

Xác định khả năng chịu lực của cột thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét bản bụng

Determination of capacities of cold-formed steel channel columns with web holes

> TS PHẠM NGỌC HIẾU¹, THS THỊNH VĂN THANH², TS NGUYỄN NGỌC THẮNG³

¹Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, Email: hieupn@hau.edu.vn

²Khoa Công trình, Trường Sĩ quan Công binh, Email: Thanhz756@gmail.com

³Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi, Email: thangnn@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Cấu kiện thép tạo hình nguội bao gồm lỗ khoét được sử dụng phổ biến để lắp đặt hệ thống kỹ thuật trong tường hay trên trần nhà. Tuy nhiên, sự có mặt của các lỗ khoét này đã dẫn đến sự giảm khả năng chịu lực của cấu kiện. Bài báo đưa ra quy trình xác định khả năng chịu lực của cấu kiện cột thép chữ C tạo hình nguội, sử dụng Phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM), đã được quy định trong tiêu chuẩn Hoa Kỳ AISI S100-2016. Một chương trình phân tích mất ổn định tuyến tính được tài trợ và phát triển bởi Viện Sắt và Thép Hoa Kỳ đã được sử dụng trong phân tích ứng xử mất ổn định tuyến tính của cột chữ C có lỗ mở bản bụng. Bài báo cũng đưa ra các ví dụ minh họa trong xác định khả năng chịu lực của cột thép chữ C với lỗ khoét bản bụng và có so sánh với khả năng chịu lực của tiết diện nguyên.

Từ khóa: Khả năng chịu lực; cột thép chữ C; tạo hình nguội; lỗ khoét bản bụng.

ABSTRACT

Cold-formed steel members that include openings are commonly employed to accommodate technical systems within walls or ceilings. However, the presence of these openings can result in a decrease in their member strength. This research paper, therefore, outlines the process of assessing the member capacities of cold-formed steel channel columns, using the Direct Strength Method (DSM) as specified in AISI S100-2016. An elastic buckling analysis software developed by the American Iron and Steel Institute is utilized to analyze the elastic buckling behavior of channel columns with openings. The paper also provides examples illustrating the determination of capacities for channel columns with openings, which are then compared to those of gross sections.

Keywords: Capacities; steel channel columns; cold-formed steel; web holes.

1. GIỚI THIỆU

Cấu kiện thép tạo hình nguội có lỗ khoét thường ngày gặp trong các kết cấu công trình để phục vụ cho việc lắp đặt các hệ thống điện, nước hay điều hòa. Thông thường các lỗ khoét này được khoan trên bản bụng của các tiết diện chữ C hay chữ Z, mà đã ảnh hưởng đến tải mất ổn định tuyến tính cũng như khả năng chịu lực của các loại cấu kiện này. Khả năng chịu lực của loại cấu kiện có lỗ khoét này đã được xem xét và quy định trong Tiêu chuẩn Hoa Kỳ AISI S100 [1] bằng cách sử dụng Phương pháp Cường độ trực tiếp. Phương pháp này chứng minh được ưu điểm của nó trong thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội so với Phương pháp Bề rộng hiệu dụng (EWM) truyền thống [2] dựa trên tính đơn giản và hiệu quả trong thiết kế. Phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM) có thể đưa ra các dự đoán về khả năng chịu lực của cấu kiện thép tạo hình nguội dựa trên nền tảng các phân tích mất ổn định tuyến tính. Điều này dẫn đến việc xác định giá trị tải mất ổn định có vai trò quan trọng làm cơ sở cho việc áp dụng Phương pháp Cường độ trực tiếp trong thiết kế cấu kiện thép tạo hình nguội.

Phân tích mất ổn định tuyến tính của tiết diện thép tạo hình nguội không lỗ khoét có thể được xác định thông qua đường cong chữ ký phân tích mất ổn định tuyến tính là kết quả của việc sử dụng một số phần mềm phân tích như THIN-WALL-2 hay CUFSM [3; 4]. Các phần mềm này được phát triển dựa trên nền tảng của phương pháp dải hữu hạn [5]. Trường hợp tiết diện không lỗ khoét, các tác giả Phạm và Vu [6] đã đưa ra các phân tích và trình bày các bước thiết kế bằng cách sử dụng chương trình THIN-WALL-2 [3]. Tuy nhiên, những chương trình phân tích mất ổn định đó không dùng được cho tiết diện có lỗ khoét bởi tính không liên tục của các dải tính toán do sự có mặt của các lỗ khoét. Trong các trường hợp như vậy, các mô hình phần tử hữu hạn thường được xem xét sử dụng như ANSYS hay ABAQUS [7] lại tỏ ra không hiệu quả, kết quả mang tính chủ quan không rõ ràng và tốn nhiều công trong việc thiết lập mô hình khi thực hiện các bước phân tích. Thêm vào đó, kết quả từ việc phân tích đó thu được rất nhiều các dạng mất ổn định mà việc xác định chỉ là quan sát đơn thuần và đôi khi không tách biệt được từng dạng mất ổn định do có những hiện tượng giao thoa giữa các dạng mất ổn định với nhau.

Về tổng quan các nghiên cứu về tiết diện thép nguội có lỗ khoét, một số nghiên cứu đã thực hiện khảo sát về ứng xử của cột thép tạo hình nguội chiều dài nhỏ với nhiều hình dạng lỗ khoét khác nhau nhằm phân tích về khả năng chịu lực khi mất ổn định cục bộ [8-11]. Các nghiên cứu khác lại xem xét ảnh hưởng của chiều dài hay vị trí lỗ đến khả năng chịu lực của cột thép tạo hình nguội [12-15]. Khả năng chịu lực và ứng xử của tiết diện thép chữ C tạo hình nguội sau đó được nghiên cứu đánh giá kỹ lưỡng thông

qua nghiên cứu của Moen và Schafer [16-23], và những kết quả nghiên cứu đó đã được đưa vào tiêu chuẩn của Hoa Kỳ AISI S100-16 [1] cho việc thiết kế loại tiết diện này với việc áp dụng và phát triển Phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM). Trong các nghiên cứu đó, họ đã phát triển một phương pháp đơn giản hóa trong xác định tải mất ổn định tuyến tính của tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét. Việc phát triển lý thuyết này là cơ sở quan trọng cho việc phát triển và ứng dụng phương pháp Cường độ trực tiếp trong thiết kế tiết diện thép tạo hình nguội có lỗ khoét mà đã được quy định trong Tiêu chuẩn Hoa Kỳ AISI S100-16 [1]. Gần đây một chương trình phần mềm CUFISM đã được phát triển bởi Viện Sắt và Thép Hoa Kỳ [24; 25] dựa trên kết quả nghiên cứu của Moen và Schafer [16-23], điều này giúp cho việc xác định các giá trị tải mất ổn định tuyến tính của loại tiết diện có lỗ khoét nhanh chóng và dễ dàng hơn.

Do đó, bài báo sẽ trình bày và áp dụng phương pháp Cường độ trực tiếp trong xác định khả năng chịu lực của cột thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét, và sau đó so sánh với khả năng chịu lực của cấu kiện nguyên không có lỗ khoét trên bản bụng.

2. XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA CỘT THÉP TẠO HÌNH NGUỘI CÓ LỖ KHOÉT

Khả năng chịu nén 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) Cường độ mất ổn định tổng thể của cấu kiện P_{ne} ; 2) Cường độ mất ổn định cục bộ của cấu kiện P_{nl} ; 3) Cường độ mất ổn định méo của tiết diện P_{nd} . Các thành phần cường độ này được xác định như sau:

2.1. Cường độ mất ổn định tổng thể

$$P_{ne} = \left(0.658^{\lambda_c^2}\right) P_y \quad \text{if } \lambda_c \leq 1.5 \quad (1)$$

$$P_{ne} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) P_y \quad \text{if } \lambda_c > 1.5 \quad (2)$$

Trong đó:

$$\lambda_c \text{ độ mảnh của cấu kiện: } \lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cre}};$$

P_y là lực gây ra biến dạng chảy dẻo của tiết diện;

P_{cre} là cường độ mất ổn định tổng thể tuyến tính, được lấy giá trị nhỏ hơn trong các giá trị sau:

$$P_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L)^2} \quad (3)$$

$$P_{exz} = \frac{1}{2\beta} \left[(P_{ex} + P_t) - \sqrt{(P_{ex} + P_t)^2 - 4\beta P_{ex} P_t} \right] \quad (4)$$

$$P_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L)^2}; P_t = \frac{1}{r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L)^2} \right]; r_o = \sqrt{x_o^2 + y_o^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g}};$$

Các thông số đặc trưng của tiết diện (I_x , I_y , J , A_g , x_o , y_o , r_o) được xác định theo tiết diện nguyên. Các đặc trưng của tiết diện có lỗ khoét được xác định theo phương pháp "trọng lượng trung bình" như đã trình bày trong Bảng 2.3.2-1 của Tiêu chuẩn Hoa Kỳ [3], căn cứ theo tỉ số chiều dài của phần tiết diện nguyên và tiết diện giảm yếu, như sau:

$$I_{avg} = \frac{I_g L_g + I_{net} L_{net}}{L}; J_{avg} = \frac{J_g L_g + J_{net} L_{net}}{L};$$

$$r_{o,avg} = \sqrt{x_{o,avg}^2 + y_{o,avg}^2 + \frac{I_{x,avg} + I_{y,avg}}{A_{avg}}}; A_{avg} = \frac{A_g L_g + A_{net} L_{net}}{L};$$

$$x_{o,avg} = \frac{x_{o,g} L_g + x_{o,net} L_{net}}{L}; y_{o,avg} = \frac{y_{o,g} L_g + y_{o,net} L_{net}}{L};$$

$C_{w,net}$ là hằng số xoắn kiểm chế của tiết diện giả thiết có chiều cao h_{hole}^* được xác định theo công thức (5), trong đó h_{hole} là chiều cao thực của lỗ khoét và D là chiều cao của tiết diện.

$$h_{hole}^* = h_{hole} + \frac{1}{2}(D - h_{hole}) \left(\frac{h_{hole}}{D} \right)^{0.2}$$

2.2. Cường độ mất ổn định cục bộ của tiết diện

Với $\lambda_l \leq 0,776$: $P_{nl} = P_{ne}$

$$\text{Với } \lambda_l > 0,776: P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne}$$

Trong đó

λ_l là độ mảnh danh nghĩa do mất ổn định cục bộ:

$$\lambda_l = \sqrt{P_{ne} / P_{crl}};$$

P_y là cường độ chảy dẻo của tiết diện nguyên;

P_{crl} là cường độ mất ổn định tuyến tính cục bộ khi chịu nén của tiết diện có khoét lỗ, được xác định bằng cách sử dụng các phân tích mất ổn định.

2.3. Cường độ mất ổn định méo tiết diện

Cường độ mất ổn định 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 (13):

$$\text{Với } \lambda_d \leq \lambda_{d1}: P_{nd} = P_{ynet} \quad (8)$$

Với $\lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2}$:

$$P_{nd} = P_{ynet} - \left(\frac{P_{ynet} - P_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1}) \quad (9)$$

Nếu $\lambda_d > \lambda_{d2}$:

Với $\lambda_d \leq 0,561$: $P_{nd} = P_y$

$$\text{Với } \lambda_d > 0,561: P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crl}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_y} \right)^{0,6} P_y \quad (11)$$

Trong đó:

λ_d là độ mảnh danh nghĩa mất ổn định méo tiết diện:

$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crl}};$$

P_y là cường độ chảy dẻo của tiết diện nguyên;

P_{ynet} là cường độ chảy dẻo của tiết diện giảm yếu;

$$\lambda_{d1} = 0,561 \left(\frac{P_{ynet}}{P_y} \right);$$

$$\lambda_{d2} = 0,561 \left[14 \left(\frac{P_y}{P_{ynet}} \right)^{0,4} - 13 \right];$$

$$P_{d2} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1,2} \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1,2} P_y;$$

P_{crl} là cường độ mất ổn định tuyến tính méo tiết diện khi chịu nén của tiết diện có khoét lỗ, được xác định bằng cách sử dụng các phân tích mất ổn định.

3. VÍ DỤ TÍNH TOÁN

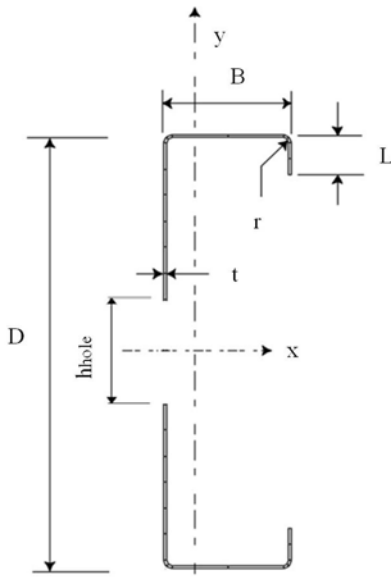
Tiết diện C20015 dùng trong tính toán với các số liệu cụ thể như sau: chiều cao $D = 203\text{mm}$; chiều rộng $B = 76\text{mm}$; sườn biên $L = 19,5\text{mm}$; chiều dày $t = 1,5\text{mm}$; chiều cao lỗ khoét $h_{hole} = 40\text{mm}$; chiều dài lỗ khoét bằng 200mm . Các kích thước tiết diện được biểu diễn trên Hình 1. Vật liệu thép có các thông số: Ứng suất chảy $F_y = 345\text{MPa}$; Mô đun đàn hồi $E = 203400\text{MPa}$.

Sử dụng các phần mềm phân tích mất ổn định như đã đề cập trong mục 1, xác định được các giá trị sau: Cường độ chảy dẻo của tiết diện nguyên $P_y = 195,47\text{ (kN)}$; Cường độ chảy dẻo của tiết diện

giảm yếu $P_{ynet} = 174,77$ (kN); Các giá trị tải mất ổn định tiết diện: $P_{cr1} = 31,22$ (kN); $P_{crd} = 66,285$ (kN). Cấu kiện có chiều dài 2500 mm, có 05 lỗ khoét được bố trí đối xứng và đều đặn, biểu diễn như trên Hình 2. Điều kiện biên cho cột được quy định quay tự do theo trục yếu (y-y) và ngàm chặt theo trục khỏe (x-x) và bị kiểm chế xoắn tại hai đầu cấu kiện. Do đó, chiều dài tính toán của cấu kiện được lấy bằng $L_y = L$, $L_x = L_z = 0,5L$; trong đó L là chiều dài hình học của cột.

Các đặc trưng hình học của tiết diện có lỗ khoét được xác định sử dụng phương pháp “trọng lượng trung bình” thu được kết quả như sau:

$A_{avg} = 542,58 \text{ mm}^2$; $I_{xavg} = 3599500 \text{ mm}^4$; $I_{yavg} = 418092 \text{ mm}^4$; $J_{avg} = 406,93$; $C_{wnet} = 3349800000$; $x_{0avg} = 55$ (mm); $y_{0avg} = 0$ mm.



Hình 1. Các kích thước chính của tiết diện chữ C

3.1. Cường độ mất ổn định tổng thể

Xác định cường độ mất ổn định tổng thể tuyến tính P_{cre} được xác định là nhỏ hơn trong hai giá trị sau:

$$P_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L)^2} = 134,15 \text{ (kN)}$$

$$P_{exz} = \frac{1}{2\beta} \left[(P_{ex} + P_t) - \sqrt{(P_{ex} + P_t)^2 - 4\beta P_{ex} P_t} \right] = 401,99 \text{ (kN)} \quad (\text{Trong}$$

đó $\beta = 0,706$)

Do đó $P_{cre} = P_{ey} = 134,15$ (kN)

Xác định khả năng chịu lực của cột do mất ổn định tổng thể:

Độ mảnh của cột:

$$\lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cre}} = \sqrt{195,47 / 134,15} = 1,207 < 1,5$$

Do đó, khả năng chịu lực do mất ổn định tổng thể của cột:

$$P_{ne} = \left(0,658^{\lambda_c^2} \right) P_y = 106,224 \text{ (kN)}$$

3.2. Cường độ mất ổn định cục bộ

Độ mảnh danh nghĩa cục bộ:

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{cr1}}} = \sqrt{\frac{106,224}{31,22}} = 1,824$$

Vì $\lambda_l > 0,776$, nên P_{nl} được xác định như sau:

$$\begin{aligned} P_{nl} &= \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne} \\ &= \left[1 - 0,15 \left(\frac{31,22}{106,224} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{31,22}{106,224} \right)^{0,4} \times 106,224 \\ &= 59,586 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

3.3. Cường độ mất ổn định méo tiết diện

Độ mảnh danh nghĩa méo tiết diện:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}} = \sqrt{\frac{195,47}{66,285}} = 1,717$$

$$\lambda_{d1} = 0,561 \left(\frac{P_{ynet}}{P_y} \right) = 0,561 \times \left(\frac{174,77}{195,47} \right) = 0,502$$

$$\lambda_{d2} = 0,561 \left[14 \left(\frac{P_y}{P_{ynet}} \right)^{0,4} - 13 \right] = 0,561 \times \left[14 \left(\frac{195,47}{174,77} \right)^{0,4} - 13 \right] = 0,921$$

Vì $\lambda_d > \lambda_{d2} = 0,921$ nên P_{nd} được xác định như sau:

$$\begin{aligned} P_{nd} &= \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y \\ &= \left[1 - 0,25 \left(\frac{66,285}{195,47} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{66,285}{195,47} \right)^{0,6} \times 195,47 \\ &= 88,812 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

Khả năng chịu nén danh nghĩa của cấu kiện cột khảo sát C20015 có lỗ khoét bản bụng:

$$P_n = \text{Min} (P_{ne}, P_{nl}, P_{nd}) = \text{Min}(106,224 \text{ kN}; 59,586 \text{ kN}; 88,812 \text{ kN}) = 59,586 \text{ (kN)}$$

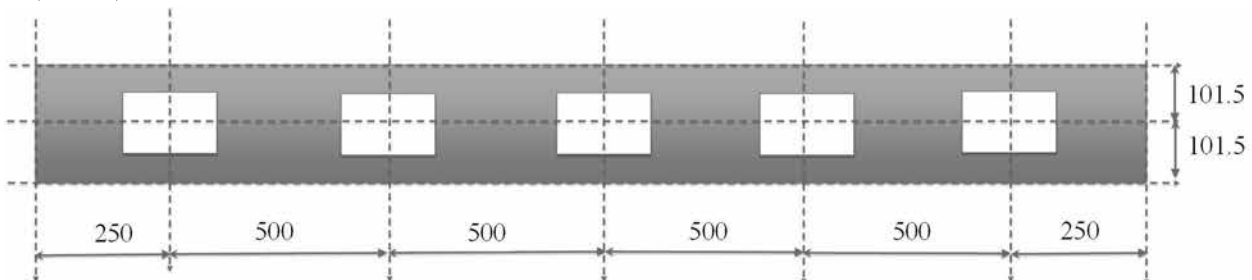
Cấu kiện có lỗ khoét bị phá hoại do mất ổn định cục bộ.

Với tiết diện nguyên, khả năng chịu lực của tiết diện được xác định dựa theo bài báo của Phạm và Vũ [26] có giá trị như sau:

$$P_n = \text{Min} (P_{ne}, P_{nl}, P_{nd}) = \text{Min}(116,11 \text{ kN}; 63,82 \text{ kN}; 108,33 \text{ kN}) = 63,82 \text{ (kN)}$$

Cấu kiện C20015 chiều dài 2500mm không lỗ khoét bị phá hoại do mất ổn định cục bộ.

Nhận xét: Cả hai trường hợp có hay không có lỗ khoét, cấu kiện đều bị phá hoại do mất ổn định cục bộ, song do ảnh hưởng của lỗ khoét khả năng chịu lực của cấu kiện giảm từ 63,82 kN xuống 59,586 kN.



Hình 2. Kích thước cấu kiện và bố trí lỗ khoét trên bản bụng cấu kiện cột thép chữ C tạo hình nguội

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày quy trình xác định khả năng chịu lực của cấu kiện cột thép tạo hình nguội có lỗ khoét bản bụng theo Tiêu chuẩn AISI S100-16 với việc áp dụng Phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM). Để áp dụng phương pháp mới này, bài báo đã giới thiệu và sử dụng phần mềm hỗ trợ cho việc phân tích mất ổn định tuyến tính của tiết diện có lỗ khoét mà phần mềm này được phát triển và tài trợ bởi Viện sắt và Thép của Hoa Kỳ. Bài báo đưa ra các chỉ dẫn tính toán cụ thể cho một cấu kiện có lỗ khoét đối xứng và đều đặn trên bản bụng cấu kiện, và đã chỉ ra được ảnh hưởng của lỗ khoét đến khả năng chịu lực của cột thép tạo hình nguội trong sự tương quan so sánh với khả năng chịu lực của cột có tiết diện nguyên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] American Iron and Steel Institute (2016) North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members. Washington DC: American Iron and Steel Institute.
- [2] Schafer BW, Peköz T (1998) Direct Strength Prediction of Cold-Formed Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions. Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- [3] Nguyen VV, Hancock GJ, Pham CH (2015) Development of the Thin-Wall-2 for Buckling Analysis of Thin-Walled Sections Under Generalised Loading. Proceeding of 8th International Conference on Advances in Steel Structures.
- [4] Li Z, Schafer BW (2010) Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: Conventional and constrained finite strip methods. Saint Louis, Missouri, USA.
- [5] Cheung YK (1976) Finite strip method in structural analysis.
- [6] Pham NH, Vu QA (2021) Effects of stiffeners on the capacities of cold-formed steel channel members. Steel Construction, vol. 14, no. 4, pp. 270-278.
- [7] Dassault Systemes Simulia Corp (2014) ABAQUS/CAE User's Manual. Providence, RI, USA.
- [8] Ortiz-Colberg RA (1981) The load carrying capacity of perforated cold-formed steel columns. Cornell University, Ithaca, NY.
- [9] Sivakumanran KS (1987) Load capacity of uniformly compressed cold-formed steel section with punched web. Can J Civil Eng, vol. 14, no. 4, p. 8.
- [10] Banwait AS (1987) Axial load behaviour of thin-walled steel sections with openings. McMaster University, Hamilton, Ontario.
- [11] Abdel-Rahman N (1997) Cold-formed steel compression members with perforations. McMaster University, Hamilton, Ontario.
- [12] Rhodes J, Schneider FD (1994) The compressional behaviour of perforated elements. Twelfth international specialty conference on cold-formed steel structures, pp. 11-28.
- [13] Loov R (1984) Local buckling capacity of C-shaped cold-formed steel sections with punched webs. Can J Civil Eng, vol. 11, no. 1, pp. 1-7.
- [14] Pu Y, Godley MHR, Beale RG, Lau HH (1999) Prediction of ultimate capacity of perforated lipped channels. Journal of Structural Engineering, vol. 125, no. 5, p. 4.
- [15] 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, pp. 91-101.
- [16] Moen CD (2008) Direct Strength design for cold-formed steel members with perforations. Johns Hopkins University, Baltimore.
- [17] Moen CD, Schafer BW (2008) Experiments on cold-formed steel columns with holes. Thin-Walled Structures, vol. 46, no. 10, pp. 1164-1182.
- [18] Moen CD, Schafer BW (2009) Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. Engineering Structures, vol. 31, no. 12, pp. 2812-2824.
- [19] Moen CD, Schafer BW (2006) Impact of holes on the elastic buckling of cold-formed steel columns. International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, pp. 269-283.
- [20] Moen CD, Schafer BW (2010) Extending direct strength design to cold-formed steel beams with holes. 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures - Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction, pp. 171-183.
- [21] Cai J, Moen CD (2016) Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory. Thin-Walled Structures, vol. 107, pp. 274-286.
- [22] Moen CD, Schafer BW (2009) Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending. Thin-Walled Structures, vol. 47, no. 12, pp. 1597-1607.
- [23] Moen CD, Schudlich A, Heyden A (2013) Experiments on Cold-Formed Steel C-Section Joists with Unstiffened Web Holes. Journal of Structural Engineering, vol. 139, no. 5, pp. 695-704.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Phạm Ngọc Hiếu and Vũ Quốc Anh (2020) Tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội chịu nén và uốn bằng phương pháp DSM theo tiêu chuẩn AS/NZS 4600:2018, Tạp chí Khoa học Công nghệ xây dựng, no. 4, p. 9.