

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN PHÂN TÍCH HỆ SỐ ĐỘNG LỰC CỦA CẦU DÀM BÊ TÔNG CỐT THÉP DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG XE THAY ĐỔI

ANALYSIS OF THE DYNAMIC IMPACT FACTOR OF THE REINFORCED CONCRETE GIRDER BRIDGES UNDER THE EFFECTS OF CHANGING VEHICLE LOAD USING FINITE ELEMENT METHOD

Nguyễn Xuân Toàn, Nguyễn Thị Kim Loan*

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng¹

*Tác giả liên hệ: ntkloan@dut.udn.vn

(Nhận bài: 19/01/2022; Chấp nhận đăng: 28/3/2022)

Tóm tắt - Bài báo giới thiệu một số kết quả phân tích hệ số động lực (HSDL) của chuyển vị trong cầu dầm bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng xe thay đổi. Ứng xử của kết cấu cầu-xe được phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình số được áp dụng vào phân tích cho cầu Sông Quý thuộc đoạn đường bộ cao tốc Phan Thiết - Dầu Giây, Việt Nam với loại xe ba trục có tải trọng thay đổi. Kết quả nghiên cứu cho thấy, với tải trọng xe thay đổi, HSDL của cầu dầm tăng đáng kể khi so sánh với giá trị trong quy trình thiết kế cầu hiện nay. Những kết quả nghiên cứu của bài báo giúp hỗ trợ thêm thông tin trong quá trình phân tích thiết kế và kiểm tra an toàn khi khai thác công trình cầu.

Từ khóa - Hệ số động lực (HSDL); phương pháp phần tử hữu hạn; tải trọng xe thay đổi; cầu Sông Quý.

1. Đặt vấn đề

Cầu dầm là một trong những loại cầu phổ biến nhất trên khắp thế giới. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để phân tích tương tác động lực học của cầu dầm - xe ([1]; [2]; [3]). Một số nghiên cứu đã phân tích HSDL của các cây cầu đơn giản do tải trọng xe ([4]; [5]). Dựa trên việc phân tích các cầu dầm liên tục hiện có, Fafard và cộng sự [6] đã chỉ ra rằng các thông số kỹ thuật tiêu chuẩn của AASHTO [7] có xu hướng ước tính HSDL thấp cho các cầu dầm liên tục nhịp dài. Đánh giá các HSDL khác nhau cho mô men uốn và lực cắt được áp dụng bởi một số mã thiết kế cầu có thể được tìm thấy trong Deng và cộng sự [8]. Nhiều nhà nghiên cứu đã chỉ ra rằng HSDL của các kết cấu cầu khác nhau là khác nhau, và một số nhận thấy rằng, HSDL thu được từ các kết cấu cầu khác nhau nên được xử lý khác nhau ([9]; [10]; [6]; [11]).

Công trình cầu thường dao động mạnh dưới tác dụng của hoạt tải xe di động và tải trọng xe thay đổi ảnh hưởng đáng kể tới phản ứng động của kết cấu. Một số công bố cho việc phân tích các kết cấu chịu tải trọng xác định. Mô hình được áp dụng phổ biến nhất cho dầm hoặc tấm, chịu tải trọng tập trung ([12]; [13]) hoặc tải trọng phân bố [14]. [15] phân tích một dầm đơn giản chịu tải trọng di chuyển tập trung với cùng cường độ, di chuyển với tốc độ không đổi. Hầu hết các bài toán mới chỉ xét đến tải trọng tập trung xác định di chuyển trên cầu.

Trong nghiên cứu này, các mô phỏng số được thực hiện để phân tích HSDL của cầu Sông Quý thuộc đoạn đường bộ cao tốc Phan Thiết - Dầu Giây, Việt Nam. Xe với tải

Abstract - This paper presents some analysis results of dynamic impact factor (DIF) of displacements in the reinforced concrete girder bridges under the effect of changing vehicle loads. The behavior of the bridge-vehicle structure is analyzed by the finite element method. The numerical model is applied to the analysis for Song Quy bridge in Phan Thiet - Dau Giay highway, Vietnam with three-axle vehicle with variable load. The research results show that, with the changing vehicle load, the DIF of the girder bridge increases significantly when compared with the value in the current bridge design process. The research results of the article help support more information in the process of design analysis and safety check when exploiting bridge works.

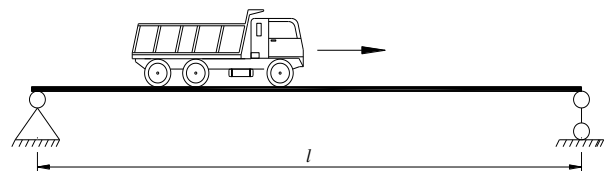
Key words - Dynamic impact factor (DIF); finite element method; changing vehicle loads; Song Quy bridge.

trọng thay đổi khi di chuyển qua cầu được xem xét và khảo sát tương ứng với các tốc độ khác nhau. Thực hiện mô hình phân tích số trên cầu dầm đơn giản gồm 1 nhịp chiều dài 33m dưới tác dụng của tải trọng xe 03 trục theo mô hình tương tác động lực.

2. Mô hình phân tích tương tác động lực giữa xe – cầu và phương trình vi phân dao động

2.1. Mô hình phân tích tương tác giữa xe và cầu

Sơ đồ tải trọng xe ba trục di chuyển trên kết cấu cầu dầm bê tông cốt thép gồm 1 nhịp dầm I được mô tả như Hình 1.

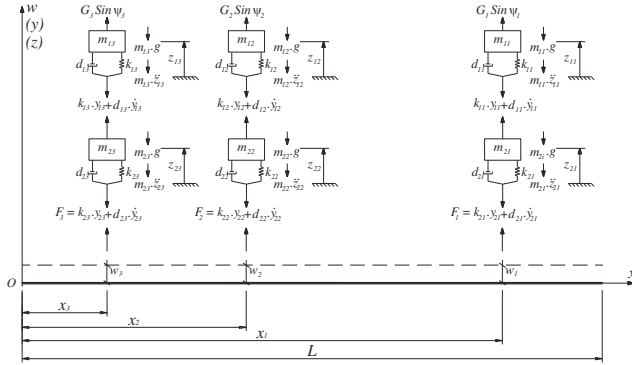


Hình 1. Sơ đồ tải trọng xe di chuyển trên cầu

Mô hình hóa kết cấu cầu như phần tử thanh (dầm), hoạt tải xe di động được mô hình hóa gồm ba trục xe. Mô hình tương tác động lực giữa hoạt tải xe ba trục di động và phần tử dầm được mô tả như Hình 2. Trong đó, $G.\sin\psi_i$ là lực kích thích điều hòa của động cơ truyền lên trục xe thứ i ; Khối lượng của thân xe và hàng hóa phân bố lên trục xe thứ i được mô hình hóa thông qua khối lượng m_{1i} ; Khối lượng của trục xe thứ i được mô hình hóa thông qua khối lượng m_{2i} ; k_{1i} , d_{1i} lần lượt là độ cứng và độ giảm chấn của nhíp xe; k_{2i} , d_{2i} lần lượt là độ cứng và độ giảm chấn của lốp

¹ The University of Danang – University of Science and Technology (Nguyen Xuan Toan, Nguyen Thi Kim Loan)

xe; L là chiều dài của phần tử dầm; $w_i(x_i, t)$ là chuyển vị của phần tử dầm tại vị trí của tải trọng thứ i ở thời điểm đang xét; z_{1i} là chuyển vị thẳng đứng của khung xe tại vị trí trục i ; z_{2i} là chuyển vị thẳng đứng của trục xe thứ i ; y_{1i} là chuyển vị tương đối giữa khung và trục xe thứ i ; y_{2i} là chuyển vị tương đối giữa trục xe thứ i và phần tử dầm; x_i là tọa độ của trục xe thứ i tại thời điểm t ($i = 1, 2, 3$).



Hình 2. Mô hình tương tác giữa phần tử dầm và xe 3 trục

2.2. Phương trình dao động uốn của phần tử dầm chịu tải trọng di động

Khi xét đến ảnh hưởng của ma sát trong và ma sát ngoài, phương trình dao động uốn của phần tử dầm chịu tải trọng phân bố $p(x, z, t)$ được xác định theo [16] và [17] như sau:

$$EJ_d \cdot \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \theta \cdot \frac{\partial^5 w}{\partial x^4 \partial t} \right) + \rho F_d \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \beta \cdot \frac{\partial w}{\partial t} = p(x, z, t)$$

$$p(x, z, t) = \sum_{i=1}^N \xi_i(t) \cdot [G_i \sin \Psi_i - (m_{1i} + m_{2i}) \cdot g - m_{1i} \cdot \ddot{z}_{1i} - m_{2i} \cdot \ddot{z}_{2i}] \cdot \delta(x - a_i)$$

$$m_{1i} \cdot \ddot{z}_{1i} + d_{1i} \cdot \dot{z}_{1i} + k_{1i} \cdot z_{1i} - d_{1i} \cdot \dot{z}_{2i} - k_{1i} \cdot z_{2i} = G_i \cdot \sin \Psi_i - m_{1i} \cdot g$$

$$m_{2i} \cdot \ddot{z}_{2i} + (d_{1i} + d_{2i}) \cdot \dot{z}_{2i} + (k_{1i} + k_{2i}) \cdot z_{2i} - d_{1i} \cdot \dot{z}_{1i} - k_{1i} \cdot z_{1i} = -m_{2i} \cdot g + d_{2i} \cdot \dot{w}_i + k_{2i} \cdot w_i$$

(1)

Trong đó, EJ_d là độ cứng chống uốn của phần tử dầm; ρF_d trọng lượng của phần tử dầm trên 1 đơn vị chiều dài; θ và β là hệ số ma sát trong và hệ số ma sát ngoài của phần tử dầm; $p(x, z, t)$ là tải trọng phân bố đều trên dầm; $\delta(x - a_i)$ là hàm Delta-Dirac; $i=1$ to N (N là số trục, $N=3$).

$$\xi_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{khi } t_i \leq t \leq t_i + T_i \\ 0 & \text{khi } t < t_i \text{ và } t > t_i + T_i \end{cases}; T_i = \frac{L}{v_i} \quad (2)$$

Biến đổi các phương trình (1) thành dạng ma trận bằng cách áp dụng phương pháp Galerkin kết hợp với lý thuyết Green, kết quả thu được phương trình vi phân của phần tử dầm như sau:

$$M_e \cdot \ddot{q} + C_e \cdot \dot{q} + K_e \cdot q = f_e \quad (3)$$

Trong đó M_e là ma trận khối lượng, C_e là ma trận cản, K_e là ma trận độ cứng hỗn hợp của toàn hệ (xe và phần tử dầm):

$$M_e = \begin{bmatrix} M_{ww} & M_{wz1} & M_{wz2} \\ 0 & M_{z1z1} & 0 \\ 0 & 0 & M_{z2z2} \end{bmatrix}; C_e = \begin{bmatrix} C_{ww} & 0 & 0 \\ 0 & C_{z1z1} & C_{z1z2} \\ C_{z2w} & C_{z2z1} & C_{z2z2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K_e = \begin{bmatrix} K_{ww} & 0 & 0 \\ 0 & K_{z1z1} & K_{z1z2} \\ K_{z2w} & K_{z2z1} & K_{z2z2} \end{bmatrix}$$

$\ddot{q}, \dot{q}, q, f_e$ lần lượt là vectơ gia tốc, vận tốc, chuyển vị, lực hỗn hợp được xác định như sau:

$$\ddot{q} = \begin{Bmatrix} \ddot{W} \\ \ddot{Z}_1 \\ \ddot{Z}_2 \end{Bmatrix}; \dot{q} = \begin{Bmatrix} \dot{W} \\ \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \end{Bmatrix}; q = \begin{Bmatrix} W \\ Z_1 \\ Z_2 \end{Bmatrix}; f_e = \begin{Bmatrix} F_w \\ F_{z1} \\ F_{z2} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$W = u_1 \quad \varphi_1 \quad u_2 \quad \varphi_2^T$ là vectơ độ dời nút của phần tử dầm trong hệ tọa độ địa phương. $u_1, \varphi_1, u_2, \varphi_2$ lần lượt là chuyển vị thẳng đứng, chuyển vị xoay trên nút trái và nút phải của phần tử dầm.

M_{ww} là ma trận khối lượng, C_{ww} là ma trận cản, K_{ww} là ma trận độ cứng của phần tử dầm chịu uốn có xét đến ảnh hưởng của ma sát trong và ma sát ngoài khi tính theo phương pháp phần tử hữu hạn của bài toán cơ bản xác định theo công thức (6):

$$K_{ww} = \frac{EJ_d}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$M_{ww} = \frac{\rho F_d L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$C_{ww} = \beta \cdot \frac{M_{ww}}{\rho F_d} + \theta \cdot K_{ww} \quad (6)$$

$$M_{z1z1} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1i} & \dots & m_{1N} \end{bmatrix};$$

$$M_{z2z2} = \begin{bmatrix} m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2i} & \dots & m_{2N} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$M_{wz1} = P \cdot M_{z1z1}; \quad M_{wz2} = P \cdot M_{z2z2} \quad (8)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1i} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2i} & \dots & P_{2N} \\ P_{31} & P_{32} & \dots & P_{3i} & \dots & P_{3N} \\ P_{41} & P_{42} & \dots & P_{4i} & \dots & P_{4N} \end{bmatrix}_{(4 \times N)}$$

$$P_i = \begin{Bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ P_{3i} \\ P_{4i} \end{Bmatrix} = \frac{\xi_i(t)}{L^3} \cdot \begin{Bmatrix} (L+2a_i)(L-a_i)^2 \\ L a_i (L-a_i)^2 \\ a_i^2 (3L-2a_i) \\ -L a_i^2 (L-a_i) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Với P_i là cột thứ i .

$$C_{z1z1} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1i} & \dots & d_{1N} \end{bmatrix};$$

$$C_{z2} = \begin{bmatrix} d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2i} & \dots & d_{2N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C_{z1z2} = C_{z2z1} = -C_{z1z1}; \quad C_{z2z2} = C_{z1z1} + C_{z2}; \quad C_{z2w} = (N_a \cdot C_{z2})^T \quad (11)$$

$$N_a = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \dots & N_{1i} & \dots & N_{1N} \\ N_{21} & N_{22} & \dots & N_{2i} & \dots & N_{2N} \\ N_{31} & N_{32} & \dots & N_{3i} & \dots & N_{3N} \\ N_{41} & N_{42} & \dots & N_{4i} & \dots & N_{4N} \end{bmatrix}_{(4 \times N)}$$

Trong đó:

$$\left. \begin{aligned} N_{1i} &= \frac{1}{L^3} \cdot (L^3 - 3L a_i^2 + 2a_i^3) \\ N_{2i} &= \frac{1}{L^2} \cdot (L^2 a_i - 2L a_i^2 + a_i^3) \\ N_{3i} &= \frac{1}{L^2} \cdot (3L a_i^2 - 2a_i^3) \\ N_{4i} &= \frac{1}{L^2} \cdot (a_i^3 - L a_i^2) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$K_{z1z1} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1i} & \dots & k_{1N} \end{bmatrix};$$

$$K_{z2} = \begin{bmatrix} k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2i} & \dots & k_{2N} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$K_{z1z2} = K_{z2z1} = -K_{z1z1}; \quad K_{z2z2} = K_{z1z1} + K_{z2};$$

$$K_{z2w} = (N_a \cdot K_{z2})^T + (\dot{N}_a \cdot C_{z2})^T \quad (14)$$

$$F_w = F_1 \dots F_i \dots F_4^T;$$

$$F_i = \sum_{i=1}^N [G_i \sin \psi_i - (m_{li} + m_{2i}) \cdot g] \cdot P_i; \quad (15)$$

$$F_{z1} = \begin{bmatrix} G_1 \sin \Psi_1 - m_{11} \cdot g \\ \vdots \\ G_i \sin \Psi_i - m_{li} \cdot g \\ \vdots \\ G_N \sin \Psi_N - m_{1N} \cdot g \end{bmatrix}; \quad F_{z2} = \begin{bmatrix} -m_{21} \cdot g \\ \vdots \\ -m_{2i} \cdot g \\ \vdots \\ -m_{2N} \cdot g \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.3. Phương trình vi phân tương tác dao động uốn của toàn hệ thống

Để ứng dụng vào phân tích dao động theo mô hình tương tác động lực học giữa cầu và tải trọng xe di động được mô tả như Hình 1, kết cấu cầu được rời rạc hóa thành các phần tử thanh cơ bản và phần tử dầm chịu tải trọng xe di động. Phương trình vi phân dao động cho toàn hệ được viết dưới dạng ma trận khi áp dụng thuật toán của phương pháp phần tử hữu hạn (17):

$$[M] \cdot \{\ddot{U}\} + [C] \cdot \{\dot{U}\} + [K] \cdot \{U\} = \{F\} \quad (17)$$

Trong đó, $[M]$ là ma trận khối lượng, $[C]$ là ma trận cản, $[K]$ là ma trận độ cứng của toàn hệ thống theo mô hình tương tác động lực học giữa cầu và tải trọng di động; $\{\ddot{U}\}$ là vectơ gia tốc, $\{\dot{U}\}$ là vectơ vận tốc, $\{U\}$ là vectơ chuyển vị, $\{F\}$ là vectơ lực tương đương mở rộng cho toàn hệ thống. $\{U\}$ là vectơ chuyển vị bao gồm chuyển vị thẳng đứng, chuyển vị ngang và chuyển vị xoay tại các nút của dầm.

2.4. Phân tích HSDL của cầu dầm

HSDL (1+IM) trong AASHTO [7] và TCVN11823-13:2017 [18] được xác định như sau:

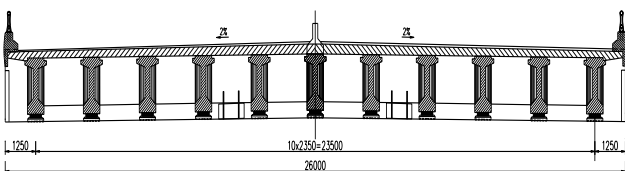
$$(1 + IM) = \frac{S_{dmax}}{S_{tmax}} \quad (18)$$

Trong đó, S_{dmax} , S_{tmax} là giá trị chuyển vị động và chuyển vị tĩnh lớn nhất do tải trọng xe di động gây ra.

3. Áp dụng phân tích HSDL trên cầu Sông Quy

3.1. Các số liệu cơ bản của kết cấu và xe

Cầu Sông Quy thuộc dự án xây dựng đường bộ cao tốc đoạn Phan Thiết – Dầu Giây, cầu một nhịp, có chiều dài nhịp $L=33$ m. Mặt cắt ngang cầu gồm 11 dầm I bê tông cốt thép ứng suất trước được biểu diễn như Hình 3.



Hình 3. Mặt cắt ngang cầu bê tông cốt thép – cầu Sông Quy

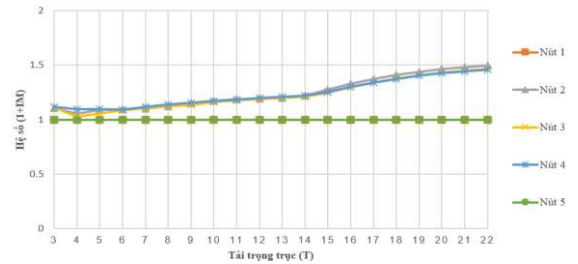
Các số liệu cơ bản của cầu như sau: $E = 3230769,23$ T/m²; $J_d = 0,30921$ m⁴; $F_d = 0,9522$ m²; $\rho F_d = 2,8$ T/m, hệ số ma sát trong và ngoài lần lượt là $\theta = 0,027$ và $\beta = 0,01$.

Xe được xét là loại xe Foton có ba trục với các tham số như sau: $m_{11} = 1,5 \div 10$ T; $m_{12} = m_{13} = 3 \div 20$ T; $m_{21} = 0,26$ T; $m_{22} = m_{23} = 0,87$ T; $k_{11} = 120$ T/m; $k_{12} = k_{13} = 260$ T/m; $k_{21} = 240$ T/m, $k_{22} = k_{23} = 380$ T/m; $d_{11} = 0,7344$ Ts/m; $d_{12} = d_{13} = 0,3672$ Ts/m; $d_{21} = 0,4$ Ts/m; $d_{22} = d_{23} = 0,8$ Ts/m.

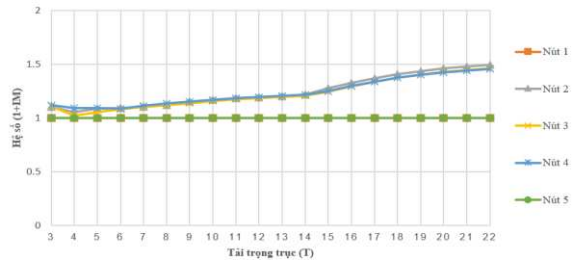
3.2. Phân tích HSDL trên cầu Sông Quy

Tiến hành phân tích dao động cầu dầm bê tông cốt thép Sông Quy khi tải trọng xe thay đổi, cụ thể là tăng từ 3T đến 22T bằng phương pháp phần tử hữu hạn, tương ứng với vận tốc 5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s và 25m/s. HSDL của chuyển vị tại mỗi nút gồm 2 thành phần được khảo sát bao gồm chuyển vị thẳng đứng (Uy) và chuyển vị xoay (Uz).

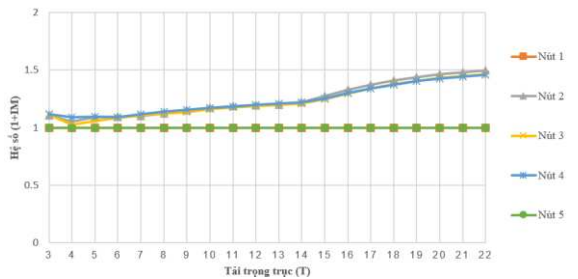
Kết quả khảo sát HSDL của chuyển vị thẳng đứng tại các nút tương ứng dưới tác dụng của tải trọng xe thay đổi gây ra tương ứng với vận tốc 5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s và 25m/s như Hình 4-8.



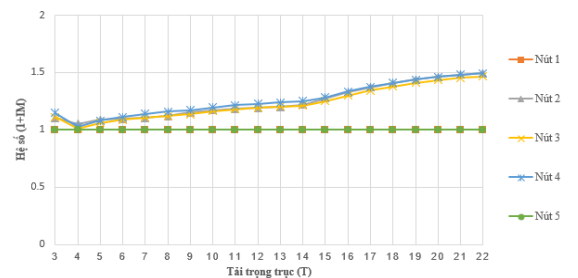
Hình 4. HSDL của chuyển vị thẳng đứng với $v=5$ m/s



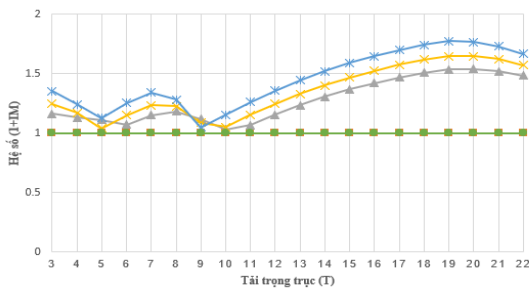
Hình 5. HSDL của chuyển vị thẳng đứng với $v=10$ m/s



Hình 6. HSDL của chuyển vị thẳng đứng với $v=15$ m/s

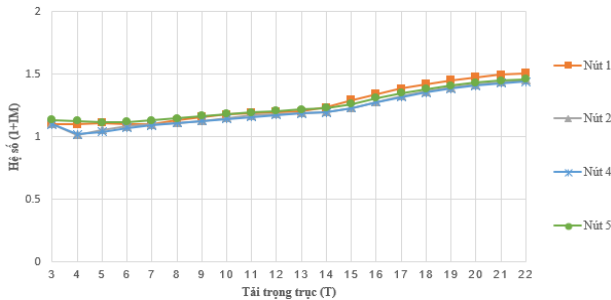


Hình 7. HSDL của chuyển vị thẳng đứng với $v=20$ m/s

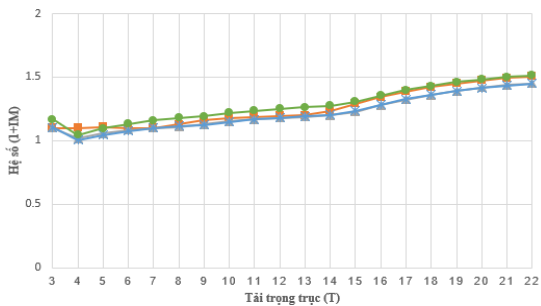


Hình 8. HSDL của chuyển vị thẳng đứng với $v=25$ m/s

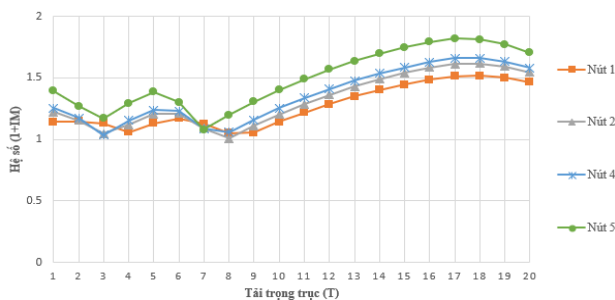
Tương tự, kết quả thu được HSDL của chuyển vị xoay tại các nút dưới tác dụng của tải trọng xe thay đổi gây ra tương ứng với vận tốc 5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s và 25m/s được thể hiện trên Hình 9-13.



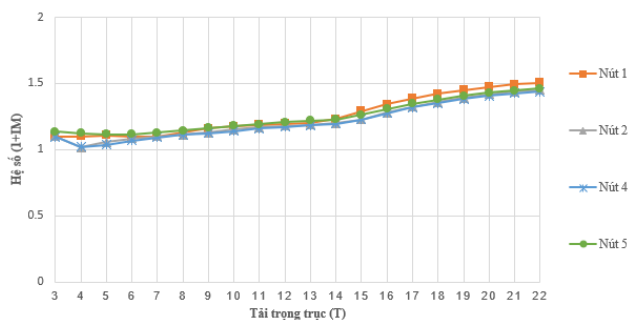
Hình 9. HSDL của chuyển vị xoay với $v=5$ m/s



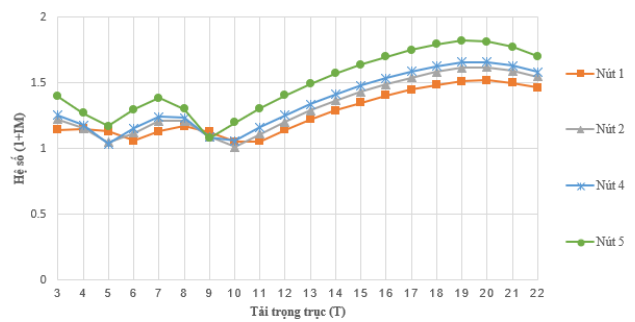
Hình 10. HSDL của chuyển vị xoay với $v=10$ m/s



Hình 11. HSDL của chuyển vị xoay với $v=15$ m/s



Hình 12. HSDL của chuyển vị xoay với $v=20$ m/s



Hình 13. HSDL của chuyển vị xoay với $v=25$ m/s

Kết quả mô phỏng cho thấy, khi tải trọng xe di động thay đổi, cụ thể là tăng từ 3 T đến 22 T, HSDL của chuyển vị thẳng đứng và xoay tại các điểm khảo sát có xu hướng tăng và đạt tới giá trị lớn nhất $(1+IM)_{max}$.

Kết quả mô phỏng cũng cho thấy, khi tải trọng thay đổi, tương ứng với vận tốc khảo sát là 5 m/s; 10 m/s; 15 m/s; 20 m/s; 25 m/s thì HSDL cũng thay đổi. HSDL tỷ lệ thuận với tốc độ di chuyển của xe. Khi vận tốc xe chạy là $v=25$ m/s, HSDL của chuyển vị thẳng đứng và xoay có sự thay đổi và độ phân tán lớn tương ứng với tải trọng càng lớn.

Giá trị HSDL của chuyển vị lớn nhất tại các điểm khảo sát khác nhau cũng khác nhau. HSDL tại các vị trí khác nhau, theo phương khác nhau thu được kết quả khác nhau, giá trị này chênh lệch lớn khi tốc độ chạy xe cao.

Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo này, khi tải trọng trục xe lớn hơn 15T, xe di chuyển qua cầu với vận tốc trong phạm vi khai thác thì HSDL đa số đều lớn hơn giá trị 1,33. Đây là giá trị đang được áp dụng trong quy trình thiết kế cầu tại nước ta theo tiêu chuẩn TCVN11823-13:2017 [18].

4. Kết luận

Bài báo phân tích tương tác động lực giữa kết cấu cầu dầm bê tông cốt thép với tải trọng xe thay đổi bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Xe với tải trọng thay đổi khi di chuyển qua cầu được áp dụng vào phân tích cho cầu Sông Quy. Kết quả mô phỏng cho thấy, khi tải trọng thay đổi, tương ứng với vận tốc khảo sát khác nhau thì HSDL cũng thay đổi. Kết quả phân tích HSDL trong phạm vi nghiên cứu cho thấy, khi tải trọng trục xe lớn hơn 15T, xe di chuyển qua cầu với vận tốc trong phạm vi khai thác thì đa số đều lớn hơn giá trị đang được áp dụng trong quy trình thiết kế cầu hiện nay. Kết quả nghiên cứu này là tài liệu tham khảo giúp cho các kỹ sư có thêm thông tin để phân tích thiết kế cầu an toàn và phù hợp với yêu cầu khai thác trong thực tế.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số: T2021-02-32.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Shepherd, R., and Aves, R. J., "Impact factors for simple concrete bridge", *Proc. Inst. Civil Eng.*, vol 55(1), 1973, (191–210).
- [2] Yang, Y. B., Liao, S. S., and Lin, B. H., "Impact formulas for vehicles moving over simple and continuous beams", *J. Struct. Eng.*, vol 121(11), 1995, (1644–1650).
- [3] Deng, L., and Cai, C. S., "Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete

- bridges”, *Eng. Struct.*, vol 32(1), 2010, (21–31).
- [4] Chang. D, and Lee. H, “Impact factors for simple-span highway girder bridges”, *J. Struct. Eng.*, vol 120 (3), 1994, (704–715).
- [5] Nguyễn Xuân Toàn, Yukihisa Kuriyama, Nguyễn Duy Thảo, “Phân tích hệ số động lực của chuyển vị, mô men uốn và lực cắt trong cầu dầm SuperT có bản mặt cầu liên tục nhiệt do tải trọng di động gây ra bằng phương pháp số”, *Tạp chí Giao thông Vận tải*, 2017, (42-45).
- [6] Fafard. M, Laflamme. M, Savard. M and Bennur. M, “Dynamic analysis of existing continuous bridge”, *J. Bridge Eng.*, vol 1 (28), 1998, (28–37).
- [7] AASHTO LRFD, *Bridge design specifications*, Washington DC, 2012.
- [8] L. Deng, W. He, and Y. Shao, “Dynamic Impact Factors for Shear and Bending Moment of Simply Supported and Continuous Concrete Girder Bridges”, *Journal of Bridge Engineering*, vol. 20 (11), 2015, p. 04015005.
- [9] Huang. D, Wang. T.L, and Shahawy. M, “Vibration of thin-walled box-girder bridges excited by vehicles”, *J. Struct. Eng.*, 121, 1995, (1330–1337).
- [10] Wang. T.L, Huang. D, and Shahawy. M, “Dynamic Behavior of Slant-Legged Rigid-Frame Highway Bridge”, *J. Struct. Eng.*, vol.120 (3), 1994, (885–902).
- [11] N. X. Toan and T. V. Duc, “Determination of dynamic impact factor for continuous girder bridge due to vehicle braking force by finite element method and experimental”, *Vietnam J. Mech.*, vol. 39(2), 2017, (149-164).
- [12] P. Sniady, “Vibration of a beam due to a random stream of moving forces with random velocity”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 97 (1), 1984, (23–33).
- [13] J. D. Turner and A. J. Pretlove, “A study of the spectrum of traffic-induced bridge vibration”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 122 (1), 1988, (31–42).
- [14] S. Sorrentino and G. Catania, “Dynamic analysis of rectangular plates crossed by distributed moving loads”, *Math. Mech. Solids*, vol. 23(9), 2018, (1291–1302).
- [15] M. Abu-Hilal, “Vibration of beams with general boundary conditions due to a moving random load”, *Archive of Applied Mechanics*, vol. 72(9), 2003, (637–650).
- [16] T. Nguyen-Xuan, Y. Kuriyama, and T. Nguyen-Duy, “Analysis of dynamic impact factors of bridge due to moving vehicles using finite element method”, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. PartF3, 2018, (1105–1119).
- [17] R.W.Clough, *Dynamics of structures*, McGraw-Hill, Inc.Singapore, 1993.
- [18] Tiêu chuẩn quốc gia, *TCVN11823-13:2017 Thiết kế cầu đường bộ*, 2017.