



## COMPARISON OF DAMPING EFFECTIVENESS IN DAMPERS ATTACHED INTERNALLY AND EXTERNALLY TO STAY CABLE, CONSIDERING STAY CABLE'S BENDING STIFFNESS

Nguyen Duy Thao

The University of Danang–University of Science and Technology, 54-Nguyen Luong Bang street, Lien Chieu district, Danang city, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 21/10/2023

Revised: 17/03/2024

Accepted: 09/04/2024

Published online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.8>

\* *Corresponding author*

Email: ndthao@dut.udn.vn; Tel: +84905292002

**Abstract.** In order to mitigate the vibrations of stay cables in cable-stayed bridges, mechanical dampers are attached to the cables. These dampers typically include viscous dampers installed between the stay cable and the bridge deck (external attachment) and high-damping rubber dampers installed between the stay cable and the interior of the cable guide pipe (internal attachment). The effectiveness in reducing cable vibrations varies significantly between these two types of dampers. This study presents results on the cable vibration behavior with a viscous damper and a high-damping rubber damper attachment model. The reliability of the study results is validated against previously published results by other authors. A comparative study is conducted to assess the vibration reduction effectiveness of a viscous damper and a high-damping rubber damper, providing recommendations for the application of these dampers. The study also analyzes the impact of damper parameters and cable bending stiffness on the damping ratio of stay cables, assisting engineers in selecting optimal parameters for the dampers.

**Keywords:** Stay cable, Viscous damper, High Damping Rubber Damper, damping ratio, bending stiffness.

@ 2024 University of Transport and Communications



# SO SÁNH HIỆU QUẢ GIẢM CHẤN CỦA THIẾT BỊ CẢN GẮN BÊN TRONG VÀ GẮN BÊN NGOÀI DÂY VĂNG CÓ XÉT ĐẾN ĐỘ CỨNG CHỐNG UỐN CỦA DÂY VĂNG

Nguyễn Duy Thảo

Trường Đại Học Bách Khoa - Đại Học Đà Nẵng, 54 - Nguyễn Lương Bằng, Quận Liên Chiểu, Thành phố Đà Nẵng, Việt Nam

## THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 21/10/2023

Ngày nhận bài sửa: 17/03/2024

Ngày chấp nhận đăng: 09/04/2024

Ngày xuất bản Online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.8>

\* Tác giả liên hệ

Email: ndthao@dut.udn.vn; Tel: +84905292002

**Tóm tắt.** Để hạn chế dao động dây cáp văng trong cầu dây văng, các thiết bị giảm chấn cơ học được gắn thêm vào dây. Các thiết bị giảm chấn nhớt thường được gắn giữa dây văng và bản mặt cầu (thiết bị cản gắn bên ngoài), trong khi đó thiết bị cản cao su thường được gắn giữa dây cáp văng và bên trong ống dẫn hướng của dây cáp văng (thiết bị cản gắn bên trong). Hiệu quả giảm dao động của hai dạng thiết bị này là hoàn toàn khác nhau. Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu dao động dây cáp văng với hai mô hình gắn thiết bị cản nhớt và cản cao su. Độ tin cậy của kết quả nghiên cứu được kiểm chứng với các kết quả của các tác giả khác đã công bố trước đây. Tiến hành khảo sát, so sánh hiệu quả giảm dao động của thiết bị cản gắn nhớt và cao su, từ đó đưa ra các khuyến cáo về việc áp dụng hai loại thiết bị cản này. Bài báo cũng tiến hành phân tích ảnh hưởng của các thông số của các thiết bị cản, độ cứng chống uốn của dây đến tỷ số cản của dây cáp văng, qua đó có thể giúp các kỹ sư thiết kế lựa chọn được các thông số tối ưu của các thiết bị cản.

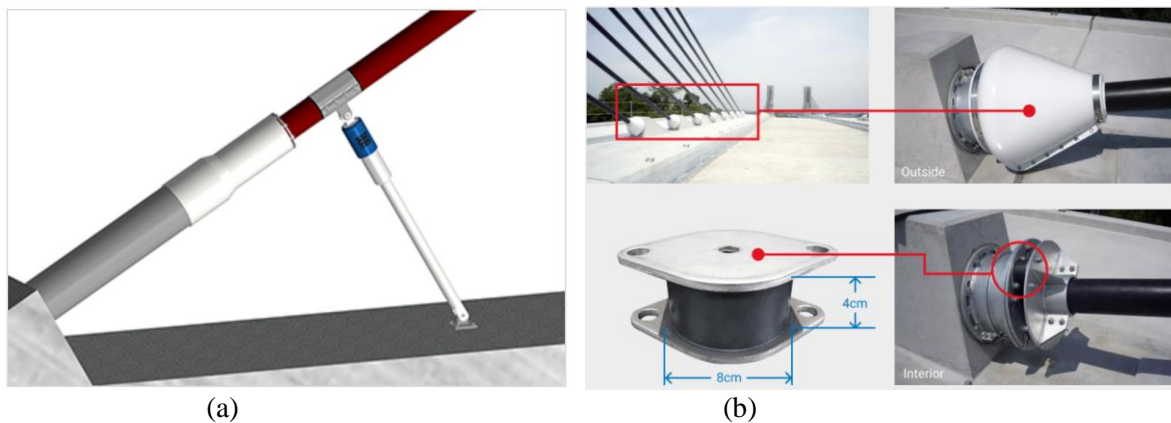
**Từ khóa:** Dây cáp văng, thiết bị cản nhớt (VD), thiết bị cản cao su (HDRD), tỷ số cản, độ cứng chống uốn.

@2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cầu dây văng là kết cấu cầu được sử dụng rất phổ biến trên thế giới do khả năng vượt nhịp lớn. Dây cáp văng là bộ phận rất quan trọng trong cầu dây và được xem là kết cấu mềm dẻo theo phương ngang và có tỷ số cản thấp. Trong quá trình khai thác, dây cáp văng dễ bị

dao động dưới tác dụng các loại tải trọng như: gió, mưa và gió kết hợp hoặc xe cộ di chuyển trên cầu [1-3]. Các dây văng thường xuyên bị dao động với biên độ lớn sẽ bị phá hoại mỏi hoặc gây cảm giác không an toàn cho người và các phương tiện lưu thông trên cầu. Để hạn chế các dao động, dây cáp văng thường được gắn thêm các thiết bị cản cơ học nhằm nâng cao tỷ số cản của dây cáp văng. Các thiết bị cản nhớt (Viscous damper – VD) thường được gắn bên ngoài tại vị trí dây cáp văng và bản mặt cầu như Hình 1a. Vị trí thiết bị cản nhớt được lắp đặt bên ngoài dây cáp văng nên làm ảnh hưởng đến mỹ quan của công trình cầu. Trong quá trình khai thác, các thiết bị cản nhớt cũng xảy ra hiện tượng thấm hoặc chảy dầu ra ngoài làm gia tăng chi phí duy tu bảo dưỡng thiết bị. Các thiết bị cản cao su (High Damping Rubber Damper - HDRD) được thiết kế để lắp đặt bên trong ống dẫn hướng như Hình 1.b. đã phần nào giải quyết được các hạn chế nêu trên của thiết bị cản nhớt, đặc biệt tính ổn định nhiệt của vật liệu cao su cũng lớn hơn so với dung dịch dầu trong thiết bị cản nhớt nên hiệu quả giảm chấn của thiết bị cản cao su cũng ổn định hơn so với thiết bị cản nhớt.



Hình 1. Dây cáp văng gắn thiết bị cản: a) Thiết bị cản nhớt [4], b) Thiết bị cản cao su [5].

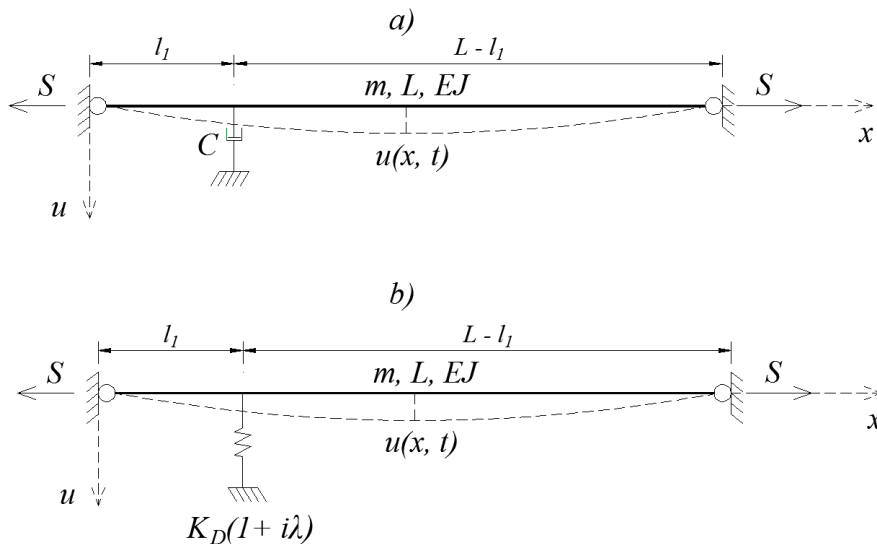
Pacheco và các cộng sự [6] công bố các nghiên ban đầu về giảm dao động dây cáp văng bằng giải pháp gắn thiết bị cản nhớt. Kết quả nghiên cứu cho phép dự báo được tỷ số cản thứ nhất có thể đạt được của dây văng theo đường cong dự báo tỷ số cản của dây văng khi gắn thiết bị cản nhớt. Sau đó, các kết quả nghiên cứu Krenk và Nielson [7] mở rộng thêm khi xét ảnh hưởng của độ võng ban đầu của dây đến tỷ số cản có thể đạt của dây văng. Các nhóm tác giả Fujino và Hoang [8], Main và Jones [9], Nguyen và Nguyen [10] trình bày các kết quả phân tích ảnh hưởng của độ cứng chống uốn EJ của dây văng đến tỷ số cản có thể đạt được của dây văng khi gắn thiết bị cản nhớt. Bên cạnh thiết bị cản nhớt, vật liệu cao su với khả năng đàn hồi và hấp thụ tốt năng lượng dao động cũng được nghiên cứu áp dụng trong cầu dây văng. Thiết bị cản cao su gồm nhiều lớp đệm cao su được gắn xung dây cáp văng (hoặc vòng đệm cao su) và được đặt bên trong ống dẫn hướng cáp nên cũng dễ dàng sản xuất và lắp đặt hơn so với thiết bị cản nhớt. Đối với hướng nghiên cứu giảm dao động dây văng bằng thiết bị cản cao su, Nakamura và các cộng sự [11] sử dụng công thức thực nghiệm để xác định các thông số của thiết bị cản cao su nhằm đạt hiệu quả giảm chấn lớn nhất cho dây văng. Công thức gần đúng để xác định các tỷ số cản đầu tiên của dây cáp văng gắn thiết bị cản cao su cũng được đề xuất bởi Fujino và Hoang [10]. Cu và Han [12] thiết lập công thức giải tích từ bài toán về trị riêng của phương trình tần số để khảo sát dao động dây cáp văng gắn thiết bị cản cao su. Le và các cộng sự [13] đề xuất công thức tiệm cận về tỷ số cản dây cáp văng gắn thiết bị cản cao su có xét đến độ cứng âm của thiết bị cản bằng cách lắp thêm bộ lò xo nén trước trong thiết bị nhằm nâng cao hiệu quả làm việc của thiết bị cản. Do cơ chế hoạt động tiêu tán năng lượng khác nhau nên hiệu quả giảm dao động của thiết bị cản nhớt và thiết bị

cản cao su cũng khác nhau. Nhìn chung nghiên cứu của các tác giả trên đều chỉ tập trung nghiên cứu riêng lẻ trên từng loại thiết bị cản, ít đưa ra các kết quả so sánh trực tiếp về hiệu quả giảm dao động của thiết bị cản nhớt và thiết bị cản cao su đối với dây cáp văng, độ cứng chống uốn của dây cáp văng thường cũng ít được đề cập đến.

Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu dao động dây cáp văng với hai mô hình gắn thiết bị cản nhớt và thiết bị cản cao su. Độ cứng chống uốn của dây văng cũng được xét đến để phù hợp hơn với trạng thái làm việc thực tế của kết cấu. Các kết quả thu được từ hai mô hình phân tích cũng được kiểm chứng, so sánh và khá phù hợp với các kết quả khác đã công bố. Bài báo cũng tiến hành khảo sát ảnh hưởng của các thông số của thiết bị đến tỷ số cản lớn nhất có thể đạt được của dây cáp văng, thông qua đó có thể xác định được các thông số tối ưu của thiết bị cản như: hệ số nhớt (của thiết bị cản), hệ số đàn hồi và hệ số tiêu hao của vật liệu cao su (của thiết bị cản cao su). So sánh hiệu quả giảm chấn của thiết bị cản nhớt và thiết bị cản cao su thông qua tỷ số cản lớn nhất có thể đạt được của dây cáp văng khi gắn tương ứng với mỗi loại thiết bị cản.

## 2. PHƯƠNG TRÌNH DAO ĐỘNG CỦA DÂY CÁP VĂNG GẮN THIẾT BỊ CẢN

Xét dây cáp văng có chiều dài  $L$ , chịu lực căng  $S$ . Các số liệu ban đầu của dây cáp văng gồm: độ cứng chống uốn  $EJ$ , khối lượng trên đơn vị chiều dài  $m$ . Giả thuyết rằng lực căng trong dây văng lớn hơn nhiều so với trọng lượng dây do đó độ võng của dây là rất nhỏ (có thể bỏ qua), liên kết hai đầu dây là khớp xoay (độ cứng góc xoay tại hai đầu dây được xem là nhỏ và có thể bỏ qua), bỏ qua giảm chấn bản thân dây cáp văng và không khí. Mô hình phân tích dao động dây cáp văng gắn thiết bị cản nhớt hoặc thiết bị cản cao su tại vị trí  $l_1$  thể hiện như Hình 2.



Hình 2. Mô hình phân tích dao động dây cáp văng gắn thiết bị cản:  
a) thiết bị cản nhớt, b) thiết bị cản cao su.

Trong đó:  $x$ - trục tọa độ dọc theo trục dây văng;  $u(x,t)$ - chuyển vị ngang (phương đứng) của dây cáp văng;  $C$ - hệ số nhớt của thiết bị cản nhớt;  $K_D, \lambda$  – lần lượt là hệ số đàn hồi và hệ số tiêu hao của thiết bị cản cao su; số ảo  $i^2 = -1$ .

Tại vị trí gắn thiết bị cản, lực cản được mô hình hóa thành các lực tập trung theo Fujino và Hoang [8], Cu và Han [12] như sau:

Thiết bị cản nhót: 
$$f_c(l_1, t) = c \left[ \frac{\partial u(l_1, t)}{\partial t} - \frac{\partial u_k(t)}{\partial t} \right] \quad (1)$$

Thiết bị cản cao su: 
$$f_c(l_1, t) = K_D(1 + i\lambda) \quad (2)$$

Theo Fujino và Hoang [8], Nguyen và Nguyen [10], Nguyen và Vo [14] phương trình dao động của hệ dây cáp văng gắn thiết bị cản có xét đến độ cứng chống uốn EJ của dây văng như sau:

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - S \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f_c(l_1, t) \delta(x - l_1) \quad (3)$$

Trong đó:  $\delta(x - l_1)$ - hàm delta dirac

Áp dụng phương pháp tách biến của Fourier, nghiệm của phương trình (3) có dạng:

$$u(x, t) = U(x)T(t) \quad (4)$$

Từ các điều kiện biên tại hai đầu dây cáp:  $U(0) = U(L) = 0$ ,  $U''(0) = U''(L) = 0$ ; các điều kiện liên tục tại vị trí gắn thiết bị giảm chấn  $U(l_{1-}) = U(l_{1+}) = U(l_1)$  và điều kiện cân bằng lực tại vị trí gắn thiết bị cản, có thể thiết lập được phương trình tần số  $\eta$  của hệ dây cáp văng-thiết bị cản như sau:

+Trường hợp dây văng gắn thiết bị cản nhót:

$$\left( \frac{EJm}{S^2} \eta^2 - 1 \right) \left[ \cot g \left( 1 - \frac{l_1}{L} \right) L \sqrt{\frac{m}{S}} \eta + \cot g L \sqrt{\frac{m}{S}} \frac{l_1}{L} \eta \right] = \frac{C}{\sqrt{mS}} i \quad (5)$$

+Trường hợp dây văng gắn thiết bị cản cao su:

$$\left( \frac{EJm}{S^2} \eta^2 - 1 \right) \left[ \cot g \left[ \left( 1 - \frac{l_1}{L} \right) L \sqrt{\frac{m}{S}} \eta \right] + \cot g \left( L \sqrt{\frac{m}{S}} \frac{l_1}{L} \eta \right) \right] = \frac{K_D(1 + i\lambda)}{\eta \sqrt{mS}} \quad (6)$$

Theo Main và Jones [15], đặt  $k_j$  là trị riêng dạng phức của  $\eta_j$  ở mode dao động thứ  $j$  được xác định như sau:

$$k_j = \sigma_j + i\phi_j = \frac{\eta_j}{\omega_1^0} \left( -\xi_j + i\sqrt{1 - \xi_j^2} \right) \quad (7)$$

Trong đó:  $\sigma_j, \phi_j$  -lần lượt là phần thực và phần ảo của trị riêng  $k_j$ ;  $\omega_1^0$  -là tần số dao động cơ bản của dây cáp văng khi chưa gắn thiết bị cản;  $\xi_j$  là tỷ số cản của dây cáp văng ở mode dao động thứ  $j$ .

Từ đó có thể xác định được tỷ số cản  $\xi_j$  và tần số dao động  $\eta_j$  của hệ ở mode dao động thứ  $j$  như sau:

$$\eta_j = \omega_1^0(\sigma_j + i\phi_j); \quad \xi_j = \left( \frac{\phi_j^2}{\sigma_j^2} + 1 \right)^{-0.5} \quad (8)$$

Thay phương trình (8) vào các phương trình (5) hoặc (6) rồi tách riêng phần thực và phần ảo ta được hệ các phương trình như sau:

+Trường hợp dây văng gắn thiết bị cản nhớt:

$$\left[ \Delta(\sigma^2 - \phi^2) - 1 \right] \left[ \frac{\sin 2\pi(1 - \frac{l_1}{L})\sigma}{M_1} + \frac{\sin 2\pi \frac{l_1}{L} \sigma}{M_2} \right] + 2\Delta\sigma\phi \left[ \frac{\sinh 2\pi(1 - \frac{l_1}{L})\phi}{M_1} + \frac{\sinh 2\pi \frac{l_1}{L} \phi}{M_2} \right] = 0 \quad (9)$$

$$\left[ 1 - \Delta(\sigma^2 - \phi^2) \right] \left[ \frac{\sinh 2\pi(1 - \frac{l_1}{L})\phi}{M_1} + \frac{\sinh 2\pi \frac{l_1}{L} \phi}{M_2} \right] + 2\Delta\sigma\phi \left[ \frac{\sin 2\pi(1 - \frac{l_1}{L})\sigma}{M_1} + \frac{\sin 2\pi \frac{l_1}{L} \sigma}{M_2} \right] - 2\Theta = 0 \quad (10)$$

+Trường hợp dây văng gắn thiết bị cản cao su:

$$\left[ \Delta(\sigma^2 - \phi^2) - 1 \right] \left[ \frac{\sin[2\pi(1 - \frac{l_1}{L})\sigma]}{M_1} + \frac{\sin(2\pi \frac{l_1}{L} \sigma)}{M_2} \right] + 2\Delta\sigma\phi \left[ \frac{\sinh[2\pi(1 - \frac{l_1}{L})\phi]}{M_1} + \frac{\sinh(2\pi \frac{l_1}{L} \phi)}{M_2} \right] - 2\Phi \frac{\sigma + \lambda\phi}{\sigma^2 + \phi^2} = 0 \quad (11)$$

$$\left[ 1 - \Delta(\sigma^2 - \phi^2) \right] \left[ \frac{\sinh[2\pi(1 - \frac{l_1}{L})\phi]}{M_1} + \frac{\sinh(2\pi \frac{l_1}{L} \phi)}{M_2} \right] + 2\Delta\sigma\phi \left[ \frac{\sin[2\pi(1 - \frac{l_1}{L})\sigma]}{M_1} + \frac{\sin(2\pi \frac{l_1}{L} \sigma)}{M_2} \right] + 2\Phi \frac{\phi - \lambda\phi}{\sigma^2 + \phi^2} = 0 \quad (12)$$

Trong đó:  $\Delta$ ,  $\Theta$  và  $\Phi$  là các thông số không thứ nguyên phản ánh các thông số của dây cáp văng, thiết bị cản nhớt và thiết bị cản cao su;  $M_1$  và  $M_2$  là các hệ số được xác định như sau:

$$\Delta = \pi^2 \frac{EJ}{SL^2}; \Theta = \frac{C}{\sqrt{mS}}; \Phi = \frac{K_D L}{\pi S} \quad (13)$$

$$M_1 = \cosh^2[\pi(1 - \frac{l_1}{L})\phi] - \cos^2[\pi(1 - \frac{l_1}{L})\sigma] \quad (14)$$

$$M_2 = \cosh^2[\pi \frac{l_1}{L} \phi] - \cos^2[\pi \frac{l_1}{L} \sigma] \quad (15)$$

Hệ phương trình (9) và (10) là hệ phương trình siêu việt đối với trường hợp dây cáp văng gắn thiết bị cản nhớt; tương tự hệ phương trình (11) và (12) đối với trường hợp dây cáp văng gắn thiết bị cản cao su. Tương ứng với mỗi số liệu đầu vào của dây cáp văng  $\Delta$  và các thông số của các thiết bị cản nhớt  $\Theta$ , thiết bị cản cao su  $\Phi$  và  $\lambda$ , vị trí gắn thiết bị cản  $l_1/L$  các hệ phương trình này có thể được giải lập bằng phương pháp số để thu được các giá trị  $\sigma_j, \phi_j$  từ đó xác định được tỷ số cản  $\zeta_j$  của dây cáp văng.

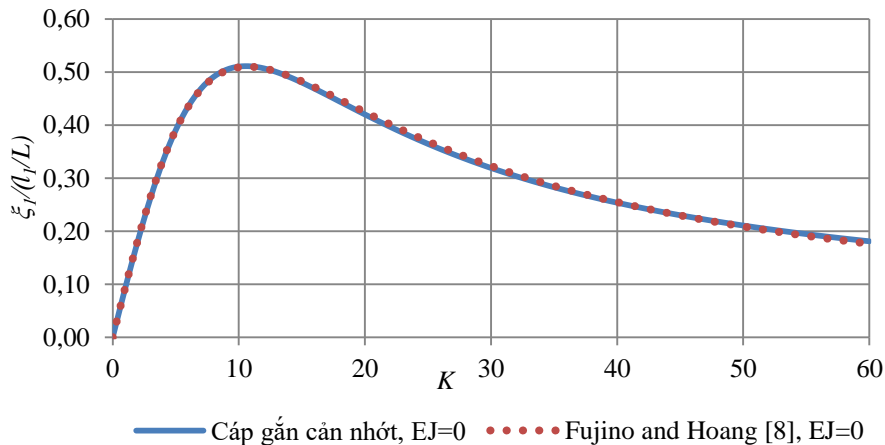
### 3. CÁC KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

#### 3.1. Các số liệu ban đầu

Kết quả phân tích tỷ số cản của hệ dây cáp văng gắn thiết bị cản phụ thuộc vào các thông số ban đầu của dây cáp văng và thiết bị cản. Số liệu ban đầu của dây cáp văng được chọn như sau: chiều dài  $L=100(m)$ , khối lượng đơn vị  $m=61,4 (kg/m)$ , lực căng  $S=3000 (kN)$ , độ cứng chống uốn  $EJ=1,291 \times 10^4 ((kN/m^2))$ . Số liệu đầu vào của thiết bị cản nhớt: hệ số cản nhớt  $C$  được xét như tham số đầu vào thay đổi thông qua hệ số  $\Theta=[0-100]$ . Các số liệu đầu vào của thiết bị cản cao su:  $K_D, \lambda$  thay đổi thông qua hệ số  $\Phi=[0-15]$  và  $\lambda=[0-20]$ .

#### 3.2. Kiểm chứng các kết quả phân tích

Để kiểm tra độ tin cậy của các kết quả phân tích trên hai mô hình dây cáp văng gắn thiết bị cản nhớt và thiết bị cản ma sát, nhóm tác giả tiến hành so sánh kết quả nghiên cứu thu được với một số kết quả nghiên cứu đã công bố trước đây như sau:

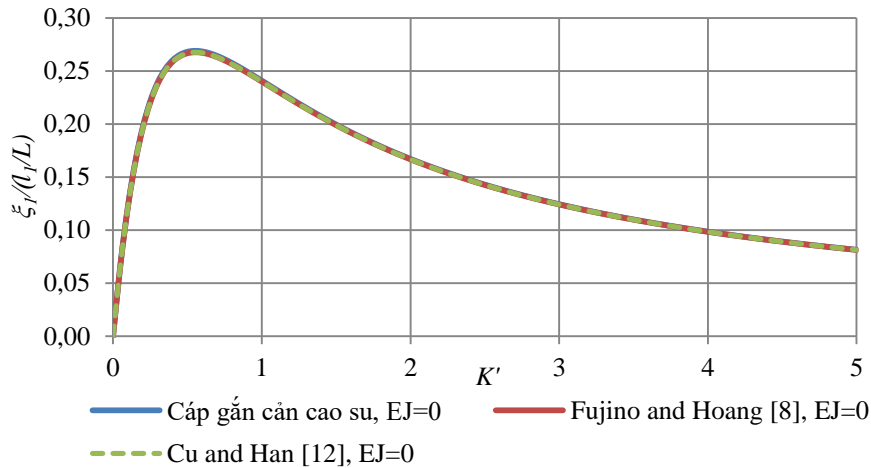


Hình 3. Tỷ số cản thứ nhất mô hình dây cáp văng gắn thiết bị cản nhớt.



**Trường hợp 1:** Xét mô hình dây cáp văng gắn thiết bị cản nhót và so sánh các kết quả đạt được với các kết quả của Fujino và Hoang [8], lưu ý rằng chưa xét đến độ cứng chống uốn của dây văng ( $EJ=0$ ). Thông số cản của thiết bị cản nhót được thiết lập lại có giá trị tương tự như [8] là  $K = \pi Cl_l / (L(mS)^{0.5})$ . Tiến hành giải hệ phương trình (9) và (10) với các thông số đầu vào như trên để thu được hệ số cản của dây cáp văng trong trường hợp gắn thiết bị cản nhót. Các kết quả nghiên cứu về tỷ số cản thứ nhất thu được trên mô hình phân tích hoàn toàn phù hợp với các kết quả nghiên cứu của Fujino và Hoang [8] và thể hiện như Hình 3.

**Trường hợp 2:** Xét dây cáp văng gắn thiết bị cản cao su và so sánh các kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả với các kết quả của Fujino và Hoang [8], Cu và Han [12]. Để phù hợp với các thông số đầu vào của [8] và [12] thông số độ cứng của thiết bị cản cao su được viết lại là  $K' = l_l K_D / S$ , lưu ý rằng chưa xét đến độ cứng chống uốn của dây văng ( $EJ=0$ ). Tiến hành giải hệ phương trình siêu việt (11) và (12) với các thông số đầu vào như trên để thu được hệ số cản của dây cáp văng. Các kết quả nghiên cứu về tỷ số cản thứ nhất của dây cáp văng thu được trên mô hình phân tích hoàn toàn phù hợp với các kết quả nghiên cứu của Fujino và Hoang [8], Cu và Han [12] và thể hiện như Hình 4.



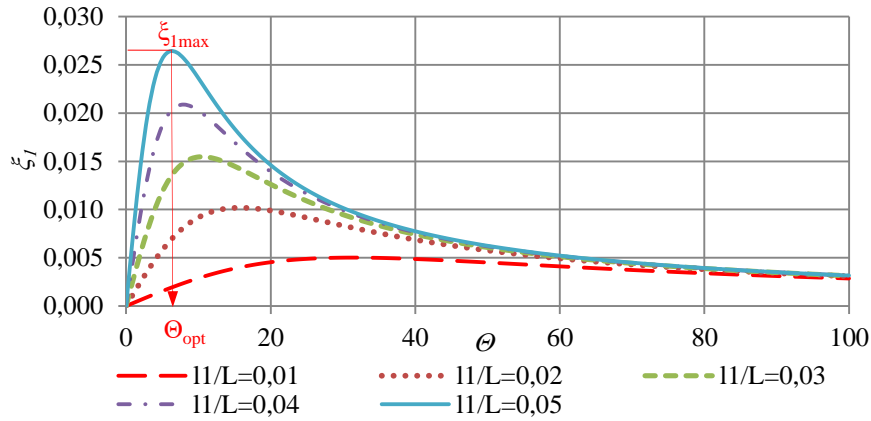
Hình 4. Tỷ số cản thứ nhất mô hình dây cáp văng gắn thiết bị cản cao su.

Các kết quả phân tích tỷ số cản thứ nhất của dây cáp văng của tác giả trong cả hai mô hình kiểm chứng đều khá phù hợp với các kết quả nghiên cứu đã công bố Fujino và Hoang [8], Cu và Han [12]. Do vậy hai mô hình phân tích dao động dây cáp văng có gắn một thiết bị cản nhót, một thiết bị cản cao su và phương pháp giải do tác giả đề xuất là đảm bảo độ tin cậy, các mô hình này sẽ được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của các thông số thiết bị cản nhót, thiết bị cản cao su đến hệ số cản lớn nhất có thể đạt được của dây cáp văng đồng thời so sánh hiệu quả giảm dao động của hai loại thiết bị cản này ở các mục tiếp theo sau đây.

### 3.3. Ảnh hưởng của hệ số nhót đến tỷ số cản của dây cáp văng

Hệ số nhót  $C$  của thiết bị cản nhót được phản ánh thông qua thông số  $\Theta = C / (mS)^{0.5}$ . Hiệu quả giảm dao động của dây văng khi gắn thiết bị cản nhót được đánh giá thông qua tỷ số cản  $\zeta$  lớn nhất có thể đạt được của dây cáp văng. Để đánh giá ảnh hưởng của thiết bị cản nhót đến tỷ số cản thứ nhất của dây cáp văng, tiến hành khảo sát với thông số  $\Theta$  thay đổi trong phạm vi vi [0-100], tương ứng với các vị trí lắp đặt thiết bị giảm chấn  $l_1/L = [0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05]$ . Kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình 5.

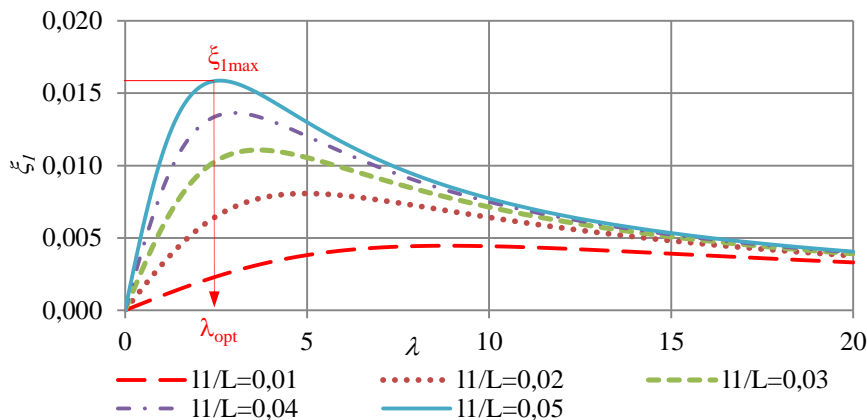




Hình 5. Tỷ số cản thứ nhất mô hình dây cáp văng gắn thiết bị cản nhớt ( $\xi_1-\Theta$ ).

Các kết quả phân tích đạt được trên mô hình dây văng gắn thiết bị cản nhớt cho thấy: Tương ứng với mỗi vị trí lắp đặt thiết bị cản nhớt nhất định, ban đầu khi thông số  $\Theta$  của thiết bị cản nhớt tăng thì tỷ số cản thứ nhất  $\xi_1$  tăng theo. Tuy nhiên sau khi đạt giá trị lớn nhất  $\xi_{1max}$  tỷ số cản của dây văng sẽ suy giảm nhanh khi thông số  $\Theta$  tăng. Như vậy, tại vị trí tỷ số cản thứ nhất đạt giá trị lớn nhất  $\xi_{1max}$  ta sẽ tìm được giá trị tối ưu  $\Theta_{opt}$  từ đó sẽ tìm được hệ số nhớt tối ưu của thiết bị cản nhớt thông qua quan hệ  $\Theta_{opt}=C_{opt}/(mS)^{0.5}$ . Kết quả khảo sát cũng cho thấy với các vị trí gắn thiết bị cản nhớt khác nhau thì hệ số nhớt tối ưu cũng sẽ khác nhau. Vị trí gắn thiết bị cản nhớt  $l_1/L$  càng lớn thì tỷ số cản của dây cáp văng càng lớn, hiệu quả giảm dao động của thiết bị cản cho dây văng càng lớn. Tuy nhiên, để đảm bảo các yêu cầu về mỹ quan cầu, thuận lợi cho việc chế tạo và duy tu bảo dưỡng thiết bị cản nhớt trong quá trình khai thác, vị trí gắn thiết bị cản nhớt thường được khuyến cáo chọn trong phạm vi (1-5)% chiều dài dây văng. Trong công tác thiết kế thiết bị cản nhớt cho dây văng, thông thường chọn trước vị trí gắn thiết bị cản trên dây theo các yêu cầu về mỹ quan và chế tạo bảo dưỡng thiết bị, sau đó tiến hành phân tích như trên để chọn ra giá trị hệ số nhớt tối ưu cho thiết bị cản nhớt nhằm mang lại hiệu quả giảm dao động lớn nhất cho dây văng ( $\xi_{max}$ ).

### 3.4.Ảnh hưởng của hệ số mất mát của thiết bị cản cao su đến tỷ số cản của dây cáp văng



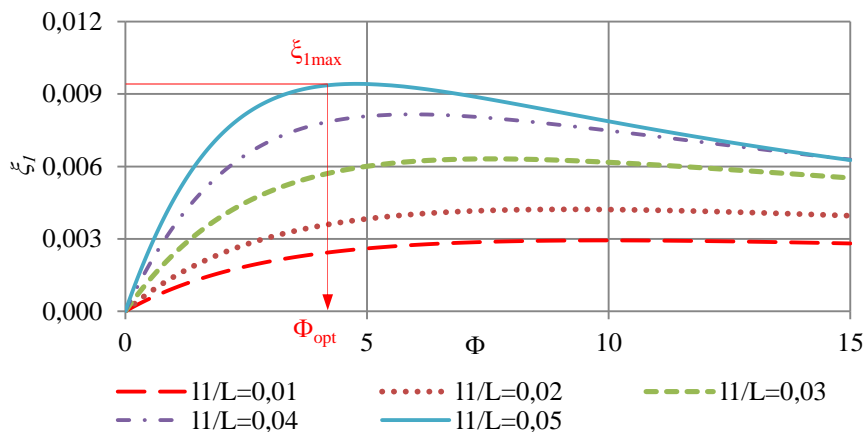
Hình 6. Tỷ số cản thứ nhất mô hình dây cáp văng gắn thiết bị cản cao su ( $\xi_1-\lambda$ ).

Thiết bị cản cao su được đặc trưng thông qua hệ số mất mát  $\lambda$  và hệ số đàn hồi  $K_D$  của vật liệu cao su. Để đánh giá ảnh hưởng của hệ số mất mát của vật liệu cao su đến tỷ số cản thứ nhất của dây cáp văng, tiến hành khảo sát  $\xi_1$  với hệ số  $\lambda$  thay đổi trong phạm vi [0-20],

trương ứng với các vị trí lắp đặt thiết bị giảm chấn cao su  $l_1/L = [0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05]$ . Kết quả khảo sát tại Hình 6 thể hiện rằng: với mỗi vị trí lắp đặt thiết bị cản cao su, ban đầu tỷ số cản thứ nhất của dây văng  $\xi_1$  sẽ tăng khi hệ số mất mát  $\lambda$  của thiết bị cản tăng. Tuy nhiên sau khi đạt giá trị lớn nhất  $\xi_{1max}$  tỷ số cản của dây văng sẽ suy giảm nhanh khi hệ số mất mát  $\lambda$  tăng. Do đó, tại vị trí tỷ số cản thứ nhất đạt giá trị lớn nhất  $\xi_{1max}$  ta sẽ tìm được giá trị tối ưu của  $\lambda_{opt}$  của thiết bị cản cao su. Các kết quả phân tích cũng cho thấy với các vị trí gắn thiết bị cản cao su khác nhau thì hệ số mất mát tối ưu của thiết bị cản cao su cũng sẽ khác nhau. Tương tự như thiết bị cản nhớt, vị trí gắn thiết bị cản cao su  $l_1/L$  càng lớn thì tỷ số cản của dây cáp văng càng lớn, hiệu quả giảm dao động của thiết bị cản cho dây văng càng lớn. Tuy nhiên, do các yêu cầu về mỹ quan cầu, chế tạo và duy tu bảo dưỡng thiết bị cản trong quá trình khai thác vị trí gắn thiết bị cản cao su cũng thường chọn trong phạm vi (1-5)% chiều dài dây văng.

### 3.5. Ảnh hưởng của hệ số đàn hồi của thiết bị cản cao su đến tỷ số cản của dây cáp văng

Bên cạnh hệ số mất mát  $\lambda$ , hệ số đàn hồi  $K_D$  của thiết bị cản cao su cũng ảnh hưởng đến khả năng giảm dao động của dây văng. Để đánh giá ảnh hưởng của hệ số  $K_D$  đến tỷ số cản thứ nhất của dây cáp văng, tiến hành khảo sát  $\xi_1$  với thông số  $\Phi$  thay đổi trong phạm vi  $\Phi \in [0-15]$ , lưu ý rằng  $\Phi = K_D L / (\pi S)$ , các vị trí lắp đặt thiết bị giảm chấn cao su  $l_1/L = [0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05]$ , giá trị của hệ số mất mát  $\lambda = [0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0]$ . Các kết quả khảo sát trên mô hình dây văng gắn thiết bị cản cao su thể hiện như Hình 7 cũng cho thấy: với mỗi giá trị hệ số mất mát  $\lambda$  nhất định, ban đầu tỷ số cản thứ nhất  $\xi_1$  của dây văng cũng tăng theo hệ số đàn hồi  $K_D$  của thiết bị cản cao su. Sau khi đạt giá trị đỉnh  $\xi_{1max}$  tỷ số cản của dây sẽ suy giảm khi  $K_D$  tăng. Tương ứng các giá trị ban đầu hệ số mất mát  $\lambda$  khác nhau thì các giá trị đỉnh  $\xi_{1max}$  cũng sẽ khác nhau. Điều đó cũng chứng tỏ rằng với mỗi giá trị hệ số mất mát  $\lambda$  nhất định, cũng sẽ chỉ có một giá trị hệ số đàn hồi tối ưu  $K_{Dopt}$  của thiết bị cản cao su nhằm mang lại hiệu quả giảm dao động lớn nhất cho dây văng. Giá trị hệ số đàn hồi tối ưu được xác định theo quan hệ  $\Phi_{opt} = K_{Dopt} L / (\pi S)$ , với thông số  $\Phi_{opt}$  được xác định tương ứng với giá trị đỉnh của hệ số cản  $\xi_{1max}$  của dây văng như Hình 7.

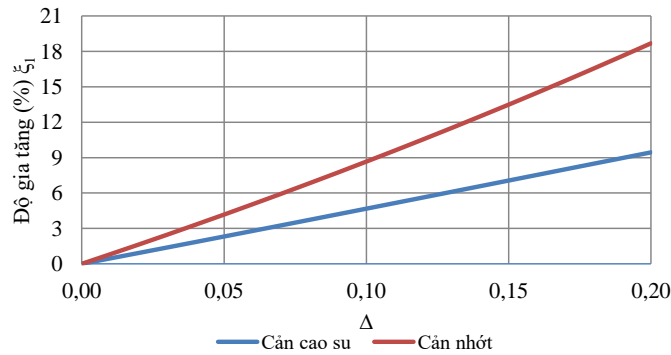


Hình 7. Tỷ số cản thứ nhất mô hình dây cáp văng gắn thiết bị cản cao su ( $\xi_1$ - $\Phi$ ).

### 3.6. Ảnh hưởng của độ cứng chống uốn EJ đến tỷ số cản của dây cáp văng

Với một dây cáp văng có các thông số ban đầu về chiều dài và lực căng cho trước, độ cứng chống uốn  $EJ$  của dây cáp văng được phản ánh thông qua tham số không thứ nguyên  $\Delta = \pi^2 EJ / (SL^2)$ , điều kiện biên của dây cáp văng như Hình 2. Tiến hành khảo sát sự biến thiên của tỷ số cản thứ nhất  $\xi_1$  của dây cáp văng với tham số  $\Delta$  thay đổi trong phạm vi  $\Delta \in [0-0,20]$ , vị trí

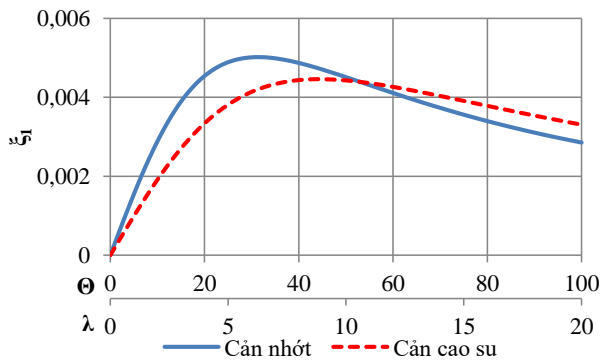
gắn thiết bị giảm chấn  $l_1/L=0,03$ . Kết quả khảo sát trên hai mô hình dây cáp văng gắn thiết bị cản nhớt và thiết bị cản cao su tại Hình 8 cho thấy: trong phạm vi khảo sát, khi xét đến độ cứng chống uốn  $EJ$ , tỷ số cản thứ nhất  $\zeta_1$  của dây cáp văng trong cả hai mô hình đều tăng lớn hơn so với trường hợp không xét  $EJ$  từ (9,44-18,68)%. Trường hợp dây cáp văng gắn thiết bị cản nhớt, mức độ gia tăng về tỷ số cản thứ nhất  $\zeta_1$  cũng lớn hơn so với trường hợp dây cáp văng gắn thiết bị cản cao su. Mức độ gia tăng về tỷ số cản này là đáng kể và cần phải xem xét đến độ cứng chống uốn  $EJ$  khi tính toán lựa chọn giải pháp giảm chấn phù hợp cho dây cáp văng.



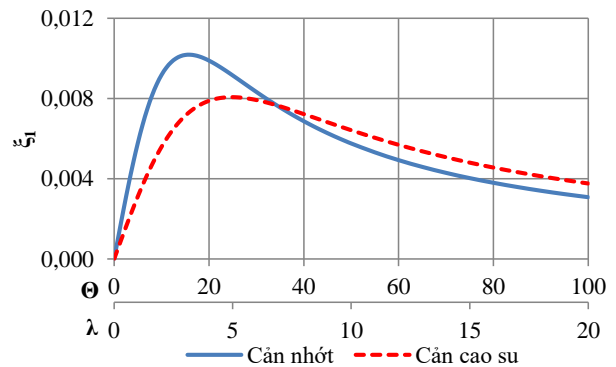
Hình 8. Độ gia tăng (%)  $\zeta_1$  khi xét đến độ cứng chống uốn  $EJ$  của dây cáp văng.

### 3.7. So sánh hiệu quả giảm dao động của thiết bị cản nhớt và cản cao su

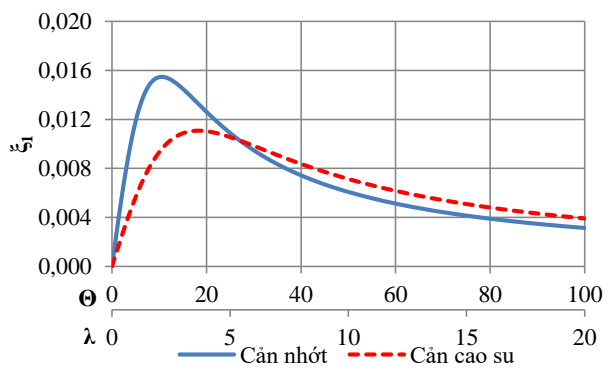
Do cơ chế hoạt động và tiêu tán năng lượng dao động khác nhau nên hiệu quả giảm dao động dây văng của hai loại thiết bị cản nhớt và cản cao su cũng khác nhau. Xét cùng một dây văng ban đầu lần lượt được gắn thiết bị cản nhớt và thiết bị cản cao su để so sánh hiệu quả giảm dao động của mỗi loại thiết bị cản thông qua tỷ số cản lớn nhất  $\zeta_{1max}$  có thể đạt được của dây cáp văng khi lần lượt gắn mỗi loại thiết bị cản tương ứng. Các thông số của mỗi thiết bị cản nhớt và cản cao su được lựa chọn theo các thông số tối ưu như phân tích ở mục 3.3-3.5, các vị trí gắn thiết bị cản lần lượt được xét tại các vị trí  $l_1/L = [0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05]$ , kết quả khảo sát được thể hiện như các Hình 9-Hình 13:



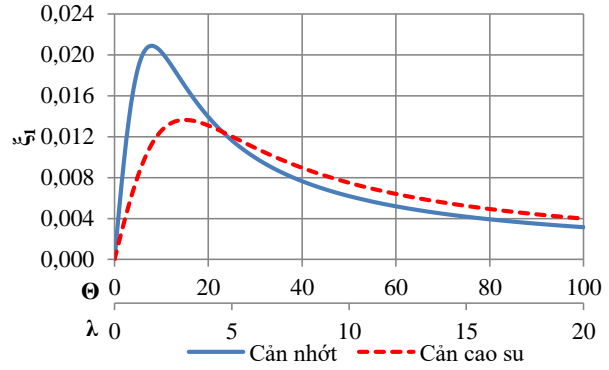
Hình 9. Hiệu quả giảm dao động của VD và HDRD tại vị trí  $l_1/L=0,01$ .



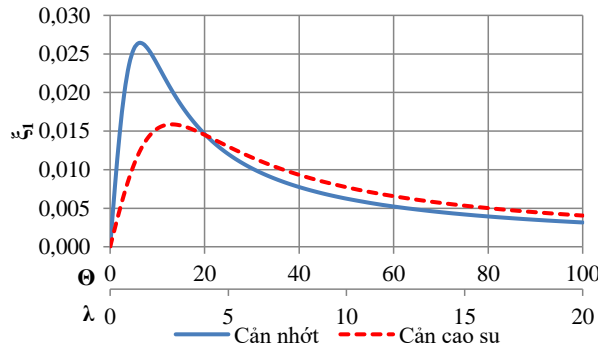
Hình 10. Hiệu quả giảm dao động của VD và HDRD tại vị trí  $l_1/L=0,02$ .



Hình 11. Hiệu quả giảm dao động của VD và HDRD tại vị trí  $l_1/L=0,03$ .



Hình 12. Hiệu quả giảm dao động của VD và HDRD tại vị trí  $l_1/L=0,04$ .



Hình 13. Hiệu quả giảm dao động của VD và HDRD tại vị trí  $l_1/L=0,05$ .

Bảng 1. So sánh tỷ số cản lớn nhất của dây văng khi gắn thiết bị cản nhót (VD), cản cao su (HDRD).

$l_1/L$	$\xi_{1max}$		Tỷ lệ (%) VD/HDRD
	VD	HDRD	
0,01	0,0050	0,0045	112,51
0,02	0,0102	0,0081	126,22
0,03	0,0155	0,0111	139,54
0,04	0,0209	0,0136	153,10
0,05	0,0264	0,0159	166,28

Các kết quả phân tích tỷ số cản lớn nhất đạt được của dây cáp văng khi lần lượt gắn thiết bị cản nhót (VD) và thiết bị cản cao su (HDRD) tại các Hình 9 – Hình 13 cho thấy: hiệu quả giảm dao động của thiết bị cản cao su thấp hơn so với thiết bị cản nhót. Bảng 1 thể hiện mức độ khác biệt về hiệu quả giảm dao động của thiết bị cản VD so với HDRD tương ứng với các vị trí gắn thiết bị cản khác nhau, sự khác biệt này có thể đạt từ 12,51% đến 66,28% khi vị trí gắn thiết bị cản trong phạm vi  $l_1/L=0,01-0,05$ . Do vậy trong thực tế áp dụng, với các dây văng có chiều dài ngắn, thường ưu tiên áp dụng các thiết bị cản gắn bên trong (thiết bị cản cao su) để đảm bảo các yêu cầu về kiến trúc, ít tốn kém chi phí duy tu bảo dưỡng thiết bị. Đối với các dây văng có chiều dài lớn, thiết bị cản cao su thường không cung cấp đủ hệ số cản tăng thêm cho dây văng, do vậy lúc này cần thiết phải sử dụng thiết bị cản nhót để cung cấp đủ hệ số cản yêu cầu cho dây văng theo các quy định của tiêu chuẩn thiết kế PTI [16-18].

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày các kết quả phân tích dao động dây cáp văng trên hai mô hình gán thiết bị cản nhớt, thiết bị cản cao su có xét đến độ cứng chống uốn EJ của dây cáp văng. Khảo sát ảnh hưởng các thông số của thiết bị cản: hệ số nhớt (thiết bị cản nhớt), hệ số đàn hồi và hệ số mất mát vật liệu (thiết bị cản cao su) đến tỷ số cản lớn nhất có thể đạt được của dây cáp văng. Thông qua các kết quả khảo sát có thể chọn được các thông số tối ưu  $C_{opt}$ ,  $\lambda_{opt}$ ,  $K_{D,opt}$  của mỗi loại thiết bị cản nhằm đạt hiệu quả giảm dao động lớn nhất cho dây văng. Bài báo đã phân tích so sánh hiệu quả giảm dao động của thiết bị cản cao su so với thiết bị cản nhớt thông qua tỷ số cản lớn nhất của dây văng đạt được khi gán lần lượt mỗi thiết bị cản tương ứng. Với nhiều ưu điểm về đảm bảo mỹ quan cầu, dễ thiết kế lắp đặt và ít tốn chi phí bảo dưỡng thiết bị cản cao su đang được sử dụng phổ biến trong cầu dây văng, tuy nhiên hiệu quả giảm dao động của loại thiết bị này chỉ đạt từ (88,88-60,14)% so với thiết bị cản nhớt khi vị trí gán thiết bị cản trong phạm vi (1-5)% chiều dài dây văng. Do vậy trong thực tế áp dụng, thiết bị cản cao su chỉ áp dụng phù hợp cho các dây văng có chiều dài ngắn, tỷ số cản yêu cầu cung cấp thêm của thiết bị cản cho dây văng không cao. Khi chiều dài dây văng tăng lên, thiết bị cản nhớt sẽ được sử dụng để cung cấp đủ tỷ số cản yêu cầu cho dây văng theo các quy định tiêu chuẩn thiết kế.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Matsumoto, T. Yagi, Y. Shigemura, D. Tsushima, Vortex-induced cable vibration of cable-stayed bridges at high reduced wind velocity, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 89 (2001) 633-647. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(01\)00063-0](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00063-0).
- [2]. E.D.S. Caetano, Cable Vibrations in Cable-stayed Bridges, International Association for Bridge and Structural Engineering, CH-8093 Zurich, Switzerland, 2007.
- [3]. Y. Fujino, K. Kimura, H. Tanaka, Wind Resistant Design of Bridges in Japan, Springer, Tokyo, Japan, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54046-5>.
- [4]. BBR VT international Ltd., <https://www.bbrnetwork.com/technologies/stay-cables/viscous-damper/>.
- [5]. Sumitomo Rubber industries Ltd., <https://grast.jp/en/bridge-cable/>.
- [6]. B.M. Pacheco, Y. Fujino, A. Sulekh, Estimation curve for modal damping in stay cables with viscous damper, J. Struct. Eng., 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)).
- [7]. S. Krenk, S.R. Nielsen, Vibrations of a shallow cable with a viscous damper, Proc. R. Soc. A, 458 (2001) 339-357. <https://doi.org/10.1098/rspa.2001.0879>.
- [8]. Y. Fujino, N. Hoang, Design formulas for damping of a stay cable with a damper, J. Struct. Eng., 134 (2008) 269-278. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:2\(269\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:2(269)).
- [9]. J.A. Main, N.P. Jones, Vibration of tensioned beams with intermediate damper. I: Formulation, influence of damper location, J. Eng. Mech., 133 (2007) 379-388. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:4\(369\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:4(369)).
- [10]. D.T. Nguyen, V.M. Nguyen, Vibration Control of Stayed-Cables using Viscous Linear Dampers in consideration of Bending Stiffness, Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Seoul – Korea, 2011, pp. 2763-2772, ISBN : 978-89-89693-32-1 98530.

- [11]. A. Nakamura, A. Kasuga, H. Arai, The effects of mechanical dampers on stay cables with high-damping rubber, *Constr. Build. Mater.*, 12 (1998) 115–123. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00013-5).
- [12]. V.H. Cu, B. Han, High-damping rubber damper for taut cable vibration reduction, *Australian Journal of Structural Engineering*, 16 (2015) 283-291. <https://doi.org/10.1080/13287982.2015.1092690>.
- [13]. X.L. Le, H. Katsuchi, B.X Luong, L.N Vu, Q.V. Ha, Enhancing Vibration Control In Stay Cables: A Modified Damping Formulation With NS-HDR Damper, *Transport and Communications Science Journal*, 75 (2024) 1198-1212. <https://doi.org/10.47869/tcsj.75.1.2>.
- [14]. D.T. Nguyen, D.H. Vo, M. Haque, Theoretical Investigation on the Impact of Two HDR Dampers on First Modal Damping Ratio of Stay Cable, *Appl. Sci.*, 11 (2021) 10985. <https://doi.org/10.3390/app112210985>.
- [15]. J.A. Main, N.P. Jones, Free Vibrations of Taut Cable with Attached Damper. I: Linear Viscous Damper, *Journal of Engineering Mechanics*, 128 (2002) 1062-1071. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2002\)128:10\(1062\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:10(1062)).
- [16]. PTI DC 45.1-18, Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation, Post-Tensioning Institute (PTI), 2018.
- [17]. FHWA-HRT-05-083, Wind-Induced Vibration of Stay Cables, Federal Highway Administration Research and Technology - U.S. Department of Transportation, 2007.
- [18]. France, Cable Stays: Recommendations of French interministerial commission on Prestressing, SETRA, Paris, 2002.