

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

Vũ Quang Việt^a, Trương Việt Hùng^b, Phạm Thái Hoàn^{c,*}

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Hàng Hải, số 484 đường Lạch Tray, quận Lê Chân, Hải Phòng, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng, Trường Đại học Thủy Lợi, số 175 Tây Sơn, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Xây dựng dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng, số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 16/08/2019, Sửa xong 07/09/2019, Chấp nhận đăng 08/09/2019

Tóm tắt

Bài báo sử dụng phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn (PTHH) để nghiên cứu khả năng chịu uốn của cầu kiện ống tròn hai lớp thép nhồi bê tông (Concrete-Filled Double skin Steel Tubes-CFDST) có mối nối ở giữa dùng để liên kết các cầu kiện có kích thước lớn ngoài khả năng vận chuyển. Mô hình mô phỏng PTHH của thí nghiệm uốn 4 điểm trên cầu kiện CFDST có mối nối được xây dựng bằng phần mềm ABAQUS và được chứng minh là đúng bằng cách so sánh với thí nghiệm. Mô hình PTHH được dùng để đánh giá khả năng chịu uốn của cầu kiện CFDST có liên kết mối nối dưới sự thay đổi của cường độ thép ống cũng như cường độ chịu nén của bê tông nhồi trong ống. Từ đó, mối liên hệ giữa khả năng chịu uốn của cầu kiện với sự thay đổi cường độ thép ống cũng như cường độ chịu nén của bê tông nhồi được đề xuất.

Từ khoá: khả năng chịu uốn; ống hai lớp thép nhồi bê tông; liên kết mối nối; phần tử hữu hạn; ABAQUS.

INVESTIGATION OF ULTIMATE BENDING MOMENT OF CIRCULAR CONCRETE-FILLED DOUBLE SKIN STEEL TUBES WITH JOINT CONNECTION USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

Abstract

The ultimate bending moment of circular concrete-filled double skin steel tubes (CFDSTs) with joint connection, which is necessary to connect the bulky CFDSTs at the site to overcome the transportation constraints, was investigated using finite element (FE) method in this study. A finite element simulation of a four-point bending test on the CFDST with a joint connection was developed using ABAQUS and was verified by comparing with the experiment. The FE simulation then was used to evaluate the ultimate bending moment of CFDST with joint connection with respect to different yield strengths of the steel tubes and concrete infill compressive strengths. Thus, the relationship between ultimate bending moment of CFDST with joint connection and yield strengths of the steel tubes as well as concrete infill compressive strengths was established.

Keywords: ultimate bending moment; concrete-filled double skin tube; joint connection; finite element analysis; ABAQUS.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(4V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(4V)-11) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Cầu kiện ống thép nhồi bê tông (Concrete-Filled Steel Tubes - CFST) đã được sử dụng rộng rãi trong vài thập kỷ qua do nhiều ưu điểm vượt trội so với kết cấu chỉ có ống thép hoặc bê tông cốt thép.

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: hoanpt@nuce.edu.vn (Hoàn, P. T.)

Trong khi ống thép rỗng bọc ngoài đóng vai trò là ván khuôn đồng thời góp phần chịu lực cùng bê tông, thì việc đổ nhồi bê tông trong ống thép giúp loại bỏ hoặc làm chậm tiến trình mất ổn định cục bộ của ống thép rỗng cũng như làm tăng đáng kể độ dẻo của tiết diện. Việc sử dụng kết cấu CFST trong xây dựng đã được chứng minh có hiệu quả kinh tế về vật liệu cũng như đẩy nhanh tiến độ thi công qua đó giúp tiết kiệm đáng kể các chi phí liên quan trong quá trình xây dựng [1].

Gần đây ống hai lớp thép nhồi bê tông (Concrete-Filled Double skin Steel Tubes - CFDST), cấu kiện không những có đầy đủ các ưu điểm của ống thép nhồi bê tông mà còn bổ sung các nhược điểm của CFST, đã được phát triển rộng rãi. Tiết diện ngang của cấu kiện CFDST bao gồm hai ống thép, một ống bên ngoài và một ống bên trong, với bê tông được nhồi giữa các ống. Các ưu điểm vượt trội của cấu kiện CFDST so với CFST có thể kể đến như: mô đun tiết diện tăng làm tăng cường tính ổn định; trọng lượng nhẹ hơn so với cấu kiện CFST cùng tiết diện; đặc tính nhót và hiệu suất chịu tải trọng lặp tốt hơn. Các cột bằng CFDST có thể có thời gian chống cháy cao hơn các cột CFST do các ống bên trong của cột được bảo vệ bởi bê tông kẹp trong đám cháy. Do đó, cấu kiện ống hai lớp thép nhồi bê tông được kỳ vọng có tiềm năng lớn sử dụng trong các kết cấu xây dựng dân dụng. Hơn nữa, không gian trong ống bên trong có thể được sử dụng cho các mục đích khác như không gian cho hệ thống kỹ thuật, cáp điện, ... Vì những ưu điểm vượt trội nêu trên, các nghiên cứu liên quan đến cấu kiện CFDST đã và đang được tiến hành rộng rãi. Có thể kể đến các nghiên cứu thực nghiệm về dầm, cột và dầm - cột làm bằng CFDST với các dạng tiết diện ngang khác nhau được thực hiện bởi Tao và Han [2]. Tao và cs. [3] cũng đã thực hiện một loạt các thí nghiệm nghiên cứu ứng xử của kết cấu cột và cột-dầm bằng CFDST chịu tải trọng nén. Các nghiên cứu bằng thực nghiệm và phân tích về CFDST chịu tải trọng tuần hoàn và dài hạn được thực hiện bởi Han [4, 5]. Wang [6] và Huang [7] cũng tiến hành các thí nghiệm để kiểm tra ứng xử của cấu kiện CFDST dưới tải trọng va chạm và tải trọng xoắn. Liên quan đến các nghiên cứu sử dụng giải tích, Pagoulatou [8] đã tìm hiểu ứng xử của các cột dùng CFDST dưới tải trọng nén dọc trục đồng tâm và sau đó đề xuất biểu thức mới để đánh giá khả năng chịu lực của cột CFDST tương thích với đề xuất trong tiêu chuẩn EC4 [9]. Ngoài ra sử dụng phân tích phần tử hữu hạn (PTHH) cũng được sử dụng nhiều để nghiên cứu về cấu kiện CFDST trong đó đáng chú ý có nghiên cứu của Huang [10] về ảnh hưởng của các tham số quan trọng được sử dụng để xác định khả năng chịu lực của mặt cắt ngang của cấu kiện cột CFDST hay nghiên cứu của Việt và cs. [11] về ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông nhồi và cường độ của ống thép đến khả năng chịu uốn của cấu kiện CFDST.

Các nghiên cứu liên quan đến cấu kiện CFDST đã và đang được thực hiện tương đối rộng rãi và đầy đủ, tuy nhiên thực tế sử dụng loại cấu kiện này vào các công trình xây dựng vẫn đang còn những trở ngại nhất định. Cấu kiện CFDST thường sử dụng trong các công trình chịu tải trọng rất lớn, do điều kiện vận chuyển thông thường các cấu kiện này thường được ghép nối tại hiện trường. Không giống như cấu kiện CFST mà việc ghép nối, liên kết có thể được tiến hành dễ dàng bằng cách hàn các ống thép ngoài lại với nhau, ghép nối các cấu kiện CFDST thông qua liên kết hàn là một thách thức đáng kể vì các ống thép trong không thể hàn được với nhau. Do đó việc nghiên cứu các dạng mối nối liên kết giữa các cấu kiện CFDST vừa giúp việc ghép nối cấu kiện dễ dàng vừa đảm bảo chịu lực là rất cần thiết.

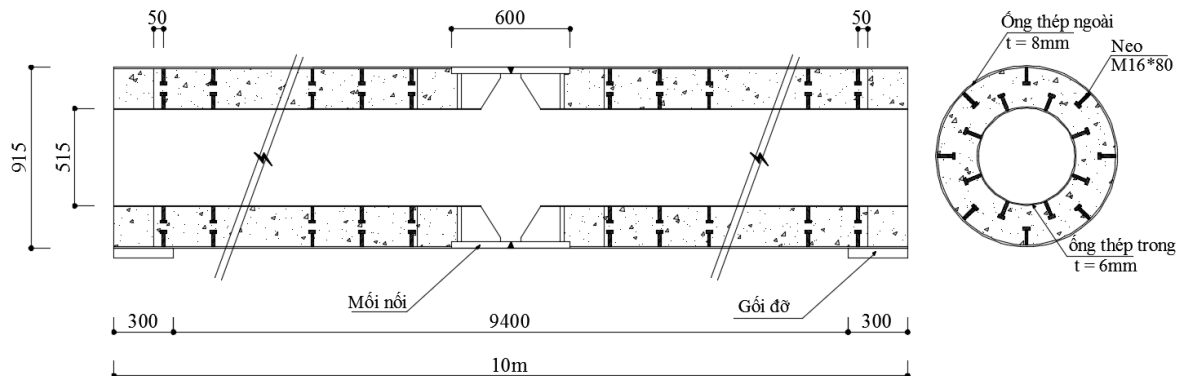
Bài báo sử dụng phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn (PTHH) để nghiên cứu khả năng chịu uốn của cấu kiện ống tròn hai lớp thép nhồi bê tông có mối nối ở giữa dầm để liên kết các cấu kiện có kích thước lớn ngoài khả năng vận chuyển. Mô hình mô phỏng PTHH của thí nghiệm uốn 4 điểm trên cấu kiện CFDST với kích thước thực tế có liên kết mối nối ở giữa được xây dựng bằng phần mềm ABAQUS. Thí nghiệm chịu uốn 4 điểm trên cấu kiện CFDST với loại mối nối mới được đề xuất và thực hiện bởi nhóm tác giả được sử dụng để chứng tỏ mô hình PTHH có thể mô phỏng tương đối

chính xác sự làm việc chịu uốn của loại cầu kiện này. Từ đó, mô hình PTHH được dùng để nghiên cứu khả năng chịu uốn của cầu kiện CFDST có liên kết mối nối.

2. Thí nghiệm cầu kiện CFDST có mối nối chịu uốn

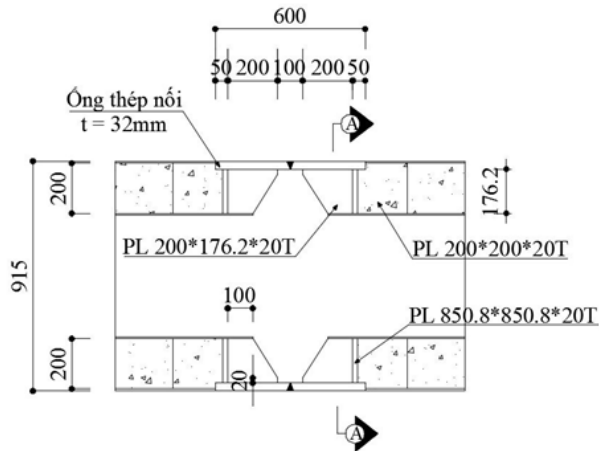
2.1. Thiết kế cầu kiện CFDST có mối nối

Hình 1 thể hiện mặt cắt dọc và ngang của cầu kiện ống hai lớp thép nhồi bê tông với mối nối ở giữa được sử dụng trong nghiên cứu này. Cầu kiện CFDST có tổng chiều dài 10 m được tạo thành bằng việc nối hai cầu kiện riêng biệt cấu tạo giống nhau có chiều dài 5 m. Mỗi cầu kiện CFDST bao gồm các ống thép bên ngoài đường kính 915 mm, độ dày 8 mm và ống thép trong đường kính 515 mm, độ dày 6 mm cùng lớp bê tông dày 200 mm được lấp đầy vào khoảng trống giữa các ống thép trong và ngoài. Hệ thống liên kết chống cắt và trượt bằng đinh tán M16 được thiết kế và sử dụng để tạo nên tác động tổng hợp giữa các ống bê tông và thép. Trên mặt cắt ngang của cầu kiện CFDST, mười sáu đinh tán được hàn giữa các ống thép bên trong và bên ngoài, trong khi dọc theo mặt cắt dọc của các ống, các đinh tán được đặt cách nhau 250 mm. Ở mỗi đầu cầu kiện CFDST dài 5 m có thiết kế hệ ống thép tròn đường kính ngoài giống với ống thép ngoài của cầu kiện CFDST, tức 915 mm, chiều dày 32 mm kết hợp hệ sườn thép bản dày 20 mm nhằm mục đích đảm bảo truyền lực giữa hai đoạn ống CFDST dài 5 m cũng như giúp cho việc liên kết hai đoạn ống ngoài hiện trường được thực hiện dễ dàng, tức chỉ cần hàn xung quanh hai ống thép dày 32 mm ở vùng nối. Thiết kế của CFDST bao gồm hệ liên kết chống cắt và trượt M16 tuân thủ và phù hợp với yêu cầu của tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép [9]. Hình 2 thể hiện chi tiết mối nối giữa hai ống CFDST được thiết kế và chế tạo tuân thủ yêu cầu và chỉ dẫn theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD [12], cụ thể theo các bước sau: (i) lựa chọn đường kính (ở đây là 915 mm) và vật liệu của ống thép dùng làm mối nối; (ii) tính toán khả năng chịu uốn (mô men dẻo) của tiết diện ống CFDST ở vùng không có mối nối; (iii) lựa chọn chiều dày của ống thép dùng làm mối nối (ở đây là 32 mm) để đảm bảo điều kiện khả năng chịu uốn của tiết diện tại mối nối (mô men dẻo) lớn hơn của tiết diện ống CFDST tại vùng không có mối nối. Chi tiết thiết kế mối nối có thể tham khảo tại [13].



Hình 1. Mặt cắt dọc và ngang của cầu kiện CFDST có mối nối

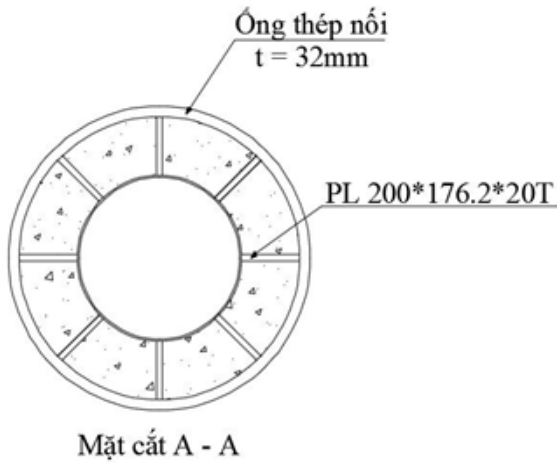
Vật liệu sử dụng cho cầu kiện CFDST được thí nghiệm mẫu để xác định cường độ chịu nén của bê tông và cường độ chịu kéo của các ống thép. Bảng 1 thể hiện tính chất vật liệu của các bê tông và thép ống thu được từ các thí nghiệm mẫu trong đó cường độ chảy dẻo của thép được xác định tuân thủ tiêu chuẩn Hàn Quốc KS D 3515:2014 [14] còn cường độ chịu nén của mẫu thử bê tông hình trụ ở



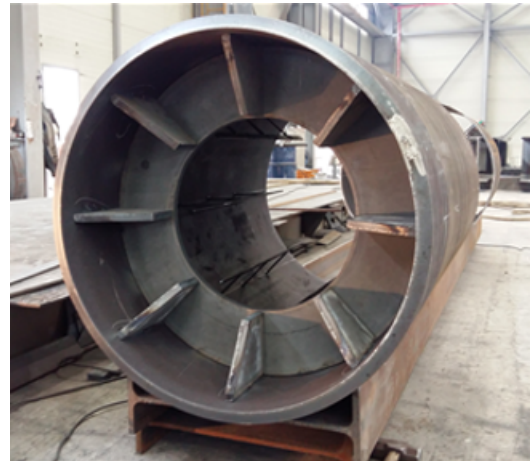
(a) Mặt cắt dọc mối nối



(b) Hình ảnh mối nối phía trong ống



(c) Mặt cắt ngang tại mối nối



(d) Chế tạo mối nối

Hình 2. Chi tiết mối nối liên kết giữa hai đoạn CFDST

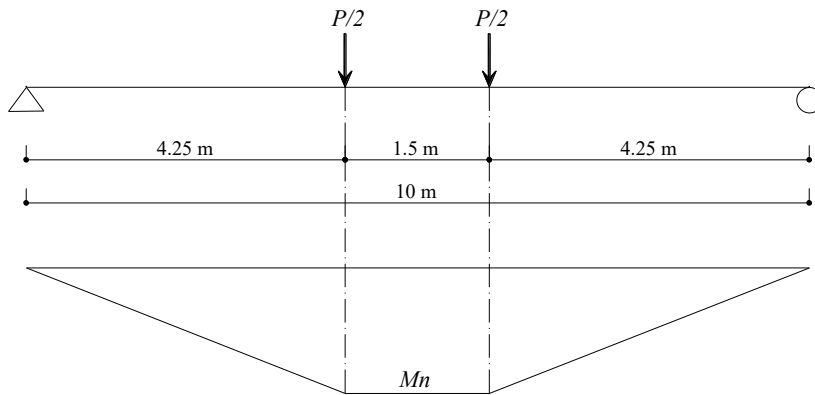
Bảng 1. Tính chất vật liệu thép ống và bê tông sử dụng trong cấu kiện CFDST

Vật liệu	Giới hạn chảy dẻo F_y (MPa)	Giới hạn bền F_u (MPa)	Cường độ chịu nén f'_c (MPa)	Mô đun đàn hồi E (MPa)
Ống thép ngoài (8 mm)	486,5	533,9	-	205000
Ống thép trong (6 mm)	467,6	517,8	-	205000
Ống thép nối (32 mm)	377, 0	536,0	-	205000
Bê tông	-	-	48,9	-

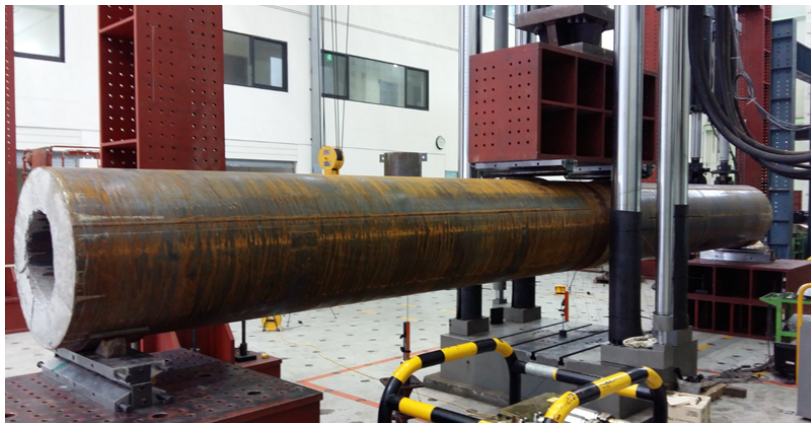
tuổi 28 ngày được xác định tuân thủ tiêu chuẩn Hàn Quốc KS F 2405 [15] do các vật liệu và cấu kiện được sản xuất, chế tạo và thí nghiệm tại Hàn Quốc.

2.2. Thí nghiệm và kết quả

Thí nghiệm uốn bốn điểm (2 điểm đặt lực và 2 gối tựa) được thực hiện để đánh giá khả năng chịu mô men uốn giới hạn của cầu kiện CFDST có mối nối được thiết kế ở trên. Mẫu thử được kiểm tra bằng kích thủy lực có khả năng gia tải đến 5000 kN. Vị trí gia tải lên cầu kiện đặt tại hai điểm cách trung tâm cầu kiện CFDST 750 mm ở cả hai bên. Để tránh ứng suất tập trung tại điểm đặt tải và các gối tựa, các miếng đệm bằng thép bản có cùng độ dày 25 mm được đệm tại các vị trí đặt lực và gối tựa. Ba dụng cụ đo chuyển vị (LVDT) 100 mm được đặt dọc theo đáy của mẫu thử trong một đoạn uốn thuần túy để đo chuyển vị dọc giữa nhịp của ống. Hai gối tựa được thiết kế và lắp dựng để cầu kiện CFDST làm việc đúng như mô hình thí nghiệm mong muốn, tức 1 đầu khớp cố định, một đầu khớp di động. Hình 3(a) minh họa sơ đồ thí nghiệm bao gồm điều kiện biên và điểm đặt lực, trong khi đó Hình 3(b) thể hiện toàn bộ hình ảnh của mẫu và lắp đặt thí nghiệm trong quá trình thực hiện.



(a) Sơ đồ thí nghiệm



(b) Lắp dựng thí nghiệm

Hình 3. Thiết lập thí nghiệm cầu kiện CFDST có mối nối

Thí nghiệm uốn được thực hiện bằng cách dùng kích thủy lực gia tải tại hai điểm đặt lực với chuyển vị tại giữa nhịp cầu kiện được kiểm soát với vận tốc 2 mm/phút khi cầu kiện làm việc trong vùng đàn hồi và 4 mm/phút khi cầu kiện làm việc trong vùng chảy dẻo cho đến khi cầu kiện bị phá hoại. Tải trọng P áp dụng và chuyển vị thẳng đứng ở giữa nhịp cầu kiện CFDST tức tại vị trí mối nối được đo trong quá trình thí nghiệm và mô men uốn tương ứng M tại tiết diện giữa nhịp được tính

toán dựa trên sơ đồ tải trong Hình 3(a), như sau:

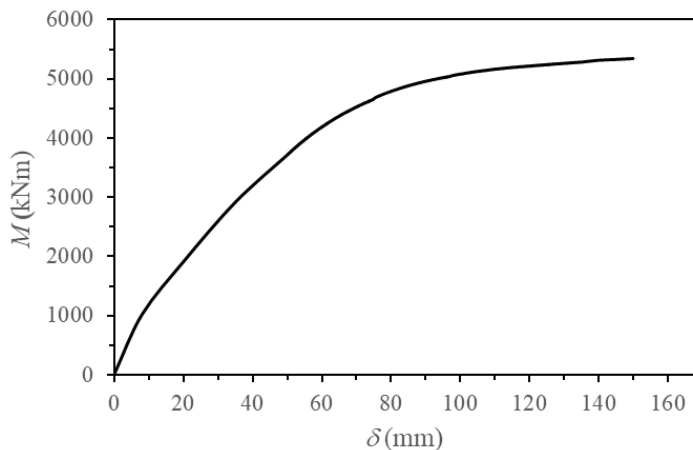
$$M = \frac{P}{2}l_1 + \frac{sw}{8}l_2^2 \quad (1)$$

trong đó $l_1 = 4,25$ m, $l_2 = 10$ m và $sw = 13,5$ kN/m là trọng lượng bản thân cầu kiện.

Hình 4 thể hiện hình ảnh mẫu CFDST có mỗi nối khi bị phá hoại và dạng phá hoại của cầu kiện. Có thể dễ dàng nhận thấy mẫu CFDST có mỗi nối bị phá hoại do sự mất ổn định cục bộ của ống thép ngoài tại giá trị tải trọng 2506 kN và vị trí phá hoại nằm ngoài mỗi nối. Hình 5 thể hiện đường cong quan hệ mô men uốn và chuyển vị theo phương thẳng đứng tại vị trí tiết diện giữa nhịp cầu kiện ($M - \delta$). Cần lưu ý là mô men uốn tại tiết diện giữa nhịp được tính toán dựa trên tải trọng tác dụng P theo công thức (1), từ đó giá trị mô men giới hạn của cầu kiện CFDST có mỗi nối ở giữa tính toán được tại thời điểm phá hoại là $M_u = 5343$ kNm.



Hình 4. Mẫu CFDST có mỗi nối bị phá hoại

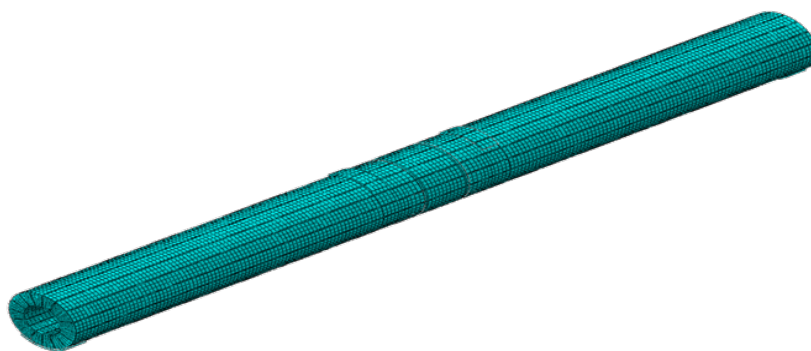


Hình 5. Đường cong quan hệ mô men uốn – chuyển vị ($M - \delta$)

3. Mô phỏng phần tử hữu hạn

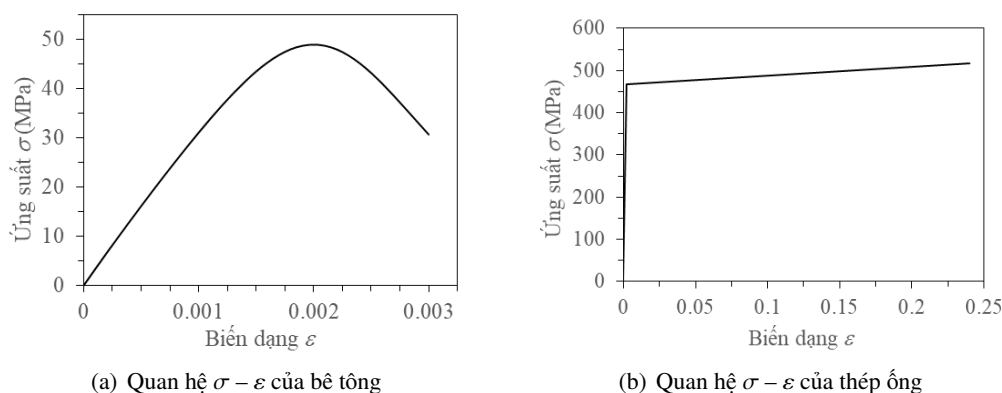
3.1. Mô hình

Nhằm mục đích khảo sát, đánh giá được khả năng chịu uốn của CFDST có mối nối cũng như kiểm tra khả năng chịu lực của mối nối được thiết kế mà không cần thực hiện các thí nghiệm tốn kém, mô hình PTHH được sử dụng. Phần mềm thương mại ABAQUS [16] được dùng để mô phỏng thí nghiệm uốn bốn điểm lên cấu kiện CFDST có mối nối được thực hiện trong nghiên cứu này. Đối với mô hình phần tử hữu hạn (PTHH), các phần tử khối 8 nút (C3D8R) được sử dụng để mô hình các cấu kiện ống thép, miếng thép đệm và bê tông nhồi trong CFDST, trong khi các phần tử thanh (T3D2) được sử dụng để mô hình hệ đỉnh tán chống cắt và trượt M16. Kích thước các phần tử cần được lựa chọn thích hợp nhằm mục đích vừa đảm bảo kết quả phân tích hội tụ đến kết quả chính xác trong thời gian ngắn nhất. Bằng cách thực hiện phân tích độ nhạy, kích thước phần tử hữu hạn được lựa chọn là 50 mm cho toàn bộ các cấu kiện của mô hình. Liên kết giữa các ống thép và bê tông nhồi được mô hình hóa bằng tùy chọn *CONTACT PAIR, đây là loại liên kết tiếp xúc bề mặt được định nghĩa và lập sẵn trong ABAQUS [16]. Để khai báo lựa chọn tiếp xúc này, hai loại bề mặt tiếp xúc với nhau được khai báo thành bề mặt chính (master surface) và bề mặt phụ thuộc (slave surface). Trong định nghĩa lựa chọn tiếp xúc trên thông thường bề mặt chính được gán cho vật liệu có độ cứng lớn hơn nhằm hạn chế các lỗi số học, do đó các ống thép được chỉ định làm bề mặt chính trong khi các mặt tiếp xúc của bê tông được đặt làm bề mặt phụ thuộc. Ứng xử giữa bề mặt chính và bề mặt phụ thuộc được khai báo là tiếp xúc cứng (hard contact) theo phương vuông góc và tiếp xúc ma sát (tangent contact) với hệ số ma sát trượt Coulomb giữa bê tông và thép ống là 0,1. Hệ liên kết chống cắt và trượt bằng đỉnh tán M16 được giả thiết là bám dính hoàn toàn vào bê tông và được mô phỏng bằng tùy chọn EMBEDDED. Ngoài ra, sự tiếp xúc giữa các miếng đệm và ống thép bên ngoài được mô hình hóa bằng cách sử dụng tùy chọn TIE. Liên kết hàn giữa các cấu kiện thép với nhau ở trong cấu kiện CFDST như mối nối, liên kết giữa ống thép và sườn thép bản, giữa M16 với ống thép trong và ngoài cũng được mô hình hóa bằng tùy chọn gắn chặt TIE. Tải trọng tác dụng được khai báo thành 1 hàng tải tập trung tại các ổ giữa trên cùng của các tấm thép tại vị trí đặt tải cách tiết diện chính giữa cấu kiện CFDST một đoạn 750 mm ở cả hai bên. Các điều kiện biên được gán vào các điểm giữa (điểm tham chiếu – reference point) của các tấm thép bản được đặt tại vị trí gối tựa, trong đó một gối tựa hạn chế toàn bộ chuyển vị thẳng theo cả 3 phương để tạo khớp cố định, một gối tựa chỉ hạn chế chuyển vị thẳng theo phương đứng để tạo khớp di động. Hình 6 thể hiện mô hình phần tử hữu hạn của toàn bộ cấu kiện CFDST có mối nối được mô phỏng trong ABAQUS.



Hình 6. Mô hình PTHH của cấu kiện CFDST có mối nối

Để có thể đạt được kết quả phân tích mô hình mô phỏng PTHH phản ánh đúng sự làm việc của cầu kiện, việc khai báo các mô hình vật liệu thể hiện đúng tính chất của vật liệu sử dụng trong mô hình mô phỏng là rất quan trọng. Trong nghiên cứu này, mô hình dẻo (plasticity model) được sử dụng để khai báo tính chất vật liệu cho các ống thép, tấm thép bản, đỉnh tán M16. Trong khi đó mô hình bê tông phá hoại dẻo (concrete damaged plasticity) được sử dụng để mô phỏng sự làm việc của bê tông. Mô hình bê tông phá hoại dẻo được đề xuất bởi Lubliner và cs. [17] và bởi Lee và Fenves [18] có thể mô hình hóa ứng xử phi tuyến ngoài vùng đàn hồi của bê tông và được lập trình sẵn trong ABAQUS. Hình 7 thể hiện các dạng đường cong quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu được sử dụng trong nghiên cứu này, trong đó các thông số vật liệu thu được từ các thí nghiệm mẫu như thể hiện trong Bảng 1. Đường cong quan hệ ứng suất nén – biến dạng của bê tông được xây dựng sử dụng mô hình bê tông của TSai [19], trong đó các thông số cần khai báo chưa thu được từ thí nghiệm mẫu như giá trị biến dạng chảy (ε_c), biến dạng bền (ε_{c1}) và mô đun đàn hồi (E) được lấy dựa trên cường độ chịu nén của mẫu bê tông dựa theo tiêu chuẩn EC2 [20] lần lượt là 0,002; 0,003 và 37 GPa. Hệ số Poisson được lấy là 0,2 đối với bê tông và 0,3 đối với thép, trong khi đó biến dạng bền của thép theo kết quả thí nghiệm mẫu là 0,24.

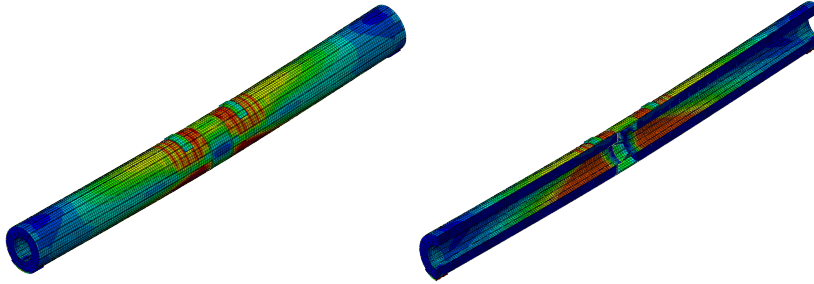


Hình 7. Mô hình vật liệu

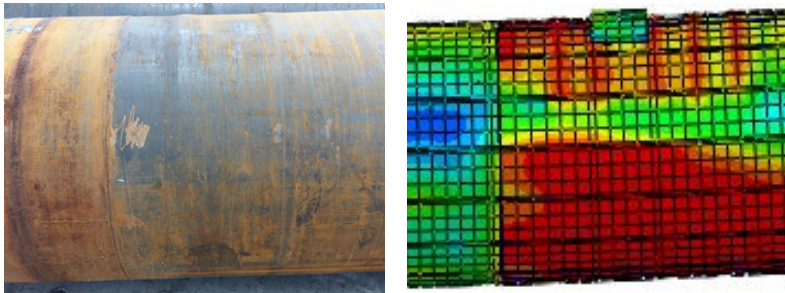
3.2. Phân tích PTHH và kết quả

Sau khi mô hình PTHH được xây dựng, lựa chọn phân tích STATIC, RISK trong ABAQUS được lựa chọn để phân tích sự làm việc chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối. Lựa chọn phân tích này cho phép tải trọng gán lên cầu kiện được tăng lên từng cấp theo từng bước phân tích cho đến khi kết cấu bị phá hoại, tại đó tải trọng phá hoại được xác định bằng tích số của hệ số gia tải và tải trọng khai báo. Trong quá trình phân tích PTHH, các kết quả phân tích tại các bước gia tải được lưu lại, do đó có thể quan sát được sự phân phối ứng suất trên toàn bộ cầu kiện CFDST cũng như thu được mối quan hệ giữa lực và chuyển vị tại bất kỳ nút nào của phần tử. Trên cơ sở đó mối quan hệ mômen uốn (thông qua lực tác dụng) và chuyển vị thẳng đứng ở giữa nhịp của cầu kiện CFDST có mối nối dễ dàng được thiết lập. Hình 8 thể hiện sự phân bố ứng suất trên toàn bộ cầu kiện CFDST khi bị phá hoại, trong khi Hình 9 so sánh kết quả thu được từ phân tích mô hình PTHH và thí nghiệm. Có thể nhận thấy rõ ở Hình 9(a), dạng phá hoại mất ổn định cục bộ ống thép ngoài ở vùng gần mối nối thu được từ phân tích PTHH trùng khớp với hình ảnh thu được từ thí nghiệm. Kết quả so sánh giữa đường cong quan hệ mômen uốn và chuyển vị thẳng đứng tại tiết diện giữa cầu kiện ($M - \delta$) thu được từ phân tích PTHH và thí nghiệm rất phù hợp và khớp như thể hiện trong Hình 9(b) không chỉ về mặt hình dạng của đường

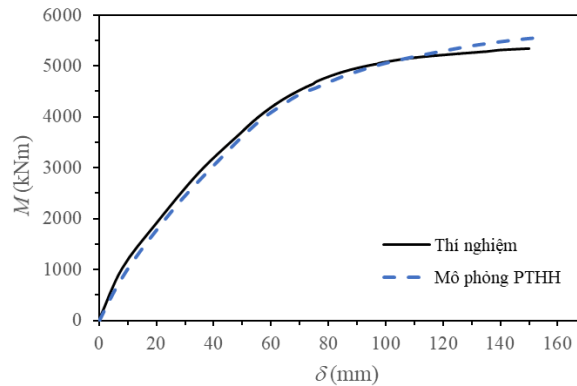
cong mà còn về giá trị mô men uốn giới hạn. Giá trị mô men uốn giới hạn thu được từ phân tích mô hình PTHH $M_{u,ana} = 5574 \text{ kNm}$ gần giống với kết quả thu được từ thực nghiệm với sai số tương đối là 4,3%. Kết quả thu được trên cho thấy mô hình PTHH được phát triển có thể sử dụng để mô phỏng chính xác thí nghiệm uốn bốn điểm của cầu kiện CFDST có mối nối ở giữa.



Hình 8. Ứng suất phân bố trên toàn bộ cầu kiện CFDST



(a) Dạng phá hoại mất ổn định cục bộ ống thép từ thực nghiệm và mô phỏng



(b) Đường cong quan hệ $M - \delta$ giữa mô phỏng và thực nghiệm

Hình 9. So sánh kết quả thu được từ phân tích mô hình PTHH và thí nghiệm

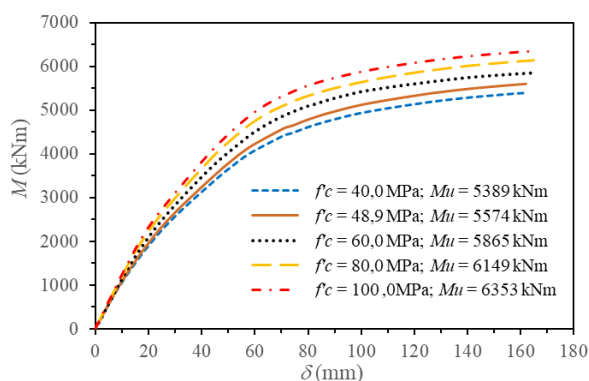
4. Khả năng chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối

Để đánh giá khả năng chịu uốn của CFDST có mối nối với các loại bê tông và ống thép khác nhau, mô hình PTHH đề xuất ở trên được dùng để mô phỏng thí nghiệm uốn bốn điểm của cầu kiện

CFDST có mối nối với các giá trị khác nhau của cường độ chịu nén của bê tông và cường độ chảy dẻo của thép ống. Để kiểm tra ảnh hưởng của cường độ chịu nén bê tông đến khả năng chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối, giá trị cường độ chịu nén của bê tông được thay đổi từ 40 MPa, 60 MPa, 80 MPa đến 100 MPa trong khi tính chất vật liệu của thép ống và thép mối nối được giữ nguyên. Ngược lại, ảnh hưởng của cường độ chảy dẻo của thép ống và thép mối nối được xem xét bằng cách thay đổi các giá trị cường độ này trong khi vẫn giữ nguyên các thông số vật liệu của bê tông nhồi. Các giá trị cường độ chảy dẻo của thép ống và thép mối nối được xem xét bằng cách giảm cường độ tương ứng của các loại thép này từ kết quả thí nghiệm mẫu theo cùng các tỷ lệ 1,2, 1,4, 1,6. Việc khảo sát các giá trị cường độ chảy dẻo của thép theo tỷ lệ giảm đều được lựa chọn do các lý do sau: (i) thép ống trong, ngoài và mối nối có cường độ khác nhau nên nếu thay đổi khác tỷ lệ sẽ không đánh giá được ảnh hưởng của chúng; (ii) vật liệu thép được sử dụng trong thí nghiệm có cường độ tương đối lớn, việc thay đổi cường độ thép theo chiều hướng tăng lên có thể dẫn đến ứng xử của thép cường độ cao trong đó quan hệ ứng suất – biến dạng có thể không còn đúng như mô hình vật liệu sử dụng trong mô hình PTHH, do đó các giá trị cường độ của thép ống và mối nối xem xét trong nghiên cứu này được lựa chọn giảm để phù hợp với các loại thép xây dựng thông thường. Sau khi xác định được các thông số vật liệu tương ứng với các trường hợp cần khảo sát, mô hình PTHH tương ứng với các trường hợp này được khai báo và phân tích để xem xét ảnh hưởng của cường độ chịu nén bê tông nhồi và cường độ chảy dẻo của thép ống, thép mối nối đến khả năng chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối.

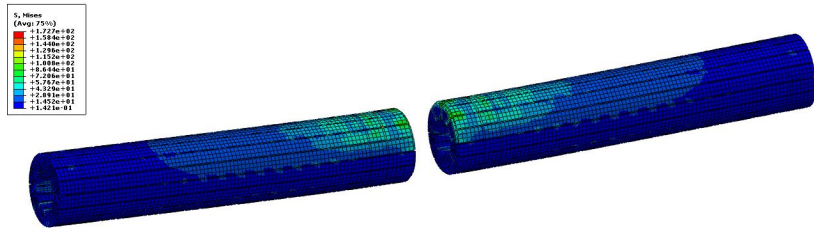
4.1. Ảnh hưởng của cường độ bê tông chịu nén

Hình 10 thể hiện các đường cong quan hệ mô men uốn – chuyển vị thẳng đứng tại tiết diện giữa nhịp ($M - \delta$) của cầu kiện CFDST có mối nối ứng với các giá trị cường độ chịu nén bê tông khác nhau thu được từ các phân tích mô hình PTHH. Có thể nhận thấy từ Hình 10, trong khi dạng đường cong quan hệ mô men – chuyển vị thẳng đứng ở giữa nhịp cầu kiện CFDST có mối nối gần như tương tự nhau, mô men tiết diện ứng với chuyển vị giống nhau cũng như mô men uốn giới hạn của cầu kiện CFDST có mối nối tăng lên khi cường độ chịu nén của bê tông tăng lên. Cường độ chịu nén của bê tông nhồi không những ảnh hưởng đến mô men tiết diện của cầu kiện CFDST có mối nối ở vùng đàn hồi mà cả ở cùng chảy dẻo khi bê tông chuyển sang trạng thái làm việc ngoài đàn hồi. Đặc biệt, giá trị mô men giới hạn của cầu kiện CFDST có mối nối tăng đáng kể khi cường độ chịu nén của bê tông tăng lên, thể hiện bằng giá trị M_u trong Hình 10. Cần lưu ý rằng giá trị mô men giới hạn của cầu kiện M_u trên tương ứng với các trường hợp bê tông có cường độ chịu nén khác nhau nhưng cường độ thép ống và thép mối nối không thay đổi.

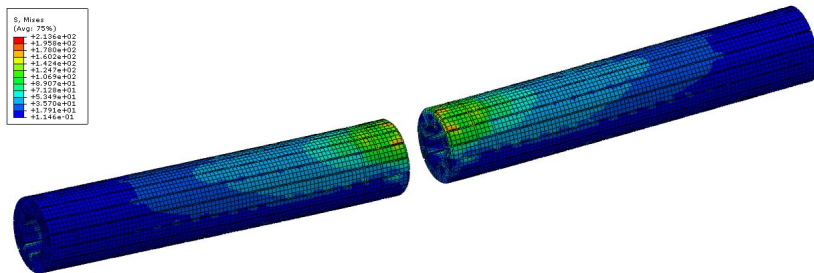


Hình 10. Ảnh hưởng của cường độ bê tông chịu nén đến quan hệ $M - \delta$

Hình 11 cho thấy sự tăng ứng suất trong bê tông ở trạng thái phá hoại của cầu kiện CFDST khi cường độ bê tông được tăng lên và rất thú vị khi nhận thấy rằng mômen uốn giới hạn của cầu kiện CFDST có mối nối (M_u) thay đổi gần như tuyến tính so với sự thay đổi cường độ chịu nén của bê tông trong vùng khảo sát như thể hiện trong Hình 12. 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 cường độ bê tông.

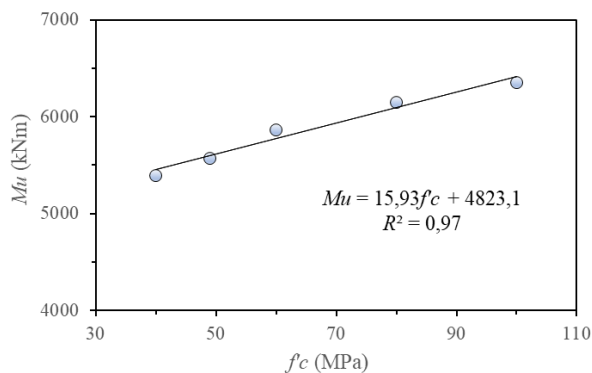


(a) Ứng suất trong bê tông ở trạng thái phá hoại với trường hợp $f'_c = 40$ MPa



(b) Ứng suất trong bê tông ở trạng thái phá hoại với trường hợp $f'_c = 100$ MPa

Hình 11. Sự tăng ứng suất trong bê tông ở trạng thái giới hạn

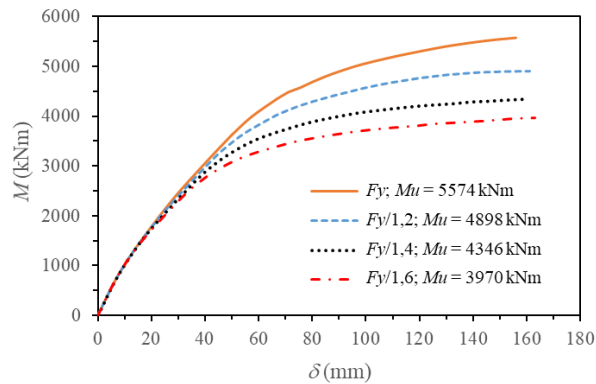


Hình 12. Ảnh hưởng của cường độ bê tông chịu nén đến M_u

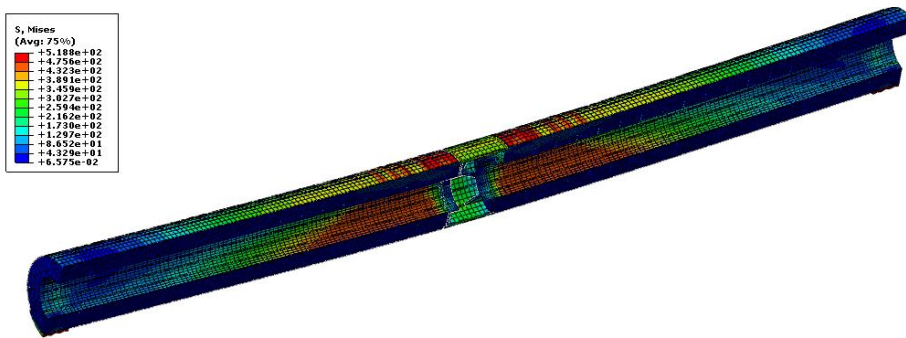
4.2. Ảnh hưởng của cường độ thép ống và mối nối

Hình 13 thể hiện các đường cong quan hệ mô men uốn – chuyển vị thẳng đứng tại tiết diện giữa nhịp ($M - \delta$) của cầu kiện CFDST có mối nối ứng với các giá trị cường độ chảy dẻo của thép ống và mối nối khác nhau thu được từ các phân tích mô hình PTHH. Có thể nhận thấy từ Hình 13, trong khi mô men giới hạn của cầu kiện CFDST có mối nối giảm đáng kể khi cường độ chảy dẻo của thép ống

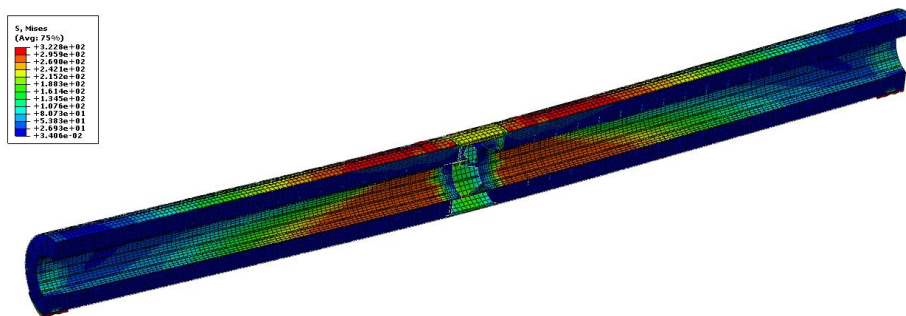
và mỗi nối giảm thì đường cong quan hệ $M - \delta$ gần như giống hệt nhau khi cấu kiện làm việc trong vùng đàn hồi. Kết quả quan sát này cho thấy cường độ của thép ống và thép mỗi nối có ảnh hưởng lớn đến mô men giới hạn của cấu kiện CFDST có mỗi nối nhưng ảnh hưởng này chỉ bắt đầu xuất hiện khi cấu kiện chuyển sang làm việc ngoài vùng đàn hồi, trong khi ở vùng đàn hồi cường độ thép ống và mỗi nối không cho thấy ảnh hưởng đến ứng xử chịu uốn của cấu kiện CFDSTK có mỗi nối. Giá trị mô men giới hạn M_u của cấu kiện CFDST tương ứng với các trường hợp ống thép và mỗi nối có cường độ khác nhau nhưng cường độ bê tông không thay đổi cũng được thể hiện trong Hình 13.



Hình 13. Ảnh hưởng của cường độ thép ống và mỗi nối đến quan hệ $M - \delta$



(a) Ứng suất trong thép ở TTPH ứng với trường hợp hệ số giảm cường độ thép 1,0



(b) Ứng suất trong thép ở TTPH ứng với trường hợp hệ số giảm cường độ thép 1,6

Hình 14. Sự giảm ứng suất trong thép ống và mỗi nối ở trạng thái phá hoại

Hình 14 cho thấy sự giảm ứng suất trong thép ống và mối nối ở trạng thái phá hoại (TTPH) của cầu kiện CFDST khi cường độ thép ống và mối nối thay đổi giảm xuống và rất thú vị khi nhận thấy rằng mômen uốn giới hạn của cầu kiện CFDST có mối nối (M_u) thay đổi gần như tuyệt đối tuyến tính so với sự thay đổi cường độ thép ống và thép mối nối trong vùng khảo sát như thể hiện trong Hình 14. 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 cường độ thép ống và mối nối.

5. Kết luận

Trong bài báo này, mô hình phần tử hữu hạn mô phỏng sự làm việc chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối được xây dựng trong đó cầu kiện CFDST và loại mối nối mới đã được đề xuất và chế tạo bởi nhóm tác giả. Khả năng chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối được nghiên cứu và đánh giá thông qua thí nghiệm và phân tích mô hình PTHH, từ đó có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Mô hình PTHH được xây dựng bằng phần mềm ABAQUS trong nghiên cứu này có thể mô phỏng chính xác sự làm việc chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối.

- Cường độ chịu nén của bê tông có ảnh hưởng lớn đến ứng xử chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối trong cả giai đoạn cầu kiện làm việc đàn hồi và ngoài vùng đàn hồi (chảy dẻo). Sự thay đổi khả năng chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối thay đổi gần như tuyến tính với cường độ chịu nén của bê tông trong vùng được khảo sát từ 40 MPa đến 100 MPa.

- Cường độ của thép ống và thép mối nối có ảnh hưởng lớn đến ứng xử chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối khi cầu kiện chuyển qua giai đoạn làm việc ngoài vùng đàn hồi (chảy dẻo) cũng như ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu uốn của cầu kiện. Sự thay đổi khả năng chịu uốn của cầu kiện CFDST có mối nối thay đổi gần như tuyệt đối tuyến tính với sự thay đổi của cường độ thép ống và mối nối trong vùng được khảo sát.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Xây dựng thông qua Đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Trường năm 2019, mã số: 75-2019/KH XD.

Tài liệu tham khảo

- [1] Han, L.-H., Huang, H., Tao, Z., Zhao, X.-L. (2006). [Concrete-filled double skin steel tubular \(CFDST\) beam-columns subjected to cyclic bending](#). *Engineering Structures*, 28(12):1698–1714.
- [2] Tao, Z., Han, L.-H. (2006). [Behaviour of concrete-filled double skin rectangular steel tubular beam-columns](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 62(7):631–646.
- [3] Tao, Z., Han, L.-H., Zhao, X.-L. (2004). [Behaviour of concrete-filled double skin \(CHS inner and CHS outer\) steel tubular stub columns and beam-columns](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 60(8): 1129–1158.
- [4] Han, L.-H., Tao, Z., Liao, F.-Y., Xu, Y. (2010). [Tests on cyclic performance of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns](#). *Thin-Walled Structures*, 48(6):430–439.
- [5] Han, L.-H., Li, Y.-J., Liao, F.-Y. (2011). [Concrete-filled double skin steel tubular \(CFDST\) columns subjected to long-term sustained loading](#). *Thin-Walled Structures*, 49(12):1534–1543.
- [6] Wang, R., Han, L.-H., Tao, Z. (2015). [Behavior of FRP-concrete-steel double skin tubular members under lateral impact: experimental study](#). *Thin-Walled Structures*, 95:363–373.
- [7] Huang, H., Han, L.-H., Zhao, X.-L. (2013). [Investigation on concrete filled double skin steel tubes \(CFDSTs\) under pure torsion](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 90:221–234.

- [8] Pagoulatou, M., Sheehan, T., Dai, X. H., Lam, D. (2014). [Finite element analysis on the capacity of circular concrete-filled double-skin steel tubular \(CFDST\) stub columns](#). *Engineering Structures*, 72: 102–112.
- [9] EN 1994-1-1:2004. *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization.
- [10] Huang, H., Han, L.-H., Tao, Z., Zhao, X.-L. (2010). [Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular \(CFDST\) stub columns](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 66(4):542–555.
- [11] Việt, V. Q., Ha, H., Hoan, P. T. (2019). [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 (STCE)-NUCE*, 13(1):21–32.
- [12] AASHTO LRFD (2012). *Design specifications*. p. 1661.
- [13] Eom, S.-S., Vu, Q.-V., Choi, J.-H., Park, H.-H., Kim, S.-E. (2019). Flexural behavior of concrete-filled double skin steel tubes with a joint. *Journal of Constructional Steel Research*, 155:260–272.
- [14] KS D 3515:2014. *Rolled steels for welded structures*. Korean Standards Association.
- [15] KS F 2405:2010. *Standard test method for compressive strength of concrete*. Korean Standards Association.
- [16] ABAQUS (2014). *Analysis user's manual version 6.14*. Dassault Systems.
- [17] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of solids and structures*, 25(3):299–326.
- [18] Lee, J., Fenves, G. L. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8):892–900.
- [19] Tsai, W. T. (1988). Uniaxial compressional stress-strain relation of concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(9):2133–2136.
- [20] EN 1992-1-1:2004. *Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization.