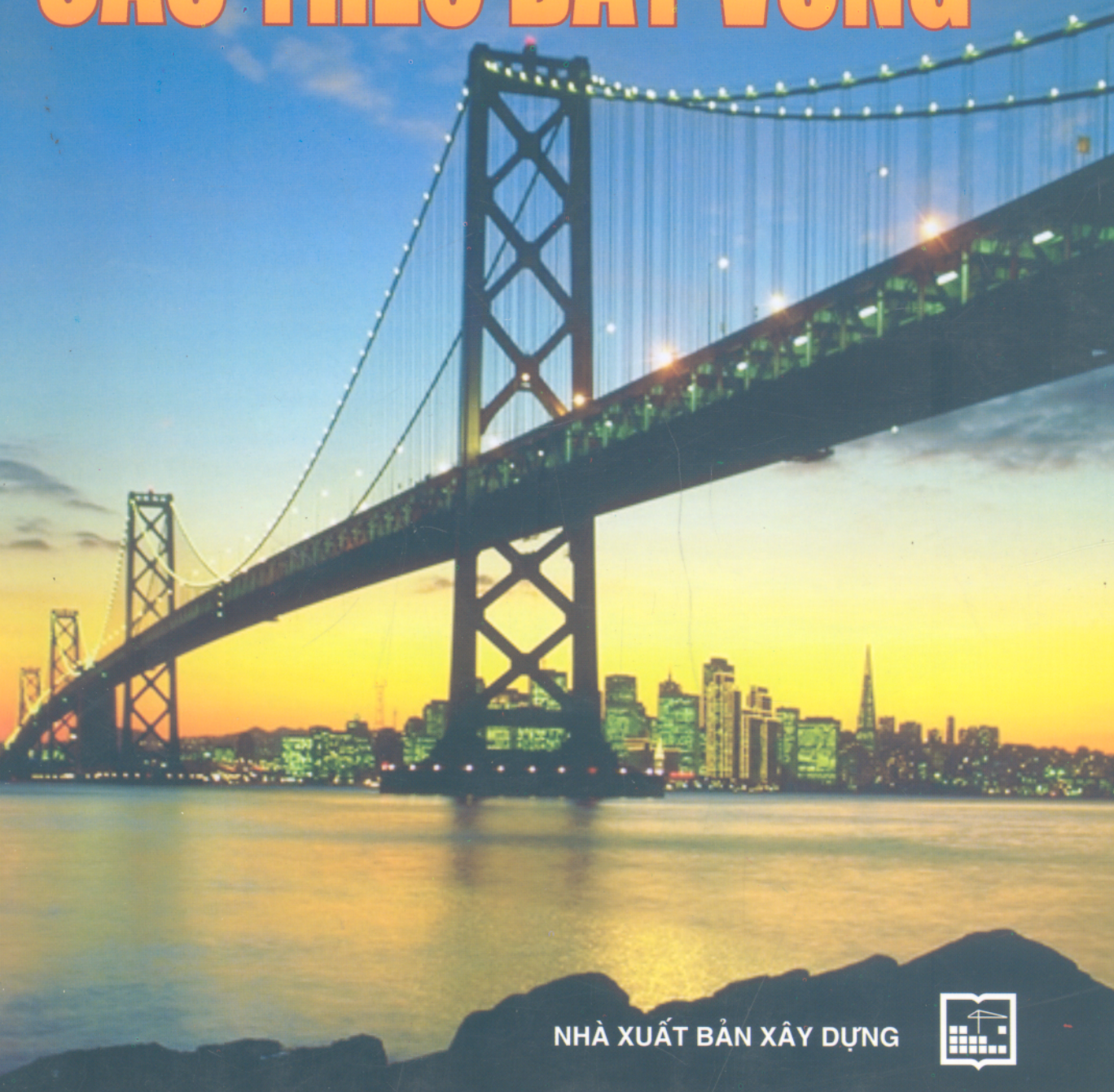


PGS. TS. NGUYỄN VIỆT TRUNG (Chủ biên)
TS. HOÀNG HÀ

THIẾT KẾ CẦU TREO DÂY VÒNG



NHÀ XUẤT BẢN XÂY DỰNG



PGS. TS. NGUYỄN VIỆT TRUNG (*Chủ biên*)
TS. HOÀNG HÀ

THIẾT KẾ CẦU TREO DÂY VÕNG

NHÀ XUẤT BẢN XÂY DỰNG
HÀ NỘI - 2004

LỜI NÓI ĐẦU

Cầu treo là loại cầu trong đó bộ phận chịu lực chính là dây cáp do vậy tận dụng được hết thành tựu của khoa học về sự làm việc của vật liệu. Chính vì có ưu điểm này nên cầu treo vượt được khẩu độ rất lớn mà các loại kết cấu khác không làm được. Ví dụ như cầu Akashi Kaikyo ở Nhật Bản vượt được nhịp 1991m. Cùng với thế giới nước ta cũng đã xây dựng rất nhiều các cây cầu treo dây văng, tiếp đến trong dự án xóa cầu khỉ ở nông thôn chúng ta còn xây dựng nhiều cây cầu treo dây văng nữa. Để đáp ứng nhu cầu của thực tế chúng tôi cho xuất bản cuốn "**Thiết kế cầu treo dây văng**". Cuốn sách được biên soạn với hy vọng cung cấp cho các sinh viên, kỹ sư và học viên cao học ngành Xây dựng công trình giao thông một tài liệu ngắn gọn và đủ dùng để phân tích tính toán và thiết kế cầu treo nói riêng hay hệ treo nói chung.

Cuốn sách bao gồm 5 chương và phần phụ lục với nội dung như sau :

Chương 1: Giới thiệu cơ sở thiết kế cầu treo dây văng

Chương 2: Trình tự thiết kế sơ bộ một cây cầu cụ thể

Chương 3: Hướng dẫn sử dụng một phần mềm tính toán trên cơ sở phân tích kết cấu cầu treo dây văng bằng Sap 2000

Chương 4: Vấn đề động lực học cầu treo

Chương 5: Kiểm tra và phân tích các hư hỏng cầu treo dây văng

Phần phụ lục có nội dung tính cầu treo theo sơ đồ biến dạng và chương trình Pascal.

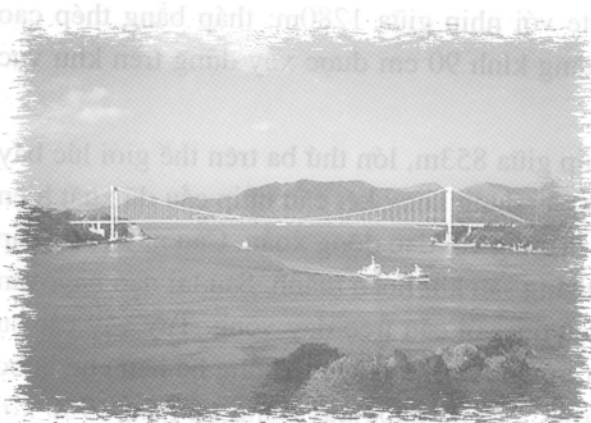
Đây là cuốn sách đầu tiên có tiếp cận đến nhiều vấn đề mới của công nghệ cầu treo, nên cũng gặp nhiều khó khăn và phức tạp, vì vậy không tránh khỏi thiếu sót. Chúng tôi mong nhận được các lời phê bình và cảm ơn các bạn đọc góp ý để giúp cho cuốn sách có chất lượng tốt hơn.

Mọi ý kiến đóng góp xin gửi về Nhà xuất bản Xây dựng - 37 Lê Đại Hành - Hà Nội

hoặc Bộ môn Công trình giao thông thành phố, Đại học Giao thông Vận tải Hà Nội

Email : Viettrungng@hn.vnn.vn hoặc nhhungct@yahoo.com

Các tác giả



Chương 1

CƠ SỞ THIẾT KẾ CẦU TREO DÂY VÕNG

1.1. GIỚI THIỆU

1.1.1. Sơ lược lịch sử phát triển của cầu treo dây văng hiện đại

Cầu treo dây văng hiện đại phát triển từ thế kỷ XIIX dựa trên cơ sở sự phát triển của các dạng kết cấu cầu và công nghệ sản xuất thép. Cầu Jacobs Creek được xây dựng ở Mỹ năm 1801 theo thiết kế của Finley, có nhịp giữa 21,3m. Đặc điểm nổi bật của cầu là có dầm chủ dạng dàn để tạo ra độ cứng cần thiết đối với cầu và tạo sự phân bố tải trọng qua tháp treo cáp vì thế đã hạn chế được đáng kể biến dạng của cáp. Cầu Clifton với nhịp giữa 214 m, là cầu treo dây văng cổ nhất hiện còn dùng cho ô tô qua lại, được khởi công xây dựng năm 1831 và được hoàn thành năm 1864 ở nước Anh, sử dụng loại xích sắt rèn.

1. Sự phát triển của chiều dài nhịp chính từ nửa cuối thế kỷ XIX ở nước Mỹ

Trong thế kỷ XIX, nước Mỹ là nơi xây dựng nhiều cầu treo nhịp dài nhất. Phương pháp lắp dây cáp kiểu “quay tơ” (AS method) sử dụng cho cáp kim loại dạng song song do Roebling đề xuất, đã được áp dụng lần đầu tiên khi xây dựng cầu Niagara, với nhịp chính dài 246m, hoàn thành năm 1855. Công nghệ này sau đó được áp dụng ở cầu Brooklyn với nhịp giữa dài 486m, hoàn thành năm 1883, ở đây dây thép đã lần đầu tiên được sử dụng. Cầu Brooklyn được coi là cây cầu dây văng hiện đại đầu tiên được xây dựng suốt trong 14 năm để bắc ngang sông New York East.

Tiếp đến, năm 1903, cầu Manhattan với nhịp giữa 448m và sau đó ít lâu, năm 1909 cầu Williamsburg với nhịp giữa dài 448m được xây dựng trên đoạn thượng lưu của cùng dòng sông. Cầu George Washington bắc qua sông Hudson ở New York được hoàn thành năm 1931 với nhịp giữa dài 1067m; tháp cầu bằng thép cao 180m; dây chủ dùng 4 bó cáp, mỗi bó cáp có đường kính 90 cm; dầm cứng dạng dàn thép rộng 32,3m, cao 9,1m; dùng cho 6 làn xe, đến năm 1962 cải tạo và nâng cấp đủ dùng cho 14 làn xe. Trong năm 1936 cầu qua vịnh San Francisco- Oakland, là cây cầu dây văng kép với nhịp giữa là

704m và trong năm 1937 cầu Golden Gate với nhịp giữa 1280m; tháp bằng thép cao 227m; dây chủ dùng 2 cáp, mỗi cáp có đường kính 90 cm được xây dựng trên khu vực vịnh San Francisco.

Năm 1940, cầu Tacoma-Narrows với nhịp giữa 853m, lớn thứ ba trên thế giới lúc bấy giờ, có dầm cứng kiểu dầm I đặc. Ngay khi xây dựng xong kết cấu nhịp cầu đã xuất hiện dao động uốn với biên độ lên tới 8,5m xảy ra cùng với dao động xoắn. Cầu này bị đổ sập dưới tốc độ gió 19m/s vào thời điểm chỉ 4 tháng sau khi hoàn thành. Sau tai nạn này, vấn đề thiết kế chịu gió trở thành vấn đề cốt yếu đối với cầu treo dây võng. Tuy vậy các sự cố cầu treo chỉ làm tăng thêm mức độ thận trọng khi thiết kế mà không hề hạn chế bước phát triển của cầu treo. Cầu Tacoma Narrows mới đã được xây dựng lại năm 1950 với chiều dài nhịp tương tự cầu cũ nhưng đã cải tiến sử dụng dầm cứng kiểu dàn.

Cầu Mackinac Straits với nhịp giữa dài 1158m được xây dựng như là cầu treo dây võng lớn tương đương với cầu Golden Gate năm 1956 và cầu Verrazano Narrows với nhịp giữa 1298m, giữ kỷ lục thế giới sau khoảng thời gian 17 năm, được xây dựng năm 1964.

2. Xu hướng mới trong kết cấu ở châu Âu từ cuối chiến tranh thế giới thứ 2 tới những năm 1960

Cầu treo dây võng được xây dựng phổ biến ở châu Âu, ngay cả khi nhịp giữa của chúng không yêu cầu quá dài.

Tại nước Anh mặc dù cầu Forth Road, với nhịp giữa 1006m được xây dựng sử dụng dạng dàn dây, cầu Severn với nhịp giữa 988m xây dựng với dầm hộp và dây treo cáp chéo năm 1966. Thiết kế độc đáo này đã cách mạng hoá công nghệ cầu treo dây võng. Cầu Humber với nhịp giữa dài 1410m là cầu dài nhất thế giới trước năm 1997 được xây dựng theo công nghệ tương tự như cầu Severn. Tại Bồ Đào Nha, cầu 25 de Abril được thiết kế cho tải trọng xe lửa và ô tô được hoàn thành năm 1966 với nhịp chính 1013m.

Năm 1998 cầu Great Belt East với nhịp chính dài 1624m được hoàn thành ở Đan Mạch, có dầm cứng dạng dầm hộp (đứng thứ 2 thế giới hiện nay).

3. Sự phát triển ở châu Á từ thập kỷ 70

Tại Nhật Bản việc nghiên cứu đề xuất kết cấu cầu Honshu Shikoku được bắt đầu bởi Hội kỹ sư công trình Nhật Bản năm 1961. Công nghệ thiết kế cầu treo dây võng nhịp lớn áp dụng ở cầu Honshu Shikoku, đã ảnh hưởng quyết định tới cấu tạo của cầu Kanmomi, hoàn thành năm 1973 với nhịp giữa dài 712m sau đó là các cầu Namhae hoàn thành năm 1973 ở Hàn Quốc với nhịp chính dài 400m, cũng như cầu Hirado hoàn thành năm 1977 với nhịp chính dài 465m.

Cầu Innoshima với nhịp chính 770m được xây dựng năm 1983 là cây cầu dây võng đầu tiên trong dự án cầu Honshu Shikoku, tiếp theo sau cầu Ohnaruto được hoàn thành

704m và trong năm 1937 cầu Golden Gate với nhịp giữa 1280m; tháp bằng thép cao 227m; dây chủ dùm 2 cấp, mỗi cấp có đường kính 90 cm được xây dựng trên khu vực vịnh San Francisco.

Năm 1940, cầu Tacoma-Narrows với nhịp giữa 853m, lớn thứ ba trên thế giới lúc bấy giờ, có dầm cứng kiểu dầm I đặc. Ngay khi xây dựng xong kết cấu nhịp cầu đã xuất hiện dao động uốn với biên độ lên tới 8,5m xảy ra cùng với dao động xoắn. Cầu này bị đổ sập dưới tốc độ gió 19m/s vào thời điểm chỉ 4 tháng sau khi hoàn thành. Sau tai nạn này, vấn đề thiết kế chịu gió trở thành vấn đề cốt yếu đối với cầu treo dây võng. Tuy vậy các sự cố cầu treo chỉ làm tăng thêm mức độ thận trọng khi thiết kế mà không hề hạn chế bước phát triển của cầu treo. Cầu Tacoma Narrows mới đã được xây dựng lại năm 1950 với chiều dài nhịp tương tự cầu cũ nhưng đã cải tiến sử dụng dầm cứng kiểu dầm.

Cầu Mackinac Straits với nhịp giữa dài 1158m được xây dựng như là cầu treo dây võng lớn tương đương với cầu Golden Gate năm 1956 và cầu Verrazano Narrows với nhịp giữa 1298m, giữ kỷ lục thế giới sau khoảng thời gian 17 năm, được xây dựng năm 1964.

2. Xu hướng mới trong kết cấu ở châu Âu từ cuối chiến tranh thế giới thứ 2 tới những năm 1960

Cầu treo dây võng được xây dựng phổ biến ở châu Âu, ngay cả khi nhịp giữa của chúng không yêu cầu quá dài.

Tại nước Anh mặc dù cầu Forth Road, với nhịp giữa 1006m được xây dựng sử dụng dạng dầm dây, cầu Severn với nhịp giữa 988m xây dựng với dầm hộp và dây treo cáp chéo năm 1966. Thiết kế độc đáo này đã cách mạng hoá công nghệ cầu treo dây võng. Cầu Humber với nhịp giữa dài 1410m là cầu dài nhất thế giới trước năm 1997 được xây dựng theo công nghệ tương tự như cầu Severn. Tại Bồ Đào Nha, cầu 25 de Abril được thiết kế cho tải trọng xe lửa và ô tô được hoàn thành năm 1966 với nhịp chính 1013m.

Năm 1998 cầu Great Belt East với nhịp chính dài 1624m được hoàn thành ở Đan Mạch, có dầm cứng dạng dầm hộp (đứng thứ 2 thế giới hiện nay).

3. Sự phát triển ở châu Á từ thập kỷ 70

Tại Nhật Bản việc nghiên cứu đề xuất kết cấu cầu Honshu Shikoku được bắt đầu bởi Hội kỹ sư công trình Nhật Bản năm 1961. Công nghệ thiết kế cầu treo dây võng nhịp lớn áp dụng ở cầu Honshu Shikoku, đã ảnh hưởng quyết định tới cấu tạo của cầu Kanmomo, hoàn thành năm 1973 với nhịp giữa dài 712m sau đó là các cầu Namhae hoàn thành năm 1973 ở Hàn Quốc với nhịp chính dài 400m, cũng như cầu Hirado hoàn thành năm 1977 với nhịp chính dài 465m.

Cầu Innoshima với nhịp chính 770m được xây dựng năm 1983 là cây cầu dây võng đầu tiên trong dự án cầu Honshu Shikoku, tiếp theo sau cầu Ohnaruto được hoàn thành

năm 1985 với nhịp chính dài 876m dùng cho tải trọng đường sắt có dự kiến phát triển tải trọng xe trong tương lai. Dự án cầu Honshu Shikoku cải tạo và nâng cấp công nghệ năm 1988 để sử dụng phù hợp cho cầu đường tàu cao tốc. Tuyến này bao gồm hệ thống hàng loạt các cầu treo dây võng nhịp lớn như là cầu Minami Bisan Seto với nhịp chính 1100m, cầu Kita Bisan Seto với nhịp chính 990m và cầu Shimotsui Sento với nhịp chính 910m. Cầu Akashi Kaikyo hoàn thành năm 1998 với nhịp chính dài nhất thế giới 1991m, thể hiện sự tích lũy kinh nghiệm công nghệ xây dựng cầu treo từ trước tới nay.

Tại Thổ Nhĩ Kỳ cầu Bosphorus với nhịp chính dài 1074m được xây dựng năm 1973 với kiểu dáng tương tự như cầu Severn, cùng thời gian này cầu Bosphorus thứ hai với nhịp chính dài 1090m được khởi công xây dựng sau đó đổi tên là cầu Fati Sulta Mehmet, được hoàn thành năm 1988 sử dụng dây treo thẳng đứng thay cho các dây treo chéo.

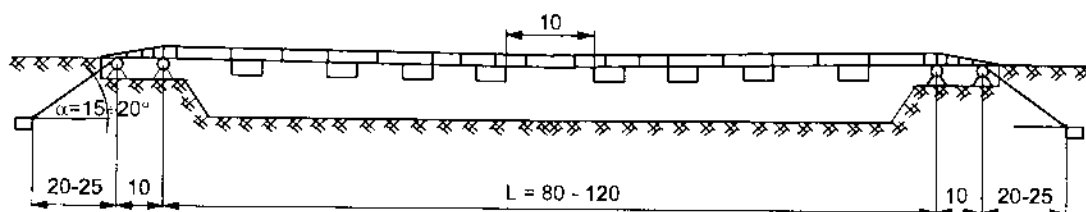
Tại Trung Quốc cầu Tsing Ma (Hồng Kông) cho xe lửa và ô tô đi chung với nhịp chính 1377m được hoàn thành năm 1997. Cầu qua sông Xi Li Yangtze với nhịp chính 900m và cầu Jing Yin Yangtze với nhịp chính 1385m đang được xây dựng [1]. Cả hai cầu treo đều có dầm hộp cứng và tháp chính bằng bê tông. Xây dựng cầu treo nhịp lớn có khẩu độ khoảng 1000m là vấn đề đang được quan tâm hiện nay. Một số dự án xây dựng các cầu treo có chiều dài vượt nhịp lớn hơn cũng đang được hình thành.

4. Sự phát triển cầu treo dây võng tại Việt Nam

Trong những năm chiến tranh, hệ thống cầu cống của nước ta bị đánh phá nhiều. Để phục vụ kịp thời cho tiền tuyến cần phải khôi phục lại những cây cầu đã bị phá hoại. Khi đó việc xây dựng cầu cáp, cầu treo là một trong những giải pháp hợp lý và nhanh chóng nhất. Cho đến nay, cầu treo dây võng vẫn giữ một vị trí quan trọng trong giao thông miền núi, phục vụ đắc lực cho công cuộc phát triển kinh tế xã hội vùng sâu, vùng xa ở nước ta.

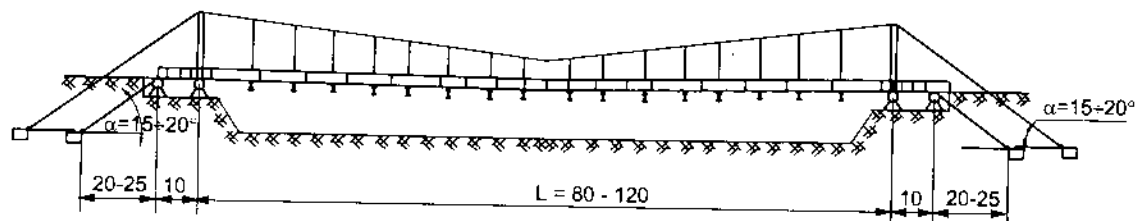
Những vị trí vượt sông mà có khẩu độ thông thuyền lớn (ví dụ ở các cửa sông lớn) thì việc sử dụng cầu treo sẽ có ưu điểm vì ít làm xáo trộn chế độ dòng chảy tự nhiên của sông, mang lại hiệu quả thiết thực về kinh tế kỹ thuật. Hơn nữa, các cầu treo thường tạo dáng vẻ đẹp và là điểm nhấn kiến trúc giữa khu vực đô thị lớn.

Ở Việt Nam đã bắt đầu xây dựng nhiều cầu treo bán vĩnh cửu từ năm 1965. Những chiếc cầu treo đầu tiên là loại cầu cáp không cống, chỉ có một hệ dây (hình 1.1) với khẩu độ từ 80÷120m. Loại cầu này đã được thiết kế thành định hình cầu cáp đã chiến không cống, ứng dụng rộng rãi trong thời kỳ chiến tranh (1965-1975).



Hình 1.1. Sơ đồ cầu treo không cống

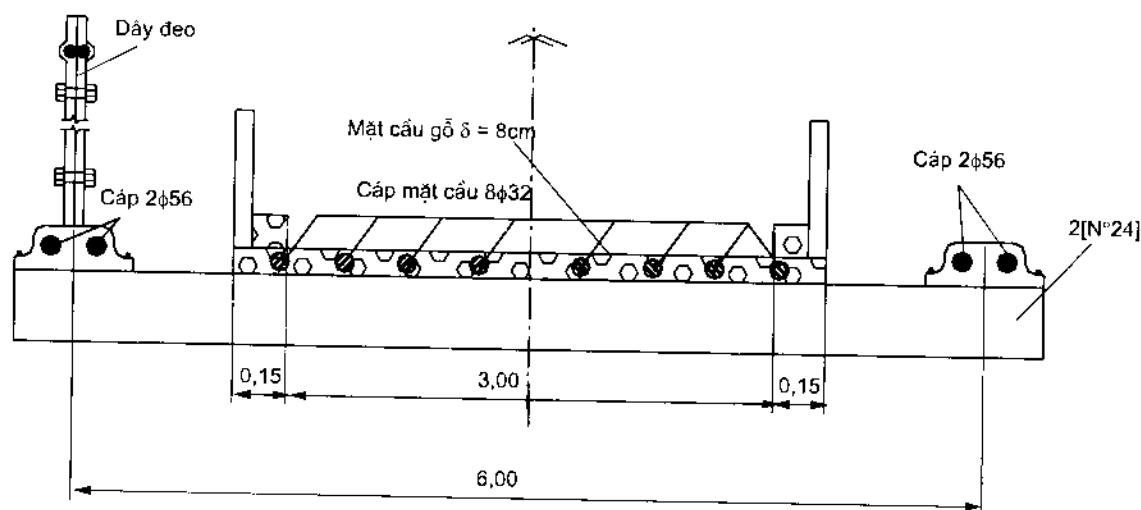
Đối với các loại cầu khẩu độ từ $120 \div 200\text{m}$ thường áp dụng loại cầu cáp có cống (hình 1.2)



Hình 1.2. Sơ đồ cầu treo có cống

Đây là loại cầu hai hệ dây: hệ dây dưới gồm hai cụm dây chủ và hệ cáp mặt cầu: hệ dây trên gồm hai cụm cáp chủ vắt qua cống trụ. Hai hệ dây được neo giữ bằng các hố thế riêng biệt.

Mặt cầu của cầu cáp không cống và cầu cáp có cống gồm dầm ngang bằng thép, gỗ đặt trên hệ cáp mặt cầu (hình 1.3)



Hình 1.3. Mặt cắt ngang cầu treo loại có cống và không cống

Vào năm 1965, 1966 đã xây dựng các cầu qua Sông Lô, khẩu độ 104m ; cầu Kỳ Cùng có khẩu độ 120m . Năm 1967, xây dựng cầu cáp Việt Trì với khẩu độ 225m , cầu Đuống khẩu độ 190m . Năm 1969 xây dựng cầu Đò Quan (Nam Định) khẩu độ 190m , với sơ đồ cáp chủ được bố trí theo dạng bắt chéo 2 dây. Sau thời kỳ này hàng loạt cầu treo dầm cứng đã được xây dựng như cầu Bảo Nhai, khẩu độ 140m ; cầu Hang Tôm khẩu độ 140m ; cầu Cốc Pài, khẩu độ 100m ; cầu treo Cửa Rào, khẩu độ 130m . Năm 1980 đã thiết kế cầu treo Sông Hồng, chiều dài toàn cầu là 1206m . Năm 1983 đã xây dựng xong toàn bộ kết cấu bên dưới, sau đó đã thay đổi bằng cầu cứng dầm thép vì không mua được cáp (nay là cầu Chương Dương).

Trong những năm gần đây một số dự án cầu treo mới đã được đề xuất cầu Thanh Thạch (Quảng Bình), cầu H'ling (Đắc Lắc), cầu Thuận Phước (Đà Nẵng)... Đặc biệt trong dự án xây dựng cầu Nhật Tân (Hà Nội) có đề xuất phương án cầu treo dây văng với các đặc điểm chọn sơ bộ: khẩu độ nhịp chính $500 \div 600\text{m}$ nhịp biên $145 \div 180\text{m}$, chiều cao tháp tính từ mặt xe chạy $\approx 70\text{m}$, khoảng cách giữa các thanh treo giữ dầm ngang là $10 \div 12\text{m}$.

Viện KHCN GTVT đã lập các đồ án định hình thiết kế cầu treo với các loại hoạt tải nhỏ như đoàn xe H8, H10. Trên cơ sở tham khảo đồ án này, nhiều cầu treo cho giao thông miền núi đã được thiết kế và xây dựng dưới dạng bán vĩnh cửu.

1.1.2. Chỉ tiêu kỹ thuật của một số cầu treo trên thế giới

Sơ đồ và kích thước cơ bản của một số cầu treo dây văng nhịp lớn trên thế giới được trình bày trong bảng 1.1.

Bảng 1.1: Kích thước các cầu treo dây văng nhịp lớn trên thế giới

STT	Tên cầu	Tên nước	Năm hoàn thành	Chiều dài các nhịp	Loại	Ghi chú
1	2	3	4	5	6	7
1	Akashi Kaikyo	Nhật	1998	960+1991+960	3 nhịp 2 chốt	
2	Great Belt East	Đan Mạch	1998	535+1624+535	liên tục	
3	Humber	Anh	1981	280+1410+530	3 nhịp 2 chốt	
4	Jing Yin Yangtze	Trung Quốc	1999	336.5+1385+309.34	nhịp đơn	
5	Tsing Ma	Trung Quốc	1997	455+1377+300	liên tục	đường bộ và xe lửa
6	Verrazano Narrows	Mỹ	1964	370.3+1298.5+370.3	3 nhịp 2 chốt	
7	Golden Gate	Mỹ	1937	342.9+1280.2+342.9	3 nhịp 2 chốt	
8	Hoga Kusten	Thụy Điển	1997	310+1210+280	3 nhịp 2 chốt	
9	Mackinac	Mỹ	1957	548.6+1158.2+548.6	3 nhịp 2 chốt	
10	Mianami Bisan-Seto	Nhật Bản	1988	274+1100+274	liên tục	đường bộ và xe lửa
11	Fatih Sultan Mehmet	Thổ Nhĩ Kỳ	1988	210+1090+210	nhịp đơn	
12	Bosphorus	Thổ Nhĩ Kỳ	1973	231+1074+255	nhịp đơn	
13	George Washington	Mỹ	1931	185.9+1066.8+198.1	3 nhịp 2 chốt	
14	Kurushima Kaikyo 3	Nhật Bản	1999	260+1030+280	nhịp đơn	
15	Kurushima Kaikyo 2	Nhật bản	1999	250+1020+245	2 nhịp 2 chốt	
16	25 de Abril	Bồ Đào Nha	1966	483.4+1012.9+483.4	liên tục	đường bộ và xe lửa

(Tiếp bảng 1.1)

1	2	3	4	5	6	7
17	Forth Road	Anh	1964	$408.4+1005.8+408.4$	3 nhịp 2 chốt	
18	Kita Bisan Seto	Nhật Bản	1988	$274+990+274$	liên tục	đường bộ và xe lửa
19	Severn	Anh	1966	$304.8+987.6+304.8$	3 nhịp 2 chốt	
20	Shimotsui-Seto	Nhật Bản	1988	$230+940+230$	nhịp đơn có nút thừa	đường bộ và xe lửa
21	Xi Ling Yangtze	Trung Quốc	1997	$225+900+255$	nhịp đơn	
22	Hu Men Zhu Jiang	Trung Quốc	1997	$302+888+348.5$	nhịp đơn	
23	Ohnaruto	Nhật Bản	1985	$93+330+876+330$	3 nhịp 2 chốt	đường bộ và xe lửa
24	Tacoma Narrows 2	Mỹ	1950	$335.3+853.4+335.3$	3 nhịp 2 chốt	
25	AsKoy	Na Uy	1992	$173+850+173$	nhịp đơn	
26	Innoshima	Nhật Bản	1983	$250+770+250$	3 nhịp 2 chốt	
27	Akinada	Nhật Bản	2000	$255+750+170$	3 nhịp 2 chốt	
28	Hakucho	Nhật Bản	1998	$330+720+330$	3 nhịp 2 chốt	
29	Angostura	Vêneduêla	1967	$280+712+280$	3 nhịp 2 chốt	
30	Kanmon	Nhật Bản	1973	$178+712+178$	3 nhịp 2 chốt	
31	San Francisco-Oakland Bay	Mỹ	1936	$356.9+704.1+353.6$	3 nhịp 2 chốt	

1.2. HỆ THỐNG KẾT CẤU

1.2.1. Các bộ phận của kết cấu cầu treo

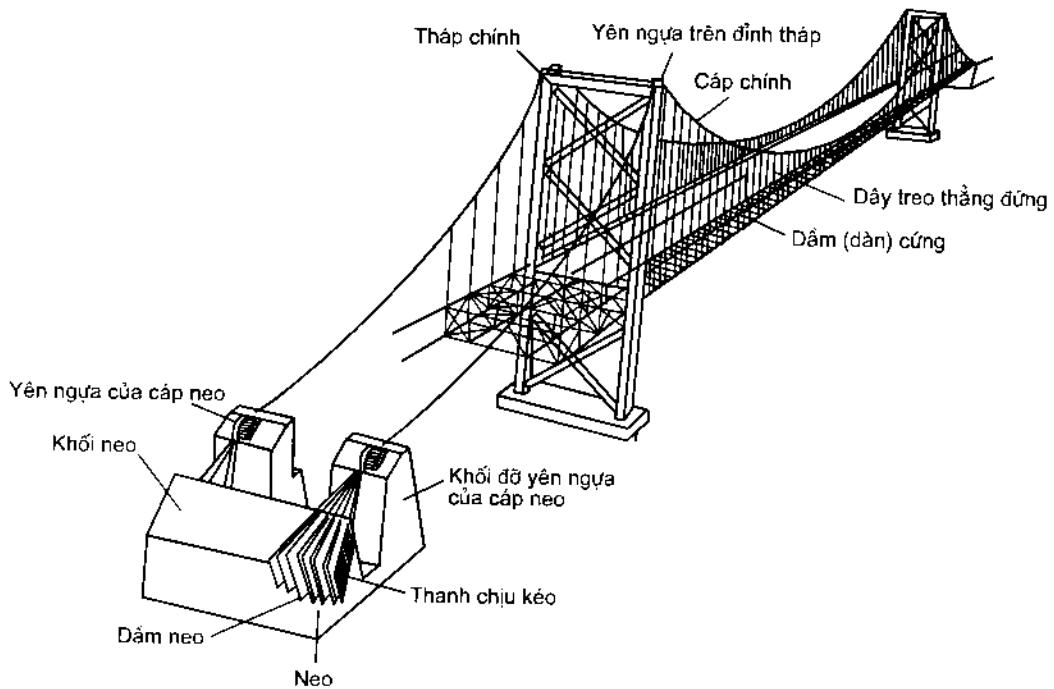
Hệ thống kết cấu chính của một cầu treo dây văng được thể hiện trong hình 1.4

1. Dầm/dàn cứng: Kết cấu dọc để chịu và phân bố tải trọng hoạt tải, hoạt động như là dầm cứng và đảm bảo ổn định khí động học cho kết cấu.

2. Cáp chính: Tổ hợp các bó sợi cáp song song, là bộ phận chịu lực chính của cầu, nâng đỡ dầm/dàn cứng và hệ mặt cầu và truyền tải trọng qua tháp cầu tới trụ và nền móng. Sự truyền tải từ dầm/dàn lên cáp chính được thực hiện thông qua các dây treo hoặc thanh treo.

3. Tháp cầu: Kết cấu trung gian thẳng đứng, chịu lực từ cáp chính truyền đến rồi truyền tải trọng xuống đến nền móng.

4. Khối neo: khối bê tông nặng để giữ neo cáp chính và hoạt động như là bộ phận chịu lực sau cùng của cầu.



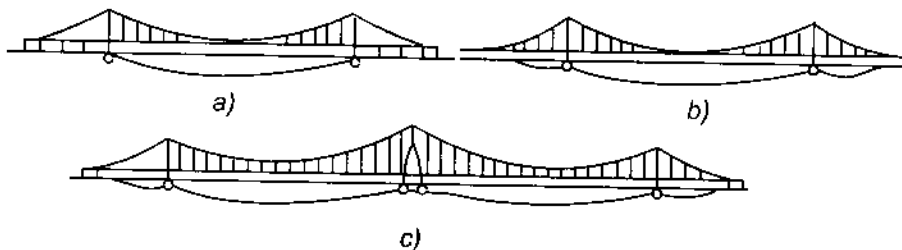
Hình 1.4. Cấu tạo các bộ phận chính của cầu treo dây văng

1.2.2. Phân loại các cầu treo dây văng

Cầu treo dây văng có thể được phân loại theo số nhịp, cấu tạo của dầm cứng, loại dây văng và phương thức neo cáp.

1. Phân loại theo số lượng nhịp

Cầu treo dây văng thường có sơ đồ một nhịp, hai nhịp, hoặc ba nhịp dây văng với hai tháp và cầu nhiều nhịp dây văng với ba hoặc nhiều hơn ba tháp (hình 1.5). Cầu treo dây văng ba nhịp được sử dụng phổ biến nhất. Trong cầu dây văng nhiều nhịp, chuyển vị ngang của đỉnh tháp có thể tăng đáng kể khi tải trọng chỉ đặt trên 1 nhịp do đó cần quan tâm đúng mức tới các biện pháp cấu tạo để kiểm soát được chuyển vị của tháp cầu.

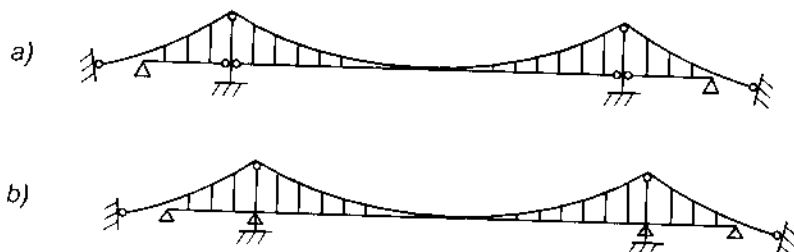


Hình 1.5. Các loại cầu treo dây văng

a) 1 nhịp; b) 2 nhịp; c) Nhiều nhịp

2. Phân loại theo cấu tạo dầm cứng

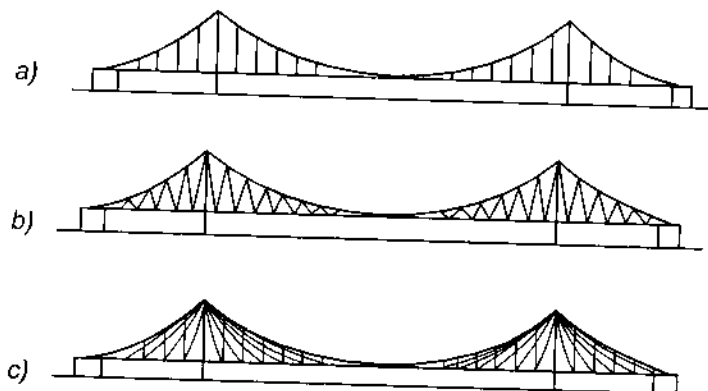
Dầm cứng có thể dùng sơ đồ dầm giản đơn tĩnh định hay dầm liên tục (hình 1.6). Dầm cứng có sơ đồ dầm giản đơn thường được sử dụng cho cầu đường ô tô. Đối với các cầu đường sắt cao tốc, dầm liên tục thường được áp dụng để đảm bảo êm thuận chạy tàu.



Hình 1.6. Các loại dầm cứng
a) Dầm cứng tĩnh định; b) Dầm cứng liên tục

3. Phân loại theo hình thức bố trí dây treo

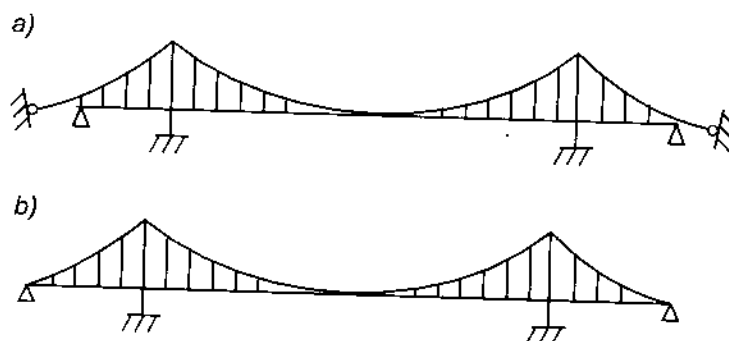
Dây treo có thể đặt thẳng đứng hoặc đặt xiên (hình 1.7). Nói chung, dây treo của các cầu treo dây văng đa số là đặt thẳng đứng. Dây treo xiên được sử dụng như trường hợp cầu Severn để tăng sự giảm rung của kết cấu dây văng. Trường hợp phối hợp dây treo thẳng đứng với các dây xiên nhằm mục đích cải thiện độ cứng của hệ kết cấu nhịp.



Hình 1.7. Các loại hệ thống dây treo
a) Dây treo thẳng đứng; b) Dây treo chéo; c) Dây treo kết hợp với dây văng

4. Phân loại theo phương thức neo cáp chính

Cáp chính có thể được neo vào khối neo bên ngoài hoặc tự neo (hình 1.8). Phần lớn các cầu treo dây văng đều bố trí neo bên ngoài. Với kiểu tự neo, thay vì neo vào khối neo thì cáp chính lại được cố định với đầu dầm cứng, khi đó lực dọc từ cáp chính sẽ được truyền trực tiếp vào đầu dầm cứng.

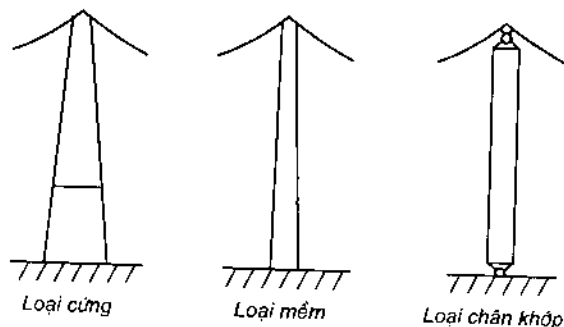


Hình 1.8. Các loại neo cáp: a) Neo bên ngoài; b) Tự neo

1.2.3. Tháp chính

a) Theo hướng dọc cầu

Tháp được phân ra các loại : cứng, mềm và chân khớp (hình 1.9). Tháp mềm thường được dùng ở cầu treo nhịp lớn, tháp cứng thường dùng ở cầu treo nhiều nhịp để cung cấp đủ độ cứng cho cầu và tháp chân khớp thường chỉ được dùng ở cầu treo nhịp ngắn, bán vĩnh cửu.



Hình 1.9. Các loại kết cấu tháp chính

b) Theo hướng ngang cầu

Tháp được phân ra các dạng: dạng cổng, dạng có thanh giằng chéo (dàn) hay dạng có cấu tạo hỗn hợp (bảng 1.2). Ngoài ra, trục tháp có thể là trục thẳng đứng hay trục nghiêng. Khi tháp bố trí nghiêng thì trục tháp phải trùng với đường tâm của cáp ở đỉnh tháp. Cấu tạo và hình dạng của tháp có ảnh hưởng lớn tới trạng thái làm việc của toàn cầu cũng như kiến trúc tổng thể của công trình.

Bảng 1.2: Các loại khung tháp chính

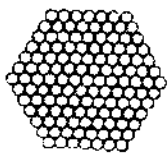
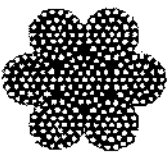
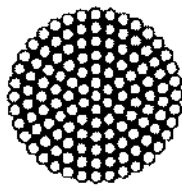
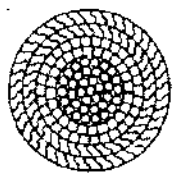
	Dàn	Cổng	Tổ hợp dàn và cổng
Dạng hình học			
Cầu	- Akashi Kaikyo - Forth Road	- Great belt East - Humber	- Golden Gate - Second Tacoma Narrows

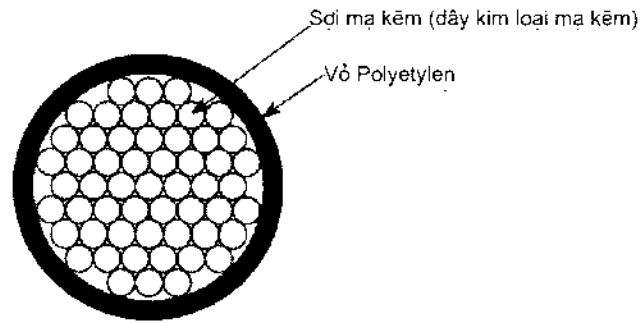
1.2.4. Cáp chủ

Đối với các cầu treo dây văng cổ điển, cáp dây treo được cấu tạo dạng xích, xích có tai treo hoặc vật liệu khác. Cáp kim loại được sử dụng lần đầu tiên cho cầu treo dây văng ở nửa đầu của thế kỷ XIX và cáp sợi song song được chấp nhận lần đầu tiên ở cầu Niagara Falls năm 1854; thép kéo nguội và thép sợi mạ kẽm được chấp nhận lần đầu tiên ở cầu Brooklyn năm 1883. Loại này đã được sử dụng trong hầu hết các loại cầu treo dây văng nhịp lớn. Bảng 1.3 thể hiện một số loại cáp chính tổ hợp từ các bó sợi song song hay bó các tao cáp. Nhìn chung trong một bó cáp các tao cáp và sợi cáp được sắp xếp và bố trí thành hình vòng tròn hay hình đa giác.

Dây treo có thể là sợi thép, thanh thép, bó các sợi tao, tao sợi song song và các loại khác. Bó sợi tao được sử dụng phổ biến làm cáp chủ trong cầu treo dây văng hiện đại. Trong các cầu Nakashi Kaikyo và Kurushima Kaikyo, tao sợi song song được bọc Polycylen theo suốt chiều dài nhằm bảo vệ tao thép không bị tác động ăn mòn của môi trường

Bảng 1.3: Các loại cáp cầu treo dây văng

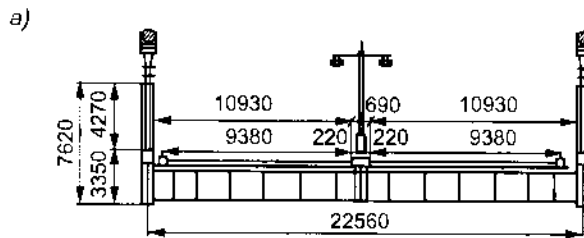
Tên	Dạng hình học	Cấu trúc	Cầu
Tao sợi song song		Các sợi được bó song song thành hình lục giác	Brooklyn Humber Great Belt East Akashi Kaikyo
Cáp bó tao		6 tao bên ngoài bọc 1 tao bên trong	St.Johns
Cáp sợi		Sợi thép là các tao trong các lớp khác nhau đối xứng nhau	Little Belt Tancarville Wakato
Cáp khoá xoắn Dây cáp khóa lõi (cáp lõi cứng)		Sợi thép biến dạng được sử dụng cho lớp bên ngoài của cáp sợi	Kvalsund Emmerich Älbssborg New Köln- -Rodenkirchen



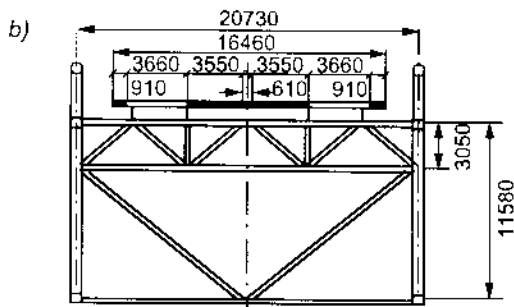
Hình 1.10. Cáp tạo sợi song song được bao bọc bởi ống Polyetylen

1.2.5. Kết cấu dầm cứng của cầu treo

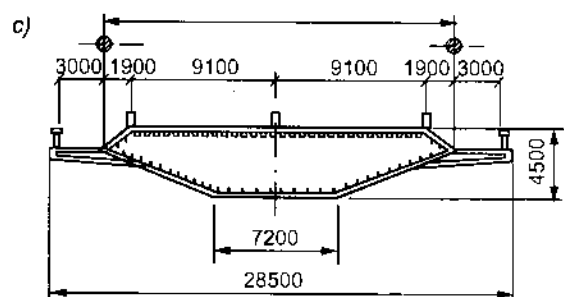
Dầm cứng có thể là dạng dầm chữ I, dạng dàn hay dầm hộp (hình 1.11). Trong một vài cầu treo nhịp ngắn, dầm cứng có độ cứng không lớn và được nâng đỡ chủ yếu nhờ dây cáp. Với cầu treo nhịp lớn thường sử dụng dầm cứng dạng dàn hay dạng hộp. Dầm cứng dạng chữ I nói chung có độ ổn định khí động học không cao. Dầm cứng dạng dàn và dạng hộp có độ ổn định khí động học tốt, có nhiều ưu điểm về công nghệ chế tạo, xây dựng, mức độ an toàn ... tuy cũng tồn tại những điểm bất lợi về tĩnh tải, cấu tạo phức tạp... (xem thêm mục 1.3.8).



Dầm cứng chữ I (cầu Bronx- Whitestone)



*Dàn cứng
(cầu Mackinac Stanits)*

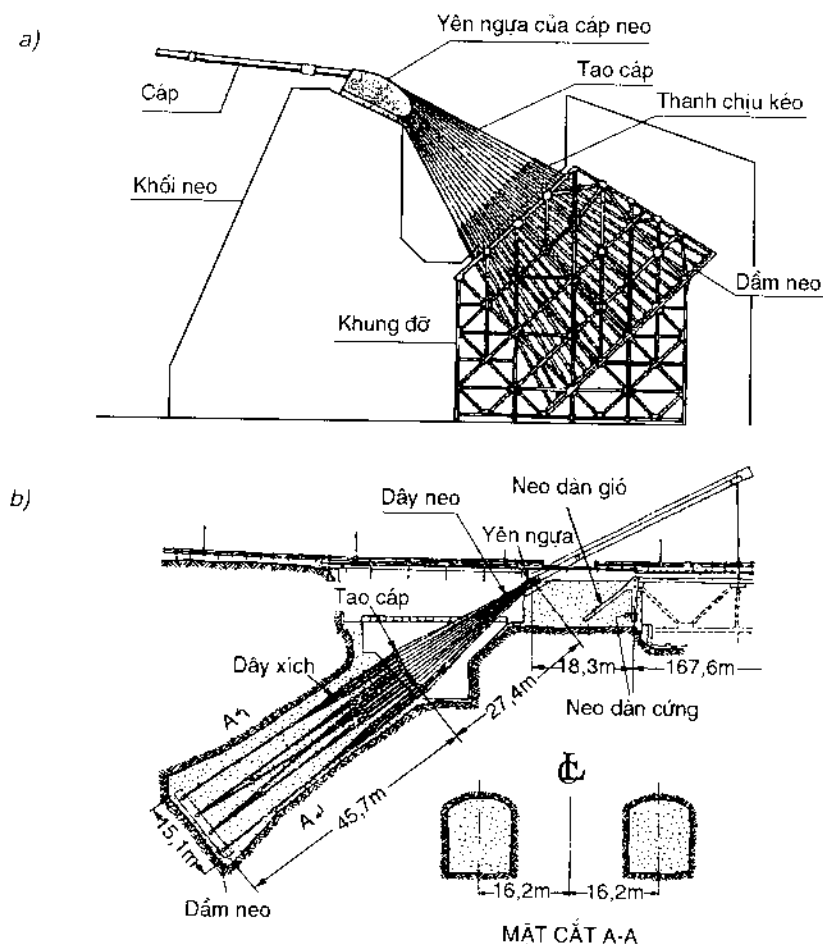


*Hộp cứng
(cầu Humber)*

Hình 1.11. Các loại mặt cắt ngang dầm cứng

1.2.6. Kết cấu khối neo giữ

Kết cấu khối neo bao gồm móng, khối neo, đai giữ, cáp neo dầm và hộp bảo vệ. Có thể phân ra các loại : hệ thống neo trọng lực hoặc hệ thống hãm neo như trên hình 1.12. Hệ thống neo trọng lực có đặc điểm lợi dụng trọng lượng của bản thân khối neo để cân bằng lực kéo của cáp chính. Loại này được sử dụng phổ biến trong cầu treo dây văng. Hệ thống hãm neo có đặc điểm là truyền lực kéo từ cáp chính trực tiếp vào nền.



Hình 1.12. Các loại neo

(a) Khối neo, cầu Akashi Kaikyo; (b) Hãm neo của cầu George Washington

1.3. CƠ SỞ THIẾT KẾ

1.3.1. Tổng quát

Năm 1823, Navier là người đầu tiên đề xuất về lý thuyết tính toán cầu treo dây văng dầm mềm. Dầm có độ cứng lớn được ứng dụng cho cầu treo dây văng trong nửa đầu của thế kỷ XIX nhằm khắc phục nhược điểm của các cầu treo dầm mềm trước đó là đã có biên độ dao động quá lớn mặc dù tác động của tải trọng không lớn lắm. Những kết quả

phân tích kết cấu cầu treo dây văng với dầm cứng kiểu dàn có độ cứng lớn được Rankine thực hiện năm 1858. Tiếp theo Melan đã góp phần hoàn thiện lý thuyết, với mô hình dàn cứng được xem như là vật thể đàn hồi. Các tác giả sau đó như Ritter, năm 1877, Lévy, năm 1886, và Melan, năm 1888 tiếp tục cải tiến mô hình tính toán hệ treo với việc đưa ra mô hình biến dạng thay thế cho mô hình đàn hồi. Moisseiff đã chứng minh sự làm việc thực tế của cầu treo không thể hoàn toàn phù hợp với sơ đồ không biến dạng trong nghiên cứu cầu Brooklyn năm 1901 và chứng minh sơ đồ biến dạng cho phép dự kiến độ vồng của cầu chính xác hơn. Năm 1909, Moisseiff đã sử dụng sơ đồ biến dạng trong phân tích mô hình cầu Manhattan. Lý thuyết này đã trở thành công cụ thiết kế hữu hiệu cho các cầu treo dây văng nhịp lớn. Hơn nữa, cùng với sự phát triển chiều dài nhịp, các tác động của tải trọng theo phương ngang như tải trọng gió và theo phương thẳng đứng sẽ đồng thời ảnh hưởng càng lớn đối với dầm cứng. Việc phân tích trạng thái chịu lực của cầu treo dây văng theo mô hình làm việc không gian đã được Moisseiff lần đầu tiên áp dụng.

Lý thuyết tính toán cầu treo phụ thuộc rất nhiều vào kiểu kết cấu và biện pháp thi công cầu. Ngày nay, đã có rất nhiều công trình được công bố về lý thuyết tính toán hệ dây và cầu treo.

Phương pháp tính hệ dây xích đầu tiên được thiết lập do giáo sư Luis Mariana Navie thiết lập. Năm 1823, ông đã xem xét tính toán hệ dây dưới tác dụng của tĩnh tải và hoạt tải thẳng đứng.

Năm 1886 M Levi đã xem xét sự biến dạng đồng thời của dầm cứng và dây chủ, thiết lập bài toán để tính toán độ bền của cầu treo. Đầu thế kỷ XIX, Ole đã giải bài toán hệ dây bằng phương pháp gần đúng. Những năm tiếp theo, hàng loạt công trình đã được công bố để tính toán hệ dây tương đương ứng với sự phát triển của kết cấu. Rankin là tác giả đầu tiên giải bài toán sự phân bố tải trọng giữa dây và dầm cứng.

Trong một thời gian dài người ta tính toán cầu treo theo lý thuyết tuyến tính. Cuối thế kỷ XIX đã xuất hiện những công trình đầu tiên tính toán cầu treo có xét đến sự thay đổi hình dạng cáp chủ dưới tác động của tải trọng. Tính toán cầu treo theo sơ đồ biến dạng không những đem lại độ tin cậy mà còn mang lại hiệu quả kinh tế. Kết luận này đã được nhiều tác giả kiểm chứng.

Năm 1881, Muller Breslan đã nghiên cứu lý thuyết tính toán cầu treo theo sơ đồ biến dạng và lần đầu tiên sử dụng hàm Hypecbol để tính toán hệ dây làm việc với dầm cứng. Đến năm 1888, J. Melan phát triển lý thuyết của Muller Breslan và dùng phương trình vi phân để tính. Năm 1904 lý thuyết này đã được sử dụng để tính cầu treo Makhotenxki ở New York.

Kỹ sư D.B.Steinman (Mỹ) đã phát triển lý thuyết của J.Melan vào năm 1909, sử dụng phương pháp năng lượng để tính toán cầu treo cả về tĩnh học và động học, đặc biệt là tính toán ổn định cầu treo dưới tác dụng của gió.

Năm 1928, S.P. Timosenko đã nghiên cứu phương pháp gần đúng trên cơ sở ứng dụng chuỗi lượng giác để tính toán cầu treo.

Từ năm 1930 đến nay, vấn đề tính toán cầu treo theo sơ đồ biến dạng đã được rất nhiều tác giả nghiên cứu. Trong số những công trình nghiên cứu về lý thuyết hệ treo cần lưu ý đến các công trình sau đây:

- Vấn đề tính toán tĩnh hệ treo ứng suất trước (tác giả B.G. Belikov)
- Tính toán kết cấu cầu treo ứng suất trước (tác giả G.E Raykus)
- Các công trình của I.A Xinnhixki và B.K Bo

Ngày nay cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ, sự phát triển ứng dụng máy tính đã góp phần nâng cao chất lượng tính toán thiết kế. Các giả thiết tính toán ngày càng gần với sự làm việc thực tế của kết cấu. Các lý thuyết tính toán được ứng dụng trong nhiều phần mềm nổi tiếng như: RM 2000, SAP2000 và Staad-Pro 2003, ADINA...

Hiện nay, nhờ sự phát triển nhanh chóng của máy tính và sự tích lũy kết quả nghiên cứu các ảnh hưởng phi tuyến, phương pháp phần tử hữu hạn với mô hình dầm rời rạc hoá đã được sử dụng phổ biến trong bài toán phân tích cầu treo dây võng. Brotton lần đầu tiên đã phân tích cầu treo dây võng theo mô hình bài toán phẳng bằng phương pháp ma trận và áp dụng cho cầu Severn với kết quả tốt. Saafan và Tezcan đã công bố kết quả nghiên cứu phương pháp tính toán cầu treo theo sơ đồ biến dạng vào năm 1966. Phương pháp Newton - Raphson hoặc phương pháp tính lặp nguyên thủy có thể được đưa vào trong ma trận chuyển vị phi tuyến phân tích các mô hình cầu treo dây võng.

1.3.2 . Phương pháp phân tích kết cấu

1. Lý thuyết đàn hồi và lý thuyết biến dạng

Lý thuyết đàn hồi và lý thuyết biến dạng dùng để phân tích các hệ thống cầu treo dây võng theo các mô hình tổng quát. Theo lý thuyết này, toàn bộ cầu treo được giả thiết là một vật thể liên tục và dây treo không dẫn (khoảng cách giữa các dây treo và dầm không đổi trong quá trình chịu tải). Cả hai phương pháp trên chấp nhận các giả thiết sau:

- Cáp hoàn toàn mềm dẻo (dễ bị uốn)
- Dầm cứng nằm ngang và thẳng. Đặc trưng độ cứng của hệ là hằng số.
- Tải trọng tĩnh của dầm cứng và cáp là phân bố đều. Toạ độ của cáp chủ theo hình Parabol
- Toàn bộ tải trọng tĩnh được truyền tới cáp.

Sự khác nhau giữa hai lý thuyết là có thêm trị số biến dạng cáp do tải trọng động không xác định. Hình 1.13 thể hiện lực và biến dạng chịu tải trọng trên cầu treo dây võng. Mômen uốn $M(x)$ của dầm cứng sau khi chịu tải trọng động được viết như sau:

Theo Lý thuyết đàn hồi:

$$M(x) = M_0(x) - H_p \cdot y(x) \quad (1.1)$$

Theo Lý thuyết biến dạng:

$$M(x) = M_0(x) - H_p \cdot y(x) - (H_w + H_p) \cdot \eta(x) \quad (1.2)$$

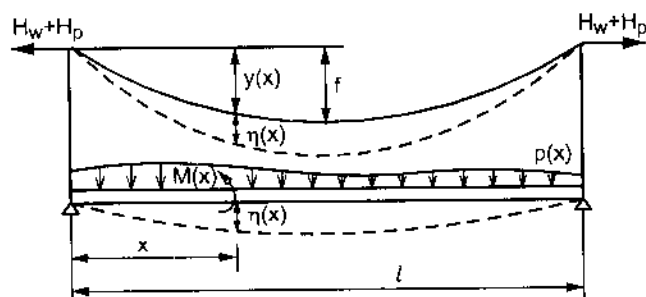
trong đó:

$M_0(x)$: mômen uốn do hoạt tải tính cho dầm giản đơn có chiều dài nhịp tương tự dầm cứng.

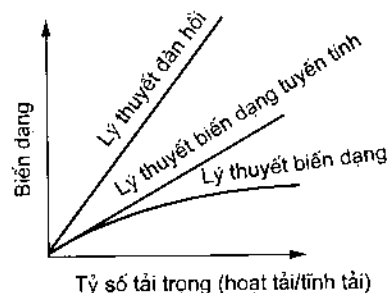
$y(x)$: chuyển vị dọc của cáp

$\eta(x)$: biến dạng của cáp dưới tải trọng động

H_w, H_p : lực cáp dọc dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng động tương ứng.



Hình 1.13. Biến dạng và lực của cầu treo dây văng



Hình 1.14. Tỷ số quan hệ biến dạng - tải trọng giữa các lý thuyết

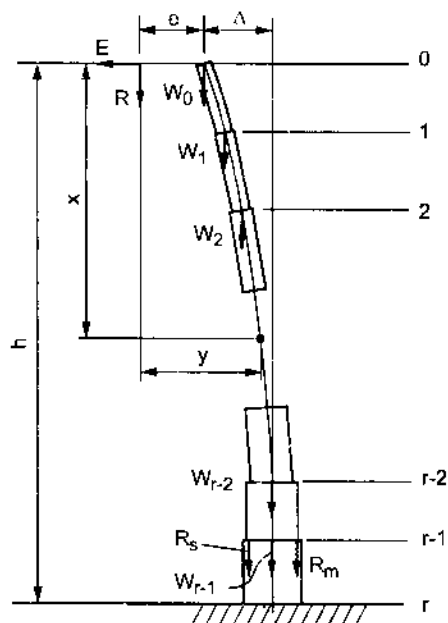
Trị số mô men uốn của dầm cứng được giảm bớt nhờ tính thêm tác dụng của độ võng gây ra do tải trọng động được xác định từ phương trình (1.2). Kết quả phân tích biến dạng phi tuyến của dây văng đã chứng tỏ nguyên tắc đường ảnh hưởng không còn phù hợp đối với kết cấu cầu dây văng. Tuy nhiên, do tác động của hoạt tải nhỏ hơn so với tĩnh tải trọng các cầu treo dây văng nhịp lớn, người ta có thể chấp nhận giả thiết $H_w + H_p$ là hằng số dưới điều kiện $H_w > H_p$. Hình 1.14 thể hiện mối quan hệ giữa tỷ số biến dạng - tải trọng nằm trong khoảng đàn hồi và lý thuyết biến dạng tuyến tính. Khi tỷ số của hoạt tải với tải trọng tĩnh là nhỏ, lý thuyết tuyến tính có thể cho kết quả phân tích chấp nhận được. Trong lý thuyết biến dạng, độ cứng chống uốn của tháp có thể không được chú ý do nó không có ý nghĩa lớn đối với sự làm việc chung của toàn bộ cầu.

2. Phân tích sự làm việc không gian với tải trọng nằm ngang

Lực ngang do gió hoặc động đất có khuynh hướng truyền từ dầm cứng tới cáp chính bởi vì dầm cứng có biến dạng ngang không trùng với cáp chính do mức độ tiếp nhận tải trọng ngang lên chúng và độ cứng của chúng khác nhau. Moisseiff lần đầu tiên thành lập phương pháp phân tích không gian xác định hiệu ứng này.

3. Phân tích không gian của tháp chính

Birdsall đã đề xuất phương pháp nghiên cứu trạng thái làm việc của tháp chính theo hướng dọc cầu. Lý thuyết Birdsall dựa trên cơ sở phương trình cân bằng về lực thẳng đứng và lực nằm ngang từ cáp hoạt động trên đỉnh tháp. Sơ đồ tính cho tháp được xác định là cột với mặt cắt thay đổi, như hình 1.15. Tải trọng nằm ngang (F) gây ra bởi tác dụng của tải trọng thẳng đứng (R), phát sinh trên đỉnh tháp và chuyển vị ngang (Δ) được xác định nhờ sử dụng lý thuyết tính toán hệ treo theo sơ đồ biến dạng tổng quát của Steinman.



Hình 1.15. Phân tích mô hình tháp chính

F : tải trọng ngang trên đỉnh tháp

R : tải trọng thẳng đứng trên đỉnh tháp

e : độ lệch tâm của R so với đường tâm của đỉnh tháp

Δ : biến dạng của đỉnh tháp

$W_0, W_1, \dots, W_{r-1}$: các thành phần trọng lượng tháp

R_s, R_m : phản lực ở cao độ xe chạy của tháp (do dầm cứng truyền tới)

4. Phương pháp chuyển vị hữu hạn

Cùng với sự phát triển của máy tính trong những năm gần đây, phương pháp chuyển vị hữu hạn trên kết cấu đã được sử dụng như là một phương pháp phân tích hiệu quả nhất. Phương pháp này được sử dụng cho phân tích phẳng hoặc phân tích dầm không gian của toàn bộ kết cấu cầu treo. Phân tích dầm theo lý thuyết biến dạng hữu hạn biểu diễn được quan hệ giữa lực và chuyển vị ở cuối của mỗi phần tử trong toàn bộ hệ thống kết cấu. Trong phương pháp phân tích này, sự làm việc thực tế của cầu như độ dãn dài của dây treo, một vấn đề chưa được đề ý đến trong lý thuyết biến dạng, có thể được xác định. Kiểu cầu treo dây văng có các dây treo xiên, giống như cầu Serven, và các kiểu khác của cầu treo trong giai đoạn lắp ghép cũng được phân tích bởi lý thuyết trên. Lý thuyết biến dạng hữu hạn tuyến tính được sử dụng trong phân tích tải trọng thẳng đứng lệch tâm và phân tích trong mặt phẳng - bởi vì tính phi tuyến hình học có thể được xem như không đáng kể trong các trường hợp đó.

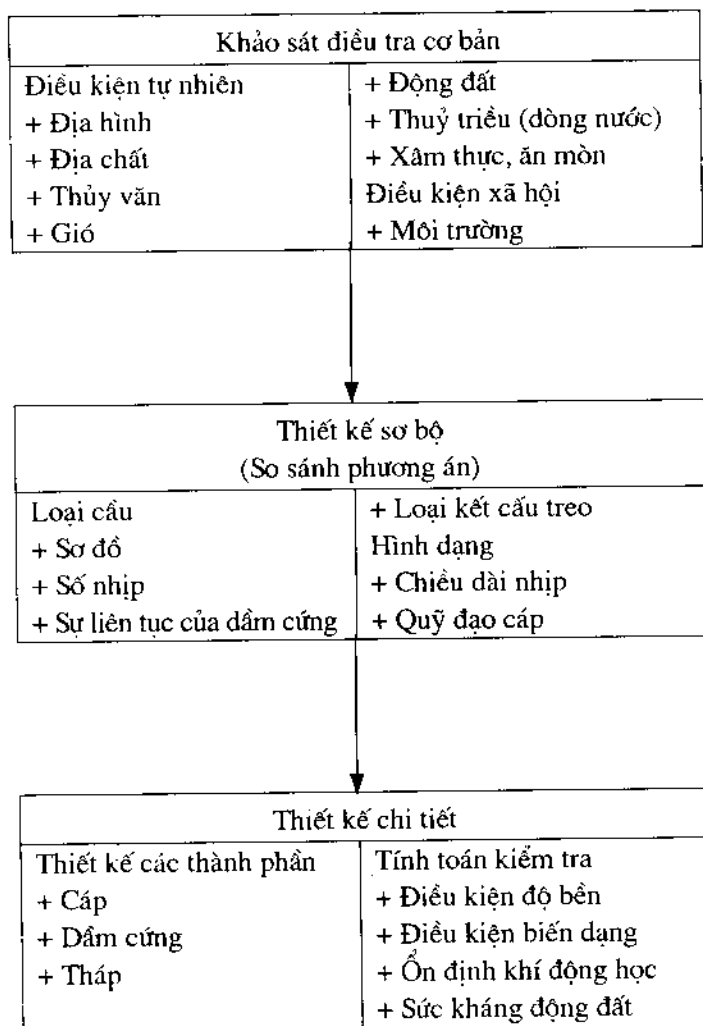
5. Phân tích ổn định đàn hồi và phân tích dao động

Phân tích điều kiện ổn định đàn hồi được sử dụng để xác định trị số chiều dài an toàn cho các kết cấu chịu nén, cụ thể như trạng thái làm việc của tháp cầu. Phân tích dao động là cần thiết để xác định tần số dao động tự do và các dạng dao động của toàn bộ kết cấu cầu treo dây văng dưới tác dụng của các tải trọng động đặc biệt như gió và động đất. Cả hai phân tích này đều là các vấn đề cần quan tâm trong lý thuyết biến dạng nhỏ của kết cấu dầm.

1.3.3. Tiêu chuẩn thiết kế

1. Trình tự thiết kế

Trình tự thiết kế tổng quát cho kết cấu nhịp cầu treo dây văng được thể hiện trong hình 1.16. Tùy theo các yêu cầu riêng của vị trí xây dựng cầu sẽ chọn sơ bộ các cấu tạo trong ở giai đoạn thiết kế sơ bộ. Các chi tiết sẽ được hoàn chỉnh dần trong quá trình thiết kế.



Hình 1.16. Trình tự thiết kế đối với kết cấu của cầu treo dây văng

2. Tải trọng thiết kế

Khi thiết kế cầu treo dây văng phải xét đến điều kiện tự nhiên của khu vực xây dựng và tải trọng khai thác (xe tải và đoàn tàu đường sắt) đặc biệt là đối với cầu có chiều dài nhịp lớn. Tĩnh tải do bản thân kết cấu cũng đóng vai trò quan trọng trong thiết kế cầu treo bởi vì tải trọng tĩnh có ảnh hưởng lớn đến nội lực trong kết cấu chính của cầu. Ngoài ra khả năng chịu tải của kết cấu chống lại các tác động gió và động đất cũng là những tiêu chí hết sức quan trọng nhằm đảm bảo an toàn cho công trình.

1. Đối với tác động của gió, việc phân tích dao động và phân tích các đặc tính khí động học là nội dung đặc biệt quan trọng.

2. Đối với tác dụng của động đất, cần xác định trị số của lực động đất và dự kiến các năng lượng địa chấn.

Ngoài ra còn phải quan tâm tới các tải trọng và tác động khác như hiệu ứng do sai số trong sản xuất và trong quá trình lắp ráp của các cấu kiện, nhiệt độ thay đổi và chuyển vị của nền (lún, xoay)....

3. Trình tự phân tích

Trình tự phân tích cho thiết kế cầu treo dây văng hiện đại như sơ đồ 1.17:

1. Lựa chọn các tham số cấu tạo ban đầu: chiều dài nhịp và xác định độ văng của cáp, tĩnh tải và giả thiết độ cứng.

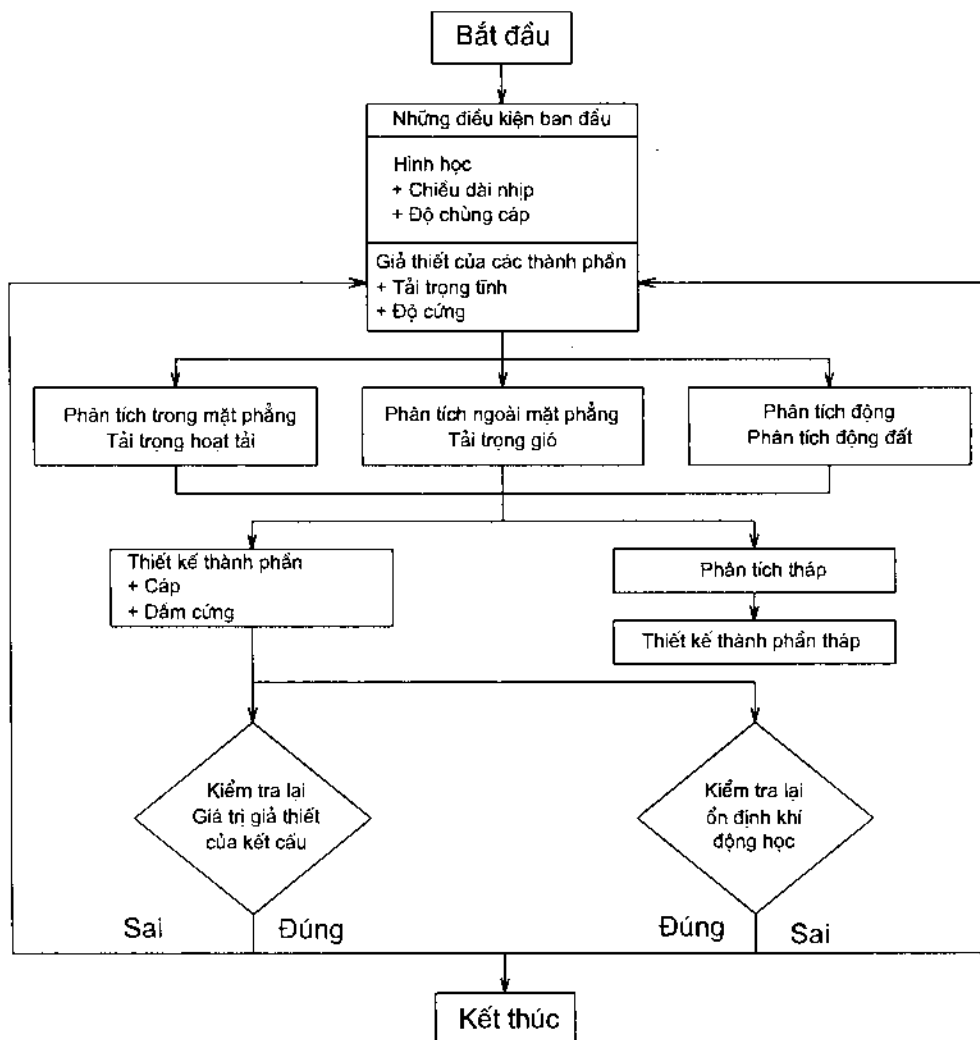
2. Phân tích mô hình kết cấu: Trong trường hợp phân tích phẳng, lực và biến dạng của thành phần dưới tải trọng hoạt động tính được nhờ sử dụng lý thuyết biến dạng hữu hạn hoặc lý thuyết biến dạng hữu hạn tuyến tính với mô hình hai chiều. Trong trường hợp phân tích không gian thì lực gió và biến dạng thành phần được tính bằng lý thuyết biến dạng hữu hạn tuyến tính với mô hình ba chiều.

3. Phân tích hiệu ứng động: hiệu ứng của lực động đất được tính bởi phân tích phổ và phân tích theo lịch sử thời gian (time- history)

4. Thiết kế các bộ phận kết cấu: cáp và dầm cứng được thiết kế khi sử dụng kết quả tính toán nội lực đã thu được từ phân tích kết cấu.

5. Thiết kế tháp: tháp được kiểm toán về cường độ và về biến dạng, dựa trên các kết quả phân tích kết cấu tổng thể đã được thực hiện từ trước.

6. Kiểm tra các giá trị giả thiết ban đầu và kiểm tra ổn định khí động học: giá trị ban đầu được giả thiết cho tải trọng tĩnh và độ cứng sẽ được kiểm nghiệm xác định lại trên cơ sở các cấu tạo chi tiết. Ổn định khí động học được kiểm tra thông qua phân tích các số liệu thí nghiệm Hầm gió (phương pháp phân tích mô hình vật lý) và các tính toán.



Sơ đồ 1.17. Trình tự tổng quát cho thiết kế cầu treo dây văng

1.3.4. Tính toán cầu dây văng dưới tác động gió

1. Tổng quan

Trong nửa đầu của thế kỷ XIX, nhiều cầu treo dây đã xảy ra sự cố dưới tác dụng của tải trọng gió do dầm không đủ độ cứng. Trong nửa sau của thế kỷ XIX số lượng sự cố đổ sập cầu đã giảm bớt nhờ có các giải pháp cấu tạo để tăng cường độ cứng của dầm chủ một cách hợp lý.

Trong thời kỳ đầu của thế kỷ XX một số cầu treo nhịp lớn mà dầm cứng với độ cứng nhỏ lại được xây dựng, vì vậy đã xuất hiện các sự cố do tác động gió. Cầu Tacoma Narrows đổ sập bốn tháng sau khi hoàn thành năm 1940 dưới vận tốc gió chỉ 19m/s. Dầm cứng dạng chữ I có độ cứng nhỏ và ổn định khí động học không phù hợp để chịu được tác động gió. Sau tai nạn này, các thí nghiệm hầm gió cho dầm cứng được áp dụng phổ biến trong nghiên cứu của ổn định khí động học đối với cầu dây. Từ đó đến nay loại

dầm cứng dạng dàn có đủ độ cứng kết hợp với các cấu tạo mặt cầu rỗng dạng ô lưới chiếm tỷ lệ lớn trong các cầu treo dây văng hiện đại nhịp lớn ở nước Mỹ và Nhật bản.

Loại dầm cứng mới dạng dầm hộp có hình dáng phù hợp ổn định khí động được chấp nhận cho cầu Severn ở nước Anh năm 1967. Đến những năm 1980 dầm cứng dạng hình hộp trở nên phổ biến cùng với các cấu tạo tăng cường ổn định cả ở phía trên và mặt đáy hộp. Các tiến bộ này được áp dụng cho cầu Tsing Ma (Trung Quốc) hoàn thành năm 1997. Cầu Akashi Kaikyo có cấu tạo các thiết bị ổn định bố trí dọc tâm của dầm cứng dạng dàn ở dưới mặt cầu để tăng ổn định.

Trong những năm 1990 ở Italy loại dầm cứng hiện đại đã được nghiên cứu áp dụng cho cầu Messina Straits có nhịp chính 3300m. Dầm cầu rộng 60m được tổ hợp từ ba hộp hình ô van dùng cho đường cao tốc và đường xe lửa. Giảm chấn khí động học tổ hợp với bề mặt gió cũng được lắp ở hai bên dầm. Cấu tạo dầm cứng dùng cho cầu treo dây văng hiện đại được thể hiện như hình 1.18.

2. Tiêu chuẩn thiết kế

Sơ đồ 1.19 thể hiện nội dung thiết kế chống gió được áp dụng cho cầu Honshu Shikoku. Trong giai đoạn thiết kế, thí nghiệm hầm gió cần được tiến hành vì hai nguyên nhân sau: một là để kiểm tra lại ảnh hưởng của các luồng khí, lực nâng và hệ số uốn tham số có ảnh hưởng đối với tính toán theo mô hình tĩnh, hai là để phát hiện và kiểm soát các trường hợp dao động bất lợi có thể xảy ra.

3. Phân tích

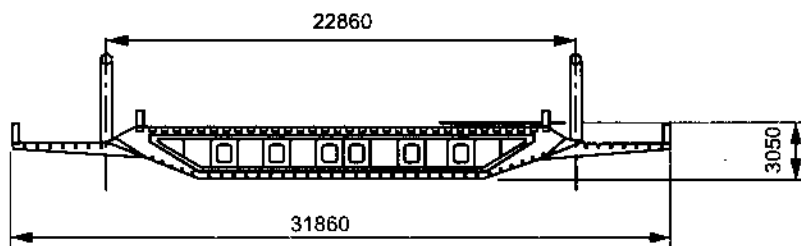
Phân tích hiệu ứng dưới tác động của gió mạnh nhằm dự báo về các tác dụng động lực do gió. Các trị số biến dạng và ứng suất trong thu được nhờ quá trình phân tích nêu trên chính là các hiệu ứng thứ cấp do tác động gió cần được đưa thêm vào trong bài toán thiết kế các cầu treo dây văng. Trạng thái mất ổn định có thể xuất hiện theo những dạng thức khác nhau thu được từ kết quả phân tích mối quan hệ giữa các đặc trưng tác động của gió và biến dạng của kết cấu. Hiện tượng Flutter là một trong những dạng mất ổn định khí động gần kề dẫn tới khả năng sụp đổ công trình. Phân tích Flutter thường bao gồm việc giải phương trình chuyển động của cầu như là bài toán giá trị riêng phức tạp dựa trên những số liệu thu được từ thí nghiệm hầm gió.

4. Thí nghiệm hầm gió

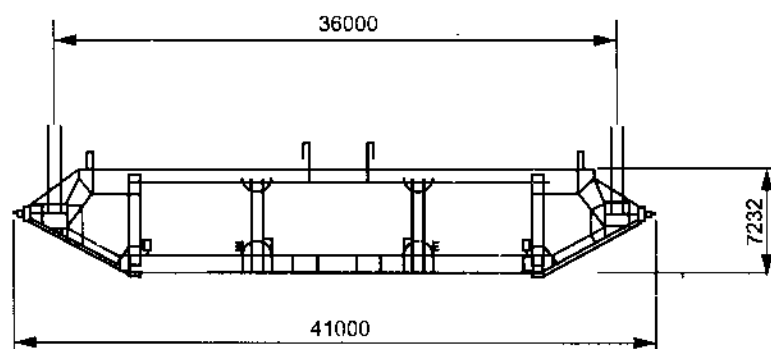
Các nội dung chính của công tác thí nghiệm hầm gió để nghiên cứu ổn định khí động học của dầm cứng như sau:

1. Thí nghiệm 2-D của mô hình cứng với gối đàn hồi để xác định các đặc tính khí động học theo các dạng (mode) dao động khác nhau. Tỷ lệ của mô hình là lớn hơn 1/100

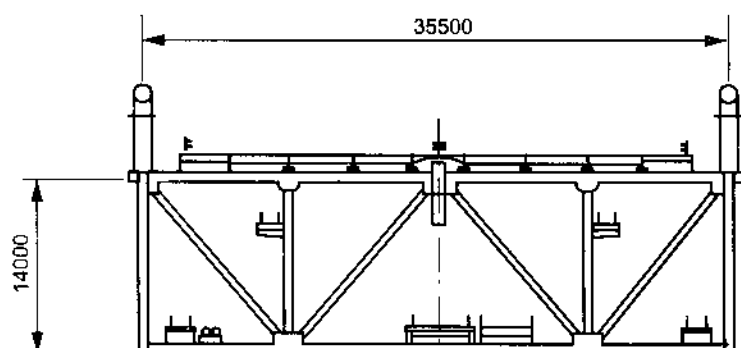
2. Kiểm tra mô hình tổng quát ba chiều. Thí nghiệm được sử dụng để kiểm tra hiệu ứng kết hợp của các dạng (mode) dao động khác nhau.



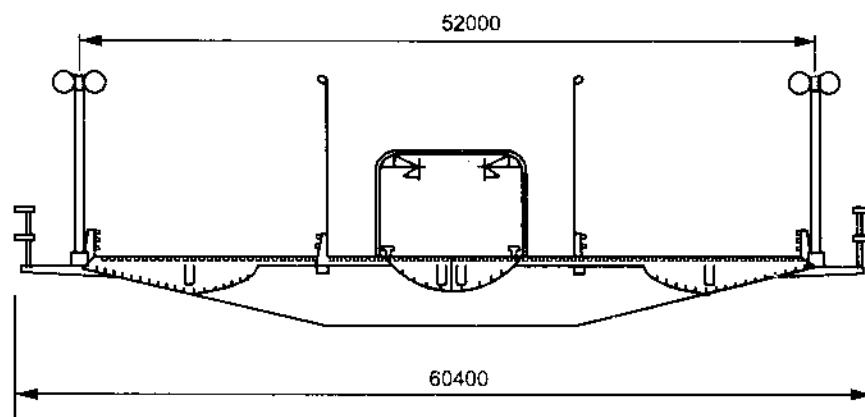
a) Mặt cắt ngang Cầu Severn



b) Mặt cắt ngang cầu Tsing Ma

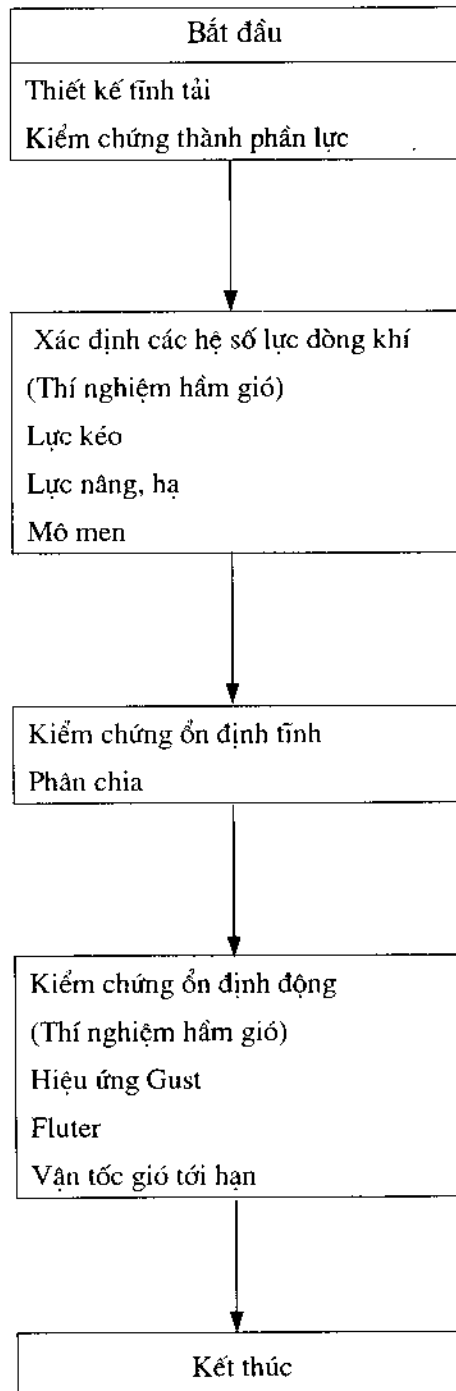


c) Mặt cắt ngang cầu Akashi Kaikyo



d) Mặt cắt ngang cầu Messina Straits

Hình 1.18. Các dạng mặt cắt ngang cầu



Sơ đồ 1.19: Trình tự phân tích các tác động do gió

Đối với cầu Akashi Kaikyo mô hình tổng thể với tỷ lệ 1/100 có chiều dài tổng cộng khoảng 40m, đã được thí nghiệm trong hầm gió nhằm phân tích ổn định khí động học của công trình dưới tác dụng của các luồng gió mạnh và xác định các chỉ số đặc trưng của Flutter.

5. Biện pháp giảm dao động cho cầu treo

Các biện pháp giảm dao động được phân loại như trong bảng 1.4

1. Sử dụng các thiết bị giảm chấn: Nhiều kiểu thiết bị giảm chấn có thể được lắp đặt trên kết cấu nhịp nhằm giảm bớt biên độ dao động. Ví dụ đặt bộ giảm chấn trên đỉnh tháp để giảm bớt các biên độ dao động quá lớn ở đỉnh tháp... Bộ giảm chấn được chế tạo theo nhiều nguyên tắc, ví dụ, theo nguyên tắc điều chỉnh khối lượng TMD, (viết tắt tiếng Anh của Tuned Mass Damper) hoặc theo nguyên lý thủy lực TLD, (viết tắt tiếng Anh của Tuned Liquid Damper) đã được sử dụng khá rộng rãi trong những năm gần đây. Bộ giảm chấn kiểu khối lượng chủ động AMD, (viết tắt tiếng Anh của Active Mass Damper) có thể hạn chế biên độ dao động trên dải tần số rộng, đã áp dụng trong nhiều cầu treo hiện đại.

Bảng 1.4: Biện pháp giảm dao động

Đối tượng	Mục tiêu điều chỉnh	Biện pháp
Với kết cấu	Tăng giảm rung Tăng độ cứng Tăng khối lượng	TMD, TLD, AMD Tăng diện tích mặt cắt của dầm cứng
Với tác động gió	Diện tích mặt cắt Kết cấu bên trên	Dầm hộp dạng khí động Mặt mở

2. Tăng độ cứng: Một cách để tăng độ cứng là tăng chiều cao dầm. Đây là một phương thức có hiệu quả để giảm hiện tượng Flutter.

3. Các giải pháp dựa trên lý thuyết khí động học: Dựa vào lý thuyết khí động học có thể đề ra các giải pháp tăng cường ổn định khí động học, ví dụ như phải mở rộng mặt cầu và thiết kế các chi tiết thoát gió trên cầu.

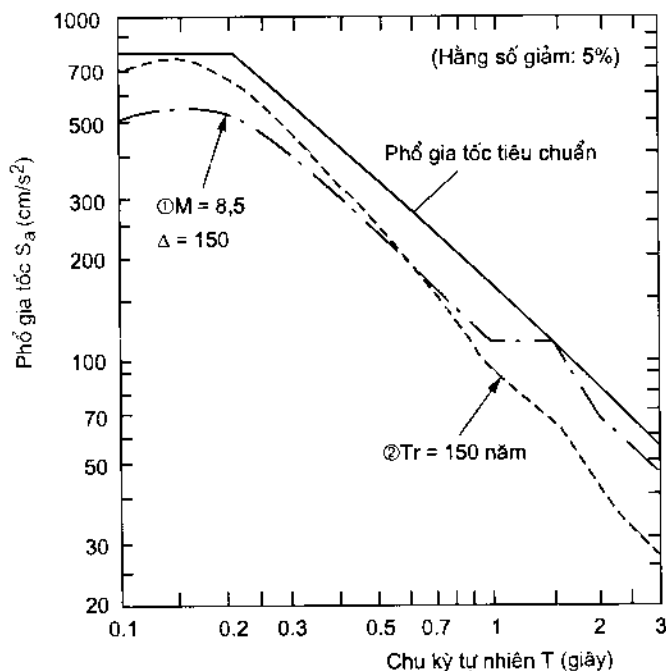
1.3.5. Thiết kế cầu chịu động đất

1. Tổng quan

Trong những năm gần đây, không xảy ra trường hợp cầu treo dây văng đổ sập hoặc thậm chí gây thiệt hại nghiêm trọng khi có động đất. Trong suốt thời gian xây dựng cầu Akashi Kaikyo vị trí tương đối của bốn móng thay đổi nhỏ không đáng kể dưới sự di chuyển của vỏ trái đất trong trận động đất Hyogo ken Nanbu năm 1995. Tác dụng động đất này đã không gây thiệt hại tới hạn với kết cấu. Mặc dù lực cắt trong kết cấu bên trên sinh ra từ tải trọng động đất quan hệ gần với tần số dao động tự do của kết cấu bên trên. Cần xác định chuyển vị lớn của dầm cứng và lực ngang lớn đối với móng do ảnh hưởng tác dụng động đất.

2. Phương pháp thiết kế

Kết cấu bên trên của cầu treo dây văng cần được phân tích để có thể chịu được các tác dụng động đất có tính chu kỳ. Ví dụ như đối với kết cấu bên trên của cầu treo Akashi Kaikyo được thiết kế với trường hợp có sự biến động lớn có tính chu kỳ của cả khu vực xây dựng cầu. Phổ gia tốc thiết kế tiêu chuẩn hoá được thể hiện trong hình 1.20. Phương pháp áp dụng là phân tích phổ động đất dựa trên biểu đồ gia tốc thu thập được theo các thời kỳ (phương pháp time-history) được thực hiện trên mô hình không gian ba chiều bao với kết cấu bên dưới và gối đàn hồi.



Hình 1.20. Phổ gia tốc thiết kế

(Cầu Honshu - Shikoku, tiêu chuẩn thiết kế động đất cho cầu Akashi Kaikyo, Nhật Bản)

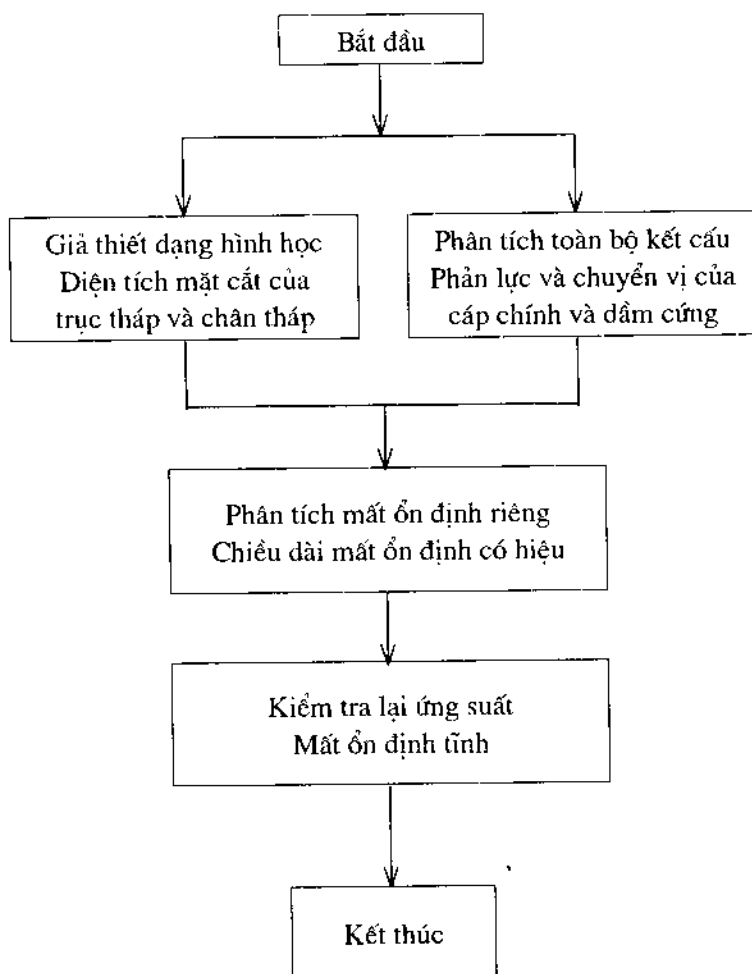
1.3.6. Tháp cầu treo

1. Tổng quan

Loại tháp mềm được áp dụng phổ biến dùng làm tháp chính của cầu treo dây văng nhịp lớn xây dựng gần đây. Tháp mềm có chuyển vị rõ rệt trong quá trình chịu tải trọng truyền tới từ cáp chính. Vật liệu xây dựng tháp có thể bằng thép hay bê tông cốt thép. Các cầu treo nhịp lớn nổi tiếng thế giới như cầu Golden Gate, cầu Verrazano Narrows ở Mỹ hay cầu Akashi Kaikyo ở Nhật Bản đều có tháp bằng thép. Trong khi đó các cầu treo nhịp lớn khác như cầu Humber và Great Belt East ở châu Âu và cầu Tsing Ma ở Trung Quốc các tháp cầu lại sử dụng vật liệu BTCT. Do tải trọng truyền tới tháp chính chủ yếu theo phương thẳng đứng nên tháp chính có thể được phân tích như là một hệ thống kết cấu độc lập.

2. Thiết kế tháp cầu treo

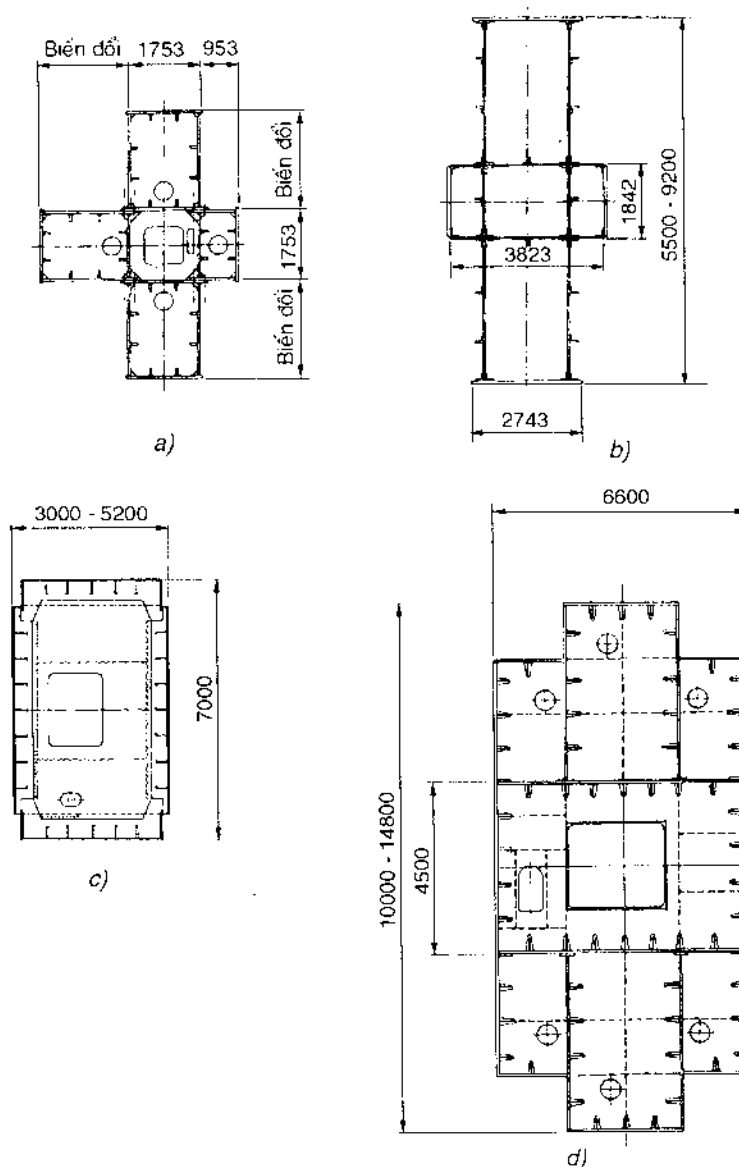
Phương pháp thiết kế cho tháp thép và tháp bê tông không quá khác nhau. Theo phương ngang, tháp chính được phân tích theo lý thuyết biến dạng nhỏ. Điều này được chấp nhận bởi vì hiệu ứng kiểm chế của cáp là không đáng kể và độ cứng uốn của tháp là cao. Khi phân tích theo hướng dọc thì phương pháp phân tích Birdsall, tham khảo trong mục 1.3.2 được sử dụng phổ biến. Tuy nhiên các phương pháp chính xác hơn như phương pháp phân tích chuyển vị hữu hạn với mô hình ba chiều có thể được sử dụng, cho phép phân tích cả hai hướng dọc và ngang (như đã được làm ở cầu Akashi Kaikyo). Một ví dụ trình tự thiết kế cho tháp chính được thể hiện ở hình 1.21.



Hình 1.21. Trình tự thiết kế tháp chính

3. Kết cấu tháp

Mặt cắt ngang thân tháp có thể dạng chữ T, chữ nhật hoặc dạng nhiều ngăn như trong hình 1.22. Trong phạm vi mặt cắt có thể chia làm nhiều hộp nhỏ, tuy nhiên cũng có thể sử dụng dạng mặt cắt một ngăn.



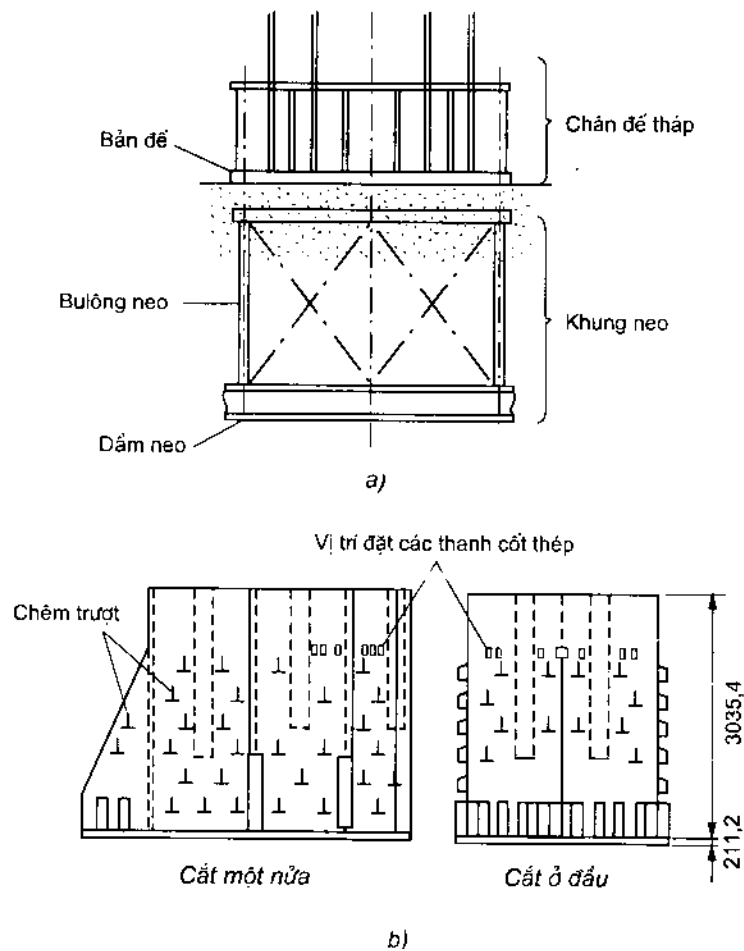
Hình 1.22. Mặt cắt thân tháp

a) Cầu New Port; b) Cầu 25de Abril; c) Cầu Bosphorus; d) Cầu Akashi Kaikyo

Cấu tạo chi tiết của tháp phải đảm bảo khả năng chịu các lực dọc, lực cắt, mô men uốn và truyền lực xuống kết cấu bên dưới và nền móng. Tháp được liên kết ở chân bằng các bulông.

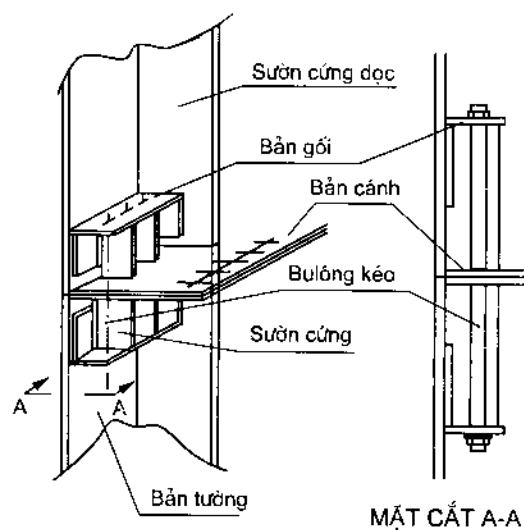
Để chịu lực nén lớn dọc theo thân tháp các bộ phận thân tháp phải được liên kết chắc chắn và phối hợp chịu lực nhờ các bu lông. Ngoài việc tăng cường khả năng chịu lực, các bulông còn có tác dụng giữ ổn định hình dạng của thân tháp.

Trong trường hợp cần thiết có thể sử dụng loại bulông cường độ cao như đối với cầu Forth Road, cầu Severn, cầu Bosphorus và cầu Kurushima Kaikyo (hình 1.24).



Hình 1.23. Móng tháp

(a) Kết cấu lưới cầu Akashi Kaikyo; (b) móng bao cầu Bosporus



Hình 1.24. Liên kết bằng bulông ở cầu Akashi Kaikyo

1.3.7. Thiết kế cáp chủ

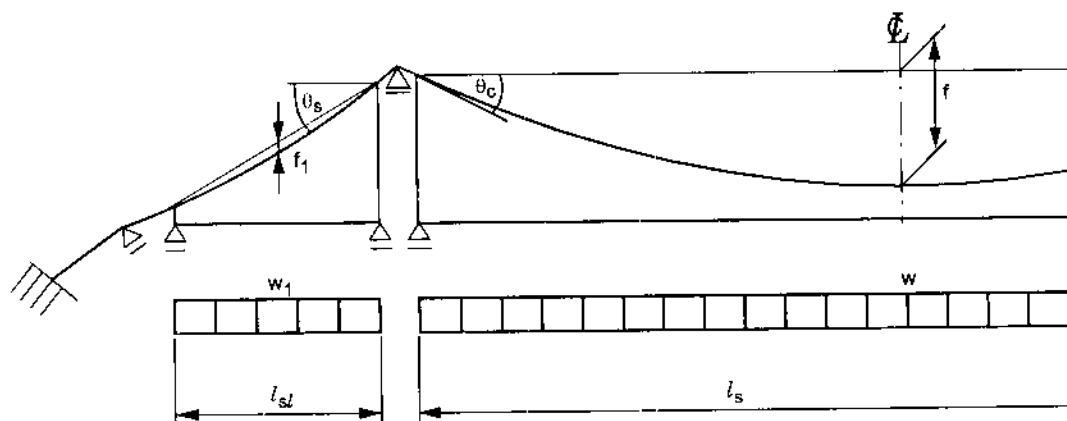
1. Tổng quát

Cáp sợi song song được sử dụng dành riêng cho cáp chính cầu treo dây võng nhịp lớn. Sợi song song đã đem lại cường độ cao và môđun đàn hồi cao hơn so với dây cáp sợi tào.

2. Trình tự thiết kế

Hình dạng sơ bộ và các vị trí liên kết của cáp chủ thể hiện trên hình 1.25. Tỷ số độ chùng/ độ dài nhịp (f/L) nên được xác định theo thứ tự sao cho giá thành xây dựng cầu giảm. Thông thường tỷ số này là khoảng 1:10. Tuy nhiên theo yêu cầu ổn định khí động tỷ lệ độ võng của cáp chủ cũng có thể thay đổi chút ít.

Diện tích mặt cắt của cáp chính được xác định trên cơ sở lực kéo cáp lớn nhất.



Hình 1.25. Dạng hình học của cầu treo dây võng

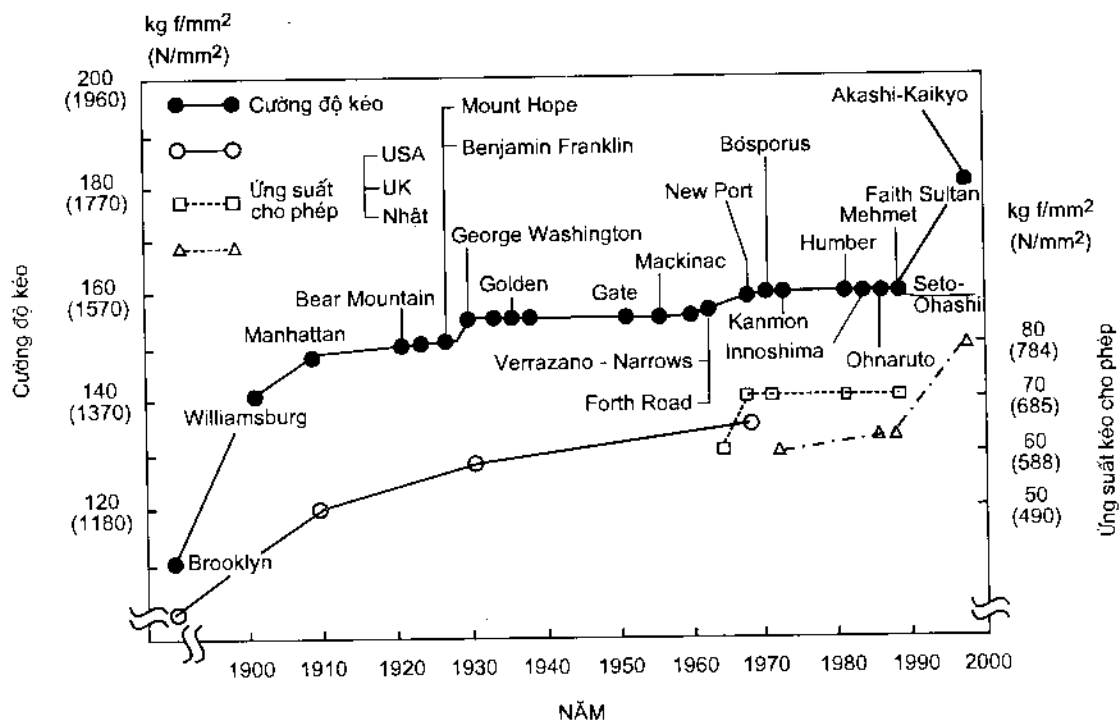
f : độ võng cáp ở nhịp chính (đường tên)	θ_c : góc nghiêng của cáp chính (nhịp chính)
f_1 : độ võng cáp ở nhịp biên	θ_s : góc nghiêng (nhịp biên)
w : tải trọng tĩnh phân bố nhịp chính	l_s : chiều dài nhịp chính
w_1 : tải trọng tĩnh phân bố nhịp biên	l_{sl} : chiều dài nhịp biên

3. Thiết kế mặt cắt cáp

Cường độ chịu kéo của sợi cáp hiện đại vào khoảng 1570 N/mm^2 . Hệ số an toàn về vật liệu cáp chủ là 2,5 được sử dụng cho cầu Verrazano Narrows và 2,2 cho cầu Humber. Đối với cầu Akashi Kaikyo hệ số an toàn được chọn là 2,2 tính theo phương pháp ứng suất cho phép với tải trọng tĩnh chiếm tỷ trọng lớn. Cáp chính được sử dụng là thép cường độ cao với cường độ chịu kéo là 1770 N/mm^2 và ứng suất cho phép là 804 N/mm^2 . Sự phát triển của cường độ cáp sản xuất được phát triển theo trình độ công nghệ luyện thép được thể hiện như hình 1.26. Cầu Great Belt East sử dụng phương pháp thiết kế theo trạng thái giới hạn, hệ số an toàn là 2,0. Thống kê cáp của một số cầu treo dây võng được nêu trong bảng 1.5.

Bảng 1.5. Cáp chính của cầu treo dây văng nhịp lớn

STT	Tên cầu	Tên nước	Năm hoàn thành	Chiều dài các nhịp	Phương pháp xây dựng	Cấu tạo của cáp chính
1	Akashi Kaikyo	Nhật Bản	1998	960+1991+960	PS	127×290
2	Great Belt East	Đan Mạch	1998	535+1624+535	AS	504×37
3	Humber	Anh	1981	280+1410+530	AS	404×37
4	Jing Yin Yangtze	Trung Quốc	1999	336,5+1385+309,34	PS	127×169(c/s), 177(s/s)
5	Tsing Ma	Trung Quốc	1997	455+1377+300	AS	368×80+360×11 368×80+360×11+ +304×6
6	Verrazano Narrows	Mỹ	1964	370,3+1298,5+370,3	AS	428×61×2
7	Golden Gate	Mỹ	1937	342,9+1280,2+342,9	AS	452×61
8	Hoga Kusten	Thụy Điển	1997	310+1210+280	AS	304×37 304×37+120×4
9	Mackinac	Mỹ	1957	548,6+1158,2+548,6	AS	340×37
10	Mianami Bisan-Seto	Nhật Bản	1988	274+1100+274	PS	127×271
11	Fatih Sultan Mehmet	Thổ Nhĩ Kỳ	1988	210+1090+210	AS	504×32
12	Bosphorus	Thổ Nhĩ Kỳ	1973	231+1074+255	AS	550×19
13	George Washington	Mỹ	1931	185,9+1066,8+198,1	AS	434×61×2
14	Kurushima Kaikyo 3	Nhật Bản	1999	260+1030+280	PS	127×102
15	Kurushima Kaikyo 2	Nhật Bản	1999	250+1020+245	PS	127×102
16	25 de Abril	Bồ Đào Nha	1966	483,4+1012,9+483,4	PS	304×37
17	Forth Road	Anh	1964	408,4+1005,8+408,4	AS	304~328×37
18	Kita Bisan Seto	Nhật Bản	1988	274+990+274	PS	127×234
19	Severn	Anh	1966	304,8+987,6+304,8	AS	438×19
20	Shimotsui-Seto	Nhật Bản	1988	230+940+230	AS	552×44

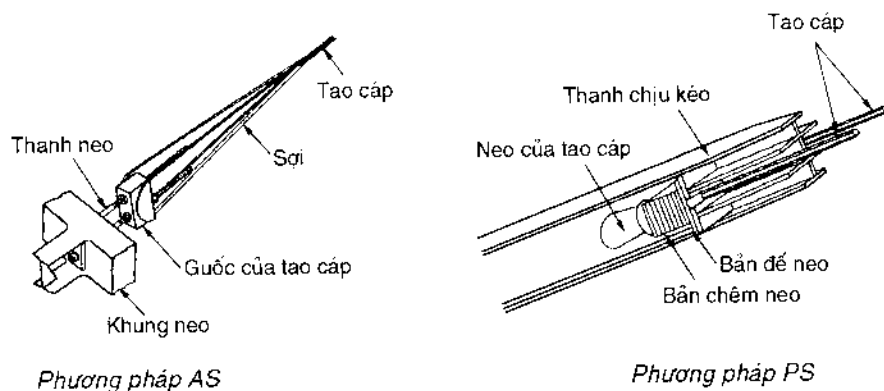


Hình 1.26 Sự phát triển cường độ của sợi cáp

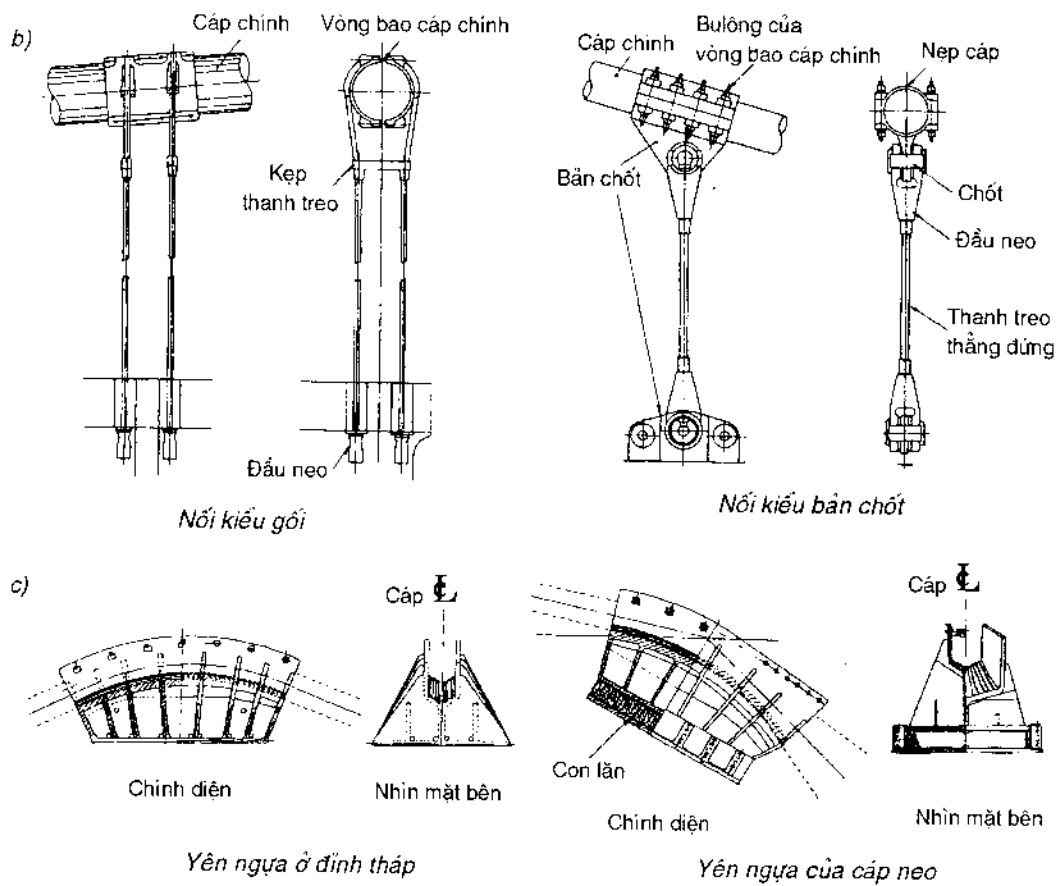
4. Các phụ kiện

Hình 1.27 thể hiện phụ kiện của cáp chính

1. Tao cáp được neo vào neo cáp dầm được gắn vào bê tông neo
2. Dây treo được cố định cáp chính với cáp phụ
3. Gối cáp hình yên ngựa chỗ tiếp xúc cáp chính và tháp và khuynh hướng mở rộng neo...



Hình 1.27. Các thành phần bổ sung của cáp chính
a) Neo của cáp vào dầm



Hình 1.27. Các thành phần bổ sung của cáp chính

b) Cáp treo; c) Gối cáp

1.3.8. Kết cấu dầm cứng của cầu dây văng

1. Tổng quan

Kết cấu dầm cứng của cầu treo dây văng có thể chọn dạng dầm dàn cứng, dầm hộp cứng như đã giới thiệu trong mục 1.3.4. Cơ sở xác định trong lựa chọn loại dầm cứng như thể hiện trong bảng 1.6. Chiều dài vượt nhịp và điều kiện tự nhiên ở vị trí xây dựng cầu cũng cần được chú ý xem xét.

Bảng 1.6: Cơ sở xác định trong lựa chọn loại kết cấu dầm cứng

Loại	Dầm dạng dàn	Dầm hộp
Chiều cao dầm	Cao	Thấp
Ổn định khí động học	Flutter có thể được kiểm tra	Vận tốc xoáy gây ra Flutter
Công tác bảo dưỡng	Diện tích bao bọc lớn	Diện tích bao bọc nhỏ
Xây dựng	Cả hai mặt cắt phương án và mặt cắt xây dựng có thể được sử dụng	Chỉ mặt cắt phương pháp lắp ghép được cho phép

2. Thiết kế dầm cứng

Lựa chọn kích thước hình học dầm cứng

Chiều rộng của dầm cứng được xác định căn cứ vào khổ cầu. Chiều cao của dầm cứng phụ thuộc vào độ cứng chống uốn và chống xoắn của dầm, trên cơ sở đảm bảo ổn định khí động học. Sau khi thiết kế kích thước hình học, cấu tạo dạng mặt cắt ngang của dầm cứng cũng ảnh hưởng lớn đến khả năng đảm bảo ổn định khí động của kết cấu và cần xác định nhờ các thí nghiệm trong hầm thổi gió.

Khi tính toán ổn định khí động học trong công tác thiết kế các cầu treo, hiện tượng Flutter (mất ổn định khí động do uốn xoắn) được đặc biệt quan tâm. Điều kiện cần thiết để loại trừ khả năng phát sinh hiện tượng flutter là phải lựa chọn cấu tạo của kết cấu nhịp sao cho tỷ số giữa tần số dao động riêng uốn và tần số dao động riêng xoắn lớn hơn 2 lần. Tuy nhiên khi khả năng đảm bảo ổn định khí động của dầm cứng được tăng cường đúng mức thì điều kiện trên cũng trở nên không cần thiết.

3. Dầm cứng kiểu dàn

Cấu tạo và tham số cơ bản của dầm cứng lấy phụ thuộc vào hoạt tải và tải trọng gió. Lý thuyết biến dạng hữu hạn tuyến tính thông thường được áp dụng để tính toán khả năng chịu tải trọng động theo phương dọc, trong đó nguyên lý đường ảnh hưởng có thể được sử dụng. Lý thuyết biến dạng hữu hạn tuyến tính được sử dụng để tính toán kết quả không gian phản ứng lại tải trọng gió do lực kéo cáp thay đổi không đáng kể.

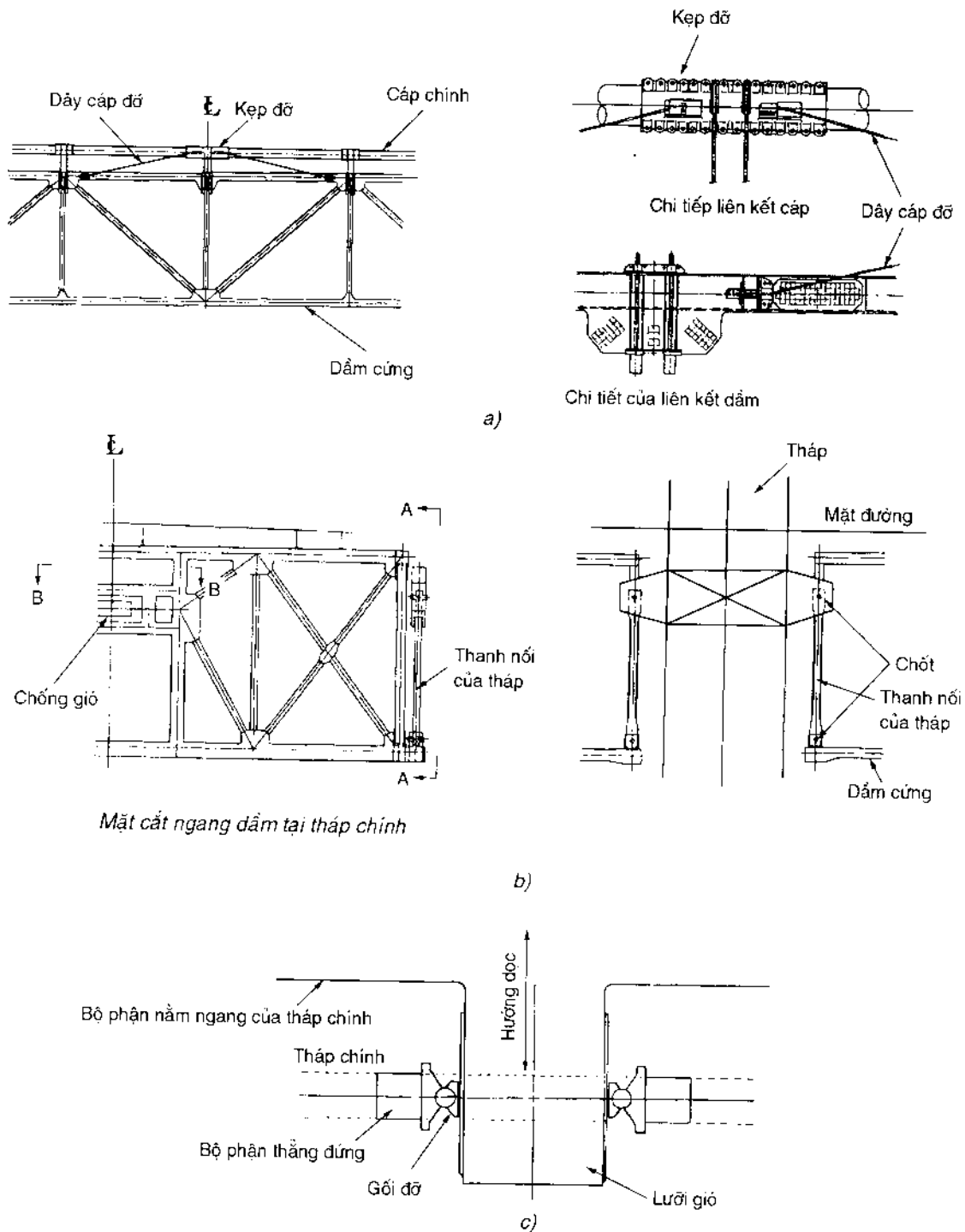
4. Dầm cứng kiểu hộp

Tham số hình học của dầm hộp cho cầu treo dây văng tương đối nhỏ chủ yếu phụ thuộc yêu cầu chế tạo, lắp ráp và sự bảo dưỡng. Dầm cứng dạng hộp được coi là phù hợp với yêu cầu đảm bảo ổn định khí động. Chiều cao của dầm cứng được xác định sao cho thoả mãn độ cứng cần thiết. Ví dụ, đối với cầu Kurushima Kaikyo thứ 2 và thứ 3 ở Nhật bản đều có chiều cao dầm cứng là 4,3m căn cứ trên kết quả thí nghiệm hầm gió. Độ bền mỏi đối với kết cấu dầm cứng dạng hộp cần được chú ý kiểm toán tại các vị trí liên kết với cáp treo và các vách ngăn thường là nơi truyền lực từ hệ mặt cầu tới cáp chủ.

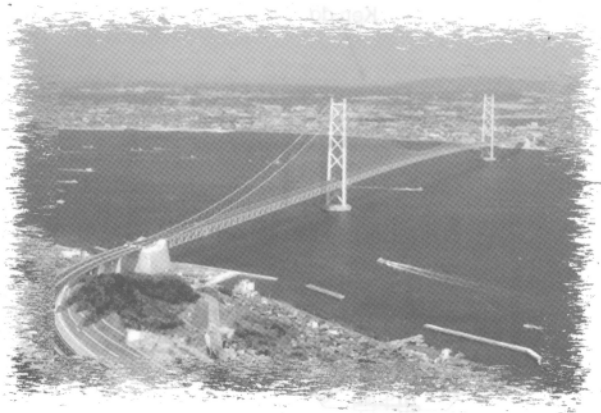
5. Các phụ kiện của dầm cứng

Hình 1.28 thể hiện các phụ kiện của dầm cứng

1. Cáp treo liên kết cáp chính và dầm cứng để hạn chế chuyển vị dọc của dầm cứng dưới sự thay đổi của tải trọng gió, động đất và nhiệt độ
2. Chi tiết liên kết dầm cứng ở tháp chính.
3. Liên kết ngăn cản chuyển vị theo phương ngang cầu của dầm cứng do gió và động đất
4. Chi tiết neo hai khớp chống chuyển vị dọc của dầm cứng.



Hình 1.28: Các phụ kiện của dầm cứng:
a) Vị trí neo cáp, b) Liên kết tháp, c) Chống gió



Chương 2

THIẾT KẾ SƠ BỘ CẦU TREO DÂY VỒNG

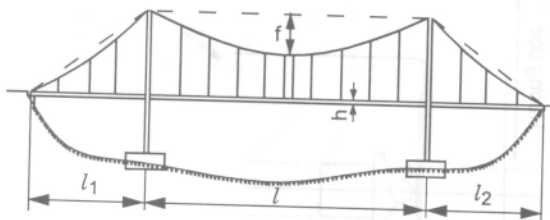
2.1. TỔNG QUAN

Hệ treo là hệ kết cấu mà cấu kiện chịu lực chủ yếu là dây hoặc dây cùng làm việc với dầm, dàn... Trong hệ treo, các cấu kiện dây chỉ chịu lực kéo và thường được làm bằng dây xích hoặc dây cáp ... Các cấu kiện chính trong cầu treo dây vồng gồm: *dây chủ, dầm cứng, dây đeo, trụ tháp và khối neo*.

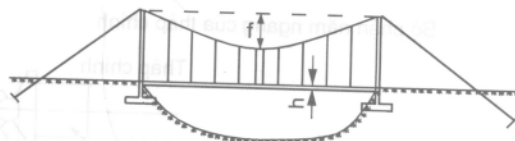
2.1.1. Dây chủ

Dây chủ thường được làm bằng các bó thép sợi cường độ cao khi chịu kéo hoặc bằng các thép tấm cường độ cao cấu tạo theo dạng dây xích. Ở trạng thái hệ chưa chịu tải trọng di động, dây chủ thường có dạng đường cong Parabol, đường tên vồng f thường chọn theo chiều dài nhịp L trong các khoảng sau:

+) Hệ treo có một lớp dây nối với dầm cứng bằng các liên kết thẳng đứng (hình 2.1a,b)



Hình 2.1a



Hình 2.1b

$$f = \left(\frac{1}{8} \rightarrow \frac{1}{12} \right) \cdot L$$

+) Hệ treo hai lớp dây nối với dầm cứng bằng các liên kết thẳng đứng (hình 2.2)

$$f = \left(\frac{1}{6} \rightarrow \frac{1}{8} \right) \cdot L$$

Mũi tên vồng tại 1/4 nhịp giữa được lựa chọn theo điều kiện bảo đảm không xuất hiện lực nén trong các dây:

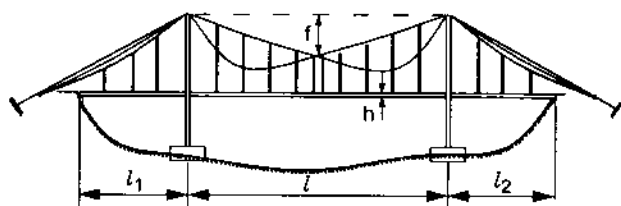
$$f_1 = \left(\frac{1}{7} \rightarrow \frac{1}{9} \right) \cdot \frac{L}{2}$$

$$f_2 = \left(\frac{1}{80} \rightarrow \frac{1}{150} \right) \cdot \frac{L}{2}$$

Còn mũi tên vồng của dây ở các nhịp biên được chọn như sau:

$$f_3 = \left(\frac{1}{6} \rightarrow \frac{1}{8} \right) \cdot L_1$$

$$f_4 = \left(\frac{1}{90} \rightarrow \frac{1}{150} \right) \cdot L_1$$



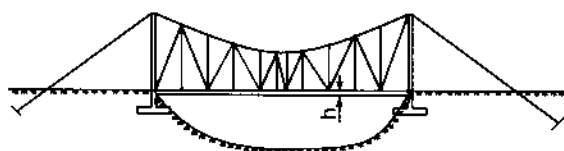
Hình 2.2

f_1, f_2 : mũi tên vồng của hai dây ở nhịp chính.

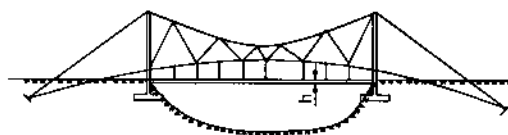
f_3, f_4 : mũi tên vồng của các dây ở nhịp biên

+) Hệ treo có các dây liên kết với dầm cứng theo dạng hình tam giác (hình 2.3, 2.4)

Trường hợp này chứa hai trường hợp ở trên và được chọn như các điều kiện đó. Đặc biệt độ cứng của hệ này tương đối lớn so với các hệ ở trên cho nên có thể tính theo sơ đồ không biến dạng cũng không gây ra sai số đáng kể.



Hình 2.3



Hình 2.4

Ví dụ cầu treo BT (Quảng Trị):

$$\frac{f}{L} = \frac{10}{100} = \frac{1}{10}$$

Cầu treo HT (Lai Châu):

$$\frac{f}{L} = \frac{14}{140} = \frac{1}{10}$$

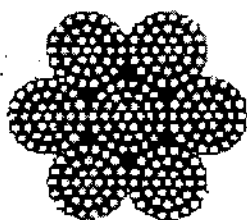
Cầu treo AS (Nghệ An) :

$$\frac{f}{L} = \frac{16}{160} = \frac{1}{10}$$

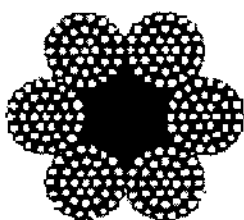
Đa số các cầu treo bán vĩnh cửu ở Việt Nam dành cho ô tô trước đây thường dùng loại cáp bó xoắn có lõi hữu cơ (cáp mềm) do Nga sản xuất. Cầu treo Bảo Nhai và Cốc Pài sử dụng cáp cứng, xoắn kín mạ kẽm. Một số cầu treo khác như cầu Dừng và cầu Cửa Rào sử dụng cáp cứng xoắn trần. Cầu Nậm (Nghệ An) dùng bó cáp song song $\Phi 5$ cường độ cao. Các cầu treo dân sinh khẩu độ nhỏ thường sử dụng cáp mềm và một số cầu dùng bó thép thường CT3 đường kính $\Phi 8 \div 10 \text{mm}$.

Trong số các loại cáp kể trên, cáp cứng xoắn kín là loại phù hợp nhất dùng để làm cầu treo vì loại này có hệ số chèn chặt lớn (0,87), biến dạng nhỏ. Cáp mềm (cáp có lõi hữu cơ) thường có biến dạng lớn khi chịu lực, trên thế giới ít sử dụng để làm cầu treo nhưng ở nước ta do điều kiện cầu được thiết kế và thi công để phục vụ đảm bảo giao thông từ trong thời gian chiến tranh hoặc là cầu treo dân sinh trên miền núi nên cho đến nay vẫn tồn tại rất nhiều cầu treo sử dụng cáp mềm.

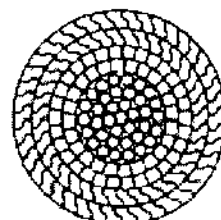
Mặt cắt ngang một số kiểu cáp thường dùng ở Việt Nam như sau:



Cáp xoắn trần lõi cứng

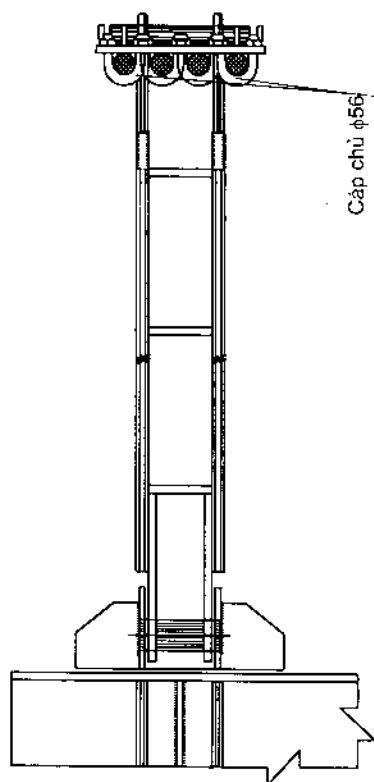


Cáp xoắn trần lõi hữu cơ

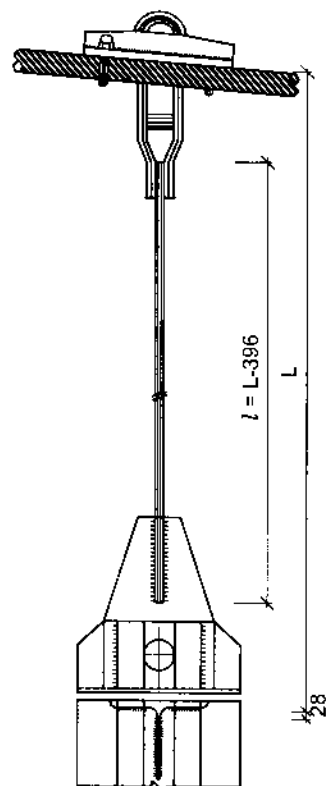


Cáp xoắn kín lõi cứng

Các sợi cáp chủ hầu hết được rải song song, trừ cầu treo Hang Tôm cáp chủ được bó thành bó mặt cắt hình lục giác.



Mặt cắt theo phương ngang cầu



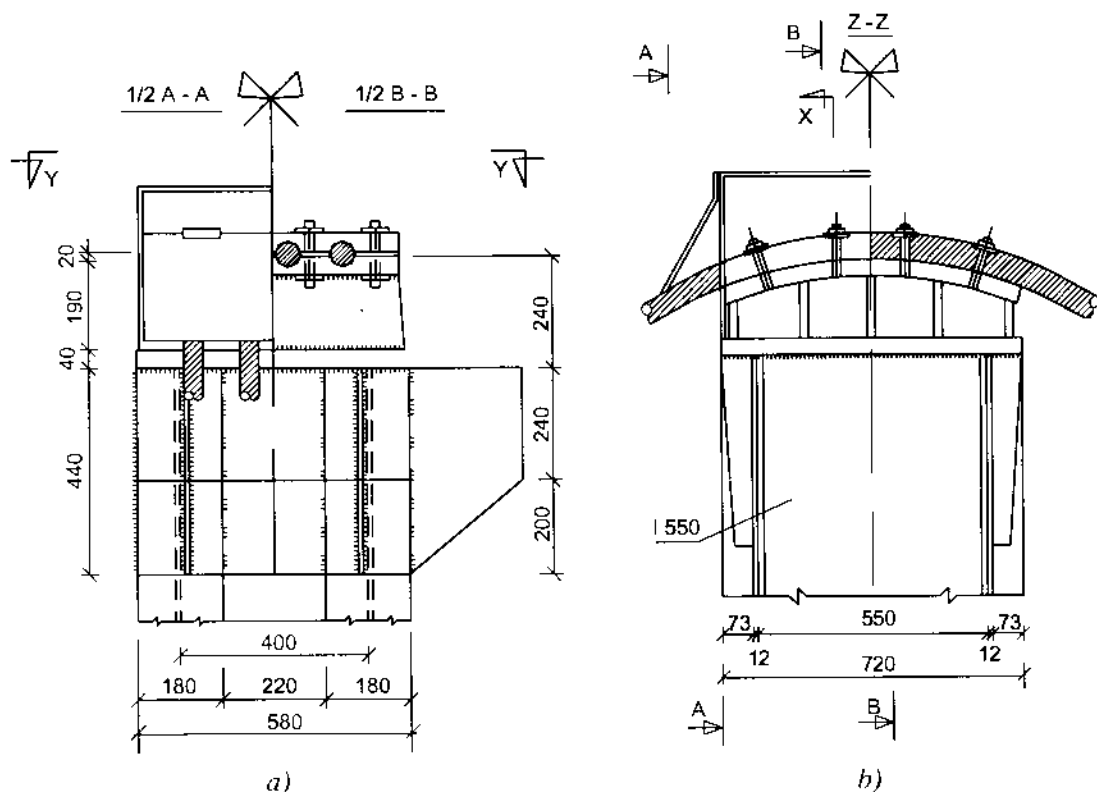
Hình chiếu chính một dây đeo

Hình 2.5. Hệ liên kết thanh đeo vào cáp chủ

Về cấu tạo, hai đầu cáp chủ được liên kết với hồ thế (hoặc với dầm cứng) và được vắt qua đỉnh trụ cổng thông qua một bộ phận thường gọi là “mu rùa” hoặc “yên ngựa”. Tùy theo kết cấu cổng trụ là loại trụ khớp hay loại trụ ngàm mà cáp chủ được bắt cố định trên “mu rùa” liên kết chặt với đỉnh trụ hay cáp chủ nằm trên “mu rùa” của gối con lăn trên đỉnh trụ.

“Mu rùa” được tạo các đường rãnh trên để có thể ôm khít sợi cáp (với kiểu cáp chủ rải song song), hoặc bó cáp (với kiểu cáp chủ bó thành bó). Bán kính cong của “mu rùa” được tính toán trên cơ sở sao cho khi cáp chủ chịu kéo, trong cáp chủ chịu kéo, trong sợi cáp uốn qua không xuất hiện ứng suất kéo cao quá mức cho phép (tổng hợp kéo cáp chủ và kéo do uốn sợi cáp).

Với kiểu cấu tạo cáp chủ rải song song, liên kết dây đeo với cáp chủ được thực hiện thông qua má ôm cáp, chốt ắc, bulông đeo. Má ôm cáp do không tạo được bán kính cong tối ưu nên thường vát góc tám để chống gãy cục bộ của cáp tại vị trí đó. Với kiểu cấu tạo cáp chủ bó thành bó, liên kết dây đeo với cáp chủ được thực hiện thông qua đai bó, chốt ắc hoặc bulông ắc.



Hình 2.6. Chi tiết cấu tạo đỉnh trụ cổng (mu rùa)
a) Các mặt cắt; b) Hình chiếu chính

2.1.2. Dầm cứng

Dầm cứng là một hệ gồm hai hoặc nhiều dầm (dàn) dọc nối với nhau bằng các dầm ngang và nối với cáp chính bằng các dây đeo. Dầm cứng có thể làm bằng thép hoặc bê tông cốt thép liên tục hoặc gián đoạn.

Tỷ số giữa các nhịp trong hệ treo ba nhịp thường chọn là :

$$L_1 = \left(\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{4} \right) \cdot L$$

L - chiều dài nhịp giữa

L_1 - chiều dài nhịp biên

Tỷ số giữa chiều cao h của dầm và chiều dài L của nhịp phụ thuộc vào nhiều yếu tố và có ảnh hưởng lớn đến độ cứng của toàn hệ. Theo các số liệu trong các công trình cầu treo hiện có (trừ một vài trường hợp cá biệt như cầu treo Tacoma) người ta chọn như sau:

$$h = \left(\frac{1}{80} \rightarrow \frac{1}{120} \right) \cdot L$$

Nhịp càng lớn thì người ta chọn tỷ số h/L càng nhỏ.

Khi $h/L > 60$ (độ cứng của hệ lớn) có thể tính toán cầu treo theo sơ đồ không biến dạng nghĩa là có thể áp dụng các phương pháp quen thuộc trong cơ học kết cấu để tính.

Khi h/L nhỏ hơn giới hạn đã nêu ở trên (độ cứng của hệ nhỏ) thì khả năng tham gia chịu lực của dầm cứng nhỏ hơn so với vai trò chịu lực của dây. Lúc này ta có thể tính hệ như hệ dây.

Ví dụ: Cầu ĐQ có nhịp lớn là 194m

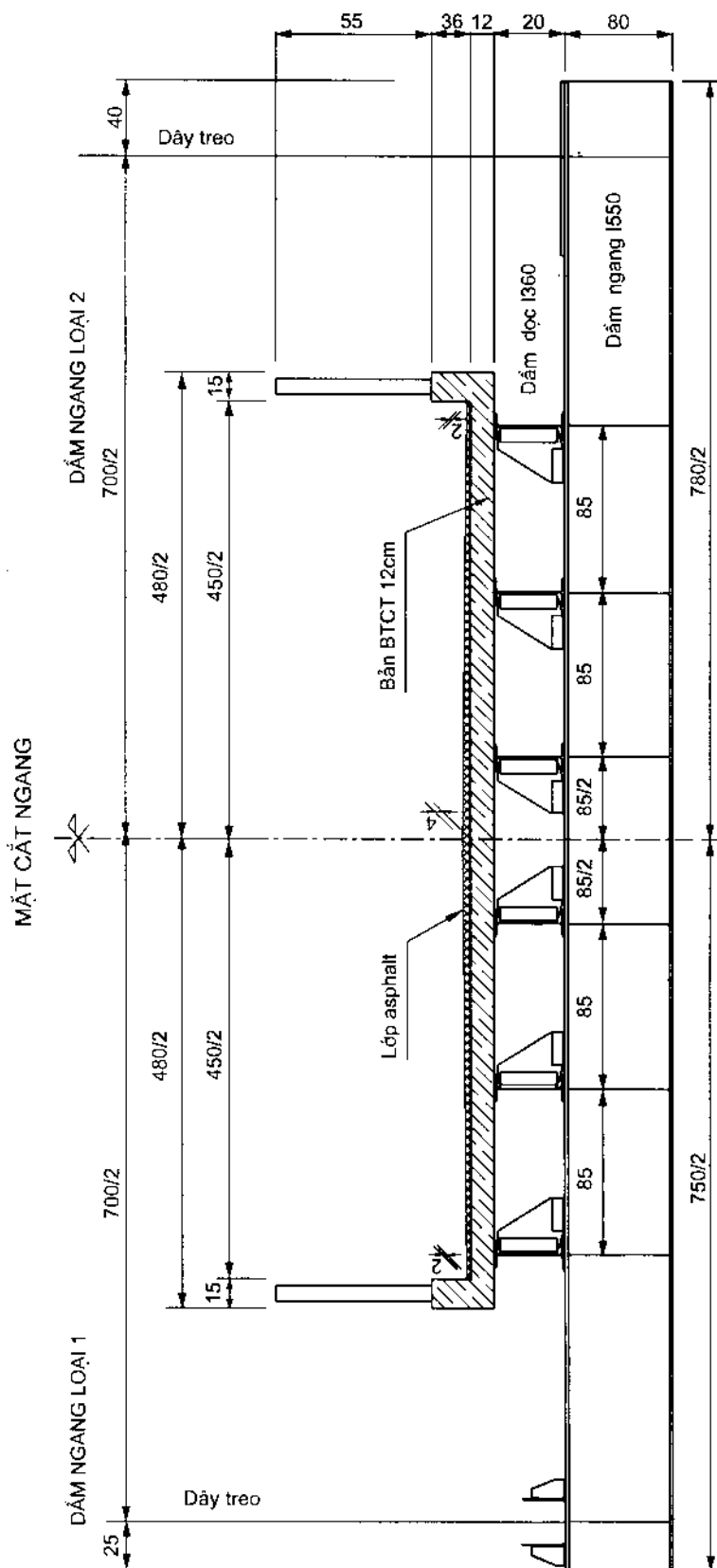
Cầu treo BT (Quảng Trị): $\frac{B}{L} = \frac{6}{100} \approx \frac{1}{16,7}$

Cầu treo HT (Lai Châu): $\frac{B}{L} = \frac{8,1}{140} \approx \frac{1}{17,3}$

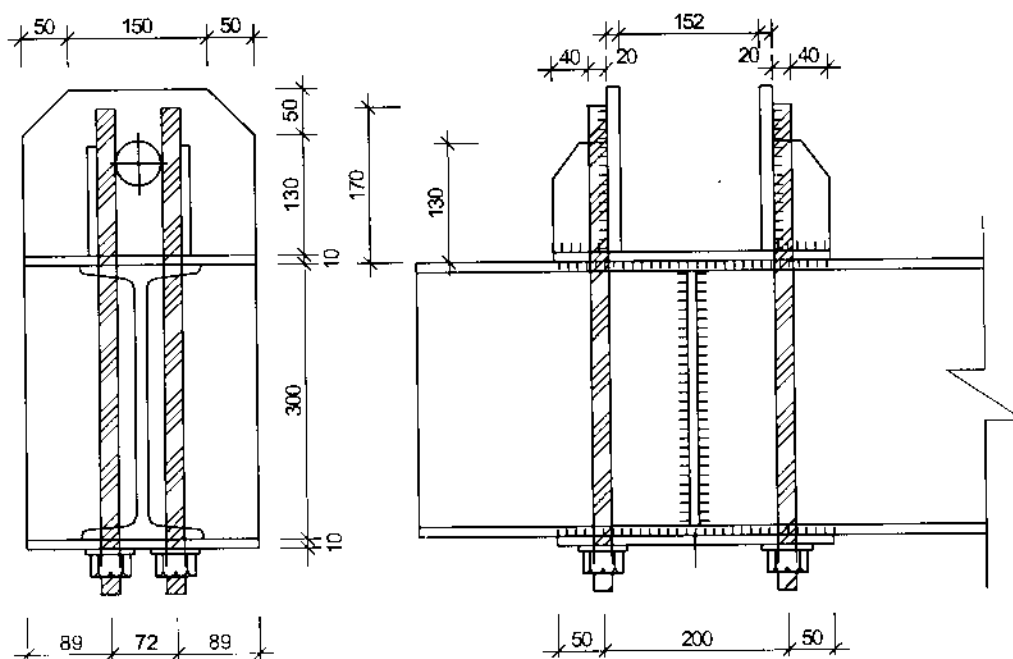
Cầu treo AS (Nghệ An) $\frac{B}{L} = \frac{7}{160} \approx \frac{1}{22,8}$

Tỷ số $\frac{B}{L} \geq \frac{1}{25}$ thì cầu ổn định với gió tốt hơn. Các cầu treo dành cho người đi bộ có tỷ số B/L nhỏ, do vậy cầu thường bị lắc ngang lớn, dễ mất ổn định với gió. Ví dụ cầu treo HL (Quảng Trị) $\frac{B}{L} = \frac{1,4}{75} \approx \frac{1}{53,6}$

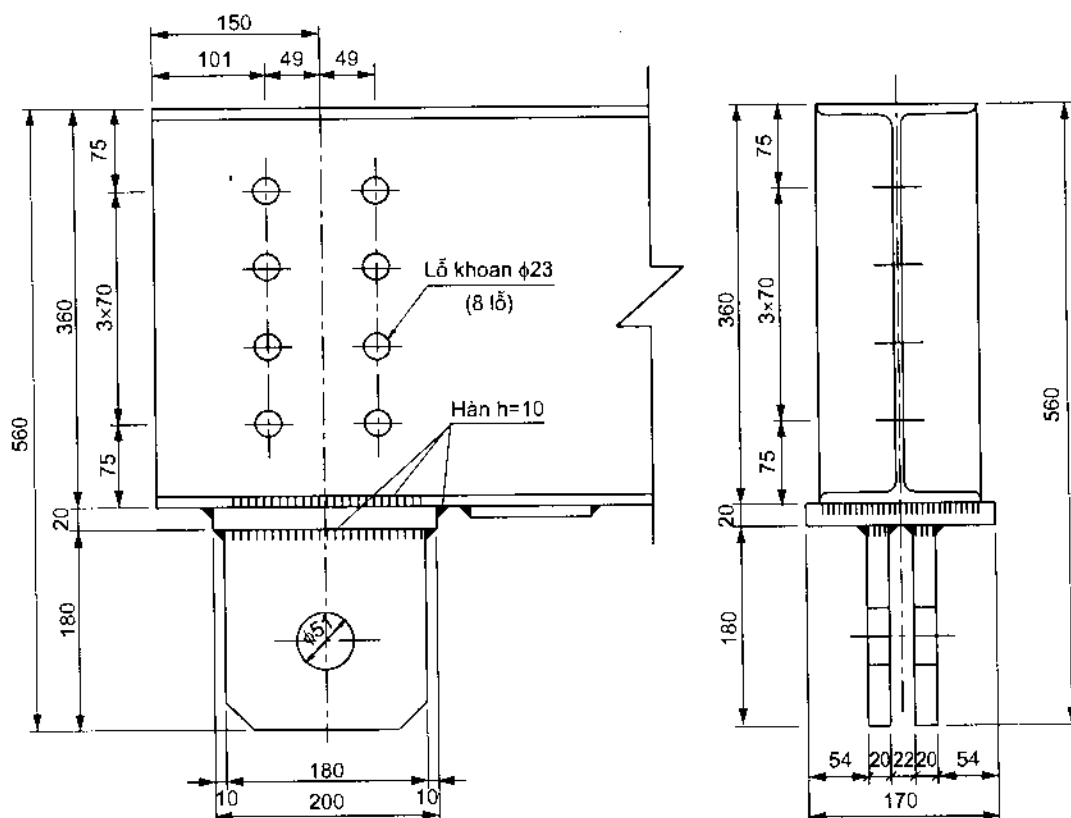
Hệ dầm của cầu treo dây văng có thể là hệ dầm liên tục hoặc hệ dầm có khớp



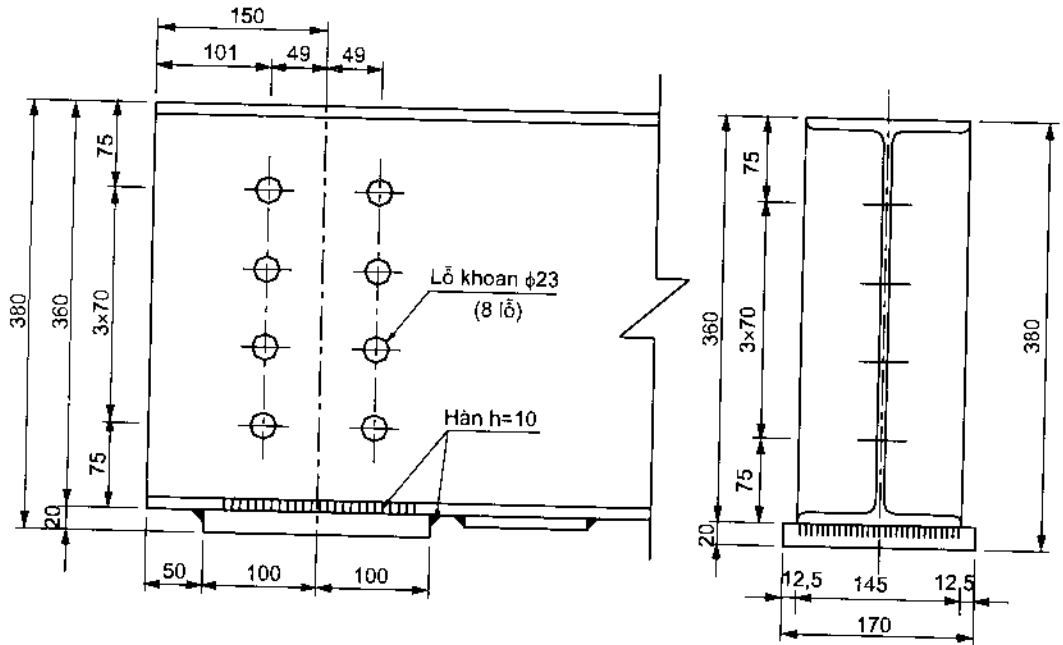
Hình 2.8. Mặt cắt ngang cầu AS (Nghệ An)



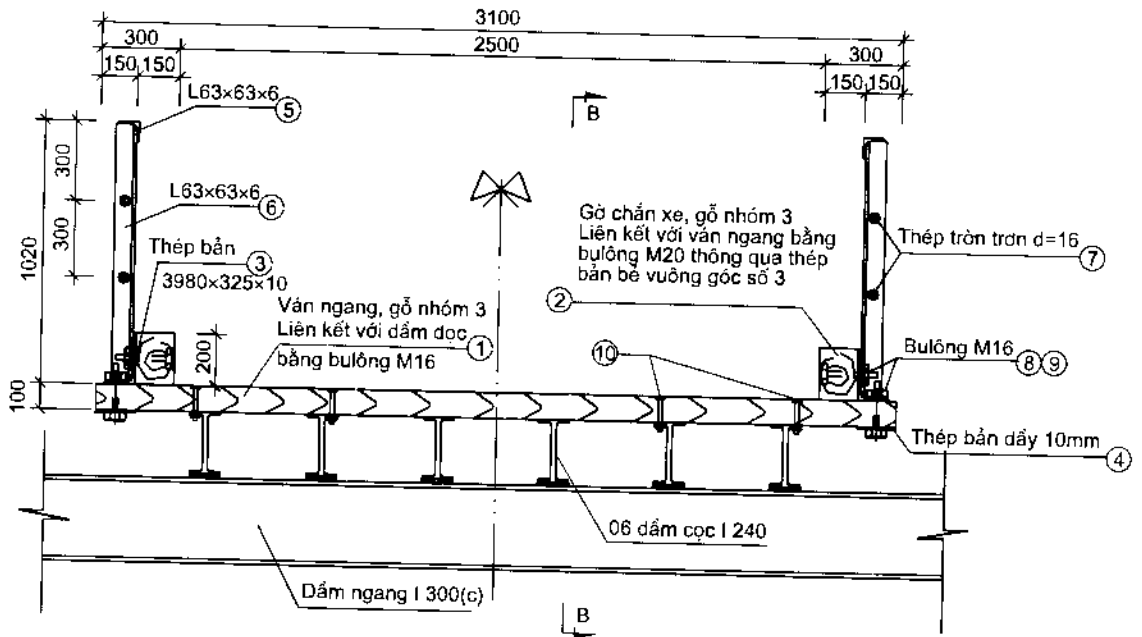
Hình 2.9. Chi tiết liên kết dầm ngang vào dầm dọc



Hình 2.10. Đầu dầm dọc gối cố định



Hình 2.11. Đầu dầm gối di động



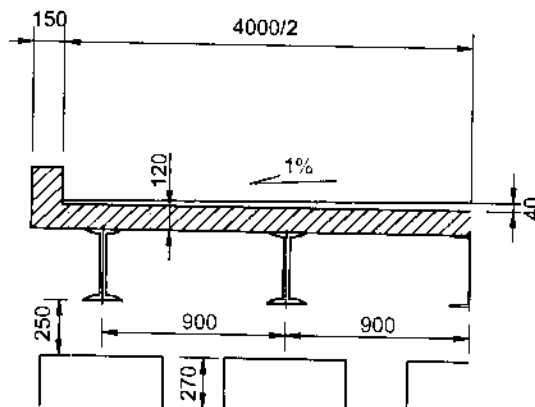
Hình 2.12. Mặt cắt ngang cầu CL

Cầu treo dầm mềm: Khi độ cứng của mặt cầu nhỏ, thường gọi là kiểu cầu treo dầm mềm. Hoạt tải đặt trên kết cấu nhịp hoàn toàn do hệ dây chịu. Dầm sẽ chỉ làm việc cục bộ trong mỗi khoang giữa hai dây đeo. Do dầm mềm nên mặt cầu có hiện tượng biến dạng hình chữ S khi đặt hoạt tải chỉ trên 1/2 nhịp (nếu có hoạt tải sẽ võng xuống còn nửa

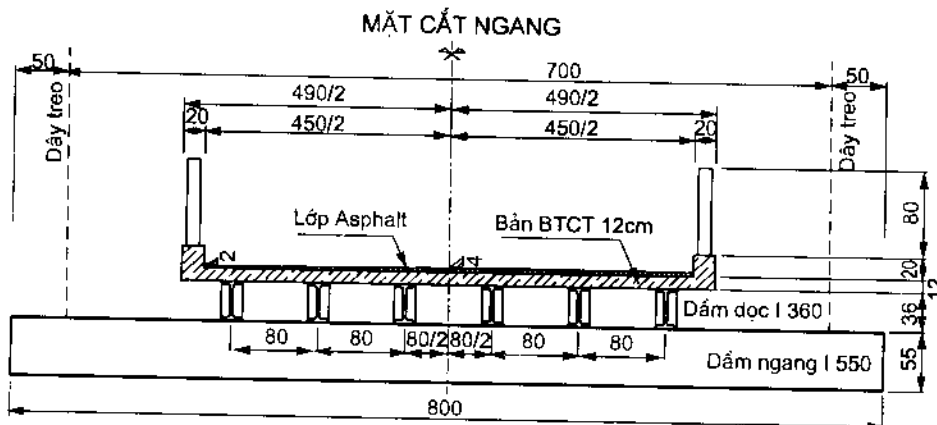
nhịp không có hoạt tải sẽ võng lên). Cấu tạo điển hình của kiểu mặt cầu này bao gồm: dầm dọc sử dụng thép hình chữ I hoặc chữ U (số hiệu 300÷450) đặt bên trên các dầm ngang chữ I hoặc chữ U (số hiệu 450÷500). Liên kết giữa dầm dọc và dầm ngang trước đây thường bằng đường hàn nhưng gần đây thường dùng liên kết bulông, vì mối nối hàn thường bị nứt trong quá trình khai thác cầu. Mặt cầu xe chạy có thể bằng BTCT đổ tại chỗ liên hợp với dầm dọc như cầu Bến Tắt, hoặc bằng bản bê tông lắp ghép như cầu Bảo Nhai, hoặc dùng bản bê tông lắp ghép kiểu Robinson như cầu Kiến An. Cũng có nhiều cầu dùng mặt cầu bằng gỗ.

Cầu treo dầm cứng: hệ dầm mặt cầu thường được cấu tạo từ các dầm thép có độ cứng lớn làm việc chung với dây chủ tạo thành một hệ liên hợp chịu hoạt tải. Dầm có độ cứng lớn giúp phân bố tải trọng đều lên các dây treo, khắc phục được hiện tượng mặt cầu biến dạng chữ S khi đặt tải 1/2 nhịp. Ở nước ta chỉ có trường hợp cầu treo Hang Tôm (Lai Châu) có hệ dầm mặt cầu thuộc loại dầm cứng kiểu dầm thép quân dụng Trung quốc T66 với chiều cao dầm là 3,09m.

Một vài kiểu dầm mặt cầu phổ biến ở nước ta hiện nay



1/2 mặt cắt ngang cầu BT (Thừa Thiên Huế)



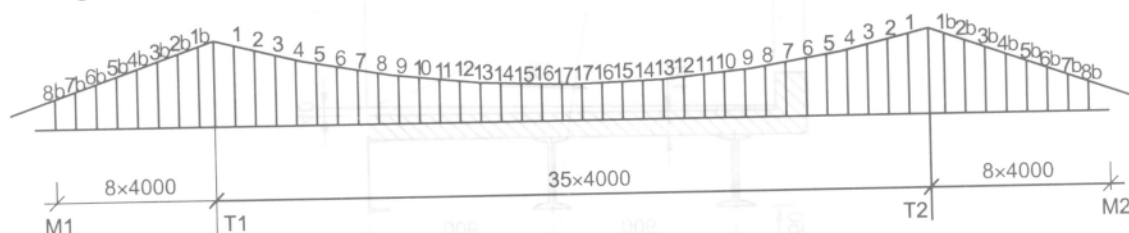
Mặt cắt ngang cầu AS (Nghệ An)

2.1.3. Dây đeo (thanh treo)

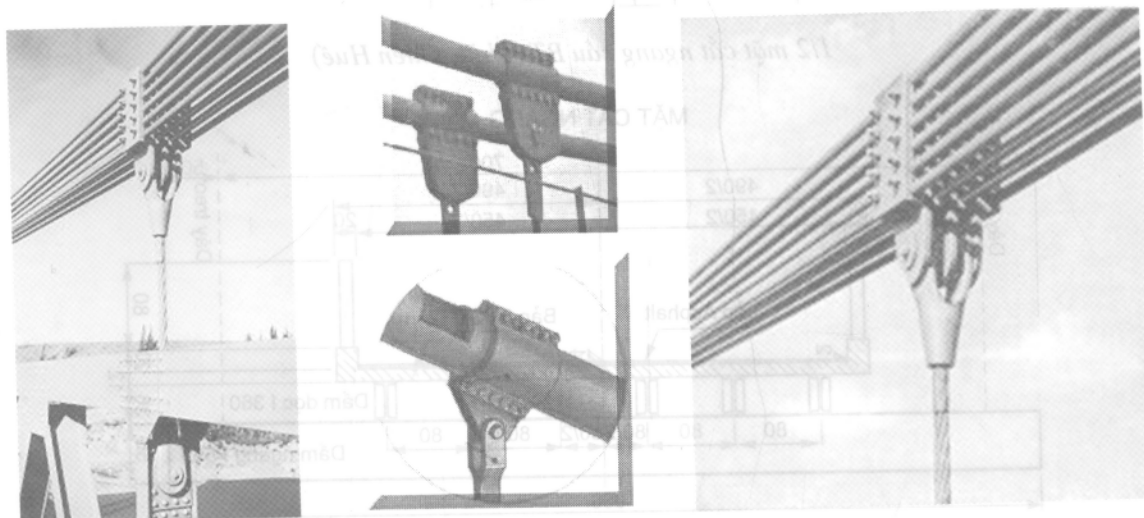
Các dây đeo chỉ chịu kéo nên thường được làm bằng thép thanh hoặc dây cáp. Nói chung, chiều dài tối thiểu của dây đeo không nên nhỏ hơn 1,5m nhưng cũng có trường hợp chọn bằng không (nối sát với dầm cứng) như trong cầu treo Tancarville ở Pháp nhằm mục đích nâng cao độ cứng của cầu. Nhiều cầu treo nông thôn ở nước ta cũng chọn cấu tạo tương tự.

Trong các cầu treo dây văng bán vĩnh cửu ở nước ta, các dây đeo thường được cấu tạo từ các thanh thép tròn tổ hợp (như các cầu treo Bến Tắt, Bảo Nhai và Kiến An), riêng cầu treo Hang Tôm cấu tạo từ cáp mềm.

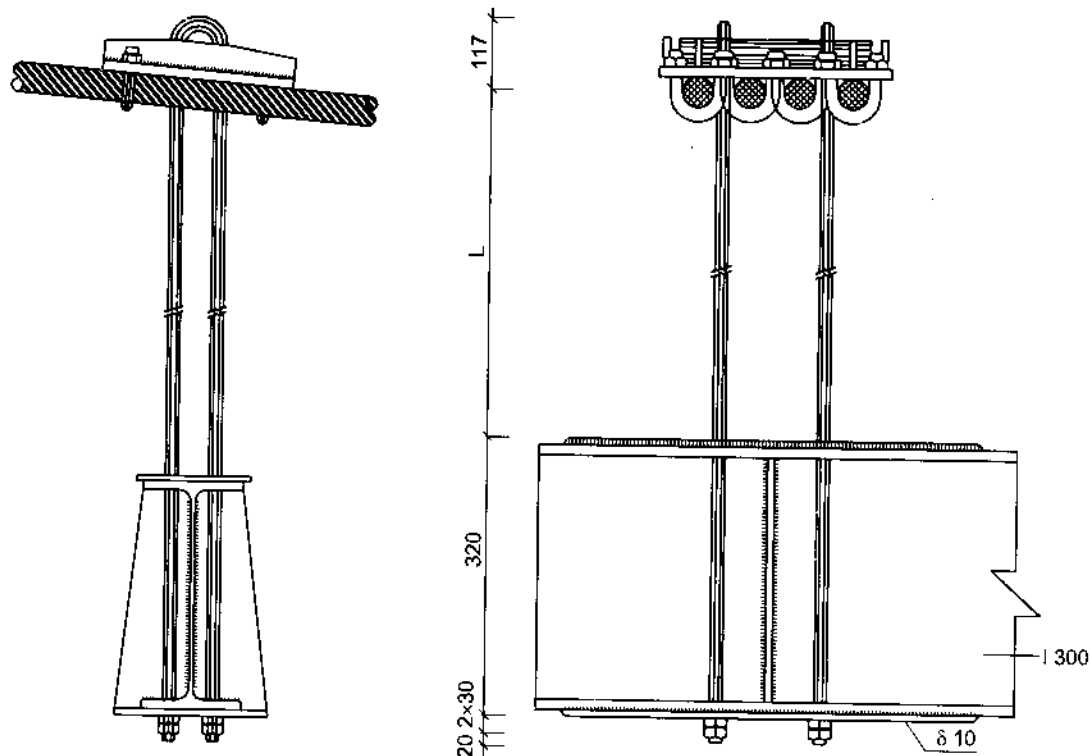
Khoảng cách giữa các dây đeo thường được thiết kế là 4÷6m. Trị số này thường được quyết định phụ thuộc vào khả năng chịu tải trọng cục bộ của dầm cứng cũng như có xem xét đến điều kiện làm việc của cáp chủ (khi khoảng cách giữa các dây đeo lớn, cáp chủ sẽ gãy khúc, chịu lực cục bộ lớn). Nhiều nghiên cứu đã xem xét bài toán ảnh hưởng của số lượng dây đeo đến lực căng (H) trong cáp chủ và chuyển vị thẳng đứng (W) đối với cầu treo một nhịp chính khẩu độ khoảng 100-160m. Kết quả cho thấy: khi số lượng khoang tăng (n tăng), thì H tăng và W giảm; Khi số lượng khoang tăng đến 14÷16 khoang (tương đương $d \approx 10$) thì H và W gần như không thay đổi.



Hình 2.13. Sơ đồ bố trí dây đeo cầu CL



Hình 2.14. Một số kiểu liên kết dây đeo và cáp chính trên thế giới



Hình 2.15. Chi tiết dây đeo chính

2.1.4. Cột tháp trụ

Cột tháp trụ có nhiệm vụ đỡ dây chủ và truyền lực từ dây chủ xuống kết cấu móng. Theo phương ngang cầu, trụ cột thường được cấu tạo theo dạng khung. Theo phương dọc cầu, cột trụ sẽ bị uốn nếu dây được liên kết cố định với đỉnh cột trụ và chịu nén lệch tâm nếu dây đặt trên đỉnh cột trụ thông qua liên kết gối di động. Bề rộng của cột trụ theo phương này thường được chọn bằng $\left(\frac{1}{20} \rightarrow \frac{1}{27}\right)$ chiều cao của cột trụ.

Trụ tháp cổng gồm hai phần: Trụ và cổng cầu

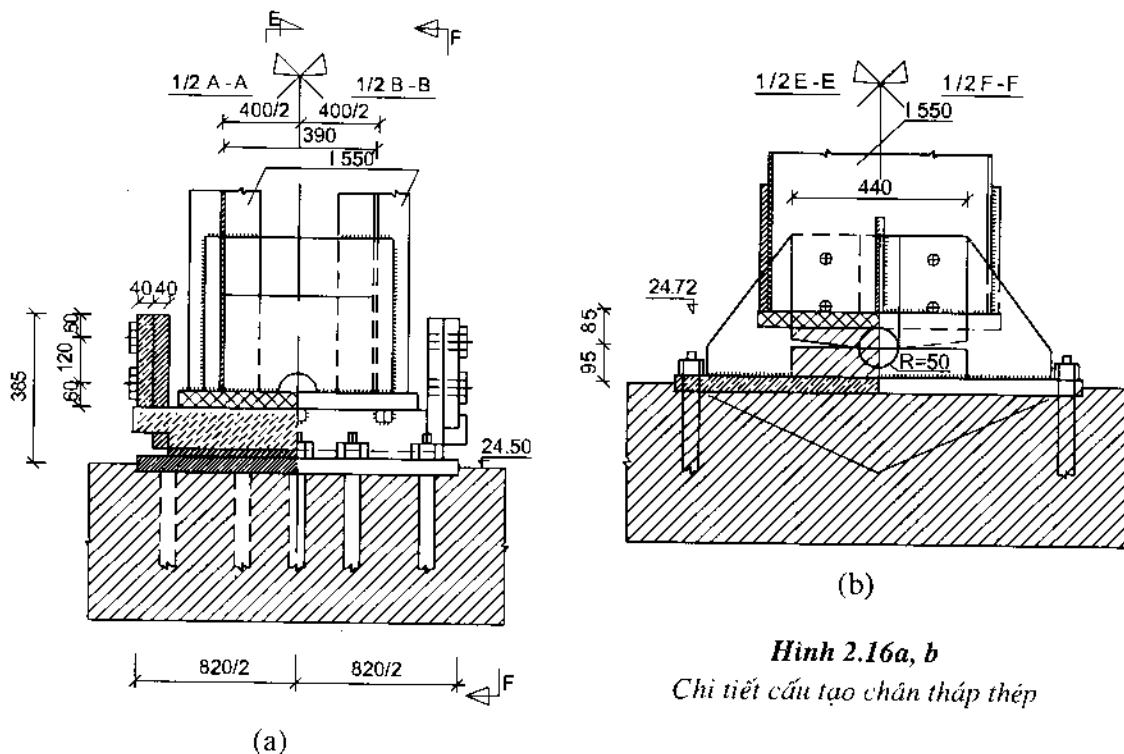
Trụ có cấu tạo bằng bê tông cốt thép hoặc bằng đá xây, kích thước kết cấu phụ thuộc vào tính toán, kiểu cổng cầu là ngầm hay khớp ở chân.

Kết cấu cổng cầu treo hết sức đa dạng. Đây là một trong những bộ phận chủ yếu tạo nên vẻ đẹp kiến trúc của cầu treo. Cổng cầu có thể làm bằng thép hoặc bê tông cốt thép.

Các trụ cổng bằng bê tông cốt thép thường được ngầm cứng ở liên kết chân cột trụ. Mặt cắt cột trụ có thể thay đổi theo chiều cao như ở cầu Bảo Nhai ($1,5 \times 0,75\text{m}$ ở chân

cột và $0,75 \times 0,75\text{m}$ ở đỉnh cột) hoặc không thay đổi như ở cầu Cốc Pài ($1,1\text{m} \times 0,75\text{m}$) và đều là các mặt cắt đặc. Cáp chủ có thể vắt qua “mu rùa” với hệ thống con lăn ở trên đỉnh tháp trụ. Theo phương ngang cầu, các cột tháp trụ được liên kết với nhau bằng các dầm bê tông cốt thép, như ở cầu Bảo Nhai, Cốc Pài.

Hầu hết các cầu treo bán vĩnh cửu còn lại ở nước ta có trụ tháp cổng bằng thép. Các cột tháp trụ được tổ hợp từ thép hình hoặc bằng thép với bản giằng-thanh giằng, sử dụng liên kết hàn hoặc đinh tán. Theo phương dọc cầu, chân cột tháp trụ được liên kết khớp với móng trụ bằng con lăn thép, cáp chủ khi đó được liên kết cố định trên đỉnh trụ tháp cổng. Theo phương ngang cầu, các cột tháp trụ được liên kết với nhau bằng dầm thép hình, như ở cầu Bến Tắt, cầu Đò Quan hoặc dầm thép như ở cầu Phùng, cầu Đuống. Tùy theo chiều cao cột trụ mà có cầu tạo một tầng như ở cầu Bến Tắt hay hai tầng liên kết như ở cầu Phùng, cầu Đò Quan.



Dưới đây giới thiệu loại trụ cổng phổ biến được thiết kế cho các cầu treo ở nước ta:

Loại trụ cổng bê tông cốt thép có nhược điểm là kích thước lớn, thi công phức tạp. Tuy nhiên nó lại có ưu điểm là tận dụng được vật liệu địa phương, chi phí cho công tác duy tu bảo dưỡng thấp, dễ tạo vẻ đẹp kiến trúc. Trụ cổng bằng thép có trọng lượng nhỏ, dễ thi công tuy nhiên giá thành vật liệu chế tạo cao và yêu cầu cho công tác duy tu bảo dưỡng cũng đòi hỏi cao so với trụ cổng bằng bê tông.

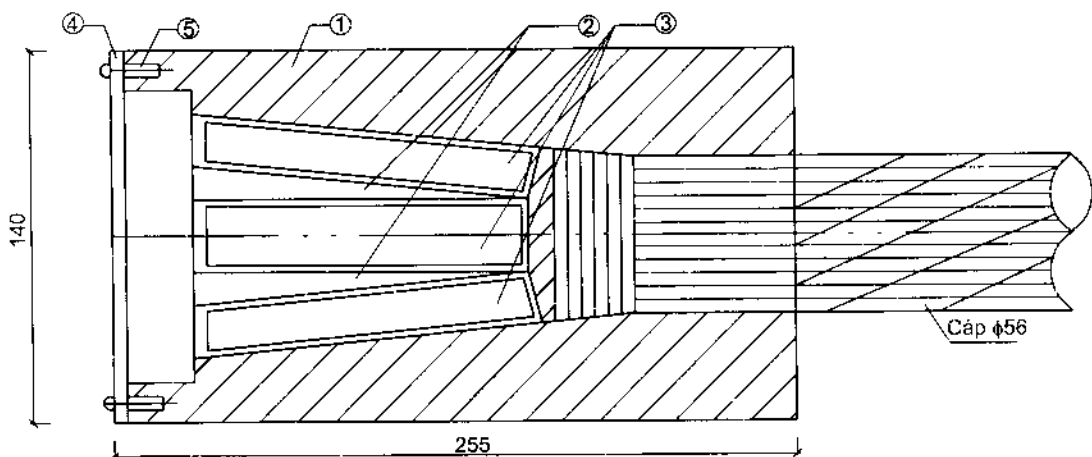
2.1.5. Neo của dây chủ

Thường có hai biện pháp neo dây cáp chủ:

+ *Neo vào đất nền bằng mố neo* (hình 2.1b). Mố neo trong các cầu treo thường là một kết cấu dạng khối khá lớn và nặng để đủ chịu lực ngang từ dây chủ truyền xuống và tương đối đa dạng.

+ *Neo vào dầm cứng* (hình 2.1a). Biện pháp neo này có ưu điểm là đơn giản, giảm được khối lượng công tác xây dựng mố neo nhưng có nhược điểm là lực căng trong dây sẽ gây ra trạng thái uốn dọc trong dầm cứng. Ngoài ra, sự thay đổi nhiệt độ cũng gây ra ảnh hưởng đáng kể khi dùng cách neo này. Trong thực tế người ta chỉ dùng biện pháp neo vào dầm cứng khi cầu có nhịp dưới 300m.

Hệ neo gồm có hai bộ phận quan trọng là hố thế và mấu neo

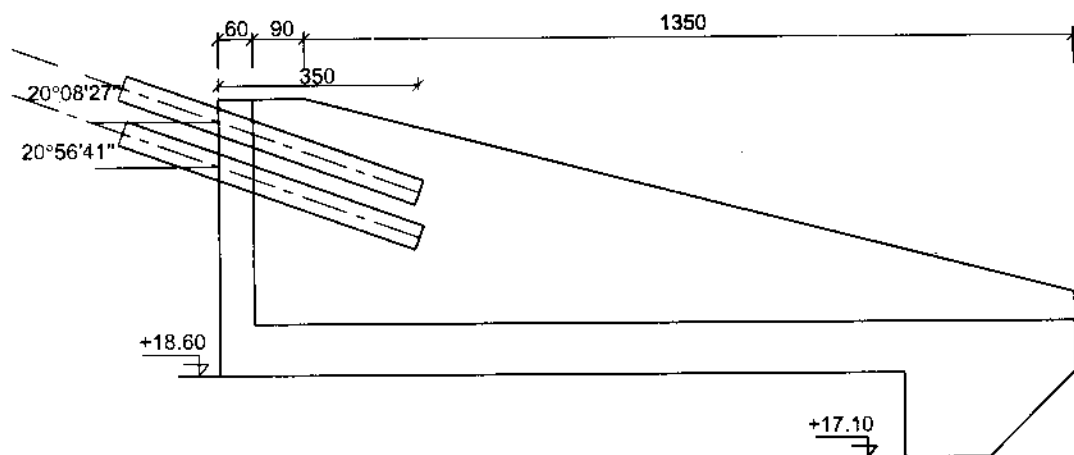


Hình 2.17. Cấu tạo neo côn cáp

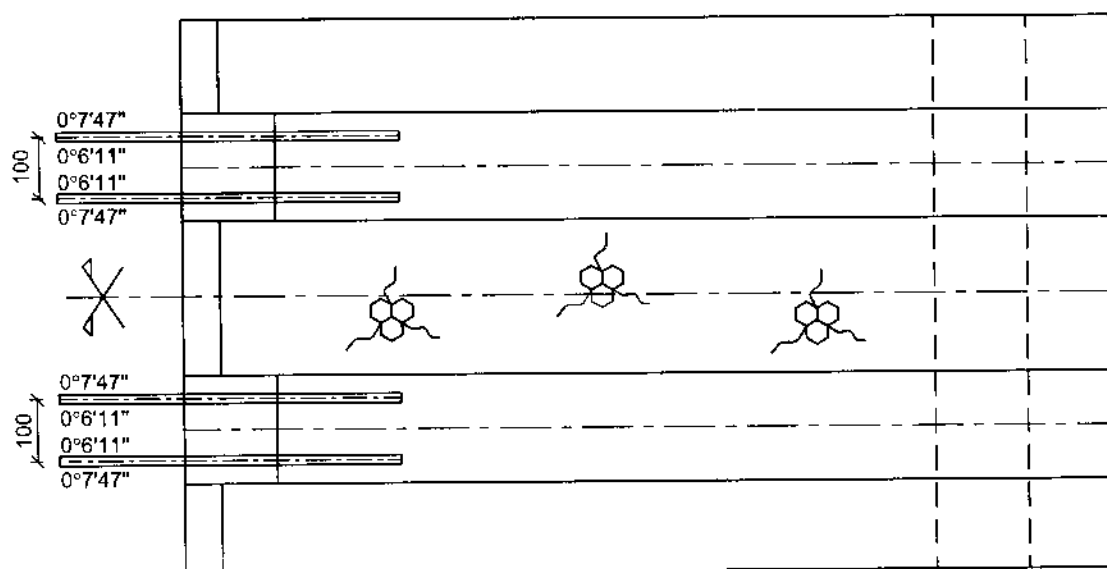
1-Vỏ neo; 2-Nêm giữa; 3- Nêm cạnh; 4- Mặt bích; 5- Vít

Hố thế: các cầu treo nước ta sử dụng loại hố thế trọng lực và áp lực

+ *Hố thế trọng lực:* dùng trọng lượng nặng của khối bê tông cốt thép và đá xây để neo giữ cáp chủ. Khi tính toán có xét đến áp lực đất trước hố thế, lực ma sát đáy móng hố thế và đất. Tùy theo điều kiện đầm lèn và điều kiện địa chất đáy móng mà lấy trị số áp lực chủ động và hệ số ma sát khác nhau. Nếu hố thế nằm trong nước thì còn phải xét thêm áp lực đẩy nổi của nước. Loại hố thế này đảm bảo an toàn khai thác nhưng giá thành xây dựng cao.



Hình 2.18a. Hình chiếu dọc cầu hố neo chính



Hình 2.18b. Mặt chính hố neo

Đối với cầu cáp đã chiến có cổng hoặc không có cổng người ta thường dùng hố thế áp lực. Riêng cầu treo Đồ Quan cũng dùng hố thế áp lực.

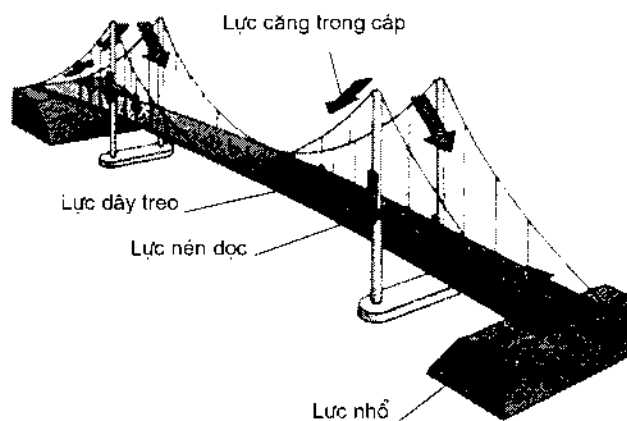
+ **Hố thế áp lực:** có cấu tạo chính là tấm bản bê tông với bề dày khoảng 50cm, có các gờ tăng cường. Tấm bản chắn này được chôn dưới đất để giữ cáp chủ thông qua áp lực đất trước nó (trong một số cầu nhỏ, bản bê tông được thay bằng bó ray hoặc thép hình).

Mẫu neo: mẫu neo của hố thế trọng lực thường cấu tạo từ thép tròn, đường kính 30÷50mm và thép hình, được neo giữ trong bê tông. Loại mẫu neo này cấu tạo đơn giản dễ thi công. Tuy nhiên, nhiều cầu ở nước ta trong khi thiết kế chưa quan tâm đến điều kiện quản lý và khai thác nên khó kiểm tra phân mẫu neo ngoài bê tông do không gian quá chật hẹp, mặt khác vị trí này thường ẩm thấp nên gây gỉ trầm trọng mẫu neo.

Mấu neo dùng trong hồ thế áp lực thường bằng thép hình, được chôn sâu dưới đất (hoặc cáp chủ cũng bị chôn dưới đất). Loại mấu neo này khó có điều kiện kiểm tra. Để chống rỉ cho các bộ phận bằng thép chôn dưới đất, thường sử dụng bao tải tấm nhựa đường quấn quanh cấu kiện. Tuy nhiên giải pháp này không có ý nghĩa lâu dài.

2.1.6. Kết luận

Cầu treo dây vồng là hệ kết cấu treo có một lớp dây chủ nối với dầm cứng bằng các dây đeo thẳng đứng, là hệ cầu treo dầm cứng đơn giản nhất và có thể vượt qua được những khẩu độ lớn.



Hình vẽ thể hiện nguyên lý
chịu lực của các bộ phận cầu
treo dây vồng

Bảng 2.1: Thông số kỹ thuật chủ yếu của một số cầu treo dây vồng ở Việt Nam

TT	Tên cầu	Tải trọng thiết kế	Chiều dài nhịp biên 1	Chiều dài nhịp chính	Chiều dài nhịp biên 2	Đường tên	Tỷ số $f/L_{\text{chính}}$	Khổ cầu	K/c tìm hai cụm cáp chủ
1	Bến Tắt (Quảng Trị)	Đoàn xe H10	30	100	30	10	1/10	4	6
2	Bảo Nhai (Lào Cai)	1xe 10,4T+ rơ móc 4,8T	50	140	50	15	1/9,3	4	6
3	Nấm (Hà Tĩnh)	1 xe 10T	30	120	30	12	1/10	4	6
4	Chợ Bông (Hà Tĩnh)	Đoàn xe H13	30	120	30	11,5	1/10,4	4	6
5	Địa Lợi (Hà Tĩnh)	1xe 16,9T	52	120	52	11,5	1/10,4	4	6
6	Cửa Rào (Nghệ An)	1xe 18T	23	130	23	11,6	1/11,2	4	5,6
7	Cốc Pài (Hà Giang)	1xe 8T+ rơ móc 4,8T	25	100	25	10	1/10	4	6
8	Hàng Tôm (Lai Châu)	Đoàn xe H13	52	140	52	14	1/10	7	8,1

Bảng 2.2: Đặc điểm cấu tạo của một số cầu treo dây võng ở Việt Nam

TT	Tên cầu	Đặc điểm cấu tạo				
		Cáp chủ	Mặt cầu	Dầm mặt cầu	Trụ cổng	Hố thể
1	Bến Tắt (Quảng Trị)	Cáp mềm lõi hữu cơ 10 sợi $\Phi 56$	BTCT liên hợp	Dầm mềm có chốt 5I360	Khớp Thép hình tổ hợp	Trọng lực và áp lực
2	Bảo Nhai (Lào Cai)	Cáp cứng xoắn kín 10 sợi $\Phi 42,5$	BTCT lắp ghép	Dầm mềm liên tục 4I 450	Ngàm BTCT đổ tại chỗ	Trọng lực và áp lực
3	Nấm (Hà Tĩnh)	Bó sợi song song 2 $\times$ 122 sợi $\Phi 5$	Gỗ	Dầm mềm liên tục 6I 280	Ngàm BTCT đổ tại chỗ	Trọng lực và áp lực
4	Chợ Bông (Hà Tĩnh)	Bó sợi song song 2 $\times$ 144 sợi $\Phi 5$	Gỗ	Dầm mềm có chốt 10I 180	Khớp Thép hình tổ hợp	Trọng lực và áp lực
5	Địa Lợi (Hà Tĩnh)	Cáp cứng xoắn trần 8 sợi $\Phi 56$	Gỗ	Dầm mềm liên tục 10I 230	Khớp Thép hình tổ hợp	Trọng lực và áp lực
6	Cửa Rào (Nghệ An)	Cáp cứng xoắn trần 8 sợi $\Phi 56$	Gỗ	Dầm mềm liên tục 3I 450+ 4I200	Khớp Thép hình tổ hợp	Trọng lực và áp lực
7	Cốc Pài (Hà Giang)	Cáp cứng xoắn kín 8 sợi $\Phi 42,5$	BTCT lắp ghép	Dầm mềm liên tục 6I 300	Ngàm BTCT đổ tại chỗ	Trọng lực và áp lực
8	Hang Tôm (Lai Châu)	Cáp mềm lõi hữu cơ 48 sợi $\Phi 42$	Gỗ	Dầm cứng liên tục Dàn thép T66	Ngàm BTCT đổ tại chỗ	Trọng lực và áp lực

2.2. THIẾT KẾ SƠ BỘ CẦU TREO DÂY VÕNG NÔNG THÔN

2.2.1. Các bước thiết kế cơ bản

Bước 1: Lựa chọn các tiêu chuẩn thiết kế cho cầu treo dây võng

Bước 2: Lựa chọn hợp lý khẩu độ cầu

Bước 3: Lựa chọn sơ đồ kết cấu hợp lý

Bước 4: Lựa chọn mũi tên võng f và kích thước sơ bộ của dây võng

Bước 5: Lựa chọn sơ bộ loại dầm cứng chọn sơ bộ giá trị EI

Bước 6: Lựa chọn sơ bộ kích thước dây treo và khoảng cách các dây treo

Bước 7: Đưa vào tính toán sơ bộ với các trường hợp tải trọng

Bước 8: Kiểm tra trạng thái ứng suất của dây nếu không vượt quá 0,56% khả năng thì đạt nếu không đạt thì làm lại bước 4

Bước 9: Kiểm tra cường độ của dầm nếu không đạt thì làm lại bước 5

Bước 10: Kiểm tra ổn định khí động học cầu

Ghi chú: Các bước 8, 9 được lặp đi lặp lại đến lúc đạt thì xong

2.2.2. Ví dụ thiết kế sơ bộ cầu treo dây võng nông thôn

Bước 1: Lựa chọn các tiêu chuẩn thiết kế cho cầu

Cầu treo dây võng nông thôn là một công trình trên tuyến giao thông nông thôn (GTNT) phục vụ cho nhu cầu dân sinh nông thôn trên địa bàn các xã, ấp, cụm dân cư. Đối tượng phục vụ chủ yếu là xe cơ giới có tải trọng nhỏ, xe thô sơ, xe súc vật hoặc chỉ đơn giản là xe hai bánh và người đi bộ. Từ thực tế đó, nhằm đảm bảo tính đồng bộ trong việc chọn quy mô kết cấu công trình trên tuyến và mối tương quan của hệ thống vận tải trong khu vực, cũng như trong khai thác sử dụng, phát huy cao nhất hiệu quả đầu tư xây dựng, việc xây dựng tiêu chuẩn kỹ thuật cho công trình GTNT nói chung và cầu nông thôn nói riêng là vấn đề có ý nghĩa đặc biệt quan trọng.

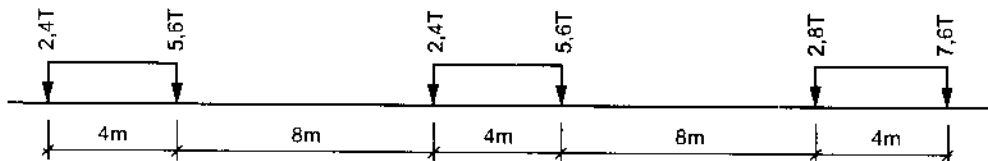
Căn cứ theo Tiêu chuẩn kỹ thuật, Quy trình thiết kế cầu, đường GTNT của Bộ GTVT và điều kiện thực tế về GTNT có thể đề ra 3 cấp hạng kỹ thuật cho cầu GTNT như sau:

Loại A:

- Dùng cho các xe cơ giới có tải trọng nhỏ (đoàn xe tiêu chuẩn H8), được khai thác đồng bộ với đường GTNT loại A.

- Xe cơ giới 8T xếp hàng một cách nhau 8m. Trong đoàn có một xe nặng 10,4T. Mỗi xe 8T có hai trục: trục trước nặng 2,4T, trục sau 5,6T, hai trục cách nhau 4m. Xe nặng có kích thước tương tự như xe thường nhưng có tải trọng tỉ lệ 1,3 (tương tự như đoàn xe tiêu chuẩn H8) kiểm toán với tải trọng bộ hành 300kG/m^2 (hình 2.20).

- Chiều rộng mặt cầu xe chạy 3,5m.



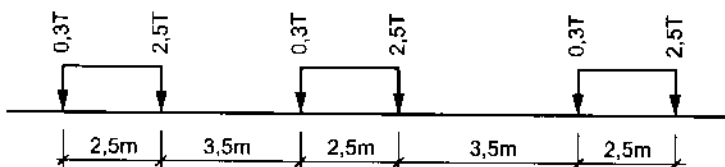
Hình 2.20. Đoàn xe cơ giới

Loại B:

- Dùng cho các xe thô sơ hay xe súc vật được khai thác đồng bộ với đường GTNT loại B.

- Xe thô sơ 2,8T, đi cách nhau 3,5m theo hàng một, trọng lượng mỗi xe 2,8T, có 2 trục: trục trước 0,3T, trục sau 2,5T; hai trục cách nhau 2,5m. Kết quả tính được kiểm toán với tải trọng bộ hành 300kG/m^2 (hình 2.21).

- Chiều rộng mặt cầu xe chạy 2,5m.



Hình 2.21
Đoàn xe thô sơ

Loại C:

- Dùng cho xe hai bánh và người đi bộ, được xây dựng phù hợp với cấp đường tương ứng.

- Cầu dân sinh áp dụng cho nông thôn chủ yếu phục vụ cho người đi bộ và các phương tiện xe đạp, xe máy, xe cải tiến và dự phòng lâu dài cho xe tải nhẹ, xe du lịch, xe máy nông nghiệp. Căn cứ vào mục tiêu khai thác trước mắt và định hướng phát triển lâu dài của khu vực mà chọn tải trọng thiết kế cho phù hợp đảm bảo yêu cầu “kinh tế - kỹ thuật”, có thể phân thành các loại tải trọng thiết kế như sau:

+ Tải trọng người đi bộ rải đều lấy bằng 150kg/m^2 .

+ Tải trọng xe máy, xe kéo lấy bằng 400kg/xe , khoảng cách trục $1,2\text{m}$, khoảng cách giữa các xe là 2m .

+ Xe du lịch, xe cải tiến, máy nông nghiệp tải trọng $1,5\text{T}$, khoảng cách trục $2,5\text{m}$ (trục trước 30% , trục sau 70%) qua cầu từng chiếc một.

Đối với những loại máy nông nghiệp chuyên dùng thì được căn cứ vào kích thước, tải trọng thực tế.

Nói chung, cần căn cứ vào điều kiện thực tế, nhằm tiết kiệm vật tư, giảm giá thành xây dựng. Ngoài ra còn căn cứ vào mật độ đi lại trên cầu, ... với chiều rộng các cầu đã được sử dụng phổ biến ở khu vực là: $1,0\text{m}$, $1,5\text{m}$, $2,0\text{m}$.

Kết luận:

- Căn cứ theo Quy trình 22TCN 210 - 92 về các tiêu chuẩn kỹ thuật thiết kế cầu-đường GTNT của Bộ GTVT.

- Căn cứ theo Quyết định số 2392/KHĐT ngày 12/9/1996 của Bộ GTVT về tiêu chuẩn kỹ thuật đối với cầu treo GTNT.

- Căn cứ đặc điểm cấu tạo, nguyên lý làm việc của cầu treo.

- Căn cứ điều kiện đặc thù khu vực: điều kiện địa chất - thủy văn và đặc biệt là nhu cầu lưu thông đường thủy.

- Căn cứ vào nhu cầu phát triển GTNT trong khu vực.

Trong ví dụ này sẽ chọn cầu treo có các thông số kỹ thuật chính sau đây:

+ Chiều rộng mặt cầu xe chạy 4m

+ Tải trọng thiết kế một xe 13 tấn hoặc người đi bộ 300kg/m^2 với 4 tổ hợp tải trọng chính:

Tổ hợp 1: Ô tô 13 tấn đặt tại vị trí $1/4$ nhịp.

Tổ hợp 2: Ô tô 13 tấn đặt tại vị trí $1/2$ nhịp.

Tổ hợp 3: Người xếp trên toàn bộ nhịp.

Tổ hợp 4: Người xếp trên $1/2$ nhịp.

Ngoài các trường hợp đang xét ta còn phải kể đến các loại tải trọng theo Tiêu chuẩn mới về thiết kế cầu 22TCN 272-01 như đối với dự án cầu Nhật Tân: hoạt tải HL-93

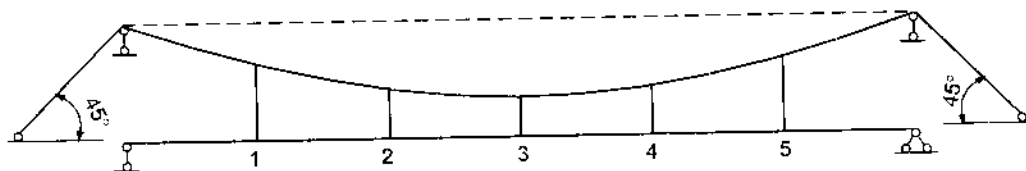
Bước 2: Lựa chọn khẩu độ cầu hợp lý

Trường hợp cầu nông thôn chủ yếu căn cứ vào cấu tạo mặt cắt ngang sông, điều kiện địa hình, địa chất thủy văn và tính không dưới cầu. Đối với các sông đã được phân cấp thì khổ giới hạn thông thuyền được xác định theo cấp sông như trên. Đối với các kênh rạch nội địa, khổ giới hạn thông thuyền được xác định theo các kích thước phương tiện giao thông đường thủy nội địa và nhu cầu thực tế của địa phương. Trong mọi trường hợp, chiều rộng thông thuyền không bé hơn 6m và chiều cao không bé hơn 1,5m. Mức nước thông thuyền được căn cứ vào mức nước sử dụng thường xuyên trong năm cũng như nhu cầu thực tế.

Trong ví dụ này ta chọn cầu có chiều dài 142m, nhịp chính dài 100m, hai nhịp biên mỗi nhịp dài 21m.

Bước 3: Lựa chọn sơ đồ kết cấu hợp lý

Sau khi phân tích ưu nhược điểm của từng loại trong ví dụ này quyết định chọn sơ đồ cầu treo dầm cứng có lực đẩy ngang, hai nhịp biên là hai dầm giản đơn. Cầu chính có dạng kết cấu như hình sau:



Hình 2.22. Sơ đồ kết cấu được lựa chọn

Bước 4: Lựa chọn mũi tên vông f và kích thước dây chính sơ bộ

Căn cứ vào kinh nghiệm chọn mũi tên độ vông $f = 10\text{m}$ nằm trong khoảng cho phép như đã nêu ở trên.

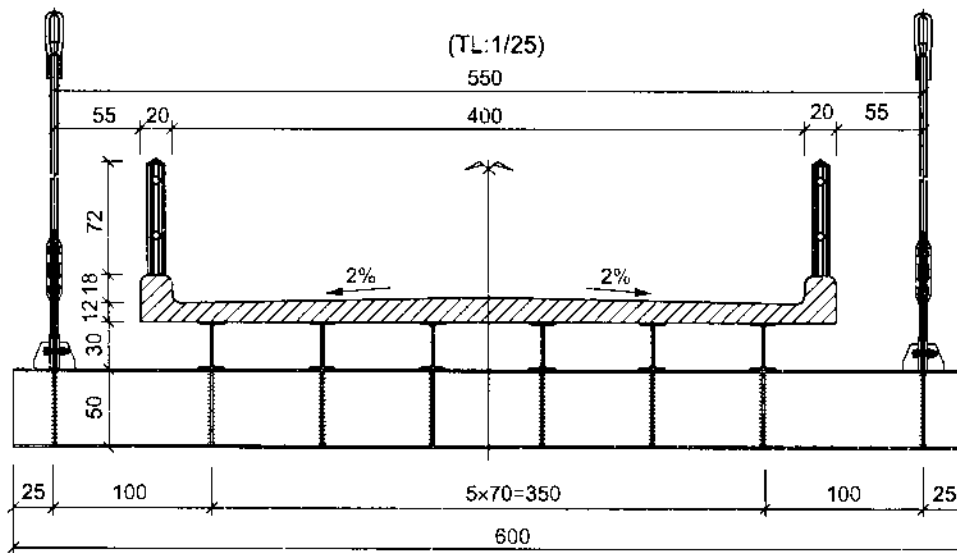
Chọn loại cáp chủ ở đây như sau: Cáp nhiều tào được bện từ nhiều sợi, thường là một tào lõi ở giữa đặt thẳng và 6 tào còn lại được bện xoắn xung quanh tào lõi. Mỗi tào gồm 37 sợi xoắn với chiều xoắn của tào cáp và sợi cáp ngược chiều nhau. Đặc điểm cấu tạo này là hạn chế biến dạng nên khi chịu tải biến dạng tương đối của cáp này thường bé hơn các loại cáp khác. Các thông số kỹ thuật chính của cáp nhiều tào như sau:

- + Cáp gồm 1 sợi lõi và 6 sợi xung quanh, mỗi sợi đều được cấu thành bởi 37 tào.
- + Đường kính ngoài của cáp 56,5mm
- + Trọng lượng đơn vị của cáp 12,25kg/m
- + Cường độ chịu kéo tiêu chuẩn 180kG/mm²
- + Lực kéo đứt tiêu chuẩn : 206T

Số lượng cáp trong một tổ hợp dây chủ tùy thuộc vào nội lực tính toán dây, chúng được bố trí thành từng sợi riêng biệt trong tổ hợp của mỗi mặt phẳng dây.

Bước 5: Lựa chọn sơ bộ loại dầm cứng chọn giá trị EJ

Trong ví dụ này chọn loại dầm cứng như hình vẽ sau: Ta có cấu tạo mặt cắt ngang có dạng dầm dọc kê trên dầm ngang. Dầm dọc là dầm I 300, dầm ngang là dầm I 500 do đó đặc trưng hình học được tính toán tương ứng với dầm này (*trong tài liệu này không nêu*).



Hình 2.23. Dạng mặt cắt ngang được lựa chọn

Bước 6: Lựa chọn sơ bộ kích thước dây treo và khoảng cách các dây treo

Thanh treo đứng được cấu tạo từ thép tròn hoặc sợi cáp. Nhưng thường đối với cầu GTNT có tải trọng nhỏ nên sử dụng thép tròn vừa đơn giản trong quá trình chế tạo vừa kinh tế hơn so với cáp sợi phải nhập ngoại. Tuy nhiên nếu dùng cáp sẽ có ưu điểm là cường độ sợi cáp cao hơn và tĩnh tải sẽ nhỏ hơn. Trong ví dụ này chọn thép thanh có đường kính 30mm và khoảng cách giữa các thanh treo là 4m.

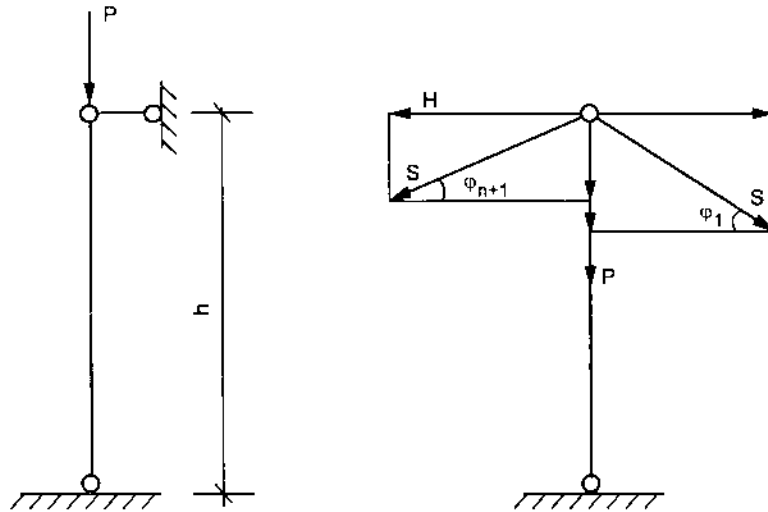
Bước 7: Đưa vào chương trình SAP 2000 để tính toán sơ bộ với các trường hợp tải trọng

Sau khi đã có đầy đủ các thông số đầu vào sẽ tiến hành mô hình hoá và tính toán bằng phần mềm SAP 2000 như đã được trình bày ở Chương sau hoặc thay số vào bảng tính EXCEL (xem phụ lục 1) hay chương trình Pascal (phụ lục 2), dùng lý thuyết “ Tính toán hệ treo theo sơ đồ biến dạng”

Sau khi tính toán xong các kết quả nội lực được đưa vào kiểm toán sơ bộ, nếu đạt thì sẽ tiến hành tính lại một lần nữa rồi mới dùng kết quả này để kiểm toán. Đối với dây treo chủ chỉ cần kiểm tra cường độ dây chịu kéo xem có vượt quá cường độ cho phép hay không. Đối với dầm cần kiểm toán như trường hợp cầu dầm liên hợp thông thường. Riêng tháp trụ và hệ thống neo được kiểm toán như sau:

Tính trụ tháp:

- Tải trọng tác dụng: là thành phần thẳng đứng của hợp lực dây chủ - dây neo.
- Sơ đồ tính: thanh hai đầu chốt, chịu tải trọng nén đúng tâm (hình 2.24).
- Nội dung: xác định một nội lực nén dọc trục tháp:

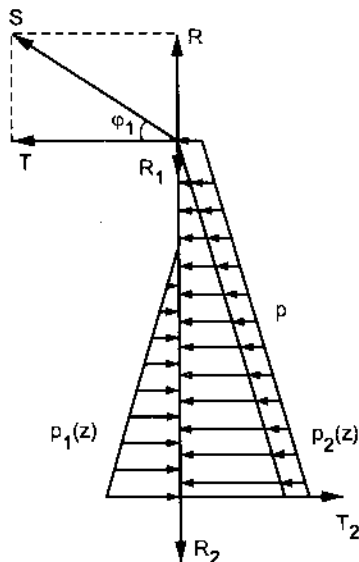


Hình 2.24: Sơ đồ tính trụ tháp

$$P = H(\operatorname{tg} \varphi_{n+1} + \operatorname{tg} \varphi_1)$$

Ngoài ra, kiểm toán các vấn đề sau: ổn định tổng thể, ổn định cục bộ, liên kết, khung cổng cầu, ...

Tính mố neo: (hình 2.25).



Hình 2.25: Sơ đồ tính toán mố neo

T : lực ngang dây neo

$P_2(z)$: áp lực chủ động sau mố

P : hoạt tải trên lăng thể trượt

R : lực đứng dây neo

T_2 : sức chịu lực ngang của cọc

$P_1(z)$: áp lực bị động trước mố

R_1 : thành phần tĩnh tải với nhịp biên

R_2 : tĩnh tải mố và vật liệu trên bản đáy

R_3 : sức chịu lực đứng của cọc

- Tải trọng tác dụng: Thành phần lực ngang (gây trượt) và lực đứng (gây nhổ) từ dây neo.

$$\begin{cases} T = S \cdot \cos \varphi_1 \\ R = S \sin \varphi_1 \end{cases}$$

Ngoài ra, như thông thường còn có áp lực đất đắp sau mố và hoạt tải trên lăng thể trượt.

- Sức kháng tải:

+ Kháng trượt:

- ♦ Sức kháng lực ngang của hệ cọc (T_2).

- ♦ Áp lực bị động của đất đắp trước mố.

+ Kháng nhổ:

- ♦ Thành phần tĩnh tải nhịp biên (R_1).

- ♦ Trọng lượng bản thân và vật liệu trên mố neo (R_2).

- ♦ Sức kháng lực đứng của hệ cọc (R_3).

Trường hợp đưa cả tháp vào sơ đồ tính toán thì cần lựa chọn trước các đặc trưng hình học của tháp, thường thì chọn theo tham khảo các đồ án đã thực hiện từ trước.

2.3. GIỚI THIỆU MỘT SỐ THÔNG SỐ KỸ THUẬT CỦA CÁC CẦU TREO DÂY VÒNG ĐÃ THIẾT KẾ

2.3.1. Dự án cầu treo Nhật Tân

A- Giới thiệu chung

Cầu Nhật Tân dự kiến vượt sông Hồng phía hạ lưu cầu Thăng Long khoảng 3,7km và thượng lưu cầu Long Biên và Chương Dương khoảng 8,3km và 8,9km. Vị trí này thuộc tuyến vành đai 2 nằm trong dự án tổng thể quy hoạch thành phố Hà Nội đến năm 2020. Phạm vi nghiên cứu bao gồm khu vực nằm giữa 2 bờ đê của sông Hồng tại vị trí quy hoạch dự kiến và khu vực phường Phú Thượng thuộc quận Tây Hồ phía bờ Nam và khu vực xã Vĩnh Ngọc cùng tuyến nối ra QL3 hướng bờ bắc thuộc huyện Đông Anh.

B- Tiêu chuẩn thiết kế kỹ thuật

- Khổ cầu:

- + Khổ cầu giai đoạn 1 gồm 4 làn xe cơ giới, 2 làn xe hỗn hợp và có thể bố trí vỉa hè cho người đi bộ.

- + Chiều rộng mặt cầu giai đoạn 1: $B = 24m$

- Hoạt tải:

- + HL - 93

- + Đoàn người 300 kG/cm^2

- Sơ đồ kết cấu nhịp

+ Chiều dài nhịp treo: $L_{nhịp chính} = 828m$

+ Chiều dài toàn cầu cả nhịp dẫn: $L_{cầu} = 3878m$

C- Quy trình áp dụng

Quy trình thiết kế cầu 22TCN 272-01, có tham khảo quy trình nước ngoài AASHTO, JIS

D- Tải trọng tác dụng

- Tính tải:

+ Bê tông cốt thép $2500kG/cm^3$

+ Thép hình thép bản $7850kG/cm^3$

- Hoạt tải thẳng đứng:

+ Hoạt tải HL-93 theo 22TCN 272-01

2.3.2. Cầu treo Thanh Thạch

A- Giới thiệu chung

Cầu treo Thanh Thạch bắc qua thượng nguồn sông Gianh nằm trên đường liên thôn thuộc xã Thanh Hoá huyện Tuyên Hoá tỉnh Quảng Bình. Cầu được xây dựng ở nơi có địa hình chênh cao khá lớn - đặc trưng của vùng đồi gò. Cầu Thanh Thạch nằm trên thượng nguồn sông Gianh, lòng sông sâu và dốc mực nước chênh lệch về mùa lũ và mùa khô rất lớn.

B- Tiêu chuẩn thiết kế kỹ thuật

- Khổ cầu:

+ Khổ cầu 4m không lề người đi

+ Chiều rộng mặt cầu cầu $B = 0,25m + 4m + 0,25m = 4,5m$

- Hoạt tải:

+ 1xe 13 tấn (xe nặng của đoàn xe H10) trong đó có tính đến hệ số xung kích.

+ Hoặc đoàn người $300kG/cm^2$.

- Sơ đồ kết cấu nhịp

+ Chiều dài nhịp treo: $L_{nhịp} = 120m$, mũi tên vông $f = 11,6m$

+ Chiều dài toàn cầu (tính đến hai đuôi neo) $L_{cầu} = 65,4 + 120 + 38m = 223,4m$

C- Quy trình áp dụng

Quy trình thiết kế cầu cống theo trạng thái giới hạn 22TCN 18-79, có tham khảo quy trình nước ngoài và kết quả nghiên cứu về cầu treo.

D- Tải trọng tác dụng

- Tính tải:

+ Bê tông cốt thép $2500kG/cm^3$

+ Thép hình thép bản $7850kG/cm^3$

- Hoạt tải thẳng đứng:
 - + 1xe 13T có tính hệ số xung kích
 - + Hoặc đoàn người 300kG/cm^2
- Tải trọng gió
 - + Khi cầu không có xe $W = 180\text{kG/m}^2$
 - + Khi có xe trên cầu $W = 50\text{kG/m}^2$

E- Vật liệu

- Cáp chủ:
 - + Dùng bó cáp lõi cứng mạ kẽm theo tiêu chuẩn Nhật JIS G3525-1977 bó cáp có đường kính danh định $D = 56\text{mm}$, cấp B có lực kéo đứt theo lý thuyết 217 T, trọng lượng đơn vị $12,89\text{ kG/m}$
 - + Cấu tạo bó cáp là 7tao x 37 sợi $(1 + 6 + 12 + 18)$
- Côn neo cáp:
 - + Côn neo cáp trong thiết kế dùng cho bó cáp có đường kính danh định $D = 56\text{mm}$. Sau khi thí nghiệm cáp có đường kính thực tế sai khác cần sửa lại kích thước côn neo cho phù hợp
 - + Vỏ neo dùng thép cacbon trung bình (thép C45)
 - + Nêm giữa và nêm cạnh dùng thép CT5
 - + Mặt bích dùng thép CT3
- Các loại thép hình thép bản:
 - + Dùng thép cacbon cán nóng có số hiệu M16C và CT3
- Bu lông:
 - + Đối với bu lông ở nút, con lăn sử dụng thép cacbon cán nóng lò Mac Tanh số hiệu CT5.
 - + Đối với bu lông tinh chế dùng thép hợp kim thấp.
- Vật liệu hàn:
 - + Khi hàn tay các cấu kiện thép có số hiệu M16C phải dùng que hàn E-42A hoặc tương đương.
- Cốt thép trong các cấu kiện bê tông và dây đeo:
 - + Các cốt thép chịu lực dùng thép cacbon cán nóng có gờ cấp AII có số hiệu CT5.
 - + Các cốt thép phân bố, cấu tạo có đường kính từ 10mm trở xuống và dây đeo dùng thép cán nóng tròn trơn cấp AI có số hiệu CT3.
- Bê tông:
 - + Bê tông dùng các loại xi măng poocăng lò quay PC30
 - + Bê tông hai hố neo mác M200#

- + Bê tông hộp bảo vệ neo, móng trụ và bản mặt cầu sử dụng mác M250#
- + Bê tông cọc khoan nhồi sử dụng mác M300#

F- Cường độ vật liệu

- Thép hình - Thép bản:

Bảng 2.3

Loại thép	Cường độ tính toán (kG/cm^2)	
	Khi kéo dọc trục R_0	Khi uốn R_u
Thép cacbon M16C	1900	2000
Thép cacbon BCT5	2000	2100
Thép cacbon BCT3	1900	2000

- Cáp lõi cứng mạ kẽm:
 - + Lực kéo đứt lý thuyết 1 bó bằng 217T
- Thép tròn:
 - + Loại AI, cán nóng, tròn trơn số hiệu CT3; $R_a = 1900 \text{ kG/cm}^2$
 - + Loại AII, cán nóng, có gờ, số hiệu CT5: $R_a = 2400 \text{ kG/cm}^2$
- Bê tông cốt thép:

Bảng 2.4

Loại cường độ	Kí hiệu	Mác bê tông		
		M200	M250	M300
Nén dọc trục	R_{up}	78	100	125
Nén khi uốn	R_u	97	125	150
Chịu kéo	R_0	6,5	8	9,5

G- Tính toán

Nội dung tính toán bao gồm:

- Tính toán nội lực và độ võng của hệ dây chủ, mặt cầu dưới tác dụng của tĩnh tải và hoạt tải thẳng đứng.
- Kiểm toán khả năng chịu lực của dây chủ, các mặt cắt của kết cấu chịu lực
- Tính cọc khoan, móng trụ và neo trọng lực BTCT
- Kiểm toán ổn định của hệ neo cáp
- Tính chiều dài cắt cáp, độ võng dây chủ trong các giai đoạn thi công, độ nghiêng của trụ cổng vào bờ (kết quả tính toán chính xác sẽ được cung cấp sau khi có cao độ thực tế của trụ, neo và các kết quả thử nghiệm cáp về độ giãn dãn, độ tụt côn neo cáp).

H- Đặc điểm cấu tạo của kết cấu nhịp

Kết cấu nhịp của cầu treo dây văng dầm mềm được cấu tạo như sau: bản mặt cầu được liên kết trên các dầm dọc, các dầm dọc kê trên các dầm ngang. Các dầm ngang được treo vào hệ cáp chủ thông qua các dây treo. Các sợi cáp chủ được ngàm chặt trên đỉnh trụ cổng và vào hai hố neo BTCT. Trụ cổng chân khớp truyền lực đứng từ hệ dây xuống móng.

+ H-1 Kết cấu nhịp cầu

Các thông số tính toán chính của cầu

- Chiều dài toàn cầu (tính đến hai đuôi neo, chưa có chiều dài):
- Chiều dài nhịp treo $L_{nhịp} = 120m$
- Chiều dài neo BTCT phía đầu trái của cầu: $L_{neo} = 15m$
- Chiều dài neo BTCT phía đầu phải của cầu : $L_{neo} = 12m$
- Độ vồng tĩnh của dây (do toàn bộ tĩnh tải) $f_0 = 11,6m$
- Độ dốc dọc cầu: $i = 2\%$
- Độ vồng tại giữa nhịp $f_v = 1,2m$
- Khoảng cách giữa tim hai cáp chủ $B = 5,5m$
- Chiều rộng mặt cầu $B_c = 4,0m$
- Chiều rộng gờ chắn bánh $B_l = 0,25m$
- Khoảng cách giữa các dầm ngang $d = 4m$

+ H-2 Bản mặt cầu BTCT lắp ghép

Mặt cầu được làm từ các bản BTCT lắp ghép dày 10cm trên có phủ lớp bê tông nhựa dày 3cm. Mặt cầu được liên kết với các dầm dọc bằng bê tông cốt liệu nhỏ thông qua các lỗ chờ ở bản. Lan can được làm bằng thép, cột lan can được thi công cùng với mỗi nối bản mặt cầu và hàn vào các bản thép chờ.

+ H-3 Dầm dọc

Dầm dọc nhịp treo gồm 7I 270 đỡ hệ mặt cầu và được liên kết với các dầm ngang. Tại hai đầu dầm dọc có hệ liên kết ngang bằng thép [200

+ H-4 Hệ giằng gió

Giằng gió được cấu tạo từ các thanh thép góc $L100 \times 100 \times 10$ dạng chữ X. Hệ giằng gió được liên kết với các dầm dọc và dầm ngang bằng bu lông.

+ H-5 Dầm ngang

Dầm ngang của cầu được chế tạo từ thép I 450, khoảng cách của chúng là 4,0m, chiều dài mỗi dầm là 6m. Các đầu dầm ngang có các chi tiết tai đeo để liên kết với các dây treo và hệ cáp chủ. Trên dầm ngang có các chi tiết để liên kết với dầm dọc.

+ H-6 Dây đeo thẳng đứng

Dây đeo làm từ các thanh thép tròn tròn đường kính 22mm và 24mm. Chiều dài của các sợi dây đeo được tính toán theo thiết kế. Dây truyền lực từ hệ mặt cầu thông qua các dầm ngang lên hệ cáp chủ thông qua liên kết kẹp cáp.

+ H-7 Hệ cáp chủ

Hệ cáp chủ gồm hai hệ dây, mỗi bên 4 bó cáp chủ $D = 56\text{mm}$. Cáp chủ khi căng xong có dạng Parabol. Độ vông của hệ cáp chủ sau khi lắp hết tĩnh tải là $f_0 = 11,6\text{m}$. Cáp chủ nhận lực thông qua các dây treo. Hệ cáp chủ được neo vào hai hố neo BTCT thông qua hệ thống côn neo cáp và được bắt chặt trên đỉnh trụ cổng. Tại hố neo cáp chủ được bố trí đối xứng với điểm được coi như là điểm gốc tìm cáp chủ giả định.

+ H-8 Côn neo cáp

Côn neo là bộ phận quan trọng của cầu dầm để liên kết hệ cáp chủ với hố neo. Côn neo cáp gồm vỏ neo được chế tạo từ thép CT5, các nêm cạnh và nêm giữa được chế tạo từ thép CT5, mặt bích được chế tạo từ thép CT3. Côn neo cáp trong thiết kế này được chế tạo cho hệ cáp chủ có đường kính $d = 56\text{mm}$ theo tiêu chuẩn Nhật JIS G 3525-1977. Côn neo cáp chỉ được chế tạo sau khi đã tiến hành thử nghiệm cáp và côn neo theo chỉ dẫn riêng.

+ H-9 Hố neo

Hố neo dạng trọng lực có thân neo làm bằng BTCT M200, thân neo là kết cấu chịu lực chính có các chi tiết để liên kết với côn neo cáp. Mỗi bên cáp có một hộp bảo vệ neo nhằm tránh mưa nắng ăn mòn các chi tiết quan trọng của cầu, hộp bảo vệ còn có bậc thang lên xuống để kiểm tra và bảo dưỡng neo, hộp bảo vệ neo bằng BTCT M250.

+ H-10 Trụ tháp cổng

Trụ cổng được chế tạo từ các thép I 550. Mỗi bên trụ cổng gồm hai nhánh, mỗi nhánh gồm hai thanh I 550 ghép với nhau bằng cách hàn các bản đệm. Hai nhánh trụ được liên kết với nhau bằng hệ liên kết ngang bằng thép [240 và $L100 \times 100 \times 10$. Trụ cổng làm việc như một thanh chân khớp theo phương dọc cầu. Các cáp chủ được bắt chặt trên đỉnh trụ và có hộp bảo vệ. Trụ cổng có chân đế khớp liên kết với đỉnh bệ trụ BTCT. Trụ cổng còn có hệ thống chống sét và thang sắt để kiểm tra.

I- Thi công lắp dựng

Việc thi công lắp dựng được thực hiện theo các bước chính sau:

Bước 1: Công tác chuẩn bị

Bước 2: Thi công trụ BTCT và hệ neo

Bước 3: Lắp dựng trụ cổng

Bước 4: Thi công hệ dây cáp chủ

Bước 5: Thi công dây đeo và dầm ngang

Bước 6: Lao lắp dầm dọc

Bước 7: Lắp bản mặt cầu

Bước 8: Lắp dựng lan can hoàn thiện công trình

2.3.3. Ví dụ cầu Cẩm Lương (ở huyện Cẩm Thủy - Thanh Hoá)

A. Quy mô kỹ thuật

- Cầu treo dây võng 3 nhịp.
- Sơ đồ nhịp: $(35+140+35)\text{m}$.
- Khổ cầu: $(2,5+2\times 0,3)\text{m}$.
- Tải trọng thiết kế: Xe chỉ huy 2,5T, kiểm toán với đoàn người 300kg/m^2 , không hệ số vượt tải.
- Tần suất thiết kế: $p = 1\%$.

B. Đặc điểm kết cấu

- Cáp chủ $4\phi 56\text{mm}/1$ bên, cáp phụ $1\phi 24/1$ bên.
- Dây đeo chính $2\phi 20/1$ bên, dây đeo phụ $\phi 20/1$ bên.
- Khoảng cách giữa các dây đeo 4m.
- Mặt cầu gỗ nhóm 3, dày 10 cm.
- Dầm dọc 6 I 240, dầm ngang I 300.
- Trụ cổng 2 I 550/1 nhánh.
- Trụ cầu BTCT M200, móng nông.
- Mố đá xây. Neo trọng lực BTCT.



Chương 3

PHÂN TÍCH, TÍNH TOÁN KẾT CẤU CẦU TREO DÂY VỒNG

Trong chương này giới thiệu tóm tắt lý thuyết “*Tính toán hệ treo theo sơ đồ biến dạng*”, qua đó xây dựng tóm tắt lý thuyết tính toán cầu treo dây vồng một nhịp. Cùng với lý thuyết tính toán trong chương này cũng giới thiệu lý thuyết tính dao động của cầu treo dây vồng một nhịp - Đồng thời cũng hướng dẫn sử dụng một chương trình tính toán kết cấu để phân tích kết cấu cầu treo dây vồng. Có rất nhiều chương trình để tính toán kết cấu nói chung và cầu treo dây vồng nói riêng, ở đây nêu ví dụ trình bày từng bước giải một bài toán cụ thể bằng chương trình SAP 2000 phiên bản 8.23 đang được sử dụng khá rộng rãi hiện nay. Chương trình này chỉ mang tính chất tham khảo cho việc sử dụng chương trình tính toán kết cấu trong tính toán cầu treo dây vồng.

3.1. LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN CẦU TREO MỘT NHỊP THEO SƠ ĐỒ BIẾN DẠNG

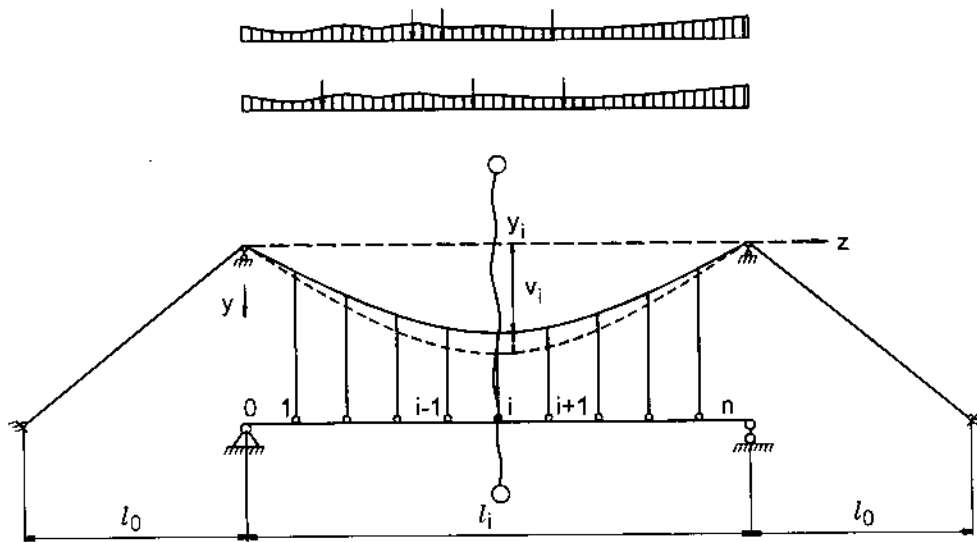
Phương pháp tính toán cầu treo theo sơ đồ biến dạng giới thiệu trong chương này được xây dựng trên cơ sở các giả thiết sau:

- Vật liệu đàn hồi và tuân theo định luật Hooke.
- Tải trọng tác dụng trên dây và trên dầm cứng là bất kỳ nhưng có phương thẳng đứng.
- Dây mềm có độ võng thoải do đó có thể bỏ qua chuyển vị theo phương dọc cầu của dây và của dầm.
- Liên kết thẳng đứng giữa dây và dầm coi như không dẫn.
- Tiết diện của dầm cứng có thể thay đổi nhưng không đổi trong phạm vi mỗi dốt (khoảng cách giữa các liên kết thẳng đứng).

Đây là những giả thiết thường được chấp nhận khi tính cầu treo dầm cứng.

Nội dung cách tính được xây dựng trên cơ sở quan niệm dây và dầm cứng là những hệ liên tục nhiều nhịp với các điểm tựa trung gian (các điểm nối với các liên kết thẳng đứng) có chuyển vị tương ứng bằng nhau.

3.1.1. Các trạng thái làm việc của kết cấu



Hình 3.1

Bài toán đặt ra là cần xác định các lực căng H trong dây cáp chính, giá trị mômen uốn M tại các mặt cắt của dầm và chuyển vị tương ứng của hệ.

Xét hệ treo gồm một dây dầm cứng 1 nhịp có n liên kết thẳng đứng như hình 3.1, hệ làm việc theo 2 trạng thái:

Trạng thái ban đầu: Dây chịu tải trọng của bản thân và của dầm (vì trong thực tế khi thiết kế cầu treo ta thường cho dây chịu toàn bộ tải trọng ban đầu cũng như dầm cứng chỉ chịu tải trọng cục bộ trong phạm vi từng dốt). Từ giả thiết ban đầu ta có được đường tên của dây.

Trạng thái tính toán: Hệ chịu thêm tải trọng bất kỳ.

Khi đó dây sẽ võng xuống một đoạn v_i tại các mắt. Từ giả thiết liên kết thẳng đứng giữa dây và dầm coi như không dẫn nên v_i cũng là chuyển vị tại mắt đó của dầm cứng.

Từ các trạng thái tính toán trên ta có thể lập được mối quan hệ giữa lực căng H , mômen uốn M và chuyển vị của dầm.

3.1.2. Tính nội lực độ võng của hệ qua các trạng thái làm việc

3.1.2.1. Tính toán đường tên ở trạng thái ban đầu

Lần lượt thực hiện các mặt cắt đứng qua các mắt (điểm nối các liên kết thẳng đứng với dây và dầm cứng), lấy cân bằng mômen ta sẽ lập được n điều kiện cân bằng viết dưới dạng ma trận như sau:

$$M_0^d - M_0 - H_0 Y = 0 \quad (3.1)$$

trong đó :

$$M_0^d = \{M_{01}^d \quad M_{02}^d \quad \dots \quad M_{0i}^d \quad \dots \quad M_{0n}^d\}$$

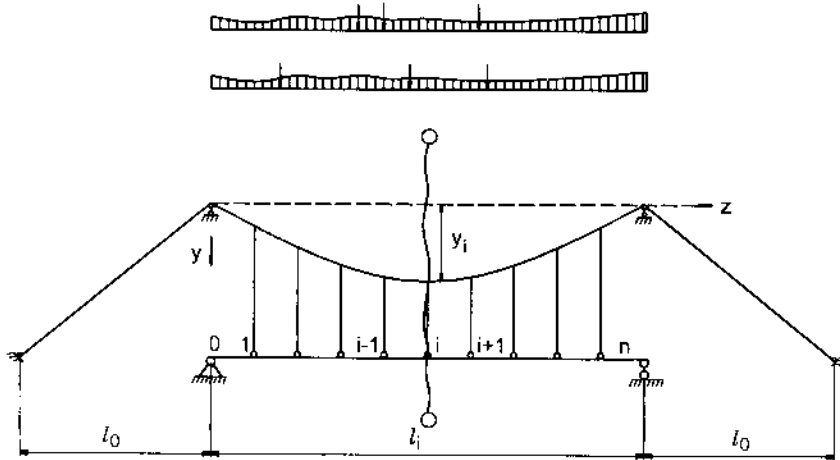
$$M_0 = \{M_{01} \quad M_{02} \quad \dots \quad M_{0i} \quad \dots \quad M_{0n}\}$$

$$Y = \{y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_i \quad \dots \quad y_n\}$$

M_{0i}^d - mômen uốn tải tiết diện i trong dầm giản đơn tương ứng có nhịp l chịu tác dụng đồng thời của các tải trọng ở trạng thái ban đầu.

M_{0i} - mômen uốn tải tiết diện i trong dầm cứng của hệ ở trạng thái ban đầu.

y_i - các tung độ thẳng đứng tại mắt thứ i của dây tính từ đường nối hai điểm tựa A, B của dây tương ứng.



Hình 3.2

Theo giả thiết bên trên, khi thiết kế cầu treo người ta thường cho dây chịu toàn bộ tải trọng ban đầu và dầm cứng chỉ chịu tải trọng cục bộ trong phạm vi từng đốt. Lúc này, các $M_{0i} = 0$, do đó điều kiện cân bằng (3.1) sẽ có dạng:

$$M_0^d - H_0 Y = 0 \quad (3.2)$$

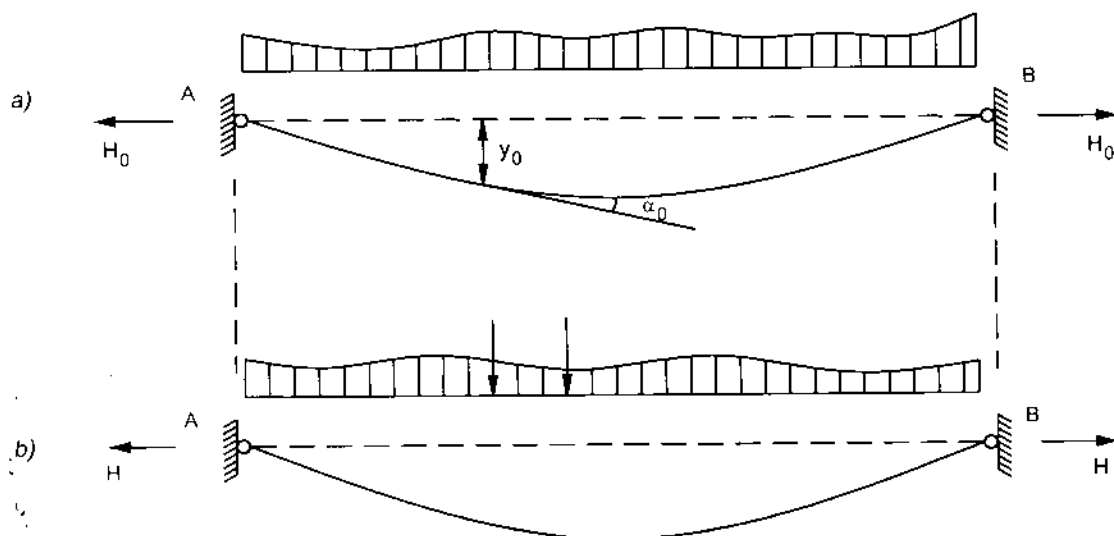
Cần tính các đại lượng H_0 , như ta đã biết (hình 3.3):

Giả sử biết trước độ võng ban đầu y_0 tại một điểm bất kỳ (thường là điểm giữa nhịp) trên dây, từ đó có thể xác định lực căng ban đầu H_0 . Xét mặt cắt tại điểm có độ võng y_0 và xét cân bằng mômen phía bên trái sẽ có :

$$H_0 = \frac{M_0^d}{y_0} \quad (3.3)$$

M_0^d - mômen uốn do tải trọng ở trạng thái ban đầu trong dầm giản đơn tương ứng tại tiết diện có độ võng ban đầu y_0 .

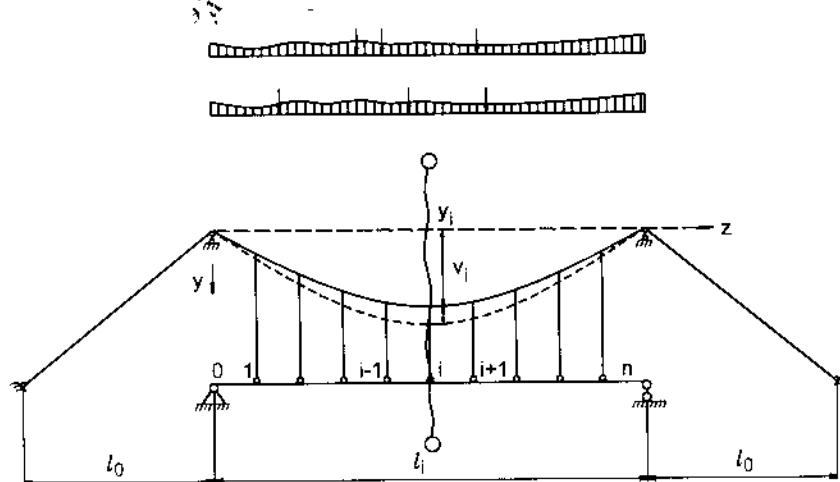
Từ đây sẽ xác định được đường tên ở trạng thái ban đầu.



Hình 3.3

3.1.2.2. Tính cho hệ dây và dầm ở trạng thái tính toán

3.1.2.2.1. Thiết lập mối quan hệ giữa lực căng H , mômen uốn trong dầm M và chuyển vị của dầm V (hình 3.4)



Hình 3.4

Lúc này dây và dầm cùng tham gia chịu tác dụng của tải trọng thêm thay đổi bất kỳ.

Dưới tác dụng của tải trọng nói trên, trong dây phát sinh các lực căng mới H còn trong dầm phát sinh các mômen uốn mới được biểu thị bằng ma trận cột M :

$$M = \{M_1 \quad M_2 \quad \dots \quad M_i \quad \dots \quad M_n\}$$

M_i - mômen uốn tại tiết diện i trong dầm cứng của hệ ở trạng thái tính toán.

Bỏ qua biến dạng đàn hồi của các liên kết thẳng đứng thì chuyển vị tại các mắt nằm trên cùng một đường thẳng đứng sẽ như nhau. Gọi V là ma trận cột biểu thị chuyển vị tại các mắt, ta có:

$$V = \{v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_i \quad \dots \quad v_n\}$$

v_i - chuyển vị thẳng đứng tại mắt i của dầm và của dầm cứng ở trạng thái tính toán.

Lần lượt thực hiện các mặt cắt đứng qua các mắt (điểm nối các liên kết thẳng đứng với dầm và dầm cứng), ta sẽ lập được n điều kiện cân bằng viết dưới dạng ma trận như sau:

$$M^d - M - H(\bar{Y} + V) = 0 \quad (3.4)$$

trong đó:

$$M^d = \{M_1^d \quad M_2^d \quad \dots \quad M_i^d \quad \dots \quad M_n^d\}$$

M_i^d - mômen uốn tại tiết diện i trong dầm giản đơn tương ứng có nhịp l chịu tác dụng đồng thời của các tải trọng ở trạng thái ban đầu và ở trạng thái tính toán.

Các ma trận $\bar{Y}$ biểu thị tung độ thẳng đứng tại mắt thứ i của dầm tính từ đường nối hai điểm A, B của dầm khi có xét đến chuyển vị cường bức thẳng đứng tại các điểm tựa.

$$\bar{Y} = Y - G_0 \bar{V}$$

$\bar{V}$ - các ma trận biểu thị chuyển vị cường bức thẳng đứng tại các điểm tựa A, B.

$$\bar{V} = \{v_0 \quad v_{n+1}\}$$

G_0 - ma trận biểu thị vị trí của các mắt, có cấu trúc như sau:

$$G_0 = \begin{bmatrix} \eta_1 & \xi_1 \\ \eta_2 & \xi_2 \\ \vdots & \vdots \\ \eta_i & \xi_i \\ \vdots & \vdots \\ \eta_n & \xi_n \end{bmatrix};$$

Với ξ_i và η_i lần lượt là tỷ số giữa khoảng cách từ mắt thứ i đến điểm tựa trái và điểm tựa phải so với chiều dài nhịp của hệ.

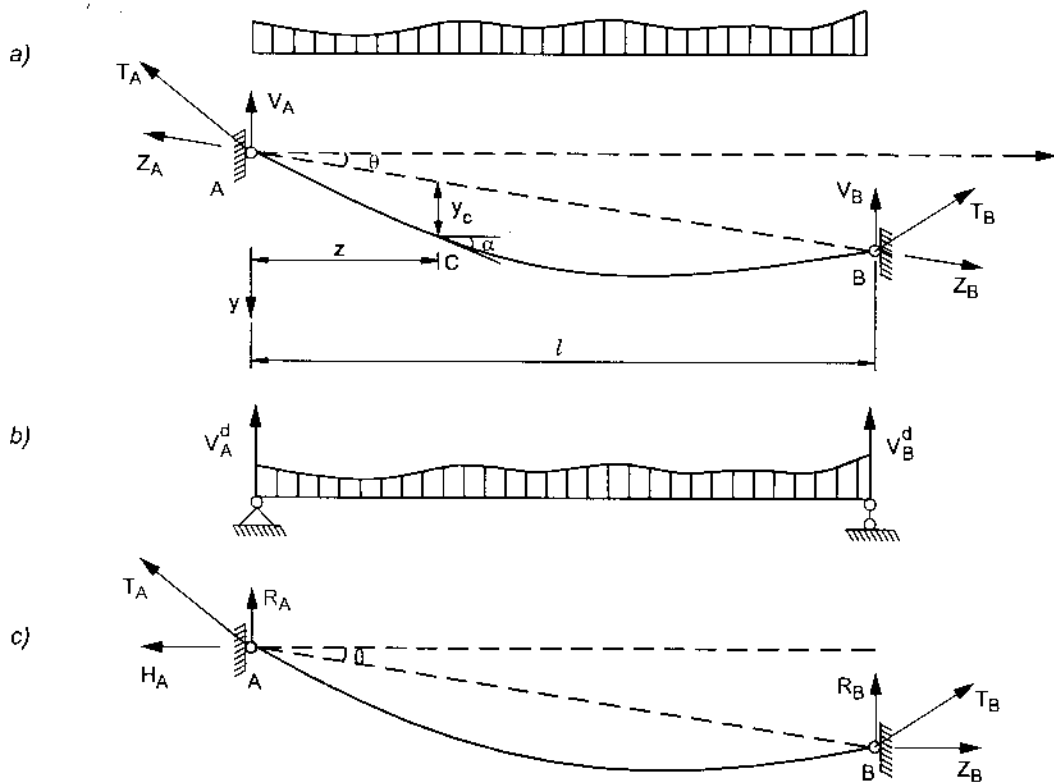
Suy ra:

$$V = \frac{1}{H} [M^d - M - H\bar{Y}] \quad (3.5)$$

Như vậy, nếu biết lực căng H trong dây và ma trận M thì có thể xác định được ma trận chuyển vị V .

3.1.2.2.2. Thiết lập mối quan hệ giữa lực căng H và chuyển vị V

Quan niệm mỗi dây là một dây mềm nhiều nhịp với các gối tựa trung gian có chuyển vị thẳng đứng được biểu thị bằng ma trận V ở cả giai đoạn ban đầu và tính toán. Cụ thể được diễn giải thông qua các mục: *cách tính hệ dây có cùng cao độ, cách tính hệ dây không cùng cao độ và tổng quát là cách tính hệ dây nhiều nhịp*. Với tư tưởng chủ đạo là tách riêng dây và dầm trên cơ sở chuyển vị của hai hệ này được liên hệ với nhau (trường hợp dây treo không dẫn thì hai chuyển vị này bằng nhau).



Hình 3.5

+ *Tính dây mềm có 2 điểm tựa A và B không trên cùng cao độ, chịu tải trọng thẳng đứng bất kỳ.*

Để xác định các đại lượng cơ bản ta vận dụng các phương trình cân bằng:

$$\sum Z = -Z_A \cos \theta + Z_B \cos \theta = 0 \rightarrow Z_A = Z_B = Z$$

$$\sum M_B = V_A^d l - \sum M_B(P) = 0 \rightarrow V_A^d = \frac{1}{l} \sum M_B(P)$$

$$\sum M_A = V_B^d l - \sum M_A(P) = 0 \rightarrow V_B^d = \frac{1}{l} \sum M_A(P)$$

trong đó:

$\sum M_B(P)$ và $\sum M_A(P)$ - lần lượt là tổng mômen đối với điểm tựa B và A của các tải trọng tác dụng trên dây.

V_A^d và V_B^d - được xác định giống như các phản lực gối V_A, V_B trong dầm giản đơn tương ứng có nhịp / chịu tải trọng như tải trọng tác dụng trên dây.

Thực hiện mặt cắt qua C và xét cân bằng của phần bên trái, ta được:

$$M_C = V_A^d Z - \sum M_C^r(P) - Z y_C \cos \theta = 0$$

$\sum M_C^r(P)$ - tổng mômen đối với điểm C của V_A và của các lực tác dụng trên phần bên trái mặt cắt qua C.

Gọi M_C^d là mômen uốn tại tiết diện C trong dầm giản đơn tương ứng, ta có:

$$M_C^d = V_A^d Z - \sum M_C^r(P)$$

Do đó, điều kiện $M_C = 0$ trở thành:

$$Z = \frac{M_C^d}{y_C \cos \theta}$$

Phân tích các lực T_A, T_B thành hai thành phần: H_A, H_B theo phương ngang z và R_A, R_B theo phương đứng y, dễ dàng suy ra:

$$H_A = H_B = H = Z \cos \theta = \frac{M^d}{y}$$

Ta thấy rằng thành phần H của lực kéo dọc trục tại tất cả mọi điểm trên dây đều như nhau

$$R_A = V_A^d + Z \sin \theta = V_A^d + H \operatorname{tg} \theta ; R_B = V_B^d - Z \sin \theta = V_B^d - H \operatorname{tg} \theta$$

Các phản lực toàn phần T_A, T_B được xác định:

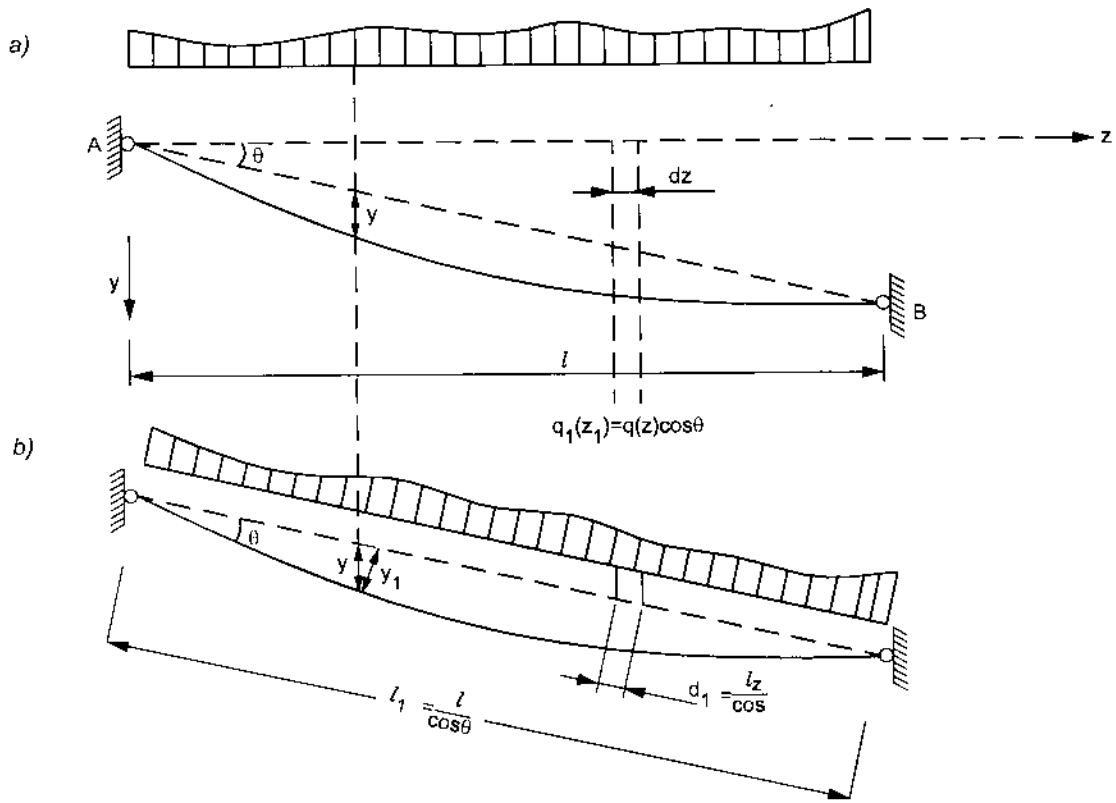
$$T_A = \sqrt{R_A^2 + H^2} ; T_B = \sqrt{R_B^2 + H^2}$$

Tiếp đó có thể tìm độ võng tại các điểm khác nhau trong công thức :

$$y^* = y + z \operatorname{tg} \theta = \frac{M^d}{H} + z \operatorname{tg} \theta \quad (3.6)$$

Lấy đạo hàm (3.6) theo z ta sẽ được công thức xác định góc nghiêng α của tiếp tuyến tại điểm bất kỳ trên dây so với phương ngang z :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{Q}{H} + \operatorname{tg} \theta \quad (3.7)$$



Hình 3.6

Phân tích tải trọng $q(z)$ thành hai thành phần:

+ $q_1(z)$ vuông góc với phương AB.

+ $q_2(z)$ song song với phương AB.

Giả thiết dạng hình học do đó chiều dài của dây được xác định chỉ do riêng thành phần $q_1(z)$ vuông góc với phương AB.

Chiều dài cong L của dây được xác định như sau :

$$L = \int_{l_1} ds = \int_{l_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_1}{dz_1}\right)^2} dz_1$$

Ta có thể tính gần đúng giá trị của L như sau :

$$L \approx \int_{l_1} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{dy_1}{dz_1}\right)^2} \right] dz_1 = l_1 + \frac{1}{2} \int_{l_1} \left(\frac{dy_1}{dz_1}\right)^2 dz_1$$

$$\frac{dy_1}{dz_1} = \operatorname{tg} \alpha(z_1) = \frac{Q_1^d(z_1)}{H_1}$$

thay vào biểu thức L, ta được :

$$L = l_1 + \frac{D}{2H_1^2} \quad (3.9)$$

với

$$D = \int_{l_1} Q_1^2 dz_1$$

Q_1 là lực cắt trong dầm đơn giản có nhịp l_1 , chịu tải trọng $q_1(z) = q(z)\cos\theta$.

Từ liên hệ vi phân giữa tải trọng và lực cắt, ta có:

$$dQ_1 = q_1(z)dz_1 = q(z)\cos\theta \cdot dz/\cos\theta = q(z)dz = dQ$$

Như vậy lực cắt Q_1 bằng lực cắt Q trong dầm đơn giản đơn có nhịp l , chịu tải trọng $q(z)$:

$$Q_1 = Q$$

Từ liên hệ vi phân giữa mômen uốn và lực cắt, ta có :

$$dM_1^d = Q_1 dz_1 = Q \frac{dz}{\cos\theta} = \frac{dM^d}{\cos\theta}$$

Do đó:
$$M_1^d = \frac{1}{\cos\theta} M^d$$

Lực căng H_1 trong dây có nhịp l_1 , chịu tải trọng $q_1(z)$ được biểu thị theo lực căng H trong dây có nhịp l , chịu tải trọng $q(z)$ như sau :

$$H_1 = \frac{M_1^d}{y_1} = \frac{M^d}{\cos\theta} \times \frac{1}{y \cos\theta} = \frac{1}{\cos^2\theta} \times \frac{M^d}{y} = \frac{1}{\cos^2\theta} H$$

Thay các đại lượng trên vào biểu thức chiều dài dây, ta có:

$$L = \frac{l}{\cos\theta} + \frac{\cos^3\theta}{2H^2} \int_0^l Q^2 dz$$

Hay:
$$L = \frac{l}{\cos\theta} + \frac{D \cos^3\theta}{2H^2} \quad (3.9)$$

Với
$$D = \int_0^l Q^2 dz$$

+ Tính dây mềm khi hai điểm tựa A, B không cùng cao độ, bị chuyển vị cưỡng bức và chịu tải trọng thẳng đứng bất kỳ.

Trạng thái ban đầu: Dây chịu tải trọng ban đầu và được treo vào hai điểm tựa A, B với độ võng f_0 tại điểm bất kỳ, tính từ đường nối AB.

Lực căng được xác định theo công thức (3.3):

$$H_0 = \frac{M_0^d}{f_0}$$

M_0^d - mômen uốn do tải trọng ở trạng thái ban đầu gây ra trong dầm giản đơn tương ứng, tại tiết diện có độ võng ban đầu f_0 .

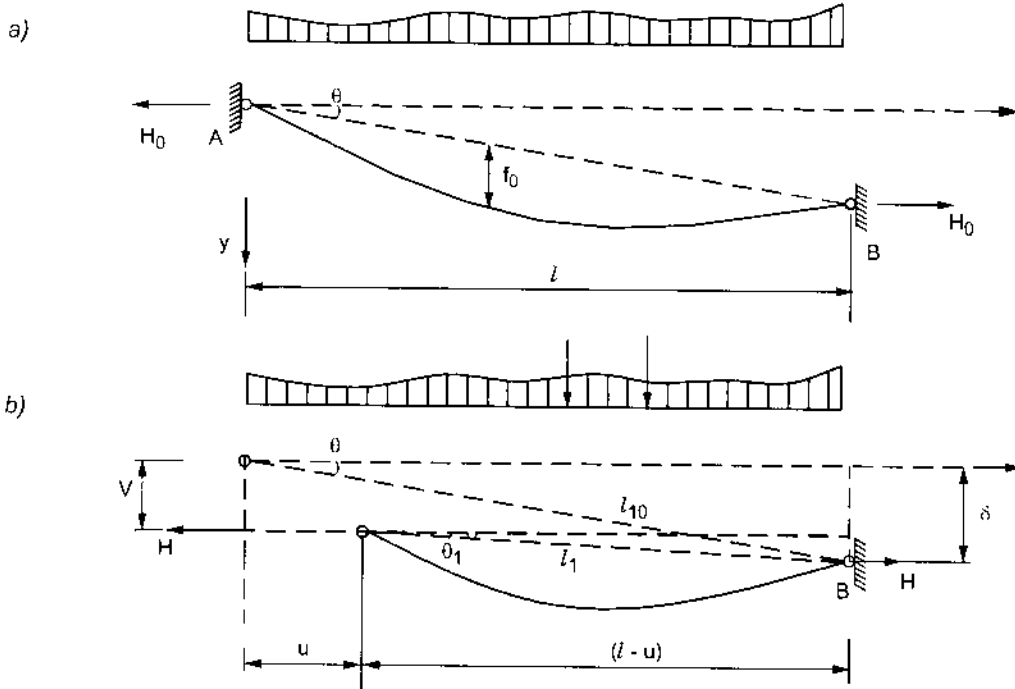
Chiều dài cong L_0 của dây ở trạng thái ban đầu được xác định theo (3.9):

$$L_0 = \frac{l}{\cos \theta} + \frac{D_0 \cos^3 \theta}{2H_0^2} \quad (3.10)$$

Với:

$$D_0 = \int_l Q_0^2 dz$$

Q_0 - lực cắt do tải trọng ở trạng thái ban đầu gây ra trong dầm giản đơn tương ứng.



Hình 3.7

Gọi L_0^* là chiều dài của dây với giả thiết dây không dãn, tức là không biến dạng đàn hồi, ta có :

$$L_0^* = L_0 - \lambda_0 \quad (3.11)$$

trong đó: λ_0 - biến dạng đàn hồi của dây ở trạng thái ban đầu.

Theo định luật Hooke:

$$\lambda_0 = \int_0^l \frac{T_0}{EA} ds = \frac{H_0}{EA} \int_0^l \frac{dz}{\cos^2 \alpha} = \frac{H_0}{EA} \int_0^l (1 + \tan^2 \alpha) dz,$$

trong đó:

A - diện tích tiết diện dây.

E - môđun đàn hồi khi kéo của vật liệu chế tạo dây.

T_0 - lực kéo dọc trục tại điểm có hoành độ z ở trạng thái ban đầu.

Từ (3.7), ta có: $\tan \alpha = \frac{Q_0}{H_0} + \tan \theta$

Do đó:
$$\lambda_0 = \frac{H_0}{EA} \left[\frac{1}{\cos^2 \theta} + \frac{2 \tan \theta}{H_0} \int_0^l Q_0 dz + \frac{1}{H_0^2} \int_0^l Q_0^2 dz \right]$$

Tích phân $\int_0^l Q_0 dz$ biểu thị tổng diện tích của biểu đồ lực cắt, hay nói khác đi là hiệu của mômen uốn tại hai đầu dầm đơn giản. Vì dây không tiếp nhận mômen tập trung nên mômen uốn ở hai đầu dầm luôn bằng 0; do đó kết quả tích phân này bằng 0 và biến dạng đàn hồi λ_0 được xác định như sau:

$$\lambda_0 = \frac{H_0 l}{EA \cos^2 \theta} + \frac{D_0}{EA H_0} \quad (3.12)$$

Thay vào (3.11) ta được :

$$L_0^* = \frac{l}{\cos \theta} + \frac{D_0}{2H_0^2} \cos^3 \theta - \frac{H_0 l}{EA \cos^2 \theta} - \frac{D_0}{EA H_0} \quad (3.13)$$

Trạng thái tĩnh toán: Giả sử dây chịu thêm tác dụng của các nguyên nhân sau:

- ✓ Tải trọng thay đổi.
- ✓ Các điểm tựa có chuyển vị cưỡng bức.
- ✓ Chuyển vị tương đối theo phương thẳng đứng y là $v = v_a - v_b$.

Quy ước xem chuyển vị tương đối v là dương khi độ chênh lệch về cao độ giữa hai điểm tựa A, B giảm; các chuyển vị tuyệt đối v_a, v_b là dương khi các điểm tựa A, B hướng theo chiều dương của trục y.

Chuyển vị tương đối theo phương z là $u = u_a - u_b$.

Quy ước xem chuyển vị tương đối u là dương khi chiều dài nhịp giữa hai điểm A, B là giảm; các chuyển vị tuyệt đối u_a, u_b là dương khi các điểm tựa A, B hướng theo chiều dương của trục z.

Dưới tác dụng của các nguyên nhân trên, dạng hình học của dây thay đổi, trong dây phát sinh lực căng mới ký hiệu là H.

Để thiết lập phương trình xác định lực căng H, trước tiên ta cần khảo sát chiều dài cong của dây ở trạng thái tính toán.

Từ (3.9) ta có:

$$L = \frac{l-u}{\cos \theta_1} + \frac{D}{2H^2} \cos^3 \theta_1 = l_1 + \frac{D}{2H^2} \cos^3 \theta_1 \quad (3.14)$$

Nếu xem u, v là nhỏ so với chiều dài nhịp và bỏ qua các đại lượng bé bậc cao đối với u/l_{10} và v/l_{10} so với đơn vị thì ta có thể xác định các đại lượng l_1 và $\cos \theta_1$ trong công thức trên như sau:

Tìm l_1 :

$$\begin{aligned} l_1 &= \sqrt{(\delta - v)^2 + (l - u)^2} = \sqrt{\delta^2 + v^2 - 2v\delta + l^2 + u^2 - 2ul} \\ l_1 &\approx l_{10} \left[l - 2 \frac{\delta v + ul}{l_{10}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \approx l_{10} \left[l - \frac{\delta v + ul}{l_{10}^2} \right] = l_{10} - v \frac{\delta}{l_{10}} - u \frac{l}{l_{10}} \\ &= \frac{l}{\cos \theta} - v \sin \theta - u \cos \theta \end{aligned}$$

Tìm $\cos \theta_1$:

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{l-u}{l_1} = l \left(1 - \frac{u}{l} \right) \frac{l}{l_{10}} \left[1 - \frac{v\delta + ul}{l_{10}^2} \right]^{-1} \approx \\ &\approx \frac{l}{l_{10}} \left(1 - \frac{u}{l} \right) \left[1 + \frac{v\delta + ul}{l_{10}^2} \right] \approx \cos \theta \left[1 + \frac{v\delta}{l_{10}^2} + \frac{ul}{l_{10}^2} - \frac{u}{l} \right] = \\ &= \cos \theta \left[1 + \frac{v}{l} \sin \theta \cos \theta + \frac{u}{l} (\cos^2 \theta - 1) \right] \\ \cos^3 \theta_1 &= \cos^3 \theta \left[1 + \frac{v}{l} \sin \theta \cos \theta - \frac{u}{l} \sin^2 \theta \right]^3 \\ &\approx \cos^3 \theta \left[1 + \frac{3v}{l} \sin \theta \cos \theta - \frac{3u}{l} \sin^2 \theta \right] \end{aligned}$$

Thay các số liệu tìm được vào (3.13) ta có:

$$L = \frac{l}{\cos \theta} - v \sin \theta - u \cos \theta + \frac{D \cos^3 \theta}{2H^2} + \frac{3D \cos^3 \theta}{2H^2 l} \sin \theta (v \cos \theta - u \sin \theta) \quad (3.15)$$

Gọi L^* là chiều dài của dây với giả thiết không dẫn, tức là không biến dạng đàn hồi, ta có:

$$L^* = L - \lambda_{dh} \quad (3.16)$$

trong đó: λ_{dh} - biến dạng đàn hồi của dây ở trạng thái tính toán.

Tương tự như (3.12), ta có:

$$\lambda_{dh} = \frac{H(l-u)}{EA \cos^2 \theta_1} + \frac{D}{EAH} \quad (3.17)$$

Thay các biểu thức (3.15), (3.17) vào (3.16), ta được:

$$L^* = \frac{l}{\cos \theta} - v \sin \theta - u \cos \theta + \frac{D \cos^3 \theta}{2H^2} + \frac{3D \cos^3 \theta}{2H^2 l} \sin \theta (v \cos \theta - u \sin \theta) - \frac{Hl}{EA \cos^2 \theta} \left[1 - \frac{v}{l} \sin 2\theta - \frac{u}{l} \cos 2\theta \right] - \frac{D}{EAH} \quad (3.18)$$

Chiều dài của dây với giả thiết dây không giãn phải bằng nhau với mọi trạng thái, do đó:

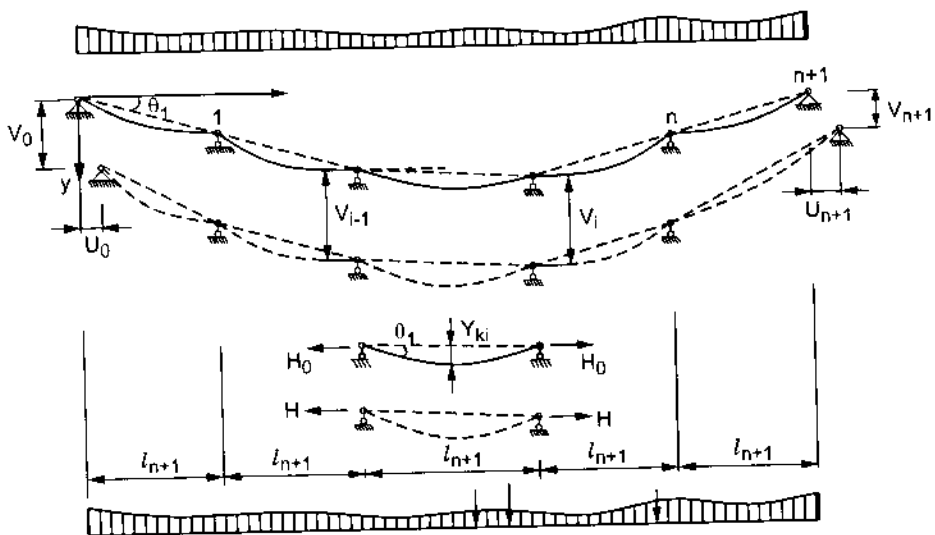
$$L^* = L_0^*$$

Biến đổi hai vế ta được:

$$\left[1 - \frac{v}{l} \sin 2\theta - \frac{u}{l} \cos 2\theta \right] H^3 + \left[\frac{EA D_0 \cos^5 \theta}{2l H_0^2} - H_0 - \frac{D_0 \cos^2 \theta}{l H_0} + \frac{EA}{l} (v \sin \theta \cos^2 \theta + u \cos^3 \theta) \right] H^2 + \frac{D \cos^2 \theta}{l} H - \frac{EA}{2l} D \cos^5 \theta \left[1 + 3 \frac{v}{l} \sin \theta \cos \theta - 3 \frac{u}{l} \sin^2 \theta \right] = 0 \quad (3.19)$$

Phương trình (3.19) dùng để xác định lực căng H ở trạng thái tính toán có tải trọng thay đổi.

+ Cách tính dây mềm nhiều nhịp



Hình 3.8

Khảo sát dây mềm có hai điểm tựa cố định ở hai đầu và có n gối trung gian là các gối di động. Số nhịp tương ứng của dây là $n+1$. Nếu gối trung gian là gối cố định thì nhịp đó coi như 1 nhịp độc lập hay một hệ nhiều nhịp khác độc lập.

Trạng thái ban đầu: Dây chịu tải trọng ban đầu thẳng đứng, trong dây phát sinh lực căng H_0 và dây có dạng hình học phù hợp với sơ đồ tải trọng ban đầu đã cho.

Vì tải trọng thẳng đứng cho nên sau khi thực hiện mặt cắt bất kỳ và từ điều kiện cân bằng dưới dạng hình chiếu của các lực lên phương z ta thấy:

$$H_0 = \text{const}$$

Cô lập nhịp bất kỳ thứ i , thay thế tác dụng của các đoạn dây thuộc nhịp thứ $(i-1)$ và thứ $(i+1)$ bằng các lực căng H_0 và áp lực thẳng đứng truyền vào gối. Vận dụng các điều kiện cân bằng ta có:

$$H_0 = \frac{M_{ki}^0}{y_{ki}^0}$$

trong đó:

y_{ki}^0 - độ võng tại điểm k thuộc nhịp thứ i ở trạng thái ban đầu [tính từ đường nối hai gối tựa thứ $(i-1)$ và thứ $(i+1)$].

M_{ki}^0 - mômen uốn tại tiết diện k trong dầm giản đơn tương ứng có nhịp l_i chịu các tải trọng ban đầu tác dụng trên nhịp thứ i .

Như vậy, nếu cho biết độ võng y_{ki}^0 tại một điểm bất kỳ thì ta có thể xác định được lực căng H_0 trong dây, tiếp đó xác định độ võng y_{mj}^0 và góc xoay α_{mj}^0 của tiếp tuyến tại điểm m bất kỳ trong nhịp thứ j như sau:

$$y_{mj}^0 = \frac{M_{mj}^0}{H_0} \quad ; \quad \text{tg} \alpha_{mj}^0 = \frac{Q_{mj}^0}{H_0}$$

Với M_{mj}^0 và Q_{mj}^0 - mômen uốn và lực cắt tại tiết diện m trong dầm đơn giản tương ứng có nhịp l_j chịu các tải trọng ban đầu tác dụng trên nhịp thứ j .

Chiều dài của đoạn dây trong nhịp thứ i ở trạng thái ban đầu được xác định giống (3.9), như sau:

$$L_{0i} = \frac{l_i}{\cos \theta_i} + \frac{D_{0i}}{2H_0^2} \cos^3 \theta_i \quad (3.20)$$

Với

$$D_{0i} = \int_l (Q_i^0)^2 dz$$

Q_i^0 - lực cắt trong dầm đơn giản tương ứng với nhịp thứ i do các tải trọng ban đầu gây ra.

Chiều dài không dẫn của đoạn dây trong nhịp thứ i ở trạng thái ban đầu được xác định giống (3.13) như sau:

$$L_{0i}^* = \frac{l_i}{\cos \theta_i} + \frac{D_{0i}}{2H_0^2} \cos^3 \theta_i - \frac{H_0 l_i}{EA \cos^2 \theta_i} - \frac{D_{0i}}{EAH_0} \quad (3.21)$$

Do đó, chiều dài không dẫn của toàn hệ dây ở trạng thái ban đầu sẽ là:

$$L_0^* = \sum_{i=1}^{n+1} L_{0i}^* = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos \theta_i} + \frac{l}{2H^2} \sum_{i=1}^{n+1} D_{0i} \cos^3 \theta_i - \frac{H_0}{EA} \sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos^2 \theta_i} - \frac{l}{EAH} \sum_{i=1}^{n+1} D_{0i} \quad (3.22)$$

Trạng thái tính toán: Giả sử dây chịu thêm các nguyên nhân sau:

- Tải trọng thay đổi bất kỳ trong các nhịp
- Các điểm tựa biên có chuyển vị cưỡng bức theo phương z và phương y :

Tại gối 0 : u_0, v_0

Tại gối $n + 1$: u_{n+1}, v_{n+1} .

- Các gối trung gian có chuyển vị cưỡng bức theo phương y là v_i (v_i hướng xuống dưới, theo chiều dương của trục y là dương).

Giả thiết bỏ qua ảnh hưởng của chuyển vị theo phương z (dọc theo chiều dài dây) tại các gối trung gian khi xác định chiều dài các nhịp.

Để xác định lực căng và dạng hình học của hệ dây ở trạng thái tính toán ta cần tìm chiều dài tương ứng của dây.

Chiều dài cong của đoạn dây trong nhịp thứ i ở trạng thái tính toán được xác định như sau:

$$L_i = \frac{l_i}{\cos \theta_i} + \frac{D_i \cos^3 \theta_i}{2H^2} - (v_{i-1} - v_i) \sin \theta_i - (u_{i-1} - u_i) \cos \theta_i \quad (3.23)$$

Với: $D_i = \int_0^{l_i} Q_i^2 dz$

Q_i - lực cắt trong dầm giản đơn tương ứng với nhịp thứ i do các tải trọng tổng cộng ở trạng thái ban đầu và trạng thái tính toán gây ra.

Chiều dài không dẫn của đoạn dây trong nhịp thứ i ở trạng thái tính toán được xác định giống (3.15), như sau:

$$L_i^* = \frac{l_i}{\cos \theta_i} + \frac{D_i \cos^3 \theta_i}{2H^2} - (v_{i-1} - v_i) \sin \theta_i - (u_{i-1} - u_i) \cos \theta_i - \frac{D_i}{EAH} - \frac{H l_i}{EA \cos^2 \theta_i} \quad (3.24)$$

Do đó, chiều dài không dẫn của toàn hệ dây ở trạng thái này sẽ là tổng các chiều dài L_i^* với $i = 1, 2, \dots, n + 1$ và được xác định như sau:

$$L^* = \sum_{i=1}^{n+1} L_i^* = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos \theta_i} + \frac{l}{2H^2} \sum_{i=1}^{n+1} D_i \cos^3 \theta_i - \sum_{i=1}^{n+1} (v_{i-1} - v_i) \sin \theta_i - \sum_{i=1}^{n+1} (u_{i-1} - u_i) \cos \theta_i -$$

$$- \frac{l}{EAH} \sum_{i=1}^{n+1} D_i - \frac{H}{EA} \sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos^2 \theta_i}$$

Các số hạng của công thức trên được biểu thị như sau:

$$\sum_{i=1}^{n+1} (v_{i-1} - v_i) \sin \theta_i = v_0 \sin \theta_1 + \sum_{i=1}^{n+1} v_i (\sin \theta_{i+1} - \sin \theta_i) - v_{n+1} \sin \theta_{n+1};$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} (u_{i-1} - u_i) \cos \theta_i = u_0 \cos \theta_1 + \sum_{i=1}^{n+1} u_i (\cos \theta_{i+1} - \cos \theta_i) - u_{n+1} \cos \theta_{n+1};$$

Từ giả thiết bỏ qua ảnh hưởng của chuyển vị theo phương z tại các gối trung gian, ta có:

$$\sum_{i=1}^{n+1} (u_{i-1} - u_i) \cos \theta_i = u_0 \cos \theta_1 - u_{n+1} \cos \theta_{n+1}$$

Thay các kết quả vừa biến đổi vào công thức L^* , ta được:

$$L^* = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos \theta_i} + \frac{l}{2H^2} \sum_{i=1}^{n+1} D_i \cos^3 \theta_i - (v_0 \sin \theta_1 - v_{n+1} \sin \theta_{n+1}) - \sum_{i=1}^{n+1} v_i (\sin \theta_{i-1} - \sin \theta_i) -$$

$$- (u_0 \cos \theta_1 - u_{n+1} \cos \theta_{n+1}) - \frac{l}{EAH} \sum_{i=1}^{n+1} D_i - \frac{H}{EA} \sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos^2 \theta_i} \quad (3.25)$$

Chiều dài của dây với giả thiết dây không dẫn phải bằng nhau với mọi trạng thái, do đó ta có điều kiện:

$$L^* = L_0^*$$

Sau khi biến đổi ta được phương trình xác định lực căng:

$$H^3 + \left[\mu + \omega \sum_{i=1}^n v_i (\sin \theta_{i+1} - \sin \theta_i) \right] H^2 + \lambda H - \gamma = 0 \quad (3.26)$$

trong đó:

$$\omega = \frac{EA}{L_n}; \quad \lambda = \frac{\omega}{EA} \sum_{i=1}^{n+1} D_i; \quad \gamma = \frac{\omega}{2} \sum_{i=1}^{n+1} D_i \cos^3 \theta_i;$$

$$\mu = \frac{\omega}{2H_0^2} \sum_{i=1}^{n+1} D_{0i} \cos^3 \theta_i - H_0 - \frac{\omega}{EAH_0} \sum_{i=1}^{n+1} D_{0i} + \omega [(v_0 \sin \theta_1 - v_{n+1} \sin \theta_{n+1}) +$$

$$+ (u_0 \cos \theta_1 - u_{n+1} \cos \theta_{n+1})]$$

Các đại lượng L_n , u_0 , u_{n+1} , L_l thay đổi theo dạng bài toán dây có hay không có dây neo.

Đại lượng	Hệ không có dây neo	Hệ có dây neo có dây chủ nối cố định với đỉnh tháp
L_n	$\sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos^2 \theta_i}$	$\sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos^2 \theta_i} + EA \left[\frac{l_a \cdot \cos \theta_1}{EA_a \cdot \cos^3 \theta_a} + \frac{l_b \cdot \cos \theta_{n+1}}{EA_b \cdot \cos^3 \theta_b} \right]$
u_0	u_0	0
u_{n+1}	u_{n+1}	0
Δs^*	Δs	$\Delta s + \left(\frac{\Delta s_a \cos \theta_1}{\cos \theta_a} + \frac{\Delta s_b \cos \theta_{n+1}}{\cos \theta_b} \right)$
L_l	$\sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos^2 \theta_i}$	$\sum_{i=1}^{n+1} \frac{l_i}{\cos^2 \theta_i} + \frac{l_a \cdot \cos \theta_1}{\cos^2 \theta_a} + \frac{l_b \cdot \cos \theta_{n+1}}{\cos^2 \theta_b}$ $-h_a (\sin \theta_1 - \operatorname{tg} \theta_a \cdot \cos \theta_1) + h_b (\sin \theta_{n+1} - \operatorname{tg} \theta_b \cdot \cos \theta_{n+1})$

Nếu gọi S là ma trận hàng gồm n cột với cấu trúc:

$$S = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_i \quad \dots \quad s_n], \text{ trong đó: } s_i = \sin \theta_{(i+1)} - \sin \theta_i,$$

Ta có:
$$\sum_{i=1}^n v_i (\sin \theta_{(i+1)} - \sin \theta_i) = SV$$

Do đó phương trình lực căng của dây sẽ có dạng:

$$H^3 + [\mu + \omega SV] H^2 + \lambda H - \gamma = 0 \quad (3.27)$$

3.1.2.2.3. Tìm mối quan hệ giữa mômen uốn trong dầm cứng M với chuyển vị V

Quan niệm dầm cứng là dầm liên tục, đặt trên các gối tựa trung gian có chuyển vị thẳng đứng được biểu thị bằng ma trận V đồng thời chịu các tải trọng trong giai đoạn ban đầu và tính toán. Nếu bỏ qua các đại lượng vô cùng bé bậc cao (> 2) thì có thể áp dụng phương trình ba mômen trong cơ học kết cấu cho trường hợp này. Đại lượng bé trong bài toán này là tỷ số giữa hiệu số chuyển vị của hai mắt lân cận so với chiều dài dốt. Sự bỏ qua các đại lượng bé bậc cao ở đây cũng phù hợp với việc bỏ qua các đại lượng bé bậc cao tương ứng trong bài toán dây.

Phương trình ba mômen viết dưới dạng ma trận có dạng:

$$A(M - M_0) + W - 6EI_0 BV = 0 \quad (3.28)$$

Các ma trận A, B, W trong (3.28) có cấu trúc như sau:

- $A = [a_{ik}]$, với $(i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, n)$

trong đó:

$$a_{i(i-1)} = \lambda_i; a_{ii} = 2(\lambda_i + \lambda_{i+1}); a_{i(i+1)} = \lambda_{i+1};$$

$a_{ik} = 0$ khi $k \leq i - 2$ và $k \geq i + 2$.

• $B = [b_{ik}]$, với $(i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, n)$

trong đó:

$$b_{i(i-1)} = -\frac{1}{l_i}; \quad b_{ii} = \frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i+1}}; \quad b_{i(i+1)} = -\frac{1}{l_{i+1}};$$

$$b_{ik} = 0 \text{ khi } k \leq i - 2 \text{ và } k \geq i + 2$$

• $W = \{W_1 \quad W_2 \quad \dots \quad W_i \quad \dots \quad W_n\};$

trong đó:

$$W_1 = 6EI_0 \left\{ \frac{\Omega_1 a_1}{l_1 EI_1} + \frac{\Omega_2 b_2}{l_2 EI_2} + v_0 \right\};$$

$$W_i = 6EI_0 \left\{ \frac{\Omega_i a_i}{l_i EI_i} + \frac{\Omega_{i+1} b_{i+1}}{l_{i+1} EI_{i+1}} \right\} \text{ khi } i = 2, 3, \dots, (n-1);$$

$$W_n = 6EI_0 \left\{ \frac{\Omega_n a_n}{l_n EI_n} + \frac{\Omega_{n+1} b_{n+1}}{l_{n+1} EI_{n+1}} + v_{n+1} \right\};$$

Trong các công thức trên:

l_i - chiều dài đốt thứ i ;

I_i, I_0 - mômen quán tính của tiết diện trong đốt thứ i và mômen quán tính quy ước (chọn tùy ý);

$\lambda_i = \frac{l_i I_0}{I_i}$ - chiều dài quy ước của đốt thứ i ;

Ω_i - diện tích biểu đồ mômen uốn trong dầm đơn giản có nhịp l_i do tải trọng tác dụng trên đốt thứ i của dầm cứng gây ra;

a_i, b_i - khoảng cách từ trọng tâm diện tích biểu đồ mômen uốn Ω_i đến mắt trái $(i-1)$ và mắt phải i ;

Ba phương trình (3.5), (3.27) và (3.28) là các phương trình cơ bản của hệ treo một dây dầm cứng, một nhịp.

$$V = \frac{1}{H} [M^d - M - H\bar{Y}]$$

$$H^3 + [\mu + \omega SV]H^2 + \lambda H - \gamma = 0$$

Thay (3.5) vào (3.27), sau khi biến đổi, ta được phương trình:

$$H^3(H-d) + [\mu H + c]H^2 + [\lambda H - \gamma]H - H^2 \omega SM = 0 \quad (3.29)$$

trong đó:

$$c = \omega.S.M^d;$$

$$d = \omega.S.\bar{Y};$$

Thay (3.5) vào (3.28), ta được:

$$A(M - M_0) + W - \frac{6EI_0}{H} B \left[M^d - M - H\bar{Y} \right] = 0 \quad (3.30)$$

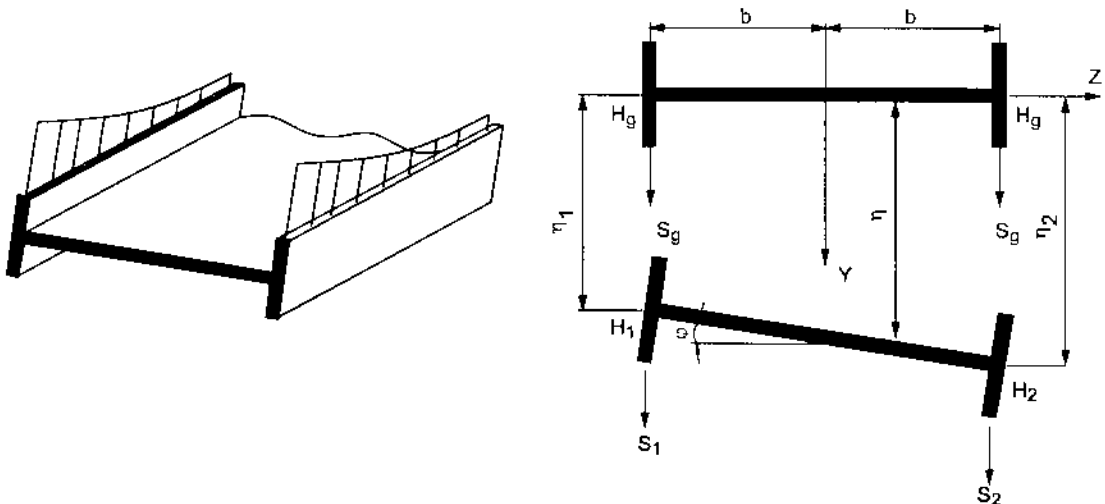
Nếu hệ có n liên kết thẳng đứng, ta sẽ lập được n phương trình (3.10) và phương trình (3.9) đủ để xác định n ẩn số M_i và ẩn số H .

Ứng với lý thuyết tính toán ở trên chúng ta có thể lập trình thành chương trình tính toán hoặc có thể lập bảng tính toán như ở phần phụ lục 1. Khi tính toán với lý thuyết trên phải chấp nhận một số giả thiết như vậy ngoài ra có thể sử dụng các phần mềm để mô hình hoá và tính toán cầu treo dây văng.

3.2. TÍNH DAO ĐỘNG CỦA CẦU TREO DÂY VĂNG

3.2.1. Thiết lập phương trình dao động của cầu treo dây văng

Khi nghiên cứu dao động của cầu treo dây văng, có thể đưa về mô hình hệ cấp -dầm (hình 3.9) gồm thanh mảnh (dầm cứng có tiết diện hở) nối với hai dây cáp parabol bằng các thanh treo thẳng đứng.



Hình 3.9. Mô tả sự làm việc không gian của cầu

Khảo sát tiết diện ngang dầm cứng của cầu treo (hình 3.9). Khi hệ dao động thì ngoài các ngoại lực (như lực gió...) trên tiết diện còn chịu tác dụng của các phản lực đàn hồi từ thanh treo $S(x)$. Do tiết diện của dầm thực hiện chuyển vị góc φ cho nên các phản lực

này xuất hiện tại hai bên thành dầm cứng sẽ khác nhau ($S_1 \neq S_2$) và do đó lực kéo ngang động trong hai dây cáp cũng khác nhau.

Thông thường dầm cứng sử dụng trong cầu có trục đối xứng OY, mặt khác nếu xem chuyển vị ngang theo phương Z là bé, có thể bỏ qua được thì sử dụng các phương trình dao động của thanh mảnh có thể viết được trong trường hợp này :

$$EJ_Z \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + S = P \quad (3.31a)$$

$$m_T + EJ_\Omega \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} - GJ_S \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + m.r^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = M \quad (3.31b)$$

$$\text{Với} \quad S = S_1 + S_2, m_T = b(S_2 - S_1), \eta_1 = \eta - b.\varphi, \eta_2 = \eta + b.\varphi \quad (3.32)$$

trong đó:

P và M - lực và mômen cường bức tác dụng trên tiết diện.

$J_Z = \int_A y^2 dA$ - mômen quán tính của tiết diện

$J_\Omega = \int_A \Omega^2 dA$ - mômen quán tính quạt của tiết diện (m^6)

J_S - mômen quán tính khi xoắn thuần túy

η - chuyển vị theo phương Oy

φ - góc xoay của tiết diện ngang

r - bán kính quán tính

A - diện tích mặt cắt

Ở trạng thái tĩnh hai dây cáp đối xứng, lực căng ngang tĩnh trong hai dây cáp bằng nhau và kí hiệu là H_g . Khi hệ dao động, lực căng ngang động của hai dây cáp là H_{1d} và H_{2d} . Nếu gọi q là trọng lượng trên một đơn vị dài của hệ (bao gồm cả trọng lượng của cáp và dầm), $y = y(x)$ là hàm biểu diễn hình dáng của dây cáp ở trạng thái tĩnh, thì dễ dàng nhận được mối quan hệ sau đây khi khảo sát cân bằng một phần tử dây cáp :

$$\text{- Trạng thái tĩnh:} \quad H_g \frac{d^2 y}{dx^2} = -q \text{ hoặc } H_g y'' = -q \quad (3.33)$$

- Trạng thái động

$$\begin{aligned} S_1 &= -(H_{1d} + H_g) \left(\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial x^2} \right) \\ S_2 &= -(H_{2d} + H_g) \left(\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{\partial^2 \eta_2}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (3.34a,b)$$

Thay các giá trị S_1, S_2 từ (3.34) vào (3.32) và kết hợp (3.33) với chú ý :

$$\frac{\partial^2 \eta_2}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + b \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}; \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - b \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (3.35)$$

sau khi bỏ số hạng phi tuyến sẽ nhận được :

$$S = -y''(H_{1d} + H_{2d}) - 2H_g \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (3.36)$$

$$m_T = b.y''(H_{1d} + H_{2d}) - 2b^2 H_g \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (3.37)$$

Mặt khác nếu qua sự biến dạng của thanh treo, sử dụng nguyên lý công khả dĩ đối với dây cáp ta sẽ có các mối quan hệ sau đây:

$$\begin{aligned} H_{1d} &= \frac{E_c F_c}{L_c} y'' \int \eta_1(x, t) dx = k \int \eta_1(x, t) dx \\ H_{2d} &= \frac{E_c F_c}{L_c} y'' \int \eta_2(x, t) dx = k \int \eta_2(x, t) dx \end{aligned} \quad (3.38)$$

Với L_c - chiều dài dây cáp giữa hai cột

$E_c F_c$ - độ cứng kéo của dây cáp

Thay (3.32) vào (3.38) có được:

$$\begin{cases} H_{1d} = k \int \eta(x, t) dx - kb \int \varphi(x, t) dx \\ H_{2d} = k \int \eta(x, t) dx + kb \int \varphi(x, t) dx \end{cases} \quad (3.39)$$

Các biểu thức (3.39) cho thấy H_{1d} và H_{2d} phát sinh là do đồng thời chuyển vị đứng η và chuyển vị xoay φ gây ra. Vậy nếu kí hiệu :

$$H_d^P = k \int \eta(x, t) dx; \quad H_d^M = kb \int \varphi(x, t) dx \quad (3.40)$$

thì (3.39) có thể viết được:

$$H_{1d} = H_d^P - H_d^M; \quad H_{2d} = H_d^P + H_d^M \quad (3.41)$$

$$\text{Do đó:} \quad H_{1d} - H_{2d} = -2H_d^M; \quad H_{1d} + H_{2d} = 2H_d^P \quad (3.42)$$

Thay biểu thức (3.42) vào (3.36) và (3.37) có:

$$S = -2y''H_d^P - H_g \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (3.43)$$

$$m_T = 2b.y''H_d^M - 2b^2 H_g \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (3.44)$$

Cuối cùng thay m_T và S vào (3.31) thì được hệ phương trình dao động uốn - xoắn của hệ:

$$EJ_z \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - 2y'' H_d^P - 2H_g \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = P \quad (3.45a)$$

$$EJ_\Omega \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} - (GJ_s + 2b^2 H_g) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - 2by'' H_d^M + mr^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = M \quad (3.45b)$$

Trong trường hợp lực cưỡng bức là tải trọng gió thì trong các phương trình 3.45 lực P gọi là lực nâng; M là mômen khí động. Các đại lượng này là hàm số của vận tốc gió của các chuyển vị φ , η và các đạo hàm của chúng. Vì vậy khi xét dao động khí động của cầu treo ta được hai phương trình phụ thuộc lẫn nhau.

3.2.2. Tính tần số dao động uốn

Phương trình dao động riêng uốn và dao động riêng xoắn của hệ sẽ nhận được khi $P = 0$ và $M = 0$. Lúc đó hai phương trình (3.45) là độc lập nhau. Vì hai phương trình có dạng giống nhau nên ở đây chỉ trình bày cách giải phương trình dao động uốn.

Phương trình dao động uốn của cầu treo (hệ cáp-dầm) được viết:

$$\frac{q}{g} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + EJ_z \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} - H_g \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{q}{H_g} H_d^P = 0 \quad (3.46)$$

Mặt khác ta có thể đặt :

$$\eta(x,t) = X(x)T(t) \quad (3.47a)$$

$$H_d^P = H_d T(t) \quad (3.47b)$$

Khi đó từ (3.40) ta có:

$$H_d = \frac{qE_c F_c}{L_c H_g} \int X dx \quad (3.48)$$

Với chú ý $\int X dx$ sẽ thực hiện đối với tất cả nhịp cầu.

Thay biểu thức (3.47) vào (3.46) ta được phương trình biên độ:

$$EJ_z X^{IV} - H_g X'' - \frac{q}{g} \omega^2 X + \frac{q}{H_g} H_d = 0 \quad (3.49)$$

Phương trình vi tích phân (3.49) có nghiệm tổng quát dạng:

$$X = C_1 \sin \lambda_2 x + C_2 \cos \lambda_2 x + C_3 \operatorname{sh} \lambda_1 x + C_4 \operatorname{ch} \lambda_1 x + \frac{g H_d}{\omega^2 H_g} \quad (3.50)$$

trong đó:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \sqrt{\frac{\gamma^2}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^4}{4} + k^4}}; & \lambda_2 &= \sqrt{-\frac{\gamma^2}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^4}{4} + k^4}} \\ k &= \sqrt{\frac{q\omega^2}{gEJ_z}}; & \gamma &= \sqrt{\frac{H_g}{EJ_z}}\end{aligned}\quad (3.51)$$

Để xác định các hằng số tích phân, tiến hành xét trường hợp cụ thể (*dầm một nhịp*) sau đây:

+ *Đối với các dao động đối xứng* :

sử dụng các điều kiện biên:

$$X(0) = X''(0) = 0 \text{ và } X(l) = X''(l) = 0$$

Thì từ (3.50) ta biểu diễn được bốn hằng số tích phân theo H_d

$$\begin{aligned}C_1 &= -\frac{gH_d}{\omega^2 H_g} \cdot \frac{Z+1}{2Z} \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 l}{2} \\ C_2 &= -\frac{gH_d}{\omega^2 H_g} \cdot \frac{Z+1}{2Z}\end{aligned}\quad (3.52)$$

$$C_3 = \frac{gH_d}{\omega^2 H_g} \cdot \frac{Z-1}{2Z} \operatorname{th} \frac{\lambda_1 l}{2}$$

$$C_4 = -\frac{gH_d}{\omega^2 H_g} \cdot \frac{Z-1}{2Z}$$

$$Z = \frac{2}{\gamma^2} \sqrt{\frac{\gamma^4}{4} + k^4} = \frac{2\lambda_2^2 + \gamma^2}{\gamma^2} = \frac{2\lambda_1^2 - \gamma^2}{\gamma^2} \quad (3.53)$$

Thay (3.52) vào (3.50) được biểu thức $X(x)$ rồi thay vào (3.48), sau khi thực hiện tích phân và chia cho H_d ta được phương trình tần số:

$$\frac{\gamma l}{\sqrt{2}} Z - \frac{Z+1}{\sqrt{Z-1}} \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 l}{2} - \frac{Z-1}{\sqrt{Z+1}} \operatorname{th} \frac{\lambda_1 l}{2} - \frac{L_c}{E_c F_c} \frac{\gamma^2 l^2 H_g^2}{32 \sqrt{2} q f} Z(Z-1) = 0 \quad (3.54)$$

với f : độ võng điểm giữa của dầm

Bằng phương pháp thử dần, ta tìm được tần số dao động đối xứng, sau đó thay (3.53) vào (3.50) sẽ được hàm dao động riêng:

$$X = \frac{32f}{\gamma^2 l^2 (Z^2 - 1)} \frac{H_d}{H_g} \left[1 - \frac{Z+1}{2Z} \frac{\cos \lambda_2 \left(\frac{l}{2} - x \right)}{\cos \frac{\lambda_2 l}{2}} - \frac{Z-1}{2Z} \frac{\operatorname{ch} \lambda_1 \left(\frac{l}{2} - x \right)}{\operatorname{ch} \frac{\lambda_1 l}{2}} \right] \quad (3.55)$$

+Đối với các dao động phản đối xứng:

Trong các dao động phản xứng vì $H_d' = 0$ nên $H_d = 0$ từ đó biểu thức (3.50) có dạng

$$X = C_1 \sin \lambda_2 x + C_2 \cos \lambda_2 x + C_3 \operatorname{sh} \lambda_1 x + C_4 \operatorname{ch} \lambda_1 x \quad (3.56)$$

Với các điều kiện biên:

$$X(0) = X''(0) = 0 \text{ và } X\left(\frac{l}{2}\right) = X''\left(\frac{l}{2}\right) = 0$$

$$\text{sẽ được phương trình tần số } \sin \frac{\lambda_2 l}{2} = 0 \quad (3.57)$$

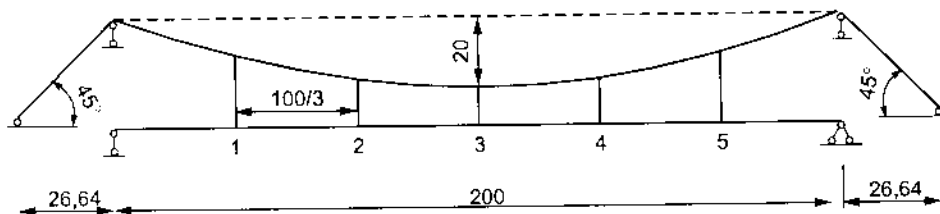
$$\text{Do đó } \lambda_2 l = n\pi \quad (n = 2, 4, 6, \dots) \quad (3.58)$$

$$\text{Từ (3.51) có: } \omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{g}{q} \left(EJ_z + \frac{H_g l^2}{n^2 \pi^2} \right)} \quad (3.59)$$

3.3. VÍ DỤ TÍNH TOÁN CẦU TREO DÂY VÔNG BẰNG SAP 2000

Như đã trình bày ở trên để tính toán được nội lực của cầu treo dây võng hay tần số dao động riêng của cầu treo dây võng chỉ một nhịp thôi đã rất phức tạp. Nên trong chương này giới thiệu với tính chất tham khảo việc tính toán cầu treo dây võng bằng SAP 2000. Để tiện theo dõi trong mục này sẽ đi vào việc giải quyết một bài toán cụ thể như sau:

Bài toán : “ Xét cầu treo một dây dầm cứng có dạng như hình 3.10 dưới đây. Cho biết: độ cứng của dầm cứng $EJ = \text{const} = 44.10^6 \text{Tm}^2$; dây có diện tích tiết diện $F_c = 0,1 \text{m}^2$, độ cứng $E_c F_c = 1,8333.10^6 \text{T}$, trọng lượng đơn vị $g = 0,78 \text{T/m}$.



Hình 3.10

Ở trạng thái ban đầu, dây chịu toàn bộ trọng lượng mặt cầu và dầm cứng là tĩnh tải phân bố đều với cường độ $q = 11,22 \text{T/m}$.

Yêu cầu xác định nội lực và chuyển vị của cầu treo khi dầm chịu thêm tải trọng tạm thời, phân bố đều với cường độ $p = 6T/m$.

Để giải bài toán này bằng *SAP 2000* cần thực hiện những bước sau :

- + Lập sơ đồ kết cấu
- + Khai báo các đặc trưng hình học
- + Gán tải trọng lên kết cấu
- + Tính toán và xuất kết quả

3.3.1. Lập sơ đồ kết cấu

3.3.1.1. Lập sơ đồ kết cấu từ *Excel*

Phương trình dầm võng là phương trình Parabol bậc 2 nên việc mô hình hoá trong *EXCEL* trước rồi *copy* sang *SAP 2000* là hợp lý nhất. Các bước làm cụ thể như sau:

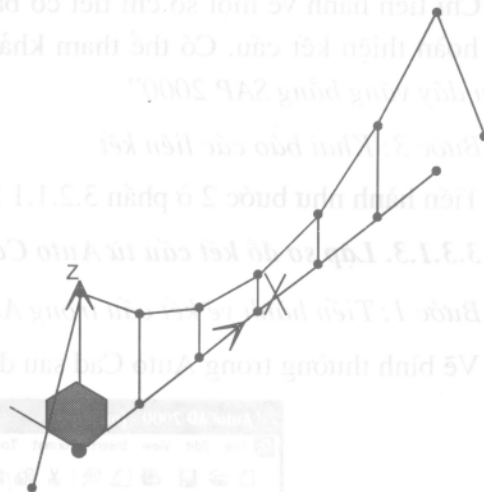
Bước 1: Xác định các điểm nút và tọa độ các điểm nút tương ứng như bảng sau:

TYPE	NAME	XI	YI	ZI	XJ	YJ	ZJ
LINE	1	-26.64	0	0	0.00	0	86.67
LINE	2	0.00	0	86.67	33.33	0	49.63
LINE	3	33.33	0	49.63	66.67	0	27.41
LINE	4	66.67	0	27.41	100.00	0	20
LINE	5	100.00	0	20	133.33	0	27.41
LINE	6	133.33	0	27.41	166.67	0	49.63
LINE	7	166.67	0	49.63	200.00	0	86.67
LINE	8	200.00	0	86.67	226.64	0	0
LINE	9	0.00	0	0	33.33	0	0
LINE	10	33.33	0	0	66.67	0	0
LINE	11	66.67	0	0	100.00	0	0
LINE	12	100.00	0	0	133.33	0	0
LINE	13	133.33	0	0	166.67	0	0
LINE	14	166.67	0	0	200	0	0
LINE	15	33.33	0	0	33.33	0	49.63
LINE	16	66.67	0	0	66.67	0	27.41
LINE	17	100.00	0	0	100.00	0	20
LINE	18	133.33	0	0	133.33	0	27.41
LINE	19	166.67	0	0	166.67	0	49.63

Sau chuẩn bị xong số liệu tiến hành *copy* và *pase* vào trong *SAP*, được hình 3.11 sau:

Bước 2 : Khai báo các liên kết

Sau đó tiến hành gán các liên kết với đất, đây là bước rất quan trọng quyết định để mô hình hoá chính xác kết cấu. Các liên kết của dầm với đất được khai báo hoàn toàn giống như được trình bày ở tài liệu [1] “Phân tích kết cấu cầu cong và cầu dầm văng bằng Sap2000”. Các liên kết của cáp với đất được chọn như là gối cố định khi mô hình hoá trong SAP 2000. Tại vị trí dây vất qua đỉnh cột tháp được coi như là gối di động khi mô hình hoá trong SAP 2000.



Hình 3.11

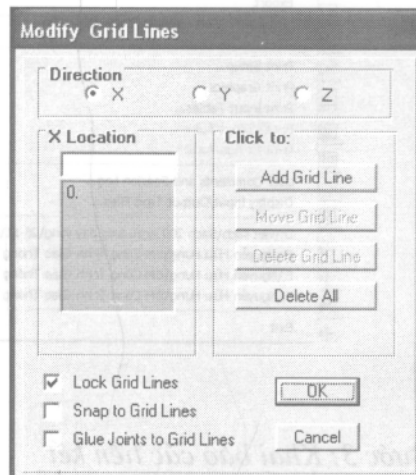
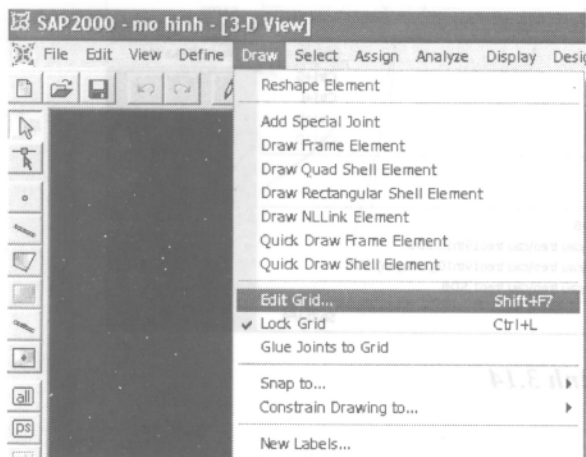
Đối với các liên kết trong bản thân kết cấu tiến hành khai báo như sau: Các dây

treo được khai báo là các phần tử *Frame* có hai đầu được giải phóng liên kết (mômen, lực cắt, mômen xoắn) coi như một thanh hai đầu chốt. Dầm được coi là một thanh liên tục, (tại các vị trí liên kết giữa dây treo và dầm không bị giải phóng liên kết). Đối với dây văng do sự làm việc của dây không có mômen tại các vị trí treo dây treo vào dầm cho nên tại các vị trí treo dây cần giải phóng liên kết (mômen uốn, lực cắt, mômen xoắn).

3.3.1.2. Lập sơ đồ kết cấu trực tiếp trong SAP 2000

Bước 1: Tiến hành tạo lưới

Tiến hành tạo lưới sao cho nút của các phần tử phải thuộc nút lưới sau đó dùng các chức năng do SAP 2000 hỗ trợ để hoàn thiện kết cấu. Dưới đây là các bước vẽ lưới (hình 3.12):



Hình 3.12

Bước 2: Tiến hành vẽ kết cấu

Chỉ tiến hành vẽ một số chi tiết cơ bản sau đó sử dụng các chức năng của SAP 2000 để hoàn thiện kết cấu. Có thể tham khảo thêm ở cuốn “*Phân tích kết cấu cầu cong và cầu dây văng bằng SAP 2000*”

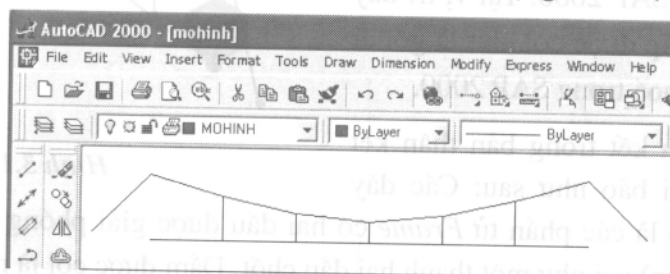
Bước 3: Khai báo các liên kết

Tiến hành như bước 2 ở phần 3.2.1.1 Lập sơ đồ kết cấu từ EXCEL.

3.3.1.3. Lập sơ đồ kết cấu từ Auto Cad

Bước 1: Tiến hành vẽ kết cấu trong Auto Cad

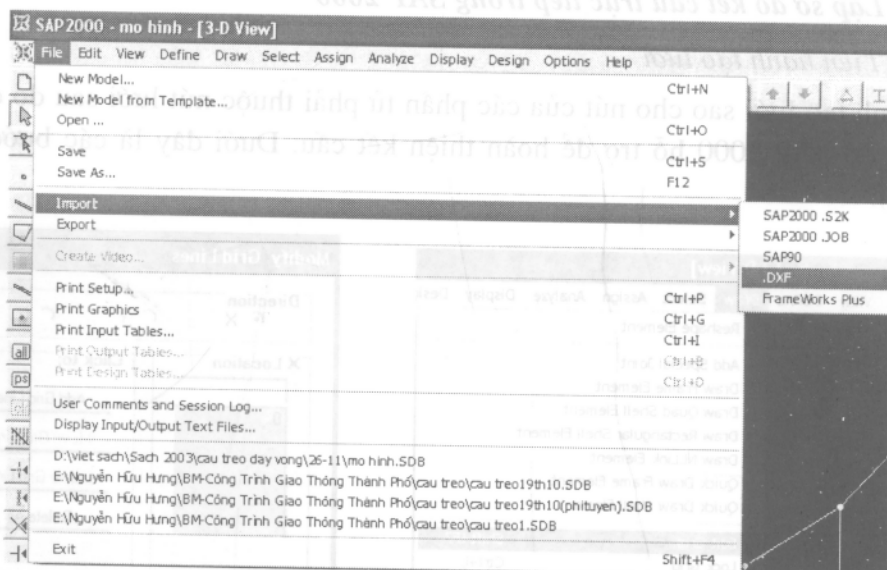
Vẽ bình thường trong Auto Cad sau đó ghi về file có dạng *.dxf (hình 3.13)



Hình 3.13. Mô hình trong Auto Cad

Bước 2: Import vào trong SAP 2000

Tiến hành như hình 3.14 dưới đây:



Hình 3.14

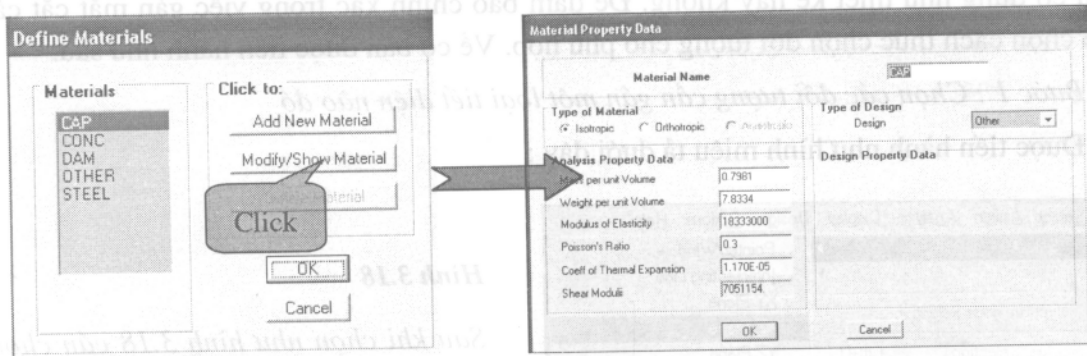
Bước 3: Khai báo các liên kết

Tiến hành như bước 2 ở phần 3.2.1.1 Lập sơ đồ kết cấu từ EXCEL.

3.3.2. Khai báo đặc trưng hình học và vật liệu kết cấu

3.3.2.1. Khai báo đặc trưng vật liệu kết cấu

Về vật liệu đặc trưng quan trọng nhất để tính toán chính xác là E (môđun đàn hồi) của vật liệu. Tùy thuộc vào vật liệu do thực tế mà khai báo vào bên trong mục đặc trưng vật liệu của kết cấu như hình 3.15 dưới đây:

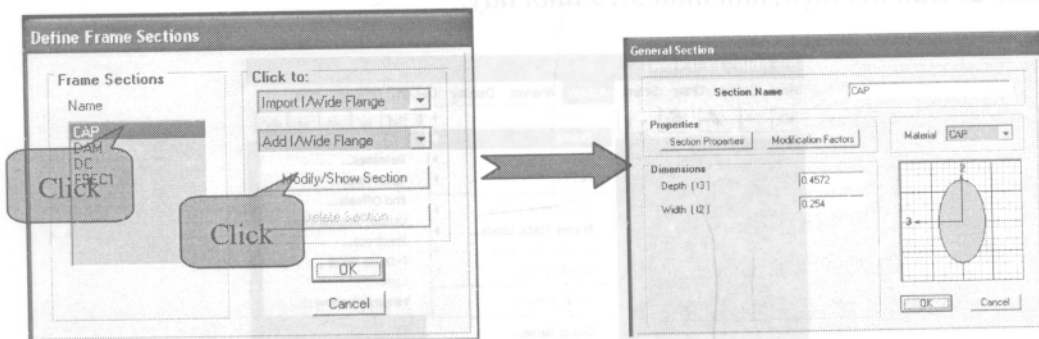


Hình 3.15

Các đặc trưng được điền vào bảng trên, như đã được hướng dẫn ở cuốn [1].

3.2.2.2. Khai báo đặc trưng hình học kết cấu

Đặc trưng hình học được khai báo sau khi đã khai báo xong đặc trưng vật liệu của kết cấu được tiến hành gồm các bước thể hiện trong hình vẽ dưới đây :



Hình 3.16

Sau khi chọn như trên xuất hiện tiếp bảng như sau (hình 3.17):

Property Data			
Section Name CAP			
Properties			
Cross-section (axial) area	0.1	Section modulus about 3 axis	1.
Torsional constant	1.	Section modulus about 2 axis	1.
Moment of Inertia about 3 axis	1.	Plastic modulus about 3 axis	1.
Moment of Inertia about 2 axis	1.	Plastic modulus about 2 axis	1.
Shear area in 2 direction	1.	Radius of Gyration about 3 axis	1.
Shear area in 3 direction	1.	Radius of Gyration about 2 axis	1.

Hình 3.17

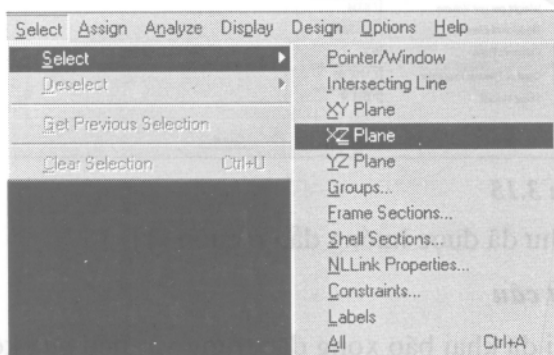
Tiến hành điền các số liệu vào các ô ở trên là hoàn thành xong công việc khai báo tiết diện bây giờ cần tiến hành gán tiết diện.

3.3.3. Gán tiết diện

Đây là bước quan trọng để đảm bảo xem các đặc trưng về hình học và vật liệu của kết cấu có đúng như thiết kế hay không. Để đảm bảo chính xác trong việc gán mặt cắt cần lựa chọn cách thức chọn đối tượng cho phù hợp. Về cơ bản được tiến hành như sau:

Bước 1 : Chọn các đối tượng cần gán một loại tiết diện nào đó

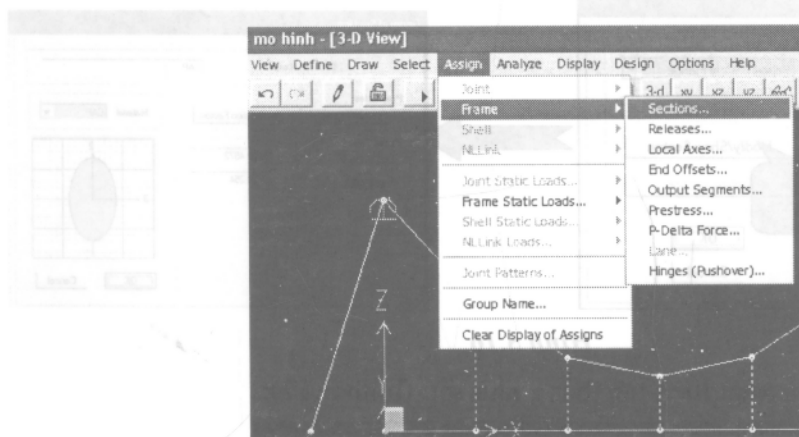
Được tiến hành như hình miêu tả dưới đây :



Hình 3.18

Sau khi chọn như hình 3.18 cần chọn phương thức "lựa chọn" hợp lý phù hợp với mục đích.

Bước 2: Gán tiết diện, như hình 3.19 dưới đây:



Hình 3.19. Miêu tả việc gán tiết diện cho kết cấu

3.3.4. Phân tích sự làm việc của kết cấu

Sự làm việc của kết cấu cầu treo bao gồm hai bộ phận cơ bản là dầm, dây văng và dây treo. Dầm trong cầu treo làm việc theo hai trường khác nhau: *dầm cứng*, *dầm mềm*; Nên về cơ bản dầm cầu thực tế vẫn được dùng phần tử thanh (frame) của SAP 2000 để mô hình. Còn đối với dây văng có hai lý thuyết tính là tính theo sơ đồ không biến dạng và tính theo sơ đồ biến dạng. Tùy thuộc vào lý thuyết tính mà sử dụng mô hình khác

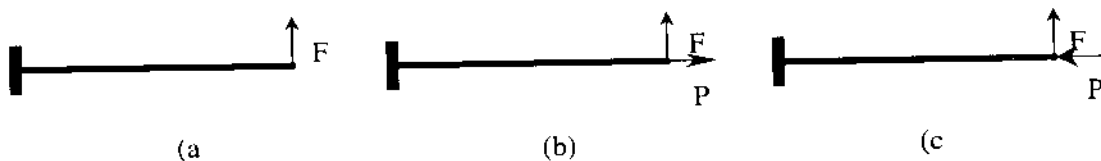
nhau. Nếu tính theo sơ đồ không biến dạng thì có thể dùng phần tử frame có độ cứng chống uốn rất nhỏ so với độ cứng chịu kéo để mô hình. Nếu tính theo sơ đồ biến dạng thì vẫn dùng phần tử frame có độ cứng chống uốn nhỏ hơn rất nhiều so với độ cứng chống kéo-nén để mô hình nhưng trong phần tử frame lúc này có xét thêm hiệu ứng P-delta. Để hiểu kỹ hơn về hiệu ứng P-delta xem mục 3.3.4.1.

Ngoài ra vì cầu treo là một hệ ổn định kém trước tác dụng của tải trọng động, như ảnh hưởng của gió, mưa, hoạt tải, động đất... Dưới những tác động này việc lựa chọn mô hình như trên mới chỉ xét đến sự phi tuyến về hình học sẽ không phản ánh chính xác bằng mô hình thay các dây treo trên bằng việc mô hình dây treo bằng phần tử phi tuyến. Vì vậy khi phân tích động sẽ thay đổi mô hình tính toán cho phù hợp với thực tế hơn.

3.3.4.1. Giới thiệu sơ bộ về phân tích P-delta trong SAP 2000

Hiệu ứng P-delta về bản chất có xét đến sự thay đổi đặc tính của kết cấu, đây là một loại phi tuyến hình học. Hiệu ứng này được sinh ra khi trên kết cấu tồn tại lực dọc và lực ngang. Sự lựa chọn này là đặc biệt quan trọng đối với các loại kết cấu có độ cứng nhỏ, thường được sử dụng phân tích các loại kết cấu như : *cáp trong cầu dây văng, cáp trong cầu treo dây văng và tháp trong cầu dây văng.*

Bản chất của việc phân tích kết cấu có xét thêm hiệu ứng P-delta là tiến hành giải bài toán lặp để xác định nội lực trong kết cấu. Kết quả của lần lặp trước được lưu lại và sử dụng làm giả thiết để giải bài toán lần sau. Toàn bộ tư tưởng được thể hiện trong ví dụ cụ thể sau: Cho một kết cấu như hình vẽ dưới đây (hình 3.20) nếu không xét hiệu ứng P-delta thì mômen ở ngàm của kết cấu hình (a), (b), (c) là $M = F.L$; Nếu có xét đến hiệu ứng P-delta thì mômen tại ngàm của kết cấu hình (a) $M = F.L$; của hình (b) $M = F.L - P.\Delta$; của hình (c) là : $M = F.L + P.\Delta$; ở đây Δ là chuyển vị đầu công xôn.



Hình 3.20

Giải bài toán lặp sẽ xảy ra hai khả năng là bài toán hội tụ hoặc bài toán không hội tụ. Nếu bài toán không hội tụ thì do nguyên nhân chính sau:

- Số lần lặp quá ít
- Sai số cho phép quá nhỏ
- Hoặc là kết cấu bị mất ổn định

Hai nguyên nhân đầu là nguyên nhân do việc giải toán còn nguyên nhân thứ ba là nguyên nhân về khả năng chịu đựng của kết cấu. Nguyên nhân này đáng quan tâm khi giải bài toán kết cấu.

Xét làm việc thực tế của kết cấu và khả năng phân tích của SAP 2000 cho thấy việc mô hình hoá kết cấu có xét đến hiệu ứng P-delta là hoàn toàn hợp lý khi áp dụng cho mô hình cầu treo dây văng.

3.3.4.2. Giới thiệu sơ bộ về phần tử phi tuyến trong SAP 2000

Phần tử phi tuyến được sử dụng đối với mô hình kết cấu cục bộ phi tuyến như là: *gaps*, *dampers* và *isolators*. Sự làm việc phi tuyến chỉ được thể hiện trong phân tích theo lịch sử thời gian (*time-history*) phi tuyến. Với tất cả sự phân tích khác, phần tử phi tuyến làm việc tuyến tính.

Như vậy với việc giải quyết bài toán tĩnh thì không cần đến phần tử Nlink trong mô hình hoá kết cấu. Chỉ khi xét đến *time-history* thì mới cần phần tử phi tuyến trong mô hình.

3.3.5. Gán tải trọng lên kết cấu

3.3.5.1. Hoạt tải

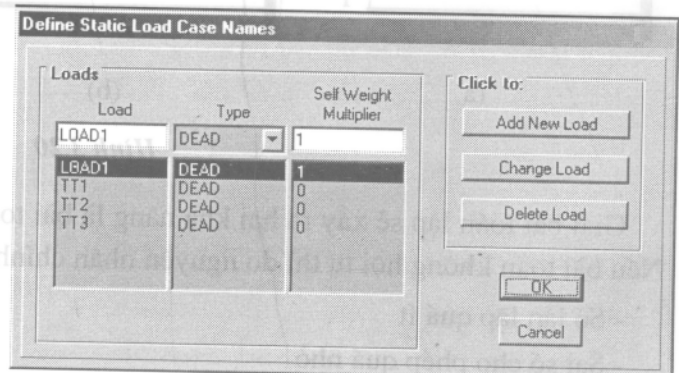
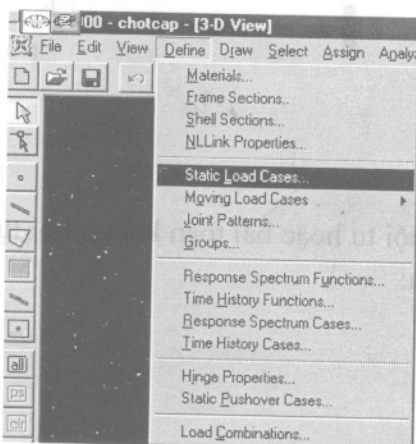
Ví dụ hoạt tải qua cầu là đoàn xe H10

Việc tiến hành khai báo tải trọng đoàn xe đã được trình bày rất kỹ trong cuốn "Phân tích kết cấu cầu cong và cầu dây văng bằng SAP 2000" (cùng tác giả) xin bạn đọc tham khảo trong tài liệu [1].

3.3.5.2. Tĩnh tải

Tĩnh tải trong ví dụ này được quy đổi về thành các tải trọng phân bố đều tác động lên dầm và dầm. Được khai báo như sau :

Bước 1: Tạo các lớp tải trọng

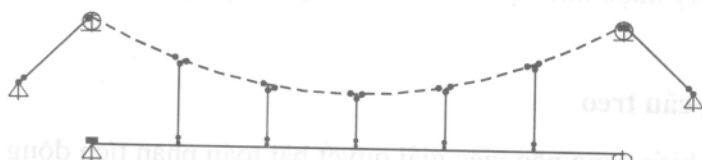


Khai báo các lớp chứa các trường hợp tải trọng

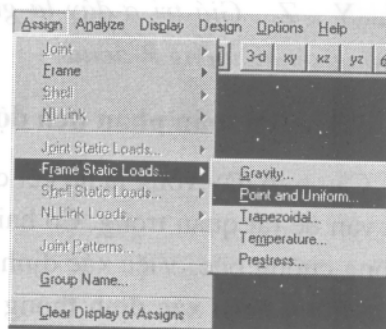
Khai báo trường hợp tải trọng tĩnh

Hình 3.21

Bước 2 : Gán tải trọng



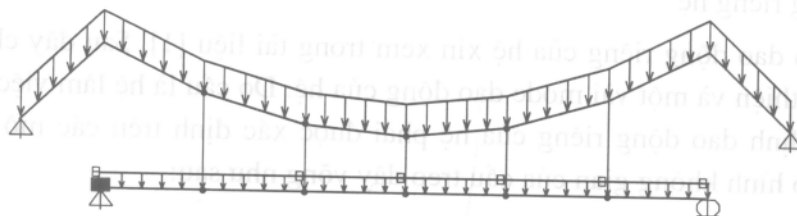
Chọn các phần tử cần gán tải trọng



Gán tải trọng lên kết cấu

Hình 3.22

Kết quả sau khi gán tải trọng xong như sau:



Hình 3.23

3.3.5.3. Gán lực P-delta

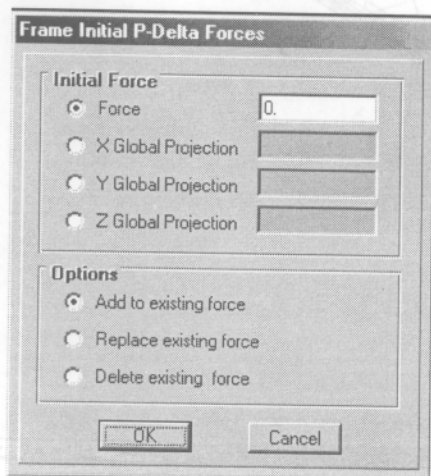
Việc gán lực P-delta được tiến hành như sau:

Bước 1: Chọn các đối tượng cần gán lực P-delta

Được tiến hành như bình thường như gán tải trọng tĩnh tải ở trên

Bước 2: Tiến hành gán lực P-delta

Được làm như hình 3.24 dưới đây:



Hình 3.24

Lực dọc P-delta được xác định thông qua công thức sau:

$$P_0 = p + \frac{px}{cx} + \frac{py}{cy} + \frac{pz}{cz}$$

ở đây :

P_0 là lực dọc P-delta và cx , cy , cz là cos của góc giữa trục 1 của phần tử dầm với trục X, Y, Z của hệ tọa độ cys tương ứng. Để tránh trường hợp chia cho 0 bạn không xác định hình chiếu lên bất kỳ trục nào của hệ tọa độ vuông góc với trục 1 của phần tử dầm.

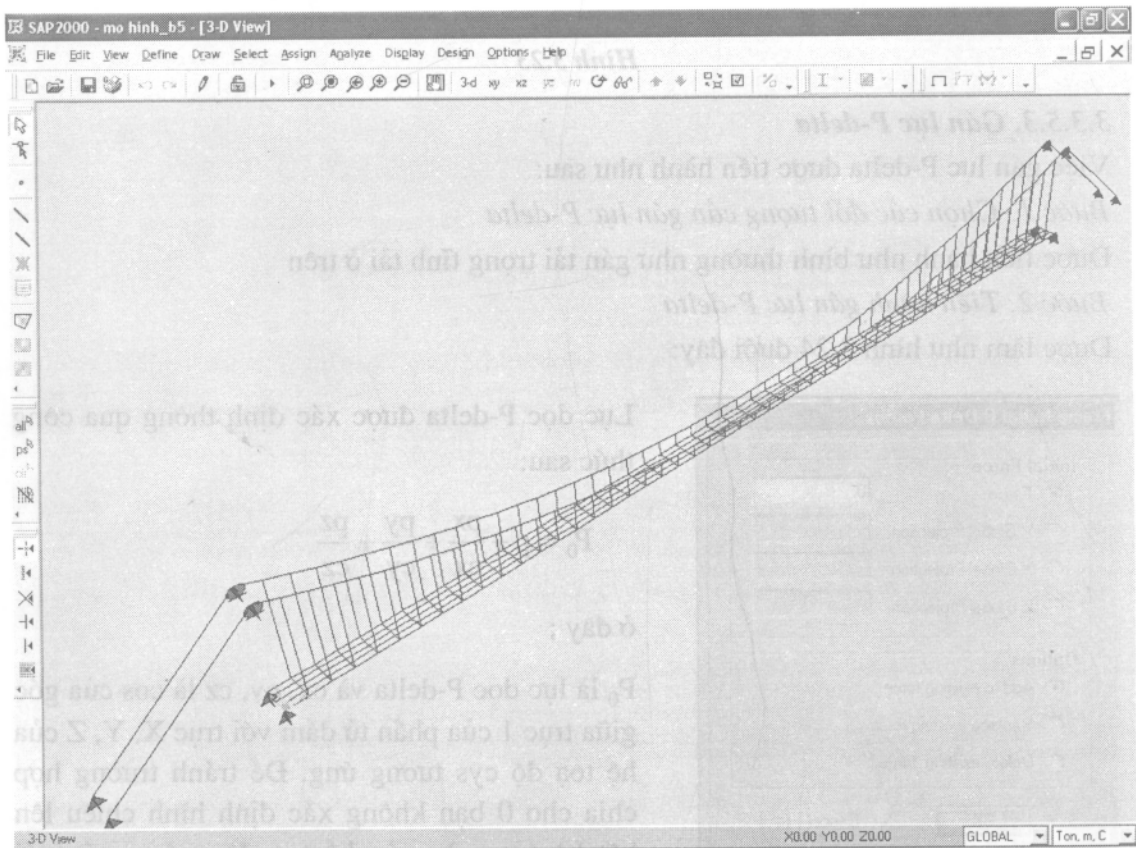
Có hai cách để xác định lực dọc là điền vào ô *Force* hoặc điền vào một trong các ô *X...*, *Y...*, *Z...*. Giá trị ở đây là giá trị được xác định ban đầu hoặc được giải sơ bộ khi không xét hiệu ứng *P-delta*

3.3.6. Bài toán phân tích động cầu treo

Cầu treo dây văng là hệ kết cấu biến dạng nên việc giải quyết bài toán phân tích động là vấn đề rất quan trọng. Có hai nội dung cần quan tâm là dao động riêng của hệ và dao động cưỡng bức. Việc xác định tần số dao động riêng của hệ có thể dùng các công thức gần đúng hoặc xác định thông qua các mô hình phân tử hữu hạn. Việc xác định bằng cách mô hình hoá kết cấu rồi xác định thông qua các phần mềm có sẵn phụ thuộc rất nhiều vào việc mô hình hoá kết cấu. Sau đây xin trình bày cách xác định tần số dao động riêng bằng phần mềm SAP 2000.

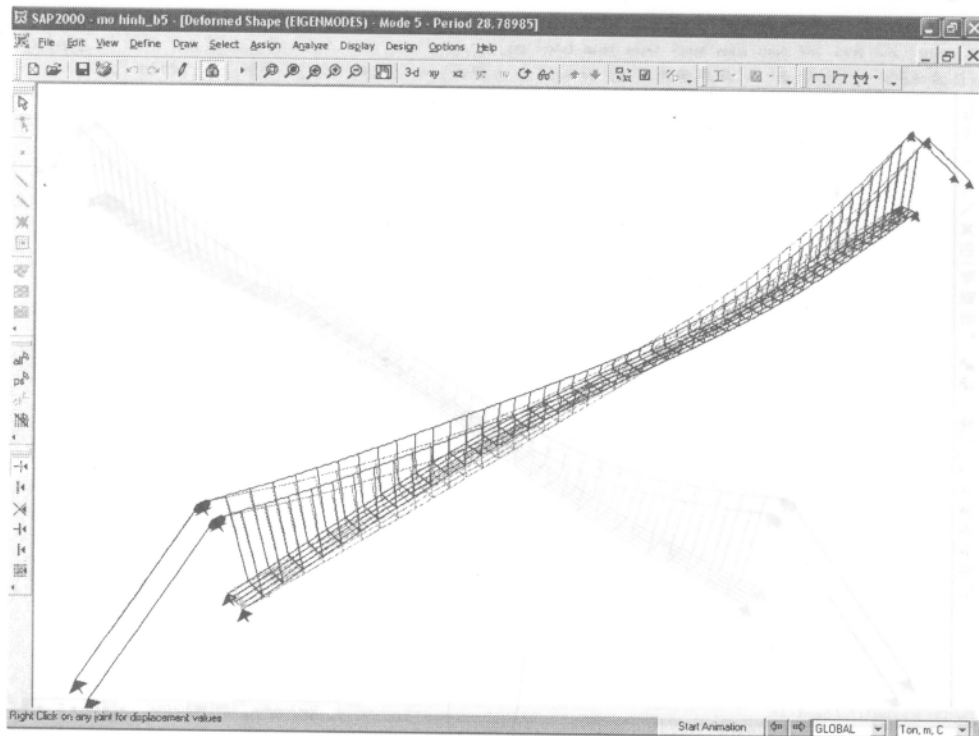
a) Dao động riêng hệ

Sự khai báo dao động riêng của hệ xin xem trong tài liệu [1]. Sau đây chỉ giới thiệu mô hình hoàn thiện và một vài mode dao động của hệ. Do cầu là hệ làm việc không gian nên việc xác định dao động riêng của hệ phải được xác định trên các mô hình không gian. Ta có mô hình không gian của cầu treo dây văng như sau:



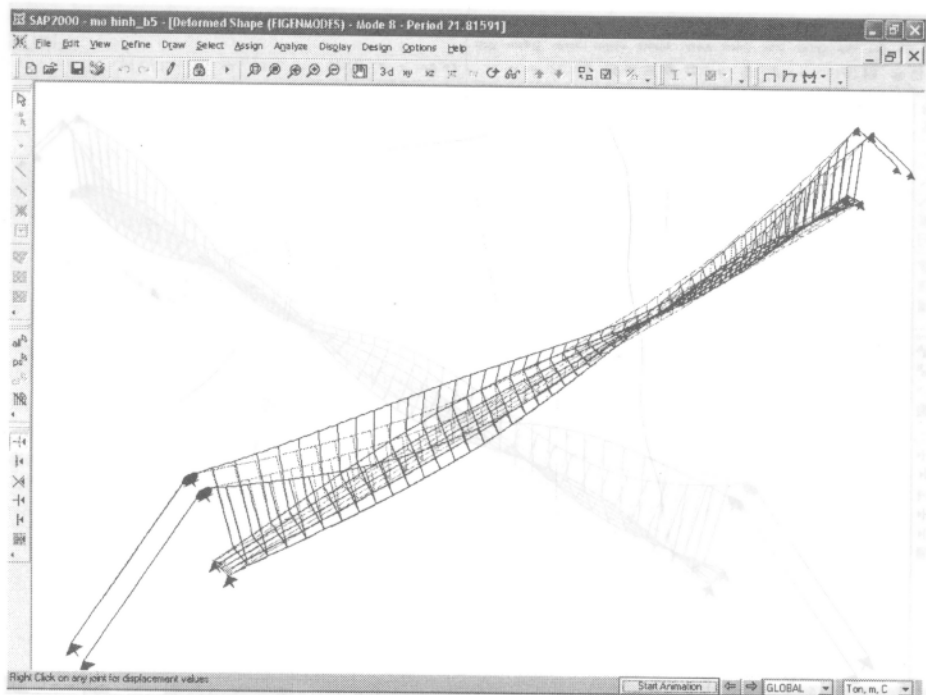
Hình 3.25

Trường hợp thứ nhất:



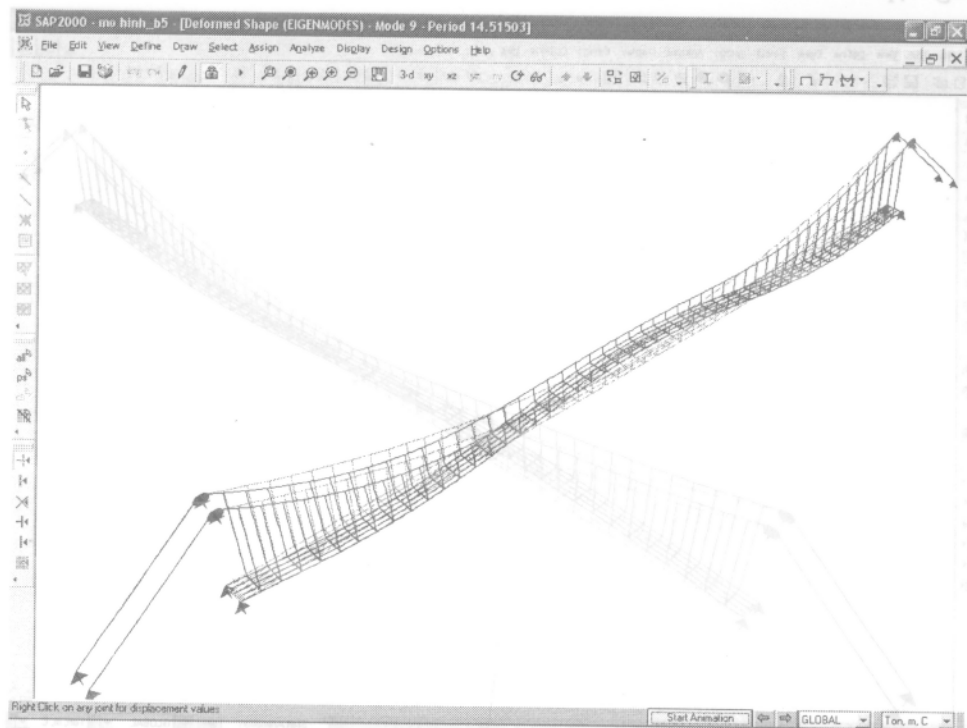
Hình 3.26

Trường hợp thứ hai:



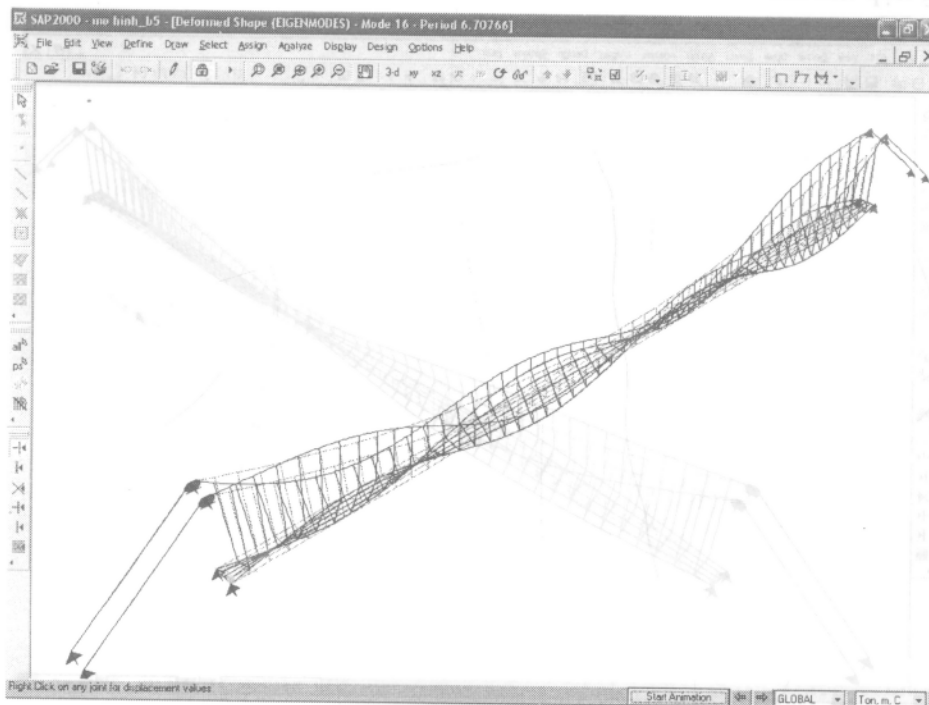
Hình 3.27

Trường hợp thứ ba :



Hình 3.28

Trường hợp thứ tư



Hình 3.29

Cần lưu ý là phải xác định đúng các tần số cần xác định mà bắt các mode cho phù hợp với mục đích.

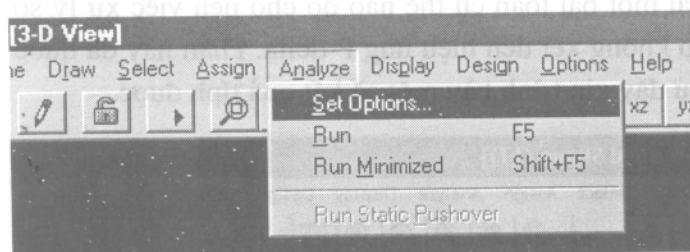
b) Dao động cưỡng bức của hệ dưới tác động của tải trọng gió

(Phần này được trình bày rất chi tiết trong *chương 4*).

3.3.7. Chạy chương trình và xử lý số liệu

3.3.7.1. Chạy chương trình

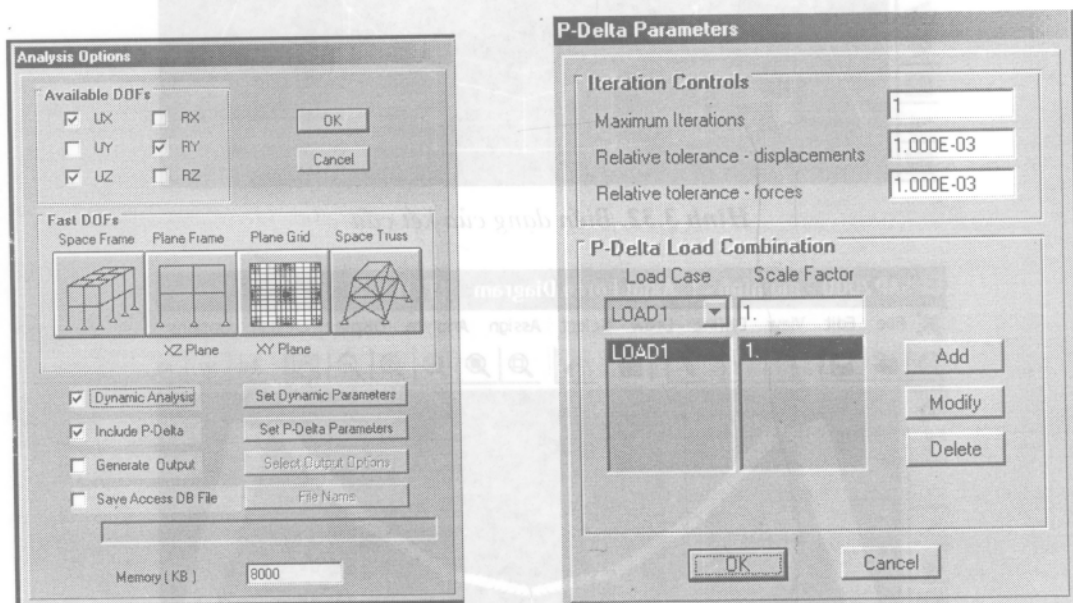
Để chương trình có xét đến hiệu ứng P-delta trước khi chạy chương trình ta cần nhập các thông tin để chương trình tiến hành xét hiệu ứng P-delta. Được thể hiện thông qua các hình sau:



Từ thanh Menu vào Set Options.

Xuất hiện bảng như hình dưới đây

Hình 3.30



Chọn set P-delta Parameters

Hình 3.31

Tại bảng trên cần chọn các thông số sau:

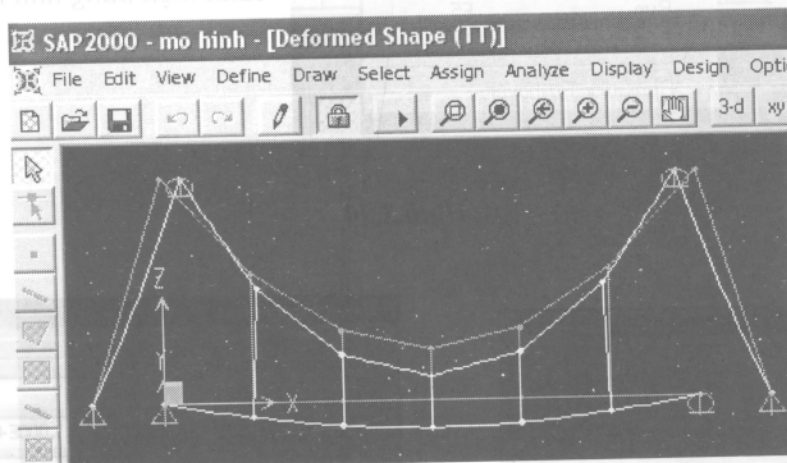
- *Maximun iteration* : số lần lặp max
- *Releative tolerance-displacements*: Sai số lặp của chuyển vị
- *Releative tolerance-forces*: Sai số lặp của lực

Ngoài ra trong mục tổ hợp tải trọng P-delta cần chọn đúng trường hợp tải trọng cần xét và hệ số cần đưa vào thêm.

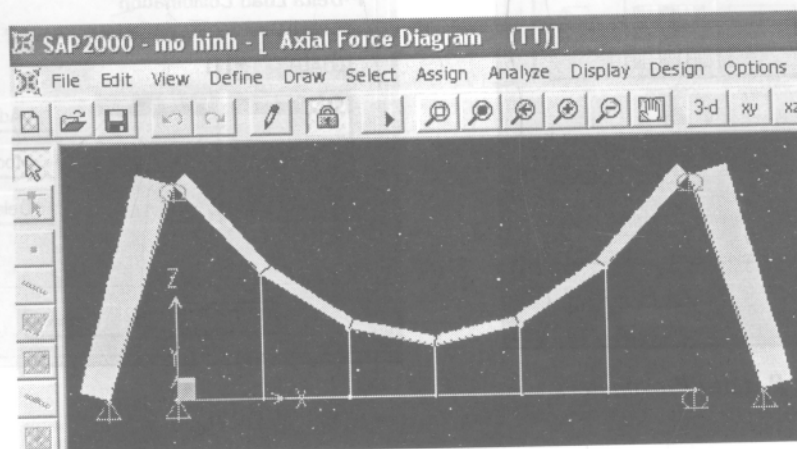
Cần lưu ý là số lần lặp không được quá lớn và sai số của phép lặp không được quá nhỏ để bài toán không hội tụ. Khi bài toán không hội tụ mọi công việc có liên quan đến việc xét hiệu ứng P-delta bị thoát ra.

3.3.7.2. Xử lý số liệu

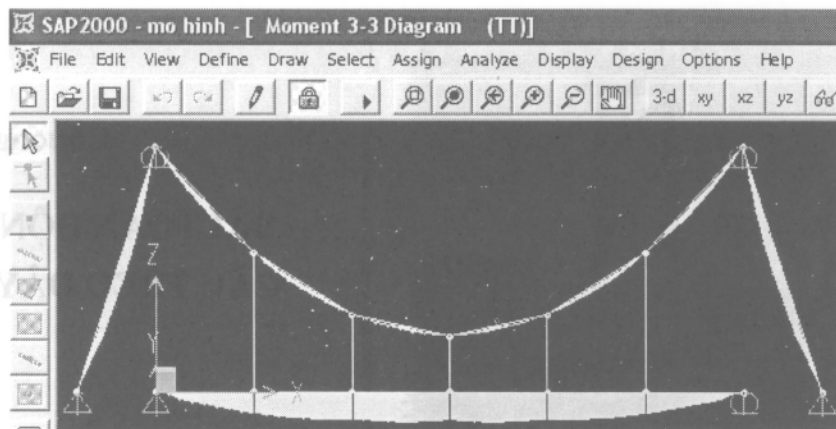
Do đặc thù công việc ở đây là giải một bài toán cụ thể nào đó cho nên việc xử lý số liệu không khác gì so với trường hợp không xét đến hiệu ứng P-delta. Phần này đã được giới thiệu rất kỹ trong tài liệu [1]. Sau đây xin trình bày một số kết quả tính được.



Hình 3.32. Biến dạng của kết cấu



Hình 3.33. Biểu đồ lực dọc trong dầm



Hình 3.34. Biểu đồ mômen uốn

Xin nhắc lại kết quả sử dụng các phần mềm tính toán phụ thuộc rất nhiều vào người sử dụng phần mềm đó. Mọi ý tưởng mô hình đều phải phù hợp với sự làm việc thực tế của kết cấu.



Chương 4

BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC CẦU TREO DÂY VÕNG

4.1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Hiện nay kết cấu cầu dây nói chung và loại cầu treo nói riêng đang khẳng định tính ưu việt của nó, không chỉ về mặt kiến trúc mỹ quan hay khả năng vượt nhịp lớn mà cả về mặt công nghệ thi công. Tuy nhiên ở Việt Nam hiện nay việc xây dựng cầu treo nhịp lớn vẫn còn khá mới mẻ. Đã có một số dự án trong nước hay hợp tác với nước ngoài thiết kế và cả thi công cầu dây đang được xúc tiến triển khai khẩn trương, góp phần cho việc ra đời những công trình cầu dây hiện đại đầu tiên ở Việt Nam.

Bài toán động học của cầu treo ở đây chủ yếu giải quyết bài toán ảnh hưởng của gió đối với công trình cầu. Đây là một trong các vấn đề khó khăn đối với các kỹ sư, chuyên gia thiết kế cầu của Việt Nam, đòi hỏi phải có sự đầu tư nghiên cứu kỹ càng, tốn kém. Một nguyên nhân gây nên sự tốn kém đó là các phương tiện và dụng cụ thí nghiệm quá đắt tiền mà ở Việt Nam chưa có và phải thuê thí nghiệm ở nước ngoài. Trong phạm vi chương này sẽ đề cập tới lý thuyết cơ bản về gió và biện pháp tính toán ảnh hưởng của gió đối với cầu thông qua các ví dụ tính toán ảnh hưởng của tải trọng gió đối với một số cầu treo dây võng ở Việt Nam, Trung Quốc, Hoa Kỳ:

- Tính toán chống gió đối với cầu treo dây võng Hồ Mòn-Quảng Đông, Trung Quốc, trong đó chấp nhận một số số liệu đã thí nghiệm được.

- Tính toán với cầu treo dây võng Tacoma, cây cầu đã đổ sập khi xây xong chưa lâu dưới tác dụng của gió nhẹ.

- Tính kiểm toán ổn định gió cho cầu treo dây võng H-ling ở Quảng Nam.

4.1.1. Khái niệm chung về tải trọng gió

Công trình cầu thường được xây dựng ở nơi trống trải và chịu gió mạnh. Tải trọng gió tác dụng lên cầu phụ thuộc vào kiểu cầu (ví dụ cầu bản, cầu dầm, cầu dầm, cầu vòm, cầu dây, v.v...) cũng như phụ thuộc tốc độ gió, hướng gió, kích thước và hình dạng cầu, các điều kiện địa hình, vùng khí hậu nơi có cầu, v.v... Nói chung, các tác động của gió lên cầu thường được xét theo các đề mục sau :

- Các áp lực gió tĩnh
- Tác dụng động học của dòng gió thổi
- Ảnh hưởng của các công trình lân cận làm thay đổi hướng gió và các đặc trưng của dòng gió.

Khi tính toán ảnh hưởng của gió lên các kết cấu nhịp cầu kiểu thông thường, người thiết kế có thể chỉ quan tâm đến xét áp lực gió tĩnh. Nhưng trong tính toán cầu dây văng và cầu dây xiên, các hiện tượng mất ổn định khí động học cần phải được chú ý nhiều hơn. Thường thì áp lực gió tĩnh có thể gây biến dạng cho kết cấu nhịp cầu. Còn tác dụng động học của gió thì làm cho kết cấu bị rung hoặc dao động mạnh. Các cầu dây văng cũng như cầu dây xiên đều rất nhạy cảm với tác động của gió, khiến cho kết cấu nhịp dao động theo nhiều dạng thức khác nhau ở tần số thấp và có thể dẫn đến hậu quả phá huỷ cầu. Nếu có 2 cầu đặt quá gần nhau, có thể xảy ra hiệu ứng Bernoulli khi dòng gió thổi qua khe hở giữa 2 cầu và gây nguy hiểm cho cả 2 cầu đó.

Áp lực gió tĩnh lên cầu được tính toán theo các nguyên lý quen thuộc của Cơ học chất lỏng. Theo lý thuyết Bernoulli thì khi có dòng chất lỏng lý tưởng tác dụng lên vật thể, mức độ tăng áp lực tĩnh sẽ bằng mức độ giảm áp lực động. Cường độ áp lực gió được tính theo phương trình sau:

$$p = 0,5C_p V^2 \quad (4-1)$$

trong đó:

p - áp lực gió

ρ - mật độ không khí

V - tốc độ gió

C - hệ số tỷ lệ (còn gọi hệ số hình dạng), lấy tùy thuộc hình dạng của vật thể cản dòng gió

Trị số của C là khá nhỏ đối với các cấu kiện hẹp và có dạng bề mặt trơn thoát gió (dạng lưu tuyến), hoặc sẽ là trị số lớn đối với cấu kiện to rộng và hình dạng không thoát gió êm thuận. Hợp lực của lực gió tác dụng lên vật thể cản gió bao gồm thành phần lực nâng theo phương thẳng đứng và lực theo hướng của dòng gió.

Sự biến đổi của tốc độ gió theo chiều cao và theo mức độ gồ ghề của địa hình.

Gió có thể coi là sự chuyển động nhiều loạn của không khí. Chuyển động này có đặc điểm là không quy luật và luôn thay đổi theo thời gian cũng như theo không gian. Trong tính toán công trình thường dùng giá trị trung bình danh định của tốc độ gió. Nếu thành phần xung bằng 0 thì chuyển động dòng gió được coi là êm đều.

Sự khác nhau giữa tốc độ trung bình và tốc độ thật chính là do thành phần xung của tốc độ, nó gây ra hiện tượng động học trong công trình. Hầu hết các nước đều có các nghiên cứu khảo sát về khí tượng và vẽ được bản đồ tốc độ gió trên khắp lãnh thổ ở cao độ 10m so với mặt đất. Bản đồ gió theo lãnh thổ của Việt Nam đã được Tổng cục Khí tượng thủy văn cung cấp.

Áp lực gió lên công trình đặc trưng bởi cột áp lực gió, xác định theo tốc độ gió với xác suất xảy ra trung bình 1 lần trong 5 năm. Áp lực gió tính toán còn được lấy phụ thuộc vào dạng công trình. Trong các tiêu chuẩn thiết kế công trình của nhiều nước thường xét tốc độ gió lớn nhất trong vòng 100 năm để thiết kế công trình cho an toàn.

Sự thay đổi tốc độ gió theo chiều cao phụ thuộc vào điều kiện địa hình, địa phương. Có thể đề nghị một quan hệ sau để xác định tốc độ gió V_h ở chiều cao h thông qua giá trị tốc độ V_n ở chiều cao chuẩn $h_n = 10m$.

$$V_h = V_n (h / h_n)^\alpha \quad (4-2)$$

Chỉ số lũy thừa α được lấy tùy theo điều kiện địa phương như sau :

- Nơi mặt nước thoáng $\alpha = 0,12$
- Nơi không có rừng, thoáng $\alpha = 0,16$
- Nơi có rừng $\alpha = 0,28$
- Trong thành phố $\alpha = 0,40$

Tốc độ gió V_h là trị số trung bình trong một khoảng thời gian nào đó. Đối với công trình thì tốc độ này cần phải được hiệu chỉnh tăng lên do sự nhiễu loạn chuyển động của dòng gió, do lốc và v.v... Khi đó, dọc theo công trình tốc độ gió tại các điểm là:

$$V_{h,L} = a_g \cdot V_h$$

trong đó:

a_g - thừa số hiệu chỉnh, được xác định tùy theo bảng 1 tương ứng với các chiều dài L_M của công trình và cao độ của nó (hay chiều cao)

Bảng 1

H (m)	Hệ số a_g tương ứng với chiều dài L_M của công trình, (m)									
110	11,4	11,30	11,24	11,21	11,18	11,16	11,14	11,12	11,10	11,09
330	11,24	11,19	11,16	11,13	11,12	11,10	11,09	11,08	11,08	11,07
550	11,20	11,15	11,13	11,11	11,10	11,09	11,08	11,07	11,06	11,06
770	11,17	11,13	11,11	11,10	11,09	11,08	11,07	11,06	11,06	11,05
1100	11,14	11,11	11,10	11,08	11,08	11,07	11,06	11,05	11,05	11,05

Tương tự, đối với công trình cao thì tốc độ gió tính toán là :

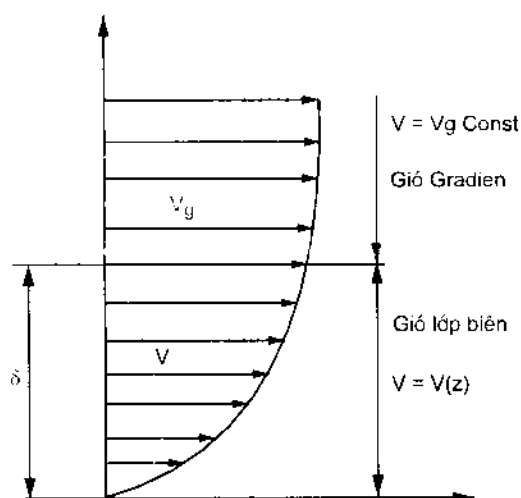
$$V_{hH} = a_H \cdot V_h$$

trong đó:

a_H - thừa số hiệu chỉnh, phụ thuộc vào chiều cao H của công trình như sau:

H(m)	330	440	660	880	1100	1120	1140	1160	1180	2200	2220	2240
a_H	11,50	11,43	11,32	11,26	11,22	11,19	11,17	11,16	11,14	11,13	11,12	11,11

Nói chung, tốc độ gió tăng từ giá trị bằng 0 ở cao độ sát mặt đất cho đến một trị số cực đại nào đó ở chiều cao chừng 0,5 - 1,0 km so với mặt đất. Bề mặt gồ ghề của địa hình sẽ cản trở sự di chuyển của dòng gió. Hiệu ứng này giảm dần theo chiều cao và đến một độ cao δ nào đó thì coi như không còn ảnh hưởng nữa. Độ cao đó gọi là lớp biên của khí quyển tự do. Phần khí quyển ở bên trên lớp biên đó gọi là khí quyển tự do. Độ cao lớp biên cũng còn gọi là độ cao gradient và tốc độ gió ở độ cao đó gọi là tốc độ gradient. Tốc độ này sẽ không thay đổi theo độ cao nữa. Cần lưu ý là khi nói đến tốc độ gió ở một địa phương nào đó thì thường không phải là tốc độ gió tại cao độ mặt đất mà là nói đến tốc độ gió tại cao độ khoảng 10m. Trên hình 4-1 vẽ biểu đồ biến đổi tốc độ gió theo độ cao so với mặt đất. Còn trên hình 4-2 mô tả các biểu đồ tốc độ gió ở các địa hình khác nhau (ví dụ, trong thành phố, vùng nông thôn, vùng bờ biển).



Hình 4-1: Biểu đồ biến đổi tốc độ gió theo độ cao so với mặt đất.

Ngoài công thức (4-2) đã nói trên, đối với tốc độ gió còn một quan hệ toán học khác theo dạng hàm Logarit đã được tác giả Liu đề ra từ năm 1991:

$$V_h = \frac{1}{k} V_m \ln (h / h_n) \quad (4-3)$$

trong đó: V_m - tốc độ cắt trượt hoặc tốc độ ma sát

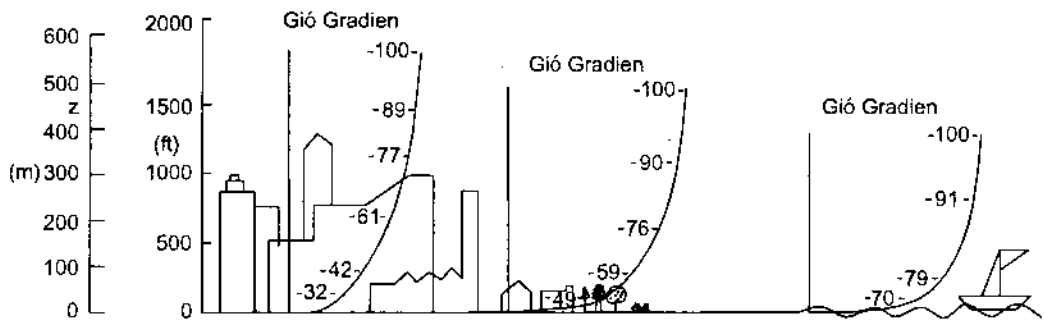
$$V_m = \sqrt{\tau / \rho}$$

với

τ - cường độ gió ở mặt đất

ρ - mật độ không khí = 1,2256 kg/m³ ở cao độ mặt biển và ở 15°C

k - hằng số Karman, lấy gần đúng bằng 0,4 dựa trên các thí nghiệm trong hầm thí nghiệm khí động học và trong khí quyển.



Hình 4-2: Các biểu đồ tốc độ gió ở các địa hình khác nhau

Nói chung "quy luật Logarit" được các nhà khí tượng học coi là đúng hơn ở phạm vi vùng khí quyển thấp, còn "quy luật lũy thừa" không được dùng trong ngành khí tượng học. Tuy nhiên do nó đơn giản khi tính áp lực gió nên công thức theo quy luật lũy thừa lại thường được dùng trong các tiêu chuẩn tính toán công trình xây dựng của nhiều nước.

Đối với một kết cấu không quá cao so với mặt đất thì có thể chấp nhận dùng tốc độ gió trên bề mặt để tham khảo suy ra tốc độ gió cho tính toán kết cấu. Điều này đúng với đa số các cầu ở vùng nông thôn. Tuy nhiên có thể một bộ phận nào đó của cầu chẳng hạn như cột tháp của các cầu dây là khá cao so với mặt đất. Khi đó tốc độ gió bề mặt không thể được dùng như tốc độ gió khống chế cho thiết kế toàn bộ cầu. Sự tăng tốc độ gió theo chiều cao có thể trở thành một đề mục quan trọng cần xét kỹ trong lúc thiết kế cầu dây. Phần nhô lên quá cao của cầu phải được thiết kế với tốc độ gió cao hơn so với tốc độ gió được dùng để thiết kế những phần thấp hơn của cầu.

Lấy ví dụ cầu Fred Harman ở bang Texas (Hoa Kỳ) đã xét :

- Tốc độ gió 110 m/h ở độ cao khoảng 10m
- Tốc độ gió 160 m/h ở cao độ mặt cầu xe chạy, cao hơn mặt nước sông 55m
- Tốc độ gió 195 m/h ở cao độ đỉnh tháp cầu dây, cao hơn mặt cầu 80 m

Đối với các tốc độ gió như thế người thiết kế đã tăng thêm 15 % tải trọng lên tháp và lên trụ cầu.

4.1.2. Mục đích và phương pháp chống gió

Mục đích thiết kế chống gió trước hết là bảo đảm trong giai đoạn thi công cũng như trong giai đoạn sử dụng sau khi xây dựng xong, cầu chịu được tác dụng tĩnh của tải trọng gió tối đa và tác dụng động do gió gây dao động tạo ra.

Vì gió tự nhiên gây ra các loại gió tạo ra dao động, nên trong thiết kế chống gió, đòi hỏi có độ an toàn đầy đủ giữa tốc độ gió tới hạn gây dao động nguy hiểm so với tốc độ gió thiết kế nhằm đảm bảo sự ổn định chống gió trong các giai đoạn thi công, đồng thời

đòi hỏi biên độ dao động lớn nhất của dao động xoáy và dao động lật nằm trong phạm vi chấp nhận được, tránh cho kết cấu bị mỏi, người khó chịu, chạy xe mất an toàn v.v..

Nếu phương án thiết kế cầu ban đầu không đáp ứng yêu cầu chống gió thì sửa đổi thiết kế hoặc dùng các biện pháp khí động hoặc biện pháp cơ học để nâng cao tính ổn định chống gió của kết cấu hoặc giảm biên độ dao động của gió gây dao động.

Vì đặc tính luồng gió rối trong không trung và đặc tính khí động của mặt cắt ngang cầu là vật thể dạng tùy ý không theo quy tắc nào cả rất phức tạp, nên hiện nay chưa có cách nào để xây dựng một mô hình toán học miêu tả một cách đầy đủ tác dụng tương hỗ giữa gió và kết cấu, mà chỉ có thể qua con đường nửa toán học, nửa thực nghiệm hoặc hoàn toàn thực nghiệm để tìm lời giải gần đúng. Vì vậy, thí nghiệm trong ống khí động học là một biện pháp quan trọng không thể thiếu trong việc thiết kế chống gió cho cầu.

Trong các giai đoạn thiết kế cầu khác nhau, có thể tùy tình hình mà sử dụng các phương pháp thiết kế chống gió và cách thí nghiệm ống khí động có độ chính xác khác nhau.

Đối với cầu lớn nói chung, ở giai đoạn thiết kế sơ bộ, có thể dùng các công thức gần đúng để đánh giá nội lực tải trọng gió tĩnh và đặc tính động lực trong các phương án. Sau khi đã xác định phương án, mới thông qua việc thí nghiệm ống khí động của các mô hình phân đoạn để đo các tham số, kiểm tra việc chống gió và phân tích các loại dao động.

Đối với các cầu quan trọng, ngay trong giai đoạn thiết kế sơ bộ, cần chọn loại hình khí động qua thí nghiệm ống khí động để làm căn cứ chọn tiết diện dầm chủ. Trong giai đoạn thiết kế kỹ thuật, lại phân tích dao động gió và kiểm tra việc chống gió một cách tỉ mỉ đối với phương án tiết diện đã chọn và xác nhận lại kết quả phân tích bằng các thí nghiệm ống khí động mô hình toàn cầu.

4.1.3. Các yếu tố quan trọng trong thiết kế chống gió

4.1.3.1. Các tham số đặc tính của gió

Qua việc điều tra, thu thập số liệu để nắm đặc tính khí tượng vị trí cầu và dùng phương pháp chính xác để xác định các tham số hợp lý sử dụng trong thiết kế chống gió. Cần đặc biệt chú ý địa hình địa mạo, hướng gió đặc thù tại địa điểm xây dựng cầu để có sự hiệu chỉnh cần thiết các trị số lấy trong quy phạm.

4.1.3.2. Đặc tính động lực cầu

Phân tích đặc tính động lực cầu là cơ sở phân tích dao động gió, cần dùng mô hình lực hợp lý và chú ý xử lý chính xác các điều kiện biên. Cần so sánh kết quả tính toán với cầu tương tự (tốt nhất là có số liệu đo đạc thực tế để kiểm tra lại tính hợp lý, chắc chắn

của nó, trong đó đặc biệt phán đoán chính xác dao động uốn đứng, uốn ngang và xoắn đối xứng và xoắn phản đối xứng của dầm chủ ở hai bậc đầu).

4.1.3.3. Tải trọng gió đối với cầu

Tải trọng gió đối với cầu gồm hai phần tải trọng gió tĩnh và tải trọng gió động. Tải trọng gió tĩnh gồm lực cản, lực nâng và mômen lực. Tải trọng gió động gồm lực quán tính của kết cấu do chấn động của gió gây ra. Vì gây ra dao động cần một thời gian kéo dài nhất định nên có thể lấy gió (bình quân) trong khoảng thời gian dài làm tốc độ gió thiết kế gây ra dao động.

4.1.3.4. Tốc độ gió tới hạn dao động trùng tránh

Tốc độ gió tới hạn dao động trùng tránh là tốc độ gió bắt đầu làm cho cầu phát sinh dao động trùng tránh lan truyền (phát tán). Khi tốc độ gió bên ngoài thấp hơn tốc độ gió tới hạn thì dao động yếu đi. Để đề phòng dao động nguy hiểm làm hư hỏng cầu cần bảo đảm sao cho tốc độ gió tới hạn dao động trùng tránh cao hơn tốc độ gió chuẩn thiết kế có thể xuất hiện ở nơi vị trí cầu và có hệ số an toàn nhất định.

4.1.3.5. Ảnh hưởng dao động giạt

Dao động giạt là dao động cưỡng bức biến đổi dưới tác dụng của luồng gió rối. Ảnh hưởng dao động giạt tùy thuộc vào đặc tính động lực của cầu, đặc tính khí động của mặt cắt dầm chủ và đặc tính luồng gió rối.

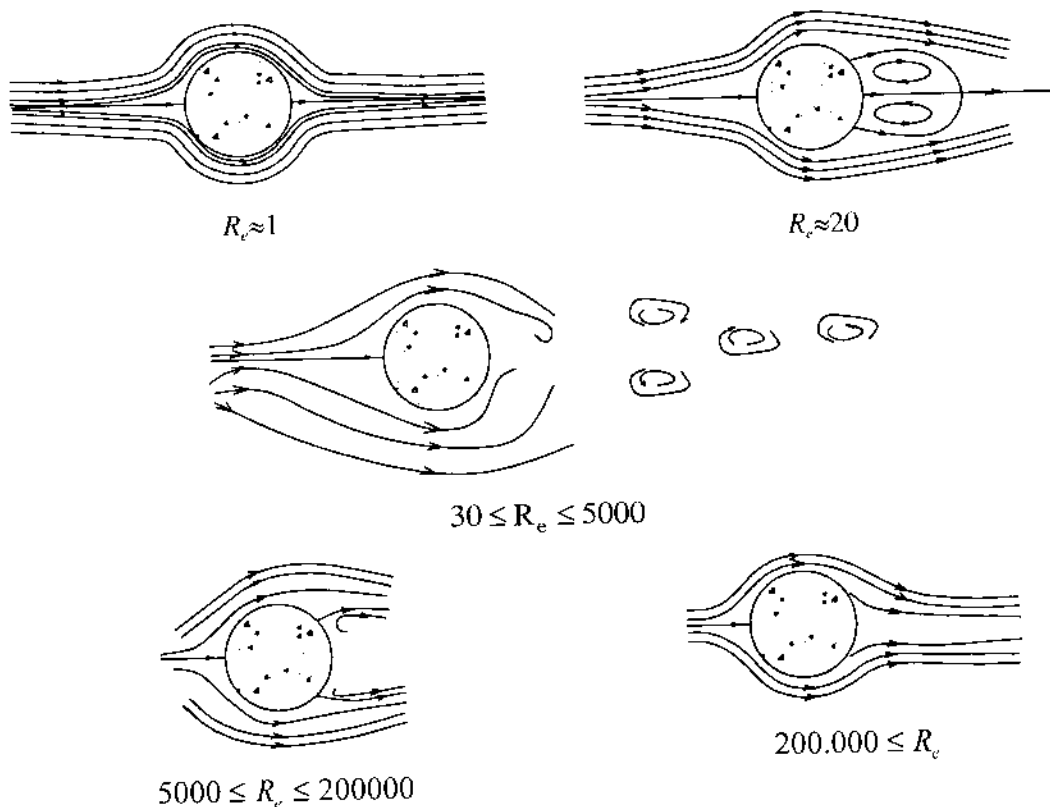
4.1.4. Khái niệm về hiệu ứng khí động học đối với cầu dây

4.1.4.1. Khái niệm

Các kết cấu cầu treo dây văng và cầu dây xiên đều được tính toán về mặt tĩnh học dưới tác dụng của gió thổi theo phương dọc cầu và theo phương ngang cầu. Trị số tải trọng gió được lấy tương ứng với tốc độ gió trung bình trong khu vực cầu. Tuy nhiên các cầu này còn chịu ảnh hưởng rất lớn của các hiệu ứng khí động học. Cho đến nay chưa có phương pháp giải tích thuần túy nào đủ chính xác để tính được tác dụng khí động học của dòng gió lên kết cấu cầu. Để nghiên cứu các ảnh hưởng đó chỉ có thể căn cứ vào các thí nghiệm trên mô hình kết cấu cầu trong hầm thí nghiệm khí động học và thí nghiệm trên các kết cấu cầu thực tế rồi rút kinh nghiệm và kết hợp với các nghiên cứu tính toán lý thuyết mà hoàn chỉnh dần lý thuyết tính toán dự báo.

Mục đích của các thí nghiệm trong hầm thí nghiệm khí động học là lựa chọn các đặc trưng độ cứng và đặc trưng hình học của kết cấu công trình sao cho loại trừ được nguy cơ phát triển các dao động nguy hiểm dưới tác động gió với cường độ dự kiến có thể sẽ xuất hiện trong khu vực xây dựng cầu trong thời hạn khai thác cầu (ví dụ 100 năm).

Khi dòng khí thổi qua một vật cản (ví dụ đó là kết cấu cầu cầu hay ô tô, máy bay, tên lửa, v.v...) sẽ phát sinh các xoáy khí lần lượt ở hai bên trái và phải ngay sát phía sau kết cấu đó. Các xoáy khí này có thể khiến cho vật thể cản dòng khí sẽ bị rung động. Tần số phát sinh các xoáy khí phụ thuộc vào hình dạng và kích thước của vật cản gió, tốc độ gió.



Hình 4-3 : Sơ đồ xuất hiện các xoáy khí phía sau vật thể hình tròn (R_e là hệ số Reynold)

Hiện tượng dao động do các xoáy khí (luồng gió xoáy sau kết cấu) đã phát hiện được ở nhiều cầu dưới tác dụng của dòng gió và đã được Giáo sư Von Karman (người Đức) nghiên cứu ngay từ đầu thế kỷ này. Để đánh giá các tác động cần phải xét đến hệ số Reynold (R_e) như sau:

$$R_e = \frac{V \cdot B}{\nu} \quad (4-4)$$

trong đó :

V - tốc độ gió

B - chiều rộng cầu

ν - độ nhớt của dòng khí (có thể lấy bằng $0,15 \text{ cm}^2/\text{s}$)

f - tần số phát sinh xoáy khí ở phía sau vật thể (kết cấu nhịp)

h - chiều cao của vật thể cản gió (chiều dây kết cấu nhịp)

Mối quan hệ giữa tốc độ gió V , kích thước đặc trưng của vật cản h trong hướng vuông góc với dòng gió (chiều cao hình chiếu vật thể lên mặt phẳng đứng) và tần số phát sinh ω của xoáy khí được thể hiện trong công thức tính trị số Strouhal như sau :

$$S = \omega h / V \quad (4-5)$$

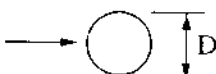
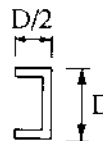
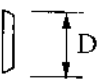
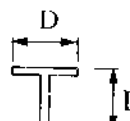
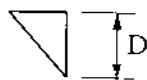
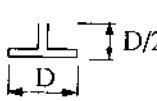
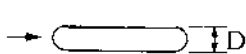
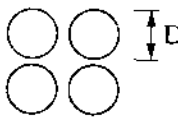
Số Strouhal này phụ thuộc hình dạng vật thể đang cản gió. Ví dụ một hình trụ tròn đường kính d sẽ có số Strouhal bằng 0,22 và rút ra :

$$\omega = 0,22 \cdot V / d$$

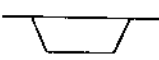
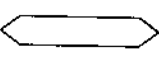
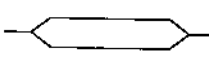
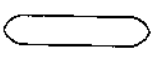
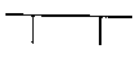
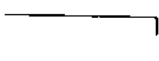
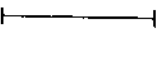
Trong Bảng 2 ghi các giá trị của số Strouhal tương ứng với các dạng mặt cắt ngang kết cấu khác nhau và hệ số Reynold khác nhau.

Bảng 2

Số Strouhal của các mặt cắt điển hình

	S_t						S_t
	R_e	30	50	500	10^3		→ 0,13 ← 0,24 ↗ 0,13
	S_t	0	0,13	0,20	0,21		
	R_e	10^4	10^5	10^6	10^7		
	S_t	0,20	0,19	0,21	0,23		
	→ 0,16 ← 0,21 ↑ 0,21						→ 0,14 ← 0,13
	← 0,12 ↗ 0,16						
	R_e	40	200	10^3			→ 0,14 ↑ 0,12
	S_t	0,13	0,17	0,15			
	R_e	10^4	10^5				
	S_t	0,14	0,13				
	→ 0,15 ← 0,19						→ 0,14 ↑ 0,14
	→ 0,20						
							$0,2 < S < 0,5$

Số Strouhal của mặt cắt cầu

	Hình dạng mặt cắt	S_t	T_h	$\frac{1}{T_h}$
1		0,12 ~ 0,14	0,102 ~ 0,256 (0,167)	6
2		0,11 ~ 0,19	0,033 ~ 0,226 (0,115)	8,9
3		—	0,101 ~ 0,153 (0,119)	8,4
4		—	0,070 ~ 0,103 (0,085)	11,2
5		—	0,055 ~ 0,138 (0,086)	11,6
6		0,05 ~ 0,13		
7		0,11	—	
8		0,17 ~ 0,19	0,045 ~ 0,200 (0,138)	7,25
9		0,16	—	
10		0,15	—	

4.1.4.2. Xét ví dụ về trạng thái của vật thể trụ tròn nằm trong dòng gió thổi

Trên hình 4-3 giới thiệu các trạng thái của vùng xoáy khí dòng gió thổi ngang bao quanh một vật hình trụ tròn (một hình dạng không thuận) có thể đại diện cho tình huống mà gió thổi ngang qua mặt kết cấu dầm cầu. Điều đặc biệt là các xoáy khí lớn sinh ra từ phía trên và phía dưới ở đằng sau vật trụ tròn theo kiểu có chu kỳ nhất định. Chúng phân bố thành 2 hàng ngay sau vật thể trụ tròn và được gọi là vệt xoáy Karman. Vệt xoáy này dao động và gây ra áp lực lắc giật lên xuống thất thường đối với vật thể trụ tròn. Áp lực đó mang đặc tính động (biến đổi theo thời gian). Tần số của lực lắc giật này bằng tần số phát sinh các xoáy khí và tỷ lệ thuận với tốc độ gió. Trạng thái khí động học phụ thuộc trị số Reynold (R_e).

Sau đây chúng ta xét tỷ mỉ hơn về tình huống nói trên.

- Khi $R_e < 10$ thì dòng khí thổi êm đềm

- Khi R_e tăng dần lên, phía sau hình trụ tròn xuất hiện 2 xoáy khí cố định, chúng lớn dần lên rồi sau đó tách khỏi dòng gió chính khi mà $R_e = 40$

- Khi $R_e > 50$ bắt đầu xuất hiện nhiều xoáy khí lần lượt và sắp xếp thành hai dòng xoáy khí ở phía sau vật thể. Trạng thái này tiếp tục cho đến khi mà $R_e = 150$.

- Khoảng giá trị của R_e ở giữa 150 và 300 là khoảng giá trị chuyển tiếp, dòng xoáy khí thẳng trở thành dòng các xoáy khí nhiều loạn và các xoáy khí được phát sinh ra một cách hỗn loạn không quy luật.

- Bắt đầu từ khi $R_e = 300$ thì các xoáy khí lại phát sinh theo chu kỳ và tình trạng này tiếp tục cho đến khi $R_e = 2.10^5$

- Khi giá trị R_e tăng hơn nữa thì các xoáy khí lại phát sinh hỗn loạn cho đến lúc mà $R_e = 5.10^6$

- Đến khi $R_e > 5.10^6$ thì một lần nữa các xoáy khí lại được phát sinh ra theo chu kỳ từ phía sau hình trụ tròn.

Đối với một hình trụ tròn đứng yên thì tần số xuất hiện các xoáy khí được xác định bằng số Strouhal (lưu ý : $S = 0,20$ khi mà $11800 < R_e < 19100$).

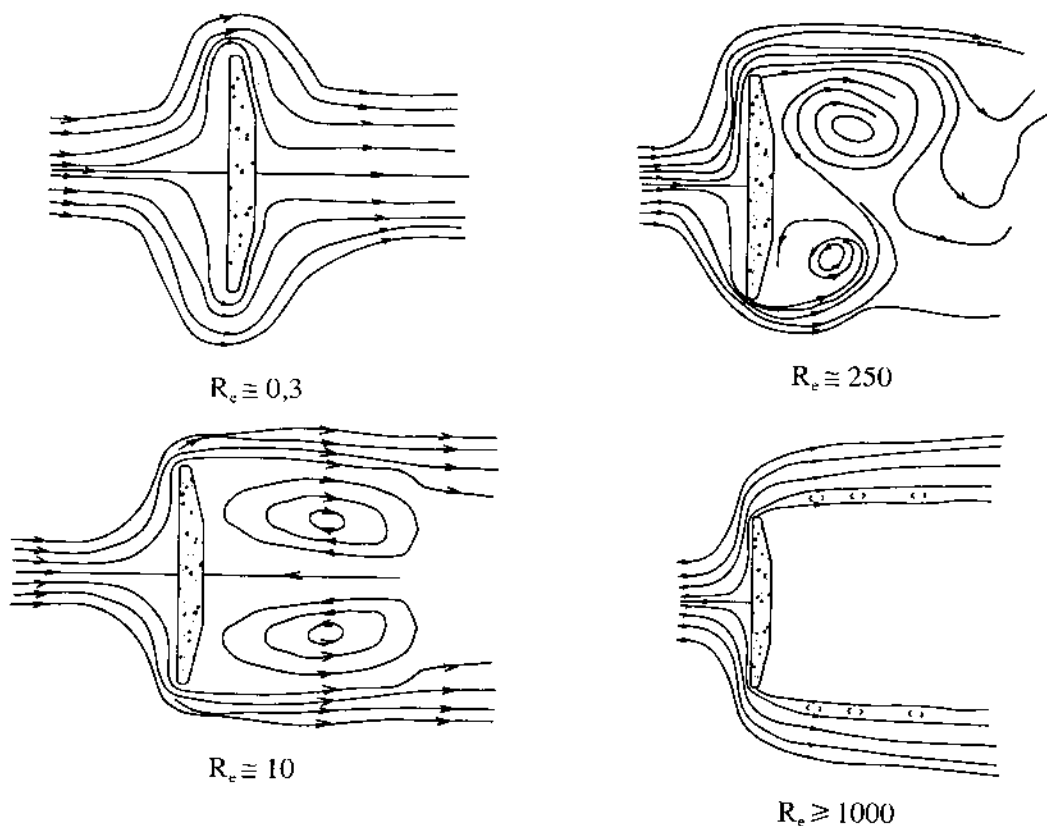
Đặc điểm kích thích của các xoáy khí đối với hình trụ tròn mềm là sự xuất hiện các dao động mạnh theo hướng ngang với hướng gió trong một khoảng biến đổi nhất định của tốc độ gió.

Kinh nghiệm cho thấy rằng hình trụ tròn dao động theo hướng dọc và hướng ngang với biên độ ngẫu nhiên và pha ngẫu nhiên với tần số gần bằng tần số dao động tự nhiên. Khi tốc độ gió tăng lên thì biên độ dao động cũng tăng theo. Điều này đặc trưng cho chế độ chuyển động êm cũng như chuyển động nhiễu loạn, nghĩa là khi $R_e > R_{e*}$, trong đó R_{e*} là số Reynoldd tương ứng với sự mất sức chịu và giảm sức cản bên hông thì dao động ngang giảm.

Theo các quan sát thí nghiệm thấy rằng ứng với một tốc độ gió nhất định thì tần số phát sinh các xoáy khí trở nên gần trùng với tần số dao động riêng của hình trụ tròn nằm trong dòng gió và biên độ dao động của hình trụ này tăng lên. Như vậy đã xảy ra cộng hưởng gió, tương ứng với tốc độ gió tới hạn và mất khả năng giảm chấn của hình trụ tròn.

4.1.4.3. Xét ví dụ về trạng thái của bản thẳng đứng nằm trong dòng gió thổi

Hình 4.4 cho thấy trạng thái dòng khí thổi qua một bản đặt thẳng đứng có 2 mép vát nhọn, tương ứng với các giá trị khác nhau của số Reynoldd.



Hình 4-4 : Mô tả các dòng khí xoáy phía sau bản thẳng đứng

- Khi số Reynoldd còn rất nhỏ ($R_e = 0,3$) thì dòng gió lượn quanh các mép vát phía trên và phía dưới của bản rồi lại chuyển động êm thuận tiếp tục.

- Khi tốc độ gió tăng lên, trị số Reynoldd cũng tăng theo đến $R_e = 10$ thì dòng khí bị phân tách thành hai dòng ở phía sau mép bản và 2 xoáy khí lớn xuất hiện đối xứng tạo ra vùng xoáy ngay sát phía sau bản.

- Khi mà trị số Reynoldd tăng đến $R_e = 250$ thì hai xoáy khí đối xứng sau bản bị mất tính đối xứng và bị thay thế bởi các xoáy khí biến đổi lần lượt theo chu kỳ làm thành các vùng xoáy nhiều như trên hình 4.4.

- Nếu trị số Reynoldd tăng cao đến lớn hơn 1000 thì nói chung một vùng xoáy nhiễu loạn sẽ xuất hiện phía sau bản. Lúc này không có các xoáy khí lớn nữa mà chỉ có một chuỗi nhiều xoáy khí nhỏ ở các mép trên và mép dưới phía sau bản, xung quanh đó là dòng chảy đều êm thuận.

4.1.4.4. Suy luận đầu tiên đối với kết cấu nhịp cầu

Đối với kết cấu nhịp cầu, tình huống phát sinh các xoáy khí cũng tương tự như đối với cánh máy bay. Quá trình biến động lên xuống thất thường của vùng xoáy khí gây ra các lực động học thẳng đứng lên dầm cầu. Nếu tốc độ gió đạt đến mức nào đó khiến cho

tần số phát sinh các xoáy khí gần xấp xỉ bằng tần số riêng của dầm cầu thì dầm cầu sẽ dao động rất mạnh với biên độ lớn đột ngột. Đó là dạng dao động uốn xảy ra trong mặt phẳng ngang với hướng gió. Khi mà tốc độ gió tăng lên nữa thì tần số xuất hiện các xoáy khí sẽ vượt quá tần số riêng của kết cấu khiến cho mức độ dao động của cầu lại giảm đi. Đến một tốc độ gió cao hơn nữa thì sự phát sinh các xoáy khí sẽ không theo chu kỳ nữa. Để đảm bảo an toàn cho kết cấu thì các kỹ sư cầu luôn phải thiết kế sao cho tần số riêng của kết cấu nhịp cầu khác nhiều so với tần số phát sinh các xoáy khí.

Do ảnh hưởng của các xoáy khí tác dụng lần lượt lên vật cản gió sẽ sinh ra một lực chu kỳ, hướng vuông góc với hướng của dòng gió. Lực này có thể viết dưới dạng quy luật điều hoà như sau :

$$P = 0,5 \rho V^2 C_S S \sin(2\pi\omega t) \quad (4-6)$$

trong đó :

S- diện tích hình chiếu vật cản gió lên mặt phẳng vuông góc với hướng dòng gió.

C_S - hệ số, phụ thuộc vào hình dạng vật cản gió (ví dụ đối với hình trụ tròn lấy $C_S = 1$)

Nếu lúc nào đó mà một trong các tần số riêng của kết cấu trùng với tần số biến đổi của lực kích động P thì có thể xảy ra dao động cộng hưởng rất nguy hiểm. Các kết cấu cầu dầm hay vòm, khung bằng BTCT thường có khối lượng rất lớn so với khối lượng của các xoáy khí cho nên những dao động như thế chỉ coi như ảnh hưởng của độ nhạy cảm với gió của kết cấu. Các dao động này không thể gây ra ứng suất lớn hoặc sự phá huỷ cấu. Nhưng đối với kết cấu cầu dây có trọng lượng tương đối nhẹ và nhịp dài thì mối nguy hiểm nhất chính là các quá trình động học phức tạp, liên quan đến sự phát triển biến dạng lớn của kết cấu nhịp đang bị dao động, dẫn đến sự biến đổi theo chu kỳ của các lực khí động đang tác dụng lên kết cấu nhịp.

4.1.4.5. Xét trạng thái của bản phẳng nằm nghiêng góc trong dòng gió thổi

Nếu dòng gió gặp một vật cản hình bản phẳng nằm nghiêng một góc α so với hướng gió thì sẽ xuất hiện áp lực gió đè lên bản phẳng đó. Thành phần của áp lực gió này theo hướng của dòng gió được các nhà nghiên cứu hàng không gọi là "sức cản bên hông". Còn thành phần áp lực vuông góc với hướng gió được gọi là lực nâng (hình 4.5). Góc α được gọi là góc hướng gió. Công thức tính lực nâng là :

$$L = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 C_L S \quad (4-7)$$

trong đó:

ρ - mật độ dòng gió

V - tốc độ gió

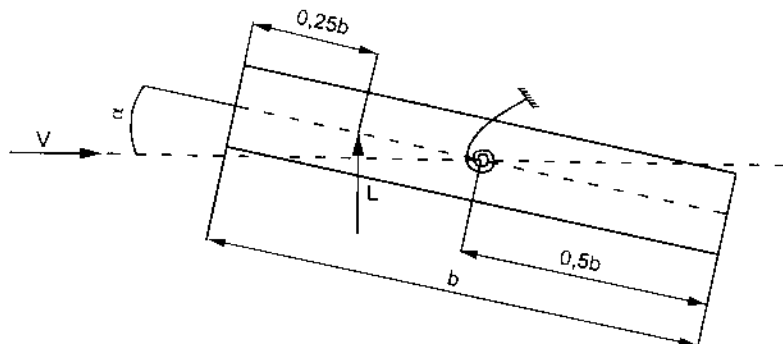
C_L - hệ số lực nâng

S - diện tích bản phẳng cản gió

Hệ số lực nâng không có thứ nguyên và theo kinh nghiệm thì phụ thuộc tuyến tính vào góc hướng gió α như sau :

$$C_L = a \cdot \alpha \quad (4-8)$$

Hệ số tỷ lệ a cũng là hằng số và gọi là độ dốc của đường cong của lực nâng. Giá trị theo kinh nghiệm của a thường xấp xỉ bằng 5. Đối với những bài toán động học cầu treo, có tác giả đề nghị lấy $a = 4$. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh rằng điểm đặt lực nâng ở tại khoảng 1/4 bề rộng bản phẳng kể từ mép trước của bản. Điểm tương ứng trên mặt cắt ngang được đặt tên là tâm khí động.



Hình 4.5: Sơ đồ hướng gió tác dụng nghiêng góc với vật thể hình bản phẳng

Trong các sơ đồ tính toán cầu treo có thể giả thiết rằng khi xoắn phần xe chạy thì mặt cắt ngang nhịp sẽ xoay quanh một trục, nằm trong mặt phẳng đối xứng dọc của kết cấu nhịp. Bởi vì tâm khí động (hình 4-6) nằm lệch so với trục xoắn cho nên tác động của dòng khí sẽ gây ra mômen xoắn. Đối với các trị số góc α nhỏ thì mômen xoắn này có thể lấy biểu thị gần đúng thông qua lực nâng. Xét đến các công thức (4-7) và (4-8) chúng ta có:

$$M_{xoắn} = \frac{bL}{4} = \frac{ba}{4} \alpha \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 S \quad (4-9)$$

Mômen xoắn rải dọc nói trên sẽ gây ra biến dạng xoắn của kết cấu nhịp. Chúng ta nghiên cứu một mô hình đơn giản là một bản cứng được liên kết vào một trục quay bằng một lò xo đàn hồi. Lò xo này sẽ tạo ra một mômen hồi phục m khi có góc quay α :

$$m = c\alpha \quad (4-10)$$

trong đó: c - trị số đặc trưng cho độ cứng của lò xo

Dĩ nhiên rằng với tốc độ gió V và độ cứng c nào đó của lò xo thì trạng thái tới hạn của sơ đồ tính toán đang xét sẽ là tình huống khi mà giá trị của mômen hồi phục, xuất hiện do lực đàn hồi của hệ thống, cân bằng với trị số của mômen xoắn do lực khí động gây ra, nghĩa là :

$$m = M$$

$$c\alpha = \frac{ba}{4} \cdot (\rho V^2 S \alpha / 2) \quad (4-11)$$

Chia phương trình (4-11) cho c và viết nó dưới dạng sau ;

$$\left(1 - \frac{1}{c} \frac{ba}{4} \frac{1}{2} \cdot \rho V^2 S\right) \cdot \alpha = 0 \quad (4-12)$$

Bởi vì $\alpha \neq 0$ nên điều kiện xác định tốc độ, tương ứng với trạng thái tới hạn sẽ là khi thành phần trong dấu ngoặc của công thức (4-12) hướng tới 0

Từ đó được :

$$v_{th} = \sqrt{\frac{8c}{ba\rho}} \quad (4-13)$$

Tốc độ này có tên gọi là tốc độ phân kỳ, còn chính hiện tượng xoay một kết cấu đàn hồi trong dòng khí và sự xuất hiện một trạng thái cân bằng tới hạn nào đó được gọi là hiện tượng phân kỳ.

Có thể tổng quát hoá các kết quả nhận được đối với trường hợp xoắn một bản đàn hồi có độ cứng GI_d và mép dọc của nó bị liên kết chống quay. Sau đây đưa ra cách giải dưới dạng ma trận với sơ đồ bản đàn hồi nói trên đã được phân chia theo dọc nhịp thành một số đoạn có chiều dài bằng d và sử dụng các ký hiệu sau:

φ - véc tơ góc quay đối với các điểm giữa của mỗi đoạn

M - véc tơ các mômen của các lực khí động

$L = d / (GJ_d) \cdot C$ - ma trận ảnh hưởng góc quay của các đoạn bản

B - chiều rộng bản

$a = 4$

$q = 0,5 \cdot V^2$

Khi đó tương ứng với công thức (4-9) có thể viết:

$$M = qdb^2\varphi \quad (4-14)$$

do ý nghĩa vật lý của bài toán mà sẽ có:

$$\varphi = L M \quad (4-15)$$

Từ đó chúng ta nhận được hệ phương trình tuyến tính, tương tự về ý nghĩa với phương trình (4-9):

$$(C - \lambda E) \varphi = 0 \quad (4-16)$$

$$\text{với:} \quad \lambda = GI_d / (qd^2 b^2) \quad (4-17)$$

Điều kiện tồn tại nghiệm của hệ phương trình là:

$$|C - \lambda E| = 0$$

Giá trị nghiệm lớn nhất λ_1 của phương trình đặc trưng nói trên tương ứng với biểu thức (4-17) sẽ chính là tốc độ tới hạn nhỏ nhất của dòng gió. Để xác định nghiệm λ_1 này thì cách đơn giản hơn cả là dùng phương pháp lũy thừa. Đối với tốc độ phân kỳ (mất ổn định ngang), sẽ có :

$$V = \sqrt{\frac{2GJ_d}{d^2 \cdot b^2 \rho \cdot \lambda_1}} \quad (4-18)$$

Cần lưu ý rằng tính chất đàn hồi của sơ đồ tính toán đang xét đã được biểu thị qua ma trận L, còn tính chất khí động học của sơ đồ đã được biểu thị qua ma trận qdb^2E

Lời giải nói trên chỉ tương ứng với điều kiện coi lực quán tính không có ảnh hưởng gì đến kết quả tính toán.

Trị số tốc độ phân kỳ (mất ổn định ngang) cho phép chúng ta hình dung về nguy cơ của tốc độ gió cao.

4.1.4.6. Xét trạng thái của kết cấu nhịp cầu dây

Ma trận L cũng có thể được lập ra cho một sơ đồ kết cấu không gian đầy đủ của cầu dây để phản ánh được đầy đủ điều kiện về liên kết giữa dầm cứng với các dây cáp của cầu, cũng như phản ánh được sự phân bố lại nội lực trong các dây cáp chịu lực của cầu treo khi đặt tải không đối xứng lên kết cấu nhịp cầu.

Tuy nhiên cần lưu ý rằng sự phá huỷ cầu do gió luôn xảy ra do dao động quá lớn. Như vậy lời giải đầy đủ hơn của bài toán về trạng thái nguy hiểm của cầu treo sẽ phải xét đến lực quán tính và mang đặc tính động học. Cách đặt bài toán như vậy đòi hỏi phải nghiên cứu một kiểu dao động của hệ thống với tên gọi là dao động flutter.

Người ta đã nghiên cứu lý thuyết về flutter của một bản liên kết đàn hồi với 2 bậc tự do trong dòng gió. Nhưng rất tiếc là chưa có lời giải tổng quát cho các hệ thống phức tạp hơn nữa vì những khó khăn về mặt toán học. Hơn nữa bài toán flutter còn bị phức tạp hoá thêm bởi phải xét đến ảnh hưởng giật của các xoáy khí đối với hệ thống kết cấu nằm trong dòng gió. Dạng dao động này có tên gọi riêng là dao động flutter giật. Lý thuyết về hiện tượng này còn chưa hoàn thiện và ở nhiều nước các nghiên cứu đều đi theo con đường dùng thí nghiệm mô hình kết hợp với lời giải lý thuyết để phục vụ thiết kế ngay.

4.1.5. Bài toán cơ bản về động học kết cấu cầu

4.1.5.1. Về các bài toán động học cơ bản

Các kết cấu cầu hiện đại ngày nay đều nhẹ hơn và do đó nhạy cảm hơn với các vấn đề động học. Vì thế trong thiết kế cầu luôn phải chú ý đến việc tính toán dao động. Các dao động của kết cấu nhịp cầu có thể chia ra 2 loại :

- 1- Loại dao động nguy hiểm về mặt cường độ (độ mỏi) đối với kết cấu.
- 2- Loại dao động ảnh hưởng đến sức khỏe và tâm - sinh lý của người qua cầu

Như vậy mọi tính toán động học đối với cầu đều phải vừa đảm bảo an toàn kết cấu và vừa đảm bảo sự tiện nghi trong khai thác cầu.

Vấn đề ổn định khí động của cầu cần phải được kiểm tra không chỉ đối với điều kiện khai thác mà cả đối với các điều kiện trong thời gian đang thi công. Chính trong lúc thi công thường xảy ra các tình huống bất lợi nhất vì các tần số dao động riêng lúc này đều thấp và tỷ số giữa tần số dao động riêng xoắn với tần số dao động riêng uốn có thể chỉ gần bằng 1 (rất nguy hiểm). Đặc biệt đó là tình huống khi đang thi công cầu treo. Do vậy chúng ta phải quan tâm kỹ đến tính toán ổn định khí động học của cầu này.

Các dao động khí đàn hồi, hấp thụ năng lượng của dòng khí có thể chuyển thành hiện tượng *flutter* nếu gặp một số điều kiện nhất định. Cần phân biệt 2 loại là *flutter* cổ điển và *flutter* giạt.

Nếu dòng khí thổi qua kết cấu một cách êm ả thì có thể quan sát thấy *flutter* cổ điển. Khi tốc độ gió yếu, các dao động khí đàn hồi sẽ bị tắt dần do tác dụng giảm chấn sẵn có của bản thân kết cấu. Khi tốc độ gió tăng lên mãi sẽ có thể đến thời điểm mà khả năng giảm chấn đối với một trong các dao động nào đó trở nên bằng 0. Như vậy đã đạt đến trạng thái tới hạn thứ nhất của *flutter*, sẽ dẫn đến sự tăng rất nhanh biên độ dao động với tần số tương ứng. Đối với các kết cấu nhịp cầu thì hiện tượng *flutter* cổ điển này thường mang đặc tính mất ổn định do dao động uốn-xoắn kết hợp.

Hiện tượng *flutter* giạt xuất hiện khi có nhiễu loạn dòng gió sau khi đi qua một kết cấu vật cản gió có hình dạng không lưu tuyến và hiện tượng này mang nhiều đặc tính dao động xoắn. Khi đó sự phát sinh các xoáy khí sẽ gây ra các lực khí động, các lực này gây ra dao động. Nếu tần số xuất hiện của các xoáy khí gần trùng với tần số riêng của kết cấu sẽ dẫn đến cộng hưởng (*flutter* giạt). Tùy theo tốc độ gió và tính chất giảm chấn của bản thân kết cấu mà các dao động cộng hưởng này có thể gây phá huỷ hoặc không gây phá huỷ nhưng đều gây ra mối kết cấu. Trên thực tế các đặc trưng của dao động khí đàn hồi phức tạp hơn nữa và còn gây nhiều khó khăn hơn nữa cho việc giải quyết triệt để vấn đề này.

Lịch sử xây dựng cầu trên khắp thế giới đã cho thấy rõ việc lơ đãng hay xét không đầy đủ đến các hiệu ứng khí động học có thể dẫn đến thảm họa phá huỷ cầu (cầu Tacoma).

Trên đây chúng ta mới nói đến dao động của kết cấu dầm cứng, nhưng các cột tháp cầu treo cũng bị dao động dưới tác dụng của dòng gió. Lấy ví dụ trường hợp cầu Sitka ở Hoa Kỳ, cầu này có 2 dầm hộp, các dây xiên được bố trí trong 2 mặt phẳng thẳng đứng. Cột tháp của cầu dạng thẳng đứng có mặt cắt chữ nhật: dọc cầu bằng 92 cm, ngang cầu bằng 122 cm, chiều cao cột tháp là 30,5m. Người ta đã thường xuyên quan sát thấy các cột tháp dao động trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng bố trí các dây xiên. Dao động này do gió thổi dọc cầu và gây ra những xoáy khí mà tần số của chúng ứng với tốc độ gió cỡ 10,8 - 11,7 m/s là trùng với tần số dao động riêng uốn của các cột tháp. Biên độ dao động lớn nhất ở đỉnh cột tháp đạt đến 14,3 cm khi tần số bằng 1,17 Hz. Khi đó ở đáy cột đã xuất hiện ứng suất bổ sung bằng 33 MPa.

Như vậy tác động của gió lên công trình nói chung có thể xuất hiện như sau.

Gió tạo ra áp lực tĩnh (tải trọng tĩnh), điều này luôn luôn được xét đến lúc thiết kế cầu. Các tác động xung giạt của gió sẽ gây ra các lực kích động khiến công trình bị dao động. Những cấu kiện mềm của kết cấu, như là dây cáp, thường có mặt cắt hình trụ tròn, khi tốc độ gió đạt đến trị số nhất định mà tần số phát sinh các xoáy khí trùng với tần số riêng của cấu kiện cản hướng dòng gió (ví dụ là cáp), sẽ gây ra cộng hưởng và cũng gây ra các ứng suất bổ sung.

Cuối cùng, trong những kết cấu khá mềm, có mặt cắt ngang không tròn, có thể phát triển dần dần sự mất ổn định khí động rồi dẫn đến phá hủy kết cấu.

Như vậy có thể nhận xét rằng bài toán động học quan trọng nhất đối với cầu dây văng là bài toán khí động học.

4.1.5.2. Tính toán gần đúng các tần số dao động riêng của cầu dây

Hiện nay ở nước ta cũng đã khá phổ cập các chương trình máy tính dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn có khả năng giúp các kỹ sư thiết kế tính toán khá nhanh chóng và chính xác về các tần số dao động riêng của kết cấu nhịp cầu. Ví dụ, chương trình SAP 2000, chương trình STAAD-III, v.v...

Tuy nhiên trong nhiều tính toán thực hành vẫn cần đến các công thức tính toán gần đúng để có thể nhanh chóng đánh giá gần đúng chấp nhận được về các tần số dao động riêng của kết cấu nhịp, nhằm phục vụ cho việc tính toán ổn định khí động của cầu dây xiên và cầu dây văng. Vì thế sau đây đưa ra một vài công thức thông dụng.

Tần số dao động riêng uốn:

Nếu xét sơ đồ dầm chỉ có 1 điểm khối lượng tập trung thì bằng cách thay tải trọng đơn vị $p = 1$ bởi trọng lượng bản thân của kết cấu ta có:

$$\omega^2 = g/y_{\max}$$

từ đó được

$$f_B = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{y_{\max}}}$$

Dựa trên rất nhiều kết quả đo đạc các cầu dây, người ta đã nhận xét rằng công thức này có sai số xấp xỉ 10 %.

Nếu xét sơ đồ dầm cứng của cầu dây có khối lượng rải đều chứ không tập trung như trên thì công thức sẽ chính xác hơn như sau :

$$f_B = \frac{1,1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{y_{\max}}} \quad (4-19)$$

trong đó : $y_{\max}$ là biến dạng tĩnh lớn nhất của hệ thống dưới tác dụng trọng lượng bản thân kết cấu.

Ví dụ đối với cầu Rio Parana, với độ vồng 1,4m thì sẽ có tần số dao động riêng uốn là

$$f_B = \frac{1,1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{9,81}{1,40}} = 0,47 \text{ Hz}$$

Tần số dao động riêng xoắn:

Đối với cầu dây có mặt cầu khá mềm, tần số xoắn thường có thể tính gần đúng suy ra từ tần số uốn theo công thức :

$$f_T = \frac{b \cdot f_B}{2r} \quad (4-20)$$

trong đó: r - bán kính xoay

b - khoảng cách ngang cầu giữa các dây

Đối với cầu dây có mặt cầu cứng, tần số riêng xoắn phụ thuộc trực tiếp vào độ cứng chống xoắn của mặt cắt ngang cầu G.J như sau :

$$f_T = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{GJ}{I}} \quad (4-21)$$

trong đó :

I - mômen quán tính cực trên một đơn vị chiều dài của kết cấu nhịp

J - hằng số xoắn

L - chiều dài nhịp chính của cầu

4.1.5.3. Về các nghiên cứu ổn định khí đàn hồi

Sự ổn định khí đàn hồi của cầu phụ thuộc vào các yếu tố sau đây :

1- Dạng hình học của kết cấu nhịp cầu

Xét các dạng mặt cắt ngang chung của dầm cứng. Dạng này có thể thuộc loại ổn định khí động học hoặc thuộc loại dễ mất ổn định khí động học. Các dạng mặt cắt dầm đặc hoặc mặt cắt chữ H của cầu kiểu dàn hờ và những dạng mặt cắt không thon khác đều có thể bị mất ổn định khí động. Lấy ví dụ mặt cắt cầu Tacoma - Hoa Kỳ (đã bị gió phá huỷ năm 1940) là dạng hình chữ H. Có thể tăng khả năng ổn định bằng cách chọn dạng mặt cắt thon để thoát gió hoặc các mặt cắt hờ có hệ giằng chống gió ở cao độ mặt xe chạy. Các cánh của máy bay là một ví dụ điển hình về dạng mặt cắt thon thoát gió tốt nhưng kết cấu cầu thì không thể dùng dạng mặt cắt đó được.

2- Các tần số dao động riêng của kết cấu cầu

Dạng mặt cắt kết cấu nhịp cầu có thể có khả năng chịu xoắn kém hoặc khoẻ. Một ví dụ về dạng mặt cắt chịu xoắn tốt là dạng mặt cắt hộp kín hoặc mặt cắt kiểu dàn cao có mặt cầu kín và hệ thống giằng chống gió ở phía dưới đáy dàn. Dạng mặt cắt kết cấu hình chữ H là dạng kém chịu xoắn. Độ ổn định khí đàn hồi sẽ được đảm bảo nếu kết cấu nhịp có tỷ số giữa tần số riêng xoắn và tần số riêng uốn của kết cấu là đủ lớn (ASCE, 1952).

3- Tính chất giảm chấn cơ học của kết cấu cầu

Độ ổn định khí đàn hồi của kết cấu nhịp cầu có thể được cải thiện bằng cách tăng tỷ số giảm chấn cơ học của cầu, nghĩa là tăng tỷ số của hệ số демпнот và hệ số демпнот tới hạn. Trong quá trình chuyển động, nội ma sát sẽ tăng lên trong hệ kết cấu và có hiệu ứng như một lực làm tắt dần dao động.

Một số nghiên cứu về tải trọng gió trên các kiểu cầu khác nhau và các phương pháp tính toán chúng đã được trình bày trong nhiều tài liệu, tuy nhiên do bản chất cực kỳ bất định của lực gió và sự phức tạp của các tính toán nên các Tiêu chuẩn AASHTO (1992, 1994, 1998) đều đưa ra những trị số thực nghiệm về áp lực gió cho các kiểu cầu khác nhau.

Hiệu ứng động học của gió được xét đến chủ yếu trong các cầu dây văng và cầu dây xiên. Tần số và biên độ dao động của cầu là các hàm số của lực gió biến đổi thất thường và các đặc trưng động học của cầu tạo kết cấu nhịp cầu.

4.1.6. Các lực khí động học

4.1.6.1. Xét trường hợp tổng quát về tác động tương hỗ của vật thể có hình dạng bất kỳ với dòng khí

Một đặc tính của cầu dây văng dao động trong dòng gió có thể kích thích gây ra các xoáy khí với tần số phát sinh nhất định, những xoáy khí này toả ra từ các mép biên của dầm cứng của cầu dây. Khi đó chúng gây ra xung áp lực, có thể phân tách thành các thành phần theo hướng dòng khí (sức cản hông) và thành phần vuông góc với dòng khí (lực nâng).

Nếu tần số phát sinh các xoáy khí trùng với tần số dao động riêng thì sẽ xảy ra cộng hưởng dao động với biên độ rất lớn, đặc biệt là trong trường hợp kết cấu có khả năng giảm chấn yếu. Với các góc hướng khác nhau của dòng gió cũng sẽ xuất hiện các lực nâng, gây dao động uốn trong mặt phẳng thẳng đứng, và gây ra cả dao động xoắn nữa, nếu tần số của hai dạng dao động này xấp xỉ bằng nhau.

Các nghiên cứu từ sau sự kiện sụp đổ cầu Tacoma ở Hoa Kỳ năm 1940 đến nay đã khẳng định được kết luận là phải thiết kế kết cấu sao cho các tần số riêng của dao động xoắn và dao động uốn sẽ khác nhau khá nhiều để đảm bảo an toàn cho cầu. Giáo sư J.Mathivat (người Pháp) đã chứng minh rằng tỷ số nói trên nên bằng khoảng 2,5 là tốt nhất. Nhưng lời khuyên này mới chỉ có giá trị đối với các nhịp cầu không lớn và đối với giai đoạn thiết kế sơ bộ. Để kết luận chính xác đối với mỗi cầu dây cụ thể còn cần phải tiến hành thí nghiệm mô hình trong hầm thí nghiệm khí động học.

Dưới tác dụng của dòng gió thì trong mặt cắt ngang nhịp cầu, thêm vào các nội lực tĩnh học, còn phải kể đến 3 tác động là:

- Tải trọng nằm ngang T
- Tải trọng thẳng đứng N
- Tải trọng mômen xoắn M

Các tác động này lại phụ thuộc vào các yếu tố sau đây :

- Áp lực gió q
- Hình dạng mặt cắt kết cấu nhịp (hệ số C_T, C_N, C_M)
- Góc tác dụng của gió lên kết cấu nhịp α

Các đặc trưng định lượng của hình dạng mặt cắt có thể tìm thấy trong các tài liệu dựa trên rất nhiều kết quả thí nghiệm trên khắp thế giới. Ví dụ, để xác định các hệ số hình dạng C_T, C_N, C_M chỉ có cách là làm thí nghiệm (trên mô hình chẳng hạn). Sơ đồ đặt tải lên mặt cắt ngang cầu như hình 4-6 :

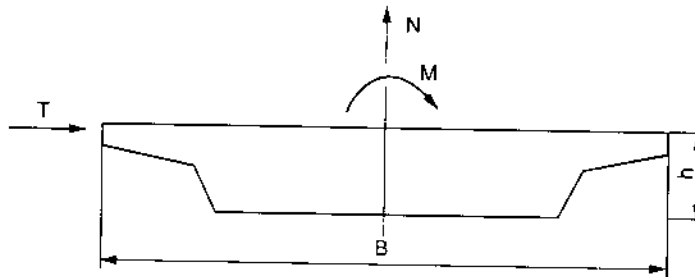
$$\begin{aligned} T &= C_T qh/ \\ N &= C_N qh/ \\ M &= C_M qBh/ \end{aligned} \quad (4-22)$$

với

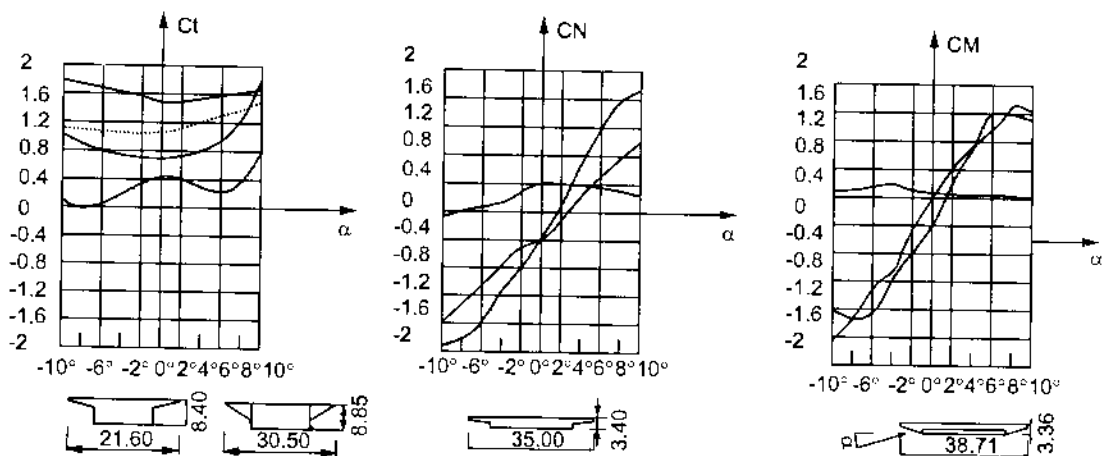
l - chiều dài cầu

h - chiều dày tổng cộng của kết cấu nhịp

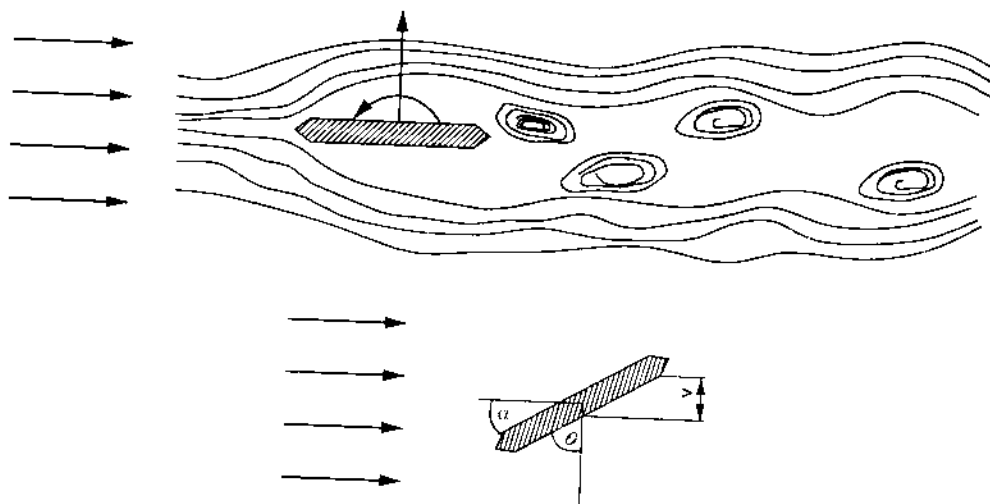
B - chiều rộng kết cấu nhịp



Hình 4-6: Các lực khí động T, N, M



Hình 4-7: Các hệ số C_T, C_N, C_M đối với 4 hình dạng mặt cắt ngang điển hình lấy tùy theo góc tới của dòng gió tác động lên kết cấu nhịp.



Hình 4-8: Mô tả hiện tượng flutter

Trên hình 4-7 mô tả các kết quả thí nghiệm đối với 4 hình dạng mặt cắt ngang điển hình. Các đường cong biểu đồ của mỗi hệ số được vẽ tùy thuộc góc tác dụng của dòng gió lên kết cấu nhịp. Hiện tượng *flutter* khi xảy ra ở mức độ cao sẽ kéo theo sự nhiễu loạn của dòng khí sau khi đi qua mặt cắt kết cấu nhịp (hình 4-8). Thực ra, nếu hình dạng mặt cắt không thuận, khó thoát gió êm thuận thì hiện tượng xoáy khí nhiễu loạn sẽ xảy ra phía sau mặt cắt dẫn đến nguy cơ dao động cộng hưởng.

Trong trường hợp tổng quát, tác động của gió lên công trình sẽ làm xuất hiện các lực động học gồm : sức cản bên hông, lực nâng và mômen xoắn.

Giá trị rải dọc nhịp của các lực đó, tác dụng lên kết cấu nhịp dài l sẽ là :

$$\text{- Lực cản bên hông} \quad q_x = T/l = q B C_T \quad (4-23)$$

$$\text{- Lực nâng} \quad q_y = N/l = q B C_N \quad (4-24)$$

$$\text{- Mômen xoắn} \quad m = M/l = q B^2 c_M \quad (4-25)$$

$$q = 0,5 \rho V^2 \quad (4-26)$$

trong đó

l - chiều dài kết cấu nhịp

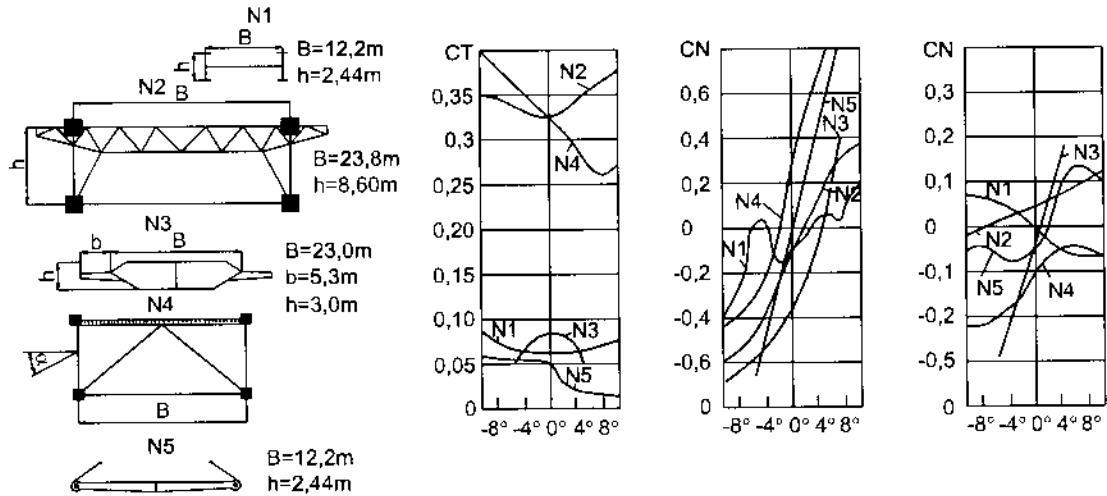
B - chiều rộng mặt cắt ngang dầm

C_i - hệ số không thứ nguyên, phụ thuộc vào trị số góc hướng của dòng gió và hình dạng mặt cắt ngang (được xác định bằng thực nghiệm)

ρ - mật độ không khí

V - tốc độ gió.

Các lực khí động phụ thuộc vào tốc độ gió cũng như góc hướng của gió, hình dạng và kích thước mặt cắt ngang vật thể. Các đồ thị của hệ số C_i đối với các dạng mặt cắt khác nhau, nhận được từ các thực nghiệm với mô hình của một dót dầm cứng trong hầm thí nghiệm gió khác nhau (hình 4.9). Đối với các vật thể hình lăng trụ có mặt cắt nhiều góc cạnh thì các hệ số c_i thực tế là không phụ thuộc vào số Reynold.



Hình 4-9: Các biểu đồ hệ số C_i tương ứng với một vài dạng mặt cắt dầm cứng của cầu dây

4.1.6.2. Về các đặc điểm của lực khí động

Khi dòng khí tác động lên mặt cắt vật thể dưới một góc nào đó thì sẽ xuất hiện lực nâng, điểm đặt và hướng của lực nâng phụ thuộc vào hình dạng và các tham số của mặt cắt ngang. Để làm ví dụ chúng ta xét mặt cắt hình chữ H như hình 4.10. Vị trí hợp lực và hướng của các lực nâng L_1 , L_2 và L_3 tương ứng với 3 trạng thái ổn định khí động:

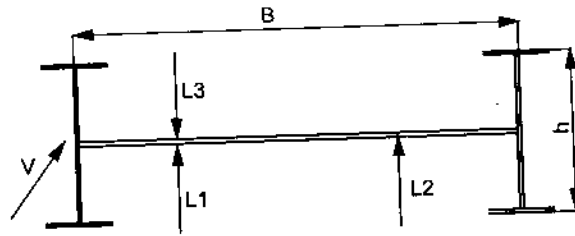
1- Khi $h/B < 0,08$ và L_1 thì trạng thái sẽ là lý tưởng, mặt cắt là ổn định đối với dao động thẳng đứng cũng như đối với dao động xoắn.

2- Khi $h/B = 0,08 - 0,24$ và L_2 thì đó là tình huống thường gặp nhất, tương ứng với lúc mặt cắt không ổn định về chịu mômen xoắn.

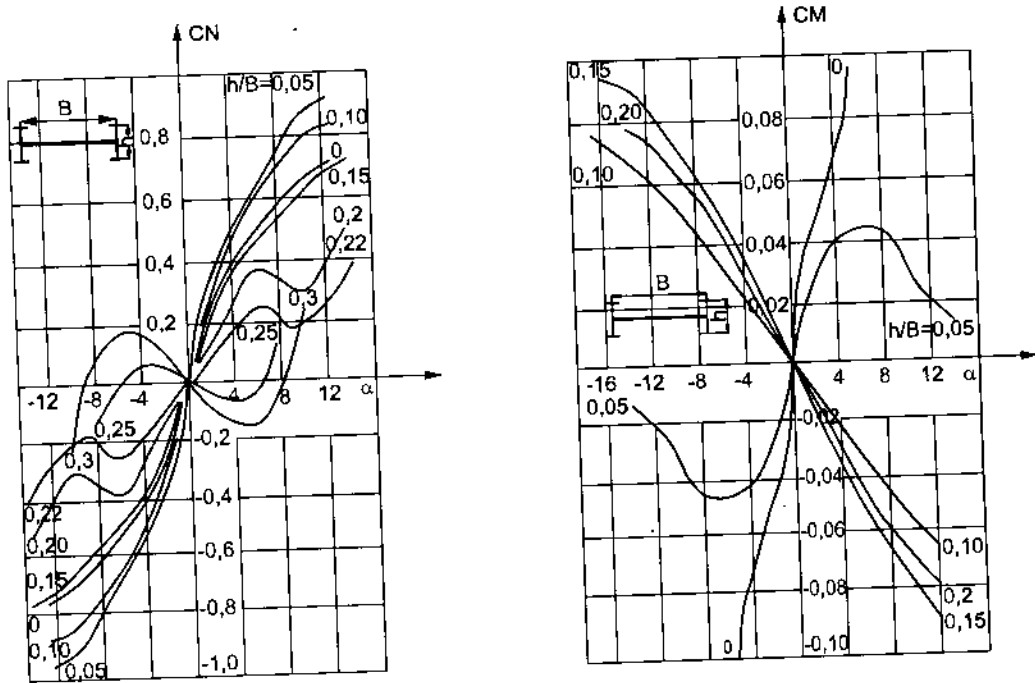
3- Khi $h/B \geq 0,24$ tức là tình huống hãn hữu, ít gặp nhất, bất lợi nhất cả về chịu mômen xoắn và chịu mômen uốn.

Các hệ số khí động của lực nâng và của mômen xoắn (hình 4.7) của 3 trạng thái đó tương ứng với các giá trị dương và hoặc âm của đạo hàm :

- Trường hợp 1: $c'_L > 0$, $c'_M > 0$
- Trường hợp 2: $c'_L > 0$, $c'_M < 0$
- Trường hợp 3: $c'_L < 0$, $c'_M < 0$

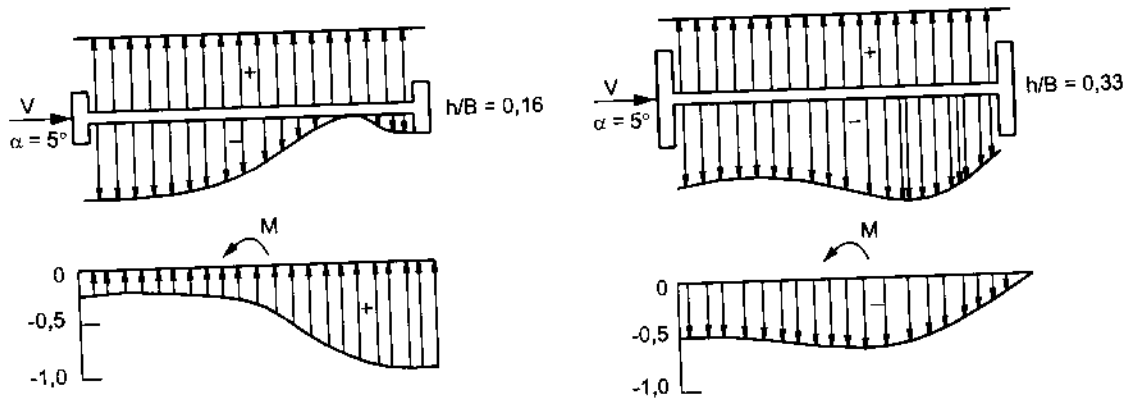


Hình 4-10: Sơ đồ tác dụng của lực nâng lên mặt cắt hình chữ H



Hình 4.11: Biểu đồ hệ số C_N và C_M mặt cắt hình H

Đặc tính phân phối của áp lực khí động theo bề rộng mặt cầu khi góc hướng của gió bằng 5 độ được vẽ trên hình 12.



Hình 4-12: Sơ đồ phân bố áp lực khí động lên mặt cắt hình H

4.1.7. Khái niệm về tính toán flutter

Bài toán ổn định của một vật thể đàn hồi nằm trong dòng khí liên quan đến một chuyên ngành cơ học đặc biệt, đó là lý thuyết khí đàn hồi với phạm vi ứng dụng chủ yếu trước đây là trong ngành hàng không.

Tuy nhiên các hiện tượng khí đàn hồi như hiện tượng phân kỳ (divergence) và hiện tượng flutter là đặc trưng không chỉ đối với các kết cấu máy bay mà cả đối với các kết cấu cầu treo dây văng và cầu treo dây xiên.

Lý thuyết phân kỳ: là lý thuyết về dạng xoắn của sự mất ổn định tĩnh, trước tiên đã được nghiên cứu ứng dụng cho cánh máy bay. Tuy nhiên ngay cả trong lĩnh vực kết cấu xây dựng cũng đã có nhiều thành tựu nghiên cứu về vấn đề ổn định uốn - xoắn kết hợp.

Lý thuyết flutter: là lý thuyết về dao động kết cấu trong dòng khí cũng được phát triển trước tiên cho các ứng dụng của ngành hàng không. Nhưng ngành kỹ thuật xây dựng có những vấn đề riêng của mình. Bài toán flutter là bài toán kiểu mới của lý thuyết ổn định đàn hồi và yêu cầu phải có một đường lối giải quyết mới đặc biệt.

4.1.7.1. Các công thức tính toán chính

Tần số phát sinh xoáy khí phụ thuộc vào độ lớn của tốc độ gió. Nếu tần số đó gần bằng một trong các tần số dao động riêng uốn của kết cấu chẳng hạn thì có thể có nguy cơ xảy ra cộng hưởng. Nguy cơ này chỉ bị hạn chế bởi khả năng kháng chấn của kết cấu thể hiện qua đặc trưng δ .

Số *Strouhal* có giá trị trung bình bằng 0,20 đối với một hình trụ tròn với đường kính là h , hoặc giá trị trung bình bằng 0,10 đến 0,20 đối với mặt cắt kết cấu cầu có chiều dài là h (giá trị 0,10 tương ứng với tình huống khi có các xoáy khí chỉ phát sinh ở một bên của mặt cắt). Có thể tính toán tốc độ gió tới hạn bằng phương trình (4-5). Nói chung các kết quả nhận được là không phụ thuộc số *Reynold* (số R_e bằng khoảng $10^5 \div 10^7$). Độ lớn của các lực chu kỳ nảy sinh ra sẽ phụ thuộc tốc độ gió và hình dạng mặt cắt ngang. Một kết cấu nhịp thanh mảnh và thuận gió sẽ là hình dạng hợp lý nhất xét theo quan điểm chịu gió tốt.

Có thể đánh giá lực chu kỳ như phản lực động tương ứng:

$$F(t) = F_0 \sin \omega t \quad (4-27)$$

trong đó:

ω (Re,S) - xung động của các xoáy khí

$$F_0 = (\rho V^2/2)Ch$$

ρ - khối lượng riêng của không khí (xấp xỉ bằng $1,3 \text{ kg/m}^3$)

C - hệ số đặc trưng chịu lực của mặt cắt ngang nhịp, phụ thuộc f và V

$$V(t) = \frac{\pi}{\delta} \frac{1}{k} \frac{1}{B} \rho \frac{V}{2} C h \sin \omega t \quad (4-28)$$

trong đó:

δ - suất giảm logarit (lấy gần đúng bằng 0,05)

$1/k$ - độ mềm liên quan đến tải trọng trên một đơn vị bề mặt cầu (F_0/b)

B - chiều rộng kết cấu nhịp

Biên độ dao động sẽ là:

$$y = \frac{\pi}{\delta} \frac{1}{kB} \left(\rho \frac{V}{2} Ch \right) = \frac{\pi}{\delta} \frac{1}{k} \frac{F}{B} = \frac{\pi}{\delta} y_{\text{tĩnh}} \quad (4-29)$$

trong đó: $y_{\text{tĩnh}}$ - biến dạng tĩnh do lực F_0 gây ra

Trong trường hợp mà $V = fh_y/S$ thì có khả năng gây kích động và từ phương trình (4-29) có thể rút ra :

$$ky = \frac{\pi}{\delta} \frac{F}{B} = \frac{\pi}{\delta} \frac{\rho C f^2}{2 S^2} h^3 \quad (4-30)$$

4.1.7.2. Hiệu chỉnh kết quả tính toán dựa trên kết quả thực nghiệm mô hình

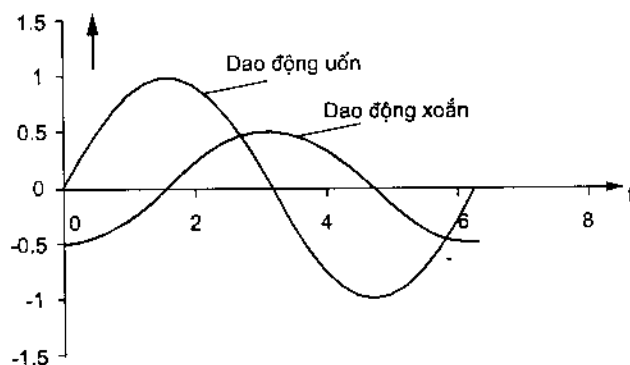
Các công thức trên đây chỉ là xét cho trường hợp lý thuyết chung. Trên thực tế cần phải hiệu chỉnh các kết quả tính toán lý thuyết theo những kết quả thu được từ thực nghiệm trong hầm thí nghiệm khí động học (hầm thử gió).

Trái với hiện tượng cộng hưởng, các lực được cung cấp năng lượng trong trường hợp *flutter* này là bởi sự chuyển động của chính kết cấu. Sự mất ổn định thường được biểu thị trước bằng hiện tượng *flutter* (sự bồng bênh trong dòng gió). Trên hình 4.14 cho một hình ảnh đơn giản hoá của tình huống mà có sự lệch pha bằng $\pi/2$ giữa dao động uốn và dao động xoắn. Bắt đầu từ một tốc độ gió nhất định (gọi là tốc độ gió tới hạn $V_{\text{tới hạn}}$) thì kết cấu nhịp nhận được thêm phần năng lượng mà nó không thể triệt tiêu đi bằng khả năng tự giảm chấn. Khi đó sẽ xảy ra chuyển động uốn và xoắn kết hợp do các lực khí động với các biên độ tăng nhanh đột ngột đến nỗi phá huỷ kết cấu.

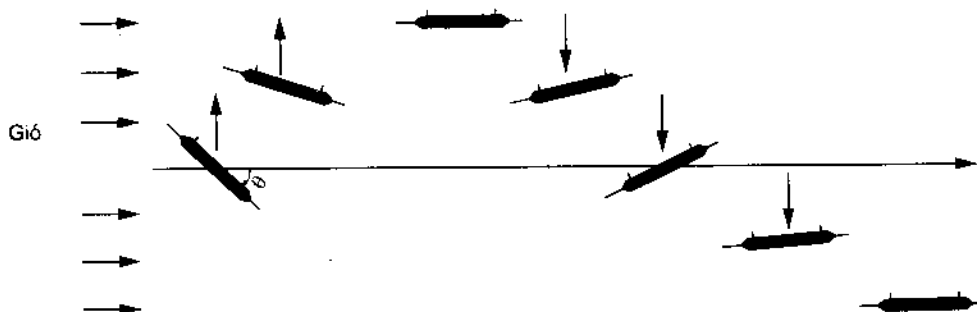
Các kỹ sư cần phải thiết kế sao cho tốc độ gió giới hạn đối với một cầu treo dây văng là cao hơn mọi tốc độ gió thực tế có thể xuất hiện ở vị trí cầu trong suốt cuộc đời của cầu đó, ví dụ 100 năm (tương ứng với một mức độ an toàn nào đó định trước). Trong trường hợp cầu dây xiên người ta có xu hướng chọn kết cấu nhịp có độ cứng chống xoắn

càng lớn càng tốt bằng cách chọn kiểu bố trí các cáp xiên trong 2 mặt phẳng bên thay thế cho cách bố trí cáp xiên chỉ trong 1 mặt phẳng đúng giữa tim cầu. Hơn nữa các cáp xiên hai bên còn nên được bố trí chụm đầu trên của cáp vào đỉnh cột tháp hình chữ A. Còn trong trường hợp cầu treo dây võng người ta thường tìm cách mở rộng mặt cắt ngang cầu hay bố trí cáp chính có chỗ liên kết trực tiếp vào hệ dầm mặt cầu. Mặt khác, mặt cầu càng rộng thì càng có khả năng chống các dao động do gió tốt hơn. Cần phải tránh thiết kế cầu tạo những cầu nhịp dài mà lại hẹp bề ngang như cầu Tacoma (xin nhắc lại rằng cầu này dài 853m và rộng 12m, nghĩa là tỷ lệ $B/L = 1/70$. Như vậy tỷ lệ này quá lớn).

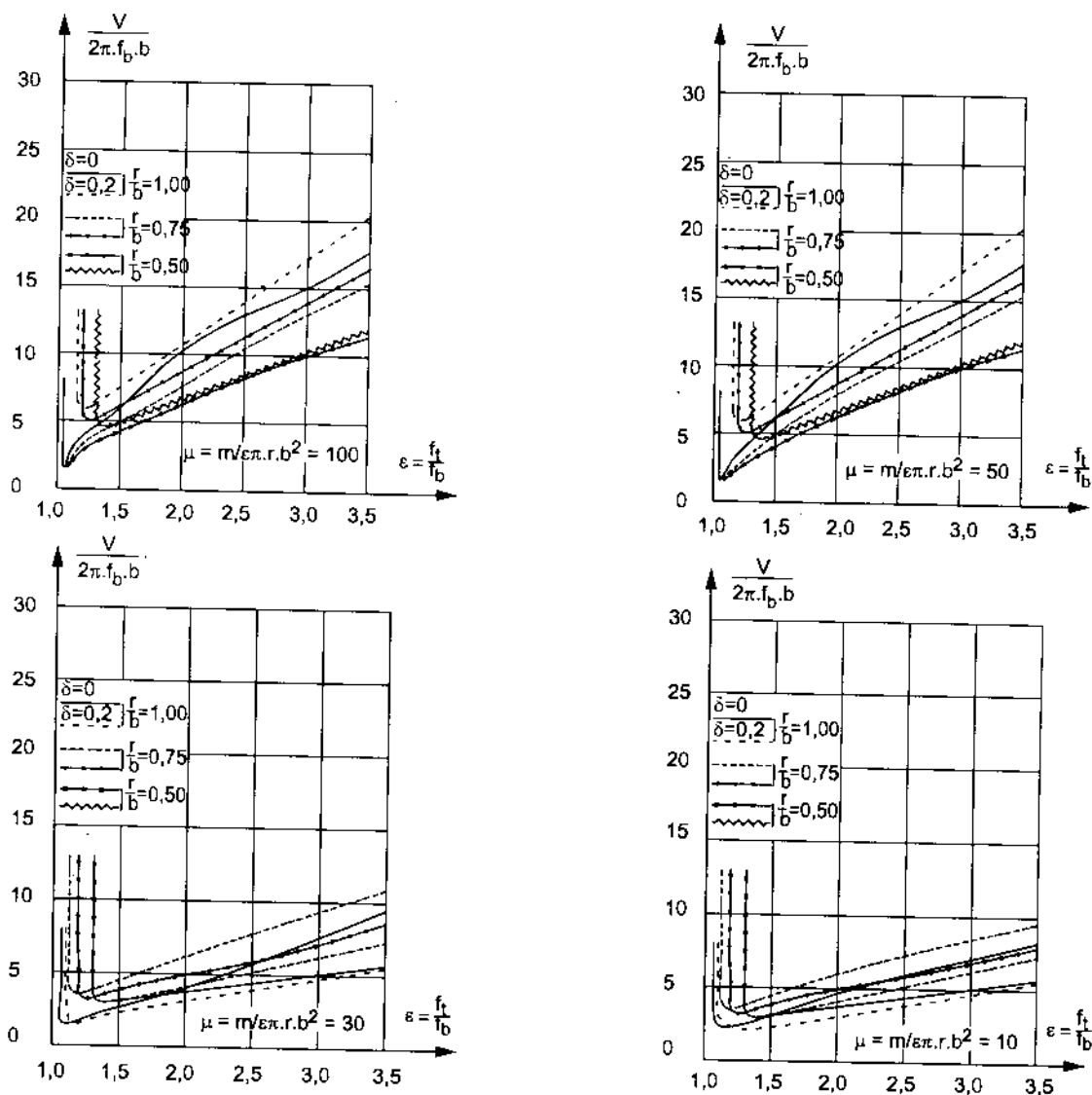
Phương pháp nửa giải tích của Kloppel (1967) đã kết hợp tính toán tốc độ tới hạn nhờ lý thuyết của Theodorsen với sự hiệu chỉnh nhờ hệ số triết giảm η xét đến hình dạng kết cấu nhịp. Tốc độ tới hạn sẽ được tìm ra căn cứ theo một biểu đồ như đã vẽ trên hình 4.15, tùy thuộc vào tỷ số ε giữa các tần số riêng xoắn và tần số riêng uốn, cũng như tùy thuộc khối lượng và nửa bề rộng b của cầu. Hệ số η , phụ thuộc hình dạng mặt cắt và ε được rút ra từ các thí nghiệm trên mô hình 4.16.



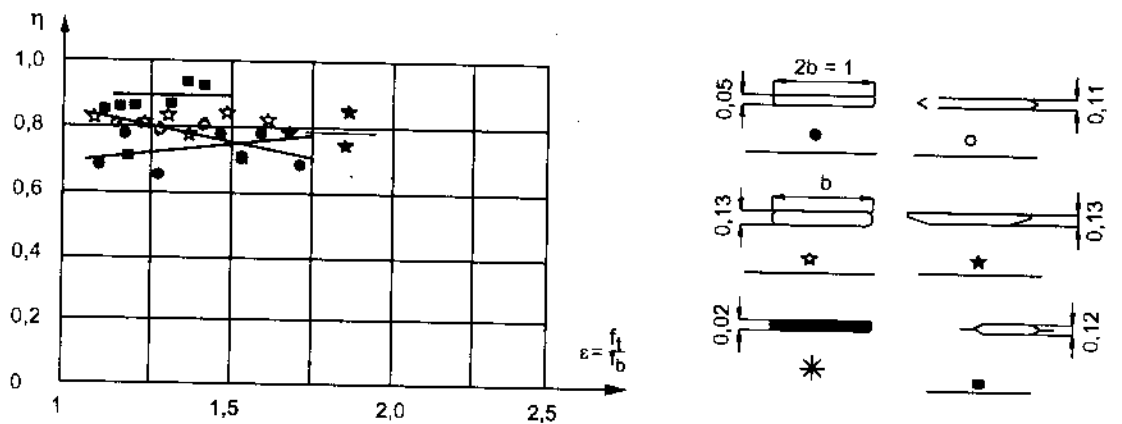
Hình 4-13



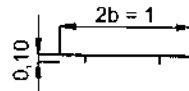
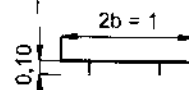
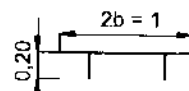
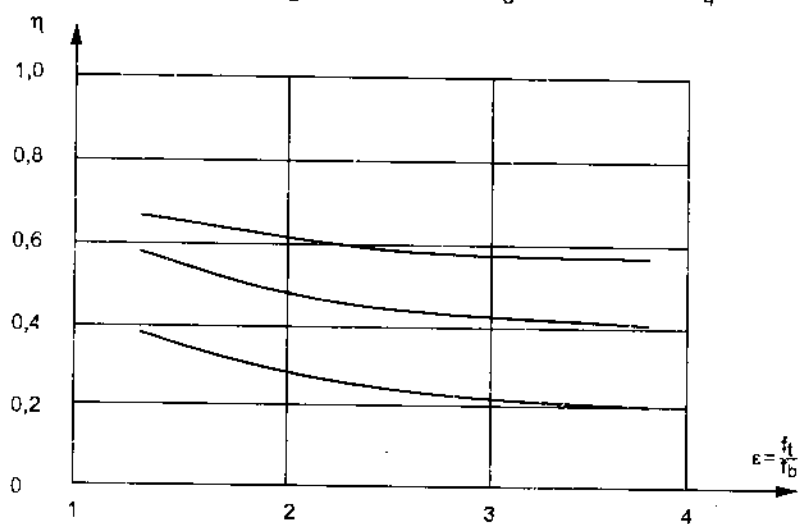
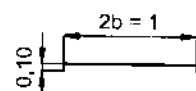
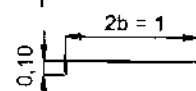
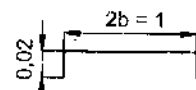
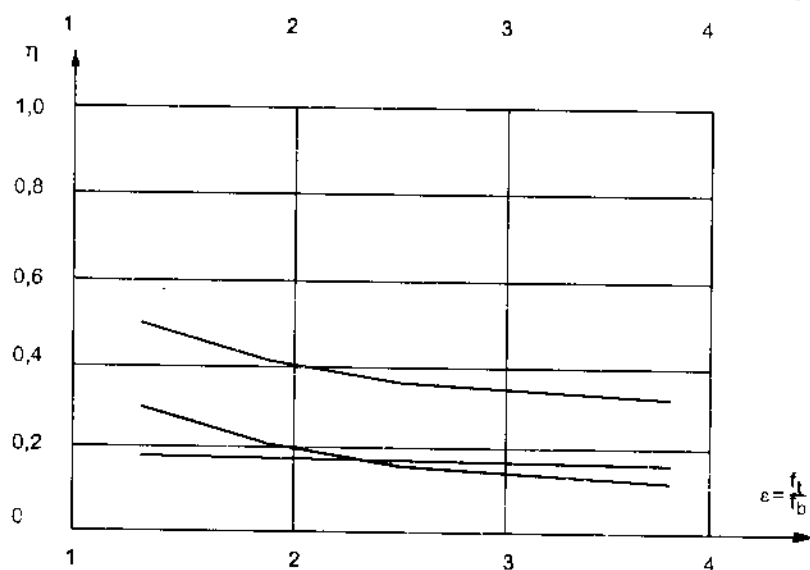
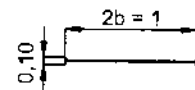
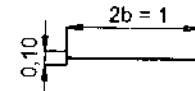
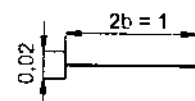
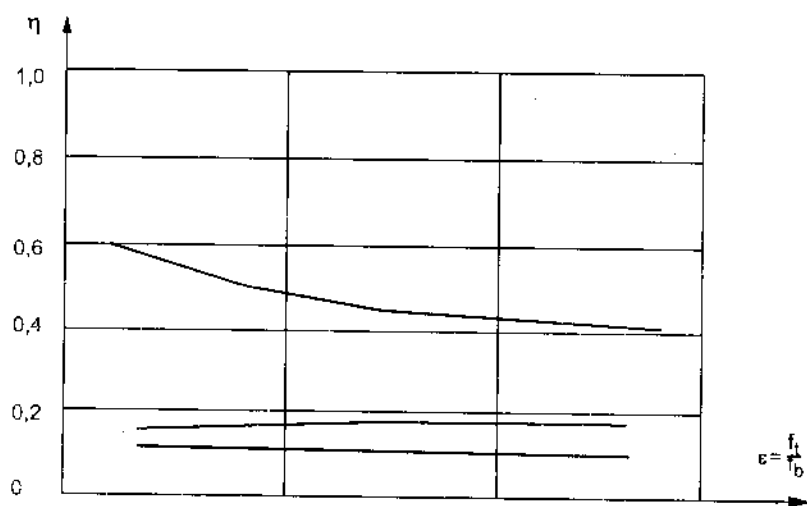
Hình 4-14



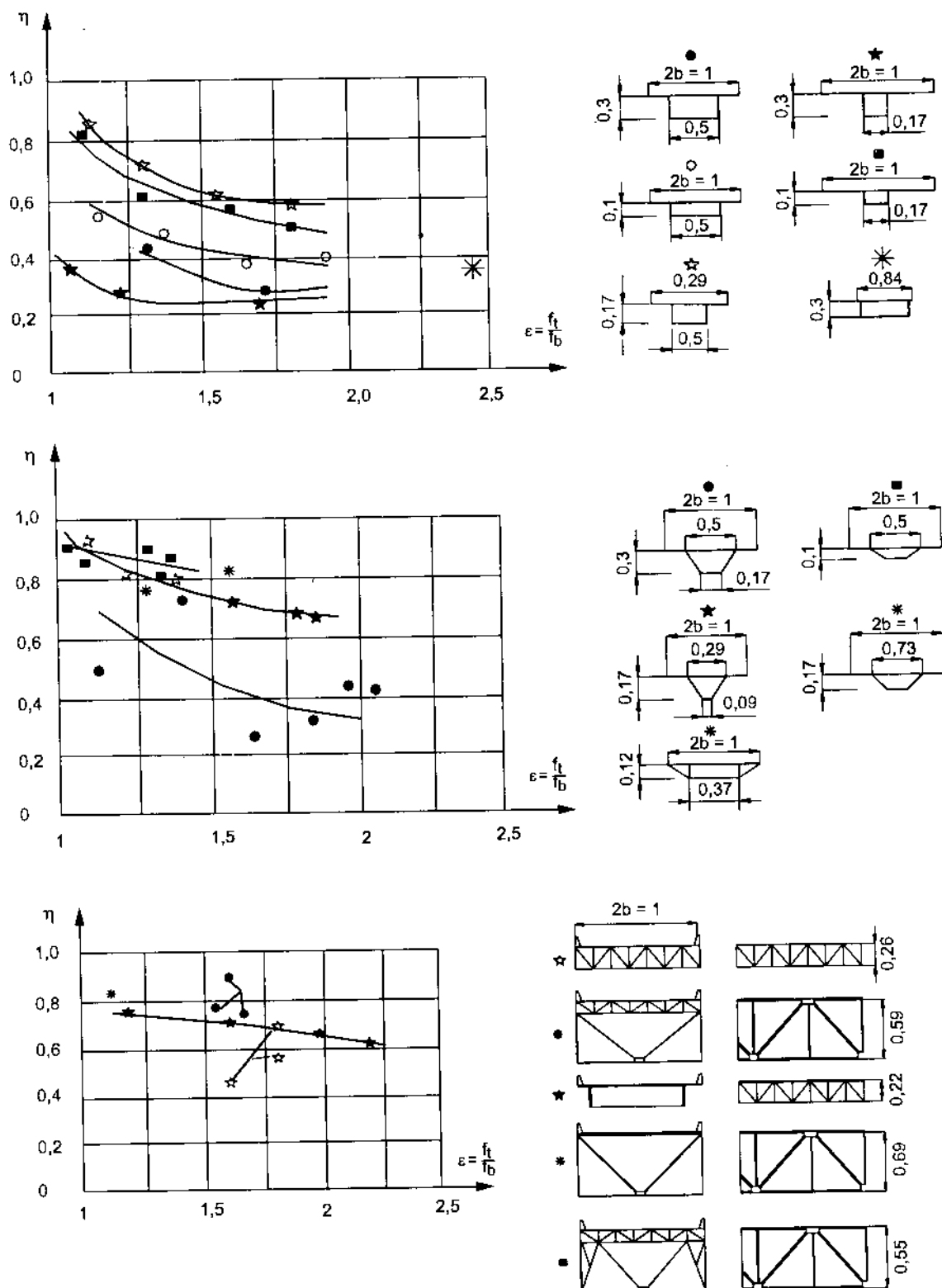
Hình 4-15



Hình 4.16. Hệ số hiệu chỉnh $\eta = V_u / V_u$



Hình 4-16 (tiếp theo)



Hình 4-16 (tiếp theo)

Giá trị của hệ số η vào khoảng 0,8 đối với kết cấu bản hoặc hộp mỏng thuận gió, giá trị này có thể giảm đến 0,1 đối với mặt cắt dạng hở như kiểu của dầm có sườn.

Tất cả các dạng mặt cắt ngang gần đúng của kết cấu nhịp thực tế hiển nhiên là chưa được thí nghiệm trong hầm khí động học. Phương pháp này chỉ là gần đúng. Tuy nhiên nó cho phép chúng ta ước lượng nhanh chóng xem liệu một cầu dây có nhạy cảm hay không với hiện tượng *flutter* (bồng bềnh trong dòng gió), trong điều kiện mà chúng ta chỉ có rất ít thông tin về dạng hình học của cầu, về trọng lượng bản thân của cầu, độ cứng của nó và kèm theo những tính toán các tần số dao động riêng uốn và tần số dao động riêng xoắn. Các tốc độ gió tới hạn vừa tính ra sẽ được so sánh với các tốc độ gió mạnh nhất đã điều tra đo đạc được trong suốt thời gian ít nhất là 30 năm ở công trường.

Ngoài ra, dòng gió có thể tác dụng theo hướng góc α so với phương nằm ngang, điều này càng làm nghiêm trọng thêm tình huống mất ổn định. Thực tế góc này không vượt quá trị số 3 đến 9 độ (trị số trung bình là 6 độ), điều này dẫn đến sự giảm tiếp theo của hệ số η tùy theo dạng của mặt cắt :

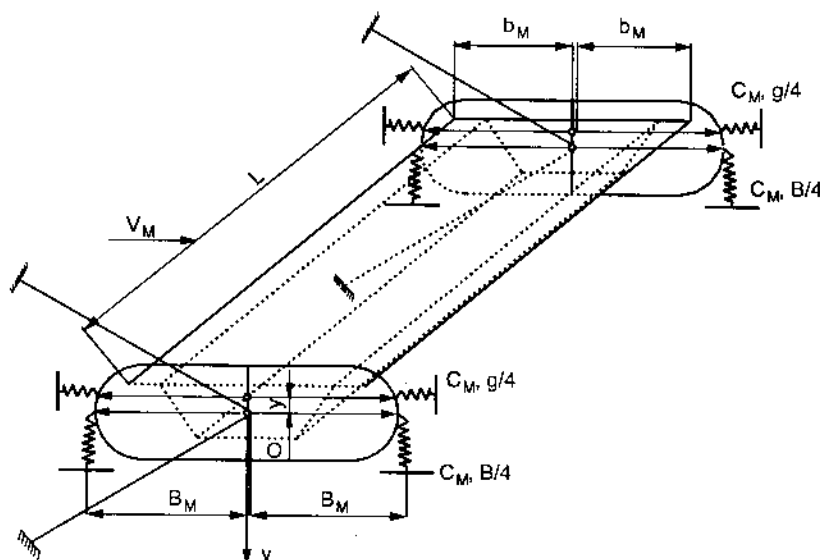
Đối với kết cấu nhịp có mặt cắt ngang dạng thuận gió:

$$\eta_{\alpha=6} / \eta_{\alpha=0} = 1/2 \quad (4-31)$$

Đối với kết cấu nhịp hình hộp:

$$\eta_{\alpha=6} / \eta_{\alpha=0} = 1/3 \quad (4-32)$$

Trên hình 4.17 giới thiệu sơ đồ bố trí mô hình thí nghiệm một dốt kết cấu nhịp cầu dây trong hầm khí động học. Mô hình này được treo bởi các liên kết đàn hồi kiểu lò xo để cho phép mô phỏng chuyển động uốn và chuyển động xoắn.



Hình 4.17 : Sơ đồ mô hình thí nghiệm cho cầu Meules ở Pháp

Giá trị của hệ số η vào khoảng 0,8 đối với kết cấu bản hoặc hộp mỏng thuận gió, giá trị này có thể giảm đến 0,1 đối với mặt cắt dạng hở như kiểu của dầm có sườn.

Tất cả các dạng mặt cắt ngang gần đúng của kết cấu nhịp thực tế hiển nhiên là chưa được thí nghiệm trong hầm khí động học. Phương pháp này chỉ là gần đúng. Tuy nhiên nó cho phép chúng ta ước lượng nhanh chóng xem liệu một cầu dây có nhạy cảm hay không với hiện tượng *flutter* (bồng bềnh trong dòng gió), trong điều kiện mà chúng ta chỉ có rất ít thông tin về dạng hình học của cầu, về trọng lượng bản thân của cầu, độ cứng của nó và kèm theo những tính toán các tần số dao động riêng uốn và tần số dao động riêng xoắn. Các tốc độ gió tới hạn vừa tính ra sẽ được so sánh với các tốc độ gió mạnh nhất đã điều tra đo đạc được trong suốt thời gian ít nhất là 30 năm ở công trường.

Ngoài ra, dòng gió có thể tác dụng theo hướng góc α so với phương nằm ngang, điều này càng làm nghiêm trọng thêm tình huống mất ổn định. Thực tế góc này không vượt quá trị số 3 đến 9 độ (trị số trung bình là 6 độ), điều này dẫn đến sự giảm tiếp theo của hệ số η tùy theo dạng của mặt cắt :

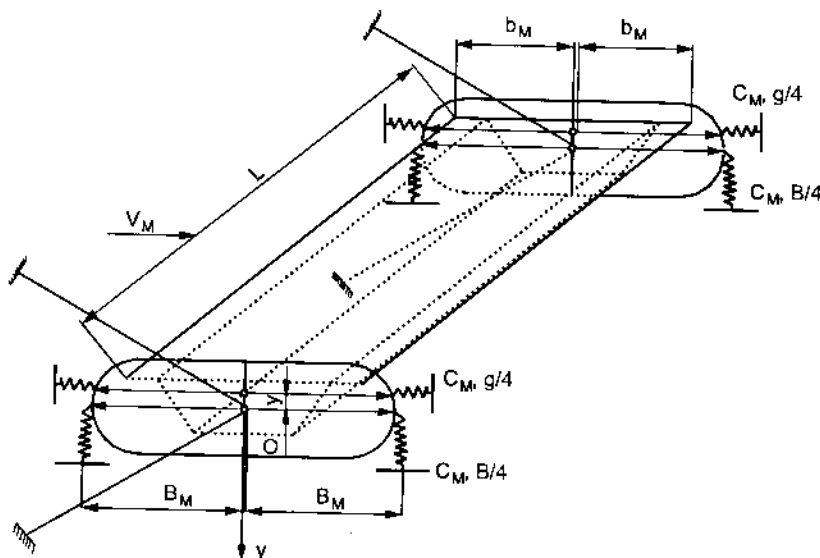
Đối với kết cấu nhịp có mặt cắt ngang dạng thuận gió:

$$\eta_{\alpha=6} / \eta_{\alpha=0} = 1/2 \quad (4-31)$$

Đối với kết cấu nhịp hình hộp:

$$\eta_{\alpha=6} / \eta_{\alpha=0} = 1/3 \quad (4-32)$$

Trên hình 4.17 giới thiệu sơ đồ bố trí mô hình thí nghiệm một dốt kết cấu nhịp cầu dây trong hầm khí động học. Mô hình này được treo bởi các liên kết đàn hồi kiểu lò xo để cho phép mô phỏng chuyển động uốn và chuyển động xoắn.



Hình 4.17 : Sơ đồ mô hình thí nghiệm cho cầu Meules ở Pháp

4.1.8. Phương pháp tính toán kết cấu về flutter xoắn

Bản chất của phương pháp là dùng đồng thời nghiệm của bài toán lý thuyết về dao động xoắn và một số biểu thức nhận được từ thực nghiệm. Đường lối này sẽ nâng cao đáng kể độ chính xác của kết quả giải.

Các tham số đặc trưng của *flutter* là :

- Tốc độ tới hạn V_{th}
- Tần số dao động vòng ω_v

Bằng thực nghiệm kết hợp với tính toán chúng ta có thể xác định mối quan hệ giữa tốc độ tới hạn và tần số dao động *flutter* đối với các dạng mặt cắt khác nhau.

Các nhà khoa học Đức đã nghiên cứu nhiều mô hình dạng khác nhau trong hầm thí nghiệm khí động rồi xác định được tốc độ tới hạn flutter và các tần số vòng tương ứng. Chiều dài mô hình khoảng $1,22 \div 2,00m$, chiều rộng $0,40 - 0,46m$; chỉ số logarit tắt dao động khi xoắn và khi uốn tương ứng là $0,005$ và $0,1010$.

Trong các kết cấu bình thường, sự tắt dần dao động được quyết định bởi các đặc điểm của hệ thống, nội ma sát trong các liên kết và nội ma sát trong vật liệu của công trình, nghĩa là các đặc tính giảm chấn của kết cấu. Nó được đặc trưng bằng hệ số phân rã năng lượng dao động của hệ thống kết cấu $\gamma_k = \delta / \pi$. Trong đó δ - chỉ số logarit của dao động.

Khi dòng khí thổi qua quanh vật thể sẽ xuất hiện hiệu ứng giảm chấn khí động (γ_a), gây ra chuyển động của vật thể trong dòng gió đó. Hệ số tổng cộng phân rã năng lượng dao động là

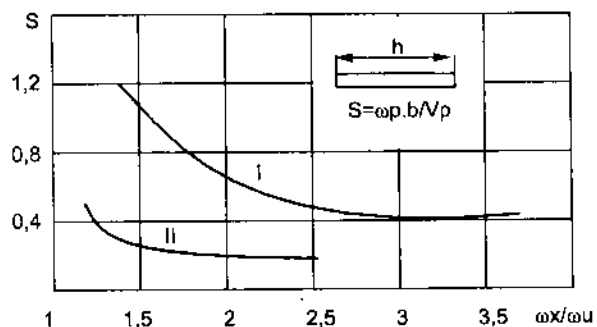
$$\gamma_{tc} = \gamma_k + \gamma_a \quad (4-33)$$

Trong các trường hợp mà γ_a lấy giá trị âm thì xuất hiện sự kích thích khí động học. Còn nếu γ_{tc} lấy giá trị âm thì sẽ xảy ra dao động tăng đột ngột.

Trên cơ sở các điều nói trên và các nghiên cứu khác nữa, chúng ta tính toán tham số:

$$S = B \omega_\Phi / v_\Phi \quad (4-34)$$

mà giá trị của nó đối với mặt cắt dạng hình chữ nhật hẹp tùy thuộc vào tỷ số giữa tần số riêng xoắn ω_x và tần số riêng uốn ω_u đã được vẽ trên hình 4.18; Xét hai tình huống là: có kể đến tính giảm chấn (theo thực nghiệm trên mô hình, nét vẽ II) và không kể đến tính giảm chấn (theo lý thuyết, nét vẽ I).



Hình 4-18

Giá trị của tham số S tùy theo tỷ số ω_x / ω_u

Lời giải lý thuyết của phương trình vi phân dao động xoắn nhỏ

của thanh thành mỏng cho phép xác định tốc độ *flutter* tới hạn như là hàm số của tần số vòng.

Lấy tích phân gần đúng của phương trình thứ hai của hệ (4-34) cho chúng ta để xác định tốc độ *flutter* :

$$V_f^2 = \frac{EJ_\omega \int_0^l \theta''^2 dz + (GJ_k - Nr^2) \int_0^l (\theta')^2 dz}{\left(\frac{\gamma.F.r^2}{g} \cdot \frac{S^2}{B^2} + \frac{1}{2} \rho.B^2.k_m \right) \int_0^l \theta^2 dz} \quad (4-35)$$

trong đó đã xét đến quan hệ giữa tần số và tốc độ của *flutter*, nghĩa là tham số S.

Đối với cầu treo dây võng một nhịp cần phải thêm vào độ cứng chống xoắn thuần túy GJ_x một thành phần $0,5 Hb^2$, với H là lực đẩy ngang, b là khoảng cách giữa các thanh treo đo theo chiều rộng của mặt cắt ngang. Khi ta cho hàm số tiệm cận gần đúng $\theta(z)$ tương ứng với các điều kiện biên khi xoắn, có thể nhận được công thức đối với các trường hợp khác nhau.

Sau đây ta xét một vài dạng đặc trưng của dầm. Đối với dầm công xôn dài l tốc độ gió tới hạn là :

$$V_f = \frac{\pi}{2.l.B} \left[\frac{2GJ_k}{\alpha.\rho.k_m} \left(\frac{EJ_\omega}{GJ_k} \cdot \frac{\pi^2}{4.l^2} - \frac{N.r^2}{G.I_k} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (4-36)$$

$$r = (J_x + J_y) / F \quad (4-37)$$

$$\alpha = 1 + 2m r^2 S / (\rho k_m B^4) \quad (4-38)$$

trong đó :

B - chiều rộng mặt cắt ngang

GJ_k và EJ_ω - các độ cứng của mặt cắt dầm (thanh) khi chịu xoắn

ρ - mật độ không khí, bằng $0,129.10^{-2} T/m^2$

N - lực nén trong dầm (thanh)

k_m - đạo hàm của hệ số mômen khí động, lấy theo thực nghiệm (đối với mặt cắt dạng bản phẳng mỏng $k_m \approx 1$)

J_x, J_y, F - tương ứng là các mômen quán tính và diện tích mặt cắt ngang

m - khối lượng rải dọc của kết cấu nhịp.

Đối với cầu treo một nhịp dài L và lực đẩy ngang bằng H thì tốc độ gió tới hạn bằng:

$$V_f = \frac{n.\pi}{l.B} \left[\frac{2.G.I_k}{\alpha.\rho.k_m} \left(\frac{EJ_\omega}{GJ_k} \cdot \frac{n^2.\pi^2}{l^2} + \frac{H.b^2}{2.G.I_k} - \frac{N.r^2}{G.I_k} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (4-39)$$

trong đó, lực nén N tác động lên dầm cứng có thể bằng 0 hoặc bằng lực đẩy ngang H tùy theo cấu tạo của cầu. Khi $H = 0$ chúng ta nhận được công thức đối với dầm nhịp gối giản đơn.

Sau đây xét một ví dụ tính toán theo phương pháp đã nói ở trên

Dầm có sơ đồ công xôn trong quá trình lắp ghép với độ dài phân hăng $L = 200\text{m}$ và rộng $b = 40\text{m}$. Các tham số đặc trưng của kết cấu nhịp là:

$$EJ_{\omega} = 0$$

$$GJ_k = 4 \cdot 10^8 \text{ kN.m}^2$$

$$m = 20,4 \text{ T/m}$$

$$r = 15 \text{ m}$$

$$k_m = 1$$

$$\rho = 0,129 \cdot 10^{-2} \text{ T/m}^2$$

$$\omega_k / \omega_n = 2,2$$

$$S = 0,67$$

Không xét đến tính giảm chấn của kết cấu.

Tính toán theo công thức (4-36) được kết quả $\alpha = 2,33$ và $V_f = 104,5 \text{ m/s}$

Tần số *flutter* là:

$$\omega_f = V_f S/b = 1,75 \text{ (đơn vị đo là 1/s)}$$

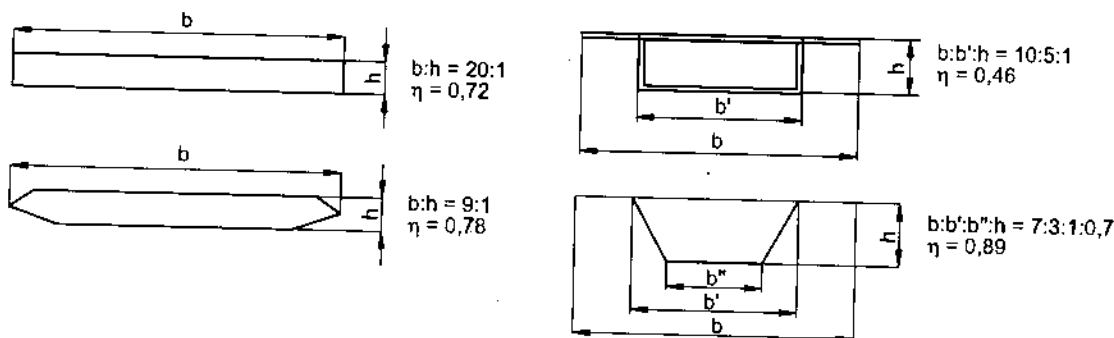
Trị số ω_f nằm trong khoảng giữa tần số dao động uốn và tần số dao động xoắn. Điều khi để làm giá trị sơ bộ có thể lấy $\omega_f = 0,5 (\omega_k + \omega_u)$.

Khi $\alpha = 1$ sẽ có tốc độ tới hạn phân kỳ, ở ví dụ này là $v_{pk} = 159,6 \text{ m/s}$

Nếu cũng thực hiện các tính toán như trên nhưng có kể đến tính giảm chấn khi $S = 0,2$. Chúng ta nhận được $\alpha = 1,118$, còn tốc độ flutter sẽ là $v_f = 150,9 \text{ m/s}$.

Như vậy, việc xét đến tính giảm chấn sẽ nâng cao độ chính xác xác định tốc độ tới hạn *flutter*. Trị số kết quả sẽ lớn hơn khá nhiều. Từ đây suy ra rằng trong thực hành thiết kế nếu bỏ qua không xét tính giảm chấn thì sẽ thiên về an toàn mà lại đơn giản tính toán hơn. Còn trong thực hành kiểm định cầu cũ thì rất cần phải xét tính giảm chấn để kết quả chính xác cao hơn.

Các công thức nêu ra trên đây chủ yếu dành cho dạng mặt cắt ngang hình chữ nhật hẹp (khi xác định các lực khí động). Tuy nhiên cũng có thể áp dụng các công thức đó cho các dạng mặt cắt ngang khác, bằng cách đưa thêm vào tốc độ tới hạn *flutter* một hệ số hình dạng mặt cắt dựa theo các tài liệu thực nghiệm của K. Kleppelia (hình 4.19). Phương pháp tính toán đã nêu ra sẽ có đủ độ chính xác và khá đơn giản để sử dụng trong lúc thiết kế sơ bộ.



Hình 4.19 : Hệ số hình dạng của các mặt cắt

Tốc độ flutter xoắn có thể tính được cả đối với các hệ thống phức tạp hơn, nếu sử dụng các phương pháp số.

Tương tự với việc xác định tốc độ phân kỳ trong trường hợp cụ thể (xem công thức (4.39) có:

$$V_f = \frac{1}{B} \left[\frac{2\lambda_{l,\min}}{\alpha \cdot \rho \cdot k_m \cdot \Delta_z} \right] \quad (4-40)$$

Như vậy, phương pháp tính toán độ ổn định khí động là khá tổng quát và đủ đơn giản để sử dụng trong thực tế thiết kế cầu.

4.1.9. Những biện pháp cấu tạo để tránh mất ổn định khí động cho kết cấu cầu dây

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu cũng như tổng quát hoá các kinh nghiệm thiết kế và khai thác các cầu treo nhịp lớn người ta đã rút ra các biện pháp cấu tạo cho phép ngăn ngừa sự phát triển các dao động nguy hiểm của kết cấu cầu trong dòng gió. Các biện pháp đó trước hết nhằm tăng độ cứng chống xoắn như:

- Dùng kết cấu dầm cứng có mặt cắt hình hộp;
- Đặt hệ thống dây cáp treo có các thanh treo nghiêng (chứ không phải chỉ có các thanh treo thẳng đứng như thông thường);
- Cải thiện dạng lưu tuyến của mặt cắt ngang dầm cho thoát gió dễ dàng hơn mà không gây ra các xoáy khí phía sau nó;
- Tăng chiều rộng mặt cầu.

Các kết quả nghiên cứu mới đây về thí nghiệm khí động học của mô hình cầu cho phép nhấn mạnh rằng các hệ thống nhiều dây xiên với 2 mặt phẳng dây kiểu đồng quy không bị xuất hiện những dao động khí đàn hồi nguy hiểm. Các cầu treo có dây xiên bổ sung và dầm cứng có chiều cao nhỏ với tỷ lệ $h/L = 1/300$ và có dầm cứng dạng lưu tuyến cũng tỏ ra an toàn như vậy.

Để thiết kế các cầu dây văng mới cần phải làm nhiều thí nghiệm trên mô hình. Cũng cần quan trắc theo dõi các cầu dây đang khai thác để sau đó rút kinh nghiệm và đề ra những

kiến nghị phục vụ hướng dẫn thiết kế cho các cầu mới sau này. Ví dụ ở nước Mỹ có hướng dẫn các điều kiện để đảm bảo ổn định khí động học cho các cầu treo như sau:

- Chiều cao dầm cứng, đo giữa các đường trục của mạ trên và mạ dưới (m):

$$h \geq \frac{L}{1000} \left(8,33 + \frac{L}{305} \right) \quad (4-41)$$

- Độ cứng chịu uốn của dầm cứng (tính bằng đơn vị kNm^2):

$$EJ \geq \frac{1,474b l^{10}}{\sqrt{H}} \quad (4-42)$$

trong đó:

L - chiều dài nhịp chính, m.

b - chiều rộng cầu, đo giữa các thanh treo, m.

h - chiều cao cột thép, m.

Để đảm bảo ổn định khí động học cần phải thiết kế hình dạng mặt cắt ngang dầm cứng sao cho mặt cắt ngang tương ứng với lực gió nâng nhỏ nhất. Ngoài ra phải đảm bảo yêu cầu về độ cứng hợp lý (tỷ số hợp lý giữa các tần số dao động xoắn và dao động uốn).

Theo ý kiến của nhiều chuyên gia thì để đảm bảo ổn định khí động học, tần số dao động xoắn cần phải lớn hơn 2- 3 lần so với tần số dao động uốn trong mặt phẳng thẳng đứng. Nếu dạng mặt cắt ngang dầm cứng là dạng thuôn và thoát gió tốt thì tỷ số này có thể giảm còn 1,5 - 2,0. Ví dụ đối với một cầu treo ở Mỹ có nhịp chính 600m và nhịp biên 240m, dầm cứng là dạng hộp thoát gió tốt thì tỷ số giữa tần số xoắn với tần số uốn như sau:

- Đối với dạng dao động thứ nhất là $0,48 : 0,147 = 3,2$.

- Đối với dạng dao động thứ hai là $0,80 : 0,145 = 5,5$.

Đối với cầu dây xiên có thể lấy ví dụ cầu qua sông Rein với mặt cắt dạng hờ của dầm cứng. Nhịp dầm dài 319m. Tỷ số của tần số dao động riêng xoắn với tần số dao động riêng uốn theo dạng dao động thứ nhất là $0,54 : 0,38 = 1,42$.

Với các chỉ số logarit của dao động riêng uốn bằng 0,18 và của dao động riêng xoắn bằng 0,07, dựa trên các nghiên cứu trong hầm thí nghiệm khí động học đã chứng tỏ độ ổn định khí động của kết cấu nhịp là tốt. Sau này qua thực tế khai thác cầu cũng thấy như vậy.

Lấy ví dụ vài cầu dây xiên ở nước Nga có mặt cắt ngang gồm 2 hộp nối với nhau bằng bản cánh trên. Chu kỳ dao động riêng thẳng đứng như sau:

- Đối với cầu qua sông Dnhép ở Kiép, $T_1 = 2,31$ giây, $T_2 = 1,17$ giây

- Đối với cầu qua sông Secsni ở Trerepov, $T_1 = 1,63$ giây, $T_2 = 0,92$ giây

Các cầu này đang khai thác bình thường.

Đối với các cầu dây xiên thì qua thực tế cho thấy chúng có rất ít khả năng hoặc không có khả năng xảy ra dao động cộng hưởng với biên độ lớn bởi vì có hiệu ứng giảm chấn làm tắt dần dao động. Điều này đã thấy rõ khi thí nghiệm cầu có nhịp 90m ở Sturgat (CHLB Đức). Yếu tố cơ bản ảnh hưởng đến dao động chính là chiều dài khác nhau của các dây xiên trong kết cấu nhịp.

Các cầu dây có trụ tháp hình chữ A thường có độ cứng không gian đặc biệt lớn. Tuy nhiên nếu bỏ qua các nguyên tắc đã nêu trên thì trong các cầu dây sẽ xuất hiện những dao động lớn do gió. Lấy ví dụ một cầu dây ở Canada nhịp dài 218m, chỉ có 1 dây ở mỗi bên trụ tháp. Cầu này xây dựng xong thì có biên độ dao động quá lớn. Sau đó phải có biện pháp gia cường để giảm dao động là: đặt thêm các cánh thoát gió, bịt kín phần đáy của mặt cắt ngang để chuyển từ dạng mặt cắt hở thành dạng mặt cắt kín. Các biện pháp này đã được thử nghiệm trong hầm thí nghiệm thổi gió và cho kết quả tốt. Với góc nghiêng vát tối ưu của bộ cánh thoát gió mới được thêm vào mặt cắt ngang dầm cứng và khi đáy mặt cắt đã được bịt kín thì biên độ dao động thẳng đứng giảm xuống đáng kể.

Khi muốn nhận định sơ bộ về độ ổn định khí động của kết cấu cầu chúng ta có thể căn cứ vào các đặc điểm của biểu đồ hệ số khí động của mômen xoắn: cụ thể là các giá trị âm của đạo hàm sẽ chứng tỏ khả năng chịu gió kém của công trình.

Về mặt vật liệu thì nên dùng dầm cứng BTCT. Do trọng lượng lớn và do khả năng tắt dao động nhanh của kết cấu BTCT (tắt nhanh gấp 2-3 lần so với kết cấu thép). Các cầu dây xiên-dầm cứng BTCT thực ra không gặp vấn đề bất lợi nào về khí động học. Lấy ví dụ cầu Columbia ở Mỹ có nhịp chính 299m, đã gặp cơn gió bão lớn trong thời gian đang thi công. Chiều dài đoạn công xôn được treo bởi các dây xiên lúc đó khoảng 150m. Nhưng tỷ số giữa tần số dao động riêng xoắn với tần số dao động riêng uốn bằng 1,4 (theo dạng dao động thứ 1), nên cầu đảm bảo an toàn.

4.2. MỘT SỐ VÍ DỤ THỰC TẾ

4.2.1. Ví dụ kiểm toán ổn định cầu treo Hồ Môn- Quảng Đông, Trung Quốc

I. Các số liệu cơ bản

1.1. Kích thước kết cấu

Khẩu độ	888	m
Chiều rộng dầm B:	35,6	m
Chiều cao dầm H:	3,012	m
Khoảng cách giữa các cáp chủ Bc:	33	m
Tỷ số l/f:	10,5	
Chiều cao cách mặt nước của dầm gia cường z:	60	m

1.2. Dầm cứng

Diện tích A:	1.229 m ²
Mômen quán tính xoắn J _d :	5.0955 m ⁴
Mômen quán tính ngang J ₂ :	124.3917 m ⁴
Mômen quán tính đứng J ₃ :	1.9786 m ²
Trọng lượng đơn vị dài của dầm m _d :	18335.7kG/m
Mômen quán theo trọng lượng đơn vị dài của dầm J _m :	1743030
Môđun đàn hồi E:	2.1E+11N/m ²
Môđun cắt G:	80770000000 N/m ²

1.3. Cáp chủ

Diện tích A _c :	0,285 cm ²
Khối lượng đơn vị dài m _c :	2396,9 kG/m
Môđun đàn hồi E _c :	2E+11 N/m ²

II. Xác định tốc độ gió cơ bản, tốc độ gió chuẩn thiết kế, tốc độ gió kiểm tra

2.1. Tốc độ gió cơ bản

$$U_{20} = 40 \text{ m/s}$$

$$U_{10} = 33.44 \text{ m/s}$$

Lấy tốc độ gió ở khu vực này là

$$U_{10} = 33.44 \text{ m/s}$$

2.2. Tốc độ gió chuẩn thiết kế

$$k_1 = 1,47$$

$$U_d = 49,16 \text{ m/s}$$

Tốc độ gió chuẩn thiết kế ở giai đoạn thi công

$$U_{ds} = 41,29 \text{ m/s}$$

2.3. Tốc độ gió kiểm tra dao động

$$\mu = 1,206$$

$$[U_{cx}] = 71,14 \text{ m/s}$$

2.4. Tốc độ gió từng trợt

$$G_v = 1,38$$

$$U_g = 67,84 \text{ m/s}$$

III. Tính toán đặc trưng động lực

3.1. Tần suất uốn thẳng đứng đối xứng bậc 1

$$W = 231295$$

$$f_b^h = 0,168 \text{ Hz}$$

3.2. Tần suất uốn thẳng đứng phản đối xứng bậc 1

$$f = 84,57$$

$$f_b^n = 0,12 \text{ Hz}$$

3.3. Tần suất xoắn đối xứng bậc 1

$$f_t^h = 0,35 \text{ Hz}$$

3.4. Tần suất xoắn phản đối xứng bậc 1

$$H_g = 132228439 \quad f_n^1 = 0,44 \text{ Hz}$$

IV. Dự đoán ổn định dao động

$$Luy = 18.968818 \quad T_{ho}^1 = 8,78$$

Khi xoắn đối xứng với tần số $f_c^k = 0.35105 \quad V_w = 109,71 \text{ m/s}$

Khi xoắn phản đối xứng với tần số $f_1^k = 0.440459 \quad V_w = 137,65 \text{ m/s}$

Vận tốc gió thực tế là: $99,83 \text{ m/s}$

Vận tốc gió dùng trong thi công là: $79,87 \text{ m/s}$

Cấp bậc an toàn dao động có thể phán đoán theo công thức

$$\min T_o^h = 5,7$$

Vậy cần phải phân tích chọn hình dạng khí động và chấn động cần thí nghiệm ống khí động mô hình cầu.

V. Phân tích tải trọng gió hướng ngang

Tải trọng trận gió hướng ngang tác dụng lên dầm:

$$g = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

$$U_g = 67.836384 \text{ m/s}$$

$$C_h = 1.3$$

$$P_g = 11036.50 \text{ N/m}$$

Tải trọng gió hướng ngang tác dụng lên cáp chủ:

$$d_c = 0.6 \text{ m}$$

$$C_d = 0.7$$

$$P_{cg} = 1301.91 \text{ N/m}$$

Sau khi có tải trọng như trên có thể dùng các phương pháp thông thường để tính toán nội lực theo phương ngang của dầm.

VI. Kiểm tra ổn định lực tĩnh

6.1. Kiểm tra sự phát tán xoắn do lực tĩnh

$$Luy = 18.968818$$

$$C_{Mu}^1 = 1.07$$

$$K_d^1 = 10.775847$$

Tốc độ gió tới hạn phát tán xoắn của cầu treo

$$U_d^1 = 134.67 \text{ m/s}$$

6.2. Kiểm tra uốn cong theo hướng ngang do lực tĩnh

$C_d = 0.812$ hệ số lực cản của dầm, lấy theo thí nghiệm

$C_L = 4.57$ lấy theo thí nghiệm

$e = f_t/f_b = 2.0920783$ $T_s = 4518.541587$

$K = 3.5398681$ $M_s = 26.00538864$

$K_d = 13.18158$

Tốc độ gió tới hạn uốn cong hướng ngang của cầu treo

$U_{th} = 164.74 \text{ m/s}$

4.2.2. Ví dụ tính dao động riêng cầu treo Tacoma, Mỹ

Ví dụ này dùng lý thuyết cộng hưởng đơn giản, nên không đủ để mô tả sự cố sụp đổ cầu dưới tác dụng của gió động nhưng cũng đủ tạo ra được một mô hình dao động đơn giản để phân tích cầu. Cầu treo dây văng là kết cấu rất thanh mảnh có khối lượng phân bố và độ cứng phân bố. Mặc dù hệ mặt cầu nói chung là rải đều theo dọc cầu, các cáp chủ, là bộ phận chủ yếu tạo ra độ cứng, lại thay đổi về độ dốc và lực kéo giữa các trụ tháp. Các số liệu ban đầu sau đây về cầu Tacoma đã thu được từ các nguồn thông tin khác nhau:

1- Số liệu cơ bản

Số liệu về hình học

$L = 2800 \text{ ft}$ = chiều dài nhịp, đo giữa các tháp cầu.

$h = 232 \text{ ft}$ = độ văng lớn nhất của cáp

$b = 39 \text{ ft}$ = chiều rộng đo giữa 2 cáp

$d = 17 \text{ in}$ = đường kính cáp

$h/l = 0,0829 = 1/12$ = tỷ số độ văng/ nhịp

$b/l = 0,0139 = 1/72$ = tỷ số bề rộng/ nhịp

Số liệu về trọng lượng:

$W_f = 4300 \text{ lb/ft}$ = trọng lượng mặt cầu/cáp/ft

$W_g = 323 \text{ lb/ft}$ = trọng lượng dầm /cáp/ft

$W_c = \pi/4 \times (17/12)^2 \times 0,082 \times 490 = 632 \text{ lb/ft}$ của cáp

$W_t = 1/2 \times (4300) + 320 + 632 = 3105 \text{ lb/ft}$ = trọng lượng tổng cộng mà 1 cáp phải chịu

$P = W_t/g = 3105/32,2 - 96,4 \text{ lb} \times \text{ft}^2 \times \text{s}^2 = \text{khối lượng tổng cộng/ft/cáp}$

2- Các giả thiết và khối lượng dùng khi tính toán

Lực kéo trong cáp:

Hình 4.20 vẽ biểu đồ cáp như vật thể tự do giữa tháp và điểm giữa nhịp. Cáp ở giữa nhịp coi như nằm ngang, đó cũng là thành phần nằm ngang của lực kéo cáp tại đỉnh cột. Viết cân bằng phương trình mômen ở cột bằng 0, chúng ta có:

$$\Sigma M_o = 232 T - 3105 \times 1400 \times 700 = 0$$

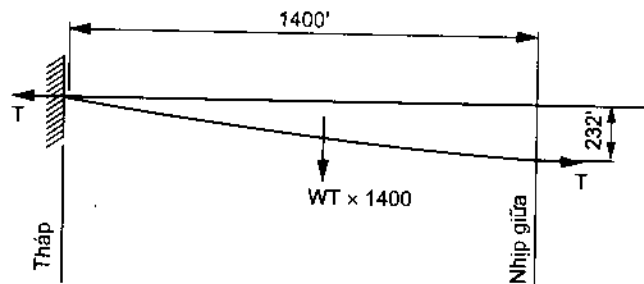
suy ra $T = 13,1 \times 10^6 \text{ lb}$

Thành phần thẳng đứng của lực kéo cáp ở đỉnh cột bằng lực nén xuống tổng cộng

$$3105 \times 1400 \times 4,347 \times 10^6 \text{ lbs.}$$

Như vậy lực kéo tổng cộng ở đỉnh cột là:

$$T_o = 10^6 \times \sqrt{(13,11^2 + 4,35^2)} = 13,82 \times 10^6 \text{ lbs.}$$



Hình 4.20

Bởi vậy ta có thể bỏ qua dao động nhỏ của cáp kéo dọc nhịp, ngoài ra độ cứng chống uốn của sàn nhỏ trong uốn được xác định không đáng kể đối với cầu treo dây văng.

Mômen quán tính khối lượng xoắn

Hình 4.21 giả thiết mặt cắt ngang tương đương của cầu đối với mômen quán tính khối lượng cực:

$$J \text{ đối với sàn} = mb^2/12 = \frac{4320}{32,2} \times \frac{39^2}{12} = 17.000$$

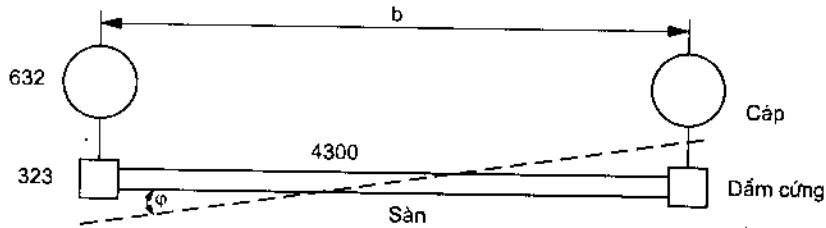
$$J \text{ đối với dầm và cáp} = 2 \times \frac{955}{32,2} \times \left(\frac{39}{2}\right)^2 = 22.400$$

$$\text{Toàn bộ } J = 39.400/\text{b.s}^2$$

Độ cứng xoắn:

Đối với cầu Tacoma Narrows dầm và mặt là cả hai mặt cắt hờ, độ cứng xoắn cung cấp bởi chúng là nhỏ trong so sánh với độ cứng xoắn cung cấp bởi cáp. Xác định cặp cáp

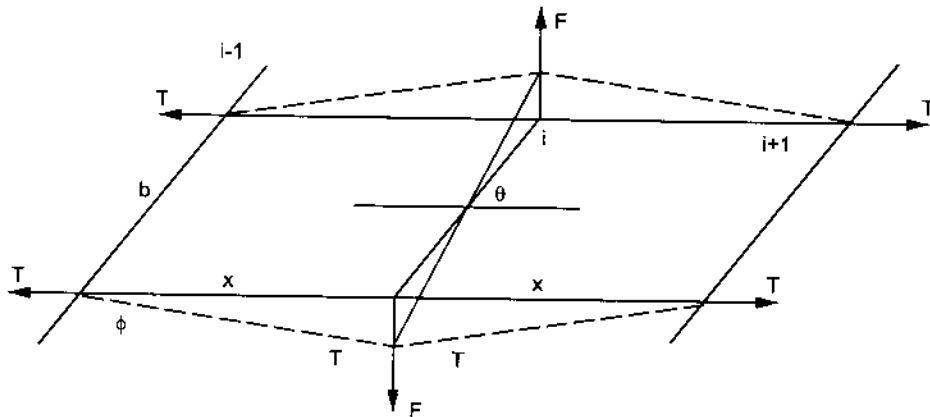
cách b ft về một bên và dưới mômen xoắn T . Cho ba vị trí liên tiếp $i-1, i, i+1$, tương đương với khoảng cách cáp như hình 4-22. Định nghĩa lại cho phần tử của ma trận độ cứng trong mục 6.3 phương trình 6.3.1 tài liệu [2], độ cứng ở vị trí i tương đương với lực ngang F khi chuyển vị $y_i = 1.0$ với toàn bộ chuyển vị khác, bao gồm $y_{i-1}, y_{i+1}, \dots$ bằng 0.



Hình 4-21

Cho mặt cắt ngang ở vị trí i là quay nhỏ, θ , ta có $y_i = x.\Phi = (b/2).\theta$, và thành phần thẳng đứng của lực kéo T là :

$$F = 2.T.\Phi = 2T \frac{b}{2.x} \theta = \frac{T.b.\theta}{x}$$



Hình 4-22

Mômen xoắn của cáp là $F.b = T.b^2.\theta/x$ và độ cứng chống xoắn của cáp được định nghĩa như là mômen xoắn trên chiều dài đơn vị của cáp, là $T.b^2$ lb.ft/rad/ft

$$T.b^2 = 13,11 \times 10^6 \times 39^2 = 19.900 \times 10^6 \text{ lb.ft}^2$$

Dao động thẳng đứng

Với T và p hằng số, chúng ta có thể phân tích dao động thẳng đứng của cầu như là khối lượng phân bố uốn p trên đơn vị chiều dài kéo dài dưới mômen xoắn T giữa hai tháp cứng là l ft. Với điều kiện biên $y(0,t) = y(l,t) = 0$ nghiệm tổng quát phải thỏa mãn phương trình:

$$\sin \frac{\omega l}{c} = 0$$

Phương trình này được thỏa mãn bởi $\frac{\omega l}{c} = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots, n\pi$

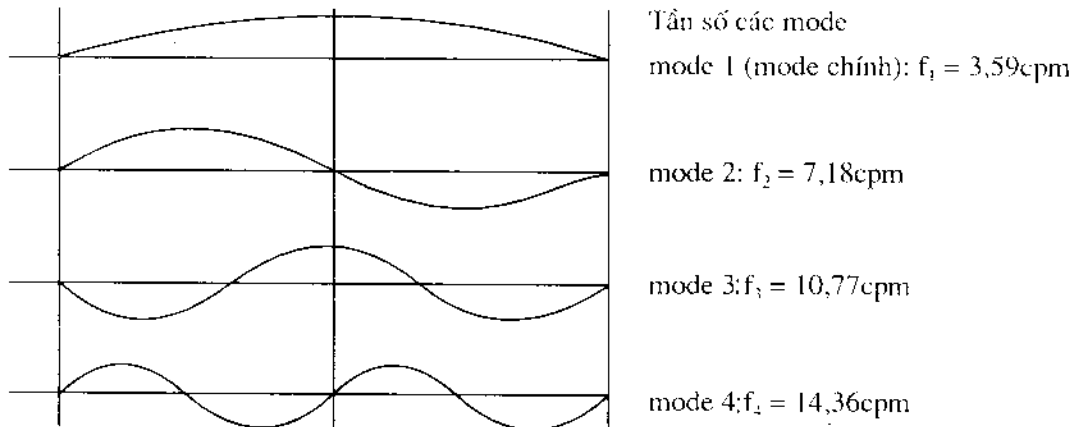
hoặc

$$f_n = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{T}{p}} \quad n(\text{số mode}) = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$c = \sqrt{\frac{T}{p}} = \text{sóng lan truyền vận tốc}$$

Khi $n = 1$ ta có mode cơ bản; khi $n = 2$ ta có mode thứ hai như hình 4.23. Thay các số liệu từ dữ liệu ban đầu, ta có:

$$f_n = \frac{n}{2 \times 2800} \sqrt{\frac{13,1}{96,4}} \times 10^6 = 0,0658n \quad \text{cps} = 3,59n \text{ cpm}$$



Hình 4-23

Dao động xoắn

Ngày cầu Tacoma đổ sập, người ta ghi được vận tốc gió 42mph đã kích thích một vài mode dao động. Mode vượt trội hơn cả đang di chuyển thẳng đứng với điểm ở nhịp giữa, (sẽ được tính trong mục sau). Sự chuyển động này đột nhiên thay đổi thành chuyển động xoắn với nút ở giữa nhịp với chu kỳ 4s và tích lại biên độ lớn gần 45° trước khi sụp đổ.

Xác định như là thanh phân bố đều, phương trình xoắn có thể được ghi lại như sau:

$$J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

Nghiệm của phương trình là:

$$\theta(x,t) = (\sin \omega \sqrt{\frac{J}{K}}x + B \cos \omega \sqrt{\frac{J}{K}}x)(C \sin \omega t + D \cos \omega t)$$

Ở đây số hạng $P.I_p dx = J$ được xác định như là mômen khối lượng cực và số hạng $I_p G dx = K$ là độ cứng chống xoắn của chiều dài dx .

Với điều kiện biên $\theta(0,t) = \theta(l,t) = 0$ tần số tự nhiên được tìm thấy từ:

$$\sin \omega \sqrt{\frac{J}{K}}l = 0$$

$$\omega \sqrt{\frac{J}{K}}l = \pi, 2\pi, \dots, n\pi$$

Đối với nút ở giữa nhịp $n = 2$: $2\pi f_2 \sqrt{\frac{J}{K}}l = 2\pi$

vậy $f_2 = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{K}{J}}$; $T_2 = \frac{1}{f_2} = l \sqrt{\frac{J}{K}} = 2800 \cdot \sqrt{\frac{39400}{19900}} \times 10^3 = 3,94s$

Điều này phù hợp với chu kỳ quan sát là 4s.

4.2.3. Ví dụ tính ổn định gió với cầu treo Hling - Quảng Nam

4.3.2.1. Khi chưa thiết kế chống gió

1. Các số liệu cơ bản

1.1. Kích thước kết cấu

Khẩu độ	144m
Chiều rộng dầm	$B = 2.5m$
Chiều cao dầm	$H = 0.40m$
Khoảng cách giữa các cáp chủ	$B_c = 4.60m$
Tỷ số	$l/f = 9.60$
Chiều cao cách mặt nước của dầm gia cường	$z = 10.00m$

1.2. Dầm cứng

Diện tích	$A = 0.472m^2$
Mômen quán tính xoắn	$J_d = 0.00002162m^4$
Mômen quán tính ngang	$J_2 = 0.00m^4$
Mômen quán tính đứng	$J_3 = 0.00223848m^4$
Trọng lượng đơn vị dài của dầm	$m_d = 938.70 \text{ kG/m}$

Mômen quán tính theo trọng lượng đơn vị dài của dầm $J_m = 1743030 \text{kg.m}^2/\text{m}$

Môđun đàn hồi $E = 210000000000 \text{N/m}^2$

Môđun cắt $G = 80770000000 \text{N/m}^2$

1.3. Cáp chủ

Diện tích $A_c = 0.005524 \text{cm}^2$

Khối lượng đơn vị dài $m_c = 400 \text{kg/m}$

Môđun đàn hồi $E_c = 200000000000 \text{N/m}^2$

II. Xác định tốc độ gió cơ bản, tốc độ gió chuẩn thiết kế, tốc độ gió kiểm tra

2.1. Tốc độ gió cơ bản

$$U_{20} = 40.00 \text{m/s}$$

$$U_{10} = 33.44 \text{m/s}$$

Lấy tốc độ gió ở khu vực này là:

$$U_{10} = 33.44 \text{m/s}$$

2.2. Tốc độ gió chuẩn thiết kế

$$K_1 = 1.47$$

$$U_d = 49.16 \text{m/s}$$

Tốc độ gió chuẩn thiết kế ở giai đoạn thi công

$$U_{ds} = 41.29 \text{m/s}$$

2.3. Tốc độ gió kiểm tra dao động

$$\mu = 1.206$$

$$[U_{cx}] = 71.14 \text{m/s}$$

2.4. Tốc độ gió từng trợt

$$G_v = 1.38$$

$$U_g = 67.84 \text{m/s}$$

III. Tính toán đặc trưng động lực

3.1. Tần suất uốn thẳng đứng đối xứng bậc 1

$$W = 17387.00$$

$$f_b^h = 0.53 \text{ Hz}$$

3.2. Tần suất uốn thẳng đứng phản đối xứng bậc 1

$$f = 15.00$$

$$f_b^n = 0.29 \text{ Hz}$$

3.3. Tần suất xoắn đối xứng bậc 1

$$f_l^h = 0.94 \text{ Hz}$$

3.4. Tần suất xoắn phản đối xứng bậc 1

$$H_g = 1473694.30$$

$$f_o^t = 0.44 \text{ Hz}$$

IV. Dự đoán ổn định dao động

$$luy = 46.11$$

$$T_{ho}^l = 13.69$$

Khi xoắn đối xứng với tần số

$$f_t^k = 0.3573 \text{ Hz}$$

thì vận tốc gió tới hạn là

$$V_\omega = 12.23 \text{ m/s}$$

Khi xoắn phản đối xứng với tần số

$$f_t^k = 0.4442578 \text{ Hz}$$

thì vận tốc gió tới hạn là

$$V_\omega = 15.20 \text{ m/s}$$

Vận tốc gió tới hạn thực tế là :

$$11.13 \text{ m/s}$$

$$\min T_{ho}^l = 30.3$$

Vậy cần phải thí nghiệm trong hầm thí nghiệm chống gió.

Vì vận tốc gió tới hạn thấp nhất là:

$$11.13 \text{ m/s}$$

nhỏ hơn vận tốc gió kiểm toán:

$$71.14 \text{ m/s}$$

nên kết cấu không ổn định với gió.

4.2.3.2. Kết quả khi thiết kế chống gió

I- Các đặc tính động lực

1- Tần suất uốn thẳng đứng đối xứng bậc 1

$$f_b^s = 0.525 \text{ Hz}$$

2- Tần suất uốn thẳng đứng phản đối xứng bậc 2

$$f_b^n = 0.287 \text{ Hz}$$

3- Tần suất xoắn đối xứng bậc 1

$$f_t^s = 0.938 \text{ Hz}$$

4- Tần suất xoắn phản đối xứng bậc 1

$$f_o^t = 0.444 \text{ Hz}$$

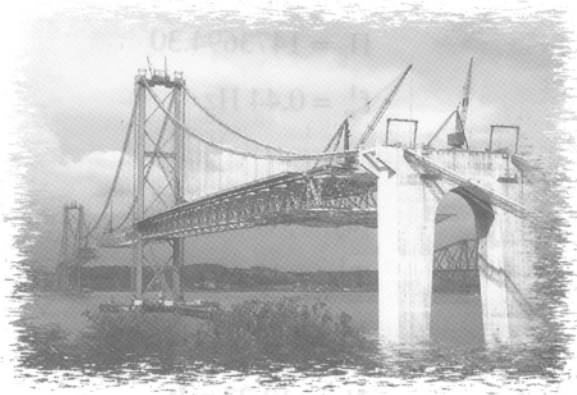
II- Dự đoán tính ổn định dao động

Tốc độ gió giới hạn dao động là:

$$121.127 \text{ m/s} \quad \text{Thoả mãn}$$

Giá trị min T_{ho}^l là:

$$3.792 \quad \text{Thoả mãn}$$



Chương 5

KIỂM TRA HƯ HỎNG CẦU TREO DÂY VÕNG

5.1. NHỮNG HƯ HỎNG PHỔ BIẾN

Những hư hỏng chủ yếu thường gặp trên bề mặt các kết cấu thép thường là do sự phá hoại bởi ăn mòn kim loại, sự suy thoái vật liệu đó thường kéo theo hiện tượng giảm khả năng chịu lực của vật liệu, phát sinh phá hoại do các loại tải trọng khai thác và do sự quá tải trong quá trình sử dụng công trình.

Gỉ trong kết cấu thép nhìn chung phát triển rất đa dạng, nó có thể là lớp gỉ đều trên toàn bộ bề mặt của một chi tiết hoặc gỉ sâu thành điểm, kết quả là gây nên một số các hư hỏng sau:

- Làm giảm chiều dày chi tiết
- Làm thủng bụng dầm, làm mất sâu diện tích vào mép cánh dầm
- Làm gỉ mặt tiếp xúc giữa hai chi tiết áp sát nhau
- Làm sùi bề mặt, làm trương nở phần chi tiết giữa hai chi tiết liên kết

Đối với kết cấu bê tông thường có những hư hỏng sau:

- Kích thước thiết kế không đủ đáp ứng tải trọng hiện tại
- Thiếu lớp chống thấm thậm chí không có cả lớp asfent, bánh xe chạy trực tiếp lên bản mặt bê tông điều đó dẫn đến các hư hỏng: biến dạng cơ học, nứt vỡ bản mặt cầu, thậm chí sập đổ cục bộ.

Phát hiện và đánh giá đúng các hư hỏng của cầu treo để có biện pháp xử lý thích hợp, kịp thời đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn khai thác cầu treo. Kết quả kiểm tra, kiểm định các công trình cầu treo dây võng nhận được một số hư hỏng điển hình sau có thể ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu lực của cầu:

5.1.1. Hệ dây cáp chính, neo

Cáp dùng phổ biến ở cầu treo là loại có cấu tạo các sợi xoắn quanh 1 sợi ở giữa gọi là lõi theo nhiều lớp với các bước khác nhau. Trong cáp mềm lõi ở giữa bằng sợi dây gai,

tẩm dầu chống gỉ. Cấu tạo của cáp như vậy không đảm bảo tính chống thấm đối với nước chảy dọc cáp. Ngay cả trong trường hợp cáp kín, trong đó các sợi lớp vỏ được tạo thành các tiết diện có dạng kín khít sợi này bên sợi kia và mặc dù sử dụng cả các sản phẩm bảo vệ gốc dầu nhưng cũng không tránh khỏi tình trạng nước thấm. Khi bị thấm nước, nước sẽ chảy dọc theo đường cáp và gây gỉ ở những điểm trữ nước.

Giữa các dây cáp có khoảng 25% lỗ rỗng và rất dễ nhạy cảm với sự ăn mòn, đặc biệt cần phải nghiên cứu đến vị trí các điểm trữ nước phụ thuộc vào cấu tạo hình học của hệ treo. Khi cáp được sắp xếp theo lớp, các điểm trữ nước chính là:

- Đáy dưới cáp gần côn neo, đặc biệt nếu nó được đặt trong hầm neo bị ẩm.
- Phần đáy Parabol giữa nhịp
- Xung quanh các gông liên kết dây đeo
- Quanh gông cáp gần hố neo
- Trong lòng bó cáp trong trường hợp cáp được bó thành chùm.
- Các hư hỏng cục bộ của lớp bảo vệ
- Các biến dạng của dây cáp là điều kiện thuận lợi để nước vào (đi qua các bản đệm...)
- Những vật cản của nước chảy dọc các dây cáp (chỗ nối dây treo)
- Những vùng bảo quản thường xuyên hoặc gần như thường xuyên trong môi trường ẩm ướt (buồng neo, vùng cây cối, vùng bóng tối...)

Tính xâm thực cơ học của dây cáp:

- Tiếp xúc của các loại ký sinh giữa dây cáp và môi trường (phần mặt ngoài cáp cũng như ở phần tiếp xúc giữa cáp và bản mặt) hoặc giữa chúng với nhau
- Tính xâm thực do lưu thông đi lại (cáp giữ)

Để đảm bảo cho các phần cáp bị gấp uốn hoạt động tốt, các dây cáp cần phải đảm bảo làm thật sạch kể cả các con lăn để sao cho diện tích tiếp xúc không bị sạn bẩn ra hoặc bị ăn mòn. Đối với các dây neo và các đai, cần phải đảm bảo các chi tiết đó không bị dòn.

Phần neo giữa các dây neo với bản mặt là một phần đặc biệt, một vài giải pháp sử dụng đã dẫn đến những sai sót như bị mài mòn do xoay ở khớp hay bị ăn mòn do tác động nước tích tụ và các rác rưởi. Việc điều chỉnh độ căng dây của công trình đảm bảo cho công trình hoạt động thích hợp.

Ngoài ra trong cấu treo còn có thể xuất hiện một số các hư hỏng khác:

- Các hiện tượng động học sinh ra khi hoạt tải đi qua thường bị khuếch đại do đặc tính của công trình. Hiện tượng này xảy ra ở mọi điểm của kết cấu.
- Các côn neo cáp là điểm cố định cứng, nó có thể chịu các lực đột biến, các con chêm trong côn nếu chế tạo quá mềm sẽ dễ dàng bị biến dạng gây tụt cáp trong côn.

Một khi xảy ra hiện tượng như vậy sẽ dẫn đến việc phân phối lại lực căng trong hệ treo, nội lực trong các sợi cáp không còn đồng đều nữa, có sợi phải chịu tải quá lớn so với khả năng chịu tải thiết kế vốn có.

Hệ điều chỉnh cáp bằng tăng-đỡ thường bị gỉ nếu không được bảo dưỡng thường xuyên, ở dạng kết cấu này thường gây ra sự tập trung ứng suất ở phần ven kết hợp với gỉ có thể gây nứt ở đó.

Trong cầu treo cần quan tâm tới các chi tiết sau:

- Cóc cáp

- + Số lượng cóc cáp so với thiết kế
- + Khoảng cách giữa các cóc cáp trong một mối liên kết
- + Độ chắc chắn khi bắt cóc.
- + Các hiện tượng hư hỏng quanh cóc cáp (gỉ - đứt sợi)

- Puli, khuyên cáp

- + Đường kính và các kích thước khác có phù hợp với loại cáp không
- + Nứt vỡ
- + Rỉ, kẹt

- Đan nối cáp

- + Chiều dài đoạn đan nối
- + Hình dáng, bước so dây có đúng chiều quy định không
- + Các hư hỏng quanh vùng đan, nối (gỉ - đứt sợi)

Tóm lại các hư hỏng chủ yếu là: Cáp chủ bị gỉ, nổ hoặc mài mòn làm giảm yếu tiết diện chịu lực. Tai đeo liên kết, dầm ngang với dây đeo bị gỉ, gãy hỏng. Rỉ các thanh neo cấu tạo từ thép tròn chôn sẵn trong bê tông hố thế.

5.1.2. Dây treo

Trong các cầu treo ở nước ta, dây treo thẳng đứng chủ yếu dùng các thanh thép tròn, hàn hữu có công trình dùng dây treo thẳng đứng bằng cáp. Các dây treo thẳng đứng có cấu tạo phần trên liên kết với cáp chủ, phần dưới liên kết với hệ mặt cầu. Các dây treo này chịu các lực khác nhau, phụ thuộc vào cấu tạo và vị trí cũng như dạng hình học của hệ treo và hệ mặt cầu.

Các dây treo thẳng đứng dùng thanh thép tròn thường cấu tạo từ hai nhánh, liên kết với nhau bằng những thanh ngang, ở đầu mỗi thanh thường hàn các chi tiết nối chốt với trụ dầm và hệ dây, ít thấy các hư hỏng ở số dây treo dài, có chăng chỉ là sự không chính xác về độ dài mỗi nhánh gây phân bố lực không đều. Các dây treo thẳng đứng dạng này

ở gần giữa nhịp chỉ có một khớp ngán và cứng có khả năng bị đứt do không tính đến các mô men uốn thay đổi phát sinh trong dây treo do các chuyển động tương đối của hệ mặt cầu với dây trên. Các dây treo thẳng đứng làm bằng cáp cũng có nguy cơ bị gỉ giống như ở cáp chủ, đặc biệt là ở phần đầu dây treo phía dưới, tại vị trí cáp đi vào côn, liên kết dây treo thẳng đứng vào hệ mặt cầu.

Các má ôm đầu trên của dây treo thẳng đứng có thể bị trượt, gây ra sự phân phối lại lực căng, làm tăng thêm lực trong các dây treo thẳng đứng bên cạnh gây nên hiệu ứng dây truyền. Đặc biệt ở các dây treo thẳng đứng gần trụ có độ dốc dây chủ lớn nên dễ tuột, trượt về hướng giữa nhịp.

5.1.3. Hệ gối cầu

Gối cầu nói chung ở phần lớn các công trình làm nhiệm vụ truyền phản lực gối xuống móng trụ và cho phép khe co giãn của hệ mặt cầu làm việc bình thường. Trong cầu treo gối cầu không làm việc hoàn toàn giống như vậy, nó đóng vai trò quan trọng hơn nhiều.

- Truyền phản lực gối thẳng đứng, thay đổi nhanh và thường xuyên
- Chịu các chuyển vị hay lực dọc rất lớn, luôn thay đổi và không giống nhau khi hoạt tải đi qua.

- Là nơi tiếp nhận lực ngang do gió sinh ra

Những hư hỏng chính đặc trưng của các loại gối như sau:

- Bị mài mòn
- Bị tách rời các điểm cố định (bản mặt hoặc gối tựa)
- Sai lệch của khối xây gối tựa lúc đầm nén

Sự tồn tại và thay đổi nhanh của các lực không gian tác dụng lên gối thường làm cho gối chóng hư hỏng mà phần lớn các gối này đã không được tính toán đầy đủ đúng theo sự làm việc đa dạng của nó. Sự xuống cấp này làm tăng độ gợn, kéo theo sự va đập ngày càng mạnh, gây nên lực động trong kết cấu ngày càng lớn, gây hư hỏng gối cầu, làm đập vỡ khối bê tông kê gối.

Hơn nữa những vấn đề do lực đập ở các gối tựa thường nảy sinh ra những hư hỏng về gối cố định thậm chí dẫn đến những hư hỏng của chính các dầm.

5.1.4. Trụ cổng

Có hai dạng trụ cổng:

a) *Dạng ngàm cứng*: Dạng cổng này thường bằng kết cấu bê tông cốt thép, cũng có những công trình có cổng cầu ngàm chế tạo từ thép hình. Trụ cổng ngàm phía đỉnh cổng thường được đặt gối đỡ cấp di động. Sự chuyển dịch của gối cấp do hệ thống con lăn

dầm nhận. Bụi và gỉ dần dần ngăn cản chuyển động của các con lăn, thậm chí làm liệt hoàn toàn. Trong trường hợp đó khi hoạt tải đi qua, cổng cầu phải chịu các lực rất lớn. Các lực như vậy không được dự kiến trước nên dẫn đến các hư hỏng, đặc biệt là nứt ở chân cổng.

b) Dạng có khớp ở chân cổng: Về nguyên tắc cổng loại này chỉ được tính toán thiết kế để chịu lực nén tuy nhiên do độ linh động của khớp chân cổng không đảm bảo, cổng có thể phải chịu các mô men uốn phụ. Ngoài ra trong trường hợp cổng có dạng hình khung, gặp tải trọng không đối xứng sẽ gây nên xoắn vặn cổng. Trong trường hợp đó liên kết ngang trên quá cứng hay không đủ cứng đều có thể là nguyên nhân gây ra những biến dạng không bình thường cho cổng cầu.

5.1.5. Hệ dầm mặt cầu

Trong các mặt cầu treo ở nước ta có kết cấu cũng như vật liệu làm mặt cầu rất đa dạng (gỗ, bê tông, bản thép bê tông liên hợp...). Ngoài các hư hỏng thường thấy ở mặt cầu nói chung còn có các hư hỏng mang đặc tính kết cấu treo.

Những hư hỏng đặc trưng chủ yếu liên quan đến vấn đề mất ổn định (vênh, võng) do các nguyên nhân:

- Hệ mặt cầu không đủ cứng
- Các gối tựa bị kẹt
- Độ căng còn "quá mềm" (các đế quá lỏng và dây cáp đầu không đủ căng, tải trọng quá lớn...)

Đa số cầu treo ở nước ta có hệ dầm mềm, có thể xem cấu trúc hệ mặt cầu gồm các bộ phận riêng biệt, nối với nhau bằng chốt liên kết độc lập vào các dây treo thẳng đứng. Sự suy yếu của các dây treo thẳng đứng này hay sự trượt của oác liên kết chúng với cáp chủ dẫn đến sự biến dạng các chi tiết tương ứng, về lâu dài có thể phá hỏng công trình. Các biến dạng thường gặp là:

- Biến dạng tổng thể theo chiều dọc cầu dưới tác dụng của tĩnh tải
- Biến dạng tổng thể theo chiều ngang cầu do việc tụt má ôm cáp dây treo thẳng đứng.
- Biến dạng cục bộ do phân bố lại lực căng trong hệ treo hoặc do xe quá tải đi qua
- Biến dạng cục bộ đột ngột sinh ra do va chạm của xe cộ trên cầu.

Nứt gãy dầm dọc khu vực $1/4$ nhịp và gần nhịp giữa. Ngoài ra còn có một số hư hỏng thường gặp khác có thể ảnh hưởng đến điều kiện khai thác bình thường của công trình, cũng như làm giảm tuổi thọ, độ bền công trình. Thống kê số liệu điều tra các hư hỏng thường gặp ở các cầu treo dây võng, phỏng đoán nguyên nhân hư hỏng được trình bày ở bảng 5.1 (gọi f là đường tên võng):

Bảng 5.1

TT	Tên cầu	Hư hỏng	Nguyên nhân
1	2	3	4
<i>Hệ dầm</i>			
1	Bến Tắt (Quảng Trị)	- f tăng 27 cm sau 20 năm - Gỉ cáp chủ gần hố thế - Mài mòn cáp chủ ở giữa nhịp - Tai đeo của dây đeo bị gỉ mất tiết diện	Cáp chủ biến dạng dư Do bảo dưỡng không tốt Do thiết kế Do bảo dưỡng, do thiết kế
2	Bảo Nhai (Lào Cai)	- f tăng 4 cm sau 20 năm - Gỉ cáp chủ gần hố thế - Tai đeo của dây đeo bị gỉ mất tiết diện	Cáp chủ biến dạng dư Do bảo dưỡng không tốt Do bảo dưỡng, do thiết kế
3	Kiến An (Hải Phòng)	- f tăng 24 cm sau 20 năm - Mài mòn cáp chủ ở giữa nhịp - Tai đeo của dây đeo bị gỉ mất tiết diện	Cáp chủ biến dạng dư Do bảo dưỡng không tốt Do bảo dưỡng, do thiết kế
4	Cốc Pài (Hà Giang)	- f tăng 4 cm sau 20 năm - Gỉ cáp chủ gần hố thế - Tai đeo của dây đeo bị gỉ mất tiết diện	Cáp chủ biến dạng dư Do bảo dưỡng không tốt Do bảo dưỡng, do thiết kế
5	Hang Tôm (Lai Châu)	- f tăng 12 cm sau 20 năm - Cáp chủ bị đứt 8 sợi nhỏ do bị đạn bắn	Cáp chủ biến dạng dư Do chiến tranh
<i>Hệ neo</i>			
1	Bến Tắt (Quảng Trị)	- Rỉ thanh neo thép ở vị trí tiếp giáp với bê tông hố thế - Thoát nước hộp bảo vệ neo tắc	Do thiết kế không hợp lý, do bảo dưỡng Do bảo dưỡng, do thiết kế
2	Bảo Nhai (Lào Cai)	- Gỉ nhẹ thanh neo thép - Hộp bảo vệ neo ẩm ướt	Do bảo dưỡng không tốt Do bảo dưỡng không tốt
3	Kiến An (Hải Phòng)	- Hố thế áp lực, không quan sát được - Những vị trí quan sát được nhìn chung còn tốt	
4	Cốc Pài (Hà Giang)	- Thanh neo thép gỉ nhẹ - Hộp bảo vệ neo ẩm ướt	Do bảo dưỡng không tốt Do bảo dưỡng
5	Hang Tôm (Lai Châu)	- Gỉ bề mặt các cấu kiện thanh neo - Thoát nước hố thế tắc	Do thiết kế, do bảo dưỡng Do bảo dưỡng, do thiết kế

1	2	3	4
<i>Trụ cột</i>			
1	Bến Tắt (Quảng Trị)	- Rỉ các thanh thép hình tổ hợp (gỉ mất trong) - Hộp bảo vệ cáp ở mu rùa hỏng	Do bảo dưỡng không tốt, do thiết kế Do bảo dưỡng, do thiết kế
2	Bảo Nhai (Lào Cai)	- Sứt vỡ bê tông thân trụ do bị đạn bắn	Do chiến tranh
3	Kiến An (Hải Phòng)	- Gỉ các thanh thép hình tổ hợp (gỉ mất trong) - Hộp bảo vệ cáp ở mu rùa hỏng	Do bảo dưỡng không tốt, do thiết kế Do bảo dưỡng, do thiết kế
4	Cốc Pài (Hà Giang)	- Sứt vỡ bê tông thân trụ do bị đạn bắn	Do chiến tranh
5	Hang Tôm (Lai Châu)	- Gối con lăn đỉnh trụ khô mỡ bảo dưỡng, gỉ nhẹ	Do bảo dưỡng
<i>Hệ dầm mặt cầu</i>			
1	Bến Tắt (Quảng Trị)	- Tai đeo dầm ngang gỉ hỏng, gãy - Hệ dầm gi ở vị trí nối chốt dầm dọc	Do bảo dưỡng không tốt, do thiết kế
2	Bảo Nhai (Lào Cai)	- Bản bê tông lắp ghép hư hỏng, cập kênh - Hệ dầm gi nặng ở vị trí dưới khe các bản lắp ghép - Tai đeo dầm ngang gỉ nặng	Do thiết kế, thi công và bảo dưỡng không tốt Do thiết kế, do bảo dưỡng Do thiết kế, do bảo dưỡng
3	Kiến An (Hải Phòng)	- Gãy dầm dọc - Bản BTCT lắp ghép bị cập kênh	Do thiết kế, do bảo dưỡng
4	Cốc Pài (Hà Giang)	- Bản BTCT hư hỏng cập kênh - Hệ dầm gi ở vị trí khe bản lắp ghép	Do thiết kế, do bảo dưỡng Do thiết kế, do bảo dưỡng
5	Hang Tôm (Lai Châu)	- Bản BTCT hư hỏng cập kênh - Hệ dầm gi ở vị trí khe bản lắp ghép	Do thiết kế, do bảo dưỡng Do thiết kế, do bảo dưỡng

Những hư hỏng trên đây ngoài do nguyên nhân khách quan là chiến tranh còn lại chủ yếu là các nguyên nhân chủ quan có thể hạn chế được.

5.2. KIỂM TRA, PHÂN TÍCH TÌNH TRẠNG CÁC BỘ PHẬN KẾT CẤU

5.2.1. Những vấn đề chung

Tai nạn, sự cố của cầu treo ở nước ta xảy ra đều do nguyên nhân những hư hỏng của các bộ phận kết cấu không được phát hiện, đánh giá và xử lý kịp thời, đúng mức. Điều

này cho thấy việc phân tích và đánh giá đúng tình trạng kỹ thuật, năng lực chịu tải của các bộ phận kết cấu cầu treo đang khai thác để có những giải pháp xử lý thích hợp, kịp thời đóng một vai trò rất quan trọng.

Kiểm tra, phân tích tình trạng kỹ thuật, đánh giá năng lực chịu tải của cầu treo dây văng đang khai thác cần đặc biệt chú ý đến những bộ phận kết cấu chủ yếu như: *cáp chủ, trụ công, mấu neo và hố thế*. Những bộ phận mà sự hư hỏng của chúng có thể ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn khai thác của cầu.

Đối với mỗi bộ phận kết cấu, sau khi xem xét tổng thể, cần tập trung kiểm tra, phân tích đánh giá tình trạng kỹ thuật những vị trí thường có hư hỏng, khuyết tật.

Sau khi phân tích các hư hỏng, khuyết tật, đánh giá tình trạng kỹ thuật của bộ phận kết cấu sẽ đánh giá được năng lực chịu tải hiện tại cũng như tuổi thọ, độ tin cậy của bộ phận kết cấu ấy. Năng lực chịu tải chung của toàn cầu sẽ được xác định, khống chế bởi năng lực chịu tải của bộ phận kết cấu yếu nhất.

5.2.2. Kiểm tra, phân tích tình trạng các bộ phận kết cấu

5.2.2.1. Hệ dây

a) Dây chủ

Như chúng ta đã biết, dây chủ là bộ phận chịu lực chủ yếu của cầu treo. Dây chủ thường làm bằng cáp (bện từ các sợi thép cường độ cao), cá biệt có một vài cầu treo dân sinh, dây chủ làm bằng sợi thép CT3 đường kính $\phi 8$ (cầu Đò Hà) hoặc bó thép $\phi 5$ cường độ cao. Từ những năm 1980 trở về trước, các cầu treo sử dụng cáp theo tiêu chuẩn của Liên Xô cũ. Gần đây một số cầu treo mới xây dựng sử dụng cáp thép của Nhật Bản theo tiêu chuẩn JIS 3525 (1977).

Phân tích đánh giá tình trạng kỹ thuật của cáp, cần xác định được chính xác cáp đó thuộc chủng loại nào, các đặc trưng hình học của nó ra sao.

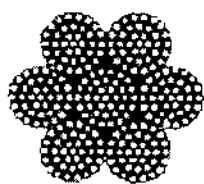
Những vấn đề chung về cáp thép dùng cho cầu treo:

+ Phân loại cáp: Có rất nhiều cách phân loại cáp, tuy nhiên dưới góc độ quản lý kỹ thuật ta có thể phân theo hình dạng mặt cắt ngang của dây cáp. Có loại dây cáp xoắn bằng dây thép tròn (cáp xoắn trần), có loại xoắn bằng dây thép tròn và dây thép hình Z bọc ngoài (cáp xoắn kín). Cáp xoắn kín có hệ số chèn chặt rất lớn (0,865) so với cáp xoắn trần ($0,45 \div 0,60$).

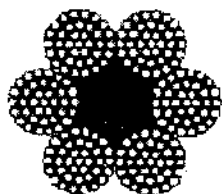
Cáp xoắn kín rất phù hợp để làm cầu treo vì biến dạng nhỏ do đó hạn chế được biến dạng của cầu khi chịu tải trọng và đồng thời rất thuận lợi khi sử dụng các vật liệu như Polyme để bảo vệ cáp.

Cáp xoắn trần có thể có lõi cứng hoặc lõi hữu cơ. Loại cáp xoắn trần có lõi hữu cơ có môđun đàn hồi nhỏ, gây biến dạng lớn cho cầu khi chịu tải, sau một thời gian cầu thường bị võng dư. Nếu so cùng đường kính, cáp xoắn kín có lực chịu kéo đứt cao hơn, độ mài mòn thấp hơn.

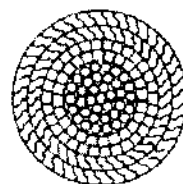
Dưới đây giới thiệu các dạng mặt cắt theo cách phân loại như trên



a) Cáp xoắn trần lõi cứng



b) Cáp xoắn trần lõi hữu cơ



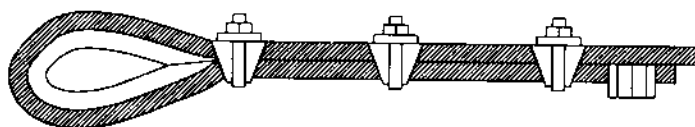
c) Cáp xoắn kín lõi cứng

Hình 5.1: Các dạng mặt cắt cáp

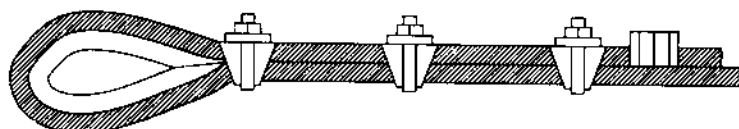
+ Xác định đường kính cáp: Để kiểm tra, đánh giá tình trạng kỹ thuật của cáp cần xác định đúng đường kính cáp. Đo đường kính cáp có thể dùng thước cặp có độ chính xác 0,1mm. Đối với dây cáp ở lớp ngoài có số nhóm sợi (tao cáp) lẻ thì không dùng thước mà phải đo chu vi dây cáp bằng một băng thép rộng không quá 5mm rồi tính ra đường kính.

+ Neo cáp bằng khuyên cáp và cóc cáp với cáp mềm, xoắn trần:

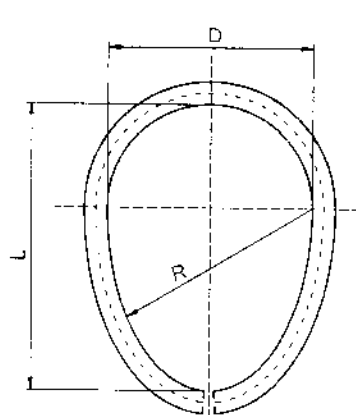
Với cáp có đường kính từ 56mm trở xuống, khuyên cáp cần có đường kính (D) tối thiểu là 250mm, đường kính và số lượng cóc cáp cũng được quy định cụ thể. Quy cách bắt cóc cáp quy định theo hình vẽ sau (hình 5.2):



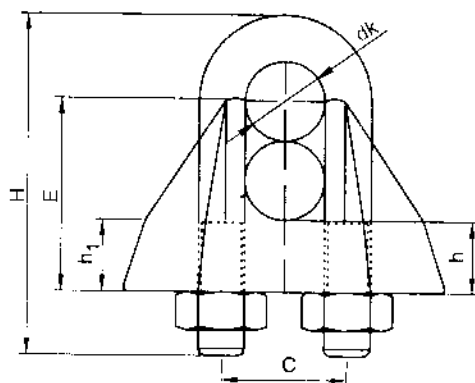
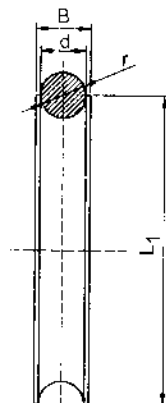
Bắt đúng quy cách



Bắt sai quy cách



Khuyên cáp



Cóc cáp

Hình 5.2: Quy cách bắt cóc cáp

+ Môđun đàn hồi sợi cáp:

Với cáp cứng xoắn kín, môđun đàn hồi gần như không thay đổi trong quá trình sử dụng. Với cáp xoắn trần, đặc biệt là với loại có lõi hữu cơ, môđun đàn hồi của sợi cáp có sự thay đổi theo thời gian: đường kính danh định của sợi cáp giảm đi, môđun đàn hồi tăng. Đặc điểm này cần lưu ý trong khi kiểm toán cầu treo đang khai thác.

Công thức xác định môđun đàn hồi của sợi cáp xoắn trần như sau:

$$E_{\text{cáp}}^{\text{TB}} = \alpha \cdot E_t \text{ với } \alpha = \cos^4 \psi \cdot \cos^4 \xi$$

Trong đó:

$E_{\text{cáp}}^{\text{TB}}$ - môđun đàn hồi của sợi cáp xoắn trần

E_t - môđun đàn hồi của thép cơ bản

ξ - góc nghiêng giữa trục tạo cáp so với trục bó cáp

ψ - góc nghiêng giữa sợi cáp và trục tạo cáp

(đại lượng ψ và ξ xác định tại thời điểm cần tính)

Kiểm tra, đánh giá tình trạng kỹ thuật

Khi kiểm tra đánh giá tình trạng kỹ thuật của cáp, cần chú ý xem xét kỹ một số chỗ dễ bị gỉ, đứt như:

+ Vị trí cáp chủ ngấp trong đất: đây là vị trí cáp dễ bị gỉ nhất, nguy hiểm nhất vì vị trí này khó kiểm tra, bảo dưỡng mà lại luôn có độ ẩm cao, đẩy nhanh tốc độ gỉ thép. (Cáp cầu Ngòi Bo bị đứt cáp chủ tại vị trí này)

+ Vị trí cáp chủ vắt qua mu rùa đỉnh trụ cổng: cần kiểm tra sự biến dạng của cáp, sự nở và sự mài mòn của cáp.

+ Vị trí cáp chủ neo vào mấu neo: nếu cáp chủ neo bằng côn neo, cần kiểm tra sự tuột, biến dạng của côn neo. Nếu cáp chủ bắt vòng qua khuyên cáp và neo bằng cóc cáp, cần kiểm tra tình trạng gỉ, nở của cáp, sự tuột, lỏng cóc cáp.

+ Vị trí cáp chủ liên kết với dầm ngang giữa nhịp : kiểm tra sự gỉ của cáp vì đây là khu vực tụ nước, cáp dễ bị gỉ. Kiểm tra và đánh giá mức độ mài mòn sợi cáp do chuyển dịch tương đối giữa sợi cáp và má ôm cáp khi có hoạt tải.

Khu vực điểm tụ thủy đối với dầm chủ bằng bó sợi $\phi 5$ cường độ cao cần xem xét kỹ sự gỉ của các sợi phía trong bó cáp.



Hình 5.3 : Cầu treo dây võng

Xác định tiết diện thực của cáp :

Mức độ hao hụt tiết diện làm việc của cáp: Các tao thép xoắn của sợi cáp có thể không bị hao hụt ở cùng một tiết diện, nhưng nếu phạm vi hư hỏng của các tao thép nằm gần nhau thì cần phải tính toán tiết diện hao hụt là tổng hao hụt của các tao thép. Kiến nghị khi phạm vi hư hỏng của các tao thép trong khoảng 1,5m (trên 3 lần bước xoắn) với cáp có đường kính từ $\phi 56$ trở xuống thì hao hụt được tính là tổng các hao hụt của các tao thép ở đó.

Các sợi cáp chủ rải song song thường có tình trạng các sợi cáp làm việc không đồng đều. Để đánh giá sự làm việc của các sợi cáp có thể sử dụng thiết bị kiểm tra lực căng trong cáp. Cao đặc xác định đường cong và đường tên tính của cáp chủ ở thời điểm kiểm toán cũng là một công việc quan trọng phục vụ cho việc đánh giá tình trạng cáp chủ. Khi cáp chủ biến dạng dư, các thông số như đường tên cáp, môđun đàn hồi của sợi cáp thay đổi dẫn đến thay đổi nội lực trong các bộ phận kết cấu của cầu khi chịu lực.

b) Dây đeo

Cần kiểm tra đánh giá sự chùng, xộc xệch của dây đeo: khi có cáp lỏng, tuột, vị trí dây đeo liên kết với cáp chủ bị dịch chuyển theo xu hướng làm chùng dây đeo, các dây đeo bị xộc xệch, trạng thái chịu lực chung của toàn cầu thay đổi theo chiều hướng bất lợi cho hệ dầm, mặt cầu xuất hiện độ võng lớn.

Kiểm tra sự gỉ, hư hỏng các tai đeo, bulông quang: tai đeo thép ở vị trí phía dưới hàn vào dây đeo cầu tạo từ thép tròn thường bị gỉ, giảm yếu tiết diện chịu lực do vị trí này thường ẩm, ẩm thấp vì nước chảy dọc theo dây đeo gây ra. Cần xác định được chính xác vị trí, mức độ hao hụt tiết diện chịu lực để kiểm toán bản thép tai đeo chịu ép mặt, kiểm toán xé rách.

Ở vị trí giữa nhịp, cáp chủ liên kết với dầm ngang bằng các dây đeo ngắn hoặc bulông quang. Cần xem xét tình trạng phá hỏng các dây đeo và bulông quang do chịu uốn khi mặt cầu có biến dạng quá lớn hoặc cầu bị lắc ngang do gió.

Trường hợp dây đeo bằng cáp, kiểm tra, phân tích tình trạng sợi cáp, tình trạng neo cáp hình cốc (kiểm tra sự gỉ của côn neo, sự biến dạng của cốc neo...) hoặc khuyên cáp và cốc cáp như đối với cáp chủ.

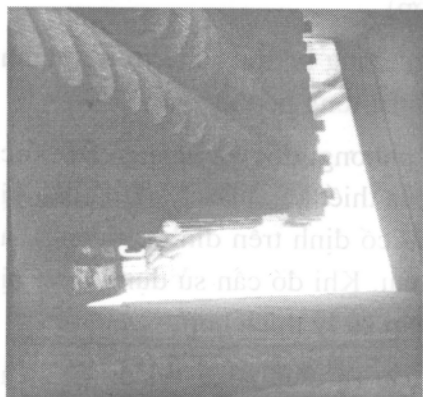
5.2.2.2. Hệ neo

a) Hố thế

Với loại hố thế trọng lực, cần kiểm tra sự sụt, trượt hố thế, kiểm tra sự dịch chuyển của hố thế. Nếu hố thế nằm trong khu vực địa chất phức tạp (có nước ngầm, khu vực thường xuyên có sụt trượt...) thì việc lập hệ thống mốc để thường xuyên theo dõi và đánh giá sự dịch chuyển của hố thế là hết sức cần thiết.

Kiểm tra bê tông hố thế: sự xuất hiện các vết nứt, nứt vỡ; chất lượng bê tông. Có thể sử dụng các phương pháp thí nghiệm không phá hoại như siêu âm, thử cường độ bê tông

bằng súng bật nảy Schmidt, đo điện thế, đo điện trở... để đánh giá cường độ, độ đồng nhất của bê tông hồ thể, khả năng gỉ cốt thép bên trong.



Hình 5.4: Hầm neo cáp



Hình 5.5 : Chi tiết neo dây cáp chủ

Với hồ thể áp lực; cần kiểm tra sự sụt trượt của bản áp lực, kiểm tra sự ổn định áp lực đất trước bản.

Kiểm tra tình trạng hộp bảo vệ neo: điều kiện vệ sinh, tình trạng thoát nước ... Thực tế cho thấy, khi cầu không có hộp bảo vệ neo hoặc khu vực này bẩn, ẩm ướt, các bộ phận kết cấu quan trọng như mấu neo, cáp chủ, khuyên cáp, cọc cáp... sẽ nhanh chóng bị gỉ, hỏng gây nguy hiểm đến an toàn khai thác công trình.

b) Mấu neo

Kiểm tra tình trạng làm việc (sự gỉ, biến dạng...) của các chốt ắc hoặc đòn gánh neo giữ cáp chủ, tình trạng của các bản thép chịu ép mặt ở mấu neo.

Kiểm tra độ gỉ của mấu neo tại vị trí tiếp giáp giữa bê tông và mặt thoáng, có thể đục bê tông xung quanh mấu neo sâu vào 2÷3cm để kiểm tra sau đó dùng keo Epoxy trám vá lại. Mấu neo bị ngấm trong bê tông hồ thể nên cần xác định được độ lệch trục mấu neo với cáp chủ theo các phương để kiểm toán mấu neo chịu kéo uốn tại vị trí tiếp giáp giữa bê tông và mặt thoáng.

Mấu neo là một bộ phận dễ hư hỏng nhưng lại hết sức quan trọng trong việc quyết định năng lực chịu tải của cầu do vậy cần kiểm tra, phân tích và đánh giá chính xác tình trạng kỹ thuật của nó để có thể đánh giá đúng năng lực chịu tải chung của cả cầu.



Hình 5.6: Ảnh chi tiết neo cáp

5.2.2.3. Trụ cổng

Kiểm tra mức độ gỉ với các cấu kiện thép của trụ cổng như: cột trụ, hệ giằng liên kết, hộp bảo vệ cáp đỉnh trụ, chốt ắc chân trụ (đối với trụ khớp).

Kiểm tra xác định vị trí các vết nứt, sút vỡ đối với trụ cổng bê tông. Kiểm tra, đánh giá chất lượng bê tông bằng các phương pháp như đối với bê tông hồ thế.

Xác định độ nghiêng lệch tĩnh của trụ cổng theo hai phương: dọc và ngang cầu. Xác định độ vắn, xoắn của trụ cổng. So sánh với các số liệu của thiết kế, quản lý. Trụ cổng bị vắn xoắn vô độ (thường xảy ra với trụ khớp, cáp chủ bất cố định trên đỉnh trụ cổng) là do lực căng trong cáp chủ thượng lưu và hạ lưu khác nhau. Khi đó cần sử dụng thiết bị để xác định lực căng tĩnh trong cáp chủ nhằm có biện pháp xử lý thích hợp.

Trường hợp trụ ngầm bị nghiêng theo phương dọc cầu ra phía sông (ví dụ do nền móng bị xói) thì độ nghiêng của trụ cần được xác định chính xác và theo dõi thường xuyên để có biện pháp sửa chữa, gia cố thích hợp vì khi đó lực tác dụng lệch tâm trên đỉnh trụ luôn có xu hướng làm trụ nghiêng thêm. Điều này đã xảy ra đối với một số cầu xây dựng trước đây.

Với trụ cứng, phải kiểm tra, xác định vị trí tĩnh của gối con lăn nhằm xác định độ lệch tâm của lực nén tác dụng vào trụ cổng. Kiểm tra tình trạng gỉ của các con lăn, thớt gối nhằm xác định hệ số ma sát thích hợp khi kiểm toán trụ.

Kiểm tra sự làm việc của hệ thống chống sét, tình trạng hộp bảo vệ cáp, mu rùa đỉnh trụ

5.2.2.4. Hệ dầm mặt cầu

Xác định đường cong tĩnh mặt cầu, so sánh với các số liệu thiết kế, quản lý. Thực tế cho thấy, sau một thời gian khai thác, cáp chủ có độ giãn dư, mặt cầu bị võng xuống.

Kiểm tra xác định các cong vênh, biến dạng, gãy hỏng dầm, cấu kiện dầm thép. Kiểm tra mức độ gỉ các cấu kiện dầm, dầm thép đặc biệt là ở vị trí khe bản BTCT lắp ghép, vị trí nối chốt dầm dọc.

Kiểm tra tình trạng các tai đeo, liên kết dầm ngang với dây đeo, xem mức độ gỉ, xé rách, tình trạng bulông liên kết, đường hàn liên kết. Các tai đeo dầm ngang thường bị gỉ, giảm yếu tiết diện do vị trí này thường bị đọng nước, đất cát bẩn. Cần xác định chính xác vị trí, mức độ hao hụt tiết diện tai đeo để kiểm toán ép mặt, chống xé rách bản thép. Các tai đeo của dây đeo ở gần giữa nhịp thường bị gãy bulông, mối hàn liên kết do chịu uốn lớn khi mặt cầu dao động lắc ngang do gió.

Kiểm tra chất lượng tà vẹt, ván lát mặt cầu, tình trạng dinh đĩa, bulông liên kết với mặt gỗ. Kiểm tra chất lượng bê tông, tình trạng sút vỡ, gỉ cốt thép của bản BTCT, liên kết bản BTCT lắp ghép với hệ dầm, kiểm tra tình trạng tách lớp bê tông và thép đối với bản Robinson.

5.3. ĐÁNH GIÁ NĂNG LỰC CHỊU TẢI CẦU TREO DÂY VÒNG

5.3.1. Những vấn đề chung

Đánh giá năng lực chịu tải bao gồm sự tổng hợp tất cả các kết quả theo dõi lâu dài, kết quả tính toán, đo đạc các tham số cơ học và hình học ở các tình huống làm việc của công trình. Công trình sẽ được đánh giá theo trạng thái giới hạn về cường độ, về nứt và biến dạng. Kết luận sẽ cho biết tải trọng như thế nào thì được phép tác động lên công trình với mức độ an toàn nào đó đã cho trước.

Đối với mỗi bộ phận kết cấu, sau khi xem xét tình trạng làm việc của bộ phận kết cấu, kiểm tra những vị trí có hư hỏng, khuyết tật, xác định được mức độ hư hỏng, cần đánh giá năng lực chịu tải hiện tại của bộ phận kết cấu ấy. Sự làm việc chung của toàn bộ cầu có thể được xem xét, đánh giá bằng kết quả đo đạc, thử tải cầu.

Năng lực chịu tải chung của toàn cầu sẽ được xác định, khống chế bởi năng lực chịu tải của bộ phận kết cấu yếu nhất có thể xem xét đến kết quả đo đạc, thử tải để loại bỏ những yếu tố bất thường.

5.3.2. Kiểm toán đánh giá năng lực chịu tải

Sau khi kiểm tra, xác định hư hỏng, sơ đồ chịu lực của các bộ phận kết cấu, tiến hành kiểm toán bộ phận kết cấu theo sơ đồ chịu lực đã xác định như các bài toán sức bền vật liệu thông thường. Trong kiểm toán cần lưu ý: Sự thay đổi mô đun đàn hồi, diện tích tiết diện cáp chủ sẽ làm thay đổi nội lực, biến dạng chuyển vị của các bộ phận kết cấu.

Trị số ứng suất kéo do uốn cáp ở vị trí vắt qua mu rùa đỉnh trụ cổng, vị trí vòng qua khuyên cáp cũng cần được xét đến đặc biệt khi cáp chủ là bó sợi song song. Các số liệu kiểm toán và kết quả kiểm toán một công trình cầu treo dây vòng ở nước ta ở trạng thái ban đầu và trạng thái sau khoảng 20 năm khai thác được trình bày trong bảng 5.2:

Bảng 5.2: Kết quả kiểm toán một số cầu treo dây vòng ở nước ta

TT	Tên cầu	Tĩnh tải (T/m)	Hoạt tải	Trạng thái ban đầu			Trạng thái sau		
				Độ cứng cáp $E_0 F_0$ (T)	Lực kéo đứt (T)	Độ cứng dầm mặt cầu $E_0 J_0$ (T)	Độ cứng cáp $E_s F_s$ (T)	Lực kéo đứt (T)	Độ cứng dầm mặt cầu $E_s J_s$ (T)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	BT (Quảng Trị)	2.658	H10	96600	1160	10490	119146	928	9441
2	BN (Lào Cai)	2.438	10.4T+4.8T	219796	1450	23058	197816	1305	20752
3	N (Hà Tĩnh)	1.116	1xe10T	90502	469	6312	72402	376	5681

(Bảng 5.2 tiếp theo)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	CB (Hà Tĩnh)	1.516	H13	181004	939	4536	144804	751	4082
5	ĐL (Hà Tĩnh)	1.216	1xe16.9T	172800	1120	5314	155520	1008	4783
6	CR (Nghệ An)	1.206	1xe18T	172800	1120	18814	155520	1008	16933
7	CP (Hà Giang)	2.264	8T+4,8T	150536	1160	10408	135482	1044	9367

Qua bảng 5.2 ta nhận thấy hệ số an toàn của cáp chủ thường được thiết kế lớn hơn 2 và tập trung ở khoảng $2,5 \div 3$.

5.3.3. Thử tải cầu

Thử tải cầu nhằm đánh giá sự làm việc chung của các bộ phận kết cấu trong công trình. Tùy thuộc kết quả kiểm tra, đánh giá hiện trạng các bộ phận kết cấu của cầu mà quyết định cấp tải trọng thử. Thông thường tải trọng thử không nhỏ hơn 80% tải trọng thiết kế.

Sử dụng các thiết bị đo biến dạng, chuyển vị, dao động và thiết bị đo đặc... để đo đạc, đánh giá sự làm việc của các bộ phận kết cấu trong sự làm việc chung của cả công trình. Thu thập và xử lý các số liệu đo đạc theo nguyên tắc thống kê để thu được các số liệu đủ độ tin cậy nhằm đánh giá đúng tình trạng làm việc của các bộ phận kết cấu.

Sau khi kết luận về tình trạng kỹ thuật, năng lực chịu tải của cầu cần đưa ra những kiến nghị, giải pháp cho công tác quản lý khai thác cầu

5.4. GIẢI PHÁP SỬA CHỮA TĂNG CƯỜNG

5.4.1. Hệ dâ

5.4.1.1. Dây chủ bị giảm yếu tiết diện

Nguyên tắc: tăng cường cho cáp chủ phần tiết diện mới có khả năng chịu kéo tới tiêu phá bằng phần tiết diện bị mất.

Nếu cáp chủ bị gỉ mất phần lớn tiết diện, có thể cắt hẳn và thay thế bằng một đoạn tăng đơ thép. Hai đầu cắt ra được bắt vòng qua pully thép ở hai đầu tăng đơ và neo giữ chặt bằng cóc cáp. Biện pháp này phức tạp ở chỗ phải có thiết bị kéo và giữ cáp để lực căng trong cáp bằng 0 trước khi cắt cáp. Tuy nhiên, ưu điểm của biện pháp này có sử dụng tăng đơ thép để điều chỉnh lực căng trong đoạn cáp sau này.

Nếu phần tiết diện cáp chủ bị mất không lớn lắm, biện pháp đơn giản và kinh tế là bù phần tiết diện bị mất bằng thép thường. Hai bên vị trí cần tăng cường được bố trí các bản ốp (kiểu Curie) liên kết chặt với cáp chủ. Các thanh thép thường được hàn trực tiếp lên các bản ốp này. Kiểu tăng cường này đơn giản, dễ thi công, tuy nhiên phần tiết diện tăng cường khi đó chỉ tham gia chịu hoạt tải.

Song song với việc bù tiết diện cho cáp chủ, giảm nhẹ tĩnh tải cũng là một biện pháp để tăng khả năng khai thác với hoạt tải cầu. Tuy nhiên, lượng giảm nhẹ tĩnh tải là bao nhiêu cho phù hợp để mặt cầu không có những biến dạng gây nguy hại đến hệ dầm, dáy đeo... cũng cần được tính toán cụ thể.

5.4.1.2. Gỉ hỏng tại đeo dầm ngang

Cấu tạo của tai đeo dầm ngang thường làm khu vực này đọng nhiều đất, cát bẩn, ẩm ướt. Đó chính là nguyên nhân gây gỉ các tai đeo. Khi đó các chốt ốc được bố trí thêm các bulông quang và các đòn gánh đỡ dưới dầm ngang.

5.4.2. Hệ neo

Các thanh neo bằng thép tròn chôn giữ trong bê tông hố thế thường bị gỉ ở vị trí sát với thành bê tông của hố thế. Khu vực này rất khó được tăng cường bằng phương pháp bù tiết diện. Do vậy, phương pháp thường được áp dụng để tăng cường năng lực chịu tải của cầu là chuyển phần nội lực do tiết diện bị hao hụt của neo cũ phải chịu sang cho neo mới. Neo mới khi được bố trí phía trước hoặc phía sau-nằm trên cùng một đường thẳng với neo cũ (song song với trục tim cầu). Các thanh neo mới được giữ vào vị trí khác của hố thế cũ hoặc vào một hố thế mới.

5.4.3. Trụ cổng

Trụ cổng thép thường được tổ hợp từ thép hình bằng bản giằng với liên kết hàn hoặc tán đinh. Sau một thời gian dài khai thác, các kết cấu này thường bị gỉ ở mặt trong của thép hình, gỉ nặng nhất ở khu vực chân trụ cổng. Tăng cường trụ cổng cũng dựa trên nguyên tắc "bù tiết diện" hao hụt. Tuy nhiên, một chú ý quan trọng nếu sử dụng hàn để liên kết các tiết diện bổ sung vào cột trụ là cần thiết kế vị trí và trình tự hàn để không ảnh hưởng tới khả năng chịu lực của cột (vì trong quá trình sửa chữa, cột trụ vẫn luôn chịu lực nén lớn).

5.4.4. Hệ dầm mặt cầu

Dầm dọc giữa nhịp bị nứt gãy do không đủ độ cứng chống uốn, do hiện tượng mỏi. Hiện nay hư hỏng này thường được sửa chữa bằng cách thay thế đoạn dầm dọc mới hoặc hàn bổ sung tiết diện thép cho khu vực dầm bị hỏng. Trên phương diện thiết kế, các nhà thiết kế đang hoàn thiện xu hướng thiết kế khu vực dầm dọc giữa cầu có độ cứng lớn, tham gia chịu hoạt tải cùng với hệ dáy.

5.5. MỘT SỐ VÍ DỤ KIỂM ĐỊNH CẦU

5.5.1. Ví dụ kiểm tra, phân tích đánh giá tình trạng cầu treo BT

A- Giới thiệu chung về cầu

Cầu treo BT nằm trên quốc lộ X tại lý trình Km 685 + 850, bắc qua sông Bến Hải thuộc địa phận tỉnh Quảng Trị. Cầu được xây dựng vào năm 1973 và đưa vào sử dụng năm 1974 với các thông số kỹ thuật chủ yếu như sau:

+ Kết cấu nhịp : 1 nhịp dài 100m (khoảng cách hai trụ cổng)

+ Khổ cầu : $4\text{m} + 2 \times 0,75\text{m}$

+ Hệ mặt cầu : các dầm ngang bằng thép hình chữ I 465, khoảng cách giữa các dầm là 5m. Dầm ngang liên kết với cáp chủ thông qua dây đeo bằng thép tròn. Hệ dầm dọc là loại dầm khớp gồm 6 dầm I 360 đặt trên dầm ngang. Theo chiều dọc cầu, dầm dọc chia thành 4 đoạn và được nối liên tục thông qua các chốt.

Mặt cầu bằng BTCT liên hợp với hệ dầm dọc.

Giằng gió bằng thép góc L80×80×80.

Lan can cầu bằng thép

+ Trụ cổng: Cổng cầu là loại trụ khớp. Mỗi trụ gồm hai cột, khoảng cách hai cột là 6m. Mỗi cột được cấu tạo từ 2I 465 tổ hợp với nhau bằng bản giằng. Phía trên hai trụ cột cổng được liên kết với nhau bằng I 465, phía dưới cột trụ được liên kết với thân trụ BTCT thông qua chốt ác $\phi 130$

+ Hệ dây: Cáp dùng làm dây chủ là hệ cáp mềm $\phi 56\text{mm}$. Toàn cầu có 10 bó mỗi bên 5 bó cáp vắt qua đỉnh trụ neo vào hố thố. Dây đeo gồm hai thanh $\phi 30$ tổ hợp thành cặp được liên kết với dây võng và hệ dầm ngang thông qua hệ chốt.

+ Hố thố : là loại hố thố trọng lực bằng BTCT đặt cách trụ cổng 30m. Đầu mỗi sợi cáp chủ được neo bằng 4 thanh $\phi 30$ uốn tròn và neo giữ trong khối BT.

B- Khảo sát hiện trạng cầu

B-1. Hệ dây

Cáp dùng làm dây chủ là hệ cáp mềm $\phi 56\text{mm}$. Toàn cầu có 10 bó (mỗi bên 5 bó) cáp vắt qua đỉnh trụ, neo vào hố thố ở hai bờ. Trước năm 1994, đầu các bó cáp ở vị trí hố thố tiếp giáp với đất ẩm nên bị gỉ nhiều. Năm 1994, các sợi cáp này đã được sửa chữa cụ thể như sau:

+ Ở hố thố phía Quảng Trị: toàn bộ 10 đầu cáp đã được sửa chữa bằng cách: cắt bỏ phần cáp bị gỉ không an toàn; mỗi đầu cáp được thay thế bằng thanh tăng đơ $\phi 50$. Sau khi đã neo xong, tiến hành đổ bê tông thêm khối bê tông phía trước.

+ Ở hố thế phía Quảng Bình: chỉ sửa chữa ba đầu cáp tầng dưới, hố phía thượng lưu. Còn lại 7 đầu cáp chưa được sửa hiện tại đã bị gỉ nhiều, đặc biệt là phía dưới khay cáp, nơi thường bị ẩm ướt và đọng nước. Khuyên cáp sát vào thành bê tông của hố thế không thể kiểm tra đánh giá chất lượng được.

Vị trí cáp chủ vắt qua mu rùa đỉnh trụ nằm trong hộp bảo vệ đã hàn kín, không thể mở để kiểm tra được. Quan sát từ hai cửa lật hai bên hộp bảo vệ vào phát hiện thấy cáp chủ trên mu rùa đều ở tình trạng khô, không được bôi mỡ bảo dưỡng, nhiều tổ tò vò làm trên sợi cáp, trên mu rùa, làm cho cáp trên mu rùa càng khô và tăng tốc độ gỉ, lão hoá sợi thép của cáp.

Tại vị trí dầm ngang giữa nhịp, cáp chủ có chuyển dịch 4cm về mỗi phía so với má ôm cáp khi có hoạt tải nên có hiện tượng sợi thép phía ngoài của cáp chủ bị mài mòn. Vị trí này cần phải được chú ý bôi mỡ bảo dưỡng thường xuyên để giảm ma sát, giảm quá trình mài mòn cáp.

Tại các vị trí khác, cáp chủ nhìn chung còn tốt, bề mặt cáp chủ được bôi mỡ bảo dưỡng. Đo chu vi cáp thu được kết quả $C = 1700\text{mm} \rightarrow$ đường kính $d = 54,11\text{mm}$. Góc nghiêng giữa sợi cáp và trục tạo cáp : $\psi = 20^\circ$; góc nghiêng giữa trục tạo cáp so với trục bó cáp : $\xi = 20^\circ$;

Dây đeo được cấu tạo từ 2φ30 liên kết với cáp chủ thông qua má ôm cáp, liên kết với dầm ngang qua các tai đeo. Năm 1994, do nhiều tai đeo ở dầm ngang bị gãy bulông liên kết, bong bật mối hàn nên đã được sửa chữa bằng cách tăng cường một đai thép φ22 bắt vòng qua chốt ốc φ50, phía dưới tiện ren, bắt bulông vào một thanh thép đỡ (loại L100 × 100) dưới đáy dầm ngang. Tuy nhiên kết cấu tăng cường này chỉ đảm bảo dầm ngang và chốt φ50 được liên kết chắc chắn. Trên thực tế bản thép dày 12mm của tai đeo liên kết vào dây đeo đã bị gỉ nặng, nếu bản thép này bị xé rách thì cũng ảnh hưởng đến an toàn khai thác cầu, do vậy cần chú ý kiểm tra thường xuyên các tai đeo này.

B-2. Hệ neo, hố thế

Hố thế là loại hố thế trọng lực bằng BTCT đặt cách trụ cổng 30m. Đầu mỗi sợi cáp chủ được neo giữ vào hố thế thông qua 4 thanh thép φ30 uốn tròn và được neo giữ trong khối bê tông.

- Hố thế phía Quảng Bình:

Hố thế phía Quảng Bình không được đổ thêm khối bê tông ở phía trước như hố thế phía Quảng Trị. Khảo sát tình trạng các thanh neo thép φ30 nhận thấy: Tại vị trí tiếp giáp giữa bê tông và mặt thoáng, các thanh neo cáp này bị gỉ. Do kích thước giữa các mấu neo với nhau và kích thước giữa mấu neo với thành trước hố thế rất hẹp nên chỉ kiểm tra được một số thanh cụ thể như sau:

+ Hố thượng lưu:

- Cụm 2 dây trên: các thanh phía dưới gỉ sâu trên 2mm. Các thanh phía trên không khảo sát được

- Cụm 3 dây dưới : Các thanh phía dưới gỉ sâu trên 2mm. Các thanh phía trên không khảo sát được. Bản thép đứng hàn vào neo gỉ sâu tới 4mm

+ Hố thể hạ lưu:

- Cụm 2 dây trên: Thanh thượng lưu 2 thanh phía dưới gỉ sâu trên 2mm. Các thanh phía trên không khảo sát được. Thanh hạ lưu 2 thanh phía dưới có một thanh gỉ khoảng 1mm, thanh còn lại gỉ sâu 3mm. Các thanh phía trên không khảo sát được.

- Cụm 3 dây dưới: các thanh phía dưới gỉ sâu đến 3mm. Các thanh phía trên không khảo sát được.

- Hố thể phía Quảng Trị:

Năm 1994 hố thể phía Quảng Trị được đổ thêm một khối bê tông ở phía trước với mục đích chịu hoạt tải. Trước khi đổ thêm khối bê tông này, các đầu cáp chủ bị gỉ được cắt và thay bằng các thanh tăng đơ $\phi 50$ sau đó căng lại cáp nhưng chỉ tiết đóng vai trò hết sức quan trọng trong khả năng chịu lực chung của toàn cầu là thanh neo thép $\phi 30$ lại không được đề cập đến. Hồ sơ kết quả khảo sát và thuyết minh thiết kế sửa chữa khi đó không đề cập gì tới tình trạng các thanh neo thép này. Với điều kiện hiện có, không thể khảo sát được tình trạng của các thanh neo thép này.

Năm 1994 cả hai hố thể phía Quảng Bình và Quảng Trị đều được xây hố bảo vệ neo ở phía trước. Các hố bảo vệ neo của hố thể Quảng Trị nhìn chung khô ráo, thoát nước tốt. Đây các hố bảo vệ neo của hố thể phía Quảng Bình nhiều bùn đất, ẩm ướt, thoát nước kém. Đây là một trong những nguyên nhân làm tăng tốc độ gỉ các cấu kiện neo bằng thép.

Tóm lại: Các thanh thép $\phi 30$ neo vào bê tông của hố thể để giữ các đầu cáp $\phi 56$ đã bị gỉ nặng. Hiện nay không có điều kiện để đánh giá được cụ thể. Những đầu cáp tại vị trí vòng qua khuyên cáp cũng bị gỉ nhưng cũng không có điều kiện để kiểm tra. Trước hố thể phía Quảng Trị được đổ thêm khối bê tông có trọng lượng khoảng 140 tấn. Giải pháp kỹ thuật này chưa có độ tin cậy cao. Nếu các thanh thép $\phi 30$ tiếp tục gỉ (vì giữa khối bê tông mới đổ với khối bê tông cũ vẫn có khe hở, nước vẫn có thể ngấm theo khe hở này gây gỉ thép), khi đó khối bê tông đổ thêm sẽ không đủ trọng lượng để giữ lực ngang do hoạt tải và tĩnh tải của mặt cầu. Mặt khác nếu khối bê tông đổ thêm bị lún thì các thanh neo thép $\phi 30$ còn làm việc ở trạng thái bất lợi hơn nhiều.

B-3. Trụ cổng

Cổng cầu là loại trụ khớp, mỗi trụ gồm hai cột, khoảng cách hai cột là 6m. Mỗi cột được cấu tạo từ 2I 465 tổ hợp với nhau bằng bản giằng. Phía trên, hai cột trụ cổng được

liên kết với nhau bằng I 465, phía dưới cột trụ được liên kết với thân trụ BTCT thông qua chốt $\phi 130$.

Giằng ngang của cả hai trụ cổng I 465 (đặt nằm ngang) được đơn vị quản lý đổ nhựa đường để chống gỉ. Cửa lật của hộp bảo vệ cáp và mu rùa trên đỉnh trụ cổng bị rơi, hỏng (trên trụ cổng Quảng Trị mất 1 cửa phía hạ lưu, trên trụ cổng Quảng Bình mất một cửa phía thượng lưu), các cửa còn lại bị gỉ khá nặng. Các tấm tôn của hộp bảo vệ bị gỉ. Trên giằng ngang của trụ cổng phía Quảng Trị, tấm tôn ốp ngoài đã bị gỉ thủng và phát hiện thấy có cây cỏ mọc từ trong ra (điều này chứng tỏ phía trong có nhiều đất cát bẩn ẩm ướt).

Các mu rùa trên đỉnh trụ cổng khô, không được bôi mỡ bảo dưỡng. Trên mu rùa và cáp chủ có nhiều tổ tò vò bằng đất. Má ôm cáp trên mu rùa trụ cổng phía Quảng Bình mất một bulông liên kết. Hệ thống chống sét nhìn chung còn tốt. Kim thu lôi và các dây dẫn còn liên tục, không bị gỉ mất tiết diện. Bề ngoài các nhánh trụ cổng bằng thép hình I 465, lớp sơn bảo vệ nhìn chung còn tốt, thép không bị gỉ nhưng phát hiện thấy các vảy gỉ thép dày tới $2 \div 3\text{mm}$ ở lỗ thoát nước chân trụ cổng. Phía trong trụ cổng các cấu kiện thép đã gỉ khá nặng. Nguyên nhân dẫn đến gỉ thép bên trong là do hơi nước tích tụ vì các tấm tôn ốp bảo vệ không tuyệt đối kín, không thoáng gió đã cản trở sự bay hơi của nước. Mặt khác, cũng chính những tấm tôn ốp này đã gây khó khăn cho đơn vị quản lý trong việc kiểm tra và duy tu bảo dưỡng. Năm 1994, khi sửa chữa cầu, bản tôn ốp phía dưới chân trụ cổng do bị gỉ nhiều đã thay thế và hàn lại. Bụng I 465 bị gỉ nặng cũng đã được hàn các sườn tăng cường bằng thép bản dày 12mm , cao 720mm .

Hiện nay, do toàn bộ các nhánh trụ cổng và bản giằng ngang liên kết đều bị bịt kín nên không kiểm tra và đánh giá chất lượng được. Để có thể kiểm tra được các nhánh trụ cổng và giằng ngang liên kết, cần phải mở các tấm tôn ốp phía ngoài. Mặt khác, trên phương diện quản lý và khai thác cầu cũng cần loại bỏ các tấm tôn ốp này để tránh tình trạng đọng hơi nước bên trong gây gỉ thép. Chốt $\phi 130$ ở chân trụ cổng khô mỡ bảo dưỡng. Các ê cu ở bulông chôn sẵn trong bê tông bệ trụ bị gỉ gần như mất hẳn. Bản thép dè trụ bị gỉ nhẹ.

Bệ trụ BTCT nhìn chung còn tốt, không có dấu hiệu lún, chuyển vị. Thân bệ trụ không có các vết nứt hay sút vỡ đáng kể. Thử cường độ bê tông trụ bằng súng bật nảy Smitch cho kết quả cường độ bê tông bệ trụ ở vào khoảng $350 \div 380\text{kg/cm}^2$.

B-4. Hệ dầm mặt cầu

Hệ dầm dọc, giằng gió chưa có gì hư hỏng lớn. Dầm dọc bị gỉ nhẹ tại các vị trí nối chốt do nước trên mặt cầu chảy xuống. Các dầm dọc biên bị gỉ tại vị trí tiếp giáp giữa bụng và cánh dưới dầm, phía má ngoài cầu do đọng đất cát bẩn và nước mưa hắt.

Dầm ngang bị gỉ tại vị trí tiếp giáp giữa bụng và cánh dưới, đặc biệt là ở má dầm phía Quảng Bình do gió Lào thổi gây đọng đất cát bẩn. Đầu các dầm ngang và các tai đeo

dầm ngang được đơn vị quản lý nhựa đường bảo vệ sau khi sửa chữa cầu năm 1994, quá trình gỉ không phát triển.

Bản mặt cầu bằng BTCT liên hợp với dầm dọc nhìn chung còn tốt nhưng do không có hệ thống thoát nước mặt cầu và gờ chắn bánh đổ liền theo chiều dài của mỗi đoạn dầm là 25m, nên toàn bộ nước trên mặt cầu chảy xuống các khe hở ở vị trí khớp nối dầm dọc gây gỉ hệ dầm dọc, dầm ngang ở vị trí này. Năm 1994, sau khi sửa chữa cầu, dầm dọc, dầm ngang ở các vị trí này cũng đã được quét nhựa đường bảo vệ nên đã phần nào hạn chế được quá trình gỉ dầm. Thử cường độ bê tông bằng súng bật nảy Smitch cho kết quả cường độ bê tông bản trên 400kG/cm².

C- Đo đặc trạng thái ứng suất biến dạng

Theo đề cương kiểm định cầu treo BT, đã tiến hành chất tải đo đặc trạng thái ứng suất biến dạng của cáp chủ, dây đeo, trụ cổng, bản BTCT mặt cầu.

Đo ứng suất cáp chủ do hoạt tải với các sơ đồ xếp tải cho cả nhịp và xếp 1/2 nhịp. Kết quả đo đặc thực tế cho thấy: Chốt trụ cổng vẫn làm việc, không có sự sai khác ứng lực giữa hai đầu Quảng Trị và Quảng Bình của cùng một dây đo. Bảng 1 và bảng 2 thể hiện kết quả đo ứng suất cáp chủ.

Kết quả khảo sát cáp chủ đã được xác định được : Góc nghiêng giữa sợi cáp và trục tạo cáp: $\psi = 20^\circ$; góc nghiêng giữa trục tạo cáp so với trục bó cáp $\xi = 20^\circ$; Môđun đàn hồi của cáp chủ xác định theo công thức sau:

$$E_{\text{cáp}}^{\text{TB}} = \alpha \cdot E_T \text{ với } \alpha = \cos^4 \psi \cdot \cos^4 \xi = 0,62 \rightarrow E_{\text{cáp}}^{\text{TB}} = 0,62 \times 2.100.000 = 1.302.000 \text{ kG/cm}^2$$

Cáp chủ tại vị trí đo xem như không bị hao hụt tiết diện. Diện tích cáp chủ $\phi 56$ xác định theo quy trình của Liên Xô cũ: $F = 11,8178 \text{ cm}^2$.

Với kết quả đo ứng suất trong cáp chủ theo các sơ đồ tải trọng, ta xác định được lực căng được trong các cáp chủ (do hoạt tải) với các sơ đồ tải trọng đó:

$$N_i = \sigma_i \cdot F_i$$

Lực căng trong các cáp chủ do hoạt tải

Sau khi đo đặc ứng suất các bộ phận : Cáp chủ, dây đeo, bản mặt cầu... có một số nhận xét sau:

- Giá trị ứng suất lớn nhất do hoạt tải đo được là 490,99kG/cm² tại cáp chủ số 10 (sợi ngoài cùng hạ lưu) ứng với sơ đồ tải trọng 1C. Lực căng trong sợi cáp chủ này do hoạt tải là 5802,42kG.

- Với tất cả các sơ đồ xếp tải chính tâm, lệch tâm thượng lưu và lệch tâm hạ lưu, trong các sợi cáp chủ đều xuất hiện ứng suất kéo, không xuất hiện ứng suất nén do hoạt tải.

- Kết quả đo đặc cho thấy: Dưới tác dụng của hoạt tải chính tâm, trong cụm dây hạ lưu phát sinh lực căng lớn trong cụm dây hạ lưu.

- Kết quả đo lực căng trong dây đeo do hoạt tải cho kết quả không lớn. Giá trị lực căng lớn nhất đo được là 1267,04kG ở dây đeo thượng lưu, giá trị ứng suất do hoạt tải khi đó là 98,67kG/cm².

- Giá trị ứng suất đáy bản BTCT mặt cầu do hoạt tải lớn nhất xác định được là 10,97kG/cm². Với giá trị ứng suất này đáy bản mặt cầu chưa bị nứt.

Sau khi đo đặc độ võng mặt cầu, độ thay đổi đường tên f , chuyển vị đỉnh trụ cổng do hoạt tải có một số nhận xét sau:

- Độ võng lớn nhất do hoạt tải xác định được là 392mm tại đỉnh dầm ngang thượng lưu, nút số 10 sơ đồ tải trọng 1B. Với cùng sơ đồ tải trọng này, nút số 5' võng lớn nhất với giá trị độ võng là 66mm. Mặt cầu biến dạng theo hình chữ S với chênh cao độ điểm võng nhất và điểm võng nhất là 456mm.

- Với sơ đồ xếp tải nửa nhịp, độ võng mặt cầu lớn nhất thu được là 317mm tại nút 5' phía hạ lưu, sơ đồ xếp tải 2C. Độ võng lớn nhất thu được là 172mm tại nút số 5 phía hạ lưu. Mặt cầu biến dạng theo hình chữ S với chênh cao độ điểm võng nhất và điểm võng nhất là 489mm.

- Các độ võng đều là đàn hồi vì sau khi rải ra khỏi cầu, trị số đọc không tải lại trở về xấp xỉ trị số ban đầu, không có hiện tượng biến dạng dư hoặc kết cấu bị xô lệch.

- Chuyển vị đỉnh trụ cổng do hoạt tải phù hợp với quy luật chịu lực của kết cấu và giá trị nhỏ, nằm trong phạm vi cho phép.

- Trị số thay đổi đường tên cáp chủ không lớn. Sự thay đổi đường tên cáp chủ phù hợp với quy luật chịu lực của kết cấu.

D- Kiểm toán một số bộ phận kết cấu chính

D-1. Kiểm toán cáp chủ

- Kiểm toán cáp chủ, xác định nội lực trong cáp chủ do tĩnh tải

- Do hiện tượng cầu yếu, lưu lượng xe trên tuyến không lớn nên phần hoạt tải không kiểm toán với cả đoàn xe mà sử dụng luôn kết quả đo đặc lực căng trong cáp chủ với tải trọng thử đã nêu ở phần trên.

- Các thông số kỹ thuật cơ bản:

+ Cáp chủ $\phi 56$:

Diện tích mặt cắt các sợi dây thép $F = 11,8178\text{cm}^2$

Khối lượng 1m cáp $m = 11,099\text{kg}$

Lực kéo đứt cáp = 11.600 kG

Modun đàn hồi (xét thời điểm hiện tại) $E E_{tb}^{cáp} = 1.302.000\text{kG/cm}^2$

+ Sơ đồ tính

Góc nghiêng cáp neo so với phương nằm ngang: $\alpha = 22,13^\circ$

Đường tên tính của sợi cáp $f = 10,24\text{m}$

Chiều dài nhịp vượt $L = 100\text{m}$

Căn cứ vào cấu tạo chi tiết các bộ phận kết cấu, tính toán được trị số tĩnh tải rải đều trung bình:

$$q_{tb} = 2,1875 \text{ T/m}$$

Hệ số vượt tải của tĩnh tải $n_t = 1,1$

Lực căng trong cáp do tĩnh tải: $S_t = H_t / \cos \alpha$

Trong đó: H là lực ngang do tĩnh tải xác định theo công thức: $H_t = \frac{n_t \cdot q_{tb} \cdot l^2}{8 \cdot f}$

Thay số vào ta có $H_t = 293731,69 \text{ kG}$; vậy $S_t = 317091,33 \text{ kG}$

Với một sợi cáp lực căng trung bình do tĩnh tải là: $S_t^{tb} = 31709,13 \text{ kG}$

Lực căng trong cáp do hoạt tải: Sử dụng trị số lực căng lớn nhất đo được trong cáp do hoạt tải thử: $S_t^{max} = 5802,42 \text{ kG}$

Lực căng tổng cộng trong sợi cáp: $S_{cáp} = S_t^{tb} + S_t^{max} = 37511,55 \text{ kG}$

Lực kéo đứt cáp lý thuyết $S_{lý thuyết} = 116000 \text{ kG}$. Nếu xét tới hệ số giảm khả năng do cáp bị gỉ hoặc mòn: $n = 0,9$ thì ta có lực kéo đứt cáp thực tế $[S_{thực tế}] = 0,9 \cdot S_{lý thuyết} = 104400 \text{ kG}$

Với tải trọng thử $S_{cáp} < [S_{thực tế}]$ vậy đảm bảo an toàn

D-2. Kiểm toán neo

Bộ phận nguy hiểm nhất cần kiểm toán là thanh neo thép $\phi 30$. Căn cứ vào các kết quả đã khảo sát được, trong phần kiểm toán dưới đây để thiên về an toàn xem các thanh thép neo $\phi 30$ bị gỉ theo đường kính chỉ còn $\phi 26$.

Các thông số kỹ thuật cơ bản:

Số thanh neo cho một sợi cáp chủ: 4 thanh

Diện tích tính toán mỗi thanh $F_{tt} = \pi d^2 / 4 = 5,3066 \text{ cm}^2$

Cường độ chịu kéo tính toán của thép neo: để thiên về an toàn, ta cũng xét tới sự giảm khả năng làm việc của vật liệu thép CT3 bằng hệ số triết giảm: $n = 0,9$

$$[R_{tt}] = 0,9 \cdot 1900 = 1710 \text{ kG/cm}^2$$

Sơ đồ tính: Cấu kiện chịu kéo đúng tâm.

Lực căng mà neo phải chịu: lực căng mà 4 thanh neo thép $\phi 26$ phải chịu bằng lực căng tính toán bằng lực căng tính toán cho một sợi cáp $\phi 56$; $S = 37511,55 \text{ kG}$.

Khả năng chịu kéo cho phép của cụm 4 thanh neo thép $\phi 26$

$$[S_{neo}] = 4.F_{tt}.[R_u] = 36297,14 \text{ kG vậy } [S_{neo}] < S$$

Mặc dù tính toán dựa vào nhiều giả thiết thiên về an toàn nhưng kết quả kiểm toán trên cho thấy các neo thép đều đã ở trạng thái nguy hiểm.

E- Kết luận và kiến nghị

E-1. Kết luận

- Kích thước các bộ phận kết cấu và kích thước tổng thể của công trình không có sai khác gì nhiều so với trạng thái cầu sau khi được sửa chữa năm 1994. Đường tên cáp chủ tầng so với đường tên do năm 1994 khoảng 3cm. Mô đun đàn hồi của sợi cáp tăng chút ít so với giá trị tính toán năm 1994.

- Cáp chủ không có hiện tượng bị nổ, tuy nhiên vị trí trên mu rùa đỉnh trụ cổng khô mỡ bảo dưỡng có thể gây gỉ, lão hoá sợi cáp. Cáp chủ tại vị trí dầm ngang giữa nhịp có hiện tượng sợi thép bị mài mòn do có chuyển dịch tương đối so với má ôm cáp khi có tải nên cần được bôi mỡ bảo dưỡng thường xuyên vị trí này để giảm ma sát, giảm mài mòn cáp. Các vị trí khác cáp chủ nhìn chung còn tốt.

- Các dây đeo nhìn chung còn tốt, chỉ cần chú ý kiểm tra thường xuyên các tai đeo thép đã bị gỉ để có phương án xử lý kịp thời khi có sự cố.

- Các hố thể không có dấu hiệu lún hay chuyển vị, tuy nhiên hộp bảo vệ neo được cấu tạo chưa đủ rộng đã gây khó khăn quá trình kiểm tra, bảo dưỡng hệ neo. Thoát nước hố thể phía Quảng Bình bị tắc gây môi trường ẩm ướt, bất lợi cho các cấu kiện neo bằng thép.

- Các thanh neo thép $\phi 30$ của hố thể phía Quảng Trị không thể khảo sát được do có khối bê tông tăng cường hố thể. Các thanh neo thép $\phi 30$ của hố thể phía Quảng Bình chưa khảo sát kỹ được tình trạng của chúng do kích thước do kích thước giữa các mấu neo với nhau và mấu neo với thành trước hố quá hẹp nhưng những kết quả khảo sát thu được và kiểm toán cho thấy : Các thanh neo này đã ở trạng thái chịu lực nguy hiểm, cần có biện pháp tăng cường ngay để đảm bảo an toàn khai thác cầu.

- Trụ cổng bị bít kín bằng các tấm tôn 3mm nên chưa khảo sát kỹ được, tuy nhiên nhiều dấu hiệu cho thấy bên trong trụ cổng đã gỉ khá nặng. Khu vực mu rùa cần được bảo dưỡng sửa chữa các hư hỏng như đã phân tích ở phần hiện trạng.

- Bản mặt cầu bằng BTCT còn khá tốt nhưng do không cấu tạo hệ thống thoát nước mặt cầu nên nước trên mặt cầu chảy trực tiếp qua các khe bản BT ở vị trí nối dầm dọc gây gỉ dầm dọc và dầm ngang ở vị trí này. Dầm dọc biên bị gỉ nhẹ ở khu vực tiếp giáp giữa bụng và cánh dưới của dầm cần được cạo gỉ, sơn bảo dưỡng.

Kết quả thử nghiệm cầu treo BT :

+ Giá trị lực căng xác định được trong cáp chủ vẫn nằm trong phạm vi cho phép

- + Giá trị ứng suất trong dây đeo không lớn, nằm trong phạm vi cho phép
- + Giá trị ứng suất bản đáy bê tông nhỏ, nằm trong phạm vi cho phép
- + Các giá trị độ võng, độ võng của đường cong mặt cầu với các sơ đồ chất tải nằm trong phạm vi cho phép. Không có hiện tượng gãy khúc đột ngột của đường cong mặt cầu.

+ Chuyển vị đỉnh trụ cổng, độ thay đổi của đường tên của cáp chủ phù hợp với quy luật chịu lực của kết cấu và có giá trị không lớn.

Kết luận : Với tình trạng kỹ thuật hiện tại, chỉ được phép tạm thời khai thác cầu treo BT với tải trọng khai thác 8T, xe qua cầu đơn chiếc. Trong thời gian 10 tháng phải tiến hành sửa chữa tăng cường cho hệ neo. Nếu không sửa chữa kịp thời, phải cấm cầu để đảm bảo an toàn cho người và phương tiện.

E-2. Kiến nghị

Tháo bỏ hộp bảo vệ cáp ở mu rùa đỉnh trụ cổng, tháo bỏ các tấm tôn ốp thân trụ cổng và giằng liên kết ngang. Mở rộng hộp bảo vệ neo, đúc bê tông tại vị trí mấu neo, tháo tấm thép định vị các thanh thép $\phi 30$ của hố thế phía Quảng Bình

Bôi mỡ bảo dưỡng ngay các thanh neo thép $\phi 30$. Bảo dưỡng cáp chủ ở vị trí trên mu rùa đỉnh trụ cổng, vị trí cáp ôm vòng qua khuyên cáp ở neo, vị trí dầm ngang giữa nhịp.

Sửa chữa hệ thống thoát nước của hố thế phía Quảng Bình

Thiết kế và thi công bổ sung hệ thống thoát nước mặt cầu với các ống dẫn nước mặt xuống quá cao độ cánh dưới dầm dọc để đảm bảo tuổi thọ cho hệ dầm mặt cầu.

Thiết kế và thi công bổ sung hệ cáp neo và tăng cường cho neo và hố thế hiện tại

Bổ sung biển khống chế khoảng cách tối thiểu giữa xe qua cầu là 50m.

Cạo gỉ, sơn bảo vệ hệ thống lan can, dầm dọc biên

Thiết kế lại hộp bảo vệ cáp ở mu rùa đỉnh để đảm bảo dễ kiểm tra và bảo dưỡng cáp

Kiểm tra định kỳ các bộ phận kết cấu, đặc biệt lưu ý đến các thanh neo thép $\phi 30$, tai đeo dầm ngang để có biện pháp xử lý thích hợp khi cần thiết.

5.5.2. Ví dụ hồ sơ kiểm định cầu Y

A- Hiện trạng cầu

1. Giới thiệu chung

Cầu dây xiên Y nằm trên đường nối Bắc - Nam, vượt qua suối Y, thuộc địa phận xã X.

Tiêu chuẩn kỹ thuật:

- Cầu xây dựng vĩnh cửu.
- Tải trọng thiết kế hai đoàn xe H13.



Hình 5.7: Bố trí chung cầu

- Khổ cầu K7 + 2 × 0.25m.
- Sông không thông thuyền.
- Mực nước thiết kế: $H_{2\%} = 45.5$ nước dâng 0.3m.
- Cầu thiết kế theo Tiêu chuẩn 22TCN 18-79.

2. Hiện trạng cầu

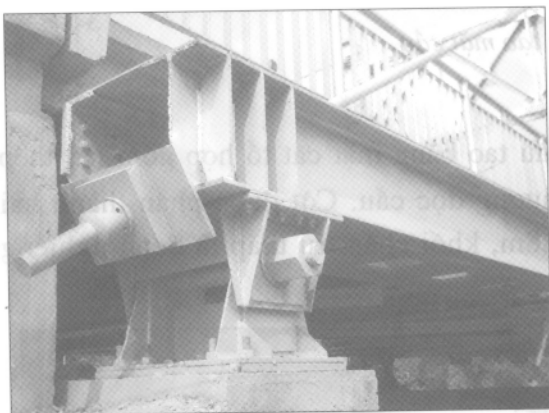
Sơ đồ cầu: 15 + 36m + 15 (m) liên tục.

Chiều dài toàn cầu: 66m.

Cầu gồm 2 mố, 2 trụ.

a) Dầm chủ:

Dầm chủ là hệ dầm liên tục 3 nhịp, theo mặt cắt ngang cầu có hai phiên dầm bố trí trong mặt phẳng của dầm văng. Mỗi phiên dầm gồm 2 dầm H 500×300mm, khoảng cách giữa hai phiên dầm là 600mm đủ cho thiết bị của bộ neo đi qua. Tổ hợp dầm bằng đường hàn, nối các đoạn bằng bulông tinh chế d22.



Hình 5.8: Cấu tạo dầm dọc



Hình 5.9: Hệ liên kết các dầm dọc

b) Hệ liên kết dọc:

Có dạng chữ K, mỗi khoảng dài 4.0m, riêng hai khoang đầu rộng 2.85m, và hai khoang giữa cầu tạo thành bất chéo chữ X thanh của hệ liên kết dọc dùng 1 L125 × 80 × 8mm.

c) Hệ mặt cầu và mặt cầu

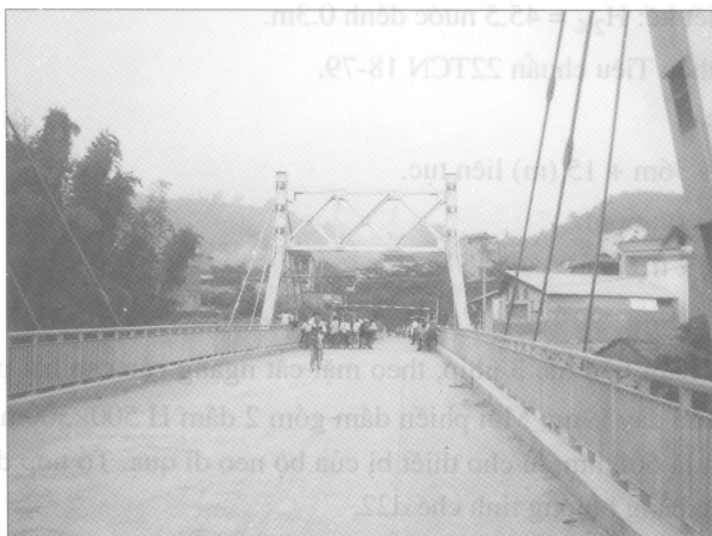
Chiều rộng đường xe chạy: 7m

Chiều cao dầm chủ: 0,5m

Mặt cầu được cấu tạo bằng tấm bản BTCT 300 được cấu tạo thành từng tấm lắp ghép, kích thước của một tấm : chiều dài 3,99m, chiều rộng 3,745m, dày 0,18m.

Liên kết các tấm bản mặt cầu bằng cách hàn cốt thép chờ tương ứng với các thép chờ ở 4 góc của tấm bản mặt cầu sau khi đệm lót bằng giấy dầu

Lớp phủ mặt cầu bằng BTXM 200 lưới thép d6, chiều dày trung bình lớp phủ 8cm.
Lan can bằng ống thép d76



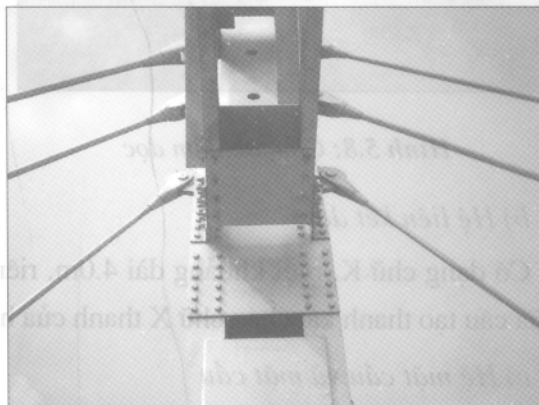
Hình 5.10: Cấu tạo mặt cầu

d) Trụ tháp

Gồm hai cột cao 10,34m, mỗi cột được cấu tạo bằng mặt cắt tổ hợp gồm hai thép H 500 × 200 đặt cách nhau 600mm theo phương dọc cầu. Cột được phân thành hai khối: Khối đầu trụ tháp là đoạn thanh dài 3.8m, khối chân trụ tháp là đoạn nghiêng góc α dài 6,35m.



Hình 5.11: Hệ liên kết tháp cầu



Hình 5.12: Liên kết dây văng với tháp cầu

Theo phương ngang cầu, trụ tháp là một khung cứng chân ngàm vào trụ bằng 8 bulông d36. Hệ liên kết ngang trụ tháp cao 2,5m được chia thành 3 khoang gồm các khung bắt chéo hình chữ X thanh ngang 2 U 200 × 80, thanh đứng thanh xiên bằng 3 L160 × 100 × 14.

e) Dây treo xiên

Ở trụ tháp các dây xiên được bố trí theo 3 tầng, dùng thanh bar và các phụ kiện kèm theo của hãng VSL.

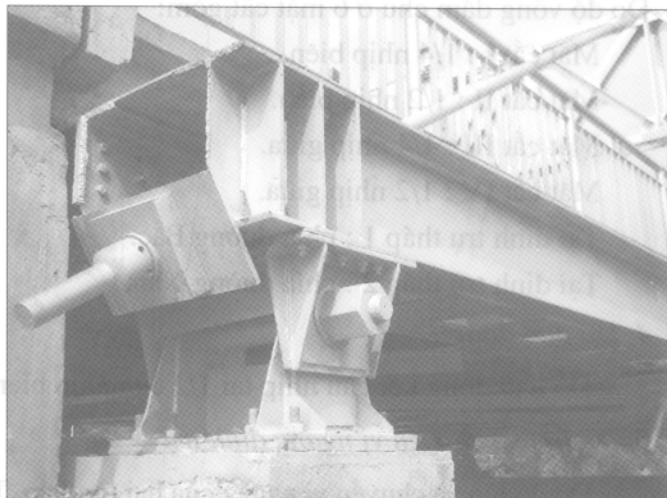
Khoảng cách tim hai hệ dây văng: 8,2m.

f) Gối cầu

Gối cầu được làm bằng thép, gồm hai gối cố định và 6 gối di động

Chiều cao gối cố định: 0,6m

Chiều cao gối di động: 0,8m



Hình 5.13: Cấu tạo gối cầu

g) Mố

Mố M1 kiểu tường băng BTCT, móng đặt vào tầng cuối sỏi

Mố M2 bằng BTCT, móng đặt vào tầng đá vôi.

B. Nội dung thử tải

1. Đăng ký trạng thái không tải của công trình

Đo đặc kích thước thực tế của công trình.

Đo trắc dọc tim cầu.

Xác định cường độ bê tông tại các bộ phận bằng phương pháp không phá huỷ.

2. Đo ứng suất

Đo ứng suất dầm chủ ở 6 mặt cắt gồm:

Mặt cắt I : 1/4 nhịp biên

Mặt cắt II : 1/2 nhịp biên

Mặt cắt III : 1/4 nhịp giữa

Mặt cắt IV : 1/2 nhịp giữa

Đo ứng suất tại các mặt cắt chủ yếu của tháp cầu.

Tại đỉnh trụ tháp 1 : phía đường Bắc.

Tại đỉnh trụ tháp 2 : phía đường Nam.

Đo ứng suất trong các dây cáp văng: 24 vị trí tại 12 dây cáp.

Đo ứng suất tại các mặt cắt chủ yếu của tháp cầu.

Đo ứng suất bản BTCT mặt cầu.

Đo ứng suất dầm ngang.

3. Đo võng

Đo độ võng dầm chủ ở 6 mặt cắt gồm:

Mặt cắt I : 1/4 nhịp biên.

Mặt cắt II : 1/2 nhịp biên.

Mặt cắt III : 1/4 nhịp giữa.

Mặt cắt IV : 1/2 nhịp giữa.

Tại đỉnh trụ tháp 1 : phía đường Bắc.

Tại đỉnh trụ tháp 2 : phía đường Nam.

4. Đo dao động

Đo dao động kết cấu nhịp tại 1/2 của nhịp biên và nhịp giữa.

5. Đo lún và chuyển vị ngang đỉnh trụ

Đo độ lún và chuyển vị ngang của hai trụ tháp. Trên mỗi đỉnh trụ bố trí 3 điểm đo.

6. Đo độ lún và lực nhổ ở mố

Đo độ lún và lực nhổ ở mố M2 phía đường Nam. Trên mố bố trí 2 điểm đo.

7. Đo cường độ bê tông

Xác định cường độ bê tông bằng phương pháp không phá huỷ tại các bộ phận:

Trụ: thân cột và xà mũ.

Mố : thân mố và tường đỉnh.

C. Tải trọng và các sơ đồ tải trọng

1. Tải trọng thử

Gồm 8 xe IFA với 6 xe thường và 2 xe nặng :

Xe 1:	Biển số ...	tải trọng 11,10 (tấn).
Xe 2:	Biển số ...	tải trọng 11,50 (tấn).
Xe 3:	Biển số ...	tải trọng 11,80 (tấn).
Xe 4:	Biển số ...	tải trọng 11,30 (tấn).
Xe 5:	Biển số ...	tải trọng 10,80 (tấn).

Xe 6: Biển số ... tải trọng 10,76 (tấn).

Xe 7: Biển số ... tải trọng 12,30 (tấn).

Xe 8: Biển số ... tải trọng 12,50 (tấn)

Sơ đồ xe thử tải và bố trí xe theo các sơ đồ xem phần phụ lục.

2. Các sơ đồ tải trọng

Sơ đồ tải trọng 1:

Sơ đồ tải trọng 1 để đo ứng suất và độ võng ở mặt cắt 1/4 nhịp biên.

Xếp 2 xe nặng sao cho trục sau của 2 xe rơi vào mặt cắt 1/4 nhịp biên, 2 xe được xếp cách nhau 1,1m.

Sơ đồ tải trọng 2:

Sơ đồ tải trọng 2 để đo ứng suất và độ võng ở mặt cắt 1/2 nhịp biên.

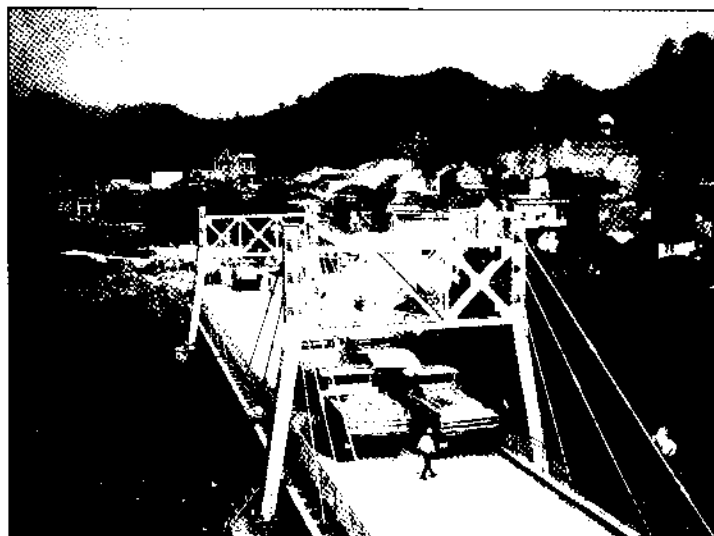
Xếp 4 xe thành 2 hàng (trong đó có 2 xe nặng) sao cho trục sau của 2 xe nặng rơi vào mặt cắt 1/2 nhịp biên, các xe ở 2 làn được xếp cách nhau 1,1m.

Sơ đồ tải trọng 3:

Sơ đồ tải trọng 3 để đo ứng suất và độ võng ở mặt cắt 1/4 nhịp giữa.

Theo chiều dọc cầu có 2 xe xếp thành một hàng sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt 1/4 nhịp giữa.

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).



Hình 5.14: Sơ đồ xếp tải 1/4 nhịp giữa

Sơ đồ tải trọng 4:

Sơ đồ tải trọng 4 để đo ứng suất và độ võng ở mặt cắt 1/2 nhịp giữa.

Theo chiều dọc cầu có 4 xe xếp thành một hàng sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt 1/2 nhịp giữa.

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).

Sơ đồ tải trọng 5:

Sơ đồ tải trọng 5 để đo ứng suất tại trụ tháp 1 (phía đường Bắc).

Theo chiều dọc cầu có 4 xe xếp thành một hàng sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt cách trụ tháp 1 một khoảng 9,05 (m).

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).

Sơ đồ tải trọng 6:

Sơ đồ tải trọng 6 để đo ứng suất tại trụ tháp 2 (phía đường Nam).

Theo chiều dọc cầu có 4 xe xếp thành một hàng sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt cách trụ tháp 1 một khoảng 9,95 (m).

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).



Hình 5.15: Sơ đồ xếp tải 1/2 nhịp chính

Sơ đồ tải trọng 7:

Sơ đồ tải trọng 7 để đo chuyển vị đỉnh mố và mũ trụ tháp.

Trong sơ đồ này chỉ dùng một xe, cho xe chạy qua cầu với tốc độ $v_{\max} = 40 \text{ Km/h}$, rồi phanh đột ngột.

Sơ đồ tải trọng 8:

Sơ đồ tải trọng 8 để đo dao động kết cấu nhịp.

Trong sơ đồ này chỉ dùng một xe, cho xe chạy qua cầu với tốc độ $20 \div 40 \text{ Km/h}$, xe chỉ dừng lại khi không còn ảnh hưởng đến đại lượng đo.

Sơ đồ tải trọng 9:

Sơ đồ tải trọng 9 để đo lún mố M2 phía đường Nam.

Theo chiều dọc cầu có 2 xe xếp thành một hàng sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt đỉnh mố.

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).

Sơ đồ tải trọng 10:

Sơ đồ tải trọng 10 để đo lún trụ tháp 1 (phía đường Bắc) .

Theo chiều dọc cầu có 2 xe xếp thành một hàng dọc sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt đỉnh trụ.

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).

Sơ đồ tải trọng 11:

Sơ đồ tải trọng 11 để đo lực nhỏ tại gối M2 (phía đường Nam).

Theo chiều dọc cầu có 4 xe xếp thành một hàng dọc sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt cách trụ tháp 1 (phía đường Bắc) 16,25 (m).

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).

Sơ đồ tải trọng 12:

Sơ đồ tải trọng 12 để đo ứng suất nén của dây cáp văng số 1 (phía đường Bắc).

Theo chiều dọc cầu có 2 xe xếp thành một hàng dọc sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt cách trụ tháp 1 (phía đường Bắc) 8,7 (m).

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).

Sơ đồ tải trọng 13:

Sơ đồ tải trọng 13 để đo ứng suất kéo của dây cáp văng số 1 (phía đường Bắc).

Theo chiều dọc cầu có 4 xe xếp thành một hàng dọc sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt cách trụ tháp 1 (phía đường Bắc) 18 (m).

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).

Sơ đồ tải trọng 14:

Sơ đồ tải trọng 14 để đo ứng suất nén của dây cáp văng số 3 (phía đường Bắc).

Theo chiều dọc cầu có 3 xe xếp thành một hàng dọc sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt cách trụ tháp 1 (phía đường Bắc) 3,8 (m).

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).

Sơ đồ tải trọng 15:

Sơ đồ tải trọng 15 để đo ứng suất kéo của dây cáp văng số 5 (phía đường Bắc).

Theo chiều dọc cầu có 3 xe xếp thành một hàng dọc sao cho trục sau của xe nặng rơi vào mặt cắt cách trụ tháp 1 (phía đường Bắc) 11,3 (m).

Theo chiều ngang cầu xếp 2 xe cách nhau 1,1 (m).

D. Thiết bị đo

Ten-zo-met so sánh (hãng Proceq - Thụy Sĩ)

Ten-zo-met cơ học (Nga, Trung Quốc)

Máy đo ứng suất điện Digital Strain Meter DMD 20A (CHLB Đức)

Chuyển vị kế (hãng Mutyo - Nhật Bản)

Macximốp đo võng

Máy đo dao động SDA 830A (Nhật Bản)

Súng bột nẩy (hãng Schmidt - Thụy Sĩ)

E. Kết quả đo thử tải trọng

Kết quả đo thử tải trọng thống kê trong phần phụ lục.

F. Nhận xét về kết quả thử nghiệm cầu

1. Kết quả đo ứng suất dầm

Mặt cắt	Số liệu ứng suất lớn nhất	
	Thớ nén (kG/cm^2)	Thớ kéo (kG/cm^2)
1/4 nhịp biên	-220.50	126.00
1/2 nhịp biên	-238.00	182.00
1/4 nhịp giữa	-231.00	136.50
1/2 nhịp giữa	-216.30	210.00

Các trị số ứng suất theo phương dọc cầu và ngang cầu đo được ở các mặt cắt đều không lớn hơn và nhỏ hơn các trị số dự kiến theo lý thuyết. Các trị số ứng suất kéo chủ và ứng suất nén chủ đo ở sườn dầm là khá nhỏ.

2. Kết quả đo ứng suất dầm

Dây cáp văng	Số liệu ứng suất lớn nhất (kG/cm^2)
1	471.50
2	221.00
3	576.10
4	413.00
5	514.60
6	401.00

Các trị số ứng suất theo phương dọc cầu và ngang cầu đo được ở các mặt cắt đều không lớn hơn và nhỏ hơn các trị số dự kiến theo lý thuyết. Các trị số ứng suất kéo chủ và ứng suất nén chủ đo ở sườn dầm là khá nhỏ.

3. Kết quả đo ứng suất chân tháp

Đầu đo	Số liệu ứng suất lớn nhất (kG/cm ²)
Khi tải ở vị trí nhịp biên	
13	65.10
14	10.50
15	-31.50
Khi tải ở vị trí nhịp giữa	
13	-128.10
14	-126.10
15	63.00

4. Kết quả đo dao động

Nhịp	$y_{\max}$ (mm)	$y_{\min}$ (mm)	y_{th}	$1 + \mu$	Tần số f (Hz)
Biên	3.902	2.430	3.013	1.371	2.63
Giữa	5.470	3.730	4.380	1.298	2.50

Kết quả đo dao động kết cấu nhịp cho thấy tần số dao động f không nằm trong phạm vi khống chế của quy trình, quy phạm và phù hợp với độ cứng chống uốn của dầm.

Tác động xung kích do đoàn tải trọng gây ra có trị số là phù hợp.

5. Kết quả đo độ võng động

Vị trí đo	Độ võng lớn nhất (mm)
Nhịp biên	3.902
Nhịp giữa	5.47

Độ võng của dầm chủ đo được dưới tác dụng của tải trọng thử tại các mặt cắt đều nhỏ hơn nhiều so với trị số lý thuyết dự kiến và chưa đến 10% so với giới hạn cho phép trong

quy trình thiết kế hiện hành $f = \frac{L}{400}$

6. Kết quả đo lực nhỏ ở gối cầu

Đầu đo	ứng suất (kG/cm ²)	Lực nhỏ (kG)
1	25.20	1512.00
2	48.30	2898.00

7. Kết quả đo chất lượng bê tông bằng phương pháp không phá huỷ

Sử dụng súng SCHMIDT đo được cường độ bê tông tại các vị trí:

Vị trí đo	Cường độ bê tông (kG/cm ²)
Trụ tháp 1	
Thân cột	350
Xà mũ	350
Trụ tháp 2	
Thân cột	350
Xà mũ	350
Mố M1	
Thân mố	300
Tường đỉnh	320
Mố M2	
Thân mố	300
Tường đỉnh	320

G. Kết luận và kiến nghị

Cầu đảm bảo khả năng thông xe như thiết kế

Phụ lục 1

TÍNH CẦU TREO THEO SƠ ĐỒ BIẾN DẠNG

I- Số liệu ban đầu

Tính cầu treo dây võng theo sơ đồ biến dạng

Chiều dài nhịp chính L_n :	L_n	= 200	m
Mũi tên giữa nhịp là f :	f	= 20	m
Chiều cao tháp cầu H_{th}	H_{th}	= 26.64	
Chia dầm thành 6 đoạn , 5 dây treo đứng:	n	= 6	
	l	= 33.333333	m
Chiều dài đoạn neo là: L_a, L_b	l_a	= 26.64	m
	l_b	= 26.64	m
Góc nghiêng của dây neo α_a, α_b	$\cos(\alpha_a)$	= 0.7071068	
	$\sin(\alpha_b)$	= 0.7071068	
	α_a	= 45 độ	
	α_b	= 45 độ	
	$\cos(\theta)$	= 0.7071068	
Trọng lượng đơn vị của cáp treo g :	g	= 0.78	t/m
Độ cứng EJ của dầm cứng:	EJ	= 44000000	
Độ cứng EF của dây cáp treo:	EF	= 1833300	
Trạng thái ban đầu :			
Trọng lượng mặt cầu và dầm cứng q :	q	= 11.22	t/m
Tải trọng tạm thời:	p	= 6	t/m

II. Tính toán

1- Xác định các số liệu ở trạng thái ban đầu

Ở trạng thái ban đầu dây chịu toàn bộ tải trọng q_0 :

$$\begin{aligned}
 q_0 &= q + g \\
 q_0 &= 12 \quad \text{T/m} \\
 M_{0max} &= q_0 * L_n^2 / 8 \\
 M_{0max} &= 60000 \quad \text{T.m} \\
 M_{01} &= 33333.333 \quad \text{T.m} \\
 M_{02} &= 53333.333 \quad \text{T.m}
 \end{aligned}$$

$$M_{03} = 60000 \quad \text{T.m}$$

$$M_{04} = 53333.333 \quad \text{T.m}$$

$$M_{05} = 33333.333 \quad \text{T.m}$$

Vì dây chịu toàn bộ tải trọng nên:

$$M_{0d} - H_0 * Y = 0$$

$$H_0 = M_{0\max}/f$$

$$H_0 = 3000 \quad \text{tấn}$$

Phương trình trục dây cáp là parabol bậc 2

Điểm	x	y	f-y
1	-66.66667	8.8888889	11.111111
2	-33.33333	2.2222222	17.777778
3	0	0	20
4	33.333333	2.2222222	17.777778
5	66.666667	8.8888889	11.111111

Ma trận Y_s :

$Y_s =$	11.111111	17.777778	20	17.777778	11.111111
$Y_s^T =$	11.111111	17.777778	20	17.777778	11.111111

Xác định các số liệu hình khác của dây:

Nhịp	$\text{tg}\alpha$	α	$\sin\alpha$	$\cos\alpha$	$1/\cos\alpha^2$	$\cos\alpha^3$
1	0.3333333	18.434949	0.3162278	0.9486833	1.1111111	0.853815
2	0.2	11.309932	0.1961161	0.9805807	1.04	0.942866
3	0.0666667	3.8140748	0.066519	0.9977852	1.0044444	0.9933702
4	-0.066667	-3.814075	-0.066519	0.9977852	1.0044444	0.9933702
5	-0.2	-11.30993	-0.1961161	0.9805807	1.04	0.942866
6	-0.333333	-18.43495	-0.3162278	0.9486833	1.1111111	0.853815
					6.3111111	5.5801024

2) Xác định các số liệu của dây

Xác định D_{0i} và D_i

$$D_{0i} = g^2 * L_i^3 / 12$$

$$D_{0i} = 1877.7778 \text{ T}^2\text{m}$$

$$D_i = 1877.7778 \text{ T}^2\text{m}$$

Xác định hệ số Ω : $\Omega = 5784.5513 \text{ T.m}$

Xác định hệ số λ, γ, μ

$$\lambda = 35.549344 \text{ T}^2$$

$$\gamma = 30305820 \text{ T}^3$$

$$\mu = -2996.633$$

Lập ma trận S

$$S = \begin{bmatrix} -0.120112 & -0.129597 & -0.133038 & -0.129597 & -0.120112 \end{bmatrix}$$

$$S_s = \begin{bmatrix} -0.120112 & -0.129597 & -0.133038 & -0.129597 & -0.120112 \end{bmatrix}$$

Xác định c và d

Ta cần lập ma trận M_d

Cường độ tải trọng tổng cả 2 trạng thái

$$q_d = g + p + q$$

$$Q_d = 18 \text{ T/m}$$

$$M_{dmax} = 90000 \text{ T.m}$$

$$M_{od} = \begin{bmatrix} 50000 & 80000 & 90000 & 80000 & 50000 \end{bmatrix}$$

$$M_{od}^T = \begin{bmatrix} 50000 & 80000 & 90000 & 80000 & 50000 \end{bmatrix}$$

Tính c : $c = \Omega * S * M_d$

$$c = -2.59E+08 \text{ t}^2$$

Ta cần lập ma trận Ytb, ta có $Ytb = Y$

$$d = \Omega * S * Y$$

$$d = -57485,75 \text{ T}$$

3) Xác định các số liệu của dầm

Lập ma trận A^*

4	1	0	0	0
1	4	1	0	0
0	1	4	1	0
0	0	1	4	1
0	0	0	1	4

$$A^* = \begin{bmatrix} 5.051E-07 & 1.263E-07 & 0 & 0 & 0 \\ 1.263E-07 & 5.051E-07 & 1.263E-07 & 0 & 0 \\ 0 & 1.263E-07 & 5.051E-07 & 1.263E-07 & 0 \\ 0 & 0 & 1.263E-07 & 5.051E-07 & 1.263E-07 \\ 0 & 0 & 0 & 1.263E-07 & 5.051E-07 \end{bmatrix}$$

Lập ma trận B* và B₀

$$B^* = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \\ 0.06 & -0.03 & 0 & 0 & 0 \\ -0.03 & 0.06 & -0.03 & 0 & 0 \\ 0 & -0.03 & 0.06 & -0.03 & 0 \\ 0 & 0 & -0.03 & 0.06 & -0.03 \\ 0 & 0 & 0 & -0.03 & 0.06 \end{bmatrix}$$

Lập ma trận W

$$W_i = 111111.11 \quad T.m^2$$

$$W = \begin{bmatrix} 111111.11 & 111111.11 & 111111.11 & 111111.11 & 111111.11 \end{bmatrix}$$

4) Lập ma trận C

Ta chọn H_{tb} của H

$$H_l = 4500 \quad T$$

Ta có điều kiện 3000

$$H_{tb} < 4500$$

Ta chọn H_{tb} :

$$H_{tb} = 4000 \quad T$$

$$H_{tb} * A^* = \begin{bmatrix} 0.0020202 & 0.0005051 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0005051 & 0.0020202 & 0.0005051 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0005051 & 0.0020202 & 0.0005051 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0005051 & 0.0020202 & 0.0005051 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0005051 & 0.0020202 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.0620202 & -0.029495 & 0 & 0 & 0 \\ -0.029495 & 0.0620202 & -0.0294949 & 0 & 0 \\ 0 & -0.029495 & 0.0620202 & -0.029495 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0294949 & 0.0620202 & -0.029495 \\ 0 & 0 & 0 & -0.029495 & 0.0620202 \end{bmatrix}$$

$$C^{-1} =$$

24.151351	16.879896	11.342677	6.9708017	3.3151044
16.879896	35.494029	23.850698	14.657782	6.9708017
11.342677	23.850698	38.809133	23.850698	11.342677
6.9708017	14.657782	23.850698	35.494029	16.879896
3.3151044	6.9708017	11.342677	16.879896	24.151351

5) Xác định N^*, N_o, Z, G

$$N^* = -W/6EJ_o - Y^*B$$

$$(-1/6EJ_o) \quad -3.79E-09$$

-0.000421	-0.000421	-0.0004209	-0.000421	-0.000421
-----------	-----------	------------	-----------	-----------

$$Y^*B =$$

0.1333333	0.1333333	0.1333333	0.1333333	0.1333333
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

$$N^* =$$

-0.133754	-0.133754	-0.1337542	-0.133754	-0.133754
-----------	-----------	------------	-----------	-----------

$$N_o =$$

-8.381016	-13.08828	-14.605409	-13.08828	-8.381016
-----------	-----------	------------	-----------	-----------

$$Z = (H_{tb} * N^* + M_d * B) * C^{-1}$$

$$H_{tb} * N^* =$$

-535.0168	-535.0168	-535.01684	-535.0168	-535.0168
-----------	-----------	------------	-----------	-----------

$$M_d * B =$$

600	600	600	600	600
-----	-----	-----	-----	-----

$$H_{tb} * N^* + M_d * B =$$

64.983165	64.983165	64.983165	64.983165	64.983165
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

$$Z =$$

4071.8341	6358.811	7095.8941	6358.811	4071.8341
-----------	----------	-----------	----------	-----------

$$G = (C-1) * A^*$$

1.433E-05	1.301E-05	8.74E-06	5.371E-06	2.554E-06
1.301E-05	2.307E-05	1.838E-05	1.129E-05	5.371E-06
8.74E-06	1.838E-05	2.562E-05	1.838E-05	8.74E-06
5.371E-06	1.129E-05	1.838E-05	2.307E-05	1.301E-05
2.554E-06	5.371E-06	8.74E-06	1.301E-05	1.433E-05

6) Xác định các ma trận S_i

$$S_0 = \Omega * S^*$$

$$S_0 = \begin{bmatrix} -694.7919 & -749.6612 & -769.56526 & -749.6612 & -694.7919 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = S_0.G = \begin{bmatrix} -0.032234 & -0.052673 & -0.0594187 & -0.052673 & -0.032234 \end{bmatrix}$$

$$S_2 = S_1.G = \begin{bmatrix} -2.03E-06 & -3.49E-06 & -4.022E-06 & -3.49E-06 & -2.03E-06 \end{bmatrix}$$

$$S_3 = S_2.G = \begin{bmatrix} -1.34E-10 & -2.31E-10 & -2.67E-10 & -2.31E-10 & -1.34E-10 \end{bmatrix}$$

$$S_4 = S_3.G = \begin{bmatrix} -8.84E-15 & -1.53E-14 & -1.768E-14 & -1.53E-14 & -8.84E-15 \end{bmatrix}$$

7) Xác định các hệ số W_i

$$W_0 = S_0 * Z$$

$$W_0 = \begin{bmatrix} -2829077 & -4766954 & -5460753.6 & -4766954 & -2829077 & -20652816 \end{bmatrix}$$

$$W_1 = S_1 * Z - S_0 * N_0$$

$$S_1.Z = \begin{bmatrix} -131.2509 & -334.9385 & -421.6289 & -334.9385 & -131.2509 & -1354.008 \end{bmatrix}$$

$$S_0.N_0 = \begin{bmatrix} 5823.0621 & 9811.7746 & 11239.815 & 9811.7746 & 5823.0621 & 42509.489 \end{bmatrix}$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} -43863.5 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = S_2 * Z - S_1 * N_0$$

$$S_2.Z = \begin{bmatrix} -0.008272 & -0.02222 & -0.028539 & -0.02222 & -0.008272 & -0.089525 \end{bmatrix}$$

$$S_1.N_0 = \begin{bmatrix} 0.2701525 & 0.6894006 & 0.8678346 & 0.6894006 & 0.2701525 & 2.7869409 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} -2.876466 \end{bmatrix}$$

$$W_3 = S_3 * Z - S_2 * N_0$$

$$S_3.Z = \begin{bmatrix} -5.44E-07 & -1.47E-06 & -1.89E-06 & -1.47E-06 & -5.44E-07 & -5.93E-06 \end{bmatrix}$$

$$S_2.N_0 = \begin{bmatrix} 1.703E-05 & 4.574E-05 & 5.874E-05 & 4.574E-05 & 1.703E-05 & 0.0001843 \end{bmatrix}$$

$$W_3 = \begin{bmatrix} -0.00019 \end{bmatrix}$$

$$W_4 = S_4 * Z - S_3 * N_0$$

$$S_4 * Z = \begin{matrix} -3.6E-11 & -9.74E-11 & -1.255E- & -9.74E-11 & -3.6E-11 & -3.92E-10 \end{matrix}$$

$$S_3 * N_0 = \begin{matrix} 1.12E-09 & 3.028E-09 & 3.9E-09 & 3.028E-09 & 1.12E-09 & 1.22E-08 \end{matrix}$$

$$W_4 = \boxed{-1.26E-08}$$

Ta thấy W_4 quá nhỏ nên dừng lại ở đây

8) Xác định các hệ số a_n

$$a_0 = -1.63E+10$$

$$a_3 = -3.115689$$

$$a_1 = -70425917$$

$$a_4 = -0.00014$$

$$a_2 = 34131.482$$

$$a_0 = -1.63E+10$$

$$a_1 \cdot \Delta + a_2 \Delta^2 + a_3 \Delta^3 + a_4 \Delta^4$$

$$1.634E+10$$

$$\text{Sai số} \quad 0.005755 \%$$

Giải phương trình trên ta tìm được Δ

$$\Delta = 210.145 \text{ tấn}$$

10) Xác định nội lực trong hệ

Ta có lực căng trong dây H_c

$$H_c = H_{tb} + \Delta$$

$$H_c = 4210.145 \text{ tấn}$$

$\Delta * G =$	0.0030112	0.0027333	0.0018367	0.0011288	0.0005368
	0.0027333	0.0048478	0.0038621	0.0023735	0.0011288
	0.0018367	0.0038621	0.0053846	0.0038621	0.0018367
	0.0011288	0.0023735	0.0038621	0.0048478	0.0027333
	0.0005368	0.0011288	0.0018367	0.0027333	0.0030112

$E =$	1	0	0	0	0
	0	1	0	0	0
	0	0	1	0	0
	0	0	0	1	0
	0	0	0	0	1

$\Delta^*G =$

0.0030112	0.0027333	0.0018367	0.0011288	0.0005368
0.0027333	0.0048478	0.0038621	0.0023735	0.0011288
0.0018367	0.0038621	0.0053846	0.0038621	0.0018367
0.0011288	0.0023735	0.0038621	0.0048478	0.0027333
0.0005368	0.0011288	0.0018367	0.0027333	0.0030112

 $G^2 =$

4.863E-10	7.214E-10	7.093E-10	5.416E-10	2.893E-10
7.214E-10	1.196E-09	1.263E-09	9.986E-10	5.416E-10
7.093E-10	1.263E-09	1.485E-09	1.263E-09	7.093E-10
5.416E-10	9.986E-10	1.263E-09	1.196E-09	7.214E-10
2.893E-10	5.416E-10	7.093E-10	7.214E-10	4.863E-10

 $\Delta^3G^2 =$

2.147E-05	3.186E-05	3.132E-05	2.392E-05	1.278E-05
3.186E-05	5.28E-05	5.578E-05	4.41E-05	2.392E-05
3.132E-05	5.578E-05	6.557E-05	5.578E-05	3.132E-05
2.392E-05	4.41E-05	5.578E-05	5.28E-05	3.186E-05
1.278E-05	2.392E-05	3.132E-05	3.186E-05	2.147E-05

 $G^3 =$

2.62E-14	4.367E-14	4.817E-14	4.005E-14	2.251E-14
4.367E-14	7.436E-14	8.373E-14	7.067E-14	4.005E-14
4.817E-14	8.373E-14	9.687E-14	8.373E-14	4.817E-14
4.005E-14	7.067E-14	8.373E-14	7.436E-14	4.367E-14
2.251E-14	4.005E-14	4.817E-14	4.367E-14	2.62E-14

 $\Delta^3G^3 =$

2.431E-07	4.053E-07	4.47E-07	3.717E-07	2.089E-07
4.053E-07	6.901E-07	7.77E-07	6.559E-07	3.717E-07
4.47E-07	7.77E-07	8.99E-07	7.77E-07	4.47E-07
3.717E-07	6.559E-07	7.77E-07	6.901E-07	4.053E-07
2.089E-07	3.717E-07	4.47E-07	4.053E-07	2.431E-07

 $G^4 =$

1.637E-18	2.807E-18	3.199E-18	2.736E-18	1.566E-18
2.807E-18	4.836E-18	5.543E-18	4.765E-18	2.736E-18
3.199E-18	5.543E-18	6.402E-18	5.543E-18	3.199E-18
2.736E-18	4.765E-18	5.543E-18	4.836E-18	2.807E-18
1.566E-18	2.736E-18	3.199E-18	2.807E-18	1.637E-18

$$\Delta^{+*}G^+ =$$

3.193E-09	5.474E-09	6.238E-09	5.336E-09	3.054E-09
5.474E-09	9.43E-09	1.081E-08	9.292E-09	5.336E-09
6.238E-09	1.081E-08	1.248E-08	1.081E-08	6.238E-09
5.336E-09	9.292E-09	1.081E-08	9.43E-09	5.474E-09
3.054E-09	5.336E-09	6.238E-09	5.474E-09	3.193E-09

0.9970101	-0.002702	-0.0018058	-0.001105	-0.000524
-0.002702	0.9952043	-0.0038071	-0.00233	-0.001105
-0.001806	-0.003807	0.99468	-0.003807	-0.001806
-0.001105	-0.00233	-0.0038071	0.9952043	-0.002702
-0.000524	-0.001105	-0.0018058	-0.002702	0.9970101

$$A^*N_o =$$

-1761.229	-2750.436	-3069.2537	-2750.436	-1761.229
-----------	-----------	------------	-----------	-----------

$$Z+A^*N_o =$$

2310.6055	3608.3748	4026.6404	3608.3748	2310.6055
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

2310.6055	3608.3748	4026.6404	3608.3748	2310.6055
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Mômen cuối cùng

$$M =$$

2281.4771	3558.5362	3969.3993	3558.5362	2281.4771
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

11) Xác định chuyển vị của dầm

$$H^*Y_{tb}^T =$$

46779.389	74847.022	84202.9	74847.022	46779.389
-----------	-----------	---------	-----------	-----------

$$M_{od}-M-H^*Y_{tb}^T =$$

939.13404	1594.4416	1827.7007	1594.4416	939.13404
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

$$V =$$

0.2230645	0.3787142	0.4341182	0.3787142	0.2230645
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Phụ lục 2

CHƯƠNG TRÌNH PASCAL

```

USES CRT, DOS, PRINTER, GRAPH, tool94;
LABEL
tt, ma, nhan, nhan1, nhan2;
CONST
Mcu:array [1..17] of real = (0.000184, 0.000203, 0.000232, 0.000254, 0.000289,
    0.000317, 0.000371, 0.000407, 0.000472, 0.000518, 0.000579, 0.000743, 0.000953,
    0.001231, 0.001589, 0.002035, 0.002560);
Tlr:array [1..17] of real = (0.021, 0.0227, 0.024, 0.0258, 0.0273, 0.0294, 0.0315,
    0.0339, 0.0365, 0.0392, 0.0422, 0.0486, 0.057, 0.0665, 0.0785, 0.0926, 0.108);
Soh:array [1..17] of integer = (20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 33, 36, 40, 45,
    50, 55, 60) ;

```

VAR

Name:string [20];

filhh:text;

choice, ykien:char;

nn,	nd,	j,	i,	ld,	ldn,	ii:integer;
xx,	l,	fvng,	k1,	k2,	c,	fc, ll,
l2,	alfa,	lneo,	tea,	teb,	smax,	nc, nc1,
nep,	ptr,	ps,	kc,	qntt,	hh,	b, bl,
fl,	flc,	tc,	lc,	qc,	ln,	wn, tdn,
qdn,	kn,	kd,	wd,	tdd,	qdd,	tg, dmc,
Fd,	bl,	dl,	bg,	hg,	qmc,	qph, nph,
qttt,	qng,	ttr,	ts,	ra,		
rb,	la,	lb,	teta,	A0,	B0,	Rut, Rug,
llg,	lmc,	blg,	max,	w1,	nM,	Mt, Mh,
xn,	xo,	x,	buoc,	y1,	y2,	R, Md,

d_o:real;

dcls, t, m, s, d, q, h, f;

array [0..5] of real;

z, zz, a, aa, aaa, bbn, bbo :

array [1..50] of real;

y:array [0..5, 0..50] of real;

dng, hng, zn, mn, r1, rn:real;

fv, ff:array [1..50] of real;

{=====}

PROCEDURE vi_du;

BEGIN

{-----}

```

l: = 120;          b: = 5.4;          b1: = 4;          f[3]: = 10;
nc1: = 6;          f1c: = 0.000115;    tc: = 0.0105;     e: = 21000000;
ln: = 6.4;         kn: = 4;           Fd: = 0.000568;   qng: = 0.3;
nd: = 6;          tg: = 0.8;          bl: = 0.8;        dl: = 0.03;
bg: = 0.15;        hg: = 0.15;        nph: = 0.7;       hh: = 12.5;
tea: = 20.6;       teb: = 20.6;       la: = 33;         lb: = 33;
ttr: = 2.8;        ts: = 7.6;         k2: = 4;          k1: = 1.7;
ncp: = 150;        fvng: = 0.3;        alfa: = 0.000012; kc: = 2.5;
A0: = 0.2;         B0: = 0.4;         Rut: = 20000;     Rug: = 1400;
Llg: = 0.6;        lmc: = 4.3;        blg: = 0.2;       xn: = 30;
t[1]: = 30;        t[2]: = 30;        t[3]: = 30;       xo: = 30;
dels[1]: = -0.5;   dels[2]: = -0.3;
END; { of vi_du }
{=====}
PROCEDURE Gioi_Thieu;
VAR gr, gm:integer;
BEGIN
{-----}
ECHO; ECHO;
clrscr;
gr: = detect;
initgraph (gr, gm, "");
setcolor (1);
rectangle (0, 0, getmaxx, getmaxy);
setbkcolor (2);
rectangle (10, 10, getmaxx-10, getmaxy-10);
setcolor (4); settextstyle (1, 0, 3);
outtextxy (getmaxx div 10, getmaxy div 25, 'TRUONG DAI HOC GIAO THONG VAN TAI
HA NOI');
ECHO;
setcolor (5); settextstyle (1, 0, 3);
outtextxy (round (getmaxx/3), round (getmaxy/8.75), 'KHOA CONG TRINH');
ECHO;
setcolor (14); settextstyle (0, 0, 2);
outtextxy (round (getmaxx/3.56) + 12, round (getmaxy/4.5), 'BO MON CAU HAM');
setcolor (14); settextstyle (3, 0, 5);
outtextxy (round (getmaxx/4) + 12, ROUND (getmaxy/3.5), 'DE TAI');
ECHO;
setcolor (14); settextstyle (3, 0, 5);
outtextxy (round (getmaxx/27), round (getmaxy/2), 'THIET KE CAU TREO DAM MEM');
ECHO;
setcolor (blue); settextstyle (1, 0, 1);
ECHO;
readln;
closegraph;
END; { of gioi_thieu }
{=====}

```



```

PROCEDURE Nhap_sl;
LABEL cuoi, fg, gg, fgg, ggg, fggg, gggg;
VAR
  hoi:char;
 kiemtra:integer;
BEGIN
  {-----}
  window (1, 1, 80, 25) ;
  text(background (cyan) ;
  textcolor (yellow) ;
  clrscr;
  Framecolor (2, 1, 78, 5, lightmagenta, white) ; clrscr;
  writeln (' SO LIEU TINH TOAN') ;
  gotoxy (20, 3) ; write ('NOI DUNG ') ;
  gotoxy (46, 3) ; write ('! KI HIEU') ;
  gotoxy (56, 3) ; write ('! DON VI') ;
  GOTOXY (66, 3) ; WRITE ('! GIA TRI') ;
  Framecolor (2, 6, 68, 25, BLUE, YELLOW) ; clrscr;
  WRITELN ('1. Chiều dài nhịp                ! l ! m') ;
  WRITELN ('2. Khoảng cách hai cấp chủ        ! b      ! m') ;
  WRITELN ('3. Khổ cầu                             ! b1     ! m') ;
  WRITELN ('4. Độ võng max ở trong thời điểm chưa chịu hoạt tải ! f [3]  ! m') ;
  WRITELN ('5. Số lượng cấp chủ chọn sơ bộ          ! ncl    ! b') ;
  WRITELN ('6. Diện tích mặt cắt ngang 1 bó cáp      ! flc    ! m²) ;
  WRITELN ('7. Trọng lượng đơn vị của cáp         ! tc     ! t/m') ;
  WRITELN ('8. Lực kéo đứt cho phép                   ! ncp    ! t') ;
  WRITELN ('9. Modul đàn hồi của vật liệu cáp          ! e      ! t/m²) ;
  WRITELN ('10. Bề rộng b ng l n                     ! bl     ! m') ;
  WRITELN ('11. Số lượng dầm dọc                        ! nd     ! dam') ;
  WRITELN ('12. Trọng lượng riêng gỗ mặt cầu           ! tg     ! t/m') ;
  WRITELN ('13. Khoảng cách 2 dầm ngang                ! kn     ! m') ;
  WRITELN ('14. Chiều dài dầm ngang                    ! ln     ! m') ;
  WRITELN ('15. Chiều dày b ng l n                     ! dl     ! m') ;
  writeln ('16. Độ võng ngược                   ! fvng   ! m') ;
  writeln ('17. Bề rộng 1 tấm ván gỗ mặt cầu         ! blg    ! m') ;
  WRITE ('18. Sửa lỗi từ đâu (cần sửa (1..18), không sửa: 0) ') ;
  gg:framecolor (69, 6, 78, 25, blue, yellow) ; CLRSCR;
  readln (l, b, b1, f [3], ncl, flc, tc, ncp, e, bl, nd, tg, kn, ln, dl, fvng, blg) ;
  Repeat
  Gotoxy (1, 18) ;
  Kiemtra = 0;
  Readln (kiemtra) ;

```

```

case kiểmtra of
1:begin Gotoxy (1, 1) ; readln (l) ; goto fg; end;
2:begin Gotoxy (1, 2) ; readln (b) ; goto fg; end;
3:begin Gotoxy (1, 3) ; readln (b1) ; goto fg; end;
4:begin Gotoxy (1, 4) ; readln (f [3]) ; goto fg; end;
5:begin Gotoxy (1, 5) ; readln (nc1) ; goto fg; end;
6:begin Gotoxy (1, 6) ; readln (f1c) ; goto fg; end;
7:begin Gotoxy (1, 7) ; readln (tc) ; goto fg; end;
8:begin Gotoxy (1, 8) ; readln (ncp) ; goto fg; end;
9:begin Gotoxy (1, 9) ; readln (e) ; goto fg; end;
10:begin Gotoxy (1, 10) ; readln (bl) ; goto fg; end;
11:begin Gotoxy (1, 11) ; readln (nd) ; goto fg; end;
12:begin Gotoxy (1, 12) ; readln (tg) ; goto fg; end;
13:begin Gotoxy (1, 13) ; readln (kn) ; goto fg; end;
14:begin Gotoxy (1, 14) ; readln (ln) ; goto fg; end;
15:begin Gotoxy (1, 15) ; readln (dl) ; goto fg; end;
16:begin Gotoxy (1, 16) ; readln (fvng) ; goto fg; end;
17:begin Gotoxy (1, 17) ; readln (b1g) ; goto fg; end;
18:begin ClrScr; Goto gg; end;
End; {case}
fg:until (kiemtra = 0) ;
Framecolor (2, 6, 68, 25, BLUE, YELLOW) ; clrscr;
WRITELN ('1. Bề rộng gờ chắn bánh          !   bg   !   m') ;
WRITELN ('2. Chiều cao gờ chắn bánh          !   hg   !   m') ;
WRITELN ('3. Hệ số trọng lượng phụ            !   nph  !   ') ;
WRITELN ('4. Chiều cao trụ cổng                  !   hh   !   m') ;
WRITELN ('5. Góc nghiêng của dây neo so với phương ngang :) ;
WRITELN ('6. Góc nghiêng neo trái                !   tea  !   do') ;
WRITELN ('7. Góc nghiêng neo phải                  !   teb  !   do') ;
WRITELN ('8. Chiều dài nằm ngang của dây neo :) ;
WRITELN ('9. Neo trái                            !   la   !   m') ;
WRITELN ('10. Neo phải                             !   lb   !   m') ;
WRITELN ('11. Trọng lượng rải đều của đoàn người:    !   qng  !   t/m2) ;
WRITELN ('12. Trọng lượng trục trước của ô tô        !   ttr  !   t') ;
WRITELN ('13. Trọng lượng trục sau của ô tô           !   ts   !   t') ;
WRITELN ('14. Khoảng cách giữa 2 trục của ô tô        !   k1   !   m') ;
WRITELN ('15. Khoảng cách giữa 2 trục bánh sau của ô tô !   k2   !   m') ;
WRITELN ('16. Hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu làm cáp !   alfa  !   ') ;
WRITELN ('17. Hệ số an toàn cáp                      !   kc   !   ') ;
WRITE ('18. Sửa lỗi từ đâu ? (cần sửa (1..18), không sửa: 0) ') ;
ggg:framecolor (69, 6, 78, 25, blue, yellow) ; CLRSCR;
readln (bg, hg, nph, hh) ;
writeln;

```

```

readln (tea, teb) ;
writeln;
readln (la, lb, qng, ttr, ts, k1, k2, alfa, kc) ;
Repeat
Gotoxy (1, 18) ;
Kiemtra: = 0;
Readln (kiemtra) ;
Case kiemtra of
1:begin Gotoxy (1, 1) ; readln (bg) ; goto fgg; end;
2:begin Gotoxy (1, 2) ; readln (hg) ; goto fgg; end;
3:begin Gotoxy (1, 3) ; readln (nph) ; goto fgg; end;
4:begin Gotoxy (1, 4) ; readln (hh) ; goto fgg; end;
5:begin Gotoxy (1, 5) ; writeln (#7, #7) ; goto fgg; end;
6:begin Gotoxy (1, 6) ; readln (tea) ; goto fgg; end;
7:begin Gotoxy (1, 7) ; readln (teb) ; goto fgg; end;
8:begin Gotoxy (1, 8) ; writeln (#7, #7) ; goto fgg; end;
9:begin Gotoxy (1, 9) ; readln (la) ; goto fgg; end;
10:begin Gotoxy (1, 10) ; readln (lb) ; goto fgg; end;
11:begin Gotoxy (1, 11) ; readln (qng) ; goto fgg; end;
12:begin Gotoxy (1, 12) ; readln (ttr) ; goto fgg; end;
13:begin Gotoxy (1, 13) ; readln (ts) ; goto fgg; end;
14:begin Gotoxy (1, 14) ; readln (k1) ; goto fgg; end;
15:begin Gotoxy (1, 15) ; readln (k2) ; goto fgg; end;
16:begin Gotoxy (1, 16) ; readln (alfa) ; goto fgg; end;
17:begin Gotoxy (1, 17) ; readln (alfa) ; goto fgg; end;
18:begin ClrScr; Goto ggg; end;
End; {case}
fgg:until (kiemtra = 0) ;
Framecolor (2, 6, 68, 25, BLUE, YELLOW) ; clrscr;
WRITELN ('1. Chiều dài tấm ván gỗ                ! lmc ! m') ;
WRITELN ('2. Chiều dài ván gỗ tính toán           ! llg ! m') ;
WRITELN ('3. Cường độ chịu uốn tính toán của gỗ      ! Rug ! T/m2) ;
WRITELN ('4. Cường độ chịu uốn tính toán của thép     ! Rut ! T/m2) ;
WRITELN ('5. Số hiệu thép dầm ngang                     ! Idn ! ') ;
WRITELN ('6. Mômen chống uốn dầm ngang                   ! Wn ! m3) ;
WRITELN ('7. Trọng lượng uốn vị dầm ngang                 ! Tdn ! T/m') ;
WRITELN ('8. Số hiệu thép dầm dọc                         ! Id ! ') ;
WRITELN ('9. Mômen chống uốn dầm dọc                     ! Wd ! m3) ;
WRITELN ('10. Trọng lượng đơn vị dầm dọc                  ! Tdd ! T/m') ;
WRITELN ('11. Lượng điều chỉnh dây cáp sau khi lắp dầm ngang ! m') ;
WRITELN ('12. Lượng điều chỉnh dây cáp sau khi lắp dầm dọc   ! m') ;
WRITELN ('13. Độ chênh nhiệt độ khi lắp dầm ngang          ! t [1] ! do C') ;
WRITELN ('14. Độ chênh nhiệt độ khi lắp dầm dọc            ! t [2] ! do C') ;
WRITELN ('15. Độ chênh nhiệt độ khi lắp mặt cầu            ! t [3] ! do C') ;

```

```

WRITELN ('16. Chiều dài đặt tải đoàn người tính từ đầu cầu      ! m') ;
WRITELN ('17. Khoảng cách tính từ đầu cầu đến trục sau ô tô    ! m') ;
WRITE ('18. Sửa lỗi từ đâu ? (cần sửa (1..18), không sửa: 0) ');
gggg: framecolor (69, 6, 78, 25, blue, yellow) ; CLRSCR;
readln (lmc, llg, Rut, Rug, Idn, Wn, Tdn, Id, Wd, Tdd,
dels [1], dels [2], t [1], t [2], t [3], xn, xo) ;
Repeat
Gotoxy (1, 18) ;
Kiemtra: = 0;
Readln (kiemtra) ;
Case kiemtra of
1:begin Gotoxy (1, 1) ; readln (lmc) ; goto fggg; end;
2:begin Gotoxy (1, 2) ; readln (llg) ; goto fggg; end;
3:begin Gotoxy (1, 3) ; readln (Rug) ; goto fggg; end;
4:begin Gotoxy (1, 4) ; readln (Rut) ; goto fggg; end;
5:begin Gotoxy (1, 5) ; readln (Idn) ; goto fggg; end;
6:begin Gotoxy (1, 6) ; readln (Wn) ; goto fggg; end;
7:begin Gotoxy (1, 7) ; readln (Tdn) ; goto fggg; end;
8:begin Gotoxy (1, 8) ; readln (Id) ; goto fggg; end;
9:begin Gotoxy (1, 9) ; readln (Wd) ; goto fggg; end;
10:begin Gotoxy (1, 10) ; readln (Tdd) ; goto fggg; end;
11:begin Gotoxy (1, 11) ; readln (dels [1]) ; goto fggg; end;
12:begin Gotoxy (1, 12) ; readln (dels [2]) ; goto fggg; end;
13:begin Gotoxy (1, 13) ; readln (T [1]) ; goto fggg; end;
14:begin Gotoxy (1, 14) ; readln (T [2]) ; goto fggg; end;
15:begin Gotoxy (1, 15) ; readln (T [3]) ; goto fggg; end;
16:begin Gotoxy (1, 16) ; readln (xn) ; goto fggg; end;
17:begin Gotoxy (1, 17) ; readln (xo) ; goto fggg; end;
18:begin ClrScr; Goto gggg; end;
end; {case}
fggg:until (kiemtra = 0) ;
      END; { of Nhap_sl }

(=====)
      PROCEDURE Menu1;
      BEGIN
      {-----}
      window (1, 1, 80, 25) ;
      TextBackGround (green) ;
      clrscr;
      frame2color (17, 7, 57, 15, red, red) ;
      frame2color (20, 8, 60, 16, white, blue) ;
      Writeln (' ');
      writeln (' Mời bạn nhập số liệu:');
      WRITELN (' 1. Từ ví dụ') ;

```

```

writeln ('      2. Từ bàn phím ');
writeln ('      T. Thoát ra');
textcolor (yellow + 128);
write ('      Mời bạn chọn ?');
choice:= readkey;
echo;
case choice of
    '1': Vi_du;
    '2': Nhap_sl;
    'T': halt;
end; {case}

      END; { of Menu1 }

{=====}
      PROCEDURE Tinh_ban_mat_cau;
      Var    c, mm, hlg      :real;
      BEGIN
          {-----}
a0:= 0.2; b0:= 0.4;
ptr:= 1.1*1.4*ttr;
ps:= 1.1*1.4*ts;
nn:= round (l/kn) -1;
qntt:= 1.4*qng*b1;
c:= B0 + 2*dl;
MM:= ps* (Llg/2-c/4) /4;
hlg:= SQRT (6*MM/ (1.2*Rug*b1g) );
dmc:= (Trunc (100*hlg) + 1) /100;
      END; { of Tinh_ban_mat_cau }

{=====}
      PROCEDURE Tinh_dam_doc;
      VAR
          c, a, b, Mt, Mh, M, q, Wdd:real;
      BEGIN
          {-----}
c:= A0 + 2*dmc;
q:= Tg* (2*bl*dl + bg*hg + dmc*lmc) /nd;
{bỏ qua trọng lượng bản thân dầm dọc, coi tải phân bố đều trên các dầm dọc}
Mt:= 1.1*q*SQR (kn) /8;
if kn>= k2 then
    begin
        a:= K2*Ps/ (Ptr + Ps) ;
        b:= K2*Ptr/ (Ptr + Ps) ;
        Mh:= ( (kn + a) *Ps + (kn + a-2*K2) *Ptr - 2*Ps*a) ;
    end
else Mh:= kn*Ps/8;    {theo nguyên tắc Vincle}

```

```

m:= Mh + Mt;
Wdd:= M/Rut;
i:= 0;
repeat
i:= i + 1;
until Mcu [i]>= Wdd;
if (i>17) or (i = 1) then begin
Writeln ( ' Giá trị tính ở ngoài bảng tra !' ) ;
Writeln ( ' Hãy chọn các giá trị sau:' ) ;
Writeln ( ' Thép chữ I có mô men chống uốn > = ', Wdd:10:6, 'm3' ) ;
Write ( ' wd<m3> = ' ) ; readln (wd) ;
write ( ' Td<T/m> = ' ) ; readln (Tdd) ;
write ( ' Id = ' ) ; readln (Id) ;
end
else begin wd:= Mcu [i]; Tdd:= Tlr [i]; Id:= Soh [i]; end;
END; { of Tinh_dam_doc }

{-----}
PROCEDURE Tinh_dam_ngang ;
VAR max, w1, M, Mt, Mh, x, y1, y2, R:real;
    y:array [1..200] of real;
    n, i:integer;
BEGIN
    {-----}
R:= (Tdd*nd + lmc*dmc*Tg + 2*bg*hg*Tg + bl*dl*Tg) *kn/2;
Mt:= R*kn/2; {tính gần đúng}
Mh:= Ps* (b-k1) /4;
M:= Mt + Mh;
W1:= M/Rut;
i:= 0;
repeat
i:= i + 1;
until Mcu [i]>= W1;
if (i>17) or (i = 1) then begin
Writeln ( ' Giá trị tính ở ngoài bảng tra !' ) ;
Writeln ( ' Thép chữ I có mô men chống uốn > = ', W1:10:6, 'm3' ) ;
Writeln ( ' Hãy chọn các giá trị sau:' ) ;
Write ( ' wn<m3> = ' ) ; readln (wn) ;
write ( ' Tdn<T/m3> = ' ) ; readln (Tdn) ;
write ( ' Idn = ' ) ; readln (Idn) ;
end
else begin wn:= Mcu [i]; Tdn:= Tlr [i]; Idn:= Soh [i]; end;
END; { Tinh_dam_ngang }

{-----}

```

```

PROCEDURE ttoan1;
BEGIN
    {-----}
window (1, 1, 80, 25);
textbackground (cyan);
clrscr;
Framecolor (15, 10, 65, 15, lightmagenta, white); clrscr;
tinhh_ban_mat_cau;
Tinh_dam_doc;
Tinh_dam_ngang;
END;
{-----}

PROCEDURE ttoan;
BEGIN
    {-----}
ra:= pi*tea/180;
rb:= pi*teb/180;
lc:= 1* (1 + 8*sqr (f [3]) / (3*sqr (l) ) ) *nc1;
qc:= lc*tc;
fc:= nc*f1c;
qdn:= nn*tdn*ln;
qdd:= nd*tdd*l;
qmc:= (lmc*dmc + 2*b1*dl + 2*bg*hg) *tg*l;
qph:= nph*qc;
lneo:= nc*hh/ (1/sin (ra) + 1/sin (rb) ) ;
l1:= 1 + la/ (cos (ra) *cos (ra) *cos (ra) ) + lb/ (cos (rb) *cos (rb) *cos (rb) ) ;
l2:= 1 + la/sqr (cos (ra) ) + lb/sqr (cos (rb) ) -
hh* (sin (ra) /cos (ra) + sin (rb) /cos (rb) ) ;
q [0]:= 1.2*qc/l;
q [1]:= 1.2* (qc + qph + qdn) /l;
q [2]:= 1.2* (qc + qph + qdn + qdd) /l;
q [3]:= q [2] + 1.5*qmc/l;
END; { of Ttoan }
{=====}

FUNCTION dd (qtd, qngd, ptrd, psd:real) :real;
VAR
    r, z:array { 1..6} of real;
    dtg:real;
BEGIN
    {-----}
if ptrd = 0 then
dd:= sqr (qtd + qngd) *l*L*L/12
else

```

```

begin
xx:= 1/2;
r [1]:= ( (1-xx-k2) *ptr + (1-xx) *ps) /1 + q [3]*1/2;
r [2]:= r [1]-q [3]*xx;
r [3]:= r [2]-ps;
r [4]:= r [3]-q [3]*k2;
r [5]:= r [4]-ptr;
r [6]:= -q [3]*1/2 - (ps*xx + ptr* (xx + k2) ) /1;
z [1]:= xx; z [3]:= k2; z [5]:= 1-xx-k2;
i:= 1; dtg:= 0;
repeat
  if r [i]*r [i + 1] >0 then
    dtg:= dtg + z [i]* (sqr (r [i]) + ABS (r [i]*r [i + 1]) + sqr (r [i + 1]) ) /3
  else
    dtg:= dtg + z [i]* (sqr (r [i]) - ABS (r [i]*r [i + 1]) + sqr (r [i + 1]) ) /3;
  i:= i + 2;
until i>5;
dd:= dtg;
end;

```

END; { of dd }

```

===== }

```

```

PROCEDURE Tinh_h (var h:real; dels, t, d, h0, d0:real);
LABEL tttt;
VAR

```

```

  a1, b11, x1, a, b, ss, buoc:real;
  y1, y2, tich, dgiua, r1, r2, ym:real;

```

```

{-----}

```

```

Function f (x:real) :real;

```

```

begin

```

```

  f:= a1*x*x-b11 + x*x*x;

```

```

end;

```

```

{-----}

```

```

BEGIN

```

```

{-----}

```

```

a:= 0; b:= 99999; ss:= 0.001; buoc:= 0.01;

```

```

tttt: a1:= e*fc*d0/ (2*11*h0*h0) -h0 + e*fc/11* (dels + alfa*t*12);

```

```

b11:= e*fc*d/ (2*11);

```

```

r1:= a; r2:= b;

```

```

y1:= f (r1); y2:= f (r2);

```

```

tich:= y1*y2;

```

```

if tich<0 then

```

```

begin

```

```

  repeat

```

```

    dgiua:= (r1 + r2) /2;

```



```

ym:= f (dgiua) ;
if ym <> 0 then begin
    if ym*y1 >0 then begin r1:= dgiua; y1:= ym; end
    else begin r2:= dgiua; y2:= ym; end
    end
until abs (r2-r1) <ss;
x1:= dgiua;
end
else if tich = 0 then if y1 = 0 then x1:= r1 else x1:= r2
else begin
    window (1, 1, 80, 25) ;
    textbackground (cyan) ; clrscr;
    Framecolor (10, 8, 70, 16, lightblue, white) ; clrscr;
    writeln ('Không có nghiệm trong khoảng nghiệm đã cho ');
    write ('Cho đoạn khảo sát [a, b] = [') ;
    readln (a, b) ;
    goto tttt;
end;
h:= x1;

END; { of Tinh_h }

===== }
PROCEDURE Tinh_h1 (var h:real; dels, t, d, h0, d0:real) ;
LABEL tttt;
VAR
    a1, b11, x1, a, b, ss, buoc:real;
    y1, y2, tich, dgiua, r1, r2, ym:real;
    {-----}
Function f (x:real) :real;
begin
    f:= a1*x*x-b11 + x*x*x;
end;
    {-----}
BEGIN
    {-----}
a:= 0; b:= 99999; ss:= 0.001; buoc:= 0.01;
ttt:a1:= e*fc*d0/ (2*11*h0*h0) -h0 - e*fc/11* (dels + alfa*t*12) ;
b11:= e*fc*d/ (2*11) ;
r1:= a; r2:= b;
y1:= f (r1) ; y2:= f (r2) ;
tich:= y1*y2;
if tich<0 then
begin
    repeat
        dgiua:= (r1 + r2) /2;

```

```

ym:= f (dgiua) ;
if ym <> 0 then begin
    if ym*y1 >0 then begin r1:= dgiua; y1:= ym; end
    else begin r2:= dgiua; y2:= ym; end
        end
    until abs (r2-r1) <ss;
    x1:= dgiua;
end
else if tích = 0 then if y1 = 0 then x1:= r1 else x1:= r2
else begin
    writeln ('Không có nghiệm trong khoảng [a, b] ');
    window (1, 1, 80, 25) ;
    textbackground (cyan) ; clrscr;
    Framecolor (20, 8, 60, 16, lightblue, white) ; clrscr;
    writeln ('Không có nghiệm trong khoảng nghiệm đã cho ');
    write ('Cho đoạn khảo sát [a, b] = [ ');
    gotoxy (37, 1) ;
    readln (a) ; gotoxy (40, 1) ; readln (b) ;
    gotoxy (45, 1) ; writeln (']') ;
    goto ttt;
end;
h:= x1;
    END; { of Tinh_h1 }
=====
PROCEDURE Tinh_m (var mmax, fmax, smax:real; h, qt2, qng2, ptr2, ps2:real) ;
BEGIN
if ptr2 = 0 then mmax:= (qng2 + qt2) *l/8
else
mmax:= qt2*xx*l/2 - qt2*xx*xx/2 + ( (1-xx) *ps2 + (1-xx-k2) *ptr2) *xx/l ;
fmax:= mmax/h;
smax:= h*sqrt (1 + 16*fmax*fmax/(l*l) ) ;
{tính m gần đúng tại điểm đặt trục sau của ô tô}
    END; { of Tinh_m }
=====
PROCEDURE Tinh_f (qt, h:real; ii:integer) ;
BEGIN
{-----}
For i:= 0 to (nn + 2) do
begin
    z [i]:= kn*i;
    Md:= qt* (l*z [i]/2-SQR (z [i]) /2) ;
    y [ii, i]:= Md/h;
end;
    END; { of Tinh_f }
=====

```

PROCEDURE DDEO;

VAR

r, Rr, s, f1, f2, chdai:real;

z, zz:array [1..50] of real;

BEGIN

{-----}

{---Tính chiều dài dây đeo---}

chdai:= 0;

Rr:= (Tdd*nd + lmc*dmc*Tg + 2*bg*hg*Tg + 2*bl*dl*Tg) *kn/2;

for i:= 1 to nn do

begin

z [i]:= kn*i;

f1:= 4*f [3]*z [i]* (1-z [i]) /sqr (l) ;

f2:= 4*Fvng*z [i]* (1-z [i]) /sqr (l) ;

a [i]:= (f [3] + Fvng) - (f1 + f2) ;

aaa [i]:= a [i]*E*Fd/ (Rr + E*Fd) ;

{ Khoảng cách giữa cáp và mặt cầu ở giữa nhíp = 0 }

chdai:= chdai + a [i];

end;

chdai:= chdai + chdai;

r:= 0;

for i:= 1 to (nn + 1) do

begin

zz [i]:= kn*i;

s:= f [0]*4*zz [i]* (1-zz [i]) /sqr (l) ;

aa [i]:= sqrt ((s-r) * (s-r) + sqr (kn)) ;

r:= s;

end;

END; { of Ddeo }

{=====}

PROCEDURE Nguoi_dat_lech;

VAR { dng, hng, z, m, r1, r:real;

fv, ff:array [1..50] of real; }

z:real;

BEGIN

{-----}

dng:= sqr (q [3]) *l*L*L/12 + sqr (qntt*xn) *xn*xn* (4*l-3*xn) / (12*l) +

qntt*q [3]*xn*xn* (l/2-x/3) ;

Tinh_h (Hng, 0, 0, dng, h [3], d [3]) ;

m:= qntt*xn* (2*l-xn) / (2*l) + q [3]*l/2;

r1:= qntt*SQR (xn) / (2*l) + q [3]*l/2;

For i:= 1 to (nn + 1) do begin

z:= kn*i;

if z<= xn then mn:= rn*z- (qntt + q [3]) *z*z/2

```

else mn:= r1* (1-z) - q [3]*sqr (1-z) /2;
ff [i]:= mn/hng;
fv [i]:= 4*fvgng*z* (1-z) /l;
bbn [i]:= fv [i] - (ff [i] - y [3, i]) ;
    end;
    END; { of Ngooi_dat_lech }
=====
PROCEDURE O_TO_dat_lech;
VAR
    dtg, h_o, z1, mo, r1, r2:real;
    ro, zzz:array [1..6] of real;
    fv, ff:array [1..50] of real;
BEGIN
    {-----}
    ro [1]:= ( (1-xo-k2) *ptr + (1-xo) *ps) /l + q [3]*l/2;
    ro [2]:= ro [1]-q [3]*xo;
    ro [3]:= ro [2]-ps;
    ro [4]:= ro [3]-q [3]*k2;
    ro [5]:= ro [4]-ptr;
    ro [6]:= -q [3]*l/2 - (ps*xo + ptr* (xo + k2) ) /l;
    zzz [1]:= xo; zzz [3]:= k2; zzz [5]:= 1-xo-k2;
    i:= 1; dtg:= 0;
    repeat
        if ro [i]*ro [i + 1] >0 then
            dtg:= dtg + zzz [i]* (sqr (ro [i]) + ro [i]*ro [i + 1] + sqr (ro [i + 1]) ) /3
        else
            dtg:= dtg + zzz [i]* (sqr (ro [i]) - ro [i]*ro [i + 1] + sqr (ro [i + 1]) ) /3;
            i:= i + 2;
        until i>5;
    d_o:= dtg;
    Tinh_h (h_o, 0, 0, d_o, h [3], d [3]) ;
    r2:= q [3]*l/2 + (ptr* (1-xo-k2) + ps* (1-xo) ) /l;
    r1:= q [3]*l/2 + (ps*xo + ptr* (xo + k2) ) /l;
    For i:= 1 to (nn + 1) do begin
        z1:= kn*i;
        if z1<= xo then mo:= r2*z1-q [3]*z1*z1/2
        else if (z1>xo) and (z1<= xo + k2) then mo:= r2*z1 - q [3]*z1*z1/2 - ps* (z1-xo)
        else mo:= r1* (1-z1) - q [3]*sqr (1-z1) /2;
        ff [i]:= mo/h_o;
        fv [i]:= 4*fvgng*z1* (1-z1) /l;
        bbo [i]:= fv [i] - (ff [i] - y [3, i]) ;
        end;
    END; { of O_TO_DAT_LECH }
=====

```

```

PROCEDURE KETQUA;
VAR nc2:integer;
BEGIN
    {-----}
    Clrscr;
    nc:=nc1;
    ttoan1;
    window (1, 1, 80, 25);
    TextBackGround (green);
    clrscr;
    frame2color (17, 10, 57, 15, red, red);
    frame2color (20, 11, 60, 16, white, blue);
    Writeln (' ');
    textcolor (white + 128);
    Write (' >>...đang tính toán...');
    Echo; Echo;
    ttoan;
    m [3]:= q [3]*l/8;
    h [3]:= m [3]/f [3];
    D [3]:= dd (q [3], 0, 0, 0);
    s [3]:= h [3]*sqrt (1 + 16*f [3]*f [3]/(l*l));
    {-----}
    D [4]:= dd (q [3], 0, ptr, ps);
    Tinh_h (h [4], 0, 0, d [4], h [3], d [3]);
    Tinh_m (m [4], f [4], s [4], h [4], q [3], 0, ptr, ps);
    {-----}
    D [5]:= dd (q [3], qntt, 0, 0);
    Tinh_h (h [5], 0, 0, d [5], h [3], d [3]);
    Tinh_m (m [5], f [5], s [5], h [5], q [3], qntt, 0, 0);
    {-----}
    if s [4]<= s [5] then smax:= s [5]
    else smax:= s [4];
    nc2:= round (kc*smax/ncp);
    if (nc2 mod 2) = 0 then nc:= nc2
    else nc:= nc2 + 1;
    {-----}
    Toan; {tính lại sau khi đã chọn được số lượng cấp}
    m [3]:= q [3]*l/8;
    h [3]:= m [3]/f [3];
    D [3]:= dd (q [3], 0, 0, 0);
    s [3]:= h [3]*sqrt (1 + 16*f [3]*f [3]/(l*l));
    Tinh_f (q [3], h [3], 3);
    {-----}

```

```

D [4]: = dd (q [3], 0, ptr, ps) ;
Tinh_h (h [4], 0, 0, d [4], h [3], d [3]) ;
Tinh_m (m [4], f [4], s [4], h [4], q [3], 0, ptr, ps) ;
{-----}
D [5]: = dd (q [3], qntt, 0, 0) ;
Tinh_h (h [5], 0, 0, d [5], h [3], d [3]) ;
Tinh_m (m [5], f [5], s [5], h [5], q [3], qntt, 0, 0) ;
{-----}
d [2]: = dd (q [2], 0, 0, 0) ;
tinh_h1 (h [2], 0, t [3], d [2], h [3], d [3]) ;
Tinh_m (m [2], f [2], s [2], h [2], q [2], 0, 0, 0) ;
Tinh_f (q [2], h [2], 2) ;
{-----}
d [1]: = dd (q [1], 0, 0, 0) ;
tinh_h1 (h [1], dels [2], t [2], d [1], h [2], d [2]) ;
Tinh_m (m [1], f [1], s [1], h [1], q [1], 0, 0, 0) ;
Tinh_f (q [1], h [1], 1) ;
{-----}
d [0]: = dd (q [0], 0, 0, 0) ;
tinh_h1 (h [0], dels [1], t [1], d [0], h [1], d [1]) ;
Tinh_m (m [0], f [0], s [0], h [0], q [0], 0, 0, 0) ;
Tinh_f (q [0], h [0], 0) ;
{-----}
O_TO_DAT_LECH;
{-----}
NGUOI_DAT_LECH;
{-----}
ddeo;
dels [0]: = 0; dels [3]: = 0; dels [4]: = 0; dels [5]: = 0;
window (1, 1, 80, 25) ;
TextBackGround (green) ;
clrscr;
frame2color (17, 10, 57, 15, red, red) ;
frame2color (20, 11, 60, 16, white, blue) ;
Writeln (' ');
textcolor (white + 128) ;
Writeln (' >>>...đã tính xong...<<<') ;
Echo; Echo; Echo;
      END; { of KETQUA }
=====
PROCEDURE VE;
  VAR y1, y2, i, y, TLX, TLY, z, GD, GM: Integer;
      ra, rb, tea, fvng, l, hh, f: real;
      ch: char;
      a: real;
      x, kn, y11, y21: integer;

```

BEGIN

{-----}

l: = 120; hh: = 11 ; f: = 10.4; fvng: = 0.3; kn: = 4;

tea: = 20.6; ra: = tea*pi/180; rb: = ra;

gd: = detect;

initgraph (gd, gm, ' ');

setbkcolor (2) ;

rectangle (10, 10, getmaxx-10, getmaxy-10) ;

setcolor (4) ; settextstyle (1, 0, 3) ;

outtextxy (round (getmaxx/5), round (getmaxy/9), ' SO DO CAU TREO DAM MEM') ;

setcolor (5) ; settextstyle (1, 0, 3) ;

outtextxy (round (getmaxx/3), round (getmaxy/5), 'TL 1 : 10.000 ') ;

TLX: = 3* (GetmaxX div round (l)) div 4;

TLY: = GetmaxY div 25 div 2;

SetBKcolor (black) ;

Setcolor (lightmagenta) ;

SetLineStyle (0, 0, 3) ;

Line (45*TLX, 25*TLY, 44*TLX, round ((25 + hh) *TLY)) ;

Line (45*TLX, 25*TLY, 46*TLX, round ((25 + hh) *TLY)) ;

Line (44*TLX, round ((25 + hh) *TLY) , 46*TLX, round ((25 + hh) *TLY)) ;

Rectangle (40*TLX, round ((hh + 25) *TLY) , round (50*TLX) , round ((hh + 28) *TLY)) ;

Line (round ((45 + l) *TLX) , 25*TLY, round ((44 + l) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY)) ;

Line (round ((45 + l) *TLX) , 25*TLY, round ((46 + l) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY)) ;

Line (round ((44 + l) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY) , round ((46 + l) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY)) : delay (500) ;

Rectangle (round ((40 + l) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY) , round ((50 + l) *TLX) , round ((hh + 28) *TLY)) ;

SetLineStyle (0, 0, 1) ;

Setcolor (lightred) ;

a: = hh*cos (ra) /sin (ra) ;

Line (45*TLX, 25*TLY, round ((45-a) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY)) ;

Line (45*TLX, round ((25 + hh) *TLY) , round ((45-a) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY)) ;

SetLineStyle (0, 0, 3) ;

rectangle (round ((41-a) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY) , round ((45-a) *TLX) , round ((hh + 27) *TLY)) ;

SetLineStyle (0, 0, 1) ;

Line (round ((45 + l) *TLX) , 25*TLY, round ((45 + l + a) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY)) ;

Line (round ((45 + l) *TLX) , round ((25 + hh) *TLY) , round ((45 + l + a) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY)) ;

SetLineStyle (0, 0, 3) ;

Rectangle (round ((45 + l + a) *TLX) , round ((hh + 25) *TLY) , round ((49 + l + a) *TLX) , round ((hh + 27) *TLY)) ;

For i: = 0 to round (l*TLX) do begin

y: = round (4*f*i/tlx* (l-i/tlx) //l*TLY) ;

```

Putpixel (i + 45*TLX, (25*TLY + y) , lightred) ;
Putpixel (i + 45*TLX, (25*TLY + y + 1) , lightred) ;
    end;
SetLineStyle (0, 0, 3) ;
For i: = 0 to round (l*TLX) do begin
y: = round (-4*fvng*i/tlx* (1-i/tlx) /l/l*TLY) ;
Putpixel (i + 45*TLX, (25*TLY + y + round (hh*tly) ) , lightred) ;
Putpixel (i + 45*TLX, (25*TLY + y + round (hh*tly-1) ) , lightred) ;
Putpixel (i + 45*TLX, (25*TLY + y + round (hh*tly + 1) ) , lightred) ;
Putpixel (i + 45*TLX, (25*TLY + y + round (hh*tly + 1) ) , lightred) ;
    end;
SetLineStyle (0, 0, 1) ;
Setcolor (lightred) ;
x: = 0;
Repeat
x: = x + kn*TLX;
y11: = 25*TLY + round (4*fx/tlx* (1-x/tlx) /l/l*TLY) ;
y21: = round ( (25 + hh) *TLY) -round (4*fvng*x/tlx* (1-x/tlx) /l/l*TLY) ;
line (x + 45*TLX, y11, x + 45*TLX, y21) ;
until x>round (l*TLX-20) ;
delay (500) ;
ch: = readkey;
echo;
closegraph;

    END; { of Vc }

=====
PROCEDURE KETLUAN;
BEGIN
Clrscr;
Framecolor (2, 1, 78, 5, lightmagenta, white) ;
writeln (' Số liệu đã tính toán' ) ;
writeln (' Nội dung                                     ! Kí hiệu    ! đơn vị    !, 'Giá trị !');
Framecolor (2, 6, 78, 24, BLUE, YELLOW) ; clrscr;
writeln ('1.Tổng chiều dài dây cáp                    ! lcap      ! m        !, lc + lneo:6:4);
writeln ('2.Tổng trọng lượng cáp trong nhịp           ! qc =      ! T        !, qc:6:3);
writeln ('3.Trọng lượng dầm ngang                         ! qdn       ! T        !, qdn:6:3);
writeln ('4.Trọng lượng dầm dọc                             ! qdd       ! T        !, qdd:6:3);
writeln ('5.Trọng lượng mặt cầu                             ! qmc       ! T        !, qmc:6:3);
writeln ('6.Trọng lượng phụ kiện                             ! qph       ! T        !, qph:6:3);
writeln ('7.Số cáp chủ                                         ! nc        ! bo       !, nc:6);
writeln ('8.Số hiệu thép dầm ngang                          ! ldn       !          !, ldn:6);
writeln ('9.Số lượng dầm ngang                               ! nn        ! nn       !, nn:6);
writeln ('10.Số hiệu thép dầm dọc                            ! ld        !          !, ld:6);
writeln ('11.Số lượng dầm dọc                                ! nd        !          !, nd:6);

```



```

writeln (' Bấm Enter để tiếp tục..');
readln;
f [5]: = m [5]/h [5];
Framecolor (5, 5, 75, 0, BLUE, YELLOW) ; clrscr;
Writeln ('-----');
Writeln (' ! Đại lượng      ! Fmax      ! Smax      ! H          ! Delta      !') ;
Writeln (' ! Thứ tự          ! <met>      ! <Tan>      ! <Tan>      ! <Met>      !') ;
Writeln (' !-----!-----!-----!-----!-----!');
for i: = 0 to 5 do
Writeln (' ! ', i:3, ' ! ', f [i]:8:4, ' ! ', s [i]:8:4, ' ! ',
h [i]:8:4, ' ! ', dels [i]:8:4, ' ! ');
writeln (' Bấm enter để tiếp tục..');
readln;
END; { of KETLUAN }

{=====}
PROCEDURE Menu2;
LABEL t, t1, t2, tdv, cuoi;
VAR z, zz:array [1..50] of real;
BEGIN
{-----}
t: window (1, 1, 80, 25);
TextBackGround (green) ;
clrscr;
frame2color (17, 7, 57, 15, red, red) ;
Frame2color (20, 8, 60, 16, White, yellow) ;
Writeln (' Mời bạn in kết quả');
WRITELN (' 1.Ra màn hình');
writeln (' 2.Ra máy in ');
Writeln (' T.Thoát ra');
textcolor (Magenta + 128);
write (' Mời bạn chọn ?');
choice: = readkey;
echo;
case choice of
    '1':Begin
t1:window (1, 1, 80, 25);
TextBackGround (green) ;
clrscr;
frame2color (17, 6, 57, 17, red, red) ;
frame2color (20, 7, 60, 18, white, blue) ;
writeln ('      Kết quả');
writeln ('      a. Số liệu thiết kế');
WRITELN (' b.Độ võng');
writeln ('      c.Chiều dài dây treo');

```

```

writeln ('    d. Các điểm đánh dấu trên cáp ');
writeln ('    e. Khối lượng vật liệu ');
writeln ('    f. Sơ đồ cầu ');
writeln ('    g. Thoát ra Menu In kết quả');
textcolor ( white + 128);
write ('    Mời bạn chọn ?');
choice: = readkey;
echo;
case choice of
'a':begin
Framecolor (2, 1, 78, 5, lightmagenta, white); clrscr;
writeln (' Số liệu tính toán');
gotoxy (20, 3); write ('Nội dung ');
gotoxy (46, 3); write ('! Kí hiệu ');
gotoxy (56, 3); write ('! chuyển vị');
GOTOXY (66, 3); WRITE ( '! Giá trị');
Framecolor (2, 6, 78, 24, BLUE, YELLOW); clrscr;
WRITELN ('1. Chiều dài nhịp                ! l      ! m      !', l: 4:2);
WRITELN ('2. Khoảng cách hai cấp chủ         ! b      ! m      !', b: 4:2);
WRITELN ('3. Bề rộng cầu                          ! bl     ! m      !', bl: 6:4);
WRITELN ('4. Độ võng max ở trạng thái chưa chịu hoạt tải ! f [3] ! m      !', f [3]: 6:4);
WRITELN ('5. Số lượng cấp chủ chọn sơ bộ           ! nc l   ! bo     !', nc l: 6:4);
WRITELN ('6. Diện tích mặt cắt ngang 1 bó cáp      ! flc    ! m2     !', flc: 8:6);
WRITELN ('7. Trọng lượng đơn vị của cáp            ! tc     ! t/m     !', tc:6:4);
WRITELN ('8. Lực kéo đứt cho phép                  ! ncp    ! t       !', ncp:6:4);
WRITELN ('9. Modul đàn hồi của vật liệu cáp         ! e      ! t/m2    !', e:6:4);
WRITELN ('10. Số liệu dầm ngang:');
WRITELN ('11. Số hiệu thép                         ! ldn    !         !', ldn:4);
WRITELN ('12. Trọng lượng 1 m dài                  ! tdn    ! t/m     !', tdn:6:4);
WRITELN ('13. Khoảng cách 2 dầm ngang              ! kn     ! m       !', kn:6:4);
WRITELN ('14. Chiều dài dầm ngang                  ! ln     ! m       !', ln:6:4);
WRITELN ('15. Mômen quán tính                      ! wn     ! m3      !', wn:8:6);
WRITE ('Bấm enter để tiếp tục...'); readln;
Framecolor (2, 6, 78, 25, BLUE, YELLOW); clrscr;
WRITELN ('16. Số liệu dầm dọc:');
WRITELN ('17. Số hiệu thép                         ! ld     !         !', ld:6);
WRITELN ('18. Trọng lượng 1 m dài                  ! tdd    ! t/m     !', tdd:6:4);
WRITELN ('20. Khoảng cách 2 dầm dọc                ! kd     ! m       !', kd:6:4);
WRITELN ('21. Số lượng dầm dọc                     ! nd     ! dam     !', nd:4);
WRITELN ('22. Mômen quán tính                      ! wd     ! m3      !', wd:8:6);
WRITELN ('23. Số liệu phần mặt cầu:');
WRITELN ('24. Trọng lượng riêng gỗ mặt cầu         ! tg     ! t/m     !', tg:6:4);
WRITELN ('25. Bề dày bản mặt cầu                  ! dmc    ! m       !', dmc:6:4);
WRITELN ('26. Bề rộng b ng l n                    ! bl     ! m       !', bl:6:4);

```

```

WRITELN ('27. Chiều dày b ng l n      !   dl   ! m   l', dl:6:4) ;
WRITELN ('28. Bề rộng gờ chắn bánh    !   bg   ! m   l', bg:6:4) ;
WRITELN ('29. Chiều cao gờ chắn bánh    !   hg   ! m   l', hg:6:4) ;
WRITELN ('30. Hệ số trọng lượng phụ     !   nph  !     l', nph:6:4) ;
WRITELN ('31. Chiều cao trụ cổng         !   hh   ! m   l', hh:6:4) ;
WRITELN ('32. Góc nghiêng của dây neo so với phương ngang :') ;
WRITELN ('33. Góc nghiêng neo trái       !   tea  ! do   l', tea:6:4) ;
WRITE ('Bấm enter để tiếp tục...') ; readln;
Framecolor (2, 6, 78, 25, BLUE, YELLOW) ; clrscr;
WRITELN ('34. Góc nghiêng neo phải      !   teb  ! do   l', teb:6:4) ;
WRITELN ('35. Chiều dài nằm ngang của dây neo :') ;
WRITELN ('36. Neo trái                     !   la   ! m   l', la:6:4) ;
WRITELN ('37. Neo phải                      !   lb   ! m   l', lb:6:4) ;
WRITELN ('38. Số liệu đoàn người:') ;
WRITELN ('39. Trọng lượng rải đều          !   qng  ! t/m2  l', qng:6:4) ;
WRITELN ('40. Số liệu ô tô:') ;
WRITELN ('41. Trọng lượng trục trước         !   ttr  ! t     l', ttr:6:4) ;
WRITELN ('42. Trọng lượng trục sau          !   ts   ! t     l', ts:6:4) ;
WRITELN ('43. Khoảng cách giữa 2 trục        !   kl   ! m     l', kl:6:4) ;
WRITELN ('44. Hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu làm cáp !   alfa !     l', alfa:8:6) ;
WRITELN ('45. Độ võng ban đầu của mặt cầu    !   fvng ! m     l', fvng:6:4) ;
WRITELN ('46. Chiều dài tấm ván gỗ          !   lmc  ! m     l', lmc:6:4) ;
WRITELN ('47. Chiều dài ván gỗ tính toán      !   llg  ! m     l', llg:6:4) ;
WRITELN ('48. Cường độ chịu uốn tính toán của gỗ !   Rug  ! T/m2  l', Rug:8:4) ;
WRITELN ('49. Cường độ chịu uốn tính toán của thép !   Rut  ! T/m2  l', Rut:8:4) ;
WRITELN ('50. Hệ số an toàn cáp             !   kc   !     l', kc:6:4) ;
WRITE ('Bấm enter để tiếp tục...') ; readln;
      end; { of 'a' }
'b':begin
tdv:window (1, 1, 80, 25) ;
  TextBackGround (green) ;
  clrscr;
  frame2color (17, 6, 57, 17, red, red) ;
  frame2color (20, 7, 60, 18, white, blue) ;
  WRITELN (' Độ võng:') ;
  writeln (' 1. Khi chỉ có dây không ') ;
  writeln (' 2. Khi đã treo dầm ngang ') ;
  writeln (' 3. Khi đã lao dầm dọc ') ;
  writeln (' 4. Khi hoàn thiện ') ;
  writeln (' 5. Khi ô tô đặt lệch ') ;
  writeln (' 6. Khi đoàn người đặt lệch ') ;
  writeln (' T. Thoát ra Menu Kết quả') ;
  textcolor (white + 128) ;
  write ('      Mời bạn chọn ?') ;

```

```

choice:= readkey;
echo;
window (1, 1, 80, 25);
textbackground (cyan); clrscr;
Framecolor (14, 1, 68, 6, lightmagenta, white); clrscr;
writeln;
case choice of
  '1':begin
    Writeln ('      Trạng thái dây chỉ chịu tự trọng:');
    write ('      điểm tính      ! khoảng cách      ! độ võng      ');
    Framecolor (14, 7, 68, 24, blue, white); clrscr;
    For i:= 0 to (nn + 2) do begin
      z [i]:= kn*i;
      writeln ('      ', i:3, '      !      ', z [i]:6:2, '      !      ', y [0, i]: 6: 4 );
      if (i = 15) or (i = 30) then begin
        WRITE ('Bấm enter để tiếp tục..') ; readln; end;
      end;
    goto tdv;
  end;
  '2':begin
    Writeln (' Trạng thái dây chịu tự trọng, dầm ngang:');
    write (' điểm tính ! khoảng cách ! độ võng ');
    Framecolor (14, 7, 68, 24, blue, white); clrscr;
    For i:= 0 to (nn + 2) do begin
      z [i]:= kn*i;
      writeln ('      ', i:3, '      !      ', z [i]:6:2, '      !      ', y [1, i]:6:4 );
      if (i = 15) or (i = 30) then begin
        WRITE ('Bấm enter để tiếp tục..') ; readln; end;
      end;
    goto tdv;
  end;
  '3':begin
    Writeln (' Trạng thái dây chịu tự trọng, dầm ngang, dầm dọc:');
    write (' điểm tính ! khoảng cách ! độ võng ');
    Framecolor (14, 7, 68, 24, blue, white); clrscr;
    For i:= 0 to (nn + 2) do begin
      z [i]:= kn*i;
      writeln ('      ', i:3, '      !      ', z [i]:6:2, '      !      ', y [2, i]:6:4 );
      if (i = 15) or (i = 30) then begin
        WRITE ('Bấm enter để tiếp tục..') ; readln; end;
      end;
    goto tdv;
  end;
  '4':begin

```

```

Writeln ('      Trạng thái dây chịu toàn bộ tĩnh tải:');
write ('      Điểm tính !      khoảng cách !      độ võng      ');
Framecolor (14, 7, 68, 24, blue, white); clrscr;
For i: = 0 to (nn + 2) do begin
z [i]: = kn*i;
writeln ('      ', i:3, '      !      ', z [i]:6:2, '      !      ', y [3, i]:6:4 );
if (i = 15) or (i = 30) then begin
WRITE ('Bấm enter để tiếp tục..') ; readln; end;
      end;
goto tdv;
      end;
'5':Begin
Writeln (' Độ võng của mặt cầu khi ô tô đặt lệch:');
write ('      điểm tính !      khoảng cách !      độ võng ');
Framecolor (14, 7, 68, 24, blue, white); clrscr;
For i: = 0 to (nn + 2) do begin
z [i]: = kn*i;
writeln ('      ', i:3, '      !      ', z [i]:6:2, '      !      ', bbo [i]:6:4 );
if (i = 15) or (i = 30) then begin
WRITE ('Bấm enter để tiếp tục..') ; readln; end;
      end;
goto tdv;
      end;
'6':Begin
Writeln (' độ võng của mặt cầu khi đoàn người đặt lệch:');
write ('      điểm tính ! khoảng cách ! độ võng ');
Framecolor (14, 7, 68, 24, blue, white); clrscr;
For i: = 0 to (nn + 2) do begin
z [i]: = kn*i;
writeln ('      ', i:3, '      !      ', z [i]:6:2, '      !      ', bbn [i]:6:4 );
if (i = 15) or (i = 30) then begin
WRITE ('Bấm enter để tiếp tục..') ; readln; end;
      end;
goto tdv;
      end;
end; { case }
end; { of 'b' }
'c': Begin
window (1, 1, 80, 25);
textbackground (cyan); clrscr;
Framecolor (14, 2, 66, 8, blue, white); clrscr;
writeln ('      Chiều dài dây treo : ');
writeln ('_____');

```

```

writeln ('!      điểm tính      !      khoảng cách      !      chiều dài !') ;
write ('!_____!_____!_____!');
Framecolor (14, 9, 66, 25, lightmagenta, white) ; clrscr;
for i: = 1 to nn do begin
zz [i]: = kn*i;
writeln ('!      !', i:3, '      !      ', zz [i]:6:2, '      !      ', aaa [i]:6:4, ' !') ;
if (i = 15) or (i = 30) then begin
write ('      Press enter to continue...') ; readln; end;
      end;
      End; { of 'c' }
      'd':begin
window (1, 1, 80, 25) ;
textbackground (cyan) ;
clrscr;
Framecolor (14, 1, 66, 7, lightmagenta, white) ; clrscr;
writeln ('      điểm đánh dấu cấp : ');
writeln ('      _____');
writeln ('!      điểm tính      !      khoảng cách      !') ;
write ('!_____!_____!');
Framecolor (14, 8, 66, 24, blue, white) ; clrscr;
for i: = 1 to (nn + 1) do begin
writeln ('!      !', i:3, '      !      ', aa [i]:6:4, '      !') ;
if (i = 15) or (i = 30) then begin
write ('      Press enter to continue...') ; readln; end;
      end;
      end; { of 'd' }
      'e':ketluan;
      'f':ve;
      'g':GOTO t ;
      End; { of Case 1 }
      GOTO t1;
      End; { of 1 }
{-----}
'2':Begin
t2>window (1, 1, 80, 25) ;
TextBackGround (green) ;
clrscr;
frame2color (17, 6, 57, 17, red, red) ;
frame2color (20, 7, 60, 18, white, blue) ;
writeln ('      Kết quả') ;
writeln ('      a. Số liệu thiết kế') ;
WRITELN ('      b. độ võng') ;
writeln ('      c. Chiều dài dây treo') ;
writeln ('      d. Các điểm đánh dấu trên cáp') ;

```

```

writeln ('      c. Khối lượng vật liệu ');
writeln ('      T. Thoát ra Menu In kết quả ');
textcolor (white + 128);
write ('      Mời bạn chọn ?');
    choice: = readkey;
    echo;
    case choice of
        'a':begin
writeln (LST, ' SO LIEU TINH TOAN');
gotoxy (20, 3); write (LST, 'NOI DUNG ');
gotoxy (46, 3); write (LST, '! KI HIEU');
gotoxy (56, 3); write (LST, '! DON VI');
GOTOXY (66, 3); WRITE (LST, '! GIA TRI');
WRITELN (LST, '1. Chiều dài nhíp                ! l ! m      ! ', l:8:6);
WRITELN (LST, '2. Khoảng cách hai cặp chu          ! b        ! m      ! ', b:8:4);
WRITELN (LST, '3. Kho câu                ! bl       ! m      ! ', bl:8:4);
WRITELN (LST, '4. Độ vòng max ở trạng thái chưa chịu hoạt tại! f [3]    ! m      ! ', f [3]:8:4);
WRITELN (LST, '5. Số lượng cặp chu chọn số bó                ! nc l     ! bo      ! ', nc l:8:4);
WRITELN (LST, '6. Diện tích mặt cắt ngang 1 bó cáp            ! fl c     ! m2      ! ', fl c:8:4);
WRITELN (LST, '7. Trọng lượng đơn vị của cáp                  ! tc       ! t/m     ! ', tc:8:4);
WRITELN (LST, '8. Lực kéo đứt cho phép                        ! ncp      ! t        ! ', ncp:8:4);
WRITELN (LST, '9. Modul đàn hồi của vật liệu cáp              ! e        ! t/m2    ! ', e:8:4);
WRITELN (LST, '10. Số liệu đàn ngang:                          ! ');
WRITELN (LST, '11. Số hiệu thép                ! ldn      !         ! ', ldn:8);
WRITELN (LST, '12. Trọng lượng 1 m dài          ! tdn      ! t/m     ! ', tdn:8:4);
WRITELN (LST, '13. Khoảng cách 2 dầm ngang       ! kn       ! m       ! ', kn:8:4);
WRITELN (LST, '14. Chiều dài dầm ngang           ! ln       ! m       ! ', ln:8:4);
WRITELN (LST, '15. Mô men quán tính             ! wn       ! m3      ! ', wn:8:6);
WRITELN (LST, '16. Số liệu dầm dọc:              ! ');
WRITELN (LST, '17. Số hiệu thép                ! Id       !         ! ', id:8);
WRITELN (LST, '18. Trọng lượng 1 m dài          ! tdd      ! t/m     ! ', tdd:8:4);
WRITELN (LST, '20. Khoảng cách 2 dầm dọc         ! kd       ! m       ! ', kd:8:4);
WRITELN (LST, '21. Số lượng dầm dọc              ! nd       ! dầm     ! ', nd:4);
WRITELN (LST, '22. Mô men quán tính             ! wd       ! m3      ! ', wd:8:6);
WRITELN (LST, '23. Số liệu phản mặt cầu:');
WRITELN (LST, '24. Trọng lượng riêng gô mặt cầu ! tg       ! t/m     ! ', tg:8:4);
WRITELN (LST, '25. Bề dày bản mặt cầu           ! dmc      ! m       ! ', dmc:8:4);
WRITELN (LST, '26. Bề rộng bản lan              ! bl       ! m       ! ', bl:8:4);
WRITELN (LST, '27. Chiều dày bản lan             ! dl       ! m       ! ', dl:8:4);
WRITELN (LST, '28. Bề rộng gô chân bánh         ! bg       ! m       ! ', bg:8:4);
WRITELN (LST, '29. Chiều cao gô chân bánh        ! hg       ! m       ! ', hg:8:4);
WRITELN (LST, '30. Hệ số trọng lượng phủ         ! nph      !         ! ', nph:8:4);
WRITELN (LST, '31. Chiều cao trụ công            ! hh       ! m       ! ', hh:8:4);
WRITELN (LST, '32. Góc nghiêng của dây neo so với phương ngang ! ');
WRITELN (LST, '33. Góc nghiêng neo trái          ! tea      ! độ      ! ', tea:8:4);
WRITELN (LST, '34. Góc nghiêng neo phải          ! teb      ! độ      ! ', teb:8:4);

```

```

WRITELN (LST, '35. Chieu dai nam ngang cua day neo :');
WRITELN (LST, '36. Neo trai                                ! la      ! m      ! ', la:8:4);
WRITELN (LST, '37. Neo phai                                ! lb      ! m      ! ', lb:8:4);
WRITELN (LST, '38. So lieu doan nguoi:');
WRITELN (LST, '39. Trong luong rai deu                    ! qng      ! t/m2 ! ', qng:8:4);
WRITELN (LST, '40. So lieu o to: ');
WRITELN (LST, '41. Trong luong truc truoc                ! ttr      ! t      ! ', ttr:8:4);
WRITELN (LST, '42. Trong luong truc sau                  ! ts       ! t      ! ', ts:8:4);
WRITELN (LST, '43. Khoang cach giua 2 truc              ! k        ! m      ! ', k1:8:4);
WRITELN (LST, '44. He so gian no nhiet cua vat lieu lam cap ! alfa      !      ! ', alfa:8:6);
WRITELN (LST, '45. Do vong ban dau cua mat cau          ! fvng      ! m      ! ', fvng:8:4);
WRITELN (LST, '46. Chieu dai tam van go                  ! lmc       ! m      ! ', lmc:6:4);
WRITELN (LST, '47. Chieu dai van go tinh toan           ! llg       ! m      ! ', llg:6:4);
WRITELN (LST, '48. Cuong do chiu uon tinh toan cua go    ! Rug       ! T/m2 ! ', Rug:6:4);
WRITELN (LST, '49. Cuong do chiu uon tinh toan cua thep  ! Rut       ! T/m2 ! ', Rut:6:4);
WRITELN (LST, '50. He so an toan cap                    ! kc        !      ! ', kc:6:4);
    end; { of 'a' }
    'b':begin
for ii:= 0 to 3 do begin
    'Case ii of
        0:Writeln (LST, ' Trang thai day chi chiu tu trong:');
        1:Writeln (LST, ' Trang thai day chiu tu trong, dam ngang:');
        2:Writeln (LST, ' Trang thai day chiu tu trong, dam ngang, dam doc:');
        3:Writeln (LST, ' Trang thai day chiu toan bo tinh tai:');
    end; { case }
    writeln;
    writeln (LST, '_____');
    writeln (LST, '!      diem tinh      !      khoang cach      !      do vong      ! ');
    write (LST, '!_____!_____!_____! ');
    For i:= 0 to (nn + 1) do begin
        writeln (LST, '      ', i:3, '      !      ', z[i]:6:2, '      !      ', y [ii, i]:6:4 );
        end;
    end;
    goto t2;
end; { of 'b' }
    'c': Begin
    writeln (LST, '      Chieu dai day treo : ');
    writeln;
    writeln (LST, '_____');
    writeln (LST, '!      diem tinh      !      khoang cach      !      chieu dai ! ');
    write (LST, '!_____!_____!_____! ');
    for i:= 1 to (nn + 1) do
        writeln (LST, '      ', i:3, '      !      ', z [i]:6:2, '      !      ', a [i]:6:4, '      ! ');
    goto t2;
    End; { of 'c' }

```



```

'd':Begin
writeln (LST, '          Diem danh dau cap : ');
writeln (LST, ' ');
writeln (LST, '          ');
writeln (LST, '          ! diem tinh ! khoang cach ! ');
write (LST, '          !          !          ! ');
for i:= 1 to (nn + 1) do
writeln (LST, '          !          ', i:3, '          !', aa[i]:6:2, '          !');
goto t2;
    end; { of 'd' }
'e':Begin
writeln (LST, '1. Tong chieu dai day cap          ! lcap ! m          !, lc + lneo:6:4);
writeln (LST, '2. Tong trong luong cap trong nhip          ! qc = ! T          !, qc:6:3);
writeln (LST, '3. Trong luong dam ngang          ! qdn ! T          !, qdn:6:3);
writeln (LST, '4. Trong luong dam doc          ! qdd ! T          !, qdd:6:3);
writeln (LST, '5. Trong luong mat cau          ! qmc ! T          !, qmc:6:3);
writeln (LST, '6. Trong luong phu kien          ! qph ! T          !, qph:6:3);
writeln (LST, '7. So cap chu          ! nc ! bo          !, nc:6);
writeln (LST, '8. So hieu thep dam ngang          ! ldn          !, ldn:6);
writeln (LST, '9. So luong dam ngang          ! nn ! nn          !, nn:6);
writeln (LST, '10. So hieu thep dam doc          ! Id          !, Id:6);
writeln (LST, '11. So luong dam doc          ! nd          !, nd:6);
Writeln (LST, '-----');
Writeln (LST, ' ! Dai luong          ! Fmax          ! Smax          ! H          ! Delta          !');
Writeln (LST, ' ! Thu tu          ! <Tan>          ! <Tan>          ! <Tan>          ! <Met>          !');
Writeln (LST, ' !-----!-----!-----!-----!-----!');
for i:= 0 to 5 do
Writeln (LST, ' !          ', i:3, '          !          ', f[i]:8:4, '          !          ', s[i]:8:4, '          !',
h[i]:8:4, ' !', dels[i]:8:4, ' !');
goto t2;
    end;
End; { of Case 2 }
goto t;
End; { of 2 }
'T':exit;
End; { of Case }
END; { of Menu2 }
{=====}
{=====}
BEGIN { Main Programme }
    gioi_thieu;
    Menu1;
    Ketqua;
    Menu2;
    SoundEcho; echo;
    END.
{=====}

```

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] PGS.TS. Nguyễn Viết Trung, KS. Nguyễn Hữu Hưng. *Phân tích kết cấu cầu cong và cầu dây văng bằng SAP 2000*. Nhà xuất bản GTVT, 2003
- [2] Lều Thọ Trình. *Cách tính hệ treo theo sơ đồ biến dạng*. Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật. 1987
- [3] Nguyễn Như Khải, Lê Đình Tâm. *Thiết kế cầu kim loại tập 2*. Nhà xuất bản Đại học và Trung học chuyên nghiệp. 1985
- [4] *Các đồ án về cầu treo* - Trường Đại học Giao thông vận tải
- [5] *Quy trình tính toán ổn định khí động học của cầu dây xiên và cầu dây văng Trung Quốc*
- [6] Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan. *Bridge Engineering Handbook*

MỤC LỤC

<i>Lời giới thiệu</i>	3
Chương 1. Cơ sở thiết kế cầu treo dây võng	
1.1. Giới thiệu	5
1.2. Hệ thống kết cấu	10
1.3. Cơ sở thiết kế	16
Chương 2. Thiết kế sơ bộ cầu treo dây võng	
2.1. Tổng quan	38
2.2. Thiết kế sơ bộ cầu treo dây võng nông thôn	55
2.3. Giới thiệu một số thông số kỹ thuật của các cầu treo dây võng đã thiết kế	61
Chương 3. Phân tích, tính toán kết cấu cầu treo dây võng	
3.1. Lý thuyết tính toán cầu treo một nhịp theo sơ đồ biến dạng	68
3.2. Tính dao động của cầu treo dây võng	86
3.3. Ví dụ tính toán cầu treo dây võng bằng SAP 2000	91
Chương 4. Bài toán động học cầu treo dây võng	
4.1. Cơ sở lý thuyết	106
4.2. Một số ví dụ thực tế	142
Chương 5. Kiểm tra hư hỏng cầu treo dây võng	
5.1. Những hư hỏng phổ biến	152
5.2. Kiểm tra, phân tích tình trạng các bộ phận kết cấu	158
5.3. Đánh giá năng lực chịu tải cầu treo dây võng	165
5.4. Giải pháp sửa chữa tăng cường	166
5.5. Một số ví dụ kiểm định cầu	168
Phụ lục 1. Tính cầu treo theo sơ đồ biến dạng	187
Phụ lục 2. Chương trình Pascal	196
Tài liệu tham khảo	223

THIẾT KẾ CẦU TREO DÂY VÕNG

Chịu trách nhiệm xuất bản:

BÙI HỮU HẠNH

Biên tập: NGUYỄN MINH KHÔI

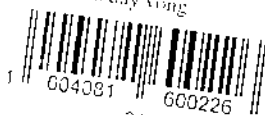
Chế bản điện tử: VŨ HỒNG THANH

Sửa bản in: NGUYỄN MINH KHÔI

Trình bày bìa: NGUYỄN HỮU TÙNG

In 1000 cuốn khổ 19×27 cm, tại Xưởng in Nhà xuất bản Xây dựng. Giấy chấp nhận đăng ký
kế hoạch xuất bản số 1773/XB-QLXB-05 ngày 15/12/2003. In xong nộp lưu chiểu tháng 7/2004.

th của heo dầy vông



34.000 VND

6X-6X8	1773 - 2004
XD- 2004	

Giá : 34.000^d