

MÔ PHỎNG CẤU KIỆN THÉP THANH THÀNH MỎNG TỔ HỢP DẠNG HỘP ĐÔI CHỊU NÉN ĐÚNG TÂM

Vy Sơn Tùng^{a,*}, Phạm Ngọc Thắng^b, Nguyễn Ngọc Linh^a

^a*Khoa 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*

^b*Khoa Xây dựng, Trường Cao Đẳng Xây dựng số 1, đường Trung Văn, quận Nam Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 31/08/2019, Sửa xong 15/09/2019, Chấp nhận đăng 16/09/2019

Tóm tắt

Bài báo dựa vào các nghiên cứu trước đây để trình bày một số hiểu biết về cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi chịu nén đúng tâm, bao gồm ưu điểm và hạn chế về tiêu chuẩn thiết kế. Một mô hình dựa trên phương pháp phân tử hữu hạn được đề xuất. Mô hình này thể hiện được sự mất ổn định của cấu kiện có kể đến kích thước thực của tiết diện, phi tuyến vật liệu, phi tuyến hình học, sai số hình học của tiết diện, sự làm việc của liên kết đỉnh vít và tương tác giữa các phần tử trong cấu kiện. Kết quả chạy của mô hình và kết quả từ thí nghiệm có sai số chấp nhận được. Do đó, mô hình này có thể áp dụng vào nghiên cứu sau để đưa ra công thức tính toán mới. Một vài phân tích chỉ ra rằng, với cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi, chiều dày có ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu nén, trong khi độ cứng và số lượng đỉnh vít cũng có ảnh hưởng đến khả năng chịu nén nhưng với mức độ ít hơn.

Từ khoá: thanh thành mỏng tạo hình nguội; tiết diện tổ hợp hộp đôi; nén đúng tâm; ổn định tổng thể; mô phỏng thanh thành mỏng.

MODELING OF COLD-FORMED STEEL BUILT-UP DOUBLE BOX MEMBERS SUBJECT TO CONCENTRIC COMPRESSION LOAD

Abstract

This paper bases on last research studies to present some understanding on cold-formed steel built-up double box members subject to concentric compression load, including advantages and limitations in existing design standards. A model based on finite element method was proposed and reasonably validated against test results, which is able to describe the buckling failure of these members, and include real geometry dimensions, material nonlinearity, geometric nonlinearity, imperfections, sectional imperfections, shear behaviour of screwed joints and contact between elements in a member. This model is applicable for further studies to develop new formulae (for practical design). Some numerical analyses are also conducted, which show that for cold-formed steel built-up double box members, thickness has great effects on compression capacity while the effects of number and stiffness of screw joints in the member are less important.

Keywords: cold-formed steel member; built-up double box section; concentric compression; global buckling; modeling of cold-formed members.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(5V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(5V)-09) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Mặc dù cần đáp ứng nhiều yêu cầu về bảo vệ chống ăn mòn và tránh tiếp xúc với nhiệt độ cao, chưa hoàn thiện tiêu chuẩn thiết kế cho tải trọng động, kết cấu thép thanh thành mỏng đang dần được

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

sử dụng rộng rãi ở các nước phát triển như Mỹ, Úc, Canada, các nước châu Âu. So với kết cấu gỗ, chúng có khả năng chống mối mọt, không phải là vật liệu cháy và dễ liên kết. So với các kết cấu bê tông, gạch đá, thép cán nóng, chúng có trọng lượng nhẹ, dễ thi công do dùng liên kết bằng ốc vít, bu lông hoặc dập hình trước. Do đó, kết cấu thép thanh thành mỏng đang dần được lựa chọn để xây dựng các nhà thấp và nhiều tầng. Theo [1], những ứng dụng phổ biến của dạng kết cấu này là khung thép nhà công nghiệp không cầu trục, hệ sàn sườn thanh thành mỏng, hệ giàn mái, tôn sàn liên hợp, tôn lợp mái, xà gỗ, tường nhẹ và khung thép nhà dân dụng. Một ví dụ được thể hiện trong Hình 1. Tại Việt Nam, một số nghiên cứu và tài liệu hướng dẫn thiết kế về kết cấu thép thanh thành mỏng cũng đã được công bố trong những năm gần đây [2–6].

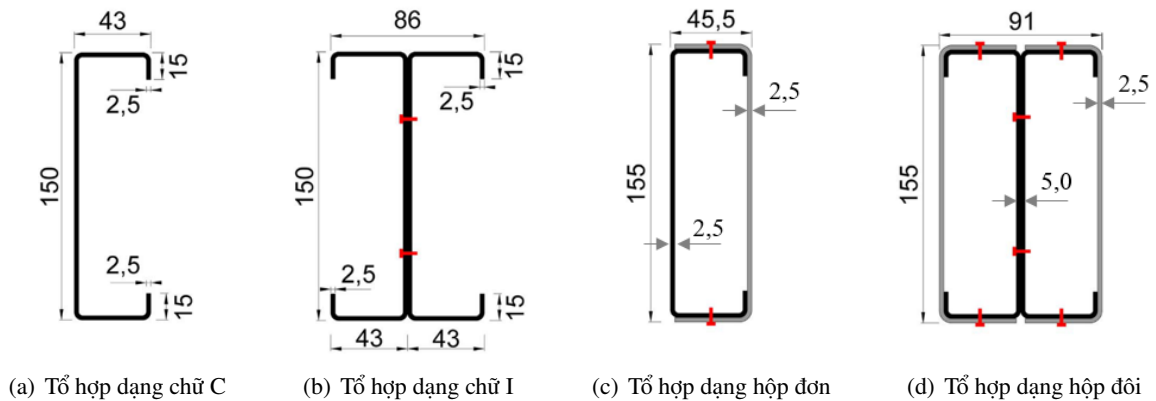


Hình 1. Ứng dụng kết cấu thép thanh thành mỏng cho nhà nhiều tầng ở Canada [7]

Với kết cấu thép thanh thành mỏng, tiết diện dạng chữ C và Z đang được dùng phổ biến do chúng được chế tạo đơn giản bằng phương pháp dập nguội tấm thép. Tuy nhiên, khả năng chống mất ổn định khi chịu nén của hai loại tiết diện này bị giới hạn do chúng có nhược điểm về tính không đối xứng, có momen quán tính chống uốn, xoắn và xoắn-uốn nhỏ. Giải pháp thứ nhất là tăng chiều rộng bản cánh và bản bụng của hai loại tiết diện trên. Tuy nhiên với cấu kiện thanh thành mỏng, mất ổn định cục bộ dễ xảy ra trước mất ổn định tổng thể (uốn, xoắn, xoắn uốn), nên giải pháp này không khả thi. Một giải pháp khác là ghép các cấu kiện thanh thành mỏng đơn bằng đỉnh vít (hoặc bu lông) lại với nhau thành các dạng tiết diện tổ hợp chữ I, hộp hoặc hộp đôi (Hình 2). Các nghiên cứu [8–13] đã chỉ ra rằng cấu kiện tổ hợp có khả năng chịu nén đúng tâm lớn hơn tổng khả năng chịu nén của các cấu kiện thành phần. Do đó, việc áp dụng giải pháp thứ hai là hiệu quả cho việc tăng khả năng chịu nén đúng tâm của cấu kiện thép thanh thành mỏng. Một cản trở là các tiêu chuẩn thiết kế cho kết cấu thép thanh thành mỏng hiện nay [14, 15] hiện chưa phù hợp với các cấu kiện tổ hợp. Tiêu chuẩn [14] chưa có quy định về sự làm việc chung của các cấu kiện thành phần trong một cấu kiện tổ hợp và vai trò của liên kết giữa chúng. Còn theo [15], khả năng chịu nén đúng tâm của cấu kiện thanh thành mỏng tổ hợp được tính toán giống như tiết diện thanh thành mỏng đơn (chữ C hoặc Z) nhưng dùng giá trị độ mảnh tương đương $(KL/r)_m$ được tính theo công thức (1),

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{a}{r_i}\right)^2} \quad (1)$$

trong đó $(KL/r)_0$ là độ mảnh của toàn tiết diện (coi như các tiết diện đơn được liên kết hoàn toàn với nhau), a là khoảng cách giữa các đỉnh vít (hoặc bu lông) liên kết, r_i là bán kính quán tính nhỏ nhất của tiết diện đơn thành phần. Tuy nhiên, [8–13] cho thấy việc áp dụng [15] đang mất an toàn với nhiều dạng tiết diện tổ hợp hoặc quá an toàn với một số dạng tiết diện tổ hợp khác. Mặt khác, [15] không đề cập đến ảnh hưởng của độ cứng và sự bố trí liên kết đỉnh vít, bu lông trong cấu kiện. Từ các lý do trên, các nghiên cứu vẫn cần được tiến hành để hoàn thiện tiêu chuẩn thiết kế cho các dạng cấu kiện thanh thành mỏng tổ hợp.



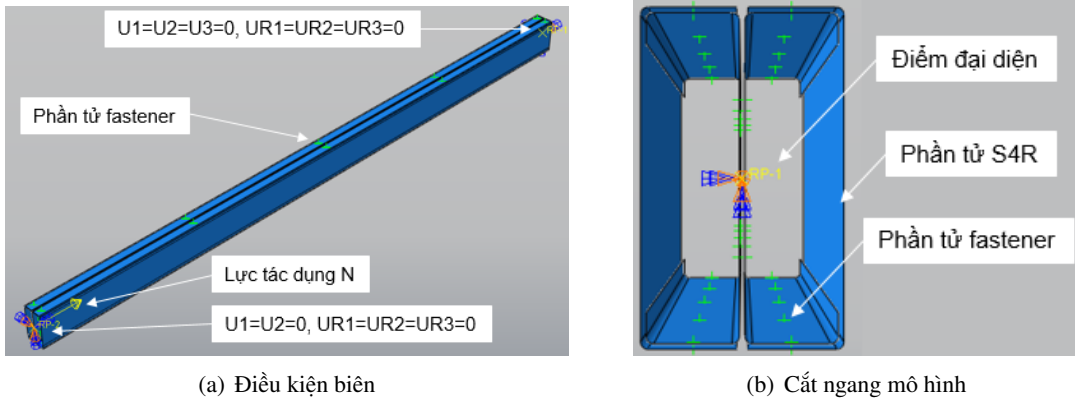
Hình 2. Một số dạng tiết diện thanh thành mỏng [10]

Bài báo này nghiên cứu về cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi. Chúng được sản xuất bằng cách ghép bốn cấu kiện thanh thành mỏng chữ C lại với nhau bằng liên kết đỉnh vít (Hình 2(d)). Dạng cấu kiện này có nhiều ưu điểm khi ứng dụng vào kết cấu giàn nhẹ hoặc khung thép nhẹ nhà công nghiệp. Tuy vậy, nghiên cứu về các cấu kiện dạng này còn ít, chủ yếu để so sánh khả năng chịu nén của chúng với các cấu kiện dạng khác hoặc chỉ xét với cấu kiện ngấn [10, 13, 16]. Nghiên cứu [10] đã chứng minh rằng loại cấu kiện này có khả năng chịu lực nén bằng 9,4 lần cấu kiện chữ C với điều kiện biên là một đầu gối cố định - một đầu gối di động và 5,6 lần với điều kiện biên là một đầu ngàm - một đầu ngàm trượt. Một so sánh trong nghiên cứu đã chỉ ra rằng áp dụng theo các quy định liên quan hiện có của các tiêu chuẩn [14, 15] cho dạng tiết diện này đang không an toàn (giá trị tính toán dựa theo tiêu chuẩn lớn hơn giá trị trung bình của thí nghiệm lên đến 23%). Do đó mục đích chính của bài báo này là thực hiện mô hình sự làm việc chịu nén của cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi bằng phương pháp phần tử hữu hạn. So sánh với mô hình của [13], mô hình này có kể đến sự trượt của liên kết đỉnh vít, mô tả cụ thể và có tính hệ thống về sai số hình học (cục bộ và tổng thể) của tiết diện. Mô hình này có thể áp dụng vào các nghiên cứu sau để đưa ra công thức tính toán khả năng chịu nén của dạng cấu kiện này thay cho việc phụ thuộc vào tiêu chuẩn thiết kế [14, 15]. Các ví dụ tính toán cụ thể được thực hiện khi thay đổi chiều dày thanh thành mỏng, độ cứng đỉnh vít và khoảng cách các đỉnh vít để hiểu rõ hơn về ứng xử của dạng cấu kiện này.

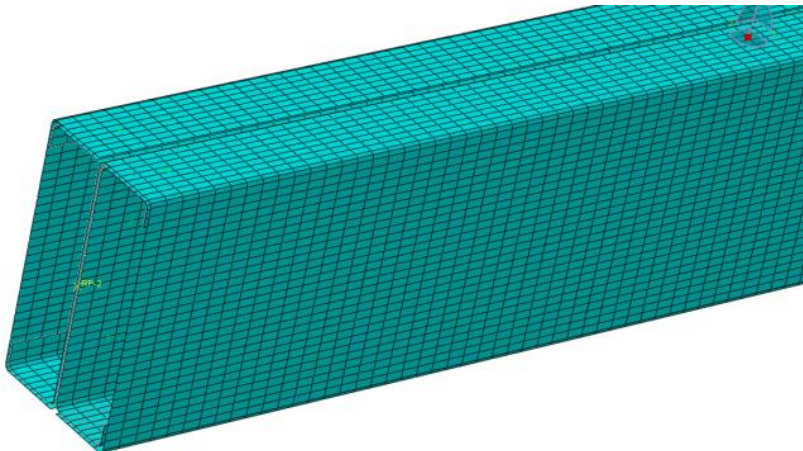
2. Xây dựng mô hình của cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi chịu nén đúng tâm

Phần mềm Abaqus/CEA được sử dụng để mô phỏng sự làm việc của cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi khi chịu nén. Thuật giải được sử dụng là Static, General/Large displacement, cho kết quả là ứng xử đàn hồi - dẻo của cấu kiện, kể đến ứng xử trước và sau mất ổn định tổng

thể và cục bộ. Vật liệu được khai báo theo mô hình đàn hồi - dẻo tuyến tính với mô đun đàn hồi $E = 203000$ Mpa [15], giới hạn chảy f_y , giới hạn bền f_u và biến dạng kéo cực hạn ϵ_u lấy từ thí nghiệm kéo mẫu thép. Do mô hình có kích thước lớn với nhiều tương tác giữa các phần tử được khai báo nên xảy ra vấn đề hội tụ (convergence problem), khiến mô hình không chạy. Để giải quyết vấn đề trên, hệ số nhớt (damping factor) được khai báo bằng 0,0008 và hệ số bình ổn (adaptive stabilization) được lấy bằng 0,005.



Hình 3. Mô hình của cầu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi chịu nén đứng tâm



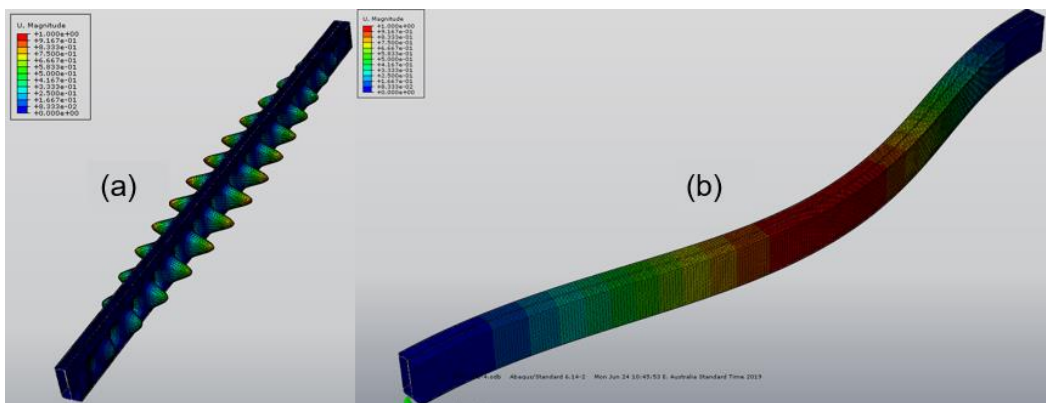
Hình 4. Chia lưới phần tử 5 mm x 10 mm

Chi tiết của mô hình được thể hiện trong Hình 3. Các phần tử của các tiết diện chữ C trong cầu kiện được quy ước bằng các phần tử bản mỏng S4R tương ứng với mặt trung bình của mỗi phần tử. Phần tử S4R gồm 4 nút, 4 cạnh, sử dụng tích phân suy giảm và công thức biến dạng lớn. So với các phần tử bản mỏng khác như S3, S4, S4R5, S8R, S8R5 và S9R5, phần tử S4R đòi hỏi khối lượng tính toán vừa phải trong khi khả năng đáp ứng các vấn đề về ổn định của cầu kiện vẫn được đảm bảo. Kích thước chia lưới của các phần tử được lấy là 5 mm x 10 mm để đảm bảo sự hội tụ về kết quả trong khi thời gian chạy không quá lớn (Hình 4). Sự tương tác giữa các phần tử của các tiết diện chữ C được giả thiết là tương tác cứng (hard contact, tức là phần tử hai tiết diện không thể chồng lên nhau hoặc cắt nhau) và độ ma sát (friction) giữa các tiết diện chữ C được lấy bằng 0,2 theo đề xuất của [17]. Ứng xử

của liên kết đinh vít được thực hiện thông qua phần tử chốt (fastener) làm việc với độ cứng đàn hồi theo hai phương chính của mặt phẳng bản thép U1, U2 với giá trị là K_e được tính toán theo công thức (2) đề xuất bởi [18],

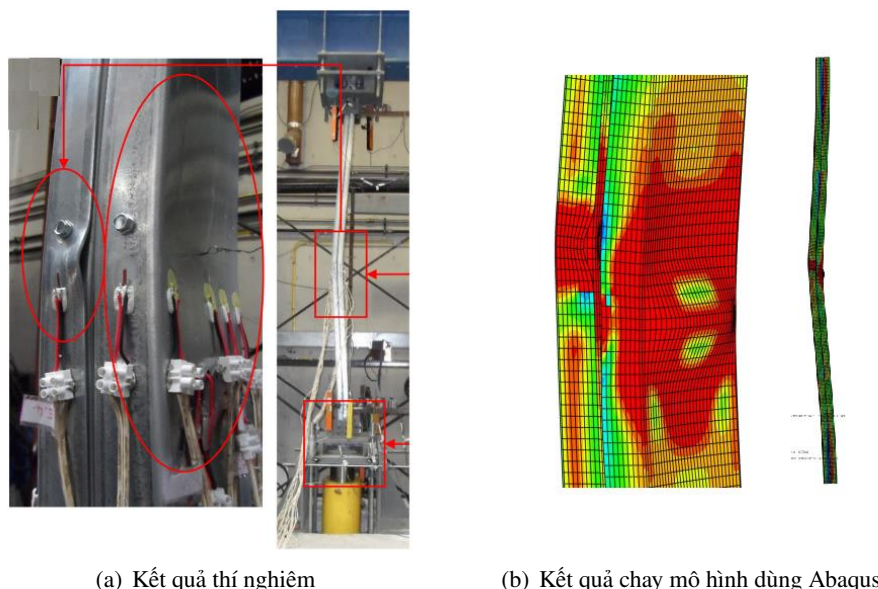
$$K_e = 1,36 \times 10^{-2} \times \left(\frac{d}{t}\right)^{0,5} \times E \times t \quad (2)$$

trong đó d là đường kính thân đinh vít, t và E lần lượt là chiều dày và mô-đun đàn hồi của bản thép. Điều kiện biên của cấu kiện tổ hợp được mô phỏng là một đầu ngàm - một đầu ngàm trượt. Theo đó các cạnh tại hai đầu của cấu kiện tổ hợp được khai báo liên kết cứng (MPC constraint/tie) với hai điểm đại diện (RP) tại trọng tâm tiết diện ở mỗi đầu. Điểm đại diện thứ nhất sẽ được khai báo các chuyển vị thẳng (U1, U2, U3) và xoay (UR1, UR2, UR3) bằng 0; điểm đại diện thứ hai (nơi đặt lực nén) được khai báo tương tự trừ chuyển vị dọc trục cấu kiện (U3). Ngoài ra, lực nén N tác dụng vào cấu kiện cũng được đặt tại điểm đại diện thứ hai.



Hình 5. Hai dạng mất ổn định chính dùng để khai báo: (a) sai số hình học cục bộ; (b) sai số hình học tổng thể

Các sai số hình học (imperfection) của tiết diện, gồm sai số hình học cục bộ và tổng thể, có ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu nén của các tiết diện thành mỏng [19]. Độ lớn và hình dạng của các sai số hình học bị ảnh hưởng bởi quá trình chế tạo, vận chuyển và lắp dựng. Một số nghiên cứu [20, 21] đã sử dụng hệ thống quét laser để mô tả lại các sai số hình học của các cấu kiện thép và nhôm thanh thành mỏng. Phương pháp này cho kết quả chính xác cao nhưng đòi hỏi thiết bị tinh vi và chỉ phù hợp ở mức độ nghiên cứu. Do vậy, bài báo này áp dụng một phương pháp khác được đề xuất trong các nghiên cứu [22, 23] bởi vì tính đơn giản và dễ áp dụng. Theo đó, hai mô hình ổn định đàn hồi (linear buckle) được chạy trước đó với lực đơn vị $N = 1$ trong khi chiều dày phần tử bản thép được khai báo là $t/5$ và $5t$ (t là chiều dày thực của bản thép) để có được dạng mất ổn định cục bộ và mất ổn định tổng thể tương ứng (Hình 5). Sai số hình học cục bộ của cấu kiện được mô tả theo chuyển vị của mỗi điểm trong cấu kiện khi mất ổn định cục bộ với độ lớn được nhân với độ lớn quy ước của sai số hình học cục bộ. Sai số hình học tổng thể được áp dụng tương tự. Độ lớn quy ước của các sai số hình học trên được lấy theo kết quả thống kê, tương ứng bằng $0,006b$ [19] và $L/960$ [15] với b là chiều rộng lớn nhất của các bản thép trong tiết diện và L là chiều dài cấu kiện. Thủ tục khai báo các sai số hình học vào mô hình đàn hồi-dẻo được làm theo hướng dẫn [24]. Ngoài ra, ảnh hưởng do ứng suất dư được bỏ qua theo gợi ý từ các nghiên cứu [19, 22]. Kết quả chạy mô hình thể hiện ở Hình 6.



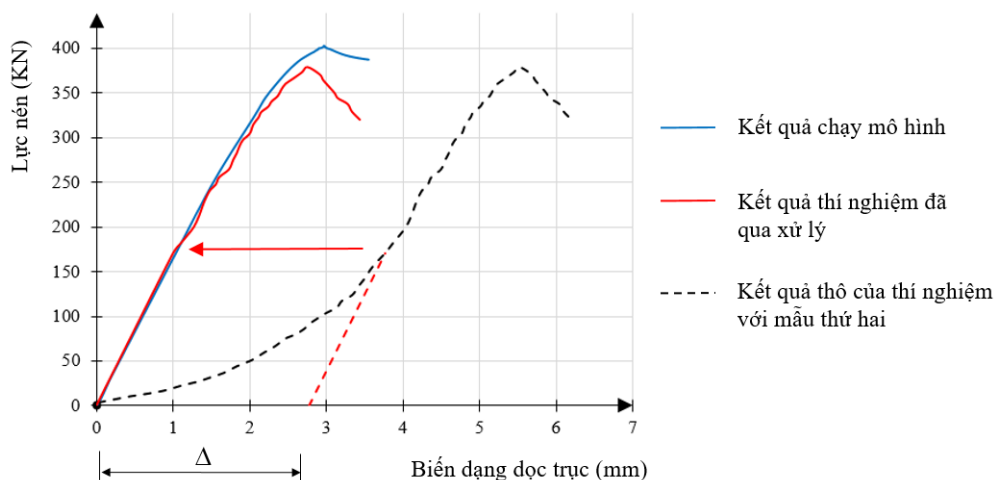
Hình 6. Biến dạng khi bị phá hoại của cấu kiện thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi khi bị nén

3. Kiểm chứng tính tin cậy của mô hình

Độ tin cậy của mô hình được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm. Theo [10], ba thí nghiệm nén đúng tâm được thực hiện với cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi, với chiều dài 2,95 m, khoảng cách các hàng đỉnh vít là 725 mm, đường kính thân đỉnh vít là 6,3 mm, tiết diện như Hình 2-d và điều kiện biên là một đầu ngàm - một đầu ngàm trượt. Ba thí nghiệm tương tự cũng được thực hiện với điều kiện biên là một đầu gối cố định - một đầu gối di động, tuy nhiên [10] không cung cấp đủ thông tin về dụng cụ mô phỏng điều kiện biên này, dẫn đến không thể xác định được chiều dài tính toán của cấu kiện. Do vậy, trong bài báo này, kết quả chạy mô hình sẽ chỉ được so sánh với kết quả thí nghiệm với điều kiện biên là một đầu ngàm - một đầu ngàm trượt. Thông số vật liệu: giới hạn chảy $f_y = 280$ Mpa, giới hạn bền $f_u = 360$ Mpa và biến dạng kéo cực hạn $\epsilon_u = 0,25$ [10]. Theo công thức (2), giá trị độ cứng đàn hồi của liên kết đỉnh vít $K_e = 10957$ N/mm.

Hình 6 cho thấy sự tương đồng cao giữa kết quả của mô hình và thí nghiệm về biến dạng khi cấu kiện bị phá hoại. Theo đó, mất ổn định tổng thể theo phương trục yếu sẽ xảy ra trước, theo sau là mất ổn định cục bộ của bản cánh phía ngoài và bản bụng. Trong Hình 7, quan hệ lực nén - biến dạng dọc trục trong cấu kiện lấy theo kết quả chạy mô hình cũng tương đối phù hợp với kết quả thí nghiệm (lưu ý, trong kết quả thô của thí nghiệm, khoảng biến dạng ban đầu $\Delta \approx 2,8$ mm gây ra do các cấu kiện chữ C thành phần trong cấu kiện tổ hợp có sai số chế tạo về chiều dài và chưa làm việc đồng thời tại thời điểm ban đầu nên cần xử lý kết quả thí nghiệm trước khi đối chiếu với kết quả mô hình). Về mặt giá trị, khả năng chịu lực của cấu kiện theo mô hình là 402,53 KN, trong khi giá trị của ba mẫu thí nghiệm [10] là 388,67 KN, 377,88 KN và 356,59 KN (độ chênh lệch tương ứng là 3,6%, 6,5% và 12,9%). Sự chênh lệch với hai mẫu thí nghiệm sau là đáng kể. Tuy nhiên, theo phụ lục K2.1.1 của [15], khi xét khả năng chịu lực của cấu kiện thép thanh thành mỏng, giá trị thí nghiệm trung bình được lấy làm giá trị tính toán khi có giá trị của ít nhất ba mẫu thí nghiệm và sai lệch giữa giá trị của mỗi mẫu thí nghiệm với giá trị trung bình nhỏ hơn 15%. Vì giá trị thí nghiệm trung bình và giá trị từ

mô hình đều dùng để dự đoán khả năng chịu lực của cấu kiện, nên sự chênh lệch giữa kết quả từ mô hình và các thí nghiệm như trên là chấp nhận được. Mặt khác, giống với kết quả tính toán của [10], khi áp dụng tiêu chuẩn thiết kế [15], khả năng chịu nén của cấu kiện trên là 430,9 KN (lớn hơn giá trị các mẫu thí nghiệm thí nghiệm là 10,8%, 14% và 20.8%). Điều này chứng tỏ mô hình được đề xuất trong bài báo này cho dự báo về khả năng chịu nén đúng tâm của dạng cấu kiện đang xét an toàn hơn so với tiêu chuẩn thiết kế [15]. Vậy mô hình này có đủ cơ sở tin cậy để áp dụng vào nghiên cứu.



Hình 7. So sánh các đường cong lực nén - biến dạng lấy từ kết quả thí nghiệm [10] và kết quả chạy mô hình dùng Abaqus

4. Khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu nén đúng tâm của cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi

Dựa vào mô hình đã đề xuất, một số khảo sát sẽ được thực hiện để kiểm tra ảnh hưởng của độ dày tiết diện, độ cứng của liên kết đỉnh vít và khoảng cách liên kết đỉnh vít đến khả năng chịu lực của cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi. Tiết diện dùng để khảo sát sẽ có kích thước như Hình 2(d). Kết quả của các khảo sát được thể hiện lần lượt như trong các Bảng 1, 2 và 3. Dễ thấy, chiều dày của cấu kiện có ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu nén đúng tâm, cụ thể là khi chiều dày tăng từ 1,0 mm lên 2,0 mm, khả năng chịu nén tăng 2,9 lần. Điều đáng chú ý là dạng phá hoại chính vẫn là do mất ổn định tổng thể. Do đó, với cấu kiện dạng này chịu nén và có độ mảnh lớn, việc giảm chiều dày sẽ làm tăng ảnh hưởng của mất ổn định cục bộ một cách rõ rệt nhưng cấu kiện không thay đổi dạng mất ổn định chính. Ngược lại, độ cứng của liên kết đỉnh vít có ảnh hưởng nhỏ đến khả năng chịu nén của cấu kiện. Trong ví dụ đang xét, khi giảm độ cứng của liên kết hai lần, khả năng chịu nén giảm 7,7%. Khoảng cách giữa các hàng đỉnh vít cũng có ảnh hưởng đáng kể, ví dụ khi tăng gấp đôi lượng đỉnh vít (giảm khoảng cách này từ 1450 mm xuống 725 mm, hay từ 725 mm xuống 369 mm) khả năng chịu nén tăng lần lượt là 18,5% và 11,4%. Tuy nhiên theo [10], khả năng chịu nén của cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi đạt trong khoảng 1,4 đến 2,35 lần tổng của các cấu kiện chữ C thành phần. Vậy nên, ngoài giả thiết của [15] về vai trò của liên kết đỉnh vít, sự tương tác lẫn nhau giữa các phần tử bản mỏng cũng có thể là nguyên nhân cho sự tăng khả năng chịu nén của cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi. Lập luận này sẽ cần được xem xét trong các nghiên cứu sau của nhóm tác giả.

Bảng 1. Ảnh hưởng của chiều dày thành mỏng đến khả năng chịu nén của cấu kiện (giá trị K_e luôn được lấy bằng 10957 N/mm)

	Chiều dày thành mỏng (mm)			
	1,0	1,5	2,0	2,5
Khả năng chịu nén (KN)	104,8	193,5	304,4	402,5

Bảng 2. Ảnh hưởng của độ cứng liên kết đỉnh vít đến khả năng chịu nén của cấu kiện

	Độ cứng của liên kết đỉnh vít (KN/mm)					
	10,96	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00
Khả năng chịu nén (KN)	402,5	395,6	392,2	376,5	374,5	373,8

Bảng 3. Ảnh hưởng của khoảng cách đỉnh vít đến khả năng chịu nén của cấu kiện (giá trị K_e được lấy bằng 10957 N/mm)

	Khoảng cách giữa các hàng đỉnh vít (mm)							
	1450	725	590	492	422	369	328	295
Khả năng chịu nén (KN)	339,7	402,5	411,7	425,4	437,9	448,2	450,7	464,7

5. Kết luận

Bài báo đã thực hiện mô hình sự ứng xử của cấu kiện thép thanh thành mỏng tổ hợp dạng hộp đôi chịu nén đúng tâm. Mô hình này đã được kiểm chứng bằng kết quả thí nghiệm. Do đó, có thể áp dụng mô hình này cho các nghiên cứu sau để đưa ra công thức tính khả năng chịu nén đúng tâm của dạng cấu kiện này. Một số ví dụ dựa trên mô hình này đã chỉ ra rằng, cấu kiện dạng này có độ mảnh lớn sẽ bị phá hoại theo dạng mất ổn định tổng thể, sự giảm chiều dày sẽ ảnh hưởng mạnh đến khả năng chịu lực nén nhưng không làm thay đổi dạng phá hoại. Độ cứng của liên kết đỉnh vít có ảnh hưởng nhỏ, còn khoảng cách các hàng của liên kết đỉnh vít có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu nén của dạng cấu kiện này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Hancock, G. J. (2016). Cold-formed steel structures: research review 2013–2014. *Advances in Structural Engineering*, 19(3):393–408.
- [2] Cường, B. H. (2010). Tính toán các đặc trưng hình học của tiết diện thanh thành mỏng hở. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*.
- [3] Kiến, Đ. Đ. (2011). *Thiết kế kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [4] Cường, B. H. (2012). Phân tích ổn định đàn hồi tâm và thanh thành mỏng bằng phương pháp dải hữu hạn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, 6(1):12–23.
- [5] Hội, P. V., Thành, Đ. Q. (2013). So sánh khả năng chịu lực của xà gồ thành mỏng tiết diện dạng chữ C và chữ Z. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐHXD*, 7(3):7–13.
- [6] Tuyền, N. M., Cường, B. H. (2015). Tính toán đặc trưng hình học của tiết diện thanh thành mỏng kín chịu xoắn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, 9(3):43–51.
- [7] Rice, J. (2017). Making solid, sustainable choices with cold-formed steel framing. *Construction Canada*.

- [8] Stone, T. A., LaBoube, R. A. (2005). [Behavior of cold-formed steel built-up I-sections](#). *Thin-Walled Structures*, 43(12):1805–1817.
- [9] Li, Y., Li, Y., Wang, S., Shen, Z. (2014). [Ultimate load-carrying capacity of cold-formed thin-walled columns with built-up box and I section under axial compression](#). *Thin-Walled Structures*, 79:202–217.
- [10] Craveiro, H. D., Rodrigues, J. P. C., Laím, L. (2016). [Buckling resistance of axially loaded cold-formed steel columns](#). *Thin-Walled Structures*, 106:358–375.
- [11] Roy, K., Ting, T. C. H., Lau, H. H., Lim, J. B. P. (2018). Effect of thickness on the behaviour of axially loaded back-to-back cold-formed steel built-up channel sections-Experimental and numerical investigation. *Structures*, Elsevier, 16:327–346.
- [12] Fratamico, D. C., Torabian, S., Zhao, X., Rasmussen, K. J. R., Schafer, B. W. (2018). [Experiments on the global buckling and collapse of built-up cold-formed steel columns](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 144:65–80.
- [13] Craveiro, H. D., Henriques, J., Silva, L. S., Martins, J. P. (2019). FEM analysis of the buckling behaviour of thin-walled CFS columns. Part II—monosymmetric (R) and double symmetric built-up box cross-sections. *Proceedings of the International Colloquia on Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS 2019)*, Prague, Czech Republic.
- [14] EN 1993-1-3 (2006). *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules - supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. European Committee for Standardization, Brussels.
- [15] AISI S100 (2016). *North American specifications for the design of cold-formed steel structural members*. Washington DC, USA.
- [16] Liao, F., Wu, H., Wang, R., Zhou, T. (2017). [Compression test and analysis of multi-limbs built-up cold-formed steel stub columns](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 128:405–415.
- [17] Gorst, N. J. S., Williamson, S. J., Pallett, P. F., Clark, L. A. (2003). *Friction in temporary works*. Research Report 71, University of Birmingham, Birmingham, U.K.
- [18] Phan, D. K., Rasmussen, K. J. R. (2018). Cold-formed steel bolted and screw-fastened connections in shear. *Eighth International Conference on Thin-Walled Structures*, Lisbon, Portugal.
- [19] Schafer, B. W., Peköz, T. (1998). [Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 47(3):193–210.
- [20] Zhao, X., Tootkaboni, M., Schafer, B. W. (2017). [Laser-based cross-section measurement of cold-formed steel members: Model reconstruction and application](#). *Thin-Walled Structures*, 120:70–80.
- [21] Pham, N. H., Pham, C. H., Rasmussen, K. J. R. (2017). Incorporation of measurement geometric imperfections into finite element models for cold-rolled aluminum sections. *Proceedings of the 4th Congrès International de Géotechnique – Ouvrages – Structures*, Ho Chi Minh City, Vietnam.
- [22] Gardner, L., Nethercot, D. A. (2004). [Numerical modeling of stainless steel structural components—a consistent approach](#). *Journal of Structural Engineering*, 130(10):1586–1601.
- [23] Zhang, J.-H., Young, B. (2015). [Numerical investigation and design of cold-formed steel built-up open section columns with longitudinal stiffeners](#). *Thin-Walled Structures*, 89:178–191.
- [24] ABAQUS. *Analysis user's manual-version 6.14*. ABAQUS Inc, USA.