

MÔ HÌNH MÔ PHỎNG CHO CẤU KIỆN CỘT THÉP NGẮN TẠO HÌNH NGUỘI CÓ LỖ KHOÉT BẮN BỤNG LỆCH TÂM

Thịnh Văn Thanh^{a,b}, Phạm Ngọc Hiếu^{c,*}, Nguyễn Ngọc Thắng^a

^aKhoa Công trình, Đại Học Thủy Lợi, Số 75 Tây Sơn, Phường Kim Liên, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Công trình, Trường Sĩ Quan Công Binh, 229B Đường Bạch Đằng,

Phường Thủ Dầu Một, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^cKhoa Xây dựng, Đại học Kiến Trúc Hà Nội, Km 10, Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 20/3/2026, Sửa xong 08/7/2026, Chấp nhận đăng 10/7/2026

Tóm tắt

Bài báo thực hiện một nghiên cứu mô phỏng về các cột ngắn thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét lệch tâm chịu mất ổn định cục bộ. Mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng bằng phần mềm ABAQUS nhằm mô phỏng chương trình thí nghiệm đã được thực hiện. Mẫu thí nghiệm dùng tiết diện chữ C cao 200 mm, dày 1,9 mm và chiều dài 520 mm. Lỗ khoét bắn bụng bao gồm hai loại là đúng tâm và lệch tâm với chiều cao lỗ khoét bằng 0,5 lần và độ lệch tâm bằng 0,2 lần chiều cao tiết diện. Mô hình phần tử hữu hạn có xét đến các đặc trưng vật liệu thực tế cũng như các sai lệch hình học đã được đo đạc. Các đặc trưng của vật liệu thực tế bao gồm cả phần phẳng cũng như phần góc của mẫu thí nghiệm sau đó được xử lý để đưa vào mô hình mô phỏng. Các sai lệch hình học đo đạc cũng được chuyển về các dạng phương trình toán học trước khi được đưa vào mô hình mô phỏng thông qua việc phát triển một số chương trình lập trình MATLAB. Mô hình phần tử hữu hạn gồm hai đầu ngàm chịu nén đúng tâm với việc gia tải bằng cách cho di chuyển một đầu của mẫu mô phỏng và đầu kia cố định. Kết quả số thu được từ mô hình sau đó được so sánh và kiểm chứng với các kết quả thí nghiệm. So sánh chứng minh sự phù hợp giữa các kết quả thí nghiệm và mô hình cả về khả năng chịu lực và ứng xử mất ổn định. Các mô hình phần tử hữu hạn đã được kiểm chứng sau đó sẽ được sử dụng cho các nghiên cứu sau này để mở rộng số liệu, nhằm bổ sung cơ sở dữ liệu và phát triển các khuyến nghị thiết kế cho cột thép tạo hình nguội tiết diện chữ C có lỗ khoét lệch tâm khi chịu mất ổn định cục bộ.

Từ khoá: mô hình mô phỏng; cấu kiện cột ngắn; thép tạo hình nguội; lỗ khoét bắn bụng; lệch tâm.

FINITE ELEMENT SIMULATION OF COLD-FORMED STEEL STUB COLUMNS WITH ECCENTRIC WEB HOLES

Abstract

This paper presents a numerical study on cold-formed steel channel stub columns with eccentric perforation under local buckling. A finite element model was developed using ABAQUS to simulate an experimental program that had previously been conducted. The test specimens consisted of the channel sections with a height of 200 mm, a thickness of 1.9 mm and a length of 520 mm. The web holes included two configurations: concentric and eccentric holes, with the hole height equal to 0.5 times the section depth and an eccentricity equal to 0.2 times the section depth. The finite element model incorporates both actual material properties and measured geometric imperfections. The material properties of both the flat and corner regions of the specimens were processed and introduced into the numerical model. The measured geometric imperfections were also converted into mathematical functions and incorporated into the model through the development of MATLAB codes. The numerical model was simulated under concentric compression with fixed boundary conditions at both ends. Loading was applied by imposing a displacement at one end while the other end was restrained. The numerical results obtained from the model were then compared and validated against the experimental results. The comparisons demonstrate good agreement between the experimental and numerical results in terms of both capacities and buckling behaviour. The validated finite element models will be used in future studies to expand the dataset, with the aim of developing a comprehensive database and proposing design recommendations for cold-formed steel channel columns with eccentric web holes subjected to local buckling.

Keywords: finite element model; stub column; cold-formed steel; web holes; eccentricity.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20\(3V\)-xx](https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(3V)-xx) © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hieupn@hau.edu.vn (Hiếu, P. N.)

1. Giới thiệu

Việc tạo các lỗ khoét trong các cầu kiện là cần thiết nhằm đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật và thực tiễn trong xây dựng. Điều này phổ biến trong kết cấu thép tạo hình nguội, và các lỗ khoét này có ảnh hưởng đáng kể đến sự làm việc và khả năng chịu tải của cầu kiện. Do đó, ngày càng nhiều nghiên cứu trên thế giới đã tập trung tìm hiểu ảnh hưởng của lỗ khoét đến ứng xử và khả năng chịu lực của các cầu kiện thép tạo hình nguội.

Các nghiên cứu trước đây đã xem xét khá nhiều về các cầu kiện thép tạo hình nguội có lỗ khoét. Một số nghiên cứu [1–4] đã khảo sát ảnh hưởng của vị trí và kích thước lỗ đến khả năng chịu tải của cột ngắn chữ C thông qua các thí nghiệm và phân tích lý thuyết, từ đó đề xuất các phương trình thiết kế để dự đoán chính xác hơn ứng xử của cột có lỗ khoét. Moen và Schafer [5–9] đã thực hiện nhiều nghiên cứu về ứng xử và khả năng chịu lực của các tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét, góp phần phát triển các khuyến nghị thiết kế dựa trên phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM), sau đó được đưa vào tiêu chuẩn AISI S100 [10]. Fang và cs. [11, 12] đã tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số để đánh giá ảnh hưởng của lỗ khoét trên bản bụng đến cường độ của các cột chữ C tổ hợp, đồng thời đề xuất các hệ số giảm nhằm cải thiện độ chính xác của các quy định thiết kế trong tiêu chuẩn Australia/New Zealand và tiêu chuẩn Hoa Kỳ. Ngoài ra, Uzzaman và cs. [13] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các lỗ có sườn tăng cứng đến hiện tượng nén cục bộ bản bụng của các tiết diện thép chữ C tạo hình nguội, từ đó đề xuất các hệ số giảm tải và khuyến nghị thiết kế phù hợp. Pham và cs. [14–19] cũng có một loạt các nghiên cứu về xem xét ảnh hưởng của kích thước lỗ khoét đến khả năng chịu lực của tiết diện thép chữ C tạo hình nguội sử dụng phương pháp Cường độ trực tiếp, sau đó đưa ra những khuyến cáo trong quá trình thiết kế nhằm tối ưu hóa khả năng chịu lực của tiết diện có lỗ khoét.

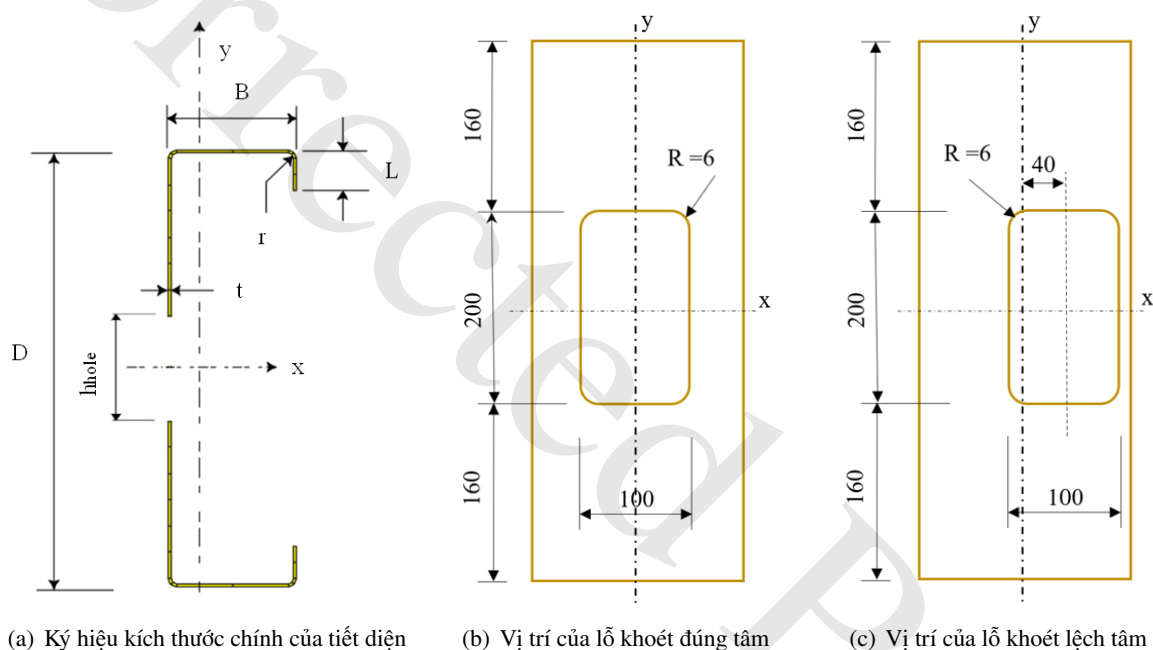
Các nghiên cứu trước đây đã khảo sát khá toàn diện các tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét trên bản bụng thông qua cả thí nghiệm và mô hình số, trong đó phần lớn tập trung vào việc cải thiện các quy định thiết kế cho các cầu kiện có lỗ khoét đúng tâm. Ngược lại, các nghiên cứu liên quan đến lỗ lệch tâm vẫn còn rất hạn chế và các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành cũng chưa đưa ra các quy định cụ thể cho trường hợp này. Tuy nhiên, trong thực tế thi công, các lỗ khoét lệch tâm thường xuyên xuất hiện do yêu cầu lắp đặt các hệ thống kỹ thuật trong công trình. Gần đây, Thịnh và cs. [20] đã xây dựng một chương trình thí nghiệm nhằm khảo sát ứng xử và khả năng chịu lực tiết diện thép chữ C tạo hình nguội có xét đến sự lệch tâm của lỗ khoét. Các kết quả thu được sẽ làm cơ sở cho việc phát triển mô hình phần tử hữu hạn.

Các phần mềm phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element – FE) hiện được sử dụng rộng rãi trong phân tích kết cấu. Mặc dù phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEA) giúp tiết kiệm đáng kể thời gian và chi phí so với việc tiến hành các thí nghiệm thực nghiệm, độ tin cậy của phương pháp này chỉ được đảm bảo khi các mô hình số được kiểm chứng bằng kết quả thí nghiệm. Sau khi được kiểm chứng đầy đủ, các mô hình FE đáng tin cậy có thể được sử dụng để mở rộng phạm vi dữ liệu nghiên cứu.

Bài báo này tập trung vào việc phát triển mô hình phần tử hữu hạn (FE) sử dụng phần mềm ABAQUS/CAE 2022 [21] nhằm nghiên cứu hiện tượng mất ổn định cục bộ của tiết diện thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét lệch tâm và đúng tâm. Các dữ liệu thí nghiệm được trình bày trong báo cáo liên quan [20] sẽ được sử dụng để hiệu chỉnh và kiểm chứng các mô hình phần tử hữu hạn. Điều này làm cơ sở cho các mô hình số hóa được thực hiện ở các nghiên cứu tiếp theo nhằm mở rộng phạm vi dữ liệu nghiên cứu dựa trên các tiết diện thương mại được cung cấp bởi BlueScope Lysaght [22].

2. Tóm tắt chương trình thí nghiệm về khả năng chịu nén của tiết diện thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét lệch tâm

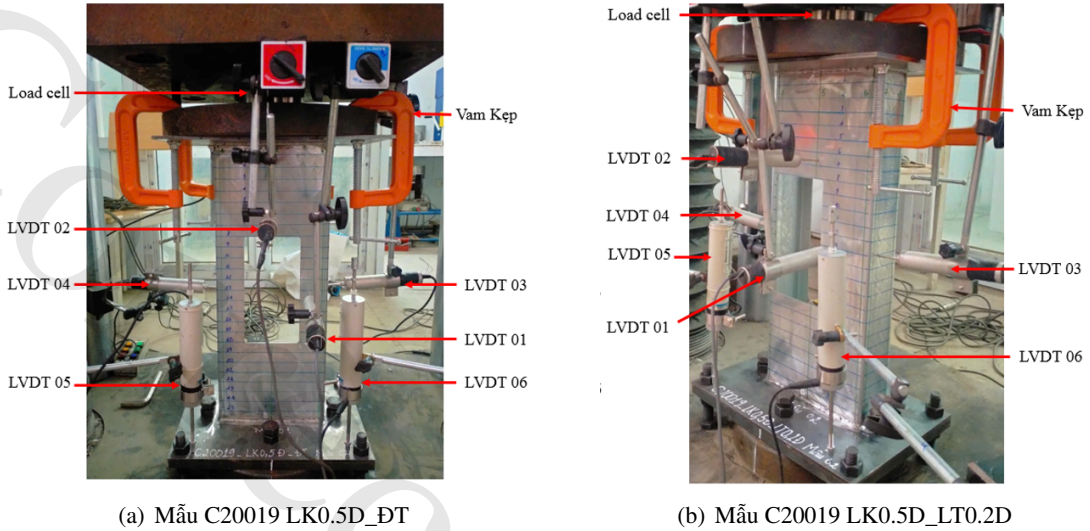
Mẫu thí nghiệm được chọn là tiết diện C20019 có chiều dài 520 mm được cắt từ cây thép dài 6 m do BlueScope Lysaght [22] cung cấp. Thí nghiệm được thực hiện bằng việc sử dụng máy nén thủy lực MTS 3000 kN tại Trường Đại học Giao thông Vận tải, Hà Nội. Mẫu thí nghiệm được khoét lỗ ở bản bụng với kích thước lỗ khoét bằng một nửa chiều cao tiết diện với hai trường hợp lỗ khoét đúng tâm và lệch tâm trên bản bụng, được liệt kê như trong Bảng 1. Mẫu thí nghiệm được ký hiệu C20019LK0.5D được giải thích như sau: C - tiết diện thép chữ C; 20019 - chiều cao và chiều dày danh nghĩa của tiết diện lần lượt là 200 mm và 1,9 mm; LK0.5D – lỗ khoét có chiều cao bằng 0,5 lần chiều cao tiết diện (D). Các ký hiệu sau đó bao gồm ĐT là lỗ khoét đúng tâm, và LT0.2D hiểu là lỗ khoét lệch tâm trên bản bụng bằng 0,2 lần chiều cao tiết diện (D). Các kích thước chính của tiết diện và vị trí của lỗ khoét được thể hiện như trên Hình 1.



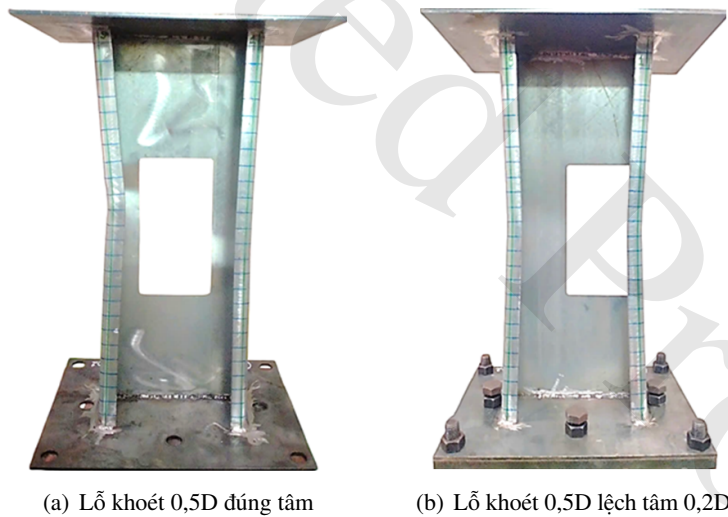
Hình 1. Kích thước của tiết diện chữ C và vị trí của lỗ khoét

Mẫu được đặt thẳng đứng, phía trên gắn bản thép tròn dày 40 mm nối với cần tải DARTEC, phía dưới liên kết với bộ máy thông qua khớp cầu nhằm bảo đảm truyền tải đúng tâm. Mẫu thí nghiệm được hàn với bản thép dày 5 mm cả hai đầu như Hình 2, sau đó được liên kết chặt với bản thép tròn phía trên và bộ máy phía dưới. Chi tiết hơn về cấu tạo thí nghiệm được trình bày trong bài báo [20]. Trước khi gia tải chính thức, tâm hình học của hệ đầu nén được xác định, các bu lông được điều chỉnh để cố định liên kết. Đồng thời ba cảm biến biến dạng được gắn trên bản bụng và bản cánh để theo dõi quan hệ ứng suất–biến dạng trong giai đoạn đầu. Một tải sơ bộ được áp xuống để kích hoạt sự tự điều chỉnh của khớp cầu, bảo đảm phân bố tải đồng đều trên toàn tiết diện; sau đó, các bu lông đáy được siết chặt hoàn toàn. Chuyển vị được đo bằng sáu cảm biến đo chuyển vị (LVDT) gắn cố định vào bộ máy; hai cảm biến LVDT5 và LVDT 6 dùng để đo độ co ngắn dọc trục của mẫu thí nghiệm, bốn cảm biến còn lại LVDT1 đến LVDT 4 đo biến dạng tại bản bụng của tiết diện nguyên, tiết diện có lỗ khoét và hai bản cánh. Tất cả thiết bị đo được hiệu chuẩn trước thí nghiệm và dữ liệu được ghi lại liên tục trong quá trình thí nghiệm. Thí nghiệm được thực hiện với tốc độ gia tải 0,2 mm/phút.

Các thí nghiệm đều bị phá hoại do mất ổn định cục bộ của bản bụng bao gồm cả mẫu có lỗ khoét đúng tâm hay lệch tâm, được minh họa trên Hình 3(a) và (b). Mẫu có lỗ khoét bản bụng lệch tâm có khả năng chịu lực thấp hơn lỗ khoét cùng kích thước đúng tâm, thấp hơn 10,84% như đưa ra chi tiết trong Bảng 1. Độ chênh lệch này là đáng kể cần xem xét đến trong quá trình thiết kế.



Hình 2. Thiết lập thí nghiệm cột thép chữ C tạo hình nguội chịu nén



Hình 3. Hình ảnh về mẫu thí nghiệm bị phá hoại

Bảng 1. Cường độ chịu lực cực hạn các mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm	L (mm)	P (kN) Mẫu 1	P (kN) Mẫu 2	P_{tb} (kN)	Chênh lệch (%)
C20019LK0.5D-ĐT	520	168,46	169,89	169,17	10,84%
C20019LK0.5D-LT0.2D	520	151,36	153,88	152,62	

Ngoài ra, để phục vụ cho việc phát triển mô hình FE ở bước tiếp theo, tính chất cơ học của vật liệu và sai lệch hình học của mẫu thí nghiệm được xác định, được trình bày chi tiết trong báo cáo của Thịnh và cs. [20]. Các tiết diện thành mỏng rất nhạy cảm với các dạng mất ổn định, và sự phá hoại do mất ổn định chịu ảnh hưởng đáng kể bởi các sai lệch hình học. Do đó, các sai lệch này được đo đạc và ghi lại đối với từng mẫu thử trước khi tiến hành thí nghiệm, bằng cách sử dụng các cảm biến dịch chuyển LVDT được bố trí dọc theo chiều dài mẫu. Chi tiết về quy trình đo sai lệch hình học được trình bày trong báo cáo của Phạm và cs. [23].

3. Mô hình phần tử hữu hạn

3.1. Tính chất cơ học của vật liệu

Tính chất cơ học của vật liệu được biểu thị bằng đường ứng suất–biến dạng như trên Hình 4, được xác định thông qua các thí nghiệm vật liệu như đã trình bày trong báo cáo của Thịnh và cs. [20]. Các kết quả thí nghiệm vật liệu bao gồm cả phần phẳng và phần góc của tiết diện được tổng hợp trong Bảng 2.

Trong mô hình vật liệu, phần mềm phần tử hữu hạn ABAQUS [21] mô tả quan hệ ứng suất–biến dạng thông qua hai giai đoạn. Giai đoạn đầu tương ứng với miền đàn hồi tuyến tính, trong đó ứng suất tỷ lệ tuyến tính với biến dạng theo định luật Hooke. Do đó, mô hình vật liệu chỉ yêu cầu các tham số đầu vào gồm mô đun đàn hồi E và ứng suất chảy. Giai đoạn tiếp theo mô tả tính chất đàn– dẻo phi tuyến của vật liệu, trong đó sau khi đạt đến trạng thái chảy, sự gia tăng ứng suất dẫn đến sự phát triển của biến dạng dẻo và mối quan hệ ứng suất–biến dạng không còn tuyến tính. Trạng thái này được mô tả trong mô hình FE thông qua việc định nghĩa đường cong ứng suất thực – biến dạng dẻo.

Dựa trên ứng suất và biến dạng thu được từ các thí nghiệm vật liệu cho phần phẳng cũng như phần góc của tiết diện thép chữ C như đã trình bày trong [20], mối quan hệ giữa ứng suất thực và ứng suất danh nghĩa, cũng như giữa biến dạng thực và biến dạng danh nghĩa, được xác định theo các biểu thức tương ứng trình bày tại Phương trình (1) và (2):

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

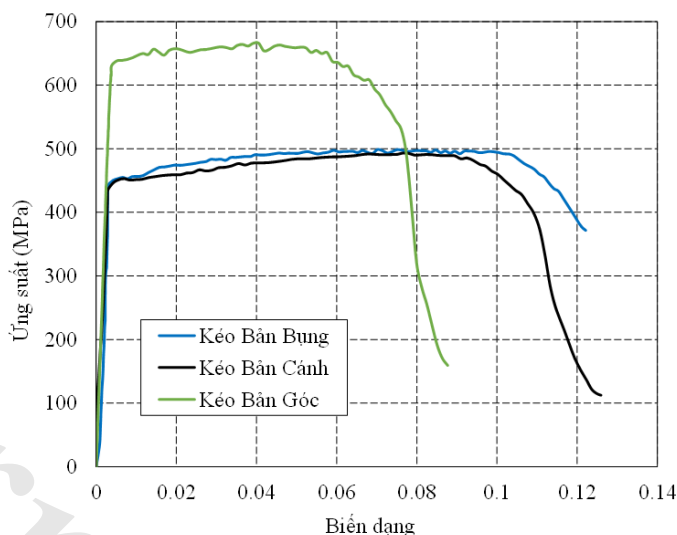
$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (2)$$

trong đó E là mô đun đàn hồi của thép; σ là ứng suất danh nghĩa; ε là biến dạng danh nghĩa.

Bảng 2. Tính chất cơ học của vật liệu

Tiết diện	Vị trí	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	σ_u (MPa)	E_o (GPa)	ε_f (%)
C20019-M1	Bản bụng	450,20	498,70	206664	12,21
C20019-M2	Bản bụng	442,99	486,81	204020	12,27
C20019-M1	Bản cánh	437,74	482,35	206628	11,92
C20019-M2	Bản cánh	445,84	493,39	207497	12,59
C20019-M1	Bản góc	638,12	666,27	205536	8,766
C20019-M2	Bản góc	648,28	699,86	208182	8,429

trong đó $\sigma_{0,2}$ là ứng suất tại thời điểm biến dạng tương đối 0,2%; σ_u là giới hạn bền kéo; E_o là mô đun biến dạng đàn hồi; ε_f là tổng độ giãn dài sau khi đứt; M1, M2 lần lượt là mẫu thí nghiệm số 1 và số 2.



Hình 4. Đường cong ứng suất - biến dạng của vật liệu

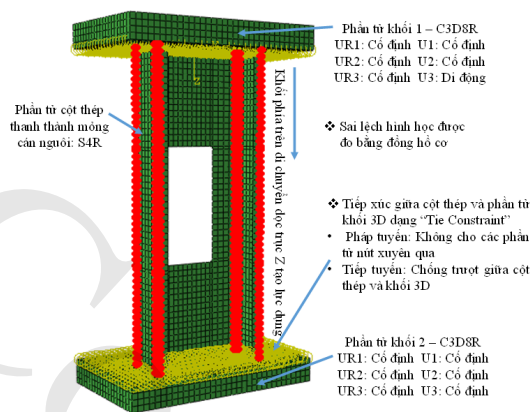
3.2. Điều kiện biên của mô hình

Đối với các cấu kiện thép tạo hình nguội, phần tử vỏ bốn nút, loại S4R, được xem là lựa chọn phù hợp và đã được sử dụng trong các phân tích phần tử hữu hạn (FE), do chiều dày vật liệu của các cấu kiện tạo hình nguội tương đối nhỏ so với bề rộng tiết diện. Phần tử vỏ này sử dụng ba bậc tự do chuyển vị và ba bậc tự do quay tại mỗi nút. Phần tử có khả năng xét đến biến dạng màng hữu hạn và các chuyển vị quay. Phần tử vỏ này phù hợp để mô phỏng kết cấu thành mỏng và đã được sử dụng hiệu quả cho mục đích này như đã bàn luận trong các báo cáo [24, 25]. Các bản thép ở đầu trên và đầu dưới tại hai đầu cấu kiện được mô hình hóa trong phần mềm ABAQUS bằng các phần tử khối 3D biến dạng (3D-deformable solid elements) và được gán các đặc trưng vật liệu của thép cacbon thông thường.

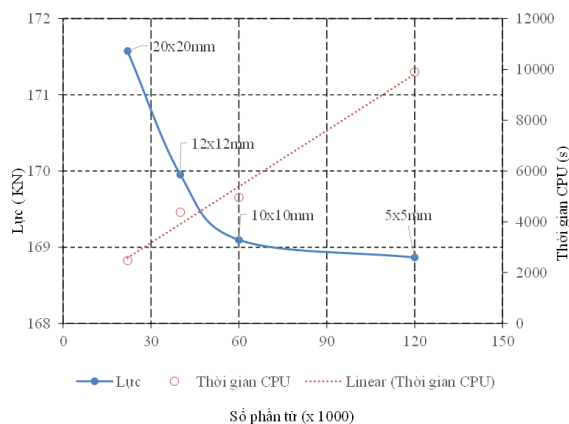
Sự tiếp xúc giữa các nút tại hai đầu tiết diện của cấu kiện và bề mặt của các bản thép phía trên và dưới được mô hình hóa thông qua các cặp tiếp xúc dạng “node-to-surface”. Trong đó, bề mặt của bản thép được định nghĩa là bề mặt chủ (main surface) dựa trên phần tử, còn mép của tiết diện được xác định là bề mặt phụ (secondary surface) dựa trên các nút. Nhằm mô tả chính xác liên kết hàn giữa mẫu chữ C và bản mã, thuộc tính tiếp xúc được thiết lập dưới dạng “Tie Constraint”, giúp chống trượt giữa mẫu thí nghiệm và các bản đế.

Trong mô hình như được mô tả trong Hình 5, các mẫu thí nghiệm được giả thiết làm việc giữa hai đầu ngàm. Tải trọng được áp dụng thông qua các chuyển vị gia tăng theo phương dọc trục của bản trên, trong khi bản dưới được cố định theo tất cả các phương chuyển vị và xoay.

Mô hình phần tử hữu hạn được chia lưới với nhiều kích thước phần tử khác nhau để thực hiện nghiên cứu độ nhạy của lưới. Đối với mỗi trường hợp, khả năng chịu tải và thời gian tính toán (CPU time) được ghi lại và thể hiện trong Hình 6. Bốn điểm trên đường xu hướng tương ứng với các kích thước phần tử 20×20 mm, 12×12 mm, 10×10 mm và 5×5 mm. Kết quả cho thấy khi kích thước phần tử giảm, giá trị khả năng chịu tải dự đoán dần hội tụ, trong khi thời gian tính toán tăng đáng kể. Mục đích của nghiên cứu này là xác định kích thước lưới phù hợp nhằm đảm bảo độ chính xác của kết quả đồng thời duy trì hiệu quả tính toán. Dựa trên kết quả phân tích, kích thước phần tử 10×10 mm được lựa chọn cho các vùng phẳng của tiết diện. Đối với các khu vực có sự thay đổi hình học lớn, chẳng hạn như các góc tiết diện và mép lỗ khoét, lưới mịn hơn được sử dụng để mô phỏng chính xác sự tập trung ứng suất.



Hình 5. Mô hình phần tử hữu hạn của mẫu thí nghiệm



Hình 6. Khảo sát tính hội tụ lưới phần tử của mô hình

3.3. Sai lệch hình học ban đầu

Sai lệch hình học được đưa vào mô hình phần tử hữu hạn bằng nhiều cách. Hai phương pháp được sử dụng phổ biến nhất là dựa trên các dạng mất ổn định riêng (eigen-buckling modes) và dựa trên các sai lệch hình học ban đầu được đo đạc thực tế.

Trong phương pháp thứ nhất, trước tiên tiến hành phân tích mất ổn định đàn hồi của cấu kiện với giả thiết kích thước hình học không tồn tại sai lệch. Các dạng mất ổn định thu được sau đó được nhân với một hệ số biên độ thích hợp để mô phỏng các sai lệch hình học ban đầu.

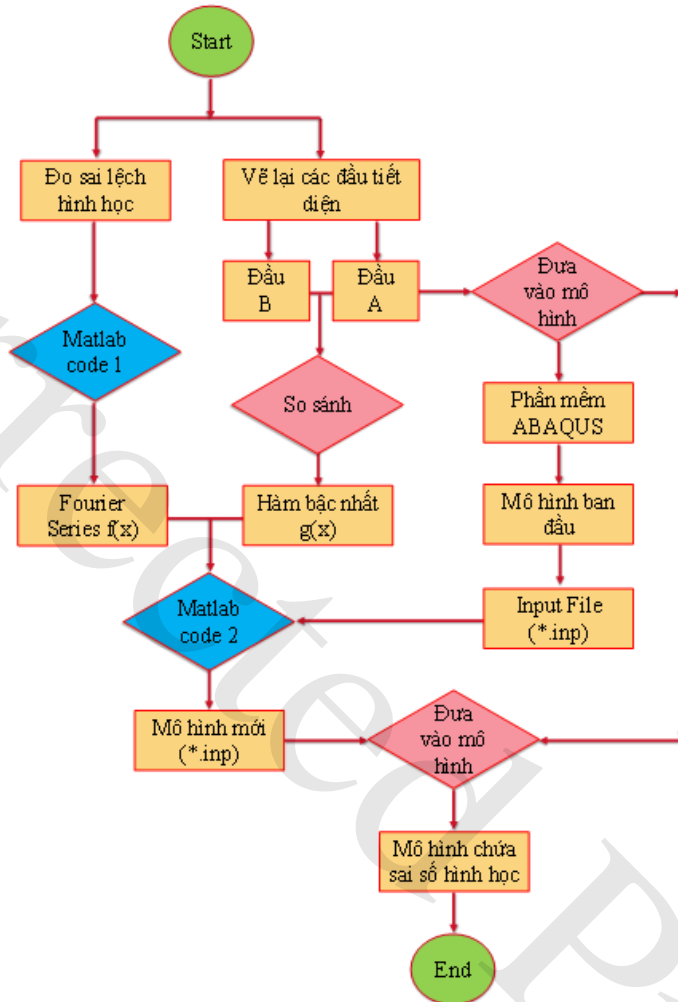
Trong phương pháp thứ hai, các sai lệch hình học ban đầu được đo đạc từ thí nghiệm được đưa trực tiếp vào mô hình phần tử hữu hạn thông qua việc điều chỉnh tọa độ của các nút trong lưới phần tử. Phương pháp này có thể mô tả chính xác hình dạng sai lệch ban đầu của cấu kiện, nhưng việc áp dụng còn hạn chế vì nó chỉ có thể thực hiện đối với các cấu kiện mà sai lệch hình học đã được đo đạc trước. Phương pháp này được sử dụng trong báo cáo nhằm kiểm chứng độ chính xác của mô hình thông qua việc so sánh với kết quả thí nghiệm.

Các sai lệch hình học ban đầu được đo theo chín đường song song với trục dọc của mẫu bằng cách dịch chuyển đồng hồ tiếp xúc theo chiều dài cấu kiện, như đã trình bày trong nghiên cứu của Thịnh và cs. [20]. Dữ liệu đo thô sau đó được xử lý bằng phương pháp phân tích chuỗi Fourier và được biểu diễn dưới dạng các hàm toán học tương ứng.

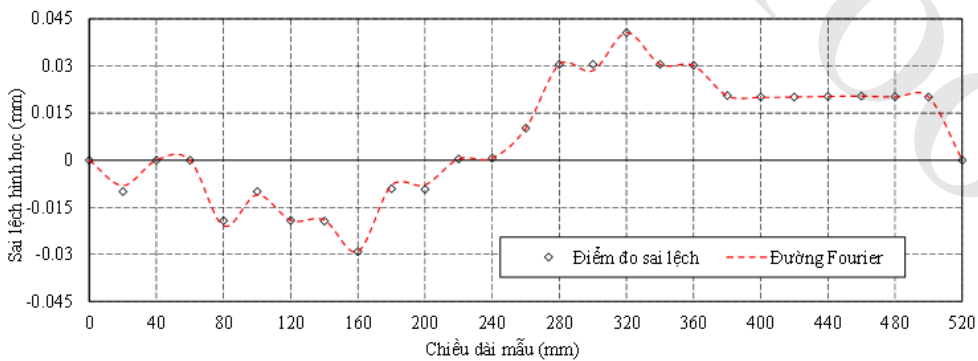
Đối với một mặt cắt ngang cụ thể, giá trị sai lệch hình học tại vị trí của từng nút trong lưới phần tử hữu hạn được xác định thông qua phương pháp nội suy. Trên cơ sở đó, một chương trình lập trình được phát triển bằng MATLAB để tính toán biên độ sai lệch hình học tại từng nút của mô hình phần tử hữu hạn và cập nhật tọa độ nút tương ứng. Phương pháp xử lý dữ liệu và đưa sai lệch hình học ban đầu vào mô hình số này đã được Phạm và cs. [23] áp dụng và mô tả chi tiết.

Ba bước chính được thực hiện để đưa các sai lệch hình học đo được vào mô hình phần tử hữu hạn. Trước hết, sau khi phác họa các mặt cắt ngang thực tế của các mẫu thí nghiệm, các mặt cắt này được số hóa trong phần mềm AutoCAD và lưu dưới định dạng tệp (*.dxf). Các mặt cắt ngang này sau đó được nhập từ tệp (*.dxf) vào ABAQUS và kéo theo phương dọc trục để xây dựng mô hình ba chiều của cấu kiện với tiết diện không đổi, thông qua lệnh *File/Import/Sketch*. Tiếp theo dựa trên tệp đầu vào (*.inp) được xuất từ mô hình ban đầu trong ABAQUS, tọa độ của toàn bộ các nút trong mô hình được hiệu chỉnh bằng một chương trình lập trình được phát triển trong MATLAB. Chương trình này sử dụng dữ liệu từ chín đường đo để điều chỉnh hình học của mô hình theo các số liệu sai lệch hình học thực tế. Cuối cùng, tệp đầu vào đã được hiệu chỉnh được đưa lại vào ABAQUS thông qua lệnh *File/Import/Model*. Sơ đồ khối cho việc đưa sai lệch hình học này được trình bày như trên Hình 7. Vị

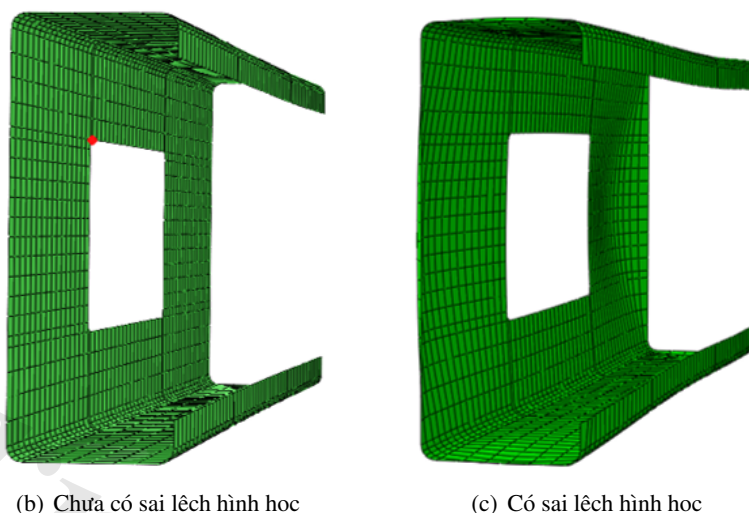
trí một đường sai lệch hình học đo được và so sánh với đường biểu diễn bằng chuỗi Fourier được biểu diễn như trong Hình 8(a). Kết quả được minh họa trên Hình 8(b) và (c) cho cấu kiện trước và sau khi xét đến các sai lệch hình học.



Hình 7. Sơ đồ đưa sai lệch hình học vào phân tích mô hình FE



(a) Một đường đo sai lệch hình học và đường biểu diễn chuỗi Fourier



Hình 8. Trước và sau đưa sai lệch hình học vào mô hình phần tử hữu hạn

4. Kiểm chứng mô hình

4.1. Khả năng chịu lực

Tải trọng tối hạn thu được từ các mô hình phần tử hữu hạn (FE) được tổng hợp trong Bảng 3, đồng thời được so sánh với các kết quả thí nghiệm tương ứng. Kết quả cho thấy sự phù hợp giữa dự đoán từ mô hình phần tử hữu hạn và kết quả thí nghiệm, với tỷ số trung bình là 0,9974, cùng độ lệch chuẩn tương ứng là 0,0191.

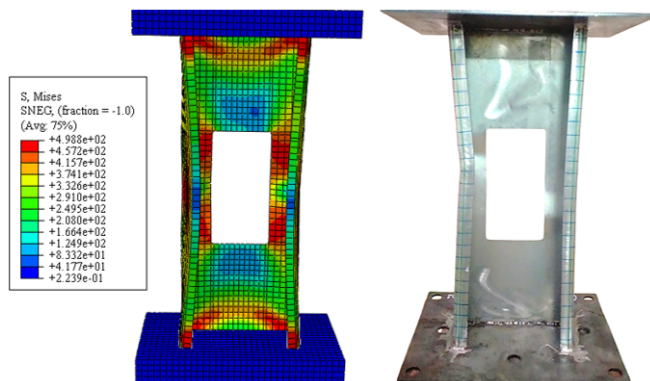
Bảng 3. So sánh kết quả thí nghiệm và kết quả mô hình FE

Mẫu tiết diện	Tải trọng tại đỉnh cao nhất (kN)		P_{FE}/P_{test}
	Tải trọng thí nghiệm P_{test}	Tải trọng mô hình P_{FE}	
C20019-LK0.5D-ĐT-M1	168,885	164,962	0,9766
C20019-LK0.5D-ĐT-M2	169,789	166,550	0,9809
C20019-LK0.5D-LT0.2D-M1	150,162	153,313	1,0210
C20019-LK0.5D-LT0.2D-M2	151,181	152,868	1,0112
Giá trị trung bình			0,9974
Độ lệch chuẩn			0,0191

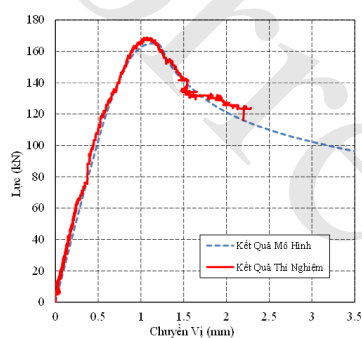
4.2. Ứng xử biến dạng của cấu kiện

Với mẫu lỗ khoét bản bụng đúng tâm, Hình 9(a) trình bày sự so sánh giữa ứng xử của mô hình phần tử hữu hạn và kết quả thí nghiệm đối với mẫu C20019LK0.5D-ĐT. Mất ổn định cục bộ được quan sát thấy trong cả kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn và kết quả thí nghiệm.

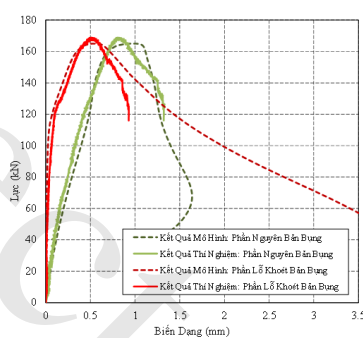
Hình 9(b) cho thấy sự phù hợp giữa kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn và kết quả thí nghiệm đối với biến dạng dọc trục. Sự tương đồng cũng được thể hiện trong Hình 9(c) và 9(d) đối với các biến dạng của bản bụng và bản cánh. Có thể nhận thấy rằng các biến dạng mất ổn định rất nhạy cảm với vị trí xuất hiện của dạng mất ổn định cục bộ. Điều này dẫn đến một sự dịch chuyển của góc dốc giữa các biến dạng đo được trong thí nghiệm và kết quả từ mô hình như trên Hình 9(c). Cụ thể tại vị trí khoảng 64 kN (giá trị mất ổn định cục bộ của phần tiết diện nguyên) và khoảng 120 kN (giá trị mất ổn định cục bộ của phần tiết diện có lỗ khoét).



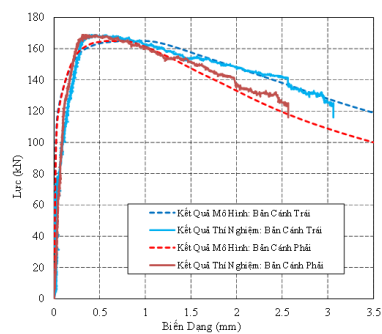
(a) Dạng phá hoại: Mất ổn định cục bộ



(b) Lực và chuyển vị dọc trục



(c) Lực và biến dạng bản bụng



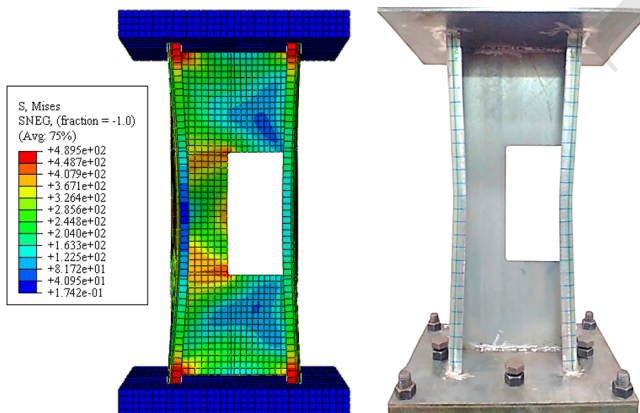
(d) Lực và biến dạng bản cánh

Hình 9. Ứng xử biến dạng của mẫu C20019LK0.5D-DT

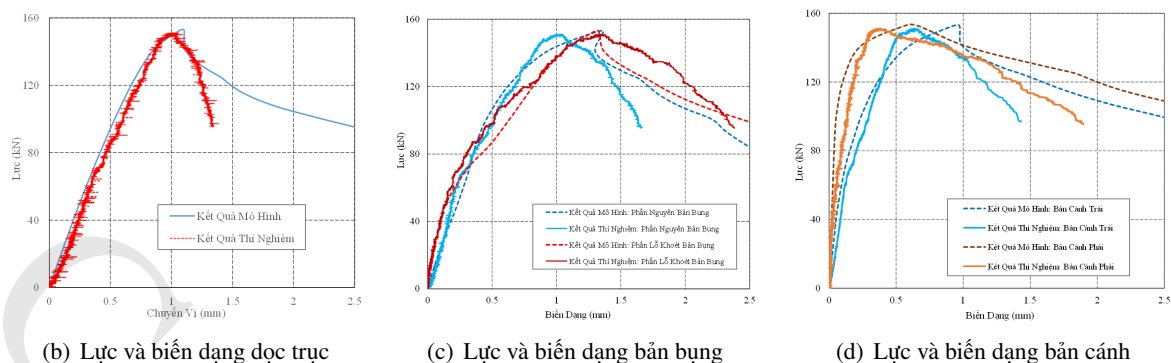
Ghi chú: Vị trí đo biến dạng của bản bụng và bản cánh được thể hiện trong Hình 2 và mô tả chi tiết trong Mục 2

Tương tự với mẫu có bản bụng lệch tâm, so sánh giữa mô phỏng số và ứng xử thực nghiệm của mẫu C20019LK0.5D-LT0.2D được trình bày trong Hình 10(a). Cả mô hình phần tử hữu hạn (FE) và kết quả thí nghiệm đều thể hiện dạng phá hoại do mất ổn định cục bộ.

Các biến dạng của mẫu này được trình bày trong Hình 10(b), (c) và (d). Sự tương thích rất tốt giữa kết quả thí nghiệm và mô hình phần tử hữu hạn được thấy với biến dạng dọc trục, biến dạng của bản bụng cũng như bản cánh.



(a) Dạng phá hoại: Mất ổn định cục bộ



Hình 10. Ứng xử biến dạng của mẫu C20019LK0.5D-LT0.2D

Ghi chú: Vị trí đo biến dạng của bản bụng và bản cánh được thể hiện trong Hình 2 và mô tả chi tiết trong Mục 2

Kết luận rằng các mô hình phần tử hữu hạn (FE) đã mô phỏng chính xác các biến dạng và cơ chế phá hoại của mẫu cột ngắn có bản bụng khoét lỗ lệch tâm và đúng tâm. Các mô hình FE đáng tin cậy này sẽ được sử dụng cho các nghiên cứu tiếp theo trong việc mở rộng khảo sát thu thập thêm số liệu về loại cấu kiện này.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày về mô hình mô phỏng cho cấu kiện cột thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét bản bụng đúng tâm và lệch tâm bằng phần mềm ABAQUS/CAE 2022 để xác định khả năng chịu lực và ứng xử mất ổn định cục bộ. Các mô hình được kiểm chứng thông qua các thí nghiệm mẫu ngắn tại trường Đại học giao thông Vận tải Hà Nội, được thực hiện trong một chương trình thí nghiệm đã được trình bày trong các báo cáo trước. Mô hình mô phỏng này có kể đến các sai lệch hình học cũng như là các tính chất cơ học của vật liệu được đo đạc từ các mẫu thí nghiệm thực tế. Kết quả đã chỉ ra rằng các mô hình phần tử hữu hạn đã mô tả chính xác khả năng chịu lực cũng như ứng xử biến dạng của mẫu thí nghiệm. Điều đó đảm bảo được độ tin cậy của mô hình, mà sau đó sẽ được sử dụng để phát triển các nghiên cứu nhằm mở rộng dữ liệu với phạm vi độ mảnh rộng hơn, phục vụ nghiên cứu sâu hơn về việc phát triển các hướng dẫn thiết kế cho các loại cột thép ngắn tạo hình nguội có lỗ khoét bản bụng lệch tâm.

Tài liệu tham khảo

- [1] Rhodes, J., Schneider, F. D. (1994). The compressional behaviour of perforated elements. 11–28.
- [2] Loov, R. (1984). [Local buckling capacity of C-shaped cold-formed steel sections with punched webs](#). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 11(1):1–7.
- [3] Pu, Y., Godley, M. H. R., Beale, G. R., Lau, H. H. (1999). [Predictin of ultimate capacity of perforated lipped channels](#). *Journal of Structural Engineering*, 125(5):510–514.
- [4] Rhodes, J., Macdonald, M. (1996). The effects of perforation length on the behaviour of perforated elements in compression. 91–101.
- [5] Moen, C. D. (2008). *Direct strength design for cold-formed steel members with perforations*. Johns Hopkins University, Baltimore.
- [6] Moen, C. D., Schafer, B. W. (2008). [Experiments on cold-formed steel columns with holes](#). *Thin-Walled Structures*, 46(10):1164–1182.
- [7] Moen, C. D., Schafer, B. W. (2009). [Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes](#). *Engineering Structures*, 31(12):2812–2824.
- [8] Moen, C. D., Schafer, B. W. (2006). Impact of holes on the elastic buckling of cold-formed steel columns. 269–283.

- [9] Moen, C. D., Schafer, B. W. (2010). Extending direct strength design to cold-formed steel beams with holes. 171–183.
- [10] American Iron and Steel Institute (2016). *North American specification for the design of cold-formed steel structural members*. Washington DC: American Iron and Steel Institute.
- [11] Fang, Z., Roy, K., Chen, B., Xie, Z., Lim, J. B. P. (2022). [Local and distortional buckling behaviour of aluminium alloy back-to-back channels with web holes under axial compression](#). *Journal of Building Engineering*, 47(4):103837.
- [12] Fang, Z., Roy, K., Chen, B., Xie, Z., Ingham, J., Lim, J. B. P. (2022). [Effect of the web hole size on the axial capacity of back-to-back aluminium alloy channel section columns](#). *Engineering Structures*, 260(6): 114238.
- [13] Uzzaman, A., Lim, J. B. P., Nash, D., Roy, K. (2020). [Web crippling behaviour of cold-formed steel channel sections with edge-stiffened and unstiffened circular holes under interior-two-flange loading condition](#). *Thin-Walled Structures*, 154(4):106813.
- [14] Pham, N. H., Thinh, V. T., Nguyen, N. T. (2023). Xác định khả năng chịu lực của cột thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét bản bụng. *Tạp chí Xây dựng*, (11):62–65.
- [15] Pham, N. H. (2023). [Numerical investigation of cold-rolled aluminium alloy stub columns with perforations undergoing local buckling](#). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(6):3453–3463.
- [16] Pham, N. H. (2023). [Investigation of web hole effects on capacities of cold-formed steel channel members](#). 235.
- [17] Pham, N. H. (2023). [Sectional capacities of cold-formed perforated steel channel columns](#). *Materials Today: Proceedings*, 85:113–117.
- [18] Pham, N. H. (2022). [Investigation of sectional capacities of cold-formed perforated steel channel sections](#). *Steel Construction*, 16(2):105–113.
- [19] Pham, N. H. (2022). [Khảo sát khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét](#). *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 16(5V):87–100.
- [20] Thinh, V. T., Pham, N. H., Nguyen, N. T. (2025). Experimental investigation of cold-formed steel stub columns with eccentric web holes. *Hydraulic and Civil Engineering Technology X*, IOS Press, volume 81, 21–27.
- [21] ABAQUS/Standard (2014). *ABAQUS/CAE user's manual*. Dassault Systemes Simulia Corp, Providence, RI, USA.
- [22] BlueScope Lysaght (2010). *Cold-formed sections*.
- [23] Pham, N. H., Pham, C. H., Rasmussen, K. J. R. (2017). [Incorporation of measured geometric imperfections into finite element models for cold-rolled aluminium sections](#). 161–171.
- [24] Su, M.-N., Young, B., Gardner, L. (2015). [Continuous beams of aluminum alloy tubular cross sections: Tests and FE model validation](#). *Journal of Structural Engineering*, 141(9):1–7.
- [25] Pham, C. H., Hancock, G. J. (2010). [Numerical simulation of high strength cold-formed purlins in combined bending and shear](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 66(10):1205–1217.