

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ SỨC KHÁNG UỐN CỦA BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO: THỰC NGHIỆM VÀ MÔ HÌNH SỐ

Ngô Quý Tuấn^{a,*}, Phạm Duy Hoà^b, Nguyễn Bình Hà^b, Lê Bá Danh^b, Khúc Đăng Tùng^b

^a*Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế,
102 đường Phùng Hưng, thành phố Huế, Việt Nam*

^b*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 03/03/2022, Sửa xong 25/4/2022, Chấp nhận đăng 04/5/2022

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô hình số xác định sức kháng uốn của bê tông chất lượng siêu cao (UHPC). Phương pháp thực nghiệm được tiến hành theo tiêu chuẩn chế tạo và thí nghiệm vật liệu UHPC NF P18-470 của hiệp hội xây dựng Pháp. Mô hình số được thực hiện bằng phần mềm ANSYS APDL, trong đó vật liệu UHPC sử dụng mô hình đàn dẻo Drucker – Prager cải tiến được gọi là mô hình DP – Bê tông. Kết quả nghiên cứu cho thấy UHPC với hàm lượng cốt sợi thép 2% theo thể tích có cường độ chịu kéo khi uốn lên đến 8 MPa, giới hạn đàn hồi khi kéo 6,9 MPa, đồng thời cường độ chịu kéo được duy trì sau khi xuất hiện vết nứt đầu tiên. Vật liệu UHPC sử dụng mô hình DP – Bê tông có sự tương đồng rất lớn khi so sánh đường quan hệ tải trọng – độ võng thu được từ mô hình số với thực nghiệm, đây được xem là phương pháp đầy triển vọng khi ứng dụng để mô hình hoá ứng xử cơ học vật liệu UHPC.

Từ khoá: bê tông chất lượng siêu cao (UHPC); cường độ chịu kéo; ứng xử uốn; mô hình Drucker-Prager; phương pháp phần tử hữu hạn; phần mềm ANSYS APDL.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODEL FLEXURAL BEHAVIOR OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Abstract

This paper presents experimental results and numerical model of beam flexural behavior using Ultra-high performance concrete (UHPC). Experimental research was performed following NF P18-470 “UHPC: specification, performance, production and conformity” of the French construction association. Numerical modeling is performed using ANSYS APDL software, in which an improved Drucker-Prager model, the so-called DP was used to simulate UHPC materials. Research results show that UHPC with the use of 2% steel fiber content by volume has tensile strength up to 8 MPa, tensile limit of elasticity is up to 6.9 MPa, and the ability to resist tension is maintained after the first crack appeared. UHPC materials using DP-Concrete model show a good correlation when compared to the load-deflection curve obtained from the experimental results, showing a new prospect when applying this model to study the mechanical behavior of UHPC.

Keywords: ultra-high performance concrete (UHPC); tensile strength; flexural behavior; numerical model of UHPC; Drucker-Prager model; FEM; Ansys APDL.

[https://doi.org/10.31814/stce.huice\(nuce\)2022-16\(2V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huice(nuce)2022-16(2V)-01) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Bê tông chất lượng siêu cao (Ultra-high performance concrete - UHPC) là loại vật liệu mới, thành phần cốt liệu chính bao gồm xi măng Pooc lăng, cát mịn, bột quartz, silica fume, phụ gia siêu dẻo, sợi

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: ngoquytuan@huaf.edu.vn (Tuấn, N. Q.)

thép và nước [1, 2]. UHPC thể hiện tính chất cơ học vượt trội với cường độ chịu nén lớn hơn 120 MPa [3], cường độ chịu kéo khi uốn lên đến 50 MPa [4], cường độ chịu kéo dọc trục từ 6 – 12 MPa [5], mô đun đàn hồi từ 42 – 55 GPa [4, 6]. Ngoài ra, UHPC có độ đặc chất, tính dẻo dai cao, khả năng chống ăn mòn tốt giúp tăng độ bền và tuổi thọ công trình.

UHPC được nghiên cứu và ứng dụng đầu tiên vào những năm cuối thập niên 90 của thế kỷ XX. Trong hơn hai thập kỷ qua, UHPC đang thu hút sự quan tâm ở nhiều quốc gia khác nhau trong việc ứng dụng cho kết cấu công trình xây dựng dân dụng và công nghiệp, công trình cầu, cảng biển, công nghiệp dầu khí, kết cấu ngoài khơi, kết cấu thủy lực, sửa chữa và phục hồi kết cấu [7]. Trong tất cả những ứng dụng này thì ứng dụng UHPC trong lĩnh vực cầu đường được xem là phổ biến nhất [8]. Ứng dụng vật liệu UHPC cho kết cấu công trình cầu đã được thực hiện ở nhiều quốc gia khác nhau bao gồm Úc, Áo, Canada, Trung Quốc, Cộng hòa Séc, Pháp, Đức, Ý, Nhật Bản, Malaysia, Hà Lan, New Zealand, Slovenia, Hàn Quốc, Thụy Sĩ và Hoa Kỳ [7].

Ở Việt Nam, nghiên cứu về vật liệu UHPC được thực hiện trong khoảng 10 năm gần đây. Các nghiên cứu này tập trung chủ yếu vào thành phần cốt liệu và hướng đến sử dụng các vật liệu địa phương để chế tạo bê tông chất lượng siêu cao [9–13]. Nhiều công trình đã tiến hành nghiên cứu ứng dụng UHPC cho kết cấu nhằm nâng cao khả năng chịu lực, độ bền trong môi trường đặc biệt và tải trọng nổ [14–18].

UHPC có cường độ chịu kéo cao, vì vậy khi thiết kế uốn, cường độ chịu kéo của UHPC không bỏ qua như đối với bê tông thường. Sự lý tưởng hóa đường quan hệ ứng suất – biến dạng khi kéo phục vụ thiết kế kết cấu UHPC là đề tài được các nhà nghiên cứu quan tâm. Hiện nay, các tiêu chuẩn thiết kế, khuyến nghị thiết kế và một số nhà nghiên cứu đã đề xuất một đường song tuyến tính (dạng hình thang) và dạng hình xấp xỉ dạng chữ nhật [5, 19–24].

Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá sức kháng uốn của bê tông UHPC bằng thực nghiệm, đồng thời đề xuất phương pháp mô hình số phù hợp để mô phỏng sự làm việc của UHPC. Mẫu UHPC được sử dụng cho thí nghiệm uốn có kích thước $100 \times 100 \times 400$ mm. Các thí nghiệm uốn 3 điểm và uốn 4 điểm sẽ được xem xét trong nội dung nghiên cứu này.

Thử nghiệm uốn được thực hiện theo tiêu chuẩn chế tạo và thí nghiệm vật liệu UHPC của hiệp hội xây dựng Pháp NF P18-470 [5].

Có hai thử nghiệm uốn được thực hiện:

- Thử nghiệm uốn bốn điểm trên mẫu dầm hình lăng trụ không khía để đánh giá ứng xử kéo của vật liệu UHPC trong giai đoạn tuyến tính.

- Thử nghiệm uốn ba điểm trên mẫu dầm hình lăng trụ có khía rãnh để đánh giá ứng xử kéo của vật liệu UHPC trong giai đoạn phi tuyến sau nứt và sự đóng góp của cốt sợi thép vào khả năng chịu kéo của vật liệu.

Kết quả thực nghiệm được so sánh với kết quả thu được từ phân tích mô hình số, từ đó lựa chọn mô hình số phù hợp phục vụ phân tích kết cấu UHPC. Đồng thời, thông qua kết quả mô hình số kết hợp với số liệu thực nghiệm để đánh giá ứng xử của UHPC.

2. Thử nghiệm uốn mẫu dầm UHPC

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Ở Việt Nam, đã có nhiều công trình nghiên cứu về thành phần vật liệu chế tạo UHPC. Các kết quả nghiên cứu đều chỉ ra rằng, hoàn toàn có thể dùng xi măng, tro bay, tro trấu, xỉ lò cao nghiền mịn, bột đá vôi, cát mịn địa phương, cát quartz, bột quartz ở trong nước để chế tạo UHPC [9–13].

Trong nghiên cứu này, sử dụng vật liệu UHPC với thành phần vật liệu chủ yếu trong nước, được nghiên cứu thành công tại trường đại học Xây dựng Hà Nội thông qua chương trình nghiên cứu KH&CN cấp Bộ “Nghiên cứu ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình” do PGS.TS. Phạm Duy Hoà làm chủ nhiệm chương trình [16] và được gọi là NUCE-UHPC. Thành phần vật liệu để chế tạo 1 m³ hỗn hợp NUCE-UHPC phục vụ thí nghiệm được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần vật liệu NUCE-UHPC

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

Các đặc trưng cơ học cơ bản của vật liệu NUCE-UHPC đã được công bố [25] bao gồm cường độ chịu nén $f'_c = 120$ MPa, mô đun đàn hồi $E = 42$ GPa, hệ số Poisson 0,209.

2.2. Mẫu thí nghiệm

Mẫu thử nghiệm uốn là mẫu hình lăng trụ, tiết diện vuông có cạnh là a , chiều dài $4 \times a$. Kích thước a được chọn là 100 mm, chiều dài mẫu 400 mm, Hình 1(a).



(a) Uốn bốn điểm



(b) Uốn ba điểm có khía rãnh

Hình 1. Mẫu thí nghiệm uốn

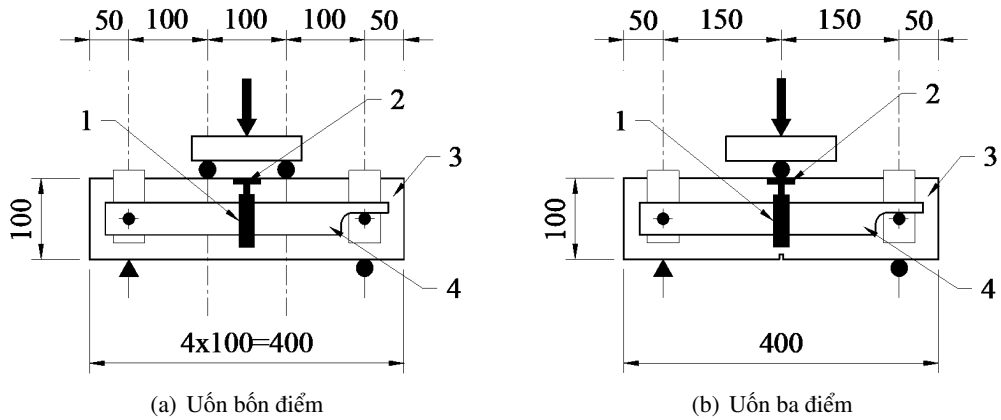
Đối với mẫu dầm hình lăng trụ có khía rãnh, rãnh được xẻ ở vị trí chính giữa mẫu dầm và ở mặt chịu kéo trong thử uốn. Chiều sâu của rãnh bằng 10 mm và chiều rộng của rãnh bằng 3 mm, Hình 1(b).

2.3. Bố trí thí nghiệm

Thử nghiệm uốn được thực hiện theo tiêu chuẩn chế tạo và thí nghiệm vật liệu UHPC của hiệp hội xây dựng Pháp NF P18-470 [5]. Mẫu thử được đặt trên hai gối tựa, khoảng cách giữa hai gối tựa bằng ba lần chiều cao mẫu.

Thiết bị đo độ võng bằng cảm biến chuyển vị được lắp đặt một đầu là cố định còn đầu kia dịch chuyển theo độ võng của mẫu dầm thí nghiệm tại giữa nhịp. Hành trình của cảm biến tối thiểu là 2 mm (Hình 2).

Việc gia tải được kiểm soát bằng cách điều khiển chuyển động của xi lanh có gắn thiết bị đo lực. Tốc độ gia tải trên chuyển động xi lanh là $(0,25 \pm 0,1)$ mm/phút. Thử nghiệm được gia tải liên tục cho đến khi đạt được độ võng được đo trực tiếp trên mẫu bằng $0,015 \times a$ (a là chiều cao của mẫu). Kết quả thí nghiệm thu được bao gồm: đường quan hệ tải trọng – độ võng ở cả thí nghiệm uốn ba điểm và uốn bốn điểm. Bố trí thiết bị phục vụ thí nghiệm được trình bày ở Hình 3.



1 – Cảm biến chuyển vị; 3 – Mẫu dầm thí nghiệm; 2 – Tấm dán lệch tâm; 4 – Thiết bị cố định đo vòng

Hình 2. Bố trí thí nghiệm uốn



Hình 3. Bố trí thí nghiệm uốn trong phòng thí nghiệm

Từ đường quan hệ tải trọng – độ võng từ thí nghiệm uốn bốn điểm có thể xác định giá trị của lực (F_{nl}) tại thời điểm mất tuyến tính (kết thúc giai đoạn đàn hồi). Giá trị ứng suất tương ứng được gọi là giới hạn đàn hồi khi uốn ($f_{ct,fl}$), được tính theo công thức (1) như sau:

$$f_{ct,fl} = 3F_{nl}/b \times a \quad (\text{MPa}) \quad [5] \quad (1)$$

trong đó: F_{nl} là tải trọng giới hạn đàn hồi (N); a, b là chiều cao và chiều rộng mẫu hình trụ (mm).

Giới hạn đàn hồi khi kéo ($f_{ct,el}$), được tính theo công thức (2) như sau:

$$f_{ct,el} = f_{ct,fl} \frac{\kappa a^{0.7}}{1 + \kappa a^{0.7}} \quad (\text{MPa}) \quad [5] \quad (2)$$

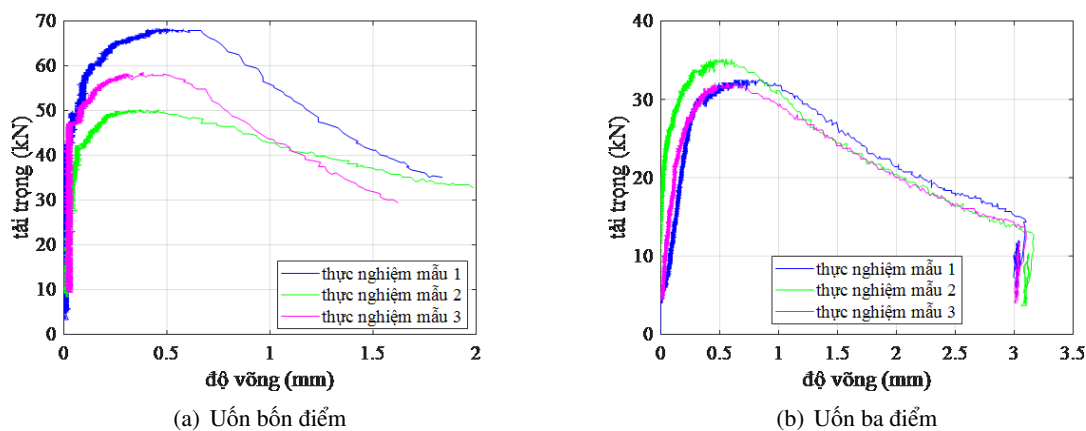
trong đó: $\kappa = 0,08$; a là chiều cao mẫu hình trụ (mm).

Từ đường quan hệ tải trọng – độ võng từ thí nghiệm uốn ba điểm có thể ước lượng độ mở rộng vết nứt (w) thông qua độ võng (f) khi biết độ võng ứng với điểm cuối giai đoạn đàn hồi (f_0), và được xác định theo công thức (3). Từ đó làm cơ sở để xác định quy luật kéo sau nứt của UHPC.

$$w = 4/3 \times 0,9 \times (f - f_0) \quad [5] \quad (3)$$

2.4. Kết quả thí nghiệm

Đường quan hệ tải trọng – độ võng giữa nhịp thu được từ thí nghiệm uốn bốn điểm và uốn ba điểm được trình bày ở Hình 4. Kết quả thí nghiệm uốn bốn điểm cho thấy, ở giai đoạn đàn hồi, các đường quan hệ tải trọng – độ võng là tương đương nhau. Tuy nhiên, giá trị tải trọng cực đại ở các mẫu thí nghiệm cho kết quả khác nhau, giá trị này dao động từ 50,0 kN đến 68,2 kN, tương ứng với độ võng trung bình 0,5 mm, tải trọng trung bình ở cuối giai đoạn đàn hồi là 34,0 kN (Hình 4(a)). Nguyên nhân dẫn đến giá trị tải trọng cực đại ở các mẫu khác nhau là do ảnh hưởng của sự phân bố và định hướng cốt sợi ở các mẫu không đều nhau. Mẫu có sự phân bố và định hướng cốt sợi tốt sẽ cho giá trị tải trọng cực đại cao hơn [26].

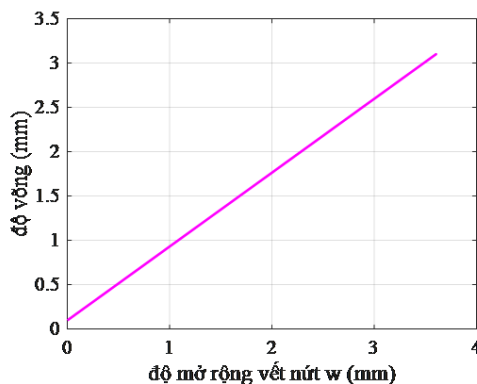


Hình 4. Kết quả thực nghiệm đường quan hệ tải trọng – độ võng

Đối với thí nghiệm uốn ba điểm, đường quan hệ tải trọng – độ võng ở các mẫu là tương đương nhau, điều này hoàn toàn hợp lý nhờ vào việc tạo khía để định hướng vị trí phát triển vết nứt trên các mẫu thí nghiệm. Tải trọng lớn nhất đạt được dao động từ 31,4 kN đến 34,0 kN tương ứng với độ võng 0,53 mm (Hình 4(b)).

Từ kết quả đường quan hệ tải trọng – độ võng của thí nghiệm uốn 4 điểm, dựa vào công thức (1) và (2) xác định được giới hạn đàn hồi khi uốn $f_{ct,fl} = 10,2$ MPa và giới hạn đàn hồi khi kéo $f_{ct,el} = 6,81$ MPa.

Mối quan hệ giữa tải trọng và độ mở rộng vết nứt ước lượng từ kết quả thí nghiệm uốn ba điểm theo công thức (3) được trình bày ở Hình 5.



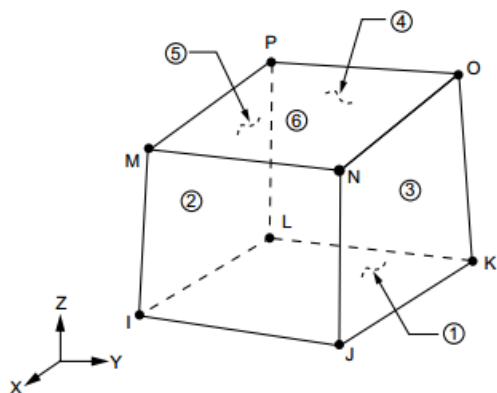
Hình 5. Đường quan hệ độ võng – độ mở rộng vết nứt

3. Mô hình số ứng xử uốn mẫu đầm UHPC

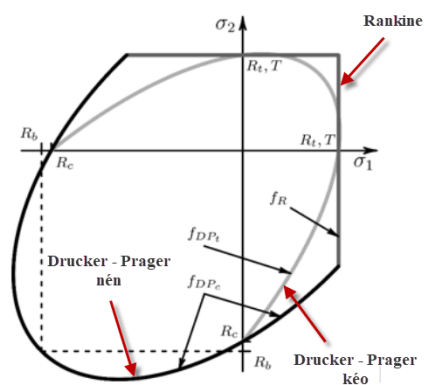
Mô hình phi tuyến vật liệu và kết cấu đầm thí nghiệm UHPC được xây dựng bằng phần mềm ANSYS APDL. Trong nghiên cứu này, việc mô phỏng ứng xử cơ học vật liệu UHPC sẽ sử dụng tổ hợp của hai bề mặt ở trạng thái phá hoại. Một bề mặt biểu diễn ứng xử kéo được gọi là bề mặt Drucker – Prager trong kéo, một bề mặt khác được gọi là bề mặt nén Drucker – Prager để biểu diễn ứng xử khi nén [27]. Mô hình đề xuất này có tính khái quát và có nhiều ưu điểm vì nó mô tả đầy đủ hiện tượng ở giai đoạn hóa cứng và hóa mềm của vật liệu khi phá hoại kéo và nén.

3.1. Loại phần tử mô hình kết cấu UHPC

Kết cấu UHPC được mô hình bằng phần tử SOLID185 trong ANSYS APDL (Hình 6), phần tử có sáu mặt, ký hiệu bằng các chữ số từ 1 đến 6; tám điểm nút, ký hiệu bằng các ký tự I, J, K, L, M, N, O, P; ba bậc tự do tại mỗi nút với chuyển vị thẳng theo phương x, y và z [27]. SOLID185 là loại phần tử phù hợp với các mô hình vật liệu mới.



Hình 6. Hình dạng phần tử SOLID185



Hình 7. Bề mặt giới hạn Drucker – Prager trong không gian hai chiều

3.2. Mô hình vật liệu

Để thể hiện sự khác biệt về độ bền trong kéo và nén của bê tông, sử dụng mô hình kết hợp hai bề mặt giới hạn bao gồm bề mặt hóa dẻo Drucker – Prager trong nén và bề mặt Drucker – Prager trong kéo như trình bày ở Hình 7 [27]. Trong đó, trục tung thể hiện ứng suất chính theo phương thứ hai và trục hoành là ứng suất chính theo phương thứ nhất.

Bề mặt Drucker – Prager trong kéo được biểu diễn bằng phương trình (4).

$$f_{DPt} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_t \sigma_m - \sigma_{Yt} \quad (4)$$

trong đó: σ_e là ứng suất Von Mises hữu hiệu; σ_m là ứng suất trung bình; $\beta_t v \sigma_{Yt}$ là các hằng số được xác định theo cường độ chịu kéo một trục R_t và cường độ chịu nén một trục R_c thể hiện ở phương trình (5) và (6).

$$\beta_t = \frac{\sqrt{3} (R_c \Omega_c - R_t \Omega_t)}{(R_c \Omega_c - R_t \Omega_t)} \quad (5)$$

$$\sigma_{Yt} = \frac{2 R_c \Omega_c R_t \Omega_t}{\sqrt{3} (R_c \Omega_c + R_t \Omega_t)} \quad (6)$$

trong đó: Ω_c, Ω_t là các hàm hóa cứng và hóa dẻo trong nén và kéo, phụ thuộc vào ứng suất σ và biến số hóa cứng κ . Xác định κ và hình dạng đặc trưng của hàm hóa cứng, hóa dẻo dựa vào hành vi hóa cứng, hóa dẻo và độ nở (HSD).

Bề mặt Drucker – Prager trong nén được biểu diễn bằng phương trình (7).

$$f_{DPc} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_c \sigma_m - \sigma_{Yc} \Omega_c \quad (7)$$

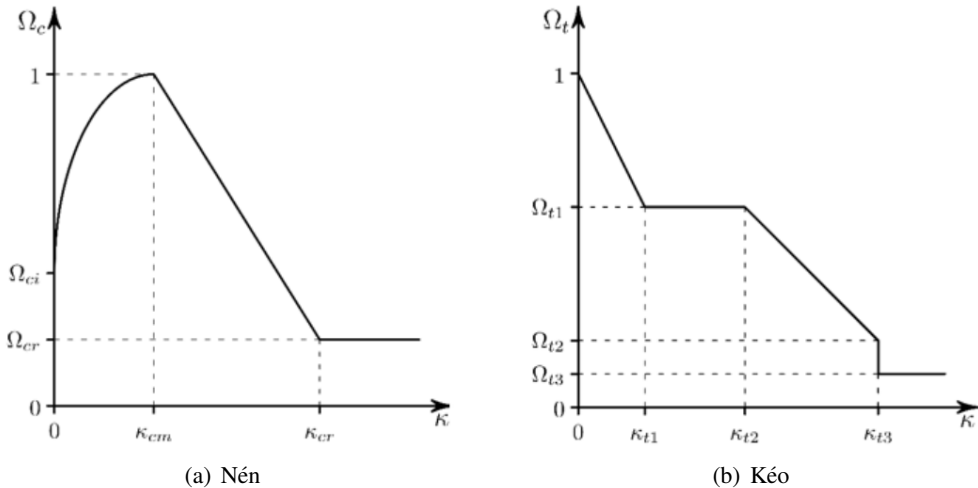
trong đó: β_c và σ_{Yc} là các hằng số được xác định theo cường độ chịu nén ba trục R_b và cường độ chịu nén một trục R_c thể hiện ở phương trình (8) và (9).

$$\beta_c = \frac{\sqrt{3}(R_b - R_c)}{2R_b - R_c} \quad (8)$$

$$\sigma_{Yc} = \frac{R_b R_c}{\sqrt{3}(2R_b - R_c)} \quad (9)$$

Khi giá trị các hàm số $f_{DPt}, f_{DPc} < 0$, ứng xử kéo và nén là đàn hồi tuyến tính. Khi hàm số $f_{DPt} = 0$, trạng thái biến dạng dẻo bắt đầu, hiện tượng nứt có thể được mô phỏng bằng cách gia tăng biến dạng dẻo và phụ thuộc vào các hàm Ω_c và Ω_t của mô hình HSD. Tương tự, khi hàm số $f_{DPc} = 0$, trạng thái biến dạng dẻo trong nén bắt đầu, bề mặt Drucker – Prager biến đổi theo hàm Ω_c của mô hình HSD.

Ansys APDL cung cấp bốn mô hình HSD đó là: mô hình HSD tuyến tính, HSD hàm số mũ, HSD năng lượng phá hoại và mô hình HSD cốt thép. Do đặc điểm ứng xử kéo UHPC có khả năng duy trì cường độ chịu kéo sau nứt, gần giống với kết cấu bê tông cốt thép. Vì vậy, trong nghiên cứu này sử dụng mô hình HSD cốt thép như trình bày ở Hình 8.



Hình 8. Mô hình HSD cốt thép

Hàm giới hạn chảy trong nén Ω_c được cho bởi một hàm hóa cứng phi tuyến và một hàm hóa mềm tuyến tính. Hàm hóa cứng phi tuyến được trình bày như sau:

$$\Omega_c = \Omega_{ci} + (1 - \Omega_{ci}) \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa_{cm}} - \frac{\kappa^2}{\kappa_{cm}^2}} \quad (10)$$

Tại $\kappa = \kappa_{cm}$, cường độ nén cao nhất đạt được và quá trình biến dạng mềm bắt đầu:

$$\Omega_c = 1 - \frac{1 - \Omega_{cr}}{\kappa_{cr} - \kappa_{cm}} (\kappa - \kappa_{cm}) \quad (11)$$

Tại $\kappa > \kappa_{cr}$, mức ứng suất tỷ đối là giá trị dư.

Hàm giới hạn chảy trong kéo Ω_t được xác định bởi quy luật đa tuyến theo cường độ dư tương đối của vật liệu. Sự mềm hoá đa tuyến được xác định bởi ứng suất tương đối và biến dạng dẻo hữu hiệu như trình bày ở Hình 8(b).

Để định nghĩa mô hình vật liệu UHPC theo phương pháp này, đòi hỏi phải có đầy đủ số liệu thực nghiệm các thông số vật liệu. Trong nghiên cứu này, các thông số cơ bản bao gồm cường độ chịu nén một trục, mô đun đàn hồi, hệ số poisson được lấy từ kết quả thực nghiệm đã công bố thuộc đề tài “Nghiên cứu ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình”, mã số CTB 2017-01 [16, 25] và cường độ chịu nén ba trục R_b được lấy bằng $1,15R_c$ theo [28, 29]. Các thông số còn lại sẽ sử dụng thông qua các nguồn tài liệu nghiên cứu về các đặc trưng cơ học UHPC có đặc điểm tương tự đã công bố trong thời gian gần đây [4, 30–33], đối với thông số chưa có số liệu thực nghiệm, tác giả sẽ dựa trên cơ sở lý thuyết mô hình Drucker – Prager [34] để đưa vào mô hình nghiên cứu. Giá trị cụ thể các thông số cơ bản sử dụng trong mô hình được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2

TT	Tham số vật liệu UHPC	Ký hiệu	Giá trị
1	Mô đun đàn hồi (N/m ²) [16, 25]	E	42×10^9
2	Hệ số Poisson [16, 25]	ν	0,22
3	Trọng lượng riêng (kN/m ³) [16, 25]	γ	25
4	Cường độ chịu nén một trục (N/m ²) [16, 25]	R_c	120×10^6
5	Cường độ chịu nén ba trục (N/m ²) [28, 29]	R_b	138×10^6
6	Cường độ chịu kéo một trục (N/m ²) [30, 31, 33]	R_t	8×10^6
7	Tham số độ nở trong nén [19]	δ_c	0,9
8	Ứng suất nén tương đối tại điểm bắt đầu hóa cứng phi tuyến [19]	Ω_{ci}	0,85
9	Ứng suất nén dư tương đối [30]	Ω_{cr}	0,20
10	Biến dạng dẻo tại cường độ chịu nén một trục [12]	κ_{cm}	$1,14 \times 10^{-3}$
11	Biến dạng dẻo hóa mềm điểm 1 [28, 32, 34]	κ_{t1}	4×10^{-2}
12	Biến dạng dẻo hóa mềm điểm 2 [28, 32, 34]	κ_{t2}	1×10^{-1}
13	Biến dạng dẻo hóa mềm điểm 3 [28, 32, 34]	κ_{t3}	5×10^{-1}
14	Ứng suất kéo dư tương đối điểm 1 [28, 32, 34]	Ω_{t1}	60%
15	Ứng suất kéo dư tương đối điểm 2 [28, 32, 34]	Ω_{t2}	30%
16	Ứng suất kéo dư tương đối điểm 3 [28, 32, 34]	Ω_{t3}	2%

3.3. Điều kiện biên và tải trọng

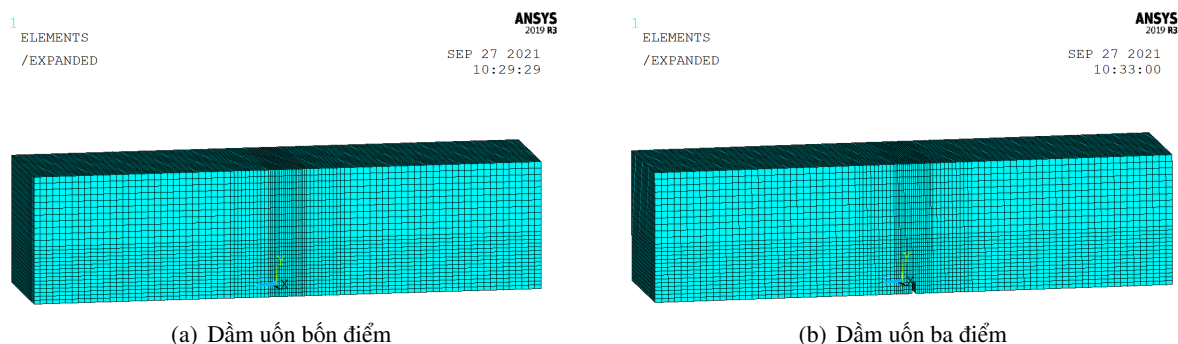
Mô hình điều kiện biên gồm một đầu là gối cố định, và đầu kia là gối di động theo phương z (phương dọc trục dầm). Các gối đặt cách đầu dầm 50 mm. Trọng lượng bản thân kết cấu được tính sau khi gán gia tốc trọng trường $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ theo phương y (phương thẳng đứng), tương ứng với bước tải trọng thứ nhất.

Mô phỏng quá trình gia tải bằng cách gán chuyển vị theo phương thẳng đứng (phương y), giá trị chuyển vị phù hợp với tốc độ chuyển vị của thiết bị gia tải theo thực nghiệm là 0,25 mm/phút tại bước tải trọng thứ hai.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Kết quả mô hình số kết cấu

Mô hình phần tử hữu hạn (FEM) cho kết cấu dầm thí nghiệm UHPC được thực hiện với kích thước hình học phù hợp với kích thước mẫu thực nghiệm. Việc chia lưới phần tử ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả đồng thời phụ thuộc vào cấu hình phần cứng máy tính và thời gian phân tích. Vì vậy, để chọn kích thước chia lưới phần tử thích hợp, trong nghiên cứu này đã kế thừa kết quả nghiên cứu liên quan đến kích thước lưới phần tử [35] và hướng dẫn chia lưới phần tử phù hợp của phần mềm ANSYS APDL [28]. Kết quả chia lưới phần tử được thực hiện theo phương án sau: ở phạm vi giữa nhịp và đáy dầm, nơi cần nghiên cứu ứng xử kéo vật liệu, lưới phần tử được chia mịn hơn với kích thước 2 mm; ngoài phạm vi này, phần tử được chia lưới có kích thước từ 3 đến 5 mm. Đồng thời, tận dụng tính đối xứng của kết cấu khi chịu tải, mô hình sẽ được thực hiện trên một phần hai chiều dài dầm, điều này giúp giảm số nút và phần tử cho mô hình (Hình 9).

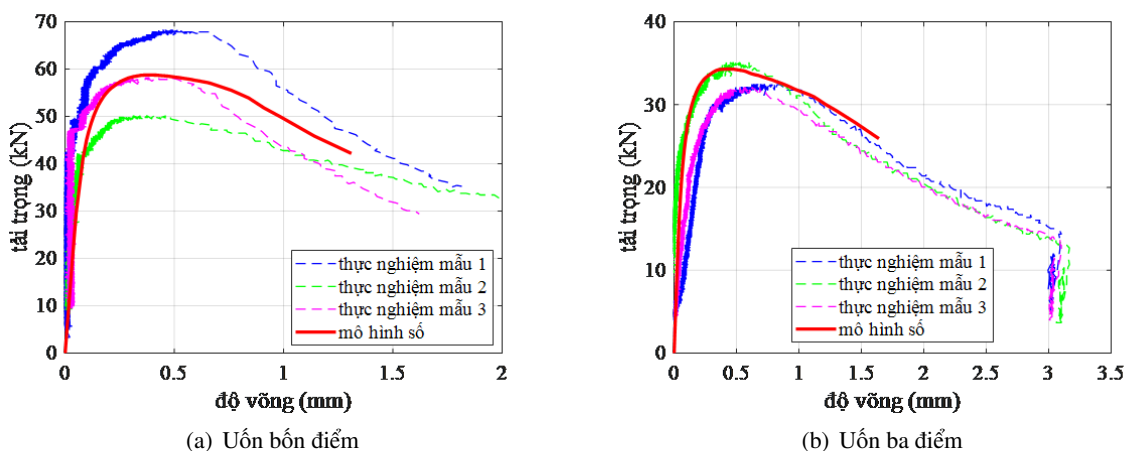


Hình 9. Mô hình 3D kết cấu dầm

4.2. Kết quả tính toán độ võng kết cấu khi chịu tải

Kết quả so sánh giữa đường quan hệ tải trọng – độ võng thu được từ mô hình số với thực nghiệm thể hiện ở Hình 10. Biểu đồ thể hiện sự tương đồng rất tốt giữa mô hình số và thực nghiệm. Ở thí nghiệm uốn bốn điểm, trong giai đoạn đàn hồi và giai đoạn tải trọng cực đại, kết quả thu được từ mô hình số phù hợp với kết quả thực nghiệm mẫu số 3. Ở giai đoạn phá hoại, kết quả giữa mô hình số và mẫu số 3 bắt đầu sai khác, tuy nhiên giá trị thu được từ mô hình số vẫn nằm trong giá trị trung bình của hai mẫu thực nghiệm số 1 và số 2 (Hình 10(a)).

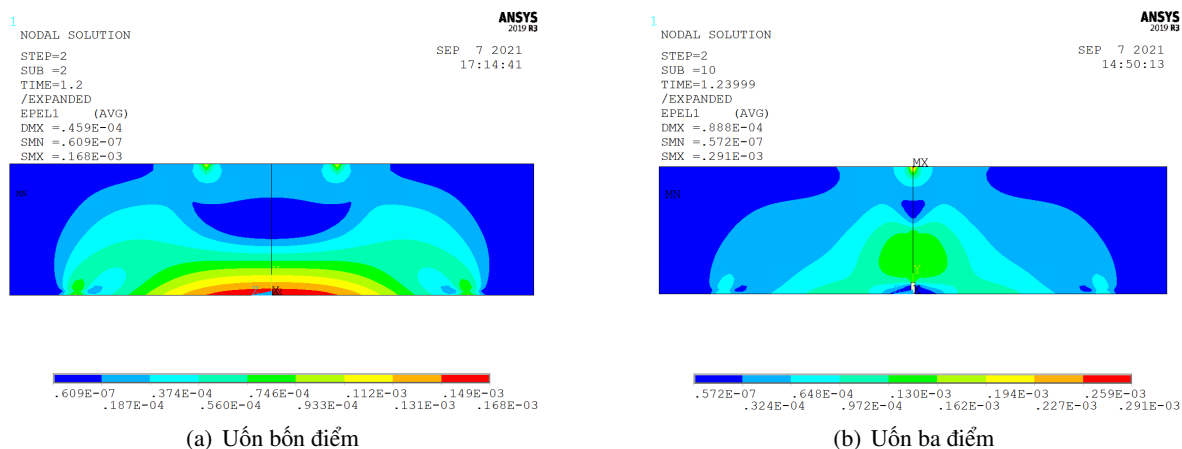
Kết quả tương tự đối với trường hợp uốn ba điểm, mô hình số tương đồng với mẫu thực nghiệm số 2. Ở giai đoạn đàn hồi và giai đoạn tải trọng cực đại, kết quả mô hình số và thực nghiệm là tương đương. Ở giai đoạn phá hoại, kết quả tải trọng từ mô hình số cao hơn thực nghiệm nhưng tương đương với kết quả thực nghiệm mẫu số 1 (Hình 10(b)). Mặc dù giữa mô hình số và thực nghiệm có sự sai khác về kết quả ở giai đoạn phá hoại mẫu, tuy nhiên giá trị sai khác vẫn nằm trong đường bao các kết quả thực nghiệm, vì vậy kết quả mô hình số có thể chấp nhận được, điều này thể hiện độ tin cậy của mô hình số khi sử dụng để phân tích ứng xử cơ học vật liệu UHPC.



Hình 10. Đường quan hệ Tải trọng – độ võng

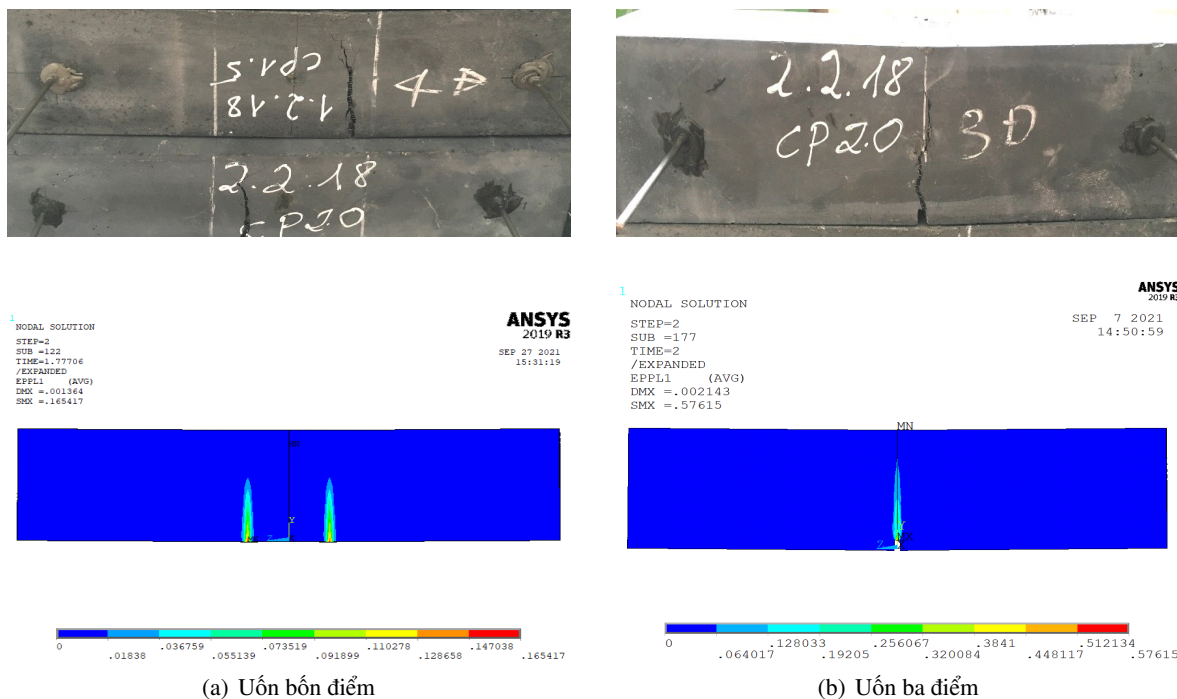
4.3. Kết quả phân tích biến dạng

Kết quả phân tích biến dạng dầm khi chịu tải tương ứng với giai đoạn biến dạng đàn hồi (Hình 11) và biến dạng dẻo (Hình 12). Ở trạng thái biến dạng đàn hồi, biến dạng kéo theo phương chính thứ nhất xuất hiện trong phạm vi giữa hai điểm đặt tải trong thí nghiệm uốn bốn điểm. Vì vậy, có thể sử dụng kết quả phân tích kéo ở khu vực này để đánh giá ứng xử kéo của UHPC.



Hình 11. Ứng suất trong bê tông khi chịu tải

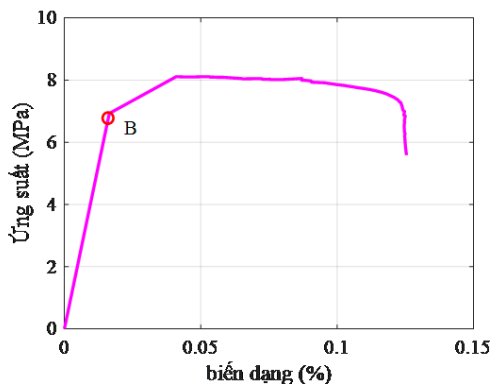
Kết quả so sánh sự hình thành vết nứt từ mô hình số với thực nghiệm được trình bày ở Hình 12. Kết quả cho thấy: vị trí hình thành vết nứt, chiều rộng, chiều cao vết nứt giữa mô hình số và thực nghiệm là tương đối phù hợp. Vị trí vết nứt ở thí nghiệm uốn ba điểm là tại vết khía tạo sẵn ở giữa nhịp (Hình 11(b)); đối với thí nghiệm uốn bốn điểm, vết nứt hình thành ở vị trí điểm đặt tải (Hình 11(a)).



Hình 12. Sự hình thành vết nứt và phá hoại dầm thí nghiệm

4.4. Kết quả đường quan hệ ứng suất – biến dạng kéo

Kết quả đường quan hệ ứng suất – biến dạng khi kéo thu được từ mô hình số dầm uốn bốn điểm được trình bày ở Hình 13. Ứng suất kéo lớn nhất thu được là 8,1 MPa, ứng suất kéo kết thúc giai đoạn đàn hồi là 6,85 MPa tương ứng với điểm B trên biểu đồ Hình 13, giá trị này tương đương với giá trị tính toán theo công thức từ số liệu thực nghiệm (6,81 MPa). Biến dạng tương ứng với giới hạn đàn hồi là 0,0163%.



Hình 13. Đường quan hệ ứng suất – biến dạng kéo UHPC

5. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô hình số dầm thí nghiệm uốn UHPC, các kết luận được rút ra như sau:

Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) sử dụng hàm lượng cốt sợi thép 2% theo thể tích có cường độ chịu kéo lên đến 8 MPa. Tuy nhiên, cường độ chịu kéo có sự biến động giữa các mẫu thử, phụ thuộc vào phương pháp trộn, đổ vật liệu vào khuôn hay nói cách khác là phụ thuộc vào sự định hướng của cốt sợi. Vì vậy, khi tính toán cần đưa hệ số định hướng cốt sợi vào cường độ chịu kéo của vật liệu.

Ứng xử chịu kéo sau nứt của UHPC có sự khác biệt rất lớn đối với bê tông thường, cường độ chịu kéo được duy trì sau khi xuất hiện vết nứt đầu tiên, điều này có được là nhờ hiệu ứng bắt cầu của cốt sợi thép. Cường độ chịu kéo giảm dần khi cốt sợi thép tụt khỏi chất nền UHPC.

Sử dụng mô hình vật liệu Drucker – Prager cải tiến được gọi là mô hình DP – Bê tông để mô hình hoá vật liệu UHPC cho thấy kết quả rất phù hợp với kết quả thu được từ thực nghiệm. Giải pháp này có triển vọng rất lớn khi ứng dụng để mô hình số kết cấu UHPC phục vụ nghiên cứu trong điều kiện bị hạn chế về số liệu thực nghiệm như hiện nay.

Thông qua kết quả phân tích mô hình số và thực nghiệm, chúng ta có thể dễ dàng thu được các thông số cơ bản về ứng xử kéo của UHPC, từ đó làm cơ sở để xây dựng đường quan hệ ứng suất – biến dạng kéo đơn giản hoá phục vụ thiết kế kết cấu UHPC.

Lời cảm ơn

Tác giả, NCS trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Bộ Giáo dục và Đào tạo cho đề tài “Xây dựng bộ chỉ dẫn kỹ thuật về thiết kế, chế tạo, thi công, nghiệm thu, bảo trì kết cấu sử dụng vật liệu bê tông chất lượng siêu cao”, mã số CTB 2017-01-06.

Tài liệu tham khảo

- [1] Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2014). [Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete \(UHPFRC\)](#). *Cement and Concrete Research*, 56:29–39.
- [2] Wu, Z., Shi, C., He, W., Wu, L. (2016). [Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete](#). *Construction and Building Materials*, 103:8–14.
- [3] Bajaber, M. A., Hakeem, I. Y. (2021). [UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review](#). *Journal of Materials Research and Technology*, 10:1058–1074.
- [4] Graybeal, B. A. (2006). Material property characterization of ultra-high performance concrete. Technical report, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, United States.
- [5] French-Standard. *NF P18-470 Concrete - Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete - Specifications, Performance, Production and Conformity*.
- [6] An, L. H., Bảo, B. T. (2020). Nghiên cứu đánh giá tổng quan các đặc tính cơ học của bê tông chất lượng siêu cao UHPC - Kinh nghiệm từ Cộng hoà Liên bang Đức. *Tạp chí Giao thông Vận tải, Bộ Giao thông Vận tải*, 77–82.
- [7] Voo, Y. L., Foster, S., Pek, L. G. (2017). Ultra-high performance concrete—technology for present and future. *Proceedings of the High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, Maastricht, The Netherlands*, 12–14.
- [8] Azmee, N. M., Shafiq, N. (2018). [Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications](#). *Case Studies in Construction Materials*, 9:e00197.
- [9] Hữu, P. D., Kha, N. L., Anh, P. D. (2011). Nghiên cứu vật liệu chế tạo bê tông cường độ siêu cao (UHPC). *Tạp chí Giao thông Vận tải, Bộ Giao thông Vận tải*, 7:15–18.
- [10] Thắng, N. C., Tuần, N. V., Hanh, P. H. (2012). Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng vật liệu sẵn có ở Việt Nam. *Tạp chí Xây dựng*, 71–74.
- [11] Thắng, N. C., Thắng, N. T., Hanh, P. H., Tuần, N. V., Thành, L. T., Lâm, N. T. (2013). Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng silica fume và xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 7(1):83–92.
- [12] Ân, V. V. T., Long, H. V., Tuấn, N. K. (2016). Chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng hỗn hợp phụ gia tro trấu - xỉ lò cao. *Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng*, 4:118–122.
- [13] Tuần, N. V., Thắng, N. C., Hanh, P. H. (2015). Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ siêu cao sử dụng phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng ở Việt Nam hướng tới phát triển bền vững. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 24:11–18.
- [14] 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 (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 13(3V):12–21.

- [15] Pham, D. H., Le, B. D., Nguyen, C. T., Tran, H. T. (2020). Modeling the fracture behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete slabs under contact Blast Loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 869(5):052079.
- [16] Hà, N. B., Hòa, P. D., Tuấn, N. Q., Danh, L. B., 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 (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 13(3V):1–11.
- [17] Hưng, C. V., Phúc, N. Đ., Thắng, N. C., Tuyển, N. N., Hoà, P. D. (2018). [Dự báo sức kháng uốn của dầm bê tông chất lượng siêu cao \(UHPC\)](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 12(4):1–13.
- [18] Việt, T. B., Long, L. M. (2020). *Nghiên cứu giải pháp kết cấu lắp ghép sử dụng bê tông tính năng cao cho công trình xây dựng trên đảo*. Hà Nội.
- [19] JSCE (2004). *Recommendations for Design and Construction of Ultra High - Strength Fiber - Reinforced Concrete Structures - Draft*.
- [20] French-Standard (2016). *NF P18-710 - Design of concrete structures: Specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPRFC)*. Association Française de Normalisation (AFNOR).
- [21] French-Standard (2018). *NF P18-451 Concrete - Execution of concrete structures - Specific rules for UHPRFC*. Paris: AFNOR.
- [22] Gowripalan, N., Gilbert, R. I. (2000). Design guidelines for RPC prestressed concrete beams. *School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales*.
- [23] Graybeal, B. A. (2006). Structural behavior of ultra-high performance concrete prestressed I-girders. Technical report, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, United States.
- [24] Kim, J.-S., Kim, B.-S. (2014). *Design Guidelines for K-UHPC*. Korea.
- [25] Hòa, P. D., Tùng, K. Đ., Danh, L. B., Hùng, N. M., Phát, N. T., Thắng, N. C. (2020). [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](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 14(2V):1–13.
- [26] Yu, R., Song, Q., Wang, X., Zhang, Z., Shui, Z., Brouwers, H. J. H. (2017). [Sustainable development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete \(UHPRFC\): Towards to an optimized concrete matrix and efficient fibre application](#). *Journal of Cleaner Production*, 162:220–233.
- [27] ANSYS Inc. (2019). *ANSYS help system: version 19.2*.
- [28] ANSYS Inc. *ANSYS help system: version 2019*. Material Reference: Canonsburg.
- [29] Grøstad, Ø., Sandberg, E. (2018). *Analysing UHPRFC beams with the help of ANSYS*. Master's Thesis, University of Agder.
- [30] Haber, Z. B., Varga, I. D., Graybeal, B. A., Nakashoji, B., El-Helou, R. (2018). *Properties and Behavior of UHPC-Class Materials*. Federal Highway Administration, 6300 Georgetown Pike McLean.
- [31] Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., Koh, K. T. (2012). [Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete](#). *Cement and Concrete Composites*, 34(2):172–184.
- [32] Wille, K., Kim, D. J., Naaman, A. E. (2010). [Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents](#). *Materials and Structures*, 44(3):583–598.
- [33] Savino, V., Lanzoni, L., Tarantino, A. M., Viviani, M. (2019). [An extended model to predict the compressive, tensile and flexural strengths of HPRFCs and UHPRFCs: Definition and experimental validation](#). *Composites Part B: Engineering*, 163:681–689.
- [34] Drucker, D. C., Prager, W. (1952). [Soil mechanics and plastic analysis or limit design](#). *Quarterly of Applied Mathematics*, 10(2):157–165.
- [35] Hưng, C. V., Hoà, P. D., Thắng, N. C., Phúc, N. Đ., Phát, N. T., Đồng, P. S., Sơn, N. H., Nam, N. H. (2019). [Ứng dụng tấm ván khuôn bê tông chất lượng siêu cao \(UHPC\) thi công bản mặt cầu bê tông cốt thép](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 13(2V):1–12.