

Ảnh hưởng của giằng ngang tại thanh cánh chịu kéo đến ổn định tổng thể của giàn thép phẳng

Effects of lateral bracings at tension chord on the overall buckling of planar steel truss

Vy Sơn Tùng⁽¹⁾, Nguyễn Như Hoàng⁽²⁾

Tóm tắt

Giàn thép phẳng chịu uốn được ứng dụng trong nhiều công trình nhà dân dụng, công nghiệp và công trình giao thông. Hiện nay, có ít nghiên cứu được thực hiện về khả năng chống mất ổn định tổng thể của giàn thép phẳng chịu uốn. Trong nghiên cứu này, các mô hình phần tử hữu hạn ổn định tuyến tính và phân tích phi tuyến (sử dụng phần tử thanh) của giàn thép phẳng chịu các lực tập trung tại các nút giàn được lập. Các mô hình này có thể xác định giá trị của lực tác dụng tới hạn (Pcr) và quan hệ lực - biến dạng của giàn thép. Để kiểm chứng độ tin cậy của các mô hình này, kết quả thu được từ chúng được so sánh với kết quả thu được từ các thí nghiệm trong một nghiên cứu đã được công bố trước đây về khả năng chống mất ổn định tổng thể của giàn thép phẳng sử dụng thanh giàn tiết diện hộp vuông rỗng (SHS). Cuối cùng, dựa trên các mô hình phần tử hữu hạn đã lập, nghiên cứu này chỉ ra rằng các giằng ngang tại thanh cánh chịu kéo có thể ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chống mất ổn định tổng thể của giàn thép phẳng.

Từ khóa: Giàn thép phẳng, Ổn định tổng thể, Lực tới hạn, Giằng ngang

Abstract

Planar steel trusses have been used for many civil and industrial buildings, as well as transportation infrastructures. Currently, few research studies have been conducted on the bending resistance for the overall buckling of planar steel trusses. In this research, finite element models for linear buckling and nonlinear analysis (based on the beam element) of planar steel trusses subjecting to concentrated loads at their nodes were developed. These models could be used to determine the critical loads (Pcr) and the load-displacement relations of the trusses.

To verify the reliability of these models, their predicted results were compared with the results obtained from a test series of planar steel trusses made of square hollow sections (SHS) in an earlier publicized research study. Finally, based on the developed finite element models, this research indicates that the effects of lateral bracings at tension chords on the overall buckling of planar steel trusses could be considerable.

Key words: Planar steel truss, Overall buckling, Critical load, Lateral bracings

(1) ThS, Giảng viên, Khoa XDDD&CN,
Trường Đại Học Xây Dựng Hà Nội,
Email: <tungvs@huce.edu.vn>

(2) ThS, Giảng viên, Khoa XDDD&CN,
Trường Đại Học Xây Dựng Hà Nội,
Email: <hoangnm@huce.edu.vn>

Ngày nhận bài: 24/03/2022

Ngày sửa bài: 14/04/2022

Ngày duyệt đăng: 5/7/2022

1. Giới thiệu

Với nhiều ưu điểm như khối lượng kết cấu nhẹ, thi công nhanh và có thể vượt nhịp lớn, giàn thép phẳng được sử dụng phổ biến cho nhà dân dụng, công nghiệp và công trình giao thông. Hình 1 trình bày một số ví dụ về ứng dụng của giàn thép phẳng. Các tiết diện được dùng phổ biến cho các thanh của giàn thép phẳng là tiết diện cán nóng hoặc tổ hợp hàn dạng chữ H, hộp rỗng và góc. Ngoài ra, trong những năm gần đây, tiết diện cán nguội dạng chữ U và C cũng được sử dụng để làm giàn thép phẳng đỡ mái.

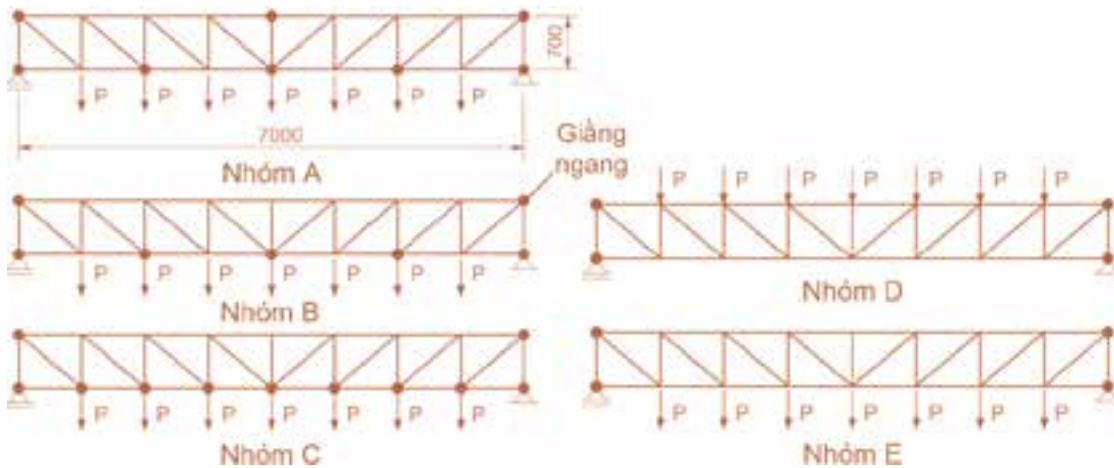
Khi bố trí khoảng cách giữa các giằng ngang không hợp lý, giàn thép phẳng nhịp lớn có thể bị phá hoại do mất ổn định tổng thể trước khi vật liệu của giàn thép đạt tới giá trị cường độ chảy dẻo. Điều này có thể gây ra lãng phí vật liệu trong thiết kế giàn thép phẳng. Trong các hướng dẫn thiết kế ở Việt Nam [1-3], khi thiết kế giàn thép phẳng, điều kiện ổn định tổng thể của giàn được đảm bảo thông qua kiểm tra điều kiện ổn định tổng thể của thanh cánh chịu nén. Phương pháp này thiên về an toàn, tuy nhiên, không kể đến sự đóng góp của các thanh bụng, cũng như các giằng ngang tại thanh cánh chịu kéo đến khả năng chống mất ổn định tổng thể của giàn thép phẳng. Ngoài ra, chiều dài tính toán ngoài mặt phẳng của thanh cánh chịu nén được lấy bằng khoảng cách giữa các điểm giằng ngang, và chiều dài tính toán trong mặt phẳng của thanh cánh này được lấy bằng khoảng cách giữa các nút giàn. Giá trị của các chiều dài tính toán này được lấy thiên về an toàn và có thể không đúng với giá trị thật của chúng.

Số lượng các nghiên cứu về ổn định tổng thể của giàn thép phẳng còn khá hạn chế. Jankowska-Sandberg và Kolodziej [4] đã tiến hành các thí nghiệm đối với các giàn thép phẳng sử dụng tiết diện hộp vuông rỗng (SHS) bị mất ổn định tổng thể khi chịu uốn. Các kết quả thí nghiệm được đối chiếu với kết quả dự đoán từ mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trước đó trong nghiên cứu [5]. Dựa vào kết quả thí nghiệm, Jankowska-Sandberg và Kolodziej [4] kết luận rằng ổn định của giàn thép phẳng phụ thuộc vào vị trí đặt lực, khoảng cách và độ cứng của các giằng ngang và độ cứng của thanh bụng. Ngoài ra, với các giàn thép phẳng được thí nghiệm, chiều dài tính toán ngoài mặt phẳng của thanh cánh chịu nén nhỏ hơn khoảng cách giằng ngang 30-80% [4]. Krajewski và Iwicki [6] đã khảo sát ảnh hưởng của độ cứng của giằng ngang đến ổn định tổng thể của giàn thép phẳng. Sau đó, từ kết quả chạy mô hình phần tử hữu hạn, Krajewski và Iwicki [7] đã cho thấy ảnh hưởng đáng kể của độ cứng của giằng ngang tại các nút của thanh cánh trên (chịu kéo) đến ổn định tổng thể của giàn thép phẳng chịu tải trọng gió bốc. Tại Việt Nam, ngoài một số tài liệu thiết kế [1-3], cho đến hiện tại, chưa có nghiên cứu nào được thực hiện về ổn định tổng thể của giàn thép phẳng.

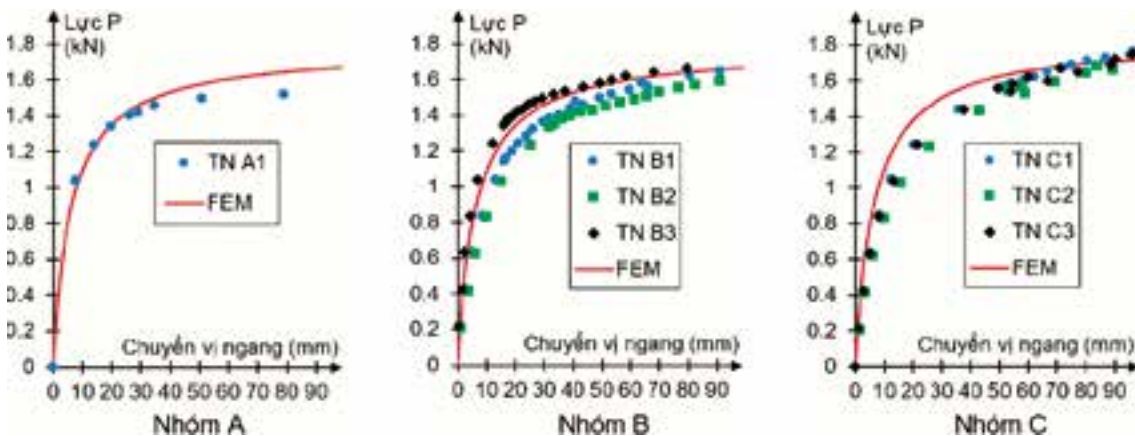
Nghiên cứu này khảo sát về ổn định tổng thể của giàn thép phẳng có kể đến ảnh hưởng của việc bố trí giằng ngang tại thanh cánh chịu kéo. Đầu tiên, nội dung của các thí nghiệm về ổn định tổng thể của giàn thép phẳng thực hiện ở [4] được trình bày ngắn gọn. Dựa trên các thí nghiệm này, mô hình phần tử hữu hạn (FEM) ổn định tuyến tính (linear buckling) và phân tích



Hình 1: Một số ứng dụng của giàn thép phẳng



Hình 2: Sơ đồ thí nghiệm của Jankowska-Sandberg và Kołodziej [4]

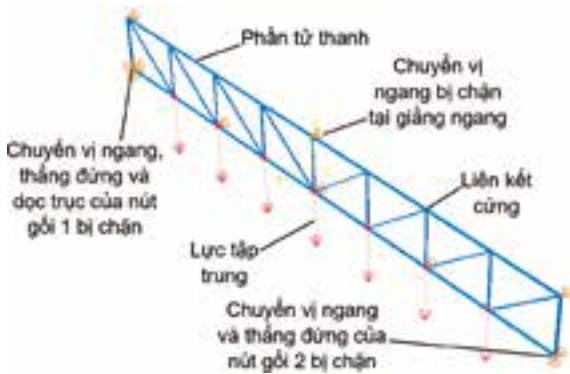


Hình 3: Đường cong P-δ của một số thí nghiệm [4]

phi tuyến (nonlinear analysis) được lập. Độ tin cậy của các mô hình này được xác nhận bằng cách so sánh kết quả mô phỏng với kết quả thu được từ các thí nghiệm. Sau đó, các mô hình này được sử dụng để đánh giá ổn định tổng thể của một giàn thép phẳng được thiết kế theo các trường hợp: không có giằng ngang, có giằng ngang tại thanh cánh chịu kéo, có giằng ngang tại thanh cánh chịu nén, và có giằng ngang tại cả thanh cánh chịu kéo và thanh cánh chịu nén.

2. Thí nghiệm về ổn định tổng thể của giàn thép phẳng [4]

Jankowska-Sandberg và Kołodziej [4] đã tiến hành 14 thí nghiệm với các giàn thép phẳng nhịp 7m. Thiết kế của các giàn thép phẳng này được thể hiện như Hình 2. Các thí nghiệm được chia thành 5 nhóm (A, B, C, D và E) và được phân biệt dựa theo cách bố trí giằng ngang và tải trọng. Tiết



Hình 4: Mô hình phần tử hữu hạn của giàn thép phẳng A1

diện của thanh cánh trên, thanh cánh dưới và thanh bụng đầu giàn là SHS 25×25×2 (chiều dày $t = 2,259\text{mm}$, mô-đun đàn hồi khi chịu kéo $E = 208,07\text{ GPa}$ và mô-đun đàn hồi khi chịu cắt $G = 80,02\text{ GPa}$), trong khi đó, tiết diện của các thanh bụng còn lại là SHS 20×20×2 ($t = 2,315\text{mm}$, $E = 210,83\text{GPa}$ và $G = 81,09\text{GPa}$). Do các thí nghiệm được tiến hành đến trước thời điểm giàn thép phẳng bị phá hoại, nên giá trị cường độ chảy dẻo f_y của vật liệu không có nhiều ý nghĩa. Giá trị lực tác dụng tới hạn $P_{cr,TN}$ được xác định thông qua quan hệ giữa lực tác dụng P và biến dạng ngang lớn nhất δ (phương pháp Southwell). Quan hệ $P-\delta$ và giá trị của $P_{cr,TN}$ thu được từ các thí nghiệm (TN) được thể hiện trong Hình 3 và Bảng 1.

3. Các mô hình phần tử hữu hạn

3.1. Mô hình phần tử hữu hạn ổn định tuyến tính

Mô hình phần tử hữu hạn ổn định tuyến tính của giàn thép phẳng được lập dựa trên phần mềm Abaqus/CAE [8] và được mô tả như Hình 4. Do các thanh giàn trong các thí nghiệm của Jankowska-Sandberg và Kołodziej [4] không bị mất ổn định cục bộ, phần tử thanh (beam element) được sử dụng để mô phỏng các thanh giàn để giảm thời gian chạy mô hình. Liên kết giữa các thanh giàn là liên kết hàn, do vậy, liên kết giữa chúng trong mô hình được mô tả là liên kết cứng. Để mô phỏng các gối tựa và giằng ngang của giàn

Bảng 1: Giá trị lực tác dụng tới hạn thu được từ thí nghiệm và mô phỏng

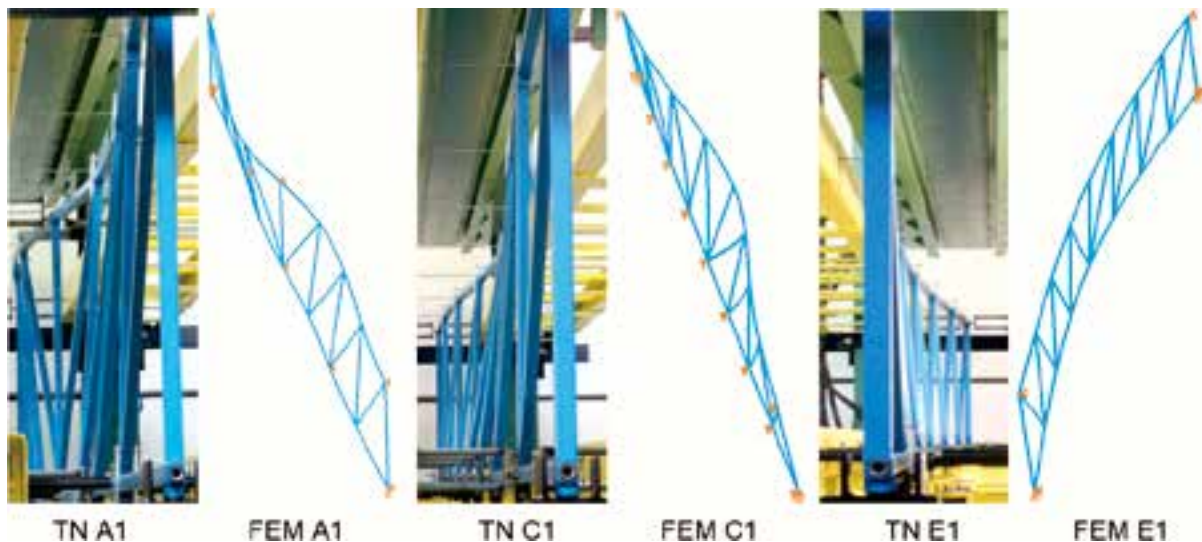
Nhóm thí nghiệm	Giàn thép	$P_{cr,TN}$ (kN)	$P_{cr,FEM}$ (kN)	$P_{cr,FEM} / P_{cr,TN}$
A	A1	1,56	1,77	1,13
	A2	1,60	1,77	1,11
	A3	1,60	1,77	1,11
B	B1	1,80	1,77	0,98
	B2	1,78	1,77	0,99
	B3	1,74	1,77	1,02
C	C1	1,92	1,86	0,97
	C2	1,90	1,86	0,98
	C3	1,89	1,86	0,99
D	D1	0,48	0,54	1,12
	D2	0,48	0,54	1,12
	D3	0,48	0,54	1,12
E	E1	0,56	0,63	1,12
	E2	0,61	0,63	1,03
Trung bình				1,06
Hệ số biến thiên				0,06

thép phẳng, các chuyển vị của các nút giàn tương ứng được khai báo bị ngăn cản như Hình 4. Ngoài ra, các lực tập trung $P = 1\text{ kN}$ cũng được đặt tại các nút giàn tương ứng với tải trọng của mỗi nhóm giàn được mô tả trong Hình 2. Tiết diện của các thanh giàn, các giá trị E và G mô tả trong Mục 2 được dùng để thiết lập các mô hình. Để tìm ra giá trị lực tác dụng tới hạn $P_{cr,FEM}$, thuật giải Buckle được sử dụng.

Để xác định giá trị lực tác dụng tới hạn $P_{cr,FEM}$ trong Bảng 1, giá trị của trị riêng (Eigenvalue) dương đầu tiên của mô hình ổn định tuyến tính (xác định bởi phần mềm Abaqus/CAE) được nhân với $P = 1\text{ kN}$. Biến dạng của giàn tương ứng với trị riêng này chính là dạng mất ổn định tổng thể của giàn.

3.2. Mô hình phần tử hữu hạn dùng cho phân tích phi tuyến

Phân tích phi tuyến (nonlinear analysis) là loại phân tích mà quan hệ phi tuyến giữa lực tác dụng và chuyển vị của kết



Hình 5: Biến dạng do mất ổn định tổng thể của giàn thép phẳng A1, C1 và E1

cấu được xét. Phân tích phi tuyến thường kê đến phi tuyến hình học, phi tuyến vật liệu và tương tác giữa các phần tử trong kết cấu. Mô hình phần tử hữu hạn dùng cho phân tích phi tuyến (gọi tắt là mô hình phân tích phi tuyến) cũng được lập trong nghiên cứu này để dự đoán đường cong P- δ của các giàn thép phẳng (Hình 3). Các đường cong P- δ này có thể dùng để kiểm tra lại giá trị $P_{cr,FEM}$ như đã nói ở Mục 2. Nếu khai báo thêm giá trị cường độ chảy dẻo f_y của vật liệu, mô hình này có thể xác định khả năng chịu lực tối đa P_{max} của giàn thép phẳng. Mô hình này cũng được lập như Mục 3.1, tuy nhiên, thuật giải Static, Riks và phi tuyến hình học (NLgeom) được sử dụng. Khuyết tật hình học tổng thể (global imperfection) được thêm vào mô hình phân tích phi tuyến dựa theo biến dạng của giàn tại trị riêng dương nhỏ nhất, và có giá trị bằng nhịp giàn/ 1000 = 7mm.

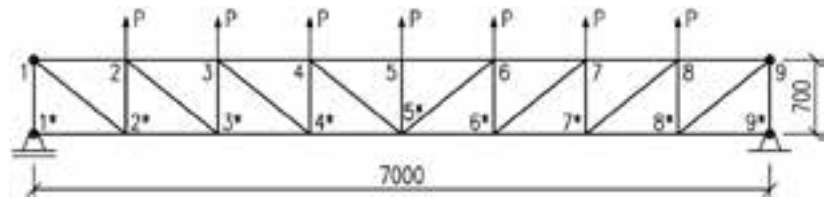
3.3. Kiểm tra độ tin cậy của các mô hình

Hình 5 cho thấy biến dạng của các giàn thép phẳng nhóm A, C và E thu được từ thí nghiệm và mô hình phân tích phi tuyến có sự tương đồng cao. Ngoài ra, sự tương đồng cao giữa các giá trị $P_{cr,TN}$ và $P_{cr,FEM}$ và giữa các đường cong P- δ thu được từ thí nghiệm và các mô hình (ổn định tuyến tính và phân tích phi tuyến) cũng được thể hiện trong Bảng 1 và Hình 3. Kết luận, các mô hình được lập trong nghiên cứu này là đáng tin cậy để dự đoán sự mất ổn định tổng thể trong giai đoạn đàn hồi (elastic buckling) của giàn thép phẳng.

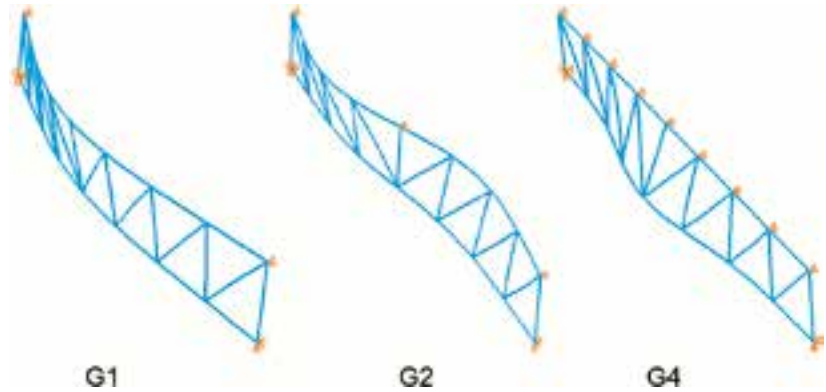
4. Khảo sát ảnh hưởng của giằng ngang tại thanh cánh chịu kéo đến ổn định tổng thể của giàn thép phẳng

Các mô hình được lập trong Mục 3 được sử dụng để khảo sát một giàn thép phẳng chịu tải trọng gió bắc (Hình 6). Các tiết diện thanh giàn và điều kiện biên tại nút gó được lấy theo mô tả trong Mục 2. Ngoài ra, chuyển vị ngang của các nút giàn 1 và 9 được ngăn cản vì có các giằng ngang. Đầu tiên, giá trị lực tác dụng tới hạn ($P_{cr,FEM}$) của trường hợp giàn thép đang xét không có thêm giằng ngang sẽ được so sánh với $P_{cr,FEM}$ của trường hợp giàn thép đang xét có thêm giằng ngang tại nút 5, hoặc các nút 3, 5 và 7, hoặc các nút 2-8 của thanh cánh trên (chịu kéo). Sau đó, $P_{cr,FEM}$ của trường hợp giàn thép đang xét có thêm giằng ngang tại nút 5*, hoặc các nút 3*, 5* và 7*, hoặc các nút 2*-8* trên thanh cánh dưới (chịu nén) sẽ được so sánh lần lượt với $P_{cr,FEM}$ của trường hợp giàn thép đang xét có thêm giằng ngang tại các nút 5 và 5*, hoặc các nút 3, 5, 7, 3*, 5* và 7*, hoặc các nút 2-8 và 2*-8* của cả thanh cánh chịu kéo và thanh cánh chịu nén.

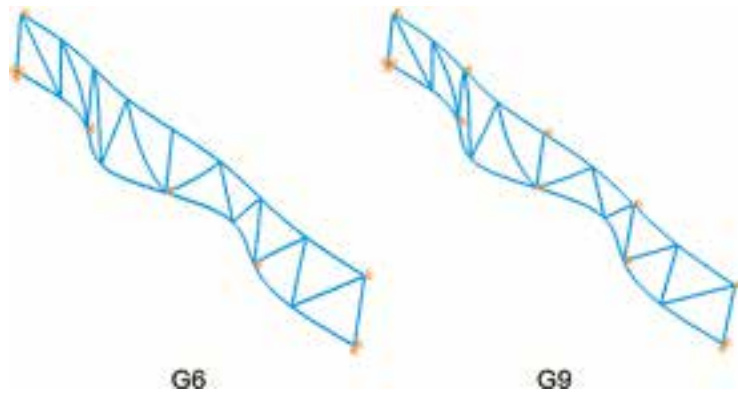
Hình 7 thể hiện dạng mất ổn định tổng thể của các trường hợp giàn thép phẳng không có giằng ngang tại thanh cánh dưới (chịu nén). Hình 7 cũng cho thấy sự bổ sung giằng ngang tại các nút của thanh cánh trên (chịu kéo) làm thay đổi dạng mất ổn định thể của giàn thép phẳng đang xét. Ngược lại, theo Hình 8, sự bổ sung giằng ngang tại các nút của thanh cánh trên không làm thay đổi dạng mất ổn định tổng



Hình 6: Sơ đồ thanh và điều kiện biên tại gó của giàn thép được khảo sát



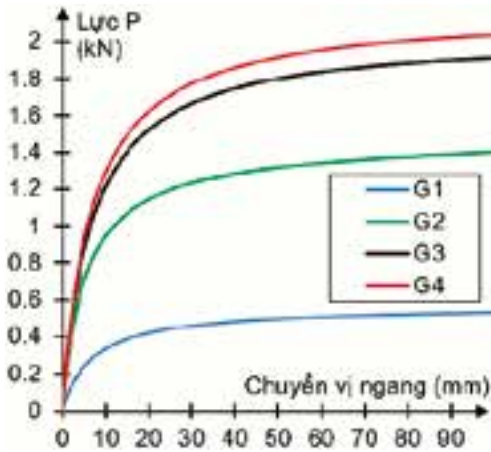
Hình 7: Dạng mất ổn định của giàn thép trong các trường hợp G1, G2 và G4



Hình 8: Dạng mất ổn định của giàn thép trong các trường hợp G6 và G9

thể của giàn thép phẳng đã được bố trí giằng ngang tại các nút tương ứng của thanh cánh dưới.

Bảng 2 cho thấy khi số lượng nút giàn được bố trí giằng ngang tăng lên, giá trị lực tác dụng tới hạn ($P_{cr,FEM}$) của giàn thép phẳng đang xét cũng được tăng lên. Khi bố trí giằng ngang như các trường hợp G2-G4, giá trị $P_{cr,FEM}$ của giàn thép phẳng này tăng rõ rệt từ 156 đến 287% so với khi bố trí giằng ngang như trường hợp G1. Bên cạnh đó, Hình 9 cho thấy với cách bố trí giằng ngang như các trường hợp G2-G4, độ cứng tổng thể của giàn thép này cũng được tăng đáng kể so với trường hợp G1. Bảng 2 cũng cho thấy, khi bố trí giằng ngang tại thanh cánh chịu nén (các trường hợp G6-G7), giá trị $P_{cr,FEM}$ tăng từ 41 đến 218% khi so với các trường hợp G3-G4. Ngoài ra, khi giàn thép phẳng đã được bố trí giằng ngang tại thanh cánh chịu nén (trường hợp G5-G7), việc bố trí thêm giằng ngang tại thanh cánh chịu kéo (trường hợp G8-G10) không có hiệu quả đáng kể (nhỏ hơn 2%). Trường hợp G2, G5 và G8 cho giá trị $P_{cr,FEM}$ gần giống nhau. Điều này cho thấy đối với giàn thép phẳng đang xét, giằng ngang tại nút giàn giữa nhịp của thanh cánh chịu kéo có hiệu quả gần giống với giằng ngang tại nút giàn giữa nhịp của thanh cánh chịu nén.



Hình 9: Đường cong P- δ của các trường hợp G1-G4 thu được từ mô hình phân tích phi tuyến

5. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày tóm tắt các thí nghiệm của Jankowska-Sandberg và Kołodziej [4] về ổn định tổng thể của giàn thép phẳng. Dựa trên bố trí và kết quả của các thí nghiệm này, các mô hình phân tử hữu hạn ổn định tuyến tính và phân tích phi tuyến được lập và kiểm chứng độ tin cậy. Sử dụng các mô hình này, một số khảo sát về ảnh hưởng của giằng ngang đến ổn định tổng thể của giàn thép phẳng đã được thực hiện. Kết quả khảo sát cho thấy giằng ngang tại các nút giàn của thanh cánh chịu kéo có ảnh hưởng đáng

Bảng 2: Khảo sát ảnh hưởng của giằng ngang đến Pcr,FEM

Trường hợp	Nút giàn có thêm giằng ngang	Pcr,FEM (kN)
G1	-	0,567
G2	5	1,450
G3	3, 5 và 7	2,057
G4	2-8	2,193
G5	5*	1,450
G6	3*, 5* và 7*	2,897
G7	2*-8*	6,982
G8	5 và 5*	1,450
G9	3, 5, 7, 3*, 5* và 7*	2,905
G10	2-8 và 2*-8*	7,128

kể đến ổn định tổng thể của giàn thép phẳng khi không bố trí giằng ngang tại các nút giàn của thanh cánh chịu nén. Tuy nhiên, ảnh hưởng của giằng ngang tại các nút giàn của thanh cánh chịu kéo là không đáng kể khi các nút giàn tương ứng của thanh cánh chịu nén đã được bố trí giằng ngang. Từ nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ xây dựng phương pháp tính toán về khả năng chịu lực của giàn thép không sử dụng hệ số chiều dài tính toán của các thanh giàn, và đề xuất cách bố trí hợp lý cho hệ giằng ngang của giàn thép phẳng trong các nghiên cứu tiếp theo./

Tài liệu tham khảo

1. P. V. Hội, N. Q. Viên, P. V. Tư và L. V. Tường. *Kết cấu thép - Cấu kiện cơ bản*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2006.
2. P. V. Hội, N. Q. Viên, P. V. Tư, Đ. N. Tranh và H. V. Quang. *Kết cấu thép - Công trình dân dụng và công nghiệp*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 1998.
3. Đ. Đ. Kiến, P. V. Tư và N. Q. Viên. *Thiết kế kết cấu thép nhà công nghiệp*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2005.
4. J. Jankowska-Sandberg and J. Kołodziej. *Experimental study of steel truss lateral-torsional buckling*. *Engineering Structures*, Vol. 46, 165-172, 2013.
5. J. Jankowska-Sandberg. *Analysis of elastic lateral buckling of steel truss with consideration of stiffness lateral braces of compression chord* (In Polish). *Inżynieria i Budownictwo*, Vol. 5, 264-266, 2006.
6. M. Krajewski and P. Iwicki. *Analysis of brace stiffness influence on stability of the truss*. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 20, 97-108, 2015.
7. M. Krajewski and P. Iwicki. *Stability of a truss under upward wind loading*. *Recent Progress in Steel and Composite Structures - Proceedings of the 13th International Conference on Metal Structures*, 417-424, 2016.
8. ABAQUS 2019. Dassault Systèmes, Providence, RI, USA, 2019.

Tính toán khả năng chịu lực của cột liên hợp thép- bê tông...

(tiếp theo trang 37)

Với giá trị trong bảng hoàn toàn có thể xây dựng biểu đồ quan hệ giữa khả năng chịu lực (lực dọc giới hạn) của cột sau một thời gian cháy nhất định như Hình 4.

Kiểm tra lực tác dụng $N_{fi,Ed} = 1747,2kN$ có thể thấy các cột cao từ 2,7 đến 3,6 m chỉ chịu được thời gian cháy đến khoảng 70-78 phút. Từ thời gian 80 đến 120 phút cột đã không đủ khả năng chịu lực (khả năng chịu lực – chữ nghiêng màu đỏ trong bảng nhỏ hơn lực tác dụng).

4. Nhận xét và kiến nghị

Bài báo giới thiệu cách xác định khả năng chịu lực của cột liên hợp thép- bê tông trong điều kiện cháy theo phương pháp đơn giản hóa được đề cập trong tiêu chuẩn EC4.

Với phương pháp này hoàn toàn có thể khảo sát ảnh hưởng của chiều dài (độ mảnh cột) cũng như thời gian cháy đến lực dọc giới hạn của cột. Từ đó có thể kiểm tra khả năng chịu lực của cột tại một thời điểm cháy nhất định. Đồng thời

cũng có thể chọn lựa tiết diện thích hợp với yêu cầu thiết kế chịu lửa nhất định./

Tài liệu tham khảo

1. EN 1993-1-1, "Design of steel structures," in Part 1-1: General rules and rules for buildings, European committee for Standardization, 2005
2. EN 1994-1-1, "Design of composite steel and concrete structures," in Part 1-1: General rules and rules for buildings, European committee for standardizations, 2004.
3. EN 1994-1-2, "Design of composite steel and concrete structures," in Part 1-2: General rules- structural fire design, European committee for Standardization, 2005.
4. Franssen J.M., "SAFIR. A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire", *Engineering Journal*, A.I.S.C., Vol 42. (3), 2005.
5. ISO 834-1:1999. *Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements*.