

**NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG KHÁNG CẮT TẠI BỀ MẶT TIẾP XÚC
GIỮA BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG UHPC VÀ BÊ TÔNG THƯỜNG**
STUDY ON THE SHEAR RESISTANCE AT THE INTERFACE BETWEEN
ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC) AND NORMAL CONCRETE

VŨ NGỌC QUANG^a, MAI VIỆT CHINH^{a,*}, LÊ QUANG HUY^a, VŨ ĐỨC TOÀN TRUNG^b

^aViện Kỹ thuật CTĐB, Học viện Kỹ thuật Quân sự

^bHệ quản lý học viên đào tạo sau đại học, Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Tác giả đại diện: Email: maivietchinh@lqdtu.edu.vn

Ngày nhận 25/02/2026, Ngày sửa 24/3/2026, Chấp nhận 29/3/2026

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2026.vi.vol1-7>

Tóm tắt: Nghiên cứu tiến hành đánh giá thực nghiệm và mô phỏng số khả năng kháng cắt tại bề mặt tiếp xúc giữa bê tông siêu tính năng (UHPC) và bê tông thường (BTT). Các mẫu UHPC-BTT được chế tạo và thử nghiệm cắt bằng thiết bị ShearMatic với hộp cắt cải tiến nhằm bảo đảm điều kiện biên ổn định. Kết quả cho thấy quan hệ lực cắt - chuyển vị của các mẫu thí nghiệm đều thể hiện ứng xử phi tuyến, trong đó tải trọng tăng nhanh sau giai đoạn ban đầu, và phá hoại xảy ra đột ngột tại giá trị cực đại. Cường độ kháng cắt xác định theo diện tích bề mặt tiếp xúc, dao động trong khoảng 1,60-1,81 MPa. Mô phỏng số sử dụng mô hình vật liệu CDP trong Abaqus, được thiết lập dựa trên kích thước mẫu và đặc tính vật liệu thực nghiệm. Kết quả mô phỏng phản ánh đúng xu hướng chuyển vị trượt và sự phân bố biến dạng. Đường cong lực cắt - chuyển vị từ mô phỏng thể hiện được độ cứng ban đầu và xu hướng làm việc của mẫu. Tải trọng cực đại và chuyển vị tương ứng từ mô phỏng số lớn hơn dữ liệu từ thực nghiệm lần lượt là 14% và 19%. Những kết quả đạt được giúp bổ sung kiến thức liên quan đến cơ chế truyền lực tại bề mặt tiếp xúc UHPC-BTT, đồng thời hỗ trợ phát triển các giải pháp tối ưu hóa liên kết trong các ứng dụng sửa chữa và gia cường kết cấu bê tông.

Từ khóa: Bê tông siêu tính năng UHPC; cường độ kháng cắt; thí nghiệm cắt phẳng; mô phỏng số

Abstract: This study presents an experimental and numerical investigation into the shear resistance at the interface between Ultra high performance concrete (UHPC) and normal concrete (NC). UHPC-NC composite specimens were fabricated and tested under direct shear using a ShearMatic testing system equipped with a modified shear box to ensure stable boundary conditions. The experimental results indicate that the shear

force-slip responses of all specimens exhibit pronounced nonlinear behavior, characterized by a rapid increase in shear force following the initial stage and a sudden failure at the peak load. The measured interfacial shear strength, calculated based on the contact surface area, ranges from 1.60 to 1.81 MPa. A simulation model was developed in Abaqus using the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model, incorporating the actual specimen geometry and experimentally determined material properties. The numerical results accurately capture the slip evolution and the concentration of strain along the interface zone. The simulated shear force-slip curves successfully reproduce the initial stiffness and the overall response trend of the specimens. The numerically predicted peak shear load and corresponding slip are approximately 14% and 19% higher, respectively, than those obtained from the experiments. The findings provide valuable insight into the load transfer mechanisms at UHPC-NC interfaces and contribute to the development of optimized interfacial bonding solutions for repair and strengthening applications of RC structures.

Keywords: Ultra high performance concrete (UHPC); shear strength; shear test; numerical simulation

1. Giới thiệu

Các kết cấu bê tông cốt thép sau thời gian khai thác thường bị hư hỏng, suy giảm độ bền và khả năng chịu lực. Để khắc phục tình trạng đó, cần phải có các giải pháp gia cường kết cấu. Trong số các giải pháp gia cường hiện đại, việc sử dụng các vật liệu hiệu suất cao như bê tông cốt sợi siêu tính năng UHPC đang nổi lên như một phương pháp đầy hứa hẹn. UHPC sở hữu những đặc tính vượt trội so với bê tông thường (BTT), bao gồm cường độ, độ bền và tính ổn định [1-5]. Việc ứng dụng một

lớp phủ mỏng bằng UHPC, thay vì các loại vật liệu khác với cùng khả năng chịu lực, có thể giảm đáng kể trọng lượng bản thân của kết cấu, cũng như khả thi về mặt thi công và phù hợp về mặt kiến trúc [6, 7]. Ngoài ra, nhờ cấu trúc vi mô rất đặc chắc của UHPC, các lớp phủ này còn cải thiện đáng kể độ bền tổng thể của kết cấu bằng cách làm chậm sự khuếch tán của các chất ăn mòn, giảm sự hấp thụ nước, và tăng cường khả năng chống mài mòn. Việc bổ sung sợi vào UHPC mang lại các đặc tính có lợi khác như giảm chiều rộng vết nứt và cải thiện kiểm soát co ngót. Tuy nhiên, để đạt được hiệu quả tối ưu nhất từ việc gia cường bằng UHPC, đòi hỏi phải đảm bảo một liên kết đủ bền tại bề mặt tiếp xúc giữa lớp phủ UHPC và nền bê tông thường hiện có. Khả năng kháng cắt tại bề mặt tiếp xúc này là một khía cạnh thiết kế quan trọng và phức tạp. Nếu liên kết không đủ, có thể dẫn đến phá hoại sớm của cấu kiện ở tải trọng thấp hơn so với khả năng chịu lực tối đa của vật liệu, gây ra bởi sự phá hoại giòn.

Các cơ chế truyền tải trọng cơ bản đóng góp vào cường độ kháng cắt giữa các bề mặt khác nhau, bao gồm UHPC - BTT và đã được nghiên cứu rộng rãi [8]. Theo đó, cường độ kháng cắt của các bề mặt không sử dụng cốt thép chủ yếu được hình thành từ ba cơ chế chính: lực dính, lực cố kết, và ma sát. Lực dính phát sinh từ các cơ chế hóa học và vật lý khác nhau ở cấp độ vi mô, phụ thuộc vào các tính chất của bê tông mới và cũ, chất lượng bề mặt nền, độ thấm nước và độ bền của nền bê tông [9, 10]. Lực cố kết được kích hoạt sau khi lực dính suy giảm, với sự dịch chuyển tương đối ngang và dọc của mặt cắt, và chủ yếu bị ảnh hưởng bởi sự tác động cơ học do độ nhám vi mô của bề mặt [8, 11]. Trong khi đó, ma sát tại vùng tiếp xúc chỉ được kích hoạt khi có lực nén ngang, thường ít quan trọng đối với các cấu kiện chịu uốn và cắt.

Một số nghiên cứu đã tập trung vào việc đánh giá cường độ kháng cắt. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến cường độ kháng cắt đã được xác định và nghiên cứu bao gồm: phương pháp xử lý bề mặt nền và độ nhám của nó, cường độ và tính chất cơ học của bê tông nền và lớp phủ [12, 13], việc sử dụng các chất kết dính trên bề mặt như nhựa epoxy hoặc vữa bê tông cường độ cao [13], điều kiện độ ẩm bề mặt (ví dụ: bề mặt khô hoặc bề mặt ướt) [8, 14], sự hiện diện của cốt thép cắt, trình tự đúc (bê

tông cường độ cao (CĐC) đúc lên bê tông thường hay ngược lại, và hiệu ứng kích thước của bề mặt tiếp xúc [15]. Để định lượng độ nhám bề mặt, các phương pháp như sử dụng cát để xác định giá trị độ nhám (R_t) từ lớn nhất đến trung bình và kỹ thuật hiển vi số 3D để đo các thông số vi cấu trúc bề mặt đã được áp dụng [8]. Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu về liên kết giữa bê tông thường và bê tông hiệu suất cao, vẫn còn thiếu sự đồng thuận về ảnh hưởng của độ nhám bề mặt lên liên kết dính và cố kết trong dướng ứng suất cắt. Các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành như EN 1992-1-1 (EC2) hay Fib model code [16, 17] phân loại độ nhám bề mặt thành các cấp độ như "rất nhẵn", "nhẵn", "thô" và "rất thô" dựa trên đánh giá định tính hoặc các thông số đơn giản như hệ số độ nhám R_t . Tuy nhiên, các phương pháp này được cho là quá thận trọng đối với lớp phủ UHPC và không khai thác hết tiềm năng của vật liệu này.

Nghiên cứu này bao gồm các thí nghiệm trên các mẫu UHPC-BTT được chế tạo tại phòng thí nghiệm để kiểm tra khả năng chịu cắt của liên kết. Hơn nữa, mô hình phần tử hữu hạn (FEM) sẽ được phát triển để phân tích sự làm việc tại bề mặt tiếp xúc. Những phát hiện từ nghiên cứu này cung cấp hiểu biết sâu hơn về khả năng kháng cắt của bề mặt tiếp xúc UHPC-BTT, góp phần xây dựng các cách tiếp cận tính toán thực tế và kinh tế hơn, từ đó tối ưu hóa việc ứng dụng UHPC trong sửa chữa và gia cường các kết cấu bê tông cốt thép.

2. Vật liệu và phương pháp

Bảng 1 thể hiện thành phần hỗn hợp UHPC được sử dụng trong nghiên cứu. Hỗn hợp bao gồm 170kg nước, 820kg xi măng Portland, 330kg chất độn (bao gồm silicafume và tro bay), và 1000kg cát thạch anh mịn trên $1m^3$ bê tông. Phụ gia giảm nước tầm cao Superplasticizer (chất siêu dẻo) dựa trên thành phần hóa học của ether polycarboxylate (Sika ViscoCrete-3000 M) được bổ sung với liều lượng 1,2 lít trên 100kg hỗn hợp để đảm bảo độ dẻo thích hợp trong khi vẫn duy trì tỷ lệ nước/chất kết dính thấp. Hàm lượng thể tích 2% sợi thép thẳng (SF13) được thêm vào hỗn hợp UHPC (Hình 1). Các sợi dài 13 mm và có cường độ kéo 2900 MPa. Hàm lượng sợi thép 2% được lựa chọn vì đây là mức tối ưu, cân bằng giữa tính chất cơ lý, tính công tác và hiệu quả kinh tế. Nếu tăng cao hơn, hiệu quả cơ

học tăng không đáng kể nhưng làm giảm tính thi công, dễ vón cục và tăng chi phí.

Bảng 1. Tỷ lệ phối trộn UHPC

Hàm lượng sợi thép	Lượng vật liệu/1 m ³ UHPC					
	Nước (kg)	Xi măng (kg)	Silica fume (kg)	Tro bay (kg)	Cát mịn (kg)	Superplasticizer (L)
2%	170	820	200	130	1000	1,2 L/100kg hỗn hợp



Hình 1. Sợi thép trong hỗn hợp UHPC



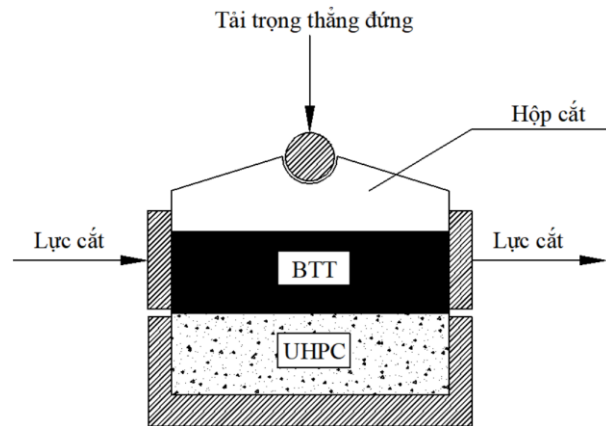
Hình 2. Hỗn hợp UHPC sau khi đạt được độ dẻo phù hợp

Quy trình sản xuất bê tông siêu tính năng UHPC được kiểm soát chặt chẽ. Trước tiên, các thành phần khô được trộn trong khoảng 2-3 phút nhằm bảo đảm sự phân bố đồng đều. Sau đó, nước và phụ gia siêu dẻo được bổ sung dần vào hỗn hợp. Khi hỗn hợp đạt được độ linh động mong muốn (Hình 2), sợi thép được đưa vào. Quá trình trộn tiếp tục thêm khoảng 3 phút để bảo đảm sự phân tán đồng đều. Các mẫu thí nghiệm nén UHPC được chế tạo theo dạng mẫu trụ kích thước tiêu chuẩn với đường kính 100mm và chiều cao mẫu 200mm, theo ASTM C39/C39M. Đồng thời quy trình chuẩn bị và bảo dưỡng mẫu tuân theo ASTM C1856/C1856M. Kết quả thí nghiệm mẫu đạt giá trị cường độ nén thấp nhất là 120 MPa [18, 19]. Bê tông thông thường được chế tạo tuân theo thiết kế cấp phối truyền thống, đạt tiêu chuẩn cường độ tối thiểu là 30MPa. Lưu ý rằng bê tông thông thường sử dụng

cốt liệu mịn để phù hợp với việc tạo mẫu thí nghiệm cắt phẳng.



Hình 3. Máy cắt phẳng ShearMatic



Hình 4. Nguyên lý thí nghiệm cắt phẳng

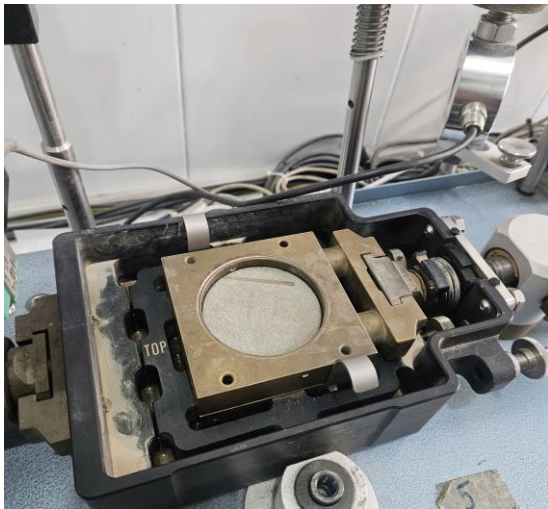
Để nghiên cứu đặc tính cơ học tại bề mặt tiếp xúc giữa UHPC và BTT, nghiên cứu sử dụng thiết bị cắt phẳng ShearMatic (Hình 3). Nhằm đáp ứng yêu cầu của thí nghiệm, một hộp cắt cải tiến đã được chế tạo, cho phép kiểm soát tốt hơn các điều kiện thử nghiệm. Nguyên lý chung của thí nghiệm cắt phẳng được minh họa trong Hình 4. Trong đó, hộp cắt dưới được thiết kế và chế tạo riêng biệt để có thể lắp ghép với hộp cắt trên, bảo đảm khả năng cố định của các mẫu trong suốt quá trình thử nghiệm. Các hộp cắt này có đường kính tiêu chuẩn là 63,5 mm, lớp bê tông (UHPC hoặc BTT) được chế tạo với chiều dày 12,5 mm. Kích thước như trên của mẫu thí nghiệm được tham khảo từ nghiên cứu liên quan đến việc xác định đặc tính ma sát giữa hai loại vật liệu khác nhau [20].



a) Tạo mẫu UHPC



b) Đổ BTT lên mẫu UHPC



c) Lắp mẫu thí nghiệm



d) Tiến hành thí nghiệm

Hình 5. Quy trình tạo mẫu và thí nghiệm xác định cường độ kháng cắt trên bề mặt tiếp xúc UHPC-BTT

Quy trình chế tạo mẫu và thực hiện thí nghiệm cắt được thực hiện theo các bước:

- Trước hết, vật liệu UHPC được đổ vào hộp cắt phía dưới (Hình 5a) và được bảo dưỡng trong điều kiện phòng trong 28 ngày để đạt được cường độ cần thiết;

- Sau giai đoạn bảo dưỡng, hai hộp cắt được lắp ghép lại với nhau, đồng thời lớp BTT được đổ lên phía trên bề mặt lớp UHPC (Hình 5b);

- Sau 28 ngày, khi lớp BTT đạt cường độ thiết kế, toàn bộ mẫu được đưa vào thiết bị ShearMatic để tiến hành thí nghiệm cắt phẳng (Hình 5c và 5d).

Trong suốt quá trình thí nghiệm, tốc độ cắt của mẫu được duy trì ổn định ở mức dưới 1,0 mm/phút, nhằm bảo đảm điều kiện tải trọng được tác dụng một cách đồng đều và có thể ghi nhận chính xác quá trình biến dạng cũng như sự phát triển của cơ chế phá hoại tại bề mặt tiếp xúc [20].



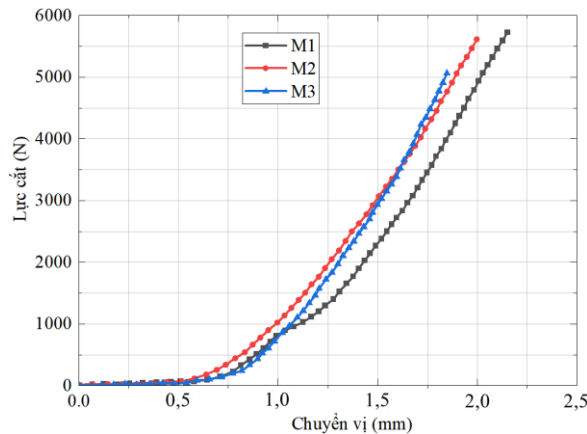
Hình 6. Minh họa dạng phá hoại sau thí nghiệm cắt

Sau thí nghiệm, các mẫu bê tông thể hiện rõ ràng dấu hiệu phá hoại trượt tại bề mặt tiếp xúc giữa hai lớp UHPC và BTT. Mặc dù mẫu vẫn giữ được hình dạng tổng thể trong hộp cắt, song có thể quan sát thấy các vết nứt và sự tách lớp dọc theo vùng tiếp xúc (Hình 6). Bề mặt mẫu xuất hiện hiện tượng mài mòn và trở nên gồ ghề hơn, kết quả trực tiếp từ quá trình chịu tác động của lực cắt phẳng trong suốt thí nghiệm. Cơ chế phá hoại điển hình được nhận thấy là sự hình thành mặt trượt

cắt rõ rệt tại vùng tiếp xúc giữa hai loại bê tông. Trên mặt tiếp xúc, sự tách biệt giữa lớp UHPC và lớp BTT được biểu hiện khá rõ, trong khi mức độ mất mát vật liệu ngoài khu vực cắt là rất hạn chế. Kiểu phá hoại quan sát được cho thấy hộp cắt cải tiến đã phát huy hiệu quả trong việc giữ cố định mẫu thử, hạn chế các chuyển động ngoài ý muốn, từ đó giúp việc đánh giá chính xác cường độ chịu cắt của bề mặt tiếp xúc diễn ra trong điều kiện tải trọng được kiểm soát.

Trong nghiên cứu này, tổng cộng 3 mẫu thử đã được chế tạo và đưa vào thí nghiệm. Quan hệ giữa tải trọng cắt - chuyển vị của các mẫu UHPC-BTT (ký hiệu M1-M3) được thể hiện trong Hình 7. Trong đó, chuyển vị tương đối (độ trượt) giữa hai lớp vật liệu tại bề mặt tiếp xúc trong quá trình thí nghiệm cắt. Giá trị này được ghi nhận trực tiếp từ hệ thống đo chuyển vị của thiết bị. Các kết quả cho thấy, đường cong tải trọng-chuyển vị của tất cả các mẫu đều thể hiện tính phi tuyến đặc trưng. Cụ thể, ở giai đoạn đầu, các mẫu xuất hiện một đoạn có độ cứng thấp, phản ánh quá trình bề mặt tiếp xúc giữa hai lớp vật liệu dần dần huy động cơ chế liên kết và ma sát. Ngay sau đó, khả năng chịu tải tăng nhanh cho đến khi đạt giá trị cực đại. Điểm đáng chú ý là sau khi

đạt tải trọng cắt lớn nhất, không ghi nhận hiện tượng giảm dần cường độ thường thấy trong các vật liệu có ứng xử dẻo. Thay vào đó, các mẫu phá hoại đột ngột ngay tại đỉnh tải trọng, cho thấy cơ chế chịu lực có tính giòn cao. Kiểu phá hoại này phản ánh rằng liên kết tại bề mặt tiếp xúc UHPC-BTT chủ yếu bị chi phối bởi cơ chế dính kết. Nói cách khác, cường độ cắt tại vùng tiếp xúc được quyết định bởi hai yếu tố chính: sự bám dính của hồ xi măng UHPC lên bề mặt BTT và sự khóa chặt cơ học do cấu trúc vi mô gồ ghề của bề mặt tiếp xúc. Khi giá trị ứng suất cắt tác dụng vượt quá ngưỡng liên kết này, khả năng chống trượt của bề mặt tiếp xúc gần như mất đi hoàn toàn, dẫn đến sự suy giảm đột ngột về khả năng chịu tải. Hiện tượng phá hoại tức thì quan sát được trong thí nghiệm không chỉ khẳng định tính chất giòn của cơ chế chịu cắt tại vùng tiếp xúc, mà còn nhấn mạnh vai trò then chốt của đặc tính dính kết trong việc quyết định cường độ kháng cắt giữa UHPC và BTT. Điều này gợi ý rằng để nâng cao khả năng kháng cắt của bề mặt tiếp xúc, các giải pháp gia cường cần tập trung vào việc cải thiện độ nhám, mức độ bám dính, hoặc bổ sung sợi nhằm tăng cường cơ chế vi mô tại bề mặt liên kết.



Hình 7. Lực cắt - chuyển vị tương đối giữa hai lớp vật liệu UHPC-BTT

Cường độ kháng cắt τ tại bề mặt tiếp xúc giữa UHPC và BTT, thể hiện đặc tính liên kết giữa hai lớp vật liệu, được xác định theo công thức:

$$\tau = V_{max} / A \tag{1}$$

trong đó: V_{max} là lực cắt lớn nhất tương ứng với các mẫu trong thí nghiệm, $A=3165,3 \text{ mm}^2$ là diện tích mặt cắt ngang của mẫu thí nghiệm, cũng là diện tích bề mặt tiếp xúc với mẫu có đường kính 63,5 mm. Số liệu tính toán cường độ kháng cắt τ được thể hiện trên Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thử nghiệm cắt

Mẫu TN	V_{max} (N)	Chuyển vị (mm)	Cường độ kháng cắt τ (MPa)
M1	5725,5	2,15	1,81
M2	5615,3	2,0	1,77
M3	5063,1	1,8	1,6

Dựa trên số liệu trình bày trong Bảng 2, giá trị tải trọng cắt cực đại V_{max} của các mẫu dao động từ 5063,1 N đến 5725,5 N, với giá trị trung bình 5467,9 N. Chuyển vị ứng với tải trọng cực đại nằm trong khoảng từ 1,8 mm đến 2,15 mm. Trong ba mẫu thí nghiệm, M1 đạt giá trị tải trọng cắt lớn nhất 5725,5 N, trong khi M3 ghi nhận giá trị thấp nhất 5063,1 N. Sự chênh lệch giữa các mẫu là không lớn, phản ánh tính đồng đều trong hành vi cơ học và mức độ lặp lại tốt của thí nghiệm. Cường độ

kháng cắt được xác định dao động từ 1,60 MPa đến 1,81 MPa, trung bình khoảng 1,73 MPa. Khoảng giá trị chênh lệch nhỏ của cường độ kháng cắt τ cho thấy quy trình chế tạo mẫu và phương pháp thí nghiệm được thực hiện tốt, bảo đảm độ tin cậy trong việc đánh giá khả năng chịu cắt tại bề mặt tiếp xúc.

3. Mô phỏng số thí nghiệm cắt

3.1 Mô hình vật liệu

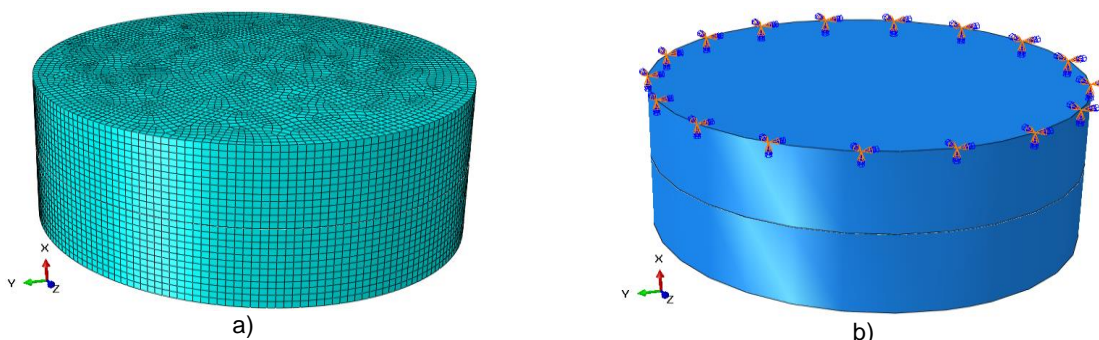
Bảng 3. Các tham số đầu vào của mô hình CDP dùng trong mô phỏng [21, 22]

Miêu tả	Ký hiệu	Giá trị	
		UHPC	BTT
Tỷ số cường độ chịu nén hai trục và một trục	σ_{b0}/σ_{c0}	1,07	1,16
Hình dạng bề mặt phá hoại	k_c	2/3	2/3
Góc giãn nở	ϕ	360	310
Độ lệch tâm	e	0,1	0,1
Tham số độ nhớt	Viscosity	0,005	0

Mô hình Concrete Damaged Plasticity (CDP) được xem là một trong những mô hình phù hợp nhất để mô phỏng ứng xử phi tuyến của bê tông. Hai cơ chế hư hỏng cơ bản của bê tông, bao gồm nứt do kéo và nghiền nát do nén đều được mô hình CDP mô tả thành công. Nhờ những ưu điểm đó, trong nghiên cứu này, mô hình CDP đã được lựa chọn để mô phỏng ứng xử của vật liệu UHPC và BTT. Cơ sở lý thuyết và các công thức chi tiết của mô hình có thể tham khảo trong các công trình của Lee và Fenves (1998), cũng như Lubliner và cộng sự (1989) [23, 24]. Trong phần mềm Abaqus [25], mô hình CDP được triển khai thông qua một số tham số đặc trưng như: tỷ số cường độ chịu nén hai trục và một trục (σ_{b0}/σ_{c0}), hình dạng bề mặt phá hoại (k_c), góc giãn nở (ϕ), độ lệch tâm (e), tham số độ nhớt, cùng với mối

quan hệ đường cong ứng suất-biến dạng của vật liệu. Các tham số cụ thể của mô hình CDP cho UHPC và BTT được trình bày trong Bảng 3. Các tham số được lựa chọn trên cơ sở tổng hợp từ các tài liệu tham khảo uy tín trong và ngoài nước đối với các loại bê tông có đặc tính tương tự. Đối với một số tham số khó xác định trực tiếp bằng thí nghiệm (như các tham số đặc trưng cho quy luật dẻo và sự suy giảm độ cứng), phương pháp phân tích ngược thông qua quá trình hiệu chỉnh lặp. Cụ thể, kết quả mô phỏng số được so sánh với kết quả thực nghiệm để điều chỉnh các tham số tương ứng. Sau quá trình hiệu chỉnh, bộ tham số được lựa chọn cho thấy sự phù hợp tốt giữa mô phỏng và thực nghiệm, qua đó đảm bảo tính hợp lý và độ tin cậy của mô hình.

3.2 Xây dựng mô hình mô phỏng số



Hình 8. Mô hình chia lưới phần tử (a) và điều kiện biên trong thí nghiệm cắt (b)

Để mô phỏng ứng xử cắt tại bề mặt tiếp xúc UHPC-BTT, mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến tính

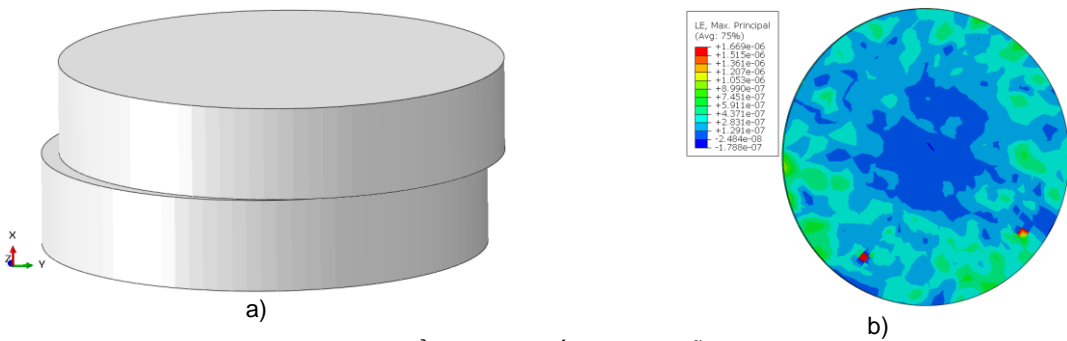
được phát triển bằng ABAQUS. Kích thước của mô hình mô phỏng được theo kích thước các hộp cắt

với đường kính tiêu chuẩn là 63,5 mm. Lớp bê tông được UHPC và BTT chế tạo với chiều dày 12,5 mm. Phần tử tích hợp giảm tám nút ba chiều (C3D8R) đã được áp dụng cho UHPC và BTT. Phân tích hội tụ được thực hiện thông qua việc tạo lưới các phần tử, với kích thước lưới là 5 mm cho toàn bộ mô hình (Hình 8a). Cường độ kháng cắt tại bề mặt tiếp xúc giữa UHPC và BTT trong mô phỏng được lấy từ kết quả thực nghiệm, với giá trị trung bình là 1,73 MPa (Bảng 3). Điều kiện biên được cố định cho 1 của lớp phần tử BTT, trong khi phía mô hình UHPC được di chuyển theo hướng lực cắt, được thể hiện trong Hình 8b.

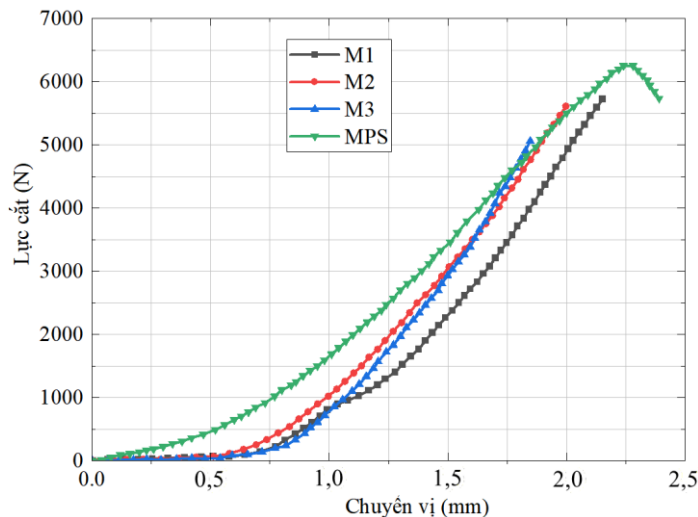
3.3 Kết quả mô phỏng số

Hình 9a và 9b thể hiện chuyển vị tương đối giữa hai mẫu vật trong thí nghiệm cắt và phân bố biến dạng (Logarithmic Strain - LE) trên bề mặt tiếp xúc của mô phỏng. Kết quả cho thấy trong giai đoạn

chịu tải, hai mẫu bê tông có xu hướng dịch chuyển trượt tương đối theo phương cắt, thể hiện qua sự biến dạng lệch giữa phần UHPC và BTT. Mức độ chuyển vị đạt giá trị lớn nhất tại vùng biên chịu ứng suất tập trung, phù hợp với cơ chế phá hoại dự kiến trong thí nghiệm thực tế. Phân bố biến dạng chính lớn nhất trên mặt cắt cho thấy các vùng biến dạng cục bộ tăng cao, tập trung tại những vị trí mép tiếp xúc, nơi có sự không đồng nhất về độ cứng giữa hai loại vật liệu. Các điểm có giá trị biến dạng cao thể hiện khả năng khởi phát vết nứt và suy giảm khả năng truyền lực cắt tại bề mặt tiếp xúc. Ngược lại, vùng lõi trung tâm xuất hiện phân bố biến dạng thấp hơn, phản ánh sự ổn định tương đối của mặt tiếp xúc khi tải trọng chưa vượt ngưỡng phá hoại. Mô phỏng số mô tả đúng xu hướng phá hoại trượt tại bề mặt tiếp xúc UHPC-BTT, đồng thời tái hiện được các vùng tập trung ứng suất và biến dạng, vốn đóng vai trò quyết định trong cơ chế phá hoại của liên kết.



Hình 9. Chuyển vị tương đối của các mẫu thí nghiệm (a) và phân bố biến dạng trên bề mặt mẫu vật trong mô phỏng số (b)



Hình 10. Đồ thị lực cắt - chuyển vị thí nghiệm cắt qua thực nghiệm và mô phỏng số

Kết quả so sánh đường cong lực cắt - chuyển vị trên Hình 10 cho thấy mô phỏng số (MPS) tái hiện khá tốt xu thế làm việc tổng thể của cấu kiện so với thí nghiệm. Ở giai đoạn đầu, độ dốc đường cong

MPS gần trùng với các đường thí nghiệm M1, M2, M3, chứng tỏ độ cứng ban đầu của mô hình được xác định hợp lý. Tuy nhiên, sau khi đạt giá trị lực cực đại, ứng xử của hai nhóm đường cong có sự

khác: trong thí nghiệm, lực cắt suy giảm tương đối đột ngột, thể hiện cơ chế phá hoại giòn do hình thành và phát triển nhanh của vết nứt. Trong khi đó, đường cong MPS xuất hiện một nhánh mềm hóa rõ ràng, lực cắt giảm dần theo chuyển vị. Sự khác biệt này chủ yếu do trong thí nghiệm, quá trình sau đỉnh

khó kiểm soát ổn định, mẫu phá hoại nhanh và không ghi nhận đầy đủ dữ liệu. Trong khi đó, mô hình số sử dụng giả thiết vật liệu liên tục và điều kiện biên lý tưởng, cho phép mô phỏng liên tục quá trình suy giảm độ cứng và lan truyền hư hỏng, từ đó thể hiện được nhánh mềm hóa sau đỉnh.

Bảng 4. So sánh kết quả thử nghiệm cắt với mô phỏng số

Trường hợp	Thí nghiệm M1, M2, M3 (Trung bình) (1)	Mô phỏng số (MPS) (2)	Chênh lệch (2)/(1)
V_{max} (N)	5467,9	6254,2	1,14
Chuyển vị (mm)	2,0	2,39	1,19

Về giá trị đặc trưng, Bảng 4 cho thấy lực cắt trung bình cực đại V_{max} trong mô phỏng đạt 6254,2 N, lớn hơn giá trị trung bình thí nghiệm của các mẫu M1, M2 và M3 là 5467,9 N, tương đương khoảng 14%. Trong khi chuyển vị tại trạng thái cực hạn tăng từ 2,0 mm (thí nghiệm) lên 2,39 mm (mô phỏng), chênh lệch khoảng 19%. Việc MPS dự đoán cả lực và chuyển vị cực đại đều lớn hơn có thể được lý giải bởi các tham số cơ học đầu vào của vật liệu (mô đun đàn hồi, cường độ vật liệu, mô hình hư hỏng) thường phản ánh lý tưởng hơn so với mẫu thực tế, vốn có khuyết tật và không đồng nhất. Ngoài ra, điều kiện biên, tiếp xúc và hệ thống đo trong mô phỏng không kể đến các yếu tố làm giảm khả năng chịu lực như ma sát phụ, độ mềm của khung thử hoặc sai số thi công. Mặc dù vậy, với sai số nằm trong khoảng 14-19% cho một bài toán phi tuyến vật liệu và phá hoại giòn, có thể xem mô hình MPS đảm bảo độ tin cậy cho mục đích nghiên cứu và dự báo xu hướng ứng xử của kết cấu. Tuy nhiên, khi đưa vào thiết kế thực tế cần cân nhắc hiệu chỉnh thêm các tham số vật liệu hoặc áp dụng hệ số giảm phù hợp.

4. Kết luận

Bài báo thông qua nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số, đã đánh giá khả năng kháng cắt tại bề mặt tiếp xúc UHPC-BTT. Từ các kết quả thu được, một số kết luận được rút ra như sau:

- Thí nghiệm cắt phẳng cho thấy bề mặt tiếp xúc UHPC-BTT chủ yếu chịu chi phối bởi cơ chế kết dính. Tải trọng cực đại của ba mẫu có sự dao động nhỏ, thể hiện chất lượng chế tạo ổn định và độ tin cậy của quy trình thử nghiệm. Phá hoại xảy ra đột ngột tại đỉnh đường cong tải trọng - chuyển vị, phản ánh bản chất giòn của bề mặt tiếp xúc không cốt

thép. Cường độ kháng cắt trung bình 1,73 MPa là chỉ tiêu quan trọng cho việc đánh giá khả năng truyền lực của lớp phủ UHPC trong các ứng dụng gia cường kết cấu bê tông cốt thép thông thường;

- Mô phỏng số sử dụng mô hình CDP trong ABAQUS đã mô tả hợp lý sự phân bố biến dạng và xu hướng trượt tại bề mặt tiếp xúc. Mặc dù mô phỏng dự đoán tải trọng lớn nhất và chuyển vị tương ứng cao hơn thực nghiệm 14% và 19%, mức sai lệch này phù hợp với bản chất lý tưởng hóa của mô hình vật liệu và điều kiện biên trong phân tích số. Điều đó cho thấy mô hình có khả năng tái hiện xu hướng ứng xử tổng thể của mẫu và là công cụ hữu ích trong nghiên cứu cơ chế phá hoại;

- Nghiên cứu khẳng định tính khả thi và hiệu quả của UHPC khi sử dụng làm lớp phủ gia cường, đồng thời nhấn mạnh vai trò quan trọng của bề mặt tiếp xúc trong việc đảm bảo khả năng kháng cắt của cấu kiện liên hợp UHPC-BTT. Các kết quả thu được không chỉ làm rõ hành vi cơ học tại bề mặt tiếp xúc mà còn gợi mở hướng hoàn thiện mô hình hóa và tối ưu quy trình xử lý bề mặt cho các ứng dụng gia cường thực tế trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Arabani, A.S., H.D. Naserabadi, and S. Aminyavari (2025), *Experimental investigation of energy absorption in fiber-reinforced ultra high-performance concrete after exposure to elevated temperatures*. Case Studies in Construction Materials. 22: p. e04451.
- [2] Cai, Z., et al.(2024), *Reinforced ultra-high performance concrete beam under flexure and shear: Experiment and theoretical model*. Case Studies in Construction Materials. 20: p. e02647.

- [3] Lê Bá, A., H.H. Việt (2024), *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, 75(5): p. 1870-1881.
- [4] Long, L.H., N.V. Tú, M.V. Chinh (2025), *Đánh giá khả năng chịu lực của bản sàn bê tông cốt thép được gia cường lớp bê tông siêu tính năng UHPC*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng - IBST.
- [5] Thường, N.T.(2024), *Nghiên cứu áp dụng bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép vào các công trình giao thông*.
- [6] *Áp dụng công nghệ mới sửa chữa mặt cầu Thăng Long*. [cited 2024; Available from: <https://baoxaydung.com.vn/ap-dung-cong-nghe-moi-sua-chua-mat-cau-thang-long-284783.html>].
- [7] Abellán-García, J., J.S. Carvajal-Muñoz, and C. Ramírez-Munévar (2024), *Application of ultra-high-performance concrete as bridge pavement overlays: Literature review and case studies*. Construction and building materials. 410: p. 134221.
- [8] Javidmehr, S. and M. Empelmann (2021), *Shear bond between ultra-high performance fibre reinforced concrete overlays and normal strength concrete substrates*. Sustainability, 2021. 13(15): p. 8229.
- [9] Chorinsky, E.(1986), *Repair of concrete floors with polymer modified cement mortars*, in *Proceedings of the Adhesion between Polymers and Concrete*. p. 230-234.
- [10] Valikhani, A., et al. (2020), *Experimental evaluation of concrete-to-UHPC bond strength with correlation to surface roughness for repair application*. Construction and Building Materials. 238: p. 117753.
- [11] Randl, N., M. Steiner, and M. Peyerl (2020), *Hochfester Aufbeton zur Tragwerksverstärkung: Teil 1: Kleinkörperversuche*. Beton-und Stahlbetonbau-Wiley Online Library. 115(2): p. 106-116.
- [12] Zeng, J.-J., et al.(2024), *Experimental investigations on tensile and shear behavior of the interface between UHP-ECC and concrete*. International Journal of Concrete Structures Materials. 18(1): p. 50.
- [13] Mack, V., R. Salehfard, and A. Habibnejad Korayem (2024), *Comparative study of the effects of key factors on concrete-to-concrete bond strength*. Civil Engineering Infrastructures Journal. 57(1): p. 205-223.
- [14] Du, C., et al.(2021), *Prediction of the interface shear strength between ultra-high-performance concrete and normal concrete using artificial neural networks*. Materials. 14(19): p. 5707.
- [15] He, S., et al.(2024), *Shear Bond Performance of UHPC-to-NC Interfaces with Varying Sizes: Experimental and Numerical Evaluations*. Buildings. 14(11): p. 3684.
- [16] *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings*. 2004, The European Union.
- [17] *Fib Model Code for Concrete Structures 2020*, International Federation for Structural Concrete.
- [18] C39M, A., *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. 2021, PA, USA.
- [19] C1856/C1856M-17, A., *Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete*. 2017, PA, USA.
- [20] Pham, D.T., et al.(2025), *Experimental study on friction characteristics between stainless steel and saturated dense coral sand*. Research on engineering structures materials.
- [21] Bahij, S., et al.(2018), *Numerical investigation of the shear behavior of reinforced ultra-high-performance concrete beams*. Structural Concrete. 19(1): p. 305-317.
- [22] Hafezolghorani, M., et al.(2017), *Simplified damage plasticity model for concrete*. Structural engineering international. 27(1): p. 68-78.
- [23] Lee, J. and G.L. Fenves (1998), *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. Journal of engineering mechanics. 124(8): p. 892-900.
- [24] Lubliner, J., et al.(1989), *A plastic-damage model for concrete*. International Journal of solids. 25(3): p. 299-326.
- [25] Systèmes, D.(2016), *Abaqus/CAE User's Guide*.