

Phân tích khả năng chịu cắt của dầm bê tông siêu tính năng UHPC theo mô phỏng và các tiêu chuẩn hiện hành

Vũ Quốc Anh^{1*}, Mai Viết Chinh²

¹ Bộ môn Kết cấu thép gỗ, Khoa Xây dựng, Trường Đại Học Kiến Trúc Hà Nội

² Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Học Viện Kỹ Thuật Quân Sự

TỪ KHOA

Bê tông siêu tính năng (UHPC)

Bê tông thường

Khả năng chịu cắt

Tiêu chuẩn thiết kế

Mô phỏng số

Mô hình vật liệu CDP

TÓM TẮT

Bê tông siêu tính năng (UHPC) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong xây dựng nhờ những ưu điểm vượt trội. Tuy nhiên, việc xác định chính xác khả năng chịu cắt của dầm UHPC vẫn còn gặp nhiều thách thức do tính chất cơ học phức tạp của vật liệu. Nghiên cứu này đánh giá khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép siêu tính năng (R-UHPC) thông qua các phương pháp tính toán khác nhau, bao gồm đề xuất từ tiêu chuẩn hiện hành và mô phỏng số. Dữ liệu từ các nghiên cứu thực nghiệm với biến thiên về tỷ lệ cốt thép dọc, hàm lượng sợi thép, cốt đai được sử dụng để kiểm chứng độ chính xác của các phương pháp tính. Kết quả cho thấy phương pháp tính từ các tiêu chuẩn hiện hành có xu hướng đánh giá thấp khả năng chịu cắt của dầm, từ 12-37% so với thực nghiệm, trong khi mô phỏng số dự báo chính xác hơn với sai số chỉ từ 8-19%. Các kết quả này góp phần hoàn thiện phương pháp tính toán khả năng chịu cắt của dầm UHPC, đồng thời hỗ trợ quá trình hiệu chỉnh các tiêu chuẩn thiết kế trong tương lai.

KEYWORDS

Ultra High Performance Concrete (UHPC)

Conventional concrete

Shear capacity

Design standard

Numerical simulation

CDP Model

ABSTRACT

Ultra High Performance Concrete has been increasingly applied in construction due to its outstanding properties. However, accurately evaluating the shear capacity of UHPC beams, remains a significant challenge. This study focuses on assessing the shear capacity of reinforced UHPC beams using various approaches, including existing design code provisions and numerical simulations. Test data incorporating variations in reinforcement ratio, steel fiber content, and stirrup ratio are employed to verify the accuracy of these methods. The results indicate that current design standards tend to underestimate the shear capacity by approximately 12-37% compared to experimental values, whereas numerical simulations offer more accurate predictions with errors ranging from only 8-19%. These findings contribute to refining shear design methodologies for UHPC beams and provide valuable insights for the future calibration of structural design codes.

1. Giới thiệu

Bê tông là một trong những vật liệu được sử dụng rộng rãi trong xây dựng do cường độ chịu nén cao, hiệu quả về chi phí và dễ tiếp cận [1, 2]. Tuy nhiên, vật liệu bê tông truyền thống có những điểm yếu cố hữu, chẳng hạn như cường độ chịu kéo thấp và hành vi phá hoại giòn, từ đó hạn chế khả năng chịu lực của kết cấu trong các trường hợp chịu tải trọng đặc biệt như động đất, va đập và tải nổ. Để khắc phục những nhược điểm này, bê tông siêu tính năng (Ultra High Performance Concrete - UHPC) đã được nghiên cứu và phát triển. UHPC thể hiện các tính chất cơ học vượt trội, bao gồm cường độ nén cao (≥ 120 MPa), cường độ kéo (> 8 MPa), độ bền và khả năng tiêu tán năng lượng cao [3-6]. UHPC đạt được các tính chất này thông qua sự kết hợp của tỷ lệ nước trên chất kết dính thấp, ma trận vật liệu được tối ưu hóa, sợi thép cường độ cao và phụ gia hóa học tiên tiến, khiến nó trở thành một giải pháp đầy hứa hẹn cho cơ sở hạ tầng hiện đại [7-9]. Trong đó, khả năng

chịu cắt của dầm UHPC đóng vai trò quan trọng, thường gặp trong hệ dầm chuyển lực, móng cọc, tường cắt, và các kết cấu nhà công nghiệp. Tuy nhiên, do sự khác biệt về hành vi cơ học giữa UHPC và bê tông thường, các phương pháp tính toán khả năng chịu cắt theo tiêu chuẩn hiện hành vẫn còn nhiều tranh cãi.

Nghiên cứu thực nghiệm của Bermudez và đồng nghiệp đã [10] đánh giá khả năng sử dụng Bê tông UHPC với các loại sợi khác nhau (sợi thép, sợi PVA) để giảm hàm lượng cốt thép chịu cắt trong dầm, thông qua một loạt các thử nghiệm dưới sơ đồ chịu tải bốn điểm. Kết quả cho thấy sự hiện diện của các loại sợi khác nhau làm tăng cường độ chịu cắt lớn nhất và khả năng kiểm soát chiều rộng vết nứt của so với các dầm chỉ sử dụng một loại sợi duy nhất. Thông qua việc phân tích thống kê các dữ liệu thử nghiệm cắt cho dầm UHPC, Kodsý [11] chứng minh rằng ứng suất trước và cường độ kéo là các thông số quan trọng nhất ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của dầm UHPC, trong khi tỷ lệ cốt thép dọc và cường độ kéo là các thông số quan

*Liên hệ tác giả: anhvq@hau.edu.vn

Nhận ngày 19/03/2025, sửa xong ngày 23/04/2025, chấp nhận đăng ngày 25/04/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2025.941>

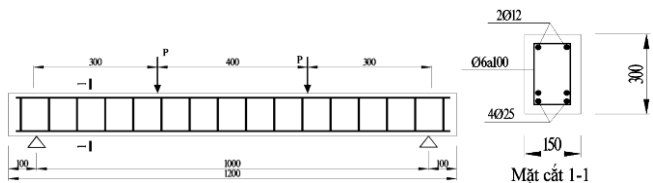
trọng nhất ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của dầm UHPC không ứng suất trước. Thông qua thí nghiệm của 17 dầm bê tông cốt thép UHPC dưới sơ đồ uốn bốn điểm, Cai và đồng nghiệp [12] đã khám phá cơ chế phá hủy uốn và cắt, qua đó đánh giá khả năng chịu lực của dầm bê tông cốt thép UHPC. Những phát hiện này đã bổ sung những hướng dẫn quan trọng cho thiết kế kết cấu dầm UHPC trong các điều kiện tải khác nhau. Trong một nghiên cứu khác, Hou và cộng sự [13] đã xây dựng mô hình dự báo khả năng chịu cắt của dầm UHPC bằng trí tuệ nhân tạo (ANN kết hợp thuật toán di truyền GA). Đồng thời, nhóm tác giả đã tiến hành thử nghiệm trên 6 dầm UHPC và thu thập dữ liệu từ 102 thí nghiệm trước đó. Nhóm tác giả tiến hành huấn luyện 1200 mô hình ANN và tối ưu hóa bằng GA để cải thiện độ chính xác. Kết quả đạt được mô hình tối ưu có $R^2 = 0,98667$, dự đoán khả năng chịu cắt tốt hơn so với các công thức thực nghiệm.

Dựa trên phần tổng quan về các công trình liên quan, có thể thấy rằng số lượng nghiên cứu về khả năng chịu cắt của dầm UHPC, nhất là trong lĩnh vực mô phỏng còn khá hạn chế. Nghiên cứu này tập trung đánh giá khả năng chịu cắt của dầm UHPC thông qua phương pháp mô phỏng. Ngoài ra, kết quả được so sánh với phương pháp tính toán từ các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Những kết quả đạt được của nghiên cứu góp phần đóng góp vào sự tiến bộ của thiết kế kết cấu UHPC, đặc biệt là trong các ứng dụng mà ứng xử cắt chi phối trạng thái phá hủy. Các kết quả cũng có thể hỗ trợ việc phát triển các hướng dẫn thiết kế được cập nhật cho dầm UHPC theo các tiêu chuẩn thiết kế.

2. Khả năng chịu cắt của dầm UHPC theo mô phương pháp mô phỏng số

2.1. Thông số hình học

Trong nghiên cứu này, mô hình mô phỏng số của dầm UHPC được xây dựng dựa trên thông số hình học và vật liệu của dầm L12 từ nghiên cứu thực nghiệm của Chen và đồng nghiệp [14] (2023). Việc lựa chọn dầm L12 làm đối tượng mô phỏng giúp so sánh trực tiếp kết quả phân tích với dữ liệu thực nghiệm, từ đó đánh giá độ chính xác và khả năng dự báo của mô hình số. Kết quả mô phỏng sẽ được đối chiếu với các giá trị thực nghiệm về tải nứt, tải phá hủy, mô hình nứt, qua đó xác minh độ tin cậy của mô hình mô phỏng số đề xuất.



Hình 1. Chi tiết dầm UHPC dùng trong mô phỏng số.

Dầm UHPC có chiều dài tổng thể 1200 mm, nhịp thực nghiệm (L) 1000 mm, chiều cao tiết diện (h) 300 mm, bề rộng (b) 150 mm, và chiều cao hiệu dụng 250 mm. Tỷ lệ $a/d = 1,2$, được xác định với $a = 300$ mm. Trong đó a là chiều dài đoạn ngàm cắt (shear span length),

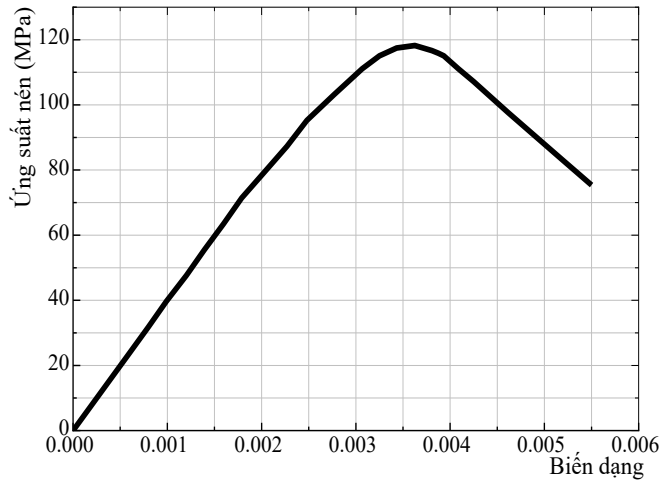
tức là khoảng cách từ gối tựa đến điểm đặt tải gần nhất. d là chiều cao hiệu dụng của dầm (effective depth), tức là khoảng cách từ mép trên của dầm đến trọng tâm của cốt thép chịu kéo (cốt thép dọc phía dưới). Dầm L12 được gia cố bằng cốt thép HRB500 đường kính 25 mm ở phía dưới với tỷ lệ cốt thép dọc 5,23 %, trong khi phía trên sử dụng cốt thép HRB400 đường kính 12 mm. Hệ thống cốt đai được bố trí với đường kính 6 mm, khoảng cách 200 mm, tương ứng với tỷ lệ cốt đai 0,19 %. Bê tông UHPC với hàm lượng sợi thép thẳng (V_f) là 1 %, chiều dài 13 mm, đường kính 0,2 mm, cường độ kéo 2200–2350 MPa, và mô đun đàn hồi 200 GPa. UHPC có cường độ nén (f_{cu}) bằng 118,0 MPa, cường độ kéo trục (f_t) là 6,4 MPa. Cốt thép HRB500 sử dụng có cường độ chảy dẻo (f_y) và cường độ kéo đứt f_u lần lượt là 526,3 MPa và 679,6 MPa. Chi tiết mặt cắt dầm L12 sử dụng trong mô phỏng được minh họa trên Hình 1.

2.2. Mô hình vật liệu

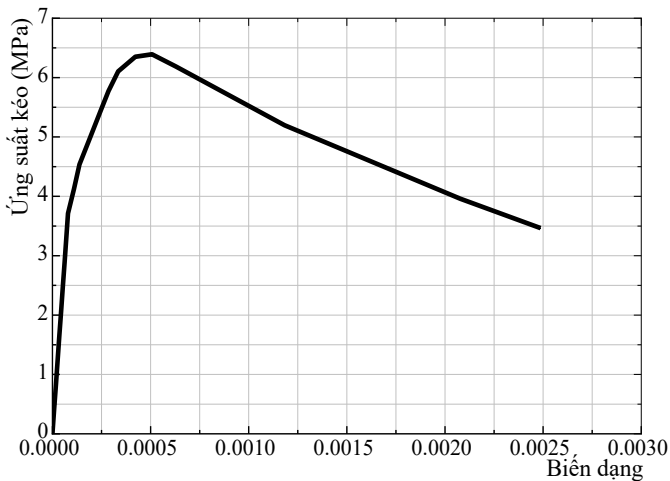
Concrete Damage Plasticity (CDP) là một mô hình vật liệu được tích hợp trong phần mềm ABAQUS [15], dựa trên lý thuyết biến dạng dẻo kết hợp với cơ chế suy giảm độ cứng do hư hỏng vật liệu, cho phép mô phỏng cả quá trình chảy dẻo và suy giảm cường độ của bê tông trong các điều kiện chịu nén và kéo [16]. Mô hình CDP được xác định thông qua hai cơ chế hư hỏng chính: hư hỏng do nén, phản ánh sự suy giảm cường độ của bê tông khi đạt đến giới hạn chịu nén, dẫn đến sự mềm hóa của vật liệu. Hư hỏng do kéo mô tả sự suy yếu của bê tông sau khi xuất hiện vết nứt, đặc trưng bởi sự giảm độ cứng và hiệu ứng kéo sau nứt. Mô hình CDP được lựa chọn vì nó có thể mô phỏng chính xác hành vi giòn của bê tông UHPC khi chịu kéo và tính dẻo khi chịu nén, giúp phản ánh chính xác sự phát triển của vết nứt và vùng hư hỏng trong dầm UHPC, bao gồm hư hỏng do cắt. Trong ABAQUS, mô hình CDP được thể hiện thông qua các tham số: tỷ lệ biến dạng dẻo của bê tông trong trạng thái kéo và nén (s_{bo}/s_{co}), được xác định từ kết quả thực nghiệm; Hình dạng của bề mặt phá hoại được đặc trưng bởi tham số k_c ; Tham số độ lệch tâm e ; Góc giãn nở của bê tông f ; Hệ số nhớt để đảm bảo hội tụ trong phân tích phi tuyến; Đường cong quan hệ ứng suất biến dạng khi kéo và nén. Bảng 1 minh họa các thông số của mô hình CDP dùng trong mô phỏng vật liệu bê tông. Hình 2 cho thấy đường cong ứng suất-biến dạng của bê tông UHPC. Bê tông UHPC thể hiện cường độ nén/kéo lần lượt là 118 MPa/6,4 MPa, với mô đun đàn hồi là 44000 MPa.

Bảng 1. Các tham số của mô hình CDP cho UHPC dùng trong mô phỏng.

Tham số	Giá trị [17-20]
s_{bo}/s_{co}	1.07
k_c	2/3
f	36°
e	0,1
Viscosity	0,005



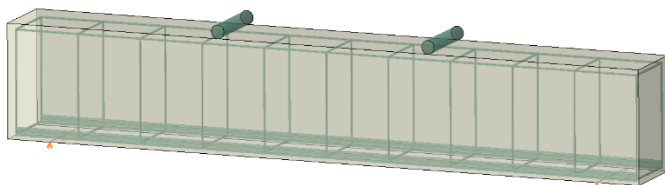
(a) khi nén



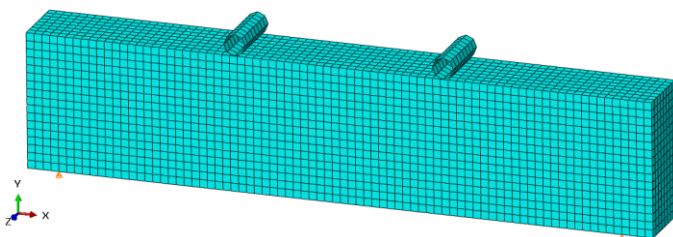
(b) khi kéo

Hình 2. Đường cong ứng suất biến dạng của UHPC.

2.2. Điều kiện biên, tải trọng và liên kết trong mô hình số



Hình 3. Mô hình mô phỏng số 3D.



Hình 4. Mô hình chia lưới phần tử.

Phần mềm ABAQUS cung cấp nhiều tùy chọn khác nhau để xác định tương tác giữa các phần tử. Trong nghiên cứu này, tương tác Tie được sử dụng để mô hình hóa tiếp xúc giữa các loại vật liệu khác nhau. Tương tác Tie có chức năng ngăn chặn chuyển vị tuyến tính và quay, đồng thời đảm bảo các bậc tự do khác giữa các bề mặt tiếp xúc là giống nhau. Một bề mặt được chỉ định là bề mặt chính, trong khi bề mặt còn lại là bề mặt phụ. Liên kết Tie được áp dụng tại vị trí tiếp xúc giữa gối và dầm. Ngoài ra, kỹ thuật Embedded được sử dụng để nhúng các phần tử phụ vào nhóm phần tử chủ, cụ thể là để mô phỏng liên kết giữa cốt thép và bê tông. Trong mô phỏng số, phần tử T3D2 (3D Truss, 2-node) thường được sử dụng để mô phỏng cốt thép dọc trong dầm bê tông cốt thép. Đây là phần tử đàn hai nút trong không gian ba chiều, chỉ có khả năng chịu lực kéo và nén dọc trục, nhưng không thể chịu uốn hoặc cắt. Trong khi đó, phần tử C3D8R là phần tử khối (solid) bậc thấp có 8 nút, sử dụng tích phân giảm (Reduced Integration) nhằm tối ưu hóa thời gian tính toán và khắc phục vấn đề khóa biến dạng. Các phần tử T3D2 và C3D8R đã chứng minh được hiệu quả trong việc mô phỏng các kết cấu bê tông cốt thép [21, 22]. Điều kiện biên trong mô phỏng được thiết lập để phản ánh chính xác sơ đồ thí nghiệm thực tế. Dầm được đặt trên hai gối tựa cứng, trong đó các gối tựa ràng buộc chuyển vị theo phương thẳng đứng ($U_y = 0$). Tải trọng được áp dụng tại hai điểm tải cách nhau một khoảng xác định. Phương thức gia tải có thể được thực hiện dưới dạng dịch chuyển cưỡng bức hoặc tải trọng phân bố, tương ứng với cơ chế bàn nén trong thí nghiệm thực tế. Hình 3 minh họa mô hình 3D của mô phỏng số. Việc lựa chọn kích thước lưới phần tử được xác định dựa trên sự cân bằng giữa độ chính xác và thời gian tính toán. Kích thước mắt lưới có ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác của kết quả mô phỏng. Trong nghiên cứu này, mô hình số được chia lưới với kích thước phần tử nhất quán 12 mm, như thể hiện trong Hình 4.

3. Khả năng chịu cắt của dầm UHPC theo một số tiêu chuẩn thiết kế hiện hành

3.1. Tiêu chuẩn thiết kế của Pháp (NF P18-710) [23]

Khả năng chịu cắt, V_{Rd} , của dầm UHPC có cốt thép theo tiêu chuẩn Pháp NF P18-710 được xác định theo công thức sau:

$$V_{Rd} = V_c + V_{fb} + V_s \quad (1)$$

Trong đó, V_c là đóng góp của bê tông vào khả năng chịu cắt của dầm, được xác định theo các phương trình (2)-(4):

$$V_c = \min(V_{Rd,c}; V_{Rd,max}) \quad (2)$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0,21}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot f_c^{1/2} \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0,21}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot f_c^{1/2} \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

Trong đó, γ_{cf} và γ_E là các hệ số an toàn, thường được lấy bằng 1; k là hệ số hiệu ứng ứng suất trước, lấy bằng 1 đối với dầm không có ứng suất trước; f_c là cường độ chịu nén của UHPC; b_w là bề rộng nhỏ nhất của tiết diện ở vùng chịu kéo; d là khoảng cách từ mép

ngoài cùng chịu nén đến tâm cốt thép chịu lực. α_{cc} là hệ số hiệu chỉnh ảnh hưởng lâu dài đến cường độ chịu nén và phương pháp tải trọng bất lợi, được lấy bằng 0,85 đối với UHPC; γ_c là hệ số an toàn đối với bê tông chịu nén, thường lấy bằng 1,3 đối với UHPC. θ là góc giữa ứng suất nén chính và trục dầm, được xác định theo công thức:

$$\theta = 0.5 \tan g^{-1} [2\tau/(\sigma_x - \sigma_y)] - \theta_0 \quad (5)$$

Trong đó, τ là ứng suất cắt trung bình tính theo lực cắt thiết kế; σ_x và σ_y lần lượt là ứng suất nén trung bình theo phương dọc và phương vuông góc với trục dầm; θ_0 là góc hiệu chỉnh, thường lấy 5°. Giá trị tối thiểu của θ được khuyến nghị là 30°.

Đóng góp của sợi thép vào khả năng chịu cắt của dầm, V_{fb} , được xác định theo phương trình:

$$V_{fb} = \frac{A_{fv} \cdot \sigma_f}{\tan g(\theta)} \quad (6)$$

Trong đó, A_{fv} là diện tích hiệu quả của sợi thép trong dầm và σ_f là cường độ chịu kéo của UHPC. Đóng góp của cốt đai vào khả năng chịu cắt của dầm, V_s , được xác định như sau:

$$V_s = \frac{A_{sv}}{s} \cdot z \cdot f_{yv} \cdot \cot g(\theta) \quad (7)$$

Trong đó, A_{sv} là diện tích của cốt đai, s là khoảng cách cốt đai, z là cánh tay đòn, có thể được tính bằng giá trị 0,9d, và f_{yv} là cường độ chảy của cốt đai.

Như vậy, phương pháp xác định khả năng chịu cắt của dầm UHPC theo tiêu chuẩn của Pháp có sự đóng góp của cốt đai và vật liệu UHPC, trong đó cả cường độ chịu nén và chịu kéo của UHPC đều được xem xét.

3.2. Tiêu chuẩn thiết kế của Nhật Bản, JSCE-2006 [23]

Khả năng chịu cắt V_{rd} theo tiêu chuẩn JSCE-2006 được tính như sau:

$$V_{rd} = V_{rpd} + V_{fd} + V_{ped} \quad (8)$$

Trong đó, V_{rpd} , V_{fd} , V_{ped} lần lượt là đóng góp của ma trận bê tông, sợi thép và cáp dự ứng lực hoặc cốt thép vào khả năng chịu cắt của dầm. Các đại lượng này được xác định theo công thức:

$$V_{rpd} = \frac{0.18 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d}{\gamma_b} \quad (9)$$

$$V_{fd} = \frac{f_{vd}}{\tan g(\beta_u)} \cdot \frac{b_w \cdot z}{\gamma_b} \quad (10)$$

$$V_{ped} = P_{ed} \cdot \frac{\sin(\alpha_p)}{\gamma_b} \quad (11)$$

Trong đó, γ_b là hệ số an toàn thiết kế, thường lấy 1,3; β_u là góc giữa trục dầm và vết nứt xiên, thường lớn hơn 30°; P_{ed} là diện tích hiệu quả của cáp dự ứng lực/cốt thép; α_p là góc giữa cáp dự ứng lực/cốt thép và trục dầm.

Khả năng chịu cắt của vùng chịu nén xiên, V_{wcd} , được xác định theo phương trình:

$$V_{wcd} = \frac{0.84 \cdot f_{cd}^{2/3} \cdot \sin(2\beta_u) \cdot b_w \cdot d}{\gamma_b} \quad (12)$$

Trong tính toán khả năng chịu cắt của tiêu chuẩn JSCE-2006 không xét đến đóng góp của cốt đai.

3.3. Tiêu chuẩn thiết kế của Thụy Sĩ SIA 2052-2016 [24]

Khả năng chịu cắt V_{rd} theo tiêu chuẩn SIA 2052-2016 được xác định như sau:

$$V_{rd} = V_{rd,U} + V_{rd,s} \quad (13)$$

Trong đó, $V_{rd,U}$ và $V_{rd,s}$ lần lượt là khả năng chịu kéo của bê tông UHPC và cốt đai. Các đại lượng này được tính như sau:

$$V_{rd,U} = \frac{b_w \cdot z \cdot 0.5(f_{uted} + f_{utud})}{\tan g(\alpha)} \quad (14)$$

$$V_{rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{sd} [\cot g(\alpha) + \cot g(\beta)] \cdot \sin(\beta) \quad (15)$$

Trong đó, f_{uted} và f_{utud} lần lượt là cường độ kéo đàn hồi và kéo lớn nhất của UHPC; α là góc nghiêng của trường ứng suất nén; β là góc nghiêng của cốt đai; f_{sd} là cường độ chảy của cốt thép. Thông thường $\alpha_{min} \leq \alpha \leq 45^\circ$. Giá trị α được khuyến nghị là 30°.

3.4. Tiêu chuẩn thiết kế của Hàn Quốc, KCI [25]

Khả năng chịu cắt V_{rd} theo tiêu chuẩn KCI-2012 được xác định như sau:

$$V_{rd} = V_{cd} + V_{fd} + V_{sd} + V_{ped} \quad (16)$$

Trong đó V_{cd} , V_{fd} , V_{sd} và V_{ped} lần lượt là đóng góp về khả năng chịu cắt của ma trận UHPC, sợi thép, cốt thép ngang và ứng suất trước vào khả năng chịu cắt của dầm. Các giá trị này có thể được tính toán bằng cách sử dụng các phương trình:

$$V_{cd} = \phi(0.18\sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d) \quad (17)$$

$$V_{fd} = \phi(f_{fd} / \tan g \theta) \cdot b_w \cdot z \quad (18)$$

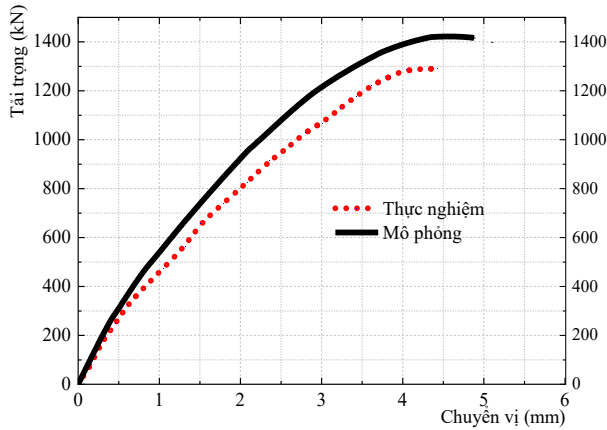
$$V_{sd} = \phi \frac{A_{sv} \cdot f_{yvd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)}{s} \cdot z \quad (19)$$

$$V_{ped} = \phi \cdot P_{ed} \cdot \sin \alpha_p \quad (20)$$

Trong đó ϕ là hệ số cắt của thành phần. Giá trị này là 0,8 khi tính cho khả năng chịu cắt của UHPC. $\phi = 0,9$ khi tính toán cho khả năng chịu cắt của cốt thép đai; α_s là góc giữa cốt thép ngang và trục thành phần vuông góc với lực cắt. Phương pháp tính toán trong KCI-2019 tương tự như trong JSCE-2006, nhưng nó xem xét ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đai.

4. Kết quả và thảo luận

Trước khi tiến hành nghiên cứu tham số mở rộng, mô hình số cần được xác minh độ tin cậy bằng cách so sánh với các kết quả thí nghiệm. Quá trình này nhằm đảm bảo rằng mô hình có thể phản ánh chính xác ứng xử thực tế của kết cấu, đặc biệt là về quan hệ tải trọng – chuyển vị, cơ chế nứt và khả năng chịu lực. Việc hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình dựa trên dữ liệu thực nghiệm giúp nâng cao độ chính xác của các dự đoán trong phân tích tham số mở rộng. Mẫu dầm thực nghiệm của Chen và đồng nghiệp [14] đã được lựa chọn cho mục tiêu này. Chi tiết về cấu tạo của dầm thí nghiệm được trình bày trong mục 2.1.



Hình 5. So sánh đường cong tải trọng – chuyển vị thu được từ mô phỏng và thực nghiệm của Chen [14].

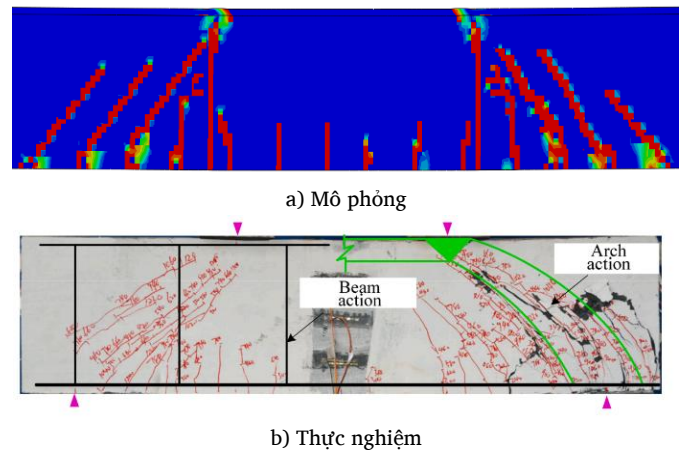
Bảng 2. So sánh khả năng chịu lực cắt theo mô phỏng và thực nghiệm.

Trường hợp nghiên cứu	Tải trọng gây nứt V_{cr} (kN)	Tải trọng lớn nhất V_{max} (kN)
Thực nghiệm của Chen (1)	180,0	1290
Mô phỏng số (2)	207,5	1443,8
Chênh lệch (2)/(1)	1,15	1,12

Hình 5 mô tả đường cong tải trọng – chuyển vị thu được từ thí nghiệm của Chen và mô phỏng số, trong đó cả hai kết quả đều thể hiện ba giai đoạn chịu tải gồm: giai đoạn đàn hồi, giai đoạn phát triển vết nứt và giai đoạn phá hủy. Giai đoạn đầu tiên có quan hệ tuyến tính giữa tải trọng và chuyển vị, khi dầm vẫn còn nguyên vẹn và chưa xuất hiện vết nứt đáng kể. Sau đó, khi tải trọng đạt đến giá trị tải trọng gây nứt V_{cr} , đường cong bắt đầu giảm độ dốc do xuất hiện và mở rộng của vết nứt trong vùng kéo, làm giảm độ cứng của dầm. Cuối cùng, khi tải trọng đạt giá trị V_{max} , cốt thép dọc chảy dẻo và dầm bước vào giai đoạn phá hủy. Quan sát đường cong cho thấy, mô phỏng số có xu hướng dự đoán tải trọng cao hơn thực nghiệm, đặc biệt là trong giai đoạn chịu tải lớn. Như thể hiện trên Bảng 2, tải trọng gây nứt từ mô phỏng đạt 207,5 kN, cao hơn 15 % so với thực nghiệm (180 kN), trong khi tải trọng lớn nhất của mô phỏng (1443,8 kN) cao hơn 12 % so với thực nghiệm (1290 kN). Nguyên nhân của sự sai lệch này có thể xuất phát từ sự khác biệt trong mô hình hóa vật liệu và điều kiện làm việc của cấu kiện trong mô phỏng số, vốn xem là lý tưởng hơn điều kiện làm việc thực tế. Mặc dù kết quả mô phỏng dự đoán tải trọng lớn hơn thực nghiệm, nhưng xu hướng đường cong giữa hai phương pháp vẫn tương đồng, cho thấy mô phỏng số có thể phản ánh tốt cơ chế làm việc của dầm. Ngoài ra, giá trị chênh lệch lớn nhất giữa mô phỏng và thực nghiệm tại điểm lớn nhất của đường cong P-U là 12 % là mức sai số có thể chấp nhận được.

Kết quả so sánh giữa mô phỏng số và thực nghiệm cho thấy sự tương đồng đáng kể trong quá trình hình thành và phát triển vết nứt

của dầm UHPC chịu cắt, như minh họa trên Hình 6. Cả hai phương pháp đều thể hiện rõ hai cơ chế chịu lực chính. Cơ chế chịu uốn đặc trưng bởi sự xuất hiện các vết nứt thẳng đứng trong vùng giữa nhịp và cơ chế chịu cắt đặc trưng bởi sự phát triển của các vết nứt xiên trong vùng chịu cắt gần gối tựa. Ở giai đoạn đầu, khi tải trọng đạt khoảng 10-15 % tải trọng phá hủy (V_{max}), các vết nứt thẳng đứng nhỏ xuất hiện tại vùng chịu mô men lớn nhất ở giữa nhịp dầm, phù hợp với xu hướng trong thực nghiệm. Khi tải trọng tăng đến khoảng 30 % V_{max} , các vết nứt xiên bắt đầu hình thành, lan rộng dần từ mặt dưới dầm lên trên và tập trung chủ yếu gần gối tựa, phản ánh sự chuyển đổi từ cơ chế chịu uốn sang cơ chế chịu cắt. Trong giai đoạn tiến đến phá hủy, khi tải trọng đạt khoảng 60 % V_{max} , các vết nứt xiên mở rộng nhanh chóng. Ở giai đoạn phá hủy, các vết nứt nghiêng chính đạt kích thước lớn nhất, tạo thành vùng ép cục bộ, dẫn đến phá hủy dầm. Tuy nhiên, mô phỏng số có xu hướng dự đoán sự hình thành vết nứt nghiêng muộn hơn so với thực nghiệm. Nhìn chung, với các kết quả đã đạt được, thể hiện ở đường cong P-U và mô hình nứt, mô hình mô phỏng số đảm bảo độ tin cậy để thực hiện các tham số mở rộng.



Hình 6. So sánh mô hình nứt thu được từ mô phỏng và thực nghiệm của Chen [14].

Mô hình số sau khi được kiểm chứng được sử dụng để phân tích tham số mở rộng, nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố thiết kế đến khả năng chịu cắt của dầm. Kết quả từ mô phỏng số đồng thời được thảo luận và so sánh với các phương pháp phân tích khác nhau, bao gồm thực nghiệm và các tiêu chuẩn hiện hành. Bảng 3 trình bày các tham số đầu vào của các dầm được sử dụng trong phân tích mở rộng, dựa trên nghiên cứu thực nghiệm của Chen và cộng sự [14]. Các thông số bao gồm tỷ lệ sợi thép (V_f), tỷ lệ cốt đai (ρ_{sv}), tỷ lệ cốt thép dọc (ρ_s), khoảng cách cốt đai (s) và cốt thép chịu lực. Trong đó, tỷ lệ sợi thép V_f thay đổi từ 0 % đến 3 %, trong khi tỷ lệ cốt đai ρ_{sv} dao động từ 0 % đến 0,38 %. Tỷ lệ cốt thép dọc ρ_s được lựa chọn trong khoảng 4,06 % đến 5,23 %, cốt thép chịu lực gồm các thanh có đường kính $\Phi 22$ và $\Phi 25$.

Bảng 3. Thông số đầu vào của các đầm dùi trong phân tích tham số mở rộng.

Cấu kiện	V_f (%)	ρ_{sv} (%)	ρ_s (%)	s (mm)	Cốt thép chịu lực
L11	0	0,19	5,23	200	4Φ25
L12	1	0,19	5,23	200	4Φ25
L13	2	0,19	5,23	200	4Φ25
L14	3	0,19	5,23	200	4Φ25
L21	1	0	5,23	-	4Φ25
L22	1	0,38	5,23	100	4Φ25
L23	1	0,25	5,23	150	4Φ25
L31	1	0,19	4,65	200	2Φ25 + 2Φ22
L32	1	0,19	4,06	200	4Φ22
L41	1	0,19	5,23	200	4Φ25
L42	1	0,19	5,23	200	4Φ25

Bảng 4 tổng hợp khả năng chịu cắt của đầm UHPC theo các phương pháp tính khác nhau, bao gồm thực nghiệm (V_m), các phương pháp tính toán từ tiêu chuẩn hiện hành (NF P18-710, JSCE-2006 V2, KCI-2019) và mô phỏng số (V_4). Kết quả cho thấy các phương pháp tiêu chuẩn có xu hướng đánh giá khả năng chịu cắt thấp hơn so với thực nghiệm, trong khi mô phỏng số dự đoán giá trị cao hơn. Cụ thể, giá trị

trung bình của tỷ lệ V_1/V_m theo tiêu chuẩn NF P18-710 là 0,72, trong khi tỷ lệ V_2/V_m theo tiêu chuẩn JSCE-2006 V2 là 0,75 và V_3/V_m theo tiêu chuẩn KCI-2019 là 0,72. Điều này cho thấy cả ba phương pháp tiêu chuẩn đều có xu hướng bảo thủ, với mức dự báo dao động từ 66 % đến 84 % so với thực nghiệm, trong đó tiêu chuẩn Nhật Bản (JSCE-2006 V2) có giá trị cao nhất (0,75) và tiêu chuẩn Pháp (NF P18-710) có độ lệch chuẩn lớn nhất (0,08), phản ánh mức độ biến động cao hơn trong các kết quả tính toán. Ngược lại, mô phỏng số (V_4) đưa ra giá trị trung bình $V_4/V_m = 1,11$, với các giá trị dao động lớn hơn từ 1,08 đến 1,19 lần so với thực nghiệm. Sự chênh lệch giữa các phương pháp có thể xuất phát từ cách tiếp cận tính toán trong từng tiêu chuẩn. Các tiêu chuẩn hiện hành thường sử dụng các hệ số an toàn cao, dẫn đến dự báo khả năng chịu cắt thấp hơn thực tế. Trong khi đó, mô phỏng số có xu hướng đánh giá cao hơn khả năng chịu lực của đầm, có thể do mô hình hóa liên kết hoàn hảo giữa cốt thép và mô phỏng vật liệu trong các điều kiện lý tưởng hơn thực tế. Mặc dù mô phỏng số cho giá trị cao hơn thực nghiệm, nhưng kết quả cho thấy mô phỏng số vẫn là phương pháp có độ chính xác cao nhất trong số các phương pháp được so sánh, với tỷ lệ V_4/V_m dao động gần với 1 hơn so với các tiêu chuẩn thiết kế. Điều này chứng minh rằng mô phỏng số có thể phản ánh tương đối chính xác cơ chế chịu cắt của đầm UHPC, đặc biệt khi mô hình số được xác thực thông qua các kết quả thực nghiệm. Mô hình số được hiệu chỉnh hoàn toàn có thể được ứng dụng rộng rãi trong thiết kế kết cấu đầm UHPC, giúp tối ưu hóa khả năng chịu lực của kết cấu đồng thời giảm bớt sự bảo thủ không cần thiết trong thiết kế theo các tiêu chuẩn hiện hành.

Bảng 4. Khả năng chịu cắt của đầm UHPC theo các phương pháp khác nhau.

Cấu kiện	V_m	NF P18-710		JSCE-2006 V2		KCI-2019		Mô phỏng	
		V_1 (kN)	V_1/V_m	V_2 (kN)	V_2/V_m	V_3 (kN)	V_3/V_m	V_4 (kN)	V_4/V_m
L11	445	309,9	0,70	291,2	0,65	316,4	0,71	409,4	0,92
L12	645	406,3	0,63	540,6	0,84	438,1	0,68	721,89	1,12
L13	720	491,2	0,68	593,9	0,82	482,2	0,67	847,47	1,18
L21	580	386,4	0,67	402,9	0,69	391,6	0,68	635,07	1,09
L22	670	445,3	0,66	461,1	0,69	469,7	0,70	774,47	1,16
L23	655	412,6	0,63	446,0	0,68	453,8	0,69	739,73	1,13
L31	560	401,3	0,72	399,8	0,71	387,5	0,69	602,44	1,08
L32	490	390,3	0,80	372,5	0,76	371,4	0,76	550,51	1,12
L41	525	431,4	0,82	427,9	0,81	406,6	0,77	625,28	1,19
L42	475	416,4	0,88	387,8	0,82	393,4	0,83	549,13	1,16
Trung bình	-	-	0,72	-	0,75	-	0,72	-	1,11
Độ lệch chuẩn	-	-	0,08	-	0,07	-	0,05	-	0,08
Phương sai	-	-	11,8	-	9,4	-	7,2	-	6,9

5. Kết luận

Nghiên cứu này đánh giá khả năng chịu cắt của đầm bê tông cốt thép siêu tính năng UHPC thông qua các phương pháp tính toán khác

nhau, bao gồm mô phỏng số và các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Mô hình mô phỏng số được thiết lập dựa trên dữ liệu thực nghiệm và được xác minh thông qua so sánh với các kết quả thử nghiệm. Từ những kết quả đạt được, có thể thấy các công thức tính toán trong

tiêu chuẩn thiết kế hiện hành có xu hướng đánh giá thấp khả năng chịu cắt của dầm UHPC, với mức sai số khoảng 12 – 37 % so với thực nghiệm. Trong khi đó, phương pháp mô phỏng số có độ chính xác cao hơn, với tỷ lệ dự báo khả năng chịu cắt so với thực nghiệm cao hơn từ 8 % đến 19 %. Mô phỏng số cho thấy tính hiệu quả của phương pháp này trong việc dự báo khả năng chịu cắt của dầm UHPC. Với mô hình số được xác thực, có thể ứng dụng rộng rãi phương pháp này vào thiết kế dầm UHPC, giúp tối ưu hóa khả năng chịu lực của kết cấu, đồng thời giảm bớt sự bảo thủ không cần thiết trong thiết kế theo các tiêu chuẩn hiện hành.

Tài liệu tham khảo

- [1]. R. Tomek, "Advantages of precast concrete in highway infrastructure construction," *Procedia engineering*, vol. 196, pp. 176-180, 2017.
- [2]. D. Mailyan, A. Kubasov, and L. Mailyan, "Ecological-Economic and Technical Advantages of Reinforced Concrete Girders with Combined Reinforcement," in *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 73: EDP Sciences, p. 04019.
- [3]. D.-Y. Yoo, N. Banthia, and Y.-S. Yoon, "Recent development of innovative steel fibers for ultra-high-performance concrete (UHPC): a critical review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 145, p. 105359, 2024.
- [4]. T. T. B. VIỆT, K. L. T. HÙNG, K. L. H. PHÚC, and K. T. B. TÚ, "Kỹ thuật sửa chữa, gia cố và bảo trì kết cấu bê tông cốt thép của công trình dân dụng và công nghiệp," *Tạp chí xây dựng*, 2022.
- [5]. N. T. Nguyễn, "Khả năng ứng xử uốn của bê tông tính năng siêu cao sử dụng nguyên vật liệu địa phương," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng*, vol. 14, no. 02, pp. 66-Trang 71, 2024.
- [6]. A. Lê Bá and H. H. Việt, "Dự báo khả năng chịu uốn kết cấu BTCT được tăng cường bê tông siêu tính năng (UHPC) sử dụng mô hình hồi quy ký tự," *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, vol. 75, no. 5, pp. 1870-1881, 2024.
- [7]. X. Zhang, Z. Wu, J. Xie, X. Hu, and C. Shi, "Trends toward lower-carbon ultra-high performance concrete (UHPC)—A review," *Construction and Building Materials*, vol. 420, p. 135602, 2024.
- [8]. T. B. Việt and B. X. Chiến, "Nghiên cứu khả năng chống ăn mòn biển của bê tông siêu tính năng UHPC, ứng dụng cho xây dựng công trình biển đảo," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng*, vol. 11, no. 05, pp. 21-Trang 30, 2021.
- [9]. G. Kravanja, A. R. Mumtaz, and S. Kravanja, "A comprehensive review of the advances, manufacturing, properties, innovations, environmental impact and applications of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)," *Buildings*, vol. 14, no. 2, p. 382, 2024.
- [10]. M. Bermudez and C.-C. Hung, "Shear behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete beams," in *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 2019, vol. 2, no. 1: Iowa State University Digital Press.
- [11]. A. Kodsý and G. Morcous, "Shear strength of ultra-high-performance concrete (UHPC) beams without transverse reinforcement: Prediction models and test data," *Materials*, vol. 15, no. 14, p. 4794, 2022.
- [12]. Z. Cai, X. Duan, L. Liu, Z. Lu, and J. Ye, "Reinforced ultra-high performance concrete beam under flexure and shear: Experiment and theoretical model," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e02647, 2024.
- [13]. R. Hou and Q. Hou, "Prediction of the shear capacity of ultrahigh-performance concrete beams using neural network and genetic algorithm," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 2145, 2023.
- [14]. B. Chen, J. Zhou, D. Zhang, K. Sennah, and C. Nuti, "Shear performances of reinforced ultra-high performance concrete short beams," *Engineering Structures*, vol. 277, p. 115407, 2023.
- [15]. D. Systèmes, "Abaqus/CAE User's Guide," 2016.
- [16]. J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, and E. Onate, "A plastic-damage model for concrete," *International Journal of solids*, vol. 25, no. 3, pp. 299-326, 1989.
- [17]. P. Kmieć and M. Kamiński, "Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration," *Archives of civil mechanical engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 623-636, 2011.
- [18]. G. Dresden, "Ultra high performance concrete under biaxial compression," in *International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany*, 2008, pp. 477-484.
- [19]. V. Dias da Silva, "A simple model for viscous regularization of elastoplastic constitutive laws with softening," *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 20, no. 7, pp. 547-568, 2004.
- [20]. S. Bahij, S. K. Adekunle, M. Al-Osta, S. Ahmad, S. U. Al-Dulaijan, and M. K. Rahman, "Numerical investigation of the shear behavior of reinforced ultra-high-performance concrete beams," *Structural Concrete*, vol. 19, no. 1, pp. 305-317, 2018.
- [21]. A. H. Alsabhan, M. R. Sadique, S. Ahmad, S. Alam, and A. S. Binyahya, "The effect of opening shapes on the stability of underground tunnels: A finite element analysis," *International Journal of GEOMATE*, vol. 21, no. 87, pp. 19-27, 2021.
- [22]. R. H. P. Akhmad, "Influence of seawater on strength of concrete beams strengthened with glass fiber reinforced polymer sheet," *International Journal of GEOMATE*, vol. 26, no. 117, pp. 35-42, 2024.
- [23]. *Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures*, Japan, 2006.
- [24]. *Swiss Society of Engineers and Architects (SIA). Recommendation: Ultra-high performance fibre-reinforced cement based composites (UHPFRC) construction material, dimensioning, and application*, Lausanne, Switzerland, 2016.
- [25]. *KCIM-12-003-Design Guidelines for Ultra High Performance Concrete*, Korea Concrete Institute (KCI), 2012.