

ĐỀ XUẤT MỘT SỐ TIẾT DIỆN CHỮ I ĐỊNH HÌNH CHO DẦM CẦU DỰ ỨNG LỰC CĂNG TRƯỚC SỬ DỤNG VẬT LIỆU UHPC SẢN XUẤT TẠI VIỆT NAM

Phạm Duy Hòa^a, Khúc Đăng Tùng^{a,*}, Nguyễn Tiến Phát^a, Nguyễn Minh Hùng^a, Lê Bá Danh^a,
Nguyễn Công Thắng^b

^aKhoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng,
số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng,
số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 23/12/2019, Sửa xong 10/02/2020, Chấp nhận đăng 23/02/2020

Tóm tắt

Bê tông chất lượng siêu cao (Ultra-high-performance concrete - UHPC) được xem là vật liệu tương lai trong lĩnh vực xây dựng cầu do các đặc tính cơ lý vượt trội so với bê tông thường, như cường độ chịu nén và uốn lớn, độ dẻo dai cao ... Gần đây, vật liệu UHPC có giá thành giảm do đã nội địa hóa được phần lớn các nguyên liệu đầu vào. Vật liệu này đã được trường Đại học Xây dựng nghiên cứu và sản xuất thành công (NUCE-UHPC). Điều này đã mở ra cơ hội tiềm năng cho việc ứng dụng đại trà NUCE-UHPC tại các dự án cầu trong tương lai gần ở Việt Nam. Nghiên cứu này đã tiến hành việc thử nghiệm trộn loại vật liệu NUCE-UHPC tại các trạm trộn bê tông thương phẩm thông thường; kiểm tra các đặc tính cơ lý; tính toán và đề xuất một số mặt cắt ngang dầm cầu dự ứng lực tiết diện chữ I sử dụng loại vật liệu này. Kết quả tính toán cho thấy rằng với cùng một chiều dài nhịp định hình (18,6 m, 24,5 m, và 33 m), dầm UHPC có chiều cao thấp hơn, thanh mảnh hơn và không cần dùng cốt thép thường. Do đó, trọng lượng của các dầm cầu UHPC cũng nhẹ hơn đáng kể so với các dầm cầu BTCT thông thường cùng kích thước.

Từ khóa: bê tông chất lượng siêu cao; dầm cầu tiết diện chữ I căng trước; sức kháng uốn; sức kháng cắt.

PROPOSING TYPICAL I-SHAPE PRE-TENSIONED GIRDERS FOR BRIDGES USING LOCAL UHPC IN VIETNAM

Abstract

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is recognized as a future material in civil engineering due to its outstanding mechanical and durability properties. Recently, cost-effective UHPC has been studied and produced in National University of Civil Engineering with use of local materials. Thus, it enables a potential for widespread application in bridge projects. In this research, this UHPC is mixed by using conventional concrete mixing systems for verifying its properties. Subsequently, these properties are used for designing typical I-shape pre-tensioned girders of 18.6 m, 24.5 m, and 33 m spans. The design results show that the UHPC girders have some advantages such as lightweight, low profile and without reinforcement when comparing to conventional prestressed concrete girders.

Keywords: ultra high-performance concrete; prestressed I-shape girder; flexural resistance; shear resistance.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(2V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(2V)-01) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tungkd@nuce.edu.vn (Tùng, K. Đ.)

1. Giới thiệu chung

Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) được xem là một trong những loại vật liệu cho tương lai vì các tính chất đặc biệt của nó bao gồm khả năng chịu lực rất cao và bền vững theo thời gian. Mặc dù có một vài định nghĩa khác nhau về khả năng chịu lực của UHPC, cường độ chịu nén tối thiểu của loại vật liệu này phải đạt được là 120 MPa, cường độ chịu kéo khi uốn ít nhất là 8 MPa [1]. Ngoài ra, vật liệu UHPC còn có khả năng chịu mài mòn, khả năng chống chịu trong môi trường thâm nhập mặn và khả năng chống va đập cũng như phá nổ tốt hơn nhiều so với bê tông thường [2]. Các ưu điểm trên của vật liệu UHPC được xem là cơ sở cho việc phát triển và ứng dụng vật liệu này trong các lĩnh vực thiết kế, thi công mới và đặc biệt cho việc sửa chữa công trình. Theo Yoo và Yoon [3], một sự thật khá thú vị là vật liệu UHPC hầu như được nghiên cứu và thử nghiệm trong các công trình cầu bên cạnh một vài ứng dụng cho các công trình đặc biệt khác.

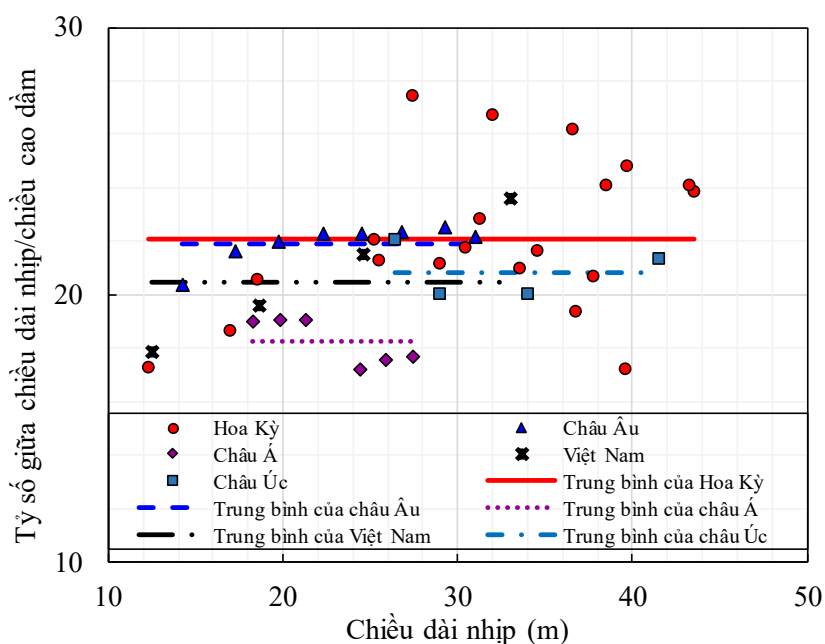
Song song với việc nghiên cứu, vật liệu UHPC đã được đưa ra ứng dụng ngoài thực tế thông qua việc xây dựng khá nhiều các cây cầu tại nhiều nước phát triển. Cầu cho người đi bộ Sherbrooke được xây dựng tại Canada vào năm 1997 là cây cầu đầu tiên trên thế giới sử dụng vật liệu UHPC cho kết cấu nhịp [4]. Tiếp sau sự kiện này, hàng loạt các cây cầu UHPC lần lượt được xây dựng tại nhiều quốc gia như: cầu Bourge-lès-Valence tại Pháp vào năm 2001 [5], cầu Sakata-Mirai tại Nhật Bản vào năm 2002 [6], cầu Seonyudo tại Hàn Quốc vào năm 2002 [7], cầu Mars Hill tại Hoa Kỳ vào năm 2006 [8] và cầu Friedberg tại Đức vào năm 2007 [9]. Trong số các dự án này, cây cầu Bourge-lès-Valence là cầu ô tô đầu tiên trên thế giới được thiết kế với đầy đủ tải trọng theo tiêu chuẩn. Tính đến thời điểm này, mặc dù đã có hàng trăm dự án cầu sử dụng vật liệu UHPC trên toàn thế giới, số lượng các cây cầu sử dụng loại vật liệu này cho kết cấu chịu lực chính như dầm UHPC dự ứng lực còn khá hạn chế. Theo như đánh giá của nhóm tác giả, nguyên nhân của vấn đề này chính là giá thành sản xuất của vật liệu UHPC còn khá cao đã dẫn đến thái độ dè dặt của các chủ đầu tư khi muốn triển khai đại trà loại vật liệu này thay thế cho bê tông thông thường.

Nắm bắt được thực tế đó, việc nghiên cứu và phát triển UHPC sử dụng vật liệu địa phương đã được tiến hành tại nhiều quốc gia. Malaysia là một trong những quốc gia khá thành công trong lĩnh vực này khi đã tự sản xuất và chế tạo được loại UHPC có giá thành dưới 1000 USD cho 1 m³ [10]. Tại Việt Nam, việc nghiên cứu và sản xuất UHPC ở quy mô trong phòng thí nghiệm đã được thực hiện từ trước năm 2013 [11, 12]. Theo các nghiên cứu này, hầu hết các cấp phối của UHPC đều sử dụng vật liệu địa phương như xi măng Portland, cát và các vật liệu thay thế cho silica fume như tro bay hoặc xỉ lò cao. Quá trình nội địa hóa các vật liệu cơ bản đã làm cho cấp phối UHPC sản xuất ra không những có giá thành hạ hơn rất nhiều so với sản phẩm nhập ngoại mà còn giúp xử lý vấn nạn phát thải công nghiệp quy mô lớn ở Việt Nam, vốn chưa được xử lý đáng kể bằng các hướng khác như: san lấp mặt bằng và thi công nền đường [13, 14], hoặc bê tông rỗng thoát nước [15]. Với việc tự chủ được nguồn vật liệu, một số các dự án thực tế đã đưa UHPC vào ứng dụng tại Việt Nam, nổi bật là hàng loạt các cây cầu nhỏ dân sinh được chế tạo nguyên nhịp dài 18 m của nhóm các tác giả tại Viện Khoa học công nghệ Xây dựng [16, 17]. Gần đây, ứng dụng dầm UHPC ứng suất trước có chiều dài 21 m vào dự án cầu An Thượng trên đường ô tô đã được thực hiện bởi nhóm nghiên cứu trường Đại học Xây dựng [18, 19]. Nhận thấy việc áp dụng đại trà dầm cầu UHPC ở nước ta là hoàn toàn khả thi trong tương lai gần [20]. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm mục đích xây dựng một số mặt cắt ngang định hình cho dầm cầu nhịp giản đơn sử dụng vật liệu UHPC sản xuất tại Việt Nam. Trước mắt, loại tiết diện dầm cầu dạng chữ I được lựa chọn để nghiên cứu và đề xuất do loại dầm này có ưu điểm nhẹ hơn các dầm có tiết diện khác cùng chiều dài nhịp. Đây chính là yếu tố quan trọng cho quá trình vận chuyển dầm từ nhà máy đến công trường, cũng như lắp đặt dầm sau này. Các loại dầm có tiết diện khác sẽ được đề xuất trong các nghiên cứu tiếp theo.

2. Các thông số cơ bản của dầm UHPC dự ứng lực căng trước tiết diện chữ I

2.1. Chiều cao dầm

Chiều cao dầm luôn là thông số cơ bản và quan trọng nhất cần được lựa chọn hợp lý khi bắt đầu thiết kế. Thông thường, chiều cao của kết cấu chịu uốn sẽ phụ thuộc vào ba yêu cầu chính: đảm bảo khả năng chịu lực ở trạng thái giới hạn (TTGH) cường độ và TTGH sử dụng, đảm bảo hiệu quả kinh tế và đảm bảo mỹ quan. Trong công trình cầu, chiều cao dầm thường được lựa chọn tùy thuộc vào vật liệu của dầm, chiều dài nhịp, sơ đồ kết cấu của dầm và các yêu cầu đặc biệt khác từ chủ đầu tư. Với kết cấu dầm cầu nhịp giản đơn bê tông cốt thép dự ứng lực (BTCT-DƯL) có tiết diện dạng chữ I, chiều cao dầm đã được nghiên cứu và đề xuất nằm trong phạm vi $(1/20 - 1/22)$ chiều dài của nhịp [21]. Trong thực tế điều tra từ hơn 60 loại dầm tiết diện chữ I trên thế giới, tỷ lệ này được thiết kế cho các dầm định hình có giá trị trung bình khoảng $1/22$ tại Hoa Kỳ và Châu Âu, khoảng $1/18$ tại Châu Á và $1/21$ tại Châu Úc theo như Hình 1. Tại Việt Nam, tỷ lệ giữa chiều cao dầm BTCT-DƯL tiết diện chữ I với chiều dài nhịp được thiết kế tương tự như trên thế giới và nằm trong phạm vi từ $1/18 - 1/22$, với giá trị trung bình khoảng $1/20$.



Hình 1. Phân tích tỷ lệ chiều cao dầm trên chiều dài nhịp của dầm BTCT-DƯL tiết diện chữ I

Dựa trên các thiết kế định hình cho dầm BTCT-DƯL, một vài quốc gia đã thiết kế các dầm UHPC dự ứng lực (UHPC-DƯL) tiết diện chữ I có chiều cao thấp hơn nhằm lợi dụng các siêu tính năng cơ học của loại vật liệu này. Thống kê từ hơn 50 cây cầu UHPC đã xây dựng trên toàn thế giới cho thấy tổng cộng có 6 loại dầm tiết diện chữ I đã được thiết kế với các kích thước liệt kê trong Bảng 1. Trong 6 loại dầm này, một số mặt cắt ngang điển hình đã được áp dụng cho nhiều cầu có cùng chiều dài nhịp, chẳng hạn như loại dầm I-650 của Dura, Malaysia. Bảng 1 cho thấy rằng chiều cao dầm UHPC-DƯL tiết diện chữ I nằm trong phạm vi $1/22 - 1/31$ chiều dài nhịp; với tỷ lệ trung bình khoảng $1/26$. Như vậy với việc sử dụng vật liệu UHPC, chiều cao của dầm đã giảm đi trung bình khoảng 20% so với dầm BTCT-DƯL. Có thể thấy khá nhiều cầu UHPC trên thế giới là các dự án thí điểm, do đó việc tính toán và thiết kế thường thiên về an toàn.

Bảng 1. Thống kê kích thước mặt cắt ngang dầm I-UHPC

Tên cầu	Chiều dài dầm (m)	Chiều cao dầm (m)	h/L	Chiều dày sườn (mm)	Chiều rộng bầu trên (mm)	Chiều rộng bầu dưới (mm)	Số cáp DUL
Cầu Mars Hill	33,53	1,07	$\frac{1}{31,3}$	115	813	711	0 tao 15,2(*) 49 tao 15,2(**)
Cầu The Cat Point Creek ở Richmond County	25,40	1,14	$\frac{1}{22,3}$	178	1194	813	Không có số liệu
Cầu Sainte Pierre La Cour	20	0,75	$\frac{1}{26,7}$	120	350	350	0 tao 15,2(*) 18 tao 15,2(**)
Cầu The Shepherds Creek	15	0,6	$\frac{1}{25}$	100	330	330	06 tao 15,2(*) 14 tao 15,2(**)
Cầu Horikoshi C-ramp	16,60	0,75	$\frac{1}{22,1}$	90	150	480	02 tao 15,2(*) 20 tao 15,2(**)
Dầm định hình I650 của Dura	15 ~ 20	0,65	$\frac{1}{22} - \frac{1}{31}$	100	300	500	04 tao 15,2(*) 21 tao 15,2(**)

(*) là số lượng tao cáp ở bầu trên của dầm; (**) là số lượng tao cáp ở bầu dưới của dầm.

2.2. Các kích thước khác

Các kích thước khác cần được quan tâm khi đề xuất mặt cắt ngang điển hình cho dầm chữ I bao gồm: kích thước bầu dầm và bề rộng sườn dầm. Tương tự như dầm BTCT-DUL, kích thước bầu dưới của dầm UHPC-DUL sẽ được tính toán để đảm bảo đủ không gian bố trí các tao cáp theo thiết kế. Điểm cần chú ý ở đây là các tao cáp được sử dụng cho kết cấu dầm UHPC-DUL căng trước thường có đường kính 15,2 mm nhằm mục đích giảm tối đa kích thước bầu dầm. Bảng 1 cũng cho thấy bề dày sườn dầm UHPC thường được thiết kế có kích thước từ 100-120 mm do các dầm này không sử dụng cốt thép đai. Các nghiên cứu và thí nghiệm cho thấy khả năng chịu lực cắt rất lớn của vật liệu UHPC đã cho phép các dầm sử dụng vật liệu này không cần thiết phải bố trí cốt thép thường [22–24]. Bề rộng phần bầu dầm bên trên được cấu tạo đủ để bố trí các tao cáp trên, thép neo với bản mặt cầu, cũng như đủ diện tích bố trí các điểm kê ván khuôn cho thi công bản mặt cầu nếu cần.

Bảng 2. Lựa chọn các thông số cơ bản cho dầm I UHPC

Các kích thước	Giá trị lựa chọn
Tỷ lệ chiều cao dầm/ chiều dài nhịp	$\frac{1}{25} - \frac{1}{31}$
Chiều dày sườn	100–120 mm
Chiều rộng bản cánh trên	300–500 mm
Chiều rộng bản cánh dưới	Kích thước theo bố trí cáp dự ứng lực sao cho có diện tích mặt cắt nhỏ nhất
Cáp dự ứng lực	Dự ứng lực căng trước với tao các đường kính 15,2 mm
Cốt thép thường	Không sử dụng

Dựa theo các đánh giá trên, các thông số cơ bản được lựa chọn cho dầm UHPC-DUL căng trước tiết diện chữ I như Bảng 2. Chi tiết các thông số sẽ được tính toán và thiết kế tương ứng với chiều dài nhịp tại phần sau của bài báo này dựa trên các đặc tính cơ lý của loại vật liệu UHPC sản xuất tại Việt Nam.

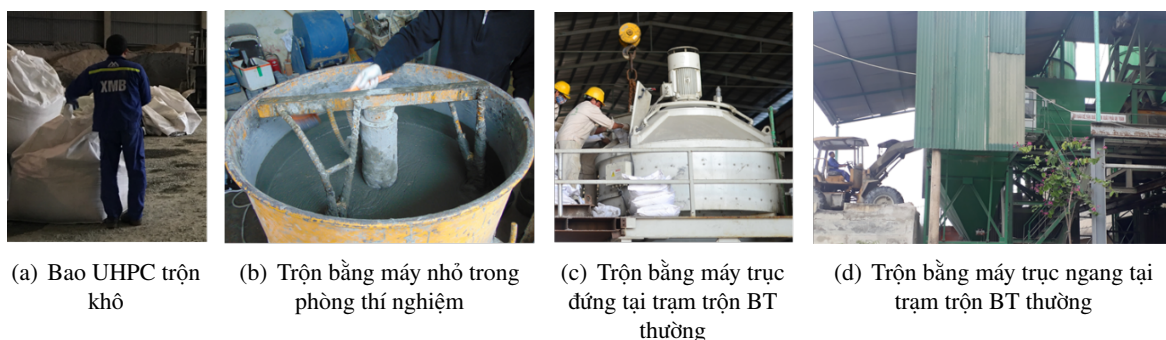
3. Vật liệu UHPC tại Việt Nam: cấp phối và tính chất cơ lý

Trong nghiên cứu này, vật liệu sử dụng là loại NUCE-UHPC được nghiên cứu và phát triển tại trường Đại học Xây dựng có cường độ chịu nén mẫu trụ tiêu chuẩn là 120 MPa. Thành phần hạt được sử dụng cho cấp phối này bao gồm cát quartz có đường kính trung bình 300 μm , xi măng Portland PC40, xỉ lò cao (Ground granulated blast-furnace slag – GGBFS) có đường kính trung bình 7,2 μm , và Silica Fume (SF) có đường kính trung bình 0,15 μm . Toàn bộ các thành phần cấp phối này được sản xuất tại Việt Nam ngoại trừ sợi thép có đường kính 0,2 mm $\times$ dài 13 mm và phụ gia siêu dẻo (Superplasticize – SP) gốc Polycarboxylate được nhập khẩu. Có thể thấy, việc nội địa hóa nhiều thành phần cấp phối cũng như quy trình trộn khô thành phẩm được đóng gói bao lớn tới 500 kg đã làm giảm giá thành của vật liệu NUCE-UHPC. Chi tiết tỷ lệ cấp phối của vật liệu trộn khô thành phẩm NUCE-UHPC được thể hiện như Bảng 3.

Bảng 3. Tỷ lệ thành phần cấp phối của vật liệu NUCE-UHPC trộn khô

Thành phần cấp phối trong 1 m ³ UHPC						
Sợi thép (kg)	Cát nghiền (kg)	Xi măng (kg)	SF (kg)	GGBFS (kg)	SP (kg)	Nước (kg)
158	1100	770	110	220	8,25	176

Vật liệu NUCE-UHPC đã được nghiên cứu và trộn thử nghiệm thành công sử dụng các trạm trộn thông thường vốn được dùng cho bê tông thương phẩm, bao gồm cả máy trộn trực đứng và máy trộn trực ngang. Việc trộn khô các thành phần cấp phối trước khi trộn ướt đã đẩy nhanh quá trình trộn ra thành phẩm vữa, đảm bảo chất lượng đồng đều và ổn định. Hình 2 thể hiện các thử nghiệm trộn UHPC tại các máy trộn khác nhau và đều cho ra các sản phẩm vữa UHPC có chất lượng đồng nhất theo đúng như yêu cầu thiết kế.



Hình 2. Thử nghiệm quy trình trộn theo nhiều phương pháp

Các đặc trưng cơ lý của thành phẩm NUCE-UHPC đã được tiến hành thí nghiệm để xác định theo các tiêu chuẩn của ASTM bao gồm: ASTM C39M [22] cho thí nghiệm xác định cường độ nén của UHPC (sử dụng mẫu trụ 100 mm $\times$ 200 mm), ASTM C469M [23] cho thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi và hệ số Poisson cũng trên mẫu trụ có cùng kích thước, ASTM C1609M [24] cho thí nghiệm xác định cường độ chịu nén khi uốn của UHPC (sử dụng mẫu dầm 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 400 mm). Quá trình chế tạo mẫu và thí nghiệm được thể hiện trên Hình 3. Kết quả các đặc trưng cơ lý của sản phẩm NUCE-UHPC được xác định từ hơn 40 thí nghiệm và được liệt kê trong Bảng 4. Các đặc trưng



Hình 3. Thí nghiệm xác định đặc trưng cơ lý của NUCE-UHPC

cơ lý này sẽ là các thông số đầu vào của vật liệu UHPC phục vụ cho việc tính toán để xuất các mặt cắt ngang định hình cho dầm UHPC-DUL tiết diện chữ I tại nghiên cứu này.

Bảng 4. Kết quả đặc trưng cơ lý của NUCE-UHPC

Đặc trưng cơ lý vật liệu	Giá trị trung bình (Giá trị Min – Giá trị Max)	Đơn vị
Cường độ chịu nén – ASTM C39M; 28 ngày	120,3 (110,8 – 132,2)	MPa
Cường độ chịu nén – ASTM C39M; 3 ngày (tương ứng với ngày cắt cáp dự ứng lực)	98,2 (93,1 – 104,8)	MPa
Mô đun đàn hồi – ASTM C469M; 28 ngày	41,1 (38,2 – 46,9)	GPa
Mô đun đàn hồi – Ước tính từ cường độ chịu nén bởi công thức của Graybeal [1]	42,1 (40,4 – 44,1)	GPa
Cường độ kéo nứt – ASTM C1609M; 28 ngày	8,1 (6,8 – 9,4)	MPa
Hệ số Poisson – ASTM C469M; 28 ngày	0,209 (0,165 – 0,249)	

4. Mặt cắt ngang định hình cho dầm UHPC-DUL tiết diện chữ I

Mặt cắt ngang cho dầm UHPC-DUL tiết diện chữ I được đề xuất dựa trên các cơ sở bao gồm khả năng chịu uốn và chịu cắt của dầm ở TTGH cường độ cũng như các kiểm toán ứng suất của dầm tại các giai đoạn làm việc theo TTGH sử dụng. Do thực tế chưa có một tiêu chuẩn chi tiết cho việc tính toán và thiết kế dầm cầu UHPC-DUL, nhóm tác giả đã đề xuất việc sử dụng kết hợp giữa hai tiêu chuẩn AASHTO LRFD của Hoa Kỳ [25] và khuyến nghị của Hiệp hội kỹ sư Xây dựng Nhật Bản

(JSCE) [26] cho vật liệu UHPC trong nghiên cứu này. Dựa trên các lý thuyết được trình bày sau đây, nhóm tác giả đã đề xuất 3 loại mặt cắt ngang điển hình cho các dầm UHPC-DUL tiết diện chữ I có chiều dài dầm: 18,6 m, 24,5 m, và 33 m. Đây cũng chính là các chiều dài nhịp định hình của dầm BTCT-DUL phổ biến ở Việt Nam hiện nay.

4.1. Sức kháng uốn của dầm UHPC-DUL

Khả năng chịu uốn lớn nhất của tiết diện dầm UHPC-DUL sẽ được tính toán theo AASHTO LRFD bởi công thức (1). Đây là công thức cơ bản dựa trên phương trình cân bằng lực giữa hai vùng vật liệu chịu nén (UHPC) và vật liệu chịu kéo là các tao cáp ứng suất trước. Các giá trị lực nén của UHPC sẽ được tính toán và xác định theo đường cong ứng suất – biến dạng được đề xuất theo khuyến nghị của JSCE (Hình 4(a)).

$$M_n = \sum C_i (c - d_c) + \sum T_i (d_T - c) + A_s f_{ps} (d_p - c) \quad (1)$$

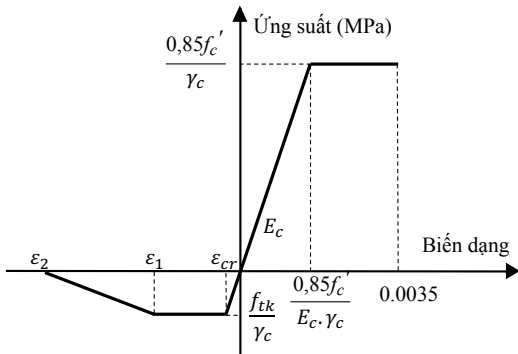
trong đó T là lực kéo tổng hợp tại cùng chịu kéo của UHPC; d_T là khoảng cách từ lực kéo đến thớ trên của dầm; C là lực nén tổng hợp tại vùng chịu nén của UHPC; d_C là khoảng cách từ lực nén đến thớ trên của dầm, và c là chiều cao của vùng chịu nén (Hình 4(b)). Trong công thức này, f_{ps} là ứng suất có hiệu của thép ứng suất trước được tạm thời lấy theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD như công thức (2):

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - k \frac{c}{d_p} \right) \quad (2)$$

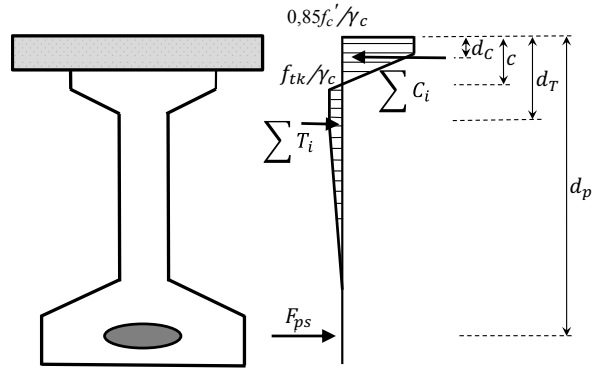
trong đó

$$k = 2 \left(1,04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}} \right) \quad (3)$$

trong đó f_{pu} là cường độ giới hạn và f_{py} là cường độ chảy dẻo của thép ứng suất trước.



(a) Đường cong ứng suất – biến dạng của vật liệu UHPC theo khuyến nghị của JSCE (Nhật Bản) [26]



(b) Tính toán sức kháng uốn của dầm I-UHPC-DUL

Hình 4. Sơ đồ làm việc chịu uốn của dầm I-UHPC-DUL

4.2. Sức kháng cắt của dầm UHPC-DUL

Sức kháng cắt của dầm UHPC-DUL được xác định dựa theo khuyến nghị của JSCE (Nhật Bản). Theo như khuyến nghị này, sức kháng cắt lớn nhất của dầm UHPC-DUL được huy động từ 3 thành phần bao gồm: sức kháng cắt từ vật liệu UHPC dưới tác động của lực nén trước từ cấp ứng suất trước V_{rpcd} , sức kháng cắt từ cốt thép đai hoặc cáp dự ứng lực kéo xiên V_{ped} và sức kháng cắt từ các sợi thép V_{fd} . Trong bài báo này, các dầm được đề xuất không sử dụng các cốt thép đai thông thường dựa theo các khuyến nghị từ các nghiên cứu trước (Bảng 2); và cáp dự ứng lực được căng thẳng dọc theo trục dầm. Khi đó, sức kháng cắt của dầm được xác định theo công thức (4):

$$V_{yd} = V_{rpcd} + V_{fd} \quad (4)$$

Đối với cầu kiện bê tông ứng suất trước, V_{rpcd} được tính toán như công thức (5):

$$V_{rpcd} = \frac{0,18}{\gamma_b} \cdot \sqrt{f'_c} b_w d \quad (5)$$

trong đó f'_c là cường độ chịu nén của UHPC; b_w là bề rộng của sườn dầm; d là chiều cao hữu hiệu của dầm (khoảng cách từ trọng tâm vùng kéo đến trọng tâm vùng nén). Hệ số an toàn $\gamma_b = 1,3$.

Khả năng kháng cắt của cầu kiện là từ cốt sợi thép được xác định theo công thức (6)

$$V_{fd} = \left(\frac{f_{vd}}{\tan \beta_u} \right) b_w \frac{z}{\gamma_b} \quad (6)$$

trong đó f_{vd} là cường độ kéo trung bình theo phương vuông góc với vết nứt; β_u là góc nghiêng của vết nứt so với phương dọc dầm ($\beta_u \geq 30^\circ$, với các tính toán sơ bộ có thể tạm lấy $\beta_u = 30^\circ$); $z = \frac{d}{1,15}$ là khoảng cách từ trọng tâm của vùng nén đến trọng tâm của cáp dự ứng lực.

4.3. Ứng suất giới hạn và độ võng giới hạn của dầm UHPC-DUL tại các giai đoạn

Các ứng suất giới hạn của dầm cầu UHPC-DUL được tạm thời lấy theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD của Hoa Kỳ cho đến khi có các cập nhật mới nhất dùng cho thiết kế cầu sử dụng UHPC. Theo như tiêu chuẩn này, ứng suất giới hạn (nén và kéo) cho phép của dầm cầu UHPC-DUL được xác định theo các công thức (7):

$$f_c = 0,6f'_c \text{ và } f_t = 0,4\sqrt{f'_c} \quad (7)$$

trong đó f_c là ứng suất giới hạn chịu nén, f_t là ứng suất giới hạn chịu kéo, f'_c là cường độ chịu nén của UHPC. Với các kiểm toán tại thời điểm cắt (căng) cấp ứng suất trước, cường độ chịu nén f'_c , phải được xác định tương ứng với độ tuổi của UHPC tại thời điểm này (ví dụ như tại ngày tuổi thứ 3 của UHPC).

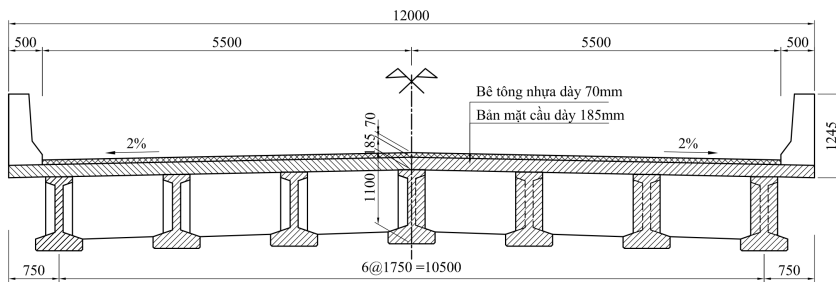
Độ võng là một thông số quan trọng trong thiết kế dầm UHPC. Trong nghiên cứu này nhóm tác giả sử dụng Tiêu chuẩn Thiết kế cầu đường bộ TCVN 11823-3:2017 để kiểm toán độ võng. Theo đó với tải trọng hoạt tải thì độ võng dầm cần phải thỏa mãn công thức (8):

$$\Delta_{LL} \leq [\Delta] = \frac{L}{800} \quad (8)$$

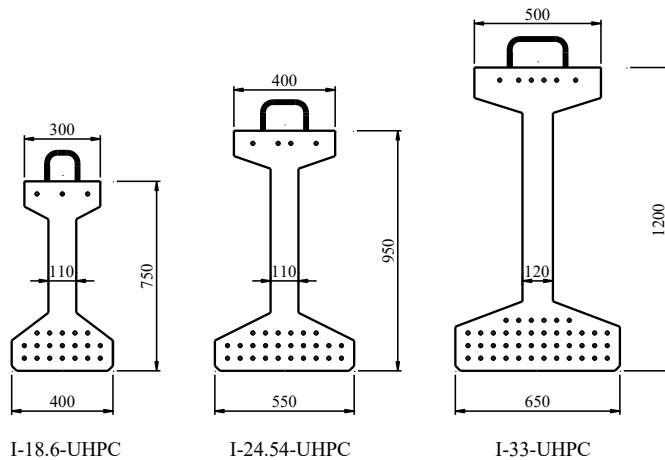
trong đó Δ_{LL} là độ võng của dầm dưới tác dụng của hoạt tải thiết kế; $[\Delta]$, L lần lượt là độ võng giới hạn và chiều dài nhịp tính toán của dầm UHPC.

4.4. Mặt cắt ngang điển hình

Dựa trên các thông số đã được lựa chọn sơ bộ tại Bảng 2, các loại mặt cắt dầm UHPC-DƯL tiết diện chữ I tương ứng với các chiều dài nhịp điển hình 18,6 m, 24,5 m, và 33 m đã được đề xuất, chi tiết như Hình 5. Chú ý rằng tỷ lệ giữa chiều cao dầm với chiều dài nhịp được đề xuất nằm trong khoảng 1/26 là cận dưới của dải tỷ lệ tại Bảng 2. Nguyên nhân việc đề xuất tỷ lệ này là do vật liệu NUCE-UHPC được lựa chọn có cường độ chịu nén nằm trong cận dưới của dải cường độ vật liệu UHPC (120 MPa). Các dầm này được thiết kế tương ứng với mặt cắt ngang cầu giả định có bề rộng 12 m, được cấu thành từ 7 dầm UHPC có khoảng cách giữa các dầm là 1,75 m. Hệ mặt cầu ở đây được giả định sử dụng bản mặt cầu BTCT thường đổ tại chỗ có chiều dày 185 mm (Hình 5). Các thông số của mặt cắt ngang giả định này cũng là các thông số phổ biến trong các cầu ngoài thực tế tại Việt Nam hiện nay. Nội lực dùng để tính toán các dầm UHPC được xác định theo tiêu chuẩn Thiết kế cầu đường bộ TCVN 11823-3:2017.



Mặt cắt ngang cầu giả định



Hình 5. Mặt cắt ngang cầu giả định và các dầm UHPC-DƯL tiết diện chữ I được đề xuất

Với các mặt cắt ngang được đề xuất như trên Hình 5, sức kháng uốn, kháng cắt được xác định theo như mục 4.1 và 4.2. Bảng 5 thể hiện giá trị sức kháng uốn và kháng cắt tại các mặt cắt bất lợi nhất; và được so sánh tương ứng với các giá trị mô men và lực cắt lớn nhất gây ra do tải trọng. Cũng trong bảng này, ứng suất trong dầm UHPC-DƯL tiết diện chữ I tại các giai đoạn làm việc cũng được kiểm tra và so sánh với ứng suất giới hạn của vật liệu UHPC xác định theo công thức (7). Kết quả tính toán, kiểm tra độ võng của từng loại dầm trong các giai đoạn được thể hiện trong Bảng 6. Giá trị độ võng do hoạt tải thiết kế sẽ được kiểm tra và so sánh với độ võng giới hạn theo công thức (8). Các dầm này cũng được thiết kế có sườn mở rộng ở khu vực 3 m phía đầu dầm (kích thước mở rộng bằng bề rộng

của bầu dầm phía trên). Một số tao cáp cũng được thiết kế bọc cáp ở khu vực đầu dầm để đảm bảo thỏa mãn các điều kiện kiểm toán về ứng suất.

Bảng 5. Sức kháng uốn, kháng cắt và ứng suất theo các giai đoạn làm việc của các dầm UHPC-DƯL tiết diện chữ I được đề xuất

Dầm	Trạng thái giới hạn cường độ				Giai đoạn cắt cáp		Giai đoạn khai thác	
	M_u (kNm)	$\varnothing M_n$ (kNm)	V_u (kN)	$\varnothing V_n$ (kN)	Vùng ứng suất kéo; nén trong dầm (MPa)	Ứng suất kéo; nén giới hạn (MPa)	Vùng ứng suất kéo; nén trong dầm (MPa)	Ứng suất kéo; nén giới hạn (MPa)
I-18,6-UHPC	2647	3942	738	1572	(2,27; -34,69)	(3,96; -58,92)	(2,01; -26,14)	(4,39; -72,18)
I-24,54-UHPC	4376	6592	887	2900	(3,9; -32,27)	(3,96; -58,92)	(3,46; -29,27)	(4,39; -72,18)
I-33-UHPC	7564	12471	1109	4487	(3,92; -35,65)	(3,96; -58,92)	(3,51; -33,76)	(4,39; -72,18)

Giá trị ứng suất mang dấu (+) thể hiện ứng suất kéo;

Giá trị ứng suất mang dấu (-) thể hiện ứng suất nén.

Bảng 6. Độ võng theo từng giai đoạn của các dầm UHPC-DƯL tiết diện chữ I được đề xuất

Dầm	Độ võng, võng tại mặt cắt giữa nhịp			
	Giai đoạn cắt cáp (mm)	Giai đoạn khai thác chỉ do tính tải (mm)	Do hoạt tải (mm)	Giá trị giới hạn dưới tác dụng của hoạt tải (mm)
I-18,6-UHPC	-46,5	-4,6	9,3	22,8
I-24,54-UHPC	-54,8	-0,4	11,7	30,1
I-33-UHPC	-72,9	3,7	14,6	40,3

Giá trị ứng suất mang dấu (+) thể hiện độ võng;

Giá trị ứng suất mang dấu (-) thể hiện độ võng.

Bảng 7. Khối lượng vật liệu cơ bản sử dụng cho dầm UHPC-DƯL và BTCT-DƯL có cùng chiều dài nhịp

Dầm	Thể tích bê tông (m^3)		Số tao cáp dự ứng lực (đường kính, mm)		Cốt thép thường (kg)	
	UHPC	BTCT	UHPC	BTCT	UHPC	BTCT
I-18,6	3,22	5,51	22 (15,2)	16 (12,7)	0	335,50
I-24,54	6,12	9,19	30 (15,2)	32 (15,2)	0	998,53
I-33	11,98	14,72	48 (15,2)	44 (15,2)	0	1527,98

Bảng 7 thể hiện tổng hợp khối lượng vật liệu được sử dụng cho dầm UHPC-DƯL và vật liệu được sử dụng cho dầm BTCT-DƯL có cùng chiều dài nhịp. Có thể thấy rằng thể tích lượng UHPC sử dụng cho các dầm đã giảm từ 1,3 đến 1,7 lần so với thể tích bê tông ở dầm BTCT-DƯL; đồng nghĩa với trọng lượng của dầm UHPC-DƯL cũng đã giảm từ 1,3 đến 1,7 lần. Tuy nhiên, có thể thấy rằng lượng thép dự ứng lực sử dụng cho dầm UHPC đã tăng chút ít với 2 dầm 25,4 m và 33 m. Với dầm ngắn 18,6 m thì lượng thép dự ứng lực tăng lên đáng kể do dầm BTCT-DƯL được thiết kế đặt ở khoảng cách khá dày, chỉ 0,9 m. Do dầm UHPC không sử dụng cốt thép thường, chi phí vật liệu và nhân công thi công cốt thép thường đã được loại bỏ.

5. Nhận xét và kết luận

Bài báo đã nghiên cứu và đề xuất 3 mặt cắt dầm UHPC-DUL tiết diện chữ I cho các chiều dài nhịp định hình phổ biến tại Việt Nam bao gồm: 18,6 m, 24,5 m, và 33 m. Các dầm này được thiết kế sử dụng vật liệu NUCE-UHPC, là loại vật liệu đã được nghiên cứu và sản xuất tại Việt Nam do chính các tác giả tại Trường Đại học Xây dựng. Cấp phối NUCE-UHPC được cấu thành từ các vật liệu địa phương ngoại trừ sợi thép và chất phụ gia siêu dẻo. Một số kết luận chính được rút ra từ nghiên cứu được liệt kê như dưới đây:

- Vật liệu NUCE-UHPC được nghiên cứu và sản xuất tại Việt Nam lần đầu tiên đưa ra thử nghiệm trộn bằng các hệ thống máy trộn công nghiệp vốn giành cho bê tông thương phẩm. Chất lượng các mẻ trộn hoàn toàn đảm bảo thông qua việc các chỉ tiêu cơ lý của UHPC tuân thủ theo đúng yêu cầu của thiết kế cấp phối.

- Việc nội địa hóa phần lớn các cốt liệu là cơ sở để giảm giá thành thành phẩm NUCE-UHPC. Bên cạnh đó, việc sử dụng các trạm trộn thông thường đã mở ra những cơ hội tiềm năng để phát triển ứng dụng vật liệu UHPC đại trà và rộng rãi, xóa bỏ định kiến rằng vật liệu UHPC phải được trộn trong các hệ thống trộn đặc biệt.

- Các dầm cầu UHPC-DUL có tiết diện chữ I được tính toán và thiết kế dựa theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD của Hoa Kỳ kết hợp với khuyến nghị của Hiệp hội kỹ sư Xây dựng Nhật Bản (JSCE) cho vật liệu UHPC. Các kết quả thiết kế mặt cắt ngang dầm cầu khá tương đồng với các thiết kế của các cầu UHPC đã được xây dựng thành công trên thế giới.

- Việc sử dụng vật liệu UHPC đã làm giảm chiều cao trung bình của dầm UHPC-DUL có tiết diện chữ I khoảng 20%; đồng thời tiết diện mặt cắt ngang cũng như trọng lượng của phiên dầm giảm trung bình từ 1,3 – 1,7 lần so với dầm BTCT-DUL. Các đặc điểm này giúp tạo ra các kết cấu đẹp hơn và có độ thanh mảnh cao hơn. Ngoài ra, việc giảm trọng lượng phiên dầm sẽ giúp thuận tiện hơn trong việc lựa chọn và triển khai các biện pháp lao lắp và thi công.

- Có thể thấy rằng lượng thép ứng suất trước được sử dụng trong dầm UHPC- DUL cao hơn trong dầm BTCT- DUL; điều này có thể giải thích do chiều cao dầm UHPC đã được thiết kế thấp hơn đáng kể. Tuy nhiên việc loại bỏ sử dụng cốt thép thường đã mang lại nhiều hiệu quả trong quá trình chế tạo dầm.

Mặc dù khá nhiều ưu điểm được liệt kê, giá thành của vật liệu UHPC vẫn khá cao. Do đó, việc tính toán hiệu quả của việc sử dụng dầm UHPC- DUL cần được xem xét một cách tổng thể hơn; và có thể phải kể đến cả các ưu điểm về độ bền công trình, độ thẩm mỹ bên cạnh giá thành. Ngoài ra, việc sử dụng kết cấu dầm cầu UHPC-DUL cần phải đặc biệt tuân thủ theo một quy trình trộn và đổ bê tông nghiêm khắc, có nghiên cứu và thử nghiệm trước. Một quy trình thi công và chế tạo không hợp lý có thể dễ dàng dẫn đến các sản phẩm dầm kém chất lượng hoặc hư hỏng. Các tiết diện được đề xuất ở đây có thể là cơ sở ban đầu cho việc lên kế hoạch chế tạo và thi công đại trà cầu đường bộ UHPC tại Việt Nam.

Lời cảm ơn

Các tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Bộ Giáo dục và Đào tạo và Trường Đại học Xây dựng cho đề tài “Nghiên cứu thiết kế và quy trình công nghệ chế tạo một số dạng kết cấu cầu sử dụng vật liệu bê tông chất lượng siêu cao ở Việt Nam”, mã số CTB-2017-01-03.

Tài liệu tham khảo

- [1] Graybeal, B. A. (2006). *Material property characterization of ultra-high performance concrete*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- [2] Danh, L. B., Hòa, P. D., Thắng, N. C., Linh, N. Đ., Dung, B. T. T., Lộc, B. T., Đạt, Đ. V. (2019). **Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tác động tải trọng nổ của vật liệu bê tông chất lượng siêu cao (UHPC)**. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 13(3V):12–21.
- [3] Yoo, D.-Y., Yoon, Y.-S. (2016). **A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete**. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10 (2):125–142.
- [4] Blais, P. Y., Couture, M. (1999). Precast, prestressed pedestrian bridge-world's first reactive powder concrete bridge. *PCI Journal*, 44(5).
- [5] Hajar, Z., Lecointre, D., Simon, A., Petitjean, J. (2004). Design and construction of the world first ultra-high performance concrete road bridges. *Proceedings of the Int. Symp. on UHPC, Kassel, Germany*, 39–48.
- [6] Tanaka, Y., Musya, H., Ootake, A., Shimoyama, Y., Kaneko, O. (2002). Design and construction of Sakata-Mirai footbridge using reactive powder concrete. *Proceedings of the 1st fib Congress Concrete Structure in the 21st Century, Osaka, Japan*, 1:103–104.
- [7] Behloul, M., Lee, K. C. (2003). **Ductal® seonyu footbridge**. *Structural Concrete*, 4(4):195–201.
- [8] Wipf, T. J., Phares, B. M., Sritharan, S., Degen, B. E., Giesmann, M. T. et al. (2009). Design and evaluation of a single-span bridge using ultra-high performance concrete. Technical report, Highway Research Board, Iowa.
- [9] Knippers, J., Pelke, E., Gabler, M., Berger, D. (2010). **Bridges with Glass Fibre-Reinforced Polymer Decks: The Road Bridge in Friedberg, Germany**. *Structural Engineering International*, 20(4):400–404.
- [10] Tadros, M. K., Voo, Y. L. (2016). Taking Ultra-High-Performance Concrete to New Heights. *ASPIRE*, 10(3):36–38.
- [11] Thắng, N. C., Tuấn, N. V., Hanh, P. H., Lâm, N. T. (2012). Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng vật liệu sẵn có ở Việt Nam. *Tạp chí Xây dựng*, 12:71–74.
- [12] Thắng, N. C., Thắng, N. T., Hanh, P. H., Tuấn, N. V., Thành, L. T., Lâm, N. T. (2013). **Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng hỗn hợp phụ gia khoáng silica fume và tro bay sẵn có ở Việt Nam**. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 7(1):83–92.
- [13] Hoang, T., Nguyen, V. P., Thai, H. N. (2020). **Use of coal ash of thermal power plant for highway embankment construction**. *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*, Springer, 433–439.
- [14] Phương, N. V., Vĩnh, Đ. V. (2017). **Một số định hướng sử dụng tro bay nhiệt điện trong xây dựng đường ô tô ở điều kiện Việt Nam**. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXD*, 11(2):22–25.
- [15] Dong, N. V., Hanh, P. H., Tuan, N. V., Minh, P. Q., Phuong, N. V. (2020). **The effect of mineral admixture on the properties of the binder towards using in making pervious concrete**. *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*, Springer, 367–372.
- [16] Việt, T. B., Long, L. M., Hoa, N. T. (2016). Research design UHPC bridge with HL93 load at the Vietnam township. *The 7th International Conference of Asian Concrete Federation “Sustainable concrete for now and the future”, Hanoi, Vietnam*.
- [17] Việt, T. B., Long, L. M., Hoa, N. T. (2016). Studying on the construction of 18m-span UHPC bridge for two-wheel transportation means in Hau Giang, Vietnam. *The 7th International Conference of Asian Concrete Federation “Sustainable concrete for now and the future”, Hanoi, Vietnam*.
- [18] Tấn, T. V., Dung, V. T. K., Bình, T. Đ., Dừa, Đ. V., Yển, V. K. (2020). **Hiệu quả ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao cho công trình cầu nghiên cứu cho cầu dân sinh An Thượng-Thành phố Hưng Yên**. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXD*, 14(1V):46–59.
- [19] Hưng, C. V., Tùng, K. Đ., Tuấn, N. V., Hòa, P. D. (2019). **Trường Đại học Xây dựng ứng dụng thành công bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) xây dựng công trình cầu dân sinh An Thượng, thành phố Hưng Yên**. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXD*, 13(1V):98–100.
- [20] Hà, N. B., Hòa, P. D., Tuấn, N. Q., Tuyển, N. N., Bảo, N. Q. (2019). **Phân tích và đánh giá xu hướng ứng**

dụng vật liệu bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXD*, 13(3V):1–11.

- [21] Chen, W. F., Duan, L. (2014). *Bridge Engineering Handbook, Five Volume Set*. CRC Press.
- [22] Giesler, A. J., McGinnis, M. J., Weldon, B. D. (2018). Flexural behavior and analysis of prestressed ultra-high-performance concrete beams made from locally available materials. *PCI Journal*, 63(6).
- [23] Manning, M. P., Weldon, B. D., McGinnis, M. J., Jáuregui, D. V., Newton, C. M. (2016). [Behavior Comparison of Prestressed Channel Girders from High-Performance and Ultrahigh-Performance Concrete](#). *Transportation Research Record*, 2577(1):60–68.
- [24] Voo, Y. L., Foster, S. J., Voo, C. C. (2015). [Ultrahigh-performance concrete segmental bridge technology: Toward sustainable bridge construction](#). *Journal of Bridge Engineering*, 20(8):B5014001.
- [25] L. AASHTO (2012). *LRFD bridge design specifications and commentary*. Washington, DC.
- [26] JSCE (2004). *Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures (Draft)*.