■Ngày nhận bài: 20/12/2024 ■Ngày sửa bài: 17/01/2025 ■Ngày chấp nhận đăng: 13/02/2025

Mô phỏng ứng xử chịu lực nén dọc trục của cột tròn liên hợp bê tông thường nhồi ống đúc sẵn bằng bê tông siêu tính năng cao

Numerical simulation of axial compressive behavior of circular composite columns made of NSC filled in prefabricated UHPC tube

> LÊ HOÀNG AN
Viện kỹ thuật công nghệ cao, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, TP.HCM; Email: lhan@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Với cường độ và độ bền vượt trội hơn rất nhiều so với bê tông thông thường, bê tông siêu tính năng cao (UHPC) được coi như là một loại vật liệu tiềm năng để chế tạo các ống mỏng đúc sẵn nhồi bê tông thường (NSC) vào bên trong và tạo ra được một loại cột liên hợp mới (UHPC-NSC). Các ống mỏng đúc sẵn bằng UHPC với tính toàn vẹn cao có thể thay thế những ống mỏng truyền thống khác trong cột liên hợp như ống thép, ống bằng sợi polymer (FRP) được bọc ngoài và có tác dụng kiềm chế nở hông lõi bê tông thường bên trong. Nhiều nghiên cứu hơn nữa để loại cột liên hợp mới UHPC-NSC được áp dụng trong thực tế là rất cần thiết. Do đó, bài báo này trình bày một vấn đề liên quan đến mô phỏng phần tử hữu hạn (FEM) cột tròn liên hợp bê tông thường nhồi ống mỏng đúc sẵn bằng bê tông siêu tính năng cao dưới tác dụng của lực nén dọc trục trên lõi bê tông thường. Mô hình FEM được xây dựng trong phần mềm ABAQUS để kiểm chứng một số kết quả thí nghiệm thu thập được. Mô hình ứng xử vật liệu cho lõi bê tông thường bị kiềm chế nở hông và ống mỏng UHPC được đề xuất để mô phỏng chính xác ứng xử của hai loại vật liệu. Mô hình FEM được thiết lập trong nghiên cứu này cho kết quả chính xác khi so sánh dạng phá hoại, đường cong lực - biến dạng, và tải trọng cực hạn với các kết quả thí nghiệm trước đây.

Từ khóa: Cột liên hợp; NSC; UHPC; phần tử hữu hạn; ABAQUS; lực nén dọc trục.

ABSTRACT

Due to superior strength and durability compared to the conventional concrete, Ultra-high performance concrete (UHPC) was considered as a potential material to produce prefabricated tube for filling normal strength concrete (NSC) to create a novel composite columns (UHPC-NSC). The prefabricated UHPC tube with high integrity can replace conventional tube such as steel tube, fiber reinforced polymer (FRP) tube to confined the NSC core. There is a need to study on UHPC-NSC columns to accelerate the practical application. Therefore, this paper deals with finite element model (FEM) investigation of UHPC-NSC circular columns made of NSC filled in prefabricated UHPC tube subjected to axial compression on only NSC core. The FEM was built using ABAQUS software to validate some collected test results. The material models for confined NSC and UHPC jacket were proposed to simulate the behavior of two materials. The FEM gave a good agreement when comparing with the previous test results in the predictions of failure pattern, load-strain curves, and ultimate load.

Keywords: composite columns, NSC, UHPC, FEM, ABAQUS, axial compression.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông siêu tính năng cao (Ultra-high performance concrete - UHPC), đặc biệt với việc sử dụng cốt sợi phân tán bên trong (Ultra-high performance fiber reinforced concrete - UHPFRC) là loại vật liệu tiên tiến có cường độ và độ bền vượt trội hơn rất nhiều so với bê tông truyền thống như bê tông thường (normal strength concrete - NSC) hoặc bê tông cường độ cao (high strength concrete - HSC) [1-3]. UHPC có cường độ chịu nén rất cao lớn hơn 120 MPa và cường độ chịu kéo trực tiếp lớn hơn 5 MPa [2]. Do đó UHPC được coi như một loại vật liệu tiềm năng có thể sử dụng trong việc chế tạo các ống mỏng đúc sẵn thay thế cho ống thép, ống sợi polymer (fiber reinforced polymer), ống uPVC (unplasticized polyvinyl clorua) để thi công bê tông cốt thép thường bên trong và tạo nên một loại cột liên hợp (UHPC-NSC) có khả năng chịu tải cao, chịu độ bền tốt, và có độ dẻo dai cao. Lớp vỏ bọc UHPC bên ngoài cột liên hợp này có chức năng bảo vệ và kiềm chế nở hông cho lõi bê tông thường bên trong, từ đó làm tăng cường độ và độ dẻo dai của cột liên hợp [4]. Bên cạnh sự làm việc như cơ chế chịu lực của cột ống thép hoặc ống FRP nhồi bê tông, nhiều ưu điểm khi UHPC được chế tạo thành ống đúc sẵn để đổ bê tông thường vào trong như sau: (1) hạn chế sự phá vỡ và nứt của lớp bê tông bảo vệ; (2) lớp bảo vệ có độ bền cho cột bê tông cốt thép (BTCT) dưới tác động của các điều kiện môi trường khác

nhau, chống xâm nhập, và chống ăn mòn; (3) giảm chi phí theo vòng đời của cột BTCT bởi độ bền theo thời gian cực kỳ tốt của lớp vỏ UHPC; (4) khả năng chịu lửa và chịu nhiệt độ cao của UHPC với sự sử dụng cốt sợi. Ngoài ra ống UHPC còn có tác dụng làm ván khuôn cố định và không tháo dỡ sau khi thi công đổ bê tông. Điều này làm tiết kiệm chi phí và thời gian thi công rất nhiều. Hơn nữa, UHPC là bê tông có khả năng tự chảy lan cao nên rất phù hợp với việc đúc các ống mỏng với các hình dạng khác nhau. Khi UHPC được sử dụng như ván khuôn cố định thì việc tạo tính thẩm mỹ cho bề mặt ngoài ván khuôn này rất thuận tiện do UHPC có tính đồng nhất vật liệu cao nên bề mặt ngoài sẽ mịn và trơn. Hiện nay, hướng nghiên cứu cột liên hợp UHPC-NSC nhận được nhiều sự quan tâm của cộng đồng khoa học và cần nhiều kiểm chứng thực nghiệm cũng như mô phỏng hơn nữa để có cơ sở ứng dụng vào thực tế.

Caluk và cộng sự (2019) [5] đã nghiên cứu ứng dụng ống mỏng UHPC như một ván khuôn để thi công bê tông cốt thép của trụ cầu với mục đích tăng cường khả năng chịu tải của trụ cầu trong giai đoạn sử dụng, thuận tiện hơn cho việc thi công, và giảm chi phí ván khuôn. Các cột liên hợp UHPC-NSC được thí nghiệm chịu tác động của tải dọc trục không thay đổi và tải trọng ngang thay đổi, nhằm mô phỏng đúng sự làm việc của trụ cầu thực tế. Các tác giả chỉ ra rằng ống mỏng đúc sẵn UHPC đã làm tăng tải trọng ngang, tăng độ cứng, và không có sự phá vỡ đột ngột của lớp bê tông bên ngoài. Ngoài ra biến dạng cũng như năng lượng phá hoại của cột tăng nhiều khi sử dụng ống mỏng UHPC. Wu và cộng sự (2018) [6] thực hiện các thí nghiệm trên cột liên hợp mặt cắt ngang hình vuông bao gồm lõi bê tông thường có cường độ nén 30 MPa và ống UHPFRC dày 20 mm với cường độ nén lên đến 143.3 MPa, dưới tác dụng của lực nén dọc trục chỉ truyền lên mỗi lõi bê tông NSC. Vết nứt, độ cứng ban đầu, tải trọng, chuyển vị cực hạn, và khả năng hấp thụ năng lượng thay đổi nhiều với sự thay đổi các thông số thí nghiệm của cột. Ứng xử của cột liên hợp được cải thiện nhiều khi tăng hàm lượng thể tích sợi thép và hàm lượng của cốt đai vòng. Xie và cộng sự (2019) [7] thực hiện thí nghiệm nén dọc trục trên 18 cột bê tông ngắn được bọc bởi lớp vỏ UHPC và mô phỏng phần tử hữu hạn 3D trong phần mềm ABAQUS để kiểm chứng lại thí nghiệm. Các tác giả này khẳng định rằng lớp vỏ UHPC làm tăng tải trọng nén và chuyển vị cực hạn cũng như độ dẻo dai của cột liên hợp. Độ gia tăng này bị tác động chính bởi bề dày của lớp bê tông UHPC bọc ngoài và tiết diện mặt cắt ngang của cột. Tian và cộng sự (2020) [8] thí nghiệm cột BTCT thường NSC có cường độ nén 32.4 MPa nhồi ống mỏng làm bằng UHPC với cường độ chịu nén 139.3 MPa. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy cột BTCT thường có đặc trưng phá hoại bởi sự phá vỡ rộng của lớp bê tông bảo vệ, trong khi đó cột nhồi ống UHPC có đặc trưng phá hoại thông qua những vết nứt nghiêng và mẫu thí nghiệm giữ nguyên hình dạng do sự dính bám tốt của sợi và vữa xi măng của UHPC. Ống UHPC càng dày thì sự phá hoại trở nên càng dẻo, đồng thời khả năng chịu tải và độ cứng của cột tăng lên. Ronanki và Aelati (2022) [9] đã thí nghiệm các cột tròn và vuông bê tông NSC bọc bên ngoài lớp UHPC dưới tác dụng của lực nén dọc trục lên lõi NSC, và tiến hành mô phỏng trong phần mềm ATENA-3D để kiểm tra lại thí nghiệm. Các tác giả này kết luận rằng cột tròn có hiệu ứng kiềm chế nở hông của lớp vỏ UHPC lên lõi NSC hiệu quả hơn và do đó làm sức chịu tải của cột nhiều hơn so với cột vuông. Ngoài ra những nghiên cứu gần đây [10-13] đã cho những kết luận tương tự như trên.

Nhìn chung, hầu hết các nghiên cứu tập trung vào thực nghiệm để xác định được cơ chế làm việc, cũng như dự đoán sức chịu tải và mức độ cải thiện cường độ, độ dẻo dai của cột UHPC-NSC so với cột BTCT thường. Các nghiên cứu mô phỏng sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn còn khá hạn chế. Do đó, bài báo này tập trung vào việc phát triển mô hình phần tử hữu hạn (finite element model - FEM) sử dụng phần mềm ABAQUS để kiểm chứng lại các kết quả thí nghiệm trong nghiên cứu [7] và [9]. Các cột liên hợp UHPC-NSC gồm lõi NSC được nhồi trong ống đúc sẵn bằng UHPC dưới tác dụng của lực nén đúng tâm lên lõi NSC được mô phỏng. Mô hình ứng xử vật liệu của lõi NSC khi kiềm chế nở hông bởi lớp vỏ UHPC, và lớp vỏ UHPC bọc ngoài không có sợi và có sợi gia cường được đề xuất trong mô hình FEM. Kết quả hình dạng phá hoại, đường cong quan hệ lực - biến dạng, và lực tới hạn đạt được trong mô hình FEM được so sánh với kết quả thực nghiệm. Thông qua đó cơ chế làm việc của loại cột liên hợp này được thảo luận.

2. MÔ HÌNH FEM CỘT LIÊN HỢP UHPC-NSC

2.1. Thông số cột mô phỏng

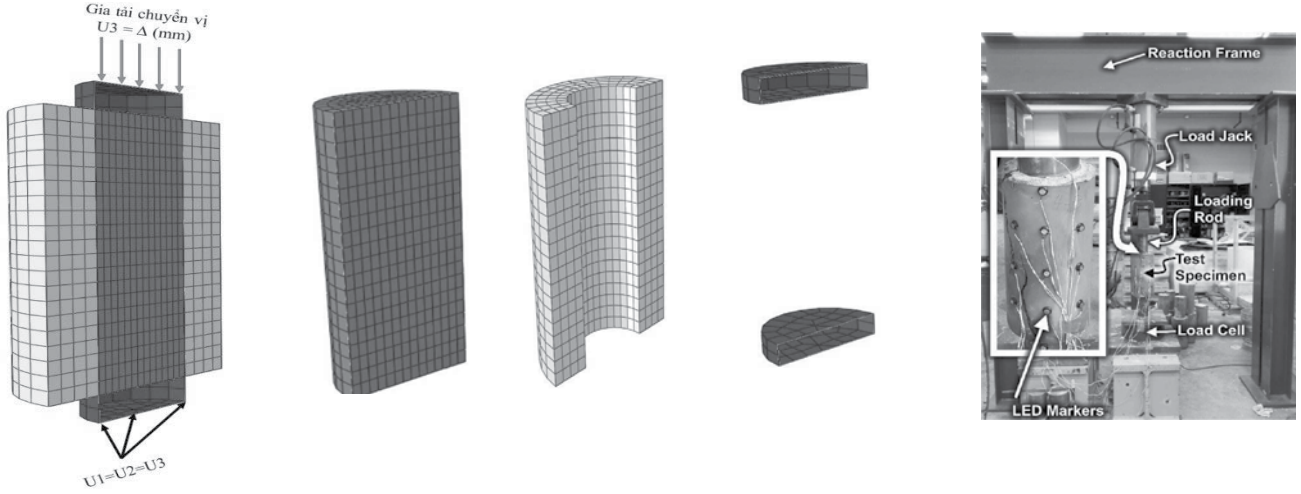
Các mẫu thí nghiệm trong nghiên cứu của Xie và cộng sự (2019) [7], Ronanki và Aelati (2022) [9] được lựa chọn để sử dụng cho việc mô phỏng kiểm chứng. Các cột liên hợp có cấu tạo gồm lõi NSC bên trong và ống UHPC bên ngoài chịu tác dụng của lực nén trên lõi NSC để tạo ra hiệu ứng kiềm chế nở hông lớn nhất. Bảng 1 mô tả các thông số hình học và vật liệu của các cột liên hợp:

Bảng 1. Thông số mẫu thí nghiệm thu thập để mô phỏng

Tên mẫu	Tác giả	Đường kính lõi D (mm)	Cường độ chịu nén lõi NSC $f'_{c,NSC}$ (MPa)	Chiều cao lõi NSC h_{NSC} (mm)	Chiều dày lớp UHPC t_{UHPC} (mm)	Cường độ chịu nén UHPC $f'_{c,UHPC}$ (MPa)	Chiều cao ống UHPC h_{UHPC} (mm)
PS_C3U1.5_01	[9]	76.2	18.15	203.2	38.1	144.8	203.2
PS_C3U1.5_02		76.2	18.15	203.2	38.1	144.8	203.2
PS_C3U0.5_01		76.2	18.15	101.6	12.7	144.8	101.6
PS_C3U0.5_02		76.2	18.15	101.6	12.7	144.8	101.6
PS_C4U1.0_01		101.6	18.15	203.2	25.4	144.8	203.2
PS_C4U1.0_02		101.6	18.15	203.2	25.4	144.8	203.2
C2-1	[7]	150	41.3	330	20	125	300
C2-2		150	41.3	330	20	125	300
C2-3		150	41.3	330	20	125	300

2.2. Lựa chọn loại phần tử, chia lưới, điều kiện biên, và cách gia tải

Hình 1 mô tả một nửa cột UHPC-NSC được mô phỏng trong phần mềm ABAQUS. Phần tử lập phương khối C3D8R gồm 8 nút với ba bậc tự do cho mỗi nút được sử dụng để mô phỏng lõi NSC và lớp vỏ UHPC. Phần tử C3D8R là phần tử đẳng tham số hàm nội suy tọa độ trong hệ tọa độ tổng thể sang hệ tọa độ tự nhiên của phần tử và hàm nội suy chuyển vị là đồng nhất [14]. Kích thước của phần tử được chọn là *D/20* với *D* là tổng đường kính của cột (có thể kể đến bề dày của ống UHPC) để đảm bảo độ chính xác của kết quả và tiết kiệm thời gian mô phỏng theo một số nghiên cứu trước đây về sự hội tụ của kích thước phần tử. Việc lựa chọn trên cho ra trung bình cho mỗi cột mô phỏng khoảng 3500 - 5000 phần tử, phù hợp với tài tuyên máy tính dùng để mô phỏng. Sự tương tác giữa lõi bê tông NSC và UHPC được mô phỏng thông qua bề mặt tiếp xúc giữa mặt trong của lớp vỏ UHPC (được chọn là "Slave") và mặt ngoài của lõi NSC (được chọn là "Master"). Theo phương pháp tuyến thì hai bề mặt này tách rời nhau nhưng không được phép xuyên qua nhau. Theo phương tiếp tuyến thì hai bề mặt này làm việc theo mô hình Mohr Coulomb với hệ số ma sát được chọn là 0.2 theo các nghiên cứu trước.



Tổng thể cột UHPC-NSC *Lõi NSC* *Ống UHPC* *Tấm thép cứng* *Hình ảnh thí nghiệm thực tế trong nghiên cứu [9]*

Hình 1. Mô phỏng FEM cột UHPC-NSC trong phần mềm ABAQUS

Để giống điều kiện thực tế trong thí nghiệm và đảm bảo tải trọng nén chỉ truyền trên lõi NSC thì hai tấm thép dày 20cm có đường kính bằng đường kính lõi được đặt ở hai đầu của cột liên hợp. Hai tấm thép này được coi như tấm cứng tuyệt đối (Rigid plate) với một tấm cứng được đặt tại mặt dưới của lõi NSC và một tấm cứng được đặt ở mặt trên lõi NSC. Điều kiện biên về chuyển vị đặt ở tấm cứng dưới (hạn chế chuyển vị theo phương U1=U2=U3) và đầu tấm cứng trên sẽ gia tải thông qua chuyển vị. Giá trị chuyển vị khuyến cáo cho các trường hợp gia tải nén là $\Delta = 0.03 \times L$ với L chiều dài cột ban đầu.

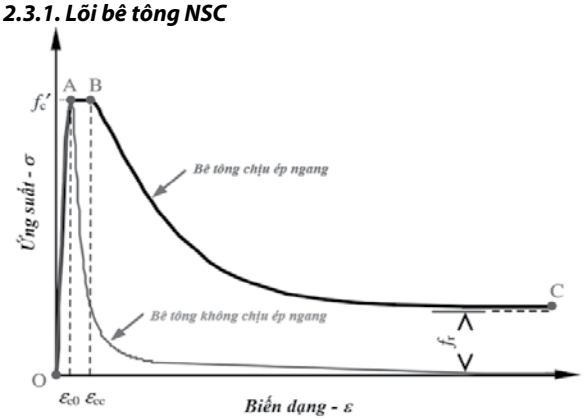
2.3. Mô hình vật liệu

Nghiên cứu này sử dụng mô hình bê tông phá hoại dẻo "Concrete damage plasticity (CDP)" trong phần mềm ABAQUS [14] để mô phỏng ứng xử của lõi NSC và ống UHPC. Các tham số chính trong mô hình CDP như góc giãn nở (ψ), độ lệch tâm của bề mặt chảy dẻo (e), tỷ số của ứng suất nén hai trục với ứng suất nén một trục (σ_{bo}/σ_{co}), tỷ số cường độ chịu kéo ngoài mặt phẳng làm việc so với cường độ chịu nén trong mặt phẳng làm việc (K_c), và độ nhớt (μ) được xác định theo nghiên cứu trước [7].

Bảng 2. Các thông số trong mô hình CDP

	ψ	e	σ_{bo}/σ_{co}	K_c	μ
Lõi bê tông thường NSC	32^0	0.1	1.16	0.667	0.001
Ống bê tông UHPC	36^0	0.1	1.16	0.667	0.001

2.3.1. Lõi bê tông NSC



Hình 2. Mô hình ứng suất - biến dạng của lõi NSC có xét đến kiềm chế nở hông của ống UHPC

Ngoài ra nghiên cứu này đã đề xuất mô hình đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng khi chịu nén của lõi NSC có xem xét đến hiệu ứng kiềm chế nở hông bởi ống UHPC như hình 2. Mô hình do Samani và Attard (2012) [15] đề xuất được sử dụng để mô tả giai đoạn tăng bền OA như sau:

$$\frac{\sigma}{f_c'} = \frac{A \times X + B \times X^2}{1 + (A-2) \times X + (B+1) \times X^2} \qquad 0 < \varepsilon \le \varepsilon_{c0} \tag{1}$$

$$X = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}; A = \frac{E_c \times \varepsilon_{c0}}{f_c'}; B = \frac{(A-1)^2}{0.55} - 1 \tag{2}$$

Biến dạng tại vị trí A (ε_{c0}) được xác định theo phương trình của Tasdemir và cộng sự (1998) [16] áp dụng được cho nhiều loại cường độ bê tông khác nhau:

$$\varepsilon_{c0} = \left[-0.067 \times \left(f_c' \right)^2 29.9 \times f_c' + 1053 \right] \times 10^{-6} \tag{3}$$

Biến dạng tại vị trí B (ε_{cc}) được xác định bằng phương trình của Samani và Attard (2012) [15] như sau:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = e^k; f_B = \left(1 + 0.027 \times f_{t,UHPC}\right) \times e^{-0.02 \times \frac{D}{t}} \tag{4}$$

$$k = \left(2.9224 - 0.00367 \times f_c'\right) \times \left(\frac{f_B}{f_c'} \right)^{0.3124 + 0.002 \times f_c'} \tag{5}$$

với f_B là áp lực ngang được tính theo công thức của Tao [17]

$$f_B = \left(1 + 0.027 \times f_{t,UHPC}\right) \times e^{-0.02 \times \frac{D}{t}} \tag{6}$$

Nhánh giảm dần (BC) trong đường cong ứng suất – biến dạng được xác định theo công thức bởi Binici (2005) [18]:

$$\sigma = f_r + \left(f_c' - f_r\right) \times \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cc}}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \qquad \varepsilon \ge \varepsilon_{cc} \tag{7}$$

trong đó tham số α và β là hệ số hình dạng của nhánh BC. f_r là ứng suất dư được xác định theo công thức của Tao và cộng sự (2013) [17]

$$f_r = 0.7 \times (1 - e^{-1.38 \times \xi_c}) \times f_c' \tag{8}$$

với hệ số ép ngang ξ_c theo công thức sau:

$$\xi_c = \frac{A_{UHPC} \times f_{t,UHPC}}{A_c \times f_c'} \tag{9}$$

Ứng suất kéo lớn nhất của lõi NSC được giả định bằng $0.1 \times f_c'$ theo kết quả của nghiên cứu trước [17]

2.3.2. Ống đúc sẵn UHPC

Đường cong xác định quan hệ ứng suất và biến dạng của UHPC được xác định dựa theo đề xuất của Popovics [19] với phương trình tổng quát như sau:

$$\frac{\sigma}{f_c^{'}} = \frac{(\varepsilon_c/\varepsilon_{c0})\times r}{r-1+(\varepsilon_c/\varepsilon_{c0})^r} \text{ với } r = \frac{E_c}{E_c - \frac{f_c^{'}}{\varepsilon_{c0}}} \quad (10)$$

Trong trường hợp chịu kéo thì cường độ chịu kéo của ống UHPC được tính toán theo công thức sau của Le và Fehling (2017) [1]:

$$f_t = 4.82 \times \ln(K) + 9.08 \quad (11)$$

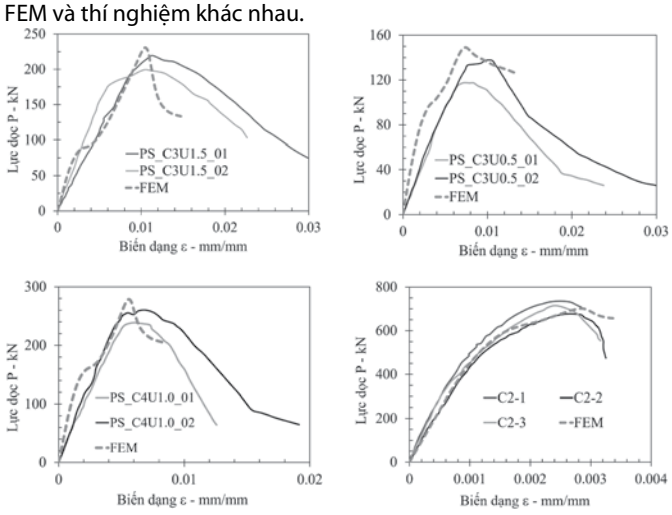
$$K = V_f \times \frac{l_f}{d_f} \quad (12)$$

trong đó V_f là hàm lượng sợi, l_f là chiều dài sợi và d_f là đường kính của sợi.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG FEM VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đường cong quan hệ lực - biến dạng

Hình 3 so sánh đường cong quan hệ lực - biến dạng (*P*-ε) giữa FEM và kết quả thí nghiệm của các mẫu trong bảng 1. Nhìn chung đường cong (*P*-ε) đạt được từ FEM tương đồng với thí nghiệm và có thể chấp nhận được. Ứng xử chịu nén đúng tâm lên lõi NSC của cột liên hợp UHPC-NSC trong FEM và thí nghiệm đều thể hiện rõ rệt hai giai đoạn bao gồm: giai đoạn 1 tăng tải đến lực nén cực hạn với đường cong (*P*-ε) gần như tuyến tính và chảy dẻo một đoạn trước khi đạt lực nén cực hạn; giai đoạn 2 rớt tải với độ dốc của đường cong (*P*-ε) lớn. Tuy nhiên hình dạng của đường cong trong FEM và thí nghiệm khác nhau về độ dốc trong hai giai đoạn, đặc biệt là với các cột trong thí nghiệm của Ronanki và Aelati (2022) [9]. Điều này được lý giải bằng sự đồng nhất của vật liệu khi mô hình FEM, trong khi đó thì vật liệu chế tạo mẫu thí nghiệm không đồng nhất và có sự phân bố ngẫu nhiên của sợi trong lớp vỏ UHPC. Giai đoạn rớt tải thì độ dốc của đường cong trong FEM và thí nghiệm không tương đồng, điều này do sự phát triển vết nứt trong FEM và thí nghiệm khác nhau.



Hình 3. So sánh đường cong quan hệ lực - biến dạng giữa FEM và kết quả thí nghiệm

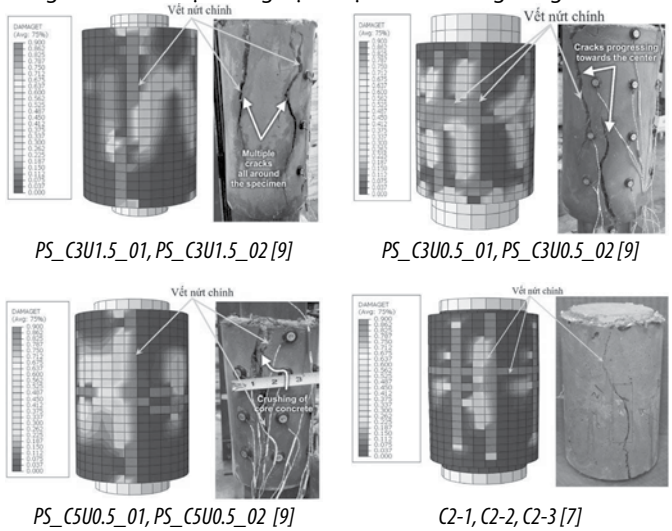
Bảng 3 so sánh lực nén cực hạn giữa FEM (P_{FEM}) và thí nghiệm (P_{test}). Nhìn chung mô hình FEM dự đoán khá chính xác lực nén cực hạn của các cột liên hợp thí nghiệm. Hầu hết lực nén cực hạn trong FEM lớn hơn so với thí nghiệm, lý do mô hình FEM đã tính toán lực nén tăng thêm do ứng suất nở hông từ ống UHPC, trong khi thí nghiệm một số vị trí nếu khi lõi NSC nở hông ngang mà ống UHPC không kiềm chế sự nở hông này tốt mà xuất hiện vết nứt thì lực nén cực hạn sẽ không cao bằng khi sự kiềm chế này được duy trì. Mô hình vật liệu cho lõi NSC có xét đến hiệu ứng kiềm chế nở hông được hiệu chỉnh từ mô hình dựa trên các kết quả nghiên cứu của cột ống thép nhồi bê tông. Mức độ kiềm chế nở hông của ống thép lên lõi NSC sẽ tốt hơn nhiều so với ống UHPC do cường độ chịu kéo của ống thép lớn hơn rất nhiều lần so với ống UHPC. Kết quả so sánh trong bảng 3 cho thấy sự chênh lệch trung bình giữa dự đoán từ FEM so với thí nghiệm là cao hơn khoảng 7% (giá trị trung bình 0.93) và với độ lệch thấp (0.08). Như vậy mô hình FEM hoàn toàn dự đoán được lực nén cực hạn của các cột thí nghiệm và giá trị dự đoán có thể chấp nhận được.

Bảng 3. So sánh lực nén cực hạn giữa FEM và thí nghiệm

Tên mẫu	Tác giả	P_{test} (kN)	P_{FEM} (kN)	P_{test}/P_{FEM}
PS_C3U1.5_01	[9]	219.45	230.796	0.95
PS_C3U1.5_02		199.33		0.86
PS_C3U0.5_01		117.43	148.931	0.79
PS_C3U0.5_01		137.76		0.93
PS_C4U1.0_01		238.70	278.53	0.86
PS_C4U1.0_02		260.38		0.93
C2-1	[7]	734.63	701.95	1.05
C2-2		676.95		0.96
C2-3		715.07		1.02
Trung bình				**0.93**
Độ lệch chuẩn				**0.08**

3.2. Hình dạng phá hoại

Hình 4 so sánh hình dạng phá hoại của các cột mô phỏng trong FEM và các cột thí nghiệm thực tế như trong bảng 1.



Hình 4. So sánh hình dạng phá hủy của cột mô phỏng FEM và cột thí nghiệm

Hình 4 so sánh hình dạng phá huỷ của các cột liên hợp UHPC-NSC trong mô phỏng FEM và thí nghiệm dưới tác dụng của lực nén dọc trục trên lõi NSC. Nhìn chung mô hình FEM cho kết quả hình dạng phá hủy tương đồng với thí nghiệm thông qua các vết nứt chính được quan sát. Các vết nứt chính này bao gồm vết nứt dọc và vết nứt theo chu vi. Các vết nứt được hình thành tại hai vị trí đầu và cuối của cột sau đó phát triển dần đến giữa thân cột tạo thành vết nứt kéo dài theo chiều cột. Nguyên nhân vết nứt hình thành là do khi cột chịu tải trọng nén dọc trục trên lõi NSC thì lõi NSC có xu hướng biến dạng ngang. Ống UHPC bao bọc xung quanh lõi NSC làm giảm biến dạng ngang này và phát sinh ứng suất vòng. Khi giá trị ứng suất vòng lớn hơn giá trị cường độ chịu kéo của bê tông UHPC thì vết nứt bắt đầu xuất hiện. Mức độ phức tạp của vết nứt

giảm dần theo sự mức độ giảm dần của hệ số chống nở hông ξ_c. Khi hệ số ξ_c thấp, chiều dày ống UHPC quá mỏng làm cho ứng suất vòng không kiềm chế được biến dạng ngang làm cho vết nứt xảy ra đột ngột dọc theo chiều dài cột. Khi hệ số ξ_c cao, chiều dày vỏ UHPC dày sẽ giúp cho ứng suất vòng duy trì sự kiềm chế biến dạng ngang tốt làm cho các vết nứt phát triển dọc theo chiều dài cột và cả theo chu vi cột.

Mặc dù mô hình FEM cho kết quả không hoàn toàn trùng khớp hết với kết quả thí nghiệm do quá trình thí nghiệm chịu tác động của nhiều yếu tố khác nhau như thiết bị thí nghiệm, độ lệch tâm khi gia tải, tiếp xúc giữa tấm gia tải và lõi bê tông NSC, sai số trong thí nghiệm, sự không đồng nhất của vật liệu bê tông... trong khi cột mô phỏng trong FEM là hoàn hảo về vật liệu và mô hình. Tuy nhiên thông qua kết quả so sánh giữa FEM và thí nghiệm như đã trình bày ở trên thì có thể chấp nhận được tính chính xác của mô hình FEM.

4. KẾT LUẬN

Dựa trên những kết quả nghiên cứu đã trình bày trong bài báo ở trên, một số kết luận được rút ra như sau:

- Mô hình FEM được xây dựng trong nghiên cứu này dự đoán khá chính xác ứng xử của cột liên hợp NSC-UHPC thông qua kết quả so sánh đường cong quan hệ lực - biến dạng và hình dáng phá hoại đạt được từ FEM và thí nghiệm tương đồng với nhau.

- Mô hình FEM dự đoán lực nén cực hạn cao hơn so với thí nghiệm do hiệu ứng kiềm chế nở hông lên lõi NSC được xem xét trong mô hình được hiệu chỉnh từ kết quả nghiên cứu của cột ống thép nhồi bê tông, trong đó ống thép có cường độ chịu kéo cao sẽ kiềm chế nở hông tốt hơn rất nhiều so với ống UHPC. Tuy nhiên giá trị dự đoán của mô hình FEM cao hơn trung bình 7% so với kết quả thí nghiệm nên hoàn toàn có thể chấp nhận được.

- Các vết nứt chính được quan sát trong mô hình FEM và thí nghiệm gồm 2 dạng chính là vết nứt dọc trục và vết nứt theo chu vi. Mô hình FEM cho kết quả hình dạng phá hoại khá tương đồng với kết quả thí nghiệm.

- Mô hình FEM được đề xuất trong nghiên cứu này có thể sử dụng để mô phỏng sâu hơn ảnh hưởng của các tham số vật liệu và hình học khác của loại cột này mà khi làm thí nghiệm rất tốn nhiều chi phí.

- Bê tông UHPC là vật liệu tiềm năng để thay thế các vật liệu truyền thống khác trong việc chế tạo ống mỏng đúc sẵn để nhồi bê tông thường NSC bên trong tạo thành cột liên hợp UHPC-NSC có sức chịu tải và độ dẻo dai được tăng cường nhờ hiệu ứng kiềm chế nở hông lên lõi NSC của ống UHPC.

Lời cảm ơn: "Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2019.325"

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. H.A. Le, E. Fehling, Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete, Construction and Building Materials,153 (2017) 790-806. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130

[2]. B.A. Graybeal, Characterization of the behavior of ultra-high performance concrete", Ph.D. Dissertation, University of Maryland, USA, 2005.

[3]. B.A. Graybeal, J. Tanesi, Durability of an ultra high-performance concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 19 (2007) 848–854. https://doi.org/10.1061/(ASCE)08991561(2007)19:10(848).

[4]. Y. Huang, S. Grünewald, E. Schlangen, M. Luković, Strengthening of concrete structures with ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): A critical review, Construction and Building Materials, 336 (2022) 127398. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127398.

[5]. N. Caluk, I. Mantawy, A. Azizinamini, Durable Bridge Columns using Stay-In-Place UHPC Shells for Accelerated Bridge Construction, Infrastructures, 4, 2(2019), p. 25. https://doi.org/10.3390/infrastructures4020025.

[6]. X. Wu, T.H.K. Kang, I.B. Mpalla, C.-S. Kim, Axial load testing of hybrid concrete columns consisting of UHPFRC tube and normal-strength concrete core, International Journal of Concrete Structures and Materials, 12, 43 (2018). https://doi.org/10.1186/s40069-018-0275-2.

[7]. J. Xie, Q. Fu, J.B. Yan, Compressive behaviour of stub concrete column strengthened with ultra-high performance concrete jacket, Construction and Building Materials, 204 (2019) 643-658. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.220.

[8]. H. Tian, Z. Zhou, Z. Yi, Y. Wei, Y, Axial behavior of reinforced concrete column with ultra-high performance concrete stay-in-place formwork, Engineering Structures, 210 (2020 110403. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110403.

[9]. V.S. Ronanki, S. Aaleti, Experimental and analytical investigation of UHPC confined concrete behavior, Construction and Building Materials, 325 (2022) 126710. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126710.

[10]. C.C. Hung, C.W. Kuo, Y. Shao, Cast-in-place and prefabricated UHPC jackets for retrofitting shear-deficient RC columns with different axial load levels, Journal of Building Engineering, 44 (2021) 103305. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103305.

[11]. Z. Zhang, Z. Wu, D. Zhang, Q. Huang, B. Chen, Axial compressive behaviors of reinforced concrete composite column with precast ultrahigh performance concrete (UHPC) jacket, Journal of Building Engineering, 48 (2022) 103956. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103956.

[12]. Y. Yang, B. Chen, Y. Chen, H. Zhou, F. Liu, X. Xie, J. Chen, W. Guo, H. Wang, Performances of Concrete Columns with Modular UHPC Permanent Formworks Under Axial Load, Int J Concr Struct Mater, 17, 38 (2023). https://doi.org/10.1186/s40069-023 00608-1.

[13]. Y. Xiong, M. Yang, H. Shi, J. Zhao,Y. Yuan, X. Guo, Axial compression behavior of concrete-filled prefabricated aligned steel fiber UHPC tubes, Journal of Building Engineering, 89 (2024) 109353. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109353.

[14]. ABAQUS/CAE User's Guide (2016). http://130.149.89.49:2080/v2016/books/usi/default.htm.

[15]. A.K. Samani, M.M. Attard, A stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression, Engineering Structures, 41 (2012). https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.027.

[16]. M.A. Tasdemir, C. Tasdemir, S. Akyyuz, A.D. Jefferson, F.D. Lydon, B.I.G Barr, Evaluation of strains at peak stresses in concrete: A three-phase composite model approach, Cement and Concrete Composites, 20, 4 (2018) 301-318. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00012-2.

[17]. Z. Tao, Z.-B. Wang, Q.J. Yu, Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression, Journal of Constructional Steel Research, 89 (2013) 121-131. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.07.001.

[18]. B. Binici, An analytical model for stress–strain behavior of confined concrete, Engineering Structures, 27, 7 (2005) 1040-1051. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.03.002.

[19]. S. Popovics, A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, Cement and Concrete Research, 3, 5 (1973) 583-599. https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3.

[20]. S.T. Kang, J.K. Kim, The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRCC), Cement and Concrete Research, 41 (2011), 1001-1014. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.009.