

# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ ỨNG XỬ NÉN CỦA MẪU BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO SỬ DỤNG THÀNH PHẦN CỐT LIỆU Ở VIỆT NAM

Lê Bá Danh<sup>a,\*</sup>, Ngô Quý Tuấn<sup>b</sup>, Phạm Duy Hòa<sup>a</sup>, Khúc Đăng Tùng<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*  
<sup>b</sup>*Khoa Cơ khí – Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế, 102 đường Phùng Hưng, Thành phố Huế, Việt Nam*

Nhận ngày 31/10/2022, Sửa xong 15/11/2022, Chấp nhận đăng 20/12/2022

---

## Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô hình số đánh giá ứng xử nén của mẫu bê tông chất lượng siêu cao (UHPC). Phương pháp thực nghiệm được tiến hành theo tiêu chuẩn thí nghiệm ASTM C469M. Mô hình số được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng 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. Mô hình DP – Bê tông có sự tương đồng rất lớn khi so sánh đường quan hệ ứng suất – biến dạng thu được từ mô hình số với thực nghiệm, đây được xem là mô hình đầy triển vọng khi ứng dụng để mô hình hoá ứng xử cơ học vật liệu UHPC. Bê tông UHPC với hàm lượng cốt sợi thép 2% theo thể tích sử dụng các loại vật liệu sẵn có ở Việt Nam được sử dụng trong nghiên cứu này. Kết quả nghiên cứu được so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng số nhằm đánh giá về sự phù hợp của mô hình Drucker – Prager cải tiến sử dụng để nghiên cứu ứng xử chịu nén của bê tông UHPC.

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

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES ON THE COMPRESSIVE BEHAVIOR OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE USING AGGREGATE COMPOSITION AVAILABLE IN VIETNAM

## Abstract

This paper presents the results of experimental and numerical research to evaluate the compressive behavior of Ultra-high Performance Concrete (UHPC). Experimental methods were carried out according to the standard ASTM C469M. Numerical modeling is conducted using finite element method and ANSYS APDL software, in which UHPC material uses an improved Drucker – Prager elastoplastic model, the so-called DP - Concrete model. The DP-Concrete model shows great similarities when comparing the stress-strain relationship curves obtained from numerical and experimental results. This is a promising numerical model when applying to model the mechanical behavior of UHPC materials. UHPC concrete with 2% steel fiber by volume using materials available in Vietnam was used in this study. The research results were compared between experiment and numerical simulation to evaluate the suitability of the improved Drucker - Prager model to study compressive behavior of UHPC concrete.

*Keywords:* UHPC, compression strength; compressive behavior; numerical model of UHPC; Drucker-Prager model; FEM; Ansys APDL software.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(5V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(5V)-01) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

---

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [danhlb@huce.edu.vn](mailto:danhlb@huce.edu.vn) (Danh, L. B.)

## 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 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 chắc, 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]. Ngoài ra, bê tông UHPC còn có thể được ứng dụng ở nhiều lĩnh vực khác cho các công trình dân dụng, công nghiệp, các công trình chịu tải trọng đặc biệt như nổ phá, va đập, ... Đặc biệt, với khả năng chống thấm và chống ăn mòn tốt, UHPC còn là vật liệu được sử dụng nhiều cho các công trình hạ tầng ven biển nhằm hướng tới phát triển bền vững.

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 nén cao, cường độ chịu nén đàn hồi đạt khoảng trên 80% cường độ chịu nén của UHPC. Sự lý tưởng hóa đường quan hệ ứng suất – biến dạng khi nén 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 đường tuyến tính giữa ứng suất – biến dạng khi nghiên cứu ứng xử cơ học của bê tông UHPC [6, 19–24].

Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ứng xử nén 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. Kết quả thực nghiệm được so sánh với 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 nén của UHPC.

## 2. Nghiên cứu thực nghiệm

### 2.1. Vật liệu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, vật liệu sử dụng là loại bê tông UHPC có thành phần hạt được sử dụng cho cấp phối bao gồm cát quartz có đường kính trung bình 300  $\mu\text{m}$ , xi măng Pooc lăng PC40, xỉ lò cao (Ground granulated blast-furnace slag – GGBFS) có đường kính trung bình 7,2  $\mu\text{m}$ , và Silica Fume (SF) có đường kính trung bình 0,15  $\mu\text{m}$ . Toàn bộ các thành phần cấp phối này được sản xuất tại Việt Nam ngoại trừ sợi thép có đường kính 0,2 mm  $\times$  dài 13 mm và phụ gia siêu dẻo (Superplasticize – SP) gốc Polycarboxylate được nhập khẩu. Chi tiết tỷ lệ cấp phối của vật liệu trộn khô thành phẩm UHPC được thể hiện như Bảng 1.

Bảng 1. Tỷ lệ thành phần cấp phối của vật liệu UHPC

Sợi thép (kg)	Cát nghiền (kg)	Xi măng (kg)	SF (kg)	GGBFS (kg)	SP (kg)	Nước (kg)
158	1108	831	111	220	8,25	176

## 2.2. Bố trí thí nghiệm

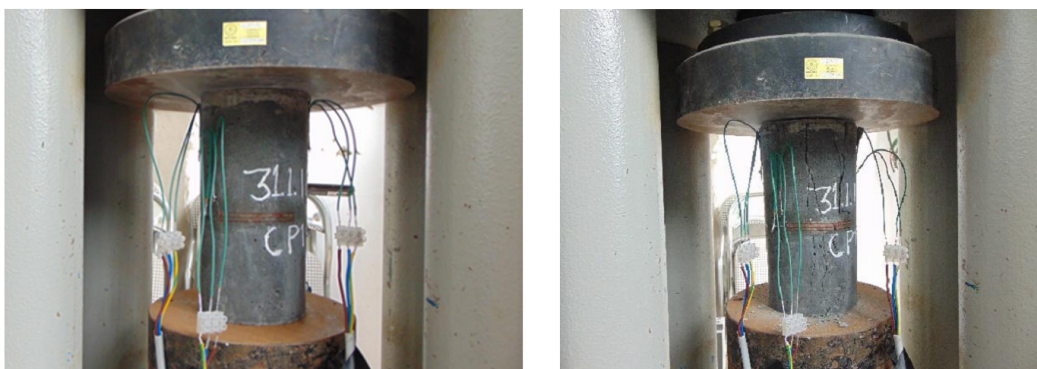
Mẫu UHPC được sử dụng cho thí nghiệm nén dạng hình lăng trụ có đường kính 100 mm và chiều cao 200 mm. Để xác định mô đun đàn hồi, hai thiết bị đo biến dạng dọc trục mẫu thí nghiệm có độ sai số cho phép đến năm phần triệu được gắn đối diện nhau ở khoảng chính giữa chiều cao mẫu thí nghiệm. Để xác định hệ số poisson, một thiết bị đo biến dạng theo chu vi có độ sai số cho phép đến năm phần triệu được gắn ở khoảng chính giữa chiều cao mẫu thí nghiệm.

Hình ảnh trộn vật liệu UHPC và đúc mẫu thí nghiệm được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Quá trình trộn vật liệu và đúc mẫu

Quá trình gia tải được thực hiện liên tục không gián đoạn, tải trọng được gia tải theo chuyển vị của trục nén với tốc độ di chuyển đầu nén 1 mm/phút. Quá trình thí nghiệm được thực hiện tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Số lượng mẫu UHPC 2% thí nghiệm là 3 mẫu ở 28 ngày tuổi. Bố trí thiết bị thí nghiệm được thể hiện trong Hình 2.



Hình 2. Thí nghiệm nén mẫu UHPC

### 2.3. Kết quả thí nghiệm

Từ các số liệu thu được trong quá trình thí nghiệm sẽ xác định các tính chất cơ lý của bê tông UHPC. Qua đó cũng vẽ được đường cong quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong quá trình gia tải. Kết quả thí nghiệm tính chất cơ lý của bê tông được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm đặc trưng cơ lý của bê tông UHPC

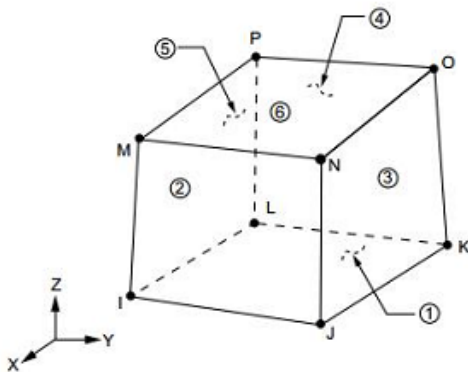
Đặc trưng cơ lý vật liệu	Giá trị trung bình (Giá trị Min – Giá trị Max)	Đơn vị
Cường độ chịu nén – ASTM C39M; 28 ngày	120 (110,8 – 132,2)	MPa
Mô đun đàn hồi – ASTM C469M; 28 ngày	42 (38,2 – 46,9)	GPa
Hệ số Poisson – ASTM C469M; 28 ngày	0,22 (0,165 – 0,249)	

### 3. Mô hình số ứng xử nén mẫu UHPC

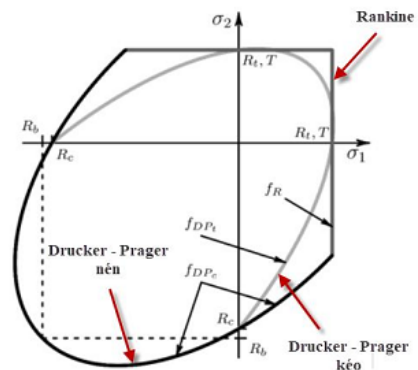
Mô hình phi tuyến vật liệu và kết cấu mẫu thí nghiệm nén UHPC được xây dựng bằng phần mềm ANSYS APDL. Trong nghiên cứu này, việc mô phỏng ứng xử cơ học vật liệu UHPC sẽ sử dụng tổ hợp của hai bề mặt ở trạng thái phá hoại. Một bề mặt biểu diễn ứng xử kéo được gọi là bề mặt Drucker – Prager trong kéo, một bề mặt khác được gọi là bề mặt nén Drucker – Prager để biểu diễn ứng xử khi nén [25]. 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 3), 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  $z$  [25]. SOLID185 là loại phần tử phù hợp với các mô hình vật liệu mới.



Hình 3. Hình dạng phần tử SOLID185



Hình 4. 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 4 [25]. 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 (1).

$$f_{DPt} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_t \sigma_m - \sigma_{Yt} \quad (1)$$

trong đó:  $\sigma_e$  là ứng suất Von Mises hữu hiệu;  $\sigma_m$  là ứng suất trung bình;  $\beta_t$  và  $\sigma_{Yt}$  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 (2) và (3).

$$\beta_t = \frac{\sqrt{3}(R_c \Omega_c - R_t \Omega_t)}{(R_c \Omega_c - R_t \Omega_t)} \quad (2)$$

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

trong đó  $\Omega_c, \Omega_t$  là các hàm hóa cứng và hóa dẻo trong nén và kéo, phụ thuộc vào ứng suất  $\sigma$  và biến số hóa cứng  $\kappa$ . Xác định  $\kappa$  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 (4).

$$f_{DPC} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_c \sigma_m - \sigma_{Yc} \Omega_c \quad (4)$$

trong đó:  $\beta_c$  và  $\sigma_{Yc}$  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 (5) và (6).

$$\beta_c = \frac{\sqrt{3}(R_b - R_c)}{2R_b - R_c} \quad (5)$$

$$\sigma_{Yc} = \frac{R_b R_c}{\sqrt{3}(2R_b - R_c)} \quad (6)$$

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  $\Omega_c$  và  $\Omega_t$  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  $\Omega_c$  của mô hình HSD.

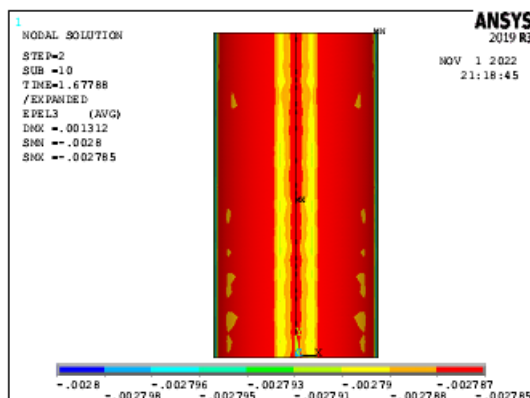
Để định nghĩa mô hình vật liệu UHPC theo phương pháp này, đòi hỏi phải có đầy đủ số liệu thực nghiệm các thông số vật liệu. Trong nghiên cứu này, các thông số cơ bản bao gồm cường độ chịu nén một trục, mô đun đàn hồi, hệ số poisson được lấy từ kết quả thí nghiệm và cường độ chịu nén ba trục  $R_b$  được lấy bằng  $1,15R_c$  theo [19, 20]. 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 [3, 4, 21, 23, 24], đối với thông số chưa có số liệu thực nghiệm, tác giả sẽ dựa trên cơ sở lý thuyết mô hình Drucker – Prager [26] 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 3.

Bảng 3. Tham số vật liệu UHPC sử dụng cho mô hình Drucker – Prager

TT	Tham số vật liệu UHPC	Ký hiệu	Giá trị
1	Mô đun đàn hồi (N/m <sup>2</sup> )	$E$	$42 \times 10^9$
2	Hệ số Poisson	$\nu$	0,22
3	Trọng lượng riêng (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$	25
4	Cường độ chịu nén một trục (N/m <sup>2</sup> )	$R_c$	$120 \times 10^6$
5	Cường độ chịu nén ba trục (N/m <sup>2</sup> ) [19, 20]	$R_b$	$138 \times 10^6$
6	Cường độ chịu kéo một trục (N/m <sup>2</sup> ) [21, 22, 24]	$R_t$	$8 \times 10^6$
7	Tham số độ nở trong nén [25]	$\delta_c$	0,9
8	Ứng suất nén tương đối tại điểm bắt đầu hóa cứng phi tuyến [25]	$\Omega_{ci}$	0,85
9	Ứng suất nén dư tương đối [21]	$\Omega_{cr}$	0,20
10	Biến dạng dẻo tại cường độ chịu nén một trục [12]	$\kappa_{cm}$	$1,14 \times 10^{-3}$
11	Biến dạng dẻo hóa mềm điểm 1 [19, 23, 26]	$\kappa_{f1}$	$4 \times 10^{-2}$
12	Biến dạng dẻo hóa mềm điểm 2 [19, 23, 26]	$\kappa_{f2}$	$1 \times 10^{-1}$
13	Biến dạng dẻo hóa mềm điểm 3 [19, 23, 26]	$\kappa_{f3}$	$5 \times 10^{-1}$
14	Ứng suất kéo dư tương đối điểm 1 [19, 23, 26]	$\Omega_{t1}$	60%
15	Ứng suất kéo dư tương đối điểm 2 [19, 23, 26]	$\Omega_{t2}$	30%
16	Ứng suất kéo dư tương đối điểm 3 [19, 23, 26]	$\Omega_{t3}$	2%

#### 4. Kết quả và đánh giá

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. Mẫu UHPC trong nghiên cứu được chia thành 30720 phần tử.

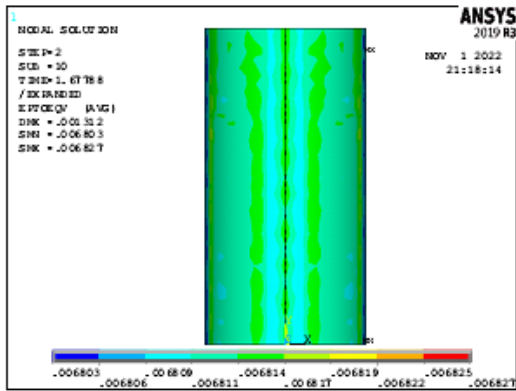


Hình 5. Kết quả mô phỏng số phân tích biến dạng đàn hồi của mẫu

Kết quả mô hình số phân tích biến dạng đàn hồi được trình bày ở Hình 5, tương ứng với giá trị biến dạng đàn hồi lớn nhất là 0,0028. Đây là biến dạng nén theo phương dọc trục (phương gia tải). Trong quá trình gia tải, biến dạng nén dọc trục cũng như ứng suất nén sẽ tăng dần. Khi các giá trị này

vượt quá giá trị giới hạn cho phép, vết nứt sẽ bắt đầu xuất hiện và phát triển dọc theo phương nén (phương dọc trục) tới lúc mẫu bị phá hoại.

Kết quả phá hoại mẫu theo mô hình số và thực nghiệm được thể hiện trong Hình 6. Vết nứt xuất hiện do ứng suất nén phát triển dọc theo chiều dài mẫu (phương gia tải), phù hợp giữa kết quả thực nghiệm và mô hình số. Các kết quả này cũng hoàn toàn phù hợp với lý thuyết về sự xuất hiện và phát triển của vết nứt do ứng suất nén.



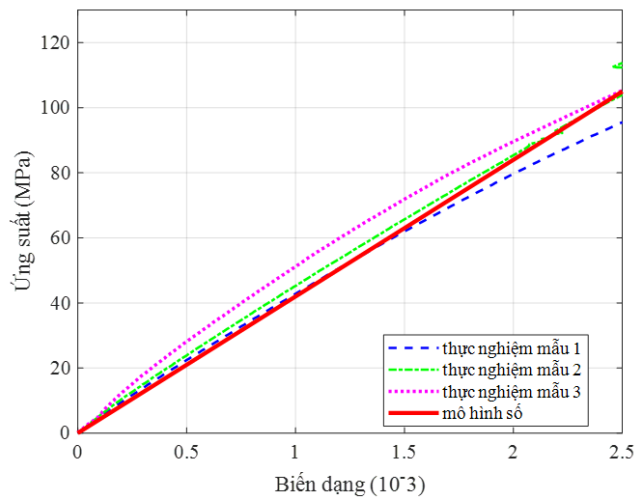
(a) Kết quả mô phỏng số



(b) Thực nghiệm mẫu khi phá hoại

Hình 6. Kết quả phá hoại mẫu theo mô hình số và thực nghiệm

Kết quả so sánh đường quan hệ ứng suất – biến dạng nén giữa mô phỏng số với thực nghiệm được thể hiện ở Hình 7. Kết quả so sánh đường quan hệ ứng suất – biến dạng nén cho thấy sự tương đồng rất lớn giữa kết quả mô hình số và thực nghiệm. Ngoài ra, kết quả phá hoại mẫu nén cũng phù hợp giữa mô hình số và thực nghiệm. Điều này khẳng định rằng sử dụng mô hình đàn dẻo Drucker – Prager cải tiến là phù hợp để mô hình số cho vật liệu UHPC.



Hình 7. Kết quả so sánh đường quan hệ ứng suất – biến dạng nén

## 5. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô hình số đánh giá ứng xử nén của mẫu bê tông chất lượng siêu cao (UHPC). Bê tông UHPC sử dụng trong nghiên cứu có thành phần cốt liệu sử dụng các vật liệu sẵn có trong nước, có cường độ chịu nén trung bình 120 MPa. 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 nén của UHPC, từ đó làm cơ sở để xây dựng đường quan hệ ứng suất – biến dạng nén đơn giản hoá phục vụ thiết kế kết cấu UHPC.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi nguồn kinh phí từ đề tài Bộ Giáo dục và Đào tạo, mã số CT.2020.04.XDA.01.

## 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*.
- [5] French-Standard (2016). *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. *Building Construction Authority Joint Seminar on Concrete for Sustainability, Productivity and The Future*, Singapore.
- [8] Azmee, N., 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., Tuấn, 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., Hanh, P. H., Tuấn, N. V. (2013). Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng silica fume và xi 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 - xi lò cao. *Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng*, 4:118–122.
- [13] Tuấn, 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., Thăng, N. C., Linh, N. Đ., Dung, B. T. T., Lộc, B. T., Đạt, Đ. V. (2019). [Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tác động tải trọng nổ của vật liệu bê tông chất lượng siêu cao \(UHPC\)](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - 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., Tuyền, N. N., Bảo, N. Q. (2019). [Phân tích và đánh giá xu hướng ứng dụng vật liệu bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình ở Việt Nam](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 13(3V):1–11.
- [17] Hung, C. V., Phúc, N. Đ., Thăng, N. C., Tuyền, 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) - NUCE*, 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] ANSYS Inc. (2019). *ANSYS help system: version 2019, Material Reference*. Canonsburg.
- [20] Grøstad, Ø., Sandberg, E. (2018). *Analysing UHPFRC beams with the help of ANSYS*. Master's Thesis, University of Agder.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Wille, K., Kim, D. J., Naaman, A. E. (2010). [Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents](#). *Materials and Structures*, 44(3):583–598.
- [24] Savino, V., Lanzoni, L., Tarantino, A. M., Viviani, M. (2019). [An extended model to predict the compressive, tensile and flexural strengths of HPFRCs and UHPFRCs: Definition and experimental validation](#). *Composites Part B: Engineering*, 163:681–689.
- [25] ANSYS Inc. (2019). *ANSYS help system: version 19.2*. Canonsburg.
- [26] Drucker, D. C., Prager, W. (1952). [Soil mechanics and plastic analysis or limit design](#). *Quarterly of Applied Mathematics*, 10(2):157–165.