# BÊ TÔNG TÍNH NĂNG SIÊU CAO (UHPC) TRONG XÂY DỰNG CẦU VIỆT NAM: NGHIÊN CỨU, LÀM CHỦ CÔNG NGHỆ VÀ ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN

**Trần Bá Việt[1], Lê Anh Đức[2], Cao Cự Vinh[3]**

[1] Hội Bê tông Việt Nam

[2] Công ty Cổ phần Tư vấn đầu tư và xây dựng Đất Việt

[3] Nippon Koei Co., Ltd.

## TÓM TẮT

Bê tông tính năng siêu cao (Ultra-High Performance Concrete - UHPC) là vật liệu xi măng cốt sợi có cường độ chịu nén rất cao, khả năng chịu kéo và duy trì sức kháng sau nứt, cấu trúc đặc chắc và độ bền lâu vượt trội so với bê tông thông thường. Những đặc tính này tạo điều kiện phát triển các kết cấu cầu có tiết diện thanh mảnh, khối lượng bản thân nhỏ, khả năng vượt nhịp lớn và nhu cầu bảo trì thấp. Bài báo tổng kết quá trình tiếp nhận, nghiên cứu, nội địa hóa, ứng dụng và từng bước làm chủ công nghệ UHPC trong xây dựng cầu tại Việt Nam theo toàn bộ chuỗi giá trị, từ vật liệu, thiết kế kết cấu, chế tạo cấu kiện, thi công, kiểm soát chất lượng đến tiêu chuẩn hóa và phát triển hệ sinh thái công nghệ. Trên cơ sở tổng hợp các kết quả nghiên cứu trong nước, hệ thống tiêu chuẩn TCVN đã ban hành và kinh nghiệm triển khai thực tế, bài báo đánh giá mức độ chủ động của các đơn vị Việt Nam trong thiết kế cấp phối, xác định đặc trưng cơ học, mô hình hóa ứng xử, thiết kế kết cấu dự ứng lực, sản xuất cấu kiện và tổ chức thi công. Nghiên cứu điển hình dầm U-UHPC dự ứng lực nhịp 50 m được sử dụng để minh họa năng lực thiết kế và chế tạo trong nước, bao gồm cấu tạo mặt cắt, phân tích mômen, lực cắt, độ võng và so sánh sơ bộ với phương án dầm Super-T. Kết quả cho thấy Việt Nam đã cơ bản làm chủ nhiều công nghệ cốt lõi của UHPC; tuy nhiên, quy mô ứng dụng còn hạn chế bởi thiếu dữ liệu thí nghiệm nguyên mẫu nhịp lớn, dữ liệu khai thác dài hạn, định mức kinh tế - kỹ thuật và cơ chế chấp thuận công nghệ mới. Bài báo đề xuất lộ trình phát triển gồm thử nghiệm dầm tỷ lệ thực, triển khai công trình thí điểm, hoàn thiện tiêu chuẩn và định mức, đánh giá chi phí vòng đời, phát triển chuỗi cung ứng và tăng cường phối hợp giữa cơ quan quản lý, cơ sở nghiên cứu, tư vấn, nhà thầu và doanh nghiệp sản xuất.

**Từ khóa:** UHPC; cầu bê tông; làm chủ công nghệ; dầm U dự ứng lực; nhịp 50 m; chi phí vòng đời.

## ABSTRACT

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) is a fiber-reinforced cementitious material characterized by high compressive strength, enhanced tensile and post-cracking capacity, a dense microstructure, and superior durability. These properties enable slender, lightweight and long-span bridge structures with reduced maintenance demand. This paper reviews Vietnam’s journey in receiving, researching, localizing, applying and progressively mastering UHPC technology across the entire value chain, including materials, structural design, component production, construction, quality control, standardization and technology ecosystem development. Based on domestic research, recently issued Vietnamese standards and practical applications, the paper evaluates the country’s capability in mix design, mechanical characterization, structural modeling, prestressed member design, industrial fabrication and field

implementation. A 50-m-span prestressed U-UHPC girder is presented as a representative case study to demonstrate domestic design and manufacturing competence through cross-sectional configuration, bending moment, shear force and deflection analyses, as well as a preliminary comparison with a conventional Super-T alternative. The review indicates that Vietnam has mastered several core UHPC technologies, while wider implementation is still constrained by limited full-scale long-span testing, long-term monitoring data, techno-economic norms and approval mechanisms for innovative solutions. A development roadmap is proposed, including full-scale girder testing, pilot projects, completion of standards and cost norms, life-cycle assessment, supply-chain expansion and stronger coordination among regulators, research institutions, consultants, contractors and manufacturers.

**Keywords:** Ultra-High Performance Concrete; bridge technology; technology mastery; prestressed U-girder; 50-m span; life-cycle cost.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển nhanh của hệ thống hạ tầng giao thông tại Việt Nam đang đặt ra yêu cầu ngày càng cao đối với chất lượng, tuổi thọ, tốc độ thi công và hiệu quả đầu tư của công trình cầu. Đối với các tuyến đường bộ cao tốc, đường sắt tốc độ cao, đường sắt đô thị, cầu vượt biển và cầu cạn qua khu vực đất yếu hoặc đô thị hóa cao, giải pháp kết cấu không chỉ phải đáp ứng khả năng chịu lực mà còn phải hạn chế số lượng trụ, giảm khối lượng thi công tại hiện trường, rút ngắn thời gian chiếm dụng mặt bằng và giảm nhu cầu sửa chữa trong quá trình khai thác.

Các kết cấu dầm bê tông dự ứng lực thông thường có ưu điểm về mức độ phổ biến, năng lực sản xuất và chi phí vật liệu ban đầu, nhưng khi tăng chiều dài nhịp thường phát sinh các hạn chế về chiều cao dầm, khối lượng bản thân, tải trọng tác dụng lên trụ - móng và yêu cầu thiết bị vận chuyển, lao lắp. Trong môi trường xâm thực, sự hình thành vết nứt và quá trình xâm nhập của nước hoặc ion clorua có thể làm gia tăng nguy cơ ăn mòn cốt thép, dẫn đến chi phí bảo trì đáng kể trong vòng đời công trình.

UHPC được phát triển theo triết lý tối ưu đồng thời cường độ, khả năng chịu kéo, độ dẻo dai và độ bền lâu. Nhờ hệ hạt mịn được tối ưu, tỷ lệ nước/chất kết dính thấp, phụ gia khoáng hoạt tính và cốt sợi phân tán, UHPC có thể duy trì sức kháng sau khi nứt và hình thành cấu trúc có độ thấm rất thấp [1], [2]. Vật liệu này vì vậy mở ra khả năng phát triển các cấu kiện cầu thành mỏng, nhẹ, đúc sẵn và có chiều dài nhịp lớn hơn, đồng thời giảm số lượng mối nối, gối cầu, khe co giãn và các bộ phận cần bảo trì.

Tại Việt Nam, UHPC đã trải qua gần hai thập kỷ từ nghiên cứu vật liệu trong phòng thí nghiệm đến thiết kế, chế tạo cấu kiện và triển khai trong một số công trình giao thông. Sự ra đời của bộ tiêu chuẩn TCVN 13735:2023, TCVN 13736:2023 và TCVN 13737:2023 ( chuẩn bị ban hành) đánh dấu bước chuyển quan trọng từ ứng dụng theo hồ sơ riêng lẻ sang hình thành khung kỹ thuật quốc gia [8],[10]. Tuy nhiên, để UHPC trở thành giải pháp được áp

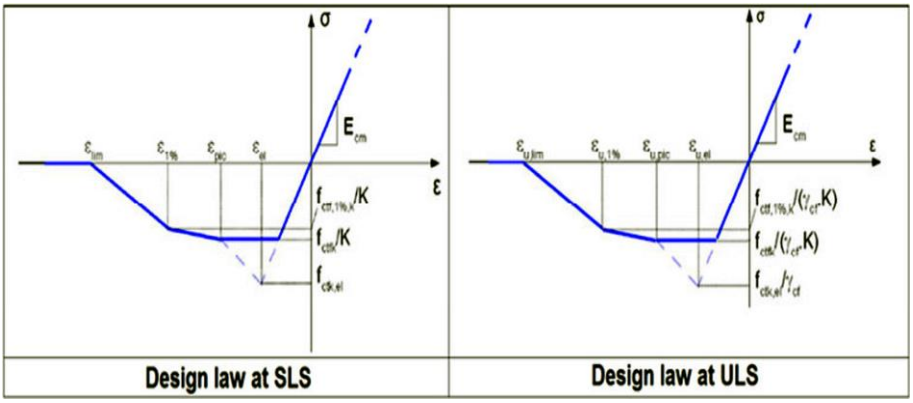
dụng có hệ thống cho cầu trên quốc lộ và cao tốc, cần đánh giá khách quan mức độ làm chủ, chỉ rõ các giới hạn hiện tại và xây dựng lộ trình phát triển phù hợp.

Bài báo tập trung tổng kết hành trình nghiên cứu, ứng dụng và làm chủ công nghệ UHPC trong xây dựng cầu tại Việt Nam; đánh giá năng lực trong nước theo chuỗi vật liệu - thiết kế - chế tạo - thi công - ứng dụng - tiêu chuẩn hóa; đồng thời sử dụng nghiên cứu dầm U-UHPC dự ứng lực nhịp 50 m cho cầu và cầu cạn, làm trường hợp điển hình minh họa cho khả năng chuyển từ nghiên cứu vật liệu sang phát triển giải pháp kết cấu nhịp lớn.

## 2. TỔNG QUAN CÔNG NGHỆ VÀ TÌNH HÌNH ÁP DỤNG

UHPC được hình thành từ các nghiên cứu về bê tông bột phản ứng vào cuối thập niên 1980 và đầu thập niên 1990. Khác với bê tông cường độ cao truyền thống, UHPC không chỉ hướng đến tăng cường độ chịu nén mà còn kiểm soát cấu trúc vi mô, cơ chế nứt, khả năng chịu kéo và độ bền lâu. Thành phần vật liệu thường gồm xi măng, cát mịn, bột khoáng, silica fume, phụ gia siêu dẻo, nước và sợi thép cường độ cao; cốt liệu thô được loại bỏ hoặc hạn chế để tăng tính đồng nhất của ma trận [1], [11].

Trong thiết kế kết cấu, điểm khác biệt cốt lõi của UHPC là khả năng duy trì ứng suất kéo sau vết nứt đầu tiên nhờ cơ chế bắc cầu của sợi. Do đó, quan hệ ứng suất - biến dạng kéo không thể được thay thế bằng giả thiết bê tông không chịu kéo như trong nhiều mô hình bê tông cốt thép thông thường. Các hướng dẫn của AFGC, JSCE, FHWA, ACI và AASHTO đều yêu cầu đặc trưng hóa vật liệu bằng thí nghiệm phù hợp và sử dụng các đường cong thiết kế riêng cho trạng thái giới hạn sử dụng và trạng thái giới hạn cường độ [2]-[6].

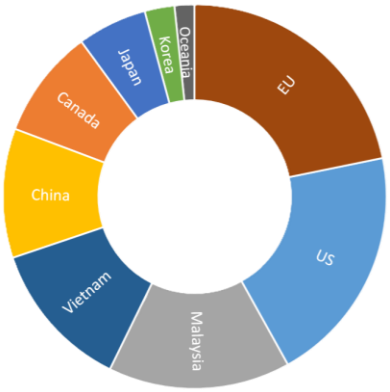



*Hình 1. Mô hình quan hệ ứng suất - biến dạng của UHPC tại SLS và ULS.*

Trên thế giới, UHPC được ứng dụng cho dầm dự ứng lực, dầm chữ U, dầm chữ I, dầm Double-T, bản mặt cầu, liên kết cấu kiện lắp ghép, lớp phủ tăng cường và bản mặt cầu liên hợp Thép - UHPC. Sự phát triển của tiêu chuẩn và công nghệ sản xuất đã giúp vật liệu chuyển từ các công trình trình diễn sang các ứng dụng hạ tầng có tính lặp lại. Kinh nghiệm quốc tế cho thấy hiệu quả của UHPC thường không nằm ở giá vật liệu riêng lẻ mà ở khả năng tối ưu tổng thể hệ kết cấu: giảm vật liệu, giảm tự trọng- tĩnh tải, tăng nhịp, giảm trụ - móng, rút ngắn thời gian thi công và giảm chi phí bảo trì [5], [6].

UHPC đã được ứng dụng thành công vào rất nhiều dự án cầu trên thế giới. [13]:

| Country / Region | Number of bridges applied |
|---|---|
| US | 240 |
| Canada | 110 |
| Malaysia | 183 |
| China | 130 |
| Japan | 70 |
| Korea | 30 |
| Vietnam | 150 |
| EU | 260 |
| Oceania | 20 |
| **Total** | **1193** |




*Bảng 1. Thống kê số lượng dự án cầu đã ứng dụng UHPC.*

Tại Việt Nam, quá trình phát triển UHPC diễn ra theo hướng nội địa hóa tương đối rõ nét. Thay vì phụ thuộc hoàn toàn vào sản phẩm thương mại nhập khẩu, các nhóm nghiên cứu đã tập trung xây dựng cấp phối từ vật liệu trong nước, đánh giá đặc trưng cơ học trong điều kiện khí hậu nhiệt đới và phát triển quy trình chế tạo phù hợp với năng lực của các nhà máy cấu kiện. Các ứng dụng ban đầu tập trung ở cầu nhịp nhỏ, cấu kiện đúc sẵn, liên kết và sửa chữa; sau đó mở rộng sang nghiên cứu dầm dự ứng lực nhịp vừa và nhịp lớn [12].

## 3. NGHIÊN CỨU, ỨNG DỤNG VÀ LÀM CHỦ CÔNG NGHỆ TẠI VIỆT NAM

### 3.1. Giai đoạn tiếp cận và nghiên cứu nền tảng

Từ giữa những năm 2000, các cơ sở nghiên cứu, trường đại học và doanh nghiệp Việt Nam bắt đầu tiếp cận UHPC thông qua tài liệu quốc tế, chương trình hợp tác và các đề tài về bê tông cốt sợi cường độ cao. Nội dung nghiên cứu ban đầu tập trung vào ảnh hưởng của tỷ lệ nước/chất kết dính, thành phần hạt, silica fume, phụ gia siêu dẻo, loại và hàm lượng sợi thép đối với tính công tác, cường độ nén, cường độ kéo khi uốn và độ bền lâu.

Một chuyển biến quan trọng của giai đoạn này là việc đánh giá UHPC không chỉ bằng cường độ nén. Các chỉ tiêu như cường độ kéo trực tiếp, ứng xử sau nứt, mô đun đàn hồi, độ co ngót, độ thấm ion clorua, khả năng chịu tải trọng lặp và độ phân tán sợi từng bước được đưa vào thí nghiệm. Cách tiếp cận này tạo nền tảng để chuyển từ "bê tông cường độ rất cao" sang "vật liệu thiết kế theo hiệu năng siêu cao", phù hợp với triết lý của các hướng dẫn quốc tế.

### 3.2. Làm chủ công nghệ vật liệu và kiểm soát chất lượng

Giai đoạn tiếp theo tập trung vào nội địa hóa nguyên liệu và quy trình sản xuất. Các nghiên cứu cho thấy xi măng Poóc lăng, cát thạch anh hoặc cát silic, silica fume, xỉ hạt lò cao nghiền mịn và các loại phụ gia siêu dẻo, phụ gia điều chỉnh có thể được lựa chọn từ nguồn

cung trong nước để chế tạo UHPC đáp ứng yêu cầu kết cấu. Việc tối ưu hóa cấp phối hạt giúp giảm lỗ rỗng, nâng cao tính đồng nhất và bảo đảm tính công tác của hỗn hợp mặc dù tỷ lệ nước/chất kết dính rất thấp.

*Bảng 2. Các chỉ tiêu đầu vào điển hình của UHPC dùng cho nghiên cứu dầm U nhịp 50 m*

| Chỉ tiêu | Giá trị lựa chọn |
|---|---|
| Hàm lượng sợi thép | ≥ 1,7% theo thể tích |
| Khối lượng thể tích hỗn hợp | > 2.500 kg/m³ |
| Độ chảy xòe theo ASTM C230 | 16-22 cm |
| Cường độ chịu nén R28 | > 150 MPa |
| Cường độ kéo tại nứt đầu tiên | ≥ 8,0 MPa |
| Cường độ kéo cực đại | ≥ 11,0 MPa |
| Mô đun đàn hồi R28 | > 48 GPa |
| Co khô sau bảo dưỡng nhiệt ẩm | ≤ 200 µm/m |
| Điện lượng thấm ion clorua | < 200 Coulomb |

*Nguồn: Tổng hợp từ yêu cầu vật liệu trong bộ tài liệu TCVN 13735-13737:2023.*

Cùng với thiết kế cấp phối, công nghệ trộn và kiểm soát phân tán sợi có vai trò quyết định. Hỗn hợp UHPC chứa lượng lớn bột mịn nên cần thiết bị trộn cưỡng bức có năng lượng phù hợp, trình tự cấp liệu được kiểm soát và thời gian trộn đủ để hình thành trạng thái đồng nhất. Việc cấp sợi phải được thực hiện từ từ trong khi máy vận hành để hạn chế vón cục và phân bố không đều. Kiểm soát chất lượng cần bao phủ từ nguyên liệu đầu vào, độ ẩm cốt liệu, sai số định lượng, độ chảy xòe, nhiệt độ hỗn hợp đến thí nghiệm cơ học và độ bền lâu của mẫu đại diện.

Việc ban hành TCVN 13735:2023 về vật liệu và phương pháp thử, TCVN 13736:2023 về thi công - nghiệm thu và TCVN 13737:2023 về yêu cầu thiết kế kết cấu đã tạo nền tảng thống nhất cho quá trình kiểm soát chất lượng [8],[10]. Đây là dấu mốc cho thấy năng lực trong nước đã chuyển từ thực hiện thí nghiệm riêng lẻ sang hình thành hệ thống yêu cầu bao quát vật liệu, thiết kế và thi công.

### 3.3. Làm chủ công nghệ thiết kế kết cấu

Sau khi làm chủ cấp phối và đặc trưng hóa vật liệu, trọng tâm nghiên cứu được chuyển sang thiết kế kết cấu nhằm khai thác hợp lý khả năng chịu kéo sau nứt, độ cứng và cường độ cao của UHPC. Năng lực thiết kế không chỉ bao gồm sử dụng phần mềm phân tích mà còn đòi hỏi thiết lập mô hình vật liệu, xác định các hệ số thiết kế, lựa chọn sơ đồ kết cấu, bố trí dự ứng lực, kiểm tra các giai đoạn thi công và đánh giá đồng thời trạng thái giới hạn cường độ (ULS) và trạng thái giới hạn sử dụng (SLS).

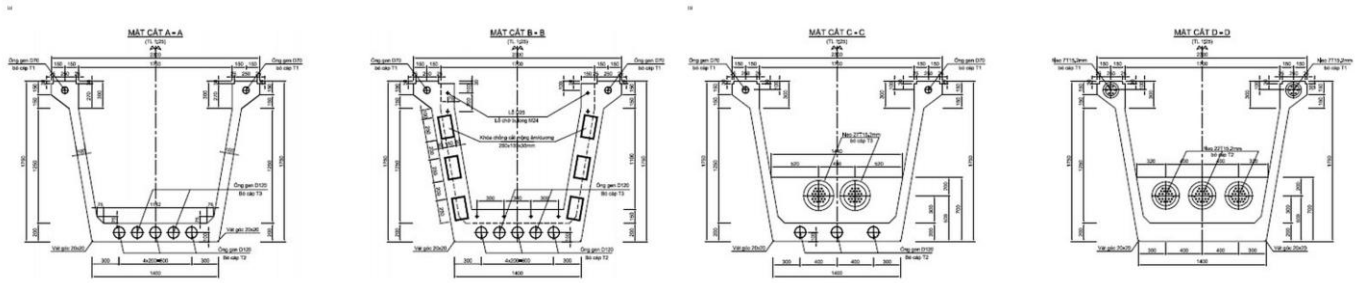
Nghiên cứu dầm U-UHPC dự ứng lực nhịp 50 m là một trường hợp điển hình cho bước phát triển này. Kết cấu được tổ chức từ các dầm chữ U đặt song song, liên kết với bản mặt

cầu để hình thành hệ làm việc tổng thể. Tiết diện thành mỏng giúp giảm khối lượng bản thân; phần đầu dầm được tăng cường để bố trí neo cáp, bản ngăn và truyền lực tại gối. Cáp dự ứng lực căng sau được lựa chọn để phù hợp với phương án chế tạo theo mô-đun và lắp ghép tại hiện trường.



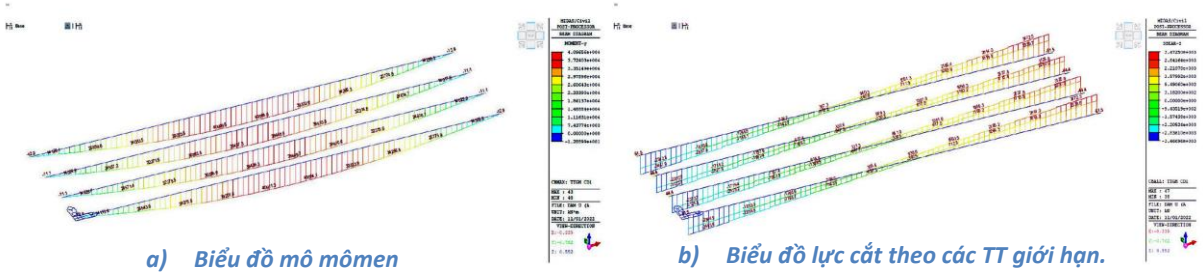
*Hình 2. Giải pháp cầu cạn sử dụng dầm U-UHPC nhịp 50 m: (a) phối cảnh; (b) mặt cắt ngang điển hình.*

Mặt cắt giữa nhịp được tối ưu theo yêu cầu chịu uốn và độ cứng, trong khi mặt cắt đầu dầm được điều chỉnh để đáp ứng yêu cầu chịu cắt, neo cáp và truyền lực cục bộ. Việc thay đổi cấu tạo theo chiều dọc cho phép phân bố vật liệu theo nhu cầu chịu lực, thay vì duy trì một tiết diện đặc nặng trên toàn bộ chiều dài. Đây là hướng thiết kế đặc trưng của UHPC, trong đó hiệu quả vật liệu được chuyển hóa thành hiệu quả hình học của cấu kiện.



*Hình 3. Cấu tạo dầm U-UHPC: (a) mặt cắt giữa nhịp; (b) mặt cắt khu vực đầu dầm.*

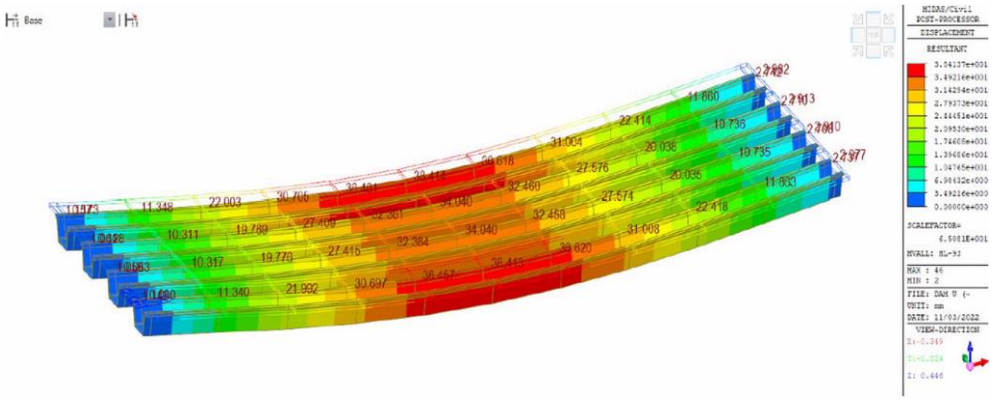
Mô hình phần tử hữu hạn được sử dụng để phân tích dầm, bản mặt cầu, liên kết ngang và điều kiện gối theo các giai đoạn: truyền lực dự ứng lực, nâng - vận chuyển, lắp ghép, căng kéo sau, thi công bản mặt cầu và khai thác dưới tĩnh tải, hoạt tải HL-93. Biểu đồ mômen và lực cắt cho phép nhận diện tiết diện bất lợi ở giữa nhịp, vùng gần gối và các vị trí thay đổi cấu tạo. Đối với sức kháng cắt, đóng góp của ma trận UHPC, cốt thép và sợi thép phải được xem xét trong giới hạn khả năng chịu nén của vùng bê tông chịu nén [4].



a) Biểu đồ mô mômen b) Biểu đồ lực cắt theo các TT giới hạn.

*Hình 4. Kết quả phân tích nội lực dầm U-UHPC*

Tại SLS, dầm được kiểm tra ứng suất thớ trên, thớ dưới, trạng thái nứt và độ võng. Theo TCVN 11823:2017, giới hạn độ võng do hoạt tải xe thường được kiểm soát theo tỷ lệ chiều dài nhịp; mô hình không gian giúp đánh giá đồng thời độ võng dọc và sự phân phối tải giữa các dầm [7]. Việc phân tích đầy đủ các giai đoạn đặc biệt quan trọng đối với cấu kiện thành mỏng, vì trạng thái cẩu lắp hoặc lắp dựng có thể tạo ra tổ hợp ứng suất bất lợi hơn trạng thái khai thác.



*Hình 5. Phân bố độ võng của hệ dầm U-UHPC dưới hoạt tải HL-93.*

Trường hợp nghiên cứu cho thấy các kỹ sư trong nước đã có khả năng chủ động từ lựa chọn mô hình vật liệu, xây dựng hình học, bố trí cáp đến phân tích nội lực và kiểm tra trạng thái giới hạn. Tuy vậy, để chuyển từ mô hình thiết kế sang hồ sơ áp dụng đại trà, các kết quả tính toán cần được kiểm chứng bằng thí nghiệm dầm nguyên mẫu tỷ lệ thực, thử tải tĩnh - mỏi và theo dõi dài hạn.

### 3.4. Làm chủ công nghệ chế tạo và thi công

Công nghệ chế tạo UHPC có yêu cầu cao hơn bê tông thông thường do hàm lượng bột mịn lớn, tỷ lệ nước/chất kết dính thấp và sự hiện diện của sợi thép. Các nhà máy trong nước đã từng bước đầu tư thiết bị trộn cưỡng bức, hệ thống định lượng, thiết bị kiểm soát nhiệt độ và hệ thống bảo dưỡng nhiệt ẩm. Quy trình trộn điển hình gồm trộn khô cốt liệu - chất kết dính, cấp phần lớn nước, cấp phần nước còn lại cùng phụ gia siêu dẻo, sau đó cấp sợi thép từ từ và tiếp tục trộn ở tốc độ cao.



*Hình 6. Thiết bị phục vụ chế tạo UHPC: (a) hệ thống trộn cưỡng bức; (b) thiết bị điều khiển bảo dưỡng nhiệt ẩm.*

Trong công tác đổ, hỗn hợp nên được cấp liên tục từ một đầu khuôn để kiểm soát hướng dòng chảy và sự định hướng của sợi. Chiều cao rơi được hạn chế để tránh phân tầng; bề mặt phải được hoàn thiện và phủ kín bằng màng PVC ngay sau khi đổ. Bảo dưỡng ban đầu duy trì độ ẩm cao, sau đó có thể áp dụng chế độ nhiệt ẩm theo chỉ dẫn kỹ thuật. Tốc độ tăng và giảm nhiệt cần được kiểm soát nhằm hạn chế gradient nhiệt và biến dạng không đồng đều.

Đối với dầm dài 50 m, phương án chế tạo theo mô-đun dài khoảng 5-10 m giúp giảm yêu cầu về bãi đúc, thiết bị nâng và phương tiện vận chuyển. Các mô-đun được lắp ghép, căn chỉnh hình học và liên kết bằng dự ứng lực căng sau. Phương án này đòi hỏi kiểm soát nghiêm ngặt bề mặt tiếp xúc, độ chính xác hình học, ống gen, đầu neo, độ giãn dài cáp và chất lượng bơm vữa. Sai lệch độ giãn dài phải được xử lý trước khi cắt đầu cáp hoặc bơm vữa để bảo đảm khả năng hiệu chỉnh.

### 3.5. Thực tiễn ứng dụng và khả năng chuyển giao

Kết quả nghiên cứu vật liệu, thiết kế và chế tạo đã tạo điều kiện đưa UHPC vào các công trình thực tế tại Việt Nam. Các nhóm ứng dụng chủ yếu gồm cầu nhịp nhỏ và trung bình, bản mặt cầu, cấu kiện lắp ghép, liên kết, sửa chữa - gia cường và bản mặt cầu liên hợp Thép - UHPC. Các chương trình cầu giao thông nông thôn cho thấy khả năng sản xuất cấu kiện lặp lại và tổ chức thi công trong điều kiện phân tán; trong khi các dự án sửa chữa cầu hiện hữu chứng minh giá trị của UHPC ở khả năng bám dính, độ đặc chắc và giảm chiều dày lớp tăng cường [12].

Mặc dù số lượng và quy mô ứng dụng còn chưa đồng đều, chuỗi năng lực trong nước đã hình thành tương đối rõ: cơ sở nghiên cứu có khả năng thiết kế và thí nghiệm cấp phối; đơn vị tư vấn có thể phân tích kết cấu; các công ty có thể phối hợp với tư vấn để thiết kế trạm trộn UHPC theo yêu cầu, nhà máy có thiết bị trộn, dưỡng hộ và chế tạo; nhà thầu có kinh nghiệm lắp ghép, dự ứng lực và kiểm soát chất lượng. Điều cần thiết trong giai đoạn tiếp theo là chuẩn hóa dữ liệu đầu vào, quy trình chấp thuận và hồ sơ nghiệm thu để các kết quả nghiên cứu có thể được chuyển giao cho nhiều dự án khác nhau.

# 4. ĐÁNH GIÁ MỨC ĐỘ LÀM CHỦ CÔNG NGHỆ UHPC

Khái niệm "làm chủ công nghệ" không nên chỉ được đánh giá bằng việc chế tạo được mẫu bê tông UHPC hoặc hoàn thành một số công trình riêng lẻ. Đối với UHPC, làm chủ công nghệ là khả năng chủ động trên toàn bộ chuỗi từ vật liệu, thiết kế, sản xuất, thi công đến tiêu chuẩn hóa, đào tạo và chuyển giao. Trên cơ sở đó, chúng tôi đề xuất đánh giá theo năm nhóm năng lực cốt lõi.

*Bảng 3. Đánh giá tổng hợp mức độ làm chủ công nghệ UHPC tại Việt Nam*

| Nhóm năng lực | Kết quả đã đạt được | Hạn chế chính | Đánh giá |
|---|---|---|---|
| Nghiên cứu vật liệu | Thiết kế cấp phối; sử dụng phần lớn nguyên liệu trong nước; thí nghiệm cơ học và độ bền lâu. | Cần mở rộng dữ liệu mỏi, co ngót dài hạn, môi trường biển và phát thải carbon. | Cơ bản làm chủ |
| Thiết kế kết cấu | Có khả năng mô hình hóa dầm, bản, dự ứng lực; áp dụng ULS và SLS; phát triển dầm U nhịp 50 m. | Thiếu dữ liệu kiểm chứng nguyên mẫu nhịp lớn và hướng dẫn chi tiết cho từng dạng cấu kiện. | Cơ bản làm chủ |
| Chế tạo - thi công | Có thiết bị trộn, dưỡng hộ, sản xuất cấu kiện; làm chủ lắp ghép và dự ứng lực căng sau. | Quy mô công nghiệp và kiểm soát phân tán sợi giữa các mẻ còn cần chuẩn hóa. | Cơ bản làm chủ |
| Ứng dụng thực tế | Đã ứng dụng cho cầu nhỏ, cấu kiện lắp ghép, bản mặt cầu, liên kết và sửa chữa. | Số dự án nhịp lớn trên quốc lộ, cao tốc còn ít; dữ liệu quan trắc dài hạn hạn chế. | Đã ứng dụng có chọn lọc |
| Hệ sinh thái - tiêu chuẩn | Đã có bộ TCVN về vật liệu, thiết kế, thi công; có mạng lưới Viện - Trường - Doanh Nghiệp. | Thiếu định mức, đơn giá, cơ chế chấp thuận và chương trình đào tạo, chứng nhận chuyên sâu. | Đang hoàn thiện |

*Nguồn: Đề xuất của nhóm tác giả trên cơ sở tổng hợp các kết quả nghiên cứu và ứng dụng trong nước.*

Kết quả đánh giá cho thấy năng lực vật liệu và chế tạo đã đạt mức tương đối cao, trong khi thiết kế nhịp lớn, dữ liệu khai thác, sản xuất quy mô công nghiệp và cơ chế phổ cập còn là các mắt xích cần ưu tiên. Giai đoạn phát triển tiếp theo do đó không còn tập trung vào chứng minh rằng Việt Nam có thể chế tạo UHPC, mà phải chứng minh tính ổn định, khả năng ổn định chất lượng, hiệu quả vòng đời và mức độ an toàn của các hệ kết cấu ở quy mô dự án lớn.

# 5. NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH: DẦM U-UHPC DỰ ỨNG LỰC NHỊP 50 M

## 5.1. Quy mô và cơ sở so sánh

Nghiên cứu điển hình xem xét một cầu cạn có chiều rộng 17,5 m với 4 làn xe và chiều dài phân tích 200 m. Phương án U-UHPC sử dụng bốn nhịp 50 m; phương án đối chứng sử dụng dầm Super-T với năm nhịp, chiều dài nhịp điển hình 40 m. Mục tiêu của so sánh là đánh giá tác động của việc tăng chiều dài nhịp đến số lượng cấu kiện, trụ, gối, khe co giãn, vận chuyển, lắp dựng và giá thành sơ bộ. Đây là so sánh ở cấp độ phương án, chưa thay thế cho dự toán chi tiết của một dự án cụ thể.

*Bảng 4. So sánh các thông số cơ bản của hai phương án kết cấu*

| Nội dung | Super-T | Dầm U-UHPC |
|---|---|---|
| Chiều dài phân tích, m | 200 | 200 |
| Số nhịp | 5 | 4 |
| Chiều dài nhịp điển hình, m | 40 | 50 |
| Số trụ | 5 | 4 |
| Số lượng dầm | 35 | 16 |
| Số gối cầu | 70 | 32 |

## 5.2. Hiệu quả kỹ thuật

Việc tăng chiều dài nhịp từ 40 m lên 50 m giúp giảm một nhịp và một trụ trên đoạn cầu 200 m. Số dầm giảm từ 35 xuống 16, làm giảm đáng kể số lượt vận chuyển và lao lắp, giảm mạnh số lượng gối cầu. Những thay đổi này có ý nghĩa lớn đối với chi phí bảo trì, bởi gối và khe co giãn là các bộ phận thường xuyên cần kiểm tra, sửa chữa hoặc thay thế.

Hiệu quả của nhịp lớn đặc biệt rõ trong các điều kiện nền đất yếu, trụ cao, vượt sông, vượt đường đang khai thác hoặc khu vực đô thị có yêu cầu hạn chế vị trí trụ. Khi chi phí trụ - móng tăng, phần chênh lệch chi phí vật liệu UHPC cao, có thể được bù đắp bằng việc giảm số lượng kết cấu phần dưới, giảm chi phí cẩu lắp và rút ngắn thời gian thi công. Ngược lại, tại vị trí trụ thấp, địa chất tốt và mặt bằng thuận lợi, lợi thế kinh tế ban đầu có thể thấp hơn; vì vậy cần đánh giá theo từng điều kiện dự án.

## 5.3. So sánh chi phí sơ bộ

*Bảng 5. So sánh sơ bộ giá thành hai phương án*

| Nội dung | Khối Lượng | | | Chi phí xây dựng (VNĐ) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Đơn Vị | Super-T | Dầm U-UHPC | Super-T | Dầm U-UHPC |
| Chế tạo dầm cầu | (dầm) | 35 | 16 | 15,200,000,000. | 13,090,000,000 |
| Lao lắp dầm cầu | (dầm) | 35 | 16 | 525,000,000 | 400,000,000. |
| BMC, dầm ngang | (m) | 200 | 200 | 8,779,619,000. | 9,475,221,566. |
| Gối cầu | (Gối) | 70 | 32 | 2,030,000,000 | 1,113,600,000 |
| Trụ cầu | (trụ) | 5 | 4 | 9,016,634,000. | 6,616,667,200. |
| Cọc khoan nhồi D1.0m | (m) | 1600 | 1200 | 11,200,000,000. | 8,960,000,000. |
| **Tổng cộng** | | | | 44,641,253,000. | 41,765,488,766. |
| Đơn giá diện tích mặt cầu, VNĐ/m² | | | | 12,754,644 | 11,932,997 |
| **So sánh Tỷ lệ** | | | | **100%** | **94%** |

*Chi phí trên chưa bao gồm chi phí thi công trụ, các thành phần phụ khác và trước thuế.*

Theo số liệu sơ bộ, tổng chi phí phương án U-UHPC bằng khoảng 94% phương án Super-T, tương ứng mức giảm khoảng 6%. Mặc dù chi phí chế tạo dầm UHPC cao hơn, tổng phương án được bù đắp bởi việc giảm trụ - móng, gối, khe co giãn, vận chuyển và cẩu lắp, chưa kể giảm chi phí chiều cao đất đắp đường dẫn. Kết quả này cần được hiểu là minh họa cơ chế tạo hiệu quả, không phải tỷ lệ tiết kiệm cố định cho mọi dự án. Để sử dụng trong quyết định đầu tư, cần chuẩn hóa phạm vi chi phí, cập nhật đơn giá, tính cả kết cấu phần dưới, tổ chức giao thông, thời gian thi công, bảo trì và giá trị còn lại của công trình.

## 6. NHỮNG TỒN TẠI VÀ ĐIỀU KIỆN MỞ RỘNG ỨNG DỤNG

Thứ nhất, dữ liệu thí nghiệm kết cấu nhịp lớn trong nước còn hạn chế. Các mô hình thiết kế cần được kiểm chứng bằng thí nghiệm dầm nguyên mẫu tỷ lệ 1:1, bao gồm thử tải tĩnh, tải lặp, phá hoại uốn - cắt, đo biến dạng, độ võng, độ mở vết nứt và đánh giá mức độ phân tán sợi tại các vùng quan trọng.

Thứ hai, dữ liệu khai thác dài hạn chưa đủ để lượng hóa đầy đủ lợi ích vòng đời. Cần xây dựng chương trình thực nghiệm để quan trắc ứng suất, nhiệt độ, độ võng, nứt, thấm và ăn mòn cho các công trình đã áp dụng UHPC; đồng thời so sánh kết quả thực đo với dự báo thiết kế để hiệu chỉnh mô hình và hệ số an toàn.

Thứ ba, hệ thống định mức, đơn giá và phương pháp lập dự toán cho UHPC chưa hoàn chỉnh. Nếu chỉ so sánh giá một mét khối vật liệu, UHPC thường bất lợi; nếu đánh giá tổng thể hệ kết cấu và vòng đời, kết quả cho thấy hiệu quả đáng kể. Do đó, định mức cần bao quát vật liệu, trộn, dưỡng hộ, sợi, ván khuôn, dự ứng lực, vận chuyển, lắp dựng, kiểm tra chất lượng, bảo trì và kích cỡ dự án ( số lượng dầm UHPC).

Thứ tư, quy trình chấp thuận công nghệ mới trong dự án đầu tư công còn cần được làm rõ. Hồ sơ kỹ thuật phải xác định khung tiêu chuẩn áp dụng, phương pháp thử, tiêu chí nghiệm thu, kiểm soát thay đổi vật liệu, truy xuất nguồn gốc và trách nhiệm của các bên. Công trình thực nghiệm cần được tổ chức như một chương trình khoa học - công nghệ có mục tiêu và dữ liệu đầu ra rõ ràng, thay vì một ứng dụng riêng lẻ không tạo được cơ sở đầy đủ cho chuyển giao.

Thứ năm, chuỗi cung ứng cần được phát triển theo hướng ổn định và có khả năng mở rộng. Xi măng, cát mịn, phụ gia khoáng và phụ gia hóa học, phụ gia điều chỉnh có thể chủ động trong nước, nhưng sợi thép, thiết bị chuyên dụng, phòng thí nghiệm thử kéo trực tiếp, đường cong ứng suất biến dạng khi kéo hoặc khi kéo uốn và năng lực kiểm soát chất lượng giữa các nhà máy vẫn cần được chuẩn hóa. Đào tạo kỹ sư thiết kế, cán bộ phòng thí nghiệm, nhân sự nhà máy và đội ngũ thi công là điều kiện không thể tách rời.

## 7. ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN TRONG GIAI ĐOẠN TỚI

Để chuyển UHPC từ công nghệ đã được chứng minh ở quy mô nghiên cứu và ứng dụng cho cầu nhỏ sang giải pháp có thể lựa chọn thường xuyên cho cầu lớn ở Việt Nam, đề xuất lộ trình gồm bốn nhóm hành động.

Một là, hoàn thiện cơ sở khoa học và tiêu chuẩn. Cần xây dựng chương trình thử nghiệm dầm U-UHPC nhịp 50 m tỷ lệ thực; phát triển dữ liệu về mỏi, co ngót, từ biến, môi trường biển và tải trọng động; ban hành hướng dẫn chi tiết cho dầm dự ứng lực, bản mặt cầu, liên kết, sửa chữa và kết cấu liên hợp. Các tiêu chuẩn mới cần bảo đảm tương thích với TCVN 11823 và hệ thống thí nghiệm hiện hành.

Hai là, triển khai dự án thí điểm có khả năng nhân rộng. Vị trí thí điểm nên là nơi nhịp lớn tạo ra lợi ích rõ, chẳng hạn vượt sông không được bố trí trụ, vượt nút giao đang khai thác, cầu cạn qua đất yếu hoặc khu vực có yêu cầu chiều cao kiến trúc thấp. Dự án phải có phương án đối chứng, kế hoạch thử tải, quan trắc và công bố dữ liệu để phục vụ các dự án tiếp theo.

Ba là, phát triển công nghiệp và chuỗi cung ứng. Cần chuẩn hóa cấp phối theo nhóm nguồn vật liệu, quy trình kiểm soát mẻ trộn, độ phân tán sợi, chế độ dưỡng hộ, truy xuất sản phẩm và chứng nhận năng lực nhà máy. Đồng thời, xây dựng định mức và đơn giá trên cơ sở sản xuất lặp lại, không dựa trên chi phí của một mẻ thử nghiệm hoặc một cấu kiện đơn chiếc.

Bốn là, tổ chức hệ sinh thái đổi mới sáng tạo. Cơ quan quản lý cần tạo cơ chế cho công nghệ mới được đánh giá minh bạch; viện nghiên cứu và trường đại học tập trung vào dữ liệu nền và đào tạo; tư vấn chịu trách nhiệm chuyển hóa kết quả nghiên cứu thành giải pháp thiết kế; nhà thầu và nhà máy bảo đảm tính khả thi thi công; hội nghề nghiệp thực hiện phổ biến, phản biện và kết nối quốc tế. Việc đánh giá UHPC nên dựa trên hiệu quả kỹ thuật, rủi ro và chi phí vòng đời, thay vì chỉ dựa trên giá đầu tư ban đầu.

## 8. KẾT LUẬN

Quá trình phát triển UHPC trong xây dựng cầu tại Việt Nam đã chuyển từ giai đoạn tiếp cận tài liệu và nghiên cứu cấp phối sang làm chủ nhiều công nghệ cốt lõi về vật liệu, thiết kế, chế tạo và thi công. Việc ban hành bộ tiêu chuẩn TCVN 13735-13737:2023 cho thấy nền tảng kỹ thuật trong nước đã đạt mức đủ để tổ chức các chương trình ứng dụng có hệ thống.

Nghiên cứu dầm U-UHPC dự ứng lực nhịp 50 m  cho thấy khả năng chủ động của kỹ sư Việt Nam trong lựa chọn thông số vật liệu, phát triển mặt cắt, bố trí dự ứng lực, mô hình hóa nội lực, kiểm tra ULS - SLS và đề xuất quy trình chế tạo theo mô-đun. So sánh sơ bộ với dầm Super-T cho thấy hiệu quả của UHPC được hình thành từ tối ưu tổng thể hệ kết cấu, đặc biệt thông qua tăng nhịp, giảm trụ, giảm số dầm, gối và khe co giãn; mức chênh lệch trong trường hợp nghiên cứu khoảng 4,1%.

Kết luận về khả năng áp dụng rộng rãi cần được củng cố bằng thí nghiệm nguyên mẫu nhịp lớn, dữ liệu khai thác, định mức kinh tế - kỹ thuật, cơ chế chấp thuận và chuỗi cung ứng ổn định. Trọng tâm giai đoạn tới không còn là chứng minh UHPC có thể được chế tạo tại Việt Nam, mà là chứng minh công nghệ có thể được triển khai an toàn, lặp lại, có hiệu quả vòng đời và chuyển giao giữa các dự án.

Với lộ trình thử nghiệm - thí điểm - tiêu chuẩn hóa - công nghiệp hóa phù hợp, UHPC có thể trở thành giải pháp kết cấu bổ sung quan trọng cho cầu cạn, cầu vượt đô thị, cầu vượt sông, công trình ven biển, đường sắt tốc độ cao và sửa chữa cầu hiện hữu, góp phần phát triển hạ tầng giao thông Việt Nam theo hướng hiện đại, bền vững và có tuổi thọ cao.

Một nội dung có ý nghĩa quyết định đối với giai đoạn phát triển tiếp theo là đào tạo và phát triển nguồn nhân lực chuyên sâu theo toàn bộ chuỗi công nghệ UHPC. Nguồn nhân lực cần được tổ chức theo các nhóm năng lực liên kết, gồm: kỹ sư thiết kế phần mềm phục vụ mô hình hóa, tính toán, BIM/CAD và tối ưu hóa kết cấu; kỹ sư công nghệ phụ trách quy trình sản xuất, trộn, đúc và dưỡng hộ; tư vấn kiểm định, thử nghiệm có năng lực xây dựng chương trình thí nghiệm, đánh giá chất lượng và nghiệm thu; kỹ sư vật liệu kiểm soát nguyên liệu, cấp phối, cốt sợi và các chỉ tiêu cơ học; kỹ sư thiết kế trạm trộn và khuôn bảo đảm độ chính xác, tính ổn định và khả năng công nghiệp hóa của cấu kiện. Bên cạnh đội ngũ kỹ sư và chuyên gia, cần đào tạo thực hành cho công nhân đúc dầm, công nhân cẩu lắp và lực lượng thi công mối nối UHPC tại hiện trường, đặc biệt về trình tự thi công, kiểm soát nhiệt độ–độ ẩm, an toàn lao động và xử lý sai lệch kỹ thuật. Vì vậy, các chương trình đào tạo cần gắn với dự án thực tế, phòng thí nghiệm, nhà máy và công trường, kết hợp giữa đào tạo chính quy, đào tạo tại chỗ, chuyển giao công nghệ và đánh giá năng lực theo vị trí công việc. Đây là điều kiện cần thiết để bảo đảm tính đồng nhất của sản phẩm, giảm rủi ro trong thi công, duy trì chất lượng mối nối và từng bước hình thành đội ngũ nhân lực UHPC có khả năng làm chủ độc lập từ thiết kế đến khai thác công trình.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] P. Richard and M. Cheyrezy, “Composition of reactive powder concretes”, Cement and Concrete Research, vol. 25, no. 7, pp. 1501-1511, 1995.

[2] AFGC-SETRA, Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Recommendations, France, 2013.

[3] Japan Society of Civil Engineers, Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft), JSCE Guidelines for Concrete No. 9, Tokyo, 2006.

[4] B. A. Graybeal, Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I-Girders, Report FHWA-HRT-06-115, Federal Highway Administration, 2006.

[5] H. G. Russell and B. A. Graybeal, Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, FHWA-HRT-13-060, 2013.

[6] AASHTO, Guide Specifications for Structural Design with Ultra-High Performance Concrete, 1st ed., Washington, D.C., 2024.

[7] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 11823:2017 - Thiết kế cầu đường bộ, Hà Nội, 2017.

[8] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 13735:2023 - Bê tông siêu tính năng (UHPC) - Vật liệu và phương pháp thử, Hà Nội, 2023.

[9] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 13736:2023 - Kết cấu bê tông siêu tính năng (UHPC) - Thi công và nghiệm thu, Hà Nội, 2023.

[10] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 13737:2023 - Kết cấu bê tông siêu tính năng (UHPC) - Yêu cầu thiết kế kết cấu, Hà Nội, 2023.

[11] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 12885:2020 - Thi công cầu đường bộ, Hà Nội, 2020.

[12] Trần Bá Việt, Lê Hoàng Phúc và Lương Tiến Hùng, "Nghiên cứu ứng dụng bê tông siêu tính năng - UHPC cho xây dựng cầu tại Việt Nam", Tạp chí Xây dựng, số 8, tr. 64-69, 2022.

[13] Xudong Shao, "Innovative Bridge Structures Based on Ultra-High Performance Concrete (UHPC)", 2024.