

Nghiên cứu ứng dụng kết cấu dầm lai thép-bê tông cốt thép trong cầu dây văng nhịp lớn - ứng dụng ở Việt Nam

■ PGS. TS. HOÀNG HÀ

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: hoangha.utc2020@gmail.com

TÓM TẮT: Cầu dây văng (CDV) dầm lai thép-bê tông là dạng kết cấu có dầm chủ được tích hợp các phần dầm chủ bằng thép và bê tông theo phương dọc của cầu. Nhờ phần dầm thép có trọng lượng nhẹ hơn nên giảm được nội lực và biến dạng, đồng thời tăng khả năng vượt nhịp. Cấu tạo đoạn dầm thép có thể dạng hộp thép hay kết cấu liên hợp. Bài báo phân tích mức độ ảnh hưởng của cấu tạo đoạn dầm thép đến các hiệu ứng nội lực và biến dạng do hoạt tải trong CDV có dầm lai, áp dụng cho một công trình CDV thực tế ở Việt Nam.

TỪ KHÓA: Cầu dây văng dầm lai, dầm hộp thép, dầm thép liên hợp, hiệu ứng nội lực và biến dạng của hệ kết cấu.

ABSTRACT: The hybrid steel-concrete beam cable-stayed bridges is a structure with main beams that integrate steel and concrete main beam sections along the bridge's longitudinal direction. Because the steel beam has a lighter weight, it reduces internal forces and deformation and increases the ability to span spans. The steel beam structure can be in the form of a steel box or a composite structure. This article analyzes the influence of steel girder section structure on internal force effects and deformation due to live load in cable-stayed bridges with hybrid girders, applied to a real (cable-stayed bridges) project in Vietnam.

KEYWORDS: Cable-stayed bridges with hybrid girders, steel box girders, composite steel girders, internal force effects and deformation of the structural system.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cầu dầm lai thép-bê tông kết hợp dầm chủ bằng bê tông dự ứng lực (BTDUL) và thép dọc theo chiều dài cầu [1]. Trong những năm 1970, các kỹ sư người Pháp đã đưa khái niệm này vào các cầu dầm liên tục, nổi bật nhất là cầu Mathilde bắc qua sông Seine ở Rouen [5]. So với cầu dầm bê tông truyền thống, việc kết hợp đoạn dầm thép trong nhịp chính làm giảm đáng kể trọng lượng bản thân của kết cấu, tránh được sự hình thành vết nứt khu vực giữa nhịp, từ đó tăng khả năng chịu nhịp của cầu. Ở khía cạnh khác, các phần dầm bằng BTDUL (PC) được sử dụng ở phần nhịp biên hay một phần trong phạm vi nhịp chính để phát huy các ưu điểm tăng độ cứng, cải thiện ổn định, giảm nội lực và biến dạng do hoạt tải ở nhịp chính, giảm lực nhổ ở trụ neo, giảm chi phí duy tu và và tiết kiệm chi phí xây dựng. Các ưu điểm này nhanh chóng được ứng dụng cho kết cấu CDV và đã chứng tỏ hiệu quả đặc biệt là đối với các CDV nhịp lớn. Trong *Bảng 1.1* giới thiệu thông số cấu tạo của một số CDV dầm lai trên thế giới và Việt Nam.

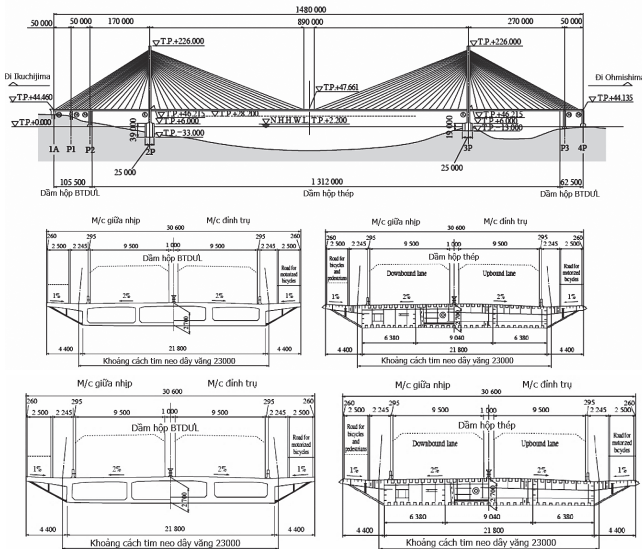
Cho đến nay, việc nghiên cứu sâu rộng về cầu dầm lai thép-bê tông đã được tiến hành cho cả các loại cầu dầm (khung) liên tục và CDV. Các nghiên cứu liên quan này có thể được chia thành ba lĩnh vực chính như sau: (i) Xác định vị trí hợp lý của mối nối thép-bê tông trong nhịp chính; (ii) Đánh giá các đặc tính cơ học và hình học phù hợp của mối nối thép-bê tông và (iii) Phân tích phản ứng động của cầu dầm lai thép-bê tông [3]. Trong nghiên cứu này tập trung vào vấn đề thứ nhất thực chất là vấn đề tỷ lệ chiều dài của đoạn dầm thép trong toàn bộ chiều dài của dầm chủ trong CDV dầm lai.

Đoạn dầm chủ bằng thép thường có cấu tạo dạng hộp thép, tuy nhiên thực tế khai thác các cầu thép cho thấy do cấu tạo mặt cầu bằng thép mỏng, độ rung động lớn nên có thể dẫn đến các khó khăn trong cấu tạo lớp phủ mặt cầu đường ô tô. Giải pháp khắc phục được đưa ra là sử dụng loại dầm hộp liên hợp thép-bản bê tông cốt thép, tuy nhiên giải pháp này có xu thế làm tăng tải trọng bản thân nên cần nghiên cứu đầy đủ hơn.

Bảng 1.1. Thông số kỹ thuật của một số CDV dầm lai

Tên cầu (nước-năm hoàn thành)	Sơ đồ cấu chính dây văng (m)	Vị trí mối nối tổ hợp	Chiều dài đoạn dầm thép (m)	Chiều dài con-xon BTCT ở nhịp chính (m)	Tỷ lệ $L_{\text{thép}}/L_{\text{chính}}$
Nagisa (Nhật - 2012)	25+105,15+19	Nhịp chính	39,15	44,4 và 24,45	0,3723
Nộ Giang (Trung Quốc - 2007)	81+175	Nhịp chính	165,5	9,5	0,9457
Hạ Môn (Trung Quốc - 2014)	135,65+209,15+135,65	Nhịp chính	190,15	9,5 x 2	0,9091

Tên cầu (nước-năm hoàn thành)	Sơ đồ cầu chính dầm vàng (m)	Vị trí mối nối tổ hợp	Chiều dài đoạn dầm thép (m)	Chiều dài con-xon BTCT ở nhịp chính (m)	Tỷ lệ $L_{thép}/L_{chính}$
Normandy (Pháp - 1995)	6x43,5+96+856+96+6x43,5	Nhịp chính	624	116x2	0,7290
Tatara (Nhật - 1999)	2x52,75+ 164,5+890+257,5+62,5	Nhịp biên	1.312	-	1,474
Cần Thơ (Việt Nam - 2010)	2x40+150+550+150+2x40	Nhịp chính	210	170 x2	0,3819
Cầu Đảo Russky (Nga - 2012)	60+72+3x84+1104+3x84+72+60	Nhịp biên	1.248	-	1,1304



Hình 1.1: Sơ đồ tổng thể và mặt cắt ngang dầm chủ của cầu Tatara

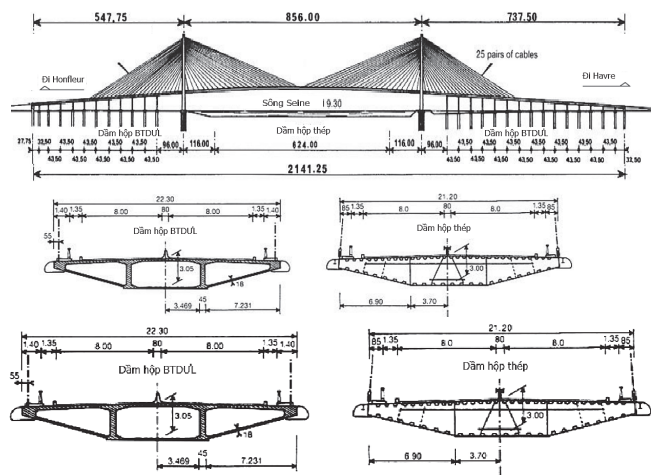
2. LỰA CHỌN VỊ TRÍ MỐI NỐI GIỮA CÁC ĐOẠN DẦM THÉP VÀ BTDƯỠ TRONG DẦM CHỦ

Việc xác định vị trí mối nối thép-bê tông trong thiết kế cầu dầm lai thép-bê tông nói chung và CDV dầm lai là rất quan trọng. Việc sử dụng dầm thép trong nhịp chính có thể nâng cao hiệu suất cơ học, đẩy nhanh tiến độ thi công và nâng cao tính khả thi của công trình [3]. Tuy nhiên, điều cần thiết là phải cân bằng hiệu quả kết cấu với các cân nhắc về mặt kinh tế khi xác định chiều dài tối ưu của dầm hộp thép, vì dầm hộp thép thường đắt hơn so với dầm bê tông [6]. Zhang và cộng sự [2] đã tiến hành một nghiên cứu toàn diện về thiết kế cầu dầm lai và chỉ ra tầm quan trọng của việc xem xét các yếu tố như hiệu suất kết cấu, tính kinh tế và thời gian xây dựng trong việc xác định chiều dài của phần thép.

Một cân nhắc quan trọng khác khi thiết kế cầu dầm liên tục là đảm bảo rằng các gối ở các trụ bên không bị nâng lên dưới bất kỳ tổ hợp tải trọng nào. Vấn đề này có thể được giải quyết một cách hiệu quả bằng cách sử dụng các dầm thép nhẹ ở giữa nhịp chính. Ngoài ra, việc sử dụng dầm bê tông ở nhịp bên có thể cân bằng hiệu quả trọng lượng bản thân của dầm thép trên nhịp chính, từ đó tăng cường độ cứng kết cấu tổng thể. Một số nghiên cứu khác đã đưa ra đề xuất rằng đối với cầu dầm lai, tỷ lệ nhịp biên và nhịp chính phải là 0,4, trong khi tỷ lệ phần thép trên nhịp chính phải nằm trong khoảng 0,4 đến 0,5. Nguyên lý chung để lựa chọn vị trí hợp lý của mối nối giữa phần dầm thép và BTDƯỠ trong kết cấu dầm lai bao gồm:

- Tại vùng có nội lực và biến dạng không quá lớn và phức tạp;
- Đảm bảo tính tương đương và toàn vẹn của hệ thống kết cấu;
- Chuyển tiếp độ cứng êm thuận;
- Đạt các chỉ tiêu kinh tế và điều kiện thuận lợi cho thi công.

Tuy nhiên, kết quả tập hợp ở Bảng 1.1 chỉ ra rằng, vị trí mối nối giữa phần dầm thép - bê tông trong các CDV thực tế cũng rất khác biệt. Trên các Hình 1.1 và 2.1 giới thiệu vị trí mối nối và chiều dài đoạn dầm thép của 2 CDV nhịp lớn điển hình là cầu Tatara (Nhật Bản) và cầu Normandy (Pháp) thể hiện ý tưởng của thiết kế các CDV dầm lai còn nhiều khác biệt.



Hình 2.1: Sơ đồ tổng thể và mặt cắt ngang dầm chủ của cầu Normandy

3. MẶT CẮT NGANG VÀ MỐI NỐI PHẦN DẦM THÉP-BÊ TÔNG CỐT THÉP TRONG CDV DẦM LAI

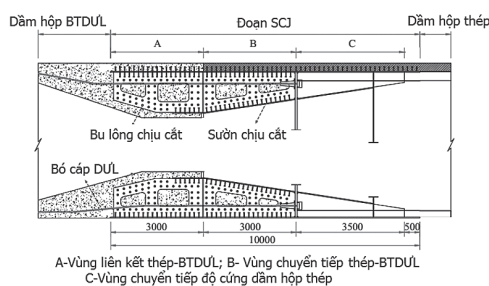
Do áp dụng cho các CDV nhịp lớn nên mặt cắt ngang dầm chủ lai thường có dạng mặt cắt hình hộp. Thiết kế mối nối là một trong những thử thách lớn nhất trong thiết kế các kết cấu dầm lai. Về nguyên lý cần có một đoạn (vùng) chuyển tiếp độ cứng từ phần thép sang phần bê tông, gọi là vùng chuyển tiếp mối nối (Steel-Concrete Join - SCJ).

Tại SCJ, sự thay đổi đột ngột về độ cứng của vật liệu và mặt cắt ở cả hai bên dẫn đến sự mất liên tục về kết cấu và giảm khả năng chịu lực của kết cấu, có thể ảnh hưởng đến sự an toàn của hệ thống cầu [4]. Vì vậy, việc đảm bảo SCJ có đặc tính cơ học tốt và làm cho sự thay đổi độ cứng và lực truyền được trơn tru là vấn đề then chốt trong thiết kế cầu dầm hộp lai.

Cấu tạo, tính chất cơ học và độ bền của mối nối thép-bê tông (SCJ) đóng vai trò liên kết giữa các phần dầm thép và bê tông trong dầm chủ lai đã nhận được sự quan tâm

ngiên cứu đáng kể của nhiều tác giả. Nhiều nghiên cứu đã được tiến hành để kiểm tra tính khả thi về cấu trúc, sự phân bố ứng suất, đặc tính truyền lực, đặc tính trượt, khả năng chịu lực, sự thay đổi độ cứng và hư hỏng do mỏi của SCJ. Những nghiên cứu này cung cấp nền tảng lý thuyết và hướng dẫn kỹ thuật cho việc thiết kế SCJ. Một trong những nguyên lý cơ bản để thiết kế SCJ được áp dụng là phải cấu tạo và thử nghiệm kết cấu mối nối để đảm bảo cho góc quay của bề mặt bê tông và thép ở hai đầu mối nối bằng nhau.

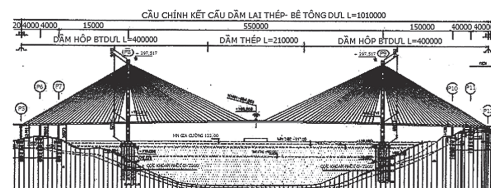
Trên Hình 3.1 giới thiệu cấu tạo đoạn SCJ đóng vai trò mối nối giữa dầm thép và dầm BTĐƯL của CDV Ngọc Giang sử dụng dầm hộp lai trên một tuyến đường sắt cao tốc ở Trung Quốc. Đoạn chuyển tiếp SCJ bao gồm 3 phần: A - Vùng liên kết thép với BTĐƯL; B - Vùng chuyển tiếp từ thép - BTĐƯL và C - Vùng chuyển tiếp độ cứng trong phạm vi dầm hộp thép.



Hình 3.1: Cấu tạo của đoạn dầm chuyển tiếp SCJ trên cầu thực tế

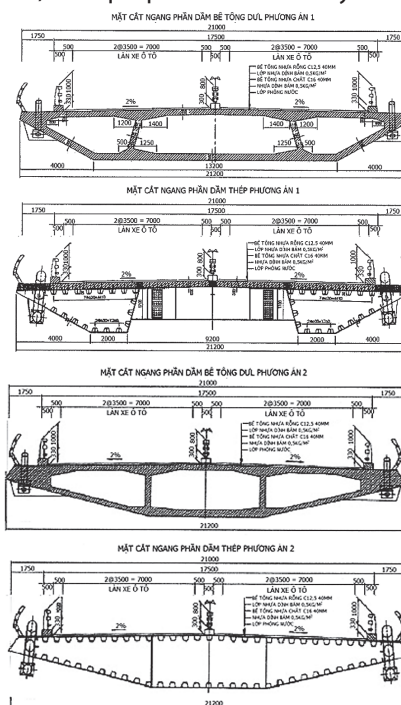
4. ỨNG DỤNG KẾT CẤU DẦM LAI TRONG MỘT SỐ CDV NHỊP LỚN Ở VIỆT NAM

Một số CDV nhịp lớn xây dựng ở Việt Nam đã sử dụng kết cấu dầm lai để giảm nội lực và biến dạng trong các bộ phận của kết cấu, đặc biệt là dầm chủ ở nhịp chính như cầu Cần Thơ hoàn thành năm 2010 có sơ đồ (2x40+150+550+150+2x40), ở nhịp chính dùng đoạn dầm hộp thép kín dài 210 m. Gần đây, trong quá trình thiết kế cầu HS (Hòa Bình) có sơ đồ (2x40+150+550+150+2x40), với nhịp chính 550 m tương tự như cầu Cần Thơ cũng đã sử dụng đoạn dầm hộp thép ở giữa nhịp chính dài 210 m (Hình 4.1).



Hình 4.1: Bố trí chung CDV HS (Hòa Bình)

Mặt cắt ngang dầm chủ so sánh hai phương án dầm lai: Phương án 1 dùng dầm hộp BTĐƯL và đoạn dầm thép dạng hộp thép kín tương tự cầu Cần Thơ. Phương 2 dùng dầm hộp BTĐƯL, đoạn dầm thép sử dụng mặt cắt ngang dạng dầm thép hộp hở - liên hợp với bản mặt cầu bê tông cốt thép (Hình 4.2). Kết quả phân tích trình bày trong Bảng 4.1.



Hình 4.2: Các phương án mặt cắt dầm lai cho CDV HS ở giai đoạn thiết kế

Bảng 4.1. Kết quả so sánh hai phương án thiết kế cầu HS: Phương án 1: Dầm lai hộp thép - hộp BTĐƯL; Phương án 2: Dầm lai hộp thép liên hợp bản bê tông cốt thép - hộp BTĐƯL

Tham số phân tích	Đơn vị	Phương án 1		Phương án 2	
		Dầm hộp BTĐƯL	Dầm hộp thép liên hợp-BTCT	Dầm hộp BTĐƯL	Dầm hộp thép kín
Diện tích m/c ngang	m ²	0,16680 x 10 ²	0,23840 x 10 ¹	0,16690 x 10 ²	0,172940 x 10 ¹
Tĩnh tải bản thân DC1	kN/m	41700,00	18.714,40	41.725,00	13.575,80
Mô-men quán tính chống uốn với trục Y	m ⁴	0,62020 x 10 ³	0,17573 x 10 ²	0,61040 x 10 ³	0,60338 x 10 ²
Mô-men quán tính chống uốn với trục Z	m ⁴	0,18174 x 10 ²	0,15917 x 10 ¹	0,12859 x 10 ²	0,17284 x 10 ¹
Mô-men dương Max dầm chủ với trạng thái giới hạn cường độ (TTGHCD) 1	kN.m	+118.672,30	+43.185,50	+88.400,10	+107.118,30
Mô-men âm Max dầm chủ với TTGHCD1	kN.m	-110.197,50	-81.000,50	-75.242,70	-53.280,70
Lực cắt lớn nhất theo TTGHCD1	kN	16.664,40	5.400,60	14.471,90	6.630,80
Lực nén dọc dầm chủ theo TTGHCD1	kN	182.828,40	14.800,60	128.192,80	13.200,00
Lực kéo dọc dầm chủ theo TTGHCD1	kN	-	11.996,10	-	15.056,10
Lực căng lớn nhất trong cáp văng	kN	4.307,70		4.161,8	
Độ võng do hoạt tải Max	m	0,1975	0,6706	0,1889	0,6875

Trên Hình 4.3 giới thiệu biểu đồ mô-men nội lực của hai phương án so sánh dưới tác động của tổ hợp tải trọng theo TTGHCD1

* **Nhận xét:** Hai phương án dầm lai của cầu HS trong giai đoạn thiết kế được so sánh, phân tích với các điều kiện có cùng sơ đồ bố trí nhịp và chiều dài đoạn dầm thép bằng nhau. Kết quả ở bảng 2 cho phép đưa ra các nhận xét sau đây:

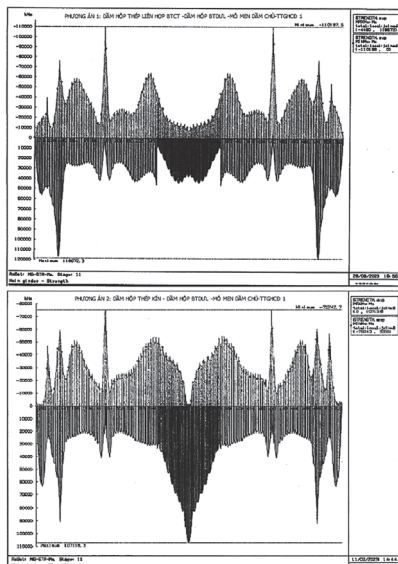
- Tuy có cấu tạo kích thước chi tiết khác nhau nhưng diện tích mặt cắt ngang, độ cứng chống uốn theo phương dọc và ngang cầu và trọng lượng bản thân của các phần dầm hộp BTĐƯL của hai phương án thiết kế là tương tự. Điều này thể hiện rõ vai trò đối trọng, giữ ổn định và chỉ tiêu kinh tế là tương đương nhau. Phương án 2 sử dụng đoạn dầm thép dạng hộp kín có kết cấu nhất quán và sự chuyển tiếp độ cứng của dầm chủ êm thuận hơn. Cụ thể là chênh lệch mô-men quán tính chống uốn quanh trục Y của phương án 1 là 35,29 lần và của phương án 2 là 10,116 lần

- Phương án 1 dùng đoạn dầm thép dạng kết cấu hai hộp thép liên hợp với bản mặt cầu BTCT nhằm 2 tiêu chí: (i) Giảm khối lượng thép dẫn đến tiết kiệm kinh phí; (ii) Tăng cường độ cứng cho bản mặt cầu, tránh độ rung lớn làm hư hỏng lớp phủ mặt cầu như đã xảy ra ở một số công trình cầu có bản mặt cầu bằng thép kiểu Orthotrope. Tuy nhiên, tính tải bản thân tăng 37,9% so với phương án dầm hộp thép kín.

- Mô-men dương Max trong dầm chủ tại nhịp biên theo phương án 1 tăng khoảng 34,2% so với phương án 2 và mô-men âm Max tại mặt cắt đỉnh trụ tháp tăng khoảng 46,5% phù hợp với việc tăng tính tải bản thân. Tuy vậy, ở nhịp chính (vùng bố trí đoạn dầm thép), mô-men dương Max lại giảm đáng kể (59,6%) trong khi mô-men âm Max tăng khoảng 52,1%.

- Lực cắt Max trong dầm theo phương án 1 tăng khoảng 15,2% tại gối và giảm khoảng 18,5% trong phạm vi nhịp chính. Lực dọc và lực căng trong cáp chênh lệch khoảng 34% đến 41%.

- Độ võng tại vị trí giữa nhịp dầm chính do hoạt tải theo hai phương án chênh lệch không đáng kể.



Hình 4.3: Biểu đồ mô-men dầm chủ - TTGHCD1 của hai phương án CDV dầm lai HS

5. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu ứng dụng dầm lai hộp thép-hộp BTĐƯL đã làm rõ thêm một số vấn đề quan trọng sau đây:

- Do giảm được trọng lượng bản thân nên sử dụng kết cấu dầm lai cho thấy rõ hiệu quả giảm nội lực và biến dạng trong dầm chủ phù hợp với độ lớn của trọng lượng bản thân đoạn dầm thép của hai phương án so sánh khoảng 34 đến 35%.

- Sự chuyển tiếp độ cứng và mức chênh lệch về độ cứng giữa các đoạn dầm thép hay thép liên hợp bản bê tông cốt thép so với độ cứng của đoạn dầm BTĐƯL có liên quan trực tiếp và nhạy cảm với sự thay đổi nội lực và biến dạng thể hiện rõ qua việc xuất hiện bước nhảy mô-men trên Hình 4.3.

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy sự cần thiết của việc nghiên cứu đầy đủ hơn về vị trí tổ chức mối nối, mức chênh lệch độ cứng cấu tạo và chuyển tiếp độ cứng của các đoạn dầm thép và dầm hộp BTĐƯL trong kết cấu CDV sử dụng dầm chủ dạng kết cấu lai khi ứng dụng vào thực tế.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Mingwei Mao, Zhi-Qi He, Gao Liu (2024), *An analytical method for determining the rational position of joint section in steel-concrete hybrid girder bridges*, Structures Journal 69, 107431.
- [2]. Arnaud, S., Matsunaga, N., Nagano, S., & Ragaru, J. (2008), *Behavior of a multiple spans cable-stayed bridge*, in J. Walraven, D. Stoelhorst, (Eds) Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for our Society, pp.807-813.
- [3]. Agrawal, T. P. (1997), *Cable-stayed bridges-parametric study*, Journal of bridge engineering, 2(2), 61-67, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(1997\)2:2\(61\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(1997)2:2(61)).
- [4]. Camara, A., & Efthymiou, E. (2016), *Deck-tower interaction in the transverse seismic response of cable-stayed bridges and optimum configurations*, Engineering Structures, 124, 494-506, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.017>.
- [5]. Chen, D. W., Au, F. T. K., Tham, L. G., & Lee, P. K. K. (2000), *Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method*, Computers&Structures, 74(1), 1-9, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00315-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00315-0).
- [6]. EN 1991-2:2003. Eurocode 1: Actions on Structures - Part 2: Traffic Loads on Bridges.
- [7]. Hoàng Hà (12/2024), *Phân tích ảnh hưởng của dạng liên kết trụ tháp và dầm chủ đến hiệu ứng nội lực và biến dạng trong kết cấu CDV chịu tải trọng khai thác*, Tạp chí Cầu đường Việt Nam.
- [8]. Bộ GTVT, *Hồ sơ thiết kế các cầu Cần Thơ và cầu HS (Hòa Bình)*.

Ngày nhận bài: 20/12/2024

Ngày nhận bài sửa: 27/12/2024

Ngày chấp nhận đăng: 10/01/2025