

Nghiên cứu đánh giá hiệu quả giảm chấn ma sát cho cầu dây văng

Study on the effectiveness of friction dampers for cable-stayed bridges

> TS TRẦN VIỆT HƯNG

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: hungtv@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Ứng xử động là một đặc tính quan trọng của cầu dây văng. Có nhiều dạng dao động từ các nguồn kích thích khác nhau trong suốt vòng đời của cây cầu có thể gây ra các hư hại và an toàn cho kết cấu. Việc bổ sung giảm chấn, đặc biệt là giảm chấn cho dây văng là rất cần thiết. Bài báo tập trung nghiên cứu đánh giá dựa trên kết quả thực nghiệm đo hiệu quả giảm chấn ma sát được lắp đặt trên cầu dây văng.

Từ khóa: Dao động; giảm chấn; tần số.

ABSTRACT

Dynamic behavior is an important characteristic of cable-stayed bridges. Various types of vibrations from different sources of excitation can occur throughout the bridge's lifespan, potentially causing structural damage and safety concerns. Therefore, the addition of dampers especially those installed on stay cables is essential. This paper focuses on an evaluation study based on experimental results measuring the effectiveness of friction dampers installed on a cable-stayed bridge.

Keywords: Vibration; damping; frequency.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cầu dây văng là một trong những loại cầu có tính thẩm mỹ cao và phổ biến nhất trên thế giới nhờ các ưu điểm như trọng lượng nhẹ, tiết diện tương đối nhỏ và hiệu quả kết cấu cao. Cầu dây văng cũng đặc trưng bởi khả năng giảm chấn kết cấu thấp, ứng xử động học phức tạp và chu kỳ dao động tự nhiên dài [2]. Tiết diện nhỏ và trọng lượng nhẹ khiến chúng dễ bị dao động dưới các tải trọng động như gió, động đất, tải trọng người đi bộ và xe cộ [4]. Hơn nữa, khi chiều dài nhịp cầu tăng lên, độ mềm dẻo của kết cấu và chiều dài dây cáp cũng tăng, có thể dẫn đến các vấn đề về ổn định khí động học.

Biên độ dao động lớn có thể gây hư hại cho cáp do tải trọng uốn và mỏi, làm giảm độ bền của cáp và thậm chí có thể gây nguy hiểm cho an toàn kết cấu. Tùy thuộc vào các thông số cụ thể của từng cáp, mức độ dễ bị dao động sẽ khác nhau. Cáp càng dài thì càng dễ bị dao động hơn so với cáp ngắn.

Do đó, bổ sung giảm chấn đã trở thành một thành phần phổ biến trong hệ thống cáp dây văng của cầu dây văng. Giảm chấn lắp ở các đầu neo dây văng có tác dụng làm tắt dần các dao động của bó cáp văng một cách nhanh nhất, tránh việc cộng hưởng tần số dao động riêng của dây và tần số dao động do các kích thích bên ngoài gây ra. Vì vậy, nghiên cứu thiết kế và lắp đặt giảm chấn cho cáp dây văng là hết sức cần thiết và cần phải được nghiên cứu đánh giá hiệu quả của việc lắp đặt này. Mục tiêu hướng tới sự an toàn khai thác ổn định các công trình cầu dây văng thì các nghiên cứu nhằm tối ưu hóa giảm chấn cho cầu vẫn đang được đầu tư nghiên cứu và liên tục cải tiến.

2. NGUYÊN NHÂN GÂY RA DAO ĐỘNG CÁP DÂY VĂNG

Cáp dây văng có thể bị dao động do kích thích trực tiếp bởi gió hoặc gián tiếp thông qua chuyển động của mặt cầu và trụ tháp. Là nguồn kích thích trực tiếp gây dao động trên dây cáp, gió là một trong những yếu tố thách thức nhất trong thiết kế cầu dây văng. Các hiện tượng khí đàn hồi khác nhau xảy ra trên dây cáp bao gồm [6]:

- Dao động do chuyển động (motion-induced vibration);
- Dao động do tách dòng (vortex-induced vibration - VIV);
- Dao động do nhiễu động gió (buffeting);
- Dao động do gió - mưa kết hợp (rain-wind-induced vibration - RWIV);

- Dao động do dòng khí phía sau (wake galloping - WG);
- Dao động khô (dry galloping - DG);
- Dao động do băng giá (ice galloping - IG);
- Các hiện tượng khí động học khác...

Ngoài ra, hiện tượng nhiễu khí động học và ảnh hưởng kéo dài cũng được ghi nhận. Hai dây cáp liền kề có cấu hình tương tự nhau nhưng có thể trải qua các dạng dao động khác nhau khi chịu tác động của gió. Trong khi đó, hiện tượng dao động do gió - mưa kết hợp (RWIV) có thể gây ra sự kết hợp giữa dao động trong mặt phẳng và ngoài mặt phẳng của dây cáp.

Kích thích gián tiếp hoặc kích thích từ điểm tựa của dây cáp được tạo ra bởi chuyển động của dầm mặt cầu và trụ tháp thông qua các điểm neo hoặc giá đỡ của dây cáp. Ngoài ra, sự kết hợp mạnh giữa dao động cục bộ và dao động toàn cầu có thể xảy ra khi tần số dao động tự nhiên của hai dạng này gần bằng nhau. Việc này có thể gây ra các hư hại cho bề mặt ống cáp hoặc trực tiếp lên dây

văng. Thiệt hại này phản ánh tầm quan trọng của tương tác động giữa dây cáp và mặt cầu vồng là sự kết hợp giữa dạng dao động toàn cầu của mặt cầu và dạng dao động cục bộ của dây cáp [3].

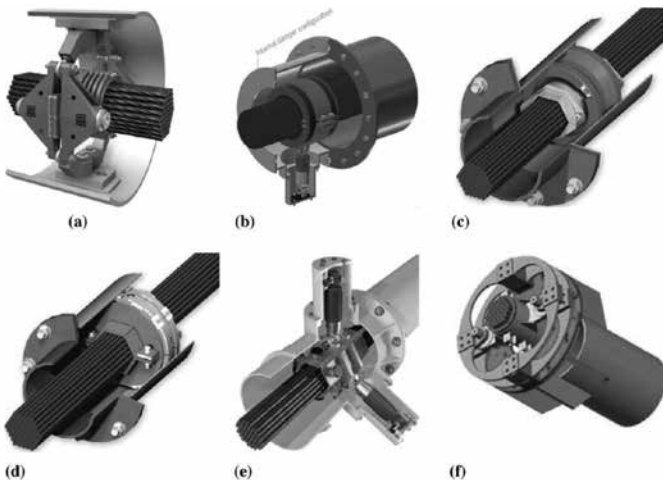
Các kích thích trực tiếp hoặc gián tiếp lên dây văng tiềm ẩn nhiều nguy cơ gây mất ổn định cho hệ dầm mặt cầu, hệ thống treo của cầu.

3. CÁC BIỆN PHÁP GIẢM DAO ĐỘNG CỦA CÁP DÂY VĂNG

Một số biện pháp đã được sử dụng để giảm thiểu dao động của dây cáp trong cầu dây văng, chẳng hạn như xử lý bề mặt dây cáp, sử dụng dây liên kết ngang (cross-ties) và kiểm soát dao động cho dây cáp bằng giảm chấn. Việc xử lý bề mặt dây cáp thường giúp giảm hiện tượng dao động do gió - mưa kết hợp (RWIVs). Có nhiều loại xử lý bề mặt như: Gân xoắn (helical fillet), vòng tròn (rings) và các dạng mẫu thiết kế đặc biệt [8].

Dây liên kết ngang là các dây phụ kết nối ngang giữa các dây cáp chính, tạo thành mạng lưới dây cáp và tăng độ cứng trong mặt phẳng của hệ thống dây. Mặc dù dây liên kết ngang được chứng minh là hiệu quả trong việc giảm dao động trong mặt phẳng của dây cáp, nhưng chúng lại kém hấp dẫn về mặt thẩm mỹ. Dây liên kết ngang cũng có thể làm tăng khả năng giảm chấn của dây cáp, tuy nhiên mức độ tăng giảm chấn phụ thuộc vào đặc tính của dây liên kết và cách chúng được kết nối với dây cáp.

Thiết bị giảm chấn dây cáp là một trong những giải pháp nổi bật nhất trong việc kiểm soát dao động của dây cáp. Nhìn chung, thiết bị giảm chấn dây cáp gồm hai loại: Giảm chấn bên trong và giảm chấn bên ngoài. Thiết bị giảm chấn dây cáp có thể được lắp đặt gần điểm neo dây cáp vào mặt cầu, hoặc nếu cần thiết ở cả hai đầu neo của dây cáp (cách tiếp cận ít phổ biến hơn). Thiết bị giảm chấn dây cáp cũng giúp giảm dao động của mặt cầu hoặc trụ tháp. Các nghiên cứu về tầm quan trọng của dao động dây cáp và các biện pháp giảm thiểu như thiết bị giảm chấn dây cáp đã bắt đầu từ những năm 1980 [7]. Thiết bị giảm chấn dây cáp không chỉ cải thiện phản ứng dao động của từng dây cáp riêng lẻ mà còn cung cấp thêm khả năng giảm chấn cho toàn bộ cây cầu, từ đó có thể nâng cao khả năng chịu động đất của cầu.



- a) - Giảm chấn ma sát dạng vuông;
- b) - Giảm chấn nhớt bên trong;
- c) - Giảm chấn đàn hồi bên trong;
- d) - Giảm chấn thủy lực bên trong;
- e) - Giảm chấn hướng tâm bên trong
- f) - Giảm chấn ma sát bên trong

Hình 1. Một số loại thiết bị giảm chấn bên trong [6]



Hình 2. Một số thiết bị giảm chấn bên ngoài [6]

Ủy ban về ứng suất trước của Pháp - CIP khuyến nghị cần phải tăng khả năng giảm chấn tự thân của cáp bằng cách sử dụng thiết bị giảm chấn bổ sung đối với các cáp có chiều dài trên 80 m. Hiện nay, rất nhiều cầu dây văng hiện đại trên toàn thế giới đã được trang bị thiết bị giảm chấn dây cáp, bao gồm hai loại chính là:

Giảm chấn bên trong (còn gọi là giảm chấn tích hợp) được đặt hoàn toàn bên trong ống neo của dây cáp hoặc tích hợp vào hệ thống dây cáp như minh họa trong Hình 1. Các dây văng được lắp đặt giảm chấn bên trong sẽ có hình dáng bên ngoài gọn đẹp.

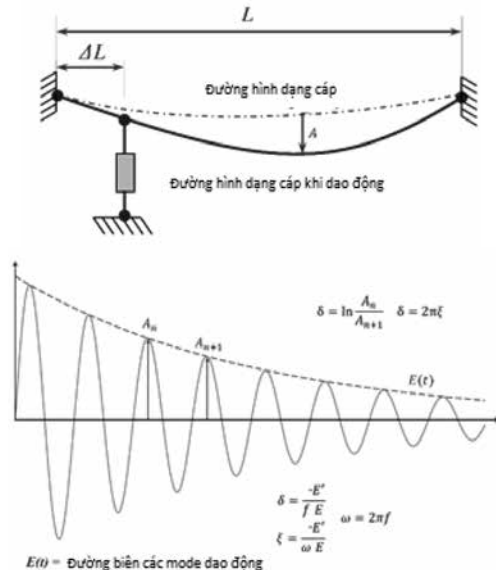
Thiết bị giảm chấn bên ngoài như trên Hình 2, được lắp đặt gần điểm neo của dây cáp, đặc biệt hiệu quả đối với dây cáp rất dài, vì chúng hiệu quả hơn so với thiết bị giảm chấn bên trong.

4. PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ GIẢM CHẤN DÂY VĂNG

Theo quy định của các quy trình hiện hành, hiệu suất giảm chấn được định nghĩa là độ giảm chấn logarit δ của bó cáp văng được lắp đặt giảm chấn được xác định theo công thức sau:

$$\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$$

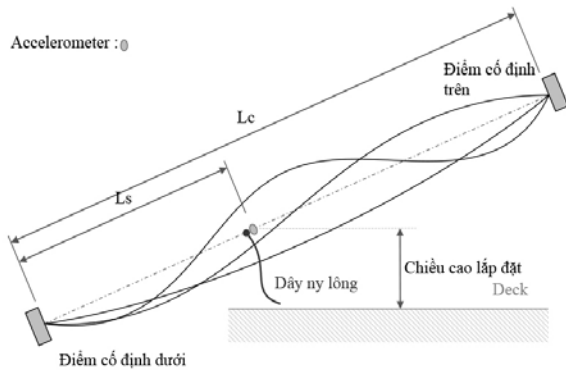
Ở đây, A_n và A_{n+1} đại diện cho biên độ của hai dao động liên tiếp của cáp, theo mô tả ở sơ đồ sau:



Hình 3. Dao động cáp văng - sơ đồ đo độ giảm chấn [1]

Theo Hội đồng Quốc tế về dự ứng lực của Pháp - CIP khuyến nghị các dây văng có chiều dài lớn (trên 80 m) có tổng cộng độ giảm chấn tính theo lượng giảm logarith lớn hơn 3% [5]. Theo Ủy ban Quốc tế về kết cấu bê tông - Fib khuyến nghị cho dây văng: Tăng thêm độ giảm chấn từ 3% đến 4% tính theo độ giảm logarith sẽ đủ để kiểm soát dao động do mưa và gió gây ra [1].

Như vậy, để đáp ứng yêu cầu của một giảm chấn dây văng theo các tiêu chuẩn thì giảm chấn được lựa chọn lắp thêm vào cần phải có hiệu suất giảm chấn ít nhất lớn hơn 4%.



Hình 4. Vị trí lắp đặt cảm biến trên cáp văng

Hiệu suất giảm chấn của bộ giảm chấn cáp dây văng phụ thuộc vào công nghệ lựa chọn. Các quy trình quốc tế hiện hành đều khuyến nghị giá trị hiệu suất này nên được đánh giá bằng các thí nghiệm tại hiện trường để đảm bảo rằng giải pháp giảm chấn đề xuất cung cấp đủ độ giảm chấn bổ sung theo yêu cầu. Để thực hiện thử nghiệm này tại chỗ, sử dụng cảm biến lắp đặt trên các dây văng. Cảm biến là một gia tốc kế đã được lắp đặt với cáp văng qua bộ kẹp và ở độ cao khoảng 15 m tính từ mặt cầu như trên Hình 4.

5. ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ GIẢM CHẤN LẮP ĐẶT TRÊN CẦU RẠCH MIẾU 2

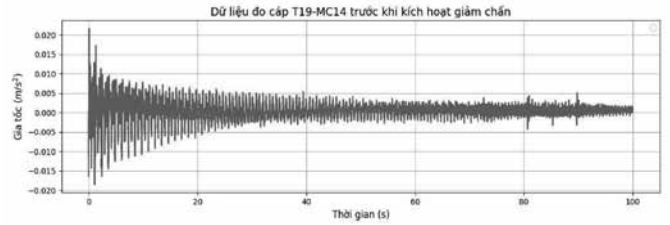
Cầu Rạch Miếu 2 là công trình giao thông trọng điểm tại khu vực đồng bằng sông Cửu Long, bắc qua sông Tiền, nối tỉnh Đồng Tháp và Vĩnh Long. Đây là cây cầu dây văng hai mặt phẳng dây, dầm bê tông cốt thép dự ứng lực với sơ đồ nhịp cầu chính (120+270+120)m. Hệ dây cáp văng dạng song song gồm 112 dây bố trí trên 2 mặt phẳng. Cáp văng sử dụng loại tạo song song (PSS) với số lượng 31 đến 50 tao cáp mỗi bó. Cầu được bố trí giảm chấn loại ma sát cho 80/112 dây văng dài.

Quá trình đo đạc đánh giá hiệu quả giảm chấn sẽ thực hiện trong 2 giai đoạn trước và sau khi lắp đặt giảm chấn dây văng vào vị trí của cáp. Việc thí nghiệm trước khi lắp đặt giảm chấn để nhằm mục đích xác định độ giảm chấn tự thân của hệ cáp văng.

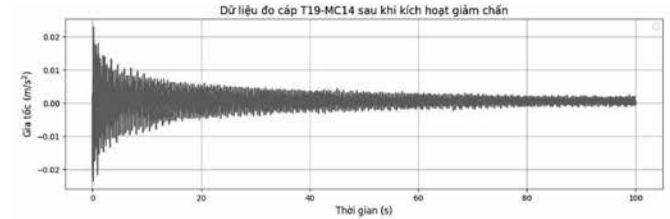


Hình 5. Đo đạc hiện trường xác định hiệu quả giảm chấn trên cầu Rạch Miếu 2

Dữ liệu đo đạc dao động các sợi cáp dây văng được thể hiện trên biểu đồ gia tốc thu được cho 2 trường hợp chưa lắp giảm chấn và có lắp giảm chấn thể hiện trên Hình 6 và Hình 7 dưới đây.



Hình 6. Biểu đồ gia tốc trước khi lắp giảm chấn - cáp T19-MC14HL



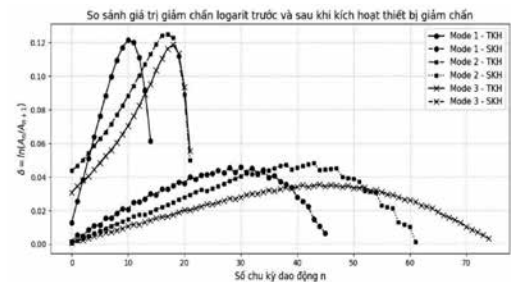
Hình 7. Biểu đồ gia tốc sau khi lắp giảm chấn - cáp T19-MC14HL

Mỗi dây văng sẽ được kích thích và đo 3 lần trước và sau khi lắp đặt giảm chấn, sau đó lấy giá trị trung bình. Kết quả xử lý số liệu đánh giá hiệu suất giảm chấn được lắp đặt trên các sợi cáp văng thí nghiệm như trong Bảng 1.

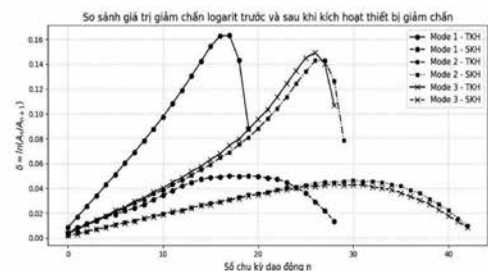
Bảng 1. Kết quả logarit đo hiệu quả giảm chấn dây văng

Sợi cáp	Trước khi lắp giảm chấn			Sau khi lắp giảm chấn			Hiệu suất giảm chấn δ (%)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
T19-MC05HL	2,68	2,25	2,33	7,94	6,75	7,58	5,29	4,48	5,23
T19-MC14HL	1,26	1,73	1,88	6,81	6,96	6,80	5,55	5,23	4,92

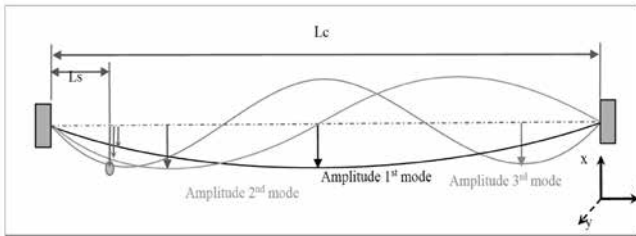
Kết quả thí nghiệm đo đạc hiệu suất của giảm chấn lắp đặt thêm cho các dây cáp văng đều lớn hơn 4%, con số này lớn hơn giá trị yêu cầu theo các tiêu chuẩn của Fib và CIP. Điều đó cho thấy các giảm chấn lắp đặt trên các cáp dây văng của cầu đều đáp ứng được các yêu cầu cần thiết của một giảm chấn dây văng.



Hình 8. Biểu đồ hệ số logarit giảm chấn theo chu kỳ dao động - cáp T19-MC05HL



Hình 9. Biểu đồ hệ số logarit giảm chấn theo chu kỳ dao động - cáp T19-MC14HL



Hình 10. Sơ đồ biến dạng 3 mode dao động chính của dây văng

Đánh giá hiệu quả của giảm chấn lắp thêm vào các bó cáp dây văng sau các chu kỳ dao động được thể hiện trên Hình 8 và Hình 9 cho cả 3 mode dao động của 2 bó cáp lựa chọn đo.

Đối với cáp dây văng, có nhiều dạng dao động khác nhau, trong đó các mode dao động thấp thường có biên độ dao động lớn, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến độ bền của dây văng liên quan đến mỏi hoặc mất ổn định. Dải tần số cần quan tâm là dưới 3 Hz do các mode này ảnh hưởng trực tiếp tới dao động do gió - mưa tới cáp văng trên cầu dây văng. Ngoài ra, thiết bị giảm chấn được thiết kế để triệt tiêu năng lượng dao động hiệu quả nhất trong khoảng tần số dao động thấp. Do đó, tập trung vào 3 mode dao động đầu tiên (Hình 10) giúp đánh giá hiệu quả của giảm chấn một cách trực quan và rõ ràng.

Các dây cáp văng sau khi được lắp đặt giảm chấn thì có hiệu quả ngay, làm tắt nhanh dao động đối với các chu kỳ dao động đầu tiên sau kích thích (Hình 8 và Hình 9). Hiệu quả giảm chấn thể hiện rõ rệt ngay sau khi dây cáp bị kích thích dao động, sớm và trước nhiều so với giảm chấn tự thân của các sợi dây cáp khi chưa được lắp đặt giảm chấn sẽ dao động kéo dài và quá trình tắt dần dao động sẽ lâu hơn nhiều lần.

Kết quả phân tích trên Hình 8 và Hình 9 cũng cho thấy mode dao động thứ nhất (Mode 1) có tốc độ tắt dao động nhanh hơn rõ rệt so với các mode cao hơn, cả trong trường hợp chưa lắp đặt và sau khi lắp đặt kích hoạt thiết bị giảm chấn. Hiện tượng này xuất phát từ hai nguyên nhân chính:

- Khi chưa có thiết bị giảm chấn, Mode 1 có tần số riêng nhỏ hơn nên với cùng hệ số giảm chấn vật liệu, tỷ số giảm chấn tương đương $\zeta=c/(2m\omega)$ sẽ lớn hơn; đồng thời, dạng dao động toàn thân của mode này gây ra biến dạng tổng thể lớn, làm tăng ma sát và tổn hao năng lượng tại các gối, liên kết và vùng biên.

- Khi có thiết bị giảm chấn, hệ thống thường được thiết kế và hiệu chỉnh (tuning) gần với tần số của Mode 1, đồng thời damper được bố trí tại vị trí bụng dao động của mode này, nơi chênh lệch chuyển vị tương đối đạt giá trị cực đại, dẫn đến khả năng tiêu tán năng lượng cao nhất.

Do đó, Mode 1 luôn thể hiện đặc trưng giảm chấn mạnh hơn và tắt dao động nhanh hơn hai mode còn lại.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày các nguyên nhân gây ra dao động đối với cáp dây văng, những ảnh hưởng của việc dao động của nó đến kết cấu cầu dây văng và phương pháp kiểm soát dao động của dây cáp bằng việc bổ sung giảm chấn cho cáp văng. Các bộ giảm chấn cáp dây văng sẽ làm cho dây văng nhanh chóng tắt dần các dao động khi bị kích thích, giúp cho các cây cầu dây văng được ổn định và an toàn khai thác. Bài báo cũng đã trình bày kết quả của việc đo đạc hiệu suất giảm chấn cáp văng được lắp đặt trên cầu Rạch Miễu 2. Thực nghiệm đo đạc và xử lý số liệu hiện trường trên một cây cầu dây văng cho thấy hiệu suất của các giảm chấn lắp đặt thêm trên cầu đều lớn hơn 4%. Con số này là đảm bảo lớn hơn các yêu cầu của các tiêu chuẩn hiện hành cho giảm chấn cáp văng, đồng thời đánh

giá được rõ hiệu quả của việc bổ sung giảm chấn sẽ làm tắt nhanh dao động ở ngay các chu kỳ đầu tiên sau khi dây văng bị kích thích so với việc dây văng không có giảm chấn thì dao động sẽ kéo dài và tắt dần chậm lại. Do vậy, các giảm chấn trên cầu đảm bảo được yêu cầu thiết kế, giúp tăng cường ổn định và an toàn khai thác cho công trình cầu dây văng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. FIB BULLETIN NO. 89, Acceptance of stay cable systems using prestressing steels.
- [2]. Shipyards A. và Orleans N. (1980), Dynamic behaviour of a cablestayed bridge, Earthq Eng Struct Dyn. 8:1-16.
- [3]. Caetano E., Cunha A., Gattulli V. và Lepidi M. (2008), Cable-deck dynamic interactions at the International Guadiana bridge: onsite measurements and finite element modelling, Struct Control Heal Monit, tr.15:237-264.
- [4]. Ali HM. and Abdel-ghaffar AM. (1994), Seismic energy dissipation for cable-stayed bridges using passive devices, Earthq Eng Struct Dyn, tr.23:877-893.
- [5]. PTI Post-Tensioning Institute, Recommendations for stay cable design, testing and installation, in, Cable-Stayed Bridges Committee Phoenix...
- [6]. A. Javanmardi, K. Ghaedi và F. Huang (2022), Application of Structural Control Systems for the Cables of Cable-Stayed Bridges: State-of-the-Art and State-of-the-Practice, Arch Computat Methods Eng. 29, pp.1611-1641.
- [7]. J. Wiancki (1983), Cables Wind Excited Vibrations of Cable-Stayed Bridge, Pergamon Press Ltd.
- [8]. Chang Y, Zhao L and Ge Y (2019), Experimental investigation on mechanism and mitigation of rain-wind-induced vibration of stay cables, J Fluids Struct, pp.88:257-274.