

TÍNH TOÁN VẬN TỐC GIÓ FLUTTER TỚI HẠN CỦA CẦU NHỊP LỚN KHI LẮP CÁC TẮM MỎNG VÀO HỆ DÂY CÁP BẰNG PHƯƠNG PHÁP BƯỚC LẶP HIỆU CHỈNH

CALCULATION OF CRITICAL FLUTTER WIND SPEED OF LONG-SPAN BRIDGES WITH FLAPS FIXED TO THE HANGERS BY USING REVISED STEP-BY-STEP METHOD

TRẦN NGỌC AN*, VŨ THỊ KHÁNH CHI, NGUYỄN THIỆN THÀNH

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: antn.ctt@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Dầm cầu nhịp lớn rất nhạy cảm với tác dụng của gió bão. Một trong các phương pháp nâng cao vận tốc gió tới hạn cho cầu nhịp lớn là lắp thêm các tấm mỏng vào hệ dây cáp. Việc lắp thêm các tấm mỏng này đã tạo ra các lực khí động bổ sung và làm tăng ổn định khí động của dầm cầu. Trong bài báo này trình bày việc tính toán vận tốc gió tới hạn của mô hình mặt cắt cầu khi lắp thêm các tấm mỏng vào hệ dây cáp trên cơ sở phương pháp bước lặp hiệu chỉnh. Độ cản Loga và tần số flutter được khảo sát trên toàn miền vận tốc gió. Các kết quả tính toán trong bài báo là cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về cải tiến cách lắp đặt của biện pháp điều khiển khí động.

Từ khóa: Vận tốc gió flutter tới hạn, cầu treo dây võng, mô hình mặt cắt, các tấm mỏng, hệ dây cáp, phương pháp bước lặp hiệu chỉnh.

Abstract

Long-span bridge decks are very sensitive to the effects of wind. One of the methods to increase the critical wind speed is to install flaps to create additional aerodynamic forces. This paper presents the calculation of the critical flutter wind of a bridge deck section model with flaps fixed to the hanger by using Revised Step-by-Step method. The Logarithmic resistance and flutter frequency are investigated over the entire wind speed range. The calculation results in the paper are the fundamental for further studies on improving the installation of aerodynamic control method.

Keywords: Critical flutter wind speed, suspension bridges, section model, flaps, hangers, Revised Step-by-Step method.

1. Giới thiệu

Dầm cầu nhịp lớn do kết cấu thanh mảnh nên nhạy cảm với tác dụng của gió. Hiện tượng mất ổn định uốn

xoắn xảy ra khi gió thổi vào dầm cầu được gọi là hiện tượng flutter. Sau sự kiện cầu Tacoma Narrows cũ sụp đổ dưới tác dụng của vận tốc gió không quá lớn, hiện tượng flutter đã nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Đã có rất nhiều công trình nghiên cứu về hiện tượng flutter cũng như các biện pháp nhằm nâng cao vận tốc gió flutter tới hạn cho cầu nhịp lớn.

Để nâng cao ổn định khí động của dầm cầu, có hai biện pháp chính là phương pháp cơ học và phương pháp khí động. Nguyên lý của phương pháp cơ học là lắp thêm vào dầm cầu một hệ phụ, năng lượng dao động của dầm cầu sẽ chuyển thành năng lượng dao động của hệ phụ, từ đó làm tăng tính ổn định của dầm cầu. Một số dạng hệ phụ lắp thêm có thể kể đến như hệ giảm chấn khối lượng (TMD) [1-3], thùng chứa chất lỏng (TLD) [4], ống chứa lỏng dạng chữ U (TLCD) [5-7],... Nguyên lý của phương pháp khí động là lắp thêm vào các tấm mỏng, từ đó xuất hiện các lực khí động bổ sung làm tăng ổn định khí động của dầm cầu. Các tấm có thể được nối khớp hai bên của dầm cầu [8-9], nối khớp một bên của dầm cầu [10], gắn cứng vào dầm cầu [11] hoặc gắn vào dây cáp [11], nối khớp vào phía dưới hoặc phía trên dầm cầu [12-14].

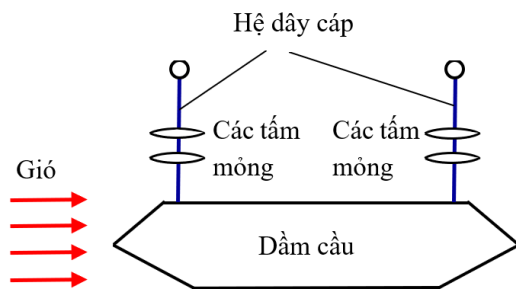
Trong [11], các tác giả đã đề xuất hai phương án bố trí gắn cứng các tấm mỏng, tuy nhiên chỉ phương án gắn cứng các tấm mỏng vào dầm cầu là có các công trình nghiên cứu triển khai tiếp theo [15-17], trong khi đó phương án gắn cứng các tấm mỏng vào hệ dây cáp mặc dù hiệu quả hơn nhưng chưa có các công trình tiếp tục nghiên cứu phát triển. Trong nội dung bài báo này sẽ thiết lập hệ phương trình chuyển động của dầm cầu và các tấm mỏng lắp vào hệ dây cáp của cầu treo dây võng. Phương pháp bước lặp hiệu chỉnh RSBS [18] áp dụng cho trường hợp cầu không lắp thiết bị giảm chấn sẽ được mở rộng tính toán vận tốc flutter tới hạn khi lắp các tấm mỏng vào hệ dây cáp một cách tường minh. Hệ hai phương trình phi tuyến được thiết lập nhằm xác định độ cản Loga và tần số flutter. Hai đại lượng này

không chỉ được khảo sát tại vị trí tới hạn mà còn được nghiên cứu trên toàn miền vận tốc gió (dưới tới hạn và trên tới hạn).

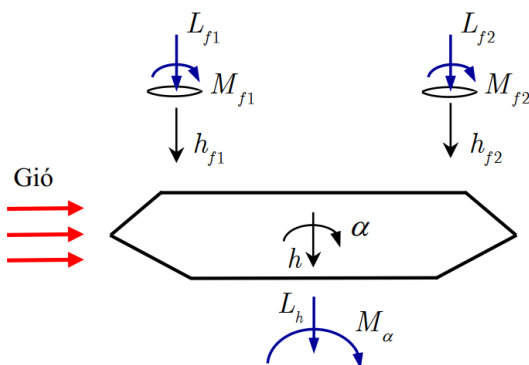
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình tính toán

Đối với cầu nhịp lớn, dao động flutter của dầm cầu thông thường được xét dưới dạng mô hình mặt cắt [19, 20]. Mô hình mặt cắt của dầm cầu được trình bày như trên Hình 1. Dầm cầu có khối lượng trên một đơn vị dài m , momen quán tính khối trên một đơn vị dài I , bề rộng dầm cầu là B . Dầm cầu có hai chuyển vị tương ứng với dao động uốn là h và dao động xoắn là α . Độ cứng chống uốn và độ cứng chống xoắn của dầm cầu lần lượt là k_h và k_α , được xác định thông qua tần số dao động uốn ω_h và tần số dao động xoắn ω_α . Độ cản uốn và độ cản xoắn của dầm cầu là c_h và c_α được xác định thông qua độ cản Lehr uốn ζ_h và độ cản Lehr xoắn ζ_α . Lắp vào hai bên hệ dây cáp các tấm mỏng có bề rộng B_f , khối lượng m_f , số lượng các tấm mỏng trên một nhánh dây cáp là n .



Hình 1. Mô hình mặt cắt dầm cầu lắp các tấm mỏng vào hệ dây cáp



Hình 2. Các chuyển vị và các thành phần lực khí động tác dụng lên dầm cầu, tấm mỏng phía thượng

Sử dụng phương pháp Lagrange II, phương trình chuyển động của hệ mô tả như trên Hình 1 có dạng:

$$(m + 2m_f) \ddot{h} = -k_h h - c_h \dot{h} + L_h + nL_{f1} + nL_{f2} \quad (1)$$

$$[I + 2m_f e^2] \ddot{\alpha} = -k_\alpha \alpha - c_\alpha \dot{\alpha} + M_\alpha + nM_{f1} + nM_{f2} + n(-L_{f1} + L_{f2})e \quad (2)$$

với L_h và M_α lần lượt là lực nâng và momen xoắn do gió tác dụng lên dầm cầu; L_{f1} , M_{f1} , L_{f2} , M_{f2} lần lượt là lực nâng và momen xoắn do gió tác dụng lên các tấm mỏng phía thượng lưu và phía hạ lưu của luồng gió; e là khoảng cách theo phương ngang từ tâm của các tấm mỏng đến tâm của dầm cầu. Các thành phần lực khí động được biểu diễn như trên Hình 2.

Phương trình lực gió tác dụng lên dầm cầu [19, 20]:

$$L_h = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (3)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (4)$$

với U là vận tốc của luồng gió; ρ là khối lượng riêng của không khí; A_i^* , H_i^* ($i = 1, 2, 3, 4$) là các tham số khí động phụ thuộc vào tần số thu gọn K và được xác định bằng thực nghiệm trong thí nghiệm hầm gió với từng mặt cắt cầu cụ thể.

Tần số thu gọn K được xác định:

$$K = \frac{B\omega_F}{U} \quad (5)$$

với ω_F là tần số dao động flutter của dầm cầu.

Các tấm mỏng khi lắp cứng vào dầm cầu sẽ chuyển vị cùng với dao động uốn xoắn của dầm cầu. Tuy nhiên, khi lắp các tấm mỏng vào hệ dây cáp, các tấm mỏng sẽ không có chuyển vị xoắn mà chỉ có chuyển vị lên xuống theo phương đứng cùng với dao động uốn của dầm cầu. Do đó phương trình lực gió tác dụng lên các tấm mỏng không có sự xuất hiện của thành phần chuyển vị xoắn.

Chuyển vị theo phương đứng của các tấm mỏng phía thượng lưu luồng gió:

$$h_{f1} = h - e\alpha \quad (6)$$

Chuyển vị theo phương đứng của các tấm mỏng phía hạ lưu luồng gió:

$$h_{f2} = h + e\alpha \quad (7)$$

Phương trình lực gió tác dụng lên một tấm mỏng lắp vào dây cáp ở phía thượng lưu luồng gió:

$$L_{f1} = \frac{1}{2} \rho U^2 B_f \left[K_f H_{11}^* \frac{\dot{h}_{f1}}{U} + K_f^2 H_{41}^* \frac{h_{f1}}{B_f} \right] \quad (8)$$

$$M_{f1} = \frac{1}{2} \rho U^2 B_f^2 \left[K_f A_{11}^* \frac{\dot{h}_{f1}}{U} + K_f^2 A_{41}^* \frac{h_{f1}}{B_f} \right] \quad (9)$$

Phương trình lực gió tác dụng lên một tấm mỏng lắp vào dây cáp ở phía hạ lưu luồng gió:

$$L_{f2} = \frac{1}{2} \rho U^2 B_f \left[K_f H_{12}^* \frac{\dot{h}_{f2}}{U} + K_f^2 H_{42}^* \frac{h_{f2}}{B_f} \right] \quad (10)$$

$$M_{f2} = \frac{1}{2} \rho U^2 B_f^2 \left[K_f A_{12}^* \frac{\dot{h}_{f2}}{U} + K_f^2 A_{42}^* \frac{h_{f2}}{B_f} \right] \quad (11)$$

Các tham số khí động $H_{11}^*, H_{41}^*, A_{11}^*, A_{41}^*, H_{12}^*, H_{42}^*, A_{12}^*, A_{42}^*$ phụ thuộc vào tần số thu gọn:

$$K_f = \frac{B_f \omega_F}{U} \quad (12)$$

Trong trường hợp các tấm được xem là mỏng, các tham số khí động trên có thể được xác định theo các hàm giải tích như trong [19, 21].

2.2. Tính toán vận tốc gió tới hạn bằng phương pháp bước lặp hiệu chỉnh

Phương pháp bước lặp hiệu chỉnh RSBS (Revised Step-by-Step) đã được Giáo sư M. Matsumoto và các cộng sự đưa ra trong [18]. Đây là phương pháp mạnh dùng để tính vận tốc gió flutter tới hạn của dầm cầu khi không lắp thiết bị giảm chấn. Phương pháp này đã được mở rộng để tính toán vận tốc gió tới hạn khi dầm cầu lắp TMDs [2] và trường hợp các tấm mỏng gắn khớp vào phía dưới dầm cầu [13].

Trong nội dung bài báo này, phương pháp RSBS sẽ được sử dụng để tính toán vận tốc gió flutter tới hạn khi lắp các tấm mỏng vào dây cáp. Trình tự tính toán được cụ thể theo những bước sau:

Bước 1: Giả thiết phương trình dao động xoắn có dạng:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\zeta_F' \omega_F t} \sin \omega_F t \quad (13)$$

$$\left(\zeta_F' = \zeta_F / \sqrt{1 - \zeta_F^2} \right)$$

Bước 2: Thay (13) vào phương trình (1), ta xác định được tỉ số biên độ (h_0 / α_0) và độ lệch pha giữa dao động uốn và dao động xoắn $\Psi_{h\alpha}$.

Bước 3: Biểu diễn lại phương trình (2) dưới dạng chuẩn:

$$\ddot{\alpha} + 2\zeta_F' \omega_F \dot{\alpha} + \omega_F^2 (1 + \zeta_F'^2) \alpha = 0 \quad (14)$$

Cần chú ý rằng, giữa độ cản Lehr và độ cản Loga của dao động flutter có mối liên hệ:

$$\delta_F = 2\pi\zeta_F' / \sqrt{1 - \zeta_F^2} = 2\pi\zeta_F' \quad (15)$$

và

$$1 + \zeta_F'^2 = 1 / (1 - \zeta_F^2) \quad (16)$$

Từ phương trình (2) và (14), ta suy ra hai phương trình (17) và (18) xác định độ cản Loga δ_F và tần số flutter ω_F . Hệ hai phương trình phi tuyến (17), (18) với ba ẩn số là vận tốc gió U , độ cản Loga δ_F và tần số flutter ω_F . Cho U biến thiên với số gia $\Delta U = 0,1 \text{ m/s}$, với mỗi giá trị của vận tốc gió U , ta sẽ có hai phương trình phi tuyến tương ứng hai ẩn số δ_F và ω_F . Sử dụng hàm *fsolve* trong Matlab, ta sẽ xác định được 2 đại lượng này, từ đó vẽ được đồ thị biểu diễn sự biến thiên theo vận tốc gió tương ứng.

3. Ví dụ tính toán

Xét mô hình cầu Great Belt có các thông số như trong Bảng 1 [2].

Bảng 1. Các thông số của cầu Great Belt

Ký hiệu	Trị số	Đơn vị
B	31	m
m	$17,8 \times 10^3$	kg/m
I	$2,173 \times 10^6$	kgm ² /m
ρ	1,225	kg/m ³
ω_h	0,62	rad/s
ω_α	1,17	rad/s
ζ_h	0	
ζ_α	0	

$$\begin{aligned} \delta_F = \pi \left\{ \frac{\rho \omega_F}{2} \left[-B^3 A_1^* + e B_f^2 (H_{11}^* - H_{12}^*) \right] \frac{h_0}{\alpha_0} (-\zeta_F \sin \Psi_{h\alpha} + \cos \Psi_{h\alpha}) + \right. \\ \left. \frac{\rho \omega_F^2}{2} \left[-B^3 A_4^* + e B_f^2 (H_{41}^* - H_{42}^*) \right] \frac{h_0}{\alpha_0} \omega_F \sin \Psi_{h\alpha} + c_\alpha - \frac{\rho B^4}{2} \omega_F A_2^* + \right. \\ \left. \frac{\rho B_f^3}{2} \omega_F e \left[A_{11}^* - A_{12}^* - e (H_{11}^* + H_{12}^*) \right] + \right. \\ \left. \frac{\rho B_f^3}{2} \omega_F \frac{h_0}{\alpha_0} \left[(A_{11}^* + A_{12}^*) (\zeta_F \sin \Psi_{h\alpha} - \cos \Psi_{h\alpha}) - (A_{41}^* + A_{42}^*) \sin \Psi_{h\alpha} \right] \right\} / \left[\omega_F (I + 2m_f e^2) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \omega_F^2 = \left\{ \frac{\rho \omega_F^2}{2} \left[B^3 A_1^* + e B_f^2 (-H_{11}^* + H_{12}^*) \right] \frac{h_0}{\alpha_0} \sin \Psi_{h\alpha} (1 + \zeta_F^2) + \right. \\ \left. \frac{\rho \omega_F^2}{2} \left[-B^3 A_4^* + e B_f^2 (H_{41}^* - H_{42}^*) \right] \frac{h_0}{\alpha_0} (\cos \Psi_{h\alpha} + \sin \Psi_{h\alpha} \zeta_F) + \right. \\ \left. k_\alpha - \frac{\rho B^4}{2} \omega_F^2 A_3^* - e^2 \frac{\rho B_f^2}{2} \omega_F^2 (H_{41}^* + H_{42}^*) + \frac{\rho B_f^3}{2} \omega_F^2 (A_{41}^* - A_{42}^*) e + \right. \\ \left. \frac{\rho B_f^3}{2} \omega_F^2 (A_{11}^* + A_{12}^*) \frac{h_0}{\alpha_0} \sin \Psi_{h\alpha} (1 + \zeta_F^2) - \right. \\ \left. \frac{\rho B_f^3}{2} \omega_F^2 (A_{41}^* + A_{42}^*) \frac{h_0}{\alpha_0} (\cos \Psi_{h\alpha} + \sin \Psi_{h\alpha} \zeta_F) \right\} (1 - \zeta_F^2) / (I + 2m_f e^2) \end{aligned} \quad (18)$$

Các tham số khí động của cầu Great Belt được biểu diễn dưới dạng hàm xấp xỉ đa thức thông qua các giá trị thực nghiệm như trong [2]. Vận tốc gió flutter tới hạn khi không lắp các thiết bị giảm chấn là 40,1m/s [2].

Lắp các tấm mỏng vào dây cáp, với 2 trường hợp $n = 1, n = 2$. Khoảng cách theo phương ngang của hai hệ dây cáp $B_c = 27\text{m}$, độ lệch tâm $e = B_c/2 = 13,5\text{m}$. Các tấm được xét có bề rộng 0,1B [11], làm bằng thép và có khối lượng riêng là 7850kg/m³.

4. Kết quả và thảo luận

Trong mục này sẽ khảo sát hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn với số lượng khác nhau của các tấm trên các nhánh dây.

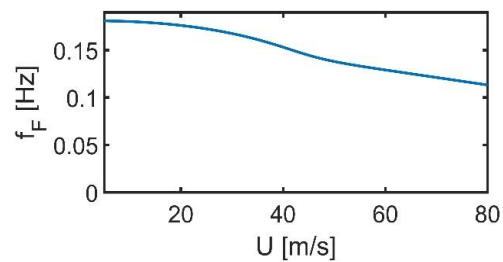
4.1. Số lượng tấm trên một nhánh dây $n = 1$

Đầu tiên, xét trường hợp bố trí một tấm mỏng trên một nhánh dây ($n = 1$). Khảo sát vận tốc gió U biến thiên trong khoảng $[5 \div 80]$ m/s. Sử dụng phương pháp RSBS, ta vẽ được đồ thị biểu diễn sự biến thiên của độ cản Loga và tần số flutter f_F theo vận tốc gió như trên Hình 3 và Hình 4.

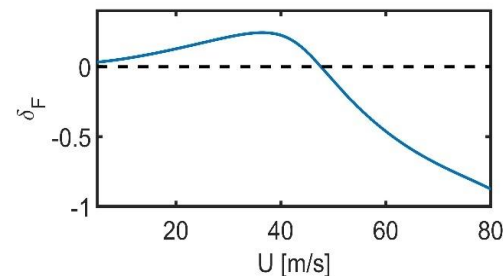
Trong đó:

$$\omega_F = 2\pi f_f \quad (19)$$

Vận tốc gió flutter tới hạn được xác định là $U_{cr}=47,6\text{m/s}$. Hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn là 18,7%. Kết quả này là phù hợp tốt với hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn trong [11] là 21%.



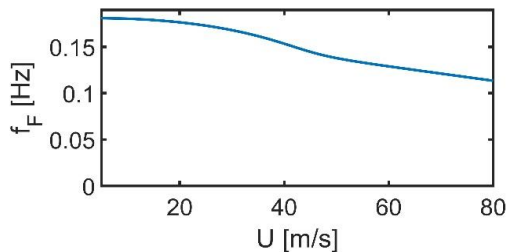
Hình 3. Đồ thị biểu diễn sự biến thiên của f_F theo U với $n=1$



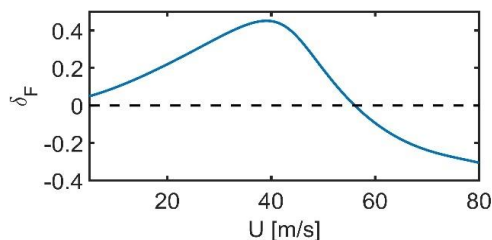
Hình 4. Đồ thị biểu diễn sự biến thiên của δF theo U với $n=1$

4.2. Số lượng tấm trên một nhánh dây $n = 2$

Xét trường hợp số lượng các tấm trên mỗi nhánh dây là $n = 2$. Tiếp tục sử dụng phương pháp bước lặp RSBS, ta xây dựng được đồ thị biểu diễn sự biến thiên của độ cản Loga và tần số flutter theo vận tốc gió như trên Hình 5 và Hình 6.



Hình 5. Đồ thị biểu diễn sự biến thiên của f_F theo U với $n = 2$



Hình 6. Đồ thị biểu diễn sự biến thiên của δ_F theo U với $n = 2$

Với $n = 2$, vận tốc gió flutter tới hạn được xác định $U_{cr} = 56\text{m/s}$. Hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn là 39,7%. Nhận thấy rằng khi số lượng các tấm mỏng trên các nhánh dây khác nhau, hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn thay đổi rõ rệt.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày tính toán vận tốc gió flutter tới hạn khi lắp các tấm mỏng vào hệ dây cáp. Các tấm mỏng cung cấp các lực khí động bổ sung làm tăng ổn định flutter của dầm cầu. Một số vấn đề được giải quyết như sau:

- Phương trình chuyển động của mặt cắt dầm cầu khi lắp các tấm mỏng vào hệ dây cáp được thiết lập theo phương pháp Lagrange II.
- Phương pháp RSBS được mở rộng từ bài toán dao động flutter của dầm cầu không lắp thiết bị giảm chấn cho trường hợp lắp các tấm mỏng vào hệ dây cáp.
- Thiết lập hệ hai phương trình phi tuyến một cách tường minh để xác định độ cản Loga và tần số flutter theo các giá trị của vận tốc gió.
- Sự biến thiên của độ cản Loga và tần số flutter của dầm cầu được xét trên toàn bộ miền vận tốc gió

(vị trí tới hạn, dưới tới hạn và trên tới hạn).

- Các kết quả tính toán phù hợp tốt với tài liệu chuyên ngành công bố, do đó cho thấy sự tin cậy của phương pháp tính đề xuất.

- Sự thay đổi vận tốc gió tới hạn theo số lượng các tấm mỏng trên một nhánh dây được khảo sát. Các kết quả mô phỏng cho thấy việc lắp các tấm mỏng vào hệ dây cáp là một biện pháp hiệu quả, đặc biệt khi tăng số lượng tấm, có thể triển khai cho các công trình trong thực tế.

Một số vấn đề vẫn chưa được giải quyết trong bài báo đó là khảo sát sự hiệu quả của việc lắp các tấm mỏng vào hệ dây cáp khi thay đổi bề rộng của các tấm, bố trí các tấm chỉ về một phía và xét sự thay đổi hiệu quả nâng cao vận tốc gió flutter tới hạn khi thông số của dầm cầu thay đổi (khảo sát Robustness). Những vấn đề này cần được tiếp tục nghiên cứu trong các bài báo tiếp theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.93**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Gu, C.C. Chang, W. Wu, H.F. Xiang (1998), *Increase of critical flutter wind speed of long-span bridges using tuned mass dampers*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.73(2), pp.111-123.
- [2] Nguyen Van Khang, Axel Seils, Tran Ngoc An, Nguyen Phong Dien, Nguyen Trong Nghia (2016), *An improvement of the step-by-step analysis method for study on passive flutter control of a bridge deck*, Archive of Applied Mechanic, Vol.86, pp.557-573.
- [3] Hai-Le Bui, Ngoc-An Tran (2022), *Multi-objective optimal design of TMDs for increasing critical flutter wind speed of briges*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.225, 104992.
- [4] L.M. Sun, Y. Fujino, K. Koga (1995), *A model of tuned liquid damper for suppressing pitching motions of structures*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.24, pp.625-636.
- [5] S. Xue, J. Ko, Y.L. Xu (2000), *Tuned liquid column damper for suppressing pitching motion of structures*, Engineering Structure, Vol.22(11), pp.1538-1551.

- [6] S. Xue, J. Ko, Y.L. Xu (2000), *Optimum parameters of tuned liquid column damper for suppressing pitching vibration of an undamped structure*, Journal of Sound and Vibration, Vol.235 (4), pp.639-653.
- [7] J.-C. Wu, Y.-P. Wang, C.-L. Lee, P.-H. Liao, Y.-H. Chen (2008), *Wind-induced interaction of a non-uniform tuned liquid column damper and a structure in pitching motion*, Engineering Structures, Vol.30(12), pp.3555-3565.
- [8] P. Omenzetter, K. Wilde, Y. Fujino (2000), *Suppression of wind-induced instabilities of a long span bridge by a passive deck-flaps control system: Part I: Formulation*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.87(1), pp.61-79.
- [9] P. Omenzetter, K. Wilde, Y. Fujino (2000), *Suppression of wind-induced instabilities of a long span bridge by a passive deck-flaps control system: Part II: Numerical simulations*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.87(1), pp.81-91.
- [10] D.J.N. Limebeer, J.M.R. Graham, X. Zhao (2011), *Buffet suppression in long-span suspension bridges*, Annual Reviews in Control, Vol.35, pp.235-246.
- [11] Diego Cobo del Arco, Ángel C. Aparicio (1999), *Improving suspension bridge wind stability with aerodynamic appendages*, Journal of Structural Engineering, Vol.125 (12), pp. 1367-1375.
- [12] Truc Huynh, Palle Thoft-Christensen (2001), *Suspension bridge flutter for girders with separate control flaps*, Journal of Bridge Engineering, Vol.6 (3), pp.168-175.
- [13] Tran Ngoc An, Nguyen Van Khang (2015), *Increase of critical flutter wind speed of long-span bridges using passive separate control wings*, Proceedings of the 16th Asian Pacific Vibration Conference, pp.649-654.
- [14] K. Wilde, Y. Fujino, T. Kawakami (1999), *Analytical and experimental study on passive aerodynamic control of flutter of a bridge deck*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.80, pp. 105-119.
- [15] U. Starossek (2016), *Eccentric-wing flutter stabilizer for long-span bridges*, Bridge Structures, Vol.12 (1-2), pp.3-9.
- [16] U. Starossek, T. Ferenczi, J. Priebe (2018), *Eccentric-wing flutter stabilizer for bridges – Analysis, tests, design, and costs*, Engineering Structures, Vol.172, pp.1073-1080.
- [17] U. Starossek, R.T. Starossek (2021), *Parametric flutter analysis of bridges stabilized with eccentric wings*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.211, pp.104566.
- [18] Masaru Matsumoto, Hisato Matsumiya, Shinya Fujiwara, Yasuaki Ito (2010), *New consideration on flutter properties based on step-by-step analysis*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.98, pp.429-437.
- [19] Emil Simiu, Robert H. Scanlan (1996), *Wind effects on structures*, 3rd edition, John Wiley & Sons.
- [20] C. Dyrbye, S.O. Hansen (1999), *Wind loads on structures*, John Wiley & Sons.
- [21] Uwe Starossek (1992), *Brückendynamik - Winderregte Schwingungen von Seilbrücken*, Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg.

Ngày nhận bài:	25/12/2024
Ngày nhận bản sửa:	21/02/2025
Ngày duyệt đăng:	22/02/2025