



PHÂN TÍCH CƠ CHẾ NÂNG CAO ỔN ĐỊNH KHÍ ĐỘNG FLUTTER ĐỐI VỚI KẾT CẤU NHỊP CẦU HỆ TREO VÀ GIẢI PHÁP CẢI TIẾN CÁN H VÁT GIÓ DẠNG CONG LỒM

Nguyễn Văn Mỹ¹, Phạm Duy Hòa², Lê Xuân Huỳnh³

Tóm tắt: Mất ổn định khí động flutter là vấn đề được quan tâm hàng đầu trong thiết kế kết cấu nhịp cầu hệ treo chịu tác động của gió. Một trong những giải pháp ngăn chặn mất ổn định khí động là làm thoát gió tiết diện ngang cầu dạng hộp có gắn các chi tiết khí động khác nhau như cánh vát gió (fairing), tấm lệch dòng (spoiler), rãnh trộn dòng (slot),...; trong đó giải pháp cánh vát gió thường được áp dụng. Xuất phát từ ý tưởng tiết diện mũi gió (wind nose), một giải pháp cải tiến: cánh vát gió dạng cong lõm được phân tích nhằm đưa ra cơ chế nâng cao ổn định khí động và miễn tham số hình học hiệu quả của tiết diện với giải pháp này.

Từ khóa: Mất ổn định khí động flutter; cầu hệ treo; cạnh vát gió; mũi gió; cánh vát gió cong lõm.

Summary: Flutter instability is a great concern in design of cable-supported bridge under wind action. One design solution to prevent this phenomena is streamlining box girder cross-section installed by aerodynamic attachments such as fairing, spoiler, slot,..., in which fairing is commonly applied. Derived from wind nose, a modified solution: concave-bending fairing is analysed so that the increasing mechanism of aerodynamic stability and the effective range of aerodynamic attachment dimension in box girder cross-section are proposed.

Keywords: Cracks; natural modal; stationary wavelet transform (SWT); frequency response function (FRF);

Nhận ngày 9/3/2015, chỉnh sửa ngày 23/3/2015, chấp nhận đăng 31/3/2015



1. Mở đầu

Bên cạnh những ưu điểm vượt trội như khả năng vượt nhịp lớn và hình dáng kiến trúc độc đáo, kết cấu cầu hệ treo (cầu dây văng và cầu treo) có nhược điểm chính là độ cứng nhỏ và nhạy cảm với các nguyên nhân gây dao động. Khi chiều dài nhịp càng lớn, kết cấu nhịp càng dễ uốn và dễ bị dao động kích thích; trong đó dao động do tác động của gió được xem là quan trọng nhất [1].

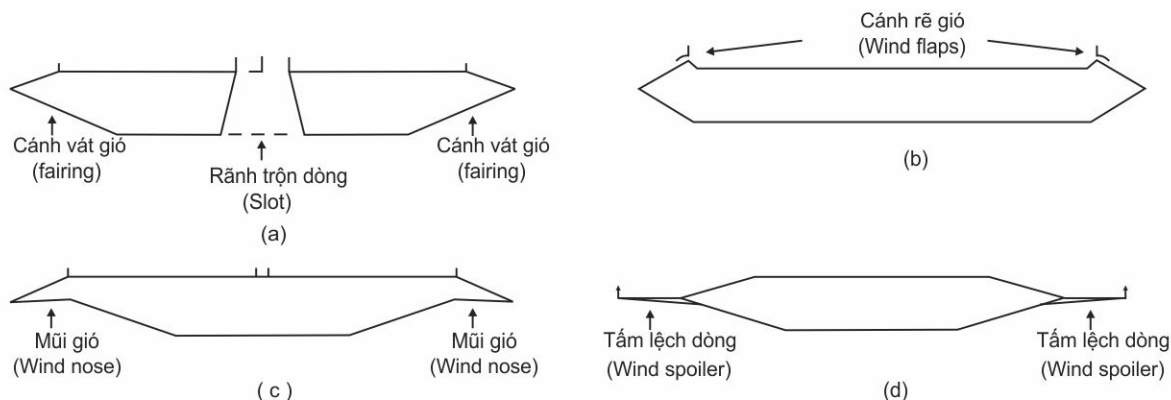
Khi nằm trong dòng gió, kết cấu nhịp có thể dịch chuyển và dao động; sau đó dao động này lại ảnh hưởng đến dòng gió xung quanh kết cấu. Dao động tạo ra bởi sự tương tác này được gọi là dao động tự kích và kết quả là sinh ra các lực khí động (lực-phụ-thuộc-dao-động). Khi kết cấu dịch chuyển, lực khí động tương tác đáng kể và biên độ dao động tự kích phát triển theo thời gian với các đặc tính phân kỳ và gây ra mất ổn định. Hiện tượng này được gọi là mất ổn định khí động và có ba loại mất ổn định xảy ra trong tiết diện ngang cầu là galloping, flutter xoắn và flutter uốn-xoắn; trong đó mất ổn định flutter là mất ổn định đặc trưng nhất của kết cấu nhịp và là một trong những vấn đề được quan tâm hàng đầu trong thiết kế cầu hệ treo nhịp lớn [1,4,5,6,7].

Một trong những giải pháp kiểm soát mất ổn định flutter là mặt cắt ngang cầu cần được tối ưu hóa bằng việc thay đổi hình dáng và gắn các chi tiết khí động. Khi đó, mặt cắt ngang dạng hộp có thể bố trí các chi tiết khí động như cạnh vát gió (fairing), mũi gió (wind nose), cánh rẽ gió (wind flap), tấm lệch dòng (spoiler), rãnh trộn dòng (slot),... như được thể hiện trên Hình 1 [1,3]; trong đó giải pháp cánh vát gió dạng xiên được áp dụng nhiều hơn cả.

¹NCS, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng. E-mail: nvmy@dut.udn.vn.

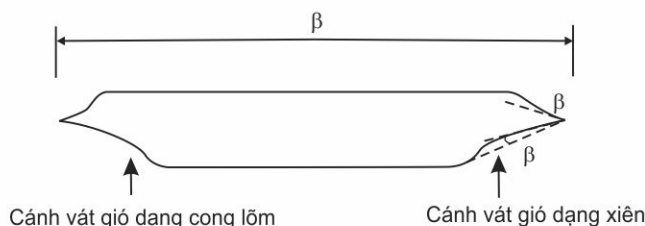
²PGS. TS, Trường Đại học Xây dựng.

³GS. TS, Trường Đại học Xây dựng.



Hình 1. Tiết diện hộp với các chi tiết khí động

Xuất phát từ ý tưởng tiết diện dạng mũi gió (Hình 1c), một giải pháp cải tiến cánh vát gió dạng cong lõm (Hình 2) sẽ được phân tích mất ổn định flutter xoắn và flutter uốn-xoắn nhằm đưa ra cơ chế nâng cao ổn định flutter, nghĩa là làm tăng vận tốc gió tới hạn. Hơn nữa, bằng việc thay đổi góc lõm β của cánh vát gió dạng lõm ứng với các bề rộng cầu B khác nhau, miền hiệu quả của góc β sẽ được xác định. Điều này sẽ giúp ích cho các nhà thiết kế có nhiều lựa chọn tiết diện ngang cầu trong giai đoạn thiết kế sơ bộ.



Hình 2. Tiết diện hộp với fairing cong lõm

Do tính phức tạp của dòng rối và các đặc trưng khí động của hệ kết cấu và dòng gió nên hiện nay chưa có mô hình toán học hoàn chỉnh nào mô tả đầy đủ sự tương tác giữa kết cấu và dòng gió. Thí nghiệm hầm gió là một phương pháp nghiên cứu thực nghiệm cần thiết không thể thiếu trong việc thiết kế cầu hệ treo nhịp lớn khi chịu tác động của gió. Tuy nhiên, đây cũng là phương pháp cần chi phí lớn và chưa có điều kiện thực hiện tại Việt Nam. Do đó, một phương pháp có thể được sử dụng để giải quyết các bài toán về tương tác giữa kết cấu và dòng khí là mô phỏng động lực học chất lưu trên máy tính (Computational Fluid Dynamics-CFD) và có thể gọi là “hầm gió số” (Numerical wind tunnel) [3,7]. Phương pháp CFD-“hầm gió số” được áp dụng để phân tích bài toán mất ổn định flutter trong bài báo này.



2. Dao động flutter

Dao động flutter trong kết cấu nhịp cầu gây ra hiện tượng mất ổn định của hệ gồm nhiều bậc tự do; tuy nhiên trong hầu hết các trường hợp, chỉ hai dạng dao động uốn và xoắn ảnh hưởng chủ yếu đến sự mất ổn định của kết cấu nhịp [1,6,7].

Các tiêu chuẩn đánh giá ổn định flutter tới hạn là (1) Khi năng lượng khí động bằng năng lượng hao tán; (2) Tổng cản của hệ kết cấu và dòng gió bằng không; và (3) Kết cấu dao động với tần số uốn bằng tần số xoắn [1,6,7].

2.1 Flutter xoắn

Phương trình chuyển động flutter xoắn được viết [1,4,6,7]:

$$\ddot{\alpha} + 2\xi_{0\alpha}\omega_{0\alpha}\dot{\alpha} + \omega_{0\alpha}^2\alpha = \frac{1}{2I}\rho U^2 B^2 \left(KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha \right); \quad (1)$$

và có thể được viết lại như sau:

$$\ddot{\alpha} + \left(2\xi_{0\alpha}\omega_{0\alpha} - \frac{1}{2I}\rho U^2 B^2 KA_2^* \frac{B}{U} \right) \dot{\alpha} + \left(\omega_{0\alpha}^2 - \frac{1}{2I}\rho U^2 B^2 K^2 A_3^* \right) \alpha = 0; \quad (2)$$

trong đó I là mômen quán tính khối lượng của kết cấu nhịp; $\xi_{0\alpha}$ là tỷ số cản của kết cấu nhịp ứng với dao động xoắn; $\omega_{0\alpha}$ là tần số vòng dao động riêng của kết cấu nhịp ứng với dao động xoắn; ρ là tỷ trọng của dòng; U là vận tốc dòng; B là bề rộng kết cấu nhịp; K là tần số triết giảm của hệ kết cấu - dòng ($K = \frac{\omega B}{U}$); ω là tần số của hệ kết cấu - dòng; và A_1^* là vi phân khí động, thường được xác định từ thí nghiệm hầm gió. Theo tiêu chuẩn ổn định flutter, có thể thấy rằng nếu A_2^* âm thì tổng cản của hệ kết cấu - khí động dương và kết cấu được xem là không phát sinh mất ổn định flutter xoắn. Ngược lại, nếu A_2^* dương thì tổng cản có thể âm; khi đó mất ổn định flutter xoắn có thể xảy ra và kết cấu có thể bị phá hoại. Vì vậy, điều kiện ổn định tới hạn này có thể biểu diễn bằng phương trình (3); khi đó vận tốc gió tới hạn U_{cr} được xác định.

$$2I\xi_{0\alpha}\omega_{0\alpha} = \frac{1}{2}\rho U_{cr} B^3 K A_2^*; \quad (3)$$

2.2 Flutter uốn-xoắn

Phương trình chuyển động flutter uốn-xoắn được viết [1, 4, 6, 7]:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} + 2\xi_{0\alpha}\omega_{0\alpha}\dot{\alpha} + \omega_{0\alpha}^2\alpha &= \frac{1}{2I}\rho U^2 B^2 \left(K A_1^* \frac{\dot{h}}{U} + K A_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right), \\ \ddot{h} + 2\xi_{0h}\omega_{0h}\dot{h} + \omega_{0h}^2 h &= \frac{1}{2m}\rho U^2 B \left(K H_1^* \frac{\dot{h}}{U} + K H_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right); \end{aligned} \quad (4)$$

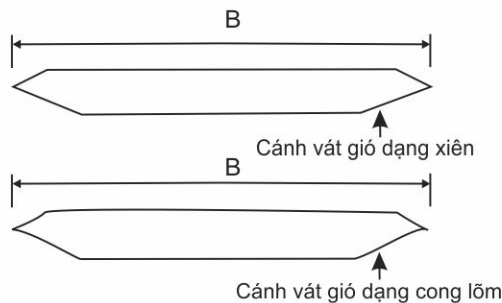
trong đó m là khối lượng phân bố của kết cấu nhịp; ξ_{0h} là tỷ số cản của kết cấu nhịp ứng với dao động uốn; ω_{0h} là tần số vòng dao động riêng của kết cấu nhịp ứng với dao động uốn; và H_1^* là vi phân khí động, thường được xác định từ thí nghiệm hầm gió. Phương trình (4) được giải bằng phương pháp step-by-step của Matsumoto [2]. Theo đó, với trạng thái tới hạn $\omega_f \approx \omega_{0\alpha}$, điều kiện mất ổn định flutter uốn-xoắn là:

$$\begin{aligned} \xi_{0\alpha} - \frac{\rho B^4}{2I} A_2^* - \frac{\frac{\rho B^2}{m} \frac{\rho B^4}{2I} \frac{\omega_f^2}{\omega_h^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_{0\alpha}^2}{\omega_h^2}\right)^2 + 4\xi_h^2 \left(\frac{\omega_{0\alpha}^2}{\omega_h^2}\right)}} \left(A_1^* |H_2^*| \cos\theta_1 + A_1^* |H_3^*| \cos\theta_2 - A_4^* |H_2^*| \sin\theta_1 - A_4^* |H_3^*| \sin\theta \right) \\ \omega_{0\alpha}^2 - \frac{\rho B^4}{I} \omega_f^2 A_3^* - \frac{\frac{\rho B^2}{m} \frac{\rho B^4}{I} \frac{\omega_f^2}{\omega_h^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_{0\alpha}^2}{\omega_h^2}\right)^2 + 4\xi_h^2 \left(\frac{\omega_{0\alpha}^2}{\omega_h^2}\right)}} \left(A_1^* |H_2^*| \sin\theta_1 + A_1^* |H_3^*| \sin\theta_2 + A_4^* |H_2^*| \cos\theta_1 + A_4^* |H_3^*| \cos\theta_2 \right) \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$



3. Phân tích cơ chế nâng cao ổn định flutter của giải pháp cải tiến cánh vát gió cong lõm

Để thấy rõ được cơ chế nâng cao ổn định flutter của giải pháp cánh vát gió dạng cong lõm, hai dạng tiết diện hộp có cánh vát gió dạng xiên và dạng cong lõm (Hình 3) được mô phỏng sự tương tác với dòng gió trong “hầm gió số” theo mô hình tiết diện [3, 7] với các vận tốc dòng khác nhau và được tính toán mất ổn định flutter xoắn và flutter uốn-xoắn. Tỷ lệ mô hình là 1/50, số Reynolds $Re = 1.59 \times 10^6$ và các thông số động lực được thể hiện ở Bảng 1.



Hình 3. Tiết diện hộp có cánh vát gió dạng xiên và dạng cong lõm

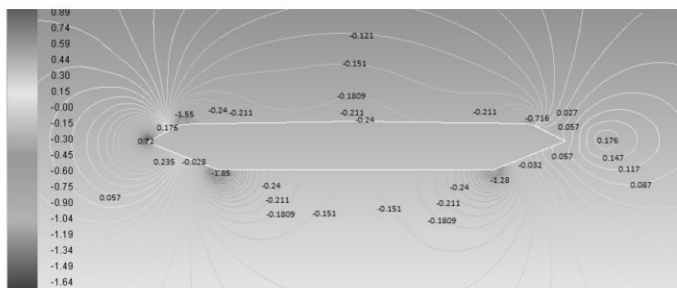
Bảng 1. Các thông số động lực của mô hình của kết cấu cầu treo [8]

Bề rộng (m)	Chiều cao (m)	Khối lượng (kg/m)	Khối lượng quán tính (kgm ² /m)	Bán kính quán tính (m)	Tần số uốn cơ bản (Hz)	Tần số xoắn cơ bản (Hz)
0.432	0.05	4.48	0.09237	0.144	2.11	5.76

Từ kết quả mô phỏng, phổ vận tốc và phổ áp suất xung quanh hai tiết diện cánh vát góc dạng xiên và cánh vát góc dạng cong lõm được thể hiện ở Hình 4 và 5; và biểu đồ hệ số áp suất xung quanh bề mặt trên và dưới tiết diện của hai tiết diện này được thể hiện ở Hình 6.

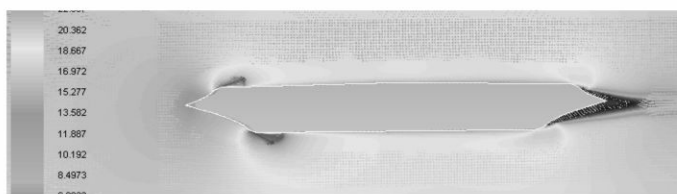


a) Phổ vận tốc

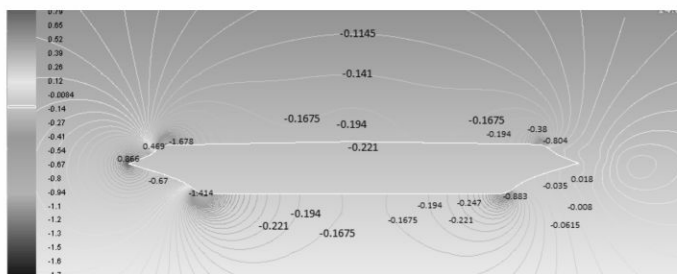


b) Phổ áp suất

Hình 4. Phổ vận tốc và phổ áp suất xung quanh tiết diện có cánh vát góc dạng xiên

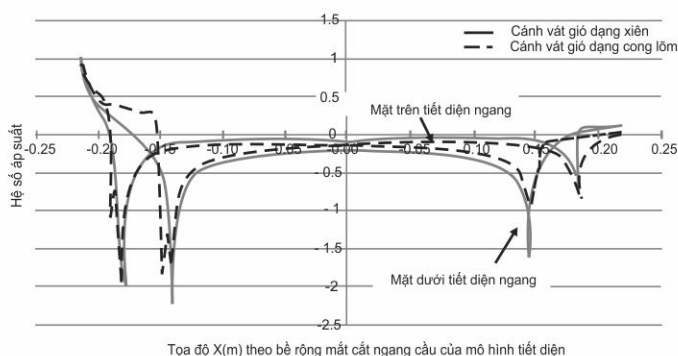


a) Phổ vận tốc



b) Phổ áp suất

Hình 5. Phổ vận tốc và phổ áp suất xung quanh tiết diện có cánh vát góc dạng cong lõm



Hình 6. Biểu đồ hệ số áp suất tại bề mặt của tiết diện có cánh vát góc dạng xiên và cong lõm

Áp dụng các tiêu chuẩn ổn định flutter ở phương trình (3) và (5) và phương pháp lập tần số, vận tốc gió tới hạn đối với tiết diện có cánh vát gió dạng xiên ứng với flutter xoắn và flutter uốn-xoắn là 15,0 và 12,5m/s; và đối với cánh vát gió dạng cong lõm lần lượt là 17,4 và 16,1m/s. Vận tốc flutter tới hạn của tiết diện có cánh vát gió dạng cong lõm cao hơn vận tốc flutter tới hạn của tiết diện có cánh vát gió dạng xiên tương ứng là 16% và 28,4%. Như vậy, tiết diện có cánh vát gió dạng cong lõm nâng cao ổn định flutter tốt hơn so với tiết diện có cánh vát gió dạng xiên.

Dựa vào kết quả mô phỏng được thể hiện từ Hình 4 và 5, giải pháp cánh vát gió nói chung đã cho thấy hạn chế được sự tách dòng tại các mép cuối của cánh vát gió và hình thành dòng khí yếu hơn trên bề mặt tiết diện; do đó lực khí động sẽ nhỏ hơn và làm tăng ổn định flutter. Hơn nữa, kết hợp với việc so sánh các giá trị hệ số áp suất tại các mặt của tiết diện (Hình 6), có thể thấy rằng đối với tiết diện có cánh vát gió dạng cong lõm, dòng khí được gắn chặt hơn trên bề mặt cánh vát gió phía dòng tới và áp lực dòng xoáy khí tác động lên bề mặt trên và dưới tiết diện cũng như áp lực dòng phía đuôi tiết diện trở nên yếu hơn so với tiết diện có cánh vát gió dạng xiên. Vì vậy, nếu dòng khí càng gắn chặt trên bề mặt cánh vát gió thì áp lực trên bề mặt tiết diện sau khi đi qua điểm tách dòng càng giảm đi, kể cả tại vùng đuôi tiết diện. Đây chính là cơ chế ngăn chặn mất ổn định flutter xảy ra. Từ đó, có thể kết luận rằng tiết diện hộp với giải pháp cải tiến cánh vát gió dạng cong lõm đã chứng tỏ đặc tính khí động flutter tốt hơn so với tiết diện hộp cánh vát gió dạng xiên.

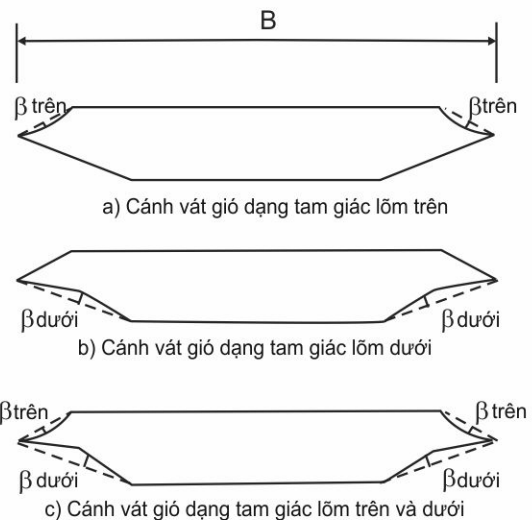


4. Xác định miền hiệu quả góc lõm β của cánh vát gió trong tiết diện hộp

Có hai dạng lõm chủ yếu của cánh vát gió trong tiết diện hộp là cánh vát gió dạng tam giác lõm và cánh vát gió dạng cong lõm với góc lõm β . Bằng việc mô phỏng một chuỗi mô hình với góc lõm β và bề rộng cầu B khác nhau, miền hiệu quả của góc β được xác định nhằm nâng cao vận tốc flutter tới hạn.

4.1 Tiết diện hộp có cánh vát gió dạng tam giác lõm

Hình 7 thể hiện ba giải pháp cánh vát gió dạng tam giác lõm trên, lõm dưới và lõm trên và dưới của tiết diện hộp, trong đó β là góc hợp bởi cánh vát gió dạng xiên (cánh vát gió ban đầu) và cánh vát gió dạng lõm. Ứng với mỗi dạng fairing, các góc $\beta = 0, 2, 4, 6, 8, 10$ và 12 độ và bề rộng cầu $B = 18,1, 21,6$ và $25,1$ m lần lượt được mô phỏng trong “hầm gió số” chịu các dao động xoắn và uốn với tổng số mô hình là 63.



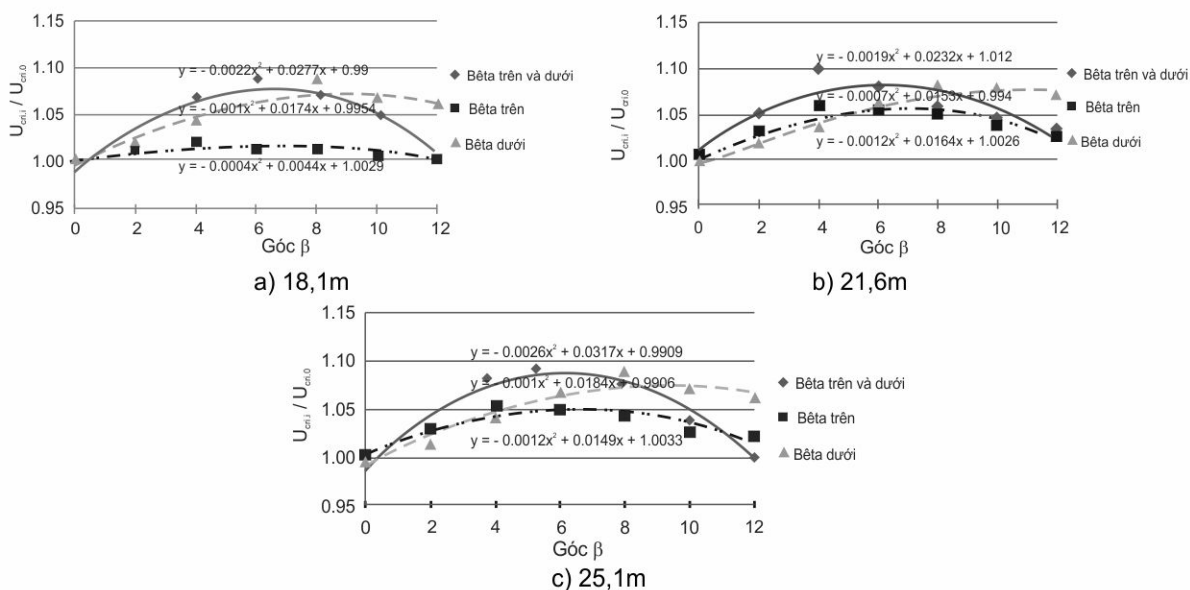
Hình 7. Các dạng cánh vát gió dạng tam giác lõm của tiết diện hộp

Bảng 2. Vận tốc flutter xoắn tới hạn U_{cr} ứng với góc β và bề rộng B

B (m)	Vận tốc flutter tới hạn mô hình U_{cr} (m/s) ứng với $\beta_{trên}$ (độ)						
	0	2	4	6	8	10	12
18,1	18,1	18,5	18,7	18,8	18,3	18,3	18,1
21,6	15,0	15,2	15,4	15,2	15,1	15,1	15,2
25,1	12,0	12,1	12,4	12,2	12,1	12,1	12,0
B (m)	Vận tốc flutter tới hạn U_{cr} (m/s) ứng với $\beta_{dưới}$ (độ)						
	0	2	4	6	8	10	12
18,1	18,1	19,6	20,7	21,4	21,8	21,6	21,4
21,6	15,0	16,1	17,2	17,6	17,9	17,9	17,8
25,1	12,0	12,8	13,8	14,1	14,5	14,2	14,2
B (m)	Vận tốc flutter tới hạn U_{cr} (m/s) ứng với $\beta_{trên}$ và $\beta_{dưới}$ (độ)						
	0	2	4	6	8	10	12
18,1	18,1	18,7	19,7	18,3	19,5	19,1	18,3
21,6	15,0	15,8	16,5	16,4	16,3	15,7	15,1
25,1	12,0	12,4	13,1	13,2	13,0	12,6	12,0

Bảng 3. Vận tốc flutter uốn-xoắn tới hạn U_{cri} ứng với góc β và bề rộng B

B (m)	Vận tốc flutter tới hạn mô hình U_{cri} (m/s) ứng với $\beta_{trên}$ (độ)						
	0	2	4	6	8	10	12
18,1	14,7	14,9	15,0	14,9	14,9	14,8	14,8
21,6	12,0	12,4	12,7	12,7	12,6	12,5	12,3
25,1	9,6	9,9	10,1	10,1	10,0	9,8	9,6
B (m)	Vận tốc flutter tới hạn U_{cri} (m/s) ứng với $\beta_{dưới}$ (độ)						
	0	2	4	6	8	10	12
18,1	14,7	15,1	15,3	15,6	16,0	15,7	15,2
21,6	12,0	12,5	12,6	12,8	13,0	12,8	12,6
25,1	9,6	9,8	10,0	10,2	10,5	10,3	9,9
B (m)	Vận tốc flutter tới hạn U_{cri} (m/s) ứng với $\beta_{trên}$ và $\beta_{dưới}$ (độ)						
	0	2	4	6	8	10	12
18,1	14,7	15,0	15,8	16,0	15,8	15,5	15,2
21,6	12,0	12,6	13,2	12,9	12,7	12,6	12,5
25,1	9,6	9,8	10,4	10,5	10,3	10,0	9,7

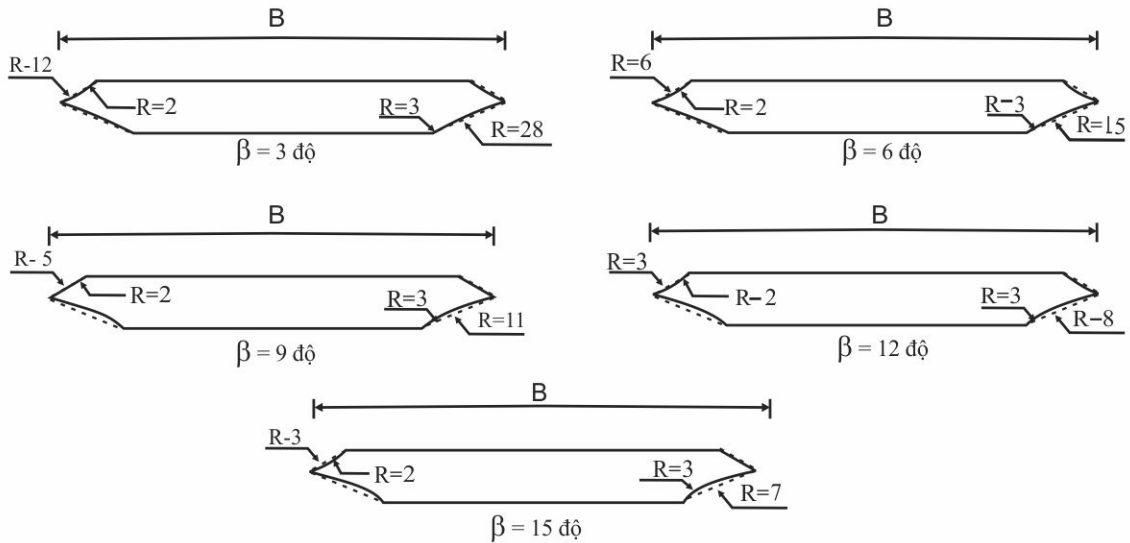

Hình 8. Đường hồi quy $U_{cri,β}/U_{cri,0}$ theo β ứng với B khác nhau

Bảng 2 và 3 thể hiện kết quả tính toán vận tốc flutter xoắn và flutter uốn-xoắn tới hạn cho từng mô hình. Hình 8 thể hiện đường hồi quy biểu diễn quan hệ giữa tỷ lệ $U_{cri,β}/U_{cri,0}$ với β ứng với các bề rộng cầu khác nhau, trong đó $U_{cri,β}$ là vận tốc flutter tới hạn ứng với góc β và $U_{cri,0}$ là vận tốc flutter tới hạn ứng với $\beta=0$ (fairing vát xiên). Từ kết quả, ta có nhận xét như sau:

- (1) Bề rộng cầu càng lớn càng dễ gây mất ổn định flutter;
- (2) Giải pháp cánh vát gió dạng tam giác lõm dưới và cánh vát gió kết hợp dạng tam giác lõm trên và dưới có đặc tính khí động tốt nhất, còn giải pháp cánh vát gió dạng tam giác lõm trên mang lại hiệu quả không cao;
- (3) Miền góc lõm hiệu quả của cánh vát gió dạng tam giác lõm là $5^\circ - 8^\circ$ và vận tốc gió tới hạn tăng khoảng 6% - 8% so với cánh vát gió dạng xiên ban đầu.
- (4) Một cơ chế rất hiệu quả nâng cao ổn định flutter là dòng tới càng gần chặt trên bề mặt cánh vát gió phía dòng tới kết hợp với hạn chế sự tách dòng tại mép cuối cánh vát gió phía dòng tới.

4.2 Tiết diện hộp có cánh vát gió dạng cong lõm

Tiết diện hộp áp dụng giải pháp cánh vát gió dạng cong lõm với góc β được định nghĩa ở Hình 2. Các mô hình với các góc $\beta = 0, 3, 6, 9, 12$ và 15 độ tương ứng với các bán kính cong (Hình 9) và bề rộng cầu $B = 14.6, 18.1, 21.6, 25.1$ và 28.6 m được mô phỏng trong “hầm gió số”. Tổng số mô hình là 30.



Hình 9. Các mô hình tiết diện với các góc β và bán kính cong lõm

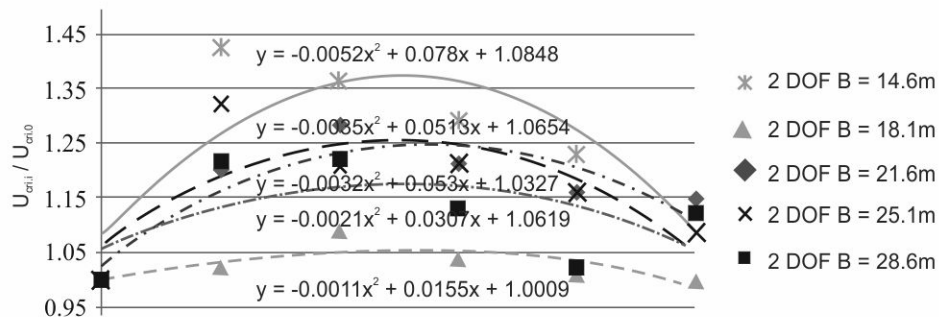
Bảng 4 và 5 thể kết quả tính toán vận tốc flutter xoắn và uốn-xoắn tới hạn phụ thuộc vào góc β và bề rộng B. Hình 10 thể hiện đường hồi quy biểu diễn quan hệ giữa tỷ lệ $U_{\text{cri},\beta}/U_{\text{cri},0}$ với β và bề rộng B khác nhau. Từ các quan hệ này, ta thấy rằng:

Bảng 4. Vận tốc flutter tới hạn xoắn U_{cri} ứng với góc β và bề rộng B

B (m)	Vận tốc flutter tới hạn mô hình U_{cri} (m/s) ứng với β (độ)					
	0	3	6	9	12	15
14,6	23,7	35,6	34,4	34,8	34,7	34,3
18,1	18,1	18,2	19,6	18,8	18,4	17,9
21,6	15,0	15,6	17,4	15,7	15,0	14,8
25,1	12,0	16,1	15,8	15,6	15,1	12,0
28,6	10,5	13,7	13,7	13,7	13,1	11,7

Bảng 5. Vận tốc flutter tới hạn uốn-xoắn U_{cri} ứng với góc β và bề rộng B

B (m)	Vận tốc flutter tới hạn mô hình U_{cri} (m/s) ứng với β (độ)					
	0	3	6	9	12	15
14,6	19,7	28,1	26,9	25,4	24,2	22,4
18,1	14,5	14,8	15,8	15,1	14,7	14,51
21,6	12,5	15,0	16,1	15,2	14,5	14,3
25,1	9,2	12,1	11,1	11,1	10,6	9,9
28,6	8,2	10,0	10,0	9,3	8,4	9,2



Hình 10. Đường hồi quy $U_{\text{cri},\beta}/U_{\text{cri},0}$ theo β ứng với B khác nhau

(1) Bề rộng cầu càng lớn càng dẫn đến mất ổn định flutter;

(2) Miền góc lõm hiệu quả của cánh vát gió dạng cong lõm là $6 - 9^\circ$ và vận tốc gió tới hạn tăng 10 - 38% so với góc cánh vát gió dạng xiên ban đầu. Điều này càng có thấy rằng cánh vát gió dạng cong lõm mang lại hiệu quả cao hơn cánh vát gió dạng tam giác lõm.

(3) Một cơ chế rất hiệu quả nâng cao ổn định flutter là dòng tới càng gần chặt trên bề mặt cánh vát gió phía dòng tới kết hợp với hạn chế sự tách dòng tại mép cuối cánh vát gió phía dòng tới.



5. Kết luận

(1) Đã cho thấy rõ cơ chế ngăn chặn mất ổn định flutter là dòng tới càng gần chặt trên bề mặt cánh vát gió phía dòng tới thì sau khi tách dòng, áp lực dòng lên bề mặt tiết diện và tại vùng đuôi càng yếu đi. Giải pháp cải tiến cánh vát gió dạng cong lõm đã đáp ứng được cơ chế ổn định flutter tốt hơn so với cánh vát gió dạng xiên thông thường vì dòng tới gần chặt trên bề mặt cánh vát gió phía dòng tới đồng thời với việc hạn chế sự tách dòng tại mép cuối cánh vát gió này.

(2) Xác định được miền tham số hình học hiệu quả của tiết diện hộp nhằm nâng cao ổn định flutter cho kết cấu nhịp cầu hệ treo là: Cánh vát gió dạng tam giác lõm: $\beta = 5 - 8^\circ$, vận tốc flutter tới hạn tăng 6÷8%; Cánh vát gió dạng cong lõm: $\beta = 6 - 9^\circ$, vận tốc flutter tới hạn tăng 10÷38%.

Tài liệu tham khảo

1. Fujino Yozo, Siringrino Dionysius (2013), "Vibration Mechanisms and Controls of Long-Span Bridges: A Review", *Structural Engineering International*, DOI: 10.2749/101686613X13439149156886, p. 248-268.
2. Matsumoto Masaru, Matsumiya Hisato, Fujiwara Shinya, Ito Yasuaki (2010), "New consideration on flutter properties based on step-by-step analysis", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 98(2010) p. 429-437.
3. Ge Y.J., Xiang H.F. (2008), "Computational models and methods for aerodynamic flutter of long-span bridges", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96(2008), p. 1912-1924.
4. Miyata Toshio (2003), "Historical view of long-span bridge aerodynamics", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91 (2003), p. 1393-1410.
5. Fujino Y., Kimura K., Tanaka H. (2012), *Wind Resistant Design of Bridges in Japan: Development and Practices*, Springer.
6. Juarado J.A., Hernández S., Nieto F. & Mosquera A. (2011), *Bridge Aeroelasticity: Sensitivity analysis and optimal design*, WIT Press, Great Britain.
7. Xu You-Lin (2013), *Wind Effects on Cable-Supported Bridges*, Wiley.
8. Tongji University (2003), *Wind tunnel study on wind-resistant performance of the Thuan Phuoc bridge in Danang city, Vietnam*.