

KHẢO SÁT KHẢ NĂNG CHỊU LỰC TIẾT DIỆN CỦA DẦM THÉP CHỮ C TẠO HÌNH NGUỘI CÓ LỖ KHOẾT

Phạm Ngọc Hiếu^{a,*}

^a*Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội,
Km 10, đường Nguyễn Trãi, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 30/5/2022, Sửa xong 09/9/2022, Chấp nhận đăng 20/9/2022

Tóm tắt

Dầm thép tạo hình nguội khoét lỗ đã trở nên quen thuộc trong kết cấu công trình do nhu cầu lắp đặt các hệ thống kỹ thuật. Sự có mặt của lỗ khoét này đã được chứng minh là ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của dầm, và đã được xem xét đến trong thiết kế theo tiêu chuẩn của Hoa Kỳ với sự áp dụng của phương pháp mới có tên là Cường độ trực tiếp. Phương pháp cường độ trực tiếp cho phép dự đoán trực tiếp khả năng chịu lực của cấu kiện thép tạo hình nguội dựa trên các phân tích mất ổn định tuyến tính. Bài báo, do đó, sẽ giới thiệu và áp dụng phương pháp mới trong phân tích mất ổn định và xác định khả năng chịu lực của tiết diện thép tạo hình nguội chữ C có lỗ khoét. Kết quả khảo sát cho thấy mô men mất ổn định cục bộ có xu hướng tăng trong khi đó mô men mất ổn định méo tiết diện lại giảm. Khảo sát xem xét cùng một diện tích lỗ khoét đã chỉ ra lỗ khoét với chiều cao thấp sẽ có lợi hơn về mặt chịu lực khi chiều dài lỗ khoét nhỏ hơn chiều cao tiết diện, nhưng lỗ khoét cao lớn hơn lại có lợi hơn khi chiều dài lỗ khoét lớn hơn chiều cao tiết diện.

Từ khoá: khả năng chịu lực tiết diện; dầm thép; tiết diện chữ C tạo hình nguội; lỗ khoét.

INVESTIGATION OF SECTIONAL CAPACITIES OF COLD-FORMED STEEL CHANNEL BEAMS WITH PERFORATIONS

Abstract

Cold-formed perforated steel beams have become common in structural buildings due to the demand for technical system installations. The presence of these holes has been illustrated to affect the capacities of these beam types, and has been considered in the design according to the American Specification with the application of a new design method called the Direct Strength Method. This method allows for directly predicting the capacities of cold-formed steel members on the basis of elastic buckling analyses. The paper, therefore, will introduce and apply this new design method in the buckling analyses and determination of sectional capacities of the perforated steel channel sections. The investigated results pointed out that local buckling moments underwent an increasing trend while the opposite trend was observed for the distortional buckling moments. Based on the investigation of the sectional capacities of perforated sections with the same hole areas, it was found that such sections with small hole heights were beneficial with the hole lengths less than the sectional depth whereas these sections with larger hole heights can obtain higher sectional capacities with the hole lengths more than the sectional depth.

Keywords: sectional capacities; steel beams; cold-formed steel channel sections; perforations.

© 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Kết cấu thép tạo hình nguội sử dụng ngày càng rộng rãi trong các ứng dụng kết cấu bởi các lợi thế trong sản xuất, bảo quản, vận chuyển và lắp dựng [1]. Trong các sản phẩm trên thị trường, thép

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

chữ C được coi loại tiết diện phổ biến nhất và trở thành sản phẩm quen thuộc trong nhiều thập kỷ qua [2]. Nhằm đáp ứng yêu cầu bố trí các hệ thống kỹ thuật trong công trình, các lỗ khoét thường được khoan trên phần bản bụng của tiết diện thép chữ C với các hình dạng khác nhau bao gồm hình tròn, hình chữ nhật, dạng dải hay các hình dạng bất kỳ mà được quyết định do yêu cầu kỹ thuật [3]. Ảnh hưởng của lỗ khoét đến khả năng chịu lực của cấu kiện thép tạo hình nguội đã được xét đến trong thiết kế được quy định trong Tiêu chuẩn thép tạo hình nguội Hoa Kỳ AISI S100 [3] bằng cách áp dụng phương pháp Cường độ trực tiếp. Phương pháp này được coi là phương pháp mới trong thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội và đã chứng minh được tính ưu việt của nó trong thiết kế so sánh với phương pháp truyền thống Bề rộng hữu hiệu [4]. Một yêu cầu bắt buộc của việc áp dụng phương pháp Cường độ trực tiếp là thực hiện các phân tích mất ổn định tuyến tính, nên việc phân tích này để xác định giá trị tải mất ổn định tuyến tính đóng vai trò quan trọng trong thiết kế.

Việc phân tích mất ổn định tuyến tính thông thường được thực hiện bằng sử dụng các phần mềm phân tích bao gồm CUFSM [5] hay THIN-WALL-2 [6]. Chi tiết của việc áp dụng các phần mềm này trong thiết kế được tham khảo trong các báo cáo của Pham [7] hay Pham & Vu [8]. Các phần mềm phân tích trên tuy nhiên lại không sử dụng được cho phân tích mất ổn định của tiết diện có lỗ khoét do tính không liên tục trong phân tích bởi sự xuất hiện của các lỗ khoét [9]. Các phần mềm phần tử hữu hạn cũng có thể được sử dụng trong các trường hợp này nhưng cũng tồn tại nhiều hạn chế trong phân tích dẫn đến không chính xác, mất nhiều công trong xây dựng mô hình và phân tích [9]. Để khắc phục các vấn đề trên, một phương pháp gần đúng trong phân tích mất ổn định của tiết diện có lỗ khoét đã được đề xuất bởi Moen và Schafer ([9–15]); phương pháp này sau đó đã được đưa vào trong Tiêu chuẩn của Hoa Kỳ [3]. Phương pháp này cũng là cơ sở cho việc thiết lập ra một mô đun phần mềm CUFSM được phát triển gần đây của Viện thép và kim loại Hoa Kỳ ([16, 17]) cho phép sử dụng trong phân tích mất ổn định tuyến tính của tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét. Mô đun phần mềm này sẽ được giới thiệu và áp dụng để phân tích mất ổn định tuyến tính của tiết diện chữ C có lỗ khoét trong bài báo.

Cấu kiện thép tạo hình nguội có lỗ khoét đã được quan tâm và nghiên cứu bởi nhiều nhà khoa học trên thế giới. Ortiz-Colberg, Sivakuman, Banwait hay Abdel-Rahman ([18–21]) đã khảo sát ảnh hưởng các hình dạng lỗ khoét khác nhau tới khả năng chịu lực và ứng xử mất ổn định cục bộ của cột thép tạo hình nguội có chiều dài nhỏ. Các nghiên cứu khác của Loov; Pu và cs.; Rhodes và Schineider hay Rhodes và Macdonal ([22–25]) xem xét ảnh hưởng của chiều dài hay vị trí lỗ khoét tới cột thép có chiều dài nhỏ với việc thay đổi vị trí các lỗ khoét. Hay gần đây Pham [26] cũng có xem xét ảnh hưởng của vị trí lỗ khoét đến giá trị tải mất ổn định tuyến tính tổng thể của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội khi chịu nén hoặc uốn với bố trí các lỗ khoét không đối xứng và lệch tâm. Đáng chú ý hơn cả là các nghiên cứu của Moen và Schafer ([9–15]) đã tập trung khảo sát về ứng xử và cường độ của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét khi chịu nén và chịu uốn. Trong các nghiên cứu đó, Moen và Schafer đã đề xuất phương pháp gần đúng trong phân tích mất ổn định tuyến tính của tiết diện có lỗ khoét và đề xuất các hướng dẫn thiết kế cho loại tiết diện này sử dụng phương pháp Cường độ trực tiếp. Các nội dung đề xuất trên sau đó đã được đưa vào trong Tiêu chuẩn thép tạo hình nguội Hoa Kỳ AISI S100-16 [3]. Gần đây, các nghiên cứu về loại tiết diện thép tạo hình nguội chữ C có lỗ khoét được tăng cường sừn xung quanh được quan tâm và khảo sát bởi một số nhà nghiên cứu, bao gồm Chen và cs. [27], Chi và cs. [28], hay Chen và cs. [29] thông qua các thí nghiệm và các mô hình số hóa để hiểu được ứng xử và cường độ của loại tiết diện khoét lỗ mới này.

Dựa vào các kết quả nghiên cứu, bài báo này sẽ tập trung đi vào giới thiệu và áp dụng mô đun phần mềm CUFSM mới được phát triển gần đây để phân tích và khảo sát giá trị tải mất ổn định của tiết diện thép tạo hình nguội chữ C có lỗ khoét. Các giá trị tải đó sau đó được sử dụng để xác định và

khảo sát khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét với việc áp dụng phương pháp Cường độ trực tiếp được quy định trong Tiêu chuẩn thép tạo hình nguội Hoa Kỳ AISI S100-16 [3]. Các tiết diện dùng cho khảo sát được lấy từ các tiết diện ngoài thị trường. Kết quả khảo sát thu được làm cơ sở để đánh giá và phân tích đặc điểm về khả năng chịu lực tiết diện của dầm chữ C có lỗ khoét. Bài báo cũng khảo sát khả năng chịu lực của loại tiết diện này cho cùng một diện tích lỗ khoét nhưng thay đổi về tương quan giữa chiều cao và chiều dài, sau đó tiến hành so sánh để đưa ra các khuyến cáo về cách thức khoét lỗ giúp cho có lợi về mặt chịu lực. Trong bài báo này, khái niệm “khả năng chịu lực tiết diện” được dịch từ thuật ngữ tiếng Anh “sectional capacities” để nói đến khả năng chịu lực của cấu kiện thép tạo hình nguội mà các dạng mất ổn định tổng thể đã được ngăn cản thông qua việc bố trí các hệ giằng chống chuyển vị ngang. Khi đó, cấu kiện chỉ có thể bị phá hoại do các dạng mất ổn định tiết diện bao gồm mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo tiết diện; và khả năng chịu lực của cấu kiện được đưa về “khả năng chịu lực của tiết diện”, cụ thể hơn có thể tham khảo trong bài báo của Phạm [7].

2. Phương pháp gần đúng trong xác định giá trị tải mất ổn định tuyến tính của tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét

Phương pháp gần đúng này được đề xuất bởi Moen và Schafer được sử dụng trong phân tích mất ổn định tuyến tính của tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét, cụ thể có thể tìm hiểu qua các nghiên cứu của Moen và Schafer ([9–11]), trong Phụ lục 2 Tiêu chuẩn AISI S100-16 [3] hay trong báo cáo khoa học của Phạm [30]. Bài báo này sẽ giới thiệu nội dung của phương pháp gần đúng này trong xác định các giá trị tải mất ổn định tuyến tính của tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét khi chịu nén hoặc uốn, bao gồm mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo tiết diện.

Các giá trị tải tuyến tính mất ổn định cục bộ khi chịu nén P_{crl} hay uốn M_{crl} của tiết diện thép có lỗ khoét được xác định như sau:

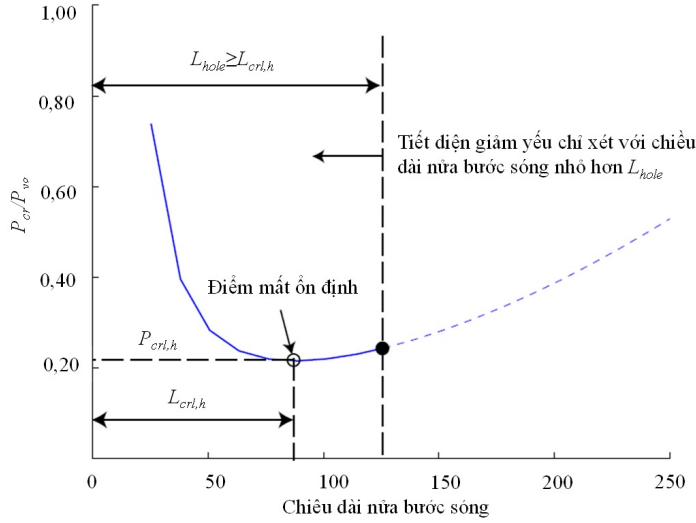
$$P_{crl} = \text{Min}(P_{crl,nh}; P_{crl,h}) \quad (1)$$

$$M_{crl} = \text{Min}(M_{crl,nh}; M_{crl,h}) \quad (2)$$

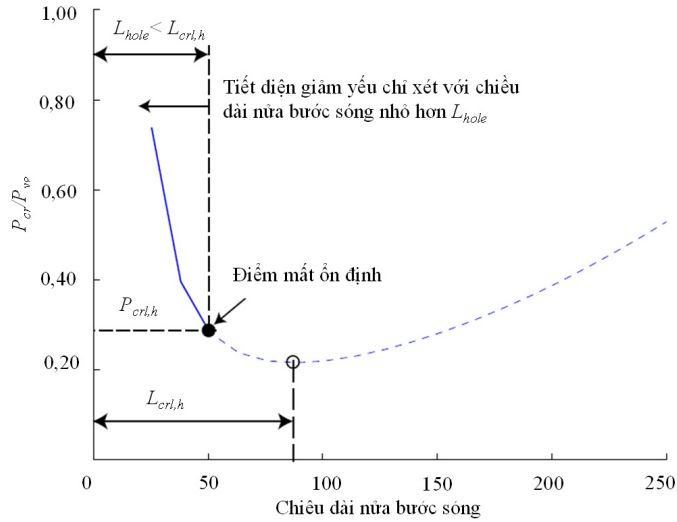
trong đó $P_{crl,nh}$; $M_{crl,nh}$ là các giá trị tải mất ổn định cục bộ của tiết diện nguyên, được xác định bằng cách sử dụng phần mềm phân tích CUFSM [5]; và $P_{crl,h}$; $M_{crl,h}$ là các giá trị tải mất ổn định tuyến tính cục bộ của tiết diện giảm yếu, cũng được xác định bằng cách sử dụng các phần mềm phân tích CUFSM [5] trong phân tích tiết diện giảm yếu. Kết quả phân tích mất ổn định của một tiết diện giảm yếu được thể hiện như Hình 1. Trên hình này có giá trị $L_{crl,h}$ là chiều dài nửa bước sóng tương ứng với tải mất ổn định cục bộ của tiết diện giảm yếu đang xem xét; L_{hole} là chiều dài của lỗ khoét đang xem xét. Nếu chiều dài lỗ khoét L_{hole} lớn hơn chiều dài nửa bước sóng $L_{crl,h}$ thì tải mất ổn định được lấy bằng giá trị tải mất ổn định cục bộ như biểu diễn trên Hình 1(a); và nếu chiều dài lỗ khoét L_{hole} nhỏ hơn chiều dài nửa bước sóng $L_{crl,h}$ thì giá trị tải mất ổn định được xác định bằng giá trị tải tại điểm có chiều dài bằng chiều dài lỗ khoét L_{hole} như biểu diễn trên Hình 1(b).

Giá trị tải mất ổn định méo tiết diện của tiết diện có lỗ khoét (P_{crd} ; M_{crd}) được xác định bằng cách xác định các thành phần tải này của một tiết diện tương đương không giảm yếu mà có chiều dày bản bụng ban đầu được thay thế bằng chiều dày bản bụng giả thiết (t_r) được xác định như công thức (3), trong đó L_{crd} là chiều dài nửa bước sóng tương ứng với mất ổn định méo tiết diện của tiết diện nguyên ban đầu; L_h là chiều dài lỗ khoét; t là chiều dày ban đầu của tiết diện.

$$t_r = t \left(1 - \frac{L_h}{L_{crd}} \right)^{1/3} \quad (3)$$



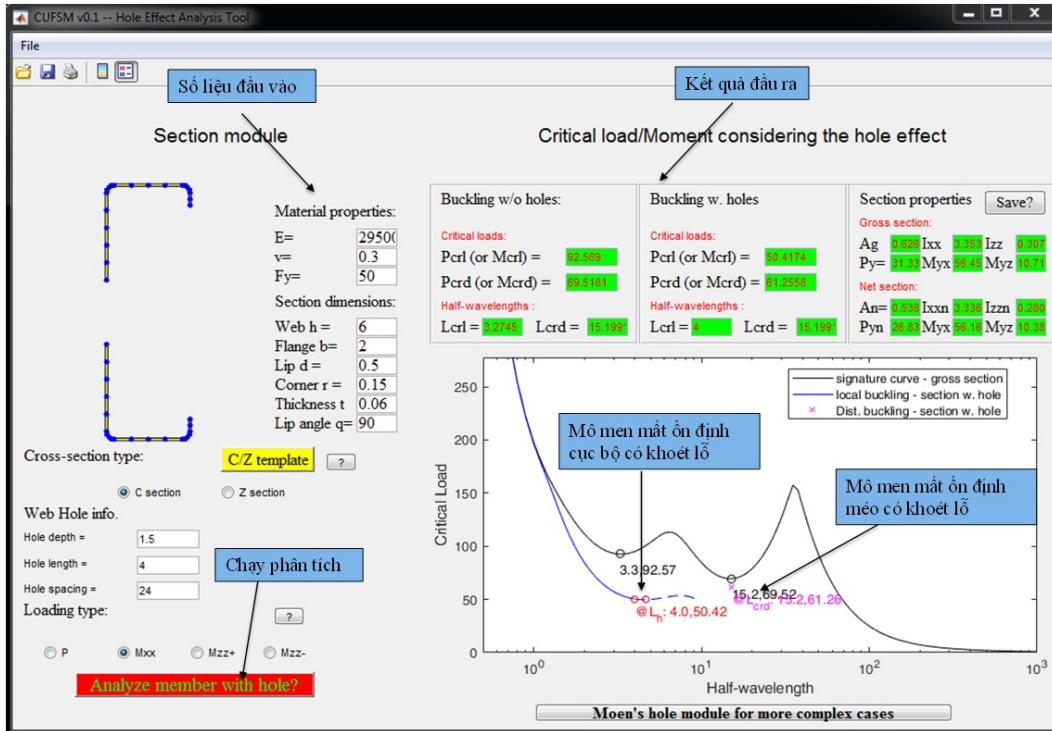
(a) Khi $L_{hole} \geq L_{cr,h}$



(b) Khi $L_{hole} < L_{cr,h}$

Hình 1. Đường cong mất ổn định cục bộ tuyến tính của tiết diện [9]

Phương pháp gần đúng này sau đó đã làm cơ sở cho việc lập ra một mô đun phần mềm CUFMS phân tích mất ổn định cho tiết diện có lỗ khoét được phát triển gần đây bởi Viện kim loại và thép Hoa Kỳ, được báo cáo chi tiết trong ([16, 17]). Việc ra đời phần mềm này là cơ sở quan trọng cho việc áp dụng phương pháp Cường độ trực tiếp trong thiết kế tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét. Giao diện phần mềm này được thể hiện như Hình 2 với các yêu cầu đầu vào nhanh chóng và đơn giản, kết quả phân tích được đưa ra bao gồm các giá trị tải mất ổn định cục bộ và méo tiết diện cho cả tiết diện nguyên và tiết diện có lỗ khoét. Phần mềm này sẽ được sử dụng trong báo cáo này nhằm khảo sát giá trị tải mất ổn định của tiết diện thép chữ C có lỗ khoét khi kích thước lỗ thay đổi.



Hình 2. Phần mềm xác định tải mất ổn định tuyến tính của tiết diện có lỗ khoét

3. Xác định khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét theo Tiêu chuẩn Hoa Kỳ AISI S100-16

Mô men uốn danh nghĩa của tiết diện thép tạo hình nguội có khoét lỗ được xác định là giá trị nhỏ nhất trong ba thành phần sau: 1) Mô men chảy dẻo của tiết diện giảm yếu M_{ynet} ; 2) Mô men mất ổn định cục bộ của tiết diện M_{nl} ; 3) Mô men mất ổn định méo của tiết diện M_{nd} . Các thành phần mô men này được xác định như sau:

- Mô men chảy dẻo của tiết diện giảm yếu:

$$M_{ynet} = S_{fnet} F_y \quad (4)$$

trong đó S_{fnet} là mô đun chống uốn tiết diện giảm yếu; F_y là ứng suất chảy của vật liệu thép.

- Mô men mất ổn định cục bộ của tiết diện:

$$M_{nl} = M_y \quad \text{khi } \lambda_l \leq 0,776 \quad (5)$$

$$M_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0,4} M_y \quad \text{khi } \lambda_l > 0,776 \quad (6)$$

trong đó λ_l là độ mảnh danh nghĩa mất ổn định cục bộ, $\lambda_l = \sqrt{M_y/M_{crl}}$; M_y là mô men chảy dẻo của tiết diện nguyên; M_{crl} là mô men mất ổn định tuyến tính cục bộ khi chịu uốn của tiết diện có khoét lỗ, được xác định bằng cách sử dụng các phân tích mất ổn định.

- Mô men mất ổn định méo của tiết diện: Mô men mất ổn định méo tiết diện được xác định căn cứ theo độ mảnh danh nghĩa λ_d , cụ thể như sau:

Nếu $\lambda_d \leq \lambda_{d2}$ với λ_{d2} được xác định như công thức (12):

$$M_{nd} = M_{ynet} \quad \text{khi } \lambda_d \leq \lambda_{d1} \quad (7)$$

$$M_{nd} = M_{ynet} - \left(\frac{M_{ynet} - M_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1}) \quad \text{khi } \lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2} \quad (8)$$

Nếu $\lambda_d > \lambda_{d2}$:

$$M_{nd} = M_y \quad \text{khi } \lambda_d \leq 0,673 \quad (9)$$

$$M_{nd} = \left[1 - 0,22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} M_y \quad \text{khi } \lambda_d > 0,673 \quad (10)$$

trong đó λ_d là độ mảnh danh nghĩa mất ổn định méo tiết diện, $\lambda_d = \sqrt{M_y/M_{crd}}$; M_y là mô men chảy dẻo của tiết diện nguyên; M_{ynet} là mô men chảy dẻo của tiết diện giảm yếu;

$$\lambda_{d1} = 0,673 \left(\frac{M_{ynet}}{M_y} \right)^3 \quad (11)$$

$$\lambda_{d2} = 0,673 \left[1,7 \left(\frac{M_y}{M_{ynet}} \right)^{2,7} - 0,7 \right] \quad (12)$$

$$M_{d2} = \left[1 - 0,22 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right) \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right) M_y \quad (13)$$

M_{crd} là mô men mất ổn định tuyến tính méo tiết diện khi chịu uốn của tiết diện có khoét lỗ, được xác định bằng cách sử dụng các phân tích mất ổn định.

4. Phân tích mất ổn định tuyến tính của tiết diện thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét

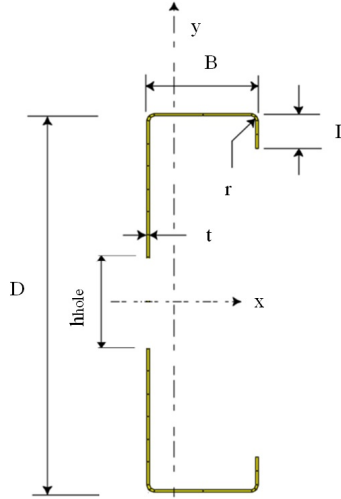
Phân tích mất ổn định tuyến tính là một yêu cầu bắt buộc trong thiết kế tiết diện thép tạo hình nguội theo phương pháp cường độ trực tiếp (DSM), và được thực hiện bằng cách sử dụng mô đun phần mềm CUFSM ([16, 17]) trong bài báo này. Tiết diện chữ C dùng cho khảo sát được lấy từ các tiết diện thép trên thị trường [31], bao gồm các tiết diện được thống kê trong Bảng 1 và các kích thước đặc trưng này được biểu thị như Hình 3. Các đặc trưng vật liệu thép dùng trong khảo sát, bao gồm mô đun đàn hồi $E = 203400$ MPa và giá trị giới hạn chảy $F_y = 345$ MPa.

Bảng 1. Các kích thước hình học của tiết diện thép tạo hình nguội chữ C (Đơn vị: mm)

Tiết diện	t	D	B	L
C15012	1,2	152	64	14,5
C20015	1,5	203	76	19,5
C25019	1,9	254	76	21,5
C30024	2,4	300	96	27,5
C35030	3,0	350	125	30,0
C40030	3,0	400	125	30,0

Ghi chú: các bán kính trong $r = 5$ mm.

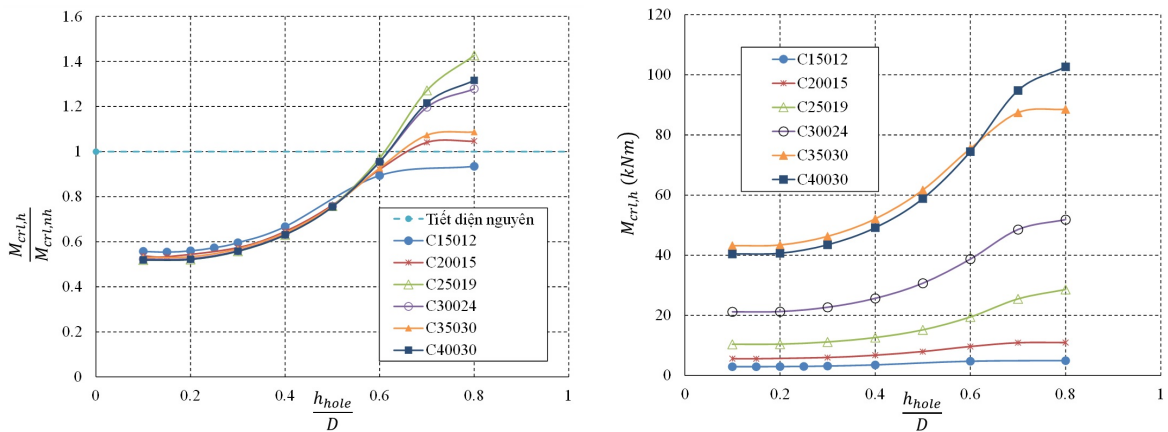
Theo như khảo sát tại báo cáo của Pham [30], tải mất ổn định cục bộ phụ thuộc vào tỉ số chiều cao lỗ khoét và chiều cao tiết diện h_{hole}/D , trong khi đó giá trị của mất ổn định méo lại chịu ảnh hưởng của chiều dài lỗ khoét qua tỉ số L_{hole}/D , nên khảo sát sẽ xem xét các yếu tố ảnh hưởng này đến từng loại tải mất ổn định tương ứng.



Hình 3. Các kích thước chính của tiết diện chữ C

4.1. Ảnh hưởng của chiều cao lỗ khoét đến mô men mất ổn định cục bộ tuyến tính

Tỉ số chiều cao lỗ khoét và chiều cao tiết diện h_{hole}/D được lấy từ 0,1 đến 0,8. Chiều dài lỗ khoét L_{hole} được lấy bằng hai lần chiều cao tiết diện ($L_{hole} = 2D$, trong đó D là chiều cao tiết diện) và cần đảm bảo chiều dài lỗ khoét L_{hole} lớn hơn chiều dài nửa bước sóng mất ổn định cục bộ của tiết diện giảm yếu đang xét $L_{crl,h}$ ($L_{hole} > L_{crl,h}$). Kết quả khảo sát được biểu diễn tại Hình 4, trong đó $M_{crl,h}$ và $M_{crl,nh}$ là mô men mất ổn định cục bộ của tiết diện có lỗ khoét và tiết diện nguyên.



Hình 4. Kết quả mất ổn định cục bộ của tiết diện chịu uốn

Kết quả cho thấy lỗ khoét có kích thước tăng thì tải mất ổn định cục bộ tại lỗ khoét có xu hướng tăng lên. Với lỗ khoét nhỏ thì mất ổn định cục bộ xảy ra tại vị trí lỗ khoét, còn với lỗ khoét lớn thì mất ổn định cục bộ xảy ra giữa các lỗ khoét. Lỗ khoét kích thước nhỏ làm giảm tải mất ổn định cục bộ của tiết diện nên khi đó mất ổn định cục bộ xảy ra tại vị trí lỗ khoét. Lỗ khoét kích thước lớn, tải mất ổn

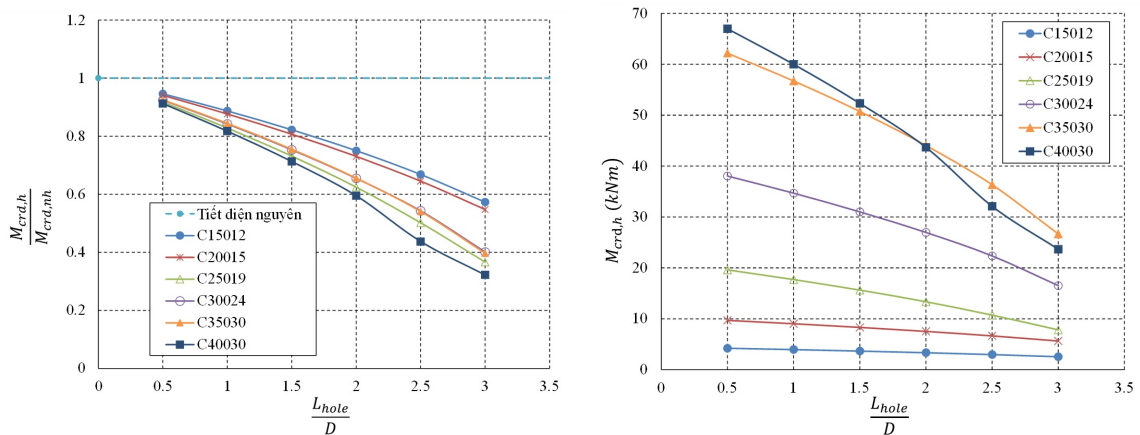
định cục bộ tại lỗ khoét cao hơn giá trị tải mất ổn định cục bộ của tiết diện nguyên, nên mất ổn định sẽ không xảy ra tại vị trí lỗ khoét mà tại tiết diện nguyên giữa các lỗ khoét. Điều này được giải thích là khi kích thước lỗ khoét tăng, phần phẳng còn lại của phía trên và dưới lỗ khoét bản bụng giảm, dẫn đến độ mảnh của các phần bản bụng này giảm và làm tính ổn định tăng.

Ảnh hưởng của lỗ khoét này đến tải mất ổn định cục bộ khá rõ ràng khi mô men mất ổn định cục bộ tại vị trí lỗ khoét giảm khá nhiều đến hơn 40% so với không khoét lỗ. Giá trị mô men mất ổn định cục bộ có xu hướng xảy ra ở khu vực khoét lỗ khi tỉ số h_{hole}/D nhỏ hơn khoảng 0,65, thậm chí tiết diện C15012 có xảy ra mất ổn định tại lỗ khoét khi h_{hole}/D đạt đến 0,8. Khi tỉ số h_{hole}/D lớn hơn 0,65 thì mô men mất cục bộ tuyến tính của tiết diện giảm yếu lớn hơn so với giá trị này của tiết diện nguyên, khi đó mô men mất ổn định cục bộ được lấy bằng giá trị này của tiết diện nguyên.

4.2. Ảnh hưởng của chiều dài lỗ khoét đến mô men mất ổn định méo tiết diện tuyến tính

Tỉ số giữa chiều dài lỗ khoét và chiều cao tiết diện khảo sát L_{hole}/D lấy từ 0,5 đến 3,0. Chiều cao lỗ khoét lấy bằng một nửa chiều cao tiết diện khảo sát. Kết quả khảo sát được biểu diễn tại Hình 5, trong đó $M_{crd,h}$ và $M_{crd,nh}$ là mô men mất ổn định méo của tiết diện có lỗ khoét và tiết diện nguyên.

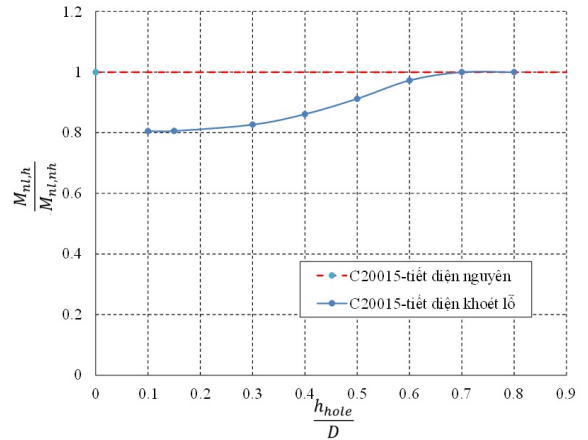
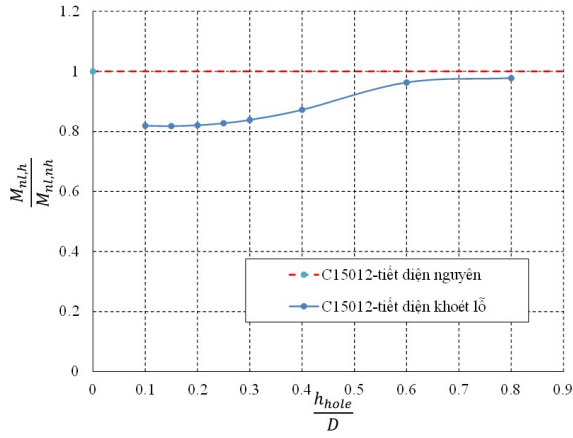
Từ các kết quả thu được có thể thấy chiều dài lỗ khoét tăng thì tải mất ổn định méo tiết diện giảm. Tỉ số giữa kích thước bản bụng và bản cánh càng tăng thì ảnh hưởng của lỗ khoét đến mô men mất ổn định méo tiết diện càng trở nên rõ rệt hơn. Cụ thể cho điều này, tiết diện C15012 có tỉ số này là 2,38 thì mô men mất ổn định méo giảm xuống khoảng 40%, còn tiết diện C40030 có tỉ số này là 3,23 thì tải mất ổn định méo giảm xuống tới khoảng 65%. Điều này được giải thích do ảnh hưởng của bản bụng đến ứng xử mất ổn định méo của bản cánh, bản bụng có tính ổn định càng cao (tức là tỉ số bản bụng và bản cánh nhỏ) thì sẽ giảm ảnh hưởng của lỗ khoét đến mất ổn định méo tiết diện của bản cánh.



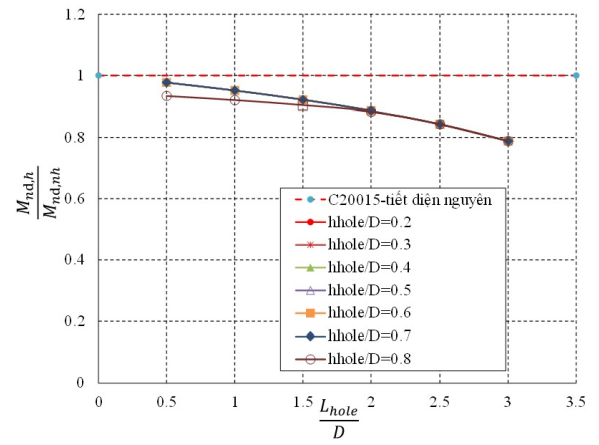
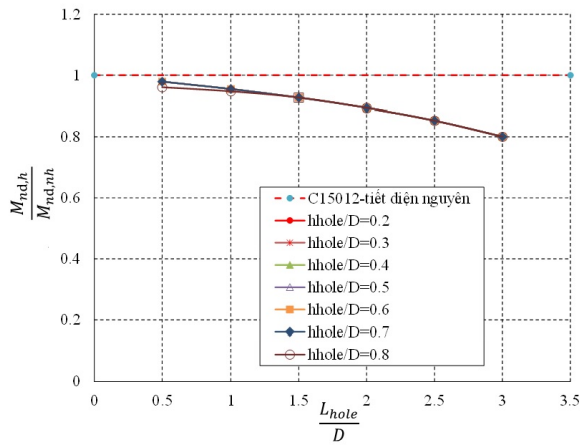
Hình 5. Kết quả mất ổn định méo của tiết diện chịu uốn

5. Khảo sát ảnh hưởng kích thước lỗ khoét đến khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép chữ C tạo hình nguội

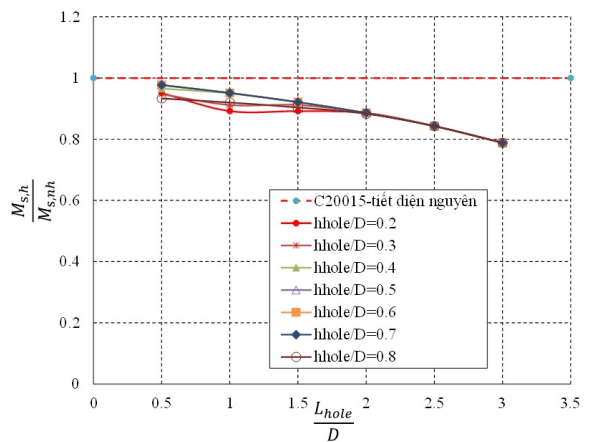
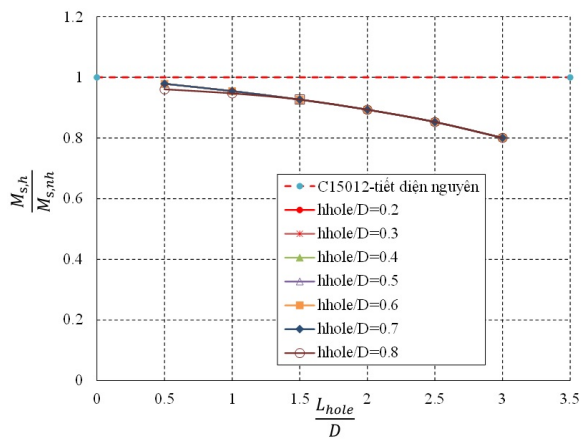
Các tiết diện thép tạo hình nguội chữ C dùng cho khảo sát được liệt kê trong Bảng 1. Kích thước lỗ khoét bao gồm chiều cao được thay đổi từ 0,2 đến 0,8 lần chiều cao tiết diện, còn chiều dài lỗ khoét được lấy từ 0,5 đến 3,0 lần chiều cao của tiết diện. Kết quả khảo sát được trình bày trên Hình 6, 7 và 8 cho các tiết diện từ C15012 đến tiết diện C40030 trong mối tương quan giữa tiết diện có lỗ khoét và tiết diện nguyên. Trong các hình trên, khả năng chịu lực tiết diện gồm hai thành phần là khả năng chịu lực do mất ổn định cục bộ (như Hình 6(a), 7(a) và 8(a)) và khả năng chịu lực do mất ổn định méo



(a) Mô men mất ổn định cục bộ tiết diện

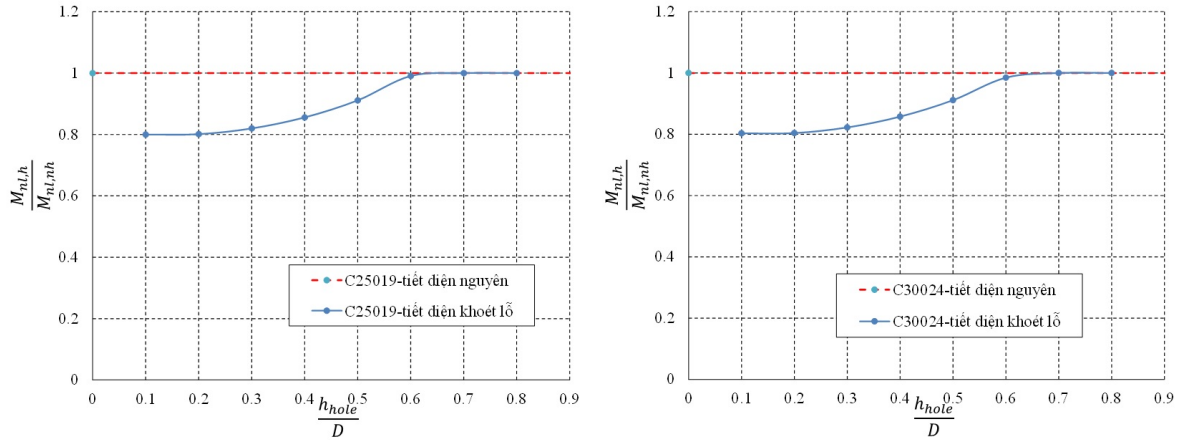


(b) Mô men mất ổn định méo tiết diện

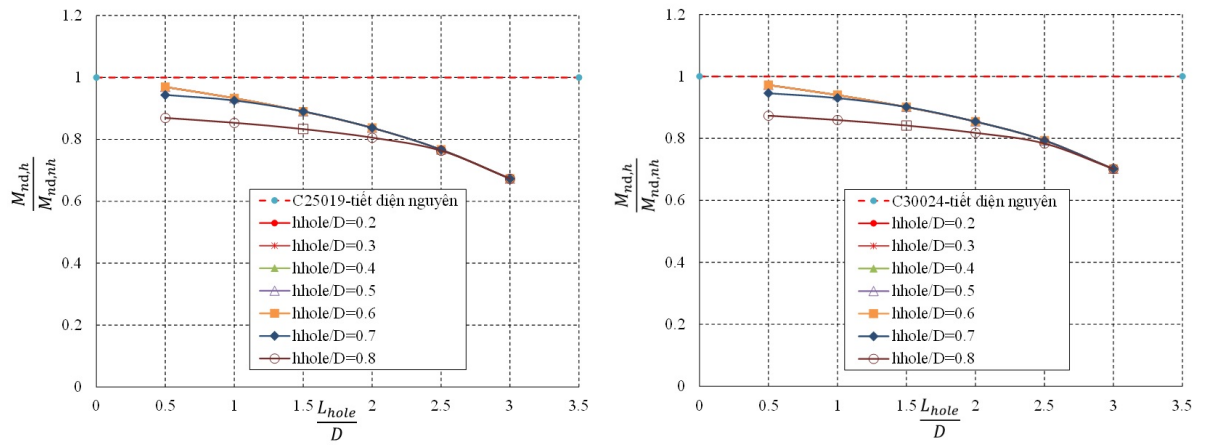


(c) Mô men chịu lực của tiết diện

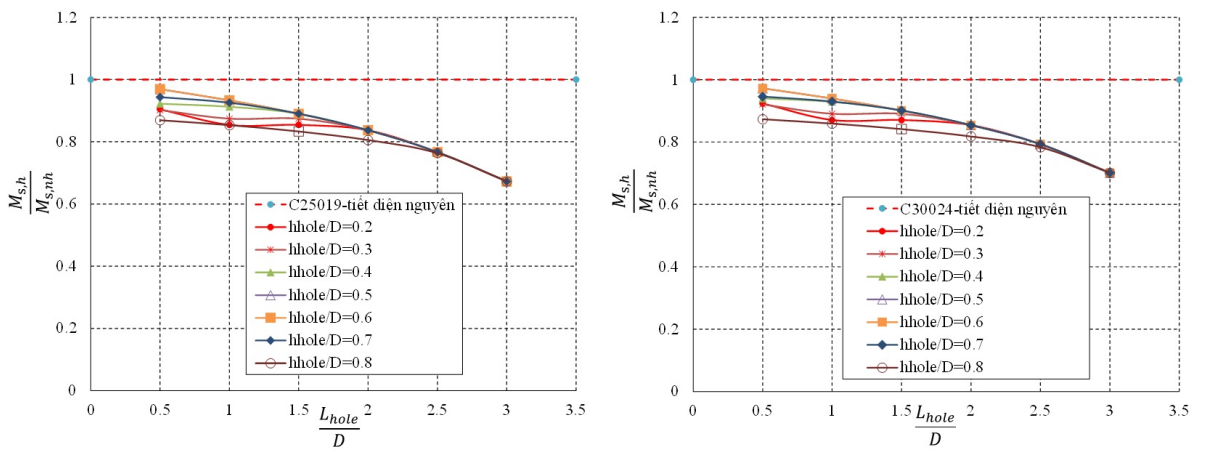
Hình 6. Khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép C15012 và C20015



(a) Mô men mất ổn định cục bộ tiết diện

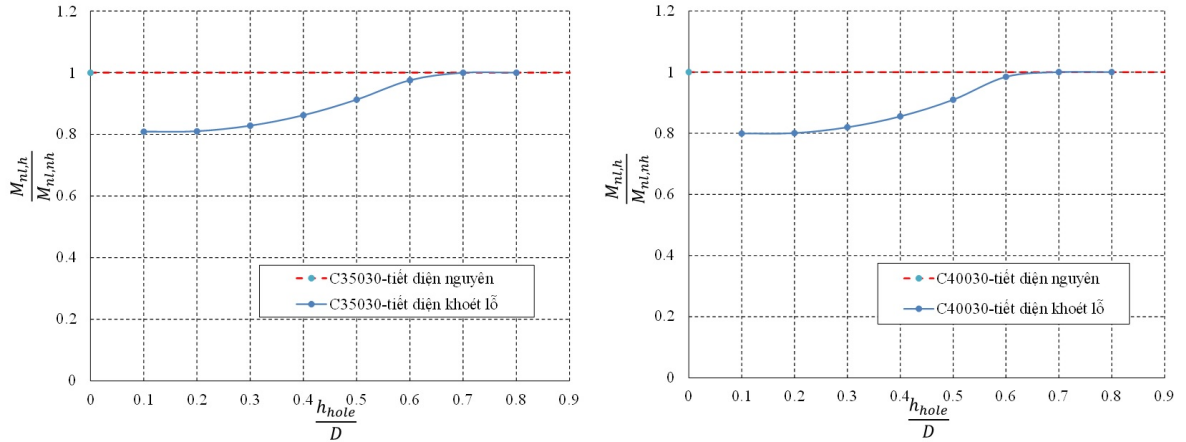


(b) Mô men mất ổn định méo tiết diện

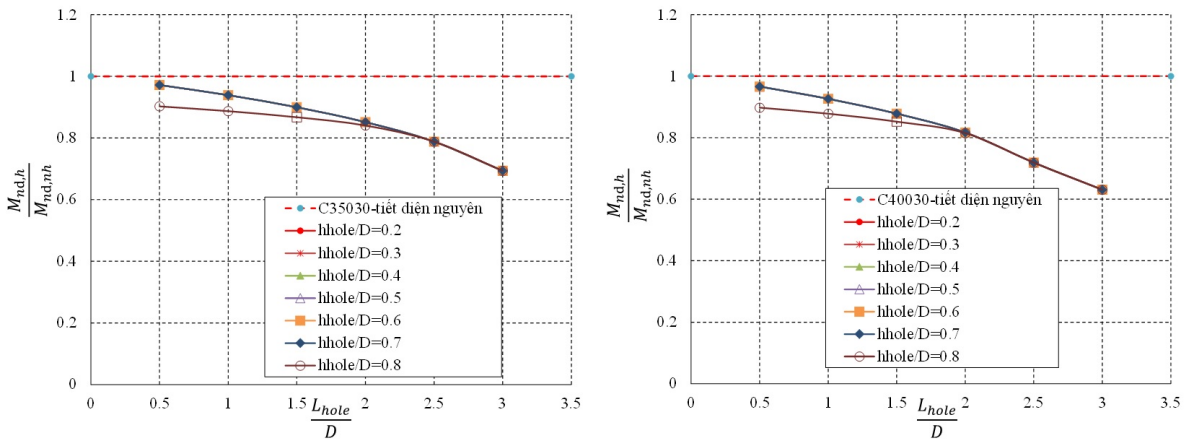


(c) Mô men chịu lực của tiết diện

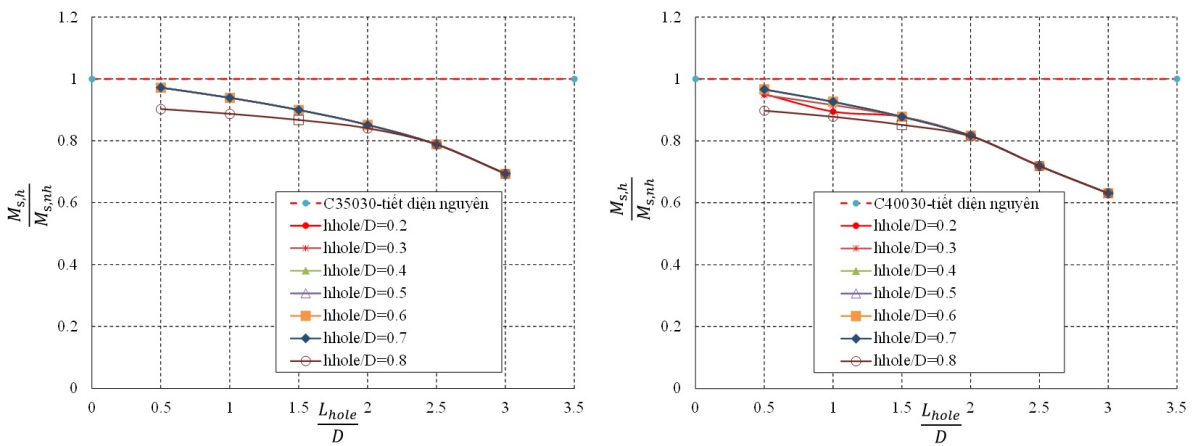
Hình 7. Khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép C25019 và C30024



(a) Mô men mất ổn định cục bộ tiết diện



(b) Mô men mất ổn định méo tiết diện



(c) Mô men chịu lực của tiết diện

Hình 8. Khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép C35030 và C40030

tiết diện (như Hình 6(b), 7(b) và 8(b)), trong đó thành phần mất ổn định cục bộ chỉ phụ thuộc vào chiều cao lỗ khoét thông qua tỉ số (h_{hole}/D), còn thành phần mất ổn định méo tiết diện phụ thuộc vào cả chiều cao lẫn chiều dài lỗ khoét thông qua tỉ số (h_{hole}/D) và (L_{hole}/D). Khả năng chịu lực tiết diện của các tiết diện khảo sát là giá trị nhỏ hơn trong hai thành phần trên, được biểu diễn như Hình 6(c), 7(c) và 8(c).

Hình 6(a), 7(a) và 8(a) cho thấy mô men mất ổn định cục bộ của tiết diện giảm đi khoảng 20% so với tiết diện nguyên khi chiều cao lỗ khoét nhỏ ($h_{hole}/D = 0,2$). Giá trị này tăng lên tiến đến mô men mất ổn định cục bộ của tiết diện nguyên khi (h_{hole}/D) lớn hơn 0,65. Khi đó mất ổn định cục bộ sẽ xảy ra tại vị trí tiết diện nguyên giữa hai lỗ khoét.

Trên Hình 6(b), 7(b) và 8(b), mô men mất ổn định méo tiết diện có xu hướng giảm xuống khi chiều dài lỗ khoét tăng, có thể giảm xuống 30% so với tiết diện nguyên. Khi chiều cao lỗ khoét tăng thì mô men mất ổn định méo tiết diện này cũng có bị ảnh hưởng song không đáng kể. Điều này chứng minh thông qua thành phần mô men mất ổn định méo tiết diện không thay đổi khi tỉ số (h_{hole}/D) thay đổi từ 0,2 đến 0,6, và có giảm xuống hơn một chút với tỉ số (h_{hole}/D) bằng 0,7 và 0,8.

Khả năng chịu lực tiết diện được biểu diễn trên Hình 6(c), 7(c) và 8(c) thấy rằng mô men gây mất ổn định cục bộ đóng vai trò chủ đạo khi tỉ số (h_{hole}/D) thay đổi từ 0,2 đến 0,6 cho hầu hết các tiết diện khảo sát (trừ tiết diện C35030) với sự thay đổi đáng kể của Hình 6(c), 7(c) và 8(c) so với Hình 6(b), 7(b) và 8(b). Khi tỉ số (h_{hole}/D) bằng 0,7 và 0,8, mô men gây mất ổn định méo tiết diện lại quyết định đến khả năng chịu lực tiết diện khảo sát thông qua việc không có sự thay đổi giữa Hình 6(c) đến 8(c) so với Hình 6(b) đến 8(b).

Nhằm tối ưu hóa kích thước lỗ khoét để đạt khả năng chịu lực tiết diện tốt hơn, một khảo sát cũng được thực hiện với các cặp lỗ khoét có kích thước khác nhau nhưng có cùng một diện tích lỗ khoét, bao gồm hai trường hợp như sau:

- Lỗ khoét ngắn (có chiều dài $L_{hole} < D$), xem xét hai cặp lỗ khoét bao gồm LK1.1 ($h_{hole} = 0,5D$; $L_{hole} = 0,8D$) và LK1.2 ($h_{hole} = 0,8D$; $L_{hole} = 0,5D$).
- Lỗ khoét dài (có chiều dài lỗ khoét $D \leq L_{hole} \leq 2D$), bao gồm hai lỗ khoét LK2.1 ($h_{hole} = 0,4D$; $L_{hole} = 2D$) và LK2.2 ($h_{hole} = 0,8D$; $L_{hole} = D$).

Bảng 2. Tỉ số giữa $M_{s,h}$ và $M_{s,nh}$

Tiết diện	Lỗ khoét ngắn ($L_{hole} < D$)		Lỗ khoét dài ($D \leq L_{hole} \leq 2D$)	
	LK1.1 (0,5D; 0,8D)	LK1.2 (0,8D; 0,5D)	LK2.1 (0,4D; 2D)	LK2.2 (0,8D; D)
C15012	0,967	0,961	0,893	0,947
C20015	0,964	0,933	0,886	0,920
C25019	0,951	0,869	0,837	0,854
C30024	0,956	0,873	0,854	0,859
C35030	0,956	0,903	0,852	0,887
C40030	0,947	0,898	0,817	0,878

Kết quả tỉ số giữa khả năng chịu lực tiết diện khi có lỗ khoét so sánh với tiết diện nguyên ($M_{s,h}/M_{s,nh}$) được xác định và thống kê trong Bảng 2, trong đó $M_{s,h}$ và $M_{s,nh}$ là mô men mất ổn định tiết diện của dầm thép chữ C tạo hình nguội có và không có lỗ khoét.

Kết quả trên Bảng 2 cho thấy rằng lỗ khoét có chiều cao nhỏ sẽ có lợi hơn về mặt chịu lực trong trường hợp lỗ khoét ngắn ($L_{hole} < D$), nhưng lỗ khoét có chiều cao lớn sẽ có ưu thế hơn khi lỗ khoét dài ($D \leq L_{hole} \leq 2D$). Điều này được giải thích như sau:

- Khi lỗ khoét ngắn ($L_{hole} < D$), mô men chịu lực tiết diện bị ảnh hưởng nhiều bởi chiều cao thông qua khoảng cách giữa các đường chịu lực trở lên đáng kể khi tỉ số (h_{hole}/D) tăng lên (xem Hình 6(c), 7(c) và 8(c)), nên khi chiều cao càng tăng thì mô men chịu lực tiết diện có xu hướng giảm xuống.

- Khi lỗ khoét dài ($D \leq L_{hole} \leq 2D$), các đường biểu diễn mô men chịu lực tiết diện có xu hướng xích lại gần nhau khi thay đổi tỉ số (h_{hole}/D), nghĩa là ảnh hưởng của chiều cao lỗ khoét có xu hướng giảm xuống (xem Hình 6(c), 7(c) và 8(c)). Trong khi đó độ dốc các đường chịu lực này có xu hướng tăng lên khi chiều dài lỗ khoét tăng, chứng tỏ ảnh hưởng của chiều dài lỗ khoét trở lên đáng kể hơn. Điều này dẫn đến mô men chịu lực tiết diện sẽ có lợi hơn với lỗ khoét có chiều dài nhỏ hơn và chiều cao lớn hơn trong khoảng khảo sát với tỉ số $h_{hole}/D \leq 0,8$.

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp phân tích mất ổn định tuyến tính và phương pháp Cường độ trực tiếp trong xác định khả năng chịu lực tiết diện của tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét theo Tiêu chuẩn thép tạo hình nguội Hoa Kỳ AISI S100-16. Dựa trên các cơ sở lý thuyết trình bày, khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét đã được xác định và khảo sát với sự thay đổi kích thước của lỗ khoét. Dựa trên kết quả khảo sát, một số nhận xét được đưa ra như sau:

- Mô men mất ổn định cục bộ có xu hướng tăng trong khi mô men mất ổn định méo tiết diện lại giảm với sự tăng lên của kích thước lỗ khoét.

- Với tiêu chí cùng một diện tích lỗ khoét, khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép chữ C tạo hình nguội sẽ có lợi hơn với lỗ khoét có chiều cao nhỏ khi chiều dài lỗ khoét ngắn ($L_{hole} < D$), nhưng nó lại có ưu thế với lỗ khoét có chiều cao lớn khi chiều dài lỗ khoét lớn ($D \leq L_{hole} \leq 2D$).

- Một phương pháp trong phân tích khả năng chịu lực tiết diện của dầm thép tạo hình nguội đã được trình bày, giúp cho người thiết kế có thể chọn kích thước lỗ khoét phù hợp về mặt kỹ thuật mà có lợi hơn về mặt chịu lực.

Tài liệu tham khảo

- [1] Yu, W.-W., LaBoube, R. A., Chen, H. (2019). *Cold-Formed Steel Design*. Wiley.
- [2] Hancock, G. J., Pham, C. H. (2016). *New section shapes using high-strength steels in cold-formed steel structures in Australia*. *Recent Trends in Cold-Formed Steel Construction*, Elsevier, 221–239.
- [3] AISI S100-16 (2016). *North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members*. Washington DC: American Iron and Steel Institute.
- [4] Schafer, B. W., Peköz, T. (1998). Direct Strength Prediction of Cold-Formed Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions. *Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*.
- [5] Li, Z., Schafer, B. W. (2010). *Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: Conventional and constrained finite strip methods*. Saint Louis, Missouri, USA.
- [6] Hancock, G. J., Pham, C. H. (2015). *Buckling analysis of thin-walled sections under localised loading using the semi-analytical finite strip method*. *Thin-Walled Structures*, 86:35–46.
- [7] Hiếu, P. N. (2022). *Đánh giá khả năng chịu lực của tiết diện thép tạo hình nguội SupaCee*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 16(1V):92–105.
- [8] Pham, N. H., Vu, Q. A. (2021). *Effects of stiffeners on the capacities of cold-formed steel channel members*. *Steel Construction*, 14(4):270–278.
- [9] Moen, C. D., Schafer, B. W. (2009). *Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes*. *Engineering Structures*, 31(12):2812–2824.

- [10] Moen, C. D. (2008). *Direct Strength design for cold-formed steel members with perforations*. PhD Thesis, Johns Hopkins University, Baltimore.
- [11] Moen, C. D., Schafer, B. W. (2008). [Experiments on cold-formed steel columns with holes](#). *Thin-Walled Structures*, 46(10):1164–1182.
- [12] Moen, C. D., Schafer, B. W. (2006). Impact of holes on the elastic buckling of cold- formed steel columns. *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 269–283.
- [13] Moen, C. D., Schafer, B. W. (2010). Extending direct strength design to cold-formed steel beams with holes. *The 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures - Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction*, 171–183.
- [14] Cai, J., Moen, C. D. (2016). [Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory](#). *Thin-Walled Structures*, 107:274–286.
- [15] Moen, C. D., Schafer, B. W. (2009). [Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending](#). *Thin-Walled Structures*, 47(12):1597–1607.
- [16] American Iron and Steel Institute (2021). *Development of CUFSM Hole Module and Design Tables for the Cold-formed Steel Cross-sections with Typical Web Holes in AISI D100*. AISI D100, Research Report RP21-01.
- [17] American Iron and Steel Institute (2021). *Development of CUFSM Hole Module and Design Tables for the Cold-formed Steel Cross-sections with Typical Web Holes in AISI D100*. AISI D100, Research Report RP21-02.
- [18] Ortiz-Colberg, R. A. (1981). *The load carrying capacity of perforated cold-formed steel columns*. Cornell University, Ithaca, NY.
- [19] Sivakumaran, K. S. (1987). [Load capacity of uniformly compressed cold-formed steel section with punched web](#). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 14(4):550–558.
- [20] Banwait, A. S. (1987). *Axial load behaviour of thin-walled steel sections with openings*. McMaster University, Hamilton, Ontario.
- [21] Abdel-Rahman, N. (1997). *Cold-formed steel compression members with perforations*. McMaster University, Hamilton, Ontario.
- [22] Rhodes, J., Schneider, F. D. The compressional behaviour of perforated elements. *Twelfth International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures*, 11–28.
- [23] 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.
- [24] Pu, Y., Godley, M. H. R., Beale, R. G., Lau, H. H. (1999). [Prediction of Ultimate Capacity of Perforated Lipped Channels](#). *Journal of Structural Engineering*, 125(5):510–514.
- [25] Rhodes, J., Macdonald, M. (1996). The effects of perforation length on the behaviour of perforated elements in compression. *Thirteenth International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures*, 91–101.
- [26] Pham, N. H. (2022). [Effects of Hole Locations on the Elastic Global Buckling Loads of Cold-Formed Steel Channel Members with Perforations Under Compression or Bending](#). *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Singapore, 57–69.
- [27] Chen, B., Roy, K., Uzzaman, A., Lim, J. B. P. (2020). [Moment capacity of cold-formed channel beams with edge-stiffened web holes, un-stiffened web holes and plain webs](#). *Thin-Walled Structures*, 157: 107070.
- [28] Chi, Y., Roy, K., Chen, B., Fang, Z., Uzzaman, A., Beulah Gnana Ananthi, G., Lim, J. B. P. (2021). Effect of web hole spacing on axial capacity of back-to-back cold-formed steel channels with edge-stiffened holes. *Steel and Composite Structures*, 40:287–305.
- [29] Chen, B., Roy, K., Fang, Z., Uzzaman, A., Pham, C. H., Raftery, G. M., Lim, J. B. P. (2022). [Shear Capacity of Cold-Formed Steel Channels with Edge-Stiffened Web Holes, Unstiffened Web Holes, and Plain Webs](#). *Journal of Structural Engineering*, 148(2).
- [30] Pham, N. H. (2021). *Nghiên cứu ảnh hưởng của lỗ khoét đến sự mất ổn định tuyến tính của cấu kiện thép tạo hình nguội*. Đề tài khoa học cấp trường. Đại học Kiến trúc Hà Nội.
- [31] BlueScope Lysaght (2014). *Supapurlins Supazeds & Supacees*.