

So sánh mô hình hoạt tải và điều kiện giới hạn về chuyển vị áp dụng cho cầu đường sắt tốc độ cao theo các tiêu chuẩn khác nhau

■ TS. LÊ NGUYỄN KHƯƠNG; TS. NGUYỄN THỊ THANH XUÂN
TS. NGUYỄN VĂN ĐĂNG; ThS. NGÔ THỊ HỒNG QUẾ
Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

TÓM TẮT: Nhằm nâng cao hiệu quả quá trình thiết kế và thi công lắp dựng, cầu đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) thường được mô-đun hóa theo chủng loại, khẩu độ và kích thước tiết diện. Ngoài các yêu cầu liên quan tới kiến trúc, địa kỹ thuật, công nghệ thi công, việc lựa chọn phương án kết cấu còn phụ thuộc vào tải trọng áp dụng và các điều kiện giới hạn theo tiêu chuẩn ban hành. Nội dung bài báo tập trung phân tích ứng xử tĩnh của nhóm cầu dầm hộp bê tông cốt thép (BTCT) dự ứng lực có khẩu độ 20 m, 24 m và 32 m chịu tác dụng của các mô hình hoạt tải theo tiêu chuẩn châu Âu, Nhật Bản và Trung Quốc. Với mỗi kết cấu, phản lực gối tựa, mô-men và chuyển vị thẳng đứng tại mặt cắt giữa dầm, chuyển vị góc xoay tại đầu dầm, được tính toán theo 9 mô hình hoạt tải khác nhau. Nghiên cứu đưa ra một số kết luận và khuyến cáo hữu ích trong việc lựa chọn mô hình hoạt tải và các điều kiện giới hạn cho tiêu chuẩn tính toán thiết kế cầu ĐSTĐC của Việt Nam trong tương lai.

TỪ KHÓA: Cầu đường sắt tốc độ cao, mô hình hoạt tải, điều kiện giới hạn, cầu dầm hộp bê tông cốt thép dự ứng lực, phương pháp đặt tải theo đường ảnh hưởng.

ABSTRACT: To improve the efficiency of the design and construction process, high-speed railway bridges (HSR bridges) are often modularized according to type, span, and cross-section properties. In addition to the architecture, geotechnical engineering, and construction technology requirements, the selected structural option also depends on the applied load and the limit state design according to the standards. This study analyzes the static behavior of prestressed reinforced concrete box girder bridges with a span of 20 m, 24 m and 32 m under the different live load models according to European, Japanese, and Chinese standards. For each structure, the support reaction, moment and vertical deflection at the middle, and the slope angle at the two ends of the beam are calculated with 9 different live load models. The study

provides valuable conclusions and recommendations in selecting the live load model and limits states for the future design calculation standards of the HSR bridges in Vietnam.

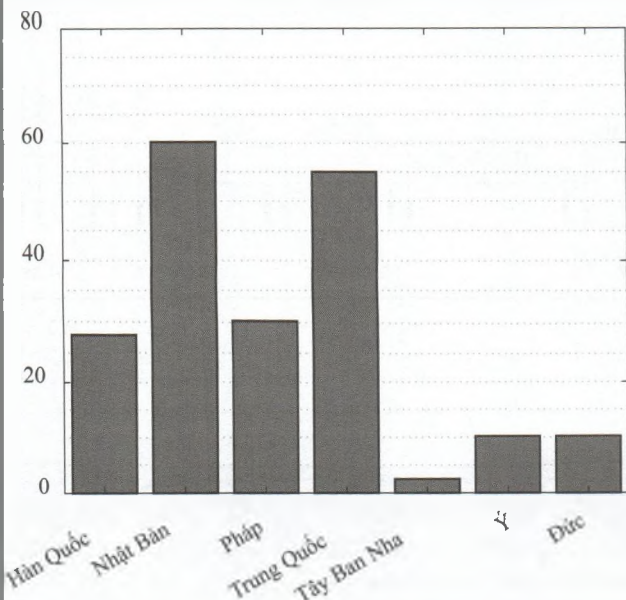
KEYWORDS: High-speed railway bridge, live load model, limited conditions, prestressed reinforced concrete bridge.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

ĐSTĐC giúp nâng cao hiệu quả trong lưu thông hàng khách và vận chuyển hàng hóa. Với nhiều quốc gia phát triển, ĐSTĐC đóng vai trò là huyết mạch của nền kinh tế quốc dân, là yếu tố quan trọng của hệ thống cơ sở hạ tầng quốc gia. ĐSTĐC hiện đại, còn được gọi là đường sắt cao tốc (High Speed Railway), được định nghĩa là hệ thống đường sắt cho phép tàu di chuyển với tốc độ 250 km/h hoặc cao hơn, vượt qua khái niệm đường sắt chuyên dụng cho vận chuyển hành khách có tốc độ 200 km/h.

Liên quan tới tiêu chuẩn tính toán thiết kế, ĐSTĐC có yêu cầu nghiêm ngặt về khả năng chịu lực và độ bền của đường ray để đảm bảo đường ray không bị biến dạng hoặc hư hỏng trong quá trình khai thác. Ngoài ra, việc xây dựng hệ thống ĐSTĐC cần được đảm bảo các điều kiện liên quan tới môi trường sinh thái, không lấn chiếm đất nông nghiệp (đất nông nghiệp), không giao cắt đồng mức với các tuyến vận tải đường bộ nhằm đảm bảo an toàn trong quá trình khai thác. Điều này dẫn đến phương án xây dựng các tuyến đường sắt trên cao là lựa chọn của nhiều quốc gia. Hình 1.1 thể hiện tỷ lệ phần trăm chiều dài cầu ĐSTĐC trên tổng chiều dài ĐSTĐC ở các quốc gia tính tới năm 2013, trong đó Trung Quốc có hơn 5.000 km là cầu ĐSTĐC trên tổng số gần 10.000 km ĐSTĐC. Tại Pháp, với tổng chiều dài 1.576 km và tốc độ thương mại cao nhất là 320 km/h, tỷ lệ sử dụng cầu ĐSTĐC cho các tuyến khác nhau dao động từ 1,3 - 32,2% [4]. Hệ thống ĐSTĐC của Đức với tổng chiều dài 1.265 km và tốc độ thương mại cao nhất là 300 km/h, tỷ lệ sử dụng cầu là 2,7 - 12,2%. Tương tự, hệ thống ĐSTĐC của Ý, Tây Ban Nha và Nhật Bản, với tổng chiều dài 533 km

143 km và 2.049 km có tỷ lệ sử dụng cầu tương ứng nằm trong khoảng 2,5 - 19,5% [4], 3,2% [5] và 33,3 - 61,5% [6].



Hình 1.1: Tỷ lệ phần trăm chiều dài cầu ĐSTDTC trên tổng chiều dài ĐSTDTC ở các quốc gia tính tới năm 2014 [3]

Với các yêu cầu liên quan tới đất nền canh tác (đất nông nghiệp), không giao cắt đồng mức với các tuyến vận tải đường bộ nhằm đảm bảo an toàn trong quá trình khai thác, theo đánh giá của nhóm nghiên cứu, Việt Nam sẽ lựa chọn phương án thiết kế có tỷ lệ sử dụng cầu trên tổng chiều dài tuyến cao. Việc nghiên cứu đánh giá, so sánh và lựa chọn mô hình tải trọng cũng như các điều kiện giới hạn áp dụng cho cầu ĐSTDTC dựa trên kinh nghiệm thiết kế của các quốc gia có hệ thống ĐSTDTC phát triển vì vậy là cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn, đặc biệt trong bối cảnh Việt Nam đang xây dựng hệ thống tiêu chuẩn thiết kế cầu ĐSTDTC.

Nội dung bài báo tập trung phân tích ứng xử tĩnh của

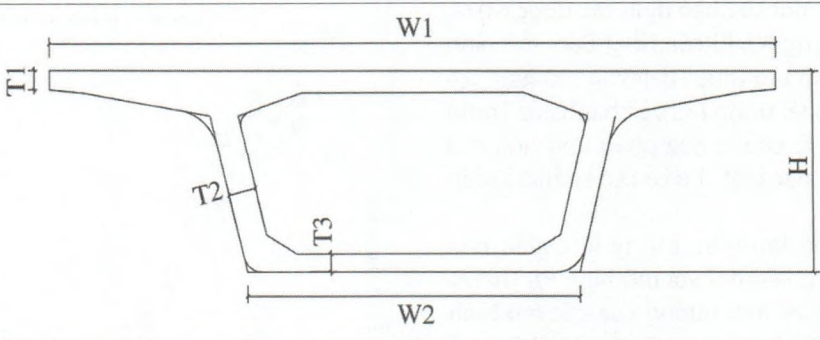
nhóm cầu dầm hộp BTCT dự ứng lực có khẩu độ 20 m, 24 m và 32 m, chịu tác dụng của các mô hình hoạt tải theo tiêu chuẩn châu Âu, Nhật Bản và Trung Quốc. Với mỗi kết cấu, phân lực gối tựa, mô-men và chuyển vị thẳng đứng tại mặt cắt giữa dầm, chuyển vị góc xoay tại đầu dầm, được tính toán theo 9 mô hình hoạt tải khác nhau. Nghiên cứu đưa ra một số kết luận và khuyến cáo trong việc lựa chọn mô hình hoạt tải và các điều kiện giới hạn.

2. MÔ HÌNH TẢI TRỌNG

ĐSTDTC nói chung được phân loại là đường sắt dành riêng cho vận chuyển hành khách, đường sắt hỗn hợp hành khách - hàng hóa nằm trên các trục chính và đường sắt liên tỉnh. Như vậy, sẽ có sự khác nhau về tải trọng thiết kế liên quan tới loại tàu và tốc độ vận hành được áp dụng cho mỗi tuyến. Ví dụ, các nước trong cộng đồng chung châu Âu sử dụng tiêu chuẩn Eurocodes [7], áp dụng các mô hình tải trọng lý thuyết nhằm bao quát tất cả các loại tải trọng có thể xảy ra trong quá trình vận hành kết nối các mạng lưới đường sắt của nhiều quốc gia. Nhật Bản, với vùng địa lý độc lập, lựa chọn mô hình tải trọng sát với tải trọng của các đoàn tàu thực tế. Trung Quốc sử dụng tải trọng ZK có giá trị bằng 0,8 tải trọng LM71 theo tiêu chuẩn châu Âu (viết tắt ZK = 0,8 LM71) cho các cầu trên tuyến dành riêng cho vận chuyển hành khách và tải trọng bằng 0,6 LM71 cho cầu đường sắt liên tỉnh [1].

Trong phần này, một số mô hình hoạt tải theo tiêu chuẩn Eurocodes [7], Nhật Bản [8] và Trung Quốc [9] được tổng hợp và sử dụng cho tính toán phản ứng tĩnh của cầu dầm hộp BTCT dự ứng lực với 3 loại nhịp điển hình có khẩu độ là 20 m, 24 m và 32 m. Đây cũng là các khẩu độ được sử dụng nhiều nhất cho cầu dầm tĩnh định tại Trung Quốc [1]. Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo này, 9 mô hình hoạt tải được lựa chọn, các mô hình này được miêu tả cụ thể trong Hình 2.1.

Loại tải trọng	Mô hình tải trọng
Mô hình LM71 theo Tiêu chuẩn EC [7]	
Mô hình HSLMA1 theo Tiêu chuẩn EC [7]	
Mô hình HSLMB theo Tiêu chuẩn EC [7]	



Trong phạm vi bài báo, các phản ứng tĩnh của cầu khi chịu ảnh hưởng của đoàn hoạt tải tiêu chuẩn như Hình 2.1 sẽ được tính toán và so sánh nhằm đưa ra một số kết luận về mô hình hoạt tải theo các tiêu chuẩn khác nhau. Các phản ứng tĩnh (chuyển vị thẳng đứng và chuyển vị góc xoay) phụ thuộc vào đặc trưng hình học của mặt cắt dọc theo trục cầu nên mô hình sử dụng phần tử dầm có mô-men kháng uốn I, diện tích mặt cắt ngang A và đặc trưng vật liệu là mô-đun đàn hồi E. Các thông số hình học và vật liệu sử dụng cho mô hình tĩnh được tổng hợp trong Bảng 3.2. Mô hình tải trọng và kết quả được thực hiện trên phần mềm KD-Railway [13]. Phần mềm KD-Railway có giao diện được phát triển bởi ngôn ngữ C# và Python, tích hợp các thư viện tính toán kết cấu theo phương pháp phần tử hữu hạn trên nền mã nguồn mở Cast3M. Tính chính xác của phần mềm KD-Railway đã được kiểm chứng dựa trên các so sánh với kết quả thí nghiệm và kết quả mô phỏng trên phần mềm thương mại Midas.

Bảng 3.2. Các đặc trưng hình học và vật liệu sử dụng trong mô phỏng

	I (m ⁴)	A (m ²)	E (GPa)
L = 20m	6,6	7,88	37,28
L = 24m	10,46	7,65	37,28
L = 32m	10,46	7,65	37,28

Mục tiêu của nghiên cứu là so sánh phản ứng tĩnh của cầu theo các mô hình tải trọng tiêu chuẩn khác nhau nên kết quả nội lực và chuyển vị không được nhân với hệ số an toàn hoặc hệ số động. Các đáp ứng tĩnh do mô hình hoạt tải gây ra được tính toán theo phương pháp xếp tải trên đường ảnh hưởng cho 2 làn tàu chạy song song. Phương pháp xếp tải trên đường ảnh hưởng được phần mềm xử lý qua các vòng lặp có bước xếp tải bằng 10 cm (tải trọng được đặt lần lượt theo các vị trí trên cầu theo bước nhảy 10 cm). Phụ thuộc vào chiều dài cầu, vị trí và chiều dài mô hình tải trọng mà số bước chạy được tính toán và lập trình tự động trên phần mềm KD-Railway. Kết quả đạt được là vị trí đoàn tàu (vị trí xếp tải) cho phản ứng tĩnh đạt giá trị bất lợi nhất (giá trị tuyệt đối lớn nhất) theo các tiêu chí về nội lực và biến dạng.

4. PHÂN TÍCH ỨNG XỬ CỦA CẦU THEO CÁC MÔ HÌNH HOẠT TẢI TIÊU CHUẨN

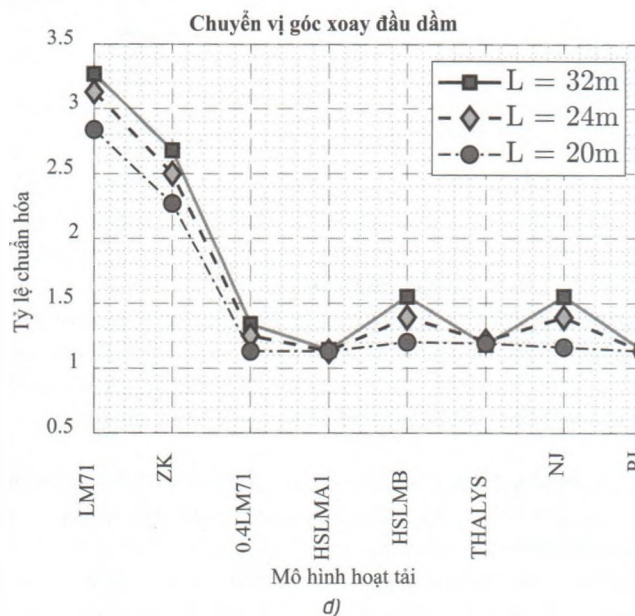
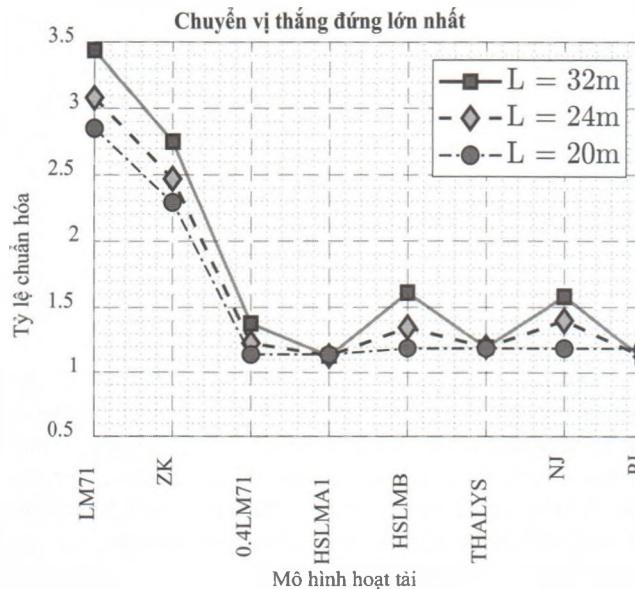
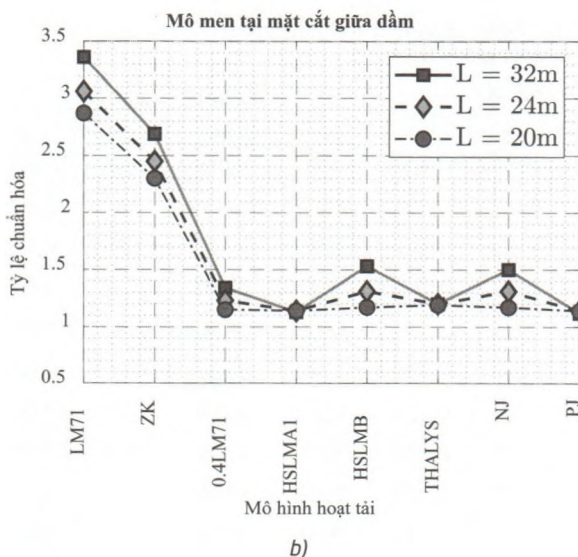
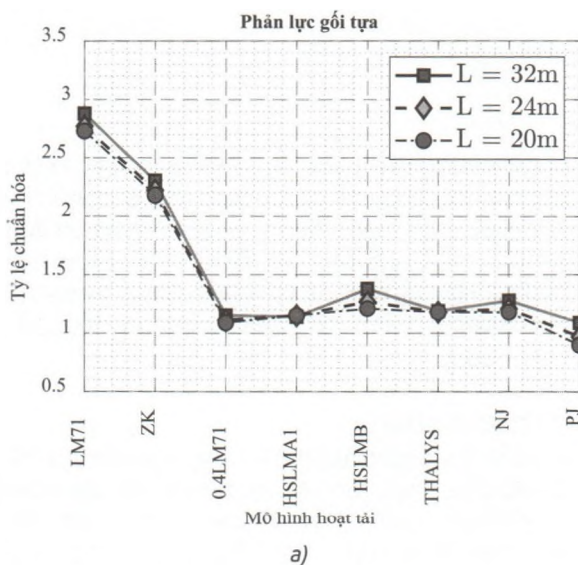
Bảng 4.1 tổng hợp kết quả phản lực gối tựa, mô-men và chuyển vị thẳng đứng tại mặt cắt giữa nhịp, chuyển vị xoay tại mặt cắt ở hai đầu dầm cho 9 trường hợp tải trọng ứng với 3 cầu có khẩu độ khác nhau. Hình 4.1 mô tả tỷ lệ đáp ứng của kết cấu được chuẩn hóa theo kết quả nhận được bằng mô hình tải trọng CRH380BL, giúp chúng ta quan sát được mối tương quan về phản lực gối tựa (Hình 4.1a), mô-men tại mặt cắt giữa dầm (Hình 4.1b), chuyển vị thẳng đứng tại mặt cắt giữa dầm (Hình 4.1c) và chuyển vị góc xoay tại mặt cắt đầu dầm (Hình 4.1d).

Bảng 4.1. Phản lực gối tựa (R), mô-men (M) tại mặt cắt giữa dầm, chuyển vị thẳng đứng (d) tại mặt cắt giữa dầm, chuyển vị góc xoay (r) tại đầu dầm

	Span L = 32 m				Span L = 24 m				Span L = 20 m			
Mô hình hoạt tải	R kN	M kNm	d mm	r ‰	R kN	M kNm	d mm	r ‰	R kN	M kNm	d mm	r ‰
LM71	3592	27558	8,25	0,72	2928	16646	3,06	0,325	2589	12150	1,68	0,199
ZK	2874	22057	6,62	0,59	2343	13317	2,45	0,26	2072	9720	1,35	0,159
0,4LM71	1437	11023	3,33	0,295	1171	6658	1,22	0,13	1036	4860	0,67	0,079
HSLMA1	1423	9277	2,72	0,25	1217	6168	1,12	0,118	1095	4820	0,67	0,079
HSLMB	1727	12580	3,86	0,34	1339	7140	1,34	0,145	1148	4930	0,70	0,084
THALYS	1487	9863	2,89	0,26	1244	6496	1,19	0,126	1125	5030	0,71	0,083
CRH380BL	1248	8209	2,41	0,22	1056	5434	0,99	0,104	949	4226	0,59	0,07
NJ	1600	12336	3,79	0,34	1280	7129	1,39	0,145	1120	4960	0,70	0,081
PJ	1360	9233	2,68	0,25	1020	6173	1,12	0,118	850	4820	0,69	0,079

Từ kết quả đạt được, một số nhận định sau được rút ra:

- Các mô hình tải trọng NJ, PJ của Nhật Bản, mô hình HLSMA1, HSLMB, mô hình tàu thực Thalys và mô hình 0,4 LM71 cho kết quả sát với tải trọng tàu vận hành của Trung Quốc (CRH380BL) khi tỷ lệ chuẩn hóa phản ứng tĩnh của các mô hình này xấp xỉ 1, đặc biệt cho cầu có khẩu độ nhịp $L = 20\text{ m}$.
- Với cầu có khẩu độ lớn hơn, các tỷ lệ chuẩn hóa này vẫn không thay đổi nhiều đối với mô hình PJ, Thalys, HLSMA1. Điều này cho thấy ảnh hưởng của các mô hình tải trọng tàu thực đang vận hành tại châu Âu, Nhật Bản và Trung Quốc có mối tương quan nhất định.
- Tải thiết kế ZK (tương ứng 0,8 LM71) cho đáp ứng lớn hơn 2 lần tải trọng tàu đang hoạt động (cho cả 3 loại tàu thực tế ở châu Âu, Nhật Bản và Trung Quốc) nên mô hình hoạt tải tiêu chuẩn hiện tại được sử dụng ở châu Âu và Trung Quốc được xem là an toàn.
- Xem xét chấp nhận biên độ an toàn với mô hình tải trọng 0,4 LM71 làm tải trọng thiết kế cho cầu dầm hộp, nhịp giản đơn trên tuyến đường dành riêng cho hành khách, với chiều dài nhịp 20 m, 25 m và 30 m.



Hình 4.1: Tỷ lệ đáp ứng của kết cấu chuẩn hóa theo mô hình đoàn tàu CRH380BL

Qua so sánh này, chúng ta thấy rõ hơn quan điểm tính toán và lựa chọn mô hình tải trọng lý thuyết theo tiêu chuẩn Trung Quốc. Họ chấp nhận lựa chọn mô hình tải trọng chỉ bằng 0,8 LM71 với mục tiêu sử dụng ĐSTDĐC là phương tiện vận chuyển hành khách với các mô hình đoàn tàu thực có tải trọng trung bình chỉ bằng 0,4 LM71. Việt Nam có thể tham khảo quan điểm lựa chọn mô hình tải trọng này để xây dựng mô hình tải trọng tiêu chuẩn áp dụng cho dự án ĐSTDĐC trong tương lai.

5. KẾT LUẬN

Quy mô và tốc độ xây dựng của ĐSTDĐC đang ngày càng phát triển ở nhiều quốc gia trên thế giới, trong đó tỷ lệ sử dụng cầu cho ĐSTDĐC ở nhiều nước, đặc biệt là Nhật Bản và Trung Quốc, trong đó nhiều tuyến có tổng chiều dài cầu ĐSTDĐC lên tới 95% tổng chiều dài tuyến. Cầu ĐSTDĐC

hạng lại nhiều lợi thế về khả năng chịu lực so với đường sắt thông thường khi vượt qua các vùng đất yếu, bảo vệ được môi trường sinh thái khi không sử dụng đất nền canh tác, không giao cắt đồng mức với các tuyến đường bộ. Việc nghiên cứu, cập nhật và ứng dụng các tiêu chuẩn thiết kế cầu ĐSTĐC có ý nghĩa thiết thực, góp phần xây dựng bộ tiêu chuẩn ĐSTĐC cho Việt Nam trong thời gian tới.

Các kết quả cụ thể đã đạt được trong nghiên cứu:

- Tổng hợp 9 mô hình hoạt tải theo tiêu chuẩn Eurocodes, Nhật Bản và Trung Quốc;
- Mô phỏng và tính toán 3 cầu BTCT dự ứng lực dạng dầm hộp có khẩu độ là 20 m, 24 m, 32 m chịu tác động tĩnh của 9 mô hình hoạt tải theo phương pháp xếp tải trên cầu ảnh hưởng;
- So sánh điều kiện giới hạn về độ võng giữa dầm và góc xoay đầu dầm giữa tiêu chuẩn châu Âu, Nhật Bản và Trung Quốc.

Các mô hình hoạt tải NJ, PJ của Nhật Bản, HSLMA1, HSLMB, Thalys, 0,4 LM71 cho kết quả sát với mô hình đoàn tàu thực tế CRH380BL của Trung Quốc, điều đó chứng minh ảnh hưởng của các mô hình tải trọng tàu thực đang vận hành tại châu Âu, Nhật Bản và Trung Quốc có mối tương quan nhất định. Kết quả so sánh thể hiện tải thiết kế ZK tương ứng 0,8 LM71 theo tiêu chuẩn Trung Quốc cho đáp ứng lớn hơn 2 lần tải trọng tàu đang hoạt động (cho cả 3 loại tàu thực tế ở châu Âu, Nhật Bản và Trung Quốc). Trên cơ sở đó, mô hình tải trọng 0,6 LM71 được khuyến nghị là tải trọng thiết kế cho cầu dầm hộp BTCT, nhịp đơn giản trên tuyến đường dành riêng cho hành khách, với chiều dài nhịp 20 m, 24 m và 32 m. Các điều kiện giới hạn về độ võng giữa dầm và chuyển vị xoay đầu dầm được kiểm chứng theo cả 3 tiêu chuẩn.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghệ GTVT trong Đề tài mã số ĐTTĐ2021-25.

Tài liệu tham khảo

- [1]. B. Yan, G.-L. Dai and N. Hu, *Recent development of design and construction of short span high-speed railway bridges in China*, Engineering Structures, 100(2015) 707-717 (<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.050>).
- [2]. International Union of Railways (2019), *High Speed Rail - Fast Track To Sustainable Mobility*, UIC.
- [3]. N. Hu, G.-L. Dai, B. Yan and K. Liu, *Recent development of design and construction of medium and long span high-speed railway bridges in China*, Engineering Structures, 74(2014) 233-241 (<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.052>).
- [4]. J. Bouley (1994), *A Short History of 'High-Speed' Railway in France Before the TGV*, Japan Railway & Transport Review, 3 (https://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr03/f49_bou.html).
- [5]. E. C. D. G. for M. and Transport (2010), *High-speed Europe: A Sustainable Link Between Citizens*, Publications Office of the European Union.
- [6]. M. Taniguchi (1992), *High Speed Rail in Japan: A Review and Evaluation of the Shinkansen Train*, UCTC (<https://escholarship.org/uc/item/5s48m11f>).

[7]. Eurocode 01 (2004), *Actions on structures*, CEN.

[8]. Institute of Railway Comprehensive Technology of Japan (2007), *Design standards for railway structures*, IRCT-J.

[9]. People's Republic of China National Railway Administration (2014), *Code for design of High Speed Railway (including its explanation) (TB 10621 - 2014)*, China Railway Press.

[10]. H. Xia, G. De Roeck and N. Zhang (2003), *Experimental analysis of a high-speed railway bridge under Thalys trains*, J Sound Vib, 268 ([https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00202-5](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00202-5)).

[11]. N. Zhang, Y. Tian and H. Xia (2016), *A Train-Bridge Dynamic Interaction Analysis Method and Its Experimental Validation*, Engineering, 2, 528-536 (<https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.012>).

[12]. G. Dai, M. Su and Y. F. Chen (2016), *Design and Construction of Simple Beam Bridges for High-Speed Rails in China: Standardization and Industrialization*, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 11 (<https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.32>).

[13]. Đ. Nguyễn Văn and K. Lê Nguyên (2020), *Nghiên cứu phương pháp tính toán hiệu ứng do các loại tải trọng đoàn tàu trên cầu và ĐSTĐC bằng mô hình lý thuyết kết hợp phương pháp số và thực nghiệm*, Đề tài cấp Bộ GTVT.

Ngày nhận bài: 25/6/2022

Ngày chấp nhận đăng: 19/7/2022

**Người phản biện: TS. Nguyễn Thùy Anh
TS. Phùng Bá Thắng**