

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN DAO ĐỘNG TỰ DO CỦA THÁP CẦU KHI LẮP THIẾT BỊ GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG TLD

FREE VIBRATIONS OF A BRIDGE PYLON WITH TUNED LIQUID DAMPERS

ĐINH TÙNG DƯƠNG¹, NGUYỄN THẾ DŨNG¹, TRẦN ĐÌNH THẮNG¹,
TRẦN ĐỨC HÙNG¹, TRẦN NGỌC AN^{2*}

¹Sinh viên Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: antn.ctt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Tháp cầu có kết cấu thanh mảnh nên rất nhạy cảm với tác dụng của tải trọng động như gió bão, động đất. Một trong những dạng thiết bị được sử dụng để giảm dao động của tháp cầu đó là thiết bị giảm chấn chất lỏng TLD (tuned liquid damper). Thiết bị này đã được sử dụng đối với tháp cầu Bãi Cháy tại Việt Nam. Bài báo này trình bày việc tính toán dao động tự do của tháp cầu khi lắp thiết bị giảm chấn chất lỏng TLD tại đỉnh tháp. Các kết quả tính toán về tần số dao động tự do và hàm dáng sẽ là cơ sở để tính toán dao động cưỡng bức của tháp cầu dưới tác dụng của tải trọng động.

Từ khóa: Dao động tự do, tháp cầu, giảm chấn chất lỏng TLD, lý thuyết Euler-Bernoulli, dầm.

Abstract

The bridge pylon has a slender structure, so it is very sensitive to the effects of dynamic loading, such as wind or earthquakes. One of the types of devices used to reduce vibrations of bridge pylons is the tuned liquid damper (TLD). This device has been used for Bai Chay bridge pylon in Vietnam. This paper presents the calculation of free vibration of a bridge pylon installed with TLDs at the top of the pylon. The calculation results of free vibration as natural frequencies and mode shapes will be the fundamental for solution of forced vibration of the bridge pylon under the effects of dynamic loading.

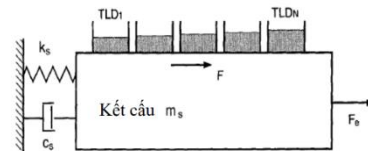
Keywords: Free vibrations, bridge pylon, tuned liquid damper, Euler-Bernoulli theory, beam.

1. Giới thiệu

Tháp cầu có kết cấu thanh mảnh nên rất nhạy cảm với tác dụng của tải trọng động như gió bão, động đất. Chính vì vậy việc nghiên cứu giảm dao động cho tháp cầu nhận được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu. Một trong những dạng thiết bị được nghiên cứu sử

dụng là thiết bị giảm chấn chất lỏng TLD (tuned liquid damper). TLD có kết cấu là một hộp chứa chất lỏng, được đặt trong lòng đỉnh tháp, có dạng hình trụ tròn hoặc hộp chữ nhật [1, 10]. Dưới tác dụng của tải trọng động, năng lượng dao động của tháp cầu đã được chuyển hóa thành dao động của chất lỏng, từ đó làm tắt nhanh dao động của tháp. Tại Việt Nam, thiết bị giảm chấn chất lỏng TLD đã được áp dụng cho tháp cầu Bãi Cháy [1, 10].

Một số các nghiên cứu trong nước về TLD áp dụng cho tháp cầu có thể kể đến như [1, 2]. Trong tài liệu [1], tác giả Nguyễn Đức Thị Thu Định đã quy đổi các TLDs về thiết bị giảm chấn khối lượng - lò xo (tuned mass dampers - TMDs) tương đương, tháp cầu được quy đổi về hệ một bậc tự do, các TLDs được xem là khác nhau về tần số (đa tần số). Trong tài liệu [2], tác giả Vũ Đức Phúc đã tính toán tối ưu cho dầm công xôn chịu tải trọng cưỡng bức phân bố đều có dạng hàm sin và lắp 3 TMDs tại 3 vị trí trên dầm.



Hình 1. Mô hình nghiên cứu dao động của tháp cầu lắp các TLDs [1]

Trong bài báo này, các tác giả mô hình hóa tháp cầu về một dầm công xôn, bỏ qua ảnh hưởng của dây cáp cũng như dầm cầu, các TLDs được đặt tại đỉnh tháp như tài liệu [1]. Một số vấn đề mới đã được trình bày trong bài báo. Đầu tiên, trong quá trình tính toán, tháp cầu được xem như một dầm Euler - Bernoulli mà không quy đổi tiếp về hệ 1 bậc tự do như Hình 1 trong tài liệu [1]. Ngoài ra, do trên thực tế, các khay chất lỏng TLDs được đặt trong lòng tháp nên trong bài báo này, mối tương quan giữa kích thước chiều rộng và chiều dài của các khay chất lỏng TLDs với kích thước trong lòng tháp cũng được đề cập. Mặt khác, như trong trường hợp cầu Bãi Cháy (Hình 2), các TLDs được sử dụng có chiều cao và chiều dài giống nhau, tần số là như nhau nên trong bài báo này, các TLDs

cũng được xem là giống nhau về kích thước và có cùng tần số (đơn tần số), đây cũng là cách tiếp cận khác so với tài liệu [1]. Các vấn đề về dao động uốn tự do của tháp cầu như các tần số dao động riêng và các hàm dáng đã được nghiên cứu, tính toán.



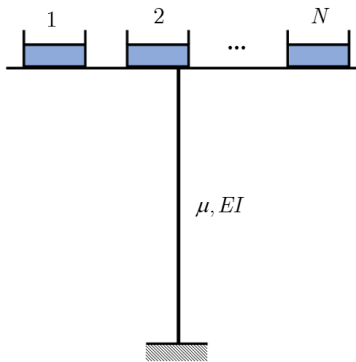
Hình 2. Bố trí các khay TLDs tại tháp cầu Bãi Cháy [1]

Các kết quả tính toán trong bài báo này sẽ là cơ sở để tính toán dao động cường bức của tháp cầu dưới tác dụng của tải trọng động như gió, bão, động đất.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình tính toán

Như đã giới thiệu trong mục 1, xét mô hình tháp cầu lắp các bộ TLDs như trên Hình 3. Tháp được xem như một dầm công xôn đồng chất, tiết diện không đổi, có khối lượng riêng ρ , khối lượng trên một đơn vị dài μ , modul đàn hồi E , momen quán tính I , chiều dài là L . Trên đỉnh tháp bố trí N bộ giảm chấn chất lỏng TLDs. Trong bài báo này xét các khối chất lỏng TLDs có kích thước là như nhau.



Hình 3. Mô hình nghiên cứu (tháp cầu lắp các TLDs)

Theo các tài liệu [6, 8], thiết bị TLD có thể quy đổi về TMD tương đương. Tần số dao động của TLD được xác định:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} \quad (1)$$

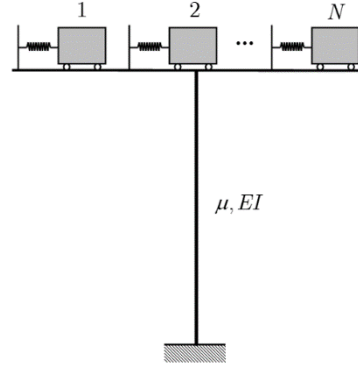
với $2a$ và h lần lượt là chiều dài và chiều cao của TLD, g là gia tốc trọng trường.

Như vậy, TLD được quy đổi về TMD có khối lượng và độ cứng lò xo tương ứng:

$$m = V\rho_{liquid} = 2\rho_{liquid}abh; k = 4\pi^2mf^2 \quad (2)$$

với ρ_{liquid} là khối lượng riêng của chất lỏng.

Mô hình tháp cầu lắp các bộ giảm chấn chất lỏng TLDs tại đỉnh tháp đã được xây dựng đưa về mô hình dầm công xôn lắp các TMDs như Hình 4.



Hình 4. Mô hình tính toán quy đổi TLDs về TMDs

2.2. Tính toán các tần số dao động tự do

Dao động tự do của dầm công xôn gắn một bộ lò xo - khối lượng tại đầu tự do đã đề cập trong các tài liệu [5, 7]. Trong tài liệu [5], các tác giả sử dụng phương pháp giải tích, còn trong tài liệu [7], tác giả sử dụng phương pháp ma trận độ cứng động lực để tìm các tần số dao động riêng và các hàm dáng tương ứng.

Trong bài báo này, các tác giả sử dụng các biến đổi trong tài liệu [5] để giải quyết bài toán dao động tự do của tháp cầu lắp các TLDs.

Phương trình dao động của tháp cầu theo lý thuyết dầm Euler-Bernoulli [2, 3, 4]:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\mu}{EI} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

Tìm nghiệm phương trình dao động của tháp cầu dưới dạng:

$$w(x, t) = W(x) e^{i\omega t} \quad (4)$$

với x là vị trí dọc theo trục của tháp, t là biến thời gian. Góc tọa độ được chọn tại vị trí ngàm ở chân tháp.

Đưa vào đại lượng không thứ nguyên:

$$\lambda^4 = \frac{\mu\omega^2}{EI} L^4 \quad (5)$$

Phương trình (3) khi đó có dạng:

$$\frac{d^4 W}{dx^4} - \left(\frac{\lambda}{L}\right)^4 W = 0 \quad (6)$$

Nghiệm phương trình (6) được tìm dưới dạng:

$$W(x) = C_1 \cos\left(\lambda \frac{x}{L}\right) + C_2 \sin\left(\lambda \frac{x}{L}\right) + C_3 \cosh\left(\lambda \frac{x}{L}\right) + C_4 \sinh\left(\lambda \frac{x}{L}\right) \quad (7)$$

Ở đầu ngàm, điều kiện biên là độ võng và góc xoay bằng không:

$$W(0) = 0; \quad \frac{dW}{dx}(0) = 0 \quad (8)$$

Ở đầu tự do, momen uốn bằng không nên ta có:

$$\frac{d^2W}{dx^2}(L) = 0 \quad (9)$$

Để tìm điều kiện biên thứ tư, ta có lực cắt tại đầu dầm:

$$Q(L, t) = NF_{dh} \quad (10)$$

với N là số lượng TMDs, F_{dh} là lực đàn hồi của lò xo.

Như đã trình bày trong mục 2.1, xét các TLDs là giống nhau và được quy đổi về các TMDs, mỗi TMD có độ cứng lò xo k và khối lượng m .

Lực đàn hồi của lò xo được xác định:

$$F_{dh} = k(u - w(L, t)) \quad (11)$$

Trong đó u là chuyển vị ngang của TMD.

Mặt khác, phương trình chuyển động của TMD theo định luật II Newton:

$$m\ddot{u} = -F_{dh} \quad (12)$$

Đặt biến trung gian

$$v = w(L, t) - u \quad (13)$$

Từ các phương trình (11)-(13), ta suy ra:

$$m\ddot{v}(L, t) = kv + m\ddot{v} \quad (14)$$

Lại có:

$$\ddot{v}(L, t) = -\omega^2 W(L) e^{i\omega t} \quad (15)$$

Thay (15) vào (14), ta có:

$$m\ddot{v} + kv = -m\omega^2 W(L) e^{i\omega t} \quad (16)$$

Nghiệm của phương trình (16) được tìm dưới dạng:

$$v = \frac{m\omega^2 W(L)}{m\omega^2 - k} e^{i\omega t} \quad (17)$$

Từ (11) ta suy ra:

$$F_{dh} = -kv = \frac{m\omega^2 W(L)}{1 - \frac{m}{k} \omega^2} e^{i\omega t} \quad (18)$$

Thay (18) vào (10) ta có:

$$-EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}(L, t) = N \frac{m\omega^2 W(L)}{1 - \frac{m}{k} \omega^2} e^{i\omega t} \quad (19)$$

Như vậy ta có điều kiện biên thứ tư:

$$\frac{d^3W}{dx^3}(L) + \frac{Nm\omega^2}{EI \left(1 - \frac{m}{k} \omega^2\right)} W(L) = 0 \quad (20)$$

Từ các phương trình điều kiện biên (8), (9), (20), thay vào biểu thức nghiệm (7), ta thu được 4 phương trình tuyến tính thuần nhất. Điều kiện để các hệ số không đồng thời triệt tiêu là định thức các hệ số phải bằng không, từ đó ta rút ra phương trình đặc trưng:

$$1 + \cosh \lambda \cos \lambda + \frac{\varepsilon \lambda}{\left(1 - \frac{m}{k} \omega^2\right)} \times (\sinh \lambda \cos \lambda - \cosh \lambda \sin \lambda) = 0 \quad (21)$$

Với:

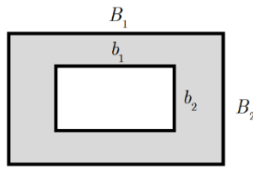
$$\varepsilon = \frac{Nm}{\mu L} \quad (22)$$

Giải phương trình (21) bằng phương pháp số ta sẽ tìm được các tần số dao động riêng ω_i tương ứng.

3. Ví dụ tính toán

Trong bài báo này, xét mô hình tháp cầu có tiết diện dạng chữ nhật rỗng như trên Hình 5. Xét dao động của tháp cầu theo phương ngang cầu (có độ cứng chống uốn nhỏ hơn). Các thông số của tháp cầu được trình bày trong Bảng 1.

Do trong thực tế, các TLDs được bố trí phía trong lòng tháp, ngoài ra còn cần phải bố trí khoang trống để thực hiện các hoạt động kiểm tra, duy tu, bảo dưỡng nên chọn các TLDs có kích thước $2a = 1,5\text{m}$; $b = 1,6\text{m}$. Như vậy khoảng trống còn lại sẽ có kích thước $1,5\text{m} \times 1\text{m}$, được bố trí ở giữa và các khay chất lỏng có thể được chia làm hai, bố trí về hai bên.



Hình 5. Mặt cắt ngang của tháp cầu

Bảng 1. Các thông số của tháp cầu

Ký hiệu	Trị số	Đơn vị
L	60	m
B_1	5	m
B_2	3	m
b_1	2,6	m
b_2	1,5	m
E	31975,35e6	N/m ²
ρ	2400	kg/m ³

Tỉ số tổng khối lượng của các TLDs và khối lượng của tháp chọn là 1%.

4. Kết quả và thảo luận

Khảo sát sự ảnh hưởng của số lượng TLDs đến tần số dao động riêng thứ nhất (tần số quan trọng nhất) với số lượng TLDs được xác định trong khoảng:

$$N \in [1; 33] \quad (23)$$

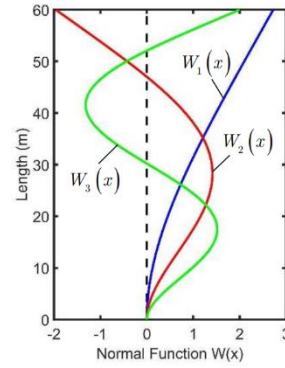
với $N_{max} = 33$, tương ứng với chiều cao của các TLDs, $h = 0,2018m$.

Bảng 2. Ba tần số đầu tiên của tháp cầu khi lắp và không lắp TLDs

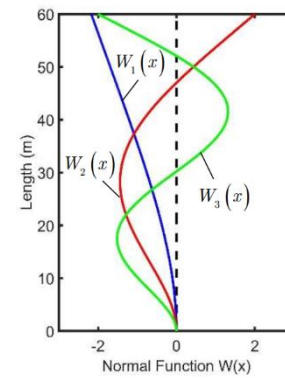
Tần số (rad/s)	Không lắp TLDs	Lắp TLDs ($N = 18$)	Lắp TLDs ($N = 25$)
ω_1	3,4705	3,9558	3,0176
ω_2	21,7495	21,7621	21,7593
ω_3	60,8992	60,9036	60,9026

Tiến hành tính toán mô phỏng số với các số lượng N khác nhau, nhận thấy với $N = 18$ ($h = 0,37m$) và $N = 25$ ($h = 0,266m$) sẽ thay đổi tần số cơ bản của tháp cầu nhiều nhất (lần lượt là 13,98% và 13,05%). Chi tiết như trong Bảng 2. Đây cũng là tần số quan trọng nhất tương ứng với mode dao động đầu tiên. Thông thường khi tính dao động cường bức dưới tác dụng của tải trọng động sẽ sử dụng mode dao động đầu tiên này. Với các tần số tiếp theo, ảnh hưởng của TLDs là không đáng kể.

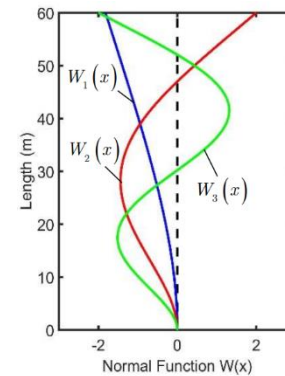
Các hàm dáng tương ứng với 3 tần số đầu tiên khi không lắp TLDs và lắp TLDs (với $N = 18$ và 25) được thể hiện trên các Hình 6, 7 và 8.



Hình 6. Các hàm dáng tương ứng với 3 tần số đầu tiên khi không lắp TLDs



Hình 7. Các hàm dáng tương ứng với 3 tần số đầu tiên khi lắp TLDs ($N = 18$)

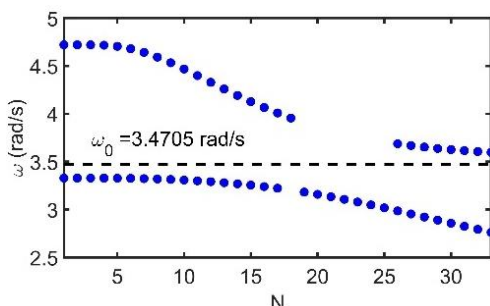


Hình 8. Các hàm dáng tương ứng với 3 tần số đầu tiên khi lắp TLDs ($N = 25$)

Các tần số dao động đầu tiên thay đổi theo số khay N được thể hiện trên Hình 9. Một điểm rất đặc biệt, với N nằm trong khoảng $[1; 17]$ và $[26; 33]$, có đến 2 tần số gần với tần số ω_0 của tháp khi không lắp TLDs.

Như vậy, thông qua ví dụ tính toán, nhận thấy TLD mặc dù có nhiều ưu điểm, nhưng nhược điểm là do bố trí trong lòng tháp cầu nên kích thước chiều dài và chiều rộng của TLD bị hạn chế, ảnh hưởng đến sự điều chỉnh các thông số khi tính toán tối ưu. Tuy nhiên, với việc điều chỉnh chiều cao của TLD, sự thay đổi với

tần số dao động cơ bản của tháp cầu là đáng kể với tỉ số khối lượng là 1%. Điều này rất có ý nghĩa đối với dao động cưỡng bức, đặc biệt với trường hợp lực tác động có dạng chu kỳ như dao động do xoáy khí (vortex shedding).



Hình 9. Các tần số dao động riêng ứng với số khay TLDs

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày tính toán dao động uốn tự do của tháp cầu khi lắp các thiết bị giảm chấn chất lỏng TLDs tại đỉnh tháp, các TLDs được quy đổi về các TMDs tương đương. Một số điểm tiếp cận mới đã được trình bày như sau:

- Tháp cầu được mô hình hóa thành dầm công xôn, một đầu ngàm, một đầu tự do. Trong quá trình tính toán dao động, tháp vẫn được xem là 1 dầm Euler - Bernoulli và không quy đổi về hệ 1 bậc tự do.
- Sự tương quan về kích thước hình học của các TLDs và kích thước trong lòng tháp đã được đề cập.
- Để phù hợp với việc bố trí các TLDs trong thực tế, các TLDs trong mô hình nghiên cứu có kích thước và tần số như nhau (đơn tần số).
- Các tần số dao động riêng của tháp cầu khi lắp TLDs và các hàm dáng tương ứng đã xác định, đây cũng là cơ sở để tính dao động cưỡng bức của tháp cầu khi lắp TLDs dưới tác dụng của tải trọng động.
- Việc bố trí các TLDs có thể điều chỉnh tần số dao động cơ bản (tần số dao động thứ nhất), trong khi các tần số tiếp theo không thay đổi nhiều. Tuy nhiên, mode dao động tương ứng với tần số cơ bản là quan trọng nhất khi chuyển sang tính dao động cưỡng bức của tháp cầu.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của bài báo là phân tích dao động cưỡng bức của tháp cầu khi lắp TLDs dưới tác dụng của gió, bão, động đất, ... Mặt khác, do trong thực tế, các khay TLDs được bố trí dọc theo tháp, do đó có thể mô hình hóa một cách chính xác hơn là xét sự phân bố của các TLDs dọc theo tháp cầu tại đỉnh tháp.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: SV23-24.40.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Đức Thị Thu Định (2014), *Nghiên cứu ứng dụng hệ giảm chấn chất lỏng trong kiểm soát dao động cho cầu dây văng tại Việt Nam*, Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Giao thông vận tải.
- [2] Đinh Tùng Dương, Nguyễn Thế Dũng, Trần Đình Thắng, Trần Đức Hùng, Đoàn Như Sơn, Trần Ngọc An (2023), *Xây dựng phương trình chuyển động của tháp cầu lắp thiết bị giảm chấn TLD dưới tác dụng của tải trọng động đất*, Kỷ yếu Hội thảo khoa học - Khoa Công trình, tháng 11/2023, tr.56-59.
- [3] Vũ Đức Phúc (2019), *Điều khiển tối ưu dao động bằng kết hợp nhiều bộ giảm chấn động lực*, Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- [4] Nguyễn Văn Khang (2005), *Dao động kỹ thuật*, NXB Khoa học kỹ thuật.
- [5] J.R. Banerjee (2012), *Free vibration of beams carrying spring-mass systems - A dynamic stiffness approach*, Computer and Structures, Vol.104-105, pp.21-26.
- [6] Yozo Fujino, Limin Sun, Benito M. Pacheco and Piyawat Chaiseri (1992), *Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures*, Journal of Engineering Mechanics, Vol.118 (10), pp.2017-2030.
- [7] C.A. Rossit and P.A.A. Laura (2001), *Free vibrations of a cantilever beam with a spring-mass system attached to the free end*, Ocean Engineering, Vol.28, pp.933-939.
- [8] L.M. Sun, Y. Fujino, B.M. Pacheco and P. Chaiseri (1992), *Modelling of tuned liquid damper (TLD)*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, Vol.41-44, pp.1883-1894.
- [9] Singiresu S. Rao (2007), *Vibration of continuous systems*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [10] Tanmoy Konar and Aparna (Dey) Ghosh (2023), *A review on various configurations of the passive tuned liquid damper*, Journal of Vibration and Control, Vol.29 (9-10), pp.1945-1980.

Ngày nhận bài:	10/01/2024
Ngày nhận bản sửa:	16/01/2024
Ngày duyệt đăng:	20/01/2024