

# KHẢO SÁT KHẢ NĂNG CHỊU UỐN CỦA TIẾT DIỆN THÉP HỘP CHỮ NHẬT TẠO HÌNH NGUỘI THEO PHƯƠNG PHÁP CƯỜNG ĐỘ LIÊN TỤC

## INVESTIGATION OF FLEXURAL CAPACITIES OF COLD-FORMED STEEL RECTANGULAR HOLLOW SECTIONS ACCORDING TO THE CONTINUOUS STRENGTH METHOD

PHẠM NGỌC HIẾU, NGUYỄN LỆ THỦY

Khoa Xây dựng, Đại học Kiến trúc Hà Nội

Email: [hieupn@hau.edu.vn](mailto:hieupn@hau.edu.vn); [thuynl@hau.edu.vn](mailto:thuynl@hau.edu.vn)

Tóm tắt: Các tiêu chuẩn thiết kế thép tạo hình nguội hiện hành được đưa ra căn cứ vào sự làm việc dẻo lý tưởng của vật liệu, nhưng thực tế ứng xử của vật liệu phức tạp hơn với ảnh hưởng của sự cứng nguội do quá trình tạo hình nguội gây ra. Cứng nguội là hiện tượng tăng cường độ thép qua giới hạn chảy dẻo do bị biến dạng dẻo trong quá trình gia công nguội. Điều này dẫn đến dự đoán khả năng chịu lực thiên về an toàn quá mức của các tiêu chuẩn hiện hành so với cường độ chịu lực thực tế của tiết diện thép tạo hình nguội. Nội dung bài báo sẽ trình bày phương pháp thiết kế là Phương pháp cường độ liên tục có xem xét đến sự cứng nguội này trong thiết kế tiết diện thép tạo hình nguội khi chịu uốn. Trên cơ sở này, các ví dụ tính toán được đưa ra cho tiết diện hộp chữ nhật chịu uốn và tiến hành các khảo sát với sự thay đổi giới hạn bền của vật liệu trên cơ sở so sánh với kết quả cường độ được thiết kế theo tiêu chuẩn thép tạo hình nguội Châu Âu.

Từ khóa: Khả năng chịu uốn, thép tạo hình nguội, tiết diện hộp chữ nhật, Phương pháp Cường độ liên tục

Abstract: The current standards for cold-formed steel structures have been based on the idealized plastic behaviour of material properties, but the actual stress-strain response of the material is more complex with the influence of strain hardening due to cold-forming processes. Strain hardening refers to the increase of strength beyond the yield stress due to plastic deformation during the cold-forming procedure. This leads to overly conservative predictions from the current standards in comparison with the actual strengths of the cold-formed steel sections. Therefore, this paper presents a new design method namely the Continuous Strength Method with the consideration of strain hardening in the design of cold-formed steel sections under

bending. Based on this new method, examples are given for the design of cold-formed steel rectangular sections, and an investigation is carried out with the variation of tensile strengths of material properties in comparison with the strength predictions from the Eurocode.

Keywords: Flexural capacities, cold-formed steel, rectangular hollow sections, The Continuous Strength Method

### 1. Giới thiệu

Kết cấu thép tạo hình nguội có xu hướng sử dụng phổ biến hơn trong các công trình xây dựng nhờ các ưu điểm của nó so với kết cấu thép truyền thống [1]. Tiêu chuẩn kết cấu thép nguội từ đó cũng đưa ra tại nhiều nước trên thế giới tạo tiền đề cho việc mở rộng ứng dụng loại kết cấu này trong thực tế [2]. Những tiêu chuẩn đó được xây dựng đều căn cứ vào sự làm việc dẻo lý tưởng của vật liệu, trong khi đó sự làm việc của vật liệu thép tạo hình nguội đã có sự thay đổi đáng kể do sự cứng nguội gây ra từ quá trình tạo hình tiết diện, đã được trình bày trong tài liệu ([1], [3]). Việc áp dụng các tiêu chuẩn hiện hành có xu hướng thiên về an toàn quá cao trong thiết kế khi vật liệu làm việc qua giai đoạn tuyến tính, như đã được bàn luận tại [4]. Gardner do đó đã đề xuất phương pháp Cường độ liên tục (Continuous strength method – CSM) trong thiết kế thép tạo hình nguội có xem xét đến hiện tượng cứng nguội do quá trình tạo hình gây ra nhằm tận dụng tối đa khả năng chịu lực của vật liệu và đảm bảo tính kinh tế trong thiết kế ([4], [5], [6]).

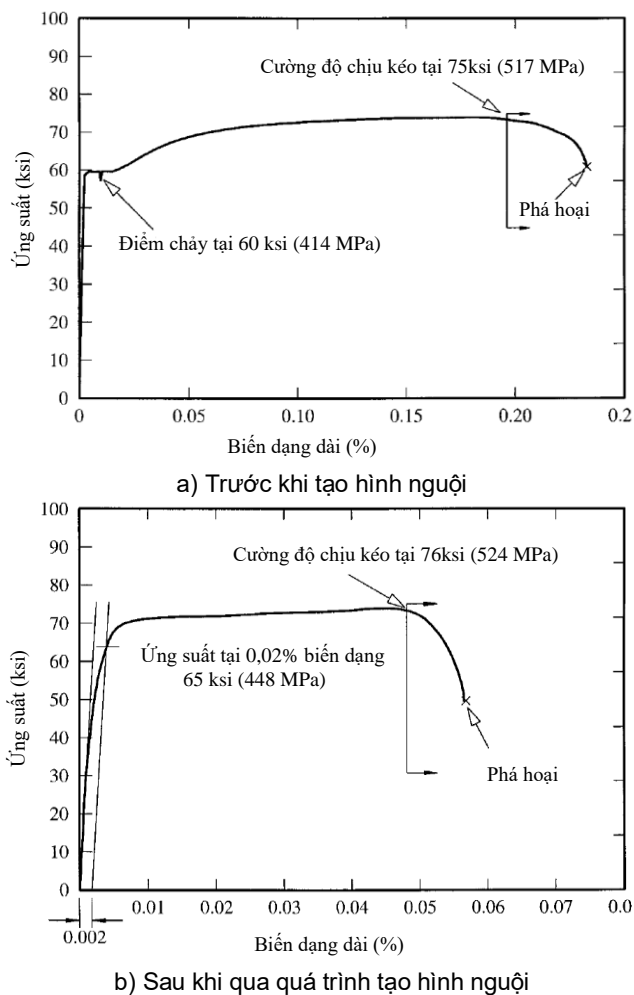
Sự cứng nguội này xảy ra do quá trình tạo hình của tiết diện thép. Hình 1 biểu diễn sự thay đổi đường cong ứng suất của vật liệu thép trước (Hình 1(a)) và sau khi trải qua quá trình tạo hình nguội (Hình 1(b)) [1]. Hiện tượng cứng nguội đã xảy ra ở đây dưới ảnh

hưởng của quá trình tạo hình nguội, làm mất đi giai đoạn chảy dẻo của vật liệu thép, tăng giới hạn chảy quy ước của thép và thay đổi đáng kể đường cong ứng suất-biến dạng. Việc áp dụng phương pháp cường độ liên tục trên giúp xem xét ảnh hưởng của hiện tượng cứng nguội này trong thiết kế thép tạo hình nguội.

Trên thế giới, phương pháp này đã được đề xuất áp dụng trong nhiều nghiên cứu về kết cấu thép không gỉ tạo hình nguội hay kết cấu nhôm để xem xét đến ứng xử của vật liệu làm việc quá giai đoạn chảy dẻo, có thể kể đến các nghiên cứu của Su, Young và Gardner ([7] [8]). Tại Việt Nam, phương pháp này đã được nghiên cứu tìm hiểu thông qua luận văn thạc sĩ của Phạm Ngọc Hưng [9] hay các xuất bản của Phạm Ngọc Hưng, Vũ Quốc Anh và Phạm Ngọc Hiếu ([10], [11]). Các báo cáo trên dừng lại trong việc giới

thiệu và đưa ra quy trình áp dụng phương pháp này trong thiết kế.

Bài báo này, sẽ trình bày tóm tắt phương pháp cường độ liên tục (CSM) trong xác định khả năng chịu lực của tiết diện thép tạo hình nguội chịu uốn. Phương pháp này sau đó được áp dụng cho thực hiện ví dụ tính toán khả năng chịu uốn của tiết diện thép hộp tạo hình nguội có sự so sánh với tính toán theo Tiêu chuẩn thép tạo hình nguội của Châu Âu EN 1993-1-3 [12]. Đóng góp của bài báo này là áp dụng phương pháp trên để thực hiện khảo sát khả năng chịu uốn của tiết diện thép hộp tạo hình nguội với sự thay đổi về chiều dày tiết diện và cường độ giới hạn bền của vật liệu, từ đó cho phép đưa ra các nhận xét về ảnh hưởng của sự cứng nguội đến khả năng chịu uốn của tiết diện khảo sát.



Hình 1. Đường cong ứng suất biến dạng của vật liệu thép [1]

## 2. Phương pháp cường độ liên tục trong xác định khả năng chịu uốn của tiết diện thép tạo hình nguội có xét đến sự cứng nguội của vật liệu

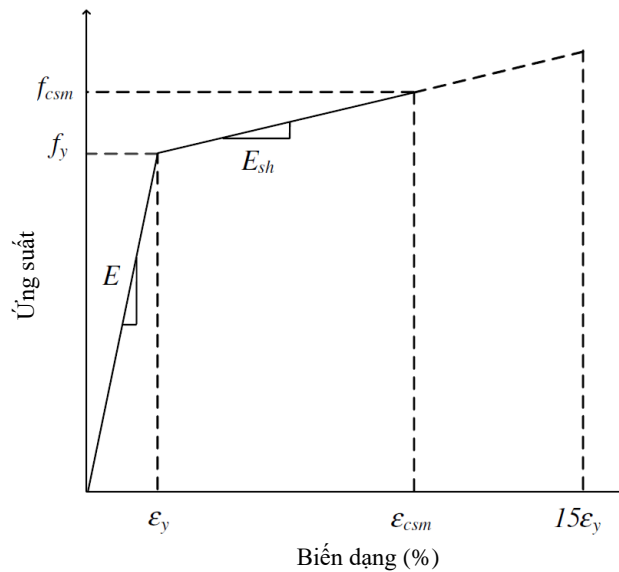
Phương pháp cường độ liên tục được đề xuất và phát triển bởi Gardner ([4], [5], [6]) nhằm kể đến sự làm việc của vật liệu thép khi ứng suất vượt qua giới

hạn chảy quy ước, được áp dụng cho vật liệu thép đã trải qua quá trình tạo hình nguội mà không còn giai đoạn chảy rõ ràng nữa, hay cho vật liệu thép không gỉ hoặc nhôm hợp kim. Phương pháp này được đưa ra căn cứ theo tiêu chuẩn Châu Âu EN 1993-1-3 [12], nhưng có sự thay thế khái niệm phân loại tiết diện bởi khái niệm khả năng biến dạng tiết diện dưới dạng không đơn vị được đề xuất thông qua các thí nghiệm thực tế. Chi tiết về phân loại tiết diện và khả năng biến dạng được trình bày chi tiết trong [12].

Cường độ liên tục là phương pháp dựa trên cơ sở biến dạng gồm hai thành phần chính là đường cong cơ sở và mô hình vật liệu. Đường cong cơ sở đưa ra mức độ biến dạng danh nghĩa của tiết diện khảo sát thể hiện được mối quan hệ giữa khả năng

biến dạng danh nghĩa và độ mảnh của tiết diện, được thành lập dựa trên các số liệu thí nghiệm. Về mô hình vật liệu, phương pháp này có kể đến sự tăng cứng trong đường ứng suất-biến dạng của vật liệu, đưa ra như trong Hình 2. Về độ mảnh của tiết diện, nó được đưa ra dưới dạng không thứ nguyên và được xác định bằng căn bậc hai giữa cường độ chảy dẻo  $f_y$  và ứng suất mất ổn định đàn hồi của tiết diện ( $\sigma_{cr,cs}$ ), sau đó được nhân với tỉ số của bề rộng phần phẳng ( $C_{flat}$ ) và đường tâm của tiết diện ( $C_{cl}$ ), được đưa ra như trong công thức (1). Chi tiết hơn về phương pháp này có thể tham khảo tại [11].

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,cs}} \left( \frac{C_{flat}}{C_{cl}} \right)_{max}} \quad (1)$$



**Hình 2.** Đường cong ứng suất-biến dạng của vật liệu theo phương pháp CSM [11]

Khả năng chịu uốn của tiết diện được xác định dựa trên đường cong cơ sở thiết kế mà đặc trưng là tỉ số  $\epsilon_{csm} / \epsilon_y$ , như trên công thức số (2), trong đó biến dạng giới hạn  $\epsilon_{csm}$  được sử dụng để kết nối mô hình vật liệu đàn hồi và tăng cứng.

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{0,25}{\lambda_p^{3,6}} \leq \min\left(15, \frac{0,1\epsilon_u}{\epsilon_y}\right) \quad (2)$$

Như đã trình bày trong Phạm và các tác giả [11], phương pháp cường độ liên tục (CSM) được áp dụng khi độ mảnh tiết diện tính theo công thức (1) nhỏ hơn

hoặc bằng 0,68. Khi độ mảnh tiết diện này vượt qua 0,68 thì khả năng chịu uốn của tiết diện vẫn được xác định theo quy định của tiêu chuẩn Châu Âu EN 1993-1-3 [12]. Khi độ mảnh tiết diện lớn, ứng suất mất ổn định đàn hồi ( $\sigma_{cr,cs}$ ) của tiết diện nhỏ, dẫn đến các hiện tượng mất ổn định cục bộ của tiết diện xảy ra sớm và tiết diện bị phá hoại trước khi ứng suất đạt tới giới hạn chảy dẻo. Với tiết diện có  $\lambda_p \leq 0,68$ , khả năng chịu uốn của tiết diện được xác định theo công thức:

$$M_{c,Rd} = M_{ycsm,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \left[ 1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left( \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left( \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \right)^2 \right] \quad (3)$$

## KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

trong đó  $f_y$  là ứng suất chảy;  $E$  là mô đun đàn hồi của vật liệu;  $W_{pl}$  là mô đun dẻo của tiết diện;  $W_{el}$  là mô đun chống uốn đàn hồi của tiết diện;

$\varepsilon_{csm}, \varepsilon_y$  tương ứng là biến dạng danh nghĩa và biến dạng đàn hồi;

$E_{sh}$  là góc dốc của đường tăng cứng;

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - \varepsilon_y};$$

$f_u$  là ứng suất kéo tới hạn;  $\varepsilon_u$  là biến dạng tại ứng

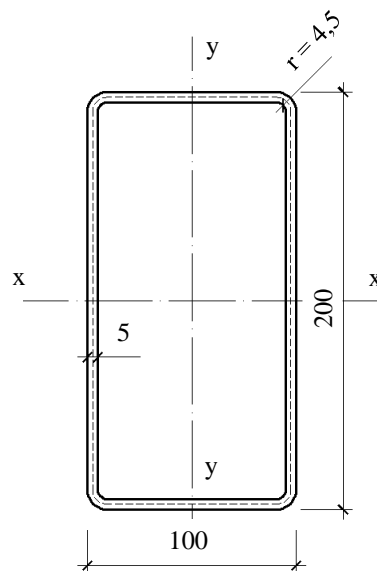
suất kéo tới hạn.

### 3. Ví dụ tính toán cho một tiết diện hộp chữ nhật chịu uốn

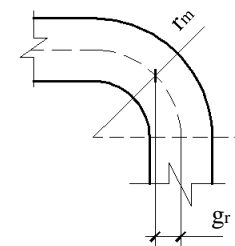
Xác định khả năng chịu uốn của tiết diện hình hộp chữ nhật 200x100x5 có đặc trưng vật liệu bao gồm  $E=193000$  (N/mm<sup>2</sup>);  $f_y=360$  (N/mm<sup>2</sup>);  $f_u = 600$  (N/mm<sup>2</sup>).

Đặc trưng hình học:  $h=200$  (mm);  $b = 100$  (mm);  $t = 5$  (mm); bán kính trong  $r = 4,5$  mm;  $A = 2851,95$  mm<sup>2</sup>;  $I_x = 14,746 \times 10^6$  mm<sup>4</sup>;  $I_y = 5,005 \times 10^6$  mm<sup>4</sup>;

$W_{el}^x = 147460$  mm<sup>3</sup>;  $W_{pl}^x = 182875$  mm<sup>3</sup>.



a) Kích thước chính của tiết diện



b) Thông số hình học  $r_m$  và  $g_r$

Hình 3. Thông số hình học của tiết diện

#### 3.1. Phương pháp bề rộng hiệu dụng (EWM)

- Các thông số hình học của tiết diện:

$$r_m = r + t/2 = 4,5 + 5/2 = 7 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 3,021 \text{ mm}$$

$$h_w = h - t - 2g_r = 200 - 5 - 2 \times 3,021 = 188,96 \text{ mm}$$

- Mô đun chống uốn hiệu dụng của tiết diện:

Đặc trưng của tiết diện: Hệ số ứng suất:  $\psi = -1$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{360}} = 0,808$$

Từ bảng 2.3 [12], xác định được hệ số ổn định:  $k_\sigma = 23,9$

$$\text{Độ mảnh của bản thép: } \bar{\lambda}_p = \frac{h_w/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{188,96/5}{28,4 \times 0,808 \times \sqrt{23,9}} = 0,337 < 0,673$$

- Xác định khả năng chịu uốn của tiết diện, được lấy nhỏ hơn trong hai giá trị mô men sau:

$$M_{cz,Rd} = \frac{W_{ply} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{182875 \times 360 \times 10^{-6}}{1,0} = 65,84 \text{ kN.m}$$

$$M_{c,Rd} = f_y (W_{el} + (W_{pl} - W_{el})4(1 - \lambda/\lambda_{el})) / \gamma_{M0}$$

$$= 360 \times (147460 + (182875 - 147460) \times 4 \times (1 - 0,337/0,65)) \times 10^{-6} / 1,0$$

$$= 77,651 \text{ kN.m}$$

trong đó  $\lambda_{el} = 0,65$ , chi tiết xem thêm trong tài liệu ([9], [12]).

Khả năng chịu uốn của tiết diện hộp  $200 \times 100 \times 5,0$  là  $65,84 \text{ kN.m}$ .

**3.2. Phương pháp cường độ liên tục (CSM)**

- Xác định biến dạng chảy và biến dạng bền:

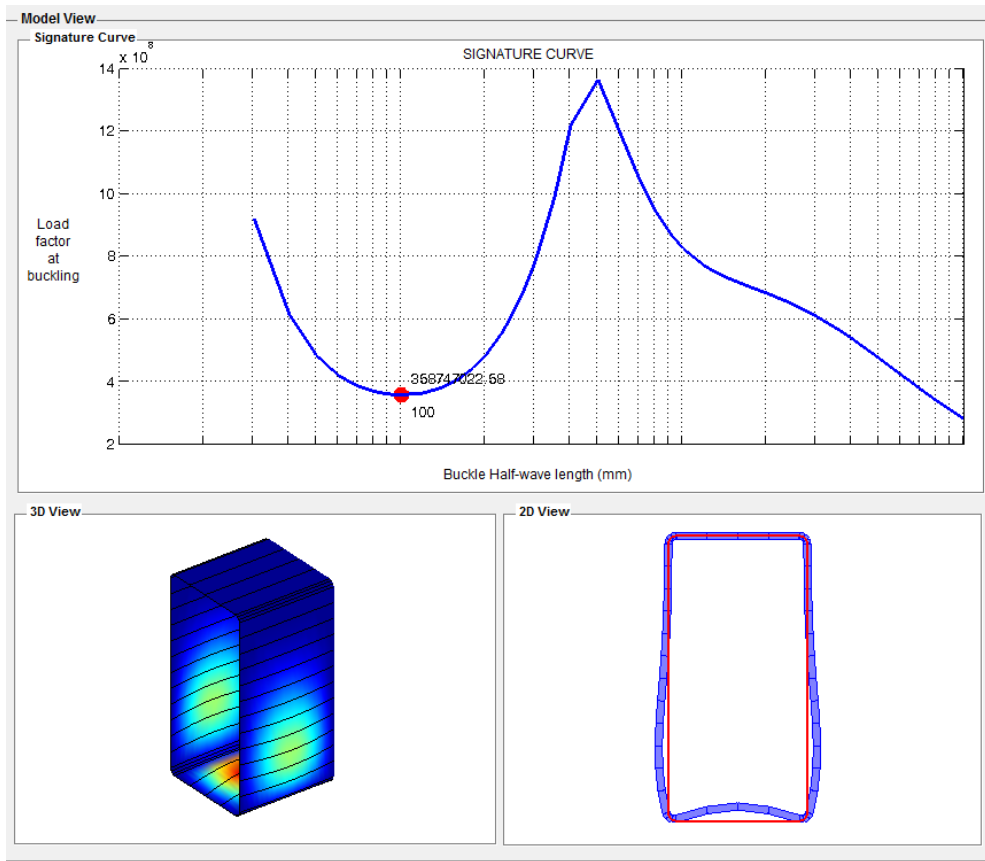
$$\epsilon_y = \frac{360}{193000} = 0,00187$$

$$\epsilon_u = 1 - \frac{360}{600} = 0,40$$

- Độ mảnh của tiết diện:

Dựa trên cơ sở phân tích ổn định đàn hồi sử dụng phần mềm THIN-WALL-2 [13], có kết quả biểu diễn như trên Hình 4, thu được giá trị mất ổn định cục bộ

$$f_{ol} = \sigma_{cr,cs} = 2511 \text{ N/mm}^2.$$



Hình 4. Kết quả phân tích mất ổn định tiết diện hình hộp chịu uốn

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,cs}}} = \sqrt{\frac{360}{2511}} = 0,379$$

Nhân với tỷ số  $(c_{flat}/c_{cl})_{max}$ , trong đó  $c_{flat}$  là khoảng cách mép dưới hai bản cánh tới bán kính cong tại vị trí giao cánh và bụng và  $c_{cl}$  là bề rộng của phần tử đi qua đường trung tâm.

$$c_{flat} = 200 - (4,5 + 5) \times 2 = 181 \text{ mm};$$

$$c_{cl} = 200 - 5 = 195 \text{ mm}$$

$$\rightarrow \frac{c_{flat}}{c_{cl}} = \frac{181}{195} = 0,928$$

$$\overline{\lambda}_p = 0,379 \times 0,928 = 0,351 \leq 0,68$$

## KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

- Xác định khả năng biến dạng của tiết diện:

$$\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{0,351^{3,6}} = 10,78 < \min\left(15, \frac{0,1\varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) = 15$$

- Xác định góc nghiêng hay góc dốc của đường tăng cứng:

$$E_{\text{sh}} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - \varepsilon_y} = \frac{60 - 360}{0,16 \times 0,40 - 0,00187} = 3863 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

- Xác định khả năng chịu uốn của tiết diện:

$$\begin{aligned} M_{y,c,Rd} &= M_{y,csm,Rd} \\ &= \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \left[ 1 + \frac{E_{\text{sh}}}{E} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} \left( \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} \right) / \left( \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} \right)^2 \right] \\ &= \frac{360 \times 182875}{1,0} \left[ 1 + \frac{3863}{193000} \times \frac{147460}{182875} (10,78 - 1) - \left( 1 - \frac{147460}{182875} \right) / (10,78)^2 \right] \times 10^{-6} = \\ &76,12 \text{ (kN.m)} \end{aligned}$$

Kết quả mô men uốn của tiết diện cho thấy phương pháp cường độ liên tục (CSM) có giá trị dự đoán cao hơn 16% so với dự đoán của phương pháp bề rộng hiệu dụng quy định theo tiêu chuẩn Châu Âu [12].

#### 4. Khảo sát khả năng chịu uốn của tiết diện thép hộp tạo hình nguội theo phương pháp cường độ liên tục

Tiết diện khảo sát có dạng hình hộp tạo hình nguội theo tiêu chuẩn Châu Âu Cold-formed EN 10219 S355J0H [14]. Các tiết diện có kích thước hộp từ 40 mm x 20 mm đến 400 mm x 200 mm, và chiều dày từ 2mm đến 10mm. Giới hạn chảy quy ước tối thiểu 355MPa, còn cường độ kéo đứt từ 470 MPa đến 680 MPa. Tiết diện chọn trong khảo sát là thép hộp tạo hình nguội 200mm x 100mm với các chiều dày khảo sát từ 2 mm đến 10 mm, cụ thể như trong Bảng 1.

Bài báo tiến hành khảo sát ảnh hưởng của sự cứng nguội thông qua sự thay đổi về cường độ kéo

đứt của vật liệu, cụ thể là  $f_u$  được lấy từ 500 MPa đến 650 MPa; còn ứng suất chảy  $f_y = 360$  MPa.

Kết quả cho thấy với tiết diện mỏng thì phương pháp CSM không được áp dụng do mất ổn định cục bộ sẽ xảy ra là tiết diện bị phá hoại do mất ổn định cục bộ trước khi ứng suất trong tiết diện đạt đến giới hạn chảy. Cụ thể như tiết diện 200 x 100 x 2,0, khi bề dày của tiết diện tăng lên làm tăng khả năng ổn định cục bộ của tiết diện, ứng suất phá hoại có xu hướng vượt qua ứng suất chảy, phương pháp CSM được áp dụng và cho thấy tính hiệu quả trong xác định khả năng chịu lực của tiết diện khi uốn, giúp làm tăng khả năng chịu uốn của tiết diện từ khoảng 2% cho các tiết diện có chiều dày nhỏ, và tăng đến khoảng 24% cho các tiết diện có chiều dày lớn.

Sự tăng lên của giới hạn bền  $f_u$  có ảnh hưởng đến khả năng chịu uốn của tiết diện khảo sát, song sự tăng này không đáng kể với độ chênh nhỏ hơn 5% khi  $f_u$  thay đổi từ 500 MPa đến 650 MPa.

**Bảng 1.** Khả năng chịu uốn của tiết diện khảo sát (Đơn vị: kN.m)

Tiết diện	EWM	CSM với sự thay đổi của $f_u$				Độ chênh lệch lớn nhất
		500	550	600	650	
200x100x2,0	19,01	-	-	-	-	-
200x100x3,0	36,94	37,66	37,68	37,71	37,73	2,14%
200x100x4,0	53,64	55,21	55,41	55,62	55,83	4,08%
200x100x5,0	65,84	74,51	75,29	76,12	76,95	16,87%
200x100x6,0	77,56	92,28	93,63	95,01	96,41	24,30%
200x100x8,0	99,62	118,53	120,26	122,04	123,84	24,31%
200x100x10,0	119,88	142,63	144,71	146,85	149,02	24,31%

Ghi chú: EWM là viết tắt của phương pháp bề rộng hiệu dụng; CSM là viết tắt của phương pháp cường độ liên tục.

## 5. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu phương pháp cường độ liên tục (CSM) trong xác định khả năng chịu uốn của tiết diện có xét đến hiện tượng cứng nguội do quá trình tạo hình nguội gây ra. Một khảo sát được tiến hành để so sánh khả năng chịu uốn của tiết diện được tính theo phương pháp cường độ liên tục (CSM) với kết quả tính toán của phương pháp bề rộng hiệu dụng (EWM) quy định theo tiêu chuẩn Châu Âu. Dựa trên kết quả khảo sát, các nhận xét sau có thể được đưa ra:

- Phương pháp cường độ liên tục (CSM) không thay thế cho các phương pháp thiết kế hiện hành, mà bổ sung thêm cho các phương pháp hiện hành trong xác định khả năng chịu lực khi ứng suất trên tiết diện vượt qua giới hạn ứng suất chảy quy ước;

- Chiều dày của tiết diện càng tăng lên thì hiệu quả thiết kế của phương pháp cường độ liên tục (CSM) thu được càng cao;

- Ảnh hưởng của sự thay đổi giới hạn bền đến khả năng chịu uốn không đáng kể khi thiết kế theo phương pháp cường độ liên tục CSM.

Các kết luận trên đưa ra các hiểu biết nhất định trong việc áp dụng phương pháp cường độ liên tục (CSM) khi xác định khả năng chịu uốn của tiết diện thép hộp tạo hình nguội có xét đến sự cứng nguội tạo ra do quá trình tạo hình.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] G.J. Hancock, T.M. Murray and D S. Ellifritt (2001), *Cold-formed Steel Structures to the AISI Specification*. The United States of America.

[2] W.W. Yu, R.A. Laboube and H. Chen (2020), *Cold-formed Steel Design*. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA: John Wiley and Sons.

[3] Phạm Ngọc Hiếu (2020), *Áp dụng phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM) trong tính toán & khảo sát khả năng chịu nén, uốn của cấu kiện thép tạo hình nguội theo Tiêu chuẩn AS/NZS 4600-2018*. Đề tài cấp trường, Đại học Kiến trúc Hà Nội, Việt Nam.

[4] L. Gardner (2008), *The Continuous Strength Method*. Structures & Buildings Journal, vol. 161, p. 6.

[5] L. Gardner (2007), *The Continuous Strength Method in Recent Developments in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. In: The 3rd International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation.

[6] L. Gardner, F. Wang and A. Liew (2011), *Influence of Strain Hardening on the Behavior and Design of Steel Structures*. International Journal of Structural Stability and Dynamics, vol. 11, no. 05, pp. 855–875.

[7] M.N. Su, B. Young and L. Gardner (2014), *Deformation-based design of aluminium alloy beams*. Engineering Structures, vol. 80, pp. 339–349.

[8] M.N. Su, B. Young and L. Gardner (2014), *Testing & design of Aluminum Alloy Cross Sections in Compression*. Journal of Structural Engineering, vol. 11.

[9] Phạm Ngọc Hưng (2017), *Phương pháp Cường độ liên tục trong thiết kế cấu kiện thép tạo hình nguội*, Luận văn thạc sĩ, Đại học Kiến trúc Hà Nội.

[10] Phạm Ngọc Hưng, Vũ Quốc Anh, Phạm Ngọc Hiếu (2017), *Xác định khả năng chịu nén của tiết diện thép tạo hình nguội bằng phương pháp cường độ liên tục (CSM)*. Tạp chí Xây dựng Việt Nam, vol. 4, pp. 91–95.

[11] Phạm Ngọc Hưng, Vũ Quốc Anh, Phạm Ngọc Hiếu (2017), *Áp dụng phương pháp Cường độ liên tục (CSM) trong tính toán khả năng chịu uốn của tiết diện thép tạo hình nguội*, Tạp chí Xây dựng Việt Nam – Bộ Xây dựng, vol.5, tr. 76-80.

[12] European Committee for Standardization, Eurocode 3 (2004): *Design of Steel Structure, Part 1-3: General rules Supplementary for Cold-formed Members and Sheeting*.

[13] V.V. Nguyen, G.J. Hancock and C.H. Pham (2015), *Development of the Thin-Wall-2 for Buckling Analysis of Thin-Walled Sections Under Generalised Loading*, in Proceeding of 8th International Conference on Advances in Steel Structures.

[14] JF Engineering Product LLP (2021), *Cold-formed EN10219 S355J0H Rectangular hollow section*.

Ngày nhận bài: 11/8/2022.

Ngày nhận bài sửa: 19/9/2022.

Ngày chấp nhận đăng: 20/9/2022.