

# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ THIẾT LẬP CÁC MÔ HÌNH PHÁ HOẠI KHÁC NHAU CỦA BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO DƯỚI ĐIỀU KIỆN NÉN HẠN CHẾ NỖ HÔNG

Nguyễn Duy Liêm<sup>a</sup>, Nguyễn Huỳnh Tấn Tài<sup>a,\*</sup>, Lê Thị Bích Thủy<sup>b</sup>, Phạm Đình Cường<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp. Hồ Chí Minh, 01 đường Võ Văn Ngân, phường Linh Chiểu, Tp. Thủ Đức, Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

<sup>b</sup>*Khoa Xây dựng, Trường Đại học Văn Lang, 45 đường Nguyễn Khắc Nhu, phường Cô Giang, quận 1, Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

<sup>c</sup>*Phòng Hành chính Quản trị, Trường Đại học Công nghệ Sài Gòn, 180 đường Cao Lỗ, phường 4, quận 8, Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

*Nhận ngày 06/01/2022, Sửa xong 29/3/2022, Chấp nhận đăng 29/3/2022*

## Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, cường độ nén dưới điều kiện hạn chế nở hông của bê tông tính năng cao (high-performance fiber-reinforced concrete, HPFRC) đã được thí nghiệm và phân tích theo ba mô hình phá hoại nén: mô hình Mohr-Coulomb, Hoek-Brown và Johnston. Các mẫu nén hình trụ có cùng đường kính 114 mm, chiều cao 200 mm, có vỏ làm bằng ống thép và nhựa uPVC, tải trọng thiết kế chỉ tác dụng lên lõi HPFRC. Bê tông HPFRC lõi được gia cường hỗn hợp sợi thép với hàm lượng theo thể tích bao gồm 1,0% sợi dài có móc và 0,5% sợi ngắn thẳng phẳng. Vỏ mẫu sử dụng bao gồm vỏ uPVC dày 3,2 mm (ký hiệu uPVC3.2) và 3,8 mm (ký hiệu uPVC3.8) trong khi vỏ thép dày 1,4 mm (ký hiệu ST1.4) và 1,8 mm (ký hiệu ST1.8). Thứ tự các loại vỏ theo độ lớn cường độ nén lõi HPFRC quan sát được như sau: Không có vỏ < uPVC3.2 < uPVC3.8 < ST1.4 < ST1.8. Từ kết quả nén mẫu, các biểu thức được thiết lập theo ba mô hình phá hoại nén để dự đoán khả năng chịu nén của lõi HPFRC.

*Từ khoá:* HPFRC; hạn chế nở hông; mô hình Mohr-Coulomb; mô hình Hoek-Brown; mô hình Johnston.

AN EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS ON COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH-PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE UNDER CONFINEMENT WITH DIFFERENT FAILURE MODELS

## Abstract

In this study work, the confined compressive strength of high-performance fiber-reinforced concrete (HPFRC) was experimentally investigated and analyzed according to three failure models, including Mohr-Coulomb, Hoek-Brown and Johnston model. The cylindrical compressive specimens covered by steel/uPVC tube were subjected to applied load only on HPFRC cores. The HPFRC cores had same diameter of 114 mm and height of 200 mm. The HPFRC core contained a systems hybrid fibers, comprising of 1.0% long hooked and 0.5% short smooth fibers by volume. The thicknesses of uPVC covers were 3.2 mm (notation PVC3.2) and 3.8 mm (notation PVC3.8) while those of steel covers were 1.4 mm (notation ST1.4) and 1.8 mm (notation ST1.8). The confined compressive strengths of the HPFRC cores were ranked regarding cover types as follows: No cover < uPVC3.2 < uPVC3.8 < ST1.4 < ST1.8. The equations were established according to three failure theories in confined compression to forecast.

*Keywords:* HPFRC; confinement; Mohr-Coulomb model; Hoek-Brown model; Johnston model.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(2V\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(2V)-06) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [taint@hcmute.edu.vn](mailto:taint@hcmute.edu.vn) (Tài, N. H. T.)

## 1. Giới thiệu

Hiện nay, bê tông cốt sợi có tính năng cao (high-performance fiber-reinforced concrete, HPFRC) được đánh giá là vật liệu xây dựng rất tiềm năng do có các đặc tính cơ học ưu việt vượt trội so với bê tông thường (normal concrete, NC) và bê tông cường độ cao (high-performance concrete, HSC) [1, 2]. Một số đặc tính cơ học ưu việt của HPFRC có thể kể đến như sau: cường độ nén cao hơn 80 MPa [3], cường độ kéo có thể trên 10 MPa và cường độ kéo uốn trên 20 MPa [4, 5], khả năng hấp thụ năng lượng lớn và tuổi thọ cao [6–9]. Do vậy, HPFRC đã và đang được ứng dụng trong các công trình xây dựng ngày càng nhiều để giảm kích thước của các bộ phận kết cấu và nâng cao độ bền, tuổi thọ của công trình [10].

Trong các thành phần kết cấu công trình, cột là kết cấu phổ biến và ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả không gian và độ bền của một cao ốc hay tòa nhà. Do đó, việc nâng cao sức kháng và giảm thiểu kích thước của cột là mục tiêu hướng đến của nhiều nhà nghiên cứu. Sử dụng vỏ nhựa uPVC hay vỏ thép cho cột bê tông là một trong những giải pháp hữu hiệu để nâng cao khả năng chịu tải cho cột. Điều này đạt được là do lớp vỏ uPVC hay vỏ thép có thể hạn chế biến dạng hông của lõi bê tông khi chịu nén dọc trục. Nói một cách khác, khi tải trọng tác động lên lõi bê tông, lớp vỏ bao quanh sinh ra một áp lực hông thụ động tác dụng lên lõi. Bên cạnh đó, lớp vỏ này còn đóng vai trò như một ván khuôn, giúp tiết kiệm khá nhiều thời gian thi công. Nhiều nhà nghiên cứu đã công bố các nghiên cứu về ảnh hưởng của lớp vỏ uPVC hay vỏ thép đối với ứng xử nén lõi làm bằng các vật liệu bê tông khác nhau [11–14]. Woldemariam và cs. [11] nghiên cứu ứng xử nén các cột bê tông đổ trong ống uPVC. Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ, độ dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông khi có ống cao hơn đáng kể so với bê tông không ống uPVC. Tương tự, Tue và cs. [12, 13] nghiên cứu về lõi bê tông hạn chế nở hông thụ động chế tạo từ bê tông tính năng siêu cao (UHPC) với cường độ nén từ 150 đến 180 MPa đổ trong ống thép. Kết quả thí nghiệm cho thấy khi độ dày của ống thép tăng lên, độ bền và độ dẻo của lõi UHPC tăng lên rõ rệt. Gupta [14] đã nghiên cứu ảnh hưởng của ống uPVC đối với ứng xử nén lõi các cột bê tông. Các ống uPVC được sử dụng có đường kính khác nhau là 140, 160 và 200 mm, chiều cao không đổi là 500 mm, lõi bê tông có cường độ nén không hạn chế nở hông từ 23,6 đến 43,5 MPa. Kết luận của nghiên cứu này là các ống uPVC có thể cải thiện 2,65 lần về độ dẻo và 3,52 lần về khả năng hấp thụ năng lượng của lõi so với khi không có ống uPVC bọc cho cột.

Mohr-Coulomb, Hoek-Brown và Johnston [15–17] đề xuất các mô hình biểu thị mối quan hệ giữa cường độ nén dọc trục và áp lực nén hông của vật liệu đất hay đá. Nhiều nhà nghiên cứu sau này đã điều chỉnh và áp dụng các mô hình này cho vật liệu bê tông [18–22]. Ansari và Li [18], Candappa và cs. [19] đã điều chỉnh và áp dụng mô hình phá hoại nén Mohr-Coulomb cho bê tông cường độ cao chịu trạng thái đa trục ứng suất. Theo kết quả nghiên cứu từ [18, 19], cường độ dọc trục của bê tông cường độ cao tăng khi áp suất hông tăng. Setunge và cs. [20], Yapı Merkezi [21] nghiên cứu sức kháng của bê tông cường độ cao khi chịu tải ba trục. Kết quả nghiên cứu cho thấy cường độ phá hoại của bê tông cường độ cao khi nén ba trục phù hợp với mô hình phá hoại nén của Johnston. Girgin và cs. [22] áp dụng cả mô hình Hoek-Brown và Johnston áp dụng cho bê tông cường độ cao chịu nén ba trục. Các tác giả kết luận rằng có thể áp dụng được cả hai mô hình để đánh giá cường độ phá hoại của bê tông cường độ cao.

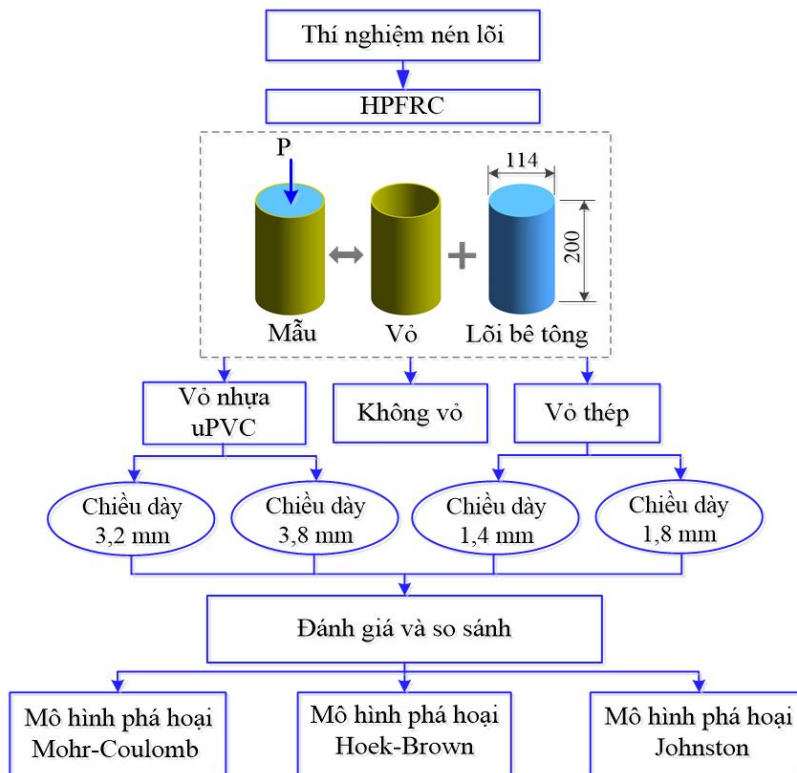
Từ các nghiên cứu đã đề cập ở trên, mặc dù đã có một số lượng lớn các nghiên cứu về nén trong điều kiện hạn chế nở hông cho bê tông, nhưng thí nghiệm nén lõi HPFRC sử dụng vật liệu trong nước vẫn chưa được nghiên cứu. Ngoài ra, việc áp dụng các mô hình Mohr-Coulomb, Hoek-Brown và Johnston cho vật liệu HPFRC là rất ít thông tin. Do đó, việc nghiên cứu cường độ nén dưới điều kiện hạn chế nở hông của HPFRC sử dụng vật liệu trong nước là rất cần thiết. Từ kết quả thí nghiệm, tác giả sẽ phân tích nén phá hoại HPFRC theo ba mô hình Mohr-Coulomb, Hoek-Brown và Johnston.

Bên cạnh đó, các đặc tính của cốt sợi trộn trong HPFRC, ví dụ như chiều dài sợi, hướng xoay và phân bố sợi, được đánh giá là những yếu tố ảnh hưởng lớn đến cường độ và các đặc tính cơ học khác của HPFRC [23, 24]. Gần đây, nhóm tác giả của bài báo này đã nghiên cứu sự kết hợp giữa hai loại sợi thép có kích thước khác nhau cho ứng xử kéo của HPFRC chế tạo tại Việt Nam [25]. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự kết hợp hai loại sợi làm gia tăng sức kháng kéo của HPFRC đáng kể so với sử dụng từng loại sợi có cùng hàm lượng. Do vậy trong bài báo này, các tác giả tiếp tục dùng cấp phối HPFRC và hỗn hợp sợi để nghiên cứu đề tài. Việc hiểu rõ các tính chất cơ học của HPFRC sẽ giúp ứng dụng vật liệu này trong nhiều công trình thực tế, mang lại hiệu quả kinh tế - xã hội lớn.

## 2. Thí nghiệm

### 2.1. Vật liệu và phương pháp chế tạo mẫu nghiên cứu

Hình 1 thể hiện sơ đồ tổng thể chương trình thí nghiệm thực hiện trong bài báo này. Bảng 1 cung cấp thành phần cấp phối vữa bê tông HPFRC theo tỉ lệ khối lượng bao gồm: xi măng, silica fume, cát trắng, tro bay, phụ gia hóa dẻo, nước. Xi măng sử dụng là loại INSEE PCB 40. Cát sử dụng trong nghiên cứu là cát trắng mịn với đường kính hạt < 1 mm do công ty UHPC Việt cung cấp. Theo như mô tả ở Hình 1, các mẫu nén thí nghiệm có hình lăng trụ cùng đường kính trong 114 mm và chiều cao 200 mm được thiết kế với 5 loại vỏ: không vỏ (tên mẫu “Không vỏ”), vỏ uPVC dày 3,2 mm (tên mẫu “PVC3.2”), vỏ uPVC dày 3,8 mm (tên mẫu “PVC3.8”), vỏ thép dày 1,4 mm (tên mẫu “ST1.4”) và vỏ thép dày 1,8 mm (tên mẫu “ST1.8”).



Hình 1. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm

Bảng 1. Thành phần vữa bê tông HPFRC theo tỉ lệ khối lượng

Cấp phối	Xi măng (kg/m <sup>3</sup> )	Silica fume (kg/m <sup>3</sup> )	Cát trắng (kg/m <sup>3</sup> )	Tro bay (kg/m <sup>3</sup> )	Phụ gia hóa dẻo (kg/m <sup>3</sup> )	Nước (kg/m <sup>3</sup> )
HPFRC	810	71	1013	203	40	263

Bảng 2. Tính chất cơ lý của hỗn hợp sợi thép

Loại sợi	Đường kính (mm)/ Chiều dài (mm)	Trọng lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	Mô đun đàn hồi (GPa)	Cường độ kéo (MPa)
Sợi thép to (1,0%)	0,5/35	7,9	200	> 1200
Sợi thép nhỏ (0,5%)	0,2/13	7,9	200	> 2500

Bảng 3. Tính chất cơ lý của vật liệu làm vỏ mẫu

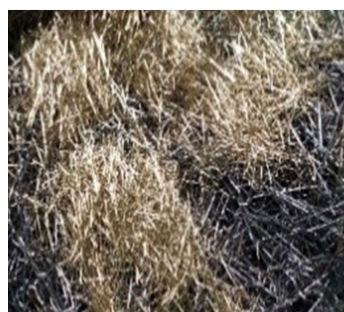
Loại vỏ mẫu	Trọng lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	Mô đun đàn hồi (MPa)	Hệ số giãn nở nhiệt (mm/m.°C)	Cường độ bền kéo đứt (MPa)
Vỏ nhựa uPVC	1,40	3000	0,08	50
Vỏ thép	7,85	200000	0,01	380

Lõi HPFRC sử dụng hỗn hợp sợi thép gia cường bao gồm: sợi thép to hai đầu móc (hooked) đường kính 0,5 mm, dài 35 mm với hàm lượng 1,0% theo thể tích, sợi thép nhỏ trơn thẳng (smooth) đường kính 0,2 mm, dài 13 mm với hàm lượng 0,5% theo thể tích. Hình 2 mô tả hai loại cốt sợi bằng ảnh chụp, Bảng 2 cung cấp một số thông tin về tính chất cơ lý của hai loại sợi thép sử dụng do công ty M.F.C Nam Việt cung cấp. Hai loại sợi thép có khối lượng riêng 7,9 g/cm<sup>3</sup> và mô đun đàn hồi 200 GPa. Cốt sợi to có cường độ kéo đứt lớn hơn 1200 MPa trong khi cốt sợi nhỏ có cường độ kéo đứt lớn hơn 2500 MPa. Tính chất cơ lý của vật liệu làm vỏ mẫu được trình bày ở Bảng 3 do các nhà sản xuất cung cấp. Vỏ uPVC sử dụng sản phẩm của công ty nhựa Bình Minh có cường độ kéo đứt 50 MPa, mô đun đàn hồi 3 GPa, trọng lượng riêng 1,4 g/cm<sup>3</sup>. Vỏ thép sử dụng sản phẩm của công ty



$d_f=0.5\text{mm}$ ,  $l_f=35\text{mm}$

(a) Sợi to hàm lượng 1,0% theo thể tích



$d_f=0.2\text{mm}$ ,  $l_f=13\text{mm}$

(b) Sợi nhỏ hàm lượng 0,5% theo thể tích

Hình 2. Ảnh chụp các loại sợi được sử dụng trong HPFRC

thép Hòa Phát có cường độ chảy 380 MPa, mô đun đàn hồi 200 GPa, trọng lượng riêng  $7,85 \text{ g/cm}^3$ . Hình 3 thể hiện ảnh chụp vỏ mẫu uPVC và vỏ thép dùng chế tạo mẫu.



(a) Vỏ nhựa uPVC



(b) Vỏ thép

Hình 3. Ảnh chụp vỏ mẫu uPVC và vỏ thép dùng chế tạo mẫu

Hỗn hợp vật liệu được trộn bằng máy trộn cưỡng bức có dung tích thùng trộn 60 lít. Xi măng, cát, silica fume, tro bay được trộn khô trong khoảng 10 phút, sau đó nước được thêm vào và trộn tiếp khoảng 5 phút. Phụ gia siêu dẻo được bổ sung từ từ, thêm vào từng đợt để có thể điều chỉnh đạt độ dẻo phù hợp. Sau đó sợi thép được cho vào trộn đều. Sau khi đúc mẫu 24 giờ, tất cả mẫu thí nghiệm được bảo dưỡng ngâm trong bể nước có nhiệt độ trung bình khoảng  $25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  và được đem nén ở 28 ngày tuổi ở trạng thái khô.

## 2.2. Thiết lập thí nghiệm

Hình 4(a) mô tả máy MATEST có khả năng tải lớn nhất 3000 kN dùng thực hiện thí nghiệm nén, tốc độ gia tải 3 kN/s. Các mẫu nén trước khi thí nghiệm phải mài phẳng đầu trên. Để có thể nén lõi bê tông HPFRC mà không bị cần lên vỏ, thí nghiệm đã dùng tấm đệm thép mài nhẵn có tổng bề dày trên 15 mm với đường kính xấp xỉ đường kính trong của mẫu nén, xem Hình 4(b). Trong quá trình thí



(a) Máy MATEST



(b) Tấm đệm thép



(c) Thiết bị đo biến dạng

Hình 4. Ảnh chụp thiết lập thí nghiệm nén mẫu

nghiệm, biến dạng và lực nén được máy ghi lại. Biến dạng nở hông ( $\varepsilon_L$ ) được đo bằng thiết bị đo biến dạng (strain-gauge) dọc theo chu vi mẫu như mô tả ở Hình 4(c). Biến dạng trục ( $\varepsilon_A$ ) và cường độ nén của lõi bê tông HPFRC ( $f'_{cc}$ ) xác định theo công thức (1). Trong đó biến dạng dọc trục của lõi lấy gần đúng theo chuyển vị của máy ( $\Delta H$ ) chia cho chiều cao mẫu ( $H$ ),  $P_{max}$  và  $D = 114$  mm lần lượt là lực nén lớn nhất và đường kính lõi bê tông HPFRC. Mỗi loại vỏ đúc thí nghiệm 2 mẫu sau đó lấy kết quả trung bình đánh giá, phân tích.

$$\begin{cases} \varepsilon_A = \Delta H/H \\ f'_{cc} = \frac{4P_{max}}{\pi D^2} \end{cases} \quad (1)$$

### 3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

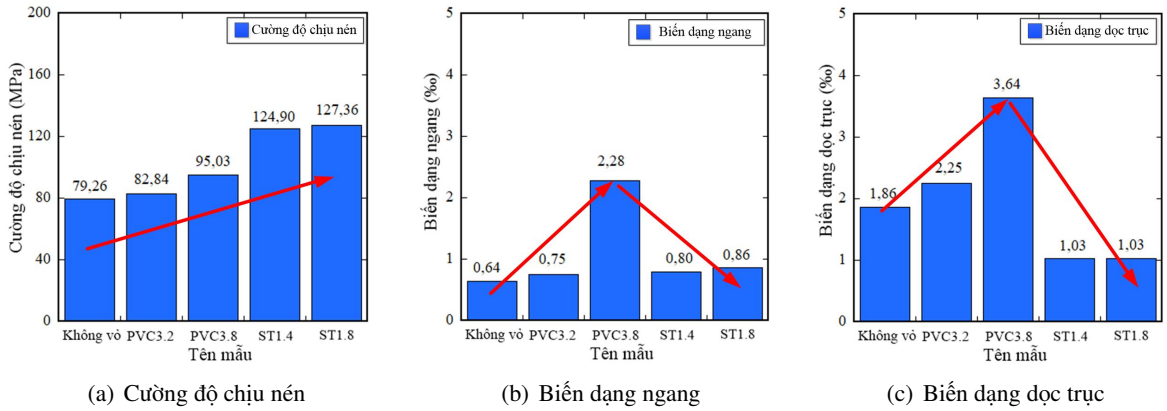
#### 3.1. Thông số nén

Bảng 4 cung cấp thông số nén cho các loại mẫu thí nghiệm theo các loại vỏ [6]. Các thông số nén bao gồm cường độ nén của lõi HPFRC ( $f'_{cc}$ ), khả năng biến dạng hông ( $\varepsilon_L$ ), khả năng biến dạng dọc trục ( $\varepsilon_A$ ). Hình 5 so sánh thông số nén của các mẫu theo các loại vỏ. Theo thể hiện ở Bảng 4 và Hình 5, giá trị  $f'_{cc}$  trong khoảng 79,26 - 127,36 MPa. Thứ tự xếp theo loại vỏ xét theo  $f'_{cc}$  có giá trị lớn dần như sau: không vỏ < uPVC3.2 < uPVC3.8 < ST1.4 < ST1.8. Về quy luật,  $f'_{cc}$  tăng rõ rệt khi chiều dày vỏ tăng, bất kể là vỏ uPVC hay vỏ thép. Tuy nhiên, các thông số  $\varepsilon_L$  và  $\varepsilon_A$  có xu hướng không rõ ràng: ví dụ vỏ uPVC3.8 tạo giá trị lớn nhất về biến dạng mặc dù cường độ không phải lớn nhất:  $\varepsilon_L =$

Bảng 4. Thông số nén của các mẫu theo các loại vỏ

Tên mẫu	Loại vỏ	Cường độ chịu nén (MPa)	Biến dạng ngang (%)	Biến dạng dọc trục (%)
Không vỏ-01	Không vỏ	78,67	-0,61	1,79
Không vỏ-02		79,85	-0,66	1,96
Giá trị trung bình		79,26	-0,64	1,86
PVC3.2-01	Nhựa uPVC	82,59	-0,72	2,14
PVC3.2-02		83,08	-0,78	2,35
Giá trị trung bình		82,84	-0,75	2,25
PVC3.8-01	Nhựa uPVC	93,76	-2,06	3,66
PVC3.8-02		96,31	-2,49	3,62
Giá trị trung bình		95,03	-2,28	3,64
ST1.4-01	Vỏ thép	125,40	-0,83	0,82
ST1.4-02		124,33	-0,77	1,24
Giá trị trung bình		124,86	-0,80	1,03
ST1.8-01	Vỏ thép	127,56	-0,59	1,02
ST1.8-02		127,17	-1,13	1,04
Giá trị trung bình		127,36	-0,86	1,03

2,28%,  $\epsilon_A = 3,64\%$ . Kết quả biến dạng bất thường của uPVC3.8 cần được xác minh thêm ở nghiên cứu trong tương lai.



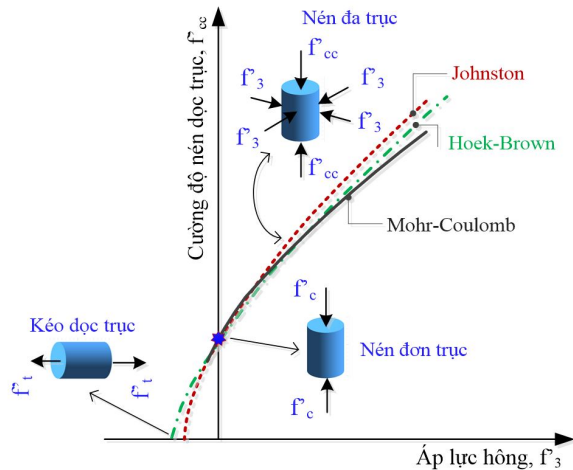
Hình 5. So sánh thông số nén của các mẫu theo các loại vò

### 3.2. Mô hình phá hoại nén dưới điều kiện hạn chế nở hông

Trong mục này, biến dạng dọc của mẫu thí nghiệm là một thông số được sử dụng trong phân tích. Tuy nhiên, việc sử dụng chuyển vị của máy thí nghiệm MATEST để xác định biến dạng tuyệt đối của mẫu thí nghiệm từ đó xác định biến dạng dọc theo công thức (1) có thể chưa đạt độ tin cậy cao. Tuy nhiên, nhóm tác giả muốn giới thiệu các mô hình phá hoại và tạm phân tích các mô hình theo dữ liệu thí nghiệm được đánh giá là còn hạn chế nghiên cứu này, khi có dữ liệu thí nghiệm tốt hơn, có thể tham khảo các mô hình này để cập nhật, hoàn thiện.

#### a. Tổng thể về ba mô hình phá hoại nén

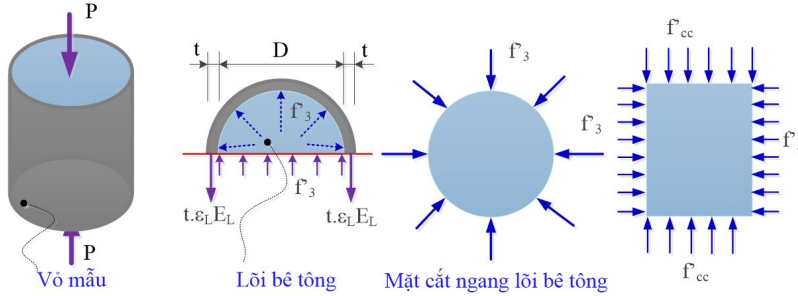
Hình 6 thể hiện các đường cong điển hình của ba mô hình phá hoại nén, bao gồm mô hình Mohr-Coulomb, Hoek-Brown và Johnston. Theo thể hiện ở Hình 6, mô hình Mohr-Coulomb chỉ xây dựng cho tải nén dọc trục [22], trong khi mô hình Hoek-Brown và Johnston áp dụng cho cả tải nén và kéo



Hình 6. Đường cong điển hình của ba tiêu chí phá hoại dưới thí nghiệm nén

đọc trực [16, 17]. Mẫu nén khí phá hoại đạt cường độ dọc trục ( $f'_{cc}$ ) và ứng suất nén hông thụ động ( $f'_3$ ) tạo bởi hiệu ứng hạn chế nở hông từ vỏ mẫu. Hình 7 thể hiện trạng thái ứng suất trong lõi và vỏ: lõi chịu cả  $f'_3$  và  $f'_{cc}$  trong khi vỏ chỉ chịu  $f'_3$ . Giá trị  $f'_3$  xác định theo biểu thức (2) trên cơ sở cân bằng tĩnh học, trong đó  $t$  là bề dày vỏ,  $D$  là đường kính lõi,  $\varepsilon_L$  là biến dạng hông,  $E_L$  là mô đun đàn hồi của vỏ.

$$f'_3 = \frac{2t\varepsilon_L E_L}{D} \tag{2}$$



Hình 7. Trạng thái ứng suất của lõi bê tông và vỏ mẫu

b. Phân tích kết quả thí nghiệm theo mô hình phá hoại Mohr-Coulomb

Biểu thức (3) thể hiện mô hình nén phá hoại Mohr-Coulomb cho vật liệu rời rạc dưới tải trọng nén đa trục, trong đó  $f'_{cc}$  là hàm số của các biến: lực dính  $c$ , góc nội ma sát  $\phi$  và ứng suất nén hông thụ động  $f'_3$ . Khi không có ứng suất hông, tức là khi  $f'_3 = 0$ , giá trị  $f'_{cc}$  được tính theo biểu thức (4). Theo nghiên cứu của Richart và cs. [26], hệ số nén hông  $k$  chỉ phụ thuộc vào  $\phi$  và được tính theo biểu thức (5). Khi này, biểu thức (3) trở thành biểu thức (6) để xác định giá trị  $f'_{cc}$ .

$$f'_{cc} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} f'_3, \quad f'_{cc} \geq f'_3 \tag{3}$$

$$f'_{cc} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}, \quad (f'_3 = 0) \tag{4}$$

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \tag{5}$$

$$f'_{cc} = f'_c + k f'_3 \Leftrightarrow \frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + k \frac{f'_3}{f'_c} \tag{6}$$

Từ kết quả thí nghiệm, phương trình phá hoại nén theo mô hình Mohr-Coulomb được thể hiện trong Bảng 5. Theo như Bảng 5, giá trị  $f'_3$  được tạo ra từ vỏ uPVC từ 0,13 đến 0,46 MPa trong khi  $f'_3$  được tạo ra từ vỏ uPVC từ 3,93 đến 5,43 MPa. Hệ số nén hông  $k$  thay đổi từ 9,84 đến 34,72.

Bảng 5. Kết quả phân tích theo tiêu chí phá Mohr-Coulomb đối với lõi HPFRC

Tên mẫu	$f'_3$ (MPa)	Giá trị $k$	Phương trình
uPVC3.2	0,13	28,27	$f'_{cc} = f'_c + 28,27 f'_3$
uPVC3.8	0,46	34,72	$f'_{cc} = f'_c + 34,72 f'_3$
ST1.4	3,93	11,62	$f'_{cc} = f'_c + 11,62 f'_3$
ST1.8	5,43	9,84	$f'_{cc} = f'_c + 9,84 f'_3$



c. Phân tích kết quả thí nghiệm theo mô hình phá hoại Hoek-Brown

Mô hình Hoek-Brown [16] áp dụng cho đá với cường độ nén  $f'_c \geq 20$  MPa được thể hiện qua biểu thức (7). Trong biểu thức (7), các hệ số  $s$  và  $m$  là các hằng số của vật liệu:  $m$  biểu thị độ cong của đường quan hệ giữa  $f'_{cc}$  và  $f'_3$ , giá trị của  $m$  phụ thuộc vào loại đá trong khi giá trị của  $s$  thay đổi từ 0 đến 1 biểu thị cho độ nguyên vẹn của đá. Trong nghiên cứu này, lõi HPFRC xem như nguyên vẹn nên  $s$  có giá trị 1, giá trị hệ số  $m$  có thể tìm thông qua biểu thức (8) trên cơ sở kết quả thí nghiệm. Bảng 6 cung cấp kết quả phân tích theo mô hình phá hoại Hoek-Brown đối với lõi HPFRC sử dụng vỏ khác nhau. Theo như Bảng 6, giá trị hệ số  $m$  thay đổi từ 19,94 đến 73,85, tùy theo loại vỏ sử dụng.

$$f'_{cc} = f'_3 + (sf_c'^2 + mf_c'f_3')^{1/2} \tag{7}$$

$$m = \frac{(f'_{cc} - f'_3)^2 - sf_c'^2}{f_c'f_3'} \tag{8}$$

Bảng 6. Kết quả phân tích theo mô hình phá hoại Hoek-Brown đối với lõi HPFRC

Tên mẫu	Hệ số $m$	Phương trình
uPVC3.2	55,79	$f'_{cc} = f'_3 + (f_c'^2 + 55,79f_c'f_3')^{1/2}$
uPVC3.8	73,85	$f'_{cc} = f'_3 + (f_c'^2 + 73,85f_c'f_3')^{1/2}$
ST1.4	26,79	$f'_{cc} = f'_3 + (f_c'^2 + 26,79f_c'f_3')^{1/2}$
ST1.8	19,94	$f'_{cc} = f'_3 + (f_c'^2 + 19,94f_c'f_3')^{1/2}$

d. Phân tích kết quả thí nghiệm theo mô hình phá hoại Johnston

Theo mô hình Johnston, phá hoại của vật liệu nguyên khối thể hiện qua biểu thức (9). Trong biểu thức (9),  $M$  và  $B$  là các hệ số vật liệu,  $f'_c$  là cường độ nén của mẫu không hạn chế nở hông. Hệ số  $M$  biểu thị độ dốc tại  $f'_3 = 0$  của đường quan hệ giữa  $f'_{cc}$  và  $f'_3$ . Hệ số  $B$  biểu thị tính phi tuyến của mô hình. Theo nghiên cứu của Girgin và cs. [22], giá trị  $B$  trong biểu thức (9) có thể được tính bằng công thức (10), và như vậy, tỷ số  $M/B$  được xác định qua công thức (11) thông qua kết quả thí nghiệm.

$$f'_{cc} = f'_c \left( 1 + \frac{M}{B} \frac{f_3'}{f_c'} \right)^B \tag{9}$$

$$B = 1 - 0,0172(\log f'_c)^2, \quad f'_c \text{ in kPa, } (8 \text{ kPa} \leq f'_c \leq 600000 \text{ kPa}) \tag{10}$$

$$\frac{M}{B} = \left[ \left( \frac{f'_{cc}}{f_c'} \right)^{1/B} - 1 \right] \frac{f_c'}{f_r} \tag{11}$$

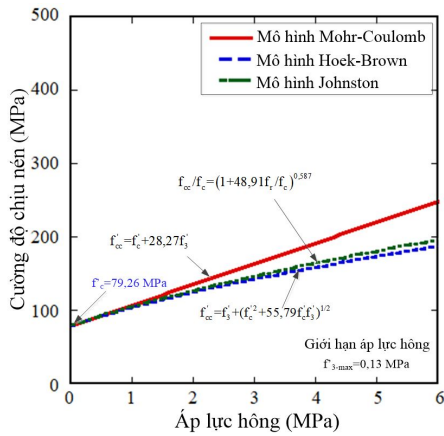
Bảng 7 cung cấp các biểu thức đã được phân tích theo mô hình phá hoại Johnston cho vật liệu HPFRC. Theo Bảng 7, giá trị  $M/B$  thay đổi từ 20,15 đến 63,18 tùy theo loại vỏ, trong khi giá trị của  $B = 0,587$  áp dụng cho tất cả các trường hợp vỏ sử dụng. Giá trị  $B = 0,587$  phân tích được trong nghiên cứu này là phù hợp kết quả nghiên cứu của Girgin và cs. [22]. Theo [22],  $B = 0,5$  cho bê tông cường độ cao nén không hạn chế nở hông từ 60 đến 132 MPa.

Bảng 7. Kết quả phân tích theo mô hình phá hoại Johnston đối với lõi HPFRC

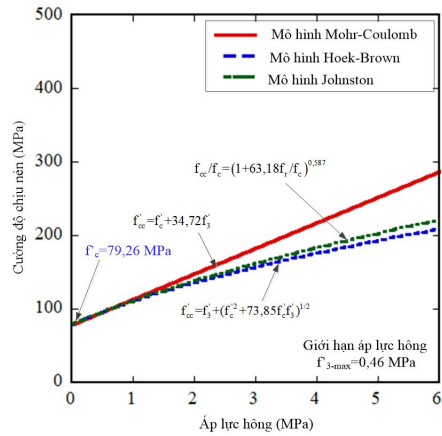
Tên mẫu	Hệ số $B$	Tỷ số $M/B$	Phương trình
uPVC3.2	0,587	48,91	$f_{cc}/f_c = (1 + 48,91f_r/f_c)^{0,587}$
uPVC3.8		63,18	$f_{cc}/f_c = (1 + 63,18f_r/f_c)^{0,587}$
ST1.4		23,59	$f_{cc}/f_c = (1 + 23,59f_r/f_c)^{0,587}$
ST1.8		20,15	$f_{cc}/f_c = (1 + 20,15f_r/f_c)^{0,587}$

4. So sánh ba mô hình nén phá hoại áp dụng cho lõi HPFRC

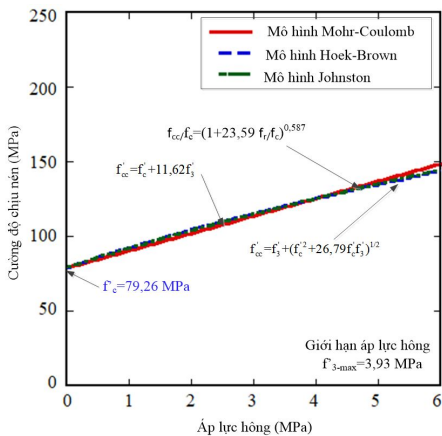
Hình 8 thể hiện các đường cong của mô hình nén phá hoại Mohr-Coulomb, Hoek-Brown và Johnston áp dụng cho lõi HPFRC ứng với các loại vỏ khác nhau. Theo thể hiện ở Hình 8, cường độ lõi HPFRC tăng khi cường độ nén hông tăng, mặc dù mức độ gia tăng khác nhau ở các mô hình (biểu thị thông qua độ dốc đường cong). Thứ tự mô hình theo độ dốc đường cong quan sát được ở Hình 8



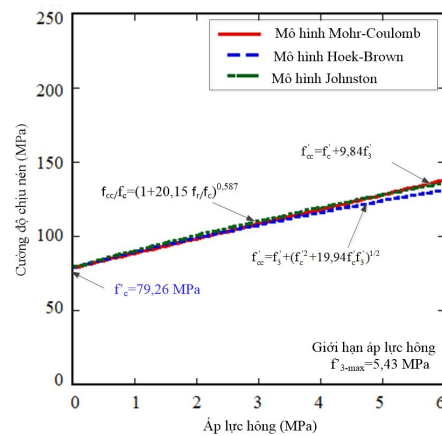
(a) PVC3.2



(b) PVC3.8



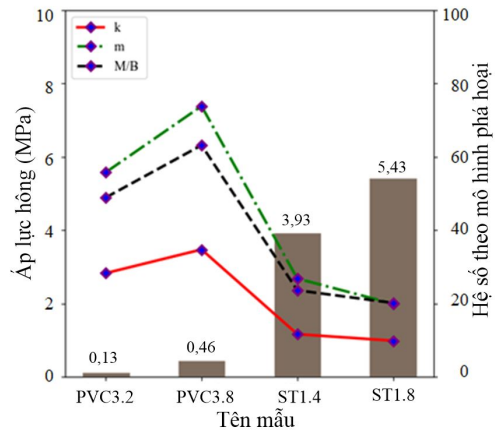
(c) ST1.4



(d) ST1.8

Hình 8. Mối quan hệ cường độ nén dọc trục và áp lực hông theo các mô hình phá hoại

như sau: Mohr-Coulomb > Johnston > Hoek-Brown. Các đường cong mô hình phân tán rõ hơn khi cường độ nén hông lớn dần. Hình 9 thể hiện ảnh hưởng áp lực hông đến các hệ số theo các mô hình phá hoại nén. Theo Hình 9, khi áp lực hông  $f'_3$  tăng, các hệ số  $k$ ,  $m$  và  $M/B$  tăng rõ rệt đối với vỏ uPVC nhưng giảm nhẹ đối với vỏ thép. Thứ tự loại vỏ theo độ lớn các hệ số này như sau: ST1.8 < ST1.4 < uPVC3.2 < uPCV3.8. Tuy nhiên, do số lượng mẫu thí nghiệm trong nghiên cứu này còn hạn chế nên xu hướng này cần được xác minh thêm ở những nghiên cứu tiếp theo trong tương lai với số lượng mẫu nhiều hơn.



Hình 9. Ảnh hưởng áp lực hông đến các hệ số trong các mô hình phá hoại nén

## 5. Kết luận

Bài báo này cung cấp thông tin hữu ích về ứng xử nén của lõi HPFRC dưới điều kiện hạn chế nở hông nhờ vỏ bao quanh. Dựa trên kết quả thí nghiệm và phân tích, có thể rút ra các nhận xét và kết luận sau đây:

- Thứ tự của loại vỏ xếp theo lớn dần của cường độ nén lõi HPFRC và môđun đàn hồi như sau: Không vỏ < uPVC3.2 < uPVC3.8 < ST1.4 < ST1.8. Khi độ dày của vỏ tăng lên, cường độ nén và môđun đàn hồi tăng theo, giá trị cao nhất được tạo ra khi sử dụng vỏ thép dày 1,8 mm.

- Lõi HPFRC dưới điều kiện hạn chế nở hông có khả năng biến dạng dọc trục lớn hơn khả năng biến dạng hông khi phá hoại, bất kể loại vỏ bọc nào.

- Mối quan hệ giữa cường độ nén dọc trục và cường độ nén hông được phân tích theo mô hình nén phá hoại của Mohr-Coulomb, Hoek-Brown và Johnston. Tuy nhiên do giới hạn của số lượng mẫu có thể ảnh hưởng đến kết quả phân tích, cần tiếp tục nghiên cứu với số lượng mẫu lớn hơn để đạt độ tin cậy cao hơn.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ theo đề tài số: T2021-103TĐ do Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh cấp.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Wille, K., Kim, D. J., Naaman, A. E. (2010). [Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents](#). *Materials and Structures*, 44(3):583–598.
- [2] Schmidt, M., Fehling, E. (2005). Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. *Proceeding of 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete*, ACI Washington, 228(4):51–78.
- [3] Graybeal, B. (2007). [Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete](#). *ACI Materials Journal*, 104(2):146–152.
- [4] Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., Koh, K. T. (2012). [Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete](#). *Cement and Concrete Composites*, 34(2):172–184.

- [5] Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., Koh, K. T. (2011). [Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers](#). *Construction and Building Materials*, 25(11):4144–4155.
- [6] Nguyen, D. L., Thai, D. K., Tran, N. T., Ngo, T. T., Le, H. V. (2022). [Confined compressive behaviors of high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete with size effect](#). *Construction and Building Materials*, 336:127382.
- [7] Nguyen, D. L., Vu, T. B. N., Do, X. S., Tran, M. P. (2019). [Using carbon black and ground granulated blast furnace slag for improvement of self-sensing capacity of high performance fiber-reinforced concretes](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 13(4V):151–158.
- [8] Naaman, A. E., Reinhardt, H. W. (2006). [Proposed classification of HPRFC composites based on their tensile response](#). *Materials and Structures*, 39(5):547–555.
- [9] Nguyen, D. L., Ryu, G. S., Koh, K. T., Kim, D. J. (2014). [Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete](#). *Composites Part B: Engineering*, 58:279–292.
- [10] Schmidt, M., Fehling, E. (2005). Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. 228(4):51–78.
- [11] Woldemariam, A. M., Oyawa, W. O., Nyomboi, T. (2020). [Experimental studies on the behavior of concrete-filled uPVC tubular columns under axial compression loads](#). *Cogent Engineering*, 7(1):1768649.
- [12] Tue, N. V., Kuchler, M., Schenck, G., Jürgen, R. (2004). Application of UHPC filled tubes in buildings and bridges. *Proceeding of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 807–817.
- [13] Tue, N. V., Schneider, H., Simsch, G., Schmidt, D. (2004). Bearing capacity of stub columns made of NSC HSC and UHPC confined by a steel tube. *Proceeding of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 339–350.
- [14] Gupta, P. K. (2013). [Confinement of concrete columns with unplasticized Poly-vinyl chloride tubes](#). *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5(1).
- [15] Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.*, 7:343–387.
- [16] Hoek, E., Kaiser, P. K., Bawden, W. F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A.A. Balkema: Rotterdam, Netherlands.
- [17] Johnson, I. W. (1985). [Comparison of Two Strength Criteria for Intact Rock](#). *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12):1449–1454.
- [18] Ansari, F., Li, Q. (1998). [High-Strength Concrete Subjected to Triaxial Compression](#). *ACI Materials Journal*, 95(6):747–755.
- [19] Candappa, D. C., Sanjayan, J. G., Setunge, S. (2001). [Complete Triaxial Stress-Strain Curves of High-Strength Concrete](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(3):209–215.
- [20] Setunge, S., Attard, M. M., Darvall, P. P. (1993). [Ultimate Strength of Confined Very High-Strength Concretes](#). *ACI Structural Journal*, 90(6):632–641.
- [21] Yapı Merkezi Internal Research Report (1996). *Investigation of the Failure Criteria for Concrete in Triaxial Compression, and Determination of its Material Properties such as Angle of Internal Friction, Cohesion without Making any Experiments*. Report No. YM/ARGE/96-12 (in Turkish).
- [22] Girgin, Z. C., Arioglu, N., Arioglu, E. (2007). [Evaluation of Strength Criteria for Very-High-Strength Concretes under Triaxial Compression](#). *ACI Structural Journal*, 104(3):278–284.
- [23] Ferrara, L., Ozyurt, N., di Prisco, M. (2010). [High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of “casting-flow induced” fibre orientation](#). *Materials and Structures*, 44(1): 109–128.
- [24] Zheng, Z. (1995). [Synthetic fibre-reinforced concrete](#). *Progress in Polymer Science*, 20(2):185–210.
- [25] Nguyen, D.-L., Thai, D.-K., Nguyen, H. T., Nguyen, T.-Q., Le-Trung, K. (2021). [Responses of composite beams with high-performance fiber-reinforced concrete](#). *Construction and Building Materials*, 270: 121814.
- [26] Richart, E., Brandtzaeg, A., Brown, R. L. (1929). *Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression*. Bulletin 190, University of Illinois, Engineering Experimental Station: Champaign, IL, USA.