

ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU DÀI DÒNG NƯỚC MƯA HÌNH THÀNH TRÊN CÁP DÂY VĂNG ĐẾN HIỆU ỨNG GIÓ MƯA KẾT HỢP

Trương Việt Hùng¹, Vũ Quang Việt², Trần Ngọc An²

Tóm tắt: Bài báo nghiên cứu các tác động của tính liên tục của dòng nước mưa hình thành trên bề mặt cáp đến dao động của cáp do hiệu ứng gió-mưa kết hợp gây ra trong cầu dây văng. Các cáp dây văng được mô hình hóa như một mô hình 3D được xây dựng dựa trên lý thuyết tuyến tính về dao động của cáp và thuật toán sai phân trung tâm. Ảnh hưởng của tốc độ gió theo chiều cao cũng được xem xét. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng biên độ dao động của cáp tỷ lệ thuận với chiều dài của dòng nước trên bề mặt cáp nhưng tỷ lệ nghịch với số đoạn của dòng nước. Ảnh hưởng của dao động của cáp do hiệu ứng gió-mưa kết hợp được giảm đáng kể nếu sự liên tục của dòng nước mưa được ngăn chặn.

Từ khóa: Cáp văng; Gió-mưa kết hợp; Dao động; Khí động lực học; Cầu dây văng.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiệu ứng gió mưa kết hợp là một hiệu ứng khí động lực học được phát hiện đầu tiên bởi Hikami và Shiraishi (1988). Đặc điểm cơ bản của hiệu ứng này là hiện tượng các cáp văng trong cầu dây văng dao động với biên độ dao động lớn và tần số dao động thấp trong điều kiện chịu sự ảnh hưởng kết hợp của mưa và gió. Khá nhiều thí nghiệm đã được thực hiện nhằm tìm hiểu nguyên nhân của hiện tượng này như: Matsumoto và nnk (1992), Flamand (1995), Gu và Du (2005), Gu (2009), Gao và nnk (2019), Jing và nnk (2015), Du và nnk (2013), v.v. Các kết quả nghiên cứu cho thấy nguyên nhân xuất phát từ sự hình thành của dòng nước trên bề mặt của cáp trong điều kiện tốc độ gió và mức độ mưa trung bình. Do tác động của gió mà dòng nước này có thể dao động trên bề mặt của cáp và làm gia tăng dao động của cáp. Gần đây, nghiên cứu của Du và nnk (2013) cho thấy rằng các lực khí động học tác dụng lên cáp và dòng nước thay đổi rất lớn khi dòng nước dao động trên cáp và các tác giả cho rằng đây có thể là cơ chế dao động của hiện tượng gió mưa kết hợp.

Bên cạnh các thực nghiệm, các mô hình lý thuyết cũng được nhiều tác giả xây dựng nhằm

giải thích cơ chế của hiện tượng gió mưa kết hợp. Mô hình 2D được sử dụng đầu tiên với một số nghiên cứu điển hình như: lý thuyết hai-bậc-tự-do (Yamaguchi 1990) và lý thuyết một-bậc-tự-do (Xu và Wang 2003, Wilde và Witkowski 2003, Trương và Vũ 2019). Trong các nghiên cứu này, dòng nước được giả thiết là dao động với cùng tần số dao động của cáp. Khi dòng nước dao động trên cáp, hướng gió cũng như vận tốc gió thực tác dụng lên cáp sẽ thay đổi liên tục. Điều này khiến cho các lực kéo và lực đẩy khí động học tác dụng lên cáp cũng thay đổi liên tục. Trong một số trường hợp, hệ số cản khí động lực học âm có thể xuất hiện làm cho cáp dao động với biên độ dao động lớn. Limaitre và nnk. (2007) dựa trên lý thuyết bôi trơn đã xây dựng mô hình 2D sự hình thành của nước mưa trên bề mặt cáp như một màng nước và nghiên cứu ảnh hưởng của sự biến đổi của màng nước này đến dao động của cáp. Mô hình dạng màng nước của Limaitre được Bi và nnk. (2013, 2018) phát triển để hình thành mô hình dao động phương trình kép giữa dao động của cáp và dao động của màng nước trên bề mặt cáp. Gần đây, mô hình cáp 3D được nhiều tác giả sử dụng để nghiên cứu hiện tượng gió mưa kết hợp. Một số nghiên cứu điển hình Li et al. (2007, 2009, 2016), v.v. Trong các nghiên cứu này, cáp

¹ Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi

² Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

được xem như là tuyệt đối thẳng và có vận tốc gió như nhau trên toàn bộ chiều dài cáp. Rõ ràng việc giả thuyết này chưa phù hợp với sự làm việc thực tế của cáp dây văng bởi 2 lý do: thứ nhất là cáp văng không thẳng tuyệt đối do ảnh hưởng của tải trọng bản thân của nó và thứ hai là vận tốc gió sẽ tăng theo khi độ chênh cao của điểm đang xét với mặt đất tăng lên. Trương và Vũ (2019) đã xây dựng mô hình cáp 3D có xét đến sự thay đổi vận tốc gió tác động lên cáp do sự thay đổi chiều cao địa hình. Các tác giả cho thấy rằng với các cáp trong cầu dây văng thông thường thì việc thay đổi vận tốc gió theo chiều cao là không thể bỏ qua trong nghiên cứu hiện tượng dao động do gió-mưa kết hợp.

Tuy nhiên, trong tất cả các nghiên cứu đã được xuất bản, ảnh hưởng của chiều dài dòng nước hình thành trên cáp đến hiệu ứng gió-mưa kết hợp chưa được xem xét. Một thực tế cho thấy rằng, với chiều dài rất lớn của một cáp văng (có thể lên đến hơn 100m) thì dòng nước chỉ có thể hình thành ở một phần của cáp chứ không phải là toàn bộ cáp. Việc hình thành trong một đoạn cụ thể của dòng nước trên cáp ảnh hưởng thế nào đến dao động của cáp là một vấn đề quan trọng cần được xem xét cụ thể. Điều này có thể cung cấp nhiều dữ liệu

khoa học quan trọng trong việc thiết kế bề mặt của cáp giúp ngăn chặn sự hình thành các dòng nước mưa, qua đó ngăn chặn hiện tượng dao động do hiệu ứng gió-mưa kết hợp.

Bài báo này trình bày ảnh hưởng của sự phân bố dòng nước mưa hình thành trên cáp đến hiệu ứng gió-mưa kết hợp. Mô hình cáp sử dụng trong nghiên cứu này là mô hình 3D được Trương và nnk (2019) xây dựng có xét đến sự thay đổi vận tốc gió theo độ chênh cao so với mặt đất. Các hàm lực khí động lực học tác dụng lên cáp do Trương và Vũ (2019) thiết lập được sử dụng cho mô hình cáp. Kết quả tính toán cho thấy rằng biên độ dao động của cáp tỷ lệ thuận với chiều dài của dòng nước trên bề mặt cáp nhưng tỷ lệ nghịch với số đoạn của dòng nước. Ảnh hưởng của dao động của cáp do hiệu ứng gió-mưa kết hợp được giảm đáng kể nếu sự liên tục của dòng nước mưa được ngăn chặn.

2. MÔ HÌNH 3D CHO HIỆU ỨNG GIÓ-MƯA KẾT HỢP TRONG CÁP

2.1. Các hàm lực khí động lực học

Trương và Vũ (2019) dựa trên lý thuyết một-bậc-tự-do đã xây dựng công thức lực khí động lực học tác dụng lên một phân tố cáp theo thời gian như sau:

$$F_{damp} = \frac{D\rho}{2} \begin{pmatrix} S_1 + S_2 \sin(\omega t) + S_3 \sin(2\omega t) + S_4 \sin(3\omega t) + S_5 \sin(4\omega t) + \\ S_6 \cos(\omega t) + S_7 \cos(2\omega t) + S_8 \cos(3\omega t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$F_{exc} = \frac{D\rho}{2} \begin{pmatrix} X_1 + X_2 \sin(\omega t) + X_3 \sin(2\omega t) + X_4 \sin(3\omega t) + X_5 \sin(4\omega t) + \\ X_6 \cos(\omega t) + X_7 \cos(2\omega t) + X_8 \cos(3\omega t) + X_9 \cos(5\omega t) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

trong đó D và ω là đường kính và tần số góc dao động riêng của cáp; ρ là khối lượng riêng của không khí; S_i và X_i là các tham số được cho

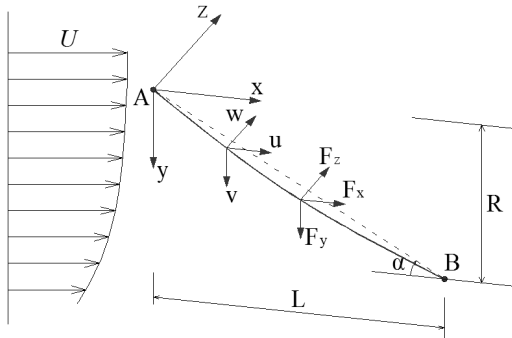
trong tài liệu của Trương và Vũ (2019). Khi đó phương trình dao động của phân tố cáp được viết thành:

$$\ddot{y} + \left(2\xi_s \omega + \frac{F_{damp}}{m} \right) \dot{y} + \omega^2 y + \frac{F_{exc}}{m} = 0, \quad (3)$$

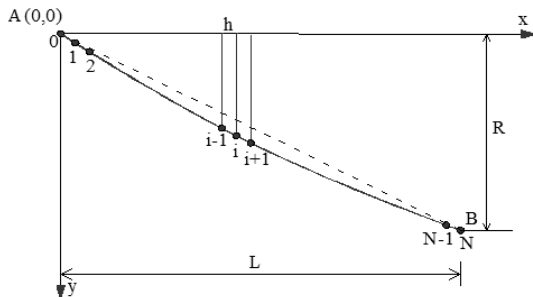
trong đó ξ_s là hệ số cản của cáp; m là khối lượng riêng của cáp theo chiều dài. Chi tiết việc

thiết lập công thức (1) và (2) được cho trong tài liệu của Trương và Vũ (2019).

2.2. Mô hình cáp 3D cho hiệu ứng gió-mưa kết hợp



Hình 1. Mô hình 3 – D của cáp



Hình 2. Mô hình chia cáp thành các phần tử

Mô hình cáp văng được giả thiết là cáp xiên có 2 đầu được cố định như trong hình 1. Bằng việc sử dụng lý thuyết tuyến tính cho dao động của cáp do Irvine (1981) đề xuất và thuật toán sai phân trung tâm, Trương và nnk (2019) đã xây dựng phương trình dao động của cáp bằng cách chia chiều dài cáp thành N phần có chiều dài chiếu theo phương ngang là như nhau (xem hình 2) và thu được phương trình sau:

$$[M] \frac{d^2 \{u\}}{dt^2} + ([C] + [F_{damp}]) \frac{d\{u\}}{dt} + [K] \{u\} = \{F_{exc}\}, \quad (4)$$

trong đó $[K]$, $[M]$ và $[C]$ là các ma trận độ cứng, khối lượng và cản được cho trong phụ lục; $\{u\} = [u_1, v_1, \dots, u_i, v_i, \dots, u_{N-1}, v_{N-1}]^T$ là vec tơ chuyển vị với u_i và v_i là chuyển vị của phân tố cáp thứ i theo phương x và phương y ; $[F_{damp}]$ và $\{F_{exc}\}$ là ma trận và vec tơ lực khí động học tác dụng lên cáp được cho trong phụ lục với $F_{x,damp}(y_i, t)$, $F_{x,exc}(y_i, t)$ và $F_{y,damp}(y_i, t)$, $F_{y,exc}(y_i, t)$ là thành phần cản và gây ra dao động của lực khí động học tác dụng lên phân tố cáp

thứ i tương ứng theo phương x và phương y tại thời điểm t . Chi tiết hàm $[F_{damp}]$ và $\{F_{exc}\}$ có thể xem trong tài liệu Trương và nnk (2019) có xét đến sự thay đổi vận tốc gió theo chiều cao, ảnh hưởng của dao động của dòng nước trên bề mặt cáp đến vận tốc và hướng gió thực tác dụng lên cáp. Phương trình (4) là hệ phương trình vi phân bậc 2 nên để giải hệ phương trình này phương pháp Runge-Kutta bậc 4 được sử dụng.

3. ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU DÀI DÒNG NƯỚC MƯA ĐẾN DAO ĐỘNG CỦA CÁP

Để đánh giá ảnh hưởng của chiều dài dòng nước trên cáp đến dao động do hiệu ứng gió-mưa kết hợp, mô hình cáp trong nghiên cứu của Trương và nnk (2019) sẽ được sử dụng. Cáp có chiều dài $L_{cap} = 330.4$ (m), khối lượng cáp là $m = 81.167$ (kg/m), đường kính cáp: $D = 0.114$ (m), tần số dao động riêng đầu tiên của cáp là $f = 0.42$ (Hz) và hệ số cản của cáp là $\zeta_s = 0.1\%$. Góc nghiêng của cáp là 27.8^0 và hướng gió tác động vào cáp là 35^0 . Hiện ứng dao động do gió-mưa kết hợp được giả thiết ở dải vận tốc gió từ 6.5 đến 12.5 (m/s) và đạt biên độ dao động lớn nhất ở 9.5 (m/s). Hệ số cản và hệ số nâng được xác định theo công thức do Trương và nnk (2019) đề xuất như sau:

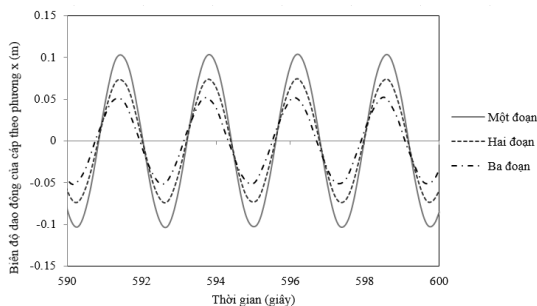
$$C_D = -1.6082\phi_e^3 - 2.4429\phi_e^2 - 0.5065\phi_e + 0.9338, \quad (5)$$

$$C_L = 1.3532\phi_e^3 + 1.8524\phi_e^2 + 0.1829\phi_e - 0.0073. \quad (6)$$

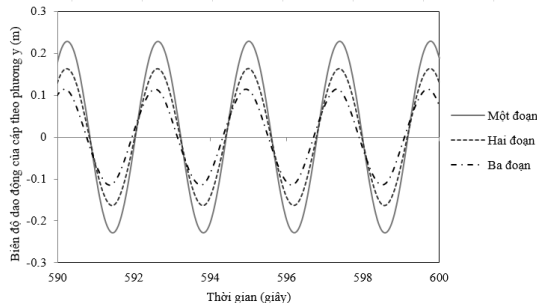
Như đã đề cập ở trên, một trong những lý do quan trọng nhất đối với hiệu ứng gió-mưa kết hợp là sự hình thành của dòng nước mưa trên bề mặt cáp. Trường hợp nguy hiểm nhất là trường hợp trong đó dòng nước mưa được tạo thành trên toàn bộ chiều dài cáp và tốc độ gió xoay quanh giá trị tới hạn của hiệu ứng gió mưa kết hợp (Trương và nnk, 2019). Tuy nhiên, trên thực tế, vì một số lý do, các dòng nước mưa có thể chỉ xuất hiện ở một hoặc một số đoạn trên chiều dài cáp. Để đánh giá ảnh hưởng của vấn đề này, chúng ta sẽ tiến hành xem xét ba trường hợp sau. Trong trường hợp đầu tiên, dòng nước mưa chỉ tạo thành một đường liên tục trên bề mặt cáp và xuất hiện ở trung tâm của cáp để có được biên độ cáp lớn nhất. Chiều dài của dòng nước mưa hình thành trên cáp thay đổi từ 10% đến 100% chiều dài cáp. Vận tốc gió, được coi là không đổi trên toàn bộ

cáp, bằng với tốc độ gió tới hạn của hiện tượng gió-mưa kết hợp (9,5 m/s). Trong trường hợp thứ 2, giả thiết rằng cáp được chia thành 2 phần bằng nhau và trên mỗi phần sẽ hình thành một dòng nước mưa có điểm giữa trùng với điểm giữa của phần cáp đó. Tương tự cho trường hợp thứ 3 khi dòng nước mưa trên cáp gồm 3 đoạn khác nhau.

Hình 3 và 4 cho thấy biên độ dao động cáp theo thời gian khi dòng nước được hình thành trên 50% và 80% toàn bộ cáp. Có thể thấy, dạng dao động của cáp trong cả ba trường hợp là tương tự nhau. Trong hình 3, khi tổng chiều dài của dòng nước bằng khoảng 50% chiều dài cáp, biên độ dao động tối đa của cáp theo phương đứng (trục y) trong ba trường hợp lần lượt là 21,55 cm, 17,96 (cm) và 12,86 (cm). Các giá trị này tăng lên lần lượt là 30,77 (cm), 28,91 (cm) và 23,45 (cm) khi dòng nước xuất hiện trên 80% toàn bộ cáp. Như vậy, biên độ dao động tối đa của cáp trong trường hợp thứ nhất (dòng nước liên tục) lớn hơn trong trường hợp thứ hai (dòng nước gồm 2 đoạn), và trong trường hợp thứ hai thì lớn hơn trong trường hợp thứ ba (dòng nước gồm 3 đoạn). Sự khác biệt này là rõ ràng khi dòng nước chỉ xuất hiện trên khoảng 50% toàn bộ cáp và là khá nhỏ khi dòng nước xuất hiện trên 80% chiều dài của cáp.

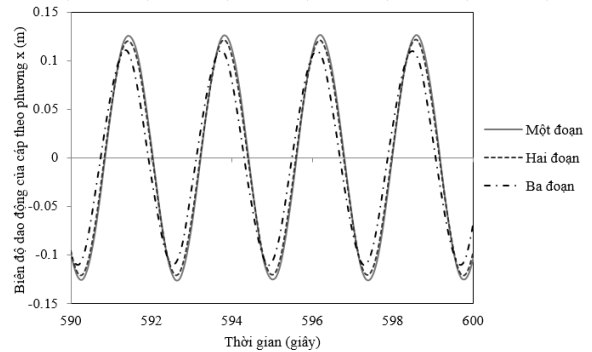


(a) Theo phương trục x

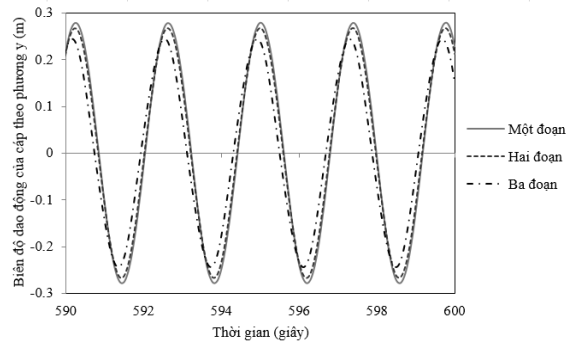


(b) Theo phương trục y

Hình 3. Dao động tại điểm giữa của cáp với chiều dài của dòng nước trên cáp là 50%

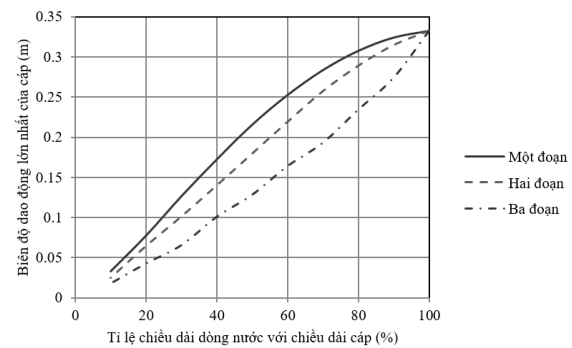


(a) Theo phương trục x



(b) Theo phương trục y

Hình 4. Dao động tại điểm giữa của cáp với chiều dài của dòng nước trên cáp là 80%



Hình 5. Biên độ dao động lớn nhất của cáp theo chiều dài dòng nước

Hình 5 trình bày mối quan hệ của tổng biên độ cáp và tỷ lệ chiều dài dòng nước hình thành trên cáp. Rõ ràng, biên độ dao động lớn nhất của cáp tỷ lệ thuận với chiều dài của dòng nước. Ví dụ trong trường hợp thứ hai, khi dòng nước hình thành trên cáp gồm 2 đoạn, biên độ dao động lớn nhất của cáp lần lượt là 6.43, 13.99, 21.91 và 28.91 (cm) tương ứng với tổng chiều dài dòng nước hình thành trên cáp chiếm 20, 40, 60 và 80% chiều dài cáp. Tuy nhiên, biên độ dao động lớn nhất của cáp tỷ lệ nghịch với số đoạn dòng nước hình thành nếu như tổng chiều dài của dòng nước trên cáp là như

- Li, S., Gu, M., Chen, Z. (2007), “Analytical model for rain-wind-induced vibration of three-dimensional continuous stay cable with quasi-moving”, Engineering Mechanics, 24(6), tr. 7-14 (in Chinese).
- Li, S., Gu, M., Chen, Z. (2009), “An analytical model for rain-wind-induced vibration of three-dimensional continuous stay cable with actual moving rivulet”, Journal of Human university (Natural Sciences), 36, tr. 1-7.
- Li, S., Wu, T., Li, S., Gu, M. (2016), “Numerical study on the mitigation of rain-wind induced vibrations of stay cables with dampers”, Wind and Structures, 23(6), tr. 615-639.
- Matsumoto, M., Shiraishi, N., Shirato, H. (1992), “Rain wind induced vibration of cables of cable-stayed bridges”, J. Wind Rng. Ind. Aerodyn, 43, tr. 2011-2022.
- Truong, V.H., Vu, Q.V. (2019), “A 2D model for analysis of rain-wind induced vibration of stay cables”, Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE), 13(2), tr. 33-47.
- Truong, V.H., Vu, Q.V., Vu, Q.A. (2019), “A three-dimensional model for rain-wind induced vibration of stay cables in cable stayed bridges”, Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE. *Bản xem trước*.
- Wilde, K., Witkowski, W. (2003), “Simple model of rain-wind-induced vibrations of stayed cables”, J. Wind Rng. Ind. Aerodyn, 91, tr. 873-891.
- Xu, Y. L., Wang, L. Y. (2003), “Analytical study of wind-rain-induced cable vibration: SDOF model”, J. Wind Rng. Ind. Aerodyn, 91, tr. 27-40.
- Yamaguchi, H. (1990), “Analytical study on growth mechanism of rain vibration of cable”, J. Wind Rng. Ind. Aerodyn, 33, tr. 73-80.

Abstract:

EFFECTS OF THE RIVULET CONTINUITY ON RAIN-WIND INDUCED VIBRATION OF CABLE STAYS

This paper investigates the effects of the rivulet continuity on the cable surface on rain-wind induced vibration of cable stays in cable-stayed bridges. The stay cable is modeled as a 3D model which is developed using the linear theory of cable vibration and the central difference algorithm. The effects of wind velocity according to the height are also considered. The results prove that the amplitude of the cable vibration ratios with the length of the rivulet on the cable surface but it is inversely proportional with the number of parts of the rivulet length. The effects of rain-wind induced vibration on the cable vibration can be significantly reduced if the continuity of the rivulet is prevented.

Keywords: Cable stay; Rain-wind induced vibration; Vibration; Aerodynamic; Cable-stayed bridge.

Ngày nhận bài: 04/10/2019

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2019