



## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON TENSILE BEHAVIOR OF ULTRA HIGH-PERFORMANCE CONCRETE

Hoang Viet Hai\*

Faculty of Civil Engineering, University of Transport and Communications, 3 Cau Giay, Lang Thuong, Dong Da, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 12/05/2023

Revised: 11/07/2023

Accepted: 23/07/2023

Published online: 15/08/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.6.2>

\* *Corresponding author*

Email: [hoangviethai@utc.edu.vn](mailto:hoangviethai@utc.edu.vn)

**Abstract.** Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with superior mechanical properties compared to ordinary concrete especially its tensile strength, has been a subject in numerous studies. However, there has not been much research on the tensile behavior of this type of material. This article presents the results of experimental research and numerical modeling to assess the tensile behavior of UHPC specimen. Tensile behavior experiments were conducted directly on pull specimens. The numerical model was developed using the finite element analysis (FEA) method, with the UHPC material employing a concrete damage plasticity model (CDPL). The CDPL model showed significant similarity when comparing the stress-strain relationships obtained from numerical simulations with experiments. In this study, UHPC concrete with a steel fiber content of 2% by volume, using readily available materials in Vietnam, was employed. The research results were compared between experiments and numerical simulations to evaluate the adequacy of the CDPL model for studying the tensile behavior of UHPC concrete in further studies.

**Keywords:** Ultra-High-Performance Concrete, concrete damage plasticity model (CDP), tensile behavior.

© 2023 University of Transport and Communications



## THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG ỨNG XỬ CHỊU KÉO CỦA BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG

Hoàng Việt Hải\*

Khoa Công Trình, Trường đại học Giao thông Vận Tải, Số 3 Phố Cầu Giấy, Phường Láng Thượng, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 12/05/2023

Ngày nhận bài sửa: 11/07/2023

Ngày chấp nhận đăng: 23/07/2023

Ngày xuất bản Online: 15/08/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.6.2>

\* Tác giả liên hệ

Email: hoangviethai@utc.edu.vn

**Tóm tắt.** Bê tông siêu tính năng (UHPC) có tính năng cơ học vượt trội so với bê tông thông thường đặc biệt là khả năng chịu kéo đang là đối tượng của nhiều nghiên cứu. Tuy nhiên hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu về ứng xử kéo của loại vật liệu này. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô hình số đánh giá ứng xử kéo của mẫu bê tông siêu tính năng (UHPC). Thực nghiệm ứng xử chịu kéo được tiến hành theo trên mẫu kéo trực tiếp. Mô hình số được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn FEA, trong đó vật liệu UHPC sử dụng mô hình bê tông phá hoại dẻo (concrete damage plasticity model, CDPL). Mô hình CDP 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 phù hợp 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 CDP để nghiên cứu ứng xử chịu kéo của bê tông UHPC trong các nghiên cứu tiếp theo.

**Từ khóa:** Bê tông siêu tính năng (UHPC), mô hình bê tông phá hoại dẻo (CDPL), ứng xử chịu kéo.

© 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông siêu tính năng hoặc tính năng siêu cao (Ultra high performance concrete) hay còn gọi là bê tông UHPC là loại vật liệu có một số tính năng cơ học vượt trội so với bê tông thông thường như là: cường độ chịu nén rất cao (từ 120MPa – 200MPa), khả năng chịu kéo, kháng

nứt lớn (từ 8-12 MPa), khả năng chống ăn mòn cao do độ đặc chắc cao dẫn tới hệ số thấm nước, clo thấp, .... Việc bổ sung thành phần sợi thép trong hỗn hợp bê tông này giúp cải thiện tính giòn, tăng tính dẻo dai, tăng khả năng bám dính giữa bê tông và cốt thép, làm giảm bề rộng vết nứt. Với đặc tính như vậy, bê tông UHPC được xem như là một trong những giải pháp hữu ích trong sửa chữa, xây mới các công trình giao thông.

UHPC đã được nghiên cứu và ứng dụng trên thế giới được hơn 30 năm nay. 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, Pháp, Đức, Ý, Nhật Bản, Malaysia, Hà Lan, Hàn Quốc, Thụy Sĩ và Hoa Kỳ [1]. Ở Việt Nam, bê tông này đã được nghiên cứu trong khoảng 10 năm trở lại đây. Các nghiên cứu ban đầu tập trung và thành phần cốt liệu và việc sử dụng thành phần vật liệu địa phương nhằm chế tạo ra bê tông tính năng siêu cao. Một số nghiên cứu đã áp dụng vật liệu này vào các công trình, kết cấu cầu: như dự án cầu dân sinh, ... Tuy nhiên, hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu về đường cong ứng suất- biến dạng, ứng xử chịu kéo và nén của loại bê tông này trong điều kiện Việt Nam.

Gần đây, Lê Bá Danh và các cộng sự [2] đã nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng ứng xử chịu nén của mẫu bê tông cường độ siêu cao. Nhóm nghiên cứu đã sử dụng mô hình đàn dẻo Drucker-Prager cải tiến nhằm so sánh giữa đường quan hệ ứng suất biến dạng với thực nghiệm. Lê Hoàng An [3] đã sử dụng phương pháp thực nghiệm để đánh giá khả năng chịu kéo của bê tông UHPC trên mẫu có kích thước 40x40x80 mm được cắt khắc chữ U kích thước 5x5 mm ở giữa tương ứng với các hàm lượng 1%, 2% sợi thép. Một số nghiên cứu khác cũng đã tập trung vào ứng xử chịu kéo của bê tông UHPC nhằm phân tích được đường cong mối quan hệ ứng suất biến dạng của vật liệu này [4-6].

Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ứng xử kéo của bê tông UHPC bằng thực nghiệm, đồng thời đề xuất phương pháp mô hình số phù hợp để mô phỏng ứng xử của UHPC khi chịu kéo. 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 trong các nghiên cứu tiếp theo. Đồng thời, thông qua kết quả mô hình số kết hợp với số liệu thực nghiệm để đánh giá ứng xử kéo của UHPC.

## 2. VẬT LIỆU VÀ THỰC NGHIỆM

### 2.1. Vật liệu

Bê tông siêu tính năng (UHPC) sử dụng để chế tạo gồm các cốt liệu thành phần chính với đặc tính kỹ thuật được như sau: Xi măng Portland PC40 có các tính chất phù hợp với TCVN 2682-2009 hoặc ASTM C150 (AASHTO M85; Cát Quartz có đường kính hạt 0,34-1mm, SiO<sub>2</sub>> 95% không chứa tạp chất hữu cơ, Ion Clo; Phụ gia và tro bay; Sợi thép sử dụng trong bê tông là loại sợi thép mạ đồng. Sợi thép có cường độ chịu kéo cao hơn 2000 MPa và đường kính bằng 0,2 mm dài 12 mm. Khối lượng sợi thép cho vào được tính toán để đảm bảo hàm lượng 2% (theo thể tích của bê tông) theo như đề xuất của một số nghiên cứu trên thế giới [7] nhằm đảm bảo cường độ chịu kéo của vật liệu đạt được lớn hơn 8MPa.

Bảng 1. Tỷ lệ và thành phần cấp phối của bê tông UHPC.

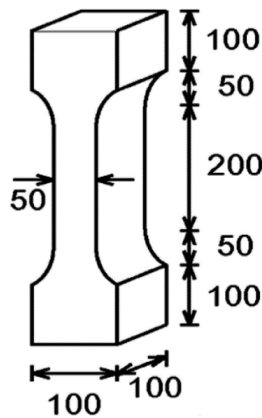
Xi măng (kg)	Cát Quart (kg)	Muội silic (kg)	Phụ gia (lít)	Nước (kg)	Sợi thép (kg)	Tỷ lệ N/CKD
788	1095	252	23,6	176,8	156	0,18

Bê tông sau khi trộn được tiến hành đúc mẫu. Sau đó, tiến hành các thí nghiệm kéo mẫu

UHPC tại các ngày tuổi khác nhau nhằm xác định đặc tính cơ lý của hỗn hợp vật liệu. Các thí nghiệm cơ lý được thực hiện tại phòng thí nghiệm Công trình – Trung tâm khoa học công nghệ trường Đại Học Giao thông Vận tải.

## 2.2. Thực nghiệm chịu kéo mẫu bê tông siêu tính năng (UHPC)

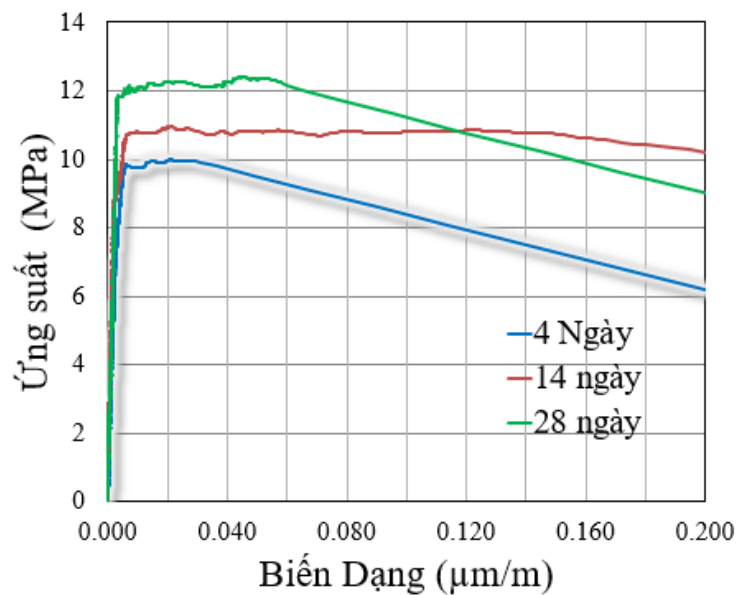
Thí nghiệm cường độ chịu kéo trực tiếp của mẫu thử được chế tạo có hình mác chèo với kích thước như (Hình 1) [8]. Các mẫu được chế tạo và bảo dưỡng nhiệt ở  $80^{\circ}\text{C}$  trong vòng 03 ngày để mẫu phát triển nhanh cường độ và giảm thiểu co ngót gây các vết nứt vi nứt xuất hiện trên các kết cấu. Các mẫu thí nghiệm sau đó được thí nghiệm với 3 tổ mẫu thuộc 3 độ tuổi khác nhau: 4 ngày, 14 ngày và 28 ngày, mỗi tổ mẫu gồm 3 mẫu thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm kéo mẫu được thể hiện trong các Hình 3, Hình 4.



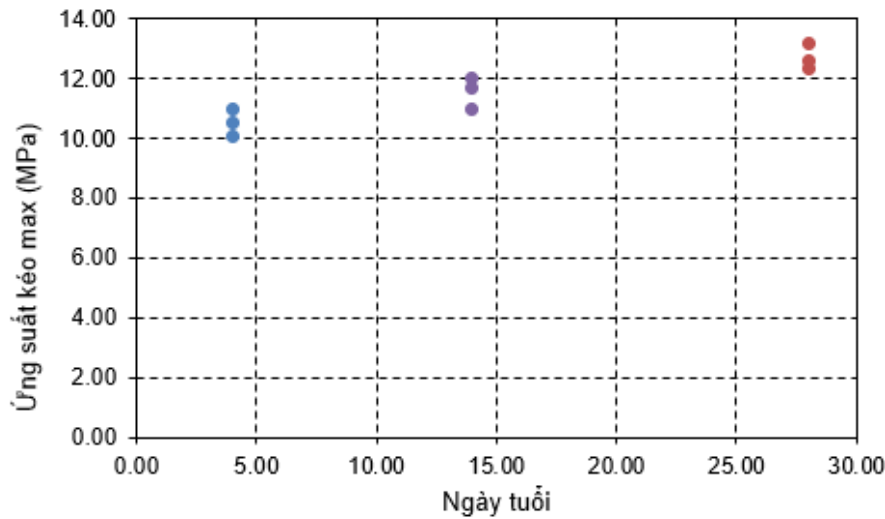
Hình 1. Mẫu mác chèo không khóa thí nghiệm cường độ chịu kéo trực tiếp (đơn vị mm).



Hình 2. Tiến hành thí nghiệm cường độ kéo mẫu UHPC.



Hình 3. Kết quả kéo mẫu ở 4, 14, 28 ngày tuổi.



Hình 4. Biểu đồ kết quả kéo mẫu tại các ngày tuổi khác nhau.

Hình 3 biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất kéo lớn nhất với biến dạng ở vị trí giữa mẫu mái chèo. Ứng suất được tính thông qua lực kéo của mẫu chia cho tiết diện của mẫu. Như vậy, ứng xử chịu kéo của mẫu UHPC thu được tương tự như các nghiên cứu trên thế giới gồm 03 giai đoạn chính: Giai đoạn đàn hồi; giai đoạn xuất hiện các vết vi nứt sợi thép phân tán làm việc chịu kéo; giai đoạn cuối là giai đoạn xuất hiện các vết nứt lớn có hiện tượng trượt cốt sợi khỏi hỗn hợp bê tông.

Cường độ chịu kéo của các mẫu thí nghiệm được hình thành từ rất sớm và đạt cường độ ở tuổi 4 ngày (lớn hơn 8MPa) và tăng nhẹ theo độ tuổi ở 14 ngày và 28 ngày (Hình 4). Kết quả thí nghiệm của các mẫu thuộc cùng tổ mẫu tại các ngày tuổi khác nhau khá tương đồng nhau về mặt cường độ, có thể dùng giá trị trung bình để đánh giá cường độ bê tông. Tại 4 ngày tuổi ứng xử kéo của mẫu UHPC đã khá cao (trung bình khoảng 10MPa) sau đó tăng chậm vào thời kỳ 7-14 ngày (đạt 11-12MPa), cường độ tại tuổi 28 ngày tăng dường như không đáng kể.

### 2.3. Mô hình phá hoại dẻo của bê tông (Concrete Damaged Plasticity)

Để phân tích đặc tính phi tuyến tính của bê tông, sự phát triển của phá hoại (damage) cần được xem xét. Bê tông được mô hình trong sử dụng mô hình phá hoại dẻo của bê tông (Concrete Damaged Plasticity (CDP)) [9]. Ứng xử phi tuyến của bê tông gắn liền đến phá hoại và tính dẻo của vật liệu này. Trong mô hình CDP, việc phá hoại của bê tông được xác định bằng cách đưa vào một tham số phá hoại vô hướng ( $d$ ). Nhiều ứng xử khác của vật liệu bê tông như biến dạng mềm (strain softening), giãn nở thể tích, v.v., có thể đặc trưng cho ứng xử dẻo (plasticity behavior). Tất cả các yếu tố trên làm giảm cường độ và độ cứng của bê tông. Hư hỏng của bê tông thường liên quan đến việc mất độ cứng.

Sau khi qua giai đoạn đàn hồi, ứng xử của bê tông được mô tả được mô tả với sự suy giảm độ cứng. Do đó, mô đun đàn hồi của bê tông được tuân theo quy luật:

$$E = (1 - d)E_0 \quad (1)$$

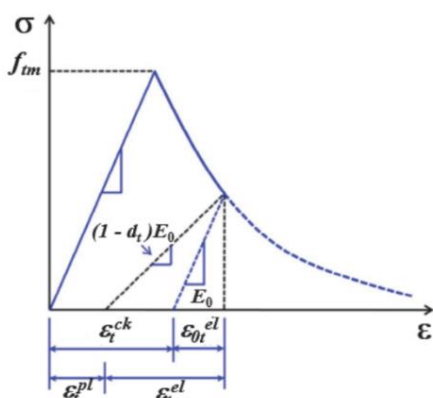
Trong đó:  $E_0$ : Mô đun đàn hồi ban đầu của bê tông UHPC;  $d$ : tham số phá hủy của bê tông ( $0 < d < 1$ ); Khi  $d=0$  có nghĩa là bê tông chưa bị hư hại;  $d=1$  bê tông bị phá hủy hoàn toàn

Theo nghiên cứu của Lubliner et al. [10], phá hoại dẻo của bê tông chỉ xảy ra trong giai đoạn hóa mềm (softening range) và độ cứng tỷ lệ thuận với lực liên kết của vật liệu. Hệ số phá hoại dẻo được tính theo phương trình sau đây như sau:

$$\frac{E}{E_0} = 1 - d = \frac{c}{c_{max}} \Rightarrow d = 1 - \frac{c}{c_{max}} \quad (2)$$

trong đó:  $c$  là lực liên kết vật liệu, tỷ lệ với ứng suất tác dụng; và  $c_{max}$  tỷ lệ thuận với cường độ của bê tông

Như vậy, ứng xử chịu kéo của bê tông được mô tả thông qua đường cong ứng suất và độ mở rộng vết nứt (hình 5).



Hình 5. Biểu đồ ứng suất - biến dạng khi bê tông chịu kéo [11].

Đường cong được mô tả thông qua mối quan hệ như sau:

Giai đoạn đàn hồi: khi ứng suất kéo nhỏ hơn ứng suất kéo cho phép  $f_{cm}$  bê tông làm việc như vật liệu đàn hồi.

Giai đoạn 2: giai đoạn khi xuất hiện vết nứt ứng suất giảm nhanh chóng biến dạng tăng nhanh. Khi chúng ta giảm tác động của tải mẫu sẽ còn biến dạng dư  $\epsilon_{pl}$ . Tổng biến dạng được biểu diễn như sau:

$$\epsilon_t = \epsilon_t^{ck} + \epsilon_{ot}^{el} = \epsilon_t^{pl} + \epsilon_t^{el} \quad (3)$$

Tham số phá hủy của bê tông chịu kéo của bê tông trong mô hình được tính toán từ kết quả thí nghiệm và công thức sau:

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} \left( \frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_t E_c^{-1}} = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{cm}} \quad (4)$$

Trong đó:  $d_t$ : tham số phá hủy của bê tông chịu kéo;  $\sigma_t$ : Ứng suất kéo (MPa);  $\epsilon_c^{pl}$ : Biến dạng của bê tông tương ứng với ứng suất kéo;  $b_t$ : hằng số  $0 < b_t < 1$

Tham số này được xác định từ kết quả thí nghiệm, phục vụ cho trình mô phỏng trên phần tử hữu hạn.

### 3.1. Thông số mô phỏng trên phần mềm FEA

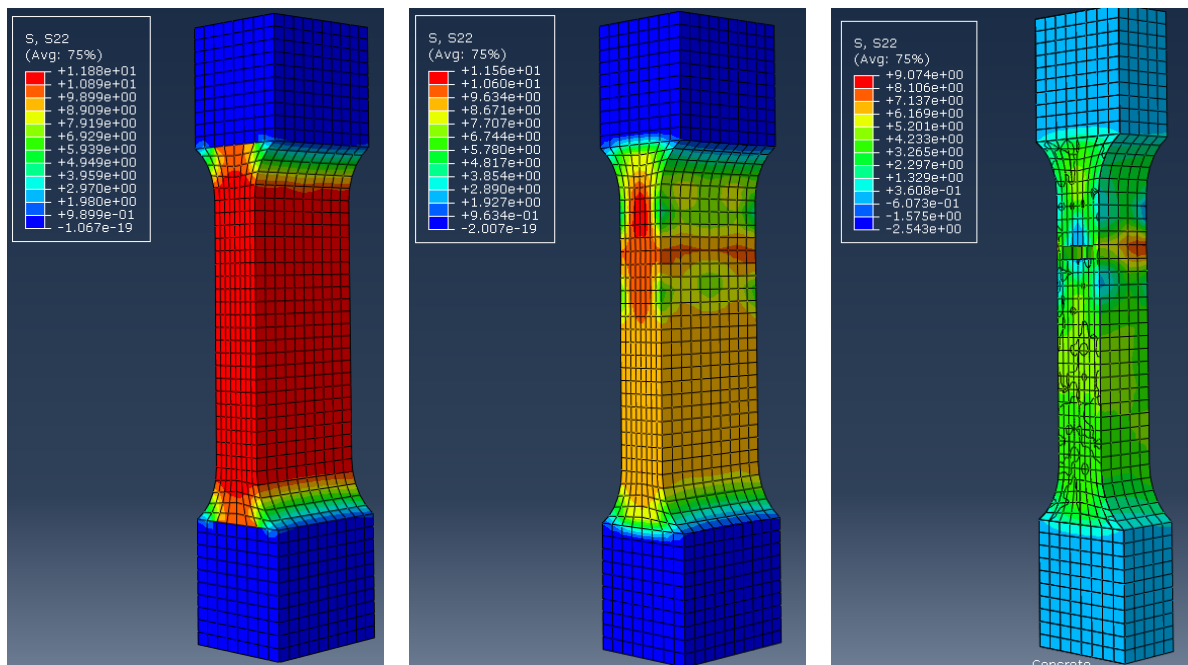
### 3.3. So sánh kết quả mô phỏng với kết quả thí nghiệm

Mô hình phi tuyến vật liệu và kết cấu mẫu thí nghiệm kéo UHPC được xây dựng bằng phần mềm ABAQUS. Trong nghiên cứu này, việc mô phỏng ứng xử cơ học vật liệu UHPC sẽ mô hình “concrete damage plasticity model”. Trong khi đó thí nghiệm kéo của vật liệu UHPC được xác định thông qua thí nghiệm kéo trực tiếp (Hình 4). Ngoài ra, trong mô hình có sử dụng một số tham số khác tương tự như bê tông [12] được liệt kê trong Bảng 2.

Bảng 2: Các tham số trong mô hình phá hoại dẻo của bê tông (CDPM).

	$\Psi(^{\circ})$	$\epsilon$	$\sigma_{bo}/\sigma_{co}$	K	Tham số nhớt (viscosity parameter)
Bê tông UHPC	36	0.1	1.16	0.667	0

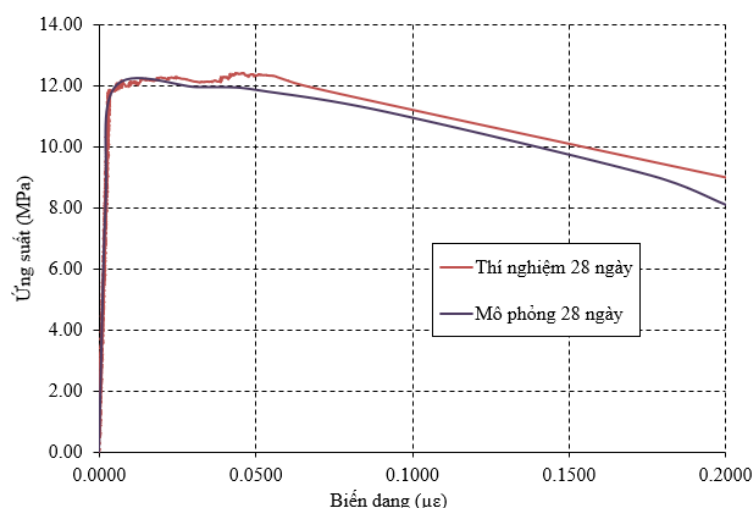
Mô hình phần tử hữu hạn (FEM) cho mẫu thí nghiệm UHPC được thực hiện với kích thước hình học phù hợp với kích thước mẫu thực nghiệm. Phần tử được sử dụng là phần tử dạng hình hộp gồm có 8 nút C3D8R (Cube Three Dimensional eight-node Reduced intergration) Việc chia lưới phần tử ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả đồng thời phụ thuộc vào cấu hình phần cứng máy tính và thời gian phân tích.



Hình 6. Kết quả mô phỏng mẫu thí nghiệm kéo : a) mẫu kéo đạt tới trường hợp giới hạn; b) mẫu kéo xuất hiện vết nứt ; c) vết nứt phát triển (hình ảnh ½ mẫu).

Kết quả mô hình số phân tích biến dạng đàn hồi được trình bày ở Hình 6c, tương ứng với giá trị biến dạng đàn hồi lớn nhất là 0,0031. Trong quá trình gia tải, biến dạng kéo dọc trục cũng như ứng suất kéo sẽ tăng dần. Khi các giá trị này vượt quá giá trị giới hạn cho phép, vết nứt sẽ bắt đầu xuất hiện khi đó cốt thép phân tán trong bê tông UHPC sẽ được kích hoạt và tham gia vào quá trình chịu kéo của mẫu.





Hình 7. So sánh kết quả mô phỏng với kết quả thực nghiệm.

Kết quả phá hoại mẫu theo mô hình số và thực nghiệm được thể hiện trong Hình 7. Vết nứt xuất hiện do ứng suất kéo phát triển ngang theo chiều dài mẫu (vuông góc với 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 kéo. Điều này khẳng định rằng sử dụng mô hình CPD là phù hợp để mô hình số cho vật liệu UHPC.

#### 4. Kết luận và kiến nghị

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô hình số ứng xử kéo của mẫu bê tông siêu tính năng (UHPC). Bê tông UHPC sử dụng trong nghiên cứu có thành phần cốt liệu sử dụng có cường độ chịu nén trung bình 120 MPa. Sử dụng mô hình bê tông phá hoại dẻo (CDPM) để mô hình hoá vật liệu UHPC cho thấy kết quả giữa mô hình và thực nghiệm là phù hợp. 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 loại bê tông siêu tính năng này, từ đó làm cơ sở để phân tích ứng xử của kết cấu sử dụng vật liệu này.

Nghiên cứu tiếp theo tập trung phân tích ứng xử thực nghiệm và mô hình chịu nén, uốn kết cấu có sử dụng vật liệu UHPC.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. R.G. El-Helou, Z.B. Haber, B.A. Graybeal, Mechanical Behavior and Design Properties of Ultra-High- Performance Concrete, ACI Materials Journal, 119 (2022). <https://doi.org/10.14359/51734194>
- [2]. Lê Bá Danh, Ngô Quý Tuấn, Phạm Duy Hòa, Khúc Đăng Tùng, 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. Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN, 16 (2022) 11-23. [https://doi.org/10.31814/stce.huice\(nuce\)2022-16\(5V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huice(nuce)2022-16(5V)-01)
- [3]. Lê Hoàng An, Thí nghiệm kéo trực tiếp xác định quan hệ giữa ứng suất kéo và độ mở rộng vết nứt của bê tông siêu tính năng cao, Journal of Transportation Science and Technology, (2013). [https://www.doi.org/10.55228/JTST.12\(1\).63-71](https://www.doi.org/10.55228/JTST.12(1).63-71)
- [4]. S.H. Park et al., Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete, Cement and Concrete Composites, 34 (2012) 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009>



- [5]. Z. Zhou, et al., On the modeling of tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with freezing-thawing actions, *Composites Part B: Engineering*, 174 (2019) 106983. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106983>
- [6]. V. Savino et al., An extended model to predict the compressive, tensile and flexural strengths of HPFRCs and UHPFRCs: Definition and experimental validation, *Composites Part B: Engineering*, 163 (2019) 681-689. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.113>
- [7]. B.A. Graybeal, Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. FHWA-HRT-06-103, (2006) 1-176.
- [8]. TCCS 02:2017/IBST, Bê tông tính năng siêu cao UHPC- hướng dẫn thiết kế kết cấu, 2017.
- [9]. J. Lee, G.L. Fenves, Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 124 (1998) 892-900. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- [10]. J. Lubliner et al., A plastic-damage model for concrete, *International Journal of Solids and Structures*, 25 (1989) 299-326. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- [11]. T. C. Le et al., A nonlinear concrete damaged plasticity model for simulation reinforced concrete structures using ABAQUS, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 59 (2022) 232-242. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.59.17>
- [12]. M.A. Al-Osta et al., Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 134 (2017) 279-296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094>