

MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN VÀ KẾT QUẢ PHÂN TÍCH SỐ CẦU NHẬT LỆ 2 TỈNH QUẢNG BÌNH DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG DI ĐỘNG

FINITE ELEMENT MODEL AND NUMERICAL ANALYSIS OF NHATLE BRIDGE NO2 UNDER MOVING LOAD

Nguyễn Xuân Toàn¹, Nguyễn Hữu Tuấn²

¹Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; Email: nguyentuan2007@gmail.com

²Trường Cao đẳng Giao thông Vận tải II; Email: tuannh@caodanggtvt2.edu.vn

Tóm tắt - Bài báo giới thiệu kết quả phân tích bằng số về dao động của kết cấu nhịp chính của cầu Nhật Lệ 2 tỉnh Quảng Bình do tải trọng di động gây ra. Mô hình phân tích dao động của cầu này dựa trên mô hình của phương pháp phần tử hữu hạn. Trong đó kết cấu cầu được mô hình hoá từ các phần tử dầm, tháp và cáp. Phần tử dầm được xét theo mô hình tương tác trực tiếp với tải trọng di động. Phần mềm KC05 được ứng dụng để mô hình hóa và phân tích dao động của cầu Nhật Lệ 2 tỉnh Quảng Bình dưới tác dụng của tải trọng di động theo mô hình 2 khối lượng. Kết quả phân tích đã chỉ ra các miền vận tốc theo lý thuyết có thể gây cộng hưởng lớn và hệ số động lực trong miền tốc độ khai thác của xe qua cầu.

Từ khóa - mô hình phần tử hữu hạn; cầu dây văng; tải trọng di động; hệ số động lực; dao động; mô hình hai khối lượng.

1. Đặt vấn đề

Trong khoảng thời gian từ năm 1990 cho đến nay, ngành cầu đường của Việt Nam đã đạt được những thành tựu to lớn. Nhiều công trình cầu nhịp lớn được thiết kế và xây dựng, đặc biệt là dạng kết cấu cầu dây văng (CDV) được áp dụng ở nhiều tỉnh, thành phố như Vĩnh Long, Cần Thơ, Quảng Ninh, Đà Nẵng, Hải Phòng, Hồ Chí Minh và Hà Nội.

Tiếp bước sự thành công của các địa phương trên, Cầu Nhật Lệ 2 (Hình 1) đã được Ủy ban Nhân dân tỉnh Quảng Bình quyết định đầu tư xây dựng với mục tiêu chung là phát triển kinh tế - xã hội của thành phố Đồng Hới. Cầu Nhật Lệ 2 là một công trình có quy mô lớn góp phần tạo cảnh quan cho vùng trung tâm của tỉnh Quảng Bình là thành phố Đồng Hới. Công trình này nối liền các vùng trọng điểm ở hai bên bờ sông Nhật Lệ, góp phần hoàn thiện mạng lưới giao thông của thành phố, tạo điều kiện cho sự phát triển kinh tế, xã hội, an ninh quốc phòng của thành phố Đồng Hới và tỉnh Quảng Bình.



Hình 1. Cầu Nhật Lệ 2 – Quảng Bình

Phần kết cấu nhịp chính của Cầu Nhật Lệ 2 là kết cấu dây văng xiên với chiều dài 2x150m. Kết cấu này rất thanh mảnh, vì vậy nó rất nhạy cảm với tải trọng động, tải trọng

Abstract - This paper presents the results of numerical analysis of Nhatle's main span vibration under moving loads. The vibration analysis is performed using the finite element model. The structure of this bridge is modeled from the beam, tower and cable elements. Beam element is considered in direct interaction with moving loads. The KC05 software was applied in modeling the bridge Nhatle 2 (Quang Binh Province) and analysing its vibration under the impact of moving load with the two-mass model. The results point to the theoretical velocity area that cause large resonance, and the dynamic coefficients in allowable speed area of the vehicles over the bridge.

Key words - finite element model; cable stayed bridge; moving load; dynamic coefficient; vibration; two mass model.

có chu kỳ, trong đó có tải trọng xe di động trên cầu. Việc nghiên cứu dao động của cầu Nhật Lệ 2 là một trong những vấn đề phức tạp, có tính khoa học và thời sự cao.

Các nghiên cứu về dao động của cầu dưới tác dụng của tải trọng di động đã được nhiều tác giả trên thế giới và trong nước quan tâm nên đã có nhiều công bố khoa học có giá trị trong những năm qua. Raid Karoumi [8] đã nghiên cứu về phản ứng động của cầu treo và CDV do tải trọng di động. Yang Fuheng và Fonder Ghislain A [12] đã nghiên cứu về phản ứng động học của CDV dưới tác dụng của tải trọng di động. M.Zeman và các cộng sự [13] đã nghiên cứu phản ứng động học của CDV do tải trọng di động bằng phương pháp trở kháng. Ở trong nước, tác giả Hoàng Hà [1] đã nghiên cứu dao động uốn của kết cấu nhịp CDV trên đường ô tô chịu tác dụng của hoạt tải khai thác theo mô hình hai khối lượng. Các tác giả Nguyễn Xuân Toàn, Phan Kỳ Phùng, Nguyễn Minh Hùng đã nghiên cứu và công bố một số kết quả về dao động của cầu và CDV dưới tác dụng của tải trọng di động theo mô hình tương tác động lực [3], [4], [5], [6], [7], [9].

Với sự phát triển và hỗ trợ mạnh mẽ của máy tính điện tử, hiện nay hầu hết các nghiên cứu về dao động của công trình đều sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) và các phương pháp số, cho phép mô hình hóa kết cấu và phân tích kết cấu bằng số theo mô hình của phương pháp PTHH. Trong phạm vi bài viết này, các tác giả sẽ áp dụng phần mềm KC05 để mô hình hóa kết cấu nhịp chính của cầu Nhật Lệ 2 và phân tích dao động của hệ dưới tác dụng của tải trọng xe di động mô hình 2 khối lượng. Phần mềm KC05 đã được xây dựng dựa trên cơ sở của phương pháp PTHH và các phương pháp số [6].

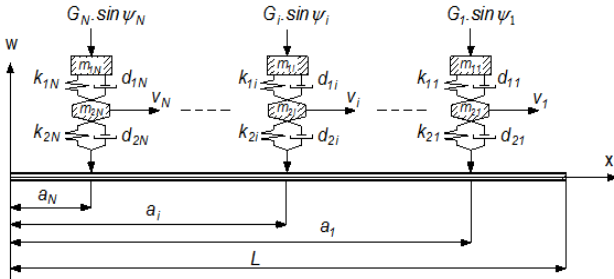
Mô hình PTHH và kết quả phân tích bằng số về dao động của cầu Nhật Lệ 2 dưới tác dụng của tải trọng xe di động được giới thiệu tóm tắt ở mục 2.

2. Mô hình và kết quả phân tích cầu Nhật Lệ 2

2.1. Mô hình phân tích cầu Nhật Lệ 2

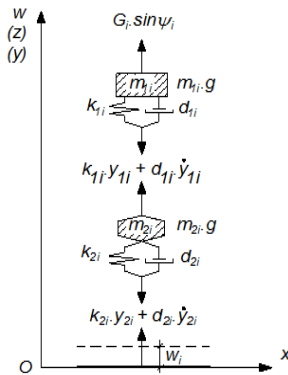
2.1.1. Mô hình tương tác giữa tải trọng và kết cấu

Mô hình PTHH của kết cấu nhịp chính cầu Nhật Lệ 2 gồm tập hợp các phần tử dầm tương tác trực tiếp với tải trọng xe di động, phần tử tháp chịu nén uốn và phần tử cáp chịu kéo có xét đến độ cứng kéo và uốn của cáp. Phần tử dầm tổng quát dưới tác dụng của N tải trọng di động mô Hình 2 khối lượng như Hình 2.



Hình 2. Mô hình tương tác giữa tải trọng di động và phần tử dầm

Cấu trúc của trục tải trọng di động thứ i được tách ra như Hình 3.



Hình 3. Cấu trúc của tải trọng di động thứ i

Trong đó: $P_i = G_i \sin \psi_i = G_i \cdot \sin(\Omega_i t + \alpha_i)$ - là lực kích thích điều hoà do động cơ và các cơ cấu truyền động của xe truyền xuống trục xe thứ i ; G_i - lực kích thích của động cơ; Ω_i - vận tốc góc; α_i - pha ban đầu; m_{1i} - khối lượng thân xe và hàng hóa truyền xuống trục xe thứ i ; m_{2i} - khối lượng của trục bánh xe thứ i ; z_{1i} - chuyển vị tuyệt đối của các khối lượng m_{1i} so với vị trí trọng tâm ban đầu của nó; z_{2i} - chuyển vị tuyệt đối của các khối lượng m_{2i} so với vị trí trọng tâm ban đầu của nó; k_{1i} , d_{1i} - độ cứng và độ giảm chấn của nhíp hay hệ thống treo trên trục xe thứ i ; k_{2i} , d_{2i} - độ cứng và độ giảm chấn của lốp xe tại trục xe thứ i ; y_{1i} - chuyển vị tương đối giữa khối lượng m_{1i} so với khối lượng m_{2i} ; y_{2i} - chuyển vị tương đối giữa khối lượng m_{2i} so với trục phần tử dầm tại vị trí của trục xe thứ i ; w_i - chuyển vị thẳng đứng của dầm tại vị trí của trục xe thứ i ; L - chiều dài của phần tử dầm đang xét; g - gia tốc trọng trường; a_i - toạ độ của trục xe thứ i tại thời điểm đang xét, nó phụ thuộc thời gian và tốc độ xe chạy trên cầu.

2.1.2. Phương trình vi phân dao động của các phần tử

Theo [5], phương trình vi phân dao động uốn và kéo nén dọc trục của phần tử dầm chịu tác dụng trực tiếp của

tải trọng xe di động mô hình 2 khối lượng được viết lại như phương trình (1):

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

$$EF_d \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \rho F_d \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \beta \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = q(x)$$

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

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

$$\xi_i(t) \cdot [m_{2i} \cdot \ddot{z}_{2i} + (d_{1i} + d_{2i}) \cdot \dot{z}_{2i} + (k_{1i} + k_{2i}) \cdot z_{2i} - d_{1i} \cdot \dot{z}_{1i} - k_{1i} \cdot z_{1i}] =$$

$$= \xi_i(t) \cdot (-m_{2i} \cdot g + d_{2i} \cdot \dot{w}_i + k_{2i} \cdot w_i)$$

$$(i = 1 \div N)$$

(1)

Trong đó: EJ_d - 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 - hệ số ma sát trong và hệ số ma sát ngoài của phần tử dầm; w - chuyển vị thẳng đứng của tiết diện dầm; u - chuyển vị dọc trục của tiết diện dầm; $\delta(x - a_i)$ - hàm delta - dirac; $\xi_i(t)$ - hàm tín hiệu điều khiển logic; các ký hiệu còn lại xem mục 2.1.1.

Sau khi biến đổi (1), ta đưa về dạng ma trận (2):

$$M_e \cdot \{\ddot{q}\} + C_e \cdot \{\dot{q}\} + K_e \cdot \{q\} = \{f_e\} \quad (2)$$

Trong đó: ma trận M_e , C_e , K_e lần lượt là ma trận khối lượng, ma trận cản, ma trận độ cứng hỗn hợp. $\{\ddot{q}\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{q\}$ - Véc tơ gia tốc, vận tốc và chuyển vị hỗn hợp, tham khảo tài liệu [5].

Đối với tháp cầu việc mô hình hóa cũng tương tự như phần tử dầm nhưng không có sự tương tác trực tiếp của tải trọng di động nên ta sử dụng kết quả nghiên cứu của phần tử thanh cơ bản trong tài liệu [14].

Đối với dây văng, theo [9] phương trình vi phân dao động của phần tử cáp được viết lại như phương trình (3):

$$\begin{cases} EJ \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} - T(t) \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} + c \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = p(x) \\ EF \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + c \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = q(x) \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: EJ - độ cứng chống uốn của cáp; EF - độ cứng chống kéo (nén) theo phương dọc trục của cáp; $u(x, t)$ - là chuyển vị dọc trục của phần tử cáp tại tiết diện đang xét; $y(x, t)$ - là chuyển vị ngang của phần tử cáp tại tiết diện đang xét; $T(t)$ - lực căng trong cáp xét tại thời điểm t ; c - hệ số ma sát của cáp; m - khối lượng phân bố trên 1 đơn vị chiều dài của cáp; $q(x)$, $p(x)$ - lực phân bố trên cáp theo phương ngang và dọc trục phần tử cáp.

Rời rạc (3) để đưa về dạng ma trận như sau:

$$M_w \cdot \{\ddot{u}\} + C_w \cdot \{\dot{u}\} + K_w \cdot \{u\} = \{f_w\} \quad (4)$$

Trong đó: ma trận M_w , C_w , K_w lần lượt là ma trận khối lượng, ma trận cản, ma trận độ cứng của phần tử cáp; $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ - Véc tơ gia tốc, vận tốc và chuyển vị của nút đang xét.

2.1.3. Phương trình dao động của CDV

Bằng cách rời rạc CDV thành các phần tử cơ bản, tiến hành lập các ma trận khối lượng, ma trận cản và ma trận độ

cứng tương ứng với từng phần tử, áp dụng thuật toán của phương pháp PTHH để ghép các ma trận con vào ma trận tổng thể, ta có phương trình dao động của toàn hệ thống có dạng như phương trình (5):

$$M.\{\ddot{U}\} + C.\{\dot{U}\} + K.\{U\} = \{F\} \quad (5)$$

Trong đó: M , C , K - Ma trận khối lượng, ma trận cản, ma trận độ cứng của toàn hệ thống cầu; $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{U\}$ - Véc tơ gia tốc, vận tốc và chuyển vị nút của các phần tử trên toàn hệ thống cầu; $\{F\}$ - Véc tơ lực tương đương trên toàn hệ thống cầu.

Áp dụng các phương pháp số để giải phương trình (5) ta thu được kết quả về chuyển vị, vận tốc và gia tốc của kết cấu CDV.

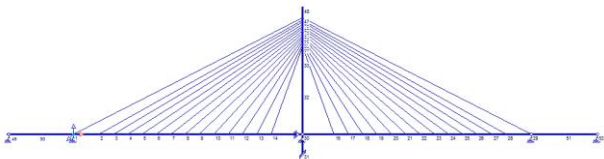
2.2. Áp dụng phân tích tĩnh và dao động cầu Nhật Lệ 2

2.2.1. Các số liệu cơ bản về kết cấu và tải trọng

Sơ đồ kết cấu nhịp chính của cầu Nhật Lệ 2 gồm 2 nhịp kết cấu CDV 150m, phân hẫng 5,6m nối với 2 nhịp dầm Super-T 38,2m, sơ đồ phân tích như Hình 1. Kết cấu dầm CDV có mặt cắt ngang dạng chữ π rộng 23,6m, cao 2,0m. Nhịp dầm gồm 10 dầm Super-T cách nhau 2,4m. Trọng lượng tính đôi của bản mặt cầu, lớp phủ và hệ dầm mặt cầu trên 1m dài của dầm chính là 13,50T/m, của dầm dẫn là 1,68T/m. Dây văng được làm từ các tao thép cường độ cao có đường kính danh định 15,2mm. Tháp cầu bằng bê tông cốt thép có tiết diện thay đổi từ chân tháp đến đỉnh tháp: 2,5x6m÷2,5x4m. Hệ số ma sát trong và ngoài của kết cấu $\theta=0,027$; $\beta=0,01$ (Theo kết quả nghiên cứu E.S.Sorokin và N.A.Popov). Cấu tạo, kích thước chi tiết của kết cấu, đặc trưng hình học và đặc trưng cơ học của vật liệu xem tài liệu [2]. Các tham số của tải trọng xe như Bảng 1.

Bảng 1. Các tham số của tải trọng xe đi động

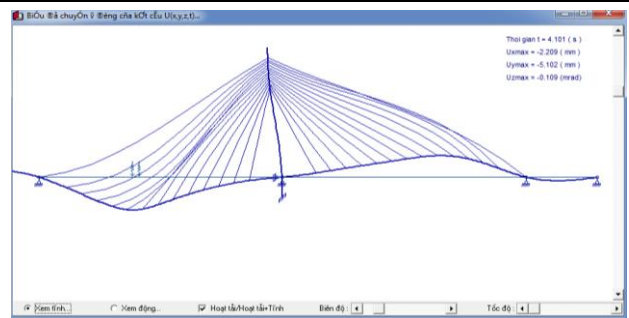
Trục trước		Hai trục sau	
m_{11}	5,945 Tấn	m_{12}	11,893 Tấn
k_{11}	36 T/m	k_{12}	200 T/m
d_{11}	0,7344 T.s/m	d_{12}	0,3672 T.s/m
m_{21}	0,055 Tấn	m_{22}	0,107 Tấn
k_{21}	120 T/m	k_{22}	260 T/m
d_{21}	0,4 T.s/m	d_{22}	0,8 T.s/m



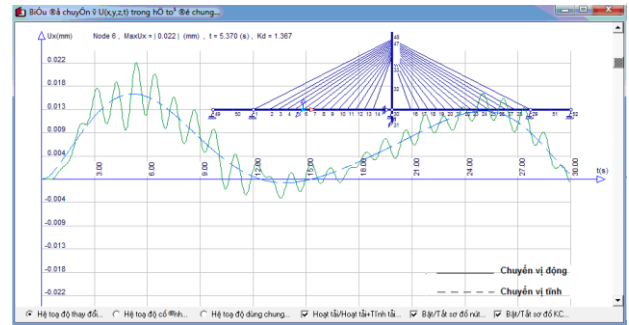
Hình 4. Sơ đồ phân tích cầu Nhật Lệ 2

2.2.2. Một số kết quả phân tích tĩnh và dao động

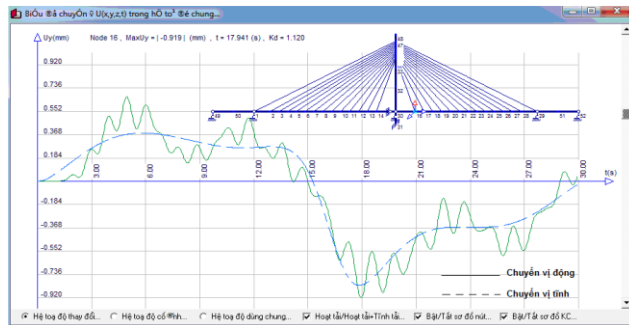
Tiến hành phân tích tĩnh và dao động cầu Nhật Lệ 2 dưới tác dụng của tải trọng xe đi động bằng phần mềm KC05 ta thu được các kết quả về nội lực và chuyển vị trong kết cấu cầu. Một số kết quả đại diện trong tập hợp của rất nhiều kết quả phân tích tĩnh và dao động của CDV Nhật Lệ 2 được thể hiện trên hình 5÷10. Trong đó hình 5 là biến dạng của cầu tại thời điểm 4,101s, hình 6÷10 là biểu đồ chuyển vị tĩnh và động tại một số nút đại diện.



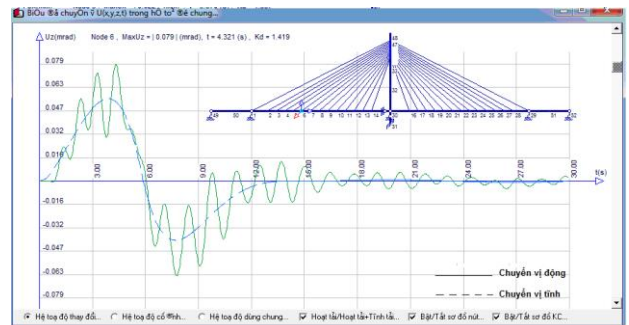
Hình 5. Biến dạng của cầu tại thời điểm $t=4,101s$



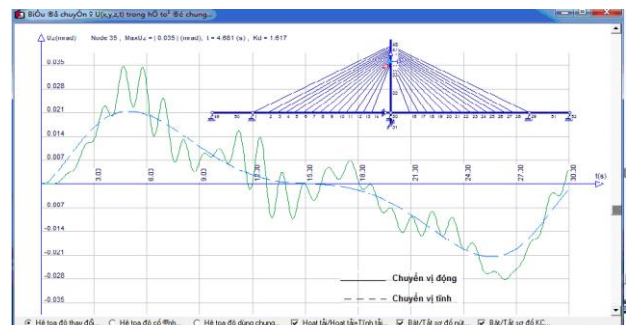
Hình 6. Biểu đồ chuyển vị U_x tại nút 6



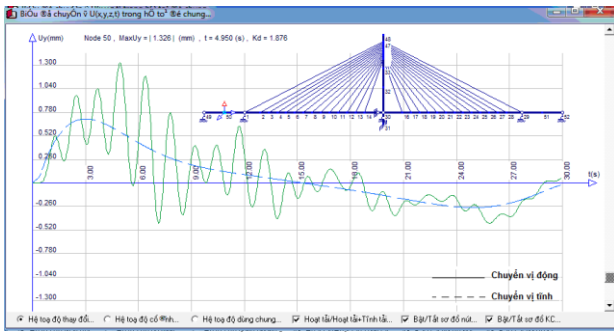
Hình 7. Biểu đồ chuyển vị U_y tại nút 14



Hình 8. Biểu đồ chuyển vị U_z tại nút 6



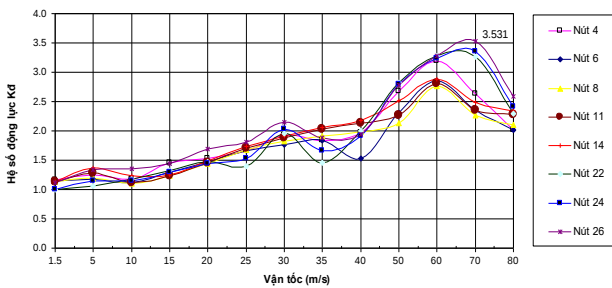
Hình 9. Biểu đồ chuyển vị U_z tại nút 35



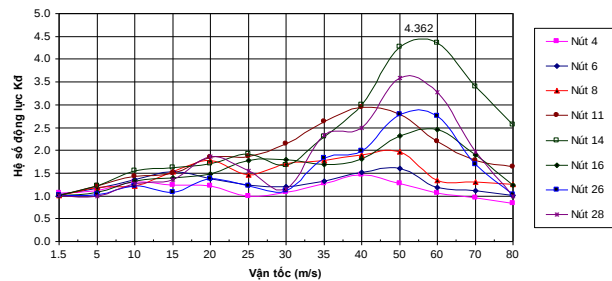
Hình 10. Biểu đồ chuyển vị U_y tại nút 50

2.2.3. Phân tích ảnh hưởng của tốc độ tải trọng di động đến dao động cầu Nhật Lệ 2

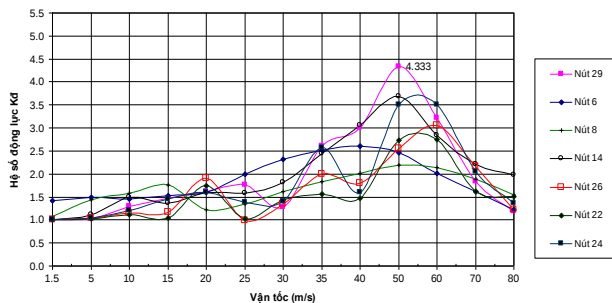
Để phân tích ảnh hưởng của tốc độ tải trọng di động đến dao động của cầu, tiến hành khảo sát hệ số động lực của chuyển vị dọc trục, chuyển vị thẳng đứng, chuyển vị ngang và chuyển vị xoay tại các nút đại diện trên dầm và tháp của cầu Nhật Lệ 2 khi xe chạy với vận tốc giả định $v=1,5\div 80$ m/s ($5,4\div 288$ km/h), kết quả khảo sát hệ số động lực trên dầm như Hình 11÷13:



Hình 11. Biểu đồ hệ số động lực của chuyển vị dọc trục tại các nút trên dầm khi tốc độ xe thay đổi

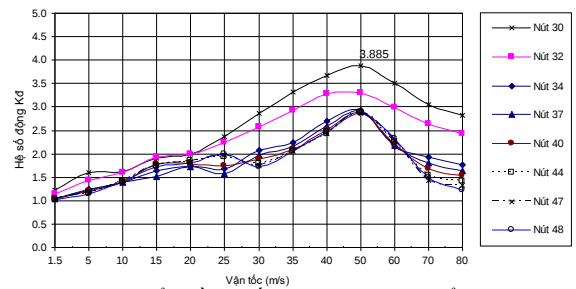


Hình 12. Biểu đồ hệ số động lực của chuyển vị thẳng đứng tại các nút trên dầm khi tốc độ xe thay đổi

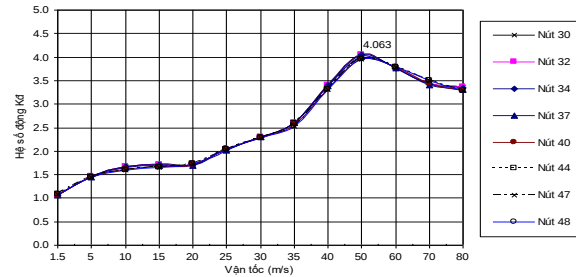


Hình 13. Biểu đồ hệ số động lực của chuyển vị xoay tại các nút trên dầm khi tốc độ xe thay đổi

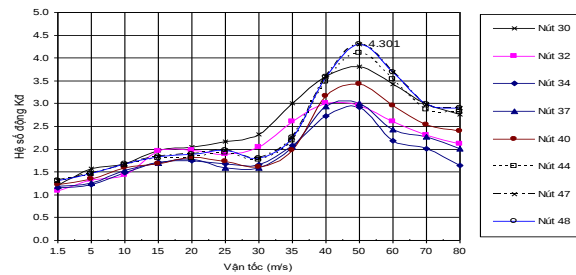
Tương tự, kết quả khảo sát hệ số động lực trên tháp như Hình 14÷16:



Hình 14. Biểu đồ hệ số động lực của chuyển vị ngang tại các nút trên tháp khi tốc độ xe thay đổi



Hình 15: Biểu đồ hệ số động lực của chuyển vị dọc trục tại các nút trên tháp khi tốc độ xe thay đổi



Hình 16. Biểu đồ hệ số động lực của chuyển vị xoay tại các nút trên tháp khi tốc độ xe thay đổi

Qua kết quả phân tích và khảo sát hệ số động lực của chuyển vị dọc trục, chuyển vị thẳng đứng và chuyển vị xoay tại các nút đại diện trên dầm và tháp của cầu Nhật Lệ 2 khi xe chạy với vận tốc giả định $v=1,5\div 80$ m/s (Hình 11÷16) ta có nhận xét sau:

Khi tốc độ tăng thì hệ số động lực thay đổi và đạt các cực trị có xu hướng tăng lên, hệ số động lực lớn nhất phổ biến trong khoảng tốc độ xe chạy $v=50\div 60$ m/s, đặc biệt khi $v=50$ m/s, hệ số động lực tại nhiều vị trí trên cầu đạt giá trị lớn nhất và khi tiếp tục tăng tốc độ $v>50$ m/s thì hệ số động lực có xu hướng giảm, điều này cho thấy kết cấu CDV Nhật Lệ 2 có xu hướng cộng hưởng lớn ứng với tốc độ xe chạy $v=50$ m/s (180 km/h). Với tốc độ khai thác nhỏ hơn tốc độ thiết kế $v_{tk}=22$ m/s (80 km/h) thì cầu Nhật Lệ 2 không bị cộng hưởng lớn.

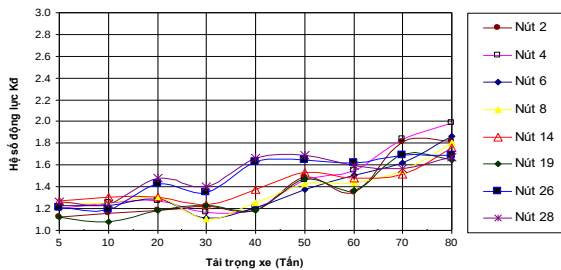
Hệ số động lực lớn nhất trong phạm vi khảo sát về lý thuyết là 4,362.

Hệ số động lực lớn nhất trong phạm vi tốc độ khai thác cho phép nhỏ hơn tốc độ thiết kế $v_{tk}=22$ m/s là 1,86. Hệ số động lực này lớn hơn hệ số động lực đã dùng trong thiết kế là 48,8%.

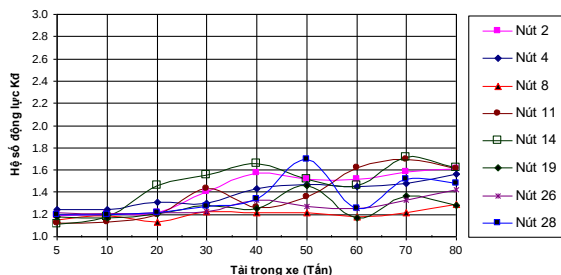
2.2.4. Phân tích ảnh hưởng của khối lượng tải trọng di động đến dao động của cầu

Tiếp theo, tiến hành khảo sát hệ số động lực của chuyển

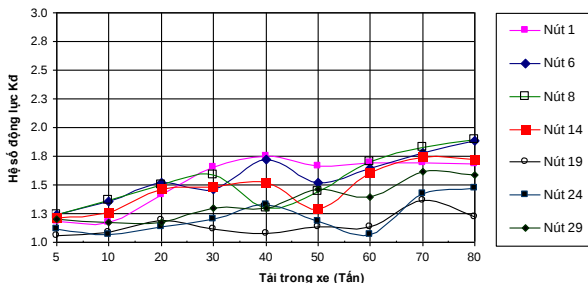
vị dọc trục, chuyển vị thẳng đứng và chuyển vị xoay tại các nút đại diện trên dầm của cầu Nhật Lệ 2 khi tải trọng xe thay đổi trong khoảng 5÷80 tấn, xe chạy ổn định với tốc độ $10\text{m/s} < \text{tốc độ khai thác}$, kết quả khảo sát như các biểu đồ Hình 17÷19:



Hình 17. Biểu đồ hệ số động lực của chuyển vị dọc trục khi tải trọng xe thay đổi



Hình 18. Biểu đồ hệ số động lực của chuyển vị thẳng đứng khi tải trọng xe thay đổi



Hình 19. Biểu đồ hệ số động lực của chuyển vị xoay khi tải trọng xe thay đổi

Qua kết quả phân tích và khảo sát hệ số động lực của chuyển vị dọc trục, chuyển vị thẳng đứng và chuyển vị xoay tại các nút đại diện trên dầm của cầu Nhật Lệ 2 khi xe chạy ổn định với tốc độ 10m/s , khối lượng thay đổi 5÷80 tấn (Hình 17÷19) ta có nhận xét sau:

Khi khối lượng tăng thì hệ số động lực thay đổi và đạt các cực trị có xu hướng tăng lên, hệ số động lực lớn nhất trong phạm vi khảo sát là 1,98 ứng với tải trọng xe 80 tấn. Hệ số động lực của chuyển vị theo phương ngang của dầm lớn nhất là 1,72 ứng với tải trọng xe 70 tấn. Với tải trọng xe khai thác nhỏ hơn 30 tấn, hệ số động lực của chuyển vị dầm lớn nhất là 1,63.

Theo kết quả nghiên cứu của Wu Yean-Seng và cộng sự cho cầu đường sắt nhịp đơn giản, hệ số động lực lớn nhất là 3,2 [10]. Theo nghiên cứu của Yang Yeong-Bin và cộng sự cho mô hình cầu đơn giản, hệ số động lực lớn nhất là 4,6 [11]. Trong bài báo này, hệ số động lực lớn nhất trong phạm vi khảo sát lý thuyết là 4,362.

3. Kết luận

Qua kết quả phân tích cho thấy tốc độ xe chạy và tải trọng xe có ảnh hưởng lớn đến hệ số động lực của cầu Nhật Lệ 2. Đặc biệt khi xe chạy với tốc độ 180km/h đã gây ra cộng hưởng lớn trên phần lớn kết cấu nhịp chính. Hệ số động lực lớn nhất trong phạm vi khảo sát về lý thuyết là 4,362. Tuy nhiên với tốc độ khai thác nhỏ hơn tốc độ thiết kế thì cầu Nhật Lệ 2 không bị cộng hưởng lớn. Hệ số động lực lớn nhất trong phạm vi tốc độ khai thác cho phép là 1,86. Hệ số động lực lớn nhất trong phạm vi khảo sát với tải trọng xe nhỏ hơn 80 tấn là 1,98 và với tải trọng khai thác nhỏ hơn 30 tấn là 1,63.

Trong phạm vi tốc độ và tải trọng khai thác cho phép, hệ số động lực lớn nhất theo nghiên cứu này đều lớn hơn hệ số động lực đã dùng trong thiết kế. Vì vậy cần lưu ý trong quá trình quản lý khai thác của cầu Nhật Lệ 2.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hoàng Hà (1999), Nghiên cứu dao động uốn của kết cấu nhịp cầu dây văng trên đường ô tô chịu tác dụng của hoạt tải khai thác, *Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật*, Hà Nội.
- [2] Hồ sơ thiết kế kỹ thuật cầu Nhật Lệ 2 – Quảng Bình (2012).
- [3] Nguyễn Xuân Toàn, Nguyễn Minh Hùng (2006), “Thuật toán và chương trình phân tích dao động ngang - dọc của dầm và tháp cầu dây văng dưới tác dụng của đoàn tải trọng di động, mô hình hai khối lượng”, *Hội nghị Khoa học Toàn quốc Cơ học Vật rắn Biến dạng lần thứ 8*, Thái Nguyên.
- [4] Nguyễn Xuân Toàn, Phan Kỳ Phùng (2006), “Dao động uốn của phần tử dầm trong phân tích dao động cầu dây văng dưới tác dụng của tải trọng di động- mô hình hai khối lượng”, *Tạp chí Giao thông Vận tải*, số 1+2, tr. 105-107.
- [5] Nguyễn Xuân Toàn (2007), Phân tích dao động Cầu dây văng dưới tác dụng của hoạt tải di động, *Luận án Tiến sĩ kỹ thuật*.
- [6] Nguyễn Xuân Toàn (2008), “Nghiên cứu xây dựng phần mềm phân tích tương tác động lực học giữa cầu dây văng và đoàn tải trọng di động mô hình 2 khối lượng”, *Đề tài KH và CN cấp Bộ*, mã số SDH07-NCS-01.
- [7] Nguyễn Xuân Toàn, Phan Kỳ Phùng, Nguyễn Minh Hùng (2007), “Phân tích ảnh hưởng của tốc độ và khối lượng của tải trọng di động đến dao động cầu dây văng”, *Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 8*, Hà Nội.
- [8] Raid Karoumi (1998), Response of Cable Stayed and Suspension Bridges to moving vehicles, Doctoral thesis.
- [9] Toan, X.N., Phung K.P. (2007), “Non-linear vibration of cable element and applications in analyzing the vibration of cable-stayed bridges under moving loads”, *The 1st International Conference on Modern Design, Construction and Maintenance of Structures*, Hanoi, Vietnam, vol 2, 37-43.
- [10] Wu Yean-Seng, Yang Yeong-Bin, Yau Jong-Dar (2001), “Three-Dimensional Analysis of Train-Rail-Bridge Interaction Problems”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 36 Issue 1, p1- 35
- [11] Yang Yeong-Bin, Yau Jong-Dar (1997), “Vehicle-bridge interaction element for dynamic analysis”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123 Issue 11, p1512, 7p
- [12] Yang Fuheng, Fonder Ghislain A. (1998), “Dynamic response of cable-stayed bridges under moving loads”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124 Issue 7, p741-748
- [13] Zeman, M., Taheri, M. R., Khanna, A. (1996), “Dynamic response of cable-stayed bridges to moving vehicles using the structure impedance method” *Appl. Math. Modeling*, 20, pp. 877-889.
- [14] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (1989), *The Finite Element Method*, McGraw-Hill, Inc, Vol 1&2, New York.