

Mô phỏng ứng xử chịu nén đúng tâm của cột bê tông cường độ siêu cao UHSC nhồi ống thép

Simulation of the behavior of ultra high strength concrete (UHSC) filled in steel tube columns under axial compression

Nguyễn Anh Tuấn^{1,*}, Lê Hoàng An¹, Phạm Đức Duy², Nguyễn Vy Thanh³, Nguyễn Lâm Toàn⁴

¹ Nhóm nghiên cứu Phát triển bền vững trong xây dựng và giao thông vận tải (SDCT), Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

² Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh

³ Trường Đại học Trà Vinh

⁴ Công ty Cổ phần Đầu tư Xây dựng Toàn Tiến Phát

*Email liên hệ: tuanna@ut.edu.vn

Tóm tắt:

Cột ống thép nhồi bê tông (Concrete filled steel tube - CFST columns) sử dụng bê tông cường độ siêu cao UHSC (Ultra-high strength concrete) là xu thế mới hiện nay trong các kết cấu xây dựng. Bài báo trình bày mô hình mô phỏng phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) sử dụng phần mềm ABAQUS để kiểm chứng một số thí nghiệm đã thực hiện trên cột tròn bê tông UHSC nhồi ống thép dưới tác dụng của lực nén đúng tâm. Các mô hình vật liệu của bê tông UHSC và ống thép được đề xuất để hiệu chỉnh mô hình vật liệu trong phần mềm ABAQUS. Kết quả của bài báo cho thấy mô hình FEM dự đoán khá tương đồng với kết quả đạt được từ thực nghiệm qua hình dạng phá hoại mẫu cho đến đường cong quan hệ lực - biến dạng. Mô hình FEM có thể dự đoán được sự phân bố tải trọng lên ống thép và bê tông theo từng giai đoạn gia tải.

Từ khóa: Ống thép nhồi bê tông; nén đúng tâm; FEM, CFST; ABAQUS.

Abstract:

Concrete filled steel tube columns (CFST) using UHSC (Ultra-high performance concrete) has been a new trend in civil engineering. This paper is aimed at presenting the finite element method (FEM) using ABAQUS software to verify some previous test results of circular UHSC filled steel tube columns under axial compression. The material models of UHSC and steel tube were suggested to modify the conventional models in ABAQUS software. The research finding from the paper indicates that there is a good agreement between the FEM results and the experiments with regard to the failure modes and the curves of load versus strain. Furthermore, the distribution of total load on the steel tube and the UHSC core of each load increment can be predicted by the FEM.

Keywords: Concrete filled steel tube; axial compression; FEM, CFST; ABAQUS.

1. Giới thiệu

Cột ống thép nhồi bê tông (Concrete filled steel tube - CFST columns) đã được sử dụng phổ biến trong xây dựng do các ưu điểm về khả năng chịu tải cao, khả năng kháng chấn, chống cháy cao và ống thép

được sử dụng như ván khuôn để đổ bê tông bên trong làm đẩy nhanh tiến độ thi công [1]-[6].

Hiệu ứng kiềm chế nở hông giữa bê tông và ống thép làm cho loại cột này có cường độ chịu tải và độ dẻo dai lớn hơn nhiều so với cột bê tông cốt thép hoặc cột thép thuần túy cùng tiết diện [2]. Đã có rất

nhiều nghiên cứu từ lý thuyết đến thực nghiệm liên quan đến loại cột liên hợp này [2]. Bê tông cường độ siêu cao UHSC (Ultra-high strength concrete) là loại bê tông có nhiều đặc điểm vượt trội so với bê tông thường về mặt cường độ cơ học và độ bền [6][7]. Thông thường UHSC có cường độ chịu nén (mẫu hình trụ tròn) lớn hơn 120 MPa và cường độ chịu kéo trực tiếp lớn hơn 5 MPa. Việc sử dụng UHSC cho cột CFST mang lại nhiều lợi ích về kết cấu như giảm được tiết diện cột nhưng vẫn đảm bảo khả năng chịu lực, thi công không cần đầm rung do UHSC có độ tự lèn cao.

Tuy nhiên các nghiên cứu liên quan đến cột bê tông UHSC nhồi ống thép vẫn còn nhiều hạn chế. Một số ít tác giả đã mô phỏng ứng xử cột CFST sử dụng UHSC để kiểm chứng thí nghiệm thực tế [7]-[10]. Tuy nhiên ứng xử liên hợp giữa bê tông UHSC và ống thép thông qua hiệu ứng kiểm chế nở hông còn đặt ra nhiều nghi vấn. Chính vì thế mô hình phần tử hữu hạn (Finite element method – FEM) là một công cụ hữu hiệu để dự đoán ứng xử kết cấu

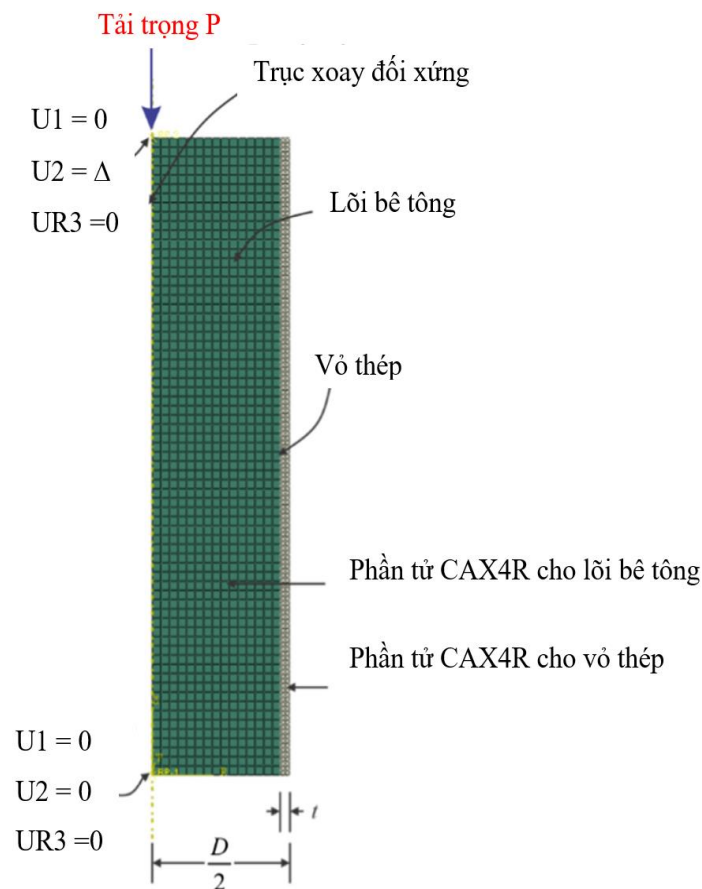
một cách chính xác, từ đó giảm được chi phí của nghiên cứu thực nghiệm. Các mô hình vật liệu trong phần mềm ABAQUS chỉ phù hợp với bê tông thường, do đó việc đề xuất mô hình vật liệu mới cho bê tông UHSC là hết sức cần thiết để có kết quả dự đoán tiệm cận với kết quả thực nghiệm.

Bài báo trình bày mô hình FEM thiết lập thông qua sử dụng phần mềm ABAQUS để kiểm chứng một số kết quả thí nghiệm thu thập được.

2. Mô hình FEM trong phần mềm ABAQUS

2.1. Xây dựng mô hình FEM

Nhiều công bố trên thế giới sử dụng các mô hình FEM khác nhau dựa trên phần mềm thương mại ABAQUS [2][3]. Mô hình FEM đối xứng trục được sử dụng trong nghiên cứu này (hình 1). Phần tử CAX4R dùng cho cả lõi bê tông và vỏ thép. Kích thước của phần tử được quyết định thông qua sự khảo sát điều kiện hội tụ. Kết quả khảo sát cho thấy, kích thước phần tử theo chiều cao và chiều ngang nên là $t/5$ với t là chiều dày của vỏ thép.



Hình 1. Mô hình FEM cho cột CFST trong ABAQUS.

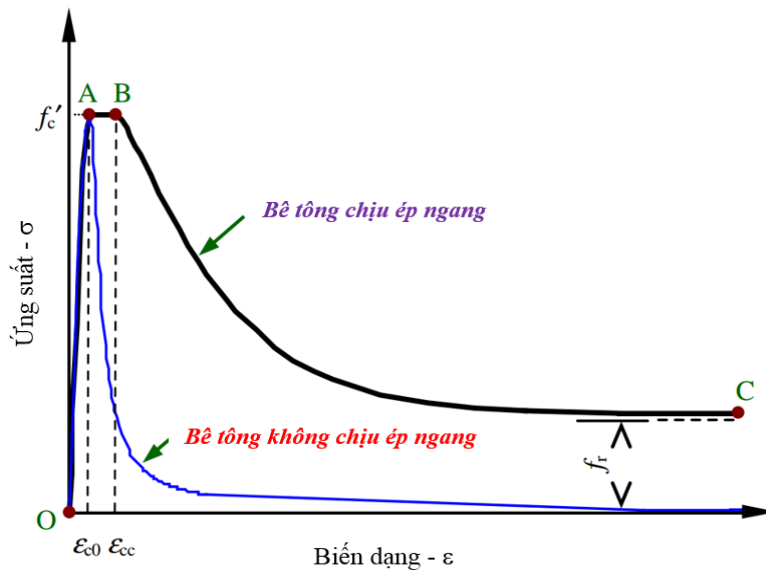
Sự tương tác giữa hai bề mặt của bê tông và thép cũng ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu lực của cột. Qua tương tác, lực chọn “Surface-to-Surface” có trong ABAQUS bao gồm theo phương pháp tuyến và tiếp tuyến. Phương pháp tuyến lựa chọn là “tiếp xúc cứng” với yêu cầu các bề mặt không được xuyên thủng qua nhau.

Với phương tiếp tuyến lựa chọn theo mô hình ma sát Coulomb với hệ số ma sát được khuyến cáo là 0.3. Để giảm thiểu yếu tố mất ổn định tại hai đầu trong quá trình mô phỏng, các điểm tham chiếu (RP) được tạo ra ở hai đầu trên và dưới cột (hình 1). Các nút ở hai đầu được cố định chặt vào hai nút tham chiếu. Các nút tham chiếu sẽ được ngàm chặt (các chuyển vị theo các phương bằng 0) dựa trên điều kiện biên ngàm, ngoại trừ phương chuyển vị của cột ở đỉnh ($U_2 = \Delta$).

2.2. Mô hình vật liệu bê tông UHSC

Trong giai đoạn đầu, sự tương tác giữa vỏ thép và lõi bê tông là không đáng kể. Do hệ số Poisson của

bê tông nhỏ hơn thép nên trong giai đoạn đầu hai loại vật liệu làm việc riêng lẻ với nhau. Khi biến dạng dọc trục bắt đầu tăng lên, sự giãn nở của bê tông bắt đầu lớn hơn sự giãn nở của thép cho đến khi hai bề mặt của hai loại vật liệu tiếp xúc với nhau. Sau đó, áp lực từ lực tại bề mặt tiếp xúc và tương tác của bê tông với vỏ thép dần dần phát triển. Khi ấy, xuất hiện hiệu ứng kiềm chế nở hông của vỏ thép lên lõi bê tông bên trong. Hai vật liệu làm việc liên hợp với nhau. Đây là cơ chế chịu lực khá phức tạp và khó đo đạc được bằng thí nghiệm thực tế. Nhiều tác giả trên thế giới đã đề xuất các mô hình vật liệu dựa trên cơ chế kiềm chế nở hông của cột CFST khi chịu nén dọc trục. Một trong những đề xuất được sử dụng rộng rãi và thành công là mô hình của Tao và cộng sự [7] được thể hiện ở hình 2. Mô hình phù hợp với các loại bê tông có cường độ chịu nén khác nhau. Do đó nghiên cứu đã áp dụng để điều chỉnh mô hình này cho việc mô phỏng ứng xử của bê tông UHSC khi chịu kiềm chế nở hông của vỏ thép.



Hình 2. Mô hình bê tông chịu ép ngang.

Trong giai đoạn đầu, từ điểm O đến điểm A, không có sự tương tác giữa vỏ thép và bê tông. Do đó, mối quan hệ giữa ứng suất - biến dạng tăng trong giai đoạn chưa thể hiện bê tông chịu ép ngang. Điểm kết thúc của đường cong OA khi đạt tới cường độ tại f'_c . Sau đó, việc đỉnh biến dạng tăng thêm trong hiệu ứng ép ngang của bê tông được thể hiện trong đoạn nằm ngang từ điểm A đến điểm B. Trong giai đoạn này, cường độ cực hạn của bê tông tăng lên từ sự ép ngang của vỏ thép được mô phỏng lại thông

qua tương tác giữa ống thép và bê tông. Một mô hình được Samani và Attard đề xuất [11] được sử dụng để mô tả đường cong OA tăng dần.

$$\frac{\sigma}{f'_c} = \frac{A \times X + B \times X^2}{1 + (A - 2) \times X + (B + 1) \times X^2} \quad 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{c0} \quad (1)$$

Trong đó:

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

Dưới tải nén dọc trục, biến dạng tải vị trí đỉnh ứng suất được tính theo phương trình 3. Phương trình này được đề xuất bởi De Nicolò và cộng sự [12] dựa trên phân tích hồi quy của các thử nghiệm nén dọc trục thu được từ nhiều tài liệu tham khảo. Trong đó, f_c' dao động từ 10 MPa đến 150 MPa.

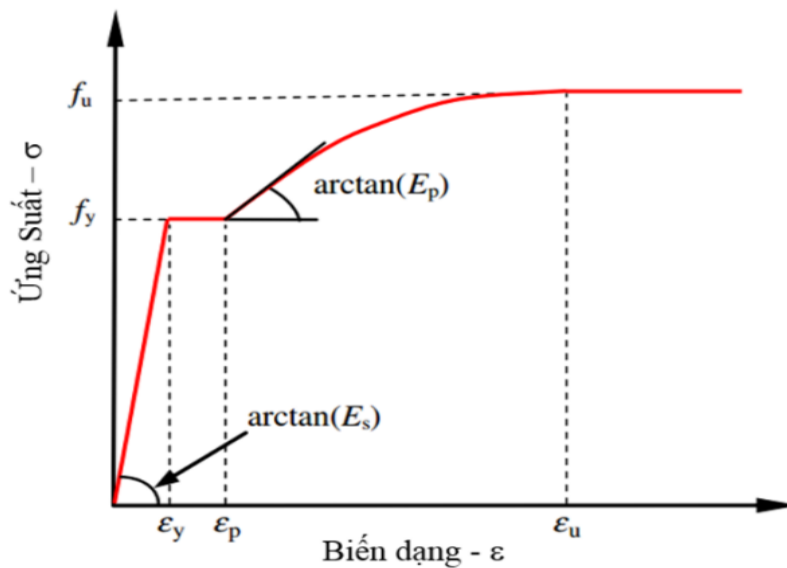
$$\varepsilon_{c0} = 0.00076 + \sqrt{(0.626 \times f_c' - 4.33) \times 10^{-7}} \quad (3)$$

Biến dạng tại điểm B (ε_{cc}) cho mô hình bê tông xác định từ phương trình sau, được đề xuất bởi Samani và Attard [11].

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = e^k, \quad k = (2.9224 - 0.00367 \times f_c') \times \left(\frac{f_B}{f_c'}\right)^{0.3124 + 0.002 \times f_c'} \quad (4)$$

Trong đó, ứng suất giam giữ tại thời điểm bê tông đạt tới cực hạn được đề xuất dựa trên phân tích hồi quy bởi nghiên cứu [8].

$$f_B = \frac{0.03 \times f_y}{e^{0.02 \times \frac{D}{t}}} \quad (5)$$



Hình 3. Mô hình vật liệu thép.

3. Đánh giá và kiểm chứng mô hình

Bài báo sử dụng các tham số kích thước và vật liệu của ba mẫu cột CS1-3, CS2-3 CS3-3 của nhóm nghiên cứu Chen và cộng sự [9] để mô phỏng và kiểm chứng. Các cột ngắn trong nghiên cứu của Chen và cộng sự [9] có tiết diện tròn và sử dụng bê tông UHSC có cường độ chịu nén lớn hơn 130 MPa. Tất cả các cột đều chịu tác dụng của lực nén đúng tâm trên toàn mặt cắt.

Đối với nhánh giảm dần của mô hình bê tông (BC) thể hiện trong Hình , một hàm số mũ được đề xuất bởi Binici [13] và các hệ số điều chỉnh nhánh α và β được dựa theo đề xuất của Tao và cộng sự [7].

$$\sigma = f_r + (f_c' - f_r) \times \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cc}}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad \varepsilon \geq \varepsilon_{cc} \quad (6)$$

2.3. Mô hình vật liệu thép

Các nghiên cứu trước chỉ ra rằng những mô hình vật liệu thép khác nhau ảnh hưởng không nhiều đến các đường cong lực - biến dạng của các cột CFST [7]. Do đó mô hình ứng xử của thép có cường độ chảy dẻo từ 200 đến 800 MPa theo nghiên cứu của Tao và cộng sự [7] được áp dụng trong nghiên cứu này. Mô hình dưới tác dụng của lực kéo, thép ứng xử dẻo và tăng cứng sau giai đoạn tuyến tính.

3.1. Hình dạng phá hủy

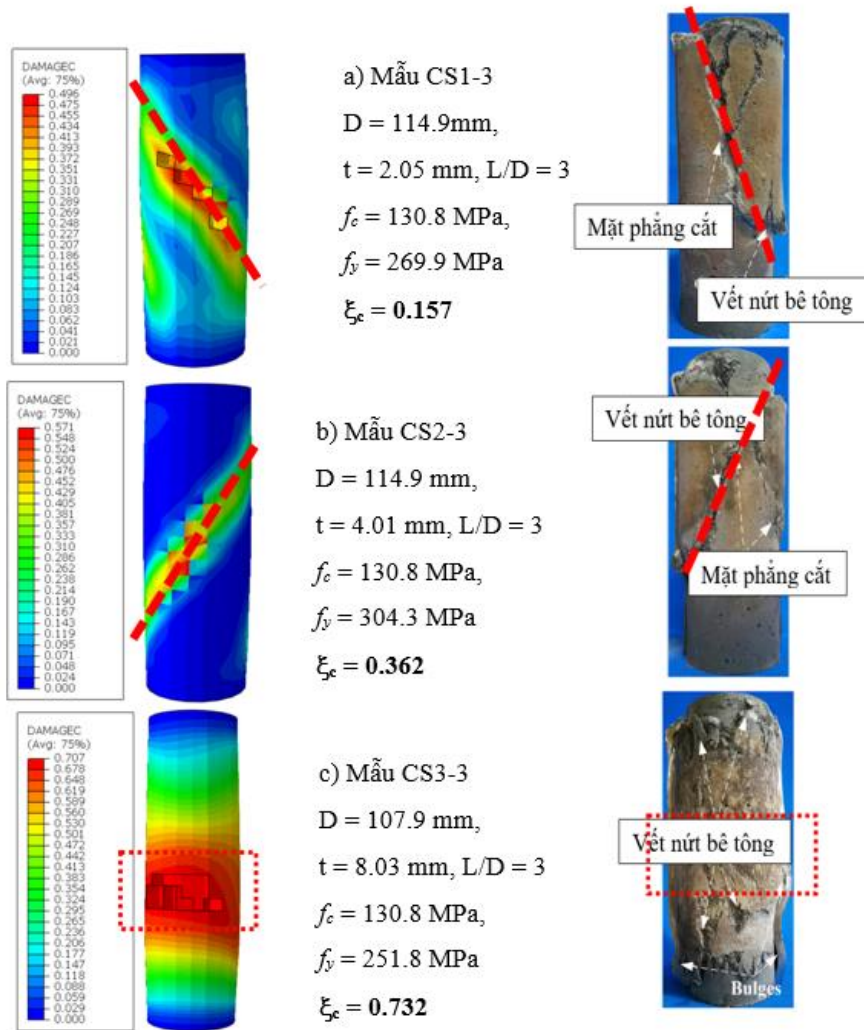
Hình dạng phá hủy của các cột từ mô phỏng sau khi kết thúc quá trình gia tải được so sánh với hình dạng phá hủy quan sát từ thí nghiệm. Kết quả như hình 4 cho thấy mô hình phá hủy của ba mẫu cột tròn nén dọc trục sử dụng bê tông UHSC với các tham số khác nhau có kết quả tương đồng với kết quả thí nghiệm. Nhìn chung hình dạng phá hủy như sau: Hình 4a và 4b cho thấy cột phá hủy chính theo mặt cắt xiên và trong hình 4c, cột phá hủy chính theo phương nở ngang. Các mức độ phá hủy chuyển từ

dạng mặt cắt xiên sang phương nở ngang theo sự tăng dần của hệ số kiểm chế nở hông (ξ_c) [7]. Hệ số kiểm chế nở hông được định nghĩa như sau:

$$\xi_c = \frac{A_s \times f_y}{A_c \times f_c} \quad (7)$$

Trong đó, A_s và f_y là diện tích mặt cắt ngang của ống thép và cường độ chảy dẻo của thép, còn A_c và f_c là diện tích mặt cắt ngang của lõi bê tông và cường độ chịu nén của bê tông.

Vết nứt chính khi phá hủy theo mặt cắt xiên chúng tỏ hiệu ứng kiểm chế nở hông (hình 4a và 4b) thấp hơn so với vết nứt chính khi phá hủy theo dạng nứt kiểu nở ngang. Hình dạng phá hủy của cột CFST khi chịu nén dọc trục phản ánh được mức độ ảnh hưởng của hiệu ứng kiểm chế nở hông ở vỏ thép lên lõi bê tông bên trong. Nếu hệ số kiểm chế nở hông càng lớn thì các cột có xu hướng phá hủy theo kiểu vết nứt hình ngang, còn ngược lại nếu hệ số kiểm chế nở hông nhỏ thì phá hủy dưới dạng các vết nứt theo mặt cắt xiên. Quan sát trên hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu trước đây [1]-[7][11].

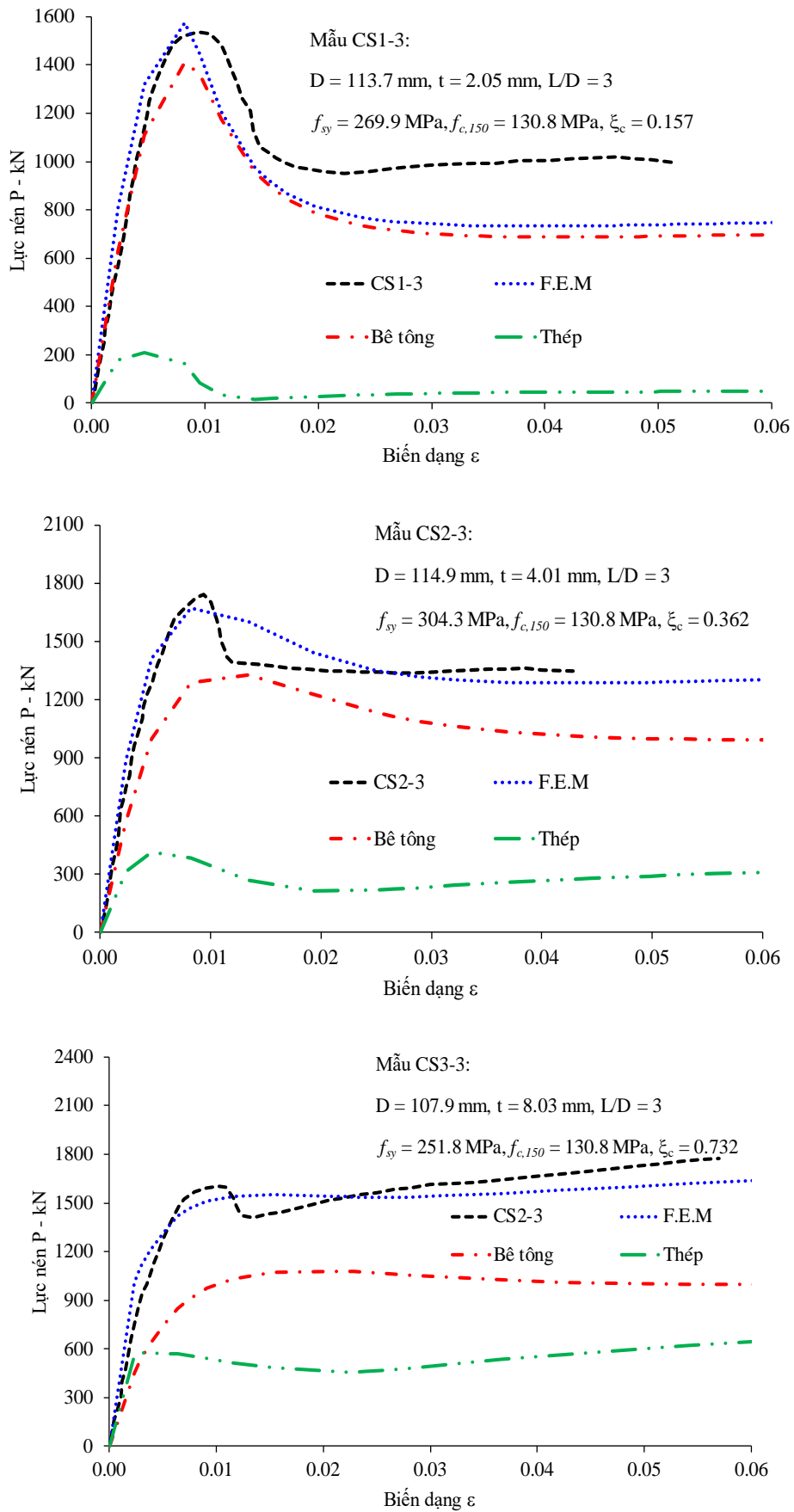


Hình 4. So sánh hình dạng phá hủy giữa mô hình FEM và quan sát từ thực nghiệm.

3.2. Đường cong quan hệ lực - biến dạng

Hình 5 so sánh đường cong quan hệ lực - biến dạng của mô hình FEM và kết quả thí nghiệm. Kết quả dự đoán từ mô hình FEM cho độ chính xác cao so với thí nghiệm.

Nhìn chung đường cong ứng xử lực - biến dạng đạt được từ FEM và thí nghiệm bao gồm các giai đoạn: (1) tuyến tính; (2) chảy dẻo đến lực tới hạn; (3) giảm tải hoặc tăng cứng sau khi đạt tải tới hạn; (4) ứng xử Lực - Biến dạng có xu hướng đi ngang đến khi kết thúc gia tải.



Hình 5. So sánh đường cong Lực - Biến dạng giữa FEM và thực nghiệm.

Với mẫu CS1-3, sau khi đạt đỉnh xu hướng giảm tải rất nhanh do hệ số kiểm chế nở hông thấp. Việc tăng chiều dày ở mẫu CS2-3 đã cải thiện rất đáng kể khả năng chịu lực sau khi đạt đỉnh và đạt tải cực hạn, giai đoạn rớt tải thấp hơn so với mẫu CS1-3.

Riêng mẫu CS3-3 với hệ số kiểm chế nở hông lớn hơn hai cột còn lại nên xuất hiện tăng cứng (đường cong dốc lên) sau khi rớt tải ở một đoạn thấp. Điều đó có thể kết luận rằng hệ số kiểm chế nở hông ảnh hưởng rất lớn đến ứng xử của cột sau khi đạt lực cực hạn.

Hình 5 còn thể hiện được đường cong phân bố lực trên lõi bê tông UHSC và thép theo từng giai đoạn gia tải. Lực nén tới hạn có sự đóng góp rất lớn từ thành phần lõi bê tông UHSC, trong khi đó lực phân bố trên ống thép khá nhỏ. Mặt khác, sự thay đổi cường độ chảy dẻo của thép không ảnh hưởng nhiều trong giá trị lực nén lớn nhất mà chỉ ảnh hưởng đến giai đoạn sau khi thép đạt đến ứng suất chảy cực hạn.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả mô phỏng FEM trong phần mềm ABAQUS và kiểm chứng lại một số thí nghiệm nén đúng tâm của cột bê tông UHSC nhồi ống thép đã thực hiện của các tác giả nghiên cứu trước. Các kết luận được rút ra như sau:

- Mô hình FEM mới được thiết lập trong ABAQUS với sự hiệu chỉnh mô hình vật liệu của bê tông UHSC có kết quả khá chính xác so với thực nghiệm. Mô hình có thể được sử dụng cho các nghiên cứu đi sâu về ứng xử của loại cột này.

- Đường cong quan hệ lực - biến dạng giữa mô hình FEM và thí nghiệm có sự tương đồng qua các giai đoạn ứng xử. Có thể thấy lõi bê tông UHSC đóng góp nhiều vào sức chịu tải chung của cột CFST hơn so với vỏ thép.

- Hệ số hiệu ứng kiểm chế nở hông ảnh hưởng khá nhiều đến ứng xử của cột CFST sau khi đạt lực nén cực đại. Nếu hệ số nở hông lớn thì đường cong quan hệ lực - biến dạng sau khi đạt tải cực hạn sẽ có đoạn rớt tải thấp hơn và có xu hướng tăng cứng nhiều hơn.

Tài liệu tham khảo

- [1] L. -H. Han, D. Lam, and D. A. Nethercot; CRC Press. 2018 “Design guide for concrete-filled double skin steel tubular structures”. Florida, USA: CRC Press. 2019.
- [2] L. -H. Han, W. Li, and R. Bjorhovde; “Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members”. Journal of Constructional Steel Research. 2014; 100:211-228. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.04.016.
- [3] M. Shams and M. A. Saadeghvaziri; “State of the art of concrete-filled steel tubular columns”. ACI Structural Journal. 1997; 94(5):558-571. DOI:10.14359/505.
- [4] N. E. Shanmugam and B. Lakshmi; “State of the art report on steel-concrete composite columns”. Journal of Constructional Steel Research. 2001; 57(10):1041-1080. DOI: 10.1016/S0143-974X(01)00021-9.
- [5] K. A. Godfrey, et al.; “Concrete strength record jumps 36%”. Civil Engineering-ASCE. 1987; 57(10):84-86.
- [6] B. Uy; “Applications, behaviour, design, research and sustainability of steel and composite structures in Australia”; in Proc. the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11+), 18-22 September 2011, Seoul, Korea. Korea: Techno Press. 2011; pp.139-157.
- [7] Z. Tao, Z. -B. Wang and Q. Yu; “Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression”. Journal of Constructional Steel Research. 2013; 89:121-131. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.07.001.
- [8] P. C. Nguyen, et al.; “Modified Numerical Modeling of Axially Loaded Concrete-Filled Steel Circular-Tube Columns”. Engineering, Technology & Applied Science Research. 2021; 11(3):7094-7099. DOI: 10.48084/etasr.4157.
- [9] S. Chen, R. Zhang, L. -J. Jia, J. -Y. Wang, P. Gu; “Structural behavior of UHPC filled steel tube columns under axial loading”. Thin-Walled Structures. 2018; 130:550-563. DOI: 10.1016/j.tws.2018.06.016.

- [10] L. H. An; “Behavior of circular steel tube confined UHPC and UHPFRC columns under axial compression”. Kassel, Germany: Kassel University Press. 2018.
- [11] A. K. Samani and M. M. Attard; “A stress–strain model for uniaxial and confined concrete under compression”. *Engineering Structures*. 2012; 41:335-349. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.03.027.
- [12] B. D. Nicolo, L. Pani and E. Pozzo; “Strain of concrete at peak compressive stress for a wide range of compressive strengths”. *Materials and Structures*. 1994; 27:206-210. DOI: 10.1007/BF02473034.
- [13] B. Binici; “An analytical model for stress–strain behavior of confined concrete”. *Engineering Structures*. 2005; 27(7):1040-1051. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.03.002.