

Nghiên cứu công nghệ bê tông siêu tính năng (UHPC) ứng dụng để thiết kế chế tạo dầm cầu tiết diện chữ U, nhịp 30m, phân đốt căng sau

Ultra High Performance Concrete (UHPC) technology to manufacture bridge girders with U-section, 30m span, post-tensioned segmentation

> TS TRẦN BÁ VIỆT ¹, THS ĐẶNG VĂN HIẾU, KS LÊ HOÀNG PHÚC ²,
KS LƯƠNG TIẾN HÙNG ², KS TRẦN BÁ TÚ ²

¹Phó Chủ tịch Hội Bê tông Việt Nam - VCA; Email: vietbach57@yahoo.com

²Công ty CP Sáng tạo và CGCN Việt Nam.

TÓM TẮT:

Nghiên cứu công nghệ về bê tông siêu tính năng (UHPC) ứng dụng cho kết cấu hạ tầng xây dựng chung, đặc biệt là hạ tầng giao thông (cầu đường bộ) là một lĩnh vực nghiên cứu nhận được nhiều sự quan tâm trên thế giới cũng như ở Việt Nam. Với nhiều tính năng vượt trội hơn so với bê tông cốt thép thường, UHPC cho phép chế tạo các dầm cầu với chiều dày mỏng, khối lượng nhẹ, mức độ kháng ăn mòn cao, cùng tuổi thọ cao, thời gian thi công ngắn và có chi phí bảo trì rất nhỏ. Bài trình bày những nghiên cứu sử dụng UHPC chế tạo dầm cầu phân đốt tiết diện chữ U, dự ứng lực căng sau.

Từ khóa: Bê tông siêu tính năng - UHPC, phân đốt dầm tiết diện chữ U; dự ứng lực căng sau, trạng thái giới hạn cường độ; trạng thái giới hạn sử dụng; sợi thép cường độ cao, độ chảy xoè; cường độ chịu nén; cường độ chịu uốn; cường độ chịu kéo; modul đàn hồi.

ABSTRACT:

Research on Ultra High Performance Concrete (UHPC) technology applied to construction infrastructure in general, especially traffic infrastructure (road bridges) is a research area of interest to the world as well as in Vietnam. With many superior features compared to conventional reinforced concrete, UHPC allows the production of fishing girders with thin dimensions, light weight, high corrosion resistance and long service life, short construction time and very small maintenance fee. This paper presents studies on using UHPC to fabricate U-section segmented bridge girders, post-tensioning.

Keywords: Ultra High Performance Concrete - UHPC, U-section beam segmentation; post-tensioning; ultimate limit state; serviceability limit state; micro steel fiber; flow; compressive strength; flexural strength; tensile strength; modulus.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mặc dù đã được ứng dụng tại các nước phát triển trong khoảng gần 30 năm nay, nhưng UHPC đối với Việt Nam vẫn là một công nghệ còn mới với triển vọng ứng dụng cao vì có nhiều tính năng vượt trội hơn so với bê tông thông thường. Các nghiên cứu cũng như các công trình đã được thi công tại Việt Nam đã kiểm chứng sự hiệu quả của UHPC khi có cường độ chịu nén từ 120 ÷ 190 MPa, cường độ chịu kéo 6 ÷ 14 Mpa, cường độ chịu uốn 15 ÷ 40 MPa và các tiêu chí khác. Điều này có được là nhờ sự phối trộn một hỗn hợp UHPC với các tỉ lệ vật liệu thành phần hợp lý tạo ra sự tối đa về độ đặc chắc tối đa cùng sự phân tán 3D của cốt sợi thép trong cấu trúc.

Hiện tại ở Việt Nam chủ yếu sản xuất UHPC và chế tạo dầm Double T với kích thước còn hạn chế. Điều này thể hiện ở chiều dài dầm, dẫn đến hiệu quả của UHPC trong ứng dụng giao thông chưa

được khai thác tối đa. Để cải thiện, có rất nhiều phương án thiết kế khác như dầm máng hình hộp kín hay các dầm tiết diện chữ I, chữ T, chữ U. Trong bài viết này nhóm tác giả trình bày về phương án sử dụng công nghệ UHPC chế tạo dầm chữ U nhịp dài 30m, phân đốt dự ứng lực căng sau.



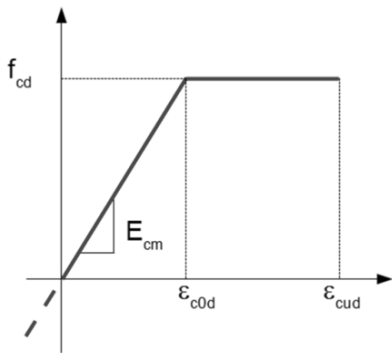
Hình 1. Mô phỏng hình dáng phân đốt dầm tiết diện chữ U

2. TÀI LIỆU, TIÊU CHUẨN ÁP DỤNG

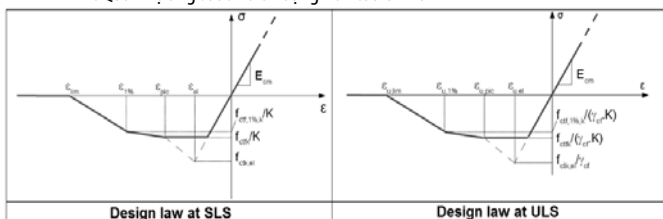
- TCVN 1651:2018, thép cốt bê tông.
- TCVN 2682:2009, xi măng Poóc lăng - yêu cầu kỹ thuật.
- TCVN 4506:2012, nước cho bê tông và vữa - yêu cầu kỹ thuật.
- TCVN 8826:2011, phụ gia hoá học cho bê tông.
- TCVN 8827:2020, phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa - Silica Fume và tro trấu nghiền mịn.
- TCVN 9036:2011, nguyên liệu để sản xuất thủy tinh - cát - yêu cầu kỹ thuật.
- TCVN 11586:2016, xỉ hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa.
- TCVN 11823-3:2017, thiết kế cầu đường bộ.
- TCVN 12392:2018, sợi cho bê tông.
- TCCS 02:2017/IBST, bê tông tính năng siêu cao UHPC – Hướng dẫn thiết kế kết cấu.
- NF P18-470:2017, concrete - ultra-high performance fibre-reinforced concrete - specifications, performance, production and conformity.
- NF P18-710:2016, national addition to Eurocode 2 - design of concrete structures: specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete.
- NF P18-451:2018, concrete - execution of concrete structures - specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete.
- ASTM C230/C230M-21, standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement.
- ASTM A416/A416M-16, standard specification for low-relaxation, seven-Wire steel strand for prestressed concrete.
- ASTM C469/C469M-14e1, standard test method for static Modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.
- ACF 04:2020, materials UHPC - technicals specification.
- K-UHPC:2014, design guidelines for UHPC.

3. PHƯƠNG PHÁP THIẾT KẾ DẦM

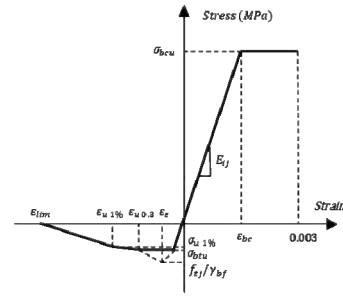
Để thiết kế dầm UHPC ở 2 trạng thái giới hạn cường độ (ULS) và trạng thái giới hạn sử dụng (SLS), NF-P18 cho phép sử dụng kết hợp mối quan hệ ứng suất - biến dạng khi nén và khi kéo của UHPC.



Hình 2. Quan hệ ứng suất - biến dạng nén của UHPC



Hình 3. Quan hệ ứng suất - biến dạng kéo của UHPC



Hình 4. Tổ hợp ứng suất - biến dạng (nén - kéo) của UHPC (Soft strain)

4. YÊU CẦU KỸ THUẬT VÀ VẬT LIỆU THÀNH PHẦN CỦA UHPC

a) Yêu cầu kỹ thuật của UHPC

- Hàm lượng sợi thép sử dụng: $\geq 1,5\%$.
- Khối lượng thể tích hỗn hợp: $\geq 2450 \text{ kg/m}^3$.
- Độ chảy xoè hỗn hợp: $16 \div 18 \text{ cm}$.
- Cường độ nén (R28): $\geq 150 \text{ MPa}$.
- Modul đàn hồi $\geq 45 \text{ GPa}$.
- Cường độ chịu kéo R28 (vết nứt đầu tiên): $\geq 8,0 \text{ MPa}$.
- Cường độ chịu kéo R28 (giá trị cực đại): $\geq 11,0 \text{ MPa}$.
- Biến dạng co khô: $\leq 550 \mu\text{m/m}$.

b) Kích thước mẫu thử nghiệm

- Độ chảy xoè hỗn hợp: cone Suttard.
- Cường độ chịu nén và Modul đàn hồi: mẫu trụ tròn D100xH200 mm.
- Cường độ chịu kéo: mẫu mác chèo không khía 50x100x500 mm.
- Cường độ chịu uốn và biến dạng co khô: mẫu lăng trụ 100x100x400 mm.
- c) Lựa chọn vật liệu thành phần chế tạo UHPC
- Chất kết dính: xi măng PC50 phù hợp với TCVN 2682:2009.
- Phụ gia khoáng bổ sung: Silica Fume phù hợp với TCVN 8827:2020 và xỉ GGBS phù hợp với TCVN 11586:2016.
- Cốt liệu: cát thạch anh phù hợp với TCVN 9036:2011, ACF 04:2020.
- Sợi thép 2D mạ đồng cường độ cao phù hợp với TCVN 12392:2018.
- Phụ gia hoá học: phụ gia dẻo gốc PCE phù hợp với TCVN 8826:2011 và ACF 04:2020.
- Nước trộn phù hợp với TCVN 4506:2012.

5. CÁC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

5.1 Kiểm tra chất lượng vật liệu đầu vào

a) Xi măng PC50

Bảng 1. Các kết quả kiểm tra chất lượng xi măng

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Khối lượng riêng	g/cm^3	3,09
2	Độ dẻo tiêu chuẩn	%	29,4
3	Độ ổn định thể tích	mm	1,1
4	Độ bền uốn, R28	MPa	13,6
5	Độ bền nén, R28	MPa	57,2

b) Phụ gia khoáng (Silica fume và GGBS)

Bảng 2. Các kết quả kiểm tra chất lượng Silica fume

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Khối lượng riêng	g/cm^3	2,22
2	Diện tích bề mặt riêng	m^2/g	23
3	Chỉ số hoạt tính, R7	%	112
4	Chỉ số hoạt tính, R28	%	119
5	Mất khí nung (LOI)	%	1,17
6	Hàm lượng SiO_2	%	95,89

Bảng 3. Các kết quả kiểm tra chất lượng GGBS

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,87
2	Chỉ số hoạt tính, R7	%	82
3	Chỉ số hoạt tính, R28	%	106
4	Mất khi nung (LOI)	%	1,73

c) Cát thạch anh

Bảng 4. Các kết quả kiểm tra chất lượng cát thạch anh

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,65
2	Độ ẩm	%	0,7
3	Khối lượng thể tích	%	1510
4	Độ hở	%	42,7
5	Hàm lượng Cl ⁻	%	0,006
6	Hàm lượng SiO ₂	%	98,12

d) Sợi thép 2D

Bảng 5. Các kết quả kiểm tra chất lượng sợi thép

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Tỉ lệ hướng sợi	-	65
2	Hàm lượng tạp chất	%	0,0
3	Cường độ chịu kéo	MPa	3200

e) Phụ gia dẻo

Bảng 6. Các kết quả kiểm tra chất lượng phụ gia dẻo

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	1,06
2	Độ pH	%	6,33
3	Hàm lượng chất khô	%	38,2
4	Hàm lượng Cl ⁻	%	0,03
5	Mức giảm nước	%	40

f) Nước trộn

Bảng 7. Các kết quả kiểm tra chất lượng nước trộn

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Hàm lượng Cl ⁻	mg/l	<350
2	Hàm lượng SO ₄	mg/l	<600
3	Hàm lượng cặn	mg/l	<200

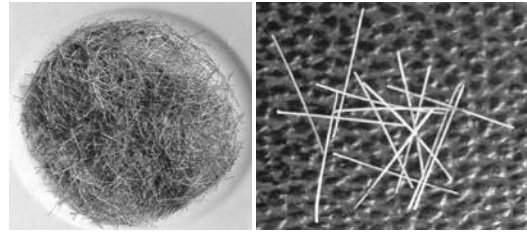


Hình 5. Cát thạch anh, Silica fume, phụ gia dẻo sử dụng để chế tạo UHPC

5.2 Thiết kế cấp phối UHPC

Bảng 8. Cấp phối sử dụng chế tạo UHPC 150/11

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Tổng chất kết dính	kg/m ³	1160
2	Cát thạch anh	kg/m ³	950
3	Sợi thép	kg/m ³	210
4	Hàm lượng phụ gia dẻo	%	3,0
5	N/CKD	-	0,168



Hình 6. Cốt sợi thép mạ đồng cường độ cao loại 2D

5.3 Các tính chất của UHPC

a) Độ chảy xoè

Bảng 9. Các kết quả kiểm tra tính công tác của hỗn hợp UHPC ở các điều kiện khác nhau

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả	
1	Điều kiện LAS	cm	18,3	
2	Điều kiện thực tế		Lần 1	17,4
			Lần 2	16,4
		Lần 3	17,1	

b) Biến dạng co

Bảng 10. Các kết quả kiểm tra biến dạng co của UHPC sau bảo dưỡng nhiệt ẩm

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Biến dạng co mềm	µm/m	18,3
2	Biến dạng co khô		17,1



Hình 7. Kiểm tra độ chảy xoè và biến dạng co

c) Cường độ chịu nén

Bảng 11. Các kết quả kiểm tra cường độ chịu nén của UHPC tại các độ tuổi

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Thử nghiệm trong LAS	R1	62,3
		R5	166,7
		R14	168,4
		R28	168,6
2	Lần 1	R1	57,8
		R5	155,1
		R14	157,3
		R28	160,0
	Lần 2	R1	61,4
		R5	152,8
		R14	156,5
		R28	157,3
	Lần 3	R1	55,3
		R5	152,6
		R14	156,1
		R28	156,4

d) Cường độ chịu kéo

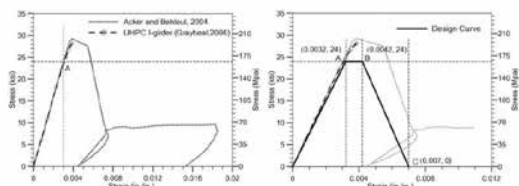
Bảng 12. Các kết quả kiểm tra cường độ chịu kéo của UHPC tại các độ tuổi

STT	Nội dung		Đơn vị	Kết quả	
1	Thử nghiệm trong LAS	R5	MPa	9,2/11,8	
		R14		8,7/12,1	
		R28		9,1/12,4	
2	Thực tế sản xuất	Lần 1	MPa	R5	8,6/11,3
				R14	9,0/11,5
				R28	8,6/12,1
		Lần 2		R5	8,4/11,7
				R14	9,3/12,5
				R28	9,2/12,3
		Lần 3		R5	8,9/11,6
				R14	8,4/12,1
				R28	8,6/12,4

Kết quả thử nghiệm ban đầu trong phòng LAS so với thực tế đảm bảo hệ số dư an toàn là $\approx 10\%$.

6. TÍNH TOÁN

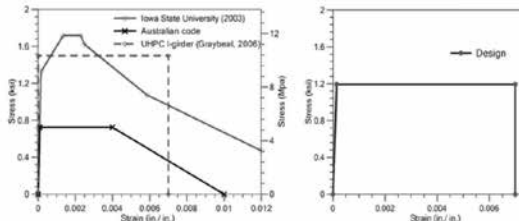
6.1 Trạng thái giới hạn cường độ



Mẫu thí nghiệm

Kiến nghị cho thiết kế

Hình 8. Quan hệ ứng suất - biến dạng khi chịu nén



Mẫu thí nghiệm

Kiến nghị cho thiết kế

Hình 9. Quan hệ ứng suất - biến dạng khi chịu kéo

UHPC thể hiện khả năng chịu kéo vượt qua cường độ kéo khi nứt, cho tới khi sợi thép bị kéo ra tại biến dạng 0.007;

Hệ số sức kháng có thể lấy 0.8 xét đến mức độ phân tán đồng đều của sợi thép (fiber);

$$Sức\ kháng\ cắt: V_{yd} = V_{rped} + V_{fd} + V_{ped}$$

Trong đó:

$$V_{rped} = (0,18 \cdot \sqrt{f_{cd}} \cdot b_w \cdot d) / \gamma_b$$

$$V_{fd} = (f_{vd} \cdot b_w \cdot \tan \beta_w) / \gamma_b$$

$$\beta_w = 1/2 \tan^{-1}(2r / (\sigma_{xu} - \sigma_{yu})) - \beta_0$$

Chú thích:

f_{cd} : Cường độ chịu nén thiết kế của UHPC (MPa);

f_{vd} : Cường độ chịu kéo thiết kế của UHPC (MPa);

b_w : Bề dày sườn;

γ_b : Hệ số chiết giảm 1.3;

β_u : Góc giữa hướng dọc trục và mặt phẳng nứt xiên, góc này $> 30^\circ$;

σ_{xu}, σ_{yu} : Ứng suất nén trung bình theo hướng dọc trục và vuông góc với trục dọc (MPa);

β_0 : Góc mà tại đó vết nứt xiên, nghiêng 45° so với trục của cấu kiện và không tồn tại lực dọc trục;

V_{rped} : Cường độ chịu cắt của cấu kiện dầm;

V_{fd} : Cường độ chịu cắt của sợi thép.

V_{ped} : Thành phần chịu kéo hiệu dụng của cáp căng dọc, song song với lực cắt = 0;

6.2 Trạng thái giới hạn sử dụng

a) Giới hạn ứng suất:

NF P18 710 [4] giữ nguyên giá trị giới hạn ứng suất của bê tông UHPFRC (viết tắt là UHPC) như bê tông ứng suất trước truyền thống theo Eurocode 2.

Bảng 13. Giới hạn ứng suất theo từng giai đoạn cụ thể

Giai đoạn	Ứng suất nén	Ứng suất kéo
Ứng suất tạm thời trước khi mất mát	$0,6 \cdot f_{ci}$	$0,4 \cdot \sqrt{f_{ci}}$
Ứng suất sau khi hết mất mát	$0,4 \cdot f_c$	$0,4 \cdot \sqrt{f_c}$

b) Mất mát ứng suất:

Mất mát lâu dài dựa vào các công thức tính kiến nghị từ TCVN 11823:2017 hoặc AASHTO (phần lớn dựa vào thí nghiệm);

NF P18-710 [4] giữ nguyên cách tính mất mát ứng suất của bê tông UHPC như bê tông ứng suất trước thông thường.

Mất mát tức thời của UHPC có thể tính trực tiếp nếu biết mô đun đàn hồi của bê tông.

c) Không chế nứt:

Tiêu chuẩn của Pháp NF P18-710, giới hạn về bề rộng vết nứt của UHPC nhỏ hơn 1mm so với bê tông truyền thống (Eurocode 2) trong cùng điều kiện môi trường tương ứng.

Đối với UHPC không dự ứng lực, cho phép nứt ở TTGH Sử dụng, chiều rộng vết nứt cho phép 0.3 mm (bình thường); 0.1 mm (khắc nghiệt); 0.05 mm (rất khắc nghiệt);

Áp dụng TCVN 11823-5, tính khoảng cách tối thiểu giữa cốt thép chịu kéo trong trường hợp có cốt thép thường.

6.3 Phân tích kết cấu

Phân tích theo phần tử hữu hạn. Sử dụng các phần mềm phân tích kết cấu RM, MIDAS, ABAQUS < ATENA... Giới hạn về độ võng tuân theo TCVN 11823-2:2017:

Tải trọng xe nói chung: L/800

Tải trọng xe và/hoặc người đi bộ: L/1000

Tải trọng xe phản hẫng: L/300

Tải trọng xe và/hoặc người đi bộ phần hẫng: L/375

L: Chiều dài nhịp



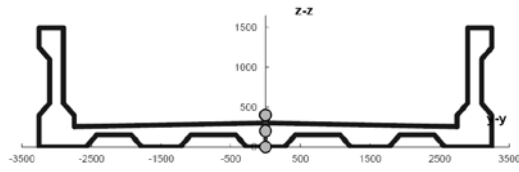
Hình 10. Mô phỏng ứng suất thứ trên



Hình 11. Mô phỏng ứng suất thứ dưới



Hình 12. Mô phỏng độ võng toàn dầm



Hình 13. Mặt cắt ngang của dầm

7. ĐIỀU KIỆN CHẾ TẠO DẦM UHPC

- Nhiệt độ hỗn hợp UHPC: $\leq 35^\circ\text{C}$.
- Nhiệt độ môi trường: $\leq 40^\circ\text{C}$.
- Độ ẩm không khí: $\geq 65\%$.
- Dung sai định lượng nước trộn: $\pm 1\text{ kg}$.
- Dung sai định lượng phụ gia dẻo: $\pm 0,5\text{ kg}$.
- Tổng thời gian trộn: 11 ± 1 phút.
- Chiều cao gầu xả hỗn hợp UHPC: $\leq 50\text{ cm}$.
- Chiều dày lớp UHPC bảo vệ cốt thép: $\geq 2\text{ cm}$.
- Bảo dưỡng nhiệt ẩm: 80°C trong 72 giờ.
- Sử dụng ống gen mạ kẽm để luồn cáp.
- Thi công ghép nối các modul bằng dự ứng lực căng sau có bám dính.



Hình 14. Ống gen luồn cáp và thiết bị neo cáp



Hình 15. Kiểm định chất lượng mối nối giữ các đốt dầm



Hình 16. Mô phỏng hình dáng toàn bộ dầm



Hình 17. Vận chuyển các phân đốt dầm thuận lợi, đặc biệt là đường tại vùng núi cao



Hình 18. Cầu xếp các phân đốt dầm vào vị trí căng cáp (dự ứng lực căng sau có bám dính)



Hình 19. Căng cáp dự ứng lực và sử dụng keo Epoxy kết dính các phân đốt



Hình 20. Dầm sau khi đã được ghép nối và căng cáp dự ứng lực



Hình 21. Một phần cầu sau khi đã hoàn thiện lao lắp dầm



Hình 22. Cầu Vàng 4 nhịp x30m đã hoàn thành (chụp ngày 27/9/2022)

KẾT LUẬN

1. Đã nghiên cứu và chế tạo được một hệ UHPC với cường độ chịu nén $120 \div 180\text{ MPa}$ và cường độ chịu kéo từ $7 \div 14\text{ MPa}$.
3. Khả năng chống thấm của UHPC rất tốt, được xác định qua các thử nghiệm riêng biệt cho kết quả trên 20 MPa . Qua đó có thể khẳng định, UHPC đáp ứng các yêu cầu thiết kế kết cấu và độ bền lâu, đặc biệt là chống, chịu ăn mòn trong môi trường nước phèn và nước biển.
4. Kết cấu UHPC có độ đặc chắc cao nên tăng độ bền lâu của công trình lên tới $100 \div 150$ năm và giảm tối đa các chi phí duy tu, bảo trì trong thời gian khai thác sử dụng.
5. Kết cấu dầm thanh mảnh nên tính tải bản thân nhỏ (giảm khoảng 70% so với tính tải của dầm bê tông thường), giảm được chi phí xây dựng móng và kết cấu đỡ trụ.
6. Từ việc thiết kế, chế tạo dầm tiết diện chữ U dài 30m, phân đốt dự ứng lực căng sau này sẽ tạo tiền đề phát triển ra các mẫu dầm khác và có chiều dài lớn hơn (40m, 50m, 60m,...)
7. Thời gian sản xuất nhanh, do được modul hoá dẫn tới công trình sớm đưa vào vận hành sử dụng.
8. Hiện nay các nhà máy bê tông lớn đều có thể làm chủ công nghệ vật liệu, chế tạo cấu kiện dầm UHPC (bê tông ly tâm Thủ Đức 1, bê tông Thành Hưng, bê tông Xuân Mai).
9. Tư vấn thiết kế đã làm chủ phương pháp tính toán, tiêu chuẩn áp dụng, phần mềm thiết kế đã thiết kế và chế tạo dầm cho 65 cầu trên 17 tỉnh thành tại Việt Nam cho kết quả tốt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. QCVN 07-4:2016/BXD, Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia các công trình hạ tầng kỹ thuật - công trình giao thông.
2. AASHTO LRFD 2017, Bridge design specifications.
3. FHWA-HRT-18-036, Material property characterization of ultra high performance concrete.
4. FHWA-HRT-09-069, Structural behavior of a 2nd generation UHPC Pi-girder.
5. FHWA-HRT-10-079, Finite element analysis of UHPC structural performance of an AASHTO type II girder and a 2nd generation PI-girder.
6. ACI PRC-239-18, Ultra high performance concrete, sn emerging technology report.
7. Plank J, New developments in admixtures for precast and ready-mix concrete ICCX middle east 2018.
8. WB-DRVN, Report piloting and scaling up building climate resident brridges in poor rural areas 2019.