

Phân tích ổn định chịu nén cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội theo tiêu chuẩn AISI S100

Nguyễn Ngọc Thắng^{1*}

¹ Bộ môn XDDD và CN, Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi

TỪ KHOÁ

Thép thành mỏng tạo hình nguội
Bề rộng hiệu dụng
Ổn định chịu nén
Giới hạn chảy
Phân tích tuyến tính

TÓM TẮT

Cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội gồm phần tử là các tấm mỏng, khi chịu nén thường bị vênh ra ngoài mặt phẳng uốn gọi là hiện tượng mất ổn định cục bộ. Tiêu chuẩn Hoa Kỳ AISI S100 đưa ra phương pháp bề rộng hiệu dụng (hữu hiệu) để dự đoán khả năng chịu lực của cấu kiện thép tạo hình nguội dựa trên phân tích mất ổn định tuyến tính của tiết diện. Phương pháp này định nghĩa bề rộng hữu hiệu là bề rộng thực của tiết diện, được coi như không bị mất ổn định, chịu ứng suất nén đạt đến giới hạn chảy. Các chỉ dẫn tính toán của phương pháp dựa trên phân bố ứng suất nén trên tiết diện để đánh giá tỷ lệ bề rộng phẳng và chiều dày của phần tử nén trong trường hợp tiết diện đạt tới trạng thái giới hạn ổn định. Bài báo phân tích làm rõ các bước đánh giá ổn định chịu nén cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội theo tiêu chuẩn này.

KEYWORDS

Cold-formed thin-walled steel
Effective width
Stable under compression stress
Yield limit
Linear analysis

ABSTRACT

Cold-formed thin-walled steel members consist of elements that are thin plates, which, when compressed, often experience buckling out of the bending plane, known as the phenomenon of local instability. The AISI S100 Standard provides an effective width method to predict the load-bearing capacity of cold-formed steel members based on the linear instability analysis of the cross-section. This method defines the effective width as the actual width of the cross-section that is considered to remain stable under compression stress up to the yield limit. The calculation instructions of this method are based on the distribution of compressive stresses on the cross-section to assess the ratio of the flat width to the thickness of the compressed element in cases where the cross-section reaches a limit state of stability. This paper analyzes and clarifies the steps for assessing the stability of cold-formed thin-walled steel members under compression according to AISI S100.

1. Giới thiệu

Kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội đã và đang sử dụng nhiều ở nước ta cho các dạng kết cấu như hệ giằng, hệ khung nhà một tầng, kết cấu mái nhẹ, khung thép Zamil [1]. Khái niệm về kết cấu thép nhẹ thành mỏng được hiểu là hệ thống kết cấu thép xây dựng bằng thép thành mỏng có tiết diện dày không quá 4mm và được tạo hình bằng phương pháp gia công ở nhiệt độ phòng như dập, cán hoặc uốn nguội. Cấu kiện thép thành mỏng tạo hình có các loại tiết diện khá đa dạng và tùy biến như tiết diện chữ Z, chữ I, chữ C, tiết diện chữ nhật, tiết diện tròn,... [2, 3]. Về phương diện kết cấu, thanh thành mỏng khác kết cấu thép thông thường ở vấn đề ứng xử của vật liệu và cách thức phá hoại, cấu kiện bị mất ổn định cục bộ không dẫn tới phá hoại mà có thể tiếp tục chịu lực được, thuộc tính của vật liệu thay đổi do phương pháp tạo hình và ảnh hưởng của ứng suất dư v.v... [4]. Cũng phải nói thêm rằng kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội có trọng lượng nhẹ, độ mảnh khá lớn và do tiết diện được thành tạo từ quá trình tạo hình nguội nên độ cứng của cấu kiện không phải là hằng số; sự biến đổi độ cứng trong quá trình làm việc của cấu

kiện sẽ dẫn đến khả năng chịu lực của cấu kiện cũng thay đổi theo [5]. Với kết cấu khung thép thành mỏng, phần bụng của cấu kiện cột, dầm khung cần được tính toán theo các điều kiện chịu lực tổng quát như uốn kết hợp cắt hoặc uốn kết hợp với ép dẹt của tiết diện [6].

Các tác giả trong [7, 8] đã chỉ ra rằng việc tạo hình bằng phương pháp gia công nguội (gia công ở nhiệt độ phòng) như dập, cán hoặc uốn nguội làm gia tăng cường độ đáng kể và ảnh hưởng sự cứng nguội sẽ tăng cường ổn định cho các cấu kiện thép thành mỏng. Kết quả nghiên cứu chỉ ra ảnh hưởng của tiết diện tạo hình nguội lên ổn định cấu kiện cho các bài toán cụ thể. Trong các nghiên cứu của mình, Hiếu và các cộng sự [9, 10] cũng đã đưa ra nhận định về sự mất ổn định tuyến tính của tiết diện thép tạo hình nguội được xác định thông qua đường cong phân tích mất ổn định tuyến tính là kết quả của việc sử dụng một số phần mềm phân tích được phát triển dựa trên nền tảng của phương pháp dải hữu hạn. Các tác giả Phạm và Vu [11] đã đưa ra các phân tích và trình bày các bước thiết kế bằng cách sử dụng chương trình THIN-WALL-2. Nghiên cứu cũng đánh giá khả năng chịu lực của loại cấu kiện thép thành mỏng dựa trên những quy định trong Tiêu chuẩn Hoa Kỳ AISI S100 [12] bằng cách sử dụng

*Liên hệ tác giả: thangnn.icc@gmail.com

Nhận ngày 02/07/2024, sửa xong ngày 23/08/2024, chấp nhận đăng ngày 26/08/2024

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2024.769>

phương pháp bề rộng hiệu dụng truyền thống dựa trên tính toán đơn giản và hiệu quả trong thiết kế. Phương pháp này 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. Trong kết quả nghiên cứu thực nghiệm về đánh giá giá trị tải trọng cực hạn gây mất ổn định cấu kiện thép tạo hình nguội bằng phương pháp bề rộng hiệu dụng, các tác giả [13, 14] cũng nhận định việc xác định chính xác bề rộng hữu hiệu hay bề rộng thực làm việc của tiết diện thành mỏng là yếu tố tiên quyết đảm bảo tối ưu tiết diện theo các điều kiện bền chịu lực và ổn định.

Bài báo này dựa trên cơ sở tổng hợp các kết quả nghiên cứu trước đây và tham chiếu các chỉ dẫn thiết kế theo tiêu chuẩn Hoa Kỳ AISI S100 [12] nhằm đưa ra phân tích một cách tổng quát việc xác định bề rộng hữu hiệu của tiết diện thành mỏng được tăng cường và không được tăng cường theo điều kiện ổn định chịu nén của cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội; từ đó áp dụng cho các trường hợp tính toán cụ thể.

2. Đặc trưng cơ bản cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội

Chiều dày t của tiết diện thành mỏng được sử dụng trong tính toán các đặc trưng của mặt cắt tiết diện thép tạo hình nguội là chiều dày của tấm kim loại gốc, không kể đến lớp bảo vệ. Khi cán nguội, bề dày thực tế có thể bị giảm đi từ 1~3 % có thể bỏ qua, không xét đến trong tính toán. Do bề dày của tiết diện cấu kiện tạo hình nguội là không đổi nên trong các chỉ dẫn tính toán đều dùng phương pháp đường trung bình (Hình 1) để tính các đặc trưng hình học của tiết diện một cách gần đúng với độ chính xác là có thể chấp nhận được. Tiết diện cấu kiện với bề dày là t được thay bằng đường thẳng đi qua trục các phần tử, các phần tử được thay bằng các đoạn thẳng hoặc cong.

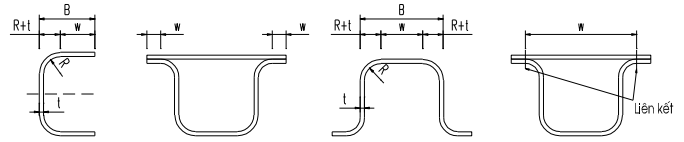


Hình 1. Đường trung bình để xác định đặc trưng hình học của tiết diện cấu kiện được tạo hình nguội.

2.1. Bề rộng phẳng và bề rộng hữu hiệu

Bề rộng phẳng (w) sử dụng trong kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội là bề rộng của phần phẳng của phần tử, không bao gồm các đoạn cong. Bề rộng phẳng được đo từ cuối góc cong hoặc đo từ tim của vật liên kết (bu lông hay hàn). Tuy nhiên trong tính toán cấu kiện thép thành mỏng, ảnh hưởng của sự gia công nguội được phân tích qua bề rộng hữu hiệu. Bề rộng hữu hiệu được định nghĩa là chiều rộng được giảm bớt trong thiết kế để tính toán các đặc trưng hình học

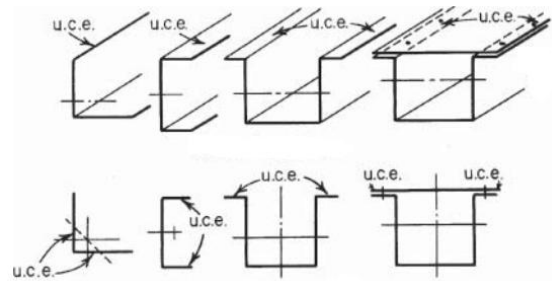
của tiết diện khi xét đến độ bền cục bộ. Có nghĩa là khi tỷ lệ bề rộng phẳng và chiều dày của phần tử nén quá lớn, một bộ phận bản bị mất ổn định. Bản phẳng khi đó được tính chuyển về bản có bề rộng b . Bề rộng này được coi như không bị mất ổn định, có thể chịu được ứng suất nén đạt đến giới hạn chảy. Minh họa Hình 2 dưới đây.



Hình 2. Bề rộng phẳng của phần tử nén cứng và không được tăng cường.

2.2. Phần tử nén không được tăng cường (u.c.e)

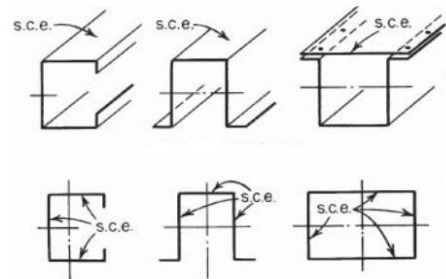
Một phần tử nén không được tăng cường là phần tử phẳng chỉ có một cạnh song song với chiều nội lực được tăng cường bằng sườn hay bằng phần tử khác. Ví dụ như bản cánh của tiết diện chữ C như Hình 3.



Hình 3. Phần tử nén không được tăng cường.

2.3. Phần tử nén được tăng cường hoặc tăng cường một phần (s.c.e)

Một phần tử nén cứng hoặc tăng cường một phần là phần tử phẳng có hai cạnh song song với chiều nội lực được tăng cường bằng sườn hay bằng phần tử khác. Ví dụ bản bụng được tăng cường ở hai cạnh trên dưới bằng hai bản cánh như Hình 4 dưới đây:

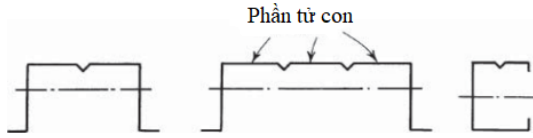


Hình 4. Phần tử nén cứng hoặc tăng cường một phần

2.4. Phần tử được tăng cường nhiều lần

Phần tử nén được tăng cường nhiều lần là phần tử nén ở giữa hai bản bụng hoặc giữa bản bụng và một mép cứng được tăng cường

bằng các sườn trung gian song song với chiều nội lực. Mỗi phần tử phẳng nằm giữa các sườn được gọi là phần tử con, minh họa trong Hình 4 dưới đây:

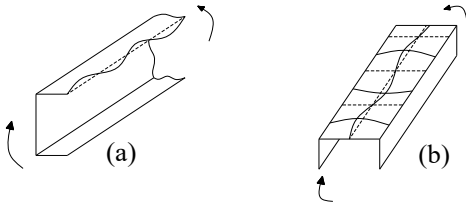


Hình 5. Phần tử nén được tăng cường nhiều lần

3. Phân tích ổn định chịu nén của kết cấu thép thành mỏng

3.1. Mất ổn định cục bộ

Cấu kiện thép tạo hình nguội gồm phần tử là các tấm mỏng, khi chịu nén thường bị vênh ra ngoài mặt phẳng uốn gọi là hiện tượng mất ổn định cục bộ, Hình 6.



Hình 6. Sự mất ổn định cục bộ

(a) Cánh chịu nén; (b) Bụng chịu nén

Phương trình vi phân đường đàn hồi ω (biến dạng) của tấm chịu ứng suất nén đều theo một phương có dạng:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} + \frac{f_x t}{D} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

Ở đây: D là độ cứng của phần tử, được tính theo:

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (2)$$

Theo lý thuyết biến dạng nhỏ, thêm vào các điều kiện biên, Timoshenko đã giải phương trình trên và tìm được ứng suất tới hạn về ổn định cục bộ: Theo lý thuyết biến dạng nhỏ, thêm vào các điều kiện biên, Timoshenko đã giải phương trình trên và tìm được ứng suất tới hạn, F_{cr} , về ổn định cục bộ:

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(w/t)^2} \quad (3)$$

Trong đó:

E - môđun đàn hồi của thép ;

μ - hệ số poisson ;

t - chiều dày tấm ;

w - chiều rộng tấm ;

k - hệ số phụ thuộc điều kiện biên và trạng thái ứng suất, lấy giá trị $k = 4$ với tấm 4 cạnh tựa khớp chịu nén đều.

Sau khi ứng suất đạt giá trị tới hạn F_{cr} , tấm bị oằn nhưng không bị phá hoại, vẫn còn khả năng chịu lực thêm. Tải trọng đặt thêm vào sẽ gây ra sự phân bố lại ứng suất và cấu kiện vẫn chịu được tải trọng. Hiện tượng này gọi là sự làm việc sau tới hạn và được áp dụng nhiều

cho cấu kiện thành mỏng.

Xét tấm có chiều rộng là w như hình 6, chịu ứng suất nén đều. Khi ứng suất $F_y > F_{cr}$, tấm bị oằn, phần ứng suất ở giữa sẽ chuyển sang hai cạnh và có giá trị lớn hơn F_{cr} . Sự tăng ứng suất ở hai cạnh sẽ tiếp tục cho đến khi đạt đến cường độ chảy F_y và tấm bị phá hủy. Tấm bị oằn có thể chuyển được thành tấm có chiều rộng nhỏ hơn là b sao cho ứng suất tới hạn của tấm bằng F_y . Từ phương trình (3) ta có:

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \quad (4)$$

Chia phương trình (3) cho phương trình (4) thu được:

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{F_{cr}}{F_y}} \quad (5)$$

Phương trình này do Yu [7] đề xuất năm 2000 dùng để tính bề rộng hữu hiệu của các phần tử tạo hình nguội.

3.2. Phần tử được tăng cường chịu nén đều

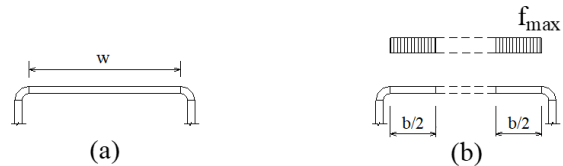
Cấu kiện thành mỏng thực tế có nhiều khuyết điểm về kích thước, chế tạo và còn nhiều ứng suất dư sau khi chế tạo. Do đó phương trình (5) cần phải điều chỉnh lại để xét các yếu tố trên. Qua các nghiên cứu thực nghiệm, các tác giả [7, 8] đã kiến nghị điều chỉnh lại công thức (5) như sau:

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{F_{cr}}{F_y}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{F_{cr}}{F_y}} \right) \quad (6)$$

Phương trình (6) cũng áp dụng cho cả trường hợp ứng suất nhỏ hơn cường độ chảy F_y . Thay cường độ chảy bằng ứng suất thiết kế F_{max} ta được phương trình dùng để tính bề rộng hữu hiệu của tiết diện:

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{F_{cr}}{F_{max}}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{F_{cr}}{F_{max}}} \right) \quad (7)$$

Ở đây F_{max} là ứng suất thiết kế tức là ứng suất do tải trọng gây ra có hệ số trên tiết diện hữu hiệu, minh họa ở Hình 7.



Hình 7. Phần tử được tăng cường chịu nén đều

(a) Phần tử thực; (b) Phần tử hữu hiệu

Tiêu chuẩn Hoa Kỳ AS100 [9] quy định cách xác định bề rộng hữu hiệu như sau:

$$b = \rho w \quad (8)$$

Ở đây, hệ số bề rộng hữu hiệu ρ được xác định theo:

$$\rho = \frac{1 - \frac{0,22}{\sqrt{\frac{F_{max}}{F_{cr}}}}}{\sqrt{\frac{F_{max}}{F_{cr}}}} = \frac{1 - \frac{0,22}{\lambda}}{\lambda} \leq 1$$

Với ρ là số hạng thể hiện độ mảnh của tấm tại ứng suất F_{max} được định nghĩa là:

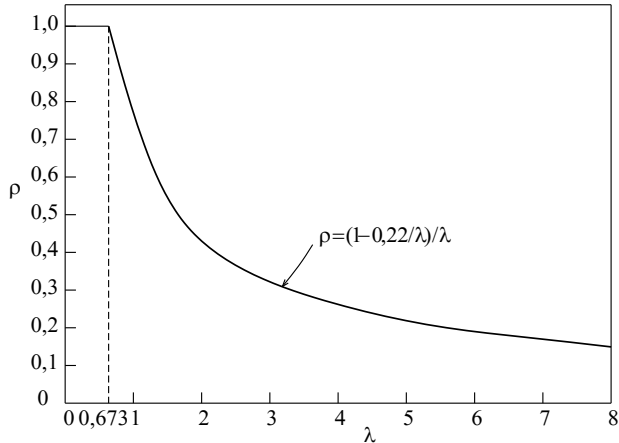
$$\lambda = \sqrt{\frac{F_{max}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{F_{max} \left[12(1 - \mu^2) \left(\frac{w}{t} \right)^2 \right]}{k \pi^2 E}} = \frac{1,052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F}{E}}$$

Trong đó:

k – hệ số phụ thuộc dạng liên kết biên của tấm

$F = F_{max}$ - ứng suất nén lớn nhất tại cạnh phần tử không kể hệ số an toàn.

Từ phương trình (9) mối quan hệ giữa hệ số bề rộng hữu hiệu ρ và độ mảnh λ của tấm tại lực nén F_{max} được biểu diễn qua biểu đồ trong Hình 8 dưới đây.



Hình 8. Quan hệ giữa hệ số ρ và hệ số λ .

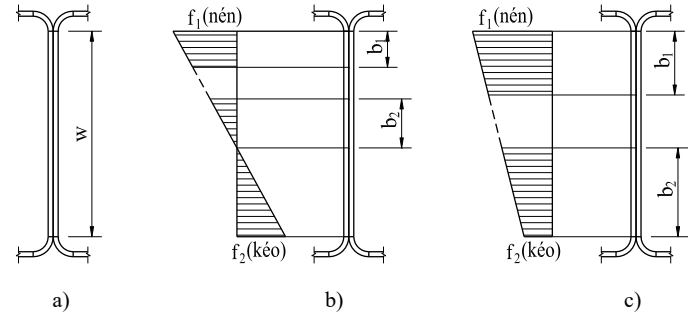
Hình 8 cho thấy, khi $\lambda \leq 0,673$ thì hệ số ρ có giá trị không đổi bằng 1, điều đó có nghĩa là $b = w$, toàn bộ bề rộng tấm tham gia chịu lực khi mà giới hạn độ mảnh nhỏ hơn giới hạn độ mảnh $[\lambda] = 0,673$. Tuy nhiên khi λ tăng lên, giá trị ρ giảm khá nhanh, điều đó có nghĩa tiết diện thực (hữu hiệu) làm việc chịu nén trong giới hạn ổn định bị thu hẹp đáng kể, thậm chí khi $\lambda = 7$ chỉ còn khoảng 20 % ($\rho = 0,2$) bề rộng tiết diện tham gia chịu lực.

3.3. Phần tử được tăng cường chịu ứng suất biến đổi tuyến tính

Trong thực tế phần tử chịu nén đều ở phân tích trên là khá ít gặp, vì ngay cả cấu kiện cột khi chịu nén cũng tồn tại thành phần nén uốn do sự lệch tâm của tải trọng và lệch tâm hình học của tiết diện. Tiết diện bụng cột khi đó chịu nén, uốn đồng thời, cũng tương tự như bản bụng của dầm chịu mômen. Trường hợp này ta xét phần tử được tăng cường chịu ứng suất biến đổi tuyến tính (hình vẽ 8), khi đó vùng nén của bụng có thể bị mất ổn định cục bộ. Ứng suất tới hạn trong trường hợp tấm bụng bị mất ổn định cục bộ vẫn tính theo công thức (3) nhưng thay bề rộng tấm w bằng giá trị h , với h là chiều cao bản bụng.

Tuy nhiên vấn đề đặt ra là hệ số k phụ thuộc điều kiện biên và trạng thái ứng suất được xác định như thế nào, nó sẽ không còn giá trị hằng số bằng 4 với tấm 4 cạnh tựa khớp chịu như trường hợp tấm chịu nén đều như mà sẽ thay đổi ứng khá phức tạp. Hệ số k sẽ bị ảnh hưởng rất nhiều yếu tố, các công thức của tiêu chuẩn AISI chỉ dẫn xác

định k đều dựa vào (hết) quả thực nghiệm, dưới đây là một số trường hợp xác định k như sau:



Hình 9. Phần tử được tăng cường chịu ứng suất biến đổi tuyến tính.

(a) Phần tử thực; (b), (c) Phần tử hữu hiệu và ứng suất phân bố trên phần tử hữu hiệu

Trường hợp 1: Đối với bản bụng chịu ứng suất biến đổi tuyến tính (f_1 là nén, f_2 là kéo)

Hệ số k xác định từ phương trình (11):

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) \quad (11)$$

Với trường hợp chiều cao tiết diện không lớn, $h_0/b_0 \leq 4$:

$$b_1 = \frac{b_e}{3 + \psi} \quad (12)$$

$$b_2 = \frac{1}{2} b_e \text{ khi } \psi > 0,236 \quad (13)$$

$$b_2 = b_e - b_1 \text{ khi } \psi \leq 0,236 \quad (14)$$

Với trường hợp chiều cao tiết diện lớn, $h_0/b_0 > 4$:

$$b_1 = \frac{b_e}{3 + \psi} \quad (15)$$

$$b_2 = \frac{b_e}{1 + \psi} - b_1 \quad (16)$$

Trường hợp 2: Đối với phần tử khác chịu ứng suất biến đổi tuyến tính (f_1, f_2 đều là nén)

Hệ số k trong trường hợp này được xác định từ phương trình (17):

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi) \quad (17)$$

$$b_1 = \frac{b_e}{3 - \psi} \quad (18)$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad (19)$$

Trong các công thức trên:

b_e - lấy bằng b trong công thức (7) nhưng thay $f_1 = f$ và k được xác định tương ứng như trên;

ψ - hệ số tỉ lệ ứng suất, lấy theo:

$$\psi = \left| \frac{F_2}{F_1} \right|$$

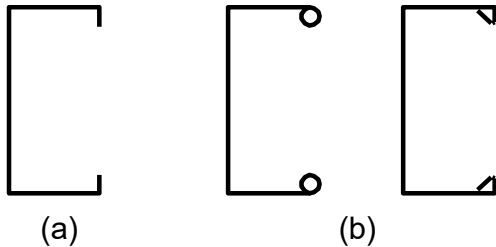
Với F_1, F_2 - ứng suất phân bố trên bề rộng hữu hiệu của tiết diện như ở hình 8 được tính với diện tích hữu hiệu (nếu F_1, F_2 đều là nén thì $F_1 \geq F_2$);

Trường hợp nếu tổng $b_1 + b_2$ sau khi tính toán lớn hơn bề rộng vùng nén thì bề rộng bản bụng là bề rộng hữu hiệu hoàn toàn.

Trường hợp 3: Phần tử chịu nén đều, có một sườn biên

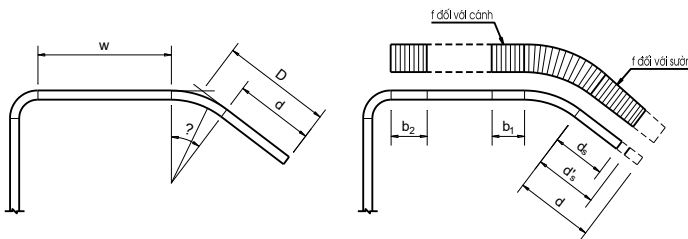
Trường hợp cánh tiết diện chữ C có mép gấp, chịu uốn quanh trục song song với bản bụng. Sườn biên có nhiệm vụ tạo gối tựa cho phần tử, làm phần tử được tăng cường, do đó tăng ứng suất tới hạn.

Nếu sườn biên không đủ cứng thì chưa làm được nhiệm vụ là gối tựa cho phần tử, điều này làm giảm khả năng ổn định và làm giảm bề rộng hữu hiệu. Sườn biên có thể là: a) Sườn biên đơn giản, chỉ có một góc uốn và một đoạn mép phẳng (Hình 10a); b) Sườn biên hình uốn, được tạo thành những hình cong kín để tăng độ cứng (Hình 10b).



Hình 10. Tiết diện có sườn biên.

Xét phần tử được tăng cứng và có sườn biên với kích thước như Hình 11.



Hình 11. Phần tử chịu nén có sườn biên.

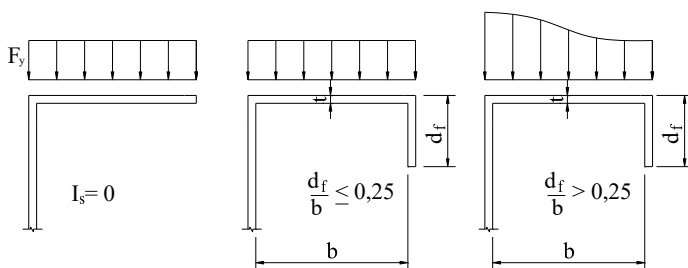
Khi $\frac{w}{t} \leq \frac{S}{3}$ phần tử được coi là hoàn toàn hữu hiệu mà không cần sườn biên, ứng suất phân bố trên hình 11 với $b = w$, ứng với giá trị S tính theo (21) dưới đây:

$$S = 1,28\sqrt{E/f} \quad (21)$$

Trong trường hợp này không cần có sườn biên, có nghĩa là $I_a = 0$, (I_a – mômen quán tính cần thiết của sườn biên để nó trở thành gối tựa cho phần tử, để làm việc như phần tử được tăng cứng). Đối với đoạn mép do có đầu tự do nên cũng có thể mất ổn định cục bộ và cần thiết phải xác định bề rộng hữu hiệu quả của nó.

$$d'_s = \rho d \quad (22)$$

Trong đó ρ – hệ số bề rộng hữu hiệu xác định theo công thức (9), với $k=0,43$. Vì sườn biên đủ cứng, nên toàn bộ chiều dài d'_s sẽ được dùng để tính toán đặc trưng hình học của tiết diện, tức là $d_s = d'_s$.



Hình 12. Biểu đồ phân bố ứng suất trên toàn bộ bề rộng b của phần tử.

Khi $\frac{S}{3} < \frac{w}{t} \leq S$ lúc đó sườn biên phải có độ cứng I_a , để trở thành gối tựa cho phần tử, để phần tử làm việc như phần tử được tăng cứng, độ cứng yêu cầu:

$$\frac{I_a}{t^4} = 399 \left[\frac{w}{t} \frac{1}{S} - \sqrt{\frac{k_u}{4}} \right]^3 \quad (23)$$

Trong đó:

w – bề rộng hữu hiệu;

t – bề dày tấm;

S – xác định theo công thức (21);

k_u – hệ số, $k_u = 0,43$.

Mômen quán tính của bản thân sườn đối với trục trọng tâm của nó song song với phần tử tính theo:

$$I_s = \frac{d^3 t \sin^2 \theta}{12} \quad (24)$$

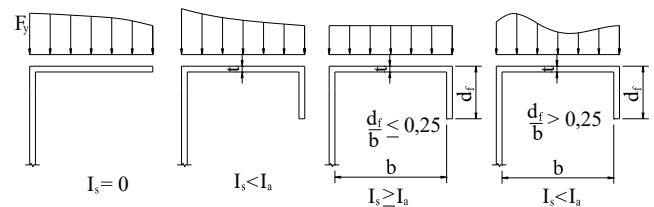
Trong đó:

d – chiều rộng sườn biên;

t – bề dày tấm;

θ – góc hợp bởi trục sườn biên với trục y ,

Nếu, $I_s \geq I_a$, và mép sườn không quá dài ($d_f/b = 0,25$), thì phần tử là hữu hiệu hoàn toàn, ngược lại khi mép sườn quá dài ($d_f/b > 0,25$), thì phần tử không còn hữu hiệu hoàn toàn và ứng suất phân bố không đều. Trường hợp này ứng suất phân bố trên Hình 13 tùy thuộc vào tương quan độ cứng.



Hình 13. Biểu đồ phân bố ứng suất trên phần tử theo tương quan độ cứng.

Khi này bề rộng hữu hiệu của phần tử vẫn được xác định theo công thức:

$$b = \rho w \quad (25)$$

Ở đó $\square$ xác định theo công thức (9), với hệ số k như sau:

$$k = C_2^n (k_a - k_u) + k_u \quad (26)$$

Trong đó:

$$C_2 = \frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad (27)$$

k_u – hệ số, $k_u = 0,43$;

n – hệ số, $n = 0,5$;

k_a – hệ số xác định theo công thức:

$$k_a = 5,25 - 5(d_f/w) \leq 4 \text{ khi } 140^\circ \geq \theta \geq 40^\circ \text{ và } (d_f/w) \leq 0,8$$

b được phân phối sang hai bên theo các bề rộng, $\frac{c_1 b}{2}$ và $\frac{c_2 b}{2}$, với

$$C_1 = 2 - C_2;$$

Chiều dài của mép được dùng để tính toán cho toàn tiết diện là:

$$d_s = C_2 d'_s \leq d'_s \quad (28)$$

Khi $\frac{w}{t} > S$ lúc đó phần tử không thể hữu hiệu hoàn toàn, không phụ thuộc độ cứng sườn biên, độ cứng yêu cầu đối với sườn biên

$$I_a = \left[115 \cdot \left(\frac{w}{t} \right) \cdot \frac{1}{S} + 5 \right] \cdot t^4 \quad (29)$$

Các đại lượng (b , k , C_1 , C_2 , d_s) được tính như đối với trường hợp $\frac{S}{3} < \frac{w}{t} \leq S$, nhưng lấy $n = \frac{1}{3}$ (gần đúng lấy $n = 0,333$).

Trường hợp 4: Phần tử không được tăng cường chịu nén đều hoặc biến đổi tuyến tính

Diễn hình của phần tử nén đều này khi phân tích cấu kiện cột khung với bản cánh là cánh của thanh tiết diện chữ C chịu nén dọc trục. Khi chịu nén đều phần tử này làm việc như một tấm dài tựa 3 cạnh còn 1 cạnh dài tự do, ứng suất tới hạn vẫn được tính theo công thức (3) nhưng với hệ số k là 0,43. Ở trạng thái sau tới hạn, phần mép tự do bị oằn, ứng suất có sự phân phối lại và trị số lớn nhất là ở phía gối tựa. Qua nhiều thí nghiệm nghiên cứu và điều chỉnh, chiều rộng hữu hiệu vẫn tính theo công thức (8), (9) và (10) ở trên ứng với $k = 0,43$. Còn khi phần tử không được tăng cường chịu ứng suất nén biến đổi tuyến tính như cánh của cột, dầm chịu nén và uốn đồng thời, bề rộng hữu hiệu của các phần tử này được tính với ứng suất tương tự như phần tử chịu nén đều với f là ứng suất nén lớn nhất f_{max} và giá trị của $k = 0,43$.

4. Kết luận

Mất ổn định cục bộ khi chịu nén có xu hướng xảy ra với các cấu kiện thép thành mỏng gia công nguội có chiều dài ngắn (hay độ mảnh thấp) dẫn đến giảm khả năng chịu lực của các kết cấu này. Về lý thuyết tính toán, phương pháp bề rộng hữu hiệu được đề xuất dựa trên nền tảng lý thuyết ổn định của tấm phẳng. Ảnh hưởng mất ổn định cục bộ tới khả năng chịu lực của cấu kiện đã được kể đến trong tính toán, song việc phân tích ảnh hưởng của sự tăng cường do quá trình chế tạo nguội cũng cần phải được xem xét và đánh giá một cách đầy đủ, tùy thuộc vào đặc điểm chịu lực của cấu kiện thành mỏng và hình dạng tiết diện. Quá trình chế tạo nguội tạo ra các tiết diện tăng cường cũng dẫn tới hiệu quả chịu lực khác nhau, điều này thu được dựa trên cơ sở các thí nghiệm nén vật liệu khi đường cong đỡ tải trở về trạng thái không tải tại giai đoạn củng cố. Tuy nhiên trong một số trường hợp không có thí nghiệm kiểm chứng, có thể tham khảo cách tính theo chỉ dẫn trong quy phạm Hoa Kỳ AISI S100 để đánh giá khả năng chịu lực cho từng trường hợp cụ thể.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Đoàn Đình Kiến (2009), *Thiết kế kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
- [2]. Đỗ Văn Bình (2020), *Nghiên cứu thực nghiệm liên kết bu lông chịu uốn và cắt đồng thời trong kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội*, Tạp chí Khoa học công nghệ giao thông vận tải, Tập 71, Số 3 (04/2020), trang 186-195.
- [3]. American Iron and Steel Institute (1996), *Specification for the Design Cold formed Steel Structural Members*, 1996.
- [4]. Wei Wen Yu, *Cold - formed Steel Design, Third Edition (2000)*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- [5]. 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.
- [6]. Trần Thị Phương Lan, Nguyễn Ngọc Thắng (2023), *Kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội và đánh giá sự gia tăng cường độ do cứng nguội*. Tạp chí Xây dựng, số 01.2024, tr 126-130.
- [7]. Phạm Ngọc Hiếu., Thịnh Văn Thanh., Nguyễn Ngọc Thắng., 2023. *Xác định khả năng chịu lực của cột thép chữ C tạo hình nguội có lỗ khoét bán bưng*. Tạp chí Xây dựng, số 11.2023, tr 62-65.
- [8]. Nguyễn Ngọc Thắng., 2024. *Thực hành tính toán liên kết kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội cho khung phẳng một tầng một nhịp*. Tạp chí Xây dựng, số 8.2024, tr 104-107.
- [9]. Phạm Ngọc Hiếu, Vũ Quốc Anh, Phạm Ngọc Hưng., *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 KHCN Xây dựng - số 4/2020 tr 73-80.
- [10]. Quoc Anh Vu, Ngoc Hieu Pham, Van Thanh Thinh and Ngoc Thang Nguyen., 2024. *Overview on research on the strength and behavior of cold-formed steel members with perforations*. E3S Web of Conferences 533, 02043 (2024) FORM-2024, pp01-09, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453302043>.
- [11]. Pham NH, Vu QA (2021) Effects of stiffeners on the capacities of coldformed steel channel members. *Steel Construction*, vol. 14, no. 4, pp. 270-278.
- [12]. 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.
- [13]. 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.
- [14]. Li Z, Schafer BW (2010) *Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFISM: Conventional and constrained finite strip methods*. Saint Louis, Missouri, USA.