



EXPERIMENTAL STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH OF UHPC CONFINED BY GFRP

Le Ha Linh¹, Thai Minh Quan^{1*}, Ngo Van Thuc², Hoang Viet Hai¹

¹University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay street, Hanoi, Vietnam

²Mien Tay Construction University, No 20B Pho Co Dieu Street, Vinh Long, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 21/04/2025

Revised: 31/05/2025

Accepted: 11/06/2025

Published online: 15/06/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.5.9>

* Corresponding author

Email: minhquan.thai@utc.edu.vn; Tel : +84815559669

Abstract. High-strength fiber-reinforced polymer (FRP) composites are materials with numerous advantages, making them suitable for strengthening reinforced concrete structures. Ultra-high performance concrete (UHPC) is known for its exceptional compressive strength and durability. However, the compressive behavior of UHPC confined by FRP wraps has not been extensively studied in Vietnam. This study conducts experimental investigations to evaluate the compressive behavior of three types of UHPC confined with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) wraps, including specimens wrapped with one and two layers of GFRP. Additionally, the effect of steel fiber content in the range of 0% to 2% on compressive strength is also examined. Experimental results indicate that increasing the number of GFRP from one layer to two layers enhances the confinement effectiveness, with compressive strength improvements ranging from 12.7% to 28.8%. The increase in compressive strength was proportional to the number of GFRP layers, with the fibreless UHPC showing the most significant improvement (28.8%). UHPC with 1% and 2% fiber content also exhibited strength gains (20.9% and 12.7%, respectively), although the difference between these two levels was negligible. The findings are generally consistent with predictive models proposed in previous international studies. Based on comparative analyses with existing models, this study proposes suitable models for predicting the compressive behavior of GFRP-confined UHPC, thereby contributing to the broader understanding of FRP confinement structures.

Keywords: Ultra High-Performance Concrete, GFRP, confined effect, compressive strength, predictive model.

@ 2025 University of Transport and Communications



THỰC NGHIỆM ỨNG XỬ CHỊU NÉN BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG ĐƯỢC KIỂM CHẾ NỖ NGANG BẰNG GFRP

Lê Hà Linh¹, Thái Minh Quân^{1*}, Ngô Văn Thức², Hoàng Việt Hải¹

¹Trường đại học Giao thông Vận Tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

² Trường đại học Xây Dựng Miền Tây, Số 20B Phó Cơ Điều, Vĩnh Long, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 21/04/2025

Ngày nhận bài sửa: 31/05/2025

Ngày chấp nhận đăng: 11/06/2025

Ngày xuất bản Online: 15/06/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.5.9>

* Tác giả liên hệ

Email: minhquan.thai@utc.edu.vn; Tel : +84815559669

Tóm tắt. Tấm sợi composite cường độ cao FRP (Fiber Reinforced Polymer) là một loại vật liệu có nhiều ưu điểm và thích hợp cho việc gia cường kết cấu bê tông cốt thép. Bê tông siêu tính năng có ưu điểm là cường độ chịu nén và độ bền rất lớn. Tuy nhiên, ứng xử chịu nén của bê tông UHPC bị kiểm chế bởi tấm sợi FRP chưa có nhiều nghiên cứu ở Việt Nam. Nghiên cứu này thực hiện các thí nghiệm nhằm đánh giá ứng xử chịu nén trên 03 loại bê tông UHPC được kiểm chế bởi tấm sợi thủy tinh GFRP 01 lớp sợi và 02 lớp sợi đồng thời xem xét ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép trong phạm vi từ 0% đến 2% đến cường độ chịu nén. Kết quả thực nghiệm cho thấy, khi chiều dày tấm sợi GFRP tăng từ 1 lớp sợi lên 02 lớp sợi thì hiệu quả kiểm chế đối với bê tông UHPC cũng tăng tương ứng từ 12,7% lên đến 28,8%. Mức độ gia tăng cường độ nén tỷ lệ thuận với số lớp GFRP, trong đó UHPC không sợi tăng mạnh nhất (28,8%). Bê tông có sợi 1% và 2% cũng tăng cường độ (20,9% và 12,7%), nhưng sự khác biệt giữa hai mức này không đáng kể. Các kết quả thu được cơ bản phù hợp với các mô hình đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây trên thế giới. Trên cơ sở phân tích so sánh với các mô hình tính toán, nghiên cứu này đã đề xuất các mô hình phù hợp để tính toán và dự báo ứng xử chịu nén của bê tông UHPC khi được gia cường bằng tấm sợi GFRP.

Từ khóa: bê tông siêu tính năng UHPC, GFRP, hiệu ứng kiểm chế, ứng xử chịu nén, mô hình dự báo.

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông siêu tính năng (UHPC) là một loại vật liệu mới trên nền xi măng, nổi bật với cường độ nén và kéo cao vượt trội cùng độ bền vượt xa so với bê tông truyền thống. Nhờ những đặc tính này, UHPC giúp giảm trọng lượng kết cấu, đồng thời nâng cao mức độ an toàn và tuổi thọ cho công trình. UHPC hiện đang được ứng dụng rộng rãi trong các công trình cầu, xây dựng dân dụng và nhà máy công nghiệp – những nơi thường xuyên chịu ảnh hưởng của môi trường ăn mòn. Tuy nhiên, tương tự như bê tông thường, UHPC có xu hướng giòn dưới tải trọng nén, dẫn đến nguy cơ phá hoại đột ngột – điều không mong muốn trong các kết cấu chịu lực. Hiện tượng giòn của bê tông UHPC do khả năng tích lũy ứng suất rất lớn trong vật liệu mà không đi kèm với biến dạng dẻo đáng kể trước khi phá hoại. Khi ứng suất đạt đến ngưỡng chịu đựng, các vết nứt vi mô sẵn có hoặc mới phát sinh sẽ lan truyền với tốc độ nhanh, dẫn đến sự phá hủy đột ngột cấu kiện. Để khắc phục hạn chế này, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc gia cường UHPC bằng các loại sợi khác nhau nhằm cải thiện đặc tính cơ học của vật liệu. Liao và cộng sự [1] đã chỉ ra rằng việc tăng tỷ lệ sợi thép từ 1% lên 2% giúp nâng cao khả năng chịu cắt tới 24%. Yu và cộng sự [2] sử dụng sợi polyethylene (PE) trong UHPC và nhận thấy vật liệu này có khả năng cải thiện tính năng chống va đập của các tấm UHPC. Xu và cộng sự [3] lại đánh giá hiệu quả của hỗn hợp sợi thép - polypropylene và kết luận rằng loại sợi lai này mang lại khả năng tăng cường độ và tính dẻo của UHPC một cách rõ rệt. Nói chung, các nghiên cứu cho thấy việc bổ sung một lượng sợi thích hợp có thể làm giảm đáng kể tính giòn của UHPC, song nếu sử dụng quá nhiều sợi sẽ làm suy giảm tính công tác của hỗn hợp, gây khó khăn trong quá trình thi công và ảnh hưởng đến chất lượng công trình.

Một hướng nghiên cứu mới nhằm tăng cường tính dẻo của UHPC là sử dụng các vật liệu có khả năng biến dạng tốt để bao bọc và kiềm chế UHPC. Ở đây, “bao bọc” là việc quấn hoặc phủ vật liệu quanh bê tông UHPC, thường theo phương ngang, tạo thành lớp vỏ bảo vệ bên ngoài. “Kiềm chế” là quá trình tạo ra ứng suất nén ngang tác động lên lõi bê tông thông qua lớp bao bọc này, nhằm hạn chế sự giãn nở ngang khi chịu tải, từ đó cải thiện cường độ chịu nén và độ dẻo của vật liệu. Cách tiếp cận bằng phương pháp này giúp tăng độ dẻo và cải thiện cường độ chịu nén cho UHPC sau khi được kiềm chế. Biện pháp kiềm chế thường được áp dụng quanh chu vi của cột UHPC, tạo ra trạng thái nén ba trục cho lõi vật liệu, từ đó không chỉ nâng cao khả năng chịu lực mà còn cải thiện đáng kể tính dẻo của cột. Trong số các vật liệu được sử dụng để kiềm chế, thép và tấm sợi composite cường độ cao (FRP) hiện đang là hai lựa chọn phổ biến nhất. FRP có ưu điểm nhẹ, bền và hệ số giãn nở nhiệt gần giống với bê tông, cho phép nó đồng thời biến dạng theo UHPC trong quá trình chịu tải [4,5]. Nhờ những đặc điểm đó, FRP được ứng dụng rộng rãi trong các công tác sửa chữa và gia cố kết cấu cũng như trong xây dựng cầu đường. Việc sử dụng FRP để kiềm chế UHPC cho phép tận dụng tối đa các ưu điểm của cả hai vật liệu, đồng thời cải thiện khả năng chịu lực và biến dạng của lõi UHPC [6]. Các kết quả thực nghiệm trên thế giới đã xác nhận hiệu quả của FRP trong việc kiềm chế UHPC. Tuy nhiên, đến nay vẫn còn thiếu các nghiên cứu đề xuất công thức cụ thể để xác định đặc tính cơ học chịu nén của UHPC khi được bao bọc bởi FRP, cũng như chưa có nhiều so sánh về độ chính xác của các công thức dự báo hiện có.

Gần đây, Lê Bá Danh và các cộng sự [7] 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 [8] 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. Tuy nhiên ở Việt Nam, chưa có nghiên cứu nào đề cập đến ứng xử chịu nén của bê tông UHPC bị kiềm chế bởi tấm sợi FRP.

Vì mục đích này, bài báo này giới thiệu kết quả nghiên cứu thực nghiệm ứng xử chịu nén đúng tâm của bê tông siêu tính năng bởi kiềm chế bởi tấm sợi thủy tinh GFRP do tính phổ biến, dễ tiếp cận tại Việt Nam và đã được ứng dụng rộng rãi trong gia cường kết cấu bê tông thông thường. Cường độ phá hoại mẫu sau đó được kiểm chứng và đối chiếu với một số nghiên cứu ở trên thế giới.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu sử dụng

Bê tông UHPC sử dụng để chế tạo gồm các thành phần chính với đặc tính kỹ thuật 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, $\text{SiO}_2 > 95\%$ 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, có cường độ chịu kéo cao hơn 2000 MPa và đường kính bằng 0,2 mm dài 12 mm. Tỷ lệ thành phần cấp phối của bê tông UHPC đã được trình bày ở nghiên cứu trước đây của tác giả Hoang Viet Hai [9] như được mô tả trong Bảng 1 nhằm đảm bảo cường độ chịu kéo của bê tông UHPC đạt lớn hơn 8 MPa [9]. Để nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến ứng xử của bê tông UHPC, trong nghiên cứu này sẽ thay đổi hàm lượng sợi với các tỷ lệ 0%, 1% và 2%, tương ứng với ký hiệu UHPC 0%; UHPC 1% và UHPC 2%.



a) Công tác quét keo epoxy lên tấm sợi



b) công tác quấn sợi

Hình 1. Hình ảnh chế tạo mẫu.

Bảng 1. Tỷ lệ và thành phần cấp phối của bê tông UHPC 2% [9].

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

Hỗn hợp UHPC 0% không có khối lượng sợi thép trong khi đó thành phần hỗn hợp UHPC 1% có 78 kg. Các thành phần vật liệu khác được giữ nguyên như trong Bảng 1. Bê tông sau khi trộn được tiến hành đúc mẫu hình trụ với đường kính 10 cm và cao 20 cm. Mẫu sau đó được

bảo dưỡng trong điều kiện thông thường. Việc bảo dưỡng mẫu UHPC trong điều kiện thường được áp dụng nhằm đảm bảo tính thực tiễn và so sánh với nhiều nghiên cứu quốc tế trước đây cũng như điều kiện thi công thực tế tại Việt Nam. Sau 28 ngày các mẫu được tiến hành gia công quấn GFRP là tấm sợi thủy tinh Tyfo SHE-25A xuất xứ từ Singapore. Chiều dày tấm sợi sau khi hoàn thiện là 0,64 mm. Cường độ chịu kéo giới hạn là 460 MPa và biến dạng lớn nhất khi bị kéo đứt là 1,76%. Keo epoxy sử dụng là loại keo Type S Epoxy.

Hình 1 thể hiện công tác quét keo epoxy lên tấm sợi và mẫu sau đó tiến hành quấn sợi. Các mẫu sau đó được tiến hành thí nghiệm tại phòng thí nghiệm Công trình - Trung tâm khoa học công nghệ trường Đại Học Giao thông Vận tải.

2.2 Số lượng mẫu và trình tự thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, tổng cộng 15 mẫu bê tông hình trụ tròn, kích thước (dxh) = (100x200) mm, đã được chế tạo từ 03 hỗn hợp bê tông và cùng được bảo dưỡng trong một điều kiện giống nhau. Sau đó, các mẫu bê tông này được gia cường kiểm chế nở ngang bằng tấm GFRP và chia thành ba nhóm như sau: Nhóm 01: 09 mẫu không được gia cường tương ứng với 03 loại bê tông UHPC 0%; UHPC 1% và UHPC 2% để xác định cường độ chịu nén của bê tông khi không được kiểm chế nở ngang; Nhóm 02: 03 mẫu của 03 loại bê tông UHPC 0%; UHPC 1% và UHPC 2% được gia cường kiểm chế nở ngang bằng tấm GFRP với 01 lớp sợi; Nhóm 03: 03 mẫu của 03 loại bê tông UHPC 0%; UHPC 1% và UHPC 2% được gia cường kiểm chế nở ngang bằng tấm GFRP với 02 lớp sợi. Trong phạm vi nghiên cứu này, việc lựa chọn 1 và 2 lớp GFRP nhằm đánh giá hiệu quả kiểm chế của lớp bao bọc ở các mức độ phổ biến và thực tế để áp dụng. Thông thường, đây cũng là cách sử dụng trong thực tiễn gia cường, sửa chữa công trình do đảm bảo hiệu quả cải thiện cơ học đồng thời vẫn giữ được tính thi công thuận lợi và tiết kiệm chi phí. Chiều dài tấm sợi được bố trí dài hơn 10 cm so với chu vi của mẫu để tạo ra hiệu ứng neo như theo hướng dẫn của đơn vị cung cấp và theo các nghiên cứu trước đây. Việc cuốn lớp GFRP dài hơn chu vi mẫu 10 cm nhằm đảm bảo lớp sợi có thể phát huy hiệu quả tối đa và tránh bong tróc tại vị trí chùng mép. Ngoài ra, một trong những ưu điểm quan trọng của giải pháp gia cường bằng cách bọc tấm sợi cho UHPC là khả năng nâng cao đáng kể cường độ chịu nén và tính dẻo của vật liệu mà không làm ảnh hưởng đến tính công tác của hỗn hợp bê tông trong quá trình thi công. Điều này đặc biệt có ý nghĩa với UHPC – loại bê tông có độ đặc cao và xu hướng mất tính công tác nhanh khi sử dụng nhiều sợi thép để gia cường. Thay vì tăng hàm lượng sợi bên trong, vốn có thể gây khó khăn khi đổ và đầm bê tông, việc sử dụng lớp sợi bao bọc bên ngoài giúp cải thiện tính dẻo và khả năng chịu lực sau nứt mà vẫn duy trì được độ linh hoạt và hiệu quả trong thi công. Bên cạnh đó, lớp sợi GFRP khá nhẹ và có khả năng thi công đơn giản, không làm tăng đáng kể khối lượng kết cấu, đồng thời có khả năng làm việc tương thích với UHPC về biến dạng, nhờ hệ số giãn nở nhiệt gần với bê tông.

2.3 Thí nghiệm nén mẫu xác định cường độ chịu nén của bê tông

Các mẫu thí nghiệm được tiến hành trên mẫu máy SANS-3000 kN, của Phòng thí nghiệm công trình, Trường Đại học Giao thông vận tải (Vilas 047) tuân thủ theo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M-20. Máy thí nghiệm phải được thiết lập sao cho lực nén tăng dần với tốc độ gia tải 6,0 kN/s. Hình 2 mô tả mẫu được đặt ở máy thí nghiệm. Trong quá trình thí nghiệm biến dạng thẳng đứng và biến dạng nằm ngang được đo đặc thông qua 02 lá điện trở được đặt dọc theo phương thẳng đứng và phương nằm ngang.

Giá trị lực nén lớn nhất của mỗi mẫu thí nghiệm P_{max} (kN) được ghi nhận từ đó xác định được cường độ chịu nén lớn nhất của mẫu bê tông $f'_c = \frac{4P_{max}}{\pi D^2}$. Cường độ chịu nén của mẫu bê

tổng tương ứng với mỗi mức gia cường là giá trị trung bình cộng của các kết quả thí nghiệm thu được trên các mẫu tương ứng.



Hình 2. Mẫu thí nghiệm ở máy nén SANS-3000 kN.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

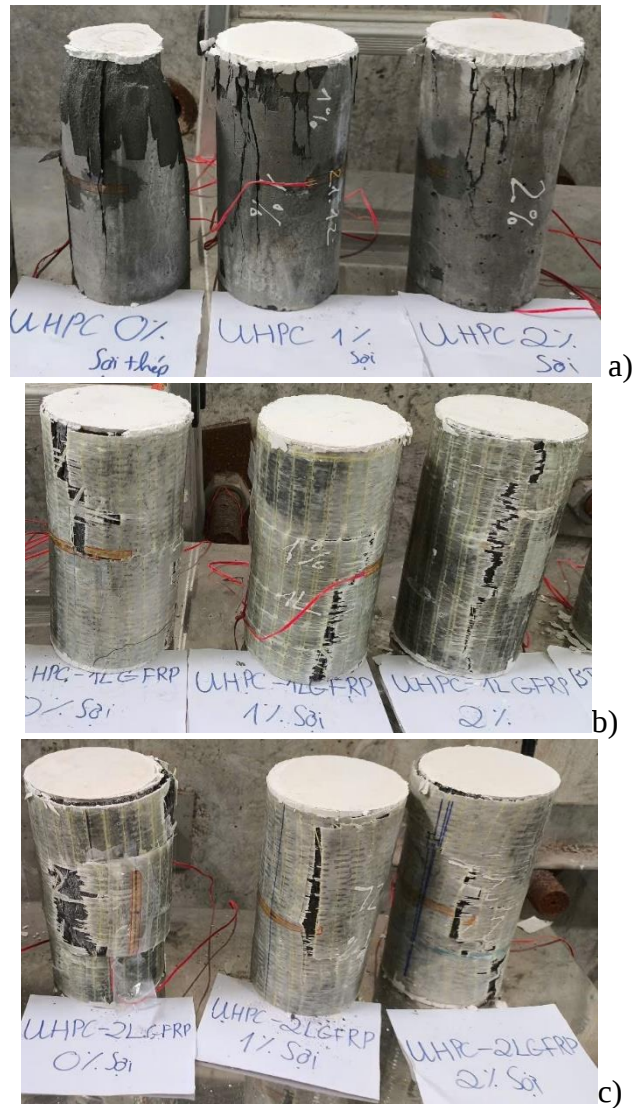
3.1. Dạng phá hoại của mẫu thí nghiệm

Hình 3 mô tả các dạng phá hoại điển hình của các mẫu thí nghiệm tương ứng với các trường hợp mẫu UHPC 0%; UHPC 1% và UHPC 2% không có và có sử dụng gia cường kiểm chế nở ngang bằng tấm GFRP với 01 lớp sợi, 02 lớp sợi. Đầu tiên, Hình 3.a mô tả kết quả nén các mẫu không sử dụng gia cường kiểm chế bằng tấm GFRP, cho thấy vai trò của sợi thép trong việc giữ lại hình dạng mẫu sau khi bị phá hoại. Mẫu UHPC 0% sợi bị phá hoại giòn, mẫu sau khi bị phá hoại không còn được nguyên vẹn. Các mẫu UHPC 1%; UHPC 2% sợi xuất hiện các vết nứt dọc theo mẫu khi bị phá hoại, một số vị trí cục bộ xuất hiện nhiều vết nứt.

Tiếp theo, đối với các mẫu được kiểm chế bằng tấm sợi GFRP quá trình phá hoại mẫu trên Hình 3.b và Hình 3.c cho thấy khi mẫu bị phá hoại, xuất hiện việc đứt tấm sợi theo phương thẳng đứng, điều này phản ánh đúng sự làm việc của mẫu bị kiểm chế tương tự như các nghiên cứu trước đây [10-12]. Việc kiểm chế nở ngang của mẫu UHPC sẽ truyền vào thành lực kéo của tấm sợi gây ra đứt tấm sợi ở thời điểm phá hoại. Khi tấm sợi bị đứt sẽ kéo theo vỡ đột ngột của bê tông, điều này minh chứng thông qua tiếng nổ rất lớn khi mẫu bị phá hoại trong quá trình làm thí nghiệm khi so sánh với mẫu không được kiểm chế bởi tấm sợi. Tấm sợi có thể bị đứt dọc theo chiều cao mẫu hoặc bị đứt ở 1/3 tấm phía trên hoặc 1/3 tấm phía dưới hoặc 2/3 tấm như trên Hình 3.b và Hình 3.c.

3.2. Ảnh hưởng của tấm sợi đến cường độ nén phá hoại mẫu bê tông UHPC

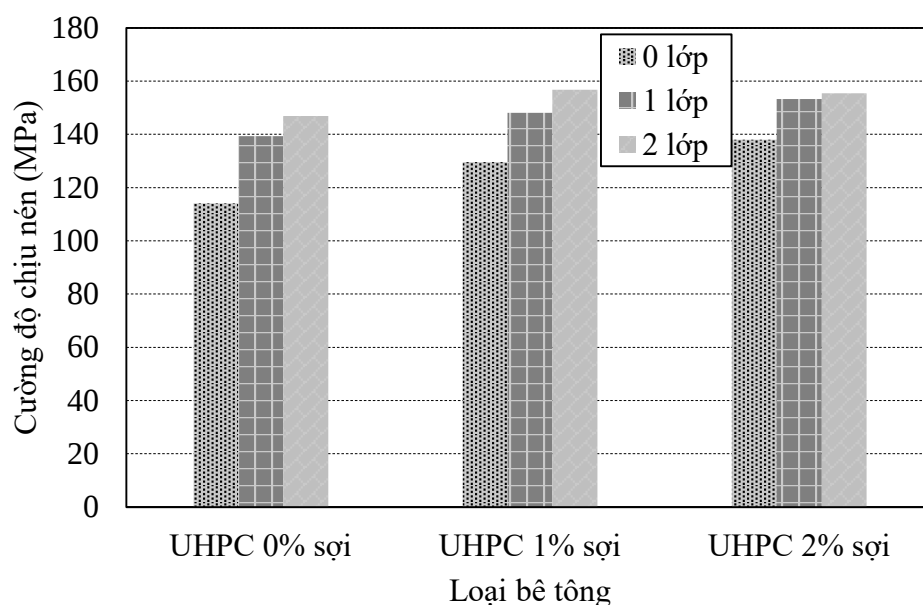
Ảnh hưởng của tấm sợi, chiều dày tấm sợi GFRP đến lực nén phá hoại mẫu bê tông UHPC được tổng hợp trong Bảng 2 và Hình 4.



Hình 3. Mẫu thí nghiệm sau khi thí nghiệm nén : a) Mẫu đối chứng ; b) Mẫu được tăng cường bởi 01 lớp sợi GFRP ; c) Mẫu được tăng cường bởi 02 lớp sợi GFRP.

Bảng 2. Tổng hợp cường độ chịu nén, biến dạng lớn nhất của các mẫu bê tông UHPC khi không hoặc bị kiểm chế nén nở hông bởi tấm sợi GFRP.

Số lớp sợi GFRP	Cường độ phá hoại, biến dạng lớn nhất tương ứng	Loại bê tông UHPC			Chiều dày tấm sợi (mm)
		UHPC 0%	UHPC 1%	UHPC 2%	
0 lớp	f'_{co} (MPa)	114,1	129,6	138,0	0
	ε_{co} (%)	2,9	3,3	3,5	
1 lớp	f'_{cc} (MPa)	139,3	148,1	153,3	0,64
	ε_{fe} (%)	1,779	1,897	1,825	
2 lớp	f'_{cc} (MPa)	146,9	156,7	155,5	1,28
	ε_{fe} (%)	1,25	1,181	0,921	



Hình 4. Ảnh hưởng của loại bê tông và số lớp sợi đến cường độ phá hoại mẫu UHPC bị kiểm chế bởi tấm sợi FRP.

Kết quả thí nghiệm trên Hình 4 cho khi tăng số lớp tấm sợi GFRP từ 0 lên 2 lớp, cường độ chịu nén của bê tông UHPC tăng rõ rệt ở tất cả các mức hàm lượng sợi (0%, 1%, và 2%). Điều này cho thấy hiệu quả kiểm chế của tấm GFRP tỷ lệ thuận với số lớp gia cường. Cụ thể, đối với UHPC không chứa sợi (0%), cường độ tăng từ 114,1 MPa lên 146,9 MPa (tăng khoảng 28,8%). Với UHPC chứa 1% sợi, giá trị này tăng từ 129,6 MPa lên 156,7 MPa (tăng khoảng 20,9%). Đối với UHPC chứa 2% sợi, cường độ tăng từ 138,0 MPa lên 155,5 MPa (tăng khoảng 12,7%). Sự khác biệt của bê tông có sử dụng 1%, 2% sợi là không rõ rệt. Bê tông bị kiểm chế với tấm sợi GFRP sẽ tăng được cường độ chịu nén khi phá hoại của mẫu và số lượng lớp sợi hay chiều dày tấm sợi tăng sẽ kéo theo cường độ tăng theo. Kết quả thực nghiệm này phù hợp với các nghiên cứu trước đây của các tác giả trên thế giới [12-14].

Kết quả trên cũng cho thấy sự khác biệt không lớn giữa UHPC có hàm lượng sợi thép 1% và 2% trong hiệu quả gia cường bằng GFRP, điều này có thể được giải thích bởi hai nguyên nhân sau: Thứ nhất, khi hàm lượng sợi thép trong UHPC tăng lên, khả năng kháng nứt và phân tán ứng suất của bê tông được cải thiện, dẫn đến vật liệu có khả năng chịu kéo tốt hơn và biến dạng dẻo cao hơn. Tuy nhiên, khi bị bao bọc bởi tấm GFRP, hiệu quả của lớp kiểm chế bên ngoài sẽ phần nào bị giới hạn do sự “chia sẻ” vai trò chống nứt và biến dạng giữa sợi thép bên trong và lớp bao bọc bên ngoài. Do đó, hiệu quả tăng thêm từ GFRP sẽ không còn rõ rệt khi bê tông đã được gia cường bằng lượng sợi cao; Thứ hai, ở hàm lượng sợi 2%, hỗn hợp UHPC bắt đầu giảm tính công tác và khả năng phân tán đồng đều của sợi trong cấu trúc bê tông. Điều này có thể làm giảm hiệu quả của sợi trong việc cải thiện tính dẻo và chịu nén, khiến cho cường độ nén gia tăng do lớp GFRP không còn chênh lệch nhiều so với trường hợp sợi 1%. Do đó, kết quả cho thấy hiệu quả gia cường của GFRP tăng cao nhất đối với UHPC không sợi, sau đó giảm dần khi hàm lượng sợi tăng, và sự khác biệt giữa 1% và 2% trở nên không đáng kể là hoàn toàn phù hợp với cơ chế tương tác giữa hai dạng gia cường bên trong và bên ngoài.

Một số nghiên cứu trên thế giới đã đề xuất công thức tính cường độ mẫu bị kiểm chế thông qua các công thức sau:

- Theo ACI 440-2R-17: cường độ của bê tông được kiểm chế bởi sợi FRP, ký hiệu f'_{cc} được tính toán theo công thức sau:

$$f'_{cc} = f'_{co} + \psi_f 3,3 \kappa_a f_l \quad (1)$$

$$f_l = \frac{2E_f t_f \varepsilon_{fe}}{D} \quad (2)$$

Trong đó: f'_{co} là cường độ của bê tông khi không bị kiểm chế; $\psi_f = 0,95$; κ_a hệ số xét đến hình dạng của mẫu, $\kappa_a = 1$ khi mẫu hình trụ tròn; E_f là mô đun đàn hồi của tấm sợi FRP; t_f là chiều dày tấm sợi (như vậy trong nghiên cứu này trường hợp sử dụng 01 lớp sợi $t_f = 0,64$ mm và trong trường hợp sử dụng 02 lớp sợi $t_f = 2 \times 0,64 = 1,28$ mm, chiều dày tấm sợi trong từng trường hợp được thể hiện trong Bảng 2); D là đường kính của mẫu thí nghiệm; ε_{fe} : biến dạng có hiệu của tấm FRP ở thời điểm phá hoại và được xác định theo công thức sau:

$$\varepsilon_{fe} = K_e \varepsilon_{fu} \quad (3)$$

Trong đó: K_e là hằng số thay đổi từ 0,57 đến 0,61; ε_{fu} Biến dạng phá hoại của tấm sợi FRP khi thí nghiệm kéo trực tiếp. Tuy nhiên, giới hạn trong công thức này là tiêu chuẩn ACI 440-2R-17 [10] chỉ áp dụng đến cường độ $f'_{co} < 100$ MPa; các mẫu thí nghiệm UHPC trong nghiên cứu này đều có cường độ lớn hơn 100 MPa.

- Theo nghiên cứu của Zhohrevand và Mirmiran năm 2013 [11]

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3,2519 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (4)$$

- Theo nghiên cứu của Lam và cộng sự năm 2021 [12]

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2,8 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (5)$$

- Theo nghiên cứu của Liao và cộng sự năm 2022 [13]

$$\frac{f'_{cf}}{f'_{co}} = 0,56 + 2,35 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,6} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,1} \text{ khi } \rho_k < 0,075 \quad (6)$$

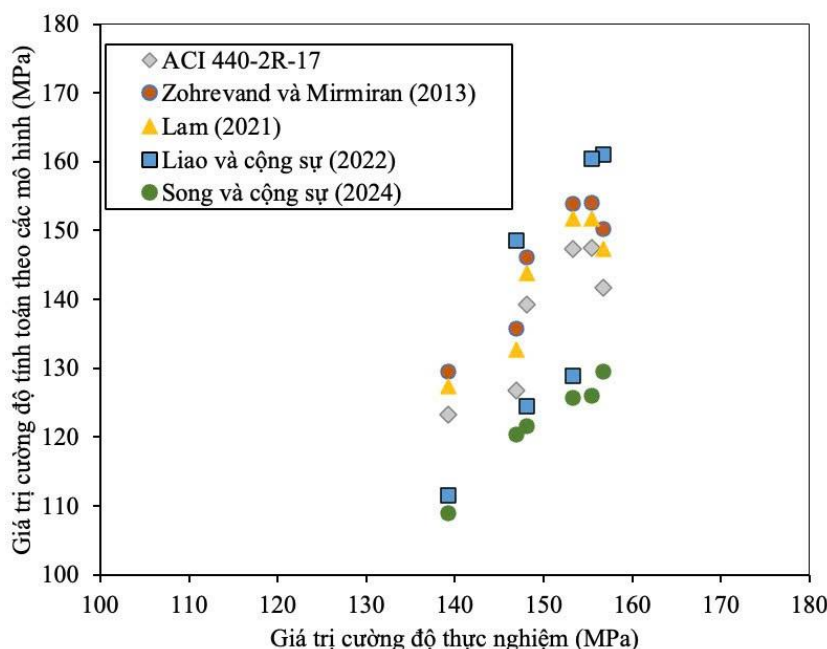
$$\frac{f'_{cf}}{f'_{co}} = 1 + 0,606 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,6} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,7} \text{ khi } \rho_k > 0,075 \quad (7)$$

Trong đó: ρ_k là hệ số kiểm chế được xác định theo công thức sau với ε_{co} là biến dạng lớn nhất của mẫu UHPC khi không bị kiểm chế.

$$\rho_k = \frac{2E_f t_f}{\frac{f'_{co} D}{\varepsilon_{co}}} \quad (8)$$

Theo nghiên cứu của Song và các cộng sự năm 2024 [14]

$$\frac{f'_{cf}}{f'_{co}} = 0,35 + 2,566 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,455} \quad (9)$$



Hình 5. Mối quan hệ giữa giá trị cường độ thực nghiệm và cường độ dự báo qua các mô hình.

Biểu đồ so sánh giữa giá trị cường độ chịu nén thực nghiệm và giá trị dự báo từ các mô hình hiện có được tổng hợp trong Hình 5 cho thấy mức độ phù hợp giữa các mô hình và thực tế thí nghiệm. Đường chéo biểu thị sự trùng khớp lý tưởng (giá trị tính toán = giá trị thực nghiệm). Theo như các kết quả dự báo, kết quả thực nghiệm phù hợp với mô hình được đề xuất bởi Zohrevand và Mirmiran (2013), mô hình Lam (2021) và mô hình trong tiêu chuẩn ACI 440-2R-17, các mô hình khác đều có độ lệch lớn hơn. Nguyên nhân có thể giải thích là các nhóm tác giả đề xuất cho mô hình chung áp dụng cho cả sợi thủy tinh và sợi các bon, cũng như chưa xét đến đầy đủ đặc tính đặc trưng của UHPC như độ giòn hoặc tương tác sợi-pha nền của bê tông. Trong khi đó nghiên cứu của Zohrevand và Mirmiran được thực hiện trên loại sợi thủy tinh tương tự như nghiên cứu thực nghiệm này. Mô hình trong tiêu chuẩn ACI 440-2R-17 có công thức đơn giản và có kết quả dự báo tiệm cận với giá trị thực nghiệm, do đó cũng có thể sử dụng để ước tính khả năng chịu nén của mẫu khi bị kiểm chế. Nghiên cứu này cung cấp những kết quả ban đầu có ý nghĩa trong việc đánh giá hiệu quả kiểm chế của tấm GFRP đối với bê tông UHPC, đồng thời là cơ sở quan trọng để phát triển mô hình dự báo ứng xử chịu nén. Tuy nhiên, do số lượng thí nghiệm còn hạn chế, cần thực hiện thêm nhiều thí nghiệm hơn nữa để hoàn thiện và hiệu chỉnh mô hình một cách toàn diện hơn.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu này đã thực hiện thí nghiệm nhằm đánh giá ứng xử chịu nén của bê tông UHPC khi bị kiểm chế bởi tấm sợi thủy tinh GFRP, đồng thời xem xét ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến cường độ chịu nén. Đây là một trong những thí nghiệm mới ở Việt Nam nhằm tập trung nghiên cứu chuyên sâu hơn về đặc tính bê tông siêu tính năng UHPC, đặc biệt khi kết hợp với vật liệu FRP, một vật liệu đã được sử dụng nhiều trong việc sửa chữa và tăng cường bê tông thông thường và kết cấu BTCT. Hiệu quả tăng cường thu được thông qua nghiên cứu thực nghiệm phù hợp với các nghiên cứu trên thế giới. Hiệu quả tăng cường tăng khi chiều dày lớp sợi GFRP tăng. Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ chịu nén của bê tông UHPC tăng rõ rệt khi tăng số lớp tấm GFRP, trong phạm vi các mức hàm lượng đã khảo sát (0%, 1%, 2%). Mức độ gia tăng tỷ lệ thuận với số lớp GFRP, trong đó UHPC không sợi tăng mạnh nhất (28,8%). Bê tông có sợi 1% và 2% cũng tăng cường độ (20,9%

và 12,7%), nhưng sự khác biệt giữa hai mức này không đáng kể. Kết quả này khẳng định hiệu quả kiểm chế của GFRP và phù hợp với các nghiên cứu trước đó.

Qua việc phân tích đánh giá các kết quả thí nghiệm, nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh là có thể sử dụng mô hình của Zohrevand & Mirmiran (2013), mô hình Lam (2021) và tiêu chuẩn ACI 440-2R-17 để xác định trước khả năng chịu nén của mẫu bị kiểm chế. Một số mô hình của các tác giả nghiên cứu gần đây dự báo cần sử dụng các kết quả đo đặc thông qua nghiên cứu thực nghiệm như biến dạng cực hạn của tấm sợi ở giai đoạn phá hoại.

Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả kiểm chế của tấm GFRP đối với bê tông UHPC, cung cấp kết quả có ý nghĩa trong việc phát triển mô hình dự báo ứng xử chịu nén. Từ đó mở ra hướng nghiên cứu trong tương lai tập trung vào việc tăng số lượng mẫu thí nghiệm, sử dụng các vật liệu FRP khác nhau cũng như số lớp bọc nhiều hơn, và bê tông UHPC có cường độ cao hơn ở trong các điều kiện bảo dưỡng khác nhau hoặc có thể mở rộng nghiên cứu thêm trong các điều kiện môi trường khác nhau về nhiệt độ, độ ẩm để hoàn thiện và hiệu chỉnh mô hình một cách toàn diện hơn.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2025-CT-008.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. Liao, J. J. Zeng, X. C. Lin, Y. Zhuge, S.H. He, Punching Shear Behavior of FRP Grid-Reinforced Ultra-High Performance Concrete Slabs, *Journal of Composites for Construction*, 27 (2023). <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-4148>
- [2]. F. Yu, D. Sun, M. Hu, J. Wang, Study on the pores characteristics and permeability simulation of pervious concrete based on 2D/3D CT images, *Construction and Building Materials*, 200 (2019) 687-702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.135>
- [3]. L. Xu, Q. Lu, Y. Chi, Y. Yang, M. Yu, Y. Yan, Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber, *Construction and Building Materials*, 204 (2019) 754–67. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.202>
- [4]. K. Miao, Y. Wei, F. Dong, K. Zheng, J. Wang, Experimental study on concrete-filled steel tube columns with inner distributed seawater and sea sand concrete-filled fiber-reinforced polymer tubes under axial compression, *Composite Structures*, 320 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117181>
- [5]. L. Zeng, W. Yu, Z. Mo, S. Huang, H. Yuan, Experimental and Numerical Studies on Sea Sand Concrete Filled Stainless Steel Tube with Inner FRP Tube Subjected to Axial Compression, *China Ocean Engineering*, 37 (2023) 272–87. <https://doi.org/10.1007/s13344-023-0023-5>
- [6]. J. J. Wang, S. S. Zhang, X. F. Nie, T. Yu, Compressive behavior of FRP-confined ultra-high-performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), *Composite Structures*, 312 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116879>
- [7]. 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*, 16 (2022) 11-23. [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(5V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(5V)-01)

- [8]. 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 12 (2013). [https://www.doi.org/10.55228/JTST.12\(1\).63-71](https://www.doi.org/10.55228/JTST.12(1).63-71)
- [9]. Hoàng Việt Hải, Thực nghiệm và mô phỏng ứng xử chịu kéo của bê tông siêu tính năng, Tạp chí Khoa học Giao Thông Vận Tải, 74 (2023). <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.6.2>
- [10]. ACI 440-2R-17, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440 (2017).
- [11]. P. Zohrevand, A. Mirmiran, Stress-strain model of ultra-high-performance concrete confined by fiber-reinforced polymers, Journal of Materials in Civil Engineering, 25 (2013) 1822–1829. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000769](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000769)
- [12]. L. Lam, L. Huang, J.H. Xie and J.F. Chen, Compressive behavior of ultra-high performance concrete confined with FRP, Composite Structures, 274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114321>
- [13]. J. Liao, J. J. Zeng, Q. M. Gong, W. M. Quach, W. Y. Gao, L. Zhang, Design-oriented stress-strain model for FRP-confined ultra-high-performance concrete (UHPC). Construction and Building Materials, 318 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126200>
- [14]. S. Song, B. Zhang, P. You, X. Yang, A review study on axial compression properties of UHPC columns confined by FRP, Frontiers in Materials, 10 (2024). <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1339386>