

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC DẠNG SƠ ĐỒ DÂY TREO ĐẾN ỨNG XỬ ĐỘNG CỦA CẦU VÒM THÉP ĐƯỜNG SẮT TỐC ĐỘ CAO DƯỚI TÁC DỤNG CỦA ĐOÀN TÀU

Hoàng Văn Tuấn^a, Trần Công Vinh^a, Cù Việt Hưng^{b,*}

^aCông ty TNHH Tư vấn Đại học Xây dựng, số 55 đường Giải Phóng, Phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
số 55 đường Giải Phóng, Phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 30/12/2025, Sửa xong 11/3/2026, Chấp nhận đăng 20/3/2026

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu ứng xử động của cầu vòm thép đường sắt tốc độ cao dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu sử dụng mô hình phần tử hữu hạn (FEM) và phương pháp phân tích lịch sử thời gian (THA). Ba loại sơ đồ dây treo khác nhau là dây treo thẳng đứng, dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi, dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm được nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số dây treo đến tần số dao động, gia tốc cực đại, chuyển vị và hiện tượng cộng hưởng. Kết quả nghiên cứu cho thấy đối với cầu vòm thép, sơ đồ dây treo dạng lưới (bao gồm dây treo có góc xiên không đổi và có điểm giao cắt hướng tâm) có ứng xử động ổn định hơn, biên độ giảm nhanh hơn, thời gian tắt dao động ngắn hơn so với dạng dây treo thẳng đứng, và đảm bảo yêu cầu theo tiêu chuẩn TCVN 13594-3:2022. Các kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn dạng kết cấu, chiều dài nhịp cũng như đề xuất vận tốc khai thác phù hợp, góp phần nâng cao độ an toàn và độ bền của cầu đường sắt tốc độ cao tại Việt Nam nói riêng và thế giới nói chung.

Từ khoá: cầu vòm thép; sơ đồ dây treo; tải trọng đoàn tàu; đường sắt tốc độ cao; phương pháp lịch sử thời gian; gia tốc cực đại; hiện tượng cộng hưởng.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF VARIOUS HANGER LAYOUT ON THE DYNAMIC RESPONSE OF HIGH-SPEED RAILWAY STEEL ARCH BRIDGES UNDER THE EFFECT OF TRAINS

Abstract

This paper studies the dynamic behavior of high-speed railway steel arch bridges under train load using finite element modeling (FEM) and time history analysis (THA). Three different hanger layouts including vertical hangers, cable network system with constant angle hangers, and cable network system with radial hanger distribution are investigated to evaluate the influence of cable hanger parameters on oscillation frequency, maximum acceleration, deflection, and resonance. Numerical results indicate that for steel arch bridges, the network system (including constant-angle and radial hangers) exhibits more stable dynamic behavior, faster amplitude reduction, and shorter damping times compared to the vertical hanger layout, ensuring the requirements of TCVN 13594-3:2022 standard. These findings provide a scientific basis for selecting the structural form, span length, and proposing appropriate operating speeds, contributing to improved safety and durability of high-speed railway bridges in Vietnam and worldwide.

Keywords: steel arch bridge; hanger layout; train load; high-speed railway; time history analysis; peak acceleration; resonance phenomenon.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20\(2V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(2V)-01) © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Trong bối cảnh phát triển hệ thống giao thông hiện đại, đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) đã trở thành xu hướng tất yếu tại nhiều quốc gia nhờ ưu điểm về an toàn, hiệu quả vận tải, giảm phát thải và kết nối vùng kinh tế. Shinkansen là tuyến đường sắt tốc độ cao đầu tiên được đưa vào khai thác năm 1964 tại Nhật Bản với tổng chiều dài khoảng 2951 km [1]. Tiếp theo đó, tuyến đường sắt tốc độ cao đầu tiên của Pháp được xây dựng từ năm 1975 đến năm 1983 nối giữa Paris và Lyon và tính đến thời điểm cuối năm 2024, mạng lưới này đã kéo dài 1550 km [2]. Năm 2008, Trung Quốc chính thức khai trương tuyến đường sắt tốc độ cao thương mại đầu tiên nối Bắc Kinh và Thiên Tân dài 117 km và cho

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

đến nay, Trung Quốc là nước có mạng lưới đường sắt tốc độ cao phát triển thần tốc. Vào thời điểm cuối năm 2016, khi tổng số chiều dài tuyến đường sắt tốc độ cao tại Trung Quốc đạt hơn 22000 km thì đến cuối năm 2024 con số này đã tăng lên 48000 km, và quốc gia này tiếp tục đặt mục tiêu lên đến khoảng 60000 km vào năm 2030, chiếm hơn 70% chiều dài đường sắt tốc độ cao trên thế giới [3, 4]. Sự phát triển nhanh chóng của mạng lưới đường sắt tốc độ cao kéo theo nhu cầu xây dựng lớn đối với các công trình cầu, trong đó bao gồm nhiều dạng cầu nhịp lớn với yêu cầu cao về yếu tố thẩm mỹ và khả năng chịu lực.

Việt Nam có địa hình trải dài dọc theo biển, vì vậy việc quy hoạch, xây dựng phát triển mạng lưới đường sắt trong đó có đường sắt tốc độ cao làm cơ sở để quy hoạch xây dựng các mạng lưới giao thông khác cũng như các trung tâm kinh tế, văn hóa, ... tại các địa phương. Theo Nghị quyết số 106/NQ-CP ngày 23/4/2025 của Chính Phủ về kế hoạch triển khai Nghị quyết số 172/2024/QH15 ngày 30 tháng 11 năm 2024 của Quốc hội về chủ trương đầu tư Dự án đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc – Nam với yêu cầu triển khai dự án theo quy mô chiều dài khoảng 1541 km, tốc độ thiết kế 350 km/h, tải trọng 22,5 tấn/trục, gồm 23 ga hành khách và 5 ga hàng hóa [5]. Với khối lượng công trình cầu dự kiến chiếm đến 60% khối lượng tuyến trong đó có nhiều cầu lớn.

Đối với cầu đường sắt tốc độ cao, đặc biệt là các cầu nhịp lớn, nghiên cứu ứng xử động là hết sức quan trọng và được yêu cầu bắt buộc. Theo khuyến nghị của Hiệp hội đường sắt quốc tế UIC, hệ thống được coi là đường sắt tốc độ cao khi khai thác với vận tốc tối thiểu 200 km/h [6], khi vận tốc càng tăng đồng nghĩa với việc tải trọng động tác dụng lên công trình cầu cũng tăng về cả biên độ cũng như tần số kích thích. Khi đó, hiện tượng cộng hưởng có thể xảy ra nếu tần số dao động riêng của cầu trùng hoặc gần bằng tần số kích thích của đoàn tàu, tạo ra độ lớn về gia tốc, chuyển vị và giảm tuổi thọ khai thác của công trình. Do đó, các tiêu chuẩn như Eurocodes [7] và TCVN 13594-3:2022 [8] đều quy định giới hạn gia tốc dao động phải nhỏ hơn $3,5 \text{ m/s}^2$ để đảm bảo về các yêu cầu khai thác cũng như tạo cảm giác êm thuận cho hành khách.

Có nhiều phương pháp nghiên cứu về động lực học của cầu đường sắt như nghiên cứu thực địa, tính toán lý thuyết và phân tích mô phỏng số. Phương pháp thực địa giúp xác thực các mô hình tính toán và phản ánh chính xác ứng xử động của công trình trong điều kiện khai thác thực tế có thể kể đến một số nghiên cứu của các tác giả như You-Liang Ding và cs. [9], Seunghoo Jeong và cs. [10], ... Phương pháp lý thuyết được xây dựng dựa trên cơ học và lý thuyết dao động đàn hồi trong đó cầu thường được mô hình hóa dầm đàn hồi chịu tác động của tải trọng di động hoặc khối lượng di động Fryba của tác giả Yang và cs. [11]. Phương pháp mô phỏng số hiện nay được sử dụng rất phổ biến nhờ khả năng mô hình chi tiết tương tác giữa tàu – ray – cầu (Train – Track – Bridge) [12, 13, 14, 15, 16]. Phân tích lịch sử thời gian (Time History Analysis – THA) được xem là công cụ hữu hiệu để giải phương trình dao động theo miền thời gian, cho phép đánh giá các ứng xử động như dao động tức thời, gia tốc cực đại, chuyển vị và hiện tượng cộng hưởng. Nhờ vậy, phương pháp này không chỉ mang tính lý thuyết mà còn đóng vai trò nền tảng cho các nghiên cứu mô phỏng số và là cơ sở khoa học để so sánh, hiệu chỉnh với dữ liệu thực địa.

Cầu vòm thép có dây treo được sử dụng khá phổ biến trên thế giới bởi khả năng vượt nhịp tương đối lớn, ưu điểm về khả năng chịu lực và thẩm mỹ kiến trúc. Dây treo có thể có dạng thẳng đứng, dạng rẽ quạt, dạng Nielsen, dạng lưới có góc xiên không đổi so với phương ngang hoặc có các điểm giao nhau hướng tâm [17]. Cầu vòm dây treo dạng lưới (Network Arch Bridge) với các dây treo xiên (Hangers Inclined) cắt nhau (Intersect) ít nhất hai lần [18]. Cầu vòm dây treo dạng lưới hướng tâm có các điểm giao cắt dây hướng tâm, góc xiên và khoảng cách dây không đổi so với vành vòm [19]. Đây là loại kết cấu cầu đạt hiệu quả cao về khả năng chịu lực, tiết kiệm được vật liệu và do đó làm cho kết cấu cầu trở nên thanh mảnh.

Hiện nay, trên thế giới đã có một số nghiên cứu về dao động của cầu vòm dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu tốc độ cao. Tác giả W. Radomski và R. Oleszek [20] nghiên cứu ứng xử động lực học của cầu vòm bê tông có chiều dài nhịp tính toán là 44,22 m, tiết diện dầm dạng chữ C bê tông cốt thép dự ứng lực với thanh treo thẳng đứng, chịu tải trọng đoàn tàu theo mô hình tải HSLM theo tiêu chuẩn Eurocodes. Nghiên cứu tập trung đánh giá chuyển vị, gia tốc, mô men uốn, nội lực và hệ số khuếch đại động của kết cấu cầu trong dải vận tốc tàu từ 160 km/h đến 360 km/h và kết luận kết cấu cầu vòm này đáp ứng các yêu cầu động lực học theo tiêu chuẩn châu Âu (EN) đối với đoàn tàu chạy với vận tốc nhỏ hơn 230 km/h. Tại Trung Quốc, nhiều tác giả cũng nghiên cứu về ứng xử động lực học của một số dạng kết cấu cầu đường sắt, một trong số đó có thể kể đến nghiên cứu của Qing Zeng và cs. [21] về ứng xử động lực học cầu vòm giàn thép dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu. Cây cầu được nghiên cứu nằm trên hệ thống cầu Danyang – Kunshan thuộc tuyến đường sắt tốc độ cao Bắc Kinh – Thượng Hải. Nghiên cứu tập trung xây dựng và áp dụng mô hình số 3D để phân tích tương tác động lực học giữa đoàn tàu cao tốc và cầu vòm giàn thép, nhằm đánh giá phản ứng động của cầu khi tàu cao tốc chạy qua, xem xét ảnh hưởng tương tác tàu – cầu (train – bridge interaction, TBI) đến chuyển vị, gia tốc, nội lực và kiểm tra điều kiện khai thác và độ an toàn động lực học của cầu. Tuy nhiên, nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào mô phỏng chi tiết trong không gian 3D, trong khi chưa đối chiếu trực tiếp các kết quả về gia tốc, chuyển vị và độ êm thuận tàu chạy với các giới hạn theo quy định trong các tiêu chuẩn thiết kế tương ứng.

Tại Việt Nam cũng đã có những nghiên cứu về dao động cầu đường sắt tốc độ cao, phần lớn tập trung vào các dạng kết cấu dầm đơn giản, dầm liên tục dạng hộp. Tác giả Phạm Duy Hòa, và cs. [22] cũng đã nghiên cứu, phân tích động lực học cầu đường sắt tốc độ cao với dạng kết cấu nhịp dầm bê tông cốt thép ứng suất trước giản đơn tiết diện chữ T có chiều dài nhịp 30 m. Trong nghiên cứu này, các tác giả đã phân tích và đánh giá độ võng, gia tốc tại vị trí giữa nhịp, cũng như đường bao gia tốc của kết cấu tương ứng với các dải vận tốc tàu từ 140 km/h đến 420 km/h, xét cho 10 mô hình tải HSLM-A1 đến HSLM-A10. Trên cơ sở kết quả phân tích, tác giả đề xuất giải pháp giới hạn tốc độ thiết kế của đoàn tàu xuống dưới 250 km/h nhằm đảm bảo yêu cầu khai thác an toàn và êm thuận của công trình.

Thông qua các nghiên cứu đã công bố, có thể nhận thấy nhiều tác giả đã đề xuất các khuyến cáo về giới hạn vận tốc khai thác của cầu dựa trên phân tích ứng xử động lực học theo những tiêu chuẩn cụ thể. Tuy nhiên, các nghiên cứu liên quan đến ứng xử động của cầu vòm thép có dây treo dạng lưới dưới tác động của đoàn tàu tốc độ cao hiện vẫn còn hạn chế, đặc biệt đối với các công trình có chiều dài nhịp trung bình đến lớn và vận tốc khai thác lên tới 350 km/h. Việc đánh giá ứng xử động của loại kết cấu này, đồng thời so sánh với các giới hạn khuyến cáo trong những tiêu chuẩn thiết kế hiện hành là cần thiết nhằm làm rõ mức độ phù hợp và an toàn trong điều kiện khai thác tốc độ cao. Do đó, việc nghiên cứu ứng xử động của loại kết cấu này không chỉ góp phần bổ sung khoảng trống trong tài liệu nghiên cứu quốc tế mà còn mang lại cơ sở khoa học cho thiết kế và vận hành hệ thống đường sắt tốc độ cao trong nước.

Bài báo này tập trung nghiên cứu ứng xử động của cầu vòm thép có dây treo với chiều dài nhịp 100 m dưới tác động đoàn tàu tốc độ cao theo tiêu chuẩn 13594-3:2022 (được biên dịch dựa trên tiêu chuẩn Eurocodes 1991-2:2003). Ba dạng sơ đồ dây treo được nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của các dạng hệ dây treo đến ứng xử động của tổng thể kết cấu cầu. Kết cấu cầu được mô hình bằng phần tử hữu hạn (Finite Element Model – FEM), sử dụng phương pháp THA để phân tích, xác định các thông số đặc trưng của kết cấu cầu như tần số riêng, hệ số tham gia khối lượng, gia tốc và chuyển vị tại vị trí giữa nhịp dưới tác dụng của các đoàn tàu tiêu chuẩn HSLM-A. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn giải pháp kết cấu, thông số hình học của cầu vòm thép có dây

treo và vận tốc khai thác tối ưu, góp phần phục vụ định hướng phát triển đường sắt tốc độ cao tại Việt Nam.

2. Phương pháp phân tích lịch sử thời gian

THA là một phương pháp phân tích động lực học phi tuyến hoặc tuyến tính theo miền thời gian, được sử dụng để giải các phương trình cân bằng động lực học khi kết cấu chịu tải trọng động. Phương pháp này cho phép xác định trực tiếp đáp ứng động (chuyển vị, vận tốc, gia tốc, nội lực) của công trình tại từng thời điểm dưới tác dụng tải trọng động [23, 24].

Các tính toán dao động tự nhiên được xác định dựa trên giả thiết quy đổi trọng lượng của các thành phần kết cấu thành trọng lượng nút tương đương. Do số bậc tự do lớn hơn, việc phân tích số các mô hình kết cấu dựa trên dạng phương trình chuyển động được sửa đổi như sau:

$$K \cdot \theta_u - M \cdot \omega^2 \cdot \theta_u = 0; K = L \cdot L^T; K^{-1} = (L^T)^{-1} \cdot L^{-1} \quad (1)$$

$$L^{-1} \cdot M \cdot \omega^2 \cdot \theta_u = L^T \cdot \theta_u \cdot L; x = L^T \cdot \theta_u; \theta_u = (L^T)^{-1} \cdot x; \lambda = \frac{1}{\omega^2} = L^{-1} \cdot M \cdot (L^T)^{-1} \quad (2)$$

trong đó M là ma trận khối lượng, K là ma trận độ cứng, ω là tần số dao động riêng của hệ; θ_u là vectơ dao động tự do; L là ma trận tam giác.

Phương pháp tích phân thời gian dựa trên thuật toán Newmark được sử dụng cho các phương trình tích phân chuyển động. Trong các phương pháp này, phương trình cân bằng tham chiếu đến điểm phân tích trong thời gian $t + k \cdot \Delta t$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) và do đó dạng của công thức (3) được kết hợp với các mối quan hệ vận tốc tại công thức (4) và chuyển vị ở công thức (5) để đưa ra nhóm các phương trình sau theo phương pháp Newmark:

$$M \cdot \ddot{u}(t + \Delta t) + C \cdot \dot{u}(t + \Delta t) + K \cdot u(t + \Delta t) = P(t + \Delta t) \quad (3)$$

$$\dot{u}(t + \Delta t) = \dot{u}(t) + [(1 - \delta) \cdot \dot{u}(t) + \delta \cdot \dot{u}(t + \Delta t)] \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \dot{u}(t) \cdot \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \cdot \ddot{u}(t) + \alpha \cdot \ddot{u}(t + \Delta t) \right] \cdot (\Delta t)^2 \quad (5)$$

Hệ phương trình chuyển động tổng quát:

$$[M] \cdot \ddot{u}(t) + [C] \cdot \dot{u}(t) + [K] \cdot u(t) = p(t) \quad (6)$$

trong đó: M là ma trận khối lượng, K là ma trận độ cứng, $P(t + \Delta t)$ là vector tải, Δt là bước thời gian phân tích, $t + k \cdot \Delta t$ là các điểm thời gian phân tích tương ứng với trạng thái cân bằng của hệ, α ; δ là các tham số tương ứng với sự thay đổi gia tốc trong bước thời gian đã cho và tương ứng với độ ổn định và độ chính xác của phương pháp phân tích; $u(t + \Delta t)$, $\dot{u}(t + \Delta t)$, $\ddot{u}(t + \Delta t)$ là vector chuyển vị, vector vận tốc, vector gia tốc tương ứng tại các thời điểm thời gian được phân tích [25, 26].

Bước thời gian phân tích $\Delta t = 0,001$ s được xác định theo khuyến cáo của Viện nghiên cứu đường sắt Châu Âu (ERRI), giá trị này nên lấy nhỏ hơn giá trị nhỏ nhất trong 4 đại lượng [22]:

$$h_1 = 1 / (8 \cdot f_{\max}); h_2 = L_{\min} / (200 \cdot v); h_3 = L_{\min} / (4 \cdot n \cdot v); h_4 = 0,001 \text{ s} \quad (7)$$

Quá trình phân tích lịch sử thời gian được tiến hành tuần tự qua các bước tính $i = 0, 1, 2, \dots$ để xác định phản ứng động tại bước $i + 1$ trước hết phải biết được các đại lượng đáp ứng tại bước i và điều kiện ban đầu. Từng bước tính toán như vậy cho phép mô phỏng chính xác sự biến thiên theo thời gian của tải trọng [27, 28].

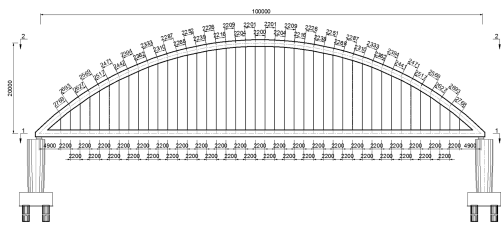
3. Phân tích động lực học kết cấu cầu vòm thép dây treo

3.1. Đối tượng nghiên cứu

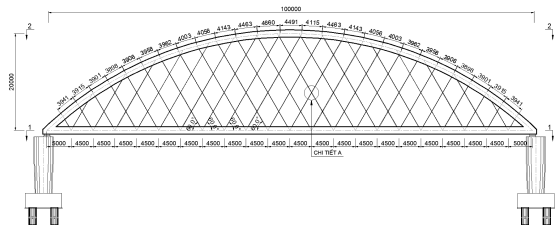
Cầu vòm dây treo là dạng kết cấu đã được sử dụng tại một số tuyến đường sắt cao tốc trên thế giới và cũng có thể xem xét lựa chọn áp dụng cho tuyến đường sắt cao tốc Bắc – Nam của Việt Nam sắp được đầu tư xây dựng. Trong nghiên cứu này, 3 dạng sơ đồ dây treo là dây treo thẳng đứng, dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi (so với phương ngang) và dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm của kết cấu cầu vòm thép chiều dài nhịp 100 m được nghiên cứu. Các thông số về tải trọng tính toán, khổ đường sắt, hệ số cản nhớt, trọng lượng riêng của đá ballast, v.v. được lựa chọn dựa trên tiêu chuẩn TCVN 13594-3:2022 [8] và thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số đầu vào

Thông số	Dây treo thẳng đứng	Dây treo lưới góc xiên không đổi	Dây treo lưới giao cắt hướng tâm
Chiều dài nhịp (m)	100	100	100
Bề rộng cầu (m)	8,5	8,5	8,5
Chiều cao đường tên vòm (m)	20	20	20
Khổ đường sắt (mm)	1435	1435	1435
Số lượng dây (trên 1 mặt phẳng)	42	42	42
Góc giữa dây treo và thanh căng (hoặc giữa dây treo và bán kính đường tròn)	90°	61°	41°
Vật liệu thép		A709-36	
+ Modun đàn hồi (MPa)		199 950	
+ Trọng lượng riêng (kN/m ³)		77,09	
Vật liệu bê tông		C35	
+ Modun đàn hồi (MPa)		31220	
+ Trọng lượng riêng (kN/m ³)		24,5	
Hệ số cản nhớt ξ (%)		0,5	



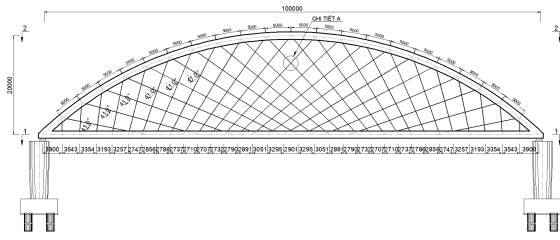
Hình 1. Bố trí chung cầu vòm dây treo thẳng đứng



Hình 2. Bố trí chung cầu vòm dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi

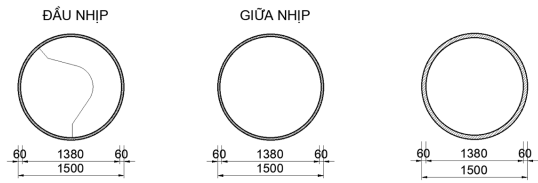
3.2. Mô hình kết cấu cầu

Kết cấu cầu vòm dây treo được mô hình bằng phần mềm Midas Civil 2022 khai báo phần tử dạng thanh (Frame), với điều kiện biên là một đầu gối cố định, một đầu gối di động; các điểm liên kết giữa dây treo với thanh căng – vòm giả thuyết là tuyệt đối cứng. Kết cấu nhịp, bản mặt cầu, đá ballast được quy đổi thành các khối lượng để xét tính chất động lực học bằng việc quy đổi tải trọng – khối lượng với gia tốc trọng trường $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Mô hình 3 dạng kết cấu cầu vòm thép dây treo được thể hiện trên Hình 8, Hình 9 và Hình 10.



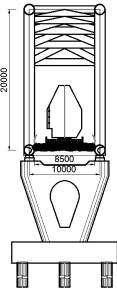
Hình 3. Bố trí chung cầu vòm dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm

CHI TIẾT THANH CĂNG

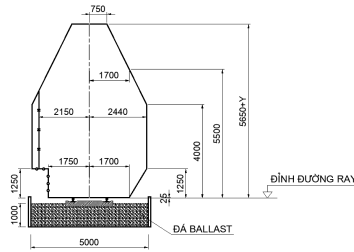


Hình 4. Kích thước vòm chủ và thanh căng

MẶT CẮT NGANG KẾT CẤU

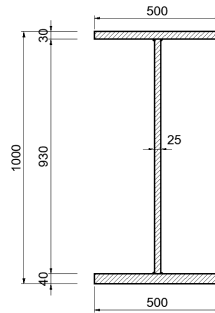


KHỔ ĐƯỜNG SẮT 1435MM
(TCVN 1.3594.2023)

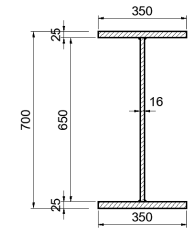


Hình 5. Mặt cắt ngang và khổ đường sắt tốc độ cao

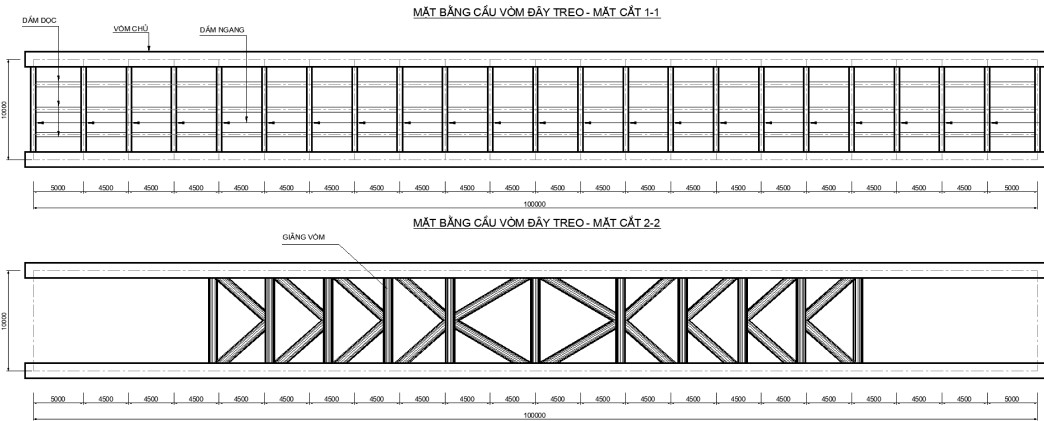
CHI TIẾT DẦM NGANG



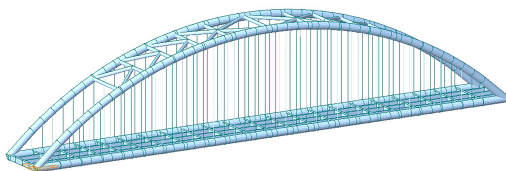
CHI TIẾT DẦM DỌC PHỤ



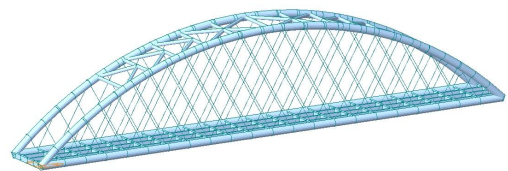
Hình 6. Kích thước dầm ngang và dầm dọc phụ



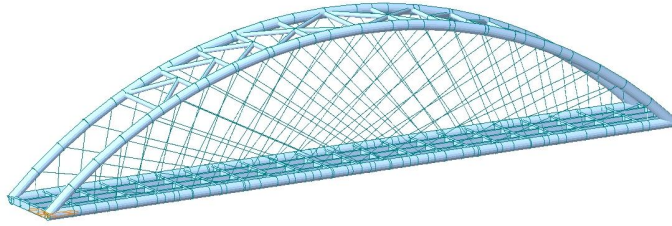
Hình 7. Mặt bằng cầu



Hình 8. Mô hình cầu vòm dây treo thẳng đứng



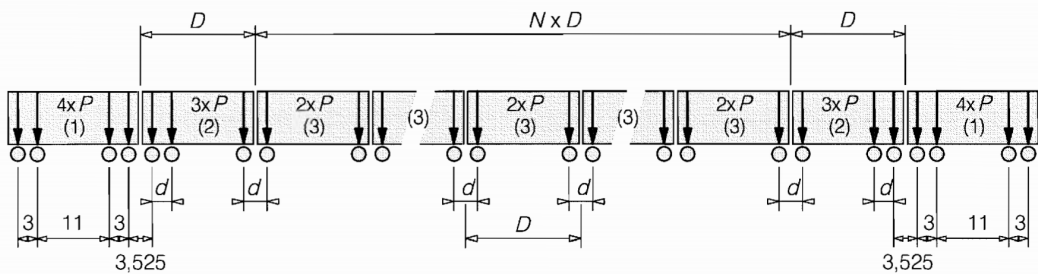
Hình 9. Mô hình cầu vòm dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi



Hình 10. Mô hình cầu vòm dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm

3.3. Mô hình đoàn tàu

Theo [8] việc phân tích động lực học cầu đường sắt khi vận tốc tàu vượt quá 200 km/h được thực hiện dựa trên các thông số đặc trưng của đoàn tàu thực tế hoặc các đoàn tàu chuẩn HSLM. Trong nghiên cứu, phân tích động lực học được tiến hành với 10 mô hình đoàn tàu HSLM-A (từ A1 đến A10) với các thông số được thể hiện như trên Hình 11 và Bảng 2.

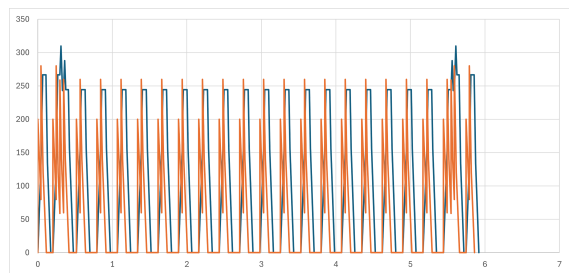


Hình 11. Thông số đoàn tàu HSLM-A [7]

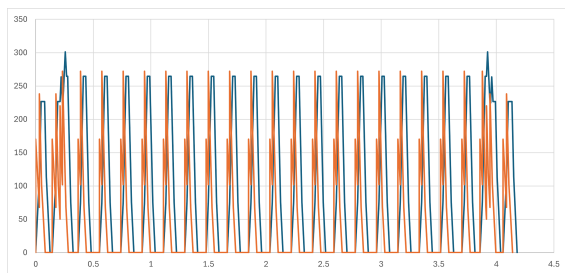
Bảng 2. Thông số 10 đoàn tàu HSLM (từ A1 đến A10) [7]

STT	Đoàn tàu	Số toa N	Chiều dài toa xe D (m)	Khoảng cách giữa tim trục bánh d (m)	Tải trọng trục P (kN)
1	A1	18	18	2	170
2	A2	17	19	3,5	200
3	A3	16	20	2	180
4	A4	15	21	3	190
5	A5	14	22	2	170
6	A6	13	23	2	180
7	A7	13	24	2	190
8	A8	12	25	2,5	190
9	A9	11	26	2	210
10	A10	11	27	2	210

Hàm tải trọng tác dụng lên nút 1 và 2 tại 2 vận tốc thiết kế 350 km/h và 250 km/h được thể hiện trong Hình 12.



(a) $V = 250$ km/h

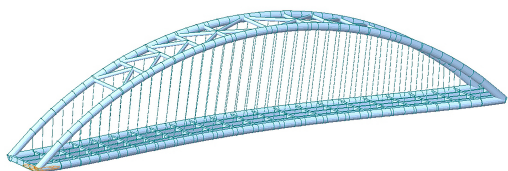


(b) $V = 350$ km/h

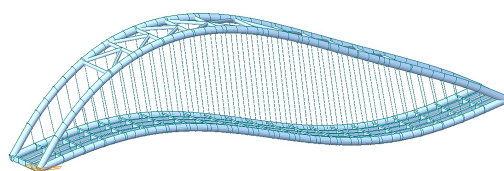
Hình 12. Hàm tải trọng tác dụng lên nút 1 và nút 2

3.4. Kết quả phân tích

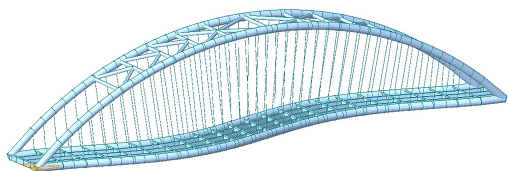
10 dạng dao động đầu tiên của các dạng kết cấu vòm dây treo thẳng đứng, dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi và dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm lần lượt được thể hiện tại Hình 13, Hình 14 và Hình 15.



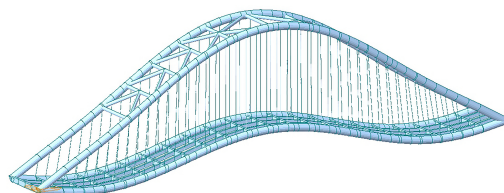
(a) $f_1 = 0,412$ Hz



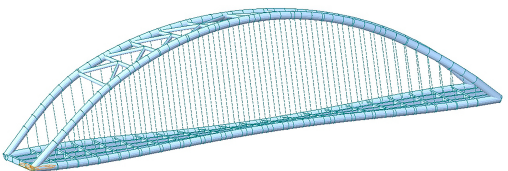
(b) $f_2 = 0,641$ Hz



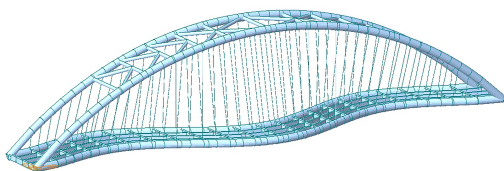
(c) $f_3 = 0,988$ Hz



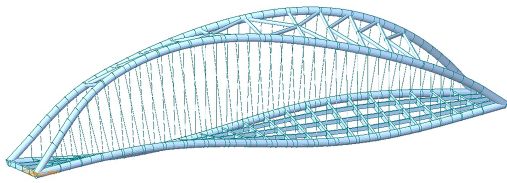
(d) $f_4 = 1,210$ Hz



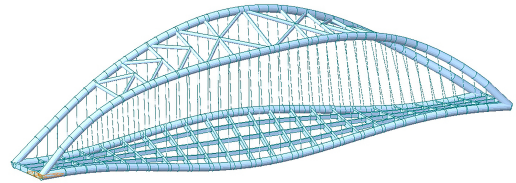
(e) $f_5 = 1,305$ Hz



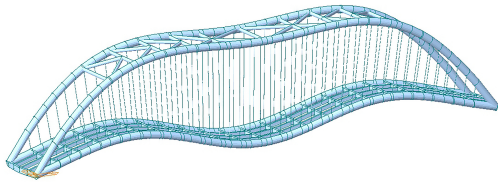
(f) $f_6 = 1,777$ Hz



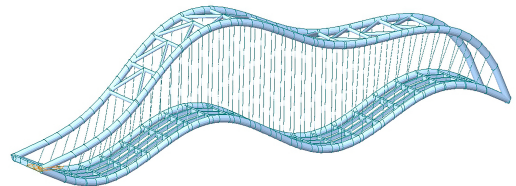
(g) $f_7 = 1,911$ Hz



(h) $f_8 = 2,068$ Hz

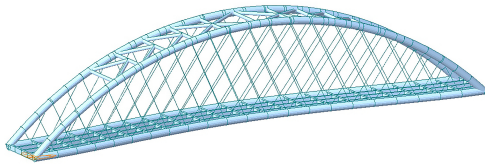


(i) $f_9 = 2,222$ Hz

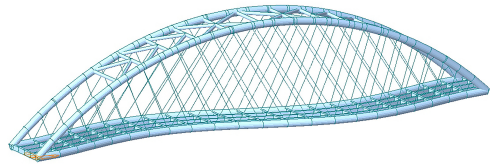


(j) $f_{10} = 2,528$ Hz

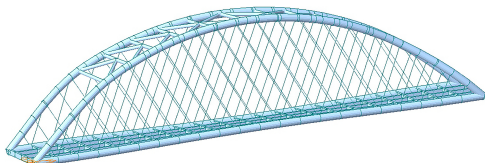
Hình 13. 10 mode dao động đầu tiên – Cầu vòm dây treo thẳng đứng



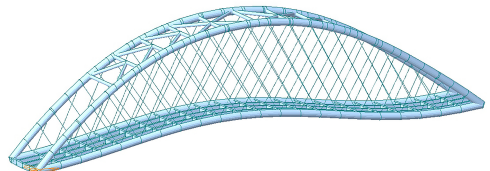
(a) $f_1 = 0,413$ Hz



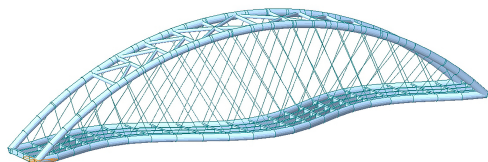
(b) $f_2 = 0,988$ Hz



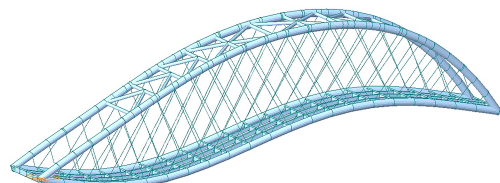
(c) $f_3 = 1,355$ Hz



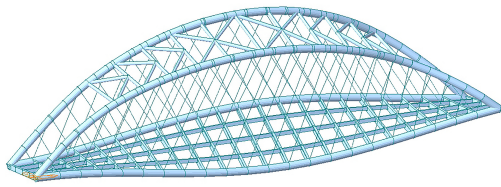
(d) $f_4 = 1,475$ Hz



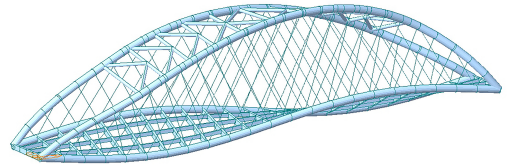
(e) $f_5 = 1,778$ Hz



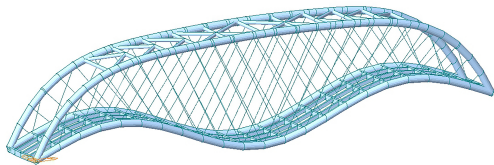
(f) $f_6 = 1,832$ Hz



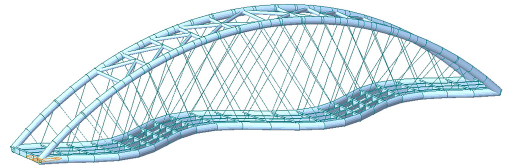
(g) $f_7 = 2,097$ Hz



(h) $f_8 = 2,356$ Hz

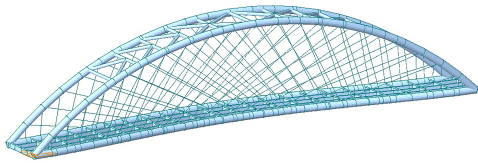


(i) $f_9 = 2,554$ Hz

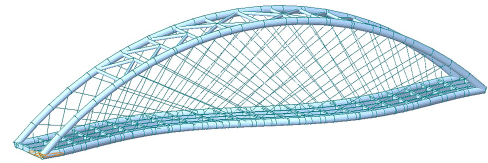


(j) $f_{10} = 2,788$ Hz

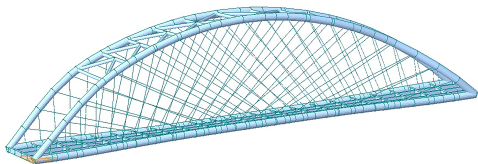
Hình 14. 10 mode dao động đầu tiên – Cầu vòm dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi



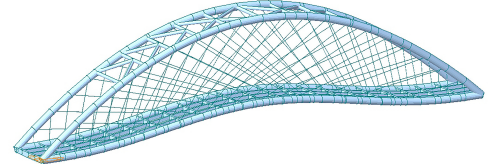
(a) $f_1 = 0,412$ Hz



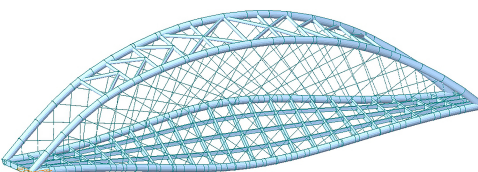
(b) $f_2 = 0,988$ Hz



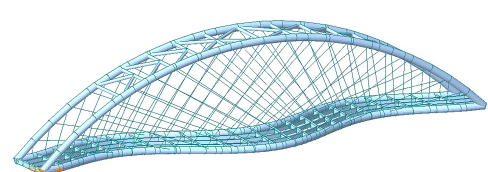
(c) $f_3 = 1,341$ Hz



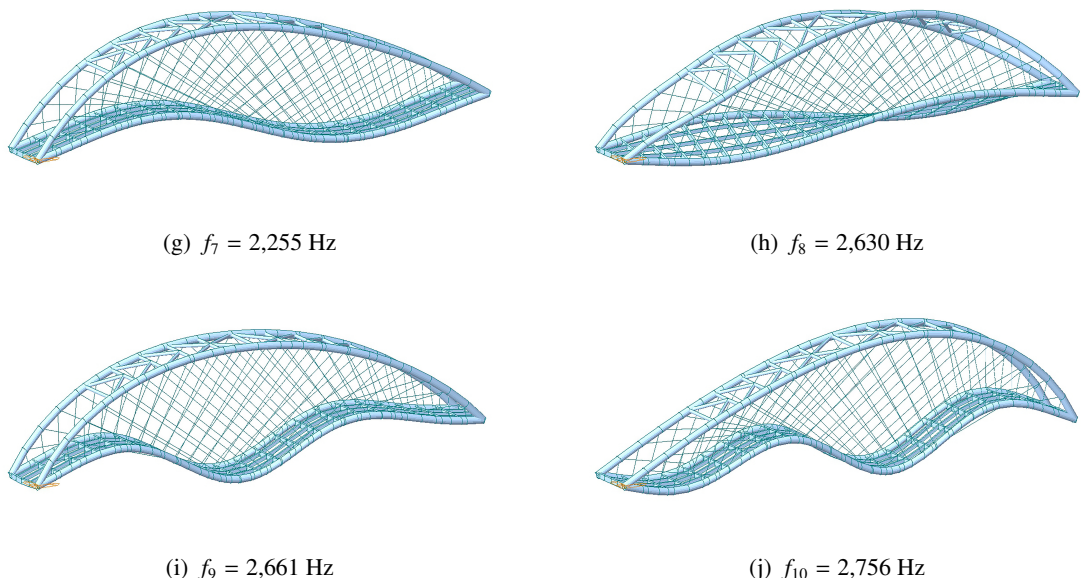
(d) $f_4 = 1,439$ Hz



(e) $f_5 = 1,744$ Hz



(f) $f_6 = 1,778$ Hz



Hình 15. 10 mode dao động đầu tiên – Cầu vòm dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm

Kết quả về tần số dao động và hệ số tham gia khối lượng của ba dạng kết cấu được thể hiện tại Bảng 3, Bảng 4 và Bảng 5.

Bảng 3. Bảng tần số dao động và hệ số tham gia khối lượng – Cầu vòm dây treo thẳng đứng

Mode	Tần số (Hz)	Hệ số tham gia khối lượng của kết cấu					
		Dx (%)	Dy (%)	Dz (%)	Rx (%)	Ry (%)	Rz (%)
1	0,412	0	65,49	0	3,99	0	0,14
2	0,641	0,98	0	0	0	55,38	0
3	0,988	0	0	0	0	0	45,03
4	1,210	0,36	0	15,14	0	0,01	0
5	1,305	0	9,37	0	62,27	0	0,06
6	1,777	0	10,99	0	0,77	0	0,02
7	1,911	0	0,43	0	0,21	0	1,93
8	2,068	0	1,54	0	4,13	0	0,55
9	2,222	7,83	0	63,73	0	0,1	0
10	2,528	0,25	0	0,29	0	10,74	0

Bảng 4. Bảng tần số dao động và hệ số tham gia khối lượng – Cầu vòm dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi

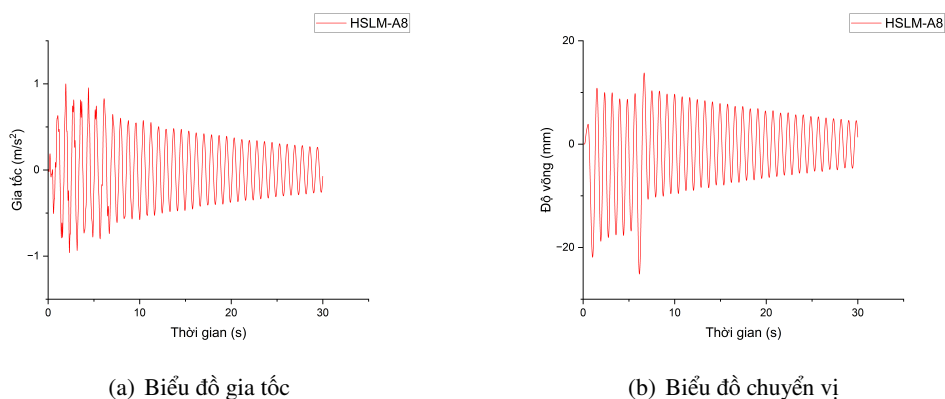
Mode	Tần số (Hz)	Hệ số tham gia khối lượng của kết cấu					
		Dx (%)	Dy (%)	Dz (%)	Rx (%)	Ry (%)	Rz (%)
1	0,413	0	65,34	0	4,01	0	0,13
2	0,988	0	0	0	0	0	44,58
3	1,355	0	10,46	0	59,16	0	0,11

Mode	Tần số (Hz)	Hệ số tham gia khối lượng của kết cấu					
		Dx (%)	Dy (%)	Dz (%)	Rx (%)	Ry (%)	Rz (%)
4	1,475	4,66	0	57,74	0	6,22	0
5	1,778	0	10,95	0	0,73	0	0,02
6	1,832	0,23	0	5,52	0	52,43	0
7	2,097	0	0,66	0	19,4	0	0,19
8	2,356	0	0	0	0,06	0	2,36
9	2,554	1,86	0	20,64	0	0	0
10	2,788	0	0	0	0	0	17,09

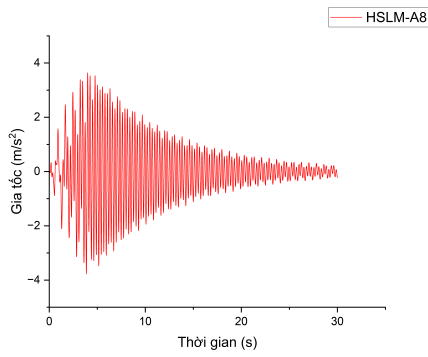
Bảng 5. Bảng tần số dao động và hệ số tham gia khối lượng – Cầu vòm dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm

Mode	Tần số (Hz)	Hệ số tham gia khối lượng của kết cấu					
		Dx (%)	Dy (%)	Dz (%)	Rx (%)	Ry (%)	Rz (%)
1	0,412	0	64,74	0	3,98	0	0,09
2	0,988	0	0	0	0	0	43,45
3	1,341	0	10,03	0	64,97	0	0,09
4	1,439	0,98	0	59,82	0	0,1	0
5	1,744	0	0,45	0	12,08	0	0,04
6	1,778	0	11,37	0	1,42	0	0,01
7	2,255	1,46	0	0,01	0	52,96	0
8	2,630	0	0	0	0	0	2,85
9	2,661	7,22	0	16,03	0	0,87	0
10	2,756	0,37	0	3,34	0	11,04	0

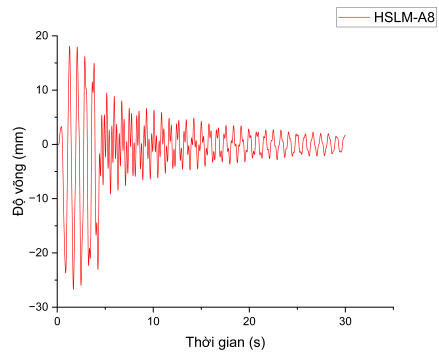
Một số kết quả gia tốc và chuyển vị tại tiết diện giữa nhịp đối với 03 dạng kết cấu cầu nghiên cứu dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu HSLM, khai thác với vận tốc 250 km/h và 350 km/h được thể hiện từ Hình 16 đến Hình 21. Kết quả tính toán gia tốc cực đại tại các dải vận tốc của ba dạng kết cấu cầu vòm dây treo được thể hiện trên Hình 22.



Hình 16. Biểu đồ gia tốc và chuyển vị tại tiết diện giữa nhịp đoàn tàu HSLM-A8 tại vận tốc $V = 250$ km/h – Cầu vòm dây treo thẳng đứng

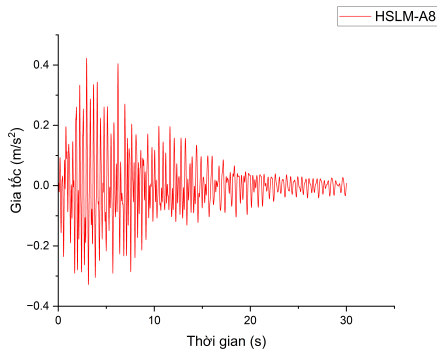


(a) Biểu đồ gia tốc

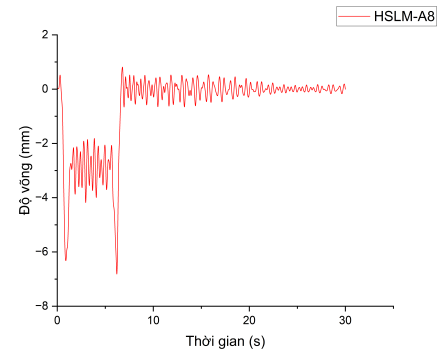


(b) Biểu đồ chuyển vị

Hình 17. Biểu đồ gia tốc và chuyển vị tại tiết diện giữa nhịp đoàn tàu HSLM-A8 tại vận tốc $V = 350$ km/h – Cầu vòm dây treo thẳng đứng

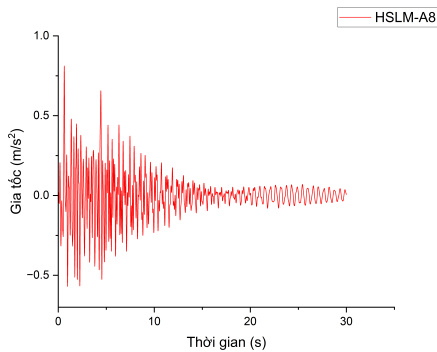


(a) Biểu đồ gia tốc

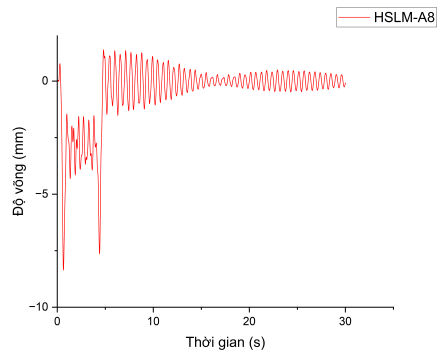


(b) Biểu đồ chuyển vị

Hình 18. Biểu đồ gia tốc và chuyển vị tại tiết diện giữa nhịp đoàn tàu HSLM-A8 tại vận tốc $V = 250$ km/h – Cầu vòm dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi

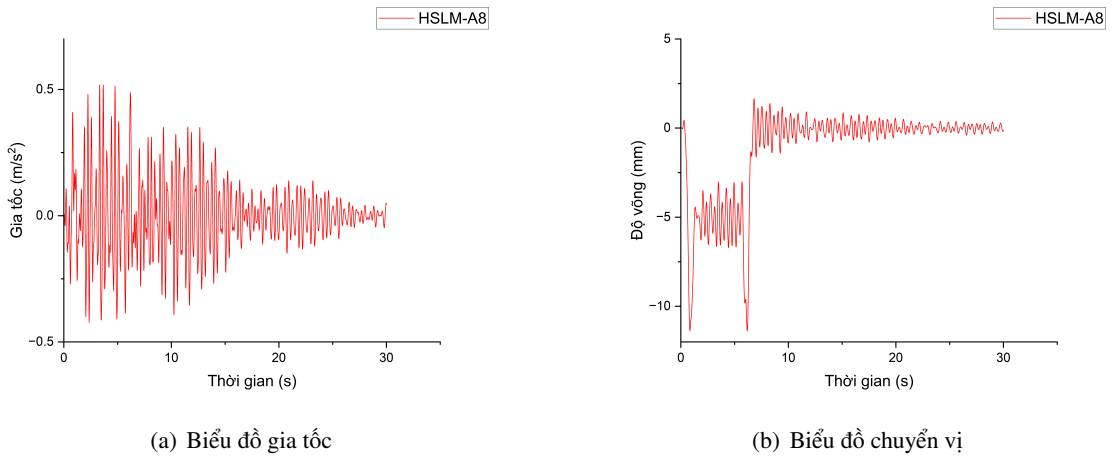


(a) Biểu đồ gia tốc

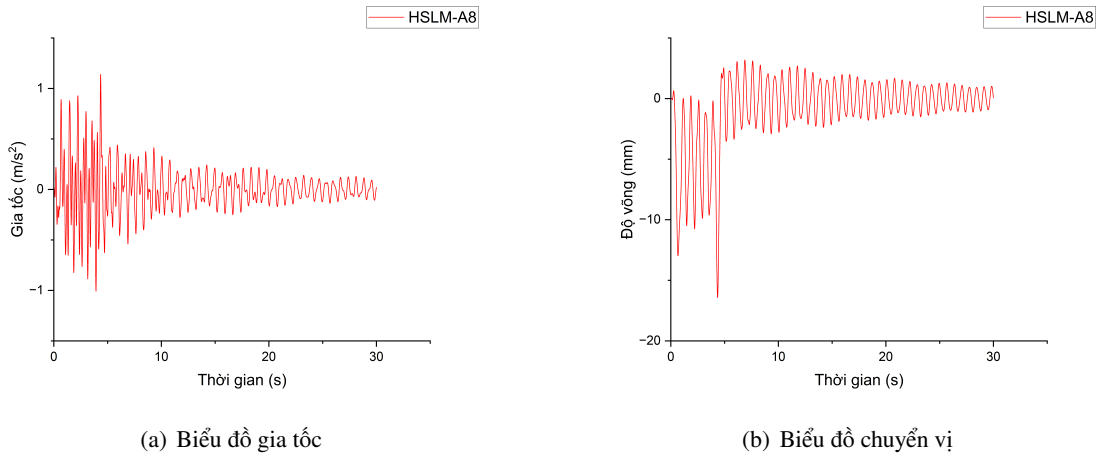


(b) Biểu đồ chuyển vị

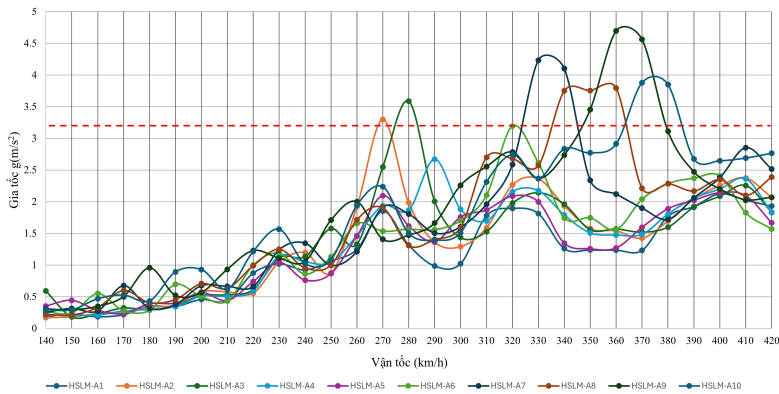
Hình 19. Biểu đồ gia tốc và chuyển vị tại tiết diện giữa nhịp đoàn tàu HSLM-A8 tại vận tốc $V = 350$ km/h – Cầu vòm dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi

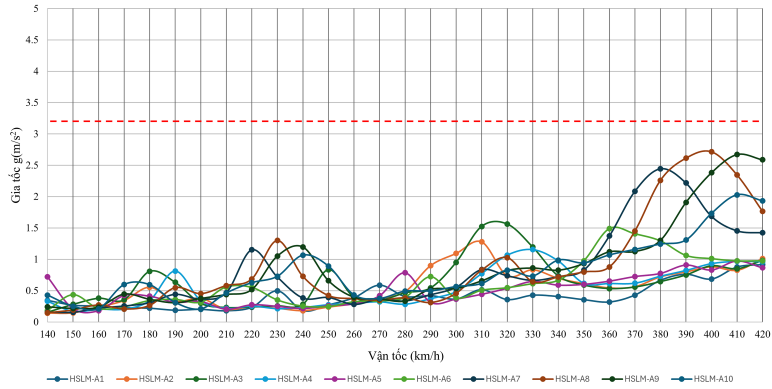


Hình 20. Biểu đồ gia tốc và chuyển vị tại tiết diện giữa nhịp đoàn tàu HSLM-A8 tại vận tốc $V = 250$ km/h – Cầu vòm dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm

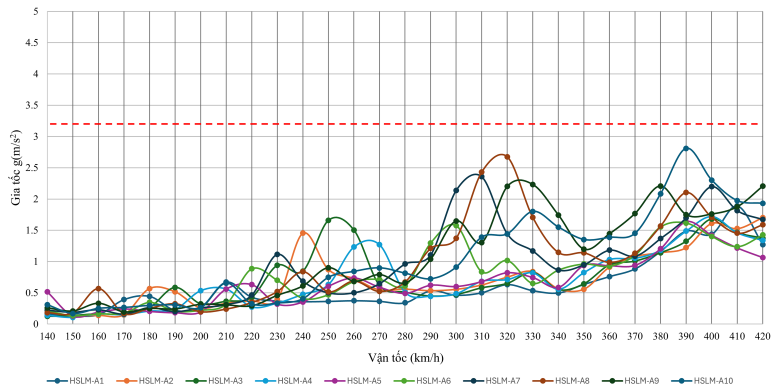


Hình 21. Biểu đồ gia tốc và chuyển vị tại tiết diện giữa nhịp đoàn tàu HSLM-A8 tại vận tốc $V = 350$ km/h – Cầu vòm dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm





(b) Cầu vòm dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi



(c) Cầu vòm dây treo dạng lưới điểm giao cắt hướng tâm

Hình 22. Biểu đồ các đỉnh gia tốc tương ứng với từng tốc độ thiết kế từ 140 km/h đến 420 km/h (bước nhảy 10 km/h)

Kết quả tính toán về các giá trị gia tốc và chuyển vị tại tiết diện giữa nhịp của 10 đoàn tàu thiết kế HSLM (từ A1 đến A10) đối với ba dạng kết cấu dây treo của cầu vòm thép, có thể rút ra một số nhận xét như sau:

- Mô hình phân tích động lực học và phương pháp tính toán được sử dụng trong nghiên cứu phản ánh tốt các đặc điểm về dao động chính của cầu và đoàn tàu tốc độ cao. Chuyển vị và gia tốc đạt giá trị lớn nhất khi các trục giữa của đoàn tàu tác dụng lên cầu. Khi đoàn tàu tiếp tục rời khỏi cầu, tải trọng tác dụng giảm dần, biên độ dao động giảm nhanh.

- Với 3 dạng kết cấu cầu vòm dây treo đều cần phải tiến hành kiểm tra phân tích động lực học dựa trên các thông số như chiều dài nhịp, vận tốc khai thác, tần số dao động uốn, xoắn đầu tiên.

- Đối với dạng kết cấu cầu vòm dây treo thẳng đứng, cần nhiều thời gian để biên độ có thể tắt dần. Vì vậy, có thể xem xét tăng hệ số cản, tăng kích thước hình học hay vật liệu để độ cứng kết cấu lớn hơn.

- Dưới tác dụng tải trọng của đoàn tàu HSLM-A, gia tốc thẳng đứng cực đại tại vị trí giữa nhịp tăng theo tốc độ của tàu. Gia tốc cực đại đối với cầu vòm dây treo thẳng đứng là $4,696 \text{ m/s}^2$ (HSLM-A9; $V = 360 \text{ km/h}$); với cầu vòm dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi là $2,672 \text{ m/s}^2$ (HSLM-A9; $V = 410 \text{ km/h}$); cầu vòm dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm là $2,810 \text{ m/s}^2$ (HSLM-A10; $V = 390 \text{ km/h}$).

- Đối với cầu vòm dây treo thẳng đứng, khi tốc độ của đoàn tàu HSLM-A3 đạt vận tốc $V = 280$ km/h, HSLM-A7 đạt vận tốc $V = 330$ km/h, HSLM-A8 đạt vận tốc $V = 340$ km/h, HSLM-A9 đạt vận tốc $V = 360$ km/h, HSLM-A10 đạt vận tốc $V = 370$ km/h giá trị gia tốc được vượt quá ngưỡng giới hạn khuyến cáo theo tiêu chuẩn TCVN 13594-3:2022 là $3,5 \text{ m/s}^2$. Đối với cầu vòm dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi và dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm, 10 đoàn tàu HSLM chạy tại các dải vận tốc từ 140 km/h đến 420 km/h đều có gia tốc đều nhỏ hơn mức khuyến cáo này.

4. Kết luận

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của 3 dạng dây treo (dây treo thẳng đứng, dây treo dạng lưới có góc xiên không đổi và dây treo dạng lưới có điểm giao cắt hướng tâm) đến ứng xử động của kết cấu cầu vòm thép dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu theo tiêu chuẩn TCVN 13594-3:2022. Từ kết quả nghiên cứu có thể rút ra một số kết luận sau:

- Dưới tác dụng của các đoàn tàu nghiên cứu, dao động của cầu vòm thép dây treo dạng lưới có biên độ gia tốc và chuyển vị nhỏ hơn so với dây treo thẳng đứng. Trong thời gian khảo sát là 30 giây, thời gian để dao động của cầu vòm dây treo thẳng đứng tắt dần dài hơn so với hai dạng cầu vòm dây treo dạng lưới.

- Kiểm tra theo điều kiện về mất ổn định nền ballast và tạo cảm giác êm thuận cho hành khách theo TCVN 13594-3:2022 cho thấy hai dạng cầu vòm dây treo dạng lưới cho kết quả đạt yêu cầu, còn cầu dây treo thẳng đứng thì vượt quá mức khuyến cáo này.

- Việc lựa chọn thông số kết cấu nhịp, sơ đồ và số lượng dây treo ảnh hưởng lớn đến kết quả phân tích động lực học trong công trình cầu. Phương pháp phân tích động lực học THA cho kết quả về ứng xử của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu khi xảy ra hiện tượng cộng hưởng, từ đó có thể điều chỉnh hợp lý khi triển khai thiết kế đảm bảo được yêu cầu quy định trong tiêu chuẩn cũng như trong quá trình khai thác.

- Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn bố trí dây treo hợp lý nhằm kiểm soát dao động của kết cấu, đáp ứng các yêu cầu về giới hạn gia tốc và chuyển vị theo tiêu chuẩn thiết kế hiện hành và hỗ trợ công tác thiết kế sơ bộ, đánh giá phương án kết cấu đối với cầu vòm thép dây treo. Những nội dung này có ý nghĩa thực tiễn đối với việc ứng dụng công nghệ cầu vòm thép dây treo trong các dự án đường sắt tốc độ cao.

- Các kết quả phân tích tính toán trong nghiên cứu này có thể là tài liệu tham khảo đối với các công trình có dạng kết cấu tương tự.

Tài liệu tham khảo

- [1] Nakagawa, D., Hatoko, M. (2007). *Reevaluation of Japanese high-speed rail construction: Recent situation of the north corridor Shinkansen and its way to completion*. *Transport Policy*, 14:150–164.
- [2] Tạp chí Xây dựng (2020). *Hành trình phát triển TGV: Bài học từ đường sắt tốc độ cao của Pháp*. Truy cập ngày 11/12/2025.
- [3] Xia, H., Zhang, N., Guo, W. (2018). *Dynamic Interaction of Train-Bridge Systems in High-Speed Railways*. Springer, Berlin Heidelberg.
- [4] China State Railway Group Corporation (2025). *China's operating high-speed railway to hit 60,000 km by 2030*. Truy cập ngày 11/12/2025.
- [5] Quốc hội Việt Nam, Số 172/2024/QH15 (2024). *Chủ trương đầu tư Dự án đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc - Nam*.
- [6] Silva, R., Ribeiro, D., Costa, C., Arêde, A., Caçada, R. (2024). *Experimental validation of a non-linear train-track-bridge dynamic model of a stone arch railway bridge under freight traffic*. *International Journal of Rail Transportation*, 12:102–133.
- [7] EN 1991-2:2003 (2003). *Eurocode 1 – Part 2: Actions on structures – Traffic loads on bridges*. European Committee for Standardization (CEN).

- [8] TCVN 13594-3:2022 (2022). *Thiết kế cầu đường sắt khổ 1435mm, vận tốc đến 350km/h*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [9] USACE, Engineer Manual, EM 1110-2-6051 (2003). *Time History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures – Engineering and Design*.
- [10] Chandrasekaran, S., Serino, G., Spizzuoco, M. (2024). *Earthquake Engineering and Structural Control: Theory and Applications*. CRC Press.
- [11] Zou, Y., Liu, Z., Tian, C., Zhang, X., Liu, B. (2024). [Dynamic response analysis of concrete filled steel tube tied arch bridge on a slab foundation under moving train load](#). *Frontiers in Built Environment*, 10: 1498790.
- [12] Zhai, W., Cai, C. (2002). [Train/track/bridge dynamic interactions: simulation and applications](#). *Vehicle System Dynamics*, 37:653–665.
- [13] Zhai, W., Han, Z., Chen, Z., Ling, L., Zhu, S. (2019). [Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review](#). *Vehicle System Dynamics*, 57:984–1027.
- [14] Hall, W. (1996). [Dynamics of structures – theory and applications to earthquake engineering](#). *Earthquake Spectra*, 12:635–636.
- [15] Guo, W., Xia, H., De Roeck, G., Liu, K. (2012). [Integral model for train-track-bridge interaction on the Sesia viaduct: Dynamic simulation and critical assessment](#). *Computers & Structures*, 112:205–216.
- [16] Camargo, R. S., Ferreira, W. G., Ceotto, B., Sobrinho, A. B. N. (2011). Pedagogic Comparison between Time and Frequency Domain formulations of Dynamic Analysis of Structures. *Proceedings of ICEE 2011, An International Conference on Engineering Education*.
- [17] Danciu, A. D., Guțiu, S. I., Moga, C., Dragomir, M. L., Ciotlăuș, M., Marusceac, V. (2023). [A review of the network arch bridge](#). *Applied Sciences*, 13:10966.
- [18] Rusev, R., Foster, R., Abbott, T., Bistolos, A. (2019). [River Irwell Crossing – UK’s First Network Arch Bridge](#). *Structural Engineering International*, 29:306–314.
- [19] De Zotti, A., Pellegrino, C., Modena, C. (2007). A parametric study of the hanger arrangement in arch bridges. *ARCH’07 – 5th International Conference on Arch Bridges*, 475–482.
- [20] Radomski, W., Oleszek, R. (2016). Dynamic response of an arch bridge under HSLM high-speed train loading according to the European standards. *Proceedings of the 8th International Conference on Arch Bridges*, 1069–1078.
- [21] Zeng, Q., Dimitrakopoulos, E. G., Lo, C. H. (2015). Three-dimensional numerical simulation of the dynamic interaction between high-speed trains and a steel-truss arch bridge. *Proceedings of the 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15)*.
- [22] Hòa, P. D., Hùng, T. V., Thắng, 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 – ĐHXDHN*, 15(7V):1–12.
- [23] Ding, Y. L., Wang, G. X., Sun, P., Wu, L. Y., Yue, Q. (2015). [Long-Term Structural Health Monitoring System for a High-Speed Railway Bridge Structure](#). *The Scientific World Journal*, 2015:250562.
- [24] Jeong, S., Kim, H., Kim, S. I., Lee, K. C. (2022). [Dynamic amplification assessment of high-speed railway bridge under resonance condition using multi-sensor fusion](#). *International Journal of Rail Transportation*, 10:456–475.
- [25] Ju, S. H., Lin, H. T. (2003). [Numerical investigation of a steel arch bridge and interaction with high-speed trains](#). *Engineering Structures*, 25:241–250.
- [26] Hashemi, G., Ramhormozian, S., Clifton, G. C. (2024). A Review on Nonlinear Time History Analysis of Structures. *2024 New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical Conference*.
- [27] Frýba, L. (2013). *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*. Springer.
- [28] Yang, Y. B., Yau, J., Yao, Z., Wu, Y. (2004). *Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: with Applications to High-Speed Railways*. World Scientific.