

NGHIÊN CỨU DAO ĐỘNG KẾT CẤU NHỊP CẦU DẦM ĐƠN GIẢN SỬ DỤNG VẬT LIỆU BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO (UHPC)

Cù Việt Hưng^{a,*}, Bùi Quốc Bảo^b, Trần Anh Quân^b, Trần Việt Hùng^a

^aKhoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam
^bCông ty TNHH Tư vấn Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 05/11/2024, Sửa xong 24/02/2025, Chấp nhận đăng 24/02/2025

Tóm tắt

Bê tông chất lượng siêu cao (Ultra High Performance Concrete - UHPC) với cường độ và độ bền vượt trội so với bê tông thông thường ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng công trình nói chung và kết cấu cầu nói riêng. Để áp dụng vật liệu UHPC một cách hiệu quả, nghiên cứu ứng xử của kết cấu dầm UHPC dưới tác động của các loại tải trọng trong đó có tải trọng động là rất cần thiết. Bài báo này nghiên cứu dao động của kết cấu nhịp dầm I-UHPC cầu An Thượng (thành phố Hưng Yên) bằng phương pháp thực nghiệm và phân tích phần tử hữu hạn sử dụng phương pháp lịch sử thời gian (Time History Analysis). Phương pháp phân tích lý thuyết này được áp dụng nghiên cứu dao động của kết cấu nhịp hai phương án so sánh của cầu An Thượng là cầu dầm thép liên hợp bản bê tông và cầu dầm bản bê tông cốt thép dự ứng lực. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, nhịp cầu dầm thép liên hợp và nhịp cầu dầm UHPC rất tương đồng về mặt dao động và tần số dao động đầu tiên theo phương đứng lớn hơn nhịp cầu dầm bản BTCT.

Từ khoá: bê tông chất lượng siêu cao - UHPC; tải trọng động; dao động kết cấu; phân tích phần tử hữu hạn; lịch sử thời gian.

RESEARCH ON VIBRATIONS OF SIMPLE GIRDER BRIDGE SPAN STRUCTURES USING ULTRA HIGH-PERFORMANCE CONCRETE (UHPC)

Abstract

Ultra High Performance Concrete (UHPC), with its superior strength and durability compared to conventional concrete, is increasingly being applied in the construction industry in general and in bridge structures in particular. To effectively utilize UHPC, it is essential to study the behavior of UHPC girder structures under various types of loads, including dynamic loads. This paper investigates the vibration of the I-UHPC girder superstructure of An Thuong Bridge (Hung Yen City) using experimental methods and finite element analysis with the Time History Analysis approach. The theoretical analysis method is applied to study the vibration of two comparative superstructure options for An Thuong Bridge: Steel composite bridge and prestressed concrete slab bridge. The research results indicate that the steel composite bridge and the UHPC bridge exhibit very similar vibration characteristics and their first oscillation frequency in the vertical direction is larger than that of the prestressed concrete slab span.

Keywords: Ultra High Performance Concrete (UHPC); dynamic load; structural vibration; finite element analysis; time history analysis.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(1V\)-05](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(1V)-05) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) có nhiều ưu điểm về tính chất cơ học và độ bền so với bê tông thông thường. Với thành phần bao gồm tỷ lệ nước-chất kết dính thấp, mật độ hạt cao, sợi thép

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hungcv@huce.edu.vn (Hung, C. V.)

cường độ cao và việc bổ sung thích hợp các phụ gia hóa học, UHPC thể hiện tính chất cơ học cao [1] (cường độ nén 28 ngày ≥ 120 MPa [2] và độ bền kéo ≥ 5 MPa [3], trong điều kiện bảo dưỡng tiêu chuẩn; cường độ nén 28 ngày ≥ 150 MPa khi xử lý bằng hơi nước [4]).

Tại Việt Nam, ngày càng nhiều công trình cầu sử dụng đầm UHPC, một số công trình tiêu biểu như cầu Kênh Thầu, cầu Cả Cát, cầu Kênh Độ, cầu Ngọn Lúa Ma (Long An) [5], cầu Đập Đá (Hậu Giang), cầu Năng An (Ninh Bình) [6, 7]. UHPC còn được ứng dụng sửa chữa mặt cầu Thăng Long [8]. Một loạt các cầu thuộc dự án giao thông nông thôn của Tuyên Quang [9, 10]. Hưng và cs. tại trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã nghiên cứu thiết kế, chế tạo và thử nghiệm một số kết cấu cầu quy mô nhỏ và trung bình sử dụng vật liệu bê tông chất lượng siêu cao (đề tài cấp Bộ Giáo dục và Đào tạo mã hiệu CTB-2017-01-04) tiêu biểu với dự án thiết kế, xây dựng cầu dân sinh An Thượng tại thành phố Hưng Yên [11] góp phần phát triển ứng dụng vật liệu UHPC trong xây dựng cầu tại Việt Nam. Tuy nhiên, vấn đề dao động của kết cấu nhịp đầm UHPC dưới tác dụng của hoạt tải vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Ứng xử của kết cấu nhịp cầu chịu tải trọng di động đã được nghiên cứu từ lâu bởi nhiều nhà nghiên cứu nổi tiếng [12, 13]. Lý thuyết về dao động của kết cấu được nhiều tác giả biên soạn thành sách trong đó có Fryba [14]. Tác giả này đã đưa ra các nghiệm giải tích bằng phương pháp biến đổi Laplace và Fourier. Tiếp theo đó, rất nhiều nghiên cứu về dao động của đầm chịu tải trọng di động với các điều kiện biên, vật liệu khác nhau, dao động đầm trên nền đàn hồi, ... Đa số các nghiên cứu trên đều sử dụng lý thuyết đầm Euler (lý thuyết đầm cổ điển) bỏ qua biến dạng do lực cắt và quán tính quay, hoặc sử dụng lý thuyết đầm Timoshenko (lý thuyết đầm tổng quát) có kể đến biến dạng cắt và quán tính quay. Phương pháp giải tích hoặc kết hợp giải các phương trình bằng phương pháp số được áp dụng phổ biến. Nhìn chung, các nghiên cứu đều kết luận rằng vận tốc của tải trọng di động, các điều kiện biên, hệ số cản, đặc tính vật liệu, ... đều ảnh hưởng đến ứng xử động lực học của kết cấu.

Khi phân tích ứng xử của kết cấu nhịp với hệ đầm cầu, bản mặt cầu và hệ liên kết ngang cũng như tính đặc thù của hoạt tải xe di chuyển, sử dụng phương pháp giải tích là vô cùng phức tạp mà mang lại hiệu quả không cao. Bởi vậy, ứng xử động của kết cấu nhịp thường được nghiên cứu thực nghiệm và phương pháp phần tử hữu hạn [15–21]. Phương pháp lịch sử thời gian (Time History Analysis) là một trong các phương pháp phân tích động lực học được chấp nhận trong tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ hiện hành tại Việt Nam [22].

Bài báo này nghiên cứu dao động của kết cấu nhịp đầm I-UHPC cầu dân sinh An Thượng, thành phố Hưng Yên bằng phương pháp thực nghiệm và mô phỏng số bằng phần mềm phân tích phần tử hữu hạn với mô hình tải trọng di động sử dụng phương pháp lịch sử thời gian. Hai phương án thiết kế truyền thống cho cầu An Thượng là cầu đầm thép liên hợp bản bê tông cốt thép và cầu đầm bản bê tông cốt thép dự ứng lực được đề xuất để nghiên cứu, so sánh về ứng xử động của kết cấu nhịp với phương án cầu đầm I-UHPC thực tế.

2. Đối tượng nghiên cứu

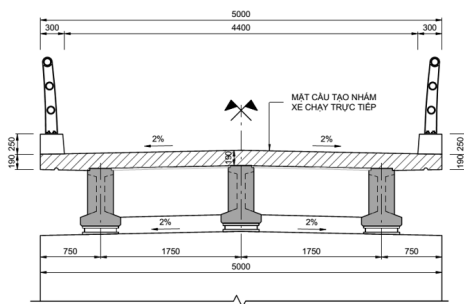
Cầu dân sinh An Thượng vượt kênh thủy lợi tại phường An Tảo, thành phố Hưng Yên, tỉnh Hưng Yên (Hình 1) được khánh thành đưa vào sử dụng ngày 30/3/2019, là một trong những sản phẩm của chương trình khoa học và công nghệ cấp Bộ Giáo dục và Đào tạo về “Nghiên cứu ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình do Trường Đại học Xây dựng Hà Nội thực hiện [11].

Cầu được thiết kế với bề rộng mặt cắt ngang cầu là 5 m, gồm mặt xe chạy 4,4 m và lan can mỗi bên 0,3 m (Hình 2). Cầu gồm 1 nhịp 21 m với tổng chiều dài cầu tính đến đuôi mố là 31,1 m. Kết cấu nhịp gồm 3 dầm tiết diện chữ I sử dụng vật liệu UHPC dự ứng lực dài 21 m, cao 0,72 m (Hình 3), bản mặt cầu dày 19 cm bằng bê tông cốt thép thường đổ tại chỗ, tấm ván khuôn đổ bản mặt cầu bằng

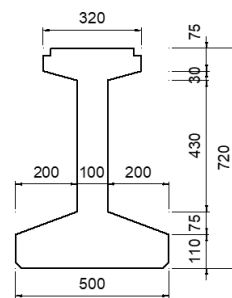


Hình 1. Cầu dân sinh An Thượng, thành phố Hưng Yên

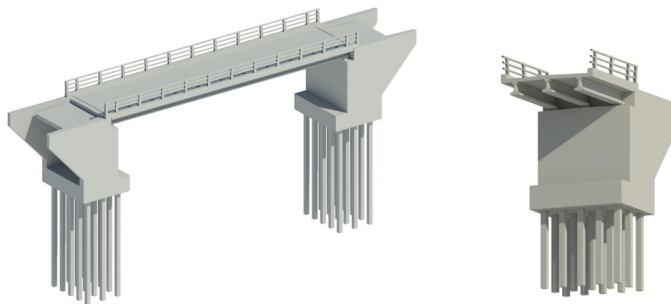
UHPC dày 35 mm. Hai móng cầu bằng bê tông cốt thép đổ tại chỗ đặt trên nền cọc ép bằng bê tông cốt thép (30×30) cm. Thiết kế 3D cầu An Thượng được thể hiện trên Hình 4. Một số hình ảnh thi công chế tạo và lắp đặt dầm I-UHPC 21 m được thể hiện trên Hình 5.



Hình 2. Mặt cắt ngang cầu dầm UHPC



Hình 3. Mặt cắt ngang dầm UHPC



Hình 4. Thiết kế 3D cầu An Thượng



Hình 5. Chế tạo và lắp đặt dầm I-UHPC 21 m cầu An Thượng [11]

3. Thực nghiệm thử tải động kết cấu nhịp cầu nhíp I-UHPC cầu An Thượng

Thí nghiệm thử tải trọng động kết cấu nhịp cầu nhíp cầu An Thượng được thực hiện trước khi đưa công trình vào khai thác. Để tạo ra dao động cho kết cấu cầu, một xe tải bốn trục không chở hàng có tải trọng khoảng 13,4 tấn được sử dụng (Hình 6). Đầu đo gia tốc 3 phương được gắn tại vị trí giữa nhịp. Thiết bị đo gia tốc SDA830C được kết nối với máy tính để hiển thị và thu thập dữ liệu (Hình 7, Hình 8, Hình 9). Thiết bị SDA830C cho phép đo dao động của dầm theo thời gian dựa trên lý thuyết hàm Fast Fourier Transform (FFT) để chuyển đổi dao động từ miền thời gian sang miền tần số. Từ biểu đồ dao động biểu diễn trong miền tần số, xác định được tần số dao động tự do của kết cấu nhịp dầm.



Hình 6. Xe chạy qua cầu thử tải động



Hình 7. Thiết bị SDA830C



Hình 8. Đầu đo gia tốc 3 phương trên kết cấu nhíp

Phương pháp FFT được sử dụng để xác định các tần số dao động tự do của kết cấu. Thuật toán FFT sẽ biến đổi chuỗi dữ liệu từ miền thời gian sang miền tần số [23–25].

$$X_k = \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-\frac{2\pi i}{N} k j}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

trong đó x_j là biến dữ liệu trong miền thời gian; X_k là biến dữ liệu miền tần số, N là số điểm dữ liệu trong miền thời gian (biến đổi FFT thường hoạt động hiệu quả nhất khi N là lũy thừa của 2 vì điều



Hình 9. Đầu nối, hiệu chỉnh thiết bị đo

này tối ưu hóa tốc độ tính toán, $N = 2n$ với n là số nguyên dương); t_j là biến độc lập trong phân tích tín hiệu thời gian đại diện cho thời điểm lấy mẫu dữ liệu, $t_j = j\Delta t$ với $j = 0$ đến $N - 1$, $i = \sqrt{-1}$ là số phức.

Dữ liệu miền tần số được xác định theo hai cách, một là phổ biên độ (A_k^{amp}) xác định theo công thức:

$$A_k^{amp} = \frac{2}{N}|X_k| \quad (2)$$

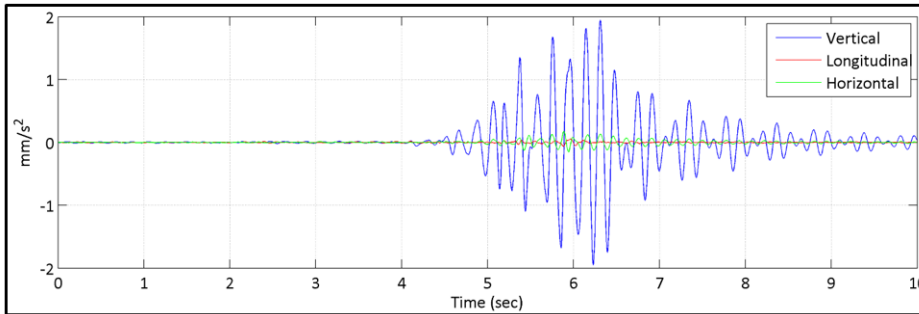
Phổ biên độ thể hiện mức độ mạnh yếu của từng thành phần tần số trong tín hiệu gốc. Đơn vị của phổ biên độ thường giống với đơn vị của tín hiệu đầu vào.

Hai là phổ công suất (A_k^{power}), xác định theo công thức:

$$A_k^{power} = \frac{1}{N}|X_k|^2 \quad (3)$$

Phổ công suất thể hiện năng lượng đóng góp của từng thành phần tần số vào tổng tín hiệu. Đơn vị của phổ công suất là bình phương đơn vị của tín hiệu đầu vào.

Phân tích FFT được thực hiện bằng phần mềm đo đạc và xử lý dữ liệu đi kèm với thiết bị đo gia tốc SDA-830C để xác định được các tần số dao động có phổ biên độ và phổ công suất lớn. Cần lưu ý rằng khi sử dụng thiết bị đo gia tốc SDA-830C chỉ xác định và nhận dạng được mode 1 do mode dao động này với kết cấu cầu giản đơn nói chung có tần số thấp nhất. Kết quả thí nghiệm thu được biểu đồ dao động của kết cấu nhịp cầu như thể hiện trên Hình 10. Chu kỳ dao động tự do theo phương thẳng đứng của kết cấu nhịp đo được khoảng 0,2 s tương ứng với tần số $f = 5$ Hz. Theo phương ngang cầu, tần số đo được là 6,9 Hz (chu kỳ 0,14 s).

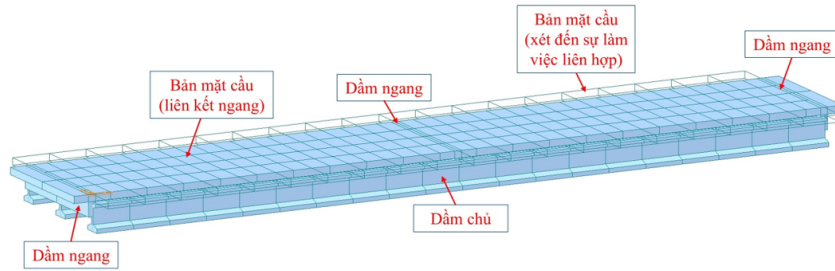


Hình 10. Biểu đồ dao động kết cấu nhịp cầu khi xe chạy qua

4. Mô phỏng số phân tích ứng xử động kết cấu nhịp dầm I-UHPC cầu An Thượng

Hệ kết cấu nhịp dầm I-UHPC cầu An Thượng được mô hình bằng phần tử hữu hạn (Hình 11), sử dụng phương pháp lịch sử thời gian để mô phỏng tải trọng xe di động. Phần tử thanh (General Beam) được sử dụng cho các phần tử dầm, liên hợp giữa dầm và bản mặt cầu được xét đến bằng việc sử dụng mặt cắt liên hợp (Composite Section). Tải trọng lan can, lớp phủ mặt cầu được chia đều cho tất cả các dầm. Toàn bộ tĩnh tải được quy đổi thành các khối lượng để xét tính chất động lực học bằng việc quy đổi tải trọng – khối lượng (Convert Self-weight into Masses, Loads to Masses) với gia tốc trọng trường $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Hệ số giảm chấn (Damping Ratio) được lấy bằng 2% [26].

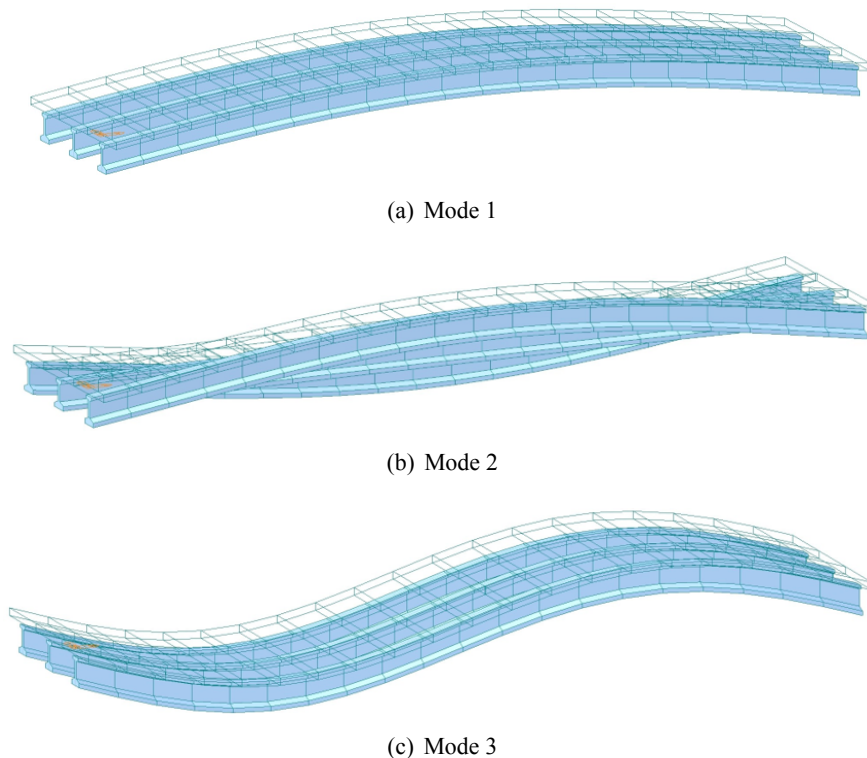
Khi tải trọng di động trong phạm vi cầu, dầm cầu dao động cưỡng bức với tần số dao động cưỡng bức. Sau khi tải trọng di động ra khỏi phạm vi cầu, dầm cầu dao động tự do với tần số dao động tự nhiên (Natural Frequencies). Để xác định các tần số dao động tự nhiên và các dạng dao động (Mode Shapes),



Hình 11. Mô hình phần tử hữu hạn kết cấu nhịp dầm UHPC

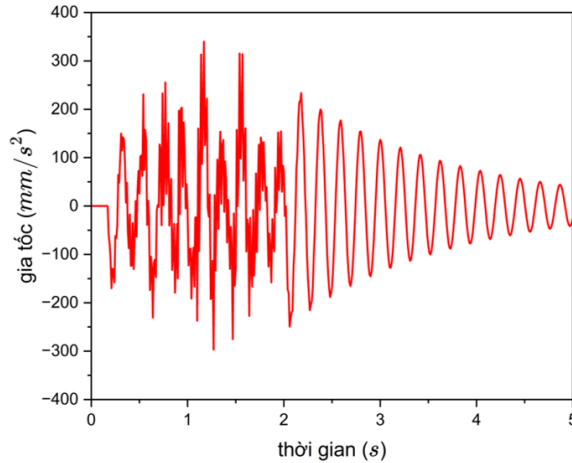
cần phải tiến hành phân tích trị riêng (Eigenvalue Analysis) bằng việc phân tích (Mass Participation Factors). Theo [27], số bậc tự do và số mode được xét trong phân tích phải đủ để bao quát ít nhất 90% sự tham gia khối lượng theo cả hai phương dọc và ngang, nghĩa là hệ số tham gia khối lượng của kết cấu tối thiểu là 90%.

Số lượng mode phân tích là nhiều, tuy nhiên bài báo chỉ tập trung quan tâm với 3 mode dao động đầu tiên. Mode 1 là dạng dao động uốn đầu tiên với tần số dao động tự do là 4,83 Hz. Mode 2 là dạng dao động xoắn đầu tiên với tần số dao động tự do là 7,04 Hz. Mode 3 là dạng dao động uốn thứ hai với tần số dao động tự do là 19,04 Hz. Kết quả phân tích thể hiện ở Hình 12, Hình 13.



Hình 12. Các dạng dao động (Mode Shapes) của kết cấu nhịp cầu UHPC

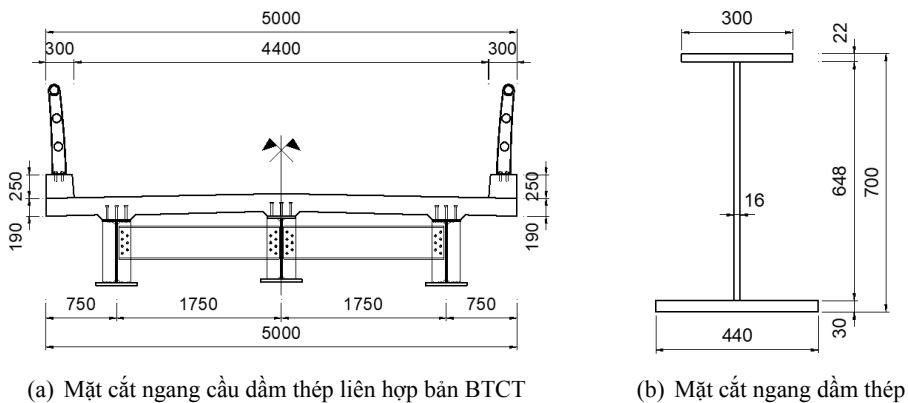
Đối với dạng dao động đầu tiên theo phương thẳng đứng, giá trị tần số dao động tự nhiên từ phân tích lý thuyết là 4,83 Hz, từ mô thực nghiệm là 5,0 Hz với sự sai khác khoảng 3,4%. Có thể thấy rằng, mô hình có đủ độ tin cậy để mở rộng nghiên cứu với các dạng kết cấu khác. Bài báo này xét với kết cấu cầu dầm thép liên hợp bản bê tông và cầu dầm bản bê tông cốt thép, tương đương về khả năng chịu lực ở trạng thái giới hạn cường độ để đánh giá dao động.



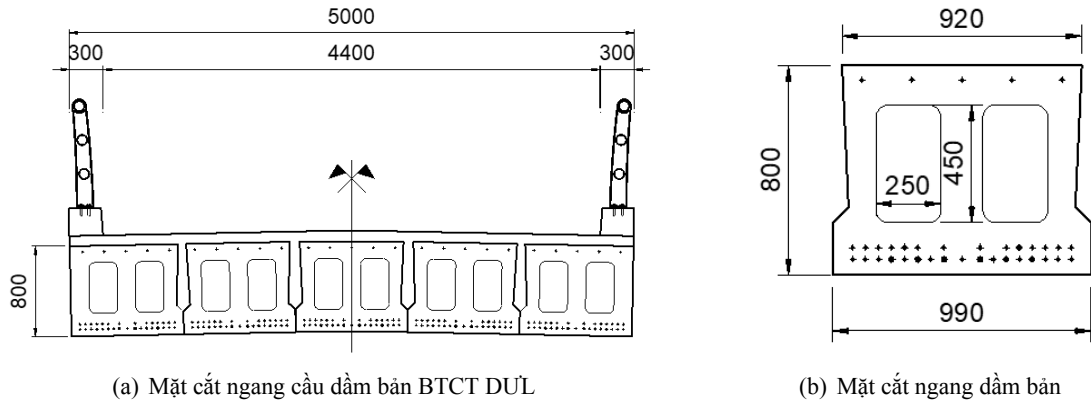
Hình 13. Kết quả phân tích PTHH biểu đồ dao động của kết cấu nhịp cầu dầm I-UHPC

5. Nghiên cứu mô phỏng ứng xử động các phương án thiết kế kết cấu nhịp khác cho cầu An Thượng

Như đã nêu ở trên, cầu An Thượng là công trình ứng dụng thành công kết quả nghiên cứu vật liệu UHPC của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Để đánh giá ứng xử động của kết cấu nhịp dầm I-UHPC, hai phương án thiết kế cầu truyền thống được đề xuất nghiên cứu cho cầu An Thượng. Tất cả các phương án này đều có bề rộng cầu $B = 5$ m, cầu chiều dài dầm 21 m, đáp ứng yêu cầu về tải trọng thiết kế như cầu thực tế đã xây dựng. Chiều cao kết cấu phần trên của cả ba phương án là gần tương đương nhau bởi không chế cao độ của đường hai đầu cầu giao cắt với đường hiện tại dọc hai bờ kênh thủy lợi. Các thông số được xác định dựa trên khả năng làm việc tương đương của chúng, đáp ứng các trạng thái giới hạn ở tiêu chuẩn thiết kế cầu TCVN 11823:2017 [22]. Phương án thứ nhất sử dụng kết cấu nhịp gồm 3 dầm đơn giản bằng thép liên hợp với bản bê tông cốt thép (BTCT); dầm thép dài 21 m có chiều cao 70 cm; bản mặt cầu dày 19 cm bằng bê tông C30 như phương án cầu thực tế (Hình 14). Phương án thứ hai sử dụng kết cấu nhịp dầm bản bê tông cốt thép dự ứng lực C40 (BTCT DUL); chiều dài dầm 21 m, chiều cao dầm 80 cm; bản bê tông liên kết C30 dày 10 cm (Hình 15). Do không chế về chiều cao kết cấu phần trên như đã nêu ở trên nên các phương án dầm tiết diện chữ I, chữ T sử dụng bê tông thông thường không được đề xuất.



Hình 14. Kích thước hình học cầu dầm thép liên hợp bản BTCT



Hình 15. Kích thước hình học cầu dầm bản BTCT DU'L

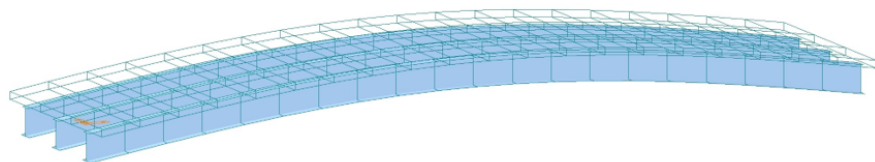
Phương pháp phân tích dao động cho hai phương án kết cấu nhịp này tương tự trường hợp nhịp dầm I-UHPC. Đối với phương án dầm thép liên hợp bản bê tông, hệ số giảm chấn lấy bằng 1%, và phương án dầm bản bê tông cốt thép dự ứng lực là 2% [26]. Mô hình và kết quả phân tích trị riêng và ứng xử động lực học của phương án dầm thép bản bê tông liên hợp được thể hiện Hình 16, Hình 17, Hình 18 và Bảng 1; của phương án dầm bản bê tông cốt thép dự ứng lực được thể hiện trên Hình 19, Hình 20, Hình 21 và Bảng 2.



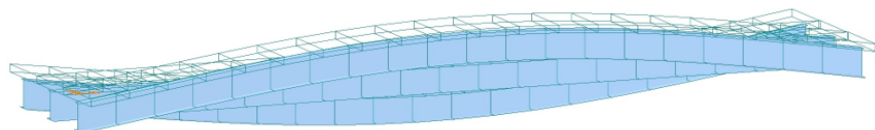
Hình 16. Mô hình phần tử hữu hạn hệ dầm thép liên hợp bản BTCT

Bảng 1. Hệ số tham gia khối lượng của các dạng dao động phương án cầu dầm thép liên hợp bản BTCT

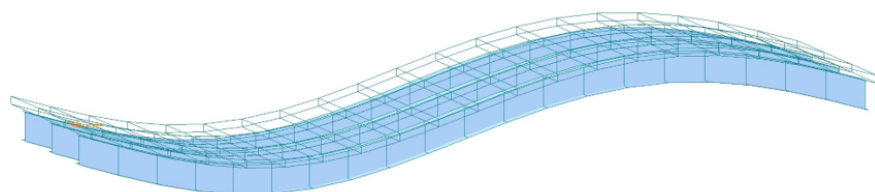
Mode	Tần số (Hz)	Chu kỳ (s)	Hệ số tham gia khối lượng (Mass Participation Factors)					
			Dx (%)	Dy (%)	Dz (%)	Rx (%)	Ry (%)	Rz (%)
1	4,84	0,21	0,49	0,00	84,53	0,00	0,25	0,00
2	6,92	0,14	0,00	3,40	0,00	80,78	0,00	0,00
3	18,85	0,05	2,51	0,00	0,01	0,00	67,68	0,00



(a) Mode 1

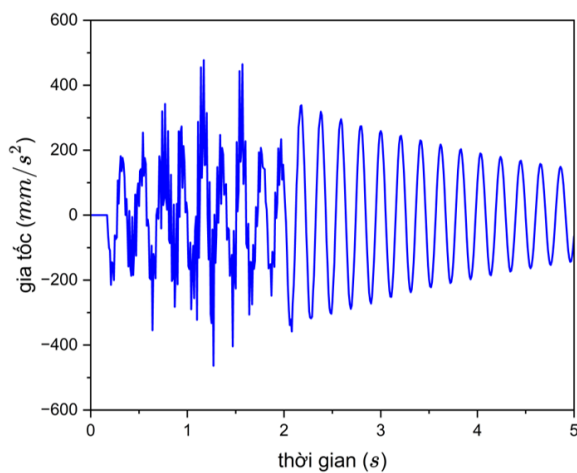


(b) Mode 2

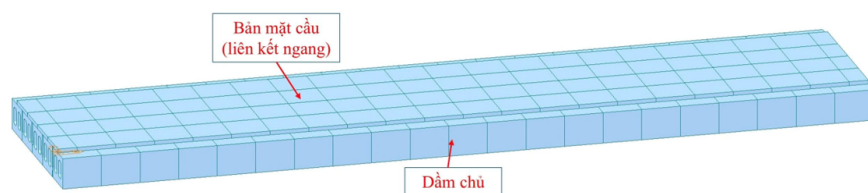


(c) Mode 3

Hình 17. Các dạng dao động của cầu dầm thép liên hợp bản BTCT



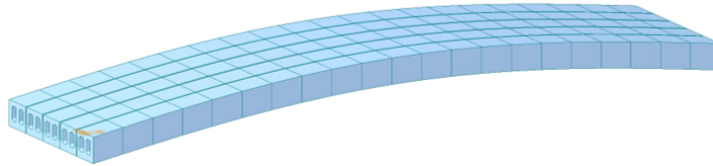
Hình 18. Kết quả phân tích PTHH biểu đồ dao động của kết cấu nhịp cầu dầm thép liên hợp bản BTCT



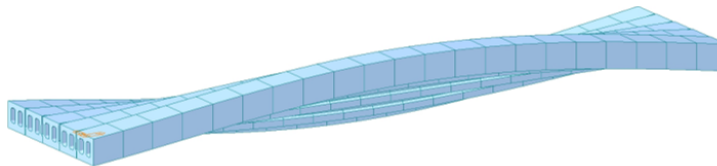
Hình 19. Mô hình phần tử hữu hạn hệ dầm bản BTCT DUL

Bảng 2. Hệ số tham gia khối lượng của các dạng dao động phương án cầu dầm bản BTCT DƯL

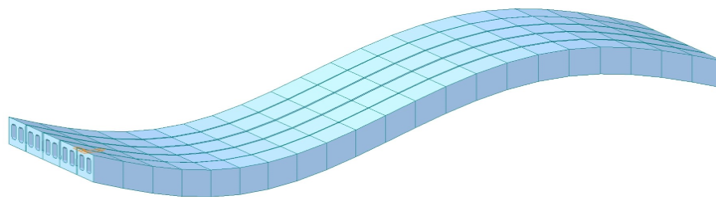
Mode	Tần số (Hz)	Chu kỳ (s)	Hệ số tham gia khối lượng (mass participation factors)					
			Dx (%)	Dy (%)	Dz (%)	Rx (%)	Ry (%)	Rz (%)
1	3,06	0,33	0,79	0,00	83,83	0,00	0,13	0,00
2	9,99	0,10	0,00	0,01	0,00	82,17	0,00	0,00
3	11,90	0,08	3,79	0,00	0,02	0,00	66,04	0,00



(a) Mode 1

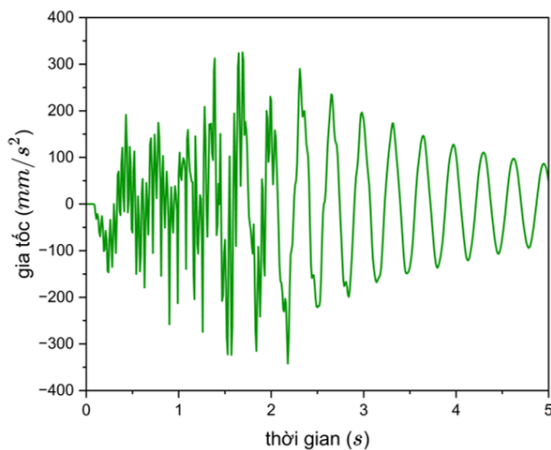


(b) Mode 2

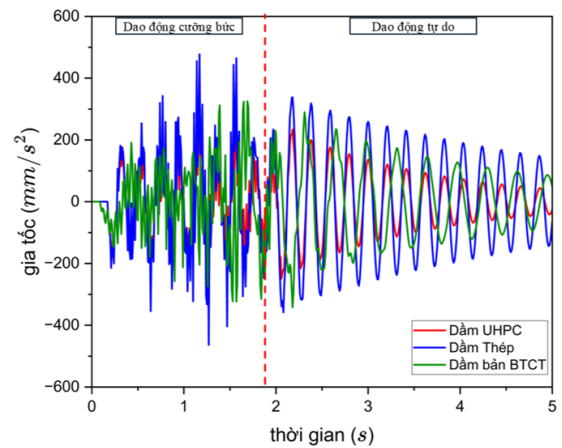


(c) Mode 3

Hình 20. Các dạng dao động của cầu dầm bản BTCT DƯL

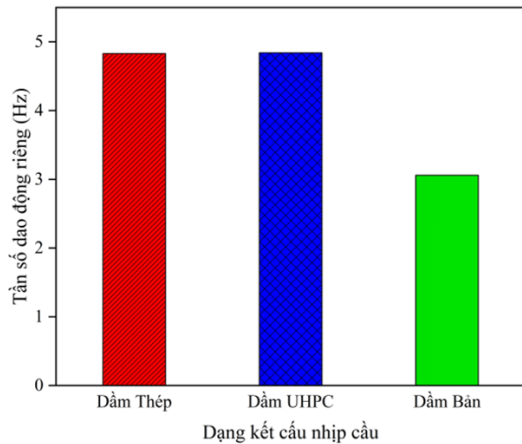


Hình 21. Kết quả phân tích PTHH biểu đồ dao động của kết cấu nhịp cầu dầm BTCT DƯL

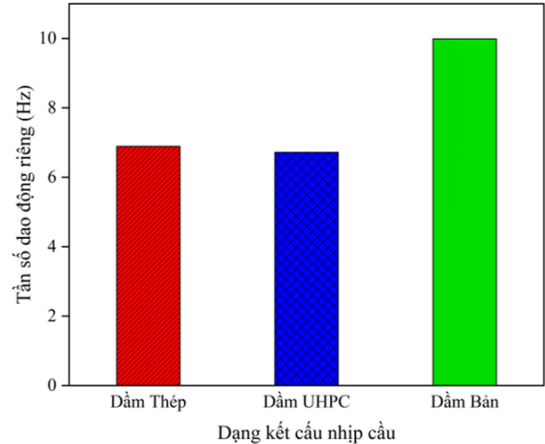


Hình 22. So sánh gia tốc của các dạng kết cấu nhịp cầu

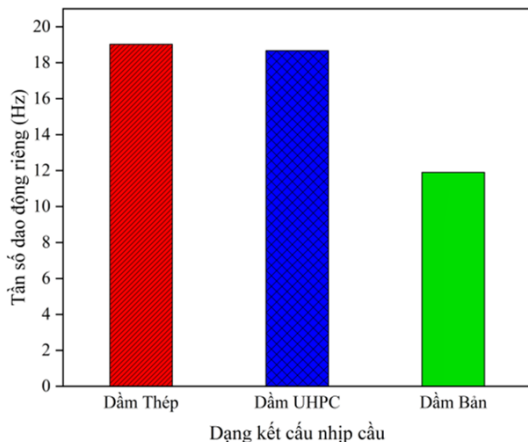
Hình 22 thể hiện biểu đồ gia tốc theo thời gian của 3 dạng kết cấu nhịp cầu. Có thể thấy rằng, ở giai đoạn dao động cường bức, dao động của nhịp dầm thép liên hợp bản BTCT lớn hơn nhiều so với nhịp dầm I-UHPC và nhịp dầm bản BTCT DƯL. Dao động của nhịp dầm I-UHPC ổn định và nhỏ hơn cả, điều này được thể hiện rõ ở giai đoạn dao động tự do. Đối với cầu dầm I-UHPC, do có trọng lượng giảm nên dao động của cầu khi có hoạt tải chạy bên trên có sự ảnh hưởng tương đối lớn. Tần số dao động theo phương đứng giảm xuống còn khoảng hơn 4 Hz khi có hoạt tải so với 4,83 Hz khi dao động tự do. Trong khi đó, cầu dầm bản BTCT DƯL có trọng lượng kết cấu lớn hơn, ảnh hưởng của trọng lượng hoạt tải đến tần số dao động theo phương đứng là không đáng kể.



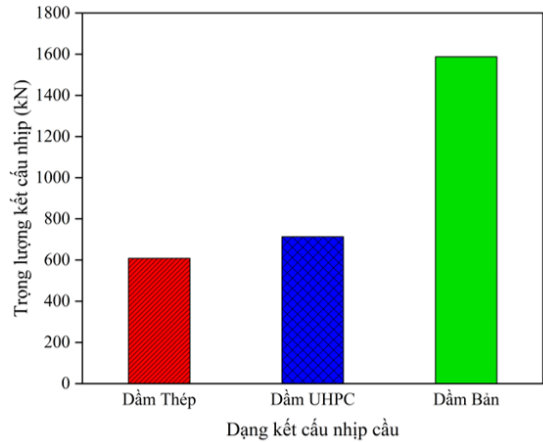
Hình 23. Tần số dao động riêng ở dạng dao động thứ nhất



Hình 24. Tần số dao động riêng ở dạng dao động thứ hai



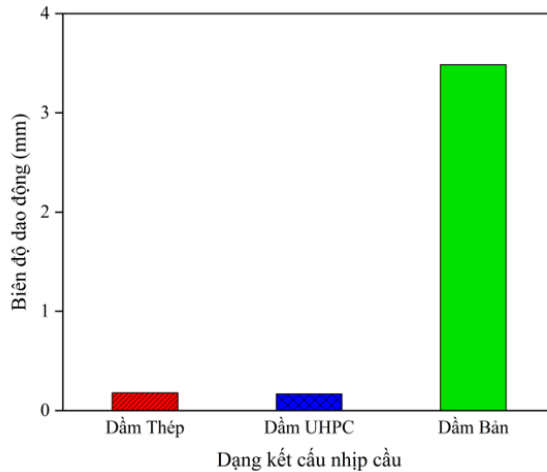
Hình 25. Tần số dao động riêng ở dạng dao động thứ ba



Hình 26. Trọng lượng bản thân kết cấu nhịp

Hình 23, Hình 24 và Hình 25 thể hiện so sánh tần số ứng với 3 dạng dao động riêng của 3 phương án cầu. Có thể thấy, tần số của phương án dầm I-UHPC và phương án dầm thép liên hợp bản BTCT chênh nhau không nhiều, 0,2% với dạng dao động thứ nhất và 2,5% với dạng dao động thứ hai và 1,9% với dạng dao động thứ ba. Tuy nhiên, phương án dầm bản BTCT DƯL lại có sự chênh lệch lớn so với 2 phương án còn lại, 36,8% với dạng dao động thứ nhất, 32,7% với dạng dao động thứ hai, 36,3% với dạng dao động thứ ba. Điều này có thể giải thích bởi kết cấu nhịp cầu dầm UHPC và cầu dầm thép liên hợp bản BTCT có trọng lượng nhỏ hơn nhiều so với kết cấu nhịp cầu bản (Hình 26).

Trọng lượng của kết cấu nhịp dầm UHPC chỉ lớn hơn dầm thép 1,2 lần. Trong khi đó, trọng lượng của kết cấu nhịp dầm bản BTCT lớn hơn dầm thép 2,6 lần.



Hình 27. Biên độ dao động ở dạng dao động thứ nhất

Hình 27 thể hiện tương quan biên độ dao động của các dạng kết cấu nhịp cầu ở dạng dao động thứ nhất. Thấy rằng biên độ dao động của kết cấu cầu dầm bản lớn hơn nhiều so với 2 dạng kết cấu còn lại. Theo quy định của Quy trình kiểm định cầu trên đường ô tô 22TCN 243-98 [28], chu kỳ dao động theo phương đứng không được nằm trong phạm vi từ 0,45 s đến 0,6 s. Có thể thấy rằng chu kỳ dao động tự nhiên theo phương đứng của nhịp cầu bản BTCT DUL là 0,33 s gần với miền cộng hưởng hơn.

6. Kết luận

Bài báo nghiên cứu ứng xử động của kết cấu nhịp cầu đơn giản dầm I-UHPC thông qua thí nghiệm thực tế trên công trình cầu An Thượng và phân tích phần tử hữu hạn. Lực kích thích dao động được tạo ra bằng cách sử dụng một xe tải chạy qua cầu. Kết quả được ghi lại bằng thiết bị SDA830C thu tín hiệu từ đầu đo gia tốc ba phương đặt tại vị trí giữa nhịp cầu. Dữ liệu được xử lý bằng thuật toán FFT (Fast Fourier Transform) nhằm chuyển đổi tín hiệu từ miền thời gian sang miền tần số. Một mô hình phần tử hữu hạn kết hợp phương pháp lịch sử thời gian (Time history Analysis) được sử dụng để phân tích dao động, kết quả cho thấy sai khác với thực nghiệm là nhỏ. Sau đó, mô hình này được áp dụng lên hai phương án thiết kế kết cấu nhịp khác giống nhau về chiều dài nhịp, bề rộng cầu, tương đương về chiều cao kết cấu phần trên và khả năng chịu lực, là phương án dầm thép liên hợp bản BTCT và phương án dầm bản BTCT DUL, nhằm phân tích ứng xử động và so sánh với phương án dầm I-UHPC. Một số kết luận được rút ra từ nghiên cứu như sau:

- Tần số dao động ứng với dạng dao động thứ nhất của kết cấu nhịp dầm I-UHPC rất tương đồng với nhịp dầm thép liên hợp bản BTCT (4,83 Hz và 4,84 Hz), nhưng lớn hơn khá nhiều nhịp dầm bản BTCT DUL (3,06 Hz). Nghĩa là kết cấu nhịp dầm I-UHPC và nhịp dầm thép liên hợp bản BTCT có độ cứng lớn hơn nhiều so với dầm bản BTCT DUL.
- Đối với dạng dao động thứ hai (xoắn kết cấu nhịp), phương án dầm I-UHPC và dầm thép liên hợp bản BTCT đều sử dụng 3 dầm với bản mặt cầu như nhau nên tần số dao động của 2 phương án này khá tương đồng là 7,04 Hz và 6,92 Hz. Riêng kết cấu nhịp dầm bản BTCT DUL có tần số ứng với dạng dao động thứ 2 là 9,99 Hz, nghĩa là độ cứng chống xoắn tốt hơn 2 phương án trên. Điều này có thể giải thích do mặt cắt ngang cầu dầm I-UHPC và dầm thép liên hợp là mặt cắt hở, vì vậy độ cứng

chống xoắn thấp. Dầm bản BTCT DƯL mặc dù có liên kết ngang là bản mặt cầu mỏng hơn 2 loại còn lại, nhưng nhờ tiết diện kín và liên tục nên khả năng chống xoắn được cải thiện.

- Đối với dạng dao động thứ ba, tần số của 3 phương án lần lượt là 19,04 Hz, 18,84 Hz và 11,90 Hz. Đây cũng là một dạng dao động uốn theo phương thẳng đứng có tần số gấp 4 lần so với dạng dao động thứ nhất. Điều này cũng cho thấy độ cứng theo phương đứng của phương án nhịp dầm I-UHPC và dầm thép liên hợp bản BTCT là tương đồng và lớn hơn so với phương án dầm bản BTCT DƯL.

- Tần số dao động cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến dao động, bao gồm độ cứng tổng thể và trọng lượng bản thân hệ kết cấu, thể hiện sự tương đồng đáng kể giữa kết cấu nhịp cầu dầm UHPC và cầu dầm thép liên hợp bản BTCT, mặc dù có sự khác biệt đáng kể về cấu tạo, liên kết giữa các bộ phận, độ giảm chấn và các đặc tính vật liệu.

Tài liệu tham khảo

- [1] Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., Abu-obeidah, A., Nassif, H., Wang, H. (2021). [New development of ultra-high-performance concrete \(UHPC\)](#). *Composites Part B: Engineering*, 224: 109220.
- [2] Perry, V. (2018). What really is ultra-high-performance concrete? *Proceedings of the 2nd International Conference on Ultra-High Performance Concrete Material & Structures UHPFRC*.
- [3] Russell, H. G., Graybeal, B. A., Russell, H. G. (2013). *Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community*. Federal Highway Administration, United States.
- [4] ACI (2018). *Ultra-high-performance concrete: An emerging technology report*. ACI Farmington Hills, MI.
- [5] Viet Nam Dura Innovation (2024). [Long An đưa cùng lúc 4 cầu bằng bê tông siêu tính năng \(UHPC\) vào sử dụng](#). Truy cập ngày 20/06/2024.
- [6] Viet, T., Long, L., Hoa, N. (2016). Research design UHPC bridge with HL93 load at the Vietnam township. *The 7th International Conference of Asian Concrete Federation Sustainable Concrete for Now and the Future*.
- [7] Viet, T., Long, L., Hoa, N. (2016). Studying on the construction of 18m-span UHPC bridge for two-wheel transportation means in Hau Giang, Vietnam. *The 7th International Conference of Asian Concrete Federation Sustainable Concrete for Now and the Future*.
- [8] Việt, T. B., Hùng, L. V., Chiến, B. X. (2022). [Nghiên cứu ổn định chất lượng lớp phủ UHPC liên hợp cầu Thăng Long](#). *Tạp chí Vật liệu và Xây Dựng*, 12(02):70–79.
- [9] Tuyên Quang Online (2024). [Những cây cầu mới trên đường nông thôn](#). Truy cập ngày 20/06/2024.
- [10] Dân tộc và Miền núi (2024). [Niềm vui từ những cây cầu mới ở vùng cao Tuyên Quang](#). Truy cập ngày 20/06/2024.
- [11] Hung, C. V., Tùng, K. Đ., Tuấn, N. V., Hòa, P. D. (2019). [Trường Đại học Xây dựng ứng dụng thành công bê tông chất lượng siêu cao \(UHPC\) xây dựng công trình cầu dân sinh An Thượng, thành phố Hưng Yên](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng - ĐHXDH*, 13(1V):98–100.
- [12] Timoshenko, S. (1922). [On the forced vibrations of bridges](#). *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 43(257):1018–1019.
- [13] Ting, E. C., Genin, J., Ginsberg, J. H. (1974). [A general algorithm for moving mass problems](#). *Journal of Sound and Vibration*, 33(1):49–58.
- [14] Fryba, L. (2012). *Vibration of Solids and Structures Under Moving Loads*. Springer Science & Business Media.
- [15] Agarwal, P., Pal, P., Mehta, P. K. (2022). [Free Vibration Analysis of RC Box-Girder Bridges Using FEM](#). *Sound and Vibration*, 56(2).
- [16] Zhang, X., Li, X., Liu, R., Hao, C., Cao, Z. (2020). [Dynamic properties of a steel-UHPC composite deck with large U-ribs: Experimental measurement and numerical analysis](#). *Engineering Structures*, 213: 110569.
- [17] Kong, X., Luo, K., Ji, W., Tang, Q., Deng, L. (2022). [Study on dynamic characteristics of an improved composite box girder with corrugated steel webs](#). *Journal of Bridge Engineering*, 27(6):04022035.

- [18] Shi, F., Wang, D., Chen, L. (2021). [Study of flexural vibration of variable cross-section box-girder bridges with corrugated steel webs](#). *Structures*, 33:1107–1118.
- [19] Siwowski, T., Rajchel, M., Wlasak, L. (2021). [Experimental study on static and dynamic performance of a novel GFRP bridge girder](#). *Composite Structures*, 259:113464.
- [20] Banas, A., Jankowski, R. (2020). [Experimental and numerical study on dynamics of two footbridges with different shapes of girders](#). *Applied Sciences*, 10(13):4505.
- [21] Pham, T. M., Davis, J., San Ha, N., Pournasiri, E., Shi, F., Hao, H. (2021). [Experimental investigation on dynamic properties of ultra-high-performance rubberized concrete \(UHPRuC\)](#). *Construction and Building Materials*, 307:125104.
- [22] TCVN 11823-2017 (2017). *Thiết kế cầu đường bộ*. Bộ Khoa học Công nghệ, Việt Nam.
- [23] Nussbaumer, H. J. (1982). *The fast Fourier transform*. Springer.
- [24] Duhamel, P., Vetterli, M. (1990). [Fast Fourier transforms: a tutorial review and a state of the art](#). *Signal Processing*, 19(4):259–299.
- [25] Trung, N. T. (2016). Xác định tần số dao động riêng cơ bản của kết cấu thép chân đế giàn khoan biển bằng phân tích kết quả phản ứng động. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 4.
- [26] AASHTO (2012). *LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [27] AASHTO (2007). *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [28] 22TCN 243-98 (1998). *Quy trình kiểm định cầu trên đường ô tô*. Bộ Khoa học Công nghệ, Việt Nam.