

MÔ PHỎNG DẦM THÉP CHỮ I CÓ NHIỀU ĐIỂM CỐ KẾT BỊ PHÁ HOẠI DO MẤT ỔN ĐỊNH TỔNG THỂ

Vy Sơn Tùng^{a,*}, Bùi Hùng Cường^a, Nguyễn Ngọc Linh^a

^a*Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 03/08/2021, Sửa xong 17/09/2021, Chấp nhận đăng 20/09/2021

Tóm tắt

Dầm thép chữ I có nhiều điểm cố kết (điểm giằng) được áp dụng trong nhiều công trình xây dựng dân dụng và công nghiệp sử dụng kết cấu thép. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu về khả năng chống mất ổn định tổng thể của dầm thép có các điểm cố kết đặt đồng thời tại bản cánh chịu nén và bản cánh kéo được công bố. Do vậy, nghiên cứu này trình bày phương pháp xây dựng mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến của dầm thép chữ I có một hay nhiều điểm cố kết chịu mất ổn định tổng thể. Độ tin cậy của mô hình được kiểm chứng bằng kết quả thí nghiệm trong một số tài liệu tham khảo. Sau đó, mô hình này được sử dụng để khảo sát khả năng chống mất ổn định tổng thể của một tiết diện dầm thép có chiều dài, số lượng và vị trí điểm cố kết, và dạng tải trọng thay đổi.

Từ khoá: dầm thép; ổn định tổng thể; điểm cố kết; phương pháp phần tử hữu hạn.

MODELLING OF STEEL I-SECTION BEAMS WITH MULTIPLE LATERAL RESTRAINTS FAILING BY LATERAL-TORSIONAL BUCKLING

Abstract

Steel I-section beams with multiple lateral restraints (bracings) have been applied in many civil and industrial buildings using steel structures. However, no publicised research study has focused on the bending resistance for lateral-torsional buckling of steel beams with multiple lateral restraints, which are located at both flanges subjecting to tension and compression yet. Hence, this research study presents a detailed procedure of developing finite element (FE) models of steel I-section beams, with one or multiple lateral restraints, subject to lateral-torsional buckling. The developed FE models were validated using test results in several past research studies. These models were then utilised to investigate the bending resistance for lateral-torsional buckling of a steel beam section with varying lengths, numbers, and locations of lateral restraints, and loading conditions.

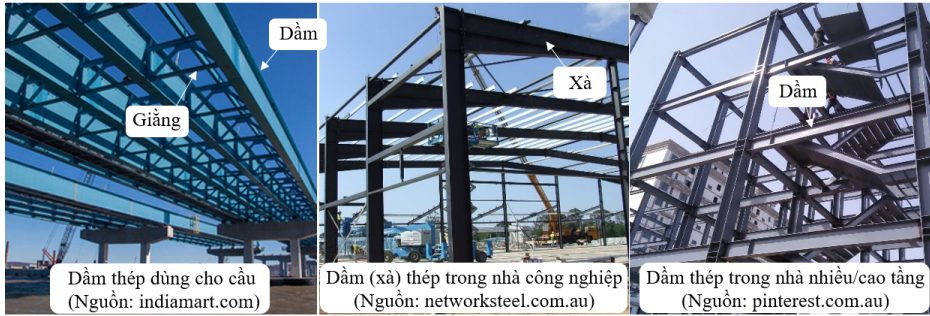
Keywords: steel beam; lateral-torsional buckling; lateral restraints; finite element method.

[https://doi.org/10.31814/stce.huice\(nuce\)2021-15\(5V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.huice(nuce)2021-15(5V)-08) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

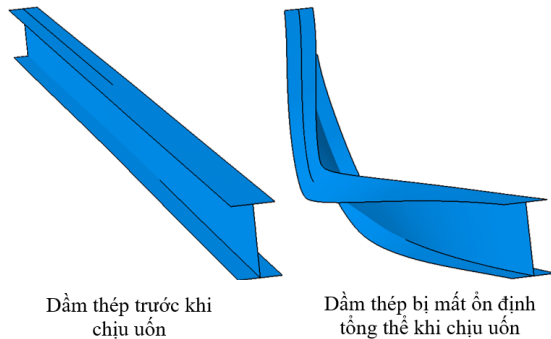
1. Giới thiệu

Dầm thép được sử dụng trong nhiều công trình xây dựng dân dụng và công nghiệp (Hình 1). Hai loại tiết diện dầm thép được dùng phổ biến tại Việt Nam là tiết diện chữ I cán nóng và tiết diện chữ I tổ hợp hàn hoặc bu-lông. So với tiết diện chữ I tổ hợp, tiết diện chữ I cán nóng có ưu điểm là được chế tạo sẵn trong nhà máy nên tiết kiệm chi phí và thời gian gia công, chất lượng đồng đều, không chịu ảnh hưởng của biến hình do hàn hay giảm yếu do liên kết bu lông khi chế tạo và dễ chống gỉ hơn. Tuy nhiên, dầm thép chữ I cán nóng có kích thước bị giới hạn do công nghệ chế tạo, trong khi đó, dầm thép chữ I tổ hợp có kích thước linh hoạt hơn. Ngoài ra hiện nay, tiết diện dầm thép thành mỏng cũng được sử dụng cho một số cấu kiện chịu mô-men uốn nhỏ như xà gồ.

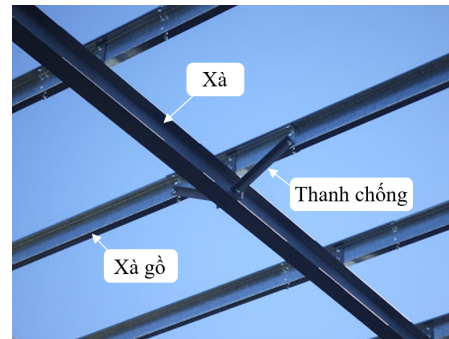
*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tungvs@nuce.edu.vn (Tùng, V. S.)



Hình 1. Một số ví dụ về ứng dụng của dầm thép



Hình 2. Ví dụ về dầm thép bị mất ổn định tổng thể



Hình 3. Thanh chống xà gỗ

Đối với dầm thép có nhịp lớn, phá hoại do mất ổn định tổng thể (Hình 2) thường xảy ra trước phá hoại gây ra do vật liệu đạt tới cường độ chảy dẻo [1]. Điều này có thể gây ra lãng phí vật liệu trong thiết kế dầm thép. Để giải quyết vấn đề này, theo tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tại Việt Nam TCVN 5575:2012 [2], việc thiết kế các điểm cố kết tại bản cánh chịu nén của dầm thép có thể làm giảm chiều dài tính toán (chiều dài mất ổn định) của dầm thép, từ đó, khả năng chống mất ổn định tổng thể của dầm thép được tăng rõ rệt. Các điểm cố kết này có thể được thiết kế bằng cách sử dụng các thanh giằng ngang (Hình 1). Trong TCVN 5575:2012 [2], giá trị chịu lực yêu cầu với thanh giằng không được đề cập. Trong tài liệu [1], mỗi thanh giằng cần chịu được lực bằng 2,5% giá trị lực nén trong bản cánh của dầm. Với dầm (xà) thép dùng trong khung thép nhà công nghiệp, các thanh chống xà gỗ (Hình 3) đóng vai trò là các điểm cố kết trong trường hợp tải trọng ngược chiều trọng lực (ví dụ: tải trọng gió bốc). Đối với trường hợp các dầm (xà) này chịu tải trọng theo chiều trọng lực, các điểm giằng dọc nhà đóng vai trò là điểm cố kết.

Hiện nay, trên thế giới, đã có nhiều nghiên cứu về ổn định tổng thể của dầm thép được thực hiện. Ví dụ, Dux và Kitipornchai [3] đã thực hiện các thí nghiệm uốn của dầm thép chữ I cán nóng với một hoặc hai vị trí được ngăn cản cả chuyển vị ngang và xoay. Trahair [4] nghiên cứu về ổn định tổng thể của dầm thép không có điểm ngăn cản chuyển vị ngang. Papangelis và cs. [5] đã lập chương trình PRFELB sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để xác định giá trị mô-men tới hạn M_{cr} của dầm thép trong khung. Bradford [6] nghiên cứu về ổn định của dầm thép có bản cánh chịu kéo bị ngăn cản chuyển vị ngang. Một số nghiên cứu [7, 8] khảo sát và đưa ra phương pháp thiết kế về ổn định tổng thể của dầm thép có gối đỡ liên tục. Ngoài ra, những năm gần đây, nhiều nghiên cứu [9–12] đã khảo sát về ổn định tổng thể của các dầm được làm từ vật liệu thép cường độ cao và đưa ra các phương pháp thiết kế phù hợp.

Tại Việt Nam, một số nghiên cứu về ổn định tổng thể của dầm thép đã được thực hiện trong những năm gần đây. Nghiên cứu [13] đã phân tích ổn định tổng thể của dầm thép chữ I một trục đối xứng chịu tải trọng ngang sử dụng hai lý thuyết ổn định khác nhau. Các nghiên cứu [14–16] đã khảo sát về khả năng chống mất ổn định tổng thể của dầm thép tổ hợp chữ I cánh rỗng và I hai bụng. Các nghiên cứu này cũng đưa ra các công thức tính đặc trưng hình học cho hai loại tiết diện trên. Gần đây, các nghiên cứu [17, 18] đã đánh giá về ảnh hưởng của sườn đầu dầm đến ổn định tổng thể của dầm thép dạng công-xôn, tiết diện chữ I. Các nghiên cứu [13–18] đều chưa đề cập đến ảnh hưởng của các điểm cố kết đến khả năng chịu uốn theo mất ổn định tổng thể của dầm thép.

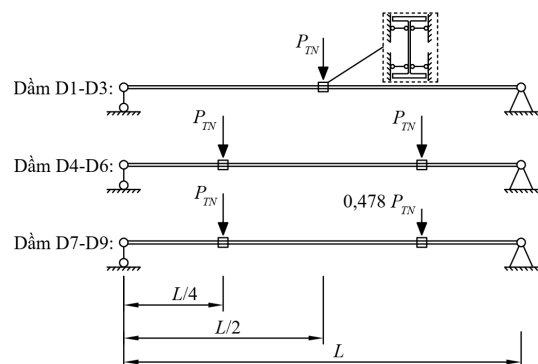
Trong TCVN 5575:2012 [2], chiều dài tính toán L_o của dầm thép được tính là khoảng cách giữa các điểm cố kết của cánh chịu nén không cho chuyển vị ngang. Lưu ý rằng chuyển vị xoắn của dầm thép tại các điểm này sẽ không được ngăn cản. Tuy nhiên, theo tài liệu [1], chiều dài tính toán của dầm được lấy theo khoảng cách giữa các điểm được ngăn cản cả chuyển vị ngang và xoắn. Bên cạnh đó, theo TCVN 5575:2012 [2], các thiết kế dầm thép có số vị trí được cố kết dọc chiều dài từ hai trở lên đều sử dụng chung một số công thức tính. Tuy nhiên, về mặt lý thuyết, khi số lượng điểm cố kết thay đổi thì hình dạng mất ổn định đàn hồi của dầm thép thay đổi, do đó, khả năng chịu lực của dầm cũng có thể bị ảnh hưởng. Ngoài ra, theo hiểu biết của nhóm tác giả, trong các nghiên cứu đã được công bố, ổn định tổng thể của dầm thép với nhiều điểm cố kết đặt tại cánh chịu nén và cánh chịu kéo chưa được đánh giá bằng phương pháp thí nghiệm hay mô phỏng phi tuyến. Do đó, nghiên cứu này thực hiện đánh giá ổn định tổng thể của các dầm thép có các điểm cố kết ngăn cản chuyển vị ngang và các dầm thép có các điểm cố kết ngăn cản chuyển vị ngang và xoắn, trong khi đó, các điều kiện kiểm tra khác của dầm thép như độ võng, khả năng chống cắt và ứng suất cục bộ được bỏ qua để giảm độ phức tạp trong thực hiện nghiên cứu.

Trong bài báo này, phương pháp và kết quả thí nghiệm dầm thép của Dux và Kitipornchai [3] và Xiong và cs. [12] được mô tả ngắn gọn. Dựa vào chúng, mô hình phần tử hữu hạn (Finite Element Modelling (FEM)) phi tuyến sẽ được xây dựng sử dụng phần mềm Abaqus/CAE [19]. Sau khi kiểm chứng độ tin cậy, mô hình này được dùng để khảo sát ổn định tổng thể của dầm thép chữ I có chiều dài, dạng tải trọng, số lượng và vị trí điểm cố kết thay đổi.

2. Thí nghiệm của Dux và Kitipornchai [3] về ổn định tổng thể của dầm thép

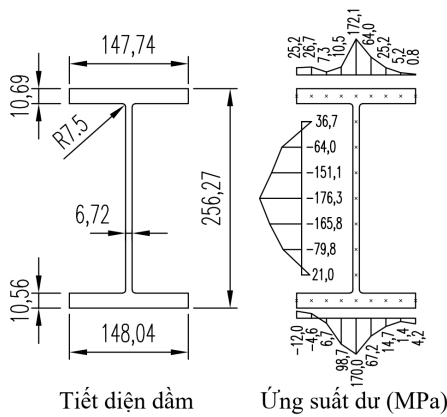
Dux và Kitipornchai [3] đã thực hiện 9 thí nghiệm uốn của dầm thép chữ I cán nóng với chiều dài của dầm thay đổi từ 5 đến 11 m. Về cơ bản, các thí nghiệm mô phỏng dầm chịu tải trọng tập trung tại một hoặc hai điểm. Tại mỗi điểm chất tải, bản bụng của dầm được ngăn cản cả chuyển vị ngang và xoắn. Sơ đồ đơn giản của các thí nghiệm, tiết diện dầm (với các kích thước trung bình) và phân bố ứng suất dư trên tiết diện dầm được mô tả như Hình 4 và 5. Chiều dài của dầm L , độ lớn sai số hình học tổng thể (độ cong ban đầu) δ_G và giá trị lực phá hoại P_{TN} được trình bày trong Bảng 1. Giá trị

cường độ tiêu chuẩn lấy theo giới hạn chảy của thép f_y của bản cánh và bản bụng tương ứng là 285,00 và 321,00 MPa, trong khi giá trị mô-đun đàn hồi E bằng $2,099 \times 10^5$ MPa. Giá trị hệ số Poisson



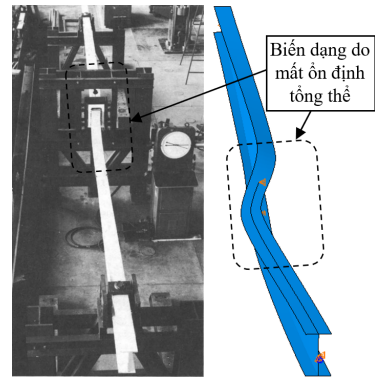
Hình 4. Sơ đồ thí nghiệm của Dux và Kitipornchai [3]

được giả thiết bằng 0,3. Hình 6 thể hiện biến dạng đặc trưng của các dầm thép D1-D3 (điểm cố kết tại giữa dầm).



Tiết diện dầm

Ứng suất dư (MPa)



Thí nghiệm

FEM

Hình 5. Tiết diện dầm D1-D9 trong thí nghiệm và phân bố ứng suất dư

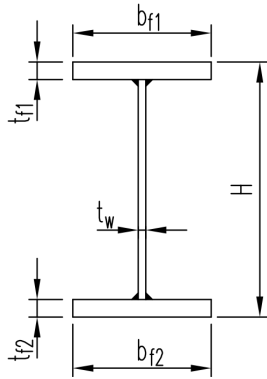
Hình 6. Biến dạng đặc trưng của các dầm D1-D3 trong thí nghiệm và FEM

Bảng 1. Một số thông số thí nghiệm của Dux và Kitipornchai [3]

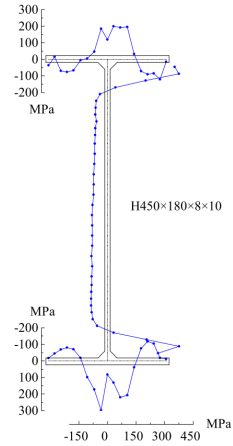
Kí hiệu dầm	L (m)	δ_G (mm)	P_{TN} (kN)
D1	11,00	1,10	47,10
D2	9,00	1,80	62,60
D3	8,00	2,00	71,00
D4	6,00	1,80	89,80
D5	5,00	1,50	107,00
D6	7,00	5,60	71,60
D7	7,00	3,50	92,80
D8	8,00	3,20	78,20
D9	9,00	6,30	67,20

3. Thí nghiệm của Xiong và cs. [12] về ổn định tổng thể của dầm thép

Trong các thí nghiệm của Xiong và cs. [12], 4 thí nghiệm được thực hiện với dầm thép D10-D13 được tổ hợp hàn từ thép cường độ cao Q460GJ, có tiết diện như Hình 7 và phân bố ứng suất dư như Hình 8, chiều dài L , các kích thước tiết diện và giá trị lực phá hoại P_{TN} được trình bày trong Bảng 2. Sơ đồ thí nghiệm của các dầm D10-D13 giống với sơ đồ thí nghiệm của các dầm D1-D3 trong thí nghiệm của Dux và Kitipornchai [3]. Các đặc trưng của vật liệu gồm có cường độ tiêu chuẩn lấy theo giới hạn chảy của thép f_y , cường độ tiêu chuẩn của thép theo sức bền kéo đứt f_u , mô-đun đàn hồi E , biến dạng tỷ đối tại giới hạn chảy ε_y và biến dạng tỷ đối tại giới hạn bền ε_u được thể hiện trong Bảng 3. Giá trị hệ số Poisson được giả thiết bằng 0,3. Các Hình 9 và 10 thể hiện biến dạng sau thí nghiệm và biểu đồ lực - độ võng giữa nhịp của dầm D13.



Hình 7. Tiết diện các dầm D10-D13



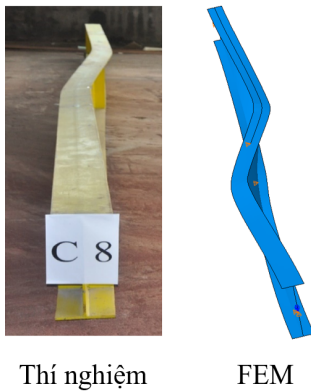
Hình 8. Phân bố ứng suất dư trong tiết diện dầm D10-D13

Bảng 2. Một số thông số thí nghiệm của các dầm D10-D13

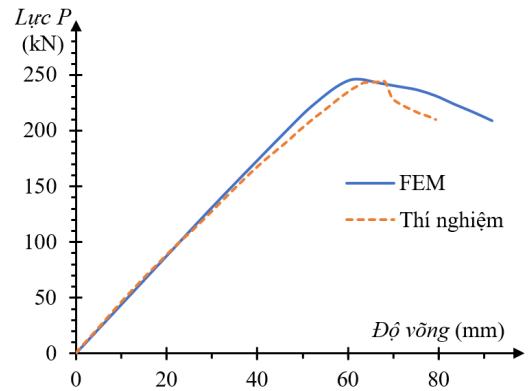
Kí hiệu dầm	L (m)	H (mm)	b_{f1} (mm)	b_{f2} (mm)	t_{f1} (mm)	t_{f2} (mm)	t_w (mm)	P_{TN} (kN)
D10	5,00	451,97	179,15	179,95	10,47	10,49	8,79	507,74
D11	6,00	451,17	180,85	179,15	10,40	10,35	8,90	387,17
D12	7,00	452,02	184,46	175,61	10,47	10,49	8,84	314,39
D13	8,00	448,18	180,90	180,53	10,47	10,47	8,38	243,61

Bảng 3. Một số thông số vật liệu của các dầm D10-D13

Vị trí	Chiều dày (mm)	E (GPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_y (%)	ε_u (%)
Bản bụng	8,00	204,74	541,00	669,00	1,33	9,67
Bản cánh	10,00	202,49	525,00	613,00	2,77	11,55



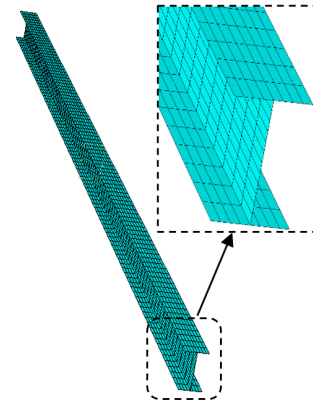
Hình 9. Biến dạng của dầm D13 trong thí nghiệm và FEM



Hình 10. Biểu đồ lực - độ võng giữa nhịp của dầm D13 trong thí nghiệm và FEM

4. Mô hình phần tử hữu hạn của dầm thép bị mất ổn định tổng thể

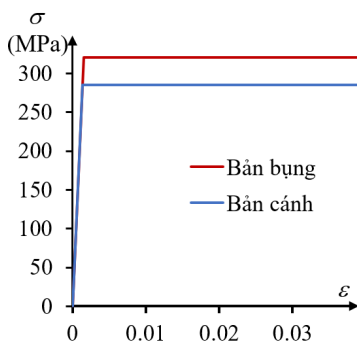
Mô hình phần tử hữu hạn trong nghiên cứu này được xây dựng sử dụng phần mềm Abaqus/CAE [19]. Tương tự [12], trong nghiên cứu này, bản cánh và bản bụng của dầm thép được mô phỏng bằng các phần tử tấm S4R quy ước đặt tại mặt trung bình của các bản. Phần tử tấm S4R có 4 nút (6 bậc tự do tại mỗi nút), 4 cạnh, sử dụng tích phân suy giảm và công thức biến dạng lớn [19]. So với việc sử dụng phần tử khối (ví dụ C3D4 và C3D8) và các phần tử có nhiều nút hơn (ví dụ S8, S9), phần tử S4R giúp làm giảm thời gian chạy mô hình trong khi vẫn đảm bảo tính chính xác của kết quả. Để đảm bảo kết quả mô phỏng được hội tụ trong khi thời gian chạy mô hình không quá lớn, kích thước chia lưới của phần tử được chọn là 20 mm trên tiết diện và 100 mm chạy dọc dầm. Hình 11 thể hiện kết quả chia lưới phần tử trong mô hình. Ngoài ra, bán kính cong hoặc kích thước đường hàn tại vị trí giao nhau giữa bản cánh và bản bụng được bỏ qua do ảnh hưởng của chúng đến các mô-đun chống uốn W_x và W_y của các tiết diện dầm đang xét là không đáng kể (nhỏ hơn 1%). Các phần tiếp theo trình bày các chi tiết khác của mô hình.



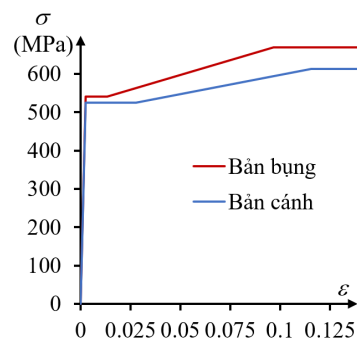
Hình 11. Chia lưới phần tử 20 mm × 100 mm

4.1. Đặc trưng vật liệu

Do hạn chế về thông tin vật liệu được mô tả trong thí nghiệm của Dux và Kitipornchai [3], mô hình đàn-dẻo tuyệt đối được sử dụng cho mô hình của các dầm D1-D9. Trong mô hình này, quan hệ ứng suất σ - biến dạng ε được mô tả thông qua giá trị E và f_y như Hình 12. Mô hình đàn-dẻo tuyệt đối không cần sử dụng giá trị f_u . Các giá trị fy trung bình (Mục 2) được dùng tương ứng với các bản cánh và bản bụng.



Hình 12. Quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu thép dầm D1-D9



Hình 13. Quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu thép dầm D10-D13 [12]

Đối với trường hợp của các dầm D10-D13, ban đầu, mô hình đàn-dẻo tuyệt đối cũng được sử dụng với các giá trị fy được lấy theo Bảng 3. Giá trị lực phá hoại thu được từ mô phỏng kí hiệu là P_{FEM} . Ngoài ra, P_{FEM*} là kết quả mô phỏng các dầm D10-D13 khi áp dụng mô hình vật liệu với quan hệ ứng suất - biến dạng phức tạp như trong Hình 13 (sử dụng E , f_y , f_u , ε_y và ε_u trong Bảng 3). Bảng 4

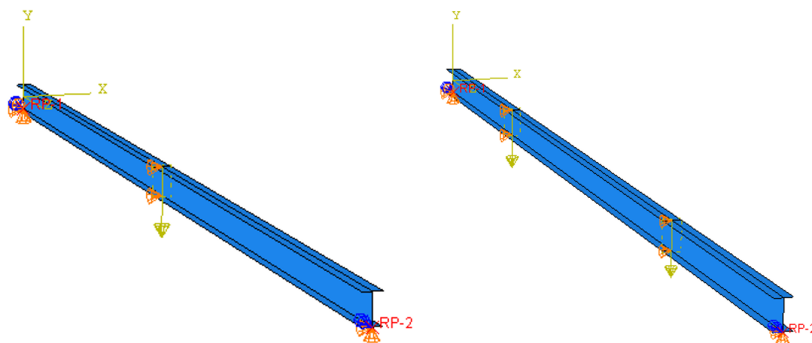
cho thấy giá trị P_{FEM} không chênh lệch nhiều so với giá trị P_{FEM*} với độ chênh lệch nhỏ hơn 1% và có xu hướng giảm khi chiều dài nhịp dầm tăng (hay ảnh hưởng do mất ổn định tổng thể tăng). Điều này cho thấy, mô hình đàn-dẻo tuyệt đối là tin cậy để mô phỏng ổn định tổng thể của dầm thép.

Bảng 4. So sánh P_{FEM} và P_{FEM*} đối với các dầm D10-D13

Dầm thép	P_{FEM} (kN)	P_{FEM*} (kN)	P_{FEM*} / P_{FEM}
D10	519,57	523,88	1,008
D11	400,70	402,24	1,004
D12	306,29	306,99	1,002
D13	245,63	245,91	1,001

4.2. Điều kiện biên và chất tải

Trong thí nghiệm, hai đầu của dầm thép được liên kết khớp với kết cấu đỡ. Do vậy, trong mô hình phần tử hữu hạn, điều kiện biên tương tự cũng được thiết lập (Hình 14). Đầu tiên, mỗi tiết diện đầu dầm được ràng buộc với điểm đại diện tương ứng (RP-1 hoặc RP-2) nằm tại tâm bản cánh dưới của mỗi đầu dầm thông qua “MPC beam constraint”. RP-1 được khai báo ngăn cản chuyển vị ngang, đứng và dọc trục (U_x , U_y và U_z) và chuyển vị xoắn (UR_z). RP-2 được khai báo giống RP-1 ngoại trừ không ngăn cản chuyển vị dọc trục (U_z). Tại vị trí được giằng của dầm, chuyển vị ngang của hai vị trí tiếp giáp bản bụng và bản cánh được khai báo ngăn cản (điểm cố kết). Việc này cũng làm ngăn cản chuyển vị xoắn của dầm thép tại vị trí giằng. Cuối cùng, tải trọng tập trung được khai báo trên bản cánh trên tại vị trí giằng.



Hình 14. Điều kiện biên và chất tải

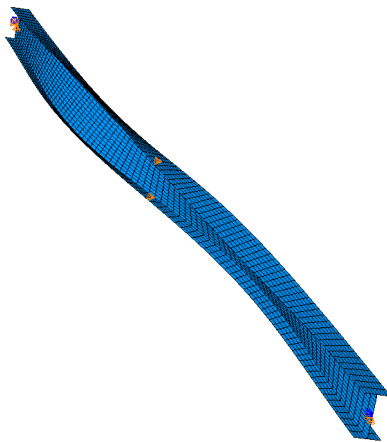
Trong thí nghiệm, các điểm cố kết không được đặt chính xác tại các vị trí tiếp giáp bản bụng và bản cánh, cụ thể là nằm trên bản bụng và cách bản cánh một khoảng nhỏ hơn 1/4 chiều cao tiết diện dầm (khoảng cách chính xác từ điểm cố kết đến bản cánh không được mô tả rõ trong các nghiên cứu [3, 12]). Bảng 5 cho thấy kể cả khi các điểm cố kết đặt tại 1/4 và 3/4 chiều cao tiết diện dầm, kết quả mô phỏng gần giống khi các điểm cố kết đặt tại các vị trí tiếp giáp bản bụng và bản cánh. Kết luận, các sai khác về vị trí điểm cố kết của mô hình so với thí nghiệm không ảnh hưởng nhiều đến kết quả mô phỏng.

Bảng 5. Ảnh hưởng của vị trí điểm cố kết của dầm thép đến P_{FEM}

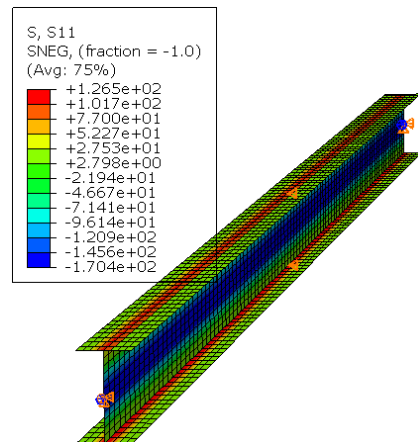
Dầm thép	P_{FEM} (kN) khi điểm cố kết đặt tại 1/4 và 3/4 chiều cao dầm	P_{FEM} (kN) khi điểm cố kết đặt tại vị trí tiếp giáp bản bụng và bản cánh
D1	52,47	52,47
D3	71,69	71,69
D5	107,26	107,43
D9	69,85	69,92
D11	399,76	399,72
D13	245,21	245,19

4.3. Sai số hình học và ứng suất dư

Quá trình chế tạo, vận chuyển và lắp đặt làm cho dầm thép có thể bị cong (sai số hình học tổng thể) và vênh (sai số hình học cục bộ). Ngoài ra, dầm thép cán nóng thường được sản xuất với nhiệt độ cao, quá trình làm nguội không đồng đều giữa các vùng trong tiết diện, từ đó sinh ra ứng suất dư. Với dầm thép tổ hợp hàn, ứng suất dư cũng được sinh ra do ảnh hưởng của nhiệt độ cao trong quá trình hàn. Theo [1], cả sai số hình học và ứng suất dư đều ảnh hưởng lớn đến khả năng chống mất ổn định tổng thể của dầm thép. Do vậy các yếu tố này cần được kể đến trong mô hình phân tử hữu hạn. Các sai số hình học cục bộ ít ảnh hưởng đến ổn định tổng thể của dầm thép, nên chúng được bỏ qua.



Hình 15. Mô hình của dầm D2 được khai báo sai số hình học tổng thể (sai số được phóng to 100 lần)



Hình 16. Mô hình của dầm D2 được khai báo ứng suất dư

Để khai báo sai số hình học tổng thể của dầm thép, các phân tích ổn định tuyến tính của dầm thép (với điều kiện biên khai báo như trên) được tiến hành đầu tiên. Dựa trên hình dạng mất ổn định tổng thể với “trị riêng (Eigenvalue)” dương đầu tiên, sai số hình học tổng thể được thêm vào mô hình phân tử hữu hạn như Hình 15. Độ lớn của sai số hình học δ_G của các dầm D1-D9 được lấy tương ứng trong Bảng 1, và δ_G của các dầm D10-D13 được lấy bằng $L/1000$ [12]. Tiếp theo, để khai báo ứng suất dư trên dầm thép, các thủ tục trong Abaqus “load $\Rightarrow$ predefined field $\Rightarrow$ mechanical $\Rightarrow$ stress” được áp dụng. Giá trị của ứng suất dư tại mỗi dải tiết diện (sau khi chia lưới) của dầm được lấy bằng ứng suất dư trung bình tại mỗi cặp điểm đo (tương ứng với mỗi dải) trong các Hình 5 (dầm D1-D9) và 8 (dầm D10-D13). Hình 16 thể hiện một tiết diện dầm sau khi khai báo ứng suất dư.

4.4. Phương pháp phân tích

Trong nghiên cứu này, phương pháp phân tích Static Riks được áp dụng. Theo [19], phương pháp này sử dụng độ lớn của lực như một biến, xử lý đồng thời lực và chuyển vị tại mỗi bước phân tích và không dùng các hệ số nhót hay hệ số bình ổn. Do đó, kết quả phân tích dùng Static Riks được đánh giá là đáng tin cậy. Để mô hình được chạy ổn định hơn với nhiều trường hợp dầm khác nhau, số bước tối đa (maximum number of increasements) được đặt là 1000, và giá trị ban đầu, nhỏ nhất, lớn nhất của mỗi bước tăng được đặt tương ứng là 0,01, 10^{-5} và 0,1.

4.5. Kiểm chứng độ tin cậy của mô hình

Bảng 6 cho thấy tỷ số giữa các giá trị lực phá hoại của các dầm D1-D13 dự đoán bằng mô hình phần tử hữu hạn P_{FEM} và kết quả thí nghiệm P_{TN} dao động trong khoảng 0,97 đến 1,11 (trung bình = 1,02 và hệ số biến thiên $COV = 0,03$). Các Hình 6 và 9 thể hiện sự tương đồng cao về hình dạng phá hoại của các dầm D1-D3 và D13 trong thí nghiệm và từ kết quả mô phỏng. Ngoài ra, Hình 10 thể hiện sự tương đồng cao giữa các đường cong lực - độ võng giữa nhịp của dầm D13 thu được từ thí nghiệm và mô phỏng. Kết luận, mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trong bài báo là đáng tin cậy cho mô phỏng ổn định tổng thể của dầm thép chữ I.

Bảng 6. So sánh các kết quả thu được từ thí nghiệm và mô phỏng

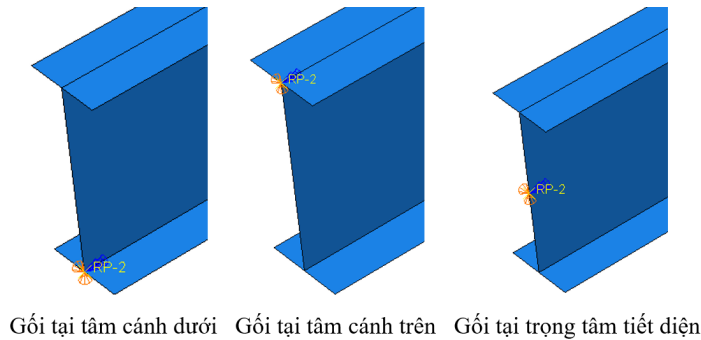
Kí hiệu dầm	P_{TN} (kN)	P_{FEM} (kN)	P_{FEM} / P_{TN}
D1	47,10	52,47	1,11
D2	62,60	63,92	1,02
D3	71,00	71,69	1,01
D4	89,80	87,91	0,98
D5	107,00	107,43	1,00
D6	71,60	73,28	1,02
D7	92,80	92,91	1,00
D8	78,20	80,00	1,02
D9	67,20	69,92	1,04
D10	507,74	518,34	1,02
D11	387,17	399,72	1,03
D12	314,39	305,64	0,97
D13	243,61	245,19	1,01
Trung bình			1,02
COV			0,03

5. Khảo sát ổn định tổng thể của dầm thép chữ I với nhiều điểm cố kết

5.1. Tiến hành

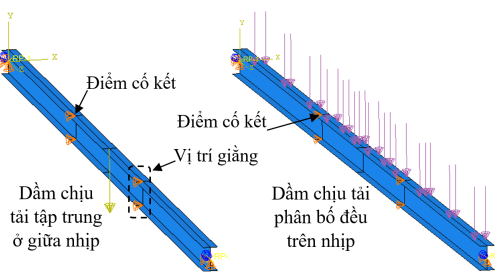
Trong thí nghiệm, các gối của dầm được đặt tại bản cánh dưới, tuy nhiên theo lý thuyết về ổn định tổng thể của dầm [1], các gối của dầm nên được đặt tại trọng tâm tiết diện. Để khảo sát ảnh hưởng của vị trí gối đến ổn định tổng thể của dầm thép chữ I, mô hình phần tử hữu hạn xây dựng ở Mục 4 được áp dụng, trong đó các điểm đại diện (RP-1 và RP-2) được đặt tại một trong ba vị trí: tâm cánh

dưới, trọng tâm tiết diện và tâm cánh trên của dầm (Hình 17). Các dầm D1, D3, D5, D9, D11 và D13 được sử dụng cho khảo sát này.

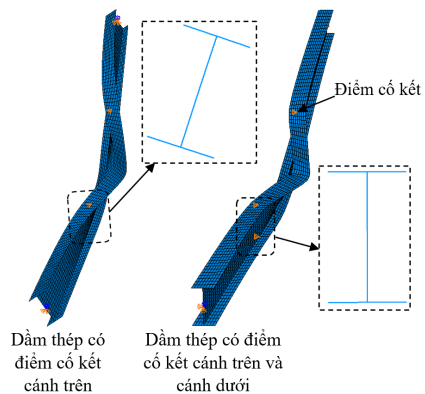


Hình 17. Khảo sát ảnh hưởng của vị trí gối của dầm

Mô hình phần tử hữu hạn nêu trên cũng được áp dụng để khảo sát ảnh hưởng của chiều dài nhịp, các điểm cố kết và dạng tải trọng đến ổn định tổng thể của dầm thép chữ I với tiết diện như Hình 5. Trong phần này, các gối được đặt tại trọng tâm tiết diện dầm theo lý thuyết và các điểm cố kết được đặt tại các vị trí tiếp giáp bản bụng và bản cánh. Tiếp theo, chiều dài nhịp L khảo sát của dầm được xét là 9, 18 và 27 m (độ mảnh $\lambda_{LT} \leq 3,07$ với cách tính được nêu trong [15, 16], thỏa mãn độ mảnh cho phép với cấu kiện chịu uốn: $\lambda_{LT} \leq 4,00$ [20]). Các vị trí giằng cách đều nhau dọc theo chiều dài của dầm với số lượng tăng từ 2 đến 9. Tải trọng tác dụng vào dầm thép gồm hai loại: tải trọng tập trung ở giữa nhịp và tải trọng phân bố (Pb.) đều (Hình 18). Trong hầu hết các trường hợp, tại mỗi vị trí giằng, các điểm cố kết được đặt tại cả cánh trên và cánh dưới của dầm để ngăn cản cả chuyển vị ngang và xoắn tại vị trí giằng. Một số trường hợp khác (Hình 19), tại mỗi vị trí giằng, các điểm cố kết chỉ đặt tại cánh trên (cánh chịu nén) của dầm, để so sánh với kết quả của các trường hợp nêu trên. Giá trị của sai số hình học tổng thể được lấy bằng 1/1000 của chiều dài dầm [20]. Các thành phần khác được áp dụng như trong Mục 4.



Hình 18. Dầm thép chịu hai loại tải trọng



Hình 19. So sánh biến dạng do mất ổn định tổng thể của dầm thép có điểm cố kết cánh trên và dầm thép có điểm cố kết cả cánh trên và dưới

5.2. Kết quả khảo sát

Theo Bảng 7, giá trị lực phá hoại P_{FEM} hầu hết đạt giá trị nhỏ nhất khi các gối nằm tại tâm bản cánh dưới và đạt giá trị lớn nhất khi các gối nằm tại tâm bản cánh trên. Tuy vậy, bảng này cho thấy sự chênh lệch về P_{FEM} giữa ba vị trí gối là không đáng kể (không lớn hơn 2%). Điều này có nghĩa là vị trí gối nằm ở bản cánh trên, bản cánh dưới hay trọng tâm tiết diện dầm không ảnh hưởng nhiều đến ổn định tổng thể của dầm thép chữ I.

Bảng 7. Ảnh hưởng của vị trí gối của dầm thép đến P_{FEM}

Dầm thép	P_{FEM} (kN) khi gối đặt tại tâm cánh dưới	P_{FEM} (kN) khi gối đặt tại tâm cánh trên	P_{FEM} (kN) khi gối đặt tại trọng tâm
D1	52,47	52,60	51,44
D3	71,69	71,84	71,76
D5	107,43	108,20	107,87
D9	69,92	70,24	70,08
D11	399,72	401,61	400,70
D13	245,19	246,05	245,63

Hình 19 cho thấy khi điểm cổ kết chỉ được đặt tại cánh chịu nén (cánh trên), dầm thép bị xoắn tại vị trí giằng khi dầm bị mất ổn định tổng thể. Trái lại, khi đặt điểm cổ kết tại cả cánh chịu nén (cánh trên) và cánh chịu kéo (cánh dưới), hiện tượng này không xảy ra. Điều này giải thích cho việc, trong Bảng 8, với 2 vị trí giằng, khả năng chịu uốn M_{FEM-2} của các dầm thép có bố trí điểm cổ kết tại cả cánh chịu nén và cánh chịu kéo lớn hơn đáng kể từ 4 đến 54% so với khả năng chịu uốn M_{FEM-1} của dầm thép có bố trí điểm cổ kết chỉ tại bản cánh chịu nén. Khi số vị trí giằng tăng lên, sự khác biệt giữa M_{FEM-2} và M_{FEM-1} giảm rõ rệt cho đến lúc hai giá trị này gần bằng nhau khi khoảng cách giữa các vị trí giằng hay chiều dài tính toán L_o nhỏ hơn 3 m.

Bảng 8 cho thấy với cùng bố trí các điểm cổ kết, khi dạng tải trọng thay đổi từ tải trọng tập trung ở giữa nhịp sang tải trọng phân bố đều, giá trị của M_{FEM-1} và M_{FEM-2} có thể tăng từ -17 đến 15%. Điều này cho thấy dạng tải trọng có thể ảnh hưởng đến ổn định tổng thể của dầm thép có nhiều vị trí giằng (hay nhiều điểm cổ kết). Tiếp theo, khi giá trị L_o giữ nguyên (ví dụ $L_o = 3$ m), khả năng chống mất ổn định tổng thể của dầm M_{FEM-1} và M_{FEM-2} có xu hướng giảm khi giá trị L tăng lên. Bên cạnh đó, tiết diện dầm thép đang xét thuộc tiết diện loại 1 theo EN1993-1-1 [20]. Do đó, khả năng chịu uốn theo điều kiện bền $M_{bên}$ của tiết diện dầm này được xác định theo [20] như sau: $M_{bên} = f_{y,min} \times W_{px} = 285,00 \times 478783,4576 \approx 136453285,4 \text{ Nmm} \approx 136,45 \text{ kNm}$. Ở đây, $f_{y,min}$ là giá trị nhỏ nhất giữa các giá trị f_y của bản cánh và bản bụng, và W_{px} là mô-đun chống uốn của tiết diện dầm đối với trục chính $x-x$ có kể đến sự phát triển của biến dạng dẻo. Bảng 8 cho thấy, khi số điểm cổ kết tăng lên (tức là chiều dài tính toán của dầm L_o giảm đi), khả năng chịu uốn của các dầm tăng lên và có xu hướng tiến tới giá trị $M_{bên}$. Trong bảng này, với các dầm có $L = 9$ m và các điểm cổ kết nằm tại cả bản cánh chịu nén và bản cánh chịu kéo, $M_{FEM-2} \approx M_{bên}$ (dầm gần như không bị mất ổn định tổng thể) khi $L_o \leq 3$ m. Tuy nhiên, với các dầm có $L = 18$ hay $L = 27$ m, M_{FEM-2} và M_{FEM-1} nhỏ hơn $M_{bên}$ rõ rệt khi $L_o \leq 3$ m. Vậy nên, ngoài chiều dài tính toán L_o , chiều dài nhịp L cũng ảnh hưởng đáng kể đến ổn định tổng thể của dầm thép.

Bảng 8. Khả năng chịu uốn của dầm thép chữ I có nhiều điểm cổ kết

L (m)	Số điểm cổ kết	L_o (m)	Tải trọng	M_{FEM-1} (kNm)	M_{FEM-2} (kNm)	M_{FEM-2} / M_{FEM-1}	$M_{bên} / M_{FEM-1}$	$M_{bên} / M_{FEM-2}$
9	2	3,00	Tập trung	108,76	127,84	1,18	1,25	1,07
9	3	2,25	Tập trung	140,15	140,75	1,00	0,97	0,97
18	2	6,00	Tập trung	52,99	74,39	1,40	2,58	1,83
18	3	4,50	Tập trung	99,26	101,78	1,03	1,37	1,34
18	4	3,60	Tập trung	-	101,50	-	-	1,34
18	5	3,00	Tập trung	109,74	109,99	1,00	1,24	1,24
18	7	2,25	Tập trung	118,34	122,97	1,04	1,15	1,11
27	2	9,00	Tập trung	34,17	52,49	1,54	3,99	2,60
27	3	6,75	Tập trung	65,20	74,14	1,14	2,09	1,84
27	4	5,40	Tập trung	-	74,28	-	-	1,84
27	5	4,50	Tập trung	71,73	84,24	1,17	1,90	1,62
27	7	3,375	Tập trung	96,89	97,51	1,01	1,41	1,40
27	8	3,00	Tập trung	-	96,31	-	-	1,42
27	9	2,70	Tập trung	98,24	98,41	1,00	1,39	1,39
9	2	3,00	Pb. đều	117,75	123,03	1,04	1,16	1,11
9	3	2,25	Pb. đều	126,79	127,11	1,00	1,08	1,07
18	2	6,00	Pb. đều	64,30	76,60	1,19	2,12	1,78
18	3	4,50	Pb. đều	86,40	88,63	1,03	1,58	1,54
18	4	3,60	Pb. đều	-	96,61	-	-	1,41
18	5	3,00	Pb. đều	96,16	96,83	1,01	1,42	1,41
18	7	2,25	Pb. đều	106,86	110,88	1,04	1,28	1,23
27	2	9,00	Pb. đều	40,23	55,31	1,37	3,39	2,47
27	3	6,75	Pb. đều	64,07	65,01	1,01	2,13	2,10
27	4	5,40	Pb. đều	-	72,52	-	-	1,88
27	5	4,50	Pb. đều	66,34	75,20	1,13	2,06	1,81
27	7	3,375	Pb. đều	88,06	88,10	1,00	1,55	1,55
27	8	3,00	Pb. đều	-	92,01	-	-	1,48
27	9	2,70	Pb. đều	93,06	93,08	1,00	1,47	1,47

6. Kết luận

Trong nghiên cứu này, ổn định tổng thể của dầm thép chữ I có nhiều điểm cổ kết đã được phân tích và khảo sát. Mô hình phần tử hữu hạn đáng tin cậy đã được xây dựng dựa trên kết quả thí nghiệm của một số tài liệu tham khảo. Các kết quả số sử dụng mô hình này cung cấp hiểu biết về ứng xử của dầm thép có nhiều điểm cổ kết khi bị mất ổn định tổng thể. Đầu tiên, vị trí gối nằm tại cánh trên, cánh dưới hay trọng tâm tiết diện của các dầm thép chữ I được chứng minh là không ảnh hưởng lớn đến ổn định tổng thể của các dầm này. Nghiên cứu này cũng chỉ ra điểm cổ kết tại bản cánh chịu kéo, dạng tải trọng và chiều dài nhịp dầm có thể ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chống uốn của những dầm này. Mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trong bài báo có thể được áp dụng cho các nghiên cứu về đánh giá các công thức thiết kế dầm thép trong các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép và phát triển các công thức hay phương pháp thiết kế mới tiện dụng và chính xác hơn.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn TS. Tuan Le, Đại học New South Wales đã trao đổi với nhóm về cách mô phỏng ứng suất dư của dầm thép.

Tài liệu tham khảo

- [1] Trahair, N. S., Bradford, M. A., Nethercot, D. A., Gardner, L. (2007). *The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3*. Taylor & Francis, NY, USA.
- [2] TCVN 5575:2012. *Kết cấu thép - Tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [3] Dux, P. F., Kitipornchai, S. (1983). *Inelastic beam buckling experiments*. *Journal of Constructional Steel Research*, 3(1):3–9.
- [4] Trahair, N. S. (1996). *Laterally unsupported beams*. *Engineering Structures*, 18(10):759–768.
- [5] Papangelis, J. P., Trahair, N. S., Hancock, G. J. (1998). *Elastic flexural–torsional buckling of structures by computer*. *Computers & Structures*, 68(1-3):125–137.
- [6] Bradford, M. A. (1998). *Inelastic buckling of I-beams with continuous elastic tension flange restraint*. *Journal of Constructional Steel Research*, 48(2-3):63–77.
- [7] Collin, P., Möller, M., Johansson, B. (1998). *Lateral-torsional buckling of continuous bridge girders*. *Journal of Constructional Steel Research*, 45(2):217–235.
- [8] Trahair, N. S. (2019). *Inelastic lateral buckling of continuous steel beams*. *Engineering Structures*, 190: 238–245.
- [9] Bradford, M. A., Liu, X. (2016). *Flexural-torsional buckling of high-strength steel beams*. *Journal of Constructional Steel Research*, 124:122–131.
- [10] Le, T., Bradford, M. A., Liu, X., Valipour, H. R. (2020). *Buckling of welded high-strength steel I-beams*. *Journal of Constructional Steel Research*, 168:105938.
- [11] Tankova, T., Rodrigues, F., Leitão, C., Martins, C., da Silva, L. S. (2021). *Lateral-torsional buckling of high strength steel beams: Experimental resistance*. *Thin-Walled Structures*, 164:107913.
- [12] Xiong, G., Kang, S.-B., Yang, B., Wang, S., Bai, J., Nie, S., Hu, Y., Dai, G. (2016). *Experimental and numerical studies on lateral torsional buckling of welded Q460GJ structural steel beams*. *Engineering Structures*, 126:1–14.
- [13] Cường, B. H. (2017). *Lý thuyết ổn định đàn hồi của dầm tiết diện chữ I có một trục đối xứng chịu tải trọng ngang*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 6(4):39–51.
- [14] Cuong, B. H., Tuyen, N. M., Cuong, N. Q. (2016). *Flexural-torsional buckling of mono-symmetrical I-section beam with hollow flange*. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE*, 10(5):11–18.
- [15] Tùng, V. S., Cường B., H. (2017). *Hiệu quả của dầm tổ hợp hàn tiết diện chữ I cánh rỗng*. *Tạp chí khoa học Kiến trúc & Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội*, (27):54–60.
- [16] Tùng, V. S., Cường, B. H. (2018). *Ổn định tổng thể của dầm thép với dạng tiết diện chữ I hai bụng tổ hợp hàn có hai trục đối xứng*. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 12 (4):51–57.
- [17] Cường, B. H. (2019). *Ảnh hưởng của sườn đầu dầm đến mômen tới hạn của dầm công xôn tiết diện chữ I*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 13(5V):20–27.
- [18] Khanh, T. D., Tuyen, N. M., Cuong, B. H. (2021). *Effects of end-plate on the critical moment of I-section cantilever beam with free end restrained laterally*. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(1):102–109.
- [19] ABAQUS. *Analysis user's manual-version 2019*. ABAQUS Inc, USA.
- [20] EN1993-1-1 (2005). *Eurocode 3 design of steel structures*. General rules and rules for buildings.