



## EXPERIMENT TO EVALUATE THE EFFECTIVENESS OF INTERNAL RADIAL DAMPING TO THE STAY CABLE T16R-MC16 OF MY THUAN 2 BRIDGE

Quyết Nguyen-Huu<sup>1</sup>, Dong Nguyen-Trong<sup>2</sup>, Cam Nhung Nguyen-Thi<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>DX Laboratory, The University of Transportation and Communications Limited Company (UCT), No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Freyssinet Viet Nam Company Limited, No 11 Tran Hung Dao Street, Ha Noi, Vietnam

<sup>3</sup>University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 12/01/2024

Revised: 26/03/2024

Accepted: 11/06/2024

Published online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.12>

\* *Corresponding author*

Email: ncnhung@utc.edu.vn; Tel: +84947610939

**Abstract.** The evaluation of the effectiveness of devices on bridge structures in general, and cable-stayed bridges in particular, is of utmost importance. Among them is the assessment of the effectiveness of various damping techniques on the vibration of the stay cables, especially under the influence of wind or rain. Common solutions include adjusting the cable surface, adding cross-link, or installing dampers. In this paper, we present a study on the effectiveness of mitigating the vibrational energy of stay cables using internal radial dampers (IRD), a type of viscous dampers. The measurement process was conducted with the stay cables at the My Thuan 2 bridge project, involving two phases: before and after the installation of dampers. The experimental damping ratios obtained from logarithmic decrement results indicate a significant increase in damping ratio from 0.072% to 0.517% for the second mode of cable vibration after the installation of dampers. This mode is particularly influenced by wind or rain-induced vibrations.

**Keywords:** Cable-stayed bridge, stay cables, Damping ratio, Wind-induced vibration, Internal radial damper.

@ 2024 University of Transport and Communications



## THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CỦA GIẢM CHẤN HƯỚNG TÂM BÊN TRONG ĐỐI VỚI CÁP VĂNG SỐ T16R-MC16 CỦA CẦU MỸ THUẬN 2

Nguyễn Hữu Quyết<sup>1</sup>, Nguyễn Trọng Đồng<sup>2</sup>, Nguyễn Thị Cẩm Nhung<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Phòng DX, Công ty TNHH Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Công ty TNHH Freyssinet Việt Nam, Số 11 Trần Hưng Đạo, Hà Nội, Việt Nam

<sup>3</sup>Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 12/01/2024

Ngày nhận bài sửa: 26/03/2024

Ngày chấp nhận đăng: 11/06/2024

Ngày xuất bản Online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.12>

\* Tác giả liên hệ

Email: ncnhung@utc.edu.vn; Tel: +84947610939

**Tóm tắt.** Việc đánh giá hiệu quả các thiết bị trên công trình cầu nói chung và cầu dây văng nói riêng là vô cùng quan trọng. Trong số đó là việc đánh giá hiệu quả các loại giảm chấn tới sự dao động của cáp văng, đặc biệt là dưới tác động của gió hoặc mưa. Một số biện pháp thường áp dụng là điều chỉnh bề mặt cáp, bổ sung các thanh buộc chéo hoặc lắp đặt các giảm chấn. Trong nghiên cứu này sẽ trình bày về hiệu quả tiêu tán năng lượng dao động của cáp văng của giảm chấn hướng tâm bên trong, là một dạng giảm chấn cản nhót. Quá trình đo được thực hiện với cáp văng tại công trình cầu Mỹ Thuận 2 bao gồm 2 giai đoạn: trước và sau khi lắp giảm chấn. Kết quả thực nghiệm hệ số giảm chấn thông qua độ suy giảm logarit thu được từ kết quả đo cho thấy sau khi lắp đặt giảm chấn, hệ số giảm chấn tăng đáng kể từ 0,072% lên 0,517% khi xét cho dạng dao động số 2 của cáp, là dạng dao động ảnh hưởng chính từ gió hoặc mưa.

**Từ khóa:** Cầu dây văng, cáp văng, hệ số giảm chấn, dao động do gió, giảm chấn hướng tâm bên trong.

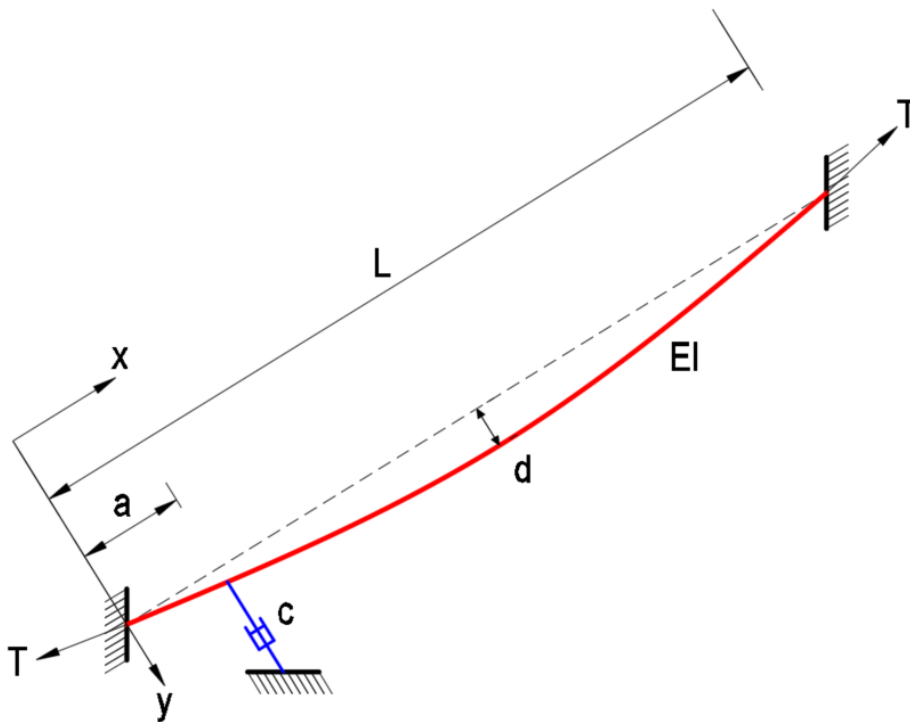
@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống cơ sở hạ tầng giao thông đóng vai trò không thể thiếu trong sự phát triển toàn

diện, đặc biệt về kinh tế của một quốc gia hay một khu vực. Trong số đó, các cây cầu góp phần cải thiện hiệu quả của mạng lưới giao thông bằng cách tạo ra đường ngắn hơn, thuận tiện, vượt những nơi có chướng ngại vật hoặc địa hình khó khăn. Đáng kể, các công trình cầu dây văng không chỉ có vai trò kết nối mà còn là những liên kết vững chắc có ý nghĩa với kinh tế xã hội. Không những vậy, các công trình cầu này còn là biểu tượng kiến trúc độc đáo, mang lại tinh mỹ quan cao cho khu vực đó.

Việc đảm bảo các hoạt động bình thường từ quá trình thi công đến khi vận hành khai thác cầu dây văng là vấn đề được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm. Đặc biệt trong những năm gần đây, chủ đề giám sát sức khỏe kết cấu công trình (Structural Health Monitoring – SHM) ngày càng nhận được nhiều kết quả nghiên cứu mới [1]. [3]. Ví dụ, Hui và Jinping đã trình bày tổng quan về các công nghệ SHM khác nhau được áp dụng cho cầu dây văng trên thế giới [4]. Jang và cộng sự đã thực hiện triển khai mạng cảm biến thông minh không dây (wireless smart sensor networks - WSSNs) trên cầu Jindo, một công trình cầu dây văng mới của Hàn Quốc có sơ đồ phân cầu chính là 70+344+70 (mét) [5].



Hình 1. Mô hình cáp được lắp đặt giảm chấn.

Trong số các nội dung quan trọng về đánh giá tình trạng của cáp trong kết cấu cầu dây văng là đánh giá hiệu quả giảm chấn. Dây văng là bộ phận quan trọng và chịu lực chính của cầu dây văng. Dưới các tác động từ gió, mưa hoặc tải trọng giao thông trên cầu, các cáp văng dễ bị rung động quá mức do độ giảm chấn thấp, thường từ 0,05-0,3% [6]. -[8]. Điều này ảnh hưởng tới các bộ phận của cáp và dẫn đến sự an toàn của cầu. Theo đó, một số cách phổ biến để giảm thiểu sự rung động này như điều chỉnh bề mặt của cáp dựa trên khí động học [9]. , sử dụng thêm các mạng cáp buộc chéo [10]. hay lắp đặt các bộ giảm chấn bán chủ động (Semi-Active Dampers) [11]. hoặc bộ giảm chấn bị động (Passive Dampers) [12]. , [13]. Bộ giảm chấn là các hệ thống cơ khí được lắp đặt giữa cáp và cầu (Hình 1). Chúng tiêu tán năng lượng để đảm bảo sự ổn định của cáp.

Một số các nghiên cứu về đánh giá hiệu quả của nhiều loại giảm chấn đã được thực hiện. Zhou và cộng sự đã thực hiện đánh giá trên cáp văng có chiều dài là 215,58 mét được gắn một cặp giảm chấn nhớt (Viscous Dampers - VD) [14]. Kết quả thu được cho thấy độ giảm chấn đáng kể của cáp sau khi lắp đặt thông qua các đặc tính phi tuyến tính. Trong một nghiên cứu khác, bốn loại giảm chấn bao gồm bộ giảm chấn nhớt, bộ giảm chấn từ tính lưu biến thụ động (Magneto-Rheological Damper - MR), bộ giảm chấn ma sát (Friction Damper) và bộ giảm chấn cao su giảm chấn cao (High Damping Rubber Damper - HDR) cũng đã được so sánh. Độ suy giảm logarit được tính toán dựa trên dữ liệu dao động tự do theo thời gian của cáp văng. Các công thức tính toán gần đúng cũng đã được đưa ra và so sánh với kết quả đo đạc hiệu quả thực tế của 4 loại giảm chấn trên là 0,6; 0,6; 0,3 và 0-1,0 [15]. Bên cạnh đó, bộ giảm chấn khối lượng quán tính điện từ (Electromagnetic Inertial Mass Damper - EIMD) đã được Li và cộng sự giới thiệu. Các nghiên cứu mô hình và 133 bộ dữ liệu dao động tự do của cáp có chiều dài 135m chỉ ra rằng khi lắp đặt loại giảm chấn này ở vị trí cách neo khoảng 3,5m thì tỷ lệ giảm chấn ở dạng dao động đầu tiên lớn hơn xấp xỉ 200% so với tỷ lệ lý thuyết [16].

Các tần số tự nhiên đầu tiên của dây văng trong cầu dây văng thường nằm trong khoảng từ 0 đến 5,0 Hz. Kết quả đo đạc của các cáp văng có chiều dài lớn nhất và nhỏ nhất tại một số công trình cầu dây văng tại Việt Nam được thể hiện trong Bảng 1:

Bảng 1. Tần số cơ bản của cáp văng một số cầu dây văng tại Việt Nam [17]. -[19].

Cầu	Cáp	Chiều dài (m)	Tần số cơ bản (Hz)	Loại giảm chấn được lắp đặt
Đakrông (Quảng Trị)	Số 8	29,67	4,05	Không có
	Số 15	88,49	1,15	Không có
Nhật Tân (Hà Nội)	P12-12	54,69	2,55	Không có
	P12-1	161,32	0,83	Không có
Mỹ Thuận (Vĩnh Long)	N32E	186,41	0,74	Giảm chấn cao su
	N13E	80,08	1,62	Giảm chấn thủy lực

Theo FIB [20]., rung động do mưa-gió (lực gió tạo ra sự cân bằng của các dòng nước di chuyển trên cáp làm thay đổi tính khí động học của cáp) là nguyên nhân gây rung phổ biến nhất được quan sát thấy trên các công trình cầu. Biên độ lớn có thể xảy ra ở tốc độ gió vừa phải khoảng 10-15m/s khi kết hợp với mưa nhỏ. Một tài liệu quan trọng khác về cáp văng [21]. đã đề cập rằng, nếu dây văng không ổn định chỉ với giảm chấn bên trong (bao gồm giảm chấn tự thân do khối lượng) thì cần các biện pháp bổ sung để kiểm soát rung động của dây văng. Điển hình là sửa đổi kết cấu trên bề mặt cáp văng và các thiết bị giảm chấn đặc biệt chống lại rung động do gió mưa gây ra. Một kết luận quan trọng đã được Cục Quản lý Đường cao tốc Liên bang của Bộ Giao thông Vận tải Hoa Kỳ [22]. đưa ra rằng rung động do gió gây ra trong cáp thường được quan sát thấy ở tần số từ 0 đến 3,0 Hz và nó xảy ra chủ yếu ở dạng dao động thứ 2.

Trong phạm vi bài báo này, chúng tôi trình bày về hiệu quả của giảm chấn hướng tâm bên trong (Internal Radial Damper – IRD) tại công trình cầu Mỹ Thuận 2 dưới tác động của gió. Đây là một trong những loại giảm chấn hiệu quả được Công ty Freyssinet giới thiệu và áp dụng cho cáp văng có chiều dài trên 80 mét. Về cơ bản đây là một loại giảm chấn dựa trên công nghệ cản nhớt, tuy nhiên thiết kế này cho hiệu suất không phụ thuộc vào biên độ và nhiệt độ của cáp. Bộ giảm chấn piston nhớt có ưu điểm là rất linh hoạt vì hệ số độ nhớt và hành trình có thể được điều chỉnh, với phạm vi tham chiếu từ 40-920 mm.

## 2. THỰC NGHIỆM

### 2.1. Giới thiệu chung về công trình

Cầu Mỹ Thuận 2 (Hình 2) là công trình cầu dây văng đầu tiên do kỹ sư Việt Nam thiết kế và xây dựng thuộc tuyến đường cao tốc Bắc-Nam phía Đông, cầu có bề rộng là 25m với 06 làn xe hạn chế với tốc độ thiết kế là 80km/h. Phần cầu dây văng có sơ đồ là 150+350+150m và chiều dài toàn cầu khoảng 1.9km. Cầu được thiết kế theo tiêu chuẩn thiết kế TCVN 11823:2017.



Hình 2. Cầu Mỹ Thuận 2 [23].

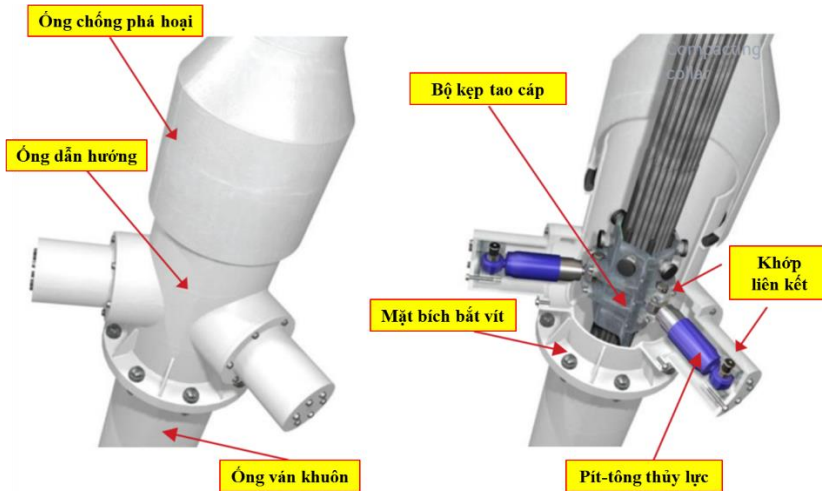
Thiết kế kết cấu hệ thống dây văng sử dụng hệ thống tào cáp song song (Parallel Stranding System – PSS). Toàn cầu gồm có 128 bó cáp dây văng với chiều dài từ khoảng 61-189m. Các loại đầu neo tương ứng với số lượng tào cáp trong mỗi bó. Hệ thống cáp dây văng tuân thủ theo các tiêu chuẩn quốc tế về dây văng như FIB Bullentin 30 [20]., PTI [24]. Cáp dây văng sử dụng loại cáp cáp 1860MPa độ trùng thấp mạ kẽm theo tiêu chuẩn NFA35-035 loại tào cáp 7 sợi.

Bảng 2. Một số thông số cơ bản của cáp văng [25].

Mô tả	Giá trị
Đường kính danh định (mm)	15,7
Cường độ kéo danh định (MPa)	1860
Khối lượng riêng danh định tào cáp (g/m)	1172
Diện tích mặt cắt ngang danh định (mm <sup>2</sup> )	>150
Mô đun đàn hồi (N/mm <sup>2</sup> )	197000±5%

### 2.2. Giảm chấn hướng tâm bên trong (Internal Radial Damper – IRD)

Giảm chấn hướng tâm bên trong được cấu tạo từ ba pít-tông thủy lực có hành trình ±50mm được đặt ở các góc 120° vòng quanh cáp (Hình 3). Đầu trong của pít-tông được cố định bằng khớp chốt trên vòng đệm để nén chặt bó sợi. Đầu ngoài của chúng được cố định bằng các khớp chốt vào ống dẫn hướng. Cuối cùng, được cố định chắc chắn vào kết cấu thông qua ống ván khuôn qua mặt bích được bắt vít. Tại các vị trí pít-tông thủy lực sau khi lắp đặt sẽ có các mũ giảm chấn để bảo vệ các bộ phận bên trong (Hình 4) [26].



Hình 3: Cấu tạo giảm chấn IRD [26].



Hình 4: Hình ảnh thực tế (Hình ảnh được chụp bởi tác giả vào ngày 17/12/2023).

Công nghệ IRD có thể áp dụng tương tự cho các công trình xây dựng mới hoặc đang được khai thác. Nó có thể thích ứng với tất cả các loại hệ thống dây văng (cáp dây văng có sợi song song, dây văng có tạo cáp song song, cáp cuộn khóa, v.v.) và tất cả các loại kết cấu dây văng (cầu, mái nhà, v.v.). Theo thông tin từ nhà sản xuất, bộ giảm chấn IRD có nhiều ưu điểm [26]. :

- Độ bền cao nhờ sử dụng công nghệ pit-tông thủy lực đã được kiểm chứng tốt
- Hiệu suất tăng theo biên độ
- Tác động trực quan thấp do chúng được đặt trong ống dẫn hướng
- Ít phụ thuộc vào hiệu ứng nhiệt độ
- Dễ dàng truy cập để theo dõi và bảo trì
- Có thể tháo rời và thay thế
- Được bảo vệ chống lại sự xâm lược và phá hoại của khí hậu
- Chi phí bảo trì thấp

Một số công trình đã áp dụng loại giảm chấn IRD thể hiện trong Hình 5 ÷ Hình 8.



Hình 5. Cầu Bãi Cháy (Việt Nam) (Hình ảnh được chụp bởi tác giả vào ngày 28/10/2023).



Hình 6. Cầu Phú Mỹ (Việt Nam) [27].



Hình 7. Cầu Anzac (Úc) [26].



Hình 8. Cầu Russky Island (Nga) [26].

### 2.3. Tiến hành đo đạc

Việc lựa chọn cáp văng dựa trên kết quả hệ số giảm logarit điển hình lý thuyết. Thực hiện đo đạc đánh giá hiệu quả của giảm chấn IRD với cáp văng T16R-MC16. Đây là cáp văng dài nhất trên nhịp chính và được lắp đặt loại giảm chấn IRD-Unit 75 (Hình 9).

Bảng 3. Thông số cáp T16R-MC16 [25].

Thông số cáp		Thông số giảm chấn	
Số tao cáp	: 69	Chiều dài cáp áp dụng	: 150-300 m
Đơn vị đầu neo	: 75	Giữ điều chỉnh lệch tâm	: ± 20 mm
Trọng lượng	: 95,41 kg/m	Hành trình pít-tông	: ± 50 mm
Chiều dài	: 188,6 m	Đường kính trong	: 508 mm
Lực căng	: 6029 kN	Đường kính ngoài	: 587 mm



Hình 9. Vị trí cáp văng thực hiện đo đạc – cáp T16R-MC16  
(Hình ảnh được chụp bởi tác giả vào 17/12/2023).

Lắp đặt cảm biến gia tốc kế loại PCB-393B12 độ nhạy cao trên dây văng theo phương thẳng đứng (trong mặt phẳng dây văng) thông qua các bộ kẹp với cáp để cố định vị trí của cảm biến trong toàn bộ quá trình đo đạc (Hình 10). Vị trí lắp đặt ở độ cao nằm trong khoảng từ 10-15m tính từ mặt cầu đảm bảo biên độ kích thích đủ tốt. Ngoài ra, để tạo kích thích cho cáp văng trong quá trình đo, sử dụng sợi dây buộc cố định với cáp để đảm bảo không có sự sai khác về vị trí khi đo cáp trước và sau khi lắp giảm chấn. Vị trí buộc dây cách cảm biến khoảng 1m để giảm thiểu ảnh hưởng tới cảm biến gia tốc.



Hình 10. Cảm biến thu thập dữ liệu dao động  
(Hình ảnh được chụp bởi tác giả vào 17/12/2023).



Hình 11. Minh họa việc tạo kích thích  
(Hình ảnh được chụp bởi tác giả vào 17/12/2023).

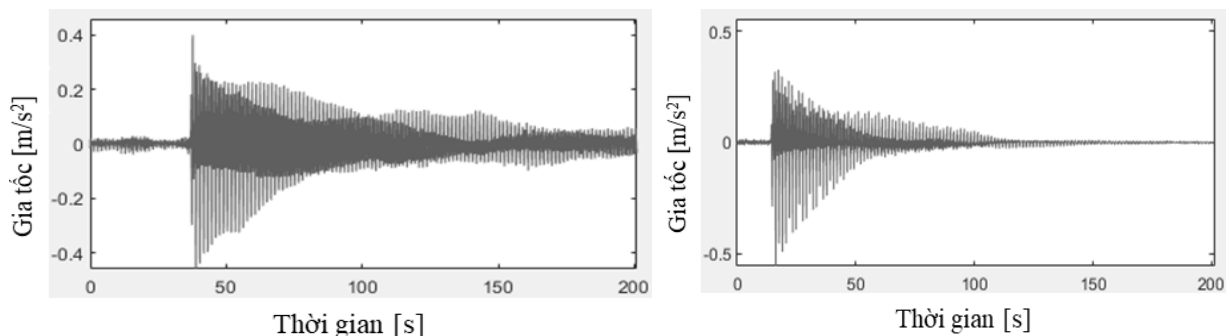
Bước tiếp theo là tạo kích thích cho dây văng (Hình 11). Việc kích thích cưỡng bức được thực hiện bởi 3-4 người đồng thời và khi cáp rung, thả dây để cáp dao động tự do. Một lưu ý quan trọng là việc kích thích qua dây phải được tạo theo phương vuông góc với cáp văng. Việc thực hiện đo đạc, thu thập dữ liệu khi cầu chưa được thông xe trong điều kiện thời tiết ổn định (nhiệt độ trung bình 30°C, trời nắng, không mưa, có gió với vận tốc khoảng 11km/h).

### 3. XỬ LÝ KẾT QUẢ VÀ ĐÁNH GIÁ

Độ suy giảm logarit ( $\delta$ ) tổng cộng của dây văng là tổng của giảm chấn nội tại (intrinsic damping -  $\delta_i$ ), giảm chấn khí động học của cáp (aerodynamic damping -  $\delta_a$ ) và giảm chấn bổ sung bị động (passive damping -  $\delta_p$ ) của giảm chấn, nếu có.

$$\delta_{total} = \delta_i + \delta_a + (\delta_p) \quad (1)$$

Trong nghiên cứu này chỉ tập trung xác định hiệu quả của giảm chấn thụ động, tức là đánh giá hiệu quả giảm chấn bổ sung của IRD đối với cáp T16R-MC16. Dữ liệu dao động của cáp văng theo thời gian là gia tốc trên miền tần số với tần số lấy mẫu là 1651 Hz. Sử dụng phần mềm Macec [28], để phân tích các đặc trưng động của cáp như tần số dao động tự nhiên và hệ số giảm chấn. Hàm truyền đổi Fourier nhanh (Fast Fourier Transform – FFT) được áp dụng và bộ lọc Butterworth bậc 4 để loại bỏ các dải tần số không mong muốn từ dữ liệu thô.

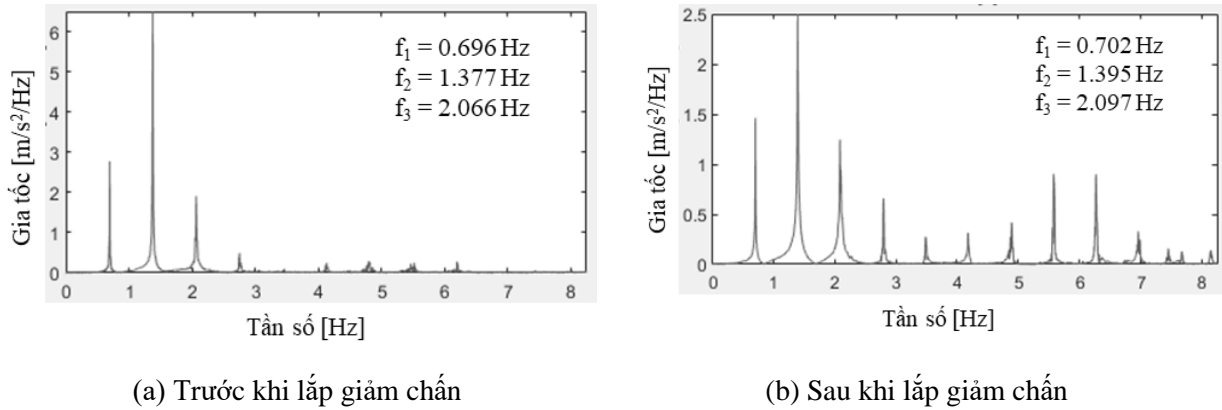


(a) Trước khi lắp giảm chấn

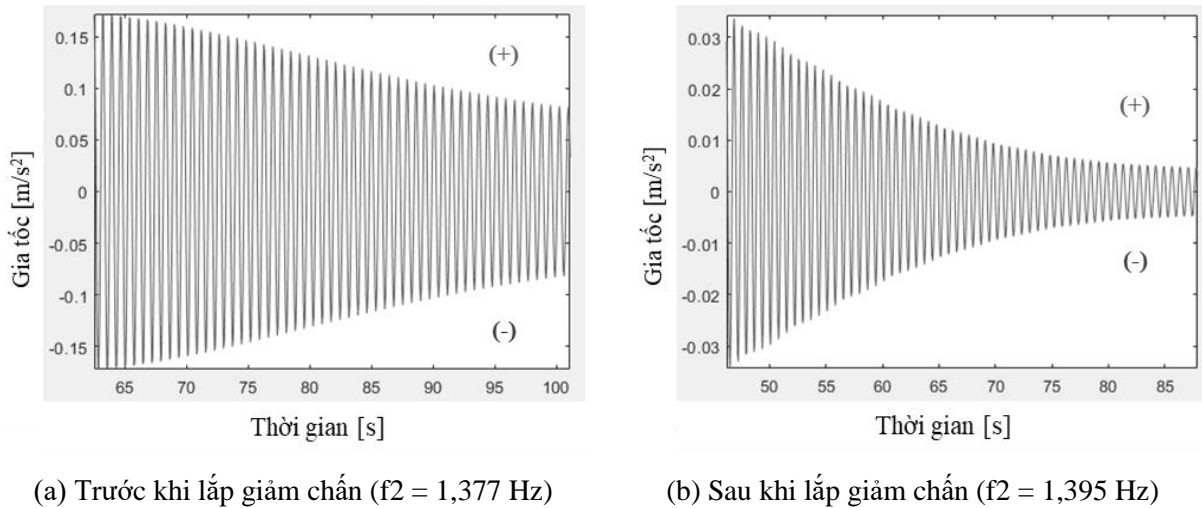
(b) Sau khi lắp giảm chấn

Hình 12: Dữ liệu thô thu thập từ cảm biến trong quá trình đo.





Hình 13. Phổ tần số trên miền thời gian.

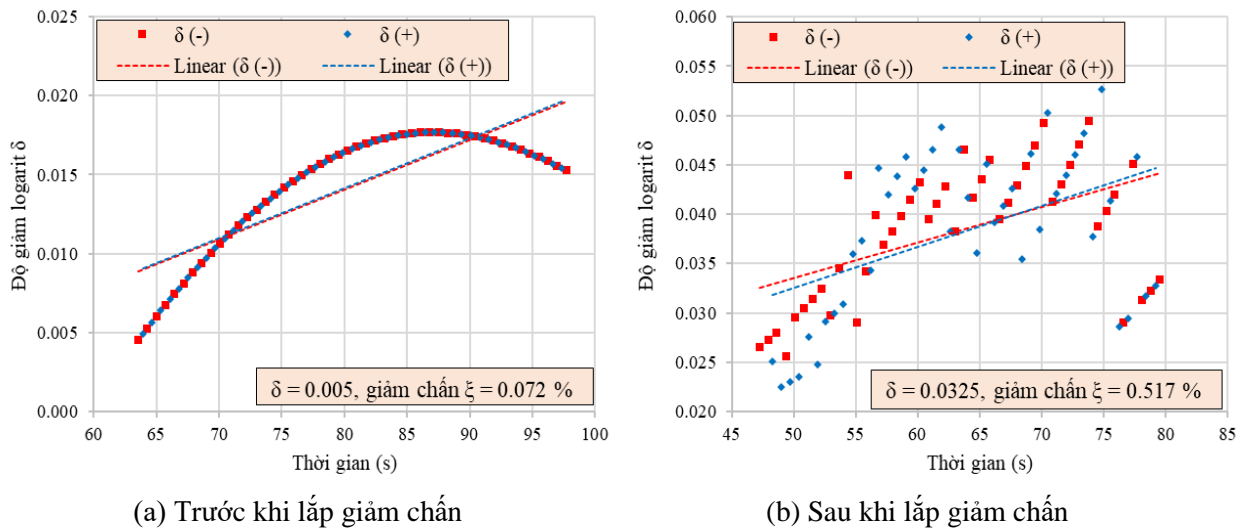


Hình 14. Dữ liệu dạng dao động thứ 2 sau khi lọc.

Từ biểu đồ trong Hình 14, có thể nhận thấy rằng cả 2 bộ dữ liệu dao động tắt dần của cáp có xu hướng giảm dần theo thời gian và điều này rõ ràng hơn trong trường hợp cáp đã được lắp giảm chấn. Từ các đỉnh biên độ dao động này thực hiện xác định hệ số giảm chấn. Trong bước này, hệ số giảm chấn ( $\xi$ ) có thể thu được thông qua độ suy giảm logarit ( $\delta$ ) dựa trên các biên độ dao động của cáp theo công thức [20]., [21]., [24]., [29]. :

$$\xi \approx \frac{\delta}{2\pi} = \frac{\ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right)}{2\pi} \quad (2)$$

Trong đó,  $A_n$  và  $A_{n+1}$  lần lượt là biên độ dao động tự do của “n+1” và “n” của dạng dao động của cáp vắng rung tự do. Chúng liên quan đến năng lượng của cáp dây văng. Cần phải lưu ý rằng, biên độ dao động cho mỗi lần kích thích là ngẫu nhiên. Dựa trên biểu đồ dao động tự do của cáp ở dạng dao động thứ 2, là dạng dao động được cho là ảnh hưởng chính từ gió, thu được biểu đồ suy giảm logarit theo thời gian như Hình 15.



Hình 15. Biểu đồ độ suy giảm logarit theo thời gian.

#### 4. KẾT LUẬN

Từ kết quả quá trình đo đặc hiệu quả giảm chấn thực tế, có thể nhận thấy rằng cấp thực hiện đo đặc đã cải thiện đáng kể hiệu quả giảm chấn. Độ giảm chấn bổ sung là hơn 0,445% cho cáp văng được lắp đặt loại giảm chấn hướng tâm bên trong (IRD). Ngoài ra, việc lắp đặt giảm chấn làm thay đổi chiều dài tự do của cáp, điều này thể hiện ở tỷ lệ tăng về tần số. Với dạng dao động 1 là 0,86%, dạng dao động 2 là 1,31% và dạng dao động 3 là 1,50%. Các tác giả kiến nghị việc đo giảm dao động được theo dõi định kỳ trong quá trình khai thác và cần được ghi vào quy trình bảo trì cầu.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2024-CT-KDN-003. Nhóm tác giả chân thành cảm ơn **Tiến sĩ Hồ Việt Long** (Phân hiệu Trường Đại học Giao thông vận tải tại Thành phố Hồ Chí Minh) vì đã có các góp ý quý báu trong quá trình đo đặc tại hiệu trường và hoàn thiện nghiên cứu này.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. F.J. Carrion, J.A. Quintana, S.E. Crespo, SHM of a stayed bridge during a structural failure, case study: the Rio Papaloapan Bridge, J Civil Struct Health Monit, 7 (2017) 139–151. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0221-z>.
- [2]. J.M. Caicedo, S.J. Dyke, Implementation of a SHM method on a numerical model of a cable-stayed bridge, in: Proceedings of the 2004 American Control Conference, 5 (2004) 4213–4218. <https://doi.org/10.23919/ACC.2004.1383969>.
- [3]. M. Ju, C. Park, G. Kim, Structural Health Monitoring (SHM) for a cable stayed bridge under typhoon, KSCE J Civ Eng, 19 (2015) 1058–1068. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0039-3>.
- [4]. H. Li, J. Ou, The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges, J Civil Struct Health Monit, 6 (2016) 43–67. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0115-x>.
- [5]. S. Jang, H. Jo, S. Cho, K. Mechitov, J.A. Rice, S.-H. Sim, H.-J. Jung, C.-B. Yun, B.F.J. Spencer,

- G. Agha, Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation, *Smart Structures and Systems*, 6 (2010) 439–459. [https://doi.org/10.12989/sss.2010.6.5\\_6.439](https://doi.org/10.12989/sss.2010.6.5_6.439).
- [6]. Y.-L. Xu, *Wind Effects on Cable-Supported Bridges*, John Wiley & Sons, 2013.
- [7]. M. Matsumoto, N. Shiraiishi, H. Shirato, Rain-wind induced vibration of cables of cable-stayed bridges, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 43 (1992) 2011–2022. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90628-N](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90628-N).
- [8]. W. Shen, S. Zhu, Harvesting energy via electromagnetic damper: Application to bridge stay cables, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26 (2015) 3–19. <https://doi.org/10.1177/1045389X13519003>.
- [9]. K. Kleissl, C.T. Georgakis, Aerodynamic control of bridge cables through shape modification: A preliminary study, *Journal of Fluids and Structures*, 27 (2011) 1006–1020. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.04.012>.
- [10]. J. Ahmad, S. Cheng, Effect of cross-link stiffness on the in-plane free vibration behaviour of a two-cable network, *Engineering Structures*, 52 (2013) 570–580. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.018>.
- [11]. E.A. Johnson, G.A. Baker, B.F. Spencer, Y. Fujino, Semiactive Damping of Stay Cables, *Journal of Engineering Mechanics*, 133 (2007) 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:1(1)).
- [12]. B.M. Pacheco, Y. Fujino, A. Sulekh, Estimation Curve for Modal Damping in Stay Cables with Viscous Damper, *Journal of Structural Engineering*, 119 (1993) 1961–1979. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1993\)119:6\(1961\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:6(1961)).
- [13]. Y.L. Xu, Z. Yu, Vibration of Inclined Sag Cables with Oil Dampers in Cable-Stayed Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 3 (1998) 194–203. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(1998\)3:4\(194\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(1998)3:4(194)).
- [14]. H. Zhou, L. Sun, F. Xing, Damping of Full-Scale Stay Cable with Viscous Damper: Experiment and Analysis, *Advances in Structural Engineering*, 17 (2014) 265–274. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.2.265>.
- [15]. H. Zhou, N. Xiang, X. Huang, L. Sun, F. Xing, R. Zhou, Full-scale test of dampers for stay cable vibration mitigation and improvement measures, *Structural Monitoring and Maintenance*, 5 (2018) 489–506. <https://doi.org/10.12989/smm.2018.5.4.489>.
- [16]. Y. Li, W. Shen, H. Zhu, Vibration mitigation of stay cables using electromagnetic inertial mass dampers: Full-scale experiment and analysis, *Engineering Structures*, 200 (2019) 109693. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109693>.
- [17]. Công ty TNHH Giao thông vận tải, Báo cáo kết quả kiểm định, Dự án: Đánh giá an toàn, kiểm định cầu Đakrông Km249+824, đường Hồ Chí Minh (nhánh Tây), tỉnh Quảng Trị, 2022.
- [18]. Công ty TNHH Giao thông vận tải, Báo cáo kết quả kiểm định, Công trình: Kiểm định và đánh giá an toàn cầu Nhật Tân, 2023.
- [19]. Công ty TNHH Giao thông vận tải, Báo cáo kết quả kiểm tra, Công trình: Kiểm tra chi tiết hệ thống dây văng cầu Mỹ Thuận, Quốc lộ 1, tỉnh Tiền Giang và Vĩnh Long, 2021.
- [20]. D. Jungwirth, G.L. Balázs, P. Boitel, Y. Bournand, P. Brenni, A. Chabert, G. Clark, A. Demonté, H.R. Ganz, C. Gläser, P. Jacquet, J.-F. Klein, J. Koster, B. Lecinq, M. Miehlbradt, T.L. Neff, T. Niki, O. Nützel, A. Rahman, R. Saul, S. Sengupta, K. Shawwaf, J.H.A. Van Beurden, Y.P. Virmani, *fib Bulletin 30. Acceptance of stay cable systems using prestressing steels*, fib. The International Federation for Structural Concrete, 2005. <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0030>.
- [21]. Cable stays: recommendations of French interministerial commission on Prestressing, SETRA, Bagneux Cedex, 2002.
- [22]. S. Kumarasena, N.P. Jones, P. Irwin, P. Taylor, HNTB Corporation, *Wind-Induced Vibration of*

Stay Cables [Final Report; August 2007], 2007. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/16449>.

[23]. Nam Long, Khánh thành cầu Mỹ Thuận 2, cầu dây văng đầu tiên do kỹ sư Việt Nam thiết kế, (2023). <https://thanhvien.vn/khanh-thanh-cau-my-thuan-2-cau-day-vang-dau-tien-do-ky-su-viet-nam-thiet-ke-185231224093941899.htm>, truy cập ngày 15/01/2024.

[24]. P.-T. Institute, Recommendations for Stay Cable Design, Testing, and Installation, Post-Tensioning Institute, 2007.

[25]. Bộ Giao thông vận tải, Ban Quản lý dự án 7, Hồ sơ thiết kế, Bước thiết kế bản vẽ thi công, Gói thầu XL.03B-Thi công thân trụ (từ trụ T14 đến T17) và kết cấu phần trên nhịp chính dây văng; kê gia cố bờ sông; hệ thống an toàn giao thông đường bộ; hệ thống chiếu sáng, Tập II: Bản vẽ phần cầu chính dây văng, Quyển III.3.1: Kết cấu phần trên-hệ thống cáp dây văng, 2022.

[26]. Freyssinet, Freyssinet stay cable system - dampers, (n.d.). <https://www.freyssinet.com/solution/build/cable-systems/dampers/>, truy cập ngày 05/01/2024.

[27]. Sống cho gia đình, [Cầu Phú Mỹ] Toàn cảnh cầu Phú Mỹ từ quận 2 tới quận 7, 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=n14HJt3hGc>, truy cập ngày 06/01/2024.

[28]. MACEC: The MATLAB Toolbox for Experimental and Operational Modal Analysis — Structural Mechanics, (n.d.). <https://bwk.kuleuven.be/bwm/macec>, truy cập ngày 07/01/2024.

[29]. L.X. Le, H. Katsuchi, S. Kawai, Damping in stay cable with damper: Practical universal damping curve and full-scale measurement, Journal of Sound and Vibration, 569 (2024) 118090. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118090>.