

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ DẦM CẦU BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG (UHPC) MẶT CẮT CHỮ PI THEO TẢI TRỌNG THIẾT KẾ HOẠT TẢI HL93

RESEARCHING THE DESIGN OF ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE BRIDGE GIRDERS WITH A PI-SECTION UNDER THE LIVE LOAD DESIGN SPECIFICATION HL93

TS. Trần Bá Việt

Hội Bê tông Việt Nam – VCA

Email: vietbach57@yahoo.com

Điện thoại: 0903 406 501

KS. Lê Anh Đức; KS. Lê Hoàng Phúc

Công ty Cổ phần Sáng tạo và Chuyển giao công nghệ Việt Nam

KS. Lê Kim Tuyến

Học viên Trường ĐHXD Miền Tây

Ngày nhận bài: 21/02/2023

Ngày gửi phản biện: 18/03/2023

Ngày chấp nhận đăng: 26/03/2023

Tóm tắt:

Nghiên cứu về công nghệ bê tông siêu tính năng (UHPC) và ứng dụng nó trong công trình hạ tầng xây dựng, đặc biệt là trong lĩnh vực hạ tầng giao thông cầu đường bộ, đang thu hút sự chú ý toàn cầu, cũng như ở Việt Nam. UHPC mang lại khả năng sản xuất dầm cầu với chiều dày mỏng, khối lượng nhẹ, khả năng chống ăn mòn cao, tuổi thọ kéo dài, thời gian thi công ngắn và chi phí bảo trì thấp. Bài viết này trình bày các nghiên cứu liên quan đến việc sử dụng UHPC để chế tạo dầm cầu với tiết diện chữ Pi với chiều dài nhịp 20m, cũng như áp dụng phương pháp ứng lực căng trước.

Từ khóa: Bê tông siêu tính năng, trạng thái giới hạn, cường độ, ứng suất, biến dạng.

Abstract:

Exploring Ultra High Performance Concrete (UHPC) technology for its application in general construction infrastructure, particularly in the realm of traffic infrastructure such as road bridges, has become a globally recognized field of research, garnering attention not only worldwide but also within Vietnam. Offering numerous advantages over traditional reinforced concrete, UHPC enables the creation of bridge girders with slender dimensions, lightweight properties, heightened corrosion resistance, and an extended lifespan, all while minimizing construction duration and maintenance costs. This article delves into research centered around the utilization of UHPC in the fabrication of Pi-section bridge girders.

Keywords: *Ultra High Performance Concrete - UHPC, limit state, strength, stress, deformation.*

1. Đặt vấn đề

UHPC ở Việt Nam là một công nghệ 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 chứng minh hiệu quả của UHPC.

Hiện tại ở Việt Nam chủ yếu sản xuất UHPC và chế tạo dầm Double T. Điều này thể hiện ở chiều dài dầm, dẫn đến hiệu quả của UHPC trong ứng dụng cho cầu chưa được tối ưu. Để cải thiện, có nhiều phương án thiết kế khác như dầm máng hình hộp kín hay các dầm tiết diện chữ I, chữ T, chữ U, chữ Pi. Trong bài viết này trình bày về phương án sử dụng công nghệ UHPC chế tạo dầm chữ Pi nhịp 20m, tải trọng HL93.



Hình 1. Cầu Batu 6- Malaysia sử dụng UHPC [11]



Hình 2. Cầu Sungai Langat – Malaysia sử dụng UHPC – nhịp 105m [11]

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 hóa 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 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.

- Design Guideline for K- UHPC, KICT, Korea, 2014"

- TCVN 11823:2017 Tiêu chuẩn thiết kế cầu (dùng để kiểm tra các điều kiện làm việc).

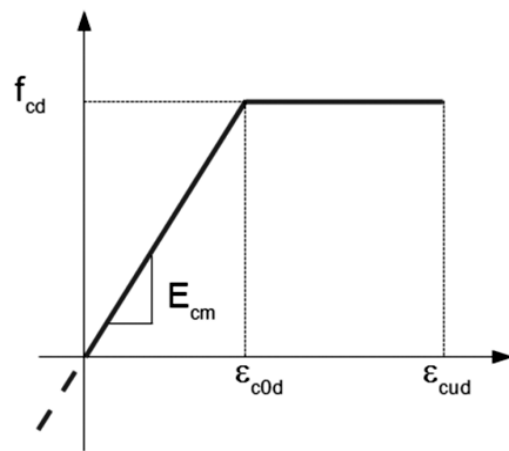
- LRFD của AASHTO bridge design Specification, Loading and General information, 2007.

- US Dep. of Transportation Federal Highway Administration. Ultra – High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, 2013.

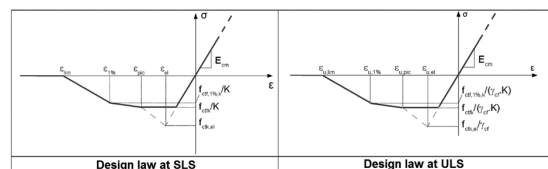
- JSCE (2008). Recommendations for design and construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), Japan.

3. Phương pháp thiết kế dầm

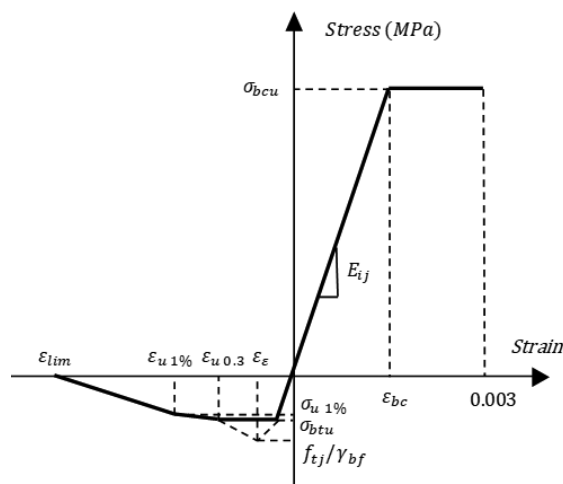
Thiết kế dầm UHPC ở 2 trạng thái giới hạn cường độ (ULS) và trạng thái giới hạn sử dụng (SLS), TCVN 13737:2023 [2], cho phép sử dụng kết hợp mối quan hệ ứng suất – biến dạng khi nén và khi kéo của UHPC.



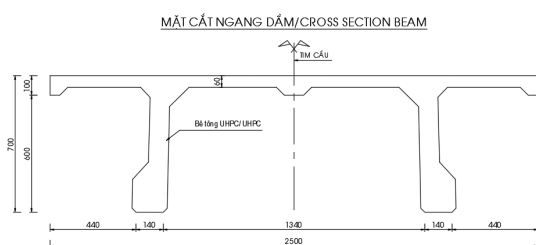
Hình 3. Quan hệ ứng suất - biến dạng nén của UHPC



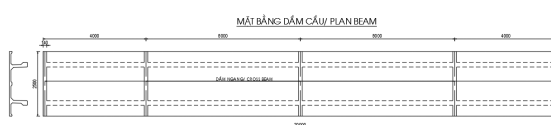
Hình 4. Quan hệ ứng suất - biến dạng kéo của UHPC



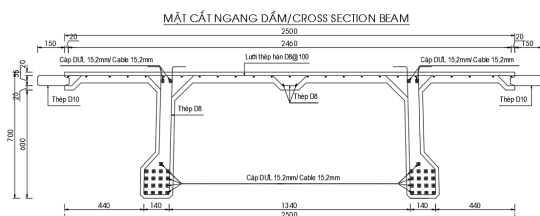
Hình 5. Tổ hợp ứng suất - biến dạng (nén - kéo) của UHPC (Soft strain)



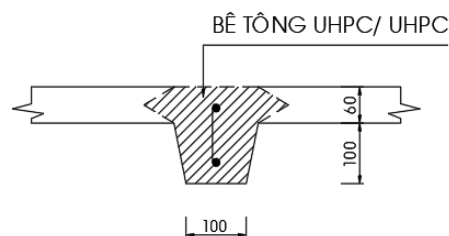
Hình 6. Mặt cắt ngang dầm thiết kế



Hình 7. Mặt bằng dầm thiết kế



Hình 8. Mặt cắt bố trí cáp thiết kế



Hình 9. Mặt cắt dầm ngang thiết kế

4. Yêu cầu kỹ thuật và thành phần vật liệu của UHPC

a) Yêu cầu kỹ Thuật của UHPC

Hàm lượng sợi thép sử dụng: $\geq 2\%$.

Khối lượng thể tích của hỗn hợp: $\geq 2450 \text{ kg/m}^3$.

Độ chảy của hỗn hợp: $> 20 \text{ cm}$.

Cường độ nén (R28): $\geq 150 \text{ MPa}$.

Modulus đàn hồi: $\geq 50 \text{ GPa}$.

Cường độ chịu kéo R28 (giá trị cực đại): $\geq 10 \text{ MPa}$.

Biến dạng co khô sau bảo dưỡng nhiệt ẩm: $\leq 100 \mu\text{m/m}$.

b) Lựa chọn Thành phần Vật liệu chế tạo UHPC

Xi măng PC50, tuân thủ theo Tiêu Chuẩn Việt Nam TCVN 2682:2009.

Phụ gia Silica Fume, tuân thủ theo Tiêu Chuẩn Việt Nam TCVN 8827:2020 [3], và xỉ GGBS, tuân thủ theo TCVN 11586:2016 [4].

Cát thạch anh, tuân thủ theo Tiêu Chuẩn Việt Nam TCVN 9036:2011 [5], cũng như theo ACF 04:2020 [6].

Sợi thép thẳng mạ đồng cường độ cao, tuân thủ theo Tiêu Chuẩn Việt Nam TCVN 12392:2018 [7].

Phụ gia siêu dẻo gốc PCE, tuân thủ theo Tiêu Chuẩn Việt Nam TCVN 8826:2011 [8] và ACF 04:2020 [6].

5. Kết quả kiểm tra các tính chất của UHPC

a) Độ chảy xòe

Bảng 1. Tính công tác của hỗn hợp UHPC

STT	Nội dung		Đơn vị	Kết quả
1	Điều kiện LAS		cm	20,3
2	Điều kiện thực tế	Lần 1		21,4
		Lần 2		21,4
		Lần 3		20,1

b) Biến dạng co

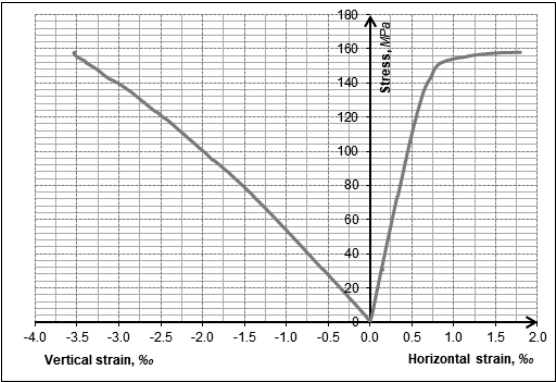
Bảng 2. Độ co của UHPC

STT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả
1	Biến dạng co mềm	μm/m	438
2	Biến dạng co khô sau bảo dưỡng nhiệt ẩm		80

c) Cường độ chịu nén

Bảng 3. Cường độ chịu nén của UHPC theo thời gian

STT	Nội dung		Đơn vị	Kết quả
1	Thử nghiệm trong LAS	R1	MPa	62,3
		R5		166,7
		R14		168,4
		R28		168,6
2	Thực tế sản xuất	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



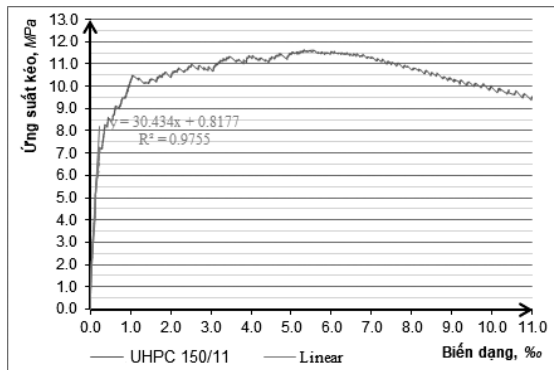
Hình 10. Biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng nén của mẫu UHPC

d) Cường độ chịu kéo trực tiếp

Bảng 4. 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	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

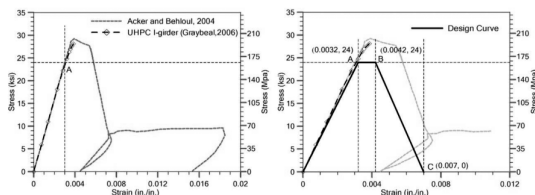
Kết quả thử nghiệm ban đầu trong phòng LAS so với thực tế đảm bảo hệ số dư an toàn là ≈ 10%



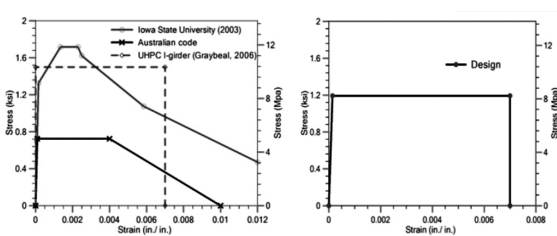
Hình 11. Biểu đồ ứng suất - biến dạng kéo mẫu UHPC

6. Tính toán

6.1. Trạng thái giới hạn cường độ

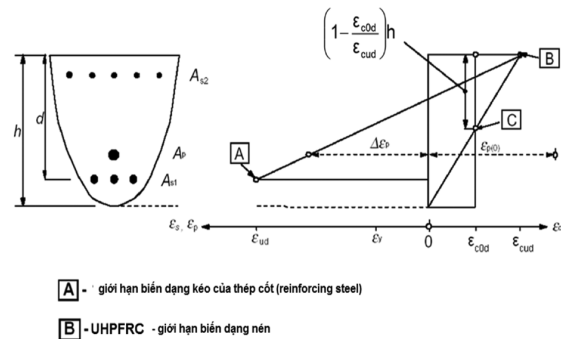


Hình 12. Quan hệ ứng suất – biến dạng khi chịu nén

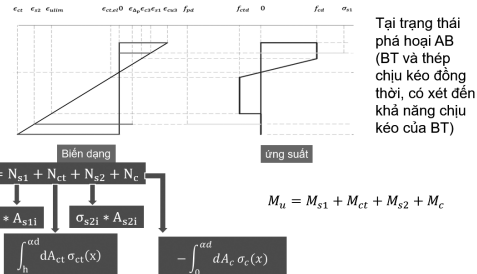


Hình 13. Quan hệ ứng suất – biến dạng khi kéo

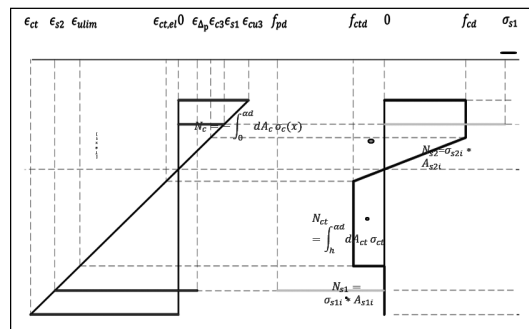
Hệ số sức kháng lấy 0.8 xét đến mức độ phân tán đồng đều của sợi thép (fiber);
Sức kháng uốn:



Phương trình cân bằng lực



TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG CHỊU UỐN



Sức kháng cắt:

TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG CHỊU CẮT

Giá trị thiết kế của lực cắt $V_{ed} < V_{Rd, total}$ khả năng chịu cắt

$$V_{Rd, total} = \min(V_{Rd} \text{ và } V_{Rd, max})$$

$V_{Rd, max}$: lực cắt giới hạn cho cường độ chịu nén của dải bê tông chịu nén trong sơ đồ giản;

V_{Rd} : tổng của ba giá trị khả năng chịu cắt giới hạn $V_{Rd, c} + V_{Rd, s} + V_{Rd, f}$

$$V_{Rd} = V_{Rd, s} + V_{Rd, c} + V_{Rd, f}$$

Cốt thép Bê tông Sợi thép

TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG CHỊU CẮT

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{Rd,c} + V_{Rd,f}$$

$$\text{Cốt thép: } V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{yk} \cot \theta \quad V_{Rd,f} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{yk} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha$$

$$\text{Bê tông: } V_{Rd,c} = \frac{0.21}{\gamma_c f_c} k f_{ck}^{1/2} b_w d$$

$$\text{Cốt cốt thép: } V_{Rd,c} = \frac{0.21}{\gamma_c f_c} k f_{ck}^{1/2} b_w d$$

$$\text{UST: } V_{Rd,c} = \frac{0.24}{\gamma_c f_c} k f_{ck}^{1/2} b_w z$$

$$\text{Không UST, không CT: } V_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c f_c} k f_{ck}^{1/2} b_w h$$

$$\text{Sợi thép: } V_{Rd,f} = A_{FV} \sigma_{Rd,f} \cot \theta$$

Trong trường hợp UHPC loại T1* hoặc T2*:

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{K} \frac{1}{\gamma_a} \frac{1}{w} \int_0^w \sigma_f(w) dw \quad w = \max(w_s, 0.3 \text{ mm})$$

Trong trường hợp UHPC loại T3*

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{K} \frac{1}{\gamma_a} \frac{1}{z} \int_{z_0}^z \sigma_f(z) dz \quad z_0 = \max(z_{0,1}, z_{0,2})$$

Khả năng chịu cắt giới hạn $V_{Rd,max}$

không có cốt thép chịu cắt

$$V_{Rd,max} = 2.3 \frac{\alpha_c}{\gamma_c} b_w z f_{ck}^{2/3} \cdot \tan \theta$$

có cốt thép chịu cắt đặt nghiêng một góc α

$$V_{Rd,max} = 2.3 \frac{\alpha_c}{\gamma_c} b_w z f_{ck}^{2/3} \left[\frac{V_{Rd,s} (\cot \theta + \cot \alpha)}{(1 + \cot^2 \theta)} + V_{Rd,f} \tan \theta \right] \left[\frac{1}{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}} \right]$$

6.2. Trạng thái giới hạn sử dụng

a) Thông số đầu vào:

+ Bê tông:

- Bê tông cốt sợi thép cường độ siêu

cao - UHPC.

- Cường độ chịu nén, $f_{ck} = 110 \text{ MPa}$.

- Cường độ chịu kéo tính toán = 7.5 MPa.

- Cường độ chịu uốn tính toán = 35 MPa.

- Mô đun đàn hồi = 42.5 GPa.

+ Cáp ứng lực trước:

- Loại cáp Grade 1860(270k) theo ASTM A416-02, đường kính cáp T15.2

- Diện tích danh định $A_s = 140.00 \text{ mm}^2/1 \text{ sợi}$.

- Giới hạn chảy, $f_{py} = 1690 \text{ MPa}$.

- Giới hạn bền, $f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$.

- Lực kéo ban đầu cho mỗi sợi cáp:

$$0.8 f_{pu} = 0.8 \cdot 1860 \cdot 140 = 208.32 \text{ KN}$$

Chọn lực kéo 19 Tấn/1 sợi

- Tỷ lệ $f_{py}/f_{pu} = 1690/1860 = 0.908 > 0.8$.

- Độ chùng ứng suất thấp, ở lực kéo

80% f_{pu} , sau 1000 h không quá 2%.

- Mô đun đàn hồi, $E_{ps} = 1.95 \cdot 10^5 \text{ MPa}$.

- Ma sát góc $\mu = 0.07$.

- Ma sát do lắc $k = 0 \text{ rad/m}$ (Kéo thẳng)

b) Giới hạn ứng suất:

Theo NF P18-710 [4], giữ nguyên giá trị giới hạn ứng suất của bê tông Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC), viết tắt là UHPC, giống như giới hạn ứng suất của bê tông truyền thống theo Eurocode 2.

Bảng 5. 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	$0.6.f'_{ci}$	$0.4.\sqrt{f'_{ci}}$
Ứng suất sau khi hết mất mát	$0.4.f'_c$	$0.4.\sqrt{f'_c}$

c) Mất mát ứng suất:

Mất mát lâu dài dựa vào các công thức tính kiến nghị từ TCVN 11823:2017 [1] hoặc AASHTO (dựa vào thí nghiệm);

NF P18-710 [9] 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 khi biết mô đun đàn hồi của bê tông.

d) Kiểm Soát Nứt:

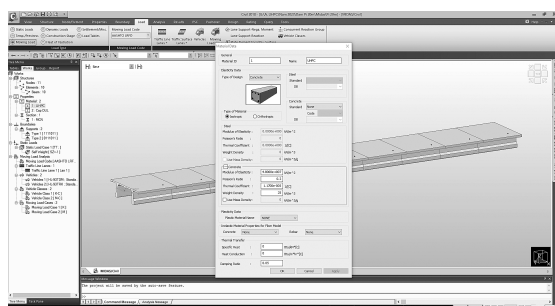
Theo Tiêu Chuẩn Pháp NF P18-710

[9], giới hạn về bề rộng của vết nứt của Ultra High Performance Concrete (UHPC) không dự ứng lực, cho phép nứt ở thành tích giữa hồng ngoại với các giá trị chiều rộng vết nứt nhất định: 0.3 mm (bình thường); 0.1 mm (khắc nhiệt); 0.05 mm (rất khắc nhiệt).

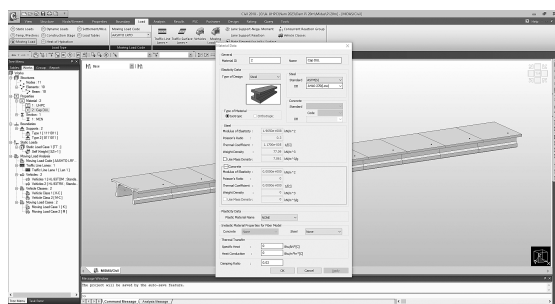
6.3. Phân tích kết cấu

Phân tích dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn, sử dụng phần mềm MIDAS để đánh giá kết cấu. Các giới hạn về độ võng tuân theo TCVN 11823-2:2017 [1] được áp dụng như sau:

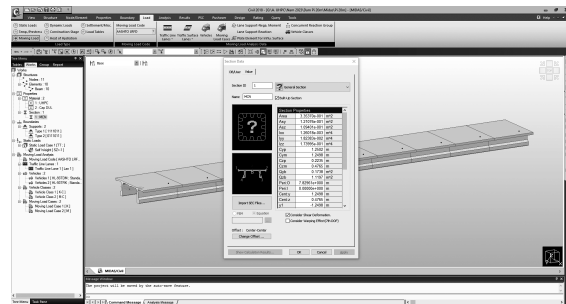
- Tải trọng từ xe chung: $L/800$.
- Tải trọng từ xe và/hoặc người đi bộ: $L/1000$.
- Tải trọng từ xe ở phần hằng: $L/300$.
- Tải trọng từ xe và/hoặc người đi bộ ở phần hằng: $L/375$.



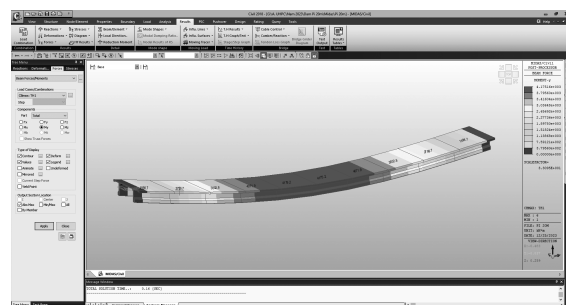
Hình 14. Khai báo vật liệu UHPC



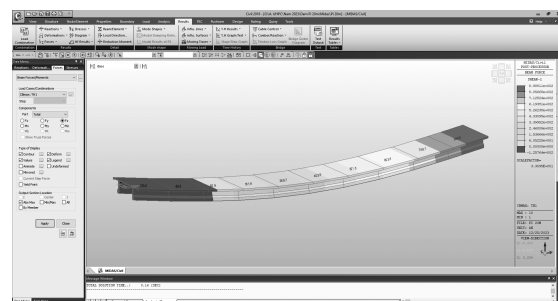
Hình 15. Khai báo vật liệu thép



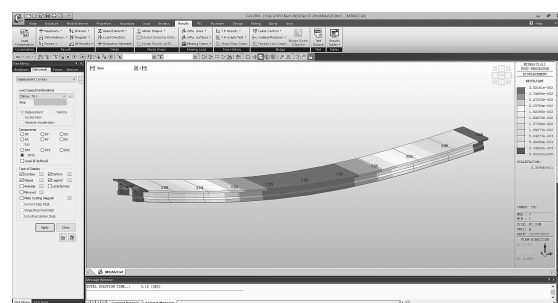
Hình 16. Khai báo mặt cắt dầm



Hình 17. Biểu đồ momen theo TTGH



Hình 18. Biểu đồ lực cắt theo TTGH



Hình 19. Biểu đồ độ võng do hoạt tải HL-93

7. Điều kiện chế tạo dầm UHPC

Nhiệt độ hỗn hợp UHPC không vượt

quá 35 °C.

Nhiệt độ môi trường không vượt quá 40 °C.

Độ ẩm không khí đạt ít nhất 65%.

Dung sai định lượng nước trộn: ± 1 kg.

Dung sai định lượng phụ gia dẻo: $\pm 0,5$ kg.

Tổng thời gian trộn là 11 ± 1 phút.

Chiều cao của gầu xả hỗn hợp UHPC không vượt quá 50 cm.

Chiều dày của lớp UHPC bảo vệ cốt thép ít nhất là 2 cm.

Quá trình bảo dưỡng nhiệt ẩm là 80 °C trong vòng 72 giờ.

8. Kết luận

1. Đã nghiên cứu phương pháp thiết kế và công nghệ để chế tạo được hệ dầm UHPC mặt cắt dạng Pi với cường độ chịu nén trung bình 150 MPa và cường độ chịu kéo lớn nhất 10,5 MPa.

2. Kết cấu dầm thanh mảnh nên tính tải bản thân nhỏ giảm được chi phí xây dựng móng và kết cấu đỡ trụ. Mức sử dụng vật

liệu như sau: UHPC 0.136 m³/m² mặt cầu, cáp 14.9 kg/m² mặt cầu, cốt thép 12.22 kg/m² mặt cầu.

3. Từ thiết kế, chế tạo dầm UHPC, tiết diện chữ Pi dài 20m là cơ sở khoa học phát triển các mẫu dầm Pi với chiều dài hơn 20m.

4. Qua đánh giá cho thấy rằng, việc ứng dụng dầm UHPC tiết diện chữ Pi với chiều dài nhịp 20m cho các công trình cầu ở Việt Nam hiện nay là rất khả thi với hai lý do như sau:

- Hiện tại, các nhà máy bê tông lớn như bê tông Thủ Đức 1, bê tông Thành Hưng, bê tông Xuân Mai đã thành công trong việc nắm vững công nghệ sản xuất UHPC.

- Tư vấn thiết kế đã đạt được sự chủ đạo trong phương pháp tính toán, áp dụng tiêu chuẩn, sử dụng phần mềm thiết kế và đã thành công trong việc thiết kế và chế tạo dầm tại Việt Nam, mang lại kết quả sử dụng đáng tin cậy.

Tài liệu tham khảo

1. TCVN 11823:2017, Thiết kế cầu đường bộ.
2. TCVN 2737:2023, Tải trọng và tác động.
3. TCVN 8827:2020, Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa - Silica Fume và tro trấu nghiền mịn.
4. TCVN 11586:2016, Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa.
5. TCVN 9036:2011, Nguyên liệu để sản xuất thủy tinh - Cát - Yêu cầu kỹ thuật.
6. ACF 04:2020, Materials UHPC - technicals specification.
7. TCVN 12392-2:2018, Sợi cho bê tông cốt sợi.
8. TCVN 8826:2011, Phụ gia hóa học cho bê tông.
9. NF P18-710, Design of concrete structures: specific rules for ultra-high performance fibre- reinforced concrete (UHPFRC).
10. AASHTO LRFD 2017, Bridge design specifications.
11. DURA® Technology Sdn Bhd - <https://dura.com.my/>