

Tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn bằng phương pháp cường độ trực tiếp theo tiêu chuẩn AISI S100-1

Determination of cold-formed steel member under bending using direct strength method according to AISI S100-1

Vũ Quốc Anh, Hoàng Anh Toàn

Tóm tắt

Bài báo trình bày quy trình tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn bằng phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM) theo Tiêu chuẩn AISI S100-16. Đồng thời, phương pháp giải tích và phương pháp số bằng cách sử dụng phần mềm CUFSM cũng được giới thiệu trong bài báo để xác định ứng suất mất ổn định tiết diện. Phương pháp số được sử dụng để xác định độ bền của cấu kiện thép tạo hình nguội tiết diện chữ C, Z có chiều dài khác nhau chịu uốn.

Từ khóa: Thép tạo hình nguội; Uốn; Phương pháp Cường độ trực tiếp; AISI S100-16

Abstract

The paper introduces the process of calculating cold-formed steel structures by the Direct Strength Method (DSM) according to American Standard AISI S100-16. Simultaneously, analytical and numerical methods using CUFSM software are also introduced in this article to determine sectional buckling stresses.

The numerical method is used to determine the strength of cold-formed steel Channel, Zee members with different lengths under bending.

Key words: Cold-formed steel; Bending; The Direct Strength Method; AISI S100-16

1. Đặt vấn đề

Kết cấu thép tạo hình nguội bắt đầu được sử dụng trong các công trình xây dựng từ năm 1850 ở cả Anh và Mỹ và phổ biến từ năm 1960 khi tại Mỹ triển khai xây dựng hàng loạt các công trình văn phòng, khách sạn, bệnh viện, trường học... Hiện nay, loại kết cấu này đang được sử dụng rất phổ biến trên thế giới bởi những ưu điểm vượt trội như trọng lượng nhẹ, dễ dàng trong sản xuất hàng loạt, vận chuyển, lắp dựng và gia công cấu kiện có tiết diện với nhiều hình dạng, kích thước rất khác nhau để phù hợp với nhu cầu sử dụng. Tại Việt Nam, loại kết cấu này mới được đưa vào sử dụng khi các công ty nước ngoài (Zamil Steel, BlueScopes) đưa sản phẩm vào thị trường trong nước và nhanh chóng nhận được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu cũng như các nhà thiết kế kết cấu.

Hiện tại, trên thế giới đã có nhiều quốc gia và vùng lãnh thổ như Bắc Mỹ, Châu Úc, Châu Âu, Anh, Nga, Nhật Bản, Ấn Độ... đã ban hành tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội. Việt Nam chưa có tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội, tiêu chuẩn thiết kế thép TCVN 5575:2012 [1] hiện hành cũng không áp dụng cho loại kết cấu này mà phải sử dụng tiêu chuẩn nước ngoài, gây khó khăn cho việc ứng dụng loại kết cấu này trong thực tế.

Tiêu chuẩn Mỹ AISI là một trong những bộ tiêu chuẩn hoàn chỉnh về tính toán, cấu tạo và thử nghiệm kết cấu thép tạo hình nguội. Năm 1946, Mỹ là nước đầu tiên trên thế giới ban hành Quy định kỹ thuật về thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội mang tên "Specifications for the design of cold formed steel structural member" của Viện Sắt và Thép Hoa Kỳ (AISI). Chúng liên tục được soát xét, chỉnh sửa và tái bản. Hiện tại, Tiêu chuẩn AISI S100-16 [2] được áp dụng tại Mỹ, Canada, Mexico đang sử dụng đồng thời hai phương pháp tính toán là phương pháp chiều rộng hữu hiệu (EWM) và phương pháp cường độ trực tiếp (DSM-Direct Strength Method). Trong đó, phương pháp DSM bắt đầu được đưa vào phụ lục 1 của Tiêu chuẩn AISI S100-04 [5] và hiện tại đã được đưa vào phần chính của Tiêu chuẩn AISI S100-16 [2]. Với việc sử dụng phương pháp DSM, quy trình thiết kế cấu kiện thép tạo hình nguội trở nên đơn giản và nhanh chóng hơn rất nhiều so với phương pháp EWM truyền thống, đặc biệt cho các tiết diện phức tạp. Quy trình thiết kế còn được hỗ trợ bằng các phần mềm phân tích mất ổn định đàn hồi như CUFSM của Mỹ và Thin-Wall của Australia.

Bài báo trình bày quy trình tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn bằng phương pháp DSM theo Tiêu chuẩn AISI S100-16 [2], với sự hỗ trợ của phần mềm phân tích ổn định đàn hồi CUFSM. Áp dụng phương pháp DSM để xác định khả năng chịu lực cấu kiện thép tạo hình nguội tiết diện chữ C, Z chịu uốn.

2. Phương pháp cường độ trực tiếp

DSM một phương pháp thực nghiệm được Giáo sư Gregory J. Hancock và các cộng sự đề xuất [9], được Giáo sư Benjamin W. Schafer (Mỹ) và cộng sự [7], [6] hoàn chỉnh đã giải quyết triệt để những nhược điểm của phương pháp EWM. Phương pháp EWM sử dụng tiết diện hiệu dụng trong tính toán dựa trên nền tảng lý thuyết ổn định tấm phẳng [11], bước đầu giải quyết được ảnh hưởng của mất ổn định cục bộ đến khả năng chịu lực của cấu kiện. Nhưng bộc lộ nhược điểm là khối lượng tính toán lớn và không tính toán được các tiết diện có hình dạng phức tạp hoặc các tiết diện có nhiều sườn trung gian [7].

Phương pháp DSM bao gồm các biểu thức để ước tính cường độ như một hàm ổn định đàn hồi của tấm tương tự như phương pháp EWM nhưng nó được áp dụng cho các dạng mất ổn định méo và mất ổn định tổng thể. Khác với phương pháp EWM, DSM dựa trên ứng xử của toàn bộ cấu kiện thay vì ứng xử

Vũ Quốc Anh

PGS, TS, Giảng viên cao cấp, Khoa Xây dựng,
Đại học Kiến trúc Hà Nội
Email: anhquocvu@gmail.com
ĐT: 0904715062

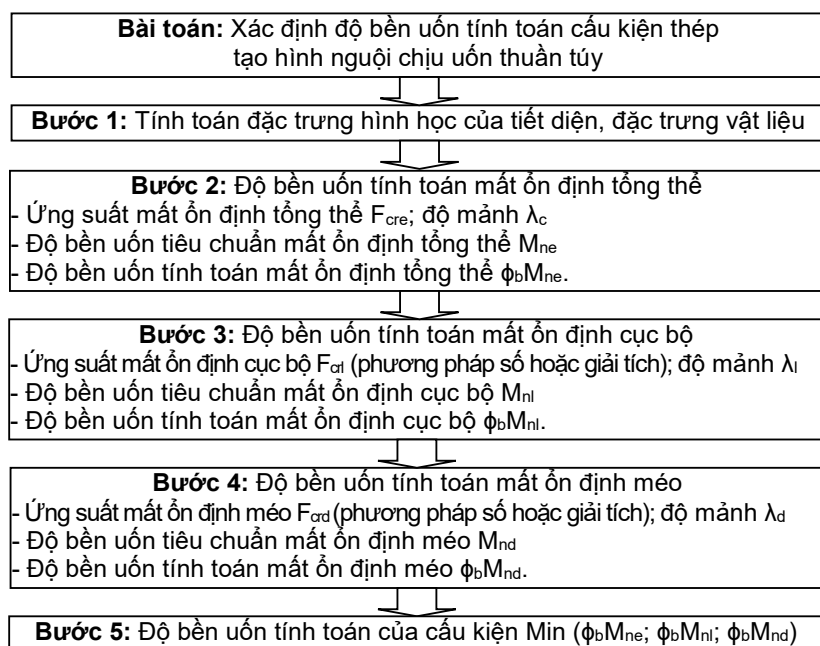
Hoàng Anh Toàn

Kỹ sư, Học viện Kỹ thuật Quân sự
Email: hoanganhtoan2003@gmail.com,
ĐT: 098636864

Ngày nhận bài: 28/12/2020

Ngày sửa bài: 23/3/2021

Ngày duyệt đăng: 20/12/2022



của tiết diện. Đầu vào của DSM là tải gây mất ổn định đàn hồi và giới hạn chảy của vật liệu. Khả năng tích hợp với các phương pháp số (phần tử hữu hạn, dải hữu hạn, lý thuyết dầm tổng quát) trong thiết kế là ưu điểm nổi bật của phương pháp này. Mặt khác, phương pháp DSM sử dụng tiết diện nguyên mà không cần phải tính lập hoặc chiều rộng hữu hiệu như phương pháp EWM tạo nên sự linh hoạt trong tính toán, giúp tối ưu hóa tiết diện thép tạo hình nguội. Bên cạnh đó, phương pháp DSM có công thức rõ ràng để xét đến mất ổn định méo và sự tương tác của các phần tử trong mặt cắt ngang. Công thức trong Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [2] liên quan đến phương pháp DSM được áp dụng cho thiết kế mất ổn định méo của dầm [7] và được hiệu chuẩn để áp dụng cho các tiết diện nhất định. Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 đưa ra một danh mục giới hạn hình học và vật liệu được chỉ ra ở Bảng B4.1-1 [2]. Danh mục này là một hạn chế cho phương pháp, nhưng là bản chất của phương pháp thực nghiệm.

Nội dung trình bày dưới đây cho cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn có tiết diện nguyên không giảm yếu. Độ bền uốn tính toán cấu kiện chịu uốn là giá trị nhỏ nhất của độ bền uốn tính toán mất ổn định tổng thể ($\phi_b M_{ne}$), độ bền uốn tính toán mất ổn định cục bộ ($\phi_b M_{nl}$) và độ bền uốn tính toán mất ổn định méo ($\phi_b M_{nd}$). Quy trình tính toán cụ thể như sơ đồ trên.

2.1. Độ bền uốn tính toán mất ổn định tổng thể

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể ở trạng thái đàn hồi (M_{ne}):

$$M_{ne} = S_x F_n \leq M_y \quad (1)$$

$$M_y = S_{fy} F_y \quad (2)$$

trong đó S_x là mô đun đàn hồi của toàn bộ tiết diện không giảm yếu đối với trục biên chịu nén; S_{fy} là mô đun đàn hồi của toàn bộ tiết diện không giảm yếu đối với trục biên tại giới hạn chảy; F_y là giới hạn chảy của vật liệu.

F_n là ứng suất tới hạn được xác định như sau:

$$\text{Với } F_{cre} \geq 2,78F_y; F_n = F_y \quad (3)$$

$$\text{Với } 2,78F_y > F_{cre} > 0,56F_y: F_n = \frac{10}{9}F_y \left[1 - \frac{10F_y}{36F_{cre}} \right] \quad (4)$$

$$\text{Với } F_{cre} \leq 0,56F_y: F_n = F_{cre} \quad (5)$$

trong đó F_{cre} là ứng suất mất ổn định ngang-xoắn ở trạng thái đàn hồi được xác định theo Mục F2.1.1 tới Mục F2.1.5 hoặc Phụ lục 2 [2].

- Độ bền uốn tính toán mất ổn định tổng thể là $\phi_b M_{ne}$ hoặc M_{ne}/Ω_b với $\phi_b = 0,9$ (LRFD, LSD) hoặc $\Omega_b = 1,67$ (ASD) [2].

2.2. Độ bền uốn tính toán mất ổn định cục bộ

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định cục bộ (M_{nl}) được xác định như sau:

$$\text{Với } \lambda_l \leq 0,776; M_{nl} = M_{ne} \quad (6)$$

$$\text{Với } \lambda_l > 0,776; M_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} M_{ne} \quad (7)$$

$$\lambda_l = \sqrt{M_{ne}/M_{crl}} \quad (8)$$

trong đó M_{ne} được xác định tại mục 2.1; M_{crl} là mô men uốn tới hạn gây mất ổn định cục bộ ở trạng thái đàn hồi, được xác định theo Phụ lục 2 [2].

- Độ bền uốn tính toán mất ổn định cục bộ là $\phi_b M_{nl}$ hoặc M_{nl}/Ω_b với $\phi_b = 0,9$ (LRFD, LSD) hoặc $\Omega_b = 1,67$ (ASD) [2].

2.3. Độ bền uốn tính toán mất ổn định méo

- Độ bền uốn tiêu chuẩn gây mất ổn định méo được xác định như sau:

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

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

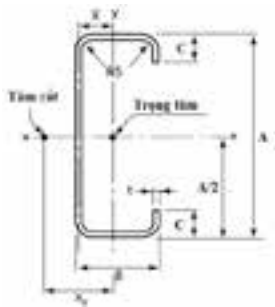
$$\lambda_d = \sqrt{M_y/M_{crd}} \quad (11)$$

$$M_{crd} = S_x F_{crd} \quad (12)$$

trong đó F_{crd} là ứng suất mất ổn định méo được xác định theo Phụ lục 2 [2].

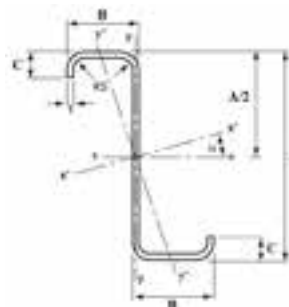
- Độ bền uốn tính toán mất ổn định méo là $\phi_b M_{nd}$ hoặc M_{nd}/Ω_b với $\phi_b = 0,9$ (LRFD, LSD) hoặc $\Omega_b = 1,67$ (ASD) [2].

A= 203 mm;
B=76 mm;
C=21 mm;
t=1,9 mm.



Tiết diện chữ C

A=203 mm;
B=79 mm;
C=18,5 mm;
t=1,9 mm.



Tiết diện chữ Z

Hình 1. Kích thước hình học của tiết diện chữ C, Z [10]

3. Phần mềm CUFSM

Phương pháp dải hữu hạn (Finite Strip Method - FSM) là một trường hợp đặc biệt của phương pháp số được sáng tạo bởi Cheung [8], Cheung đã sử dụng lý thuyết tấm của Kirchhoff để xây dựng các dải hữu hạn. Đây là một phương pháp rất hiệu quả và phổ biến để phân tích ổn định đàn hồi cho cấu kiện thép tạo hình nguội. AISI đã tài trợ để phát triển phương pháp này. Kết quả là sự ra đời của phần mềm CUFSM với việc dùng FSM để phân tích ổn định đàn hồi cho tiết diện bất kỳ. CUFSM khảo sát được cấu kiện chịu nén, uốn,... tự nhận biết các dạng mất ổn định tổng thể, mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo và các trường hợp đặc biệt khác. Phần mềm CUFSM đưa ra kết quả phân tích mất ổn định tiết diện dưới dạng là một đường cong chữ ký "Signature" mà thể hiện được mối quan hệ giữa ứng suất mất ổn định và chiều dài nửa bước sóng của các dạng mất ổn định. Với mỗi tiết diện có một đường cong riêng biệt đặc trưng. Giá trị ứng suất mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo từ phần mềm CUFSM được dùng để xác định độ bền của cấu kiện thép tạo hình nguội bằng phương pháp DSM như trình bày ở phần trên.

4. Khảo sát ổn định của cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn

4.1. Xác định độ bền của cấu kiện thép tạo hình nguội tiết diện C, Z chịu uốn

Xác định độ bền của cấu kiện thép tạo hình nguội tiết diện C20019 và Z20019 [10] chịu uốn theo trục x có hai đầu liên kết khớp với chiều dài 3,0 m ($F_y = 345$ MPa). (Hình 1)

4.1.1. Đặc trưng hình học của tiết diện

Đặc trưng hình học của tiết diện có thể được tính toán bằng phương pháp giải tích theo các công thức được giới thiệu trong tài liệu Cold-Formed Steel Design-Vol 1 [3], tra thông số theo Catalogue của nhà sản xuất [10] hoặc xác định bằng cách sử dụng phần mềm CUFSM. Kết quả trong bảng 1.

4.1.2. Phân tích mất ổn định tuyến tính

- Ứng suất mất ổn định ngang-xoắn đàn hồi của cấu

kiện có tiết diện C:

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad (13)$$

trong đó C_b là hệ số kể đến sự biến đổi mô men dọc theo chiều dài cấu kiện, được phép lấy bằng một đơn vị trong tất cả các trường hợp; S_f là mô đun đàn hồi của tiết diện nguyên không giảm yếu đối với thờ biên chịu nén.

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad (14)$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} \quad (15)$$

trong đó K_y là hệ số tỷ lệ chiều dài cho trạng thái uốn quanh trục y được xác định theo Chương C [2], $K_y = 1$; L_y là chiều dài giới hạn của cấu kiện chịu uốn quanh trục y.

$$\sigma_t = \frac{1}{A_g r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (16)$$

trong đó K_t là hệ số tỷ lệ chiều dài cho hiệu ứng xoắn được xác định theo Chương C [2], $K_t = 1$; L_t là giới hạn chiều dài của các cấu kiện cho hiệu ứng xoắn; E là mô đun đàn hồi của thép, $E = 203000$ (MPa); G là mô đun đàn hồi trượt của thép, $G = 78076,92$ (MPa).

- Ứng suất mất ổn định ngang-xoắn đàn hồi của cấu kiện có tiết diện Z:

$$F_{cre} = \frac{C_b \pi^2 E d I_{yc}}{2 S_f (K_y L_y)^2} \quad (17)$$

trong đó d là chiều cao tiết diện; I_{yc} là mô men quán tính vùng nén đối với trục trọng tâm song song với bản bụng của tiết diện.

- Kết quả tính toán ứng suất mất ổn định tổng thể:

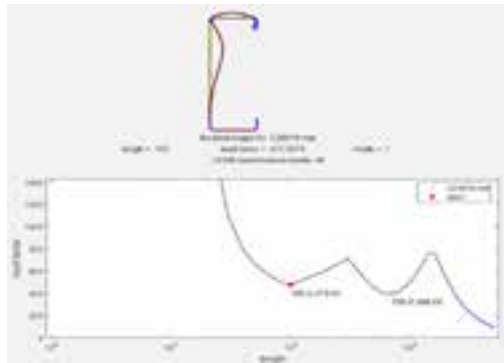
C20019 có $F_{cre} = 263,78$ (MPa);

Z20019 có $F_{cre} = 220,95$ (MPa).

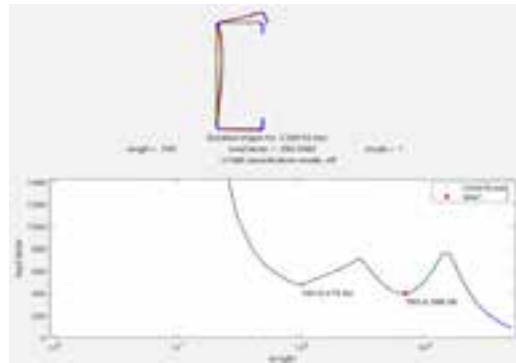
- Độ bền uốn tính toán mất ổn định tổng thể:

Bảng 1. Thông số hình học của tiết diện

Tiết diện	A_g (mm ²)	Mô men quán tính (10 ⁶ mm ⁴)		x_o (mm)	Mô đun chống uốn S_x (10 ³ mm ³)	Bán kính quán tính (mm)		Hằng số xoắn St. Venant J (mm ⁴)	Hằng số xoắn vênh C_w (10 ⁶ mm ⁶)
		I_x	I_y			r_x	r_y		
C20019	720,4	4,565	0,552	55,3	45,0	79,6	27,5	866,94	4841
Z20019	720,4	4,562	0,879	0	45,0	79,6	34,9	866,94	6555

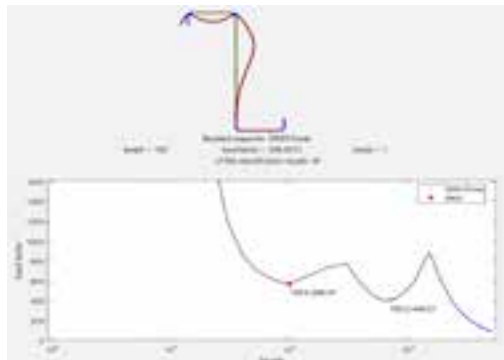


Mất ổn định cục bộ

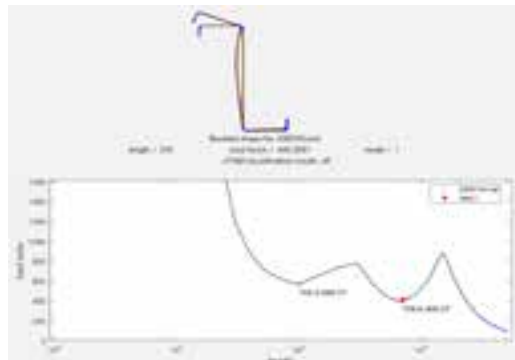


Mất ổn định méo

Hình 2. Đường cong chữ ký tiết diện C20019



Mất ổn định cục bộ



Mất ổn định méo

Hình 3. Đường cong chữ ký tiết diện Z20019

C20019 có $\phi_b M_{ne} = 9879255$ (Nmm);

Z20019 có $\phi_b M_{ne} = 8780629$ (Nmm).

4.1.3. Phân tích mất ổn định của tiết diện (hình 2, hình 3)

Sử dụng phần mềm CUFSM cho kết quả giá trị ứng suất mất ổn định cục bộ và ứng suất mất ổn định méo như sau:

C20019: $F_{cr1} = 475,83$ (MPa); $F_{crd} = 399,29$ (MPa).

Z20019: $F_{cr1} = 568,07$ (MPa); $F_{crd} = 406,27$ (MPa).

- Độ bền uốn tính toán mất ổn định cục bộ:

C20019 có $\phi_b M_{nl} = 9879255$ (Nmm);

Z20019 có $\phi_b M_{nl} = 8780629$ (KNm).

- Độ bền uốn tính toán mất ổn định méo:

C20019 có $\phi_b M_{nd} = 11467779$ (Nmm);

Z20019 có $\phi_b M_{nd} = 11528775$ (KNm).

4.1.4. Độ bền uốn tính toán của cấu kiện $\phi_b M_n$ (Bảng 2)

Bảng 2. Độ bền uốn tính toán của cấu kiện

Cấu kiện	$\phi_b M_{ne}$ (Nmm)	$\phi_b M_{nl}$ (Nmm)	$\phi_b M_{nd}$ (Nmm)	$\phi_b M_n$ (Nmm)
C20019	9879255	9879255	11467779	9879255
Z20019	8780629	8780629	11528775	8780629

* Nhận xét: mất ổn định cục bộ xảy ra với cấu kiện có tiết diện C20019 và Z20019.

4.2. Khảo sát mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo cho các cấu kiện chịu uốn

4.2.1. Khảo sát bằng phương pháp giải tích

a) Mất ổn định cục bộ

Ứng suất mất ổn định bộ được xác định bằng phương pháp giải tích (phương pháp phần tử [2, 4], phương pháp tương tác [12]) hoặc phương pháp số [2].

* Phương pháp phần tử: ứng suất ổn định cục bộ (F_{cr1}) được xác định dựa trên giá trị nhỏ nhất của ứng suất mất ổn định trong các phần tử trên tiết diện.

$$F_{cr1} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad (18)$$

trong đó k là hệ số vênh của tấm được xác định theo Phụ lục 1 Tiêu chuẩn AISI S100-16 [2]; E , μ là mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của vật liệu; t là chiều dày của phần tử; w là chiều rộng phần tử bản.

Kết quả:

C20019 có $F_{cr1} = 391,43$ (MPa);

Z20019 có $F_{cr1} = 391,43$ (MPa)

* Phương pháp tương tác

Mất ổn định cục bộ bản cánh/mép:

$$f_1 = 1; f_2 = (c-d)/c = 0,8123; c = h/2 + t/2; \xi = (f_1 - f_2)/f_1$$

$$k_{f1} = (8,55\xi - 11,07)(d/b)^2 + (3,95 - 1,59\xi)(d/b) + 4;$$

Mất ổn định cục bộ bản cánh/bụng:

$$f_1 = 1; f_2 = -1; \xi = (f_1 - f_2)/f_1 = 2;$$

$$k_{f2} = 1,125 \cdot \min \left[4; (0,5\xi^3 + 4\xi^2 + 4)(b/h)^2 \right];$$

Kết quả:

C20019 có $F_{cr1} = 518,33$ (MPa);

Z20019 có $F_{cr1} = 518,33$ (MPa)

Bảng 3. So sánh ứng suất mất ổn định cục bộ và ứng suất mất ổn định méo

Tiết diện	F_{cre} (MPa)					F_{crd} (MPa)		
	PP phân tử	PP tương tác	PP số	Sai số (%)		PP giải tích	PP số	Sai số (%)
				PP phân tử	PP tương tác			
C20019	391,43	518,330	475,830	17,34	8,93	351,720	399,290	11,91
Z20019	391,43	518,330	568,070	31,09	8,76	351,720	406,270	13,43

* Nhận xét: sai lệch về kết quả tính toán ứng suất mất ổn định cục bộ của phương pháp tương tác (B.W.Schafer và Peköz [12]) so với phương pháp số nhỏ hơn sai lệch kết quả tính toán của phương pháp phân tử. Mặt khác, cũng có sự sai lệch kết quả tính toán ứng suất mất ổn định méo giữa phương pháp giải tích và phương pháp số. Do vậy, ta sử dụng kết quả tính toán của phương pháp số là đảm bảo độ tin cậy.

Bảng 4. Ứng suất mất ổn định cục bộ và ứng suất mất ổn định méo

Tiết diện	Ứng suất mất ổn định cục bộ F_{crl} (MPa)					Ứng suất mất ổn định méo F_{crd} (MPa)		
	PP phân tử	PP tương tác	PP số	Δ_1 (%)	Δ_2 (%)	PP giải tích	PP số	Δ_3 (%)
C10012	426,123	462,030	606,796	-29,775	-23,86	356,510	400,910	-11,07
C10015	673,910	728,230	899,930	-25,115	-19,08	485,590	555,410	-12,57
C10019	1.098,900	1.182,230	1.419,850	-22,605	-16,74	670,359	781,940	-14,27
C15012	267,960	291,425	317,600	-15,630	-8,24	236,137	265,720	-11,13
C15015	422,720	458,150	489,670	-13,672	-6,44	319,895	358,090	-10,67
C15019	687,000	742,510	778,970	-11,807	-4,68	439,810	496,260	-11,38
C15024	1.114,000	1.194,000	1.234,800	-9,783	-3,30	624,345	719,940	-13,28
C20015	242,998	323,620	297,740	-18,386	8,69	213,990	236,640	-9,57
C20019	391,430	518,330	475,830	-17,737	8,93	351,720	399,290	-11,91
C20024	627,670	838,650	757,860	-17,179	10,66	462,079	520,900	-11,29
C25019	249,070	522,169	354,910	-29,822	47,13	274,567	308,440	-10,98
C25024	398,994	839,000	565,980	-29,504	48,24	390,380	437,240	-10,72
C30024	285,180	515,790	375,380	-24,029	37,40	323,338	365,030	-11,42
C30030	447,800	801,400	587,430	-23,770	36,42	455,830	519,980	-12,34
C35030	327,760	480,830	397,910	-17,630	20,84	294,780	325,940	-9,56
Z10012	393,850	427,654	650,580	-39,462	-34,27	338,490	382,190	-11,43
Z10015	622,590	674,260	992,750	-37,286	-32,08	461,390	526,270	-12,33
Z10019	1.014,600	1.095,000	1.563,440	-35,105	-29,96	637,337	746,840	-14,66
Z15012	259,630	281,520	375,380	-30,835	-25,00	243,750	277,710	-12,23
Z15015	409,513	441,287	575,540	-28,847	-23,33	342,089	394,480	-13,28
Z15019	665,398	717,259	914,700	-27,255	-21,59	448,467	512,650	-12,52
Z15024	1.045,100	1.183,000	1.410,710	-25,917	-16,14	619,772	716,730	-13,53
Z20015	242,998	299,087	344,980	-29,562	-13,30	197,999	222,890	-11,17
Z20019	391,430	518,330	568,070	-31,095	-8,76	351,720	406,270	-13,43
Z20024	627,670	775,400	879,830	-28,660	-11,87	447,450	511,090	-12,45
Z25019	249,080	483,690	399,650	-37,675	21,03	257,720	295,510	-12,79
Z25024	398,990	775,620	638,560	-37,517	21,46	379,850	435,000	-12,68
Z30024	285,190	477,175	432,720	-34,094	10,27	305,361	350,060	-12,77
Z30030	447,400	743,320	678,220	-34,033	9,60	432,700	499,440	-13,36
Z35030	327,760	451,378	467,880	-29,948	-3,53	283,497	320,990	-11,68

Ghi chú: Δ_1 , Δ_2 lần lượt là sai lệch về giá trị ứng suất mất ổn định cục bộ của phương pháp phân tử, phương pháp tương tác so với phương pháp số; Δ_3 là sai lệch về giá trị ứng suất mất ổn định méo của phương pháp giải tích so với phương pháp số.

b) Mất ổn định méo

Xác định các thông số hình học của bản cánh gồm A_f , I_{xf} , I_{yf} , I_{xyf} , x_{of} , y_{of} , h_{xf} , J_f , C_{wf} dựa trên các công thức tính toán theo tài liệu Cold-Formed Steel Design-Vol 1 [3].

Mất ổn định méo xảy ra ở một nửa bước sóng tới hạn:

$$L = \left\{ \frac{4\pi^4 h_0 (1 - \mu^2)}{t^3} \left[I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \frac{\pi^4 h_0^4}{720} \right\}^{1/4} \quad (19)$$

Độ cứng chống xoay đàn hồi của bản cánh:

$$k_{\phi fe} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \left[EI_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 GJ_f \quad (20)$$

Độ cứng chống xoay đàn hồi của bản bụng:

$$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)} \left[\frac{3}{h_0} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{19h_0}{60} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \frac{h_0^3}{240} \right] \quad (21)$$

Độ cứng chống xoay hình học yêu cầu của bản cánh:

$$k_{\phi fg} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \left\{ A_f \left[(x_{of} - h_{xf})^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of} (x_{of} - h_{xf}) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right] + I_{xf} + I_{yf} \right\} \quad (22)$$

Độ cứng chống xoay hình học yêu cầu của bản bụng:

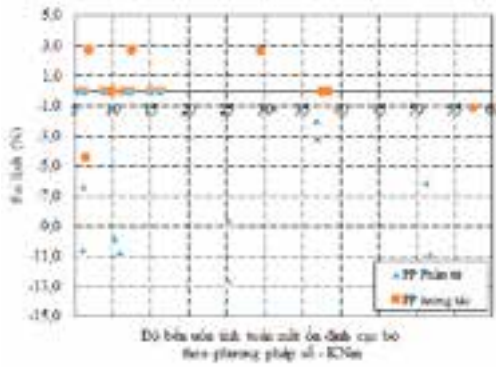
Ta có $\xi_{web} = (f_1 - f_2)/f_1$

với $f_1 = -f_2 \Rightarrow \xi_{web} = 2$ và $f_1 = -f_2 \Rightarrow \xi_{web} = 2$

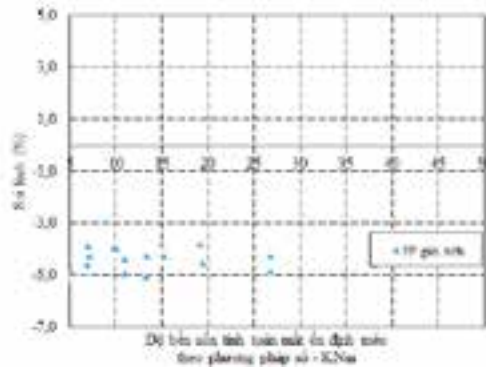
Bảng 5. Độ bền uốn tính toán cấu kiện chiều dài 3,0 m

Tiết diện	Độ bền uốn tính toán mất ổn định cục bộ $\phi_b M_{nl}$ (KNm)					Độ bền uốn tính toán mất ổn định méo $\phi_b M_{nd}$ (MPa)		
	PP phần tử	PP tương tác	PP số	$\Delta 1$ (%)	$\Delta 2$ (%)	PP giải tích	PP số	$\Delta 3$ (%)
C10012	0,953	0,953	0,953	0,000	0,00	2,081	2,168	-4,03
C10015	1,264	1,264	1,264	0,000	0,00	2,874	2,998	-4,14
C10019	1,723	1,723	1,723	0,000	0,00	3,972	4,110	-3,35
C15012	2,639	2,709	2,722	-3,037	-0,46	3,569	3,735	-4,44
C15015	3,494	3,494	3,494	0,000	0,00	4,986	5,193	-3,99
C15019	4,569	4,569	4,569	0,000	0,00	7,014	7,297	-3,88
C15024	6,134	6,134	6,134	0,000	0,00	9,852	10,251	-3,89
C20015	6,193	6,791	6,613	-6,364	2,69	7,025	7,308	-3,87
C20019	9,772	9,879	9,879	-1,090	0,00	10,968	11,468	-4,36
C20024	12,355	12,355	12,355	0,000	0,00	15,018	15,609	-3,79
C25019	10,923	12,567	12,237	-10,732	2,70	13,362	13,955	-4,25
C25024	16,220	16,220	16,220	0,000	0,00	19,168	19,924	-3,80
C30024	25,224	29,980	27,586	-8,562	8,68	26,790	27,983	-4,26
C30030	37,025	38,226	38,226	-3,141	0,00	37,936	39,584	-4,16
C35030	51,311	58,063	54,661	-6,128	6,22	46,808	48,573	-3,63
Z10012	0,878	0,878	0,878	0,000	0,00	2,094	2,186	-4,22
Z10015	1,112	1,112	1,112	0,000	0,00	2,900	3,025	-4,14
Z10019	1,415	1,415	1,415	0,000	0,00	4,014	4,192	-4,25
Z15012	2,481	2,505	2,505	-0,963	0,00	3,672	3,860	-4,86
Z15015	3,259	3,259	3,259	0,000	0,00	5,226	5,496	-4,91
Z15019	4,027	4,027	4,027	0,000	0,00	7,175	7,493	-4,25
Z15024	5,428	5,428	5,428	0,000	0,00	10,085	10,504	-3,98
Z20015	6,037	6,454	6,749	-10,550	-4,38	6,962	7,297	-4,58
Z20019	8,781	8,781	8,781	0,000	0,00	10,961	11,529	-4,93
Z20024	11,875	11,875	11,875	0,000	0,00	15,266	15,941	-4,23
Z25019	10,324	11,446	11,446	-9,807	0,00	13,309	14,014	-5,03
Z25024	15,032	15,032	15,032	0,000	0,00	19,485	20,413	-4,54
Z30024	25,141	29,508	28,749	-12,551	2,64	26,824	28,191	-4,85
Z30030	36,854	37,601	37,601	-1,987	0,00	38,119	39,958	-4,60
Z35030	51,757	57,397	58,052	-10,843	-1,13	47,047	49,263	-4,50

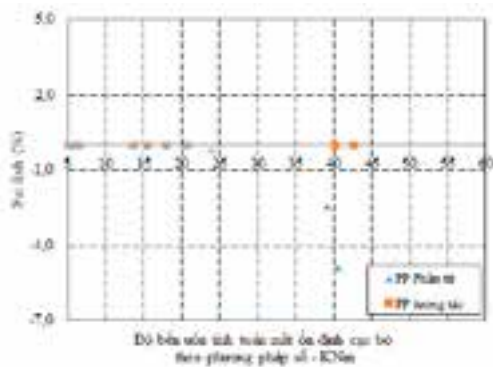
Ghi chú: Δ_1 , Δ_2 lần lượt là sai lệch về giá trị độ bền uốn tính toán mất ổn định cục bộ của phương pháp phần tử, phương pháp tương tác so với phương pháp số; $\Delta 3$ là sai lệch về giá trị độ bền uốn tính toán mất ổn định méo của phương pháp giải tích so với phương pháp số.



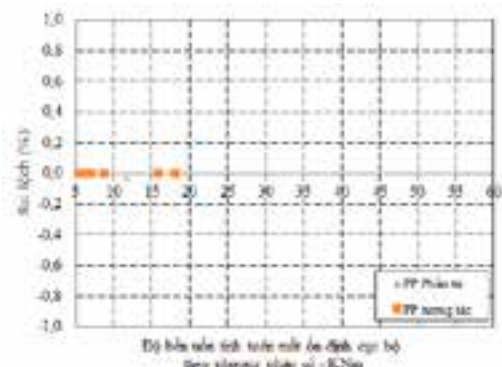
Hình 4. Độ bền uốn tính toán cầu kiện chiều dài 3,0 m



Hình 5. Độ bền uốn tính toán cầu kiện chiều dài 5,0 m



Hình 6. Độ bền uốn tính toán cầu kiện chiều dài 8,0m



$$k_{\phi wg} = \frac{h_0 t \pi^2}{13440} \left(\frac{[45360(1-\xi_{web}) + 62160] \left(\frac{L}{h_0} \right)^2 + 448\pi^2 + \left(\frac{h_0}{L} \right)^2 [53 + 3(1-\xi_{web})] \pi^4}{\pi^4 + 28\pi^2 \left(\frac{L}{h_0} \right)^2 + 420 \left(\frac{L}{h_0} \right)^4} \right) \quad (23)$$

Ứng suất mất ổn định méo ở trạng thái đàn hồi:

$$F_{crd} = \beta \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{k_{\phi fg} + k_{\phi wg}} \quad (24)$$

Kết quả:

C20019 có $F_{crd} = 351,720$ (Nmm);

Z20019 có $F_{crd} = 351,720$ (Nmm)

c) So sánh kết quả tính toán (Bảng 3)

4.3. Khảo sát khả năng ổn định của cầu kiện chịu uốn

4.3.1. Khảo sát mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo

Khảo sát các cầu kiện chịu uốn chiều dài thay đổi 3,0m, 5,0 m và 8,0m với các tiết diện khác nhau. Kết quả trong bảng 4, bảng 5.

Kết quả được thể hiện trên biểu đồ phần trăm như sau:

Tương tự khảo sát độ bền uốn tính toán mất ổn định cục bộ cho cầu kiện có chiều dài 5,0 m và 8,0m. Độ bền uốn tính toán mất ổn định méo được tính toán theo phương trình (6), (7) không phụ thuộc vào chiều dài cầu kiện. Kết quả trong hình 5, hình 6.

* Nhận xét: sai lệch về kết quả tính toán ứng suất mất ổn định cục bộ của phương pháp tương tác (B.W.Schafer và Peköz [12]) so với phương pháp số nhỏ hơn sai lệch kết quả tính toán của phương pháp phần tử. Mặt khác, kết quả tính toán ứng suất mất ổn định méo giữa phương pháp giải tích và phương pháp số cũng có sai lệch; độ bền uốn tính

toán khi sử dụng giá trị ứng suất mất ổn định theo phương pháp tương tác cho kết quả gần đúng với phương pháp số. Do vậy, ta sử dụng kết quả tính toán của phương pháp số là đảm bảo độ tin cậy.

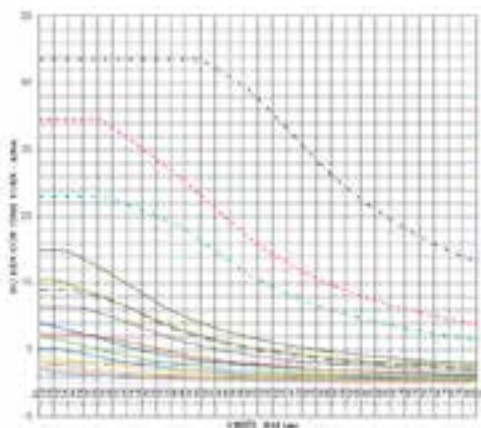
4.3.2. Độ bền uốn tính toán của cầu kiện

Trên cơ sở thông số kỹ thuật của thép tạo hình nguội do nhà sản xuất cung cấp ta dễ dàng xác định được độ bền uốn tính toán của cầu kiện có chiều dài thay đổi từ 2,0m đến 8,0m có tiết diện C, Z và lập được biểu đồ, rất tiện ích để phục vụ thiết kế. Kết quả hình 7, hình 8.

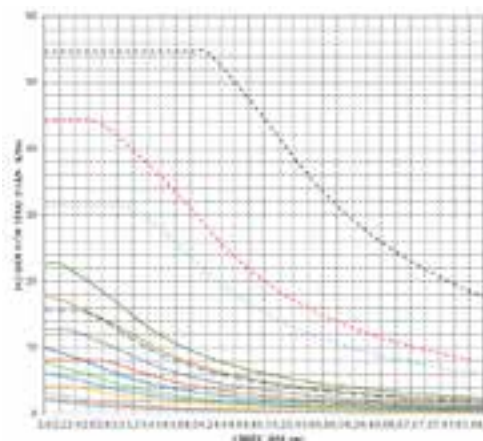
4.4. Nhận xét chung

Sai lệch về kết quả tính toán ứng suất mất ổn định cục bộ của phương pháp tương tác so với phương pháp số nhỏ hơn sai lệch kết quả tính toán của phương pháp phần tử. Các công thức do B.W.Schafer và Peköz [12] đề xuất là đóng góp lớn để cải thiện kết quả tính toán giải tích khi không có sự hỗ trợ của phần mềm. Mặt khác, kết quả tính toán ứng suất mất ổn định méo giữa phương pháp giải tích có sai lệch. Do vậy, ta sử dụng kết quả tính toán của phương pháp số là đảm bảo độ tin cậy; quá trình tính toán thiết kế và kiểm tra nên được thực hiện bằng phương pháp số.

Đối với cầu kiện ngắn tiết diện Z có độ bền lớn hơn tiết diện C do ảnh hưởng của mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo. Tuy nhiên đối với cầu kiện dài tiết diện C có độ bền lớn hơn cầu kiện tiết diện Z do ảnh hưởng của mất ổn định tổng thể.



Hình 7. Độ bền uốn tính toán cấu kiện tiết diện C



Hình 8. Độ bền uốn tính toán cấu kiện tiết diện Z

* Nhận xét: Đối với cấu kiện ngắn tiết diện Z có độ bền lớn hơn khi dùng tiết diện C do ảnh hưởng của mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo. Tuy nhiên đối với cấu kiện dài tiết diện C có độ bền lớn hơn cấu kiện tiết diện Z do ảnh hưởng mất ổn định tổng thể.

5. Kết luận

Bài báo trình bày quy trình tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn bằng phương pháp cường độ trực tiếp theo Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [2], với sự hỗ trợ của phần mềm CUFSM trong phân tích mất ổn định của tiết diện. Kết quả cho thấy độ tin cậy của phương pháp số (được hỗ trợ bằng cách sử dụng phần mềm CUFSM) và kiến nghị sử dụng phương pháp này trong thực hành tính toán thiết kế.

Khảo sát cấu kiện có tiết diện C, Z với chiều dài khác nhau cho thấy độ tin cậy của phương pháp số so với phương pháp giải tích khi tính toán ứng suất mất ổn định cục bộ và ứng suất mất ổn định méo. Đồng thời giới thiệu công thức tính toán ứng suất mất ổn định cục bộ do B.W.Schafer và Peköz [12] đề xuất để cải thiện kết quả tính toán giải tích khi không có sự hỗ trợ của phần mềm.

Đối với cấu kiện ngắn tiết diện Z có độ bền lớn hơn tiết diện C do ảnh hưởng của mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo. Tuy nhiên đối với cấu kiện dài tiết diện C có độ bền lớn hơn cấu kiện tiết diện Z do ảnh hưởng của mất ổn định tổng thể. Kết quả khảo sát được lập thành biểu đồ rất tiện lợi trong thực hành tính toán thiết kế.

Kết quả tính toán khi sử dụng phương pháp số được hỗ trợ bằng phần mềm CUFSM có độ tin cậy cao và rất tiện lợi, đặc biệt khi tính toán các đặc trưng hình học của tiết diện và phân tích mất ổn định cấu kiện thép tạo hình nguội. Việc sử dụng phương pháp DSM đã tạo nên sự thay đổi lớn về công cụ tính toán, đem lại nhiều lợi ích cho việc nghiên cứu và thực hành thiết kế kết cấu công trình. Do vậy, việc áp dụng phương pháp DSM cho thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội là rất cần thiết, đặt ra yêu cầu nước ta cần phải có tiêu chuẩn riêng về thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội.

Tài liệu tham khảo

1. TCVN5575:2012, "Kết cấu thép - Tiêu chuẩn thiết kế".
2. American Iron and Steel Institute (2016), "North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, ".
3. American Iron and Steel Institute (2013), "Cold-Formed Steel Design - Vol 1, ".
4. American Iron and Steel Institute (2006), "Committee on Specifications for the Design of Cold Formed Steel Structural Member, Direct Strength Method (DSM) Design Guide, January 2006".
5. American Iron and Steel Institute (2004), Supplement 2004 to the North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2001 Edition, Washiton, DC, 2004.
6. B. W. Schafer (2008), "Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design, " *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, no. 7–8, pp. 766–778,.
7. B. W. Schafer and T. Peköz (1998), "Direct Strength Prediction of Cold-Formed Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions," *Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, Missouri.
8. Cheung, Y.K, "Finite strip method in structural analysis, " 1st Edition ed. 1976, Oxford; New York: Pergamon Press.
9. G. J. Hancock, Y. B. Kwon, and E. Stefan Bernard, (1994), "Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling, " *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 31, no. 2–3, pp. 169–186, .
10. Lysaght, Zed & Cees, "User Guide for Design and Installation Professionals, 2019".
11. M.G.James, S.P. Timoshenko and (1961), "Theory of Elastic Stability, 2nd edition", 2nd, edito. New York: McGraw-Hill.
12. Schafer, B.W., Peköz, T. (1999), "Laterally Braced Cold - Formed Steel Flexural Members with Edge Stiffened Flange", *Journal of Structural Engineering*. 118-127.