

BÀI TOÁN PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH KHÍ ĐỘNG CHO CẦU DÂY VĂNG

PGS.TS. Nguyễn viết Trung
Thạc sỹ Bùi Hữu Hưởng

1.ĐẶT VẤN ĐỀ:

Một trong những vấn đề quan trọng nhất đối với cầu dây văng là vấn đề ổn định khí động của kết cấu dưới tác dụng của gió. Đây là vấn đề rất phức tạp do kết cấu cầu dây văng nhịp lớn có kết cấu mảnh, độ cứng nhỏ rất dễ mất ổn định do tải trọng gió do các tác động hết sức phức tạp và ngẫu nhiên của gió. Nhiều cầu dây văng trên thế giới đã bị sập do không có sự nghiên cứu đầy đủ về ảnh hưởng của gió cũng như ổn định của kết cấu với gió.

Cầu dây văng khẩu độ lớn là một kết cấu siêu tĩnh nhiều bậc với đặc điểm là kết cấu mảnh có độ cứng nhỏ. Kết cấu nhịp dây văng gồm các bộ phận chính như: tháp, dầm chủ, dây văng và trụ neo. Cầu dây văng có nhiều sơ đồ khác nhau như sơ đồ 1 tháp, sơ đồ 2 tháp. Dầm chủ có cấu tạo bằng BTCT, thép liên hợp bê tông cốt thép hay dầm hộp thép hoặc có dạng hỗn hợp như phân dầm BTCT ở hai đầu nhịp, ở giữa là phân dầm thép hoặc thép liên hợp. Dạng tháp có dạng chủ yếu như hình chữ A, chữ H. Mặt cắt dầm có nhiều dạng: bản đặc, Chữ Π không vát hay có vát dạng khí động học hoặc dạng hình hộp. Ngoài việc lựa chọn các thông số cầu dây văng về mặt chịu lực và phù hợp với công nghệ thi công như: chiều dài nhịp, chiều cao tháp từ mặt cầu đến đỉnh tháp, chiều cao dầm, bề rộng mặt cầu, cự ly dây văng. Các thông số khác liên quan đến ổn định khí động như: Tỷ số giữa chiều dài nhịp và bề rộng cầu, tỷ số giữa bề rộng cầu và chiều cao dầm chủ, dạng tháp (dạng chữ A tốt hơn nhiều so với dạng chữ H về ổn định khí động), hình dạng dầm chủ, số mặt phẳng dây, mặt phẳng dây thẳng hay nghiêng...

2.CÁC TÁC ĐỘNG KHÍ ĐỘNG CỦA GIÓ :

Các hiện tượng khí động của cầu dây văng nhịp lớn được phân loại thành một số bài toán để xem xét thích hợp trong thiết kế như sau:

*Tác động tĩnh:-Ứng suất và biến dạng tĩnh.

-Mất ổn định.

*Tác động động:-Dao động có giới hạn:

+Dao động rung, lắc (Buffeting)

+Dao động cuộn xoáy (Vortex-induced oscillation)

+Dao động do mưa và gió (Rain-wind induced vibration)

+Dao động gập (Wake induced vibration)

-Dao động không giới hạn:

+Dao động tiến triển nhanh (Galloping)

+Dao động trông trành (Flutter)

Ý nghĩa trong các bài toán trên như sau:

*Tác động tĩnh:

-Ứng suất và biến dạng tĩnh là bài toán tính toán ứng suất và biến dạng do giá trị trung bình của tốc độ gió thay đổi theo thời gian. Các giá trị này không phụ thuộc vào thời gian.

-Mất ổn định được nhận thấy điển hình tại các cầu mảnh, trong đó việc mất ổn định đột ngột tại mặt phẳng vuông góc với hướng gió. Hoặc mất ổn định do mặt cầu có độ chống xoắn yếu, vệt đột ngột do tốc độ gió lớn.

*Tác động động:

-Dao động giới hạn là dạng dao động có giới hạn về biên độ giới hạn và dãy tốc độ gió giới hạn. Nó không gây tai họa thảm khốc song ảnh hưởng đến khả năng khai thác như vấn đề mỏi và không thuận tiện cho người. Nó bao gồm các dạng sau:

+Dao động rung lắc là dao động ngẫu nhiên do tác động rối của gió.

+Dao động cuộn xoáy được tạo thành tại phía khuất gió của kết cấu.

+Dao động do mưa và gió thường quan sát được tại cáp văng trong điều kiện mưa

và gió gây ra bởi sự tạo thành dòng chảy trên bề mặt cáp và dòng chảy dọc phía khuất gió.

+Dao động gật .

-Dao động không giới hạn là dao động nếu xảy ra sẽ gây hậu quả thảm khốc. Nó được yêu cầu không được xảy ra trong dãy vận tốc gió thiết kế.Nó bao gồm các dạng sau:

+Dao động tiến triển nhanh (Gallopings)

+Dao động trông trành (Flutter) :là một loại dao động lan truyền nguy hiểm.Khi dao động này đạt tới một tốc độ gió tới hạn, do lực phản tác dụng của luồng khí , cầu liên tục nhận được năng lượng làm cho biên độ dao động tăng dần , cuối cùng dẫn đến kết cấu bị phá hoại . Trường hợp này đã được biết đến trong sự cố sập cầu Tacoma Narrows ở Mỹ năm 1940 do mất ổn định Flutter.

Như vậy đối với cầu dây văng , dạng mất ổn định chủ yếu và quan trọng nhất là mất ổn định do Flutter. Thường được phân thành Flutter xoắn hoặc Flutter xoắn uốn.Tuỳ theo mặt cắt của cầu ,dao động trông trành có hai loại cơ chế hoạt động. Đối với mặt cắt phẳng dẹt có hình khí động học có thể phát sinh dao động trông trành ngẫu hợp xoắn uốn.Tốc độ gió tới hạn của loại này tương đối cao.Lúc đó hiệu ứng về độ cứng do gió tốc độ cao gây nên làm thay đổi tần suất uốn và xoắn của kết cấu.Dưới tác dụng của tốc độ gió tới hạn làm chúng ngẫu hợp thành tần số dao động trông trành thống nhất và thúc đẩy sự lan truyền dao động.Đối với mặt cắt không có dạng khí động học, thì dễ phát sinh dao động trông trành xoắn.Do sự chuyển động xoắn của tiết diện do gió di chuyển gây nên, tạo thành một loại hiệu ứng cản âm.Khi đạt tới tốc độ gió tới hạn cản âm của không khí sẽ khắc phục cản dương của bản thân kết cấu dẫn tới sự lan truyền dao động.

Do đặc tính dòng rối của gió tự nhiên gần mặt đất , nên gió mạnh có thể có góc tác dụng nhất định. Khi kiểm tra tính ổn định dao động trông trành của cầu khẩu độ lớn cần xét ảnh hưởng bất lợi của góc tác dụng đối với tốc độ gió tới hạn .Góc tới hạn làm cho chiều cao hình chiếu đứng của mặt cắt phẳng ,dẹt hình khí động học dài thêm ,sinh ra hiệu ứng có thể phát sinh dao động trông trành xoắn dòng phân ly do cản âm của không khí gây ra giống như tiết diện không có hình dạng khí động học .Hai loại dao động ngẫu hợp và dao động xoắn có sự cạnh tranh nhau ,vì vậy cần phải so sánh ,phân tích để xét dao động trông trành bất lợi nhất .

3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN:

Nghiên cứu bắt đầu bằng sự xem xét phân tích các mode dao động.Nên xem xét 20 hoặc hơn dạng mode dao động không gian 3-D ni(x,y,z) với các tần số dao động của nó và quán tính :

$$I_i = \int_{structure} \eta^2(x, y, z) dm(x, y, z) \quad (1)$$

Với x là toạ độ dọc theo nhịp, đặt h(x,t), $\alpha(x,t)$, p(x,t) thể hiện chuyển vị đứng , vận và lắc ngang của mặt cầu tại x, ta có:

$$h(x, t) = \sum_i h_i(x) B \xi_i(t) ; \quad \alpha(x, t) = \sum_i \alpha_i(x) \xi_i(t) ; \quad p(x, t) = \sum_i p_i(x) B \xi_i(t) \quad (2)$$

Với $h_i(x)$, $\alpha_i(x)$, $p_i(x)$ là các giá trị biến dạng mode dao động thứ i tại điểm x của mặt cầu và ξ_i là toạ độ tổng thể của mode dao động thứ i, B là bề rộng mặt cầu, tần số vòng dao động tự nhiên ω_i và hệ số giảm chấn ζ_i , chuyển động của ξ_i được khống chế bởi:

$$I_i(\ddot{\xi}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{\xi}_i + \omega_i^2\xi_i) = Q_i(t) \quad (3)$$

Với Q_i là lực tổng thể .Đặt lực nâng, lực lôi kéo và mô men cho một đơn vị chiều dài nhịp xác định bởi:

Lực nâng: $L = L_{ae} + L_b$; Lực lôi kéo : $D = D_{ae} + D_b$; Mô men: $M = M_{ae} + M_b$

Lực đàn hồi khí động dưới chuyển vị hình sin dưới gió có mật độ không khí ρ và vận tốc gió trung bình U:

$$L_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2KH_1^* \frac{h}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (4)$$

$$M_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KA_1^* \frac{h}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (5)$$

$$D_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KP_1^* \frac{h}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 P_3^* \alpha + K^2 P_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (6)$$

Dưới giả thiết là tác động gió trộn thay đổi chậm, lực rung lắc do ảnh hưởng rối của gió được thể hiện bằng:

$$L_b = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_L \frac{u(x,t)}{U} + \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \frac{w(x,t)}{U} \right] \quad (7)$$

$$M_b = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_M \frac{u(x,t)}{U} + \left(\frac{dC_M}{d\alpha} \right) \frac{w(x,t)}{U} \right] \quad (8)$$

$$D_b = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_D \frac{u(x,t)}{U} \right] \quad (9)$$

Với Qi được tính bằng:

$$Q_i = \int_{deck} [(L_{ae} + L_b)h_i B + (D_{ae} + D_b)p_i B + (M_{ae} + M_b)\alpha_i] dx \quad (10)$$

Từ phương trình hệ thống, với $s = U \cdot t/B$ ta có:

$$I_i(\ddot{\xi}_i + 2\zeta_i K_i \dot{\xi}_i + K_i^2 \xi_i) = \frac{B^2}{U^2} Q_i(s) \quad (11)$$

Với: $\dot{\xi}_i = d\xi_i / ds$; $K_i = B\omega_i / U$ Từ đó:

$$\frac{B^2}{U^2} Q_i(s) = \frac{1}{2} \rho B^4 \int_0^l \{ K [H_1^*(K)h_i^2(x) + P_1^*(K)p_i^2(x) + A_2^*(K)\alpha_i^2(x)] \xi_i \quad (12)$$

$$+ K^2 A_3^*(K)\alpha_i^2(x)\xi_i + L_b h_i(x) + D_b p_i(x) + M_b \alpha_i(x) \} dx$$

$$\text{Biến đổi Fourier của } f(s) \text{ là: } f(K) = \int_0^\infty f(s)e^{-iKs} ds \quad (13)$$

Với: $K = \frac{B\omega}{U}$. Chúng ta nhận được biểu thức trong phạm vi biến đổi có giá trị cho phương

trình chuyển động tổng quát ξ_i :

$$\frac{B^2}{U^2} Q_i(s) = \frac{1}{2} \rho B^4 \int_0^l K^2 \{ i [H_1^*(K)h_i^2(x) + P_1^*(K)p_i^2(x) + A_2^*(K)\alpha_i^2(x)] \quad (16)$$

$$+ A_3^*(K)\alpha_i^2(x) \} \xi_i(K) + L_b h_i(x) + D_b p_i(x) + M_b \alpha_i(x) \} dx$$

$$\text{Bỏ qua biến của đạo hàm Flutter với } x. \text{ Xác định: } \int_0^l q_i^2(x) \frac{dx}{l} = G_{qi} \quad (14)$$

Với $q_i = h_i, p_i$ và α_i . Lấy biến đổi Fourier của phương trình (11) kết quả là:

$$(K_i^2 - K^2 + 2i\zeta_i K_i K) \xi_i = \frac{\rho^4 l}{2I_i} \{ K^2 [i(H_1^* G_{hi} + P_1^* G_{pi} + A_2^* G_{ai}) + A_3^* G_{ai}] \xi_i + \int_0^l [L_b h_i(x) + D_b p_i(x) + M_b \alpha_i(x)] \frac{dx}{l} \}$$

Để điều kiện xảy ra mất ổn định Flutter ta phải có $\gamma_i \leq 0$ với γ_i là sự tắt dần dao động hệ thống trong mode thứ i (tắt dao động cơ học cộng với khí động học). Điều này dẫn đến điều kiện để xảy ra mất ổn định Flutter là:

$$H_1^* G_{hi} + P_1^* G_{pi} + A_2^* G_{ai} \leq \frac{4\zeta_i I_i}{\rho B^4 l} \left(1 + \frac{\rho B^4 l}{2I_i} A_3^* G_{ai} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Trong đó chỉ các đạo hàm Flutter quan trọng được giữ lại như $H_1^*, P_1^*, A_2^*, A_3^*$.

Giải biểu thức trên sẽ tìm được vận tốc gió tới hạn xảy ra dao động trùng trùng Flutter tương ứng với tần số xảy ra Flutter. Kết cấu cầu dây văng sẽ ổn định với Flutter khi vận tốc gió tại vị trí xây dựng cầu tại độ cao của kết cấu nhỏ hơn vận tốc gió giới hạn do Flutter.

4. KẾT LUẬN:

Sự ổn định Flutter của cầu dây văng phụ thuộc vào các đặc trưng của cầu:

a) Đặc trưng hình học của cầu: Hình dạng mặt cắt ổn định như dạng mặt cắt khí động học, mặt cắt hộp. Dạng mặt cắt kém ổn định như dạng dầm đặc hoặc kiểu chữ H...

b) Tần số dao động của cầu: tần số dao động xoắn cao và tỉ số giữa tần số dao động do xoắn với tần số dao động do uốn cao sẽ đảm bảo cho kết cấu ổn định.

c) Sự tắt dao động cơ học của cầu: ổn định khí động càng cao nếu hệ số tắt dần dao động cơ học của cầu cao. Như vậy cần sử dụng các thiết bị giảm chấn cho cầu dây văng để tăng khả năng ổn định khí động.

d) Quán tính của mặt cầu: Kết cấu càng nặng càng tăng ổn định khí động của cầu.

Việc nghiên cứu phân tích ổn định khí động Flutter trong các cầu dây văng khẩu độ lớn có ý nghĩa to lớn. Đây là vấn đề cần phải nghiên cứu sâu hơn và kỹ lưỡng hơn do các tác động của gió ở gần mặt đất là rất phức tạp và mang tính chất ngẫu nhiên. Hiện nay các cầu dây văng khẩu độ lớn đã và đang được xây dựng mạnh mẽ ở nước ta, đặc biệt chúng ta đang thực hiện dự án cầu Rach-Miêu, việc làm chủ được công nghệ thiết kế cầu dây văng khẩu độ lớn nhất là vấn đề xem xét ảnh hưởng khí động lên cầu dây văng đang là yêu cầu cấp bách. Việc làm chủ được công nghệ tính toán phân tích bài toán khí động và thí nghiệm ống khí động sẽ tạo điều kiện cho các kỹ sư Việt Nam có thể tự thiết kế các cầu dây văng vượt khẩu độ lớn.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO CHÍNH

- 1-Tiêu chuẩn châu Âu Euro Code 1 , phần 2-4 .
- 2-Quy trình tính toán ổn định khí động học của cầu dây văng dầm cứng của Trung Quốc.
- 3-Wind effects on structures ,Emil Simiu và Robert H. Scalan ,1996.
- 4-Dynamic response of structures to wind and earthquake loading,1980.
- 5-Cable stayed bridges,1988.