

NÂNG CAO KHẢ NĂNG ỔN ĐỊNH DAO ĐỘNG CỦA DÂY CÁP VĂNG BẰNG THIẾT BỊ CẢN MÔ HÌNH ĐÀN-NHÓT CÓ XÉT ĐẾN ĐỘ CỨNG CHỐNG UỐN CỦA DÂY CÁP VĂNG

ENHANCING THE VIBRATING STABILITY OF CABLE-STAYED BY A DAMPER DEVICE WITH VISCO-ELASTIC MODEL IN CONSIDERATION OF BENDING STIFFNESS

Nguyễn Duy Thảo

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

Email: ngduythao1978@yahoo.com; ndthao@dut.udn.vn

TÓM TẮT

Cầu dây văng thuộc loại cầu có nhịp lớn, độ cứng nhỏ và dễ bị ảnh hưởng với các tải trọng có tính chất chu kỳ. Dây cáp văng là kết cấu mềm theo phương ngang và có tỷ số cản dao động rất thấp. Khi chịu các kích động có tính chất chu kỳ trong các điều kiện nhất định, dây cáp văng có thể tích lũy năng lượng và dao động với biên độ khá lớn. Dây cáp văng thường xuyên dao động với biên độ lớn sẽ bị phá hoại do hiện tượng mỏi gây ra. Bài báo trình bày cơ sở lý thuyết và phân tích số cho giải pháp nâng cao khả năng ổn định dao động của dây cáp văng bằng thiết bị cản mô hình đàn nhót có xét đến độ cứng của dây cáp văng; xây dựng chương trình Cable-BKDN để tự động hóa công tác thiết kế giảm chấn đối với dây cáp văng trên môi trường MATLAB. Kết quả nghiên cứu cho phép xác định các thông số tối ưu của thiết bị cản và vị trí gắn thiết bị cản hợp lý nhất trên dây cáp văng.

Từ khóa: dây cáp văng; thiết bị cản; tỷ số cản; tần số dao động; mô hình đàn-nhót.

ABSTRACT

Cable-stayed bridge is a long span bridge. It has small stiffness and is influenced easily by some cycle load. Cable-stayed is flexible horizontal structure and has very small damping factor. When cable-stayed is excited by some cycle load in specific condition, it can accumulate the energy and vibrate with larger amplitude. Cable-stayed usually vibrate with larger amplitude, it will be destroyed by fatigue phenomenon. This paper presents the theory and numerical analyze for enhancing the vibrating stability of cable-stayed by damper device with visco-elastic model in consideration of the bending stiffness of cable-stayed. Making the program Cable-BKDN to design automatically the damping damper for cable-stayed in Matlab environment. From the study results, it is possible to determine optimal parameters of damping device and the best suitable location attached damper device on cable-stayed.

Key words: Cable-stayed; damper device; damping ratio; vibration frequency; visco-elastic model.

1. Đặt vấn đề

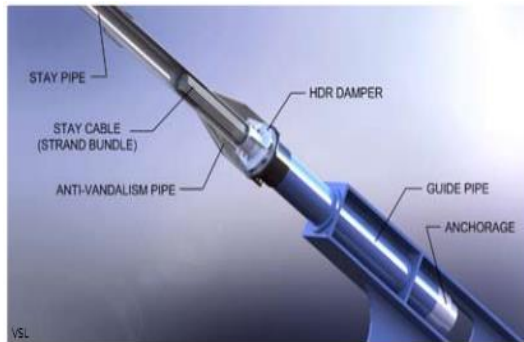
Kết cấu cầu dây văng đang được sử dụng rộng rãi trên thế giới bởi tính thẩm mỹ và khả năng vượt nhịp của nó. Cầu dây văng khẩu độ lớn đầu tiên được xây dựng ở Việt Nam là cầu Mỹ Thuận (Vĩnh Long-năm 2000) với chiều dài nhịp chính 350m, tiếp đó là hàng loạt các dự án xây dựng cầu dây văng khác như: cầu Kiên (Hải Phòng) nhịp chính 200m, cầu Bãi Cháy (Quảng Ninh) một mặt phẳng dây với nhịp chính 435m, cầu Cần Thơ (Cần Thơ) nhịp chính 550m, cầu Trần Thị Lý (Đà Nẵng) ba mặt phẳng dây với nhịp chính 230m... Với địa hình có nhiều hệ thống sông lớn trên cả nước, nhu cầu xây dựng

cầu dây văng ở nước ta vẫn còn rất lớn trong thời gian tới. Dây cáp văng là một trong các bộ phận quan trọng và đặc trưng của loại hình kết cấu cầu dây văng. Các dây cáp văng thường rất dài, có đường kính nhỏ có thể được xem là kết cấu mềm dẻo theo phương ngang và có tỷ số cản rất thấp. Nhịp cầu dây văng càng lớn thì dây cáp văng càng dài, tỷ số cản càng thấp, dây càng dễ dao động với biên độ lớn dưới tác dụng của các tải trọng có tính chu kỳ. Dây cáp văng thường xuyên dao động với biên độ lớn sẽ gây ra hiện tượng mỏi bên trong dây cáp văng. Để khắc phục hiện tượng này ta có nhiều phương pháp, trong đó phương pháp sử dụng thiết bị giảm chấn gắn vào dây cáp văng ở gần vị trí đầu neo được sử dụng

khá phổ biến. Việc gắn các thiết bị giảm chấn sẽ làm giảm biên độ dao động của cáp nhờ lực cản sinh ra trong thiết bị giảm chấn. Các thiết bị giảm chấn như: Viscous Damper [1][2], Friction Damper [3], High damping Rubber Damper [4][5]... đã được sử dụng nhằm giảm dao động của dây cáp văng một cách rất hiệu quả.



Hình 1. Thiết bị giảm chấn Viscous damper bố trí tại Arthur Ravenel Jr. Bridge (USA)



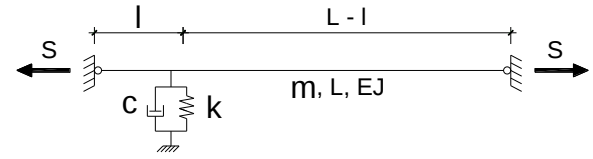
Hình 2. Thiết bị giảm chấn cao su (High damping Rubber Damper) bố trí bên trong ống dẫn hướng

Nội dung của bài báo trình bày cơ sở lý thuyết và phương pháp phân tích số khảo sát dao động của dây cáp văng có gắn thiết bị giảm chấn nhớt có xét đến độ cứng của thiết bị cản (Visco-Elastic model) và độ cứng chống uốn EJ của dây cáp văng. Xây dựng chương trình Cable-BKĐN để tự động hóa công tác thiết kế thiết bị giảm chấn cho dây cáp văng trên môi trường Matlab.

2. Phương trình vi phân dao động của hệ dây cáp văng - thiết bị cản

Dây cáp văng được gắn cố định tại hai đầu dây chịu lực căng “S”, có chiều dài “L”, thiết bị giảm chấn ngoài được gắn tại vị trí cách đầu cố định của dây cáp một đoạn “l”. Lực cản phát sinh trong thiết bị giảm chấn được mô phỏng thông qua hệ số cản nhớt “c” và độ cứng “k” của thiết bị cản. Mô hình phân tích hệ cáp văng-thiết

bị cản như Hình 3.



Hình 3. Mô hình dây cáp văng – thiết bị cản

Trong đó: m-khối lượng của cáp văng trên một đơn vị chiều dài; EJ-độ cứng chống uốn của dây.

Từ [6] và [7], phương trình vi phân dao động của hệ có dạng:

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + EJ \cdot \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - S \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f(x, t) \quad (1)$$

Trong đó: $u(x, t)$ -hàm chuyển vị của cáp; δ -hàm delta dirac; $f(x, t)$ -lực cản trong thiết bị cản.

$$f(x, t) = c \frac{\partial u}{\partial t} + k \cdot u \quad (2)$$

Áp dụng phương pháp tách biến của Fourier kết hợp với điều kiện biên tại các vị trí neo cáp và điều kiện cân bằng lực tại vị trí gắn thiết bị cản, ta thiết lập được phương trình tần số của dây cáp văng như phương trình (3):

$$\left(\frac{EJ \cdot m}{S^2} \cdot \eta^2 - 1 \right) \cdot \left[\cot g \left[\left(1 - \frac{l}{L} \right) \cdot L \cdot \sqrt{\frac{m}{S}} \cdot \eta \right] + \cot g \left[L \cdot \sqrt{\frac{m}{S}} \cdot \frac{l}{L} \cdot \eta \right] \right] = \frac{c}{\sqrt{m \cdot S}} \cdot i + \frac{k}{\eta \cdot \sqrt{m \cdot S}} \quad (3)$$

Trong đó: η_i -tần số dao động của dây ở mode dao động thứ i. Đặt k là trị riêng có dạng phức:

$$k_i = \sigma_i + j \cdot \phi_i = -\xi_i + j \cdot \sqrt{1 - \xi_i^2} \cdot \eta_i / \omega_{i0} \quad (4)$$

Với ω_{i0} -tần số dao động cơ bản của dây cáp văng khi chưa gắn thiết bị cản; σ_i, ϕ_i -là phần thực và phần ảo của trị riêng thứ i; ξ_i -tỷ số cản mode thứ i của dây cáp văng.

$$\xi_i = \sqrt{1 + \frac{\phi_i^2}{\sigma_i^2}} \quad (5)$$

Thay (4),(5) vào phương trình (3) và tách riêng phần thực và phần ảo ta được hệ gồm hai phương trình (6),(7):

$$\begin{aligned} & \left[\Delta(\sigma^2 - \phi^2) - 1 \right] \cdot \left[\frac{\sin\left[2\pi \cdot \left(1 - \frac{l}{L}\right) \cdot \sigma\right]}{M_1} + \frac{\sin\left(2\pi \cdot \frac{l}{L} \cdot \sigma\right)}{M_2} \right] \\ & + 2 \cdot \Delta \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \left(\frac{\sinh\left[2\pi \cdot \left(1 - \frac{l}{L}\right) \cdot \phi\right]}{M_1} + \frac{\sinh\left(2\pi \cdot \frac{l}{L} \cdot \phi\right)}{M_2} \right) \\ & - 2 \cdot \Phi \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \phi^2} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \left[1 - \Delta(\sigma^2 - \phi^2) \right] \cdot \left[\frac{\sinh\left[2\pi \cdot \left(1 - \frac{l}{L}\right) \cdot \phi\right]}{M_1} + \frac{\sinh\left(2\pi \cdot \frac{l}{L} \cdot \phi\right)}{M_2} \right] \\ & + 2 \cdot \Delta \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \left[\frac{\sin\left[2\pi \cdot \left(1 - \frac{l}{L}\right) \cdot \sigma\right]}{M_1} + \frac{\sin\left(2\pi \cdot \frac{l}{L} \cdot \sigma\right)}{M_2} \right] \\ & + 2 \cdot \Phi \cdot \frac{\phi}{\sigma^2 + \phi^2} - 2 \cdot \Theta = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Trong đó: Δ, Φ, Θ - các thông số không thứ nguyên phụ thuộc vào các thông số ban đầu của hệ dây cáp văng và thiết bị cản, các thông số Δ, Φ và Θ được xác định theo phương trình (8); M_1, M_2 là các tham số xác định theo phương trình (9), (10).

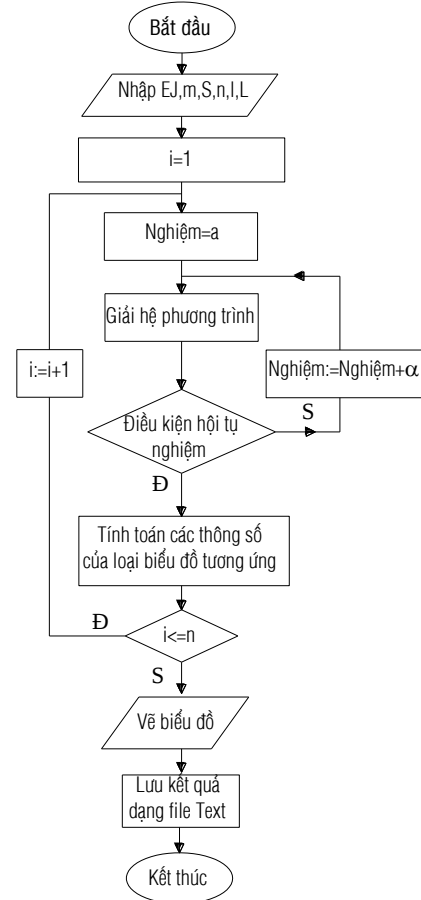
$$\Delta = \pi^2 \cdot \frac{EJ}{S \cdot L^2}; \quad \Phi = \frac{k \cdot L}{\pi \cdot S}; \quad \Theta = \frac{c}{\sqrt{m \cdot S}} \quad (8)$$

$$M_1 = \cosh^2\left[\pi \cdot \left(1 - \frac{l}{L}\right) \cdot \phi\right] - \cos^2\left[\pi \cdot \left(1 - \frac{l}{L}\right) \cdot \sigma\right] \quad (9)$$

$$M_2 = \cosh^2\left[\pi \cdot \frac{l}{L} \cdot \phi\right] - \cos^2\left[\pi \cdot \frac{l}{L} \cdot \sigma\right] \quad (10)$$

3. Xây dựng chương trình Cable-BKĐN trên môi trường MatLab

Hệ phương trình (6), (7) là hệ phương trình phi tuyến. Chương trình Cable-BKĐN được xây dựng để tự động hóa việc giải lập hệ phương trình phi tuyến trên môi trường MATLAB. Thuật toán của chương trình được thể hiện như hình Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ thuật toán chương trình Cable-BKĐN

4. Một số kết quả phân tích số bằng chương trình Cable-BKĐN

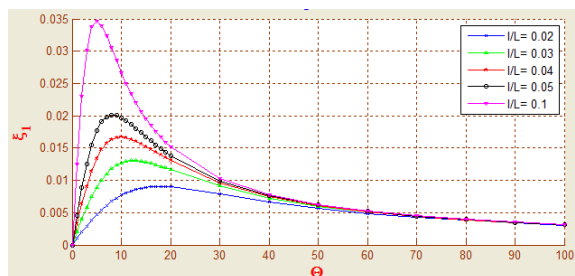
Khả năng ổn định dao động của dây cáp văng được đánh giá thông qua tỷ số cản “ ξ ”. Chương trình Cable-BKĐN cho phép đánh giá ảnh hưởng của các thông số của thiết bị cản (thiết bị giảm chấn) đến tỷ số cản của dây cáp văng như sau.

4.1. Ảnh hưởng của hệ số cản nhớt “c” của thiết bị giảm chấn đến tỷ số cản

Hệ số cản nhớt “c” của thiết bị giảm chấn ảnh hưởng đến tỷ số cản của dây cáp văng thông qua hệ số $\Theta = c/(m \cdot S)^{0.5}$. Khảo sát sự biến thiên của tỷ số cản thứ nhất “ ξ_1 ” tương ứng với sự thay đổi của $\Theta = [0 \div 100]$, các vị trí lắp đặt thiết bị giảm chấn $l/L = 0,02; 0,03; 0,04; 0,05$ và $0,1$. Kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình.5.

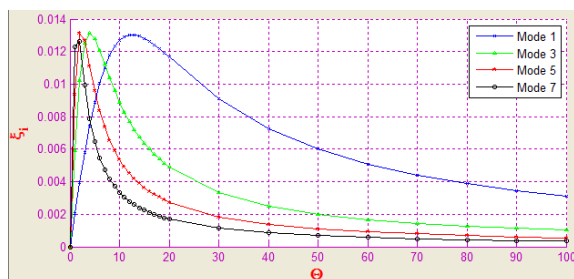
Kết quả khảo sát Hình 5 cho thấy: ban đầu tỷ số cản thứ nhất của dây cáp văng “ ξ_1 ” tăng cùng với sự tăng của Θ . Tuy nhiên sau khi “ ξ_1 ” đạt đến giá trị cực đại thì “ ξ_1 ” giảm dần theo sự

tăng của Θ . Từ kết quả phân tích này có thể xác định được hệ số cản nhớt tối ưu của thiết bị cản nhằm đạt được tỷ số cản lớn nhất cho dây cáp văng.



Hình 5. Tỷ số cản “ ξ_1 ” – Thông số Θ

Tiến hành phân tích ảnh hưởng của hệ số cản nhớt “ c ” đối với các tỷ số cản ở mode dao động thứ i, kết quả phân tích thể hiện ở Hình 6.



Hình 6. Tỷ số cản “ ξ_i ” – Thông số Θ

Từ kết quả phân tích Hình 6 cho thấy: ứng với các mode dao động khác nhau thì hệ số cản nhớt tối ưu là khác nhau. Điều này chứng tỏ ứng với một hệ số cản nhớt “ c ” nhất định của thiết bị cản (thiết bị giảm chấn) nó chỉ phát huy tốt hiệu quả giảm chấn đối với một mode dao động nhất định.

Kết quả so sánh hiệu quả giảm dao động của thiết bị giảm chấn theo mô hình đàn nhớt và thiết bị giảm chấn cao su [5] được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. So sánh tỷ số cản theo các mô hình

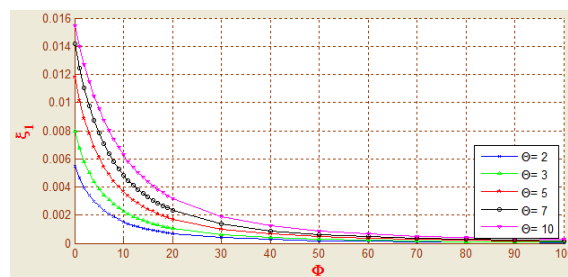
Vị trí gắn thiết bị cản l/L	Tỷ số cản của dây cáp văng theo các mô hình cản ξ_1 (%)		
	Đàn-Nhớt	HDRD [5]	Chênh lệch
0,10	3,47	2,74	26,72 %
0,05	2,01	1,32	52,07 %
0,04	1,67	1,05	58,86 %
0,03	1,30	0,78	66,09 %

0,02	0,91	0,52	74,50 %
------	------	------	---------

Từ kết quả ở Bảng 1 cho thấy: hiệu quả giảm dao động của thiết bị giảm chấn theo mô hình đàn nhớt lớn hơn so với thiết bị giảm chấn cao su HDRD [5]. Tuy nhiên, giảm chấn cao su lại có ưu điểm về mặt mỹ quan (do thiết bị giảm chấn được bố trí bên trong ống dẫn hướng cáp) và chi phí duy tu bảo trì thiết bị ít hơn.

4.2. Ảnh hưởng của độ cứng “ k ” của thiết bị giảm chấn đến tỷ số cản

Độ cứng “ k ” của thiết bị giảm chấn ảnh hưởng đến tỷ số cản của dây cáp văng thông qua hệ số $\Phi = k.L/(\pi.S)$. Khảo sát sự biến thiên của tỷ số cản thứ nhất “ ξ_1 ” tương ứng với sự thay đổi của $\Phi = [0 \div 100]$, thông số $\Theta = 2; 3; 5; 7$ và 10. Kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình 7.



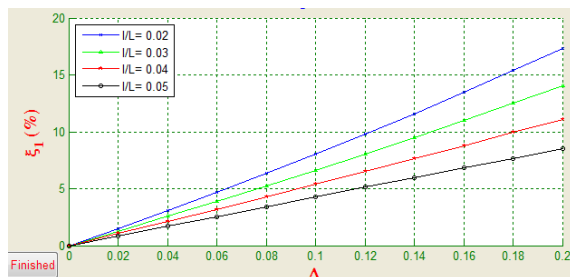
Hình 7. Tỷ số cản “ ξ_1 ” – Thông số Φ

Kết quả phân tích Hình 7 cho thấy: độ cứng của thiết bị giảm chấn càng lớn thì sẽ càng làm suy giảm tỷ số cản của dây cáp văng (suy giảm hiệu quả giảm chấn của thiết bị). Điều này được giải thích như sau: khi độ cứng “ k ” của thiết bị cản tăng lên, dây cáp văng bị khóa cứng tại vị trí gần thiết bị cản; thiết bị cản không hấp thụ và chuyển hóa được năng lượng dao động của dây cáp văng và như vậy sẽ không phát huy được hiệu quả giảm chấn của thiết bị.

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

Tỷ số cản của dây cáp văng ngoài việc phụ thuộc vào các thông số của thiết bị giảm chấn còn phụ thuộc vào độ cứng chống uốn EJ, lực căng S và chiều dài L của dây cáp văng. Thông số không thứ nguyên Δ xác định theo phương trình (8) được đề xuất nhằm khảo sát ảnh hưởng của độ cứng EJ đối với tỷ số cản của dây cáp văng. Nghiên cứu sự biến thiên của tỷ số cản thứ nhất “ ξ_1 ” khi Δ thay đổi từ $[0 \div 0,2]$ ứng với vị trí

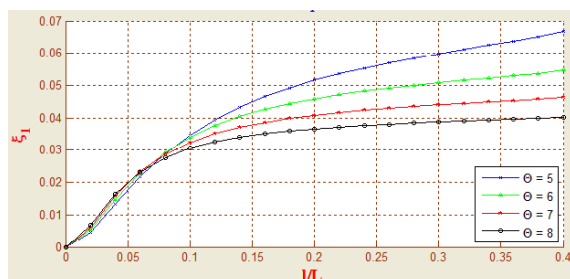
gắn thiết bị $l/L = 0,02; 0,03; 0,04$ và $0,05$. Kết quả khảo sát được thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. Sự gia tăng Tỷ số cản “ ξ_1 ” theo Δ

Từ kết quả ở Hình 8 cho thấy: khi xét đến độ cứng chống uốn EJ của dây cáp sẽ làm gia tăng tỷ số cản của dây cáp văng lên 17,5%. Giá trị này là đáng kể khi xét đến khả năng hạn chế dao động và ổn định khi động của dây cáp văng.

4.4. Ảnh hưởng của vị trí gắn thiết bị cản



Hình 9. Tỷ số cản “ ξ_1 ” – Vị trí gắn thiết bị cản

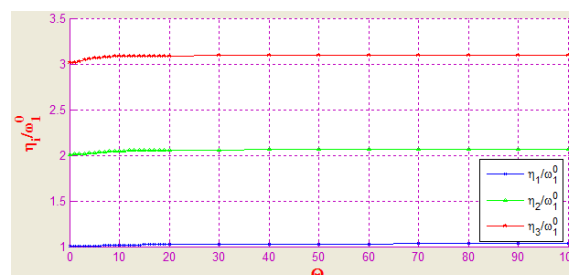
Khảo sát sự biến thiên của tỷ số cản thứ nhất (dao động mode 1) của dây cáp văng tương ứng với các vị trí lắp đặt thiết bị giảm chấn $l/L = 0 \div 0,4$; tham số Θ thay đổi trong phạm vi $5 \div 8$; kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình 9.

Kết quả khảo sát Hình 9 cho thấy: Khi tỷ số l/L càng tăng nghĩa là càng đưa vị trí thiết bị giảm chấn gần về phía giữa dây thì tỷ số cản càng tăng lên (hiệu quả giảm dao động cho dây cáp văng càng tốt hơn) và đạt giá trị lớn nhất tại 0,4. Tuy nhiên, với giá trị này đòi hỏi phải đưa thiết bị cản lên rất cao so với mặt cầu, do đó rất khó khăn cho việc thiết kế, lắp đặt cũng như duy tu và bảo trì thiết bị đồng thời ảnh hưởng đến kiến trúc mỹ quan của cầu. Thông thường thiết bị giảm chấn được lắp đặt tại vị trí $l/L = 0,02 \div 0,05$.

4.5. Sự thay đổi về tần số của dây cáp văng

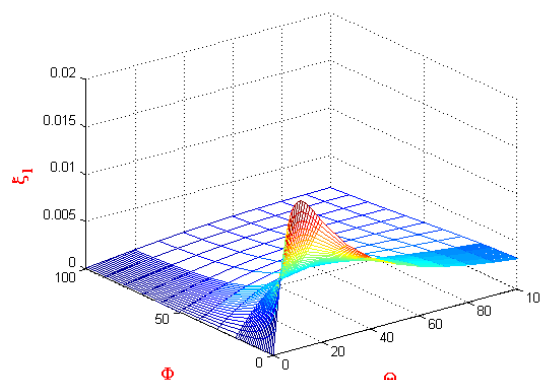
Khi được gắn thêm thiết bị cản, tần số dao

động của dây cáp văng sẽ thay đổi và phụ thuộc vào các thông số của thiết bị cản. Hình 10 thể hiện sự thay đổi tần số dao động mode thứ i đối với thông số “ c ” của thiết bị. Kết quả khảo sát cho thấy: khi gắn thêm thiết bị giảm chấn sự thay đổi về tần số của dây là khá nhỏ.



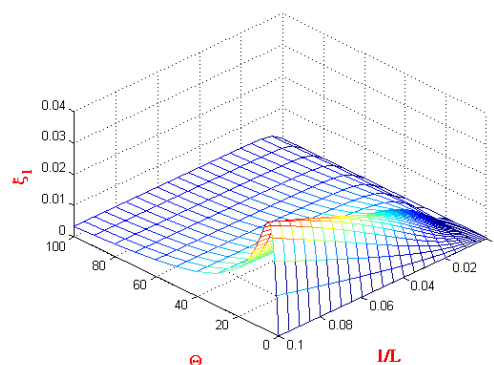
Hình 10. Sự thay đổi về tần số Mode i – Θ

4.6. Xác định tỷ số cản lớn nhất của dây cáp tương ứng với các thông số của thiết bị cản



Hình 11. Quan hệ ba chiều ξ_1 - Θ - Φ

Tỷ số cản lớn nhất của dây cáp văng phụ thuộc vào các thông số của thiết bị cản như: hệ số cản nhớt “ c ”, độ cứng “ k ” và vị trí gắn thiết bị “ l/L ”. Để đánh giá đồng thời sự ảnh hưởng của “ c ” và “ k ” đối với tỷ số cản của dây cáp văng, chương trình Cable-BKĐN cho phép thể hiện kết quả ba chiều ξ_1 - Θ - Φ như Hình 11.



Hình 12. Quan hệ ba chiều ξ_1 - Θ - l/L

Sự ảnh hưởng đồng thời của “c” và “l/L” đối với tỷ số cản của dây được thể hiện kết quả ba chiều ξ_1 - Θ -l/L như Hình 12. Từ các kết quả khảo sát ở Hình 11 và 12 cho phép xác định được các thông số “c”, “k” tối ưu của thiết bị cản và vị trí gắn thiết bị “l/L” hợp lý nhất trên dây cáp văng.

5. Kết luận

Với mục tiêu nâng cao khả năng ổn định dao động dây cáp văng, bài báo đã trình bày cơ sở lý

thuyết và phân tích số giải pháp sử dụng thiết bị giảm chấn mô hình đàn nhớt có xét đến độ cứng chống uốn EJ của dây. Đánh giá ảnh hưởng của các thông số thiết bị giảm chấn đối với tỷ số cản của dây cáp văng. Xây dựng chương trình Cable-BKĐN để tự động hóa công tác thiết kế giảm chấn trên máy tính. Kết quả nghiên cứu cho phép xác định các thông số và vị trí gắn thiết bị giảm chấn hợp lý nhất mang lại hiệu quả giảm dao động tối ưu nhất cho dây cáp văng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. A. Main, N. P. Jones: “Free Vibrations of Taut Cable with Attached Damper. I: Linear Viscous Damper”, *Journal of Engineering Mechanics*/2002, Vol 128, No10, pp 1062-1071.
- [2] J. A. Main, N. P. Jones: “Free Vibrations of Taut Cable with Attached Damper. II: NonLinear Damper”, *Journal of Engineering Mechanics*/2002, Vol 128, No10, pp 1072-1081.
- [3] Emmanuel Rigaud, Joel Pirret-Liaudet, Michel Berlin, Lucille Joly-Pottuz and Jean Michel Martin 2010: “An original Dynamic tribotest to discriminate friction and viscous damping” *Tribology International*, Vol.43, pp 320-329.
- [4] Yozo Fujino and Nam Hoang: “Design Formulas for Damping of a Stay Cable with a Damper” *Journal of Structure Engineering ASCE*/2008, pp 269-278.
- [5] Nguyễn Duy Thảo: “Kiểm soát dao động của dây Cáp văng bằng thiết bị cản theo mô hình High Damping Rubber Damper có xét đến độ cứng chống uốn của dây cáp văng”, *Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 9/2012*, Tập 1: Động lực học và điều khiển, trang 564-572.
- [6] Duy-Thao Nguyen and Van-My Nguyen: “Vibration control of Stayed-Cables using viscous linear dampers in consideration of bending stiffness”; *The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11+)*, Seoul-Korea, 18-22 September 2011, pp 2673-2772
- [7] Elsa de Sá Caetano: “Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridges”; *Structural Engineering Documents*, 2007

(BBT nhận bài: 26/07/2013, phản biện xong: 09/08/2013)