MÔ PHỎNG CỘT NGẮN ỐNG THÉP NHỒI BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO CHỊU TẢI TRỌNG NÉN ĐÚNG TÂM

ThS. **PHAN ĐÌNH HÀO**, KS. **TRỊNH HỮU HIỆP** Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

Tóm tắt: Khả năng chịu lực cực hạn (chịu nén) của cột ống thép nhồi bê tông (gọi tắt, theo Tiếng Anh, là CFST) phụ thuộc chủ yếu vào đặc tính của các vật liệu cấu thành. Ngoài ra, ứng xử của cột còn phụ thuộc vào hiệu ứng giam giữ của ống thép tác dụng lên lõi bê tông và đặc tính hình học của ống như tiết diện ngang hay tỷ số của bề rộng cột với chiều dày của ống thép. Nghiên cứu này sử dụng phần mềm ABAQUS để phân tích sự ảnh hưởng của cường độ bê tông đến khả năng chịu lực của cột CFST dưới tác dụng của tải trọng nén dọc trục. Nhằm nâng cao kiến thức liên quan đến ứng xử cơ học của cột CFST và việc sử dụng hiệu quả bê tông cường độ cao, các mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến ba chiều đã được xây dựng và thực hiện quá trình phân tích số cho cột ngắn CFST. Nghiên cứu được thực hiện với ba trường hợp đặt tải khác nhau, bao gồm tải trọng chỉ tác dụng lên lõi bê tông, tải trọng chỉ tác dụng lên ống thép và tải trọng tác dụng đồng thời lên cả lõi bê tông và ống thép. Kết quả khảo sát cho thấy trường hợp cột CFST nén lên phần lõi bê tông có sức chịu nén tối đa lớn nhất, hơn nữa khả năng chịu tải của các cột cũng tăng khi tăng cường độ chịu nén của bê tông nhồi.

Từ khóa: Cột ống thép nhồi bê tông (CFST); cường độ chịu nén tối đa; bê tông cường độ cao; hiệu ứng giam giữ; ứng xử cơ học; tải trọng nén đúng tâm; mất ổn định cục bộ.

1. Đặt vấn đề

1.1 Xu hướng phát triển của xây dựng hiện đại

Nhu cầu xây dựng nhà cao tầng ở Việt Nam đang gia tăng mạnh mẽ. Việc tăng cường độ chịu nén của bê tông cho phép cột có tiết diện nhỏ hơn và cho phép sử dụng nhiều không gian sàn hơn. Tuy nhiên, khi sử dụng bê tông cường độ cao cho các cột có kích thước nhỏ hơn thì có thể xảy ra sự phá hoại dòn. Đối với cột bê tông cốt thép truyền thống, để ngăn chặn sự phá hoại dòn cũng như tăng độ dẻo cho cột, khoảng cách giữa các cốt thép đai thường được giảm xuống. Nói cách khác, số lượng thép đai sử dụng cho cột tăng lên và điều này sẽ tạo ra một mặt trụ tự nhiên tách biệt lõi bê tông bị giam giữ bên trong với lớp bê tông bảo vệ bên ngoài. Vì vậy, nguy cơ nứt võ sớm của lớp bê tông bảo vệ khi cột làm việc sẽ tăng cao. Trên cơ sở đó, cột ống thép nhồi bê tông (Concrete Filled Steel Tube - CFST) là một giải pháp thay thế hiệu quả cho các cột bê tông cốt thép truyền thống. Ở các quốc gia phát triển như Hoa Kỳ, Anh, Úc, Nhật Bản, Trung Quốc, Thụy Điển,... việc sử dụng cột CFST trong hệ kết cấu đã tăng lên đáng kể, đặc biệt là các vùng thường xảy ra động đất. Các cột CFST có khả năng chống động đất tốt nhờ các tính năng ưu việt như có cường độ nén lớn và độ dẻo cao cũng như khả năng tiêu tán năng lượng rất tốt.

1.2 Tình hình nghiên cứu và ứng dụng kết cấu CFST

Cột CFST được nghiên cứu và ứng dụng trong việc xây dựng nhà cao tầng và cầu vượt nhịp tại một số quốc gia tiên tiến trên Thế giới như đã đề cập ở trên. Do vậy, cột CFST có tiết diện vuông và tròn đã được phân tích mô hình và thí nghiệm về cường độ chịu lực, khả năng ốn định cục bộ của ống thép, ứng xử chịu uốn,... bởi một số tác giả như: Ge và Usami (1992, 1994); Uy (1998); Han (2004); Fujimoto và cộng sự (2004); Yu và cộng sự (2007); Han và cộng sự (2008). Trong các nghiên cứu trên, phần lớn được thực hiện bằng phương pháp thí nghiệm các mẫu thử và phân tích kết quả ứng xử thu được từ thí nghiệm. Các nghiên cứu dựa trên mô phỏng số còn hạn chế về số lượng và việc phân tích vẫn chưa sâu sắc do tính chất phức tạp của loại kết cấu liên hợp này.

Tại Việt Nam, có một số nghiên cứu về lý thuyết và mô hình tính toán dùng để phân tích ứng xử phi tuyến kết cấu CFST (Phan Đình Hào và cộng sự, 2012); đánh giá khả năng chịu tải của cột CFST (Chu Thị Bình, 2011); nghiên cứu thực nghiệm nén cột ngắn CFST tiết diện tròn mẫu lớn (Ngô Hữu Cường và cộng sự, 2016) nghiên cứu gia cường chống trượt giữa lõi bê tông và bề mặt ống thép đối với cột mảnh CFST chịu nén lệch tâm (Lê Xuân Dũng và Phạm Mỹ, 2016). Tuy nhiên, các nghiên cứu trên vẫn còn rời rạc, đồng thời việc ứng dụng loại kết cấu này ở nước ta chưa được triển khai rộng rãi. Hơn nữa, đến nay chưa có Tiêu chuẩn Việt Nam dành cho việc thiết kế và thi công kết cấu CFST. Vì vậy, việc nghiên cứu sâu hơn về khả năng chịu lực của cột CFST là thực sự cần thiết, đặc biệt là trong trường hợp sử dụng bê tông cường độ cao.

1.3 Nhiệm vụ nghiên cứu

Mục đích chính của bài báo là phân tích và đánh giá khả năng chịu tải trọng nén đúng tâm của cột CFST khi sử dụng bê tông cường độ cao lần lượt là 65, 75 và 85 MPa. Đồng thời, nghiên cứu cũng khảo sát về sự phân phối lực dọc giữa lõi bê tông và ống thép khi chịu tải trọng nén đúng tâm; đánh giá sự gia tăng cường độ chịu nén của lõi bê tông do hiệu ứng giam giữ được tạo ra bởi ống thép.

2. Nội dung nghiên cứu

2.1 Mô hình hóa phần tử hữu hạn

2.1.1 Yêu cầu của việc mô phỏng

Xây dựng mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) bằng phần mềm Abaqus nhằm để mô phỏng sự làm việc của cột ống thép nhồi bê tông dưới tác dụng của tải trọng nén. Từ kết quả phân tích số, các thông tin chi tiết về sự phân bố của ứng suất và biến dạng trong cột sẽ được cung cấp giúp tăng cường sự hiểu biết tốt hơn về ứng xử cơ học của loại kết cấu liên hợp này. Yêu cầu đặt ra là mô hình PTHH cần được xây dựng sao cho mô phỏng sự làm việc của cột một cách thực tế nhất. Đặc biệt, tính chất cơ học của các vật liệu thành phần, sự làm việc tương tác giữa ống thép và lõi bê tông cũng như sự gia tăng cường độ chịu nén của bê tông do hiệu ứng giam giữ cần được quan tâm đúng mức trong quá trình mô phỏng.

2.1.2 Mô hình hóa phần tử hữu hạn

Ông thép, lõi bê tông và các tấm gia tải là những vật thể tách biệt có sự tương tác với nhau trong quá trình làm việc. Để mô phỏng chính xác ứng xử thực tế của cột liên hợp CFST, các thành phần của cột phải được mô hình với những loại phần tử phù hợp. Một mô hình PTHH 3 chiều dựa trên các phần tử khối được thành lập. Bề mặt tiếp xúc chung giữa ống thép, lõi bê tông và tấm tải được mô phỏng bằng cách áp dụng tương tác bề mặt dựa trên mô hình ma sát Coulomb. Để mô hình ống thép, phần tử khối 8 nút (C₃D₈) với đầy đủ các điểm tích hợp được sử dụng. Trong khi đó, lõi bê tông sử dụng đồng thời phần tử khối 8 nút và 6 nút (C₃D₆) với việc giảm số điểm tích hợp (hình 1 và hình 2). Đối với các tấm gia tải, phần tử cứng 4 nút (R₃D₄) được sử dụng như trên hình 3. Việc chia lưới ống thép và lõi bê tông được thực hiện một cách khá đơn giản nhưng cần phải đảm bảo độ chính xác của lời giải khi phân tích (hình 4).



Hình 4. Chia lưới ống thép và lõi bê tông

2.1.3 Mô hình vật liệu

a. Vật liệu bê tông

Mô hình phá hoại dẻo, Damage Plasticity Model, trong phần mềm Abaqus được sử dụng để mô phỏng ứng xử của bê tông trong cột liên hợp CFST. Mô hình này có khả năng dự đoán cả ứng xử nén và kéo của bê tông dưới áp lực giam giữ. Đường cong quan hệ giữa ứng suất và biến dạng khi nén đơn trục của bê tông sử dụng cho việc phân tích là kết quả thu được từ các thí nghiệm nén mẫu hình trụ tiêu chuẩn với bê tông được trộn từ cùng một mẻ cho các cột. Trong các thí nghiệm này, mối quan hệ ứng suất biến dạng chỉ được ghi đến ứng suất lớn nhất (Ultimate Strength), do vậy phần còn lại của mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng được lấy tương ứng với một đường thẳng chỉ với độ dốc nhỏ. Mô hình độ cứng kéo được sử dụng để xác định các thuộc tính nứt và sau nứt của bê tông. Mô hình này giả định rằng ứng suất trực tiếp qua một vết nứt giảm dần về không khi vết nứt mở ra. Hệ số Poisson của bê tông trong miền biến dạng đàn hồi được lấy là v_c = 0.2.

b. Vật liệu thép

Một mô hình đàn hồi dẻo với tiêu chí chảy dẻo Von-Mises liên quan đến quy tắc dòng chảy và biến dạng cứng đẳng hướng được sử dụng để mô tả ứng xử cơ bản của ống thép (HKS 1997). Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng đầy đủ thu được từ các thí nghiệm kéo đơn trục trên các mẫu được sử dụng trong quá trình phân tích mô hình PTHH. Hệ số Poisson của thép trong miền biến dạng đàn hồi được lấy là $v_a = 0.3$.

2.2 Tính chất của các loại vật liệu

2.2.1 Bê tông

Tất cả các mẫu được đúc theo phương thẳng đứng với bê tông cùng một mẻ trộn để đảm bảo tính đồng nhất về chất lượng của bê tông giữa các cột. Các thí nghiệm về vật liệu của bê tông được thực hiện để xác định cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày, bao gồm các mẫu bê tông được đúc thành mẫu hình trụ và mẫu hình lập phương, theo Tiêu chuẩn Thụy Điển [18]. Đối với các mẫu hình trụ có đường kính D = 150 mm, chiều cao H = 300 mm thì cường độ chịu nén của mẫu là $f_{c,cyl}$ = 65 MPa, mô đun đàn hồi là E_c = 38.5 GPa. Đối với các mẫu hình lập phương 150x150x150 mm, cường độ chịu nén của mẫu là $f_{c.cube}$ = 79.4 MPa. Năng lượng khi xảy ra nứt của bê tông, G_F = 157 N/m, được xác định là năng lượng yêu cầu đế mở ra một đơn vị diện tích của bề mặt vết nứt, theo RILEM (1985). Đây là một thuộc tính của vật liệu và không phụ thuộc vào kích thước của kết cấu. Các kết quả về đặc tính của bê tông được thể hiện như ở bảng 1 và hình 5.

Bảng 1. Đặc tính vật liệu bê tông [18] Cường độ chịu nén (MPa) Mô đun Khối lượng riêng (kg/m³) đàn hồi (MPa) 65 38500 2400 75 40800 85 43332 90 Ứng suất (MPa) 80 70 60 50 65 MPa 40 75 MPa 30 20 85 MPa 10 0 0.001 0.002 0.003 0.004 0

Biến dạng Hình 5. Đường cong ứng suất - biến dạng của bê tông [18]

2.2.2 Ông thép

Các thí nghiệm kéo mẫu thép được tiến hành theo Tiêu chuẩn Thụy Điển [18]. Tính chất trung bình của 5 mẫu kéo bao gồm: ứng suất chảy f_y = 433 MPa, ứng suất bền f_u = 568 MPa, biến dạng tại

điểm bắt đầu hóa cứng là $\varepsilon_{ah} = 0.029$, biến dạng tương ứng với ứng suất bền là $\varepsilon_{au} = 0.136$, mô đun đàn hồi là $E_a = 206$ GPa. Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng khi kéo của ống thép được thể hiện như trên hình 6.



Hình 6. Đường cong ứng suất - biến dạng của ống thép [18]

2.2.3 Tính toán sức chịu tải tối đa của cột theo Eurocode 4

Giả thiết xảy ra sự tương tác đầy đủ giữa ống thép và lõi bê tông, khi đó sức chịu tải tối đa của cột CFST có thể được tính toán theo Tiêu chuẩn Eurocode 4 (EC4) như sau:

$$P_{u,cal} = P_{a,cal} + P_{c,cal}$$
(1)
trong đó:

- P_{a,cal} - sức kháng dẻo danh nghĩa của tiết diện ống thép.

$$P_{a,cal} = f_{\gamma} A_a \tag{2}$$

 - P_{c,cal} - sức kháng dẻo danh nghĩa của tiết diện bê tông.

$$P_{c,cal} = f_{c,cyl} A_c \tag{3}$$

 - f_y - ứng suất chảy của ống thép, thu được từ kết quả của các thí nghiệm vật liệu;

 - f_{c,cyl} - cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ, thu được từ các thí nghiệm vật liệu;

 - A_a, A_c lần lượt là diện tích mặt cắt ngang của ống thép và lõi bê tông.

Sức kháng dẻo danh nghĩa của tiết diện ống thép:

$$P_{a,cal} = f_y A_a = 433 \times \frac{\pi}{4} \times (159^2 - 149.4^2) \times 10^{-3} = 1007(kN)$$

Sức kháng dẻo danh nghĩa của tiết diện bê tông:

$$P_{c,cal} = f_{c,cyl} A_c = 65 \times \frac{\pi}{4} 149.4^2 \times 10^{-3} = 1139(kN)$$

Sức chịu tải tối đa của cột theo EC4:

 $P_{u,cal} = P_{a,cal} + P_{c,cal} = 1007 + 1139 = 2146(kN)$

Sức chịu tải tính toán (kN)	Cường độ bê tông (MPa)						
	65	75	85				
P _{a,cal}	1007	1007	1007				
P _{c,cal}	1139	1315	1490				
P _{u,cal}	2146	2322	2497				

Bảng 2. Sức chịu tải của các cột CFST theo EC4

2.3 Các dạng cột được mô phỏng

2.3.1 Các trường hợp đặt tải trọng

Điều kiện chịu tải cơ bản là cột chịu lực nén đúng tâm, phần ống thép và lõi bê tông chịu tải đồng thời. Tuy nhiên, với mục đích phân tích, đánh giá ứng xử cơ học khác nhau của các cột CFST và hiệu ứng giam giữ của ống thép đối với lõi bê tông, mô hình được xây dựng thêm dành cho hai điều kiện tải trọng khác là tải trọng chỉ áp dụng lên riêng phần lõi bê tông và tải trọng chỉ áp dụng lên riêng phần lõi bê tông và tải trọng chỉ áp dụng lên riêng phần ống thép. Để áp dụng tải cho hai trường hợp nén trên phần lõi bê tông và nén trên phần ống thép thì trong khoảng 10 mm cuối cùng ở đầu cột không được đổ đầy bê tông. Ngoài ra, trường hợp đặt tải trọng nén đúng tâm lên ống thép rỗng cũng được thực hiện để lấy kết quả làm tham chiếu cho các trường hợp được nghiên cứu nêu trên. Do đó, toàn bộ các trường hợp đặt tải trọng được tóm tắt như sau:

- SES: cột ống thép thuần túy, tải trọng tác dụng lên ống thép rỗng;
- SFC: cột CFST, tải trọng chỉ tác dụng lên phần lõi bê tông;
- SFS: cột CFST, tải trọng chỉ tác dụng lên phần ống thép;
- SFE: cột CFST, tải trọng tác dụng lên toàn bộ tiết diện ống thép và lõi bê tông.

2.3.2 Đặc trưng hình học của các cột CFST

Cột có chiều cao 650 mm, tiết diện ngang có đường kính ngoài là 159 mm và chiều dày ống thép là 4.8 mm (hình 7). Trong đó:



Hình 7. Các trường hợp tải trọng tác dụng

- a. Tải trọng tác dụng chỉ trên phần lõi bê tông;
- b. Tải trọng tác dụng chỉ trên phần ống thép;
- c. Tải trọng tác dụng lên cả phần lõi bê tông và ống thép;
- d. Tiết diện ngang của các cột CFST.

2.4 Sự tương tác giữa ống thép và lõi bê tông

Trong quá trình mô phỏng các cột CFST, sự tương tác giữa ống thép và lõi bê tông cần được xem xét. Sử dụng các tiếp xúc bề mặt để khai báo cho sự tương tác giữa bề mặt trong của ống thép và bề mặt ngoài của lõi bê tông.

Khi bề mặt trong của ống thép và lõi bê tông tiếp xúc với nhau dưới tác dụng của tải trọng nén, chúng truyền lực cắt và các lực theo phương vuông góc trên bề mặt chung của chúng. Độ ôm chặt giữa ống thép và lõi bê tông được mô phỏng dựa trên sự tương tác bề mặt với mô hình tiếp xúc pressureoverclosure theo phương vuông góc và mô hình ma sát Coulomb theo hướng tiếp tuyến với bề mặt tiếp xúc. Với việc sử dụng các mô hình này, các bề mặt có thể tách biệt và trượt tương đối với nhau cũng như là truyền áp lực tiếp xúc và ứng suất cắt giữa lõi bê tông và ống thép.

Trong các hình thức cơ bản của mô hình ma sát Coulomb, hai bề mặt tiếp xúc có thể cùng chịu ứng suất cắt trên bề mặt chung của chúng đến một cường độ nhất định trước khi chúng bắt đầu trượt tương đối với nhau. Mô hình ma sát Coulomb định nghĩa ứng suất cắt quan trọng này là tcrit mà tại đó sự trượt giữa các bề mặt bắt đầu. Ứng suất cắt quan trọng T_{crit} được định nghĩa như là một phần của áp lực tiếp xúc *p* giữa các bề mặt.

$$\tau_{crit} = \mu p \tag{4}$$

trong đó: μ là hệ số ma sát giữa lõi bê tông và ống thép. Theo Baltay và Gjelsvik (1990), hệ số ma sát giữa bê tông và thép có giá trị từ 0.2 đến 0.6. Ở đây, hệ số ma sát được lấy bằng 0.2 đối với tất cả các trường hợp phân tích mô hình PTHH. Khi bề mặt bê tông và ống thép tiếp xúc với nhau thì áp lực tiếp xúc được truyền giữa chúng. Ngược lại, áp lực tiếp xúc sẽ giảm về giá trị không (0) khi các bề mặt tách biệt với nhau.

2.5 Điều kiện biên và cách áp dụng tải trọng

2.5.1 Điều kiện biên

Hình 8 cho thấy hai tấm gia tải được sử dụng tại các đầu cột trong quá trình thí nghiệm nén. Trong mô hình PTHH, sử dụng phần tử tấm cứng để mô hình cho các tấm gia tải này. Trong cả thí nghiệm và mô hình PTHH, tải trọng được áp dụng cho các cột thông qua tấm gia tải phía trên. Do đó, tấm gia tải phía trên được ngăn cản chuyển vị theo 5 bậc tự do, chỉ cho phép sự dịch chuyển theo phương dọc trục cột. Trong khi đó, tấm gia tải phía dưới được ngăn cản chuyển vị theo cả 6 bậc tự do.

Trong các thí nghiệm, sự tiếp xúc trực tiếp giữa các tấm gia tải và các bề mặt của cột được thực hiện để thu được các kết quả chính xác. Do đó, sự tương tác giữa tấm gia tải và các bề mặt cột trong phần mềm Abaqus được sử dụng để mô hình sự làm việc đúng với thực tế.

2.5.2 Cách áp dụng tải trọng

Trong nghiên cứu này, mục tiêu cần đạt được là theo dõi đến cuối cùng các ứng xử cơ học của cột nên tải trọng được áp dụng theo phương pháp gia tải bằng cách tăng dần chuyển vị tại nút trung tâm của tấm tải phía trên. Nhằm đạt mục tiêu phân phối đều tải trọng lên đầu cột, tất cả các nút khác ở trên bề mặt của tấm gia tải buộc phải có sự tịnh tiến thẳng đứng giống như nút trung tâm. Ngoài ra, phương pháp Newton-Raphson đã được ứng dụng để tìm sự cân bằng trong mỗi cấp gia tải.

3. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

3.1 Quan hệ lực và chuyển vị dọc trục của các cột CFST

Kết quả mô phỏng thu được có thể xem trên hình 8-10 như bên dưới.



Hình 8. Quan hệ lực - chuyển vị dọc trục tại đỉnh các cột CFST với bê tông nhồi 65 MPa

SFE

3.2 Khả năng chịu lực của các cột CFST

Hình 9. Quan hệ lực - chuyển vị dọc trục tại đỉnh các cột CFST với bê tông nhồi 75 MPa



2688

Trường hợp tải Cường độ bê tông (MPa) 65 75 85 SES 1008 1008 1008 SFC 2914 3159 3280 SFS 994-2692 994-2951 994-3065

2580

2334

Bảng 3. Sức chịu tải tối đa của các cột CFST theo mô hình PTHH (kN)

3.3 Các dạng phá hoại của cột CFST - 65 MPa- PTHH





Hình 11. Biến dạng của cột SES và cột SFC

c. Cột SFS d. Cột SFE Hình 12. Biến dạng của cột SFS và cột SFE

3.4 Ứng suất trong ống thép và lõi bê tông của các cột CFST - 65 MPa – PTHH



1000

500

0

0

5

Hình 18. Phân phối lực dọc trục trong lõi bê tông

và ống thép tại tiết diện giữa cột SFC

0 5 10 15 20 Chuyển vị (mm) Hình 17. Phân phối lực dọc trục trong lõi bê tông và ống thép tại tiết diện giữa cột SFE

Tổng hợp lực

Lực trong bê tông
Lực trong ống thép

500

0

Lực trong ống thép

10

15

Chuyển vị (mm)

20

4. Phân tích kết quả mô phỏng

4.1 So sánh các kết quả mô phỏng với các kết quả thực nghiệm đã có và tính toán lý thuyết

Kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả thí nghiệm của Johansson và Gylltoft [18] được thể hiện ở bảng 4.

	0	1 1	v ,		,	,	
Loại cột, trường hợp tải	Cường độ bê tông (MPa)	P _{max} thí nghiệm [18] (kN)	P _{u,cal} theo EC4 (kN)	P _{FEA} mô phỏng (kN)	$\frac{P_{\max}}{P_{u,cal}}$	$rac{P_{\scriptscriptstyle FEA}}{P_{\scriptscriptstyle max}}$	$rac{P_{FEA}}{P_{u,cal}}$
SES	-	920	-	1008	-	1.1	-
SFC	65	2220	2138	2914	1.03	1.31	1.36
SFS	65	950	2138	994-2692	0.44	1.05-2.83	0.46-1.25
SFE	65	2150	2138	2334	1	1.09	1.09
SFC	75	-	2322	3159	-	-	1.36
SFS	75	-	2322	994-2951	-	-	0.43-1.27
SFE	75	-	2322	2580	-	-	1.11
SFC	85	-	2497	3280	-	-	1.31
SFS	85	-	2497	994-3065	-	-	0.40-1.23
SFE	85	-	2497	2688	-	-	1.08

Bảng 4. So sánh kết quả mô phỏng với thực nghiệm [18] và tính toán lý thuyết theo EC4

Từ bảng 4, các số liệu cho thấy sự thống nhất cao giữa kết quả thu được trong thí nghiệm và phân tích PTHH đối với các cột CFST có cường độ bê tông 65 MPa, bao gồm SES, SFS và SFE với tỉ số lực nén lần lượt là: 1.1, 1.05 và 1.09. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng cho trường hợp cột SFC chưa đạt được sự thống nhất cao với kết quả từ các thí nghiệm (tỉ số lực nén: 1.31). Nguyên nhân có thể là do mô hình vật liệu sử dụng cho bê tông chưa được mô phỏng tốt cho trạng thái ứng suất ba trục của lõi bê tông. Sự tăng cường độ chịu nén của bê tông trong mô hình vật liệu là lớn hơn so với thực tế. Ngoài ra, sự khác nhau giữa sơ đồ thí nghiệm [18] và mô hình PTHH cũng có thể dẫn đến sự khác nhau này. Cụ thể là, với thí nghiệm nén mẫu, tải trọng được áp dụng đúng tâm lên cả phần bê tông ở hai đầu cột. Trong khi đó, với mô hình PTHH, tải trọng được áp dụng đúng tâm lên phần bê tông ở một đầu cột, đầu còn lại được ngăn cản chuyến vị theo cả 6 bậc tự do.

4.2 Ứng xử cơ học của các cột tương ứng

Từ các đường cong quan hệ lực nén – chuyển vị dọc trục của các cột CFST trong phân tích mô hình PTHH (hình 8-10), có thể nhận xét rằng: khi tăng cường độ của bê tông, quy luật gia tăng lực – chuyển vị của các cột CFST là tương tự nhau cho cùng trường hợp gia tải. Việc tăng cường độ chịu nén của bê tông theo các cấp độ làm tăng đáng kể khả năng chịu lực của các cột CFST.

Trong giai đoạn đàn hồi, cột SFE có ứng xử cứng hơn so với cột SFC. Đối với cột SFE, lõi bê tông và ống thép được tiếp nhận tải đồng thời nên tải trọng được phân phối ngay từ đầu cho cả ống thép và lõi bê tông. Trong khi đó, cột SFC cho thấy lõi bê tông chịu hầu như toàn bộ tải trọng trong giai đoạn đầu.

Ứng xử của cột SFS, trong giai đoạn đàn hồi, là tương tự với cột ống thép rỗng SES. Tuy nhiên, sau khi ống thép chảy thì phần bê tông tham gia chịu lực, khả năng chịu lực của cột được phục hồi cho đến khi bê tông đạt được cường độ tối đa. Trong quá trình gia tăng tải trọng, sự làm việc của cột SES và SFS cho thấy sự khác nhau trong xu hướng mất ổn định cục bộ của ống thép. Trong đó, đối với cột SES, sự mất ổn định cục bộ là ống thép biến dạng lõm vào bên trong và bắt đầu tăng kích thước cùng với sự biến dạng thẳng đứng (hình 11a). Ngược lại, cột SFS cho thấy sự mất ổn định cục bộ của ống thép là biến dạng lồi ra bên ngoài do có sự ngăn cản bởi lõi bê tông từ bên trong. Do đó, sự mất ổn định cục bộ của ống thép trong trường hợp này là cột bị biến dạng lượn sóng về phía bên ngoài (hình 12a).

Tải trọng do lõi bê tông chịu đối với hai trường hợp cột SFE và SFC đạt giá trị cao hơn so với sức

chịu tải danh nghĩa của bê tông tính theo Tiêu chuẩn Eurocode 4. Điều này cho thấy hiệu ứng giam giữ mà ống thép tác dụng lên lõi bê tông làm tăng sức chịu tải của lõi bê tông và hiệu ứng này được thể hiện rõ hơn đối với cột SFC. Đối với cột SFE, lõi bê tông đóng góp khoảng 60% (hình 17) khả năng chịu lực của cột. Trong khi đó, lõi bê tông của cột SFC đóng góp cao hơn cho khả năng chịu lực của cột, là khoảng 80% (hình 18).

5. Kết luận

Kết quả nghiên cứu từ phân tích mô hình PTHH được so sánh với các kết quả tính toán theo EC4 và kết quả thí nghiệm của các tác giả khác [18] cho phép rút ra một số kết luận sau:

 Ứng xử cơ học và khả năng chịu lực cực hạn (chịu nén) của cột CFST phụ thuộc vào cách gia tải được áp dụng khi nén lên cột. Trường hợp nén vào lõi bê tông cho kết quả cường độ chịu nén tối đa của cột lớn nhất so với hai cách đặt tải còn lại;

 Cường độ chịu nén của bê tông nhồi có ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu lực tối đa của các cột CFST, quan hệ giữa chúng là tỉ lệ thuận.
Đồng thời, quy luật của đường cong quan hệ lực nén – chuyển vị là tương tự nhau đối với các cột có cùng cách đặt tải khi thay đổi cường độ của bê tông nhồi;

- Hiệu ứng giam giữ của ống thép đối với lõi bê tông tạo ra ứng suất nén ba trục và làm tăng cường độ chịu nén của lõi bê tông một cách đáng kể. Cột CFST áp dụng tải trọng nén lên phần lõi bê tông có hiệu ứng giam giữ tốt nhất;

- Các số liệu về kết quả mô phỏng số của nghiên cứu này có thể sẽ cung cấp một phần cơ sở dữ liệu cho việc phân tích nhằm góp phần xây dựng Tiêu chuẩn hay hướng dẫn tính toán và thiết kế kết cấu CFST ở nước ta trong tương lai gần.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ge, H., and Usami, T. (1992), Strength of concrete-filled thin-walled steel box columns- experiment. Journal of Structural Engineering, 118(11): p. 3036-3054.
- [2] Ge, H., and Usami, T. (1994), Strength analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns. Journal of Constructional Steel Research, 30: p.259-281.
- [3] Uy, B. (1998), Concrete-filled fabricated steel box columns for multi-storey buildings: behaviour and design. Progress in Structural Engineering and Materials, 1(2): p. 150-158.
- [4] Han, L.-H. (2004), Flexural behaviour of concretefilled steel tubes. Journal of Constructional Steel Research, 60: p.313-337.

- [5] Fujimoto, T., Mukai, A., Nishiyama, I. and Sakino, K. (2004), Behavior of Eccentrically Loaded Concrete-Filled Steel Tubular Columns. Journal of Structural Engineering, 130(2): p. 203-212.
- [6] Yu, Z. (2007), Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns. Journal of Constructional Steel Research, 63: p.165-174.
- [7] Han, L.-H., Liu, W. and Yang, Y-F. (2008), Behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns subjected to axially local compression. Journal of Constructional Steel Research, 64: p.377-387.
- [8] Chu Thị Bình (2011), Khả năng chịu tải của cột thép ống nhồi bê tông, Tạp chí Kết cấu và Công nghệ Xây dựng, tháng 6.
- [9] Phan Đình Hào, Ngô Hữu Cường, Ngô Trường Lâm Vũ và Trần Hữu Huy (2012), Phân tích ứng xử phi tuyến kết cấu ống thép nhồi bê tông. Đề tài Nghiên cứu Khoa học cấp Bộ - Mã số: B2010-TDA01-23-TRIG. Hoàn thành tháng 6.
- [10] Ngo-Huu, C., Nguyen-Minh, L., Ho-Huu, C., Kamura, H., Nanba, T. and Nakagawa, K. (2016), Experimental study of circular stub CFT columns under axial compression loads. Proceedings of EASEC-14, p. 994-1002.
- [11] Lê Xuân Dũng và Phạm Mỹ (2016), Nghiên cứu ảnh hưởng trượt tương đối giữa ống thép và lõi bê tông đến khả năng chịu lực nén lệch tâm của cột ống thép nhồi bê tông. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng, số 1(98), trang: 15-21.
- [12] ABAQUS Documentation. Version 6.14-4.
- [13] Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structure. Part 1.1, General rules and rules for buildings.
- [14] Starossek, U., Falah, N. and Lohning, T. (2008), Numerical Analyses of the Force Transfer in Concrete-Filled Steel Tube Columns. The 4th International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, (ASEM'08).
- [15] HKS (1997). ABAQUS/Standard User's Manual, version 5.7, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Pawtucket, R.I.
- [16] RILEM 50-FMC Committee. (1985). "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams." Mater. Struct., 18(106), 285-290.
- [17] Baltay, P., and Gjelsvik, A. (1990). "Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress." J. Mater. Civ. Eng., 2(1), 46-49.
- [18] Johansson, M., and Gylltoft, K. (2002), Mechanical Behavior of Circular Steel-Concrete Composite Stub Columns. Journal of Structural Engineering. Vol 128. No. 8, August 1, p.1073-1081.

Ngày nhận bài: 07/11/2016.

Ngày nhận bài sửa lần cuối: 09/12/2016.

Tạp chí KHCN Xây dựng – số 4/2016