Nâng cao vận tốc gió tới hạn cho cầu nhịp lớn bằng cách lắp các tấm mỏng lên các dây cáp về một phía của dầm cầu

Trần Ngọc An*, Vũ Thị Khánh Chi, Nguyễn Thiện Thành

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, 484 Lạch Tray, phường Lê Chân, TP Hải Phòng, Việt Nam

Ngày nhận bài 24/3/2025; ngày chuyển phản biện 26/3/2025; ngày nhận phản biện 15/4/2025; ngày chấp nhận đăng 21/4/2025

Tóm tắt:

Việc nâng cao vận tốc gió tới hạn cho cầu nhịp lớn bằng phương pháp khí động nhận được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu. Khác với biện pháp cơ học, biện pháp khí động được thực hiện với sự thay đổi lực gió tác dụng lên cầu, từ đó nâng cao ổn định khí động của cầu tương ứng. Để thay đổi lực gió tác dụng lên cầu, có thể lắp các tấm mỏng vào một phía của dầm cầu hoặc vào dây cáp. Bài báo này tập trung trình bày việc nâng cao ổn định khí động của dầm cầu khi lắp các tấm mỏng vào dây cáp, có xét đến việc bố trí về phía thượng lưu và hạ lưu so với hướng gió. Số lượng các tấm mỏng lắp trên một nhánh dây cũng được khảo sát. Phương pháp bước lặp hiệu chỉnh (RSBS) được sử dụng để tính toán vận tốc gió flutter tới hạn. Các kết quả mô phỏng số cho thấy, việc lắp các tấm mỏng về phía hạ lưu luồng gió cho hiệu quả rõ rệt. Hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn sẽ tăng lên khi số lượng các tấm mỏng trên một nhánh dây tăng. Hướng nghiên cứu của bài báo có thể áp dụng cho các cầu trong thực tế tại Việt Nam và các tính toán có thể mở rộng cho trường hợp mô hình toàn cầu.

Từ khóa: **dây cáp, điều khiển thụ động, hiện tượng flutter, mặt cắt dầm cầu, phương pháp bước lặp hiệu chỉnh, tấm mỏng.**

Chỉ số phân loại: **1.3, 1.8, 2.1**

Improving the critical flutter wind speed of long-span bridges by installing flaps on one side of the hangers

Ngoc An Tran*, Thi Khanh Chi Vu, Thien Thanh Nguyen

Vietnam Maritime University, 484 Lach Tray Street, Le Chan Ward, Hai Phong City, Vietnam

Received 24 March 2025; revised 15 April 2025; accepted 21 April 2025

Abstract:

Improving the critical flutter wind speed for long-span bridges through aerodynamic methods has attracted significant research interest. Unlike mechanical methods, aerodynamic solutions aim to modify the wind forces acting on the bridge, thereby enhancing its aerodynamic stability. These modifications can be achieved by installing flaps either on the bridge deck or on the hangers. This article focuses on improving the aerodynamic stability of the bridge deck by installing flaps on the hangers, considering installation on the upstream and downstream sides relative to the wind direction. The number of flaps installed on a suspender is also investigated. The revised step-by-step method is used to calculate the critical flutter wind speed. Numerical simulation results show that installing the flaps on the downstream side of the wind flow yields a significant improvement. The efficiency of enhancing the critical flutter wind speed increases as the number of flaps on the suspender increases. The computational approach presented in this article can be extended to full-bridge models. The research direction of the paper can be applied to bridges in practice in Vietnam.

Keywords: **bridge deck section, flaps, flutter, hangers, passive vibration control, revised step-by-step method.**

Classification numbers: **1.3, 1.8, 2.1**

**Tác giả liên hệ: Email: antn.ctt@vimaru.edu.vn*

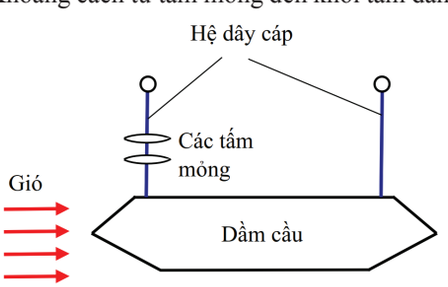
1. Đặt vấn đề

Bên cạnh biện pháp cơ học, việc sử dụng các biện pháp khí động để nâng cao vận tốc gió tới hạn đã được thực hiện trong nhiều nghiên cứu. Ban đầu, biện pháp khí động bằng cách lắp các tấm mỏng được áp dụng trong lý thuyết cánh [1, 2], sau đó được mở rộng áp dụng cho trường hợp dầm cầu chịu tác dụng của gió. Trong nghiên cứu của D.C.D. Arco và cs (1999) [3], các tác giả đề xuất bố trí các tấm mỏng nối cứng vào dầm cầu hoặc dây cáp, các kết quả mô phỏng số được thực hiện với cầu Great Belt. Việc bố trí các tấm mỏng ở hai bên dầm cầu đã được đề cập và tiến hành mô phỏng số với mô hình mặt cắt [4, 5] và mô hình toàn cầu [6, 7]. Trong nghiên cứu của P.D. Huynh và cs (2013) [8], các tác giả tiếp tục phát triển hướng nghiên cứu bố trí các tấm mỏng ở hai bên dầm cầu, các kết quả mô phỏng số cũng như thực nghiệm cho thấy hiệu quả với cả hiện tượng dao động uốn xoắn với luồng gió thổi đều (flutter) và dao động với luồng gió rối (buffeting). Trong nghiên cứu của T. Huynh và cs (2001) [9], các tác giả đưa ra giải pháp bố trí các tấm mỏng ở phía dưới dầm cầu, biện pháp điều khiển là chủ động. Một số nghiên cứu đã cho thấy sự hiệu quả khi lắp các tấm mỏng nối cứng vào dầm cầu, sự hiệu quả nâng cao ổn định khí động sẽ tăng lên khi bố trí độ lệch tâm tăng [10, 11].

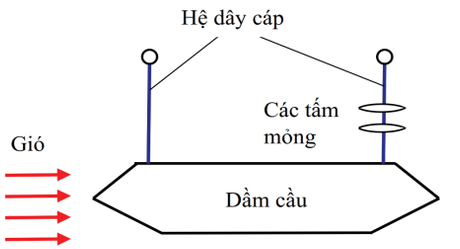
Trong nội dung bài báo này, các tác giả đề xuất một hướng tiếp cận khác, đó là bố trí các tấm mỏng vào hệ dây cáp nhưng chỉ bố trí về một phía. Việc bố trí về một phía sẽ làm giảm số lượng các tấm mỏng phải lắp trên cầu. Vị trí bố trí của các tấm mỏng ở phía thượng lưu và hạ lưu của luồng gió cũng được đề cập. Phương pháp tính toán được sử dụng là phương pháp bước lặp hiệu chỉnh (Revised step-by-step method - RSBS) [12]. Các kết quả tính toán sẽ được áp dụng mô phỏng số cho cầu Great Belt.

2. Mô hình tính toán

Xét mô hình mặt cắt dầm cầu với hai bậc tự do [13, 14]. Dầm cầu có khối lượng và momen quán tính khối trên một đơn vị dài là m và I. Độ cứng chống uốn và chống xoắn của dầm cầu lần lượt là k_h và k_a. Độ cản uốn và độ cản xoắn lần lượt là c_h và c_a. Các chuyển vị của dầm cầu theo phương uốn và xoắn là h và a. Bố trí các tấm mỏng lên dây cáp ở phía thượng lưu (hình 1) và hạ lưu (hình 2) của luồng gió. Các tấm mỏng có bề rộng B_f, khối lượng m_f, số lượng các tấm mỏng bố trí trên một nhánh dây là n. Khoảng cách từ tấm mỏng đến khối tâm dầm cầu là e.



Hình 1. Bố trí các tấm mỏng lên dây cáp ở phía thượng lưu của luồng gió (mô hình A).



Hình 2. Bố trí các tấm mỏng lên dây cáp ở phía hạ lưu của luồng gió (mô hình B).

Để thiết lập hệ phương trình chuyển động của dầm cầu dưới tác dụng của gió khi lắp các tấm mỏng, trong bài báo này sử dụng phương pháp Lagrange.

Đối với mô hình A, hệ phương trình chuyển động có dạng

$$\left(m+m_f\right)\ddot{h}+c_h\dot{h}+k_hh=L_h+nL_f \quad (1a)$$

$$\left[I+m_fe^2\right]\ddot{\alpha}=-k_\alpha\alpha-c_\alpha\dot{\alpha}+M_\alpha+nM_f-neL_f \quad (1b)$$

Đối với mô hình B, hệ phương trình chuyển động có dạng

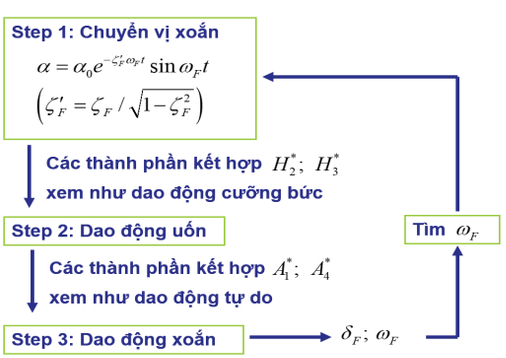
$$\left(m+m_f\right)\ddot{h}+c_h\dot{h}+k_hh=L_h+nL_f \quad (2a)$$

$$\left[I+m_fe^2\right]\ddot{\alpha}=-k_\alpha\alpha-c_\alpha\dot{\alpha}+M_\alpha+nM_f+neL_f \quad (2b)$$

trong đó: L_h và M_a là lực nâng và momen do gió tác dụng lên dầm cầu. Phương trình của L_h và M_a được trình bày trong một số nghiên cứu trước đây [13, 14]. Các hệ số lực gió thông thường được xác định bằng thực nghiệm. Đối với cầu Great Belt, các hệ số này được tính xấp xỉ đa thức như nghiên cứu của N.V. Khang và cs (2016) [15]. Lực nâng và momen khí động tác dụng lên một tấm mỏng được ký hiệu là L_f và M_f và được tính toán như nghiên cứu của U. Starossek (1992) [16].

3. Phương pháp bước lặp hiệu chỉnh

Để tính toán vận tốc gió flutter tới hạn, có ba phương pháp mạnh là phân tích trị riêng phức [13, 14], ký hiệu số phức [16] và bước lặp hiệu chỉnh RSBS [12]. Trong nội dung bài báo này sử dụng phương pháp bước lặp hiệu chỉnh do ưu điểm có thể khảo sát được tần số flutter và độ cản Loga trên toàn miền vận tốc gió. Sơ đồ phương pháp RSBS được trình bày như ở hình 3.



Hình 3. Sơ đồ phương pháp Revised step-by-step method. Step: Bước.

Sử dụng phương pháp bước lặp RSBS, ta xây dựng được hai phương trình đại số phi tuyến tương ứng với ba ẩn số là vận tốc gió U, độ cản Loga δ_F và tần số flutter ω_F. Với mỗi giá trị vận tốc gió U ta tìm được δ_F và ω_F tương ứng.

4. Kết quả và bàn luận

Xét mặt cắt cầu Great Belt với các thông số cho như trên bảng 1. Vận tốc gió flutter tới hạn khi không lắp các tấm mỏng là 40,1 m/s [15].

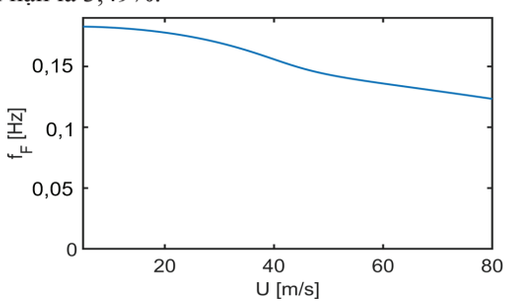
Bảng 1. Các thông số của cầu Great Belt [15].

Thứ tự	Các thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Bề rộng dầm cầu	B	31	m
2	Độ lệch tâm	e	13,5	m
3	Khối lượng trên một đơn vị dài	m	$17,8x10^3$	kg/m
4	Momen quán tính khối trên một đơn vị dài	I	$2,173x10^6$	kgm^2/m
5	Tần số dao động uốn	ω_h	0,62	rad/s
6	Tần số dao động xoắn	ω_α	1,17	rad/s
7	Độ cản Lehr uốn	ζ_h	0	
8	Độ cản Lehr xoắn	ζ_α	0	

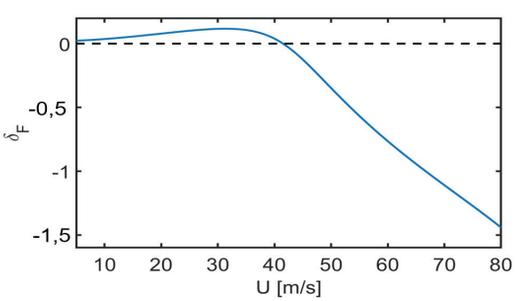
Bố trí các tấm mỏng với bề rộng B_f=0,1B như nghiên cứu của D.C.D. Arco và cs (1999) [3]. Sự hiệu quả của việc lắp các tấm mỏng lên dây cáp ở phía thượng lưu và hạ lưu luồng gió được trình bày trong mục tiếp theo.

4.1. Các tấm mỏng lắp lên dây cáp phía thượng lưu luồng gió - mô hình A

Xét lắp tấm mỏng với số lượng n=1. Sự biến thiên tần số flutter và độ cản Loga được thể hiện như trên hình 4 và 5. Vận tốc gió tới hạn là 41,5 m/s. Hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn là 3,49%.

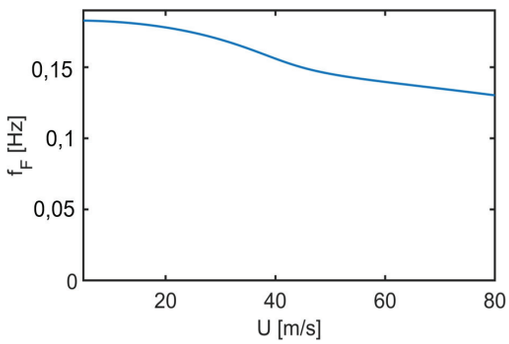


Hình 4. Biến thiên tần số flutter f_F theo vận tốc gió *U*. Mô hình A (n=1).

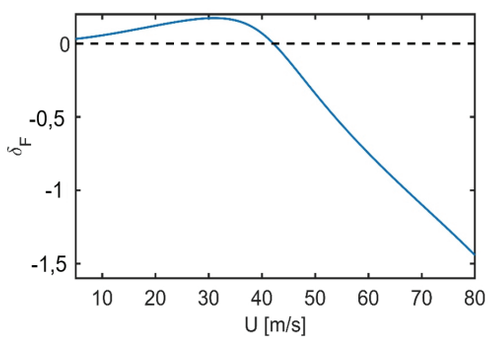


Hình 5. Biến thiên độ cản Loga δ_F theo vận tốc gió *U*. Mô hình A (n=1).

Tiếp tục xét lắp tấm mỏng với số lượng n=2. Sự biến thiên tần số flutter và độ cản Loga được thể hiện như trên hình 6 và 7. Vận tốc gió tới hạn là 42,1 m/s. Hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn là 4,99%.



Hình 6. Biến thiên tần số flutter f_F theo vận tốc gió *U*. Mô hình A (n=2).

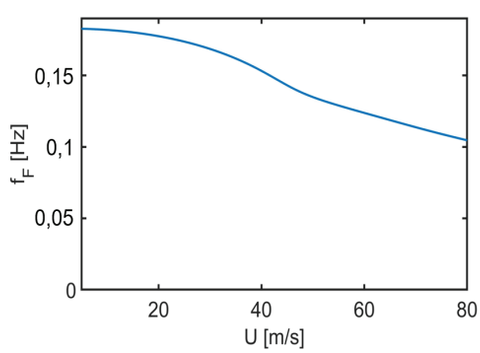


Hình 7. Biến thiên độ cản Loga δ_F theo vận tốc gió *U*. Mô hình A (n=2).

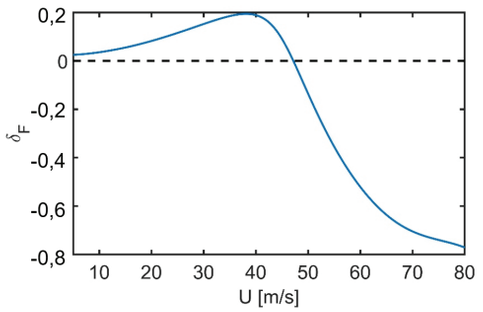
Như vậy, có thể nhận thấy rằng, việc bố trí các tấm mỏng lên dây cáp về phía thượng lưu của luồng gió là không có hiệu quả cao.

4.2. Các tấm mỏng lắp lên dây cáp phía hạ lưu luồng gió - mô hình B

Xét lắp tấm mỏng với số lượng n=1. Sự biến thiên tần số flutter và độ cản Loga được thể hiện như trên hình 8 và 9. Vận tốc gió tới hạn là 47,1 m/s. Hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn là 17,46%.

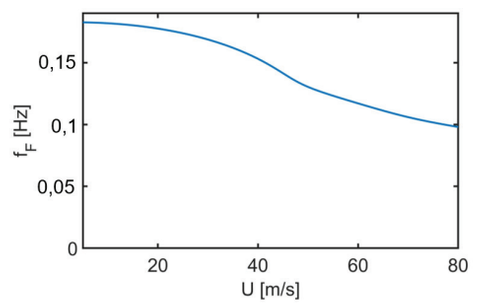


Hình 8. Biến thiên tần số flutter f_F theo vận tốc gió *U*. Mô hình B (n=1).

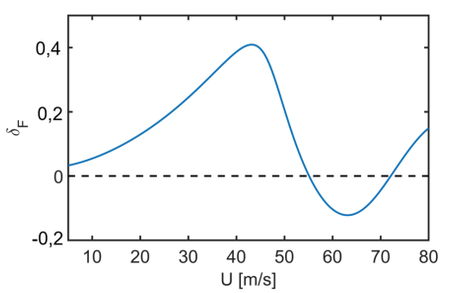


Hình 9. Biến thiên độ cản Loga δ_F theo vận tốc gió *U*. Mô hình B (n=1).

Tiếp tục xét lắp tấm mỏng với số lượng n=2. Sự biến thiên tần số flutter và độ cản Loga được thể hiện như trên hình 10 và 11. Vận tốc gió tới hạn là 55,1 m/s. Hiệu quả nâng cao vận tốc gió tới hạn là 37,41%.



Hình 10. Biến thiên tần số flutter f_F theo vận tốc gió *U*. Mô hình B (n=2).



Hình 11. Biến thiên độ cản Loga δ_F theo vận tốc gió *U*. Mô hình B (n=2).

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày một cách bố trí mới nhằm nâng cao vận tốc gió flutter tới hạn, đó là lắp các tấm mỏng lên dây cáp về một phía của dầm cầu. Các kết quả mô phỏng số cho thấy việc lắp các tấm mỏng lên dây cáp về phía thượng lưu của luồng gió là không hiệu quả. Trong khi đó, lắp các tấm mỏng lên các dây cáp về phía hạ lưu của luồng gió đem lại hiệu quả rõ rệt. Việc lắp các tấm mỏng về một bên sẽ là một giải pháp hữu ích khi số lượng các tấm mỏng bố trí lên dây cáp không quá nhiều. Các nghiên cứu trong bài báo có thể mở rộng áp dụng cho mô hình toàn cầu.

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. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Y.C. Fung (1995), *An Introduction to The Theory of Aeroelasticity*, Dover Publications, Inc., New York, 512pp.

[2] R.L. Bisplinghoff, H. Ashley, R.L. Halfman (1995), *Aeroelasticity*, Dover Publications, Inc., 880pp.

[3] D.C.D. Arco, A.C. Aparicio (1999), "Improving suspension bridge wind stability with aerodynamic appendages", *Journal of Structural Engineering*, **125(12)**, pp.1367-1375, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:12(1367).

[4] P. Omenzetter, K. Wilde, Y. Fujino (2000a), "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*, **87(1)**, pp.61-79, DOI: 10.1016/S0167-6105(00)00016-7.

[5] P. Omenzetter, K. Wilde, Y. Fujino (2000b), "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*, **87(1)**, pp.80-91, DOI: 10.1016/S0167-6105(00)00016-7.

[6] P. Omenzetter, K. Wilde, Y. Fujino (2002a), "Study of passive deck-flaps flutter control system of full bridge model. I: Theory", *Journal of Engineering Mechanics*, **128(3)**, pp.264-279, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:3(264).

[7] P. Omenzetter, K. Wilde, Y. Fujino (2002b), "Study of passive deck-flaps flutter control system of full bridge model. II: Results", *Journal of Engineering Mechanics*, **128(3)**, pp.280-286, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:3(264).

[8] P.D. Huynh, N.N. Trung (2013), "Flutter and buffeting control of long-span suspension bridge by passive flaps: Experiment and numerical simulation", *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, **14(1)**, pp.46-57, DOI: 10.5139/IJASS.2013.14.1.46.

[9] T. Huynh, P.T. Christensen (2001), "Suspension bridge flutter for girders with separate control flaps", *Journal of Bridge Engineering*, **6(3)**, pp.168-175, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:3(168).

[10] U. Starossek, R.T. Starossek (2021), "Parametric flutter analysis of bridges stabilized with eccentric wings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **211**, DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104566.

[11] U. Starossek, T. Ferenczi, J. Priebe (2018), "Eccentric-wing flutter stabiliser for bridges - Analysis, tests, design, and costs", *Engineering Structures*, **172(1)**, pp.1073-1080, DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.056.

[12] M. Matsumoto, H. Matsumiya, S. Fujiwara, et al. (2010), "New consideration on flutter properties based on step-by-step analysis", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **98(8-9)**, pp.429-437, DOI: 10.1016/j.jweia.2010.02.001.

[13] E. Simiu, R.H. Scanlan (1996), *Wind Effects on Structures*, John Wiley & Sons, 3rd Edition, 704pp.

[14] C. Dyrbye, S.O. Hansen (1999), *Wind Loads on Structures*, John Wiley & Sons, 244pp.

[15] N.V. Khang, A. Seils, T.N. An, et al. (2016), "An improvement of the step-by-step analysis method for study on passive flutter control of a bridge deck", *Archive of Applied Mechanics*, **86**, pp.557-573, DOI: 10.1007/s00419-015-1046-z.

[16] U. Starossek (1992), *Brückendynamik-Winderregte Schwingungen von Seilbrücken*, Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg, 262pp.