



# MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN CHO CỘT THÉP ỚNG HAI LỚP NHỒI BÊ TÔNG KHI CHỊU TẢI NÉN DỌC TRỰC

## FINITE ELEMENT MODELING OF CONCRETE-FILLED DOUBLE STEEL TUBULAR COLUMN UNDER AXIALLY COMPRESSION

Nguyễn Ngọc Minh<sup>1,a</sup>, Nguyễn Đình Du<sup>2,b\*</sup> và Nguyễn Đăng Khoa<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Khoa Khoa học Ứng dụng, Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia, Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>2</sup> Khoa Kỹ thuật Công trình, Đại học Lạc Hồng

<sup>a</sup>nguyennngocminh@hcmut.edu.vn, <sup>b</sup>dingdu85@gmail.com, <sup>c</sup>ndkhoa@gmail.com

**TÓM TẮT.** Cột thép ống hai lớp nhồi bê tông (CFDST) đang thu hút nhiều sự quan tâm nghiên cứu, hướng đến các ứng dụng trong xây dựng cầu và nhà cao tầng. Cấu tạo cột bao gồm một lớp lõi bê tông kẹp giữa hai lớp vỏ thép (một lớp vỏ trong và một lớp vỏ ngoài). So với cột ống thép nhồi bê tông trước đây (CFST), cột CFDST giúp giảm nhẹ khối lượng bản thân trong khi vẫn đảm bảo được khả năng chịu tải cao nhờ hiệu ứng kháng nở hông. Bài báo này trình bày một mô hình phần tử hữu hạn đơn giản được xây dựng trên phần mềm ABAQUS để phân tích mô phỏng đáp ứng phi tuyến của cột CFDST dạng trụ tròn rỗng chịu tải nén dọc trục. Mô hình đề xuất được sử dụng để khảo sát hai trường hợp: cột CFDST tiết diện không đổi và cột CFDST tiết diện biến đổi đều. Kết quả tính toán giới hạn chịu nén của cột CFDST theo mô hình đề xuất được so sánh và cho thấy sự phù hợp tốt với các kết quả thực nghiệm đã công bố của các tác giả khác.

**TỪ KHOÁ.** cột thép ống hai lớp nhồi bê tông, CFDST, hiệu ứng kháng nở hông, cường độ chịu nén dọc trục, phần tử hữu hạn

**ABSTRACT.** Concrete-filled double skin steel tubular columns (CFDST) have drawn many attractions from research community, as they are promising in construction of bridges and buildings. CFDST column is a composite structure that has one concrete core being confined by one steel layer inside and one steel layer outside. Compared with CFST columns, the structure of CFDST columns has lower self-weight, while the confinement effect, which helps to increase compressive strength of concrete, is preserved. In this paper, a simple finite element model is developed, based on the software ABAQUS, to analyze the non-linear behavior of CFDST columns under axial compression. The current model is used to analyze the behaviour of two types of CFDST columns: straight columns and tapered columns. Results obtained by the present model is compared with experimental data reported by other authors in literatures, showing good agreement

**KEYWORDS.** concrete-filled double skin steel tubular columns, CFDST, confinement effect, axial compressive load capacity, finite element model

### 1. GIỚI THIỆU

Bê tông có thể bị phá hủy giòn khi chịu nén. Việc bố trí các sợi thép trong kết cấu cột bê tông cốt thép giúp tăng tính dẻo, hạn chế phá hủy giòn. Mật độ thép đai tăng lên thì tính dẻo càng tăng. Trường hợp giới hạn chính là một bề mặt thép liên tục, từ đó hình thành nên ý tưởng cột ống thép nhồi bê tông (CFST) với lớp vỏ thép bao bọc lõi bê tông đặc bên trong. Khi cột chịu nén, hiện tượng nở hông của lõi bê tông bị lớp vỏ thép kháng lại, tạo nên hiệu ứng kháng nở hông làm tăng cường độ chịu nén của bê tông. Với đặc tính đó, cột CFST đã được ứng dụng trong các công trình xây dựng tại nhiều nước trên thế giới [1,2,3]. Mặt khác, lớp vỏ thép còn đóng vai trò như khuôn khi đổ bê tông. Cột thép ống hai lớp nhồi bê tông (CFDST) được cải tiến từ CFST, với lõi bê tông được kẹp giữa hai lớp thép trong và ngoài. Đặc điểm này giúp cột CFDST giảm nhẹ khối lượng hơn cột CFST, trong khi vẫn duy trì được cường độ chịu tải [4].

Do những ưu điểm nổi trội, cột CFDST đã thu hút được nhiều sự quan tâm nghiên cứu trên thế giới. Trong đó chủ yếu là nghiên cứu thực nghiệm khảo sát đặc tính cột như cường độ chịu nén đúng tâm [4,5,6] và lệch tâm [7,8], khả năng chịu xoắn [9], khả năng chịu uốn dưới tác động của tải chu kỳ [10] hay chịu va chạm ngang [11]. Về phân tích mô phỏng, hiện có mô hình phần tử hữu hạn cho cột CFDST như mô hình của Hu và Su [12] hay mô hình của Pagoulatou và cộng sự [13]. Tuy nhiên các mô hình này chỉ mới xét cột có tiết diện không đổi, chưa xét trường hợp cột có tiết diện biến

đổi đều. Trong ứng dụng thực tế, ví dụ như cột điện, cột CFDST có thể có dạng tiết diện biến đổi đều. Một số nghiên cứu thực nghiệm bước đầu đã quan tâm đến dạng cột này như [7,14].

Số lượng các nghiên cứu về cột CFDST cho đến nay còn chưa nhiều và rời rạc, do tính chất phức tạp của loại kết cấu này. Thêm vào đó, hiện tại chưa có tiêu chuẩn Việt Nam cho việc thiết kế và thi công cột CFDST. Vì vậy, việc nghiên cứu sâu hơn về dạng kết cấu liên hợp này là hết sức cần thiết. [11]

Mục đích chính của bài báo là trình bày một mô hình phần tử hữu hạn tương đối đơn giản, nhằm phân tích đáp ứng phi tuyến của cột CFDST khi chịu nén đúng tâm, với hai dạng cột: cột thẳng (tiết diện không đổi) và cột có tiết diện biến đổi đều.

### 2. MÔ HÌNH VẬT LIỆU

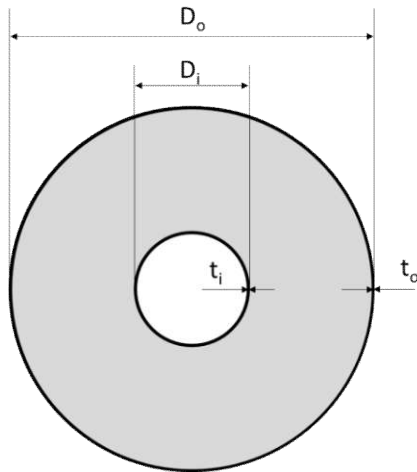
Cột CFDST được xét trong bài báo có tiết diện tròn, với phần lõi bê tông và các lớp vỏ thép đồng tâm với nhau, như minh họa ở Hình 1. Trong đó, Do và to lần lượt là đường kính và bề dày của lớp vỏ thép ngoài, còn Di và ti lần lượt là đường kính và bề dày của lớp vỏ thép trong. Mô hình vật liệu cho lớp vỏ thép và phần lõi bê tông sẽ được trình bày trong các phần tiếp theo dưới đây.

Received: May, 16<sup>th</sup> 2019

Accepted: July, 25<sup>th</sup> 2019

\*Corresponding Author

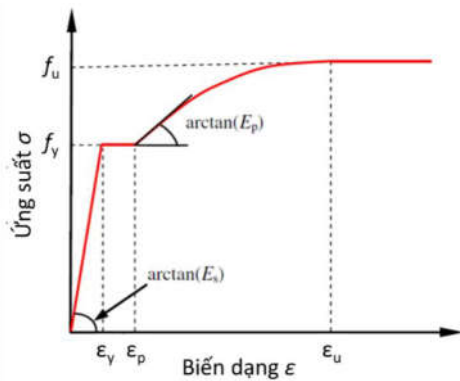
Email: dingdu85@gmail.com



Hình 1. Tiết diện cột CFDST

### 2.1 Vật liệu thép

Thép là vật liệu dẻo. Mối quan hệ giữa ứng suất ( $\sigma$ ) và biến dạng ( $\epsilon$ ) có thể xem là tuyến tính trong vùng đàn hồi. Khi ứng suất vượt quá giới hạn đàn hồi (còn gọi là giá trị ứng suất chảy dẻo  $f_y$  – yield stress), ứng xử của vật liệu thể hiện tính dẻo và quan hệ ứng suất – biến dạng là phi tuyến. Ở bài báo này, mô hình đàn-dẻo biến cứng do Zhong Tao và cộng sự [2] đề xuất cho nhóm vật liệu thép kết cấu có  $f_y$  trong khoảng từ 200 MPa đến 800 MPa sẽ được áp dụng. Theo mô hình này, đường cong  $\sigma$ - $\epsilon$  được biểu diễn qua 4 giai đoạn, xem Hình 2. Ở giai đoạn một, quan hệ ứng suất-biến dạng là đàn hồi tuyến tính với hệ số góc là modulus đàn hồi  $E_s$ , cho tới khi ứng suất đạt đến ngưỡng chảy dẻo  $f_y$ . Giai đoạn hai là một đoạn ngắn chảy dẻo lý tưởng. Giai đoạn ba là giai đoạn biến cứng theo hàm mũ cho đến khi đạt giá trị ứng suất giới hạn  $f_u$  (ultimate stress). Sau đó, ứng xử được xem là chảy dẻo lý tưởng nếu biến dạng tiếp tục tăng.



Hình 2. Quan hệ ứng suất – biến dạng đơn trục của thép theo mô hình của [2]

Biểu diễn toán học của mô hình như sau

$$\begin{aligned} \sigma &= E_s \epsilon, & 0 \leq \epsilon < \epsilon_y \\ \sigma &= f_y, & \epsilon_y \leq \epsilon < \epsilon_p \\ \sigma &= f_u - (f_u - f_y) \cdot \left( \frac{\epsilon_u - \epsilon}{\epsilon_u - \epsilon_p} \right)^p, & \epsilon_p \leq \epsilon < \epsilon_u \\ \sigma &= f_u, & \epsilon_u \leq \epsilon \end{aligned} \quad (1)$$

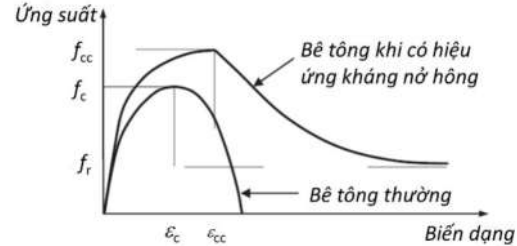
Trong phương trình (1),  $\epsilon_y$  và  $\epsilon_u$  lần lượt là các giá trị biến dạng tương ứng với  $f_y$  và  $f_u$ . Số mũ biến cứng  $p$  được tính bởi

$$p = E_p \left( \frac{\epsilon_u - \epsilon_p}{f_u - f_y} \right), \quad (2)$$

với  $E_p$  được gọi là modulus dẻo.

Nếu không có sẵn số liệu đo đạc, có thể lấy  $E_s = 200$  GPa,  $E_p = 0.02 E_s$ , hệ số nở ngang Poisson  $\nu = 0.3$ . Các thông số còn lại có thể ước lượng theo [2].

### 2.2 Vật liệu bê tông



Hình 3. Quan hệ ứng suất – biến dạng đơn trục của bê tông khi có và không có hiệu ứng kháng nở hông [17]

Bê tông là vật liệu giòn. Tuy nhiên lõi bê tông trong cột CFDST bị kẹp bởi các lớp vỏ thép, và do đó chịu ảnh hưởng của hiệu ứng kháng nở hông (confinement effect). Do hiệu ứng này mà giới hạn bền nén và tính dẻo của bê tông tăng lên rõ rệt. Sự khác biệt về tính chất vật liệu bê tông khi chịu nén trong hai trường hợp (có và không có hiệu ứng kháng nở hông) đã được chỉ ra trong các nghiên cứu trước đây [15,16,17], như thể hiện ở Hình 3.

Hai yếu tố mấu chốt trong mô hình vật liệu lõi bê tông trong cột CFDST là ước lượng giới hạn bền nén (đỉnh của đường cong ứng suất-biến dạng) và phần chịu tải còn lại (nhánh biến mềm). Theo [15], giới hạn bền nén đơn trục của bê tông khi có kháng nở hông,  $f_{cc}$ , và giá trị biến dạng tương ứng  $\epsilon_{cc}$  được ước lượng từ các giá trị của bê tông thường (không có hiệu ứng kháng nở hông) như sau

$$f_{cc} = f_c + k_1 f_l, \quad (3)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_c \left( 1 + k_2 \frac{f_l}{f_c} \right). \quad (4)$$

Trong các phương trình (3) và (4),  $f_c$  và  $\epsilon_c$  lần lượt là giới hạn bền nén và biến dạng tương ứng của bê tông thường. Các hằng số  $k_1 = 4.1$  và  $k_2 = 5k_1$  được chọn theo [15]. Đại lượng  $f_l$  được gọi là áp suất kẹp (lateral confinement pressure), chịu ảnh hưởng bởi cả lớp vỏ thép trong và lớp vỏ thép ngoài [12].

$$\begin{aligned} f_l &= 8.525 - 0.166 \frac{D_o}{t_o} - 0.00897 \frac{D_i}{t_i} + \\ &+ 0.00125 \left( \frac{D_o}{t_o} \right)^2 + 0.00246 \left( \frac{D_o}{t_o} \right) \left( \frac{D_i}{t_i} \right) - 0.0055 \left( \frac{D_i}{t_i} \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Lưu ý là nếu  $f_l$  đạt giá trị âm khi tính theo phương trình (5), ta sẽ lấy  $f_l = 0$ .

Với bê tông thường, nếu không có sẵn thông số đo đạc giá trị biến dạng  $\epsilon_c$  và modulus đàn hồi  $E_c$  có thể ước lượng theo [2,12,17].

$$\epsilon_c = 0.00076 + \sqrt{0.626 f_c - 4.33 \times 10^{-7}}, \quad (6)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \quad (7)$$

Nhánh biến mềm trong Hình 3 có thể biểu diễn xấp xỉ bởi hàm mũ theo [16]

$$\sigma = f_r + (f_{cc} - f_r) \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cc}}{\alpha}\right)^\beta\right), \quad \varepsilon \geq \varepsilon_{cc} \quad (8)$$

Trong phương trình (8),  $f_r$  là khả năng chịu tải còn lại (*residual stress*) và có thể được ước lượng theo [2]

$$f_r = 0.7(1 - \exp(-1.38\xi_c))f_{cc} \leq 0.25f_{cc}, \quad (9)$$

với  $\xi_c$  được gọi là hệ số kẹp (confinement factor) xác định bởi [4,18]

$$\xi_c = \frac{A_{so} \cdot f_{yso}}{A_{c,nominal} \cdot f_{ck}} \quad (10)$$

Ở phương trình (10),  $A_{so}$  và  $f_{yso}$  lần lượt là diện tích tiết diện và ứng suất chảy của lớp vỏ thép ngoài.  $A_{c,nominal}$  là diện tích mặt cắt ngang danh nghĩa của bê tông, được tính khi xem như bê tông lấp đầy phần không gian bên trong lớp thép ngoài.  $f_{ck}$  là độ bền nén đặc trưng của bê tông, được tính bằng 67% của giá trị độ bền nén đo được với mẫu bê tông hình lập phương. Với tiết diện cột như Hình 1, các tham số  $\alpha$  và  $\beta$  trong phương trình (8) có thể chọn theo [2]

$$\alpha = 0.04 - 0.036 / (1 + \exp(6.08\xi_c - 3.49)) \quad \text{và} \quad \beta = 1.2 \quad (11)$$

### 3. MÔ HÌNH PHÂN TỬ HỮU HẠN

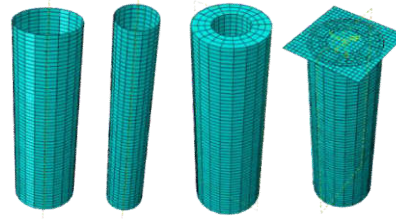
Mô hình phân tử hữu hạn được xây dựng trên phần mềm ABAQUS, nhằm mô phỏng đáp ứng của cột CFDST khi chịu tải nén dọc trục. Mô hình cột CFDST được xây dựng trong không gian ba chiều, với 4 chi tiết: lõi bê tông, vỏ thép ngoài, vỏ thép trong và tâm gia tải. Các chi tiết là các vật thể riêng biệt tương tác với nhau trong suốt quá trình làm việc.

#### 3.1 Lưới phân tử

Lõi bê tông được mô hình bằng phần tử khối 8 nút (C3D8). Với các lớp thép, phần tử vỏ 4 nút (S4) được sử dụng. Việc lựa chọn phần tử vỏ dựa trên cơ sở bề dày mỏng của các ống thép. Lựa chọn này cho phép giảm khối lượng tính toán, trong khi vẫn đảm bảo được tính chính xác khi so với phần tử khối như một số nghiên cứu trước đây về kết cấu liên hợp CFST/CFDST [12,19]. Tâm gia tải được biểu diễn dưới dạng tấm phẳng cứng tuyệt đối và sử dụng phần tử cứng (rigid) 4 nút (R3D4) để chia lưới. Mục đích việc chia lưới trên tâm gia tải là để thực hiện tiếp xúc giữa tấm với các chi tiết của cột.

Ảnh hưởng của mật độ lưới đến kết quả mô phỏng đã được nhóm tác giả khảo sát với nhiều kích thước phần tử khác nhau, cho thấy tác động không đáng kể. Điều này phù hợp với quan sát của các nghiên cứu trước [2,12]. Với mỗi mẫu khảo sát, nhìn chung cần khoảng 5000-6000 phần tử. Hình 4 trình bày lưới chia trên từng chi tiết như các lớp vỏ thép, lõi bê tông, và trên toàn bộ mô hình sau khi đã lắp ráp.

Tương tác bề mặt giữa các chi tiết trong cột CFDST được biểu diễn thông qua module tiếp xúc surface-to-surface của ABAQUS dựa trên mô hình ma sát Coulomb. Các bề mặt có thể ở trạng thái tiếp xúc hoặc tách rời nhau (có khoảng hở) nhưng không được xuyên qua nhau. Trong các thí nghiệm, hệ số ma sát không được nêu cụ thể, do đó hệ số ma sát 0.25 được sử dụng, tương tự như một số nghiên cứu khác [12,17].



Hình 4. Lưới phân tử trên các chi tiết theo thứ tự từ trái qua phải: vỏ thép ngoài, vỏ thép trong, lõi bê tông và toàn mô hình

#### 3.2 Điều kiện biên

Mặt dưới cột được ngàm chặt (ràng buộc tất cả các bậc tự do), mặt trên tiếp xúc với tâm gia tải. Tâm gia tải được quy định chỉ di chuyển đi xuống theo phương thẳng đứng để nén cột.

### 4. KẾT QUẢ

$$\frac{e^{ix}}{2} = \frac{\cos x + i \sin x}{2} \Rightarrow \exp(ix)/2 = (\cos x + i \sin x)/2$$

#### 4.1 Cột CFDST thẳng (tiết diện không đổi)

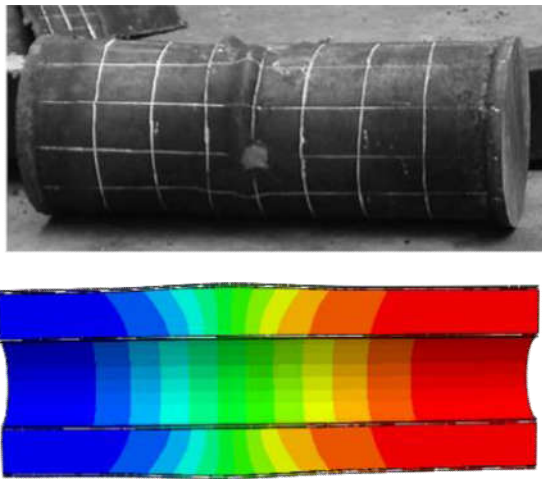
Mô hình đề xuất được kiểm chứng thông qua việc so sánh với kết quả thực nghiệm đã công bố bởi các tác giả khác. Cụ thể, khảo sát được thực hiện với 10 mẫu cột CFDST, trong đó có 3 mẫu từ [4], 2 mẫu từ [20], 2 mẫu từ [18] và 3 mẫu từ [6]. Thông số hình học và vật liệu của các mẫu thí nghiệm được liệt kê ở Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Thông số hình học các mẫu thí nghiệm cột thẳng

Mẫu	$D_o$ [mm]	$t_o$ [mm]	$D_i$ [mm]	$t_i$ [mm]	$L$ [mm]	Nguồn
CC2a	180	3	48	3	540	[4]
CC3a	180	3	88	3	540	
CC5a	114	3	58	3	342	
C2C7	114.6	4.7	48.4	2.8	400	[20]
C3C7	114.4	3.5	48.4	2.8	400	
DS-2	300	2	180	2	1100	[18]
DS-6	300	4	180	2	1100	
C23-375	158	2.14	40	2.14	450	[6]
C23-750	158	2.14	77	2.14	450	
C23-1125	157	2.14	115	2.14	450	

Bảng 2. Thông số vật liệu các mẫu thí nghiệm cột thẳng

Mẫu	$f_c$ [MPa]	$F_{yso}$ [MPa]	$F_{ysi}$ [MPa]	Nguồn
CC2a	40	275.9	296.1	[4]
CC3a	40	275.9	370.2	
CC5a	40	294	374	
C2C7	63.4	416	425	[20]
C3C7	63.4	453	425	
DS-2	28	290	290	[18]
DS-6	28	290	290	
C23-375	286	286	18.7	[6]
C23-750	286	286	18.7	
C23-1125	286	286	18.7	



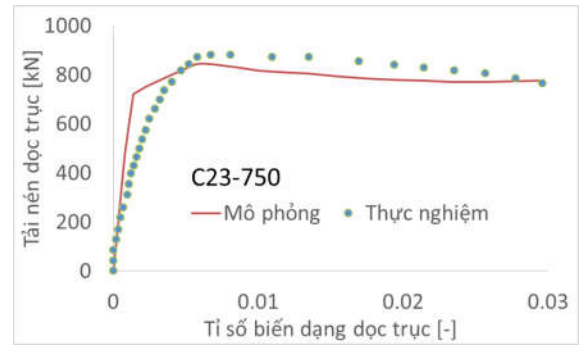
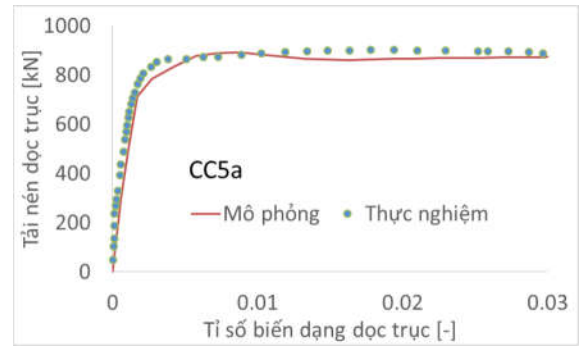
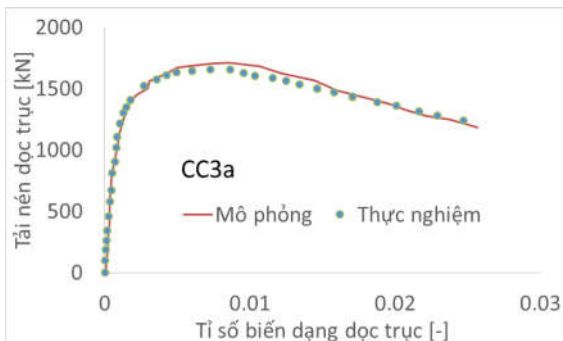
**Hình 5.** Biến dạng của mẫu CC3a theo thực nghiệm (ảnh trên) và mô phỏng (ảnh dưới). Kết quả mô phỏng thể hiện 1/2 mô hình

Hình 5 thể hiện biến dạng của mẫu CC3a theo mô phỏng và so sánh với kết quả thực nghiệm của [4] ngay trước khi bị phá hủy (khi kết thúc thí nghiệm). Có thể thấy, mô hình đã dự đoán được hình dáng biến dạng của cột. Bê tông có khuynh hướng nở ngang cục bộ và làm cong các bề mặt vỏ thép. Bảng 3 so sánh khả năng chịu tải nén dọc trục của cột CFDST dự đoán bởi mô hình ( $N_m$ ) và số liệu thực nghiệm ( $N_e$ ), cho thấy sự phù hợp tốt. Thống kê với 10 mẫu thể hiện giá trị trung bình của tỉ số  $N_m/N_e$  là 1.014 với độ lệch chuẩn là 0.042.

**Bảng 3.** So sánh khả năng chịu tải nén dọc trục của cột CFDST thẳng dự đoán bởi mô hình,  $N_m$ , và số liệu thực nghiệm,  $N_e$

Mẫu	$N_e$ [kN]	$N_m$ [kN]	$N_m/N_e$	Nguồn
CC2a	1790	1847	1.032	[4]
CC3a	1648	1711	1.038	
CC5a	903	891	0.986	
C2C7	1390	1452	1.044	[20]
C3C7	1191	1299	1.091	[18]
DS-2	2141	2102	0.982	
DS-6	2693	2612	0.97	
C23-375	968.2	1015	1.048	[6]
C23-750	879.1	870	0.99	
C23-1125	703.6	675	0.959	
		<b>Trung bình</b>	<b>1.014</b>	
		<b>Độ lệch chuẩn</b>	<b>0.042</b>	

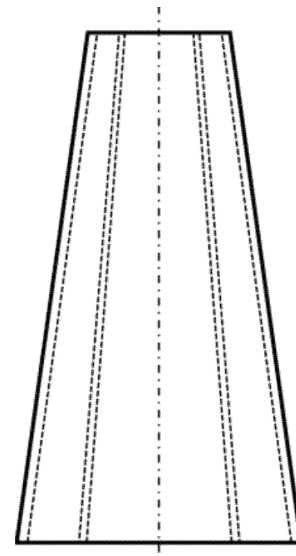
Hình 6 trình bày đường cong tải – tỉ số biến dạng dọc trục của các mẫu CC3a, CC5a và C23-750. Tỉ số biến dạng dọc trục là tỉ số giữa phần bị thu ngắn do nén và chiều dài ban đầu của cột. Các kết quả một lần nữa cho thấy sự tương đồng giữa mô hình đề xuất với thực nghiệm. Mô hình phân tử hữu hạn đưa ra dự đoán hợp lý về đáp ứng của cột trong suốt quá trình chịu tải nén, qua đó phản ánh độ tin cậy của mô hình.



**Hình 6.** Đồ thị tải – tỉ số biến dạng dọc trục của các mẫu CC3a, CC5a và C23-750 thu được từ mô phỏng, trong tương quan với số liệu tham khảo từ thực nghiệm

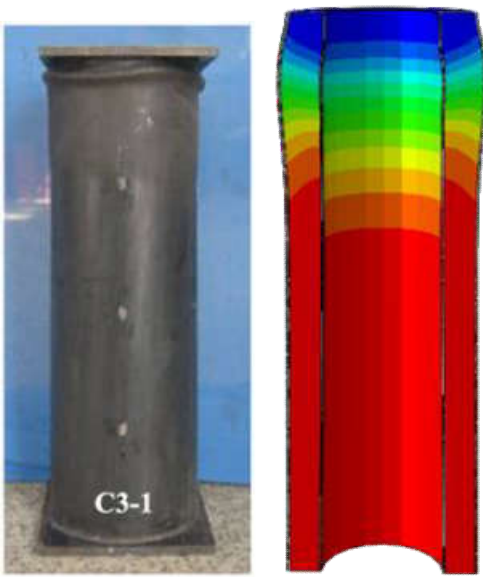
#### 4.2 Cột CFDST với tiết diện biến đổi đều

So với cột CFDST thẳng (tiết diện không đổi) thì cột tiết diện biến đổi đều có hình côn, với đáy dưới lớn hơn đáy trên, như minh họa ở Hình 7. Căn cứ phương trình (10), ta thấy rằng hệ số kẹp cũng sẽ biến thiên tăng dần theo chiều cao cột, cũng có nghĩa là hiệu ứng kháng nở hông sẽ mạnh nhất ở đỉnh cột. Điều này phản ánh tính chất của cột tiết diện biến đổi đều khi chịu nén sẽ phức tạp hơn so với cột thẳng. Các thí nghiệm ở tài liệu [14] cho thấy dạng phá hoại đặc trưng của cột CFDST tiết diện biến đổi đều khi chịu nén dọc trục là ở đỉnh cột, như trình bày ở Hình 8. Bê tông ở khu vực này có khuynh hướng nở ngang cục bộ và làm cong các tấm thép. Đây là đặc điểm hoàn toàn khác biệt với trường hợp cột thẳng ở Hình 5.



**Hình 7.** Minh họa cột CFDST tiết diện biến đổi đều





Hình 8. Biến dạng của cột CFDST tiết diện biến đổi đều, mẫu C3, so sánh giữa thí nghiệm [14] và mô phỏng

Bảng 4. Thông số hình học các mẫu thí nghiệm cột CFDST tiết diện biến đổi đều [14]

Mẫu	Vỏ thép ngoài		Vỏ thép trong		L [mm]
	D <sub>o</sub> x t <sub>o</sub> [mm x mm]		D <sub>i</sub> x t <sub>i</sub> [mm x mm]		
	Đỉnh cột	Đáy cột	Đỉnh cột	Đáy cột	
C2	329 x 3.82	350 x 3.82	210 x 2.92	210 x 2.92	1050
C3	308 x 3.82	350 x 3.82	189 x 2.92	189 x 2.92	1050

Bảng 5. Thông số vật liệu thép trong mẫu thí nghiệm cột CFDST tiết diện biến đổi đều [14]

	f <sub>y</sub> [MPa]	f <sub>u</sub> [MPa]	E [MPa]	ν
Vỏ thép trong	396.5	530.7	202000	0.295
Vỏ thép ngoài	439.3	508.5	212000	0.307

Bảng 6. Thông số vật liệu thép trong mẫu thí nghiệm cột CFDST tiết diện biến đổi đều [14]

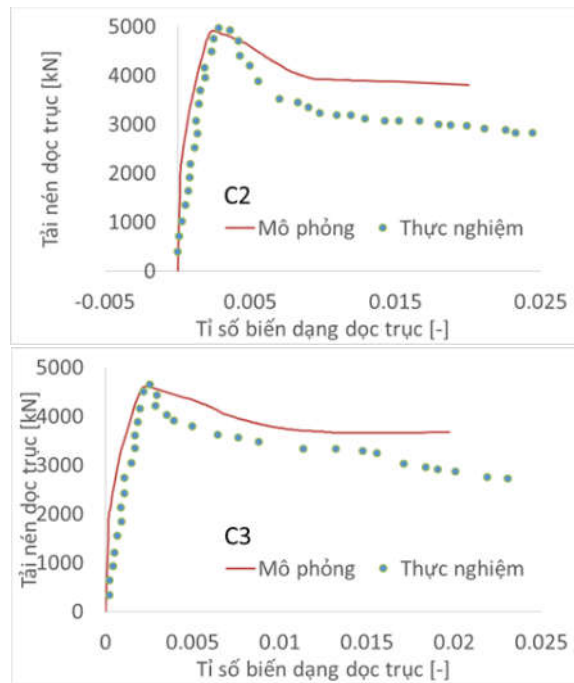
f <sub>c</sub> [MPa]	E	ν
52.2	33000	0.2

Thông số hình học cột và thông số vật liệu bê tông và các lớp vỏ thép trong thí nghiệm ở tài liệu [14] được liệt kê trong các Bảng 4-6. Kết quả dự đoán giới hạn chịu tải nén của cột được trình bày ở Bảng 7, cho thấy sự tương đồng với số liệu thực nghiệm.

So sánh đồ thị tải – tỉ số biến dạng dọc trục của các mẫu C2 và C3 thu được từ mô hình và số liệu thực nghiệm của [14] được trình bày ở Hình 9. Có thể thấy, mô hình dự đoán khá tốt giai đoạn trước khi đạt giới hạn chịu tải. Tuy nhiên, mô hình có xu hướng dự đoán khả năng chịu tải còn lại cao hơn so với thí nghiệm.

Bảng 7. Kết quả tính toán giới hạn chịu tải nén của cột CFDST tiết diện biến đổi đều theo mô hình đề xuất, N<sub>m</sub>, so sánh với số liệu thực nghiệm, N<sub>e</sub>, của [14]

Mẫu	N <sub>e</sub> [kN]	N <sub>m</sub> [kN]	N <sub>m</sub> /N <sub>e</sub>
C2	4932	4919	0.997
C3	4585	4614	1.006



Hình 9. Đồ thị tải – tỉ số biến dạng dọc trục của các mẫu C2 và C3 thu được từ mô phỏng và so sánh với số liệu thực nghiệm từ tài liệu [14]

## 5. KẾT LUẬN

Cột CFDST là một dạng kết cấu liên hợp bê tông và thép với ứng xử phức tạp với nhiều yếu tố phi tuyến: biến dạng lớn, phi tuyến vật liệu và sự tiếp xúc bề mặt giữa các chi tiết khác nhau. Khả năng chịu tải nén dọc trục của cột phụ thuộc vào vật liệu thép và bê tông được sử dụng, và đặc biệt là hiệu ứng kháng nở hông. Hiệu ứng này gây ra trạng thái ứng suất trong bê tông, làm tăng khả năng chịu nén và tăng tính dẻo cho bê tông.

Mô hình phân tử hữu hạn đề xuất đã được áp dụng thành công cho cột CFDST tiết diện không đổi. Kết quả dự đoán của mô hình về hình dáng biến dạng và đường cong tải – tỉ số biến dạng dọc trục có sự phù hợp với kết quả thí nghiệm của các tác giả khác nhau. Điều này thể hiện độ tin cậy của mô hình.

Mô hình đề xuất cũng bước đầu được áp dụng để khảo sát trường hợp cột CFDST có tiết diện biến đổi đều. Với cột có tiết diện biến đổi đều, hiệu ứng kháng nở hông có xu hướng tăng dần theo chiều cao, nhỏ nhất ở đáy cột và lớn nhất ở đỉnh cột. Sự khác biệt về tính chất đã biểu hiện ở hình dáng phá hoại đặc trưng của cột. Vùng bị phá hoại trong trường hợp cột CFDST tiết diện biến đổi đều là ngay sát đỉnh cột, trong khi với cột tiết diện không đổi thì vùng bị phá hoại ở khoảng giữa và hơi lệch về phía đáy cột.

Nghiên cứu hiện tại dừng ở việc khảo sát đáp ứng cột CFDST chịu tải nén dọc trục. Trong thực tế làm việc, cột có thể chịu tải nén lệch tâm. Khi đó, bên cạnh lực dọc, cột còn chịu thêm uốn ngang. Trong trường hợp này, cột có nguy cơ mất ổn định. Một hướng phát triển thú vị nữa cho các nghiên cứu tiếp theo là khảo sát khả năng chịu tải va chạm ngang của cột, ví dụ trường hợp sà lan và chạm với trụ cầu.

## 6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L.-H. Han, G.-H. Yao, and Z. Tao. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-Walled Structures*, 2007, vol. 45, 24-36.
- [2] Z. Tao, Z.-B. Wang, and Q. Yu. Finite element modelling of

- concrete-filled steel stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, **2013**, vol. 89, 121-131.
- [3] L.-H. Han, W. Li, and R. Bjorhovde. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *Journal of Constructional Steel Research*, **2014**, vol. 100, 211-228.
- [4] Z. Tao, L.-H. Han, and X.-L. Zhao. Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns. *Journal of Constructional Steel Research*, **2004**, vol. 60, 1129-1158.
- [5] M. Elchalakani, X.-L. Zhao, and R. Grzebieta. Test on concrete filled double-skin (CHS outer and SHS inner) composite short columns under axial compression. *Thin-Walled Structures*, **2002**, vol. 40, 415-441.
- [6] K. Uenaka, H. Kitoh, and K. Sonoda. Concrete filled double skin circular stub columns under compression. *Thin-Walled Structures*, **2010**, vol. 48, 19-24.
- [7] W. Li, L.-H. Han, Q.-X. Ren, and X.-L. Zhao. Behavior and calculation of tapered CFDST columns under eccentric compression. *Journal of Constructional Steel Research*, **2013**, vol. 83, 127-136.
- [8] Y.-B. Zhang and L.-H. Li, W. Han. Analytical behaviour of tapered CFDST columns under axially partial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, **2017**, vol. 139, 302-314, .
- [9] H. Huang, L.-H. Han, and X.-L. Zhao. Investigation on concrete filled double skin steel tubes (CFDSTs) under pure torsion. *Journal of Constructional Steel Research*, **2013**, vol. 90, 221-234.
- [10] L.-H. Han, H. Huang, Z. Tao, and X.-L. Zhao. Concrete double skin steel tubular (CFDST) beam-columns subjected to cyclic bending. *Engineering Structures*, **2006**, vol. 28, 1698-1714.
- [11] S. Aghdamy, D. P. Thambiratnam, M. Dhanakesar, and S. Saiedi. Effects of load-related parameters on the response of concrete-filled double-skin steel tube columns subjected to lateral impact. *Journal of Constructional Steel Research*, **2017**, vol. 138, 642-662.
- [12] H.-T. Hu and F.-C. Su. Nonlinear analysis of short concrete-filled double skin tube columns subjected to axial compressive forces. *Marine Structures*, **2011**, vol. 24, 319-337.
- [13] M. Pagoulatou, T. Sheehan, X. H. Dai, and D. Lam. Finite element analysis on the capacity of circular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) stub columns. *Engineering Structures*, **2014**, vol. 72, 102-112.
- [14] W. Li, Q.-X. Ren, L.-H. Han, and X.-L. Zhao. Behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns. *Thin-Walled Structures*, **2012**, vol. 57, 37-48.
- [15] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, **1988**, vol. 114, no. 8, 1804-1826.
- [16] B. Binici. An analytical model for stress-strain behavior of confined concrete. *Engineering Structures*, **2005**, vol. 27, 1040-1051.
- [17] H.-T. Thai, B. Uy, M. Khan, Z. Tao, and F. Mashiri. Numerical modelling of concrete-filled steel box columns incorporating high strength materials. *Journal of Constructional Steel Research*, **2014**, vol. 102, 256-265.
- [18] H. Huang, L.-H. Han, Z. Tao, and X.-L. Zhao. Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST). *Journal of Constructional Steel Research*, **2010**, vol. 66, 542-555.
- [19] M. Johansson and Gylltoft. Mechanical behavior of circular steel - concrete composite stub columns. *Journal of Structural Engineering*, **2002**, vol. 128, 1073-1081.
- [20] X.-L. Zhao, R. H. Grzebieta, and M. Elchalakani. Test of concrete-filled double skin CHS composite stub columns. *Steel and Composite Structures*, **2002**, 2(2), 129-142.