

Phân tích hiện tượng cộng hưởng cầu đường sắt tốc độ cao nhịp ngắn dạng dầm hộp bê tông cốt thép dự ứng lực

■ TS. PHÙNG BÁ THẮNG^(*); TS. LÊ NGUYỄN KHƯƠNG

Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

■ ThS. TRẦN QUANG ĐÔNG

Công ty Cổ phần Tư vấn xây dựng công trình Thăng Long

Email: ^(*)thangpb@utt.edu.vn

TÓM TẮT: Bài báo trình bày kết quả phân tích động lực học cầu đường sắt tốc độ cao dạng dầm hộp bê tông cốt thép dự ứng lực với chiều dài nhịp $L = 20$ m, $L = 24$ m và $L = 32$ m. Mỗi cầu được tính toán theo 16 mô hình tải trọng, bao gồm 10 mô hình tải trọng thiết kế theo tiêu chuẩn Eurocode và 6 mô hình tàu thực tế đang được sử dụng tại châu Âu. Kết quả nghiên cứu đã chứng minh rằng hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi chiều dài giữa hai trục bánh xe liên tiếp của tàu là bội số nguyên dương của bước sóng do tải trọng từ tàu kích thích. Đồng thời, ứng xử động lực học bất lợi cho cả ba cầu được phát hiện ở dải vận tốc trên 300 km/h.

TỪ KHÓA: Mô hình đoàn tàu HSLM-A, cầu đường sắt tốc độ cao, phân tích động lực học, hiện tượng cộng hưởng.

ABSTRACT: The paper presents the results of a dynamic analysis of 3 prestressed reinforced concrete bridges with different span lengths ($L = 20$ m, $L = 24$ m and $L = 32$ m) subjected to 16 different train models including 10 conventional HSLMA trains and 6 real train models used in Europe. The study found that resonance occurs when the length of the train carriages is a positive multiple of the wavelength of the excitation load. The most unfavourable conditions for the bridges were found to occur at speeds above 300 km/h.

KEYWORDS: HSLM-A train models, High-speed railway bridge, dynamic analysis, resonance phenomenon.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong kết cấu cầu đường sắt tốc độ cao với tốc độ khai thác trên 200 km/h, ứng xử động lực học trong tương tác giữa tàu và cầu có thể gây ra các hệ quả không mong muốn như hư hỏng cục bộ, mất ổn định lớp nền ballast và rung lắc gây khó chịu cho hành khách. Hiện tượng này đặc biệt

ngghiêm trọng đối với các cầu dầm giản đơn nhịp ngắn đến trung bình, do hệ số giảm chấn kết cấu thấp và tần số dao động riêng cũng như khẩu độ của cầu dễ tạo ra hiện tượng cộng hưởng [1, 2].

Các phản ứng động lực học của cầu đường sắt chịu ảnh hưởng của nhiều tham số, trong đó hiện tượng cộng hưởng từ tải trọng trực di chuyển có tính lặp lại theo chu kỳ của các đoàn tàu là yếu tố bất lợi nhất. Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã chứng minh, tương tác tàu-cầu gây ra tác động bất lợi nhất cho cầu khi sử dụng giả thuyết đơn giản hóa, coi đoàn tàu di chuyển theo mô hình đoàn tải trọng tập trung di chuyển qua cầu [3]. Giả thuyết này cũng được áp dụng trong tiêu chuẩn Eurocode cho giai đoạn thiết kế mặt cắt dọc cầu, sử dụng mô hình đoàn tải trọng tập trung HSLM-A, đảm bảo kết quả tìm được cho tương tác bất lợi hơn so với các mô hình đoàn tàu thực tế [4].

2. PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH VÀ MÔ HÌNH TẢI TRỌNG TÍNH TOÁN

2.1. Phương pháp phân tích

Việc phân tích động lực học cầu đường sắt tốc độ cao không đơn giản như tính toán theo phương pháp áp dụng tải trọng tĩnh tương đương. Các giá trị chuyển vị và gia tốc lớn nhất tại các mặt cắt theo thời gian có thể ước lượng bằng công thức giải tích hoặc mô phỏng số. Dựa trên nền mã nguồn mở Cast3M [5] được phát triển bởi Hiệp hội Năng lượng nguyên tử Pháp, chương trình KD-Railway đã được phát triển [6] cho phép người dùng tính toán động lực học cầu đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) theo phương pháp phần tử hữu hạn, sử dụng nguyên lý xếp chồng dạng dao động (modal superposition dynamic analysis). Độ tin cậy của phần mềm KD-Railway đã được chứng minh trong nghiên cứu [6].

2.2. Mô hình tải trọng sử dụng cho nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, tải trọng thiết kế HSLM-A theo tiêu chuẩn Eurocode [7] bao gồm 10 mô hình tải trọng với số lượng toa tàu, chiều dài toa xe, khoảng cách trục bánh và tải trọng trục khác nhau được sử dụng. Ngoài ra, nghiên cứu còn sử dụng 6 mô hình đoàn tàu thực tế đang được sử dụng tại các nước châu Âu bao gồm ICE2, Thalys2, Eurostar, ETR-Y, Talgo AV2, Virgin. Mô hình tải trọng di chuyển trong dải vận tốc từ 200 km/h đến 400 km/h.

3. TRƯỜNG HỢP TÍNH TOÁN

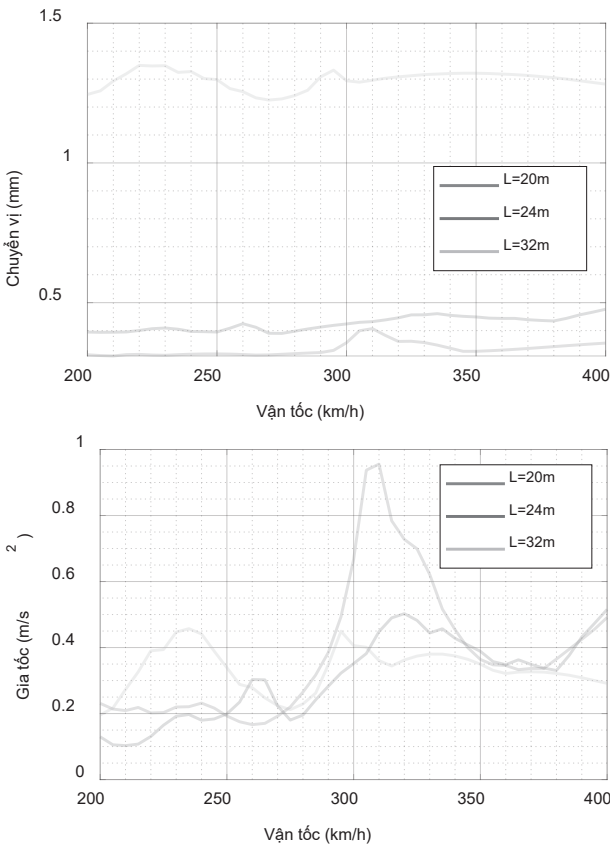
3.1. Thông số đặc trưng của kết cấu

Trong nghiên cứu này, ba cầu dầm nhịp giản đơn với khẩu độ 20 m, 24 m và 32 m dạng dầm hộp bê tông cốt thép (BTCT) dự ứng lực được sử dụng cho phân tích động lực học. Thông số về kích thước tiết diện của 3 cầu theo nghiên cứu tổng hợp của Yan và các cộng sự [4].

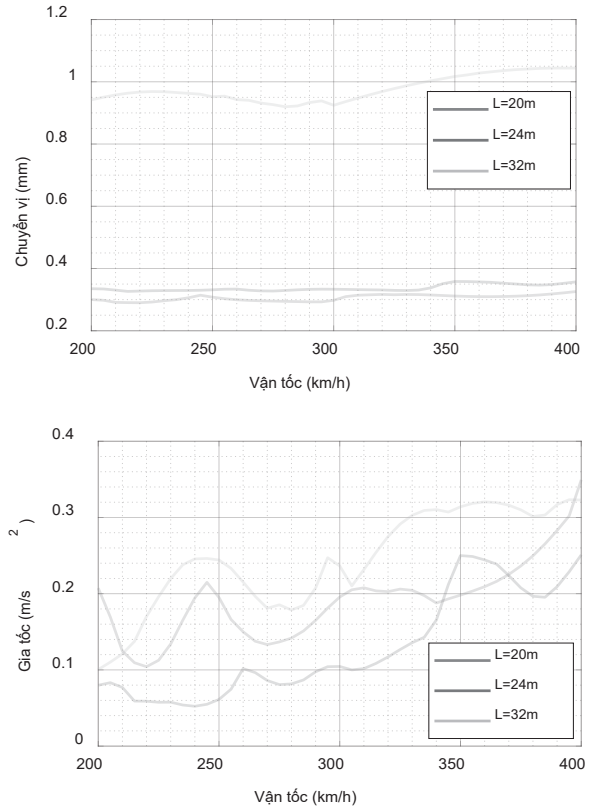
Dạng dao động riêng đầu tiên theo phương uốn trong mặt phẳng đứng của cầu nhịp 20 m, 24 m và 32 m có tần số dao động lần lượt là 12,99 Hz, 11,08 Hz, và 6,23 Hz. Các tần số này có so sánh đối chiếu với kết quả tính toán của những cầu cùng loại đã được công bố trong nghiên cứu khác liên quan tới cầu dầm BTCT dự ứng lực đang được xây dựng cho hệ thống đường sắt HS2 tại Anh [8].

3.2. Hiện tượng cộng hưởng

Hình 3.1 và Hình 3.2 so sánh chuyển vị và gia tốc thẳng đứng lớn nhất của 3 cầu chịu tác động của tàu Talgo AV2 và tàu ETR-Y-500. Khi xét riêng tác động của tàu AV2 (Hình 3.1), ta nhận thấy chuyển vị của cầu có khẩu độ $L = 32$ m là lớn nhất trong 3 cầu nhưng gia tốc lớn nhất lại xuất hiện trên cầu có khẩu độ $L = 20$ m khi tốc độ di chuyển của tàu là 310 km/h. Nhận định trên chỉ còn đúng cho chuyển vị trong trường hợp tải trọng tác dụng là tàu ETR-Y-500 (Hình 3.2). Xét về giá trị chuyển vị trong 2 trường hợp tải trọng, sự khác nhau là không rõ rệt và được giải thích bởi tải trọng trục của ETR-Y-500 là 120 kN, trong khi tải trọng trục của Talgo AV2 là 170kN. Tuy nhiên, giá trị gia tốc trong hai trường hợp tải trọng có sai khác tới 400% khi xét riêng cầu có khẩu độ $L = 20$ m chịu tác dụng của tải trọng di chuyển với vận tốc $v = 310$ km/h.



Hình 3.1: Đường bao chuyển vị và gia tốc tàu Talgo AV2



Hình 3.2: Đường bao chuyển vị và gia tốc tàu ETR-Y-500

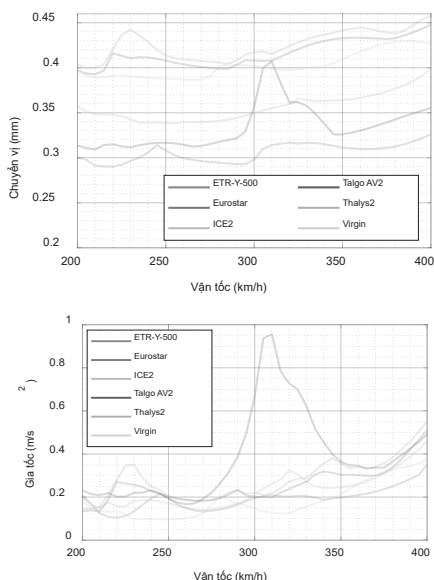
Như vậy, giá trị gia tốc xuất hiện trên cầu bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi về tải trọng tác dụng và vận tốc di chuyển của tàu hơn là chuyển vị thẳng đứng tại mặt cắt giữa cầu. Một trong các lý do chính gây ra sự khác biệt về gia tốc trong hai trường hợp này còn là hiện tượng cộng hưởng xuất hiện trong trường hợp tàu Talgo AV2 di chuyển với vận tốc 310 km/h qua cầu có khẩu độ $L = 20$ m.

Hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi tần số của tải trọng kích thích trùng với tần số dao động riêng của kết cấu. Trong trường hợp cầu đường sắt tốc độ cao, hiện tượng cộng hưởng có thể được xác định qua tỷ lệ giữa bước sóng của tải trọng kích thích λ (m) và khoảng cách lặp lại của tải tác dụng (xác định theo chiều dài điển hình của toa tàu). Tỷ lệ này là số nguyên dương hoặc gần bằng một số nguyên dương thì hiện tượng cộng hưởng sẽ xảy ra [9]. Bước sóng của tải trọng kích thích được xác định theo công thức $\lambda = v / f_0$, trong đó v là vận tốc di chuyển của đoàn tàu, f_0 là tần số dao động đầu tiên của cầu.

Lấy ví dụ trường hợp cầu có khẩu độ $L = 20$ m, tần số dao động riêng đầu tiên của cầu là $f_0 = 12,99$ Hz, vận tốc di chuyển của đoàn tàu là 320 km/h tương ứng $v = 86,11$ m/s. Bước sóng của tải kích thích $\lambda = v / f_0 = 6,29$ m. Tàu Talgo AV2 có khoảng cách trục điển hình là $D = 13,14$ m, sẽ tạo ra hiện tượng cộng hưởng ở vận tốc 310 km/h do tỷ lệ $D/\lambda \approx 2$.

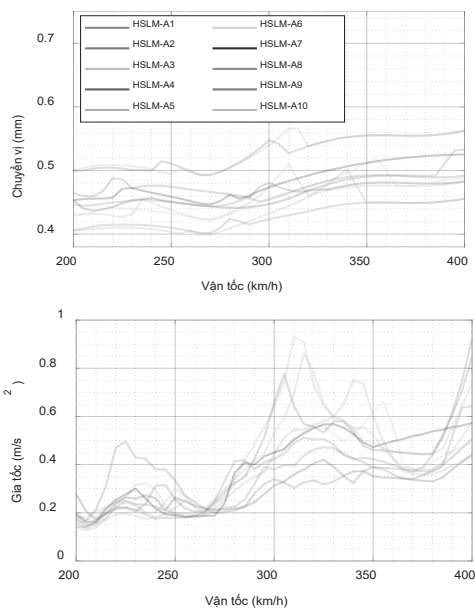
3.3. Ứng xử động lực học với cầu có khẩu độ $L = 20$ m

Với tác động của 6 mô hình tải trọng thực tế (Hình 3.3), tàu Thalys 2 và Eurostar cho chuyển vị lớn nhất, tuy nhiên tàu Talgo AV2 lại cho gia tốc dao động lớn nhất do hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi tàu di chuyển với vận tốc 310 km/h.



Hình 3.3: Chuyển vị và gia tốc cầu có khẩu độ $L = 20$ m chịu tác động của 6 mô hình tải trọng thực tế

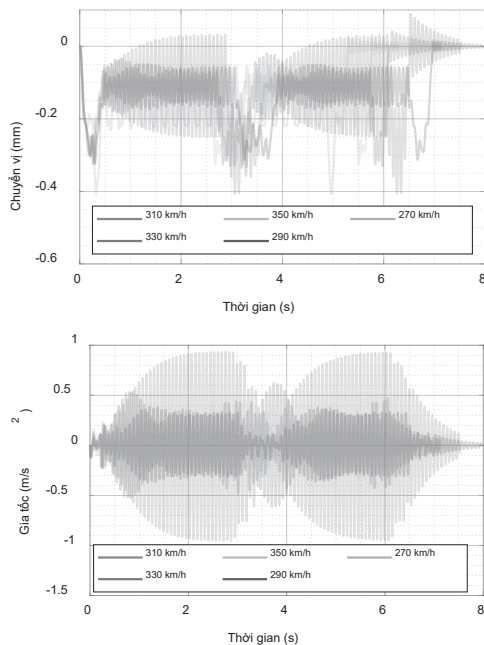
Với 10 mô hình tải trọng HSLMA, chuyển vị thẳng đứng do tàu HSLM A9 và HSLM A10 là lớn nhất do tải trọng trực của hai mô hình tải trọng này là 210 kN, lớn nhất trong số 10 mô hình HSLMA. Gia tốc lớn nhất xuất hiện trên cầu ứng với 3 mô hình tải trọng HSLM A3, HSLM A9 và HSLM A10. Ở 3 mô hình tải trọng này, khoảng cách trực điển hình lần lượt là 20 m, 26 m và 27 m, tương ứng tạo ra các giá trị tỷ lệ so với bước sóng kích thích ở vận tốc 310 km/h là 3,01, 3,92 và 4,07. Như vậy, các đoàn tàu này di chuyển ở khoảng vận tốc 310 km/h tới 320 km/h sẽ tạo ra hiệu ứng cộng hưởng bất lợi nhất. Điều này cũng được khẳng định qua kết quả tính gia tốc thẳng đứng lớn nhất theo Hình 3.4.



Hình 3.4: Chuyển vị và gia tốc của cầu có khẩu độ $L = 20$ m chịu tác động của 10 mô hình tải trọng HSLMA

Để thấy rõ hơn hiện tượng cộng hưởng do 6 mô hình đoàn tàu thực tế tạo ra, xét riêng tàu Talgo AV2, Hình 3.5 thể hiện chuyển vị và gia tốc theo thời gian xuất hiện tại mặt

cắt giữa dầm cầu khi cầu chịu tác dụng của tàu Talgo AV2 di chuyển với các vận tốc khác nhau. Giá trị chuyển vị và gia tốc lớn nhất đều xảy ra trong trường hợp $v = 310$ km/h.

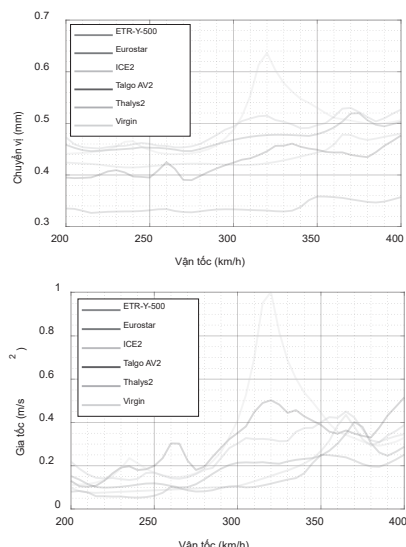


Hình 3.5: Chuyển vị và gia tốc theo thời gian tại mặt cắt giữa dầm cầu $L = 20$ m dưới tác dụng của tàu Talgo AV2 di chuyển với các vận tốc khác nhau

3.4. Ứng xử động lực học của cầu có khẩu độ $L = 24$ m

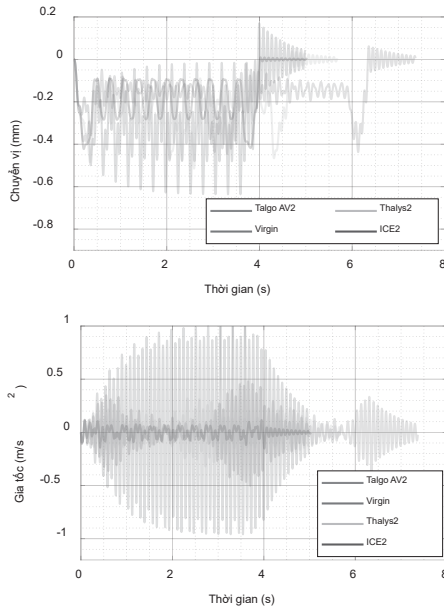
Hình 3.6 thể hiện đường bao chuyển vị và gia tốc của cầu chịu tác động của 6 mô hình tải trọng thực tế, tàu Virgin cho chuyển vị và gia tốc lớn nhất do hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi di chuyển với vận tốc 320 km/h.

Lý giải cho kết quả này, có thể tính tỷ lệ giữa bước sóng của tải trọng kích thích λ (m) và khoảng cách lặp lại của tải tác dụng (xác định theo chiều dài điển hình của toa tàu). Cụ thể, bước sóng của tải kích thích $\lambda = v / f_0 = 8,02$ m. Tàu Virgin có khoảng cách trực điển hình là $D = (21,8 - 2,1 - 2,7) = 17$ m, sẽ tạo ra hiện tượng cộng hưởng với cầu ở vận tốc 320 km/h do tỷ lệ $D / \lambda \approx 2$ (là số nguyên dương).



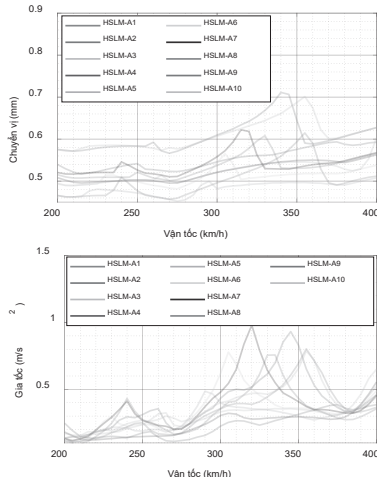
Hình 3.6: Chuyển vị và gia tốc của cầu có khẩu độ $L = 24$ m chịu tác động của 6 mô hình tải trọng thực tế

Hình 3.7 mô tả chuyển vị và gia tốc theo thời gian tại mặt cắt giữa dầm cầu khi chịu tác dụng của 4 đoàn tải trọng thực tế di chuyển với vận tốc 320 km/h. Chuyển vị lớn nhất tại mặt cắt giữa dầm cho thấy sự ảnh hưởng của hiệu ứng cộng hưởng, tàu Virgin cho chuyển vị lớn hơn 50% các tàu còn lại. Kết quả gia tốc thẳng đứng phản ánh hiện tượng cộng hưởng rõ ràng hơn đối với tàu Virgin.



Hình 3.7: Chuyển vị và gia tốc theo thời gian tại mặt cắt giữa dầm cầu L = 24 m khi cầu chịu tác dụng của 4 đoàn tải trọng thực tế di chuyển với vận tốc 320 km/h

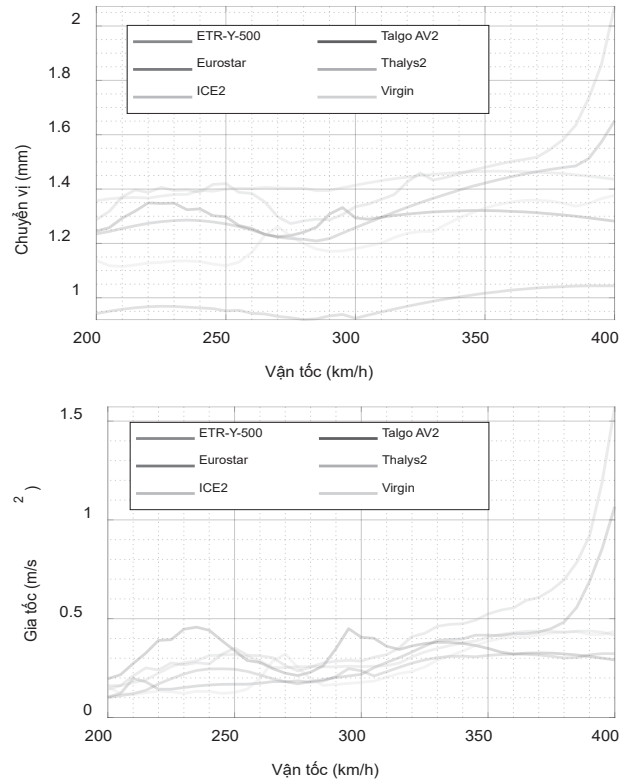
Xét ảnh hưởng của 10 mô hình tải trọng HSLMA, chuyển vị thẳng đứng do tàu HSLM A9 và HSLM A10 là lớn nhất tại hai vận tốc 340 km/h và 355 km/h. Tuy nhiên, gia tốc lớn nhất ứng với 2 mô hình tải trọng HSLM A7 và HSLM A9 tại các vận tốc di chuyển tương ứng là 320 km/h và 345 km/h. Giá trị đỉnh tại các biểu đồ bao vận tốc và gia tốc với mỗi mô hình tàu đều ứng với một giá trị vận tốc di chuyển cụ thể của tàu, vận tốc này được coi là vận tốc gây ra cộng hưởng. Tùy thuộc vào tốc độ khai thác của tuyến đường mà chúng ta lựa chọn giá trị phù hợp cho công trình trong giai đoạn thiết kế.



Hình 3.8: Chuyển vị và gia tốc của cầu có khẩu độ L = 24 m chịu tác động của 10 mô hình tải trọng HSLMA

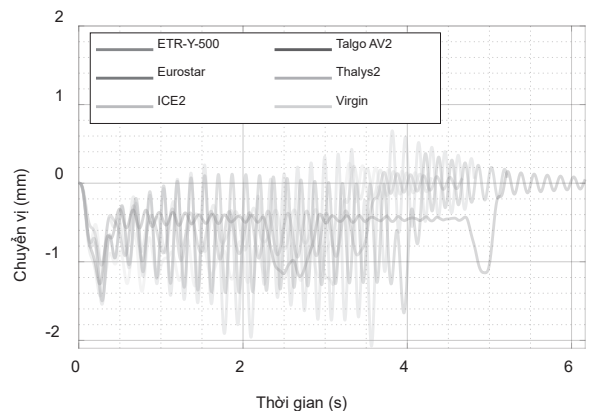
3.5. Ứng xử động lực học của cầu có khẩu độ L = 32 m

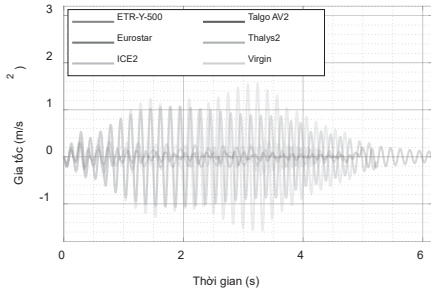
Hình 3.9 thể hiện đường bao chuyển vị và gia tốc cầu chịu tác động của 6 mô hình tải trọng thực tế, các tàu đều không gây ra hiện tượng cộng hưởng khi di chuyển với vận tốc dưới 350 km/h. Hiện tượng cộng hưởng chỉ bắt đầu xuất hiện với tàu Thalys và Eurostar ở vận tốc trên 400 km/h.



Hình 3.9: Chuyển vị và gia tốc của cầu có khẩu độ L = 32 m chịu tác động của 6 mô hình tải trọng thực tế

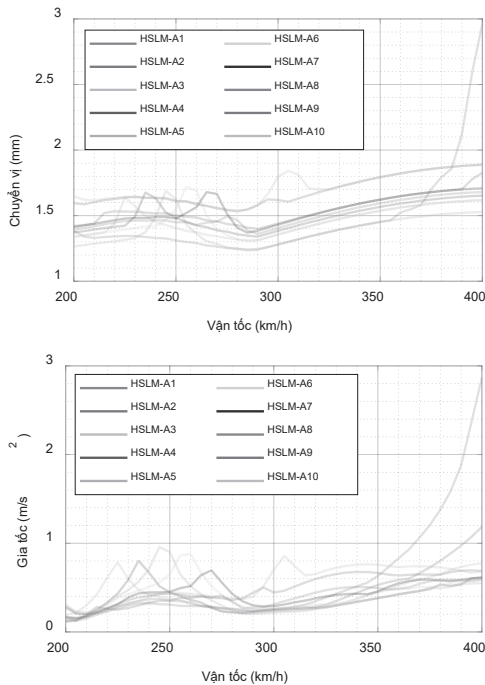
Chuyển vị và gia tốc theo thời gian xuất hiện tại mặt cắt giữa dầm khi chịu tác dụng của 6 đoàn tải trọng thực tế di chuyển với vận tốc 400 km/h được thể hiện trên Hình 3.10. Hiện tượng cộng hưởng xảy ra với hai tàu Eurostar và Thalys2. Cầu có khẩu độ L = 32 m sẽ nhận tổng tải trọng của toàn bộ toa tàu do các mô hình tàu thực tế đều có chiều dài toa tàu nhỏ hơn 30 m. Đây cũng là lý do gây ra sự khác biệt rõ rệt về chuyển vị thẳng đứng trong những trường hợp có và không xảy ra hiện tượng cộng hưởng (so sánh với với trường hợp cầu có khẩu độ L = 20 m, nhỏ hơn hầu hết chiều dài các toa tàu trong mô hình tàu thực tế).





Hình 3.10: Chuyển vị và gia tốc theo thời gian xuất hiện tại mặt cắt giữa dầm cầu $L = 32$ m khi cầu chịu tác dụng của 4 đoàn tải trọng thực tế di chuyển với vận tốc 400 km/h

Xét ảnh hưởng của 10 mô hình tải trọng HSLMA, không có hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi vận tốc di chuyển của các mô hình tải trọng này nhỏ hơn 350 km/h. Hiện tượng cộng hưởng xảy ra với mô hình tàu HSLM A1 khi vận tốc di chuyển lớn hơn 400 km/h.



Hình 3.11: Chuyển vị và gia tốc của cầu có khẩu độ $L = 32$ m chịu tác động của 10 mô hình tải trọng HSLMA

4. KẾT LUẬN

Dựa trên kết quả phân tích động lực học của 3 cầu BTCT dự ứng lực có khẩu độ khác nhau $L = 20$ m, $L = 24$ m, và $L = 32$ m, có một số kết luận:

- Hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi chiều dài điển hình của các toa tàu là bội số nguyên dương của bước sóng của tải trọng kích thích.

- Vận tốc di chuyển gây ra các điều kiện bất lợi nhất cho 3 cầu được xét tới trong nghiên cứu đều lớn hơn 300 km/h.

- Với cầu có nhịp nhỏ hơn 22 m, sự khác biệt về chuyển vị lớn nhất được tạo ra bởi các mô hình tàu thực tế và 10 mô hình tải trọng HSLM A là không lớn, ngay cả với vận tốc di chuyển gây ra hiện tượng cộng hưởng.

- Trong trường hợp cầu có khẩu độ $L = 32$ m, các tàu đều không gây ra hiện tượng cộng hưởng khi di chuyển với

vận tốc dưới 350 km/h. Hiện tượng cộng hưởng chỉ bắt đầu xuất hiện với tàu Thalys và Eurostar ở vận tốc trên 400 km/h.

- Hiện tượng cộng hưởng thể hiện rõ ràng hơn khi xem xét gia tốc dao động của cầu.

- Giá trị chuyển vị và gia tốc lớn nhất do tổ hợp mô hình tàu thiết kế HSLM A đều lớn hơn giá trị chuyển vị và gia tốc lớn nhất do 6 mô hình tàu thực tế gây ra. Điều này chứng tỏ tổ hợp mô hình tàu thiết kế HSLM A có tính phổ quát, cho phép xác định được các điều kiện bất lợi nhất do tải trọng gây ra.

Ngoài ra, với cùng một kết cấu cầu, ứng xử động lực học do các mô hình tải trọng gây ra là khác nhau, vì thế cần lựa chọn phương án kết cấu cho phép lưu thông nhiều loại tàu có thể khai thác trên cùng tuyến trong tương lai. Với các cầu đã được xây dựng, nếu trong quá trình thiết kế không xét tới ảnh hưởng của một mô hình tải trọng nào đó, cần có bước phân tích, kiểm tra lại trước khi cho phép đoàn tải trọng đó lưu thông với dải vận tốc cụ thể.

Tài liệu tham khảo

[1]. Hòa P. D., Hùng T. V., Thăng P. B. và Hằng N. T. N. (Nov., 2021), *Nghiên cứu phân tích động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc*, vol.15, no.7V, Art. no.7V, doi: 10.31814/stce.huice(nuce)2021-15(7V)-01.

[2]. S. H. Ju and H. T. Lin (Nov., 2003), *Resonance characteristics of high-speed trains passing simply supported bridges*, Journal of Sound and Vibration, vol.267, no.5, pp.1127-1141, doi: 10.1016/S0022-460X(02)01463-3.

[3]. José M. Goicolea (2011), *Resonant effects in short span high speed railway bridges: modelling and design issues*.

[4]. B. Yan, G.-L. Dai and N. Hu (Oct., 2015), *Recent development of design and construction of short span high-speed railway bridges in China*, Engineering Structures, vol.100, pp.707-717, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.06.050.

[5]. D. Combescure (Jul., 17, 2014), *Modelisation des structures de genie civil sous chargement sismique a l'aide de castem 2000*, CEA, 2001. Accessed, [Online]. Available: <http://www-cast3m.cea.fr/html/Combescure/ModeleGCCastem2000.pdf>.

[6]. L. N. Khuong and V. D. Nguyen (Jun., 2022), *KD-Railway 1.0 - A structural dynamics software for high-speed rail bridge based on open source Cast3m platform*, Journal of Science and Transport Technology, pp.41-51, doi: 10.58845/jstt.utt.2022.en.2.2.41-51.

[7]. Eurocode 01, *Actions on structures*.

[8]. V. Đ. Nguyễn và K. Le-Nguyen (2021), *Phân tích động lực học cầu đường sắt cao tốc bằng phương pháp PTHH và chống chất dạng dao động*, Tạp chí GTVT, số 7.

[9]. Y. B. Yang, J. D. Yau and Y. S. Wu (2004), *Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: With Applications to High-Speed Railways*, WORLD SCIENTIFIC, doi: 10.1142/5541.

Ngày nhận bài: 28/5/2024

Ngày nhận bài sửa: 10/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 02/7/2024