

Thực nghiệm phân tích và đánh giá dao động kết cấu cầu và ray dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu

An experimental investigation and assessment of structural vibrations in bridges and rail induced by train loads

> THS ĐỖ THỊ HẰNG*, NGÔ HOÀNG LONG, DƯƠNG MINH HIẾU, BÙI THỊ KIM DUNG

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: hangdo@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Dao động của kết cấu cầu và ray dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá độ bền, an toàn và hiệu suất vận hành của hạ tầng đường sắt. Nghiên cứu này thực hiện phân tích thực nghiệm nhằm so sánh đáp ứng dao động của kết cấu cầu và ray khi chịu tác động của đoàn tàu. Dữ liệu dao động được thu thập từ cả kết cấu nhịp và ray bằng hệ thống cảm biến gia tốc. Các thông số quan trọng như tần số dao động tự nhiên, biên độ dao động và đặc tính suy giảm dao động được phân tích để chỉ ra sự khác biệt trong phản ứng kết cấu. Kết quả cho thấy dao động của cầu có tần số thấp hơn nhưng biên độ lớn hơn, trong khi dao động của ray có tần số cao hơn do ảnh hưởng trực tiếp của tương tác bánh xe - ray. Nghiên cứu cũng đánh giá ảnh hưởng của tốc độ tàu, tải trọng trục và điều kiện kết cấu đến dao động tổng thể. Thông qua việc phân tích, đánh giá và so sánh kết quả thực nghiệm dao động của cầu và ray, nghiên cứu tạo tiền đề để đề xuất các giải pháp giảm dao động và tối ưu hóa kết cấu nhằm nâng cao tuổi thọ và độ an toàn của hệ thống cầu và ray.

Từ khóa: Dao động cầu, dao động ray, tải trọng tàu, phân tích thực nghiệm.

ABSTRACT

The vibration of bridge and rail structures under train loads plays an important role in assessing the durability, safety and operational performance of railway infrastructure. This study conducted an experimental analysis to compare the vibration response of bridge and rail structures under train loads. Vibration data were collected from both the span and rail structures using an accelerometer system. Important parameters such as natural frequency, amplitude and damping characteristics were analyzed to show the differences in structural responses. The results showed that the bridge vibration had a lower frequency but larger amplitude, while the rail vibration had a higher frequency due to the direct influence of wheel-rail interaction. The study also evaluated the effects of train speed, axle load and structural conditions on the overall vibration. Through analyzing, evaluating and comparing the experimental results of bridge and rail vibrations, the study creates a premise to propose solutions to reduce vibrations and optimize structures to improve the life and safety of the bridge and rail system.

Keywords: Bridge vibration, rail vibration, train load, experimental analysis.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong hệ thống giao thông đường sắt, kết cấu cầu và ray đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo khả năng vận hành an toàn, hiệu quả và bền vững của đoàn tàu. Khi tàu di chuyển qua cầu, tải trọng động từ bánh xe tác động trực tiếp lên ray, sau đó truyền qua tà vẹt và hệ dầm cầu, tạo ra các phản ứng dao động phức tạp trong toàn bộ hệ thống. Việc nghiên cứu và kiểm soát dao động của cầu và ray không chỉ giúp bảo vệ kết cấu công trình mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng chạy tàu và sự an toàn của hành khách. Nếu dao động vượt quá giới hạn cho phép có thể gây ra hư hỏng kết cấu, làm giảm tuổi thọ công trình và ảnh hưởng đến hiệu suất vận hành của đoàn tàu [1, 2].

Mặc dù cùng chịu tác động từ tải trọng đoàn tàu, nhưng dao động của cầu và ray có sự khác biệt rõ rệt về cơ chế và đặc điểm. Dao

động cầu thường có tần số thấp, nằm trong khoảng từ 0,5 Hz đến 5 Hz, nhưng biên độ dao động lớn hơn do kết cấu cầu có kích thước lớn và chịu tải trọng phân bố trên một phạm vi rộng. Ngược lại, dao động của ray có tần số cao hơn, trong khoảng từ 20 Hz đến 200 Hz, nhưng biên độ nhỏ hơn do ray chịu tải trọng trực tiếp từ bánh xe tàu. Dao động cầu bị chi phối bởi các yếu tố như độ cứng kết cấu, chiều dài nhịp và điều kiện gối tựa, trong khi dao động ray chịu ảnh hưởng chủ yếu từ hệ thống liên kết ray - tà vẹt, nền đường và tương tác bánh xe - ray [3].

Nếu dao động của cầu và ray không được kiểm soát hiệu quả có thể dẫn đến nhiều vấn đề nghiêm trọng. Một trong những hiện tượng nguy hiểm nhất là cộng hưởng, xảy ra khi tần số dao động tự nhiên của cầu hoặc ray trùng với tần số kích thích từ tải trọng động của đoàn tàu, khiến dao động tăng đột biến và làm hư hại kết cấu.

Ngoài ra, dao động ray mạnh có thể làm mất ổn định nền đường, gây lún lệch hoặc làm hỏng liên kết ray - tà vẹt, ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn chạy tàu. Đối với cầu, tải trọng động có thể tạo ra ứng suất lớn tại các vị trí liên kết và gối cầu, dẫn đến nguy cơ nứt và suy giảm tuổi thọ công trình theo thời gian [4, 5].

Nhằm hiểu rõ hơn về đặc điểm dao động của cầu và ray trong hệ thống cầu đường sắt, nghiên cứu này tập trung vào việc đo đạc dao động thực tế trên cầu Thăng Long khi chịu tác động của đoàn tàu. Các dữ liệu thu thập sẽ được phân tích để so sánh sự khác biệt về tần số, biên độ và đặc tính suy giảm dao động giữa hai loại kết cấu. Đồng thời, nghiên cứu cũng đánh giá ảnh hưởng của tốc độ tàu, tải trọng trục và điều kiện nền đường đến dao động cầu và ray, từ đó đề xuất các giải pháp kiểm soát dao động nhằm nâng cao độ bền kết cấu và đảm bảo an toàn vận hành. Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp tối ưu hóa thiết kế và bảo trì cầu đường sắt mà còn góp phần nâng cao chất lượng vận hành tàu, giảm chi phí bảo trì và kéo dài tuổi thọ công trình [6].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ DAO ĐỘNG CẦU VÀ RAY DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA ĐOÀN TÀU

2.1. Dao động cầu dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu

Cầu đường sắt chịu tác động của tải trọng đoàn tàu dưới dạng tải trọng động, gây ra các dao động có biên độ và tần số khác nhau tùy thuộc vào đặc tính kết cấu cầu, đặc điểm đoàn tàu và điều kiện khai thác. Khi tàu di chuyển trên cầu, tải trọng của nó không chỉ tác động theo phương thẳng đứng mà còn tạo ra tải trọng ngang và tải trọng dọc do hiệu ứng quán tính và rung động từ bánh xe.

Dao động của cầu có thể được mô hình hóa bằng phương trình vi phân chuyển động dựa trên lý thuyết dao động của dầm chịu tải động. Nếu coi cầu là một dầm đơn giản có khối lượng phân bố đều và chịu tải trọng động từ các trục bánh xe của đoàn tàu, phương trình dao động của cầu có dạng tổng quát:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t) \quad (1)$$

Trong đó: m - Khối lượng kết cấu cầu trên một đơn vị chiều dài; c - Hệ số cản của cầu; k - Độ cứng kết cấu của cầu; y - Chuyển vị của cầu tại một điểm bất kỳ; $F(t)$ - Tải trọng động từ đoàn tàu, thường được biểu diễn dưới dạng một chuỗi tải trọng di động.

Tần số dao động riêng của cầu có thể được tính theo công thức:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

Trong đó: f_n - Tần số dao động tự nhiên của cầu. Tần số này phụ thuộc vào độ cứng của kết cấu cầu, khối lượng bản thân cầu và các điều kiện biên. Nếu tần số dao động của cầu trùng với tần số kích thích từ tải trọng đoàn tàu, có thể xảy ra hiện tượng cộng hưởng, làm tăng biên độ dao động và ảnh hưởng đến độ bền kết cấu.

2.2. Dao động ray dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu

Ray đường sắt là phần kết cấu chịu tác động trực tiếp từ bánh xe đoàn tàu và truyền tải trọng xuống hệ thống tà vẹt, đá ballast hoặc dầm cầu. Dao động của ray có đặc điểm khác với dao động của cầu do kích thước nhỏ hơn, độ cứng cao hơn và chịu tải trọng tập trung từ bánh xe.

Mô hình phổ biến để mô phỏng dao động của ray là mô hình dầm trên nền đàn hồi Pasternak hoặc mô hình dầm Euler-Bernoulli trên nền đàn hồi Winkler. Trong mô hình này, ray được coi như một dầm liên tục trên nền đàn hồi với phương trình dao động tổng quát:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_r y + m_r \ddot{y} = P(t) \quad (3)$$

Trong đó: EI - Độ cứng uốn của ray; k_r - Độ cứng của nền đường ray (bao gồm liên kết ray - tà vẹt - ballast); m_r - Khối lượng đơn vị chiều dài của ray; $P(t)$ - Lực tác động từ bánh xe lên ray, phụ thuộc vào điều kiện tiếp xúc bánh xe - ray.

Dao động của ray có tần số cao hơn dao động của cầu do kích

thước nhỏ và độ cứng lớn. Biên độ dao động của ray cũng bị ảnh hưởng bởi điều kiện tiếp xúc giữa bánh xe và ray. Các yếu tố như độ mòn bánh xe, hư hỏng mặt ray hoặc điều kiện liên kết ray - tà vẹt có thể làm tăng cường độ rung động và ảnh hưởng đến chất lượng chạy tàu.

Tốc độ tàu là một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến dao động của cả cầu và ray. Khi tốc độ tàu tăng, tải trọng động tác động lên cầu và ray có thể trở nên lớn hơn do ảnh hưởng của lực quán tính và tải trọng xung kích. Đặc biệt, nếu tốc độ tàu trùng với tốc độ lan truyền sóng dao động trong cầu hoặc ray có thể xuất hiện hiệu ứng cộng hưởng động, làm tăng đáng kể biên độ dao động và gây nguy hiểm cho kết cấu.

Ngoài tốc độ tàu, điều kiện kết cấu của cầu và hệ thống đường ray cũng ảnh hưởng đến đặc điểm dao động. Các cầu có nhịp dài thường có tần số dao động thấp hơn, trong khi các cầu thép hoặc cầu dầm hộp có thể có dao động phức tạp hơn do cấu trúc đa phần tử. Đối với ray, sự xuống cấp của nền đường, tình trạng liên kết ray - tà vẹt và độ mòn bánh xe có thể làm tăng mức độ rung động, ảnh hưởng đến chất lượng vận hành của đoàn tàu.

3. THỰC NGHIỆM ĐO ĐẠC VÀ PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG KẾT CẤU CẦU VÀ RAY

3.1. Giới thiệu công trình cầu



Hình 1. Cầu Thăng Long [7]

Trong nghiên cứu này, cầu Thăng Long - một cây cầu đặc biệt sẽ được sử dụng để nghiên cứu thực nghiệm. Cầu Thăng Long được thiết kế để khai thác giao thông đường bộ và đường sắt, tạo nên nét kiến trúc độc đáo. Cầu gồm hai tầng: Tầng trên dành riêng cho phương tiện đường bộ, trong khi tầng dưới được thiết kế cho tàu hỏa có khổ đường ray 1.000 mm và 1.435 mm. Các dầm công-xôn được lắp đặt ở cả hai bên tầng dưới để cho phép các phương tiện thô sơ và xe máy đi qua cầu.

Cầu giàn thép Thăng Long gồm 15 nhịp chia thành 5 mô-đun, mỗi mô-đun có ba nhịp giàn thép liên tục. Cầu được thiết kế theo Tiêu chuẩn 18-79TCN của Việt Nam. Tải trọng hoạt động của cầu là T24 cho tàu hỏa và H30-XB80 cho xe cộ. Cầu đã trải qua hai lần sửa chữa lớn và đã được nâng cấp để đáp ứng tiêu chuẩn tải trọng thiết kế mới - HL93. Các thành phần giàn được làm bằng thép hợp kim và có mặt cắt ngang hình hộp. Các thành phần giàn trên và dưới có chiều cao lên tới 800 mm, trong khi các thành phần dọc và chéo là 600 mm. Theo chiều ngang, các thanh giằng chéo được lắp đặt cách nhau 3,6 m để tăng cường độ cứng tổng thể của cầu. Hệ thống giằng gió trên và dưới cũng được thiết kế bằng thép hình chữ I để chống lại chuyển động ngang và tăng độ cứng của cầu.

3.2. Thực nghiệm đo đạc dao động kết cấu cầu, ray

Để nghiên cứu và đánh giá dao động của kết cấu cầu và ray dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu, các thí nghiệm đo đạc đã được thực hiện trên cầu Thăng Long bằng cách sử dụng các cảm biến gia tốc PCB lắp đặt trên kết cấu nhịp cầu và ray. Cảm biến gia tốc PCB là loại cảm biến gia tốc có độ nhạy cao, cho phép ghi nhận chính xác các dao động của cầu và ray trong quá trình tàu di chuyển. Đoàn tàu thử nghiệm là đoàn tàu hàng D19E-979 gồm 6 trục, mỗi trục 13,5 T và đoàn toa với trọng lượng 4,2 T/m.

Các cảm biến gia tốc PCB được lắp đặt trên các nhịp cầu để đo đạc các dao động của kết cấu cầu khi tàu chạy qua. Vị trí lắp đặt

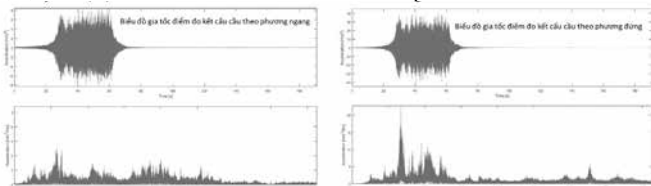
được chọn ở các vị trí gần với vị trí đo ray. Các cảm biến này đo được các gia tốc theo ba phương (x, y, z), giúp ghi nhận đầy đủ các dao động theo chiều dọc, ngang và xoay của cầu. Đồng thời, các cảm biến gia tốc PCB cũng được lắp đặt trên hệ thống ray, gần các vị trí tiếp xúc với bánh xe của tàu để đo đặc dao động của ray. Việc lắp đặt cảm biến trên ray giúp theo dõi sự thay đổi của các tín hiệu dao động dưới tác dụng của tải trọng động từ bánh xe tàu, đồng thời đo đặc các yếu tố như độ ổn định và độ mòn của ray theo thời gian. Cảm biến gia tốc trên ray có thể ghi lại các dao động có tần số cao, giúp phân tích tác động của lực động lên hệ thống đường sắt. Các cảm biến gia tốc PCB ghi lại tín hiệu dao động theo thời gian, sau đó tín hiệu này được chuyển đổi thành các dữ liệu số qua hệ thống thu thập dữ liệu. Các dữ liệu thu thập sẽ bao gồm các thông số như tần số dao động, biên độ và thời gian dao động, từ đó phục vụ cho việc phân tích và so sánh dao động giữa cầu và ray.



Hình 2. Thực nghiệm đo đặc dao động cầu và ray tại Cầu Thăng Long

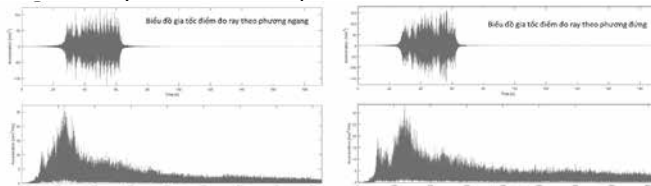
3.3. Phân tích và đánh giá kết quả

Sau khi thu thập dữ liệu từ các cảm biến gia tốc PCB được lắp đặt trên kết cấu nhịp cầu và ray của cầu Thăng Long, quá trình phân tích và đánh giá kết quả là bước quan trọng để hiểu rõ hơn về dao động của hệ thống cầu và ray dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu. Các dữ liệu thu được từ cảm biến sẽ được xử lý để tính toán các thông số dao động như tần số, biên độ và đặc tính của dao động theo các phương. Hình 3 thể hiện kết quả gia tốc, vận tốc và chuyển vị tại điểm đo kết cấu cầu theo miền thời gian và miền tần số.



Hình 3. Kết quả phân tích dao động tại điểm đo kết cấu cầu

Hình 4 thể hiện kết quả gia tốc, vận tốc và chuyển vị tại điểm đo kết cấu ray theo miền thời gian và miền tần số.



Hình 4. Kết quả phân tích dao động tại điểm đo kết cấu ray

Kết quả phân tích dao động cho thấy, khi tàu chạy qua cầu Thăng Long, dao động của cầu và ray có những đặc điểm khác nhau về tần số và biên độ. Dao động của kết cấu cầu có biên độ lớn hơn và tần số dao động thấp hơn, dao động chủ yếu nằm trong phạm vi từ 0,5 Hz đến 5 Hz. Tần số dao động này phản ánh sự dao động của các nhịp cầu lớn dưới tác dụng của tải trọng động từ đoàn tàu. Biên độ dao động tại các điểm gần gối cầu và các điểm giữa các nhịp là lớn hơn so với các điểm xa gối, do sự phân bố không đồng đều của tải trọng và đặc tính kết cấu của cầu. Dao động của ray có tần số cao hơn nhiều so với dao động cầu, thường dao động trong phạm vi từ 20 Hz đến 100 Hz. Dao động của ray chủ yếu là dao động dọc và ngang, do ảnh hưởng trực tiếp của tải trọng bánh xe. Biên độ dao động của ray nhỏ hơn so với cầu, nhưng tần số dao động của nó lại

cao hơn rất nhiều, phản ánh sự tương tác mạnh mẽ giữa bánh xe tàu và bề mặt ray.

Phân tích kết quả cho thấy tần số dao động của cầu thấp hơn tần số dao động của ray. Điều này là do cầu có kết cấu lớn hơn và chịu tải trọng động tác động lên diện tích lớn hơn, dẫn đến tần số dao động thấp hơn. Trong khi đó, ray có kết cấu nhỏ hơn và chịu tải trọng tập trung từ bánh xe, vì vậy dao động của ray có tần số cao hơn nhiều. Biên độ dao động của cầu có xu hướng lớn hơn so với biên độ dao động của ray. Điều này là do kết cấu cầu có khối lượng lớn và diện tích chịu tải rộng, đồng thời dao động của cầu ảnh hưởng từ tải trọng tổng thể của đoàn tàu, tạo ra các biến động lớn hơn. Ngược lại, dao động của ray tuy có tần số cao nhưng biên độ nhỏ hơn, vì tải trọng động của đoàn tàu tập trung vào các bánh xe tiếp xúc với ray.

Một trong những kết quả đáng chú ý là sự tương tác giữa dao động của cầu và ray. Tải trọng động từ tàu có ảnh hưởng đồng thời đến cả cầu và ray, tuy nhiên độ lệch pha giữa các dao động của cầu và ray đã được ghi nhận trong quá trình thí nghiệm. Điều này cho thấy rằng, mặc dù chúng chịu tác động từ cùng một tải trọng nhưng dao động của cầu và dao động của ray có thể không đồng pha, tạo ra các hiệu ứng cộng hưởng hoặc tác động không đồng nhất giữa các bộ phận của hệ thống cầu - ray.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện phân tích thực nghiệm về dao động của kết cấu cầu và ray dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu, với dữ liệu thu thập từ hệ thống cảm biến gia tốc lắp đặt trên cầu Thăng Long. Kết quả cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa dao động của cầu và dao động của ray: Cầu có tần số dao động thấp nhưng biên độ dao động lớn, trong khi ray có tần số dao động cao hơn nhưng biên độ nhỏ hơn. Sự khác biệt này xuất phát từ đặc điểm kết cấu và cơ chế chịu tải của hai loại kết cấu.

Kết quả phân tích và đánh giá dao động cầu và ray dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu cho thấy dao động của cầu và ray có những đặc điểm riêng biệt về tần số và biên độ. Việc theo dõi và đánh giá dao động này là rất quan trọng để đảm bảo tính ổn định và an toàn của kết cấu cầu và hệ thống đường sắt. Các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc giảm thiểu tác động của dao động động lực học, đặc biệt là trong các tình huống cộng hưởng, để bảo vệ kết cấu và nâng cao tuổi thọ của công trình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hòa, P. D., Hùng T. V., Thăng, P. B., & Hằng, N. T. N. (2021), Nghiên cứu phân tích động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, doi: [https://doi.org/10.31814/stce.huace\(nuce\)2021-15\(7V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huace(nuce)2021-15(7V)-01).
- [2]. Lê Văn Vũ và cộng sự (2023), Xây dựng mô hình động lực học kết hợp tàu - ray dựa trên thực nghiệm phản ứng động của kết cấu ray thuộc tuyến đường sắt đô thị, Tạp chí Khoa học GTVT, doi: 10.47869/tcsj.74.9.5.
- [3]. L.R. Ticona Melo và các cộng sự (2020), Dynamic analysis of the train-bridge system considering the non-linear behaviour of the track-deck interface, Engineering Structures, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110980>.
- [4]. Heiland, T., Stempniewski, L., & Stark, A. (2024), The Dynamic Characteristics of Railway Portal Frame Bridges: A Comparison between Measurements and Calculations, Applied Sciences.
- [5]. N. T. C. Nhung, L. V. Vu, H. Q. Nguyen, D. T. Huyen, D. B. Nguyen and M. T. Quang (2023), Development and Application of Linear Variable Differential Transformer (LVDT) Sensors for the Structural Health Monitoring of an Urban Railway Bridge in Vietnam, Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol.13, doi: <https://doi.org/10.48084/etasr.6192>.
- [6]. Nguyen Thi Cam Nhung, Tran Quang Minh, José C Matos, Hélder S Sousa (2021), Research and application of indirect monitoring methods for transport infrastructures to monitor and evaluate structural health.
- [7]. Le Khanh (2023), Hà Nội: Chiếm ngưỡng cầu Thăng Long bắc qua sông Hồng sau gần 40 năm hoạt động, Báo Đại đoàn kết - Cơ quan Trung ương của MTTQ Việt Nam, doi: <https://daidoanket.vn/ha-noi-chiem-nguoc-cau-thang-long-bac-qua-song-hong-sau-gan-40-nam-hoat-dong-10258684.html>.