

GIẢM CHẤN TỰ THÂN TRONG CÁP CẦU DÂY VĂNG Ở VIỆT NAM - THÍ NGHIỆM HIỆN TRƯỜNG VÀ ĐÁNH GIÁ SỐ LIỆU ĐO

PGS.TS. NGUYỄN PHƯƠNG DUY*

Bộ môn Cầu-Hầm, Trường Đại học Giao thông vận tải

TS. TRẦN VIỆT HƯNG

Bộ môn Kết Cấu, Trường Đại học Giao thông vận tải

GS.TS. ĐỖ ANH TÚ

Bộ môn Cầu-Hầm, Trường Đại học Giao thông vận tải

** Email: npduy@utc.edu.vn*

Phản biện: PGS.TS. Chu Thanh Bình

PGS.TS. Nguyễn Hữu Thuận

TÓM TẮT:

Các dao động kích thích trên cáp văng, như rung xoáy, galloping hoặc dao động do mưa - gió kết hợp, có thể làm tăng nguy cơ mỏi và giảm tuổi thọ khai thác của hệ thống neo cáp cầu dây văng. Hầu hết các tiêu chuẩn quốc tế hiện nay sử dụng số Scruton (S_c) làm chỉ tiêu thiết kế chính, vì thông số này liên quan trực tiếp đến suy giảm logarit tự thân của bó cáp. Tuy nhiên, giá trị suy giảm logarit (δ) nội tại phụ thuộc mạnh vào đặc tính của hệ kết cấu và điều kiện môi trường, dẫn đến khó xác định chính xác bằng các tính toán lý thuyết. Do đó, thử nghiệm hiện trường luôn được đề xuất là giải pháp đánh giá phù hợp nhất.

Bài báo trình bày chương trình đo đặc độ giảm chấn tự thân tại hiện trường trên hai cầu dây văng được xây dựng gần đây tại Việt Nam, nơi có hệ cáp đa dạng về chiều dài, tần số dao động riêng, trọng lượng đơn vị và góc nghiêng. Từ dữ liệu thu được, nhóm tác giả so sánh với mô hình dự báo đơn giản phụ thuộc duy nhất vào chiều dài bó cáp. Nghiên cứu cũng đánh giá hiệu quả của các hệ thống giảm chấn mat sát được lắp đặt trên các công trình - là giải pháp giảm ảnh hưởng dao động trên các bó cáp văng được áp dụng phổ biến tại nhiều cầu dây văng mới ở Việt Nam.

Từ khóa: Giảm chấn tự thân; Cầu dây văng; Thử nghiệm giảm chấn; Giảm chấn ma sát.

ABSTRACT:

Wind-induced vibrations in stay cables - such as vortex shedding, galloping, or combined rain-wind excitation - can significantly increase fatigue risks and reduce the service life of the cable-anchorage systems in cable-stayed bridges. Most current international standards adopt the Scruton number (S_c) as the primary design indicator, as it is directly related to the cable's intrinsic logarithmic decrement. However, the intrinsic damping (δ) is strongly influenced by both structural characteristics and environmental conditions, making it difficult to predict accurately through analytical methods. Therefore, field testing is consistently recommended as the most reliable approach for evaluating actual stay cable damping.

This paper presents an in-situ measurement campaign on the inherent damping of stay cables on two recently constructed cable-stayed bridges in Vietnam, featuring a wide range of cable lengths, natural frequencies, unit weights, and inclination angles. Based on the recorded data, the authors compare the measured damping with a simple predictive model that depends solely on the cable length. The study also evaluates the effectiveness of friction damper system installed on these structures, one of the mitigation solution has been commonly applied to many newly built cable-stayed bridges in Vietnam.

Keywords: Intrinsic damping; Stay Cable bridge; Damping test; Friction Dampers.

1. GIỚI THIỆU

Các cầu dây văng với kết cấu cáp có độ mảnh lớn và lực căng trung bình thường khiến các bó cáp trở nên rất nhạy cảm với các dạng kích thích dao động. Do độ giảm chấn tự thân rất nhỏ, các bó cáp đôi khi không thể tiêu tán hiệu quả năng lượng dao động, dẫn đến nguy cơ mỏi cao cho các bộ phận của hệ

thống đầu neo, làm giảm tuổi thọ khai thác hoặc gây hư hại đến các lớp bảo vệ của bó cáp.

Ba dạng kích thích dao động phổ biến nhất được ghi nhận trong tài liệu gồm: galloping (gồm wake galloping và galloping của cáp khô bị nghiêng) xảy ra ở tốc độ gió cao, và dao động do mưa - gió kết hợp xảy ra ở tốc độ gió thấp.

Kinh nghiệm từ thử nghiệm hiện trường quy mô thực [1] và thử nghiệm hầm gió [2, 3] đã chỉ ra tham số khí động quan trọng không thứ nguyên - số Scruton, được định nghĩa như sau:

$$S_c = m\xi/\rho D^2 \quad (1)$$

Trong đó: m là khối lượng đơn vị chiều dài của cáp; ξ là hệ số suy

giảm tới hạn; ρ là khối lượng riêng của không khí ($1,25 \text{ kg/m}^3$); và D là đường kính bó cáp.

Khi giá trị S_c lớn, dao động được triệt tiêu hoặc chỉ xảy ra ở tốc độ gió rất cao [4, 5]. Viện Dự Ứng Lực (PTI) [8] khuyến nghị rằng dao động do mưa - gió kết hợp được xem là không nguy hiểm khi $S_c > 10$ đối với cáp có bề mặt trơn và $S_c > 5$ đối với cáp có cấu tạo bề mặt có gờ xoắn kép [4].

Để đánh giá khả năng nhạy cảm với galloping, PTI đề xuất kiểm tra tốc độ gió tới hạn dựa trên S_c theo công thức:

$$U_{cr} = c_f D (S_c)^{0.5} \quad (2)$$

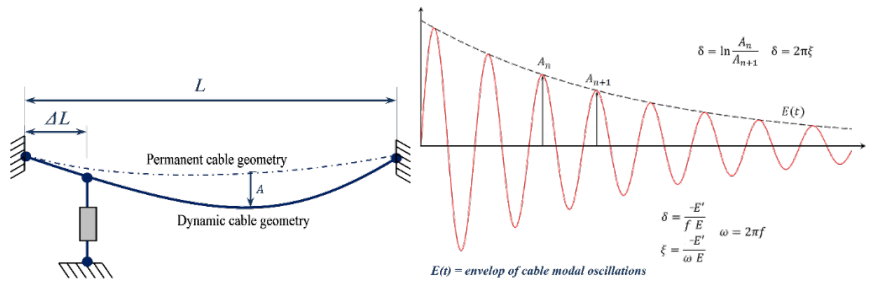
Trong đó: U_{cr} là tốc độ gió tới hạn; c là hằng số phụ thuộc vào khoảng cách thông thoáng giữa các cáp; f là tần số riêng của cáp.

Bên cạnh đó, theo Hiệp Hội Bê tông Quốc tế (FIB) [3], dao động do mưa-gió kết hợp của cáp dây văng có thể được kiểm soát khi độ giảm chấn đạt $\delta = 3\text{--}4\%$. Khuyến nghị này tương đồng với Ủy ban Quốc tế về Dự ứng lực (CIP), trong đó đề xuất giá trị độ suy giảm logarit lớn hơn 3% để tránh mất ổn định do mưa-gió kết hợp đối với cáp dài hơn 80 m [10].

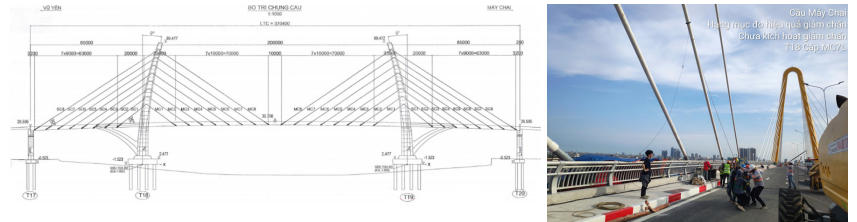
Có thể thấy rằng vấn đề dao động cáp có thể được khắc phục bằng cách thay đổi tần số dao động riêng hoặc tăng giá trị suy giảm của cáp. Trong khi tần số dao động riêng là đặc trưng của từng bó cáp và việc điều chỉnh có thể ảnh hưởng đến lực căng cáp, giá trị suy giảm logarit có thể được tăng cường thông qua liên kết chéo hoặc lắp đặt giảm chấn ngoài.

Việc đánh giá nhu cầu lắp đặt giảm chấn bổ sung do đó phụ thuộc vào giá trị giảm chấn tự thân của bó cáp, vốn khó xác định chính xác bằng phương pháp tính toán. Do đó, thử nghiệm đánh giá suy giảm của cáp được xem là phương pháp phù hợp nhất [9].

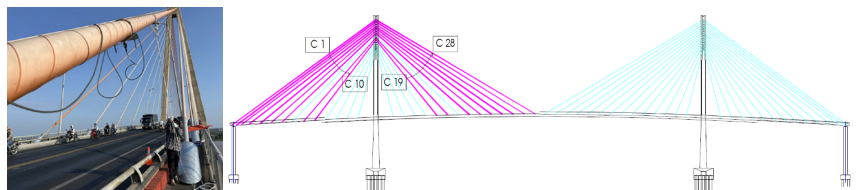
Bài báo này trình bày chương trình thử nghiệm đo độ giảm chấn tự thân trên các dây cáp tỷ lệ thực được thực hiện gần đây trên hai



Hình 1. Sơ đồ minh họa định nghĩa độ giảm chấn tự thân bó cáp văng.



Hình 2. Cầu Hoàng Gia - Sơ đồ cầu và hình ảnh thí nghiệm hiện trường



Hình 3. Cầu Rạch Miếu 1 - Hình ảnh thí nghiệm hiện trường và sơ đồ các bó cáp thí nghiệm

cây cầu dây văng mới xây dựng tại Việt Nam. Dữ liệu thử nghiệm được phân tích, đánh giá và so sánh với mô hình giản đơn dự báo suy giảm logarit làm cơ sở cho các thảo luận.

2. GIẢM CHẤN TỰ THÂN BÓ CÁP VĂNG

Theo định nghĩa, độ giảm chấn hiệu quả của cáp dây văng được biểu thị bằng độ suy giảm logarit δ , được tính từ hai biên độ dao động liên tiếp của cáp, A_n và A_{n+1} , theo mô tả trình bày trong hình minh họa ở Hình 1.

$$\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (3)$$

Nói chung, việc xác định chính xác giá trị độ giảm chấn của cáp dây văng là rất khó khăn. Tuy nhiên, trong thực hành kỹ thuật vẫn tồn tại một mô hình kinh nghiệm “truyền thống” được sử dụng để dự báo, như thể hiện trong Công thức (4).

$$\delta_i = 2\pi(0.24 \cdot 6 \times 10^{-4} L) \quad (4)$$

Giá trị giảm chấn tự thân của bó cáp thường được giả định biến thiên tuyến tính theo chiều dài tự do của cáp (L) trong một mô hình giản đơn (4).

3. THÍ NGHIỆM HIỆN TRƯỜNG

Chúng tôi trình bày dưới đây các kết quả thử nghiệm giảm chấn được thực hiện trên hai cầu dây văng được xây dựng ở Việt Nam tại hai thời điểm khác nhau. Đó là cầu Hoàng Gia (2025) và cầu Rạch Miếu (2008). Các chiến dịch thử nghiệm được tiến hành trong giai đoạn sau lắp đặt giảm chấn (2025) nhằm xác nhận các giá trị giảm chấn lý thuyết và hiệu quả của giải pháp giảm ảnh hưởng của dao động bằng hệ giảm chấn ma sát.

Hình ảnh thí nghiệm hiện trường và sơ đồ bố trí các bó cáp thí nghiệm được thể hiện trên Hình 2 cho cầu Hoàng Gia và Hình 3 cho cầu Rạch Miếu.

Cần nhấn mạnh rằng các mẫu đo trong đó tồn tại một số điều kiện, đặc biệt là các yếu tố môi trường bất lợi như gió hoặc tải trọng động tác dụng lên bản mặt cầu ảnh hưởng đến phản ứng của dây văng, sẽ phải được loại bỏ khỏi quá trình phân tích dữ liệu.

Trong quá trình thử nghiệm, phép đo dao động cưỡng bức - tự do nhằm xác định tỷ số giảm chấn tự thân cho ba dạng dao động đầu tiên (trong mặt phẳng) đã được thực hiện. Các đặc tính của dây văng được thử nghiệm được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2.

Cấu hình thí nghiệm và bố trí cảm biến gia tốc được trình bày trong Hình 4. Chiều dài tự do của dây văng được định nghĩa là chiều dài dây theo dây cung giữa hai nút cố định: tại vị trí trung tâm của ống dẫn hướng trên bản mặt cầu và tại đầu bộ định tâm của neo trụ tháp.

Một cảm biến gia tốc hai phương được lắp đặt trên dây văng tại các cao độ khác nhau, được xác định trước theo từng dây thử nghiệm và tương ứng các dạng dao động được xét đến.

Độ giảm chấn của dây văng và hiệu quả của bộ giảm chấn lắp đặt trên cầu được đo trong quá trình đáp ứng tự do giả định của dây văng dưới tác động kích thích xung. Quy trình thử nghiệm được lặp lại nhằm thu thập dữ liệu dao động cho ba dạng dao động đầu tiên của dây văng và loại bỏ các sai số.

Quá trình kích thích được thực hiện thủ công bằng cách tạo một tải trọng tức thời tác dụng lên dây văng tại vị trí không trùng với nút dao động của dạng dao động đang khảo sát (Hình 4).

4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM GIẢM CHẤN TỰ THÂN VÀ HIỆU QUẢ GIẢM CHẤN BỔ XUNG

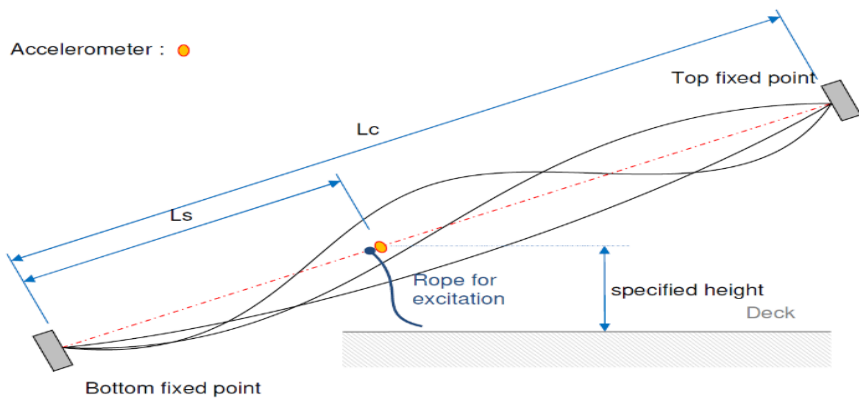
Ban đầu, bộ giảm chấn được tháo rời để đo độ giảm chấn tự thân của cáp dây văng. Sau đó, độ giảm chấn bổ sung được đo bằng cách kích hoạt các bộ giảm chấn thông

Bảng 1. Các đặc trưng hình học và vật lý của các bó cáp thí nghiệm trên cầu Rạch Miễu 1

Số hiệu bó cáp văng	Số tao	L tự do (m)	KL đơn vị (Kg/m)	Góc nghiêng (độ)	Đường kính (mm)	Lực căng (kN)
C19	25	67,441	32.5	27.405	160.0	3,102.0
C20	26	75,096	33.8	25.142	160.0	3,207.0
C22	29	91,215	37.7	21.813	160.0	3,766.0
C23	31	99,552	40.3	20.559	160.0	3,900.0
C24	33	107,873	42.9	19.498	180.0	4,162.0
C25	35	116,485	45.5	68.748	180.0	4,417.0
C26	37	125,182	48.1	55.613	180.0	4,649.0
C27	39	133,786	50.7	46.280	200.0	4,828.0
C28	43	142,689	55.9	39.637	200.0	5,125.0

Bảng 2. Các đặc trưng hình học và vật lý của các bó cáp thí nghiệm trên cầu Hoàng Gia

Số hiệu bó cáp văng	Số tao	L tự do (m)	KL đơn vị (Kg/m)	Góc nghiêng (độ)	Đường kính (mm)	Lực căng (kN)
SC8R	61	113.737	79,3	32,75	250	5955
SC6L	43	87.801	55.9	33,30	250	4308
MC7L	40	91.763	52,0	33,95	250	3582

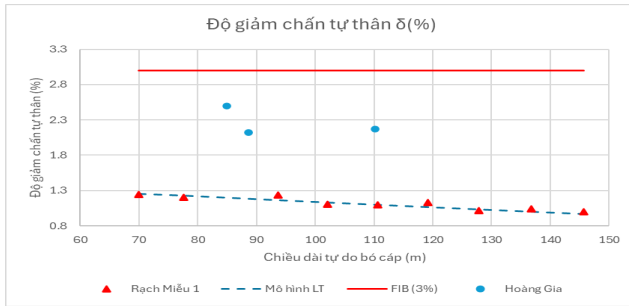


Hình 4. Sơ đồ bố trí thí nghiệm giảm chấn và điểm đặt thiết bị giảm chấn

qua các chế độ gia tải. Một quá trình xử lý dữ liệu hậu đo đã được tiến hành để loại bỏ các giá trị đo bị ảnh hưởng bởi kích thích môi trường, vốn dẫn đến giá trị giảm chấn bị phóng đại.

Một cách nghiêm ngặt, chuyển động của dây văng được trích xuất từ tín hiệu gia tốc đo được thông qua quá trình tích phân kép. Tuy

nhiên, để loại bỏ nhiễu và sai số đo có thể dẫn đến tín hiệu không phù hợp, quá trình tích phân được thực hiện trong miền tần số. Hệ số suy giảm logarit (giảm chấn) được xác định từ đường bao tín hiệu biên độ dao động theo công thức dưới đây, trong đó (f) là tần số của tín hiệu điều hòa [1].



Hình 5. Kết quả xác định độ giảm chấn tự thân bằng thí nghiệm đo so sánh với yêu cầu của FIB

$$\delta(t) = -\frac{1}{f} \frac{A'(t)}{A(t)} \quad (5)$$

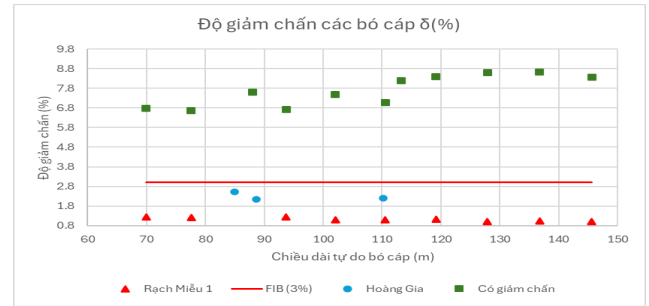
Hình 5 trình bày so sánh giữa các giá trị giảm chấn tự thân đo được trên các bó cáp và kết quả đánh giá lý thuyết liên quan đến tần số dao động riêng bậc 1 của dây văng. Có thể quan sát thấy rằng các giá trị giảm chấn nội tại đo được tương đương với các giá trị được nêu trong hầu hết các Tiêu chuẩn Quốc tế [3, 8, 10] và khá phù hợp với các giá trị đánh giá lý thuyết.

Hình 6 thể hiện hệ số suy giảm logarit tương ứng khi bộ giảm chấn ma sát được kích hoạt, so sánh với giá trị giảm chấn tự thân đo được của dây văng tại cầu Hoàng Gia và cầu Rạch Miếu 1. Có thể quan sát thấy sự gia tăng rõ rệt của các giá trị giảm chấn của dây văng, chứng

minh hiệu quả của giải pháp giảm chấn ma sát đã lắp đặt. Độ giảm chấn bổ sung trung bình do hệ thống giảm chấn ma sát mang lại đạt tối thiểu 4%.

5. KẾT LUẬN VÀ THẢO LUẬN

Quy trình đánh giá khả năng xuất hiện dao động quá mức trong các bó cáp văng, hiện tượng galloping hoặc mưa gió kết hợp theo các quy trình quốc tế hiện hành dựa chủ yếu trên số Scruton và độ giảm chấn tự thân δ của bó cáp. Bên cạnh đó, việc đánh giá độ giảm chấn nội tại rất khó đạt được độ chính xác cao. Việc ước lượng giảm chấn của dây văng cần được xác nhận thông qua các thí nghiệm hiện trường thích hợp nhằm xác định hệ số suy giảm logarit của bó cáp. Quy trình thử nghiệm giảm



Hình 6. Độ giảm chấn bổ xung xác định bằng phương pháp thí nghiệm hiện trường

chấn, quá trình tương quan và xử lý dữ liệu đã được trình bày để tham khảo và phục vụ cho các nghiên cứu trong tương lai.

Kết quả thử nghiệm cho thấy độ giảm chấn nội tại đo được của dây văng phù hợp với các giá trị đánh giá lý thuyết cũng như các giá trị được quy định trong các Tiêu chuẩn và Quy chuẩn Quốc tế hiện hành. Hiệu quả của hệ thống giảm chấn ma sát lắp đặt trên cầu Rạch Miếu 1 và cầu Hoàng Gia cũng đã được chứng minh thông qua dữ liệu thực nghiệm, với việc gia tăng hệ số suy giảm logarit của dây văng trên 4%.■

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Bộ Xây dựng và Cục Đường Bộ Việt Nam trong đề tài mã số DT25305.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Annan, R., Guile, M., Shim, B., Ahn, S. S., Yang, J. H.: Friction dampers on Incheon bridge, performance prediction and in situ test. In: 3rd FIB International Congress. Washington, USA (2010).
2. Cooper, K. R.: A note on the wind induced vibrations of bundled bridge stay cables. National Research Council of Canada, Note provided to RWDI (1985).
3. FIB: Acceptance of stay cable system using prestressing steels. International Federation for Structural Concrete (FIB), Lausanne, Switzerland (2005).
4. Hikami, Y., Shiraishi, N.: Rain-wind induced vibrations of cables in cable stayed bridges. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 29, 409-418 (1988).
5. Irwin, P. A.: Wind vibrations of cables on cable-stayed bridges. In: proceedings of Structural Congress XV, pp. 383-387. Portland, Oregon (1997).

6. Larose, G. L., Smitt, L. W.: Rain/Wind Induced Vibrations of Parallel Stay Cables. In: proceedings of IABSE Conference, Malmö (1999).
7. Matsumoto, M., Shiraishi, N., Shirato, H.: Inclined cable aerodynamics. In: Structural design, analysis & testing proceedings. Proceedings of the ASCE Structures Congress, San Francisco (1989).
8. PTI: Recommendations for stay cable design, testing and installation. 4th Edn. Post Tensioning Institute - Committee on Cable-Stayed Bridge. USA (2001).
9. Saito, T., Matsumoto, M., Kitazawa, M.: Rain-wind excitation of cables on cable-stayed Higashi-Kobe bridge and cable vibration control. In: Proceedings of Conference on Cable Stayed and Suspension Bridges, pp.507-514. (1994).
10. CIP: Recommendations on cable stays. French International Commission on Prestressing. Setra, Bagneux, France (2002).

Ngày nhận bài: 6/4/2026;

Ngày chấp nhận đăng: 28/4/2026