

Nghiên cứu ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông

Nguyễn Hoàng Quân ¹, Nguyễn Quang Sĩ ^{2*}, Nguyễn Thanh Quý ², Phan Cảnh Tiên ², Lê Đăng Dũng ¹

¹ Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải.

² Khoa Công trình, Phân Hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông Vận tải.

TỪ KHOẢ

Mô phỏng số
Cột ống thép nhồi bê tông (CFST)
Hiệu ứng kiểm chế bê tông
Nén đúng tâm

TÓM TẮT

Cột ống thép nhồi bê tông đã và đang được nghiên cứu, sử dụng rộng rãi trong xây dựng. Đã có nhiều tiêu chuẩn đề xuất việc tính toán khả năng chịu nén đúng tâm của loại cột này. Nội dung của bài báo sẽ trình bày kết quả nghiên cứu ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông tính toán theo 04 tiêu chuẩn AS/NZS 5100.6, AISC, Eurocode 4 và GB 50936-2014 và nghiên cứu mô phỏng số loại cột này. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khả năng chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông tính toán theo các tiêu chuẩn khá tương đồng với kết quả thực nghiệm. Ngoài ra, kết quả mô phỏng thu được cho thấy sự tương đồng với kết quả thí nghiệm trên phương diện đường cong lực - biến dạng, dạng phá hoại của cột. Bên cạnh đó, một số tham số ảnh hưởng đến ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông như chiều dày ống thép và cường độ ống thép cũng được khảo sát.

KEYWORDS

Numerical
Concrete – filled steel tubular
Concrete confinement
Axial compressive

ABSTRACT

Concrete – filled steel tubular (CFST) has been studied and widely used in construction. Many standards have been proposed to calculate the axial compressive capacity of CFST. This paper presents the result of the axial compressive behavior of concrete – filled steel tubular according to AS/NZS 5100.6, AISC, Eurocode 4 and GB 50936-2014 standards and numerical simulation this type of column. The research results show that, the axial compressive capacity of CFST calculated according to the standards is quite similar to the experimental results. In addition, the obtained results show the similarity between the numerical simulation model and experimental results in aspects such as force - strain curve, and failure mode. Besides, some parameters affecting the axial compressive behavior of CFST such as steel tube thickness, steel strength were also investigated.

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, cột liên hợp ống thép nhồi bê tông (concrete – filled steel tubular column _ CFST) đang được áp dụng vào các kết cấu trong các công trình xây dựng hiện đại. Dạng kết cấu này có khả năng chịu lực lớn, tính dẻo cao, độ cứng lớn và phát huy được hết ưu điểm của các vật liệu thành phần. Ống thép bên ngoài phần lõi bê tông ngoài tác dụng chịu lực còn có tác dụng kiểm chế hiện tượng nở ngang của bê tông bên trong ống, giúp cho cường độ chịu nén của bê tông tăng lên đáng kể. Ngoài ra, phần lõi bê tông trong ống có vai trò hạn chế hoặc thậm chí triệt tiêu hiện tượng mất ổn định cục bộ của ống thép. Từ đó, khả năng chịu lực của cột CFST này cũng tăng lên nhiều so với cột bê tông cốt thép thông thường. Tuy nhiên, khả năng chịu lực của dạng kết cấu này bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như: dạng hình học của ống thép, độ mảnh của cột và tính chất của các vật liệu thành phần [1].

Có nhiều nghiên cứu thực nghiệm về kết cấu cột liên hợp ống thép nhồi bê tông được tiến hành [2], [3], [4]. Bên cạnh đó, các nghiên cứu mô phỏng cột CFST cũng được tiến hành để so sánh với thí nghiệm, từ đó khảo sát các tham số. Ngoài ra, khả năng chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông cũng đã được đề xuất trong các tiêu chuẩn

tính toán như AS 4100-1998[12], Eurocode 4 [7], AS/NZS 5100.6 [5], AISC 360-10 [13], AS 3600-2009 [14], v.v

Trong bài báo này, khả năng chịu tải trọng đúng tâm theo các tiêu chuẩn AS/NZS 5100.6 [5], AISC [6], Eurocode 4 [7] và GB 50936-2014 [8] sẽ được tính toán và so sánh với kết quả thí nghiệm được thực hiện bởi Y.L Li và cộng sự [9]. Ngoài ra, phần mềm phần tử hữu hạn (PTHH) Abaqus [10] được sử dụng để nghiên cứu ứng xử chịu nén của cột ống thép nhồi bê tông. Kết quả mô phỏng được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm. Từ mô hình đã được kiểm chứng, chiều dày ống thép và cường độ ống thép được khảo sát để xem xét ảnh hưởng tới ứng xử của kết cấu cột ống thép nhồi bê tông.

2. Thí nghiệm xác định ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông

Phần dưới đây trình bày tóm tắt thí nghiệm về cột ống thép nhồi bê tông được thực hiện bởi Y.L Li và cộng sự [9]

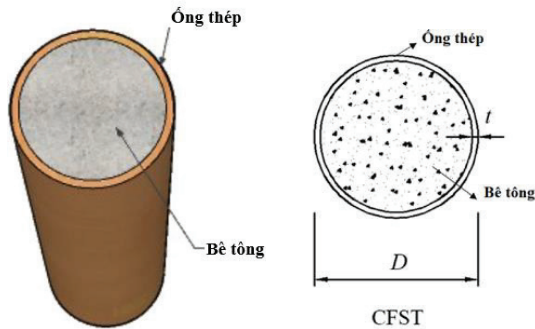
2.1. Bố trí thí nghiệm

*Liên hệ tác giả: sinq_ph@utc.edu.vn

Nhận ngày 15/11/2022, sửa xong ngày 25/12/2022, chấp nhận đăng 07/02/2023

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2023.454>

Nhằm xác định ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông, mẫu cột CFST có cấu tạo như Hình 1 với các thông số hình học được lấy trong Bảng 1. Ống thép sử dụng loại thép không gỉ (cấp AISI 316) với cường độ chảy là $f_{y0} = 314,5$ MPa. Bê tông sử dụng trong thí nghiệm có cường độ chịu nén trung bình $f'_c = 42,5$ MPa.



Hình 1. Cấu tạo cột CFST.

Cột được nén bằng máy thủy lực Amsler 5000 kN. Tải trọng dọc trực tác dụng trực tiếp lên mẫu cột thông qua một tấm thép ở đỉnh cột để phân bố đều lực vào trong ống thép và lõi bê tông. Sơ đồ bố trí thí nghiệm được trình bày ở Hình 2. Cột được gia tải bằng phương pháp khống chế chuyển vị với tốc độ 1mm/ phút. Ba thiết bị đo chuyển vị (linear variable differential transformer - LVDTs) lắp đặt ở đầu cột, giữa cột và chân cột được sử dụng để đo chuyển vị dọc trục của cột trong quá trình thí nghiệm. Các thiết bị cảm biến điện trở (strain gage - SG) được gắn vào ống thép được sử dụng để đo biến dạng của ống thép theo phương đứng và phương ngang trong quá trình gia tải.

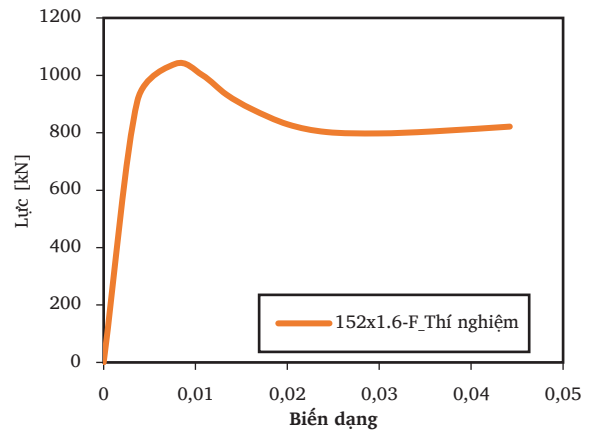
Bảng 1. Các thông số của mẫu cột thí nghiệm [9].

Mẫu TN	Kích thước		Chiều cao cột
	Đường kính cột D (mm)	Chiều dày ống thép t (mm)	L (mm)
152x1.6-F	152,6	1,6	450



Hình 2. Bố trí thí nghiệm [9].

2.2 Kết quả thí nghiệm



a) Quan hệ lực – biến dạng



b) Hình dạng phá hoại mẫu

Hình 3. Mối quan hệ lực – biến dạng và hình dạng phá hoại của mẫu cột [9].

Hình 3a thể hiện mối quan hệ lực tác dụng và biến dạng của cột thí nghiệm. Giá trị lực lớn nhất trong thí nghiệm này là 1050 kN. Từ biểu đồ trên, có thể thấy rằng, sau khi đạt đến giá trị cực đại thì lực không bị giảm đột ngột như các cột bê tông cốt thép mà giảm một cách từ từ do hiệu quả của hiệu ứng kiểm chế nở ngang bê tông của ống thép. Bên cạnh đó, Hình 3b trình bày hình ảnh phá hoại của cột, có thể thấy rằng, cột thép có xu hướng mất ổn định ra phía ngoài do có phần lõi bê tông bên trong cột ngăn chặn ống thép bị lõm vào.

Phần tiếp theo, bài báo sẽ trình bày tính toán khả năng của cột CFST theo các tiêu chuẩn chuẩn AS/NZS 5100.6 [5], AISC [6], Eurocode 4 [7] và GB 50936-2014 [8].

3. Tính toán sức chịu tải tối đa của cột CFST

3.1 Theo tiêu chuẩn AS/NZS 5100.6 [5]

Tiêu chuẩn AS/NZS 5100.6 áp dụng cho cho các cột CFST sử dụng bê tông có cường độ lên đến 100 MPa và cường độ chảy của ống thép lên đến 690 MPa. Sức chịu tải tối đa của cột được xác định bằng công thức:

$$P_{u,AS} = \phi k_f A_s \eta_2 f_y + \phi A_r f_{ry} + \phi_c A_c f'_c \left(1 + \frac{\eta_1 t f_y}{D f'_c} \right)$$

Trong đó: ϕ là hệ số giảm khả năng chịu lực của ống thép, k_f là hệ số hình dạng của cột, A_s là diện tích của ống thép, A_r là diện tích cốt thép thanh trong cột, f_{ry} là cường độ chảy của cốt thép thanh, ϕ_c là hệ số của bê tông chịu nén, A_c là diện tích của bê tông trong cột, D là đường kính của cột.

η_1, η_2 là các hệ số, được xác định theo công thức:

$$\eta_1 = 4,9 - 18,5\lambda_r + 17(\lambda_r)^2 \text{ khi } (\eta_1 \geq 0)$$

$$\eta_2 = 0,25(3 + 2\lambda_r) \text{ khi } (\eta_2 \leq 1)$$

λ_r là độ mảnh của cột, được xác định theo công thức:

$$\lambda_r = \sqrt{\frac{N_{us}}{N_{cr}}}$$

N_{us} là cường độ chịu nén tối đa của mặt cắt ngang cột, xác định theo công thức:

$$N_{us} = A_s f_y + A_c f'_c$$

N_{cr} là tải trọng tới hạn đàn hồi của cột, được xác định theo công thức:

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi^2 (EI)_e}{L_e^2} \right)$$

$(EI)_e$ là độ cứng có hiệu của cột trong giới hạn đàn hồi.

$$(EI)_e = EI_s + EI_r + E_c I_c$$

L_e là chiều cao có hiệu của cột, E là mô đun đàn hồi của vật liệu, I_s là mô men quán tính của ống thép, I_r là mô men quán tính của thép thanh, I_c là mô men quán tính của bê tông cốt.

Giá trị của các hệ số ϕ , ϕ_c và k_f được lấy bằng 1. Tất cả các thông số liên quan tới cốt thép thanh đều bằng 0.

3.2 Theo tiêu chuẩn AISC [6]

Tiêu chuẩn AISC trình bày cách tính khả năng của cột CFST bằng cách cộng khả năng của bê tông và thép, điều này đồng nghĩa với việc, tiêu chuẩn này không kể đến hiệu ứng kiểm chế nở ngang bởi ống thép. Tiêu chuẩn này áp dụng cho các cột CFST sử dụng bê tông có cường độ 69 MPa và ống thép có cường độ 525 MPa. Công thức xác định khả năng lớn nhất của cột theo AISC như sau:

$$P_{u,AISC} = A_s f_y + C_2 f'_c A_c$$

Trong đó C_2 là hệ số an toàn, giá trị của hệ số này theo tiêu chuẩn là $C_2 = 0,95$.

Bảng 2. So sánh giá trị lực lớn nhất của cột CFST.

Mẫu TN	TN [10]	AS/NZS 5100.6 [5]		AISC [6]		Eurocode 4 [7]		GB 50936 [8]	
	P_{exp} (kN)	$P_{u,AS}$ (kN)	Sai số (%)	$P_{u,AISC}$ (kN)	Sai số (%)	$P_{u,EC4}$ (kN)	Sai số (%)	$P_{u,GB}$ (kN)	Sai số (%)
152x1.6-F	1050	1019,5	3	843,02	20	998,8	5	1062,4	1

Từ kết quả thu được trong Bảng 2, có thể nhận thấy rằng, giá trị lực lớn nhất của cột thu được từ thí nghiệm khá tương đồng với kết quả khi tính toán theo 03 tiêu chuẩn AS/NZS 5100.6, Eurocode 4 và GB

3.3. Theo tiêu chuẩn Eurocode 4 [7]

Tiêu chuẩn Eurocode 4 cho phép thiết kế các cột CFST với bê tông có cường độ tới 60 MPa và ống thép có cường độ 460 MPa. Tính toán khả năng của cột CFST theo tiêu chuẩn này theo công thức:

$$P_{u,EC4} = \eta_a A_s f_y + A_c f'_c \left(1 + \eta_c \frac{t f_y}{D f'_c} \right)$$

Trong đó:

$$\eta_a = 0,25(3 + 2\bar{\lambda}) \text{ } (\eta_a \leq 1,0)$$

$$\eta_c = 4,9 - 18,5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2 \text{ } (\eta_c \geq 0)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}}$$

$$N_{pl,Rk} = A_s f_y + A_c f'_c$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{L^2}$$

$$(EI)_{eff} = E_s I_s + 0,6 E_{cm} I_c$$

Trong đó, $(EI)_{eff}$ là độ cứng chống uốn có hiệu của cột, η_a và η_c là hệ số kiểm chế của bê tông, $\bar{\lambda}$ là độ mảnh của cột, $N_{pl,Rk}$ là khả năng của cột trong giới hạn dẻo và N_{cr} là tải trọng tới hạn đàn hồi của cột.

3.4. Theo tiêu chuẩn GB 50936-2014 [8]

Tiêu chuẩn GB 50936-2014 có xét đến hiệu ứng tăng khả năng chịu lực của cột do tác dụng của hiệu ứng kiểm chế bê tông trong cột CFST. Công thức xác định khả năng của cột như sau:

$$P_{u,GB} = A_s f_{sc}$$

$$f_{sc} = (1,22 + B\theta + C\theta^2) f'_c$$

$$\theta = \frac{A_s f_y}{A_c f'_c}$$

$$B = \frac{0,176}{f_y} + 0,974$$

$$C = -\frac{0,104 f'_c}{14,4} + 0,031$$

Trong đó: A_s là diện tích mặt cắt ngang của cột CFST, f_{sc} là cường độ chịu nén thiết kế của cột có kể đến hiệu ứng kiểm chế nở ngang, B và C là hệ số ảnh hưởng bởi hình dạng đến hiệu ứng kiểm chế của cột và θ là hệ số kiểm chế bê tông.

Kết quả tính toán khả năng chịu lực lớn nhất của cột theo các tiêu chuẩn và so sánh các giá trị này với kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 2.

50936-2014 với sai số nhỏ hơn 5 %. Kết quả theo tiêu chuẩn AISC có sai số so với thí nghiệm là lớn nhất (20 %), lý do tiêu chuẩn này không kể đến hiệu ứng kiểm chế nở ngang bê tông bởi ống thép, do đó, giá trị

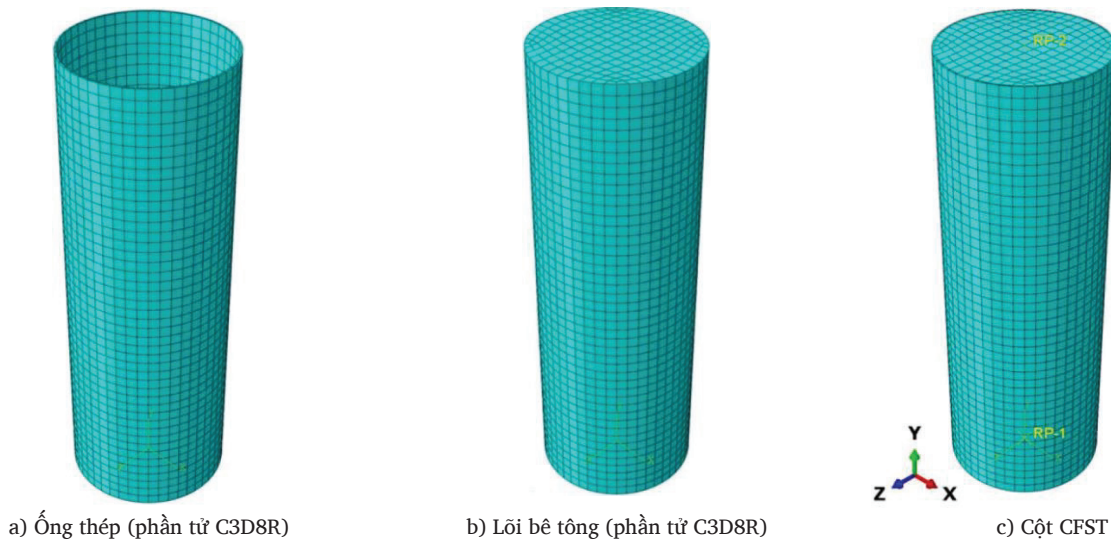
lực lớn nhất tính toán theo tiêu chuẩn AISC nhỏ hơn so với giá trị thu được từ thí nghiệm.

4. Mô hình mô phỏng

4.1 Xây dựng mô hình

Bên cạnh các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm, mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) bằng phần mềm Abaqus [10] sẽ được xây dựng để mô phỏng sự làm việc của cột ống thép nhồi bê tông chịu nén đúng tâm. Đây là phần mềm có xét đến đặc điểm làm việc phi tuyến của vật liệu.

Hình 4 thể hiện lưới PTHH được sử dụng trong mô hình. Bê tông và thép hình đều được mô tả bằng cách sử dụng mô hình phần tử khối 3 chiều, 8 nút tuyến tính (C3D8R), mỗi nút của phần tử có ba bậc tự do là chuyển vị thẳng theo ba phương. Tương tác giữa bê tông và thép theo phương tiếp tuyến được mô phỏng bằng mô hình “hard – contact” nhằm mục đích tránh cho phần bê tông và thép xâm nhập vào nhau. Theo phương pháp tuyến, tương tác giữa bê tông và thép được miêu tả bằng mô hình ma sát Coulomb với hệ số ma sát bằng 0,25. Ở hai đầu của mẫu được khống chế chuyển vị theo ba phương trừ vị trí đặt lực không được khống chế chuyển vị theo phương dọc trục. Mẫu được nén dọc trục theo phương pháp khống chế chuyển vị.



Hình 4. Chia lưới các phần tử trong mô hình mô phỏng.

4.2. Mô hình vật liệu bê tông và ống thép

Việc sử dụng ống thép bọc bên ngoài bê tông có tác dụng kiểm soát hiện tượng nở hông của bê tông. Nhờ đó, bê tông bị kiểm chế có cường độ chịu nén cao hơn và biến dạng lớn hơn. Hiện tượng này của bê tông được mô phỏng bằng cách sử dụng mô hình ứng suất biến dạng của bê tông được đề xuất bởi Han và các cộng sự [11] và được biểu diễn thông qua các phương trình sau:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_o(x-1)^\eta + x} & (x > 1) \end{cases}$$

Trong đó: $x = \varepsilon/\varepsilon_o$; $y = \sigma/\sigma_o$; $\sigma_o = f'_c (N/mm^2)$
 $\varepsilon_o = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$; $\varepsilon_c = (1300 + 12,5f'_c) \times 10^{-6}$
 $\eta = 2$ (tiết diện tròn)

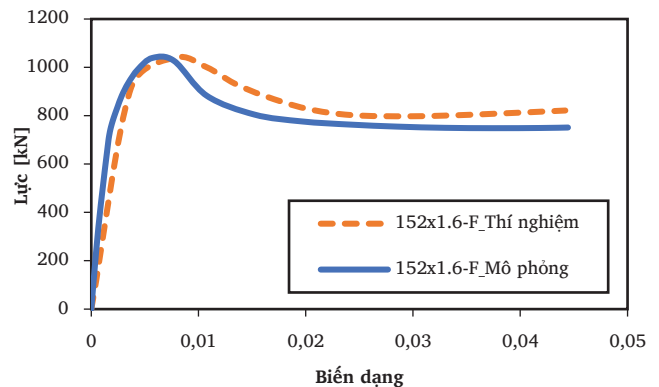
$\beta_o = (2,36 \times 10^{-5})^{[0,25+(\xi-0,5)^7]} \times (f'_c)^{0,5} \times 0,5 \geq 0,12$ (tiết diện tròn)

$\xi = \alpha \frac{f_y}{f_{ck}}$ hệ số kiểm chế nở hông, $\alpha = \frac{A_s}{A_c}$ là hàm lượng thép, f_{ck} là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông được lấy bằng $0,67f_{cu}$, với f_{cu} là cường độ chịu nén của bê tông xác định trên mẫu hình lập phương.

Ống thép được miêu tả bằng mô hình đàn dẻo lý tưởng. Giới hạn chảy của ống thép được lấy theo các giá trị đo được từ thí nghiệm. Mô đun đàn hồi của thép được lấy bằng 200.000 MPa và hệ số Poisson bằng 0,3.

4.3. Kết quả mô phỏng

4.3.1. Mối quan hệ lực - biến dạng



Hình 5. So sánh lực – biến dạng của cột mô phỏng với kết quả thí nghiệm.

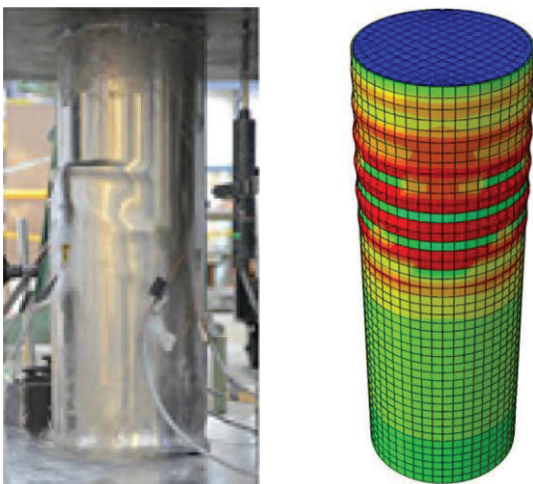
Hình 5 thể hiện sự so sánh mối quan hệ lực biến dạng thu được từ mô hình mô phỏng và kết quả thí nghiệm. Quan sát thấy rằng đường cong thu được từ mô hình mô phỏng thể hiện sự tương đồng với kết quả thí nghiệm. Trên Hình 5, nhận thấy rằng, sau khi đạt được giá trị lực nén lớn nhất thì đường cong không bị giảm đột ngột mà giảm từ từ giống như kết quả thu được từ thí nghiệm. Giá trị lực lớn nhất không có sự khác biệt nhiều so với kết quả thí nghiệm (Bảng 3), với sai số nhỏ hơn 2 %.

Bảng 3. So sánh kết quả của cột thí nghiệm và mô phỏng.

Mẫu TN	Lực lớn nhất P_u (kN)		
	Thí nghiệm	Mô phỏng số	Sai số
152x1.6-F	1050	1038,98	1,05 %

4.3.2. Dạng phá hoại

Hình 6 a,b thể hiện hình ảnh phá hoại (biến dạng) của mẫu cột thu được từ thí nghiệm và từ mô hình mô phỏng. Nhận thấy rằng biến dạng từ thí nghiệm và từ mô hình mô phỏng có sự tương đồng. Mô hình mô phỏng mô tả được biến dạng phồng ra của ống thép. Lưu ý rằng, mô hình mô phỏng chỉ cho phép miêu tả biến dạng gần giống với thí nghiệm, không thể miêu tả đúng vị trí của các biến dạng này như trong thí nghiệm.

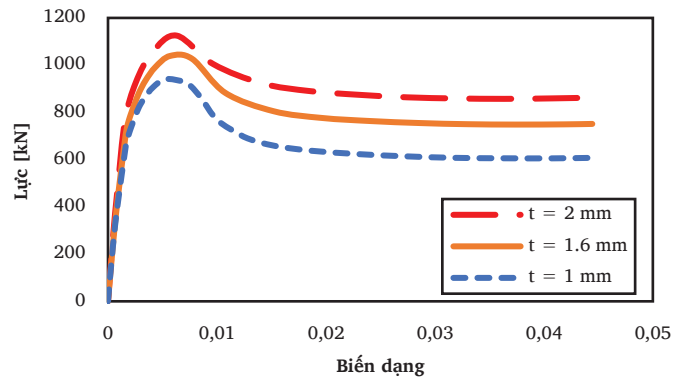


a) Biến dạng của mẫu cột thí nghiệm. b) Biến dạng của mẫu cột mô phỏng.
Hình 6. Hình ảnh phá hoại mẫu cột từ mô hình mô phỏng.

4.4. Ảnh hưởng của một số tham số tới ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông

Mô hình mô phỏng số kể trên cho thấy sự tương đồng với kết quả thí nghiệm về đường cong lực – biến dạng, dạng phá hoại của cột. Trên cơ sở đó, mô hình này được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của chiều dày ống thép và cường độ ống thép tới ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông.

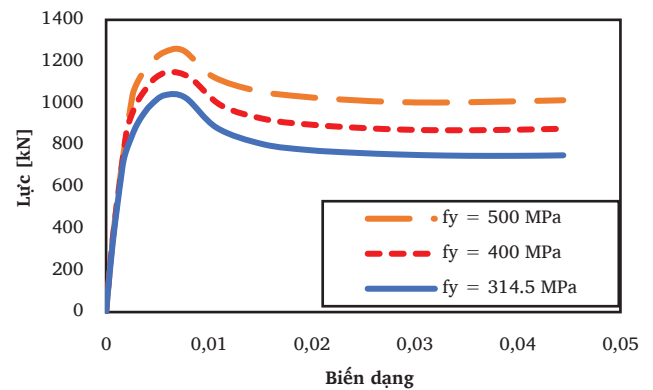
4.4.1. Ảnh hưởng chiều dày ống thép



Hình 7. Ảnh hưởng của chiều dày ống thép.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày của ống thép tới ứng xử chịu nén đúng tâm của cột, đường kính cột được giữ nguyên, thông số thay đổi là chiều dày của ống thép. Hình 7 thể hiện kết quả đường cong lực - biến dạng của cột với chiều dày ống thép khác nhau. Khi chiều dày ống thép được thay đổi từ 1,6 mm thành 1 mm thì khả năng chịu lực lớn nhất của cột giảm đi 9,44 %. Tuy nhiên khi tăng chiều dày ống thép từ 1,6 mm thành 2 mm thì khả năng này sẽ tăng lên 8,28 %.

4.4.2. Ảnh hưởng của cường độ của ống thép



Hình 8. Ảnh hưởng của cường độ ống thép.

Hình 8 trình bày ảnh hưởng của cường độ của ống thép tới ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông. Quan sát thấy rằng, trong giai đoạn đàn hồi, ứng xử của các mẫu cột này là giống nhau. Khi tăng giới hạn chảy của ống thép từ 314,5 MPa lên 400 MPa và 500 MPa thì giá trị lực lớn nhất cũng tăng lên (tương ứng tăng 10,7 % và 20,6 %).

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày nghiên cứu xác định ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông (CFST). Kết quả tính toán khả năng chịu lực lớn nhất của cột theo các tiêu chuẩn cũng không chênh lệch nhiều với kết quả thí nghiệm ở 03 tiêu chuẩn AS/NZS 5100.6, Eurocode 4 và GB 50936-2014 (sai số nhỏ hơn 5 %). Tiêu chuẩn AISC không kể

đến hiệu ứng kiểm chế nở ngang bê tông bởi ống thép nên giá trị lực lớn nhất tính toán theo tiêu chuẩn này nhỏ hơn so với giá trị thu được từ thí nghiệm (sai số 20 %).

Ngoài ra, mô hình mô phỏng cho thấy sự tương đồng với kết quả thí nghiệm trên các phương diện như mối quan hệ lực – biến dạng, dạng phá hoại. Sai số giữa giá trị chịu lực lớn nhất của mô hình và thí nghiệm là nhỏ hơn 2 %. Bên cạnh đó, dựa trên mô hình mô phỏng số, nghiên cứu tham số được tiến hành để xác định ảnh hưởng của một số tham số tới ứng xử chịu nén đúng tâm của cột CFST. Các phân tích khảo sát cho thấy rằng khi tăng chiều dày của ống thép từ 1mm lên thành 1,6 mm và 2 mm thì khả năng chịu lực lớn nhất của cột cũng tăng lên (tăng tương ứng 10,4 % và 8,28 %). Ngoài ra, khi tăng cường độ chảy của ống thép từ 314,5 MPa lên 400 MPa và 500 MPa thì giá trị lực lớn nhất cũng tăng tương ứng 10,7 % và 20,6 %.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Phạm Văn Nam, Nguyễn Hoàng Quân, Trần Hùng, Đỗ Văn Linh (2019), “Mô phỏng ứng xử chịu nén đúng tâm của cột liên hợp ống thép hình e líp nhồi bê tông”, Hội thảo khoa học cán bộ trẻ lần thứ XV, Phần 2: Kết cấu – công nghệ xây dựng, trang 191-199.
- [2]. Huu – Tai Thai, Brian Uy, Mahbub Khan, Zhong Tao, Fidelis Mashiri (2014), *Numerical modelling of concrete – filled steel box columns incorporating high strength materials*, Journal of Construction Steel Research 102, p 256-265.
- [3]. Y. F. Yang, L. H. Han (2012), *Concrete filled steel tube (CFST) columns subjected to concentrically partial compression*, Thin-walled structures 50, p 147-156.
- [4]. Vipulkumar Ishvarbhai Patel, Brian Uy, Farhad Aslani (2016), *Confined concrete model of circular, elliptical, and octagonal CFST short columns*, Steel and composite structures.
- [5]. AS/NZS 5100.6. (2017) *Bridge design Part 6: Steel and composite construction*, Sydney, New South Wales, Australia: Standards Australia.
- [6]. AISC 360-16 (2016). *Specification for structural steel buildings*. Chicago (IL, USA): American Institute of Steel Construction.
- [7]. EN 1994-1-1. Eurocode 4 (2014) - *Design of composite steel and concrete structures*, part 1.1: general rules and rules for building. London (UK): British Standards Institution.
- [8]. GB 50936-2014 (2014). *Technical code for concrete filled steel tubular structures*. Beijing (China): Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, (MOHURD); [in Chinese].
- [9]. Y. L. Li, X. L. Zhao, R. K. Singh Raman, X. Yu (2018), *Axial compression tests on seawater and sea sand concrete – filled double – skin stainless steel circular tubes*, Engineering structures 176, p 426 – 438.
- [10]. ABAQUS. ABAQUS standard user's manual, version 6.13. Providence, RI (USA): Dassault Systèmes Corp.; 2013.
- [11]. L.-H. Han, G.-H. Yao, and Z. Tao, “Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, no. 1, pp. 24–36, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.tws.2007.01.008
- [12]. AS4100-1998(R2016). *Steel structures*; 2016.
- [13]. ANSI/AISC 360-10, *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA, 2010.
- [14]. AS 3600-2009. *Concrete structures*, Sydney, New South Wales, Australia: Standards Australia; 2009.