



Mô phỏng ứng xử của cột vuông ống thép nhồi bê tông với các cường độ vật liệu bê tông khác nhau

Numerical simulation of structural performance of square CFST columns with various concrete strengths

Phạm Thanh Tuấn, Vũ Hiếu Phương, Phạm Đức Duy, Lê Hoàng An*

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

Từ khóa:

Cột vuông ống thép
nhồi bê tông
Phần tử hữu hạn
Cường độ bê tông

TÓM TẮT

Cột ống thép nhồi bê tông (CFST) kết hợp các ưu điểm của thép và bê tông, tạo nên kết cấu có cường độ chịu lực và độ bền cao, từ đó, mang lại hiệu quả kinh tế cho các công trình xây dựng. Các nghiên cứu trước đây đã khám phá và nâng cao hiệu suất của CFST thông qua các phương pháp thử nghiệm và mô phỏng. Nghiên cứu này tập trung vào việc mô phỏng ứng xử của cột vuông ống thép nhồi bê tông bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), sử dụng phần tử khối và phần tử tấm để mô hình hóa lõi bê tông và vỏ thép tương ứng. Kết quả so sánh giữa dữ liệu thực nghiệm và mô phỏng FEM cho thấy sự tương đồng đáng kể, mặc dù, có khác biệt sau khi lực nén đạt đỉnh. Kết quả cho thấy việc tăng cường độ của lõi bê tông trong cột CFST ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu tải của kết cấu. Những kết quả này cung cấp thông tin quan trọng để tối ưu hóa thiết kế và ứng dụng thực tiễn của CFST trong ngành xây dựng và hiểu rõ hơn về ứng xử của cột CFST.

Keywords:

Square CFST
FEM
Concrete strength

ABSTRACT

Concrete-filled Steel Tube (CFST) columns combine the advantages of steel and concrete, resulting in structures with high load-bearing capacity and durability, thereby providing economic benefits for construction projects. Previous studies have focused on exploring and enhancing the performance of CFST through experimental and simulation methods. This research concentrates on simulating the behavior of square CFST columns using the Finite Element Method (FEM), utilizing solid elements and shell elements to model the concrete core and the steel shell, respectively. The comparison between experimental data and FEM simulations shows significant similarity, although differences emerge after the compressive force reaches its peak. The results indicate that increasing the strength of the concrete core in CFST columns significantly affects the structure's load-bearing capacity. These findings provide vital information for optimizing the design and practical application of CFST in the construction industry and offer a deeper understanding of the behavior of CFST columns.

* Lê Hoàng An. 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

Email: hoangan.le@ut.edu.vn

[https://www.doi.org/10.55228/JTST.14\(1\).1-10](https://www.doi.org/10.55228/JTST.14(1).1-10)

Ngày nhận bài: 25/11/2024; Ngày nhận bài sửa: 28/12/2024; Ngày chấp nhận đăng: 14/01/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/01/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Cột ống thép nhồi bê tông (Concrete-Filled Steel Tube - CFST) là một giải pháp kết cấu hiện đại, kết hợp các ưu điểm về cơ học và vật liệu của thép và bê tông để tạo ra một kết cấu chịu lực hiệu quả, linh hoạt và kinh tế. Sự kết hợp này, giúp cột CFST có khả năng chịu lực nén và lực kéo tốt, đồng thời, tăng cường độ dẻo dai, khiến nó trở thành lựa chọn ưu việt trong các công trình đòi hỏi khả năng chịu tải trọng lớn và đảm bảo an toàn kết cấu. Lớp thép bên ngoài đóng vai trò như một lớp chịu lực kéo và hạn chế biến dạng cục bộ, trong khi phần bê tông lõi bên trong chịu lực nén, cải thiện khả năng chịu lửa của hệ kết cấu [1], [2].

Từ giữa thế kỷ XX, đặc biệt trong bối cảnh tái thiết sau Thế chiến II, nhu cầu phát triển các công trình cao tầng và kết cấu quy mô lớn đã thúc đẩy sự ra đời và ứng dụng của cột CFST. Tại châu Âu và Hoa Kỳ, các công trình dân dụng và công nghiệp bắt đầu áp dụng cột CFST trong kết cấu chịu lực chính, nhờ vào khả năng chịu tải cao và tính tiết kiệm không gian so với các phương pháp truyền thống [3].

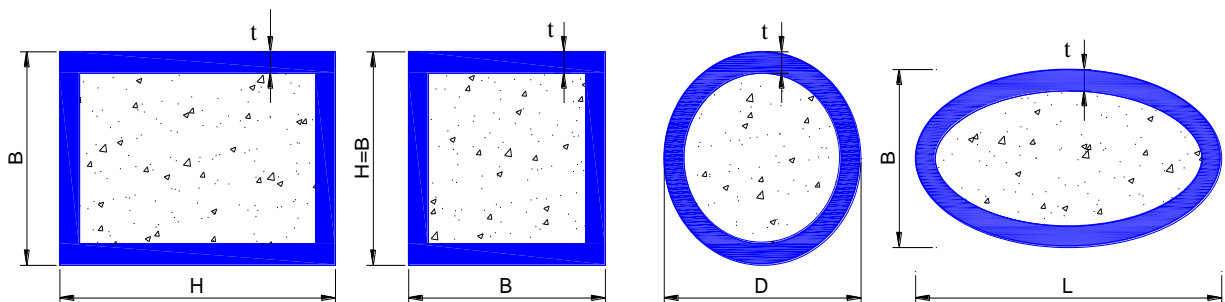
Trong những năm gần đây, nhờ sự tiến bộ của công nghệ vật liệu và phương pháp mô phỏng kết cấu, cột CFST tiếp tục được cải tiến và ứng dụng rộng rãi trên toàn thế giới. CFST được sử dụng trong các công trình mang tính biểu tượng, từ các tòa nhà cao tầng, cầu đường đến các công trình dân dụng, nhấn mạnh khả năng chịu lực lớn, tính bền vững và độ bền cao trước các tác động của môi trường như động

đất và thời tiết khắc nghiệt [4], [5]. Tại Việt Nam, CFST được ứng dụng thành công trong các công trình giao thông trọng điểm như cầu Đông Trù tại Hà Nội và tòa nhà Bitexco Financial Tower ở Thành phố Hồ Chí Minh, góp phần tối ưu hóa khả năng chịu lực và bảo vệ môi trường.

Nhiều nghiên cứu về CFST đã khảo sát về cách thức tương tác giữa thép và bê tông, tìm ra các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của hệ kết cấu này. Hào [6] đã mô phỏng phi tuyến trên ABAQUS cho thấy khả năng chịu tải của cột tăng tương ứng với gia tăng cường độ chịu nén của bê tông, đồng thời, tải trọng được phân bố lên lõi bê tông một cách hiệu quả hơn.

Sĩ và cộng sự [7] đã đối chiếu kết quả mô phỏng với các tiêu chuẩn thiết kế (AS/NZS 5100.6, AISC, Eurocode 4 và GB 50936-2014) và cho thấy giá trị khả năng chịu nén đúng tâm theo các tiêu chuẩn này gần bằng với dữ liệu thí nghiệm. Kết quả mô phỏng còn chỉ ra đường cong lực - biến dạng cũng như dạng phá hoại có sự tương đồng so với thực nghiệm.

Ngoài ra, đối với các cột CFST ở tuổi rất sớm, Ma và cộng sự [8] đã tiến hành nghiên cứu và phát triển mô hình ứng suất - biến dạng đặc trưng cho giai đoạn đầu của cột CFST. Kết quả cho thấy khả năng chịu tải của cột tăng nhanh trong những ngày đầu và đạt tới 70 - 80% khả năng chịu tải ở ngày thứ bảy, điều này rất quan trọng trong các dự án yêu cầu thời gian thi công nhanh chóng.



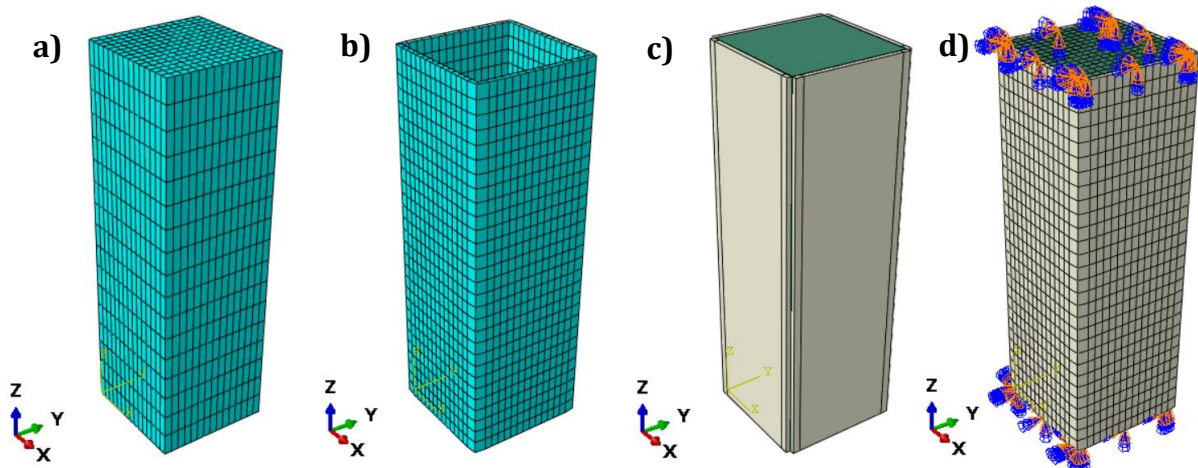
Hình 1. Cột ống thép nhồi bê tông điển hình.

Trong điều kiện chịu nhiệt, Bình và cộng sự [9] đã đánh giá khả năng chịu lửa của cột CFST. Khi nhiệt độ của ống thép tăng đến 600°C, cường độ thép suy giảm đáng kể, dẫn đến việc chuyển tải trọng sang lõi bê tông. Với mô phỏng bằng phần mềm SAFIR cho thấy khả năng dự đoán chính xác ứng xử của CFST khi chịu tác động nhiệt.

Nghiên cứu của Yang và Han [10] đã khảo sát ứng xử của cột CFST dưới tải lệch tâm. Kết quả cho thấy khi độ lệch tâm tăng, sức chịu tải của cột giảm nhưng vẫn duy trì tính dẻo dai. Điều này cung cấp thông tin quan trọng cho các công trình phải đối mặt với các tình huống tải trọng phức tạp. Lam và cộng sự [11] đã mô phỏng trên phần mềm ABAQUS để đánh giá khả năng chịu nén của cột CFST với các đặc

điểm nghiêng (góc nghiêng so với phương thẳng đứng) và thon (sự giảm dần kích thước tiết diện dọc theo chiều cao cột). Kết quả cho thấy, khả năng chịu tải giảm đáng kể khi góc nghiêng hoặc mức độ thon của cột tăng. Nghiên cứu này lưu ý cần xem xét thiết kế cột CFST phù hợp với các đặc tính hình học, đảm bảo hiệu quả và an toàn trong các ứng dụng thực tiễn.

Các nghiên cứu gần đây quan tâm đến cải tiến kết cấu CFST, đã tập trung vào nâng cao các thuộc tính cơ học. Li và cộng sự [12], [13] đã chỉ ra rằng việc sử dụng hỗn hợp sợi hybrid không chỉ tăng cường độ cứng còn nâng cao khả năng chịu tải, dù một số tính chất về độ dẻo của kết cấu có thể giảm nhẹ. Những cải tiến này giúp mở rộng ứng dụng của CFST, đặc biệt trong các công trình yêu cầu cường độ cao.



Hình 2. Mô phỏng FEM điển hình các mẫu cột vuông CFST trong ABAQUS.
(a) Lõi bê tông (C3DR), (b) Vỏ ống thép (S8), (c) Mẫu cột CFST, (d) Điều kiện biên ban đầu.

Tuy có nhiều nghiên cứu và ứng dụng về cột CFST trong lĩnh vực xây dựng song những hiểu biết hiện nay về cơ chế làm việc và sự tương tác giữa thép và bê tông vẫn còn hạn chế. Đặc biệt, các hiện tượng biến dạng cục bộ và sự phát triển ứng suất khi chịu các chế độ tải trọng phức tạp chưa được nghiên cứu toàn diện, dẫn đến khó khăn khi dự đoán chính xác khả năng làm việc của cột CFST trong điều kiện thực tế. Do đó, nghiên cứu này hướng đến việc mô phỏng cột CFST với sự thay đổi cường độ bê tông, qua đó, phân tích ảnh hưởng của cường

độ bê tông đến đặc tính chịu lực và biến dạng của kết cấu. Kết quả thu được góp phần hoàn thiện quy trình thiết kế cột CFST cho những công trình quy mô lớn, đồng thời, nâng cao tính an toàn và hiệu quả kinh tế trong ứng dụng thực tiễn.

2. Mô hình mô phỏng FEM

2.1 Mô hình lưới phần tử

Trong quá trình mô phỏng cột CFST trên phần mềm ABAQUS, lựa chọn và sử dụng các loại phần tử rất quan trọng để đảm bảo kết quả

phân tích chính xác và đáng tin cậy. Trong quá trình này, nhóm tác giả sử dụng hai loại phần tử chính là phần tử khối (solid elements) và phần tử tấm (shell elements) [14].

Khi mô phỏng cột CFST, với phần tử khối sử dụng loại C3D8R để mô phỏng lõi bê tông của cột. Phần tử này cho phép tái hiện các biến đổi phức tạp như nén, căng và uốn trong bê tông một cách chính xác. Với khả năng mô phỏng cấu trúc dày và đa chiều, phần tử khối giúp hiểu rõ hơn về ứng xử cơ học của lõi bê tông.

Phần tử tấm loại S4 được sử dụng để mô phỏng vỏ thép bao quanh lõi bê tông. Với cấu trúc mỏng như vỏ thép, phần tử tấm này giảm số lượng phần tử cần thiết và tối ưu hóa quá trình tính toán. Bằng cách này, vỏ thép được mô phỏng tốt. Quá trình chia lưới phần tử được thực hiện dựa trên kích thước phù hợp với phân bố ứng suất dư.

2.2 Mô hình vật liệu

Mô hình vật liệu bê tông

Mô hình đề xuất bởi Han và cộng sự [15] được sử dụng trong nghiên cứu này vì tính hiệu quả trong việc mô phỏng ứng xử cơ học của bê tông khi bị giam giữ bởi ống thép. Mô hình này gồm ba giai đoạn, như được hiển thị trong Hình 3. Trong giai đoạn ban đầu (OA), không có hoặc rất ít sự tương tác giữa ống thép và bê tông. Do đó, nhánh tăng của mối quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông không bị giam giữ là phù hợp để đại diện cho đoạn cong ban đầu cho đến khi đạt đến ứng suất lớn nhất f'_c xem phương trình (1). Sau đó, trong giai đoạn chảy dẻo (AB), bê tông trải qua gia tăng biến dạng đáng kể do hiệu ứng giam giữ của ống thép. Sự tăng cường cường độ bê tông trong giai đoạn này được mô phỏng thông qua tương tác giữa ống thép và bê tông. Khi vượt qua ứng suất cực đại, bê tông chuyển sang giai đoạn giảm (BC), do cường độ chịu nén giảm trong khi biến dạng tiếp tục tăng, phản ánh rõ đặc tính dẻo của vật liệu trong điều kiện giam giữ xem phương trình (2).

- Giai đoạn OA:

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

$$\text{Với: } X = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}} \quad A = \frac{E_c \varepsilon_{co}}{f'_c} \quad B = \frac{(A-1)^2}{0.55} - 1$$

Trong đó:

σ : Ứng suất của bê tông;

f'_c : Cường độ chịu nén cực đại của bê tông;

ε : Biến dạng của bê tông;

E_c : Mô đun đàn hồi của bê tông;

ε_o : Biến dạng bê tông bắt đầu chịu hiệu ứng giam giữ (điểm A);

ε_{cc} : Biến dạng bê tông tại cường độ nén cực đại (điểm B).

- Giai đoạn BC:

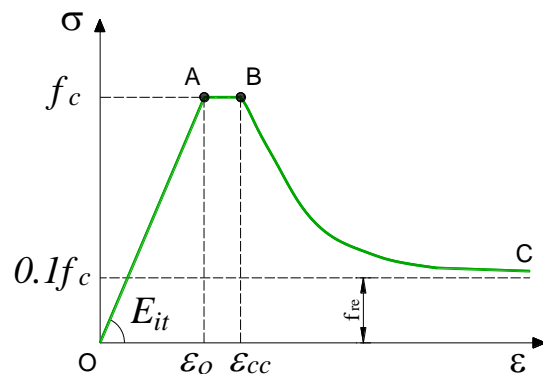
$$\sigma = f_r + (f'_c - f_r) e^{-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cc}}{\alpha}\right)^\beta} \quad \varepsilon > \varepsilon_{cc} \quad (2)$$

$$\text{Với: } f_r = 0.1f'_c \quad \alpha = 0.005 + 0.0075\xi_c$$

Trong đó:

f_r : Sức chịu tải còn lại của bê tông sau khi xuất hiện vết nứt;

α : Hệ số xét đến sự suy giảm ứng suất.

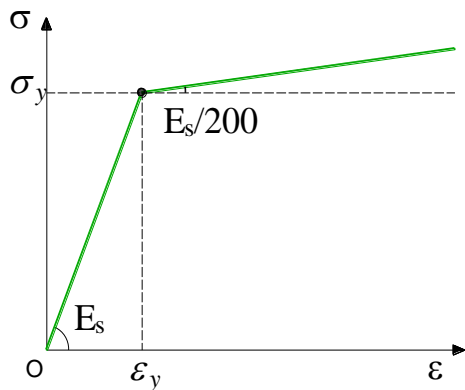


Hình 3. Đường cong ứng suất - biến dạng trong mô phỏng ứng xử của lõi bê tông.

Mô hình vật liệu thép

Mô hình dẻo Von Mises thường được áp dụng kết hợp với mô hình tuyến tính để mô tả

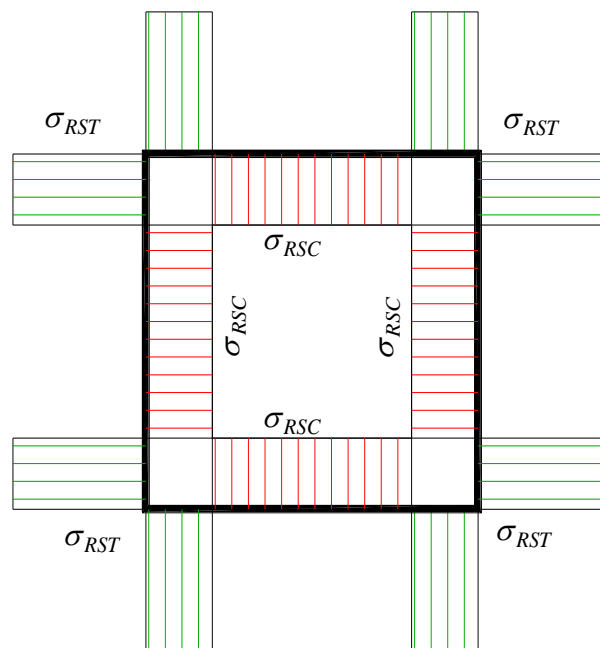
đặc tính cơ học của cốt thép. Với các thông số mô đun đàn hồi và tỷ lệ Poisson lần lượt là 200 GPa và 0,3 [5], [6]. Mô hình này giả định rằng cốt thép sau khi trải qua giai đoạn đàn hồi chuyển sang giai đoạn dẻo tới vô hạn. Trong phạm vi này, cường độ chảy của vật liệu là yếu tố quyết định duy nhất, và điều này được minh họa trong Hình 4.



Hình 4. Đường cong ứng suất - biến dạng trong mô phỏng ứng xử của vỏ thép.

Mô hình ứng suất dư

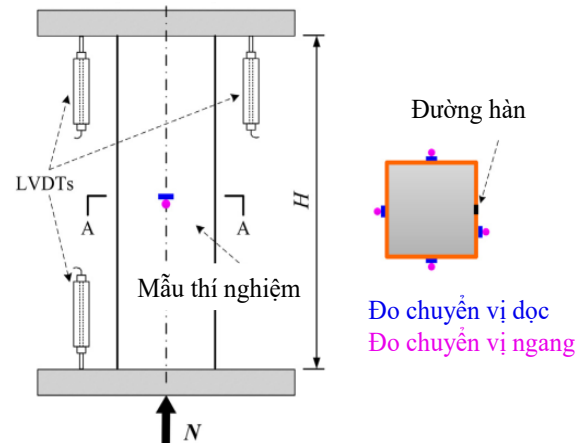
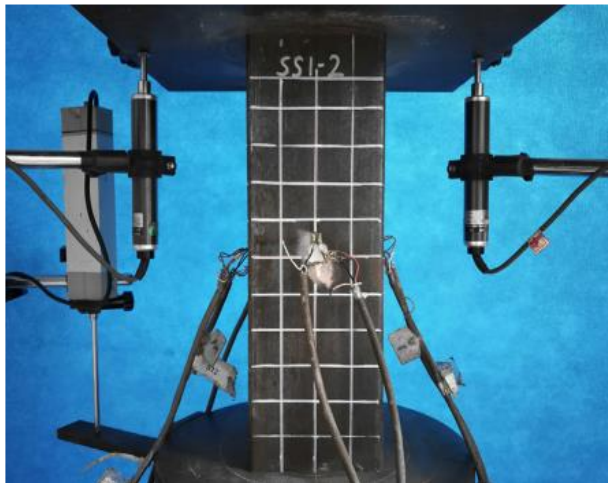
Đối với các cột CFST vuông, lõi bê tông phải chịu giam giữ không đồng đều, ứng suất tại các góc cao hơn so với các phần khác, được thể hiện tại Hình 5.



Hình 5. Ứng suất dư trong mô phỏng của vỏ thép.

3. Kiểm chứng thí nghiệm

Chen và cộng sự [16] đã phân tích về ứng xử cơ học cột ứng xử kết cấu của cột ống thép chứa bê tông tính năng cao (UHPCFST) so với cột ống thép sử dụng bê tông thường (CFST), dưới tải nén đúng tâm. Kết quả cho thấy dù ống thép và UHPC hoạt động tốt với nhau nhưng hiệu ứng cải thiện của ống thép đối với lõi bê tông cường độ UHPC không đáng kể như với bê tông thông thường (Hình 6). Kết quả cung cấp thông tin về các chế độ phá hủy, đường cong ứng suất - biến dạng và ảnh hưởng của các tham số như cường độ của bê tông cốt và hệ số hạn chế (confinement factor). Chen và cộng sự [16] tiến hành thử nghiệm tổng cộng 24 mẫu, bao gồm các mẫu có tiết diện tròn (CS) và tiết diện vuông (SS), dưới tải nén trục. Các mẫu thí nghiệm được chia thành 12 mẫu sử dụng bê tông tính năng cao (UHPC), 06 mẫu CFST thông thường và 06 mẫu cột thép rỗng. Trong nghiên cứu này, các thông số kỹ thuật của cột với sự thay đổi cường độ bê tông ở lõi lấy từ nghiên cứu của Chen và cộng sự [16] được mô phỏng lại và thể hiện trong Bảng 1.



Hình 6. Quá trình thí nghiệm của Chen và cộng sự [16].

Bảng 1. Thông số mẫu thực nghiệm của Chen và cộng sự [16].

Mẫu thí nghiệm	Chiều rộng (mm)	t (mm)	L (mm)	B/t	L/B	f_c (MPa)	f_y (MPa)	ξ	N_u (kN)
SS1-1	100.4	2.07	300	48.6	3	59	348.7	0.519	987
SS1-2	100.4	2.03	300	49.5	3	113.2	348.7	0.265	1406
SS1-3	100.7	2.05	300	48.9	3	130.8	348.7	0.232	1575

4. Kết quả mô phỏng

Hình 7 trình bày sự so sánh giữa kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Qua Hình 7a của mẫu SS1-1 cho thấy ứng xử của thực nghiệm và mô phỏng đều tăng đến cùng một điểm trước khi giảm mạnh. Tuy nhiên, sau điểm giảm, đường cong thực nghiệm có xu hướng phục hồi và duy trì mức lực nén ổn định so với đường cong FEM. Sau khi giảm, không phục hồi và tiếp tục ổn định ở mức lực nén thấp hơn và phá hủy.

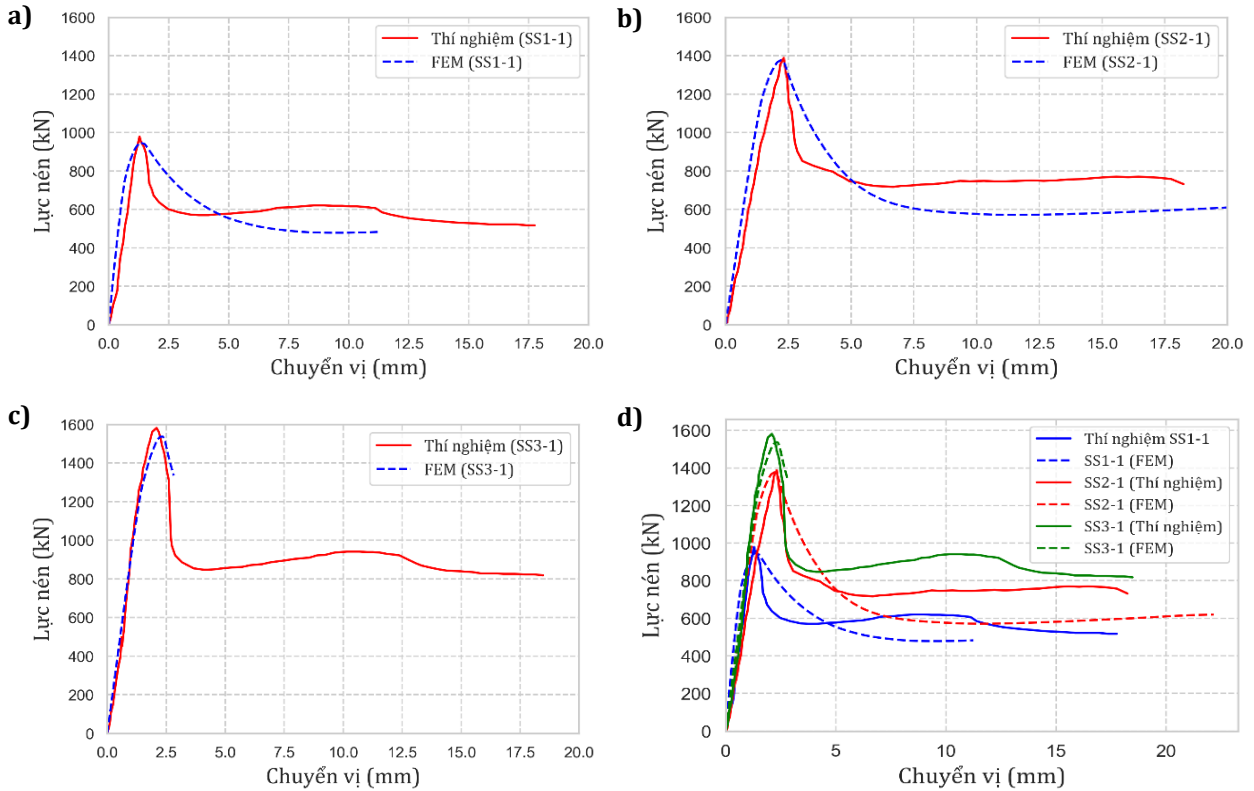
Với mẫu SS1-2 và SS1-3 thể hiện tại Hình 7b và Hình 7c cho thấy tương tự như mẫu SS1-1, hai đường cong trong giai đoạn đầu khá tương đồng đều tăng nhanh đến điểm đỉnh, sau đó, đường cong thực nghiệm duy trì một mức lực nén tương đối ổn định, trong khi đường cong mô phỏng FEM giảm và ổn định ở mức thấp hơn so với thực nghiệm. Thông qua Hình 7d thấy rằng, kết quả thực nghiệm và mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn cho các mẫu cột CFST với cường độ lõi bê tông khác

nhau, 59 MPa cho mẫu SS1-2, 113 MPa cho mẫu SS1-1, và 130 MPa cho mẫu SS1-3. Các đường cong trên biểu đồ cho thấy sự tương đồng trong giai đoạn đàn hồi và đạt đỉnh. Đối với mẫu SS1-2 và SS1-1, nhánh mềm sau đạt đỉnh, đường cong thực nghiệm duy trì một lực nén tương đối ổn định, trong khi đường cong mô phỏng FEM thể hiện một độ sụt giảm và ổn định ở một mức thấp hơn. Mẫu SS1-3 có cường độ bê tông cao nhất là 130 MPa, kết quả thực nghiệm và mô phỏng FEM đều duy trì mức lực nén khá ổn định. Tuy nhiên, với mô phỏng, sau khi qua điểm đạt đỉnh thì giảm đột ngột.

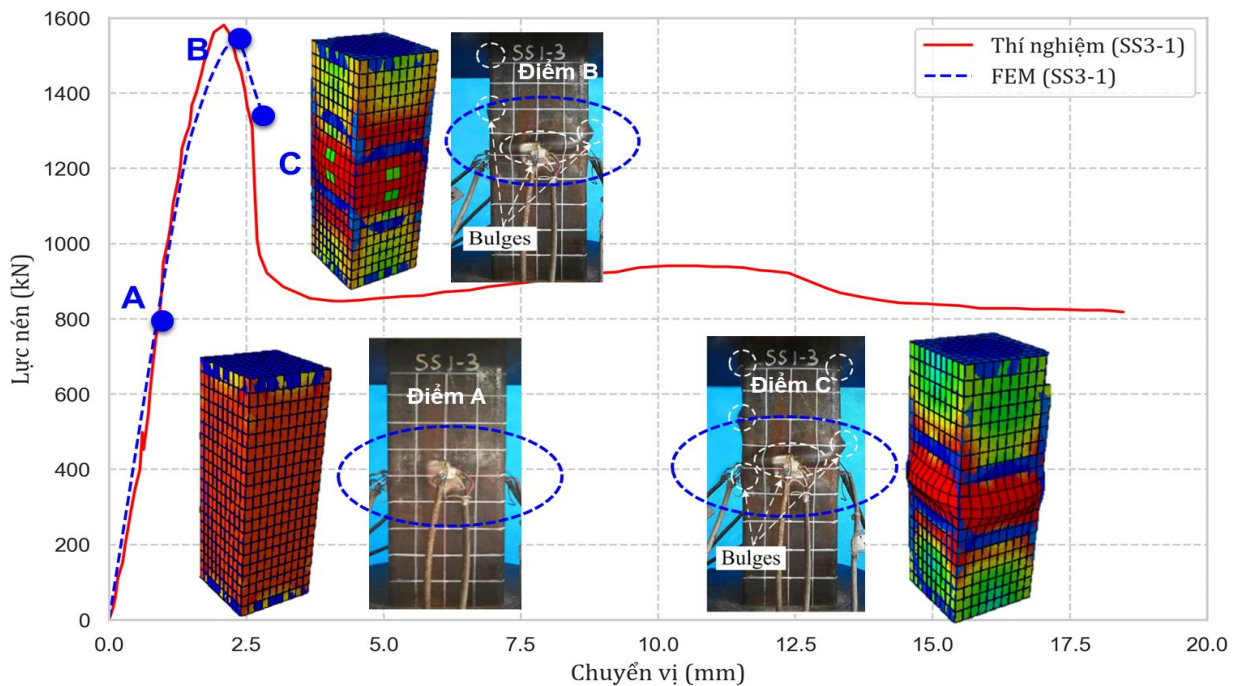
Hình dạng biến dạng thông qua mô phỏng và thực nghiệm của mẫu cột SS1-3 cho thấy sự tương đồng theo các giai đoạn (Hình 8). Cả hai kết quả đều xuất hiện hiện tượng phồng rộp (bulging) tại các điểm chịu lực cao, đặc biệt ở khu vực giữa cột, cho thấy sự phát triển của các vùng ứng suất cục bộ. Hình dạng phá hủy trong thực nghiệm có sự phồng cục bộ rõ rệt, và mô phỏng FEM cũng thể hiện hiện tượng này qua các vùng biến dạng lớn.

Hình 9 cho thấy khả năng chịu lực tối đa của các mẫu bê tông. Mẫu SS1-1 ($f'_c = 59 \text{ MPa}$) đạt tải trọng cực đại 969,4 kN. Khi cường độ bê tông tăng lên $f'_c = 113,2 \text{ MPa}$ (SS2-1), khả năng chịu lực tăng đáng kể đến 1.373,5 kN (tương

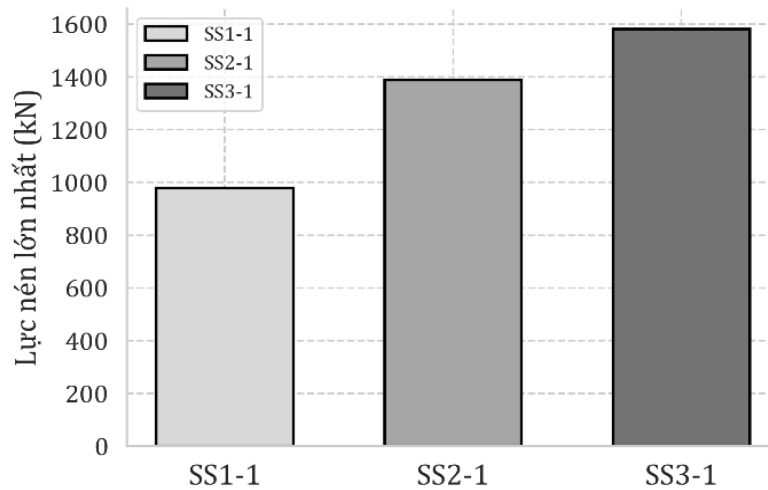
ứng 41,68% so với SS1-1). Mẫu SS3-1 ghi nhận 1.569,0 kN, tăng 61,85% so với SS1-1. Kết quả cho thấy tăng cường độ lõi bê tông trong cột CFST mang lại hiệu quả lớn trong việc gia tăng khả năng chịu lực.



Hình 7. Đường cong lực - chuyển vị của các mẫu trong thực nghiệm và FEM.
 (a) Mẫu SS1-1, (b) Mẫu SS1-2, (c) Mẫu SS1-3, (d) Hợp các mẫu.



Hình 8. Hình dạng phá hủy theo hình theo giai đoạn mẫu SS1-3.



Hình 9. So sánh cường độ chịu nén tối đa của các mẫu.

5. Kết luận

Từ kết quả phân tích và so sánh, có thể rút ra một số kết luận sau:

Kết quả mô phỏng bằng FEM và thí nghiệm thực tế cho thấy sự tương đồng đáng kể trong giai đoạn đàn hồi và khi đạt đến lực nén tối đa. Điều này cho thấy mô hình FEM có khả năng dự đoán chính xác ứng xử của cột CFST trong giai đoạn chịu tải ban đầu, đặc biệt là trong giai đoạn đàn hồi.

Sau khi lực nén đạt đỉnh, có sự khác biệt đáng chú ý giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng FEM. Đường cong thực nghiệm thể hiện lực nén được duy trì ở mức ổn định, trong khi kết quả mô phỏng cho thấy lực nén giảm mạnh và không có sự phục hồi. Do đó, cần nghiên cứu và tích hợp thêm các yếu tố như ảnh hưởng của điều kiện thực nghiệm và tính không đồng nhất của vật liệu vào mô hình.

Kết quả thực nghiệm chỉ ra việc tăng cường độ của lõi bê tông trong cột CFST có ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu tải. Các mẫu cột với cường độ bê tông cao hơn thể hiện khả năng chịu nén vượt trội so với cột có cường độ thấp hơn, như vậy, tăng cường độ bê tông là một phương pháp hiệu quả để cải thiện khả năng chịu lực của kết cấu.

Các mẫu cột với cường độ bê tông cao hơn thể hiện độ cứng và sự ổn định tốt hơn sau khi

đạt đỉnh so với các mẫu có cường độ thấp hơn. Điều này cho thấy rằng cường độ bê tông không chỉ ảnh hưởng đến khả năng chịu tải tối đa còn cải thiện khả năng duy trì lực nén trong giai đoạn giảm tải.

Mặc dù, mô hình FEM cho thấy sự chính xác trong giai đoạn đàn hồi, nhưng vẫn chưa thể hiện được đầy đủ ứng xử sau đạt đỉnh của cột CFST. Để mô phỏng chính xác hơn, cần nghiên cứu và tích hợp thêm các yếu tố như ảnh hưởng của điều kiện thực nghiệm và tính không đồng nhất của vật liệu vào mô hình.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Phạm Thanh Tuấn: Phương pháp, Điều tra, Xác thực, Trực quan hóa, Tiếp nhận tài trợ, Viết – bản thảo gốc. **Vũ Hiếu Phương:** Biên soạn dữ liệu, Phân tích dữ liệu. **Phạm Đức Duy:** Biên soạn dữ liệu, Phân tích dữ liệu. **Lê Hoàng An:** Phương pháp, Giám sát, Tiếp nhận tài trợ, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, Viết – bản thảo gốc, chỉnh sửa bản thảo, Phản hồi ý kiến phản biện.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Lời cảm ơn

Công trình này thuộc đề tài mã số KH2303 được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh (UTH). Các tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn đối với sự hỗ trợ tài chính.

Thanh Tuan Pham. *Sustainable Development in Construction and Transport Research Group (SDCT), University of Transport Ho Chi Minh City*

Hieu Phuong Vu. *Sustainable Development in Construction and Transport Research Group (SDCT), University of Transport Ho Chi Minh City*

Duc Duy Pham. *Sustainable Development in Construction and Transport Research Group (SDCT), University of Transport Ho Chi Minh City*

Hoang An Le. *Sustainable Development in Construction and Transport Research Group (SDCT), University of Transport Ho Chi Minh City*

*Corresponding author: hoangan.le@ut.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] D. -D. Pham and P. -C. Nguyen, "Finite element modelling for concrete-filled steel circular tube columns subjected to axial compression," in *Proc. CIGOS - Innovation for Sustainable Infrastructure*, 2019, pp. 75-80, doi: [10.1007/978-981-15-0802-8_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8_8).
- [2] D. -D. Pham, H. -P. Vu, H. -V. Nguyen, V. -T. Trinh, and D. -X. Tu, "Behavior of CFDST stub columns considering various concrete strengths," in *Proc. 3rd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2022)*, 2022, pp. 141-147, doi: [10.1007/978-3-031-39090-6_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39090-6_16).
- [3] J. R. Joseph and J. H. Henderson, "Concrete-filled steel tube truss girders—a state-of-the-art review," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 70, 2023, Art. no. 49, doi: [10.1186/s44147-023-00220-w](https://doi.org/10.1186/s44147-023-00220-w).
- [4] B. Kumari, "Concrete filled steel tubular (CFST) columns in composite structures," *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, vol. 13, no. 1, ver II, pp. 11-18, Jan./Feb. 2018. [Online]. Available: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jeee/Papers/Vol13%20Issue%201/Version-2/B1301021118.pdf>
- [5] V. Q. Việt, P. T. Hoàn, và T. V. Hùng, "Ảnh hưởng của các tham số hình học đến ứng xử của cấu kiện ống thép hai lớp nhồi bê tông chịu uốn," *Tạp chí Xây dựng*, số 1, 2020. [Online]. Available: <https://tapchi.ibst.vn/ckfinder/userfiles/files/1.2020/Vu%20Quang%20Viet.pdf>
- [6] P. Đ. Hào và T. H. Hiệp, "Mô phỏng cột ngắn ống thép nhồi bê tông cường độ cao chịu tải trọng nén đúng tâm," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 4, 2016. [Online]. Available: https://ibst.vn/upload/documents/file_upload/1488352299PhanDinhHao.pdf
- [7] N. Q. Sĩ, N. H. Quân, L. Đ. Dũng, N. T. Quý, and P. C. Tiên, "Nghiên cứu ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, tập 13, số 2, 2023. [Online]. Available: <https://ojs.jomc.vn/index.php/vn/article/view/454/269>
- [8] L. Ma, H. Wang, and J. Zhang, "Axial compression experiment and numerical simulation of CFST short columns at an ultra-early age," *Structures*, vol. 59, Jan. 2024, Art. no. 105674, doi: [10.1016/j.istruc.2023.105674](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105674).
- [9] C. T. Bình, "Nghiên cứu thực nghiệm cột ống thép nhồi bê tông trong điều kiện cháy," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 2/2012, 2012. [Online]. Available: <https://ibst.vn/DATA/nhuyen/Chu%20Thi%20Binh-web.pdf>
- [10] Y. -F. Yang and L. -H. Han, "Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 49, no. 2, pp. 379-395, Feb. 2011, doi: [10.1016/j.tws.2010.09.024](https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.09.024).
- [11] D. Lam, X. H. Dai, L. H. Han, Q. X. Ren, and W. Li, "Behaviour of inclined, tapered and STS square CFST stub columns subjected to axial load," *Thin-Walled Structures*, vol. 54, pp. 94-105, May 2012, doi: [10.1016/j.tws.2012.02.010](https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.02.010).
- [12] W. Li, Z. Wang, W. Wu, L. Sun, and B. Chen, "Axial compressive performance of hybrid fiber cementitious composite-encased CFST columns," *Materials Today Communications*, vol. 35, Jun. 2023, Art. no. 106044, doi: [10.1016/j.mtcomm.2023.106044](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106044).
- [13] W. Li, X. Zhao, and Y. Lu, "Mechanism-based unified design formula for axially loaded CFST

- columns with various profiles," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 211, Dec. 2023, Art. no. 108163, doi: [10.1016/j.jcsr.2023.108163](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108163).
- [14] *Abaqus Scripting User's Manual Version 6.11*, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2012.
- [15] L. -H. Han and Y. -F. An, "Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 93, pp. 62-76, Feb. 2014, doi: [10.1016/j.jcsr.2013.10.019](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.10.019).
- [16] S. Chen, R. Zhang, L. -J. Jia, J. -Y. Wang, and P. Gu, "Structural behavior of UHPC filled steel tube columns under axial loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 130, pp. 550-563, Sep. 2018, doi: [10.1016/j.tws.2018.06.016](https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.016).