

Phân tích ảnh hưởng của chiều cao dầm đến tần số dao động riêng của kết cấu cầu dầm hộp bê tông giản đơn nhịp nhỏ và vừa sử dụng cho đường sắt cao tốc

■ TS. TRẦN VIỆT HÙNG; THS. PHAN VIỆT LÂM

Trường Đại học Xây dựng

TÓM TẮT: Xây dựng đường sắt cao tốc là một giải pháp đảm bảo sự đi lại của người dân giữa các đô thị lớn của nhiều quốc gia trên thế giới. Do yêu cầu khai thác ở tốc độ cao (trên 200 km/h), so với cầu đường sắt thông thường, việc tính toán thiết kế cầu cho đường sắt cao tốc đòi hỏi những yêu cầu mới, đặc biệt là yêu cầu về dao động của kết cấu cầu và dao động của hệ cầu - tàu cao tốc nhằm đảm bảo sự êm thuận cũng như độ ổn định của đoàn tàu trong quá trình khai thác. Các yêu cầu mới này dẫn đến việc lựa chọn các kích thước sơ bộ của kết cấu cầu đường sắt thông thường sẽ không phù hợp với kết cấu cầu đường sắt cao tốc. Nghiên cứu này phân tích ảnh hưởng của chiều cao dầm đến tần số dao động của kết cấu cầu dầm hộp bê tông giản đơn nhịp nhỏ và vừa sử dụng cho đường sắt cao tốc. Qua các kết quả phân tích động lực học bằng phần mềm mô phỏng, các tác giả đề xuất khoảng tỷ lệ hợp lý giữa chiều cao dầm chủ và chiều dài nhịp khi xét đến yêu cầu về tần số dao động của kết cấu cầu đường sắt cao tốc.

TỪ KHÓA: Đường sắt cao tốc, bê tông ứng suất trước, cầu dầm hộp, tần số dao động.

ABSTRACT: High-speed rail (HSR) construction is a solution to ensure the movement of people between cities of many countries around the world. Due to high-speed operation (more than 200 km/h), compared to a regular railway bridge, the design of high-speed railway bridge required new service limits particularly vibration of bridge structure and bridge-train systems due to the need of track smoothness and train stability. These new requirements resulted in the selection of preliminary dimensions of conventional railway bridge structures that would not be suitable for high-speed railway bridge structures.

This research study the influence of bridge depth on vertical natural frequencies of small- and medium-span, simply supported concrete box girder bridges of high-speed. Through the results of dynamic analysis by simulation software, the authors propose

a reasonable range of ratio between the bridge depth and span length when considering the requirements of vertical natural frequency of high-speed railway bridge structure.

KEYWORDS: High-speed rail, prestressed concrete, box girder bridges, natural frequency.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xây dựng đường sắt cao tốc là một giải pháp đảm bảo sự đi lại của người dân giữa các đô thị lớn được áp dụng ở nhiều quốc gia trên thế giới. Ở các tuyến đường sắt cao tốc, công trình cầu chiếm một tỷ trọng đáng kể chiều dài toàn tuyến, chẳng hạn ở tuyến Kyushu Shinkansen ở Nhật Bản là 64%, tuyến Bắc Kinh - Hồng Kông và Thượng Hải - Côn Minh tỷ lệ này là 70%. Trong các kết cấu cầu được sử dụng cho đường sắt cao tốc, kết cấu cầu bê tông dự ứng lực giản đơn nhịp nhỏ và vừa chiếm một tỷ trọng rất lớn, như ở tuyến Bắc Kinh - Thượng Hải, 90% công trình cầu có kết cấu nhịp giản đơn [1].

Do yêu cầu khai thác ở tốc độ cao (trên 200 km/h), so với cầu đường sắt thông thường, việc tính toán thiết kế cầu cho đường sắt cao tốc đòi hỏi những yêu cầu mới, đặc biệt là yêu cầu về dao động của kết cấu cầu và dao động của hệ cầu - tàu cao tốc nhằm đảm bảo sự êm thuận cũng như độ ổn định của đoàn tàu trong quá trình khai thác. Các yêu cầu mới này dẫn đến việc lựa chọn các kích thước sơ bộ của kết cấu cầu đường sắt thông thường sẽ không phù hợp với kết cấu cầu đường sắt cao tốc và đòi hỏi các nghiên cứu phân tích để đưa ra các thông số tham khảo mới phù hợp.

2. ĐẶC ĐIỂM TÁC ĐỘNG CỦA ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC ĐẾN KẾT CẤU CẦU VÀ YÊU CẦU GIỚI HẠN TẦN SỐ DAO ĐỘNG RIÊNG CỦA KẾT CẤU

So với đường sắt thông thường, hoạt tải thiết kế của tàu đường sắt cao tốc nhỏ hơn, khoảng 45 - 65% hoạt tải thiết kế của tàu đường sắt thông thường [1]. Tuy nhiên, do yêu cầu khai thác ở tốc độ rất cao nên cầu đường sắt cao tốc có các yêu cầu khắt khe hơn về độ cứng của kết cấu để giảm thiểu biến dạng và tránh rung động quá mức hoặc cộng hưởng khi đoàn tàu chạy qua.

Tham số động lực học quan trọng nhất của kết cấu cầu đường sắt cao tốc là tần số dao động riêng của kết cấu nhịp. Mặc dù không hoàn toàn thể hiện ứng xử động của kết cấu cầu khi có đoàn tàu chạy qua, tần số dao động riêng phản ánh độ cứng của kết cấu cũng như mức độ nhạy của dao động của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng, do đó đóng vai trò quan trọng trong tính toán thiết kế cầu đường sắt cao tốc.

Để tránh khả năng cộng hưởng của cầu và đoàn tàu cũng như đảm bảo an toàn và êm thuận trong quá trình khai thác, ứng xử động của kết cấu cầu cũng như đoàn tàu và hệ cầu - đoàn tàu cần được phân tích và khống chế trong các giới hạn cho phép. Tuy nhiên, nếu kết cấu nhịp cầu giản đơn có tần số dao động riêng nằm trong khoảng giới hạn thì khi tính toán thiết kế không cần thiết phải tiến hành phân tích động lực học của kết cấu. Nhìn chung, khoảng giới hạn về tần số dao động riêng của cầu nhịp giản đơn dùng cho đường sắt cao tốc của các nước (Tiêu chuẩn châu Âu Eurocode EN 1991-2, Tiêu chuẩn thiết kế đường sắt cao tốc của Trung Quốc TB 10621 - 2014 [3]) đều dựa trên Tiêu chuẩn thiết kế của Hiệp hội Đường sắt quốc tế UIC (Tiêu chuẩn UIC Code 776-2R [2]).

Trong phạm vi nghiên cứu cầu đường sắt cao tốc (tốc độ thiết kế từ 200 - 350 km/h), nhịp giản đơn khoảng giới hạn tần số dao động riêng của kết cấu nhịp theo Tiêu chuẩn UIC Code 776-2R bao gồm:

- Với $40m \leq L \leq 100m$:
 - + Giới hạn trên: $n_0 \leq 94,76.L^{-0,748}$
 - + Giới hạn dưới: $n_0 \geq 23,58.L^{-0,592}$
- Với $L \leq 40m$:
 - + Giới hạn trên: $n_0 \leq 94,76.L^{-0,748}$ và $n_0 < n_T/1,2$
 - + Giới hạn dưới: $n_0 > V / \left(\frac{v}{n_0}\right)_{lim}$

Trong đó: L - Chiều dài nhịp (m); n_0 - Tần số dao động uốn (Hz); n_T - Tần số dao động xoắn (Hz); V - Tốc độ thiết kế của đoàn tàu (m/s); $(v/n_0)_{lim}$ - Giá trị giới hạn của tỷ số giữa vận tốc thiết kế và tần số dao động riêng của kết cấu nhịp được quy định trong Bảng 8, 9 - Tiêu chuẩn UIC Code 776-2R.

Nghiên cứu này sử dụng khoảng giới hạn tần số dao động riêng theo phương đứng của cầu đường sắt cao tốc theo Tiêu chuẩn UIC Code 776-2R khi không cần tính toán phân tích động lực học làm tiêu chí giới hạn cho việc phân tích ảnh hưởng của tham số chiều cao dầm.

3. PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA THAM SỐ CHIỀU CAO DẦM ĐẾN TẦN SỐ DAO ĐỘNG RIÊNG CỦA KẾT CẤU CẦU DẦM HỘP BÊ TÔNG GIẢN ĐƠN NHỊP NHỎ VÀ VỪA

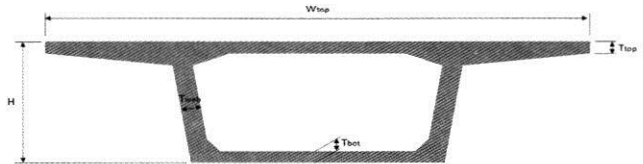
Các kết cấu cầu đường sắt cao tốc bê tông cốt thép dự ứng lực nhịp giản đơn trên thế giới sử dụng các dạng mặt cắt là mặt cắt dạng dầm hộp, dạng chữ T, dạng bản và dạng lòng máng. Tuy nhiên, do có lợi thế rất lớn trong việc dễ dàng tiếp cận kiểm tra, duy tu, bảo dưỡng, sửa chữa và thay thế các thiết bị phụ trợ, kết cấu dầm hộp gần như là giải pháp phổ biến nhất trên thế giới. Một số quốc gia như Mỹ, Đài Loan, Trung Quốc chỉ sử dụng mặt cắt dạng dầm hộp với kết cấu cầu đường sắt cao tốc nhịp giản đơn. Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo chỉ tiến hành phân tích với kết cấu

dầm giản đơn bê tông dự ứng lực có tiết diện dạng hộp.

3.1. Mô hình kết cấu cầu

Chiều cao dầm là một trong những tham số đặc trưng có ảnh hưởng lớn nhất đến kết cấu cầu nói chung và cầu đường sắt cao tốc nói riêng. Để nghiên cứu ảnh hưởng của tham số chiều cao dầm (H) đến kết cấu cầu BTCT giản đơn nhịp nhỏ và vừa sử dụng cho đường sắt cao tốc, các thông số cơ bản của kết cấu được lựa chọn để mô hình như sau:

- Kích thước hình học của tiết diện dầm: Hiện nay, tiết diện dầm hộp 1 khoang là tiết diện được áp dụng phổ biến nhất trong thiết kế cầu đường sắt cao tốc nhịp giản đơn trên thế giới ([4,5]). Các tham số kích thước hình học của tiết diện dầm hộp được thể hiện trên Hình 3.1. Để tiến hành phân tích ảnh hưởng của tham số chiều cao dầm, các tham số kích thước khác được tiến hành lựa chọn xác định trước. Bề rộng bản cánh trên của dầm được lấy $W_{top} = 12,0$ m tương ứng với bề rộng được thiết kế với đường sắt khổ đôi của Đài Loan, Mỹ và Trung Quốc. Chiều dày bản cánh trên $T_{top} = 300$ mm; chiều dày bản cánh dưới $T_{bot} = 280$ mm; chiều dày sườn dầm $T_{web} = 450$ mm. Tham số chiều cao dầm chủ H được lựa chọn thay đổi từ 1,2 - 8,0m.



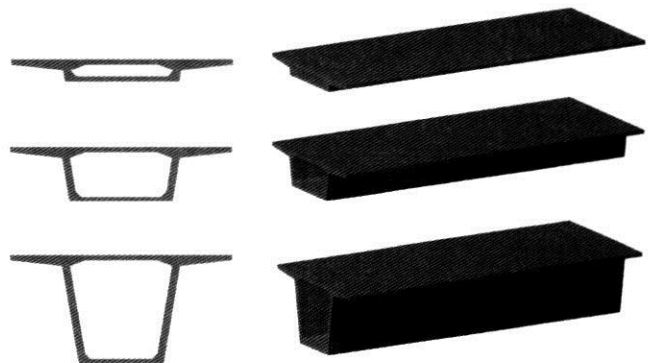
Hình 3.1: Các tham số đặc trưng của tiết diện dầm hộp

- Vật liệu được mô hình phân tích là bê tông C40 với trọng lượng riêng $\gamma = 24,5$ kN/m³ (đã kể đến trọng lượng cốt thép).

- Tĩnh tải: Bao gồm trọng lượng bản thân của kết cấu, trọng lượng của phần lan can và phần đá ballast được lấy bằng 45 kN/m (lựa chọn theo giá trị được tính toán cho dự án đường sắt cao tốc HS2 của UK).

Ảnh hưởng của tham số chiều cao dầm được tiến hành phân tích với các cầu có chiều dài nhịp là 20 m, 24 m, 28 m, 30 m, 32 m, 36 m, 40 m, 44 m và 48 m.

Để mô hình của kết cấu nhịp có ứng xử động tổng thể tương đương với ứng xử của kết cấu thực, mô hình phân tích phải đảm bảo tương đương về các đặc trưng cơ học cũng như tương đương về sự phân bố khối lượng so với kết cấu thực. Phần mềm Midas được sử dụng để mô hình mô phỏng ứng xử động của kết cấu nhịp và sau đó tiến hành phân tích động lực học theo phương pháp phân tích modal analysis.



Hình 3.2: Một số mô hình phân tích trong phần mềm Midas

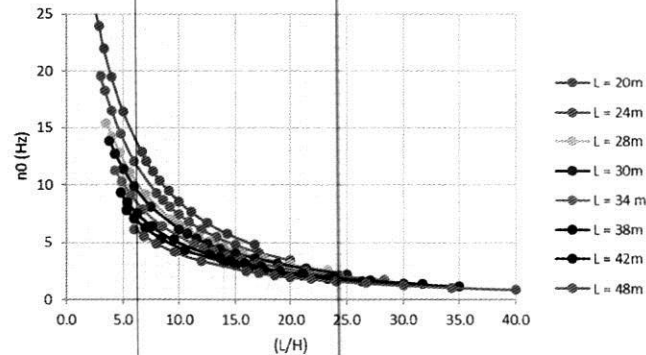
Một ví dụ về kết quả tính toán tần số dao động riêng của một kết cấu dầm hộp nhịp giản đơn được thể hiện ở Hình 3.3.



Hình 3.3: Dạng dao động mode 1 của kết cấu nhịp

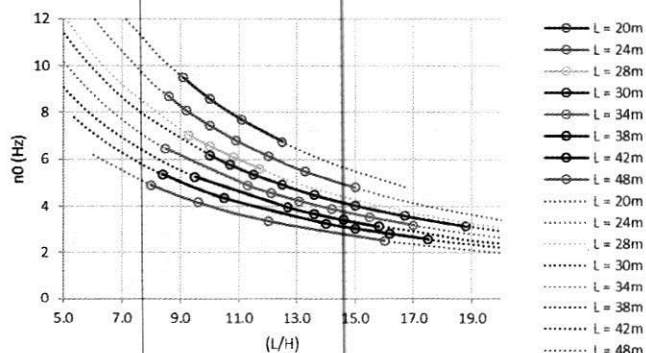
3.2. Ảnh hưởng của chiều cao dầm chủ đến tần số dao động riêng của kết cấu

Ứng xử của kết cấu nhịp phụ thuộc vào chiều cao dầm chủ và thông thường được thể hiện qua tỷ số giữa chiều dài nhịp và chiều cao dầm chủ (L/H). Tỷ số (L/H) đóng vai trò quan trọng trong tính toán thiết kế. Nó góp phần xác định chiều cao dầm chủ, trọng lượng của kết cấu nhịp, xác định kết cấu trụ móng và ảnh hưởng đến tổng mức đầu tư của công trình cầu. Từ kết quả phân tích bằng phần mềm ở trên, ảnh hưởng của tỷ số (L/H) đến tần số dao động riêng của kết cấu cầu dầm hộp BTCT nhịp giản đơn được thể hiện trên Hình 3.4.

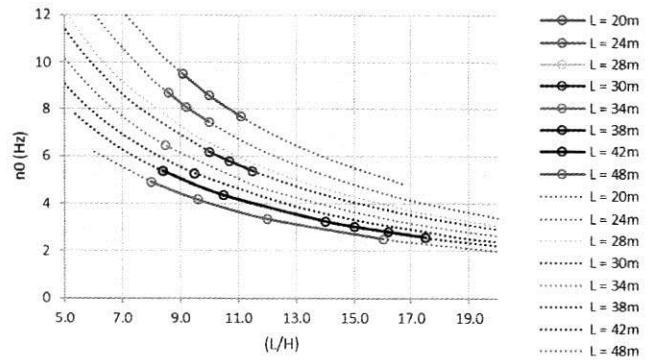


Hình 3.4: Ảnh hưởng của tỷ số (L/H) đến tần số dao động riêng của kết cấu

Theo yêu cầu giới hạn tần số dao động riêng của theo phương đứng của cầu đường sắt cao tốc của Tiêu chuẩn UIC Code 776-2R khi không cần tính toán phân tích động lực học làm tiêu chí giới hạn, tỷ lệ chiều dài nhịp và chiều cao dầm chủ hợp lý ứng với các tốc độ thiết kế của đoàn tàu là 200 km/h và 350 km/h được thể hiện trên Hình 3.5 và Hình 3.6.



Hình 3.5: Ảnh hưởng của tỷ số (L/H) đến tần số dao động riêng của kết cấu với vận tốc đoàn tàu $V = 200$ km/h



Hình 3.6: Ảnh hưởng của tỷ số (L/H) đến tần số dao động riêng của kết cấu với vận tốc đoàn tàu $V = 350$ km/h

Có thể thấy, tỷ lệ chiều dài nhịp và chiều cao dầm chủ hợp lý với các tuyến đường sắt cao tốc có tốc độ thiết kế khác nhau có sự thay đổi như sau:

- Với chiều dài nhịp $L = 20$ m, sự khác biệt là không lớn với các tốc độ thiết kế của các đoàn tàu cao tốc khác nhau. Với tốc độ thiết kế 200 km/h và 350 km/h, tỷ lệ (L/H) hợp lý tương ứng là khoảng (9 - 13) và (9 - 11), tương ứng với tần số dao động riêng khoảng từ (7 - 10 Hz).

- Với chiều dài nhịp $L = 24$ m, sự khác biệt của tỷ lệ (L/H) hợp lý với các tốc độ thiết kế của các đoàn tàu cao tốc khác nhau là rất lớn. Với tốc độ thiết kế 200 km/h, tỷ lệ (L/H) hợp lý là khoảng (9 - 17). Tuy nhiên, với đoàn tàu có vận tốc thiết kế 350 km/h, tỷ lệ (L/H) hợp lý chỉ nằm trong khoảng (8,5 - 10).

- Với chiều dài nhịp $L = 28$ m, tỷ lệ (L/H) hợp lý là khoảng (9 - 12) với đoàn tàu có vận tốc thiết kế 200 km/h. Tuy nhiên, với đoàn tàu có vận tốc thiết kế 350 km/h, tỷ lệ (L/H) hợp lý không đạt được.

- Với chiều dài nhịp $L = 30$ m, tỷ lệ (L/H) hợp lý là khoảng (10 - 18) với tốc độ thiết kế 200 km/h. Tuy nhiên, với đoàn tàu có vận tốc thiết kế 350 km/h, tỷ lệ (L/H) hợp lý chỉ nằm trong khoảng (10 - 11,5).

- Với chiều dài nhịp $L = 34$ m và 38 m, sự khác biệt của tỷ lệ (L/H) hợp lý với các tốc độ thiết kế của các đoàn tàu cao tốc khác nhau là đặc biệt lớn. Với tốc độ thiết kế 200 km/h, tỷ lệ (L/H) hợp lý là khoảng (8,5 - 15). Tuy nhiên, với đoàn tàu có vận tốc thiết kế 350 km/h, tỷ lệ (L/H) hợp lý chỉ nằm trong khoảng (8,5 - 9,5).

- Với chiều dài nhịp từ $L = 42 - 48$ m, tỷ lệ (L/H) hợp lý là khoảng (8 - 17) tương ứng với tần số dao động riêng khoảng (2,5 - 5 Hz) với vận tốc tàu cao tốc 200 km/h và 350 km/h. Qua đó có thể thấy rằng, với các kết cấu nhịp trên 40 m, độ cứng của kết cấu nhỏ, trọng lượng kết cấu nhịp lớn nên ảnh hưởng của tốc độ đoàn tàu đến kết cấu là nhỏ.

Kết quả này cung cấp một gợi ý quan trọng giúp cho người thiết kế có thể lựa chọn sơ bộ chiều cao của kết cấu dầm chủ khi thiết kế cầu nhịp giản đơn cho đường sắt cao tốc.

4. KẾT LUẬN

Kết quả phân tích ảnh hưởng của chiều cao dầm đến tần số dao động của kết cấu cầu dầm hộp bê tông cốt thép giản đơn nhịp nhỏ và vừa cho thấy yêu cầu về tần số dao động của kết cấu ảnh hưởng lớn tới việc lựa chọn chiều cao

dầm, đặc biệt là khi thiết kế cho tuyến đường sắt cao tốc có tốc độ cao. Dựa trên kết quả phân tích tham số chiều cao dầm và tỷ lệ chiều dài nhịp và chiều cao dầm chủ với tiêu chí lấy giới hạn tần số dao động riêng của kết cấu khi không phải tiến hành phân tích động lực học của Tiêu chuẩn UIC Code 776-2R để xác định chiều cao dầm hợp lý, một số kết quả chính có thể nhận thấy:

- Với đoàn tàu thiết kế có tốc độ nhỏ $V = 200$ km/h (là tốc độ bắt đầu được xếp loại đường sắt cao tốc), chiều cao dầm chủ hợp lý với kết cấu dầm hộp giản đơn khoảng từ $(1/9 - 1/16) L$.

- Với cầu có chiều dài nhịp lớn hơn 40 m, chiều cao dầm chủ hợp lý của kết cấu dầm hộp giản đơn với đoàn tàu có tốc độ thiết kế lớn $V = 350$ km/h (là tốc độ lớn nhất trong tiêu chuẩn thiết kế các nước hiện nay) cũng giống như khi thiết kế với đoàn tàu có tốc độ thiết kế $V = 200$ km/h.

- Với cầu có chiều dài nhịp từ 20 - 40 m, chiều cao dầm chủ hợp lý với tốc độ thiết kế của đoàn tàu là 200 km/h và 350 km/h có sự khác biệt rất lớn. Đặc biệt rất khó để thiết kế kết cấu dầm hộp giản đơn với nhịp từ 25 - 29 m thỏa mãn yêu cầu về tần số dao động khi tốc độ thiết kế là 350 km/h.

Lời cảm ơn: Các tác giả xin trân trọng cảm ơn sự tài trợ và giúp đỡ của Bộ GTVT và Trường Đại học Xây dựng thông qua Đề tài "Nghiên cứu lựa chọn các tham số kỹ thuật cho các kết cấu cầu bê tông cốt thép nhịp nhỏ và vừa áp dụng cho cầu đường sắt cao tốc ở Việt Nam"; mã số: DT183016.

Tài liệu tham khảo

[1]. Bin Yan, Gong-Lian Dai, Nan Hu (2015), *Recent development of design and construction of short span high-speed railway bridges in China*, China Engineering Structures 100 (2015) 707-717.

[2]. UIC Code 776-2R (2009), *Design requirements for rail-bridges based on interaction phenomena between train, track and bridge*, The International Union of Railways (UIC).

[3]. Gong-Lian Dai, Miao Su, Y. Frank Chen (2016), *Code for design of High Speed Railway (including its explanation)*, People's Republic of China National Railway Administration (CNRA-PRC) [in Chinese].

[4]. TB 10621 - 2014 (2014), *Design and Construction of Simple beam bridges for High-speed rails in China: Standardization and Industrialization*, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2016, Volume 11(4): 274-282.

[5]. Waggoner, F., Jacob, V., Jong, K., Daniels, A. (2009), *Design Guidelines for High-Speed Train Aerial Structures*, California High-Speed Train Project.

Ngày nhận bài: 03/10/2020

Ngày chấp nhận đăng: 11/11/2020

Người phản biện: TS. Đặng Xuân Hùng

TS. Nguyễn Ngọc Tuyền