

# ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ HÌNH HỌC ĐẾN ỨNG XỬ CỦA CẤU KIỆN ỚNG THÉP HAI LỚP NHỒI BÊ TÔNG CHỊU UỐN

TS. VŨ QUANG VIỆT

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

TS. PHẠM THÁI HOÀN

Trường Đại học Xây dựng

TS. TRƯƠNG VIỆT HÙNG

Trường Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: Bài báo nghiên cứu ứng xử của cấu kiện ống thép hai lớp nhồi bê tông (Concrete-Filled Double-Skin steel Tubes - CFDST) có hệ neo chống cắt chịu uốn thuần túy bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH). Mô hình 3D của cấu kiện CFDST có hệ neo chống cắt dạng đinh mũ được xây dựng và phân tích sử dụng phần mềm ABAQUS. Mô hình PTHH của cấu kiện CFDST được kiểm chứng bằng kết quả thí nghiệm. Kết quả kiểm chứng cho thấy mô hình được xây dựng mô phỏng chính xác sự làm việc chịu uốn của cấu kiện CFDST, từ đó ảnh hưởng của các tham số hình học bao gồm tỷ số độ mảnh của ống thép ngoài ( $D_o/t_o$ ), tỷ số độ mảnh của ống thép trong ( $D_i/t_i$ ), và tỷ số giữa đường kính ống thép trong và ống thép ngoài ( $D_i/D_o$ ) đến ứng xử của loại cấu kiện này khi chịu uốn được nghiên cứu thông qua phân tích mô hình PTHH đã được xây dựng.

Từ khóa: Cọc thép hai lớp nhồi bê tông; phần tử hữu hạn, khả năng chịu uốn; ABAQUS.

Abstract: This paper investigates the behavior of concrete-filled double-skin steel tubes (CFDST) members with shear connectors subjected to bending using finite element (FE) simulation. A three dimensional FE model of the CFDST member with shear connectors (M16 studs) was developed and analyzed using ABAQUS software. In order to demonstrate the accuracy of the FE model, a comparison between the results obtained from FE analysis and experiment was made. The model is further used to perform parametric studies for investigating the influences of geometric parameters on the behavior of the CFDST member with M16 studs subjected to bending.

Keyword: Concrete filled double skin steel tube; finite element analysis; ultimate strength; ABAQUS.

## 1. Mở đầu

Cấu kiện ống thép hai lớp nhồi bê tông (Concrete-Filled Double-Skin steel Tubes - CFDST) ngày càng trở nên phổ biến hơn so với ống thép một lớp nhồi bê tông truyền thống nhờ các ưu điểm vượt trội như khả năng chịu động đất, hiệu suất chịu tải trọng lặp, chịu lửa tốt hơn, độ dẻo cao hơn, trọng lượng nhẹ hơn,... Cấu kiện CFDST bao gồm hai ống thép trong và ngoài đồng tâm cùng với lớp bê tông được nhồi vào giữa hai ống thép. Trong những năm gần đây, các nghiên cứu về loại cấu kiện này cũng được thực hiện khá phổ biến trên thế giới [1-14]. Trong đó, có thể kể đến các nghiên cứu thực nghiệm về dầm, cột, dầm - cột được tạo từ các cấu kiện CFDST với các loại mặt cắt khác nhau được thực hiện bởi Han và Zhao [1]. Zhong Tao và cộng sự [2] đã thực hiện một loạt các thí nghiệm về ứng xử của cấu kiện CFDST dạng cột ngắn và dầm - cột chịu tải trọng nén. Han [3-5] đã tiến hành các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm cho loại cấu kiện CFDST chịu tải trọng lặp và tải trọng dài hạn. Liên quan đến các nghiên cứu sử dụng phương pháp giải tích, Pagoulatou [6] đã tìm hiểu ứng xử của cột ngắn dùng CFDST chịu tải trọng nén lệch tâm, và sau đó dựa vào kết quả phân tích, Pagoulatou đã đề xuất công thức để ước lượng khả năng chịu lực của cấu kiện này phù hợp với tiêu chuẩn Eurocode 4 [7]. Mặt khác, thông qua việc sử dụng phân tích PTHH, Huang [8] đã điều tra ảnh hưởng của các thông số quan trọng được sử dụng để xác định khả năng chịu lực của mặt cắt ngang cột ngắn làm bằng CFDST. Trong thực tế, các cấu kiện CFDST chịu nén hoặc chịu uốn thường được sử dụng rộng rãi cho kết cấu cột của nhà cao tầng. Tuy nhiên ứng xử chịu uốn của cấu kiện này thường được xem xét khi áp dụng trong xây dựng các kết cấu nhịp lớn, kết cấu cầu [9-12].

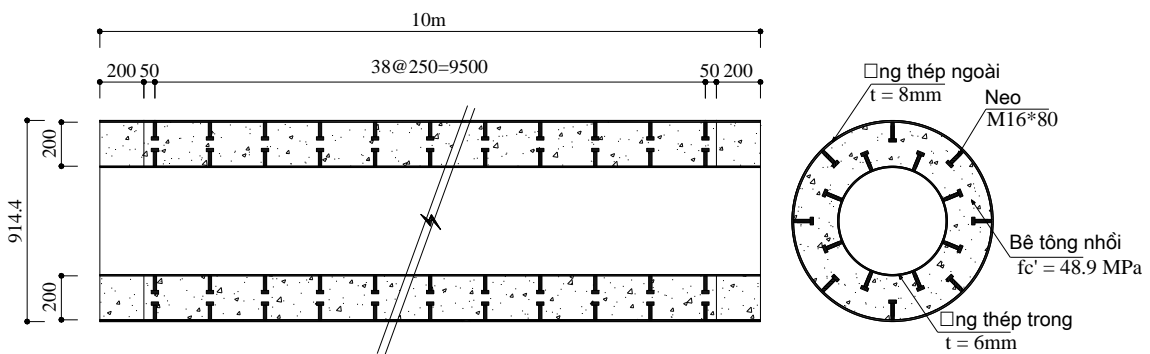
Một số nghiên cứu thực hiện trước đây đã chứng minh rằng việc bê tông nhồi trượt trong ống thép cũng ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của cấu kiện này. Tuy nhiên các nghiên cứu về loại cấu kiện này có sử dụng neo chống cắt còn khá hạn chế. Gần đây, Eom và cộng sự [15] đã phát triển một dạng cấu kiện CFDST với neo chống cắt dạng đinh mũ và dạng tấm dẹt chịu tải trọng uốn. Dựa vào kết quả nghiên cứu, tác giả đã kết luận rằng loại cấu kiện này có hiệu quả trong xây dựng. Tuy nhiên tác giả vẫn chưa khảo sát ảnh hưởng của các tham số hình học đến ứng xử của loại cấu kiện này.

Trong nghiên cứu này, ứng xử của cấu kiện CFDST có neo chống cắt chịu uốn được nghiên cứu sử dụng mô hình mô phỏng PTHH. Mô hình PTHH 3D của cấu kiện này đã được xây dựng và phân tích bằng phần mềm ABAQUS [16]. Mô hình mô phỏng được kiểm chứng bằng kết quả thực nghiệm, từ đó mô hình PTHH được sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng các tham số hình học của ống thép đến ứng xử chịu uốn của cấu kiện CFDST.

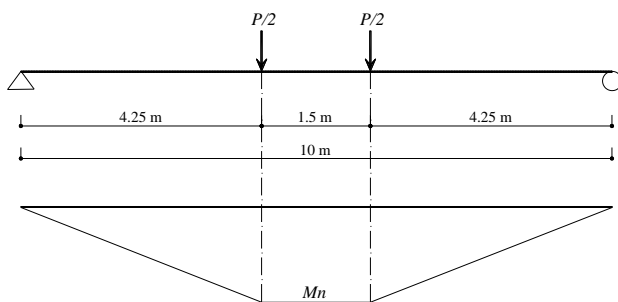
## 2. Mô phỏng phần tử hữu hạn

### 2.1 Mô tả thí nghiệm cấu kiện CFDST chịu uốn

Cấu kiện CFDST có neo chống cắt chịu uốn được thiết kế và thí nghiệm bởi Eom và cộng sự [15]. Cấu kiện CFDST có chiều dài 10 m bao gồm ống thép ngoài có đường kính 914.4 mm, chiều dày 8mm, ống thép trong có đường kính 514.4 mm, chiều dày 6 mm và lớp bê tông dày 200 mm lấp đầy khoảng trống giữa hai ống thép trong và ngoài. Hệ thống neo chống cắt và trượt bằng đinh tán M16 được hàn cả vào ống thép trong và ống thép ngoài để tạo nên tác động tổng hợp giữa các ống thép và bê tông. Kích thước chi tiết của cấu kiện này được thể hiện ở hình 1. Thí nghiệm uốn bốn điểm đã được Eom và cộng sự [15] sử dụng để đánh giá khả năng chịu lực của cấu kiện này. Sơ đồ minh họa thí nghiệm, hình ảnh của cấu kiện và sơ đồ lắp đặt thí nghiệm được thể hiện trong hình 2.



Hình 1. Mặt cắt dọc và ngang của cấu kiện CFDST có neo chống cắt [15]



a) Sơ đồ minh họa thí nghiệm



b) Lắp đặt thí nghiệm

Hình 2. Thiết lập thí nghiệm cấu kiện CFDST [15]

## 2.2 Mô hình phần tử hữu hạn

### 2.2.1. Mô hình vật liệu

#### a. Mô hình vật liệu bê tông

Đường cong quan hệ giữa ứng suất – biến dạng dùng để mô phỏng ứng xử của bê tông khi chịu nén

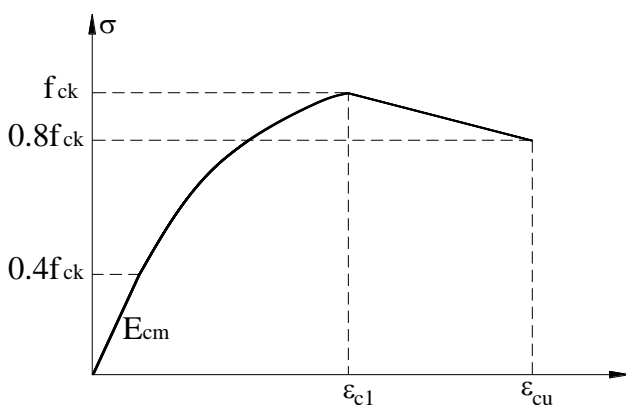
được sử dụng dựa vào đề xuất của Kim [18] và Nguyen [19] (hình 3a) với một số thay đổi dựa theo tiêu chuẩn Eurocode 2 [17], cụ thể như sau:

- Phần đầu tiên của đường cong quan hệ ứng suất-biến dạng được giả định là một đường tuyến tính. Giới hạn của đường tuyến tính này đặt tại vị trí

có ứng suất  $0.4 f_{ck}$ , trong đó  $f_{ck}$  là cường độ nén của mẫu bê tông hình trụ. Mô đun đàn hồi ban đầu của bê tông  $E_{cm}$  được xác định theo tiêu chuẩn Eurocode 2 [17] với giả định hệ số poisson là 0.2;

- Phần thứ hai của đường cong là đoạn cong parabol bắt đầu từ điểm có ứng suất  $0.4f_{ck}$  cho đến điểm có ứng suất bằng ứng suất tới hạn của bê tông  $f_{ck}$ . Đoạn cong này được xác định bởi [17] theo công thức dưới đây:

$$\sigma = \left[ \frac{kn - n^2}{1 + (k - 2)n} \right] f_{ck} \quad (1)$$



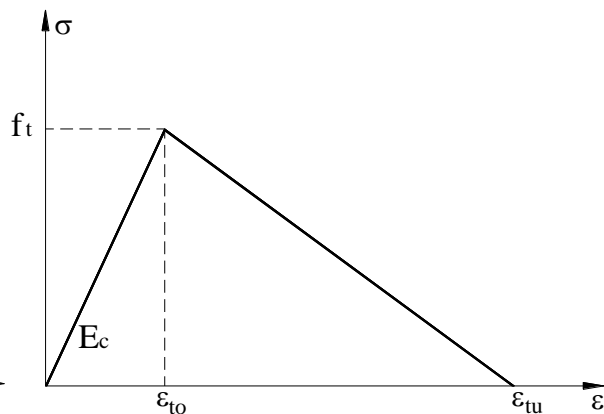
a) Mô hình vật liệu bê tông chịu nén

trong đó:

$$n = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}; \quad (\epsilon_{c1} - \text{biến dạng tương ứng với ứng suất tới hạn } f_{ck}) \quad (2)$$

$$k = 1.1 E_{cm} \frac{\epsilon_{c1}}{f_{ck}} \quad (3)$$

- Phần thứ ba của đường cong ứng suất-biến dạng này được giả định là đường tuyến tính giảm dần từ điểm có ứng suất tới hạn  $f_{ck}$  cho tới điểm có ứng suất  $0.8f_{ck}$ . Biến dạng tới hạn  $\epsilon_{cu}$  tương ứng với điểm có ứng suất  $0.8f_{ck}$  được xác định dựa vào tiêu chuẩn Eurocode 2 [17].



b) Mô hình vật liệu bê tông chịu kéo

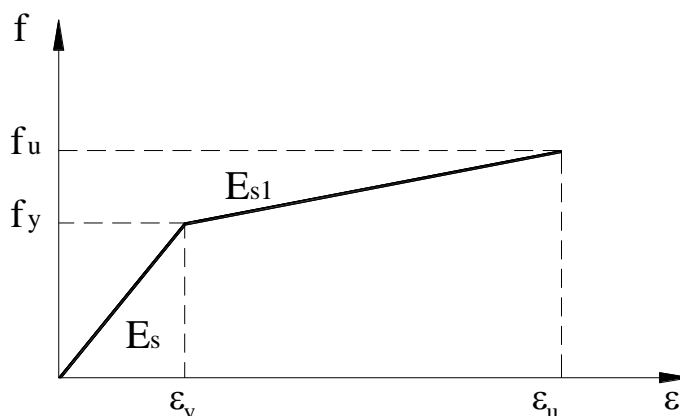
**Hình 3. Đường quan hệ ứng suất – biến dạng của bê tông**

Đối với ứng xử của bê tông khi làm việc chịu kéo, đường cong quan hệ ứng suất-biến dạng được giả thiết bởi hai đường tuyến tính như được trình bày trong hình 3b. Ứng suất kéo lớn nhất  $f_t$  được giả định bằng  $0.1 f_{ck}$  [20] trong khi biến dạng lớn nhất tại điểm có ứng suất bằng không  $\epsilon_{tu}$  được giả định lấy giá trị là 0.1 [20].

Để mô phỏng ứng xử thực tế của bê tông, mô hình bê tông phá hoại dẻo đề xuất bởi Lee và Fenves [21] đã được sử dụng trong mô hình này.

*b. Mô hình vật liệu thép*

Đường cong quan hệ ứng suất – biến dạng của thép được sử dụng là đường hai đoạn tuyến tính thể hiện trong hình 4. Để thiết lập quan hệ này, các thông số đầu vào như cường độ chảy, biến dạng chảy, mô đun đàn hồi của thép, cường độ tới hạn, biến dạng tới hạn được xác định từ thí nghiệm của Eom và cộng sự [15].



**Hình 4. Đường quan hệ ứng suất – biến dạng của thép**

### 2.2.2. Chia lưới và chọn loại phần tử

Trong mô hình PTHH này, các loại phần tử khác nhau bao gồm phần tử khối, phần tử tấm và phần tử thanh đã được sử dụng để mô hình hóa các thành phần của cấu kiện CFDST. Trong đó, phần tử khối 8 nút (C3D8R) được sử dụng để mô phỏng lớp bê tông trong ống và các tấm đỡ tại gối và tấm truyền lực. Phần tử tấm 4 nút (S4R) được sử dụng để mô hình hóa ống thép trong và ngoài. Cuối cùng, phần tử thanh (T3D2) được sử dụng để mô phỏng hệ neo chống cắt dạng đinh mũ. Kích thước các phần tử (element size) có ý nghĩa quan trọng trong

mô hình PTHH. Các phần tử được chia với kích thước nhỏ sẽ cho kết quả phân tích chính xác hơn, tuy nhiên thời gian phân tích sẽ rất lớn. Ngược lại, các phần tử được chia lưới với kích thước lớn yêu cầu ít thời gian phân tích hơn nhưng cho kết quả không chính xác bằng. Thông qua việc phân tích độ nhạy với kích thước khác nhau cho các loại phần tử, kích thước 50 mm được lựa chọn để sử dụng cho toàn bộ các thành phần của cấu kiện CFDST ngoại trừ hệ neo chống cắt sử dụng phần tử có kích thước 5 mm. Mô hình chia lưới của cấu kiện CFDST được thể hiện trong hình 5.



### 2.2.3. Liên kết và điều kiện ràng buộc

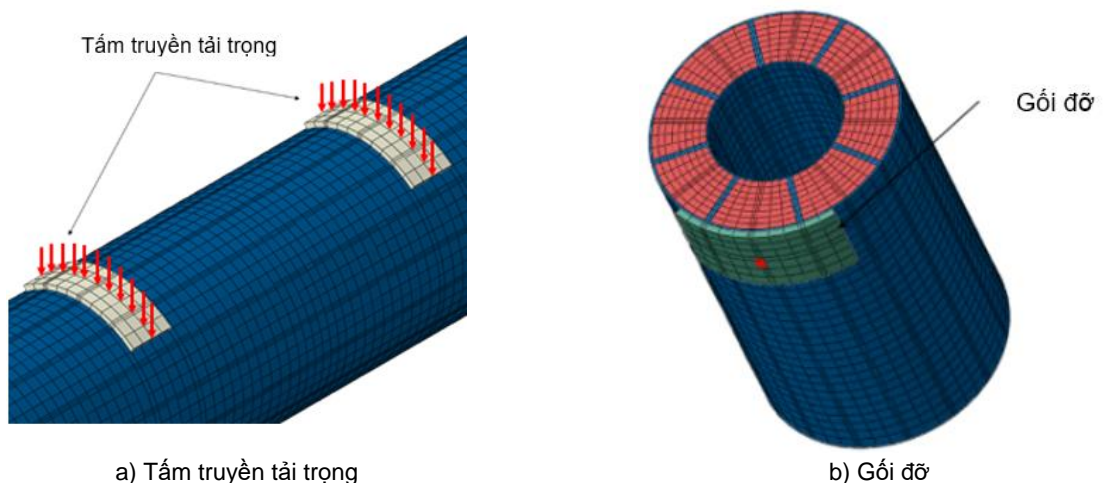
Liên kết giữa các ống thép và bê tông được mô hình hóa sử dụng loại liên kết tiếp xúc giữa mặt với mặt (Surface-to-Surface). Để khai báo loại liên kết này, hai bề mặt tiếp xúc sẽ được định nghĩa là bề mặt chính (Master surface) và bề mặt phụ thuộc (Slaver surface) trong đó bề mặt chính thường được gán cho vật liệu có độ cứng lớn hơn (có mô đun đàn hồi lớn hơn) nhằm hạn chế các lỗi số học. Do đó, đối với liên kết giữa các ống thép và bê tông nhồi, bề mặt phụ thuộc được gán cho các bề mặt của lớp bê tông nhồi, trong khi bề mặt chính được gán cho các bề mặt của ống thép tiếp xúc với lớp bê tông. Ứng xử giữa bề mặt chính và bề mặt phụ thuộc được khai báo là tiếp xúc cứng theo phương vuông góc và tiếp xúc ma sát với hệ số ma sát trượt Coulomb giữa bê tông và thép được sử dụng là 0.1 [15].

Đối với việc khai báo liên kết giữa hệ neo chống cắt và ống thép trong/ngoài, liên kết gắn chặt (TIE) được sử dụng nhằm đảm bảo sự tiếp xúc trực tiếp giữa hệ neo và các ống thép. Thêm vào đó, hệ neo chống cắt này cũng được giả thiết là dính bám hoàn toàn vào lớp bê tông thông qua tùy chọn

EMBEDDED có sẵn trong thư viện của ABAQUS. Đối với các liên kết giữa các tấm thép tại vị trí truyền tải trọng và vị trí gối với ống thép ngoài, liên kết TIE cũng được sử dụng để mô phỏng ứng xử tương tác giữa chúng.

### 2.2.4. Điều kiện biên và tải trọng

Hình 6 thể hiện mô hình hóa tải trọng và điều kiện biên của cấu kiện CFDST chịu uốn. Các tấm thép được sử dụng tại vị trí gối tựa và vị trí truyền tải trọng để tránh việc tập trung ứng suất gây phá hủy cục bộ cấu kiện. Tải trọng được gán tại các điểm ở giữa mặt trên của tấm thép truyền tải trọng. Trong khi đó, một đầu của cấu kiện CFDST được khai báo như gối tựa cố định (hạn chế chuyển vị tịnh tiến theo ba phương) và đầu còn lại được khai báo như gối tựa di động (chỉ hạn chế chuyển vị thẳng đứng). Lưu ý rằng các điều kiện biên này được gán vào các điểm tham chiếu đặt tại mặt đáy ngoài của các tấm thép tại gối. Để gán tải trọng vào mô hình, chuyển vị được gán từng bước theo phương pháp kiểm soát chuyển vị cho đến khi kết cấu bị phá hủy như đã được đề cập trong tài liệu [15]. Chi tiết việc gán tải trọng và điều kiện biên được thể hiện trong hình 6.

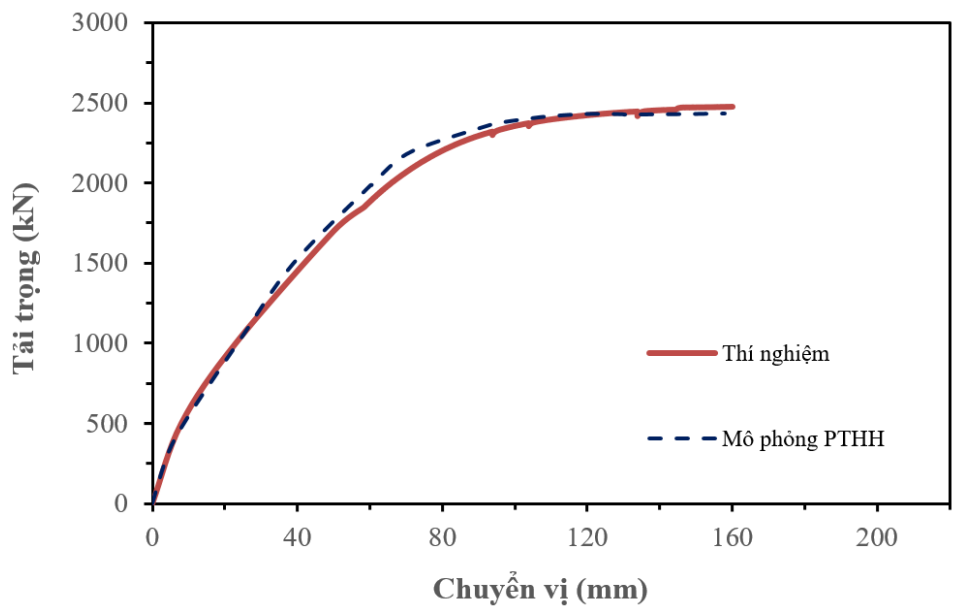


Hình 6. Chi tiết về khai báo tải trọng và điều kiện biên

3. Kiểm chứng mô hình

Để kiểm chứng độ chính xác của mô hình PTHH đã được xây dựng, kết quả thu được từ phân tích mô hình PTHH được so sánh với kết quả thí nghiệm của cấu kiện CFDST có hệ neo chống cắt dạng đinh mũ M16 chịu uốn thuần túy [15]. Trong nghiên cứu

này, các thông số so sánh bao gồm: Tải trọng cực hạn và đường cong tải trọng - chuyển vị giữa nhịp cấu kiện được sử dụng để so sánh giữa thí nghiệm và mô phỏng. Hình 7 thể hiện sự so sánh giữa đường cong tải trọng - chuyển vị thu được từ mô hình PTHH và thí nghiệm.



Hình 7. So sánh kết quả của đường quan hệ lực – chuyển vị giữa mô hình PTHH và thí nghiệm

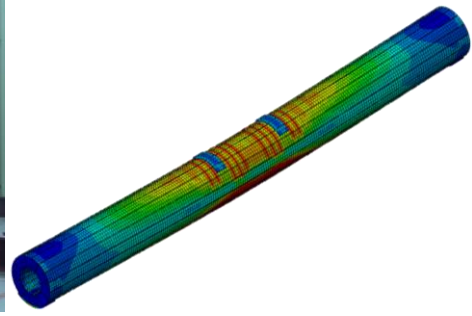
Bảng 1. So sánh khả năng chịu lực của cấu kiện thu được từ phân tích PTHH và thí nghiệm

Mẫu	Thí nghiệm $P_{uEXP}$ (kN)	PTHH $P_{uFEA}$ (kN)	$\frac{P_{uFEA}}{P_{uEXP}}$
CM-WJ	2444	2429.67	0.994

Có thể thấy rằng đường cong tải trọng-chuyển vị thu được từ mô hình PTHH rất phù hợp và gần với đường cong thu được từ thí nghiệm. Thông qua bảng 1, ta có thể thấy rằng sự khác biệt giữa tải trọng cực hạn thu được từ mô hình PTHH và thí nghiệm là rất nhỏ. Thêm vào đó, dạng phá hủy của

cấu kiện thu được từ mô hình PTHH và thí nghiệm cũng được trình bày trong hình 8. Với các kết quả so sánh ở trên, có thể kết luận rằng mô hình PTHH được xây dựng trong nghiên cứu này là đáng tin cậy và phản ánh chính xác ứng xử chịu uốn của cấu kiện CFDST có hệ neo chống cắt.





a) Thí nghiệm

b) Mô hình PTHH

Hình 8. Dạng phá hủy của cấu kiện

**4. Ảnh hưởng của các tham số hình học đến ứng xử của cấu kiện CFDST**

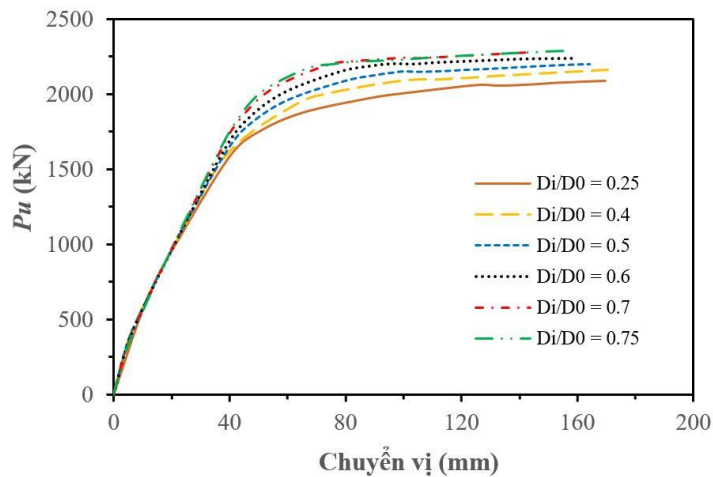
Trong mục này, ảnh hưởng của các tham số hình học bao gồm tỷ số độ mảnh của ống thép ngoài ( $D_o/t_o$ ), tỷ số độ mảnh của ống thép trong ( $D_i/t_i$ ), tỷ số đường kính của ống thép trong/ống thép ngoài ( $D_i/D_o$ ), đến ứng xử chịu uốn của cấu kiện CFDST có hệ neo chống cắt sẽ được nghiên cứu.

**4.1 Ảnh hưởng của tỷ số  $D_i/D_o$**

Để đánh giá ảnh hưởng của tỷ số  $D_i/D_o$  đến ứng xử chịu uốn của cấu kiện CFDST, mô hình PTHH được phân tích với các trường hợp có tỷ số  $D_i/D_o$  thay đổi từ 0.25 (mẫu HR-1) đến 0.75 (mẫu HR-6). Tỷ số  $D_i/D_o$  được thay đổi trong phạm vi khảo sát trên nhưng không làm thay đổi kích thước tổng thể

của cấu kiện CFDST bằng cách giữ đường kính ngoài của ống thép  $D_o$  cố định, trong khi đó đường kính trong của ống thép  $D_i$  được thay đổi. Kết quả phân tích mô hình PTHH ứng với các trường hợp này được thể hiện trên hình 9 và bảng 2.

Bảng 2 cho thấy khi tỷ số  $D_i/D_o$  tăng từ 0.25 đến 0.70, khả năng chịu lực của cấu kiện CFDST cũng tăng lên tương ứng. Khi tỷ số này lớn hơn 0.7 thì khả năng chịu lực của cấu kiện tăng lên không đáng kể. Việc tỷ số  $D_i/D_o$  tăng dẫn đến giảm đáng kể trọng lượng của nó. Cụ thể, việc tăng tỷ số  $D_i/D_o$  từ 0.25 lên 0.7 dẫn đến giảm 36% trọng lượng của cấu kiện. Điều này cho thấy, việc sử dụng cấu kiện ống thép hai lớp là hiệu quả hơn đáng kể so với cấu kiện ống thép nhồi bê tông truyền thống.



Hình 9. Ứng xử của cấu kiện CFDST tương ứng với các tỷ số  $D_i/D_o$

Bảng 2. Ảnh hưởng của tỷ số  $D_i/D_o$  đến khả năng chịu lực của cấu kiện CFDST

Mẫu	$D_o \times t_o$ (mm)	$D_i \times t_i$ (mm)	$D_i/D_o$ ratio	$f'_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$P_u$ (kN)	Độ tăng (%)
HR-1	898.4 x 8.984	224.60 x 6.23	0.25	40	380	460	2101.53	
HR-2	898.4 x 8.984	359.36 x 6.23	0.40	40	380	460	2161.03	2.83
HR-3	898.4 x 8.984	449.20 x 6.23	0.50	40	380	460	2200.72	4.72
HR-4	898.4 x 8.984	539.04 x 6.23	0.60	40	380	460	2240.73	6.62
HR-5	898.4 x 8.984	628.88 x 6.23	0.70	40	380	460	2279.53	8.47
HR-6	898.4 x 8.984	673.80 x 6.23	0.75	40	380	460	2290.86	9.01

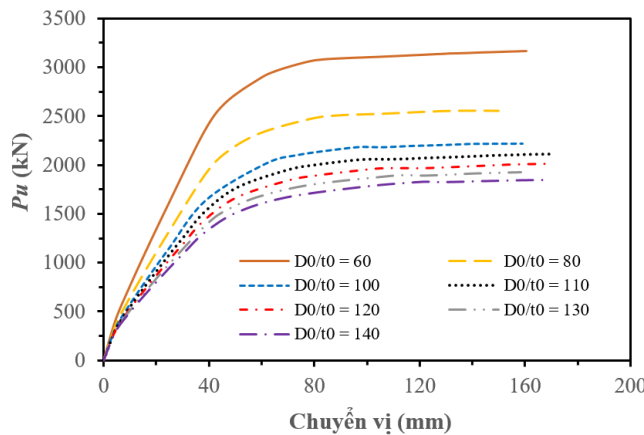
**4.2 Ảnh hưởng của tỷ số  $D_o/t_o$**

Ảnh hưởng của tỷ số  $D_o/t_o$  được khảo sát bằng cách thay đổi chiều dày của ống thép ngoài trong khi cố định đường kính của nó để

thay đổi tỷ số  $D_o/t_o$  trong phạm vi từ 60 (mẫu OTR-1) đến 140 (mẫu OTR-7). Kết quả thu được từ mô phỏng được thể hiện trong bảng 3 và hình 10.

**Bảng 3.** Ảnh hưởng của tỷ số  $D_o/t_o$  đến khả năng chịu lực của cấu kiện CFDST

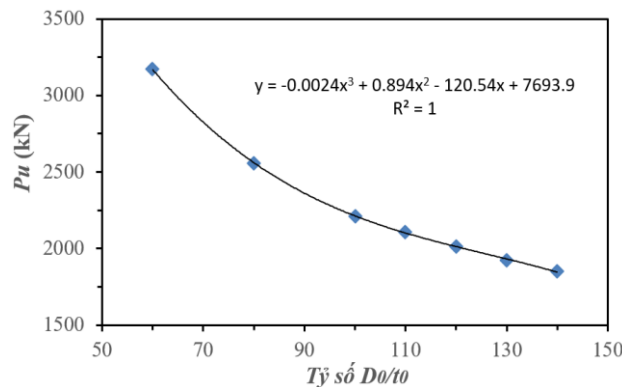
Mẫu	$D_o \times t_o$ (mm)	$D_i \times t_i$ (mm)	Tỷ số $D_o/t_o$	$f_c'$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$P_u$ (kN)	Độ giảm (%)
OTR-1	898.4 x 14.973	498.40 x 6.23	60	40	380	460	3169.84	
OTR-2	898.4 x 11.230	498.40 x 6.23	80	40	380	460	2558.00	19.30
OTR-3	898.4 x 8.984	498.40 x 6.23	100	40	380	460	2212.56	30.20
OTR-4	898.4 x 8.167	498.40 x 6.23	110	40	380 <td 460	2107.70	33.51	
OTR-5	898.4 x 7.487	498.40 x 6.23	120	40	380	460	2015.34	36.42
OTR-6	898.4 x 6.911	498.40 x 6.23	130	40	380	460	1922.44	39.35
OTR-7	898.4 x 6.417	498.40 x 6.23	140	40	380	460	1850.51	41.62



**Hình 10.** Ứng xử của cấu kiện CFDST tương ứng với các tỷ số  $D_o/t_o$

Có thể nhận thấy rõ từ hình 10 rằng độ cứng ban đầu của cấu kiện bị giảm đáng kể khi mà tỷ số  $D_o/t_o$  tăng lên. Ngoài ra kết quả từ bảng 3 cho thấy khả năng chịu lực cực hạn của cấu kiện cũng bị giảm đáng kể khi mà tỷ số này được gia tăng. Cụ thể là, khi tỷ số  $D_o/t_o$  tăng từ 60 lên 80, 100, 110, 120, 130 và 140, khả

năng chịu lực của cấu kiện bị giảm tương ứng là 19.30%, 30.20%, 33.51%, 36.42%, 39.35% và 41.62%. Quan hệ giữa khả năng chịu lực và tỷ số  $D_o/t_o$  được thể hiện trên hình 11, trong đó khả năng chịu lực của cấu kiện biến thiên tỷ lệ nghịch với tỷ số  $D_o/t_o$  theo hàm đa thức bậc 3 trong phạm vi khảo sát.



**Hình 11.** Quan hệ giữa khả năng chịu lực của cấu kiện CFDST tương ứng với các tỷ số  $D_o/t_o$

**4.3 Ảnh hưởng của tỷ số  $D_i/t_i$**

Kết quả khảo sát ảnh hưởng của tỷ số  $D_i/t_i$  được thể hiện trong hình 12 và bảng 4. Tỷ số  $D_i/t_i$  được

thay đổi bằng cách cho chiều dày của ống thép trong được thay đổi trong khi đường kính trong của nó được giữ cố định. Tỷ số này được khảo sát trong

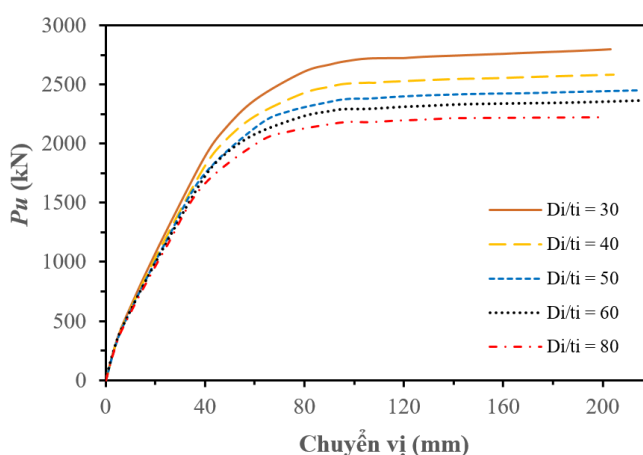
## KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

phạm vi từ 30 (mẫu ITR-1) đến 80 (mẫu ITR-5). Hình 12 cho thấy, độ cứng ban đầu của cầu kiện bị giảm nhẹ trong khi khả năng chịu lực của cầu kiện lại giảm đáng kể khi mà tỷ số  $D_i/t_i$  gia tăng. Có thể nhận thấy từ hình 13, khả năng chịu lực của cầu

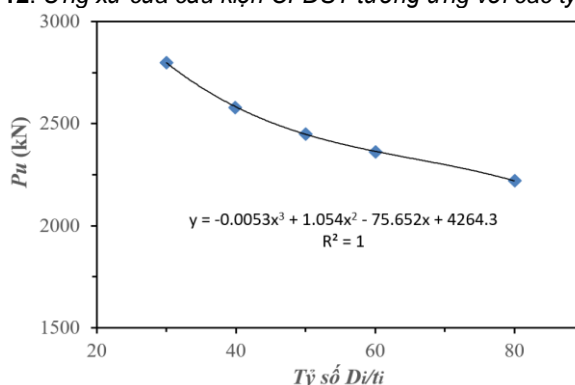
kiện giảm tương ứng với độ tăng của tỷ số  $D_i/t_i$  theo hàm đa thức bậc 3 trong phạm vi khảo sát. Điều này rất có ý nghĩa khi giúp người thiết kế có thể dễ dàng dự đoán được khả năng chịu lực của cầu kiện CFDST khi thay đổi tỷ số  $D_i/t_i$  của nó.

**Bảng 4.** Ảnh hưởng của tỷ số  $D_i/t_i$  đến khả năng chịu lực của cầu kiện CFDST

Mẫu	$D_o \times t_o$ (mm)	$D_i \times t_i$ (mm)	Tỷ số $D_i/t_i$	$f_c'$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$P_u$ (kN)	Độ giảm (%)
ITR-1	898.4 x 8.984	498.40 x 16.613	30	40	380	460	2799.50	
ITR-2	898.4 x 8.984	498.40 x 12.460	40	40	380	460	2580.35	7.83
ITR-3	898.4 x 8.984	498.40 x 9.968	50	40	380	460	2450.98	12.45
ITR-4	898.4 x 8.984	498.40 x 8.307	60	40	380	460	2363.18	15.59
ITR-5	898.4 x 8.984	498.40 x 6.230	80	40	380	460	2220.00	20.70



**Hình 12.** Ứng xử của cầu kiện CFDST tương ứng với các tỷ số  $D_i/t_i$



**Hình 13.** Quan hệ giữa khả năng chịu lực của cầu kiện CFDST tương ứng với các tỷ số  $D_i/t_i$

### 5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, mô hình PTHH của cầu kiện CFDST chịu uốn đã được xây dựng và phân tích bằng phần mềm ABAQUS. Độ chính xác của mô hình đã được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả của mô hình với kết quả của thí nghiệm. Ảnh hưởng của các tham số hình học đến ứng xử của cầu kiện này bao gồm tỷ số  $D_i/D_o$ ,  $D_o/t_o$ , và  $D_i/t_i$  đã được khảo sát. Dựa vào các kết quả phân tích ở trên, rút ra một số kết luận như sau:

- Việc tăng tỷ số lỗ rỗng  $D_i/D_o$  dẫn đến sự gia tăng khả năng chịu lực của cầu kiện khi chịu uốn và

do đó giảm đáng kể trọng lượng bản thân của cầu kiện. Cụ thể, việc tăng tỷ số  $D_i/D_o$  từ 0.25 lên 0.7 dẫn đến giảm 36% trọng lượng của cầu kiện;

- Việc sử dụng các ống thép ngoài có chiều dày mỏng hơn dẫn đến giảm độ cứng ban đầu và đồng thời giảm đáng kể khả năng chịu lực của cầu kiện. Cụ thể là khi tỷ số  $D_o/t_o$  tăng từ 60 lên 80, 100, 110, 120, 130, và 140, khả năng chịu lực của cầu kiện bị giảm tương ứng là 19.30%, 30.20%, 33.51%, 36.42%, 39.35% và 41.62%;

- Tỷ số độ mảnh của ống thép trong chỉ ảnh hưởng nhỏ đến độ cứng ban đầu của cầu kiện



nhưng ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu lực của nó. Khả năng chịu lực của cấu kiện giảm gần tuyến tính tương ứng với độ tăng của tỷ số độ mảnh của ống thép trong.

Cấu kiện CFDST có neo chống cắt dạng đinh mũ chỉ mới được phát triển trong thời gian gần đây, do đó các nghiên cứu về loại cấu kiện này còn khá hạn chế. Trong các nghiên cứu tiếp theo, tác giả sẽ tiến hành tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của neo bao gồm đường kính neo, khoảng cách neo trên phương dọc và trên mặt cắt ngang của cấu kiện đến khả năng chịu lực của nó đồng thời đánh giá độ chính xác của các công thức trong tiêu chuẩn hiện hành (Eurocode 4, AISC...) cho loại cấu kiện này.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Z. Tao, and L.-H. Han (2006), "Behaviour of concrete-filled double skin rectangular steel tubular beam-columns", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, pp. 16.
2. Z. Tao, L.-H. Han, and X.-L. Zhao (2004), "Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-column", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, pp. 30.
3. L.-H. Han, H. Huang, Z. Tao et al. (2006), "Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns subjected to cyclic bending", *Engineering structures*, vol. 28, no. 12, pp. 1698-1714.
4. L.-H. Han, Z. Tao, F.-Y. Liao et al. (2010), "Tests on cyclic performance of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns", *Thin-Walled Structures*, vol. 48, no. 6, pp. 430-439.
5. L.-H. Han, Y.-J. Li, and F.-Y. Liao (2011), "Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns subjected to long-term sustained loading", *Thin-walled structures*, vol. 49, no. 12, pp. 1534-1543.
6. M. Pagoulatou, T. Sheehan, X. Dai et al. (2014), "Finite element analysis on the capacity of circular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) stub columns", *Engineering Structures*, vol. 72, pp. 102-112.
7. "Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings", *EN 1994-1-1*, European Committee for Standardization, 2004.
8. H. Huang, L.-H. Han, Z. Tao et al. (2010), "Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, no. 4, pp. 542-555.
9. Uenaka, K. (2008). Concrete filled double skin tubular members subjected to bending. *Steel and Composite Structures*, Techno-Press, 8(4): 297-312.
10. Shimizu, M. et al. (2013). Experimental study on ultimate strength of concrete filled double tubular steel with shear connector. *International Journal of Steel Structures*, Springer, 13(1): 49-54.
11. Zhao, Z., L. et al. (2016). Behavior of Large-scale hybrid FRP-concrete-steel double skin tubular beams with shear connectors. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 1-11.
12. Chen, J. et al. (2016). Behavior of thin-walled dodecagonal section double skin concrete-filled steel tubes under bending. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 98: 293-300.
13. Việt, V. Q., Hùng, T. V., & Hoàn, P. T. (2019). Nghiên cứu khả năng chịu uốn của ống tròn hai lớp thép nhồi bê tông có liên kết mối nối bằng mô phỏng phần tử hữu hạn. *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCNXD) - ĐHXD 2019*, 13(4V), 115-128.
14. Vu Quang Viet, Hoang Ha, Pham Thai Hoan, "Evaluation of Ultimate Bending Moment of Circular Concrete - Filled Double Skin Steel Tubes using Finite Element Analysis". *Journal of Science and Technology in Civil Engineering NUCE 2019*. 13 (1): 21-32.
15. S. S. Eom, Q.V. Vu, J. H. Choi, H. H. Park, S. E. Kim, "Flexural behavior of concrete-filled double skin steel tubes with a joint", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 155, pp. 260-272, 2019.
16. ABAQUS, "Analysis User's Manual version 6.14", Dassault Systems, 2014.
17. ENV 1992-1-1, "Eurocode 2: Design of concrete structures, part 1: General rules and rules for buildings", CEN, 1992.
18. S. E. Kim, and H. T. Nguyen, "Evaluation of the connection efficiency of hybrid steel-concrete girder using finite element approach", *International Journal of Mechanical Sciences*, no. 61, pp. 8 - 23, 2012.
19. H. T. Nguyen, and S. E. Kim, "Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, pp. 1909-1920, 2009.
20. X. Liu, M. A. Bradford, Q. J. Chen et al., "Finite element modelling of steel - concrete composite beams with high-strength friction-grip bolt shear connectors", *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 108, pp. 54-65, 2016.
21. J. Lee, and G. L. Fennes, "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures", *Journal of engineering mechanics*. ASCE, vol. 124, no. 8, pp. 9, 1998.

**Ngày nhận bài:** 27/11/2019.

**Ngày nhận bài sửa lần cuối:** 06/02/2020.