

TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH KHÍ ĐỘNG FLUTTER CỦA DÀM CHỦ TRONG KẾT CẤU CẦU HỆ DÂY

FLUTTER STABILITY ANALYSIS OF GIRDER OF LONG-SPAN BRIDGES

TS. TRẦN NGỌC AN

Khoa Công trình, Trường ĐHHH Việt Nam

Tóm tắt

Bài báo trình bày việc tính toán ổn định khí động flutter của dầm chủ trong kết cấu cầu hệ dây theo mô hình hai bậc tự do. Nội dung của bài báo này nhằm cung cấp cho các kỹ sư ngành cầu đường một số vấn đề cơ bản trong việc tính toán vận tốc gió tới hạn của mô hình cầu hai bậc tự do.

Abstract

This paper presents the flutter stability analysis of girder of long-span bridges using 2 degrees of freedom model. The content of this paper is to provide for road engineers some basic problems about calculating the critical wind speed of two degrees of freedom model.

Key words: flutter stability, long-span bridges, critical wind speed.

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, các công trình cầu treo (dây văng, dây võng) được xây dựng ngày càng nhiều tại Việt Nam với ưu điểm chiều dài nhịp lớn và có tính thẩm mỹ cao. Tuy nhiên, do có kết cấu thanh mảnh và phức tạp nên những công trình này cũng rất nhạy cảm dưới tác dụng của gió, bão. Việt Nam là một đất nước chịu ảnh hưởng nhiều của gió, bão nên việc nghiên cứu lý thuyết kháng gió là hết sức cần thiết với các kỹ sư ngành cầu đường. Mặc dù vậy, phần thiết kế kháng gió của các cầu treo lớn tại Việt Nam vẫn là do nước ngoài thiết kế. Ví dụ, cây cầu dây văng Rạch Miễu là công trình do Việt Nam tự đầu tư, với thiết kế và tổng thầu là các công ty Việt Nam nhưng phần thiết kế kháng gió là do Đại học Tongji (Trung Quốc) thực hiện [11].

Nhằm đáp ứng bước đầu tìm hiểu về lý thuyết kháng gió, trong nội dung bài báo này, tác giả trình bày một số vấn đề cơ bản trong việc xây dựng mô hình mặt cắt của dầm chủ cầu treo nhịp lớn và tính toán vận tốc flutter tới hạn theo mô hình này, cũng như giới thiệu một số phương pháp điều khiển bị động nhằm nâng cao vận tốc flutter tới hạn.

2. Mô hình mặt cắt của dầm cầu một nhịp giản đơn

Quá trình biến đổi hệ phương trình vi phân mô tả dao động uốn-xoắn của dầm một nhịp giản đơn dưới tác dụng của gió về hệ phương trình vi phân dao động hai bậc tự do (2DOF) đã được trình bày chi tiết trong tài liệu [2, 12]. Để nhận được được hệ phương trình vi phân mô tả dao động uốn-xoắn của dầm, ta tách ra một phần tử dầm có chiều dài dx . Áp dụng nguyên lý d'Alembert, xét cân bằng động lực học của phần tử dầm dx , ta thu được hai phương trình vi phân mô tả dao động dao động uốn và dao động xoắn của dầm dưới tác dụng của các lực khí động [2, 12]:

$$m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_b^e \frac{\partial w}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + c_b^i \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial t} \right) \right] = A_L \quad (1)$$

$$\rho_b I_p \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + c_t^e \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[GI_T \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] = M_L \quad (2)$$

ký hiệu các đại lượng trong hệ (1), (2) có thể tham khảo trong các tài liệu [2, 12]. A_L , M_L là lực nâng và momen khí động.

Tìm nghiệm hệ (1), (2) dưới dạng [2, 12]

$$w(x, t) = \sum_{j=1}^n h_j(t) \sin\left(\frac{j\pi}{L} x\right), \quad \varphi(x, t) = \sum_{j=1}^n \alpha_j(t) \sin\left(\frac{j\pi}{L} x\right) \quad (3)$$

Thay (3) vào hệ (1), (2), sau đó nhân hai vế của hệ phương trình mới nhận được với $\sin \frac{k\pi x}{L}$ rồi tích phân cả hai vế theo x từ $x=0$ đến $x=L$. Để đơn giản, ta lấy $k=1$, khi đó ta nhận được hệ phương trình [2, 12]

$$m\ddot{h}(t) + c_h \dot{h}(t) + k_h h(t) = L_h \quad (4)$$

$$I\ddot{\alpha}(t) + c_\alpha \dot{\alpha}(t) + k_\alpha \alpha(t) = M_\alpha \quad (5)$$

3. Mô hình mặt cắt của dầm chủ cầu treo nhịp lớn

Dao động của cầu treo (dây văng, dây võng) nhịp lớn dưới tác dụng của gió là hết sức phức tạp, tổng hợp từ dao động của các thành phần kết cấu: Tháp cầu, hệ dây treo và dầm chủ cầu treo. Chính vì vậy, việc đưa dao động của dầm chủ cầu treo về dao động của mô hình mặt cắt 2 bậc tự do mang tính gần đúng với việc thừa nhận các giả thiết được nêu trong tài liệu [3]

Khi đó, xét mặt cắt của dầm cầu chịu tác dụng của luồng gió thổi đều. Mặt cắt giả thiết có hai bậc tự do: Di chuyển uốn và di chuyển xoắn ký hiệu bởi h và α . Một đơn vị chiều dài nhịp có khối lượng m , momen quán tính khối I , lực hồi phục uốn và xoắn đặc trưng bởi hệ số đàn hồi k_h và k_α và các hệ số cản nhớt c_h và c_α . Với các định nghĩa này, các phương trình chuyển động có thể viết [3, 8, 9, 10]

$$m\ddot{h}(t) + c_h \dot{h}(t) + k_h h(t) = L_h \quad (6)$$

$$I\ddot{\alpha}(t) + c_\alpha \dot{\alpha}(t) + k_\alpha \alpha(t) = M_\alpha \quad (7)$$

với L_h và M_α lần lượt là lực nâng và momen khí động tự kích trên mỗi đơn vị chiều dài của dầm, được xác định theo công thức:

$$L_h = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KH_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^*(K) \frac{h}{B} \right] \quad (8)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[KA_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^*(K) \alpha + K^2 A_4^*(K) \frac{h}{B} \right] \quad (9)$$

Hệ (6), (7) thông thường được biểu diễn dưới dạng

$$m \left[\ddot{h} + 2\zeta_h \omega_h \dot{h} + \omega_h^2 h \right] = L_h \quad (10)$$

$$I \left[\ddot{\alpha} + 2\zeta_\alpha \omega_\alpha \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha \right] = M_\alpha \quad (11)$$

với

$$\omega_h^2 = \frac{k_h}{m}; \quad \omega_\alpha^2 = \frac{k_\alpha}{I}; \quad \zeta_h = \frac{c_h}{2m\omega_h}; \quad \zeta_\alpha = \frac{c_\alpha}{2I\omega_\alpha} \quad (12)$$

Như vậy, trong hệ (10), (11), các thông số cần được xác định gồm có:

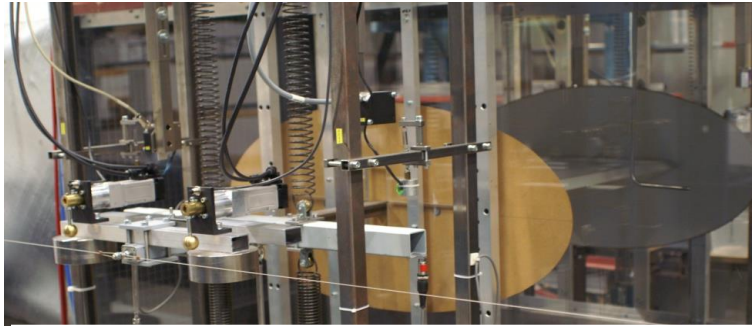
- Khối lượng và momen quán tính khối trên một đơn vị dài của dầm chủ m, I .
- Tần số dao động uốn và dao động xoắn của dầm chủ ω_h, ω_α . Các tần số này được tính toán từ mô hình toàn cầu (có xét đến ảnh hưởng hệ dây treo và tháp cầu) bằng cách sử dụng các phần mềm chuyên dụng như RM, ANSYS.
- Độ cản uốn và độ cản xoắn ζ_h, ζ_α . Các độ cản uốn và độ cản xoắn này có thể tra bảng [8].
- Các tham số khí động A_i^*, H_i^* ($i=1, 2, 3, 4$) được xác định bằng thực nghiệm hoặc có thể lấy từ các dạng mặt cắt cầu điển hình [4, 5].

4. Các phương pháp tính vận tốc flutter tới hạn

Trong phạm vi lý thuyết dao động tuyến tính, tồn tại một vận tốc gió tới hạn U_F , khi vận tốc gió $U > U_F$ thì biên độ dao động flutter tăng lên vô hạn, khi $U < U_F$ thì biên độ dao động flutter giảm về không. Để tính toán vận tốc tới hạn flutter của gió, người ta thường sử dụng các phương pháp sau:

- Phương pháp trị riêng phức [10]
- Phương pháp ký hiệu số phức [3]
- Phương pháp sử dụng tiêu chuẩn Routh – Hurwitz [6]
- Phương pháp bước lặp RSBS [7]

5. Mô hình thí nghiệm mặt cắt GB tại trường Đại học Kỹ thuật Hamburg



Hình 1. Mô hình thí nghiệm trong thí nghiệm hầm gió [12]

Mô hình mặt cắt dầm cầu GB được thực hiện trong hầm gió của Viện Phân tích kết cấu và Công trình thép thuộc Đại học Kỹ thuật Hamburg, mặt cắt có dạng thu nhỏ của mặt cắt ngang dầm cầu Great Belt ở Đan Mạch. Hầm gió có dạng hầm gió mở kiểu Eiffel với vận tốc gió lớn nhất là 24m/s. Bề rộng và chiều cao của thí nghiệm mô hình mặt cắt đều là 0,8m. Cường độ rối nhỏ hơn 0,1% tại vận tốc gió cực đại (hình 1)

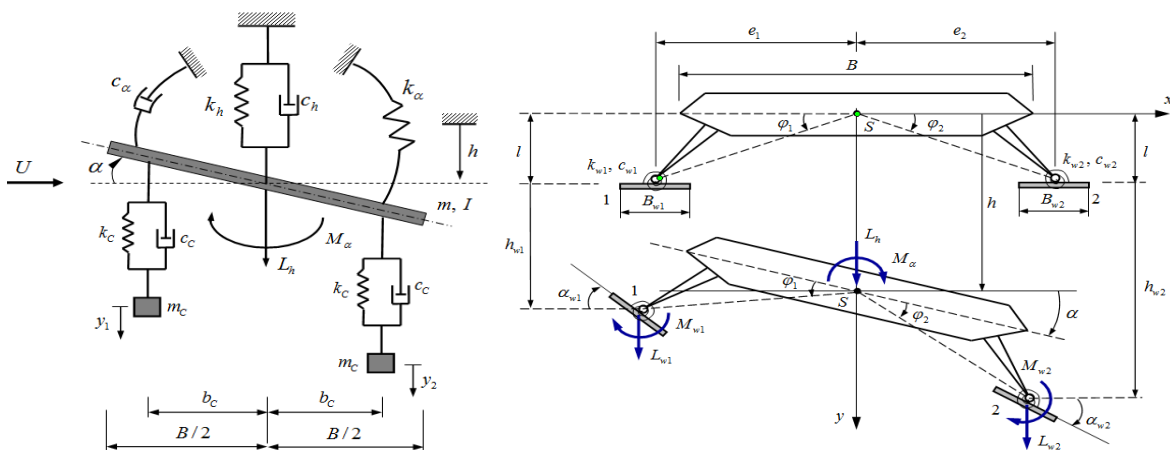
Kết quả vận tốc gió tới hạn và tần số tới hạn của mô hình thực hiện trong thí nghiệm hầm gió của trường Đại học Kỹ thuật Hamburg là 9,8 m/s và 9,4 rad/s.

Sử dụng phương pháp bước lặp, ta tìm được:

$$U_F = 9,31\text{m/s}; \omega_F = 9,42\text{rad/s}$$

Kết quả trên phù hợp tốt với kết quả thực nghiệm là $U_F = 9,8\text{m/s}$, sai số là 5%.

6. Một số phương pháp điều khiển bị động nhằm nâng cao vận tốc flutter tới hạn



Hình 2. Mô hình dầm chủ cầu – TMDs và mô hình dầm chủ cầu – các cánh vẩy [12]

Theo tài liệu [12], có hai phương pháp điều khiển bị động chính như sau (hình 2):

+ Phương pháp cơ học: Lắp đặt các bộ giảm chấn khối lượng-cản (TMDs) vào dầm chủ của cầu. Nguyên lý của phương pháp này là chọn các thông số của TMDs (m_c, k_c, c_c, b_c) sao cho TMDs sẽ hấp thụ một phần năng lượng của dao động dầm chủ cầu. Nếu năng lượng truyền từ dầm chủ cầu sang TMDs càng lớn thì dao động của dầm chủ càng nhỏ, từ đó sẽ nâng cao vận tốc flutter tới hạn.

+ Phương pháp khí động: Lắp đặt các cánh vẩy (winglets) vào dầm chủ cầu. Nguyên lý của phương pháp này là bố trí các cánh vẩy với vị trí và kích thước hợp lý, kết hợp với độ cứng của lò xo

xoắn nhằm bổ sung thêm các lực khí động mới tác dụng trực tiếp vào các cánh vẩy, từ đó làm giảm dao động của dầm chủ cầu.

Các kết quả tính toán trong tài liệu [12] cho cầu Great Belt của Đan Mạch cho thấy: Với phương pháp cơ học có thể nâng cao vận tốc flutter tới hạn lên khoảng 80%, trong khi đó phương pháp khí động có thể nâng cao vận tốc flutter tới hạn lên khoảng 45%.

7. Kết luận

Trong nội dung bài báo này, tác giả đã trình bày một số vấn đề cơ bản trong việc xây dựng mô hình mặt cắt của dầm chủ cầu treo nhịp lớn và tính toán vận tốc flutter tới hạn, cũng như giới thiệu một số phương pháp điều khiển bị động nhằm nâng cao vận tốc flutter tới hạn. Đây là những vấn đề cơ bản trong lĩnh vực tính toán ổn định khí động flutter của dầm chủ cầu treo nhịp lớn. Tác giả cũng hy vọng rằng, trong tương lai, các kỹ sư ngành cầu đường Việt Nam có thể hoàn toàn làm chủ lĩnh vực rất phức tạp này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyen Van Khang, Nguyen Phong Dien, Hoang Ha, Tran Ngoc An (2014) On the calculation of critical flutter wind speed of long-span bridges in Vietnam. *National Symposium with International Participation on Vibration and Control of Structures under Wind Actions, Hanoi*, pp. 95-103
- [2] Nguyen Van Khang, Nguyen Phong Dien, Nguyen Thi Van Huong, T.N. An (2011) On the equations of the coupled bending-torsional vibration of beam bridges. *Proceedings of the National Scientific Seminar on Dynamics and Progressive Collapse in Cable-stayed Bridges, Hanoi*, pp. 17-26
- [3] Uwe Starossek (1992) *Brückendynamik-Windinduzierte Schwingungen von Seilbrücken*. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg
- [4] Uwe Starossek (2009) Flutter derivatives for various sections obtained from experiments and numerical simulations. www.tuhh.de/tuhh/startseite.html
- [5] Uwe Starossek, Hasan Aslan, Lydia Thiesemann (2009) Experimental and numerical identification of flutter derivatives for nine bridge deck sections. *Wind and Structures, Vol. 12, No. 6*, pp. 519-540
- [6] J. Schmutz (2004) *Der Einsatz von Dämpfern gegen windinduzierte Schwingungen weitgespannter Brückenüberbauten*. Studienarbeit, TU Hamburg-Harburg
- [7] Masaru Matsumoto, Kazumasa Okubo, Yasuaki Ito, Hisato Matsumiya, Ginam Kim (2008) The complex branch characteristics of coupled flutter. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, pp. 1843-1855
- [8] Emil Simiu, Toshio Miyata (2006) *Design of Buildings and Bridges for Wind: A Practical Guide for ASCE-7 Standard Users and Designers of Special Structures*. Wiley
- [9] Emil Simiu, Robert H. Scanlan (1996) *Wind effects on structures (3rd editon)*. John Wiley & Sons
- [10] C. Dyrbye, S.O. Hansen (1999) *Wind loads on structures*. John Willey & Sons
- [11] Ledong Zhu (Manager) (2004) *Wind tunnel study on wind-resistant performance of Rach Mieu cable-stayed bridge in Vietnam*. Tongji University
- [12] Trần Ngọc An (2014) *Tính toán ổn định khí động flutter của dầm chủ trong kết cấu cầu hệ dây bằng phương pháp bước lặp*. Luận án Tiến sĩ, Đại học Bách Khoa Hà Nội
- [13] Nguyen Van Khang, Axel Seils, Tran Ngoc An, Nguyen Phong Dien, Nguyen Trong Nghia (2015) An improvement of the step-by-step analysis method for study on passive flutter control of a bridge deck. *Archive of Applied Mechanics (accepted)*