

PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG CỦA TRỤ CẦU SÔNG HÀN CHỊU VA ĐẬP CỦA TÀU THỦY

ANALYSIS OF HAN-RIVER PIER VIBRATION UNDER IMPACT OF SHIP COLLISION

Nguyễn Đức Hoàng¹, Nguyễn Xuân Toàn²

¹Đại học Duy Tân, Email: hoangts2003@gmail.com

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng, Email: nguyensexuantoan2007@gmail.com

Tóm tắt - Cầu sông Hàn là một trong những công trình rất quan trọng trong sự nghiệp xây dựng và phát triển của thành phố Đà Nẵng. Công trình này đã được xây dựng nhịp quay để tàu lớn qua lại nên trụ cầu tiềm ẩn nhiều rủi ro khi bị va đập của tàu thủy. Bài toán phân tích dao động của trụ cầu bị va đập của tàu thủy là rất cần thiết. Trong bài báo này, các tác giả giới thiệu một mô hình và kết quả phân tích hiệu ứng va đập của tàu vào kết cấu trụ T5 của cầu sông Hàn trên cơ sở áp dụng định lý biến thiên động lượng, nguyên lý d'Alembert và các phương pháp số. Trong đó, hệ số cản được xác định theo phương pháp của Rayleigh. Đây là mô hình nghiên cứu đơn giản có thể áp dụng phân tích cho các kết cấu trụ cầu tương tự bị va đập của tàu thủy khi xét hệ làm việc trong miền đàn hồi.

Từ khóa - phân tích; dao động; trụ cầu; cầu sông Hàn; va đập; tàu thủy. (cần xem lại từ khóa ví dụ: "phân tích dao động trụ cầu" là 01 từ khóa)

1. Giới thiệu chung

Trên thế giới đã có một số nghiên cứu về dao động của kết cấu trụ cầu hoặc móng cầu như: Nhóm tác giả Zhu Bin, Chen Ren Peng, Chen Yun-Min [5] đã nghiên cứu dao động của trụ cầu dưới tác động của lực kích thích ngang; Nhóm tác giả Francesca Dezi, Sandro Carbonary và Graziano Leoni [7] đã nghiên cứu động lực học tương tác giữa các cọc đơn bằng phương pháp tính tương đương. Hossein Tahghighi và Kazoo Konagai [10] đã phân tích sự làm việc tương tác giữa đất và cọc dưới tác dụng của tải trọng ngang như lực động đất, địa chấn hay lực tác dụng trùng phục; Yanyan Sha và Hong Hao [9] đã áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích va chạm của sà lan vào một cầu tàu độc lập; Lý thuyết va chạm vật rắn phá huỷ và không phá huỷ được giáo sư Fourny đề cập vào năm 1993 [12], việc nghiên cứu va chạm trong lĩnh vực kỹ thuật ở các cấp độ, đối tượng có kích thước lớn cũng như áp dụng cho vật liệu rắn hoặc vật liệu biến dạng được giáo sư Frémond cùng cộng sự đưa ra (2003) [8]. Cơ sở lý thuyết về va chạm mới được nghiên cứu và đề cập trong thời gian gần đây, nên việc phân tích va chạm tàu thủy, sà lan vào trụ cầu là bài toán còn khá mới. Do đó, kết quả nghiên cứu về lĩnh vực này trên thế giới vẫn còn hạn chế.

Ở trong nước, các tác giả Nguyễn Xuân Toàn và Đặng Nguyễn Uyên Phương [3] đã nghiên cứu về dao động của cầu cảng Thọ Quang chịu va đập của tàu thủy dựa trên mô hình tuyến tính và phân tích kết quả bằng phương pháp số. Do lĩnh vực nghiên cứu này rất phức tạp và chi phí thử nghiệm rất tốn kém. Nên các kết quả nghiên cứu về lĩnh vực này cho đến nay vẫn chưa thực sự phổ biến.

Trong phạm vi bài viết này các tác giả xây dựng một mô hình đơn giản xét đến va đập của tàu thủy vào trụ T5 của cầu Sông Hàn. Kết quả phân tích dao động của trụ T5 được xét với các cấp tải trọng và vận tốc của tàu trước lúc va đập khác nhau. Định lý cân bằng động lượng, nguyên lý d'Alembert

Abstract - Han River Bridge is an important construction in development of Danang City. This work has a swing span built for the ship circulation, which results in a high risk of ship collision with the piers. For that reason, it is necessary to analyse the vibration of the piers at the point of collision and to calculate safety factors of the structure. This article introduces a computational model of T5 pier of Han bridge to solve its vibration problems, using Theorem of Linear Impulse and Momentum, d'Alembert Principle and Numerical methods. The Rayleigh method is used to determine the drag coefficient. This simple model can be applied for the analysis of similar piers' vibration under the collision of ship with the structure working in elastic range.

Key words - Analysis; vibration; piers; Han River Bridge; collision; ships.

đã được áp dụng để xây dựng các phương trình vi phân dao động của trụ T5 và giải bằng các phương pháp số.

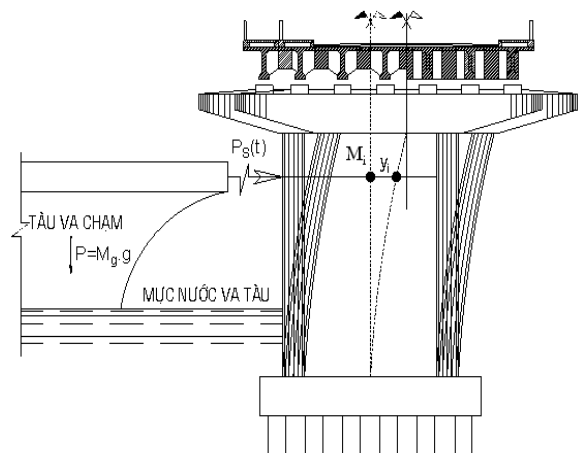
Hình ảnh cầu Sông Hàn và trụ T5 như Hình 1, cấu tạo và kích thước hình học trụ cầu T5 theo tài liệu [1].



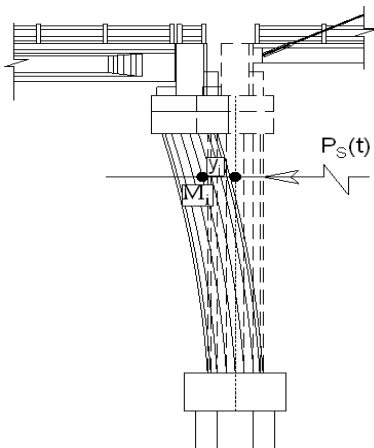
Hình 1. Hình ảnh cầu sông Hàn và trụ T5

2. Cơ sở tính toán

2.1. Mô hình tính toán



Hình 2. Tàu va đập dọc vào thân trụ T5



Hình 3. Tàu và đập ngang vào thân trụ T5

được tập trung về M₂ là vị trí chịu va đập của tàu; khối lượng một phần thân trụ bên dưới tập trung về M₁.

Trong phạm vi bài viết này các tác giả chỉ xét hệ làm việc trong giai đoạn đàn hồi, bỏ qua năng lượng bị mất mát do biến dạng không phục hồi, ma sát, nhiệt...

2.2. Lực va tàu vào trụ cầu

Lực va tàu vào trụ cầu có thể xác định bằng thực nghiệm, song do không có điều kiện làm thực nghiệm, lực va tàu vào trụ cầu T₅ được xác định gần đúng theo công thức của AASHTO [4]:

$$P_s(t) = 1,2 \cdot 10^5 \cdot v \cdot \sqrt{DWT} \tag{1}$$

Trong đó:

P_s(t): lực va tàu tính tương đương (N)

DWT: trọng tải của tàu (T)

v: vận tốc va tàu (m/s)

2.3. Phương trình vi phân dao động của hệ

Xét tàu có khối lượng M_g di chuyển với vận tốc v tại thời điểm chuẩn bị va đập vào trụ cầu. Khi đó trụ vẫn đứng yên nên ta có động lượng của hệ (gồm tàu và trụ) được xác định theo công thức (2):

$$Q_{ox} = M_g \times v \tag{2}$$

Khi tàu va đập vào trụ cầu, xét tại thời điểm hệ ở trạng thái cân bằng và không chuyển động, động lượng của hệ:

$$Q_{Ix} = 0 \tag{3}$$

Xung lượng của hệ khi va đập tính theo giá trị trung bình của lực P_s(t):

$$S = -P_s(t) \cdot \Delta t \tag{4}$$

Áp dụng định lý biến thiên động lượng ta có:

$$Q_{Ix} - Q_{ox} = S \tag{5}$$

Thay (2), (3) và (4) vào (5) ta có:

$$P_s(t) = \frac{M_g \times v}{\Delta t} \tag{6}$$

Hoặc thời gian va đập:

$$\Delta t = \frac{M_g \times v}{P_s(t)} \tag{7}$$

Trong đó:

P_s(t): lực va tính tương đương (T) ;

v: vận tốc tàu trước khi va đập (m/s) ;

Δt: thời gian duy trì lực va đập của tàu vào trụ (s);

M_g: khối lượng tàu (T).

Xét mô hình kết cấu như Hình 4, 5 áp dụng nguyên lý d'Alembert ta có hệ phương trình vi phân dao động của kết cấu trụ cầu T₅:

$$[M] \cdot \ddot{y}_t + [C] \cdot \dot{y}_t + [K] \cdot y_t = P_s(t) \tag{8}$$

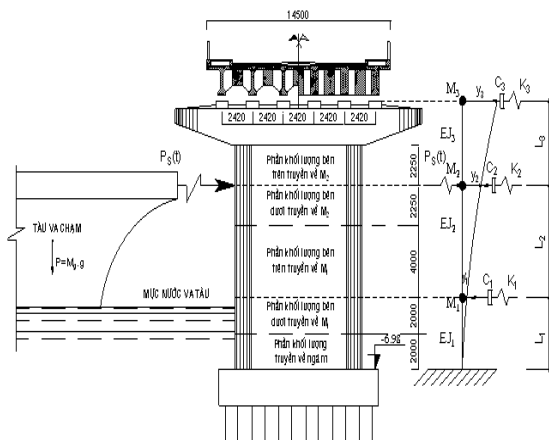
Trong đó:

[M]: ma trận khối lượng (T.10⁻¹);

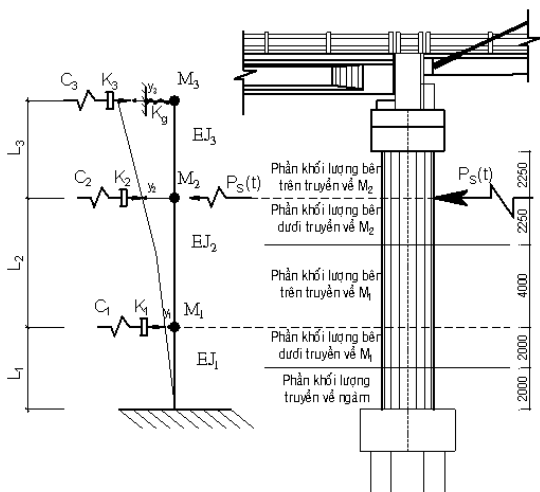
[K]: ma trận độ cứng (KN/mm);

[C]: ma trận hệ số cản (KN.s²/mm).

ÿ_t , ẏ_t , y_t : lần lượt là véctơ gia tốc (mm/s²), véctơ



Hình 4. Sơ đồ phân tích tàu và đập dọc vào trụ T5



Hình 5. Sơ đồ phân tích tàu và đập ngang vào trụ T5

Xét va đập của tàu vào trụ T₅ của cầu Sông Hàn theo hai trường hợp sau:

- Tàu va đập dọc vào thân trụ như Hình 2
- Tàu va đập ngang vào thân trụ như Hình 3

Căn cứ vào tài liệu thiết kế [1] xét trường hợp bất lợi khi nhịp chính quay 90° cho tàu qua lại, chỉ còn nhịp cầu dẫn kê trên trụ T₅, một cách gần đúng ta xét mô hình gồm 3 khối lượng tương đương được mô hình hóa như Hình 4 và Hình 5: khối lượng một phần kết cấu nhịp cầu dẫn và xà mũ trụ được tập trung về M₃; khối lượng một phần thân trụ

vận tốc (mm/s) và vectơ biên độ dao động (mm).

$\{P_{s(t)}\}$: vectơ tải trọng tác dụng (KN)

Để phân tích dao động của hệ, trước hết ta phải xác định các tham số của hệ phương trình (8) và sau đó áp dụng các phương pháp số để giải.

2.4. Xác định các tham số của hệ phương trình vi phân dao động

2.4.1. Ma trận độ cứng của hệ $[K]$

Ma trận độ cứng của hệ theo phương dọc tiết diện trụ cầu như sau (9):

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 640481,7 & -263476,3 & 80605,9 \\ -263476,3 & 232451,4 & -100572,1 \\ 80605,9 & -100572,1 & 50048,1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Ma trận độ cứng của hệ theo phương ngang tiết diện trụ cầu như sau (10):

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 47093,4 & -19377,7 & 5930,6 \\ -19377,7 & 17113,7 & -7407,7 \\ 5930,6 & -7407,7 & 3687,3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Ở đây $[K]$ được xác định thông qua $[F]$: $[K]=[F]^T$

$[F]$: là ma trận độ mềm có cấu trúc như sau (10a):

$$[F] = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} \quad (10a)$$

Trong đó: δ_{ij} là chuyển vị tại khối lượng thứ i do lực bằng đơn vị đặt tại khối lượng thứ j gây ra.

2.4.2. Ma trận khối lượng của hệ $[M]$

Khối lượng của hệ được đưa về ba khối lượng M_1, M_2, M_3 , từ cấu tạo của hệ ta xác định được ma trận khối lượng như sau (11):

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3548,75 & 0 & 0 \\ 0 & 2661,50 & 0 \\ 0 & 0 & 7575,52 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.4.3. Ma trận hệ số cản $[C]$:

Để xác định ma trận hệ số cản $[C]$ ta phân tích dao động riêng của hệ không cản (12):

$$[M] \cdot \ddot{y}_t + [K] \cdot y_t = 0 \quad (12)$$

Xác định tần số dao động riêng ω_i và sau đó xác định ma trận hệ số cản $[C]$ theo công thức của Rayleigh (13):

$$[C] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K] \quad (13)$$

α và β xác định theo công thức (14):

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (i = 1,2) \quad (14)$$

Do không có điều kiện thực nghiệm nên các tác giả tham khảo số liệu trong tài liệu [6] với tỷ số cản $\xi_i=5\%$ và tính toán được các tham số như Bảng 1:

Bảng 1. Hệ số cản của trụ T5

STT	Tiết diện	K/ thời gian (s)	Số vòng	vòng / phút	Tần số	α	β
1	Dọc thân trụ	0-9	1	6,667	0,111	0,0056	0,4500
2		9-18	1	6,667	0,111		
1	Ngang thân trụ	0-37	1	1,622	0,027	0,0014	1,8500
2		37-74	1	1,622	0,027		

2.4.4. Xác định lực và tàu thuyền

Áp dụng công thức (1) và (7) ta xác định Δt như Bảng 2 và Bảng 3:

Bảng 2: Thời gian và đập dọc tàu vào trụ [4]

Loại tải trọng	v^H (m/s)	Mg (DWT)	$P_s(t)$ (KN)	Δt (s)
tàu 10.000DWT	6,1	10000	73200,0	0,083
tàu 1.000DWT	5,3	1000	20112,1	0,026
Sà lan	4,4	500	11806,4	0,019

Bảng 3. Thời gian và đập ngang tàu vào trụ

Loại tải trọng	v^H (m/s)	Mg (DWT)	$P_s(t)$ (KN)	Δt (s)
Tàu 10.000DWT	6,1	10000	36466,7	0,167
Tàu 1000DWT	5,3	1000	10013,9	0,053
Sà lan	4,4	500	5873,4	0,037

Một cách gần đúng ta xác định lực và lớn nhất $P_s(t)$ theo công thức (6) và giả thiết là cường độ không đổi trong khoảng thời gian duy trì lực và trên trụ. Kết quả tính toán $P_s(t)$ ứng với từng trường hợp như công thức (17) và (19).

2.4.5. Lực đàn hồi của gối cầu

$$F_{dhg} = K_g \times y \quad (15)$$

Trong đó:

K_g : độ cứng của gối cầu (KN/mm);

y : chuyển vị của gối (mm).

3. Áp dụng tính toán

Tính toán cho tàu có trọng tải $M_g=10.000$ (DWT), và đập dọc tàu vào dọc tiết diện thân trụ với vận tốc thiết kế $v=6,1$ (m/s).

Hệ phương trình dao động của trụ T5 khi tàu va đập dọc tàu vào dọc tiết diện thân trụ.

$$\begin{bmatrix} 3548,8 & 0 & 0 \\ 0 & 2661,5 & 0 \\ 0 & 0 & 7575,5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 288236,7 & -118564,3 & 36272,6 \\ -118564,3 & 104618,0 & -45257,4 \\ 36272,6 & -45257,4 & 22564,1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 640481,7 & 263476,3 & 80605,9 \\ 263476,3 & 232451,2 & 100572,1 \\ 80605,9 & 100572,1 & 50048,1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_s(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Với:

$$P_s(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 73200 & t \leq 0,083 \\ 0 & t > 0,083 \end{cases} \quad (17)$$

Tính toán cho tàu có trọng tải $M_g=10.000$ (DWT), và đập ngang tàu vào ngang tiết diện thân trụ với vận tốc thiết kế $v=6,1$ (m/s).

Hệ phương trình dao động của trụ T5 khi tàu va đập ngang tàu vào ngang tiết diện thân trụ:

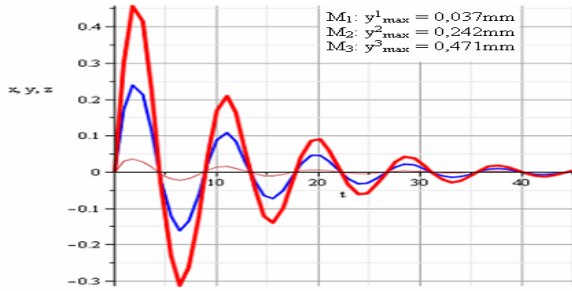
$$\begin{pmatrix} 3548,8 & 0 & 0 \\ 0 & 2661,5 & 0 \\ 0 & 0 & 7575,5 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 87127,7 & -35848,7 & 10971,5 \\ -35848,7 & 31664,1 & -13704,3 \\ 10971,5 & -13704,3 & 6832,0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 47093,4 & 19377,7 & 5930,6 \\ 19377,7 & 17113,7 & 7407,7 \\ 5930,6 & 7407,7 & 3687,3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{\bullet} \\ P_s(t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Với:

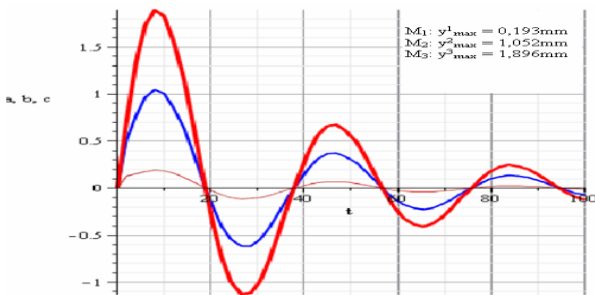
$$P_s(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 36466,7 & t \leq 0,167 \\ 0 & t > 0,167 \end{cases} \quad (19)$$

F_{đng}: Xác định theo công thức (15)

Giải phương trình (16) và (18) bằng phần mềm Maple v.13 cho kết quả:



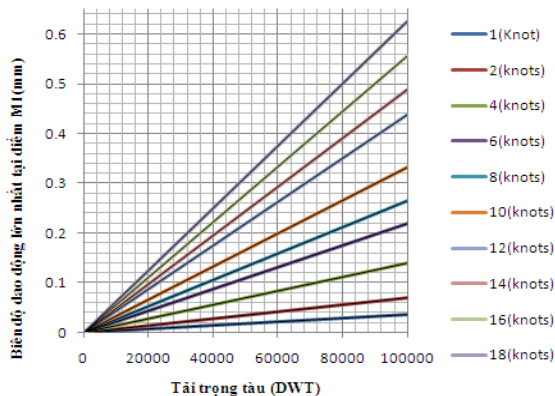
Hình 6. Biên độ dao động của T₅ khi tàu và đập dọc tiết diện thân trụ



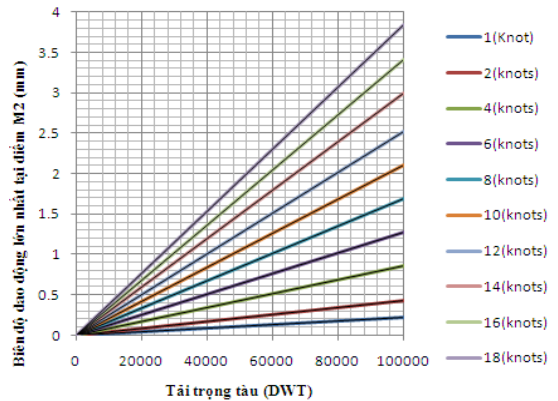
Hình 7. Biên độ dao động của T₅ khi tàu và đập ngang tiết diện thân trụ

4. Phân tích quan hệ giữa biên độ dao động với tải trọng tàu và vận tốc tàu

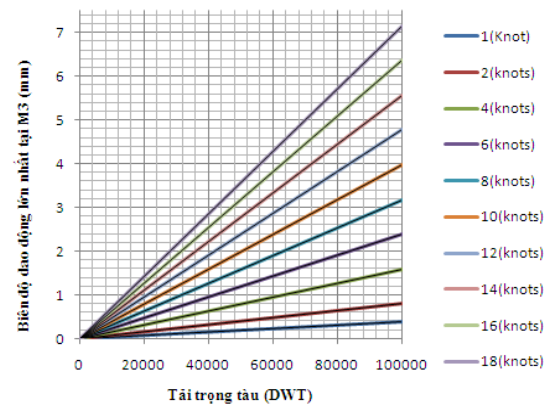
Tính toán tương tự cho các trường hợp tải trọng tàu và vận tốc và tàu khác nhau ta lập được các biểu đồ quan hệ giữa tải trọng tàu và vận tốc và tàu với biên độ dao động lớn nhất của trụ như Hình (8), (9) và (10).



Hình 8. Quan hệ giữa tải trọng, vận tốc tàu với biên độ dao động của khối lượng M₁ của trụ T₅



Hình 9. Quan hệ giữa tải trọng, vận tốc tàu với biên độ dao động của khối lượng M₂ của trụ T₅



Hình 10. Quan hệ giữa tải trọng, vận tốc tàu với biên độ dao động của khối lượng M₃ của trụ T₅

Theo kết quả phân tích trên Hình 8, 9 và 10 cho thấy biên độ dao động lớn nhất của trụ tăng gần như tỉ lệ thuận với tải trọng và vận tốc và của tàu. Các quan hệ này gần như tuyến tính nên có thể xấp xỉ tuyến tính, ta có thể áp dụng để tra cứu ngược biên độ dao động của trụ T₅ cầu sông Hàn tương ứng với tải trọng và tốc độ thiết kế của tàu khác nhau. Khi thiết kế các kết cấu tương tự, thay vì phân tích cho nhiều tốc độ và tải trọng tàu khác nhau, ta có thể phân tích xác định chuyển vị động tương ứng với 2 cấp tải trọng và tốc độ khác nhau để nội suy ra các giá trị chuyển vị động tương ứng với các cấp tải trọng và tốc độ thiết kế hoặc tải trọng và tốc độ thực tế của tàu cho phép lưu thông trên sông Hàn.

5. Kết luận

Bài báo giới thiệu mô hình và kết quả phân tích hiệu ứng va đập của tàu vào kết cấu trụ T₅ cầu sông Hàn trên cơ sở áp dụng định lý biến thiên động lượng, nguyên lý d’Alembert và các phương pháp số. Trong đó hệ số cản được xác định theo phương pháp Rayleigh. Đây là mô hình nghiên cứu đơn giản có thể áp dụng phân tích cho các kết cấu trụ cầu chịu va đập của tàu trong khai thác khi xét hệ làm việc trong miền đàn hồi. Có thể phân tích chính xác

hơn khi xét đến tương tác với nền đất.

Theo kết quả nghiên cứu trên trụ T_5 của cầu sông Hàn với tỷ số cản 5% cho thấy biên độ dao động của trụ tăng gần như tỉ lệ thuận với tải trọng và vận tốc va của tàu. Các quan hệ này có thể xấp xỉ tuyến tính. Do vậy khi phân tích cho các kết cấu cầu vượt sông tương tự có thể phân tích xác định chuyển vị động tương ứng với 2 cấp tải trọng và tốc độ khác nhau để suy ra các giá trị chuyển vị động tương ứng với các cấp tải trọng và tốc độ thiết kế hoặc tải trọng và tốc độ thực tế của tàu thông thường. Như vậy có thể giảm được khối lượng tính toán mà vẫn chủ động trong nghiên cứu thiết kế và quản lý khai thác công trình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Sở giao thông thành phố Đà Nẵng (1998), Hồ sơ bản vẽ thiết kế thi công công trình cầu vượt sông Hàn thành phố Đà Nẵng.
- [2] Nguyễn Trọng, Tống Danh Đạo, Lê Thị Hoàng Yến (2001), *Cơ học cơ sở - Phần động lực học*. NXB. KHKT, Hà Nội.
- [3] Nguyễn Xuân Toàn, Đặng Nguyễn Uyên Phương (2013), Phân tích dao động cầu cảng Thọ Quang chịu va đập của tàu thủy. Tạp chí KHCN Đại học Đà Nẵng, số 10(71)2013, trang 45-49.
- [4] AASHTO (2005). *Standard specifications for highway bridges 17th Ed.*, Washington, D.C.
- [5] Zhu Bin, Chen Ren-Peng, Chen Yun-Min (2003) "Transient reponse of piles – bridge under horizontal excitation", *Journal of Zhejiang University Science*, V.4. No1, P28-34.
- [6] Ray W.Clough & Joseph Renzien (1995). *Dynamics of Structures*. Third edition, Computers & Structure.Ine University Ave. Berkeley,CA 94704 USA.
- [7] Francesca Dezi, Sandro Carbonary & Graziano Leoni (2010) "Static equivalent method for the kinematic interaction analysis of single piles". *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* No.30.P.679-690.
- [8] Frémond,M.,Gormaz,R.,Martín,J.A.,2003."Collision of asolid with anincom-pressiblefluid. Theory", *Comput Fluid Dynam*.16,405e420.
- [9] Yanyan Sha & Hong Hao (2012) " Nonlinear finite element analysis of barge collision with a single bridge pier" *Engineering Structures*, 41, P 63-76.
- [10] Hossein Tahghighi & Kazoo Konagai (2007) "Numerical analysis of nolinear soil-pile group interation under luterl loads". *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* No.27.P.463-474.
- [11] Farzin Zareian & Ricardo A.Media (2010) "Apractical method for proper modeling of structural damping in inelastic plane structural systems". *Computers & Structure* No.88.P45-53.
- [12] Fourny,W. L.,(1993), "Mechanisms of Rock Fragmentations by Blasting", vol.4. Pergamon, *Oxford*, pp.39-69.

(BBT nhận bài: 14/09/2014, phân biện xong: 07/10/2014)