Tạp chí Khoa học công nghệ Giao thông vận tải
Journal of Transportation Science and Technology
Trang tạp chí: https://tapchicongnghegtvt.vn

Phân tích ứng xử chịu nén đúng tâm của cột CES bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Analysis of the structural performance of CES columns under axial compression using FEM

*Nguyễn Minh Đức, Vũ Hiếu Phương, Phạm Đức Duy, Lê Hoàng An**

Viện Kinh tế và phát triển giao thông vận tải, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Từ khóa:
Cột liên hợp
Phần tử hữu hạn
Cường độ bê tông
Cốt sợi

TÓM TẮT

Cột liên hợp lõi thép bọc bê tông bên ngoài (CES) đã trở thành một phần không thể thiếu trong ngành xây dựng hiện đại, nhờ vào sức chịu tải lớn và độ cứng rất cao. Nghiên cứu này tập trung vào phân tích ứng xử của các cột CES dưới tải trục nén đúng tâm. Thông qua việc thu thập và mô phỏng các mẫu thực nghiệm sử dụng vật liệu bê tông cường độ khác nhau, từ đó, sử dụng mô hình phần tử hữu hạn để đánh giá và phân tích ứng xử của các cột CES dưới tải trọng nén đúng tâm. Ngoài ra, khảo sát so sánh ứng xử của cột khi đưa cốt sợi vào bê tông với cột bê tông thông thường. Kết quả cho thấy sự cải thiện lớn trong khả năng chịu tải nén khi tăng cường độ của bê tông và bổ sung thêm cốt sợi vào. Kết quả này giúp hiểu rõ hơn về cách cột CES ứng xử trong các điều kiện cường độ bê tông khác nhau.

Keywords:
CES
FEM
Concrete strength
Fibers

ABSTRACT

Concrete-Encased Steel (CES) columns have become a vital element in modern construction due to their superior load-bearing capacity and stiffness. This study investigates the behavior of CES columns subjected to axially compressive loading. The research involves the simulation of experimental models using concrete with various strengths using Finite Element Modeling (FEM). Additionally, a comparative analysis is conducted between CES columns reinforced with fibers and those utilizing conventional concrete. The research results reveal a significant enhancement in compressive load-bearing capacity with the increase in concrete strength and the incorporation of fibers. These findings offer a deeper understanding of the behavior of CES columns using various concrete strengths, contributing valuable insights for the design and optimization of these structural components.

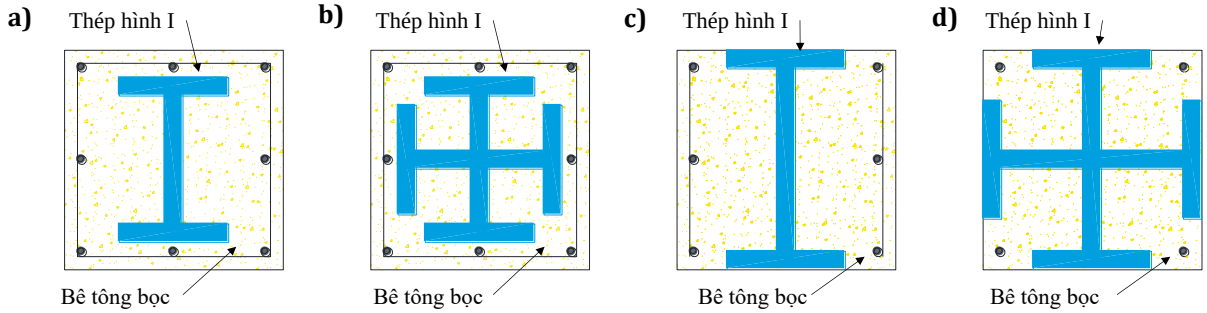
* Lê Hoàng An. Viện Kinh tế và phát triển giao thông vận tải, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh.
Email: hoangan.le@ut.edu.vn

https://www.doi.org/10.55228/JTST.13(6).67-74
Ngày nhận bài: 7/10/2024; Ngày nhận bài sửa: 30/10/2024; Ngày chấp nhận đăng: 08/11/2024
Ngày xuất bản trực tuyến: 15/11/2024
pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Cột liên hợp lõi thép bọc bê tông, hay Composite Encased Steel (CES), là sự lựa chọn hàng đầu trong các dự án có yêu cầu cao về độ bền và tính linh hoạt của thiết kế. Sự kết hợp giữa thép và bê tông không chỉ mang lại khả năng chịu tải rất lớn còn giảm trọng lượng của cột, giúp tối ưu quá trình xây dựng và vận chuyển. Đặc biệt của CES là khả năng chống biến dạng, chịu lực tốt và linh hoạt, đảm bảo an toàn và hiệu suất trong quá trình sử dụng. Bên cạnh đó, việc sử dụng CES cũng giúp giảm thiểu ảnh hưởng đến môi trường và nâng cao tính bền vững của các công trình xây dựng [1], [2], [3]. Ngoài ra, trong thị trường xây dựng ngày nay, tập trung vào hiệu quả và tiết kiệm chi phí, cột CES đã trở thành một lựa chọn đáng tin cậy và phổ biến cho các dự án xây dựng. Các cột liên hợp lõi thép và bê tông được dùng rộng rãi trong các công trình cao tầng, cầu và các dự án có quy mô lớn, giúp giảm trọng lượng và cải thiện hiệu suất chịu động đất.

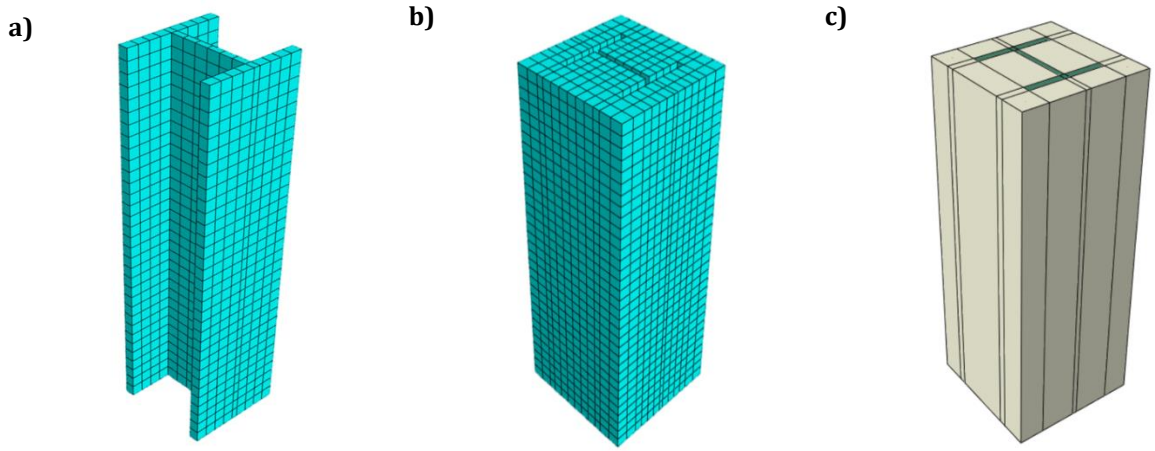
Sự kết hợp giữa bê tông cường độ cao và thép cường độ cao trong CES giúp tăng khả năng chịu tải và giảm kích thước của cột. Đồng thời, các biện pháp như sử dụng sợi thép và cốt thép ngang giúp tăng cường khả năng chịu lực và độ cứng của cột, từ đó, giảm thiểu sự nứt vỡ và đảm bảo hiệu suất của công trình [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Vì vậy, CES không chỉ là một sản phẩm kỹ thuật tiên tiến còn là một giải pháp nổi bật cho việc xây dựng hiện đại và bền vững.



Hình 1. Một số dạng cột liên hợp lõi thép bọc bê tông. (a) Cốt cứng lõi thép chữ I bọc toàn bộ bằng bê tông, (b) Cốt cứng lõi thép chữ thập bọc toàn bộ bằng bê tông, (c) Cốt lõi cứng lõi thép chữ I bọc một phần bê tông, (d) Cốt cứng lõi thép chữ thập bọc một phần bê tông.

Hình 1 cho thấy một số dạng cột liên hợp lõi thép bọc cốt thép phổ biến hiện nay. Trong đó, bê tông bọc bên ngoài có thể gia cường thêm bởi cốt thép đai hoặc cốt sợi trong bê tông. Vào năm 1985, Tomii [10] đã đề xuất một nghiên cứu về cột CES, tập trung vào việc mô tả khái quát đặc điểm chịu lực của các cột CES thông qua các thí nghiệm thực nghiệm. Nghiên cứu cho thấy nhờ vào sự kết hợp giữa lõi thép và vỏ bê tông, cột CES có khả năng chịu lực cao hơn so với các loại cột truyền thống, đồng thời, cung cấp nền tảng cho các phương pháp tính toán ban đầu. Sau đó, vào năm 1998, nghiên cứu của Schneider [11] đã đề xuất các mô hình phân tích ứng xử của cột liên hợp dựa trên mối tương tác giữa bê tông và lõi thép. Nghiên cứu này đã tạo nền tảng cho các nghiên cứu sâu hơn về sự phân bố ứng suất và biến dạng trong các thành phần của cột, đặc biệt là dưới tác động của tải trọng nén. Trong năm 2012, Ibrahim [12] phát triển các mô hình phần tử hữu hạn để dự đoán ứng xử của cột CES, từ đó, phát triển các công cụ mô phỏng số giúp phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu tải của các loại cột này. Nghiên cứu này đã mở ra hướng đi mới trong việc áp dụng mô hình số vào thiết kế và đánh giá các cấu kiện CES.

Có thể thấy, những nghiên cứu ban đầu đã đóng vai trò quan trọng trong các nghiên cứu ngày nay về cột CES. Hiện nay, các nghiên cứu của Huang và cộng sự [5], Wang và cộng sự [13], Zerfu và cộng sự [14], Lai và cộng sự [15] đã mở rộng và phát triển các mô hình phân tích kết cấu cột CES, với việc khảo sát đến các tham số kết cấu khác nhau. Trong đó, Wang và cộng sự [13] tập trung vào việc khảo sát tỷ lệ cốt thép, cấu trúc thép đai và hiệu ứng kích thước lên khả năng chịu nén của cột, trong khi Zerfu và cộng sự [14] áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích tác động cường độ chịu nén của bê tông và kích thước lõi thép. Lai và cộng sự [15] đề xuất mô hình dự báo ứng xử chịu nén của cột CES khi sử dụng các mức cường độ bê tông khác nhau, Huang và cộng sự [5] khảo sát ảnh hưởng của bê tông cường độ cao (HSC) và bê tông siêu tính năng (UHPC) kết hợp với sợi thép trong việc tăng cường khả năng chịu lực và hạn chế sự phá hủy. Những nghiên cứu này đã đóng góp vào sự phát triển các mô hình dự đoán và phân tích có độ chính xác cao hơn, đồng thời, chỉ ra rằng, việc sử dụng vật liệu cường độ cao và tỷ lệ cốt thép hợp lý có thể tối ưu hóa khả năng chịu nén, giảm thiểu hiện tượng phá hủy và biến dạng trong cột CES, đặc biệt ở những cấu kiện có kích thước lớn.



Hình 2. Mô phỏng điển hình các mẫu cột trong ABAQUS.
(a) Lõi thép hình chữ I, (b) Bê tông bọc ngoài, (c) Cột CES.

Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào khả năng chịu tải của cột CES, mô phỏng và khảo sát ảnh hưởng của các tham số như tỷ lệ cốt thép, cường độ bê tông, kích thước lõi thép. Phần lớn các nghiên cứu hiện tại tập trung vào việc sử dụng bê tông HSC hoặc UHPC, nhưng chưa đánh giá chi tiết của các tham số này, đặc biệt là cường độ bê tông lên sự phân bố ứng suất và biến dạng trong cột CES dưới tải nén đúng tâm. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc mô phỏng và khảo sát ảnh hưởng của sự thay đổi cường độ bê tông trong cột CES dưới tải nén đúng tâm, từ đó, làm cơ sở cho việc tối ưu hóa thiết kế cột trong các công trình thực tế.

2. Mô hình hóa phần tử hữu hạn

2.1. Mô hình lưới phần tử cột CES

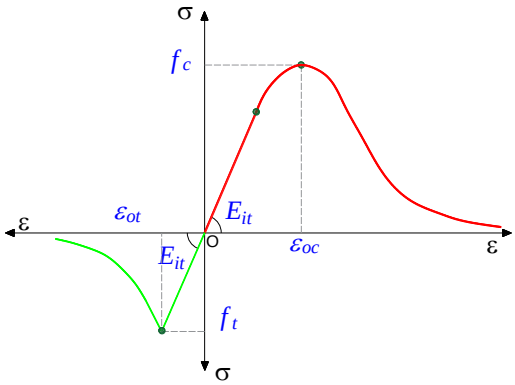
Với mô phỏng cột CES bằng phần mềm ABAQUS, việc lựa chọn và sử dụng các loại phần tử đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo kết quả phân tích chính xác và đáng tin cậy [16]. Nhóm nghiên cứu sử dụng hai loại phần tử chính: phần tử khối (Solid elements) và phần tử thanh (Truss elements). Trong đó, phần tử khối sử dụng cho lõi thép và khối bê tông bọc là phần tử C3D8R, cho phép mô phỏng các biến đổi phức tạp như nén, kéo và uốn trong bê tông và lõi thép một cách chính xác, khả năng mô

phỏng cấu trúc dày và đa chiều. Phần tử khối giúp hiểu rõ hơn về ứng xử của lõi thép, phần tử thanh sử dụng có thể mô phỏng thép dọc là phần tử T3D2 [16].

2.2. Mô hình vật liệu

2.2.1. Mô hình vật liệu bê tông

Mô hình phá hủy bê tông hay CDP (Concrete Damaged Plasticity), đã được tích hợp vào phần mềm ABAQUS để mô phỏng tính phi tuyến của bê tông cho các cột CES [16], [17], [18], [19]. Các tham số đầu vào của CDP, bao gồm góc mở rộng của bề mặt phá hủy của bê tông φ = 30°, độ lệch ε = 0.1, tỷ số ứng suất nén hai trục ban đầu với ứng suất nén đơn trục giữa ứng suất nén hai chiều và ứng suất nén một chiều f_{bo}/f_{co} = 1.16, và tỷ số K_c = 0.667, được sử dụng để mô hình trạng thái ứng suất ba chiều của bê tông. Hình 3 thể hiện đường cong ứng suất – biến dạng của vật liệu bê tông trong cột CES. Ứng xử nén của bê tông được tính toán từ phương trình (1) và (2), theo [20]. Ngoài ra, một mô hình được đề xuất bởi Tamai [21] để mô tả ứng xử của bê tông, được minh họa trong phương trình (3) và (4).



Hình 3. Đường cong lực – chuyển vị trong mô phỏng ứng xử của bê tông.

Ứng xử chịu nén của bê tông:

Trước khi đạt đỉnh (ε_{oc}, $f_c^{'}$):

$$\frac{\sigma}{f_c^{'}} = \frac{XY - Y^2}{1 + XY - 2Y} \quad với \quad \varepsilon \le \varepsilon_{co} \qquad (1)$$

Với, $X = \frac{E_{it}}{E_o}$, $Y = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}}$.

$$E_o = 4700\sqrt{f_c^{'}}$$

$$E_{it} = 22000\left(\frac{f_c^{'}}{10}\right)^{0.3}$$

$$\varepsilon_{co} = 10^{-3} \times \left[0.7\left(f_c^{'}\right)^{0.31}\right]$$

Sau khi đạt đỉnh (ε_{oc}, $f_c^{'}$):

$$\frac{\sigma}{f_c^{'}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{Y-1}{\eta - 1}\right)^2} \quad với \quad \varepsilon > \varepsilon_{co} \qquad (2)$$

Với: $X = \frac{E_{it}}{E_o}$, $Y = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}}$ $\eta = 1 + \frac{0.001}{\varepsilon_{co}}$

Ứng xử chịu kéo của bê tông:

Trước khi đạt đỉnh (ε_{ot}, f_t):

$$\sigma = E_o \varepsilon \; với \; \varepsilon \le \varepsilon_{ot} \qquad (3)$$

Với, $\varepsilon_{to} = \frac{f_t}{E_o}$

Sau khi đạt đỉnh (ε_{ot}, f_t):

$$\sigma = f_t\left(\frac{\varepsilon_{ot}}{\varepsilon}\right)^{0.4} với \quad \varepsilon > \varepsilon_{ot} \qquad (4)$$

Trong đó:

f_t: Cường độ chịu kéo cực đại của bê tông;

ε_{to}: Biến dạng của bê tông tại cường độ chịu kéo cực đại f_t;

η: Tham số đặc trưng cho sự suy giảm ứng suất sau đỉnh;

σ: Ứng suất của bê tông;

ε: Biến dạng của bê tông;

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

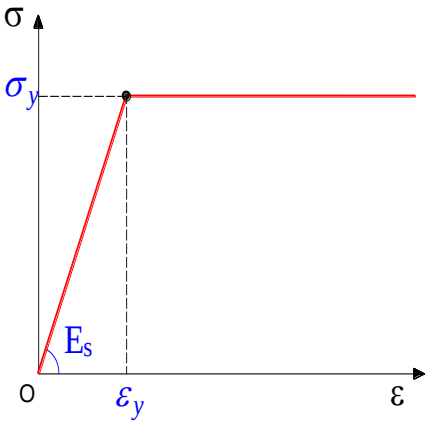
ε_{co}: Biến dạng của bê tông tại cường độ chịu nén cực đại f_c';

E_o: Mô đun đàn hồi ban đầu của bê tông;

E_{it}: Mô đun đàn hồi tức thời của bê tông.

2.2.2 Mô hình vật liệu thép

Với mô hình dẻo Von-Mises [11] được sử dụng cùng 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. Mô hình giả định rằng sau giai đoạn đàn hồi, cốt thép chuyển sang giai đoạn dẻo không giới hạn. Khi đó, cường độ chảy của vật liệu là yếu tố duy nhất quyết định, được minh họa trong Hình 4.

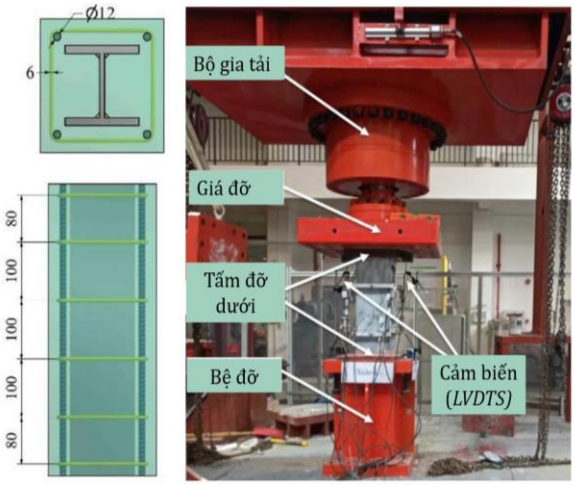


Hình 4. Đường cong lực – chuyển vị trong mô phỏng của lõi thép [11].

3. Kết quả và thảo luận

Nghiên cứu của Huang và cộng sự [5] tập trung vào khảo sát ứng xử chịu nén của cột lõi thép hình chữ I bọc bê tông liên hợp một số mẫu được gia cố bằng cốt sợi. Quá trình thử nghiệm và những thiết bị đo nén của các cột liên hợp xem Hình 5. Bộ kích thử nghiệm có khả năng gia tải 12.000 kN điều khiển bằng máy tính. Tải trọng được gia tải trực tiếp lên tấm thép ở trên các mẫu. Ngoài ra, các cảm biến biến dạng tuyến tính (LVDTs) được đặt theo chiều dọc gắn vào tấm tải trọng để ghi lại sự co ngắn trục của các mẫu.

Bảng 1 trình bày các thông số kích thước hình học và vật liệu sử dụng cho mẫu cột CES thực nghiệm. Các mẫu cột vuông có cùng kích thước (cao 500 mm, rộng 200 mm) nhằm hạn chế ảnh hưởng do mô men uốn. Cột đối chứng sử dụng ba loại bê tông gồm cường độ thường (NSC), cường độ cao (HSC) và cường độ siêu cao gia cường sợi (UHPFRC). Thép hình chữ I có cường độ chảy f_y = 270.4 MPa, thanh thép dọc (Ø12 mm) có cường độ chảy f_y = 436,2 MPa và thép đai (Ø6 mm) với cường độ chảy f_y = 344.3 MPa.

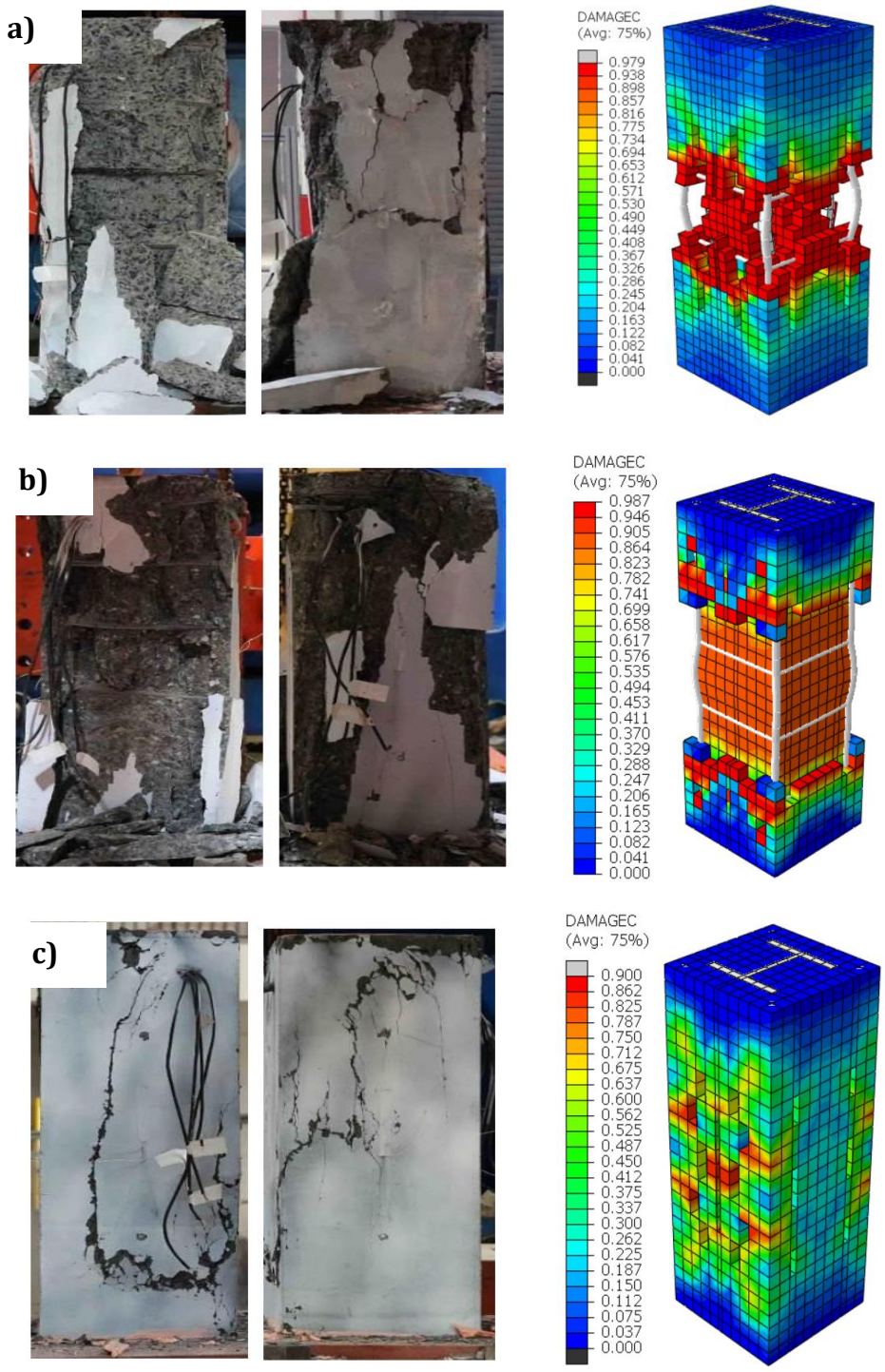


Hình 5. Thí nghiệm Huang và cộng sự [5].

Kết quả mô phỏng và thực nghiệm của các mẫu tại Hình 7, cho thấy khá tương đồng về ứng xử ở giai đoạn đàn hồi, tăng tới lực tới hạn và giảm mềm ở nhánh phía sau. Với mẫu NSCF0LC và UHPCF2LC cho thấy lực nén tối đa tại đỉnh là gần bằng nhau, ứng xử của phần giảm dần đường cong lực-chuyển vị có sự tương đồng với nhau.

Bảng 1. Thông số mẫu thực nghiệm của Huang và cộng sự [5].

Mẫu thí nghiệm	B (mm)	H (mm)	L (mm)	Vf	D (mm)	f_c (MPa)	s (mm)	N_u (kN)
NSCF0LC	200	200	500	-	4ϕ12	51.3	ϕ6a50	2196.9
HSCF0LC	200	200	500	-	4ϕ12	94.9	ϕ6a50	2651.8
UHPCF2LC	200	200	500	2%	4ϕ12	163.7	ϕ6a50	4714.9

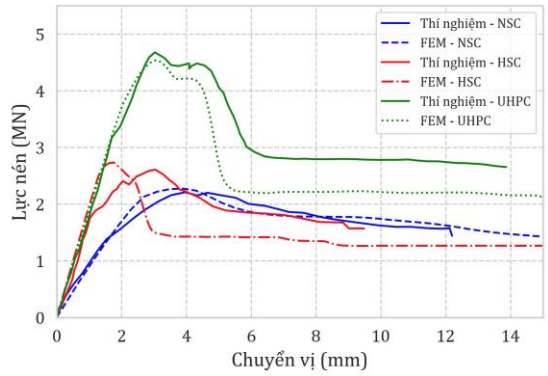


Hình 6. Tổng hợp so sánh hình dạng phá hủy. (a) Mẫu NSCF0LC (b) Mẫu HSCF0LC (c) Mẫu UHPCF2LC.

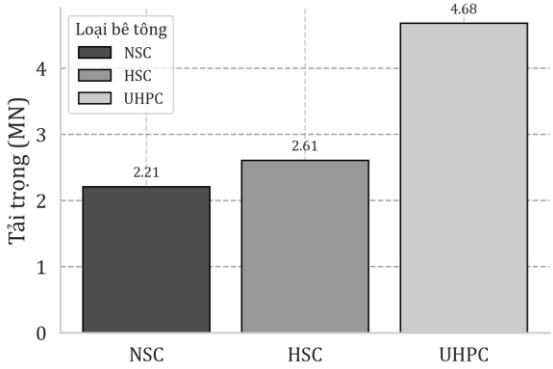
Với mẫu HSCF0LC, mô hình số FEM khác với nhánh mềm so với kết quả thử nghiệm. Tuy nhiên, cột CES đạt giá trị lực nén tối đa xấp xỉ với thực nghiệm. So sánh về hình dạng của ba mẫu cột sử dụng cường độ bê tông khác nhau (Hình 7), cho thấy khi sử dụng cốt sợi cho bê tông bọc ngoài cột CES (UHPCF2LC), nhánh mềm phía sau được cải thiện. Kết quả tại Hình 8 cho thấy khả năng chịu tải trọng của ba loại bê tông: NSC, HSC, UHPC lần lượt là 2.21 MN, 2.61 MN và 4.68 MN. So sánh với NSC, cho thấy HSC có khả năng chịu tải trọng tối đa cao hơn 18%, trong khi UHPC có sự cải thiện lớn đạt 112%.

Kết quả vùng phá hủy theo mô phỏng so với thực tế cho vết nứt khá tương đồng (Hình

6). Với mẫu NSCF0LC cho thấy, mức độ phá hủy nghiêm trọng của bê tông bọc phía ngoài (Hình 6a) và giảm dần với mẫu HSCF0LC và UHPCF2LC (Hình 6b và Hình 6c).



Hình 7. Tổng hợp so sánh đường cong lực – chuyển vị giữa thực nghiệm và mô hình FEM.



Hình 8. So sánh cường độ chịu nén tối đa của các mẫu.

4 Kết luận

Dựa trên các kết quả mô phỏng FEM và thực nghiệm, có thể rút ra một số kết luận. Cột CES sử dụng bê tông HSC và UHPC gia cường sợi thép cho khả năng chịu tải nén cải thiện lớn so với bê tông NSC, đặc biệt với UHPC. Bê tông UHPC gia cường sợi thép cải thiện khả năng chịu tải, tăng tính dẻo và độ bền, giúp giảm thiểu lớn vết nứt và phá hủy, đặc biệt là sau khi vượt qua tải trọng cực đại.

Kết quả mô phỏng FEM cho thấy sự tương đồng với thí nghiệm về hình dạng biến dạng, từ đó, cho thấy tiềm năng trong việc dự đoán phân bố ứng suất và biến dạng của cột CES dưới tải nén đúng tâm thông qua mô phỏng. Cột CES sử dụng bê tông UHPC và cốt sợi thép có tiềm năng ứng dụng lớn trong các công trình yêu cầu độ bền cao, với khả năng chịu tải nén tăng hơn 112% so với bê tông NSC.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Nguyễn Minh Đức: Phương pháp, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, Điều tra, Xác thực, Trực quan hóa, Tiếp nhận tài trợ, Phản hồi ý kiến phản biện, 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 về sự 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 được cung cấp theo yêu cầu.

Lời cảm ơn

Công trình này thuộc đề tài mã số KH2304 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.

Tài liệu tham khảo

[1] B. Lai, J. Y. R. Liew, and M. Xiong, "Experimental study on high strength concrete encased steel composite short columns," *Eng. Struct.*, vol. 228, 2019, Art. no. 116640, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.021.

[2] Q. Wang, D. Zhao, and P. Guan, "Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete,"

Eng. Struct., vol. 26, no. 7, pp. 907-915, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.engstruct.2004.02.009.

[3] B. Lai, J. Y. R. Liew, and A. L. Hoang, "Behavior of high strength concrete encased steel composite stub columns with C130 concrete and S690 steel," *Eng. Struct.*, vol. 200, 2019, Art. no. 109743, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109743.

[4] M.K.I. Khan, M. M. Rana, Y.X. Zhang, and C.K. Lee , "Compressive behaviour of engineered cementitious composites and concrete encased steel composite columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 167, Apr. 2020, Art. no. 105967, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.105967.

[5] Z. Huang, X. Huang, W. Li, and J. Zhang, "Compressive resistance behavior of UHPFRC encased steel composite stub column," *Eng. Struct.*, vol. 37, no. 2, pp. 211-227, 2020 doi: 10.12989/scs.2020.37.2.211.

[6] D. -D. Pham and P. -C. Nguyen, "Finite element modelling for concrete-filled steel circular tube columns subjected to axial compression," in *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*, Hanoi, Vietnam, 2020, pp. 75-80 doi: 10.1007/978-981-15-0802-8_8.

[7] 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 *Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2022)*, Cam Tho, Vietnam, 2022, pp. 141-147, doi: 10.1007/978-3-031-39090-6_16.

[8] A. L. Hoang and E. Fehling, "Influence of steel fiber content and type on the uniaxial tensile and compressive behavior of UHPC," *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 790-806, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130.

[9] A. H. Le, F. Ekkehard, D. -K. Thai and C. V. Nguyen, "Simplified stress-strain model for circular steel tube confined UHPC and UHPFRC columns," *Steel Compos. Struct.*, vol. 29, pp. 125-138, 2018, doi: 10.12989/scs.2018.29.1.125.

[10] M. Tomii, "Bond check for concrete-filled steel tubular columns," *ASCE*, pp. 195-204, 1985.

[11] S. P. Schneider, "Axially loaded concrete-filled steel tubes," *J. Struct. Eng.*, vol. 124, no. 10, pp. 1125-1138, 1998, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:10(1125).

[12] A. M. Ibrahim, S. k. Mohaisen, and Q. W. Ahmed, "Finite element modeling of composite steel-concrete beams with with external prestressing," *International Journal Of Civil And Structural Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 101-116, 2012.

[13] J. Wang, S. Ma, and M. Cui, "Numerical simulation of size effect in concrete-encased high-strength steel columns under axial compression," *Structures*, vol. 59, Jan. 2024, Art. no. 105725, doi: 10.1016/j.istruc.2023.105725.

[14] K. Zerfu and R. Yadeta, "Finite element-based performance analysis of encased composite columns under monotonic axial compression load," *Adv. Civ. Eng.*, 2023, doi: 10.1155/2023/5974705.

[15] B. Lai and J. R. Liew, "Investigation on axial load-shortening behaviour of high strength concrete encased steel composite section," *Engineering Structures*, vol. 227, 2021, Art. no. 111401, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111401.

[16] *ABAQUS standard user's manual - Version 6.14*, Dassault Systèmes, RI, USA, 2014.

[17] B. Lai, J. Y. R. Liew, and T. Wang, "Buckling behaviour of high strength concrete encased steel composite columns," *Compos. Struct. Res.*, vol. 154, pp. 27-42, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.11.023.

[18] E. Ellobody, B. Young, and D. Lam, "Eccentrically loaded concrete encased steel composite columns," *Thin-Walled Struct.*, vol. 49, no. 1, pp. 53-65, 2017, doi: 10.1016/j.tws.2010.08.006.

[19] E. Ellobody and B. Young, "Numerical simulation of concrete encased steel composite columns," *Compos. Struct. Res.*, vol. 67, no. 2, pp. 211-222, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.08.003.

[20] *High Performance Concrete-Recommended Extensions to the Model Code 90-Research Needs, No.228, 1995.*

[21] S. Tamai, "Average stress-strain relationship in post-yield range of steel bar in concrete," JSCE, no. 11, pp. 117-129, 1988.