

TÍNH TOÁN CẤU KIỆN THÉP TẠO HÌNH NGUỘI CHỊU NÉN BẰNG PHƯƠNG PHÁP CƯỜNG ĐỘ TRỰC TIẾP THEO TIÊU CHUẨN AISI S100-16

ThS. **HOÀNG ANH TOÀN**
Học viện Kỹ thuật Quân sự
PGS. TS. **VŨ QUỐC ANH**
Đại học Kiến trúc Hà Nội

Tóm tắt: Báo cáo trình bày phương pháp cường độ trực tiếp (DSM) trong thiết kế cấu kiện thép tạo hình nguội chịu nén theo Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16. Phần mềm CUFSM được giới thiệu để xác định ứng suất mất ổn định của tiết diện mà sử dụng trong tính toán của phương pháp DSM. Ví dụ tính toán sau đó được đưa ra để xác định khả năng chịu nén của cấu kiện thép tạo hình nguội tiết diện chữ C dựa trên các cơ sở tính toán đã trình bày.

Từ khóa: Thép tạo hình nguội; Nén; Phương pháp cường độ trực tiếp; Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16.

Abstract: This paper presents the Direct Strength Method (DSM) in designing cold-formed steel members subjected to compression according to American Standard AISI S100-16. CUFSM software is introduced to determine sectional buckling stresses using in DSM method design. Examples are subsequently given to calculate compressive capacities of cold-formed channel members on the basis of the presented design method.

Key words: Cold-formed Steel; Compression; The Direct Strength Method; AISI S100-16.

1. Giới thiệu

Hiện nay trên thế giới, kết cấu thép tạo hình nguội được sử dụng rất phổ biến và đa dạng trong nhiều lĩnh vực. Ban đầu kết cấu này được sử dụng trong lĩnh vực hàng không (chế tạo vỏ máy bay), ô tô và sau đó là kết cấu xây dựng. Trong xây dựng, kết cấu này được dùng để làm nhà nhiều tầng, sàn liên hợp, giàn không gian, mái vòm mỏng, nhà nhịp lớn, nhà công nghiệp, tấm mái, tấm tường và các bộ phận kiến trúc đã đem lại nhiều hiệu quả ưu việt so với việc sử dụng kết cấu thép thông thường như tiết kiệm vật liệu, thuận tiện trong việc bảo quản, vận chuyển và cầu lắp. Mặt khác, kết cấu thép tạo hình nguội có nhiều điểm khác biệt trong chế tạo, cấu tạo và tính toán so với kết cấu thép thông thường. Nhiều quốc gia và vùng lãnh thổ như Bắc

Mỹ, Châu Úc, Châu Âu, Anh, Nga, Trung Quốc,... đã ban hành tiêu chuẩn tính toán kết cấu thép tạo hình nguội. Ở Việt Nam, không có nhiều tài liệu đề cập đến loại kết cấu này, kể cả tiêu chuẩn thiết kế thép TCVN 5575:2012 cũng không thể sử dụng để thiết kế cho các loại cấu kiện đặc biệt này. 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 structure 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 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). Trong đó phương pháp DSM được đề xuất bởi Giáo sư G.J.Hancock (Australia); được phát triển, hoàn thiện bởi Giáo sư B.W.Schafer (Mỹ) và được đưa vào phần chính của Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [1].

Bài báo trình bày quy trình tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội bằng phương pháp cường độ trực tiếp theo Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [1] với sự hỗ trợ phần mềm phân tích ổn định đàn hồi CUFSM; sau đó áp dụng tính toán cho cấu kiện thép tạo hình nguội chịu nén.

2. Phương pháp cường độ trực tiếp

DSM là phương pháp thay thế được đề cập trong Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [1] và cũng là một phương pháp thực nghiệm. Phương pháp này được phát triển vào những năm 1990 nhằm mục đích khắc phục những hạn chế của phương pháp chiều rộng hữu hiệu (EWM) và được bắt đầu đưa vào trong phụ lục 1 của Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-04. 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 cũng được áp dụng cho các dạng mắt ổn định méo và mắt ổn định tổng thể. Khác với EWM, DSM dựa trên ứng xử của toàn bộ cấu kiện thay vì ứng xử của tiết diện. Đầu vào cho DSM là tải gây mất ổn định đàn hồi và thông số chảy dẻo của vật liệu. Có thể dễ dàng thu được kết quả thông qua các phương pháp số như phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), phương pháp dải hữu hạn (FSM) và lý thuyết dầm tổng quát (GBT). Khả năng tích hợp với các phương pháp số trong thiết kế là điểm nổi bật của phương pháp này.

So với EWM, DSM có ưu điểm là sử dụng đặc trưng của tiết diện nguyên và không cần phải tính lập hoặc tính toán chiều rộng hữu hiệu. Vì vậy, DSM dẫn đến sự linh hoạt khi xác định đặc trưng hình học của mặt cắt ngang, do đó tạo điều kiện thuận lợi cho nhiệm vụ tối ưu hóa tiết diện thép tạo hình nguội. Bên cạnh đó, DSM có công thức rõ ràng để xét đến mất ổn định méo trong thiết kế và bao gồm cả sự tương tác của các thành phần trong mặt cắt ngang. Công thức được sử dụng trong Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [1] liên quan đến phương pháp DSM được áp dụng cho thiết kế mất ổn định méo của dầm giống như trong Schafer và Pekoz (1998) [4]. DSM được hiệu chuẩn để áp dụng cho các tiết diện nhất định. Do đó, Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [1] đưa ra một danh mục với các giới hạn hình học và vật liệu. Danh mục này là một hạn chế cho phương pháp, nhưng nó là bản chất của phương pháp thực nghiệm.

Nội dung trình bày dưới đây cho cấu kiện chịu nén dọc trục có tiết diện nguyên không giảm yếu.

Khả năng chịu lực của cấu kiện chịu nén dọc trục là giá trị nhỏ nhất của cường độ tính toán mất ổn định tổng thể ($\phi_c P_{ne}$), cường độ tính toán mất ổn định cục bộ ($\phi_c P_{nl}$) và cường độ tính toán mất ổn định méo ($\phi_c P_{nd}$).

2.1 Cường độ tính toán mất ổn định tổng thể

Cường độ tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể (P_{ne}) cho trạng thái chảy và mất ổn định tổng thể (uốn, xoắn hoặc uốn-xoắn) được tính toán theo từng tiết diện và được xác định như sau:

$$P_{ne} = A_g F_n \quad (1)$$

trong đó:

A_g - Tổng diện tích của tiết diện;

F_n - Ứng suất nén được tính toán như sau:

$$\text{Với } \lambda_c \leq 1,5; F_n = (0,658^{\lambda_c^2}) F_y \quad (2)$$

$$\text{Với } \lambda_c > 1,5; F_n = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad (3)$$

$$\text{trong đó: } \lambda_c = \sqrt{F_y / F_{cre}} \quad (4)$$

F_{cre} - Giá trị nhỏ nhất của ứng suất mất ổn định tổng thể (uốn, xoắn và uốn-xoắn) được xác định theo mục E2.1 đến E2.5 hoặc Phụ lục 2 [1];

F_y - Cường độ chảy dẻo của cấu kiện chịu nén.

Cường độ tính toán mất ổn định tổng thể là $\phi_c P_{ne}$ với $\phi_c = 0,85$ (LRFD) [1].

2.2 Cường độ tính toán mất ổn định cục bộ

Cường độ tiêu chuẩn mất ổn định cục bộ (P_{nl}) cho trạng thái chảy và mất ổn định tổng thể được tính toán theo từng tiết diện và được xác định như sau:

$$\text{Với } \lambda_1 \leq 0,776; P_{nl} = P_{ne} \quad (5)$$

$$\text{Với } \lambda_1 > 0,776; P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne} \quad (6)$$

$$\text{trong đó: } \lambda_1 = \sqrt{P_{ne} / P_{cr1}} \quad (7)$$

P_{ne} - Cường độ tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể của cấu kiện được xác định theo biểu thức (1);

P_{cr1} - Tải trọng tới hạn gây mất ổn định cục bộ ở trạng thái đàn hồi, xác định theo phụ lục 2 [1].

Cường độ tính toán mất ổn định cục bộ là $\phi_c P_{nl}$ với $\phi_c = 0,85$ (LRFD) [1].

2.3 Cường độ tính toán mất ổn định méo

Cường độ tiêu chuẩn mất ổn định méo (P_{nd}) được tính toán cho từng tiết diện và xác định như sau:

$$\text{Với: } \lambda_d \leq 0,561; P_{nd} = P_y \quad (8)$$

Với:

$$\lambda_d > 0,561; P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y \quad (9)$$

$$\text{trong đó: } \lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} \quad (10)$$

$$\text{Với: } P_y = A_g F_y \quad (11)$$

A_g - Tổng diện tích mặt cắt ngang của tiết diện;

F_y - Giới hạn chảy;

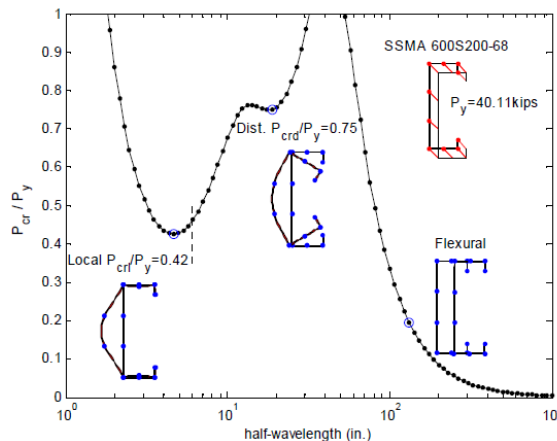
P_{crd} - Tải trọng tới hạn gây mất ổn định méo ở trạng thái đàn hồi, được xác định theo Phụ lục 2 [1].

Cường độ tính toán mất ổn định méo là $\phi_c P_{nd}$ với $\phi_c = 0,85$ (LRFD) [1].

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 [5], Cheung đã sử dụng lý thuyết tấm Kirchoff 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 kết cấu 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 phương pháp FSM để phân tích ổn định đàn hồi cho tiết diện bất kỳ. FSM khảo sát được cấu kiện chịu nén, uốn, uốn cong,... 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 của một tiết diện dưới dạng là một đường cong "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 cho một đường cong riêng biệt đặc trưng. Hình 1 biểu diễn một đường cong ứng suất mất ổn định của tiết diện cột khung khi chịu nén, đặc trưng bởi hai giá trị cực tiểu. Giá trị cực tiểu đầu tiên ứng với chiều dài nửa bước sóng ngắn nhất là ứng suất mất ổn định cục bộ (local buckling stress) và giá trị cực tiểu thứ hai ứng với nửa bước sóng dài hơn là ứng suất mất ổn định méo (distortional buckling stress). Các giá trị ứng suất với chiều dài nửa bước sóng lớn hơn là đường cong Euler. Giá trị ứng suất mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo từ phần mềm CUFSM được dùng để xác định khả năng chịu lực của cấu kiện thép tạo hình nguội bằng phương pháp cường độ trực tiếp như trình bày ở phần trên.

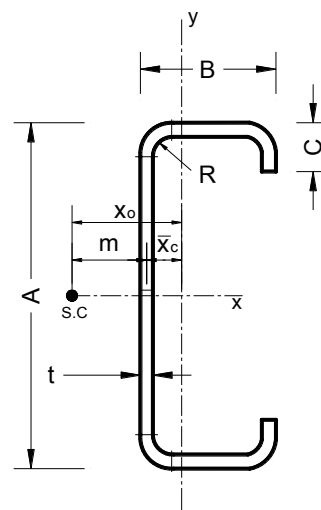


Hình 1. Phân tích FSM của kết cấu cột khung [1]

4. Ví dụ tính toán

Xác định khả năng chịu lực của cột thép tạo hình nguội tiết diện chữ C chịu nén đúng tâm có hai đầu liên kết khớp với chiều dài 2,5m và 4,0m. Tiết diện chữ C ($F_y = 345\text{MPa}$) với thông số hình học sau:

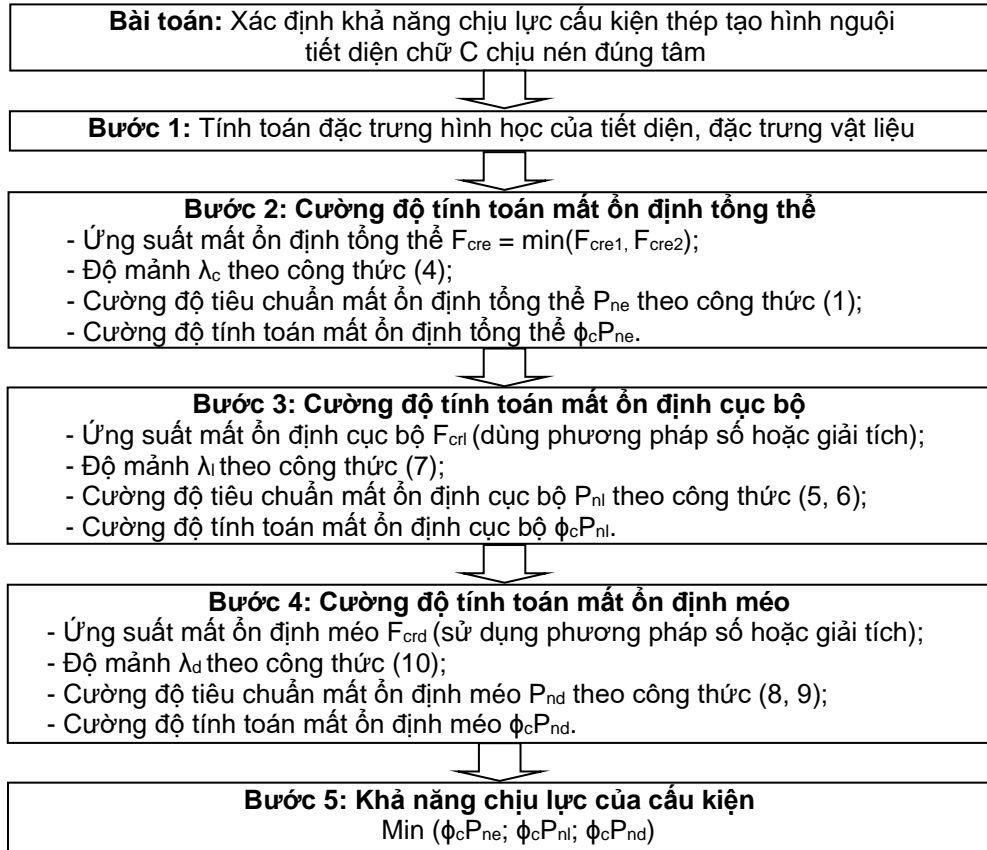
- A = 200mm;
- B = 85mm;
- C = 20mm;
- t = 3,0mm;
- R=1,5mm.



Hình 2. Kích thước hình học của tiết diện chữ C [2]

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Sơ đồ tính toán như sau:



4.1 Đặc trưng hình học của tiết diện chữ C

a) Đặc trưng vật liệu

Mô đun đàn hồi trượt của vật liệu:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{203000}{2 \cdot (1+0,3)} = 78076,92 \text{ (MPa)}$$

μ : Hệ số Poisson của vật liệu; $\mu = 0,3$

b) Đặc trưng hình học của tiết diện

Bảng 1. Các thông số hình học của tiết diện chữ C

Kích thước (mm)				A_g (mm ²)	Mô men quán tính (10 ⁶ mm ⁴)		x_o (mm)	Mô đun chống uốn (10 ³ mm ³)		Bán kính quán tính (mm)		J (mm ⁴)	C_w (10 ⁶ mm ⁶)
A	B	C	t		I_x	I_y		S_x	S_y	r_x	r_y		
200	85	20	3,0	1178,5	7,423	1,100	61,67	74,2	5,5	79,4	30,6	3536	8810

4.2 Phân tích mất ổn định tuyến tính

4.2.1 Mất ổn định tổng thể: Ứng suất mất ổn định tổng thể là giá trị nhỏ nhất của ứng suất mất ổn định uốn và ứng suất mất ổn định uốn-xoắn:

- Ứng suất mất ổn định uốn (F_{cre1}): $F_{cre1} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$ (12)

Cấu kiện dài 2,5m: $F_{cre1} = 299,2$ (MPa); Cấu kiện dài 4,0m: $F_{cre1} = 116,9$ (MPa).

trong đó:

E - Mô đun đàn hồi của thép, E=203000 (MPa);

K - Hệ số chiều dài hữu hiệu được xác định theo chương C [1]; K=1;

L - Chiều dài không giằng của cấu kiện;

r - Bán kính quán tính của tiết diện nguyên không giảm yếu đối với trục gây mất ổn định; $r = r_y$.

- Ứng suất mất ổn định uốn-xoắn (F_{cre2}):

$$F_{cre2} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad (13)$$

Cấu kiện dài 2,5m: $F_{cre2} = 228,4$ (MPa); Cấu kiện dài 4,0m: $F_{cre2} = 101,0$ (MPa).

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Với $\beta = 1 - (x_o/r_o)^2 = 0,7$ (14)

r_o - Bán kính quán tính độc cực của tiết diện đối với tâm cắt.

$= \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} = 105,0$ (mm) (15)

r_x, r_y - Bán kính quán tính của tiết diện theo trục x, y tương ứng.

x_o - Khoảng cách từ trọng tâm của tiết diện đến tâm cắt theo hướng trục chính x, giá trị tại bảng 1.

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

Cấu kiện dài 2,5m: $\sigma_t = 238,4$ (MPa); Cấu kiện dài 4,0m: $\sigma_t = 106,1$ (MPa).

A_g - Diện tích toàn bộ mặt cắt ngang không giảm yếu của cấu kiện;

G - Mô đun đàn hồi trượt của thép;

J - Hằng số xoắn Saint-Venant của tiết diện ngang;

E - Mô đun đàn hồi của thép;

C_w - Hằng số xoắn vênh của tiết diện;

K_t - Hệ số bề rộng hữu hiệu cho trạng thái xoắn được tính theo chương C [1]; $K_t = 1$;

L_t - Chiều dài không giằng của cấu kiện chịu vênh; $L_t = L$.

$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2}$ (17)

Cấu kiện dài 2,5m: $\sigma_{ex} = 2019,1$ (MPa); Cấu kiện dài 4,0m: $\sigma_{ex} = 788,7$ (MPa).

K_x - Hệ số chiều dài tính toán khi uốn đối với trục x được xác định theo Chương C [1]; $K_x = 1$;

L_x - Chiều dài không giằng của cấu kiện khi uốn với trục x.

Bảng 2. Cường độ tính toán mất ổn định tổng thể của cấu kiện chịu nén

Chiều dài (m)	Chiều dài tính toán (m)			Các thành phần ứng suất (MPa)				Ứng suất mất ổn định tổng thể F_{cre} (MPa)	Cường độ tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể	
	l_x	l_y	l_z	F_{cre1}	σ_t	σ_{ex}	F_{cre2}	λ_c	$\phi_c P_{ne}$ (KN)	
2,5	2,5	2,5	2,5	299,2	238,4	2019,1	228,4	228,4	1,23	183,6
4,0	4,0	4,0	4,0	116,9	106,1	788,7	101,0	101,0	1,85	82,7

* Nhận xét:

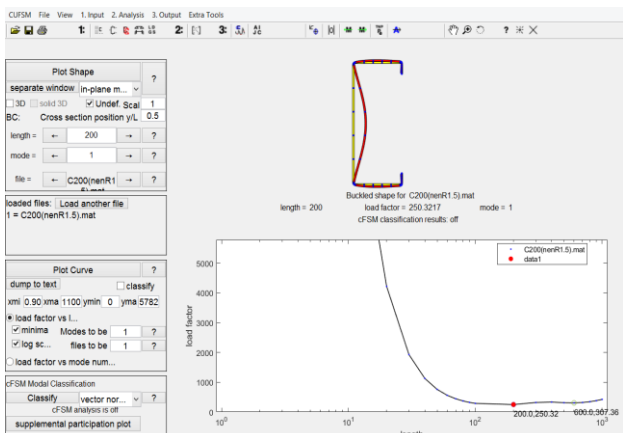
Mất ổn định do uốn-xoắn xảy ra đối với cả hai loại cấu kiện dài 2,5m và 4,0m.

4.2.2. Mất ổn định tiết diện: Sử dụng phần mềm CUFSM. Tiết diện chữ C được khai báo và phân

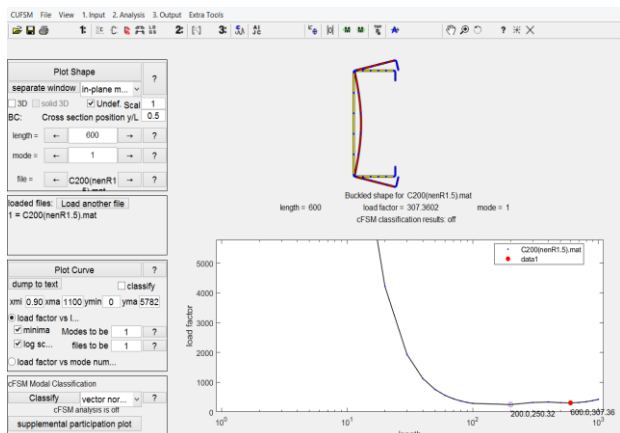
tích trong phần mềm CUFSM, cho các giá trị ứng suất mất ổn định như sau:

Giá trị ứng suất mất ổn định cục bộ (local buckling stress): $F_{crl} = 250,32$ (MPa)

Giá trị ứng suất mất ổn định méo (distortional buckling stress): $F_{crl} = 307,36$ (MPa).



Mất ổn định cục bộ



Mất ổn định méo

Hình 3. "Signature Curve" cho tiết diện chữ C chịu nén

4.3 Xác định khả năng chịu lực của cấu kiện chịu nén bằng phương pháp DSM

Bảng 3. Khả năng chịu lực của cấu kiện chịu nén

Chiều dài (m)	Mất ổn định tổng thể		Mất ổn định cục bộ		Mất ổn định méo		Khả năng chịu lực (KN)
	λ_c	$\phi_c P_{ne}$ (KN)	λ_l	$\phi_c P_{nl}$ (KN)	λ_d	$\phi_c P_{nd}$ (KN)	
2,5	1,23	183,6	0,86	163,8	1,06	246,5	163,8
4,0	1,85	82,7	0,57	82,7	1,06	246,5	82,7

* Nhận xét: Mất ổn định tổng thể và mất ổn định cục bộ xảy ra với cấu kiện dài (4,0m) tại giá trị 82,7 KN. Mất ổn định cục bộ xảy ra với cấu kiện ngắn (2,5m) và khả năng chịu lực của cấu kiện đã giảm từ 183,6 KN xuống 163,8 KN do ảnh hưởng của mất ổn định cục bộ.

5. Khảo sát mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo cho các cấu kiện chịu nén

5.1 Khảo sát mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo của tiết diện chữ C chịu nén tại mục 4.

5.1.1. Mất ổn định cục bộ

Để xác định ứng suất mất ổn định cục bộ có thể sử dụng phương pháp giải tích (phương pháp phần tử hoặc phương pháp tương tác) hoặc phương pháp số [6].

a) Phương pháp phần tử

Tải trọng tới hạn gây mất ổn định cục bộ (P_{cr1}) của cấu kiện được xác định dựa trên giá trị nhỏ nhất

$$k_f = 4 \text{ (Tra bảng C1-1 [1]); } F_{cr,f} = k_f \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 982,31 \text{ (MPa).}$$

a2) Mất ổn định cục bộ của bản bụng

$$k_w = 4 \text{ (Tra bảng C1-1 [1]); } F_{cr,w} = k_w \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{h} \right)^2 = 170,19 \text{ (MPa).}$$

a3) Mất ổn định cục bộ của bản mép

$$k_l = 0,425 \text{ (Tra bảng C1-1 [1]); } F_{cr,l} = k_l \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{d} \right)^2 = 2050,51 \text{ (MPa).}$$

$$F_{cr} = \min(F_{cr,f}; F_{cr,w}; F_{cr,l}) = 170,19 \text{ (MPa)}$$

b) Phương pháp tương tác

b1) Mất ổn định cục bộ bản cánh/mép

Theo [6], giá trị hệ số k được tính như sau:

$$\text{Với } \frac{d}{b} = \frac{18,5}{82} = 0,226 < 0,6; \quad k_{f,l} = 4,3277; \quad F_{cr,f,l} = k_{f,l} \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 1063 \text{ (MPa).}$$

b2) Mất ổn định cục bộ bản cánh/bụng

Theo [6], giá trị hệ số k được xác định như sau:

$$\text{Với } \frac{h}{b} = \frac{197}{82} = 2,40 > 1; \quad k_{f,w} = \left\{ \left[2 - \left(\frac{b}{h} \right)^{0,4} \right] \cdot 4 \cdot \left(\frac{b}{h} \right)^2 \right\} = 0,898; \quad F_{cr,f,w} = k_{f,w} \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 220,52 \text{ (MPa).}$$

$$F_{cr} = \min(F_{cr,f,l}; F_{cr,f,w}) = 220,52 \text{ (MPa)}$$

Từ giá trị F_{cr} ta xác định được cường độ tiêu chuẩn và cường độ tính toán mất ổn định cục bộ.

của ứng suất mất ổn định của các phần tử trên mặt cắt của tiết diện và được xác định như sau:

$$P_{cr1} = A_g \cdot F_{cr1} \tag{18}$$

A_g - Tổng diện tích mặt cắt ngang của tiết diện;

F_{cr1} - Ứng suất gây mất ổn định cục bộ nhỏ nhất của các phần tử trên mặt cắt của tiết diện:

$$F_{cr1} = k \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 \tag{19}$$

k - Hệ số vênh của tấm được xác định theo phụ lục 1 [1] cho các dạng phần tử với các biên khác nhau;

E, t - Mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của vật liệu;

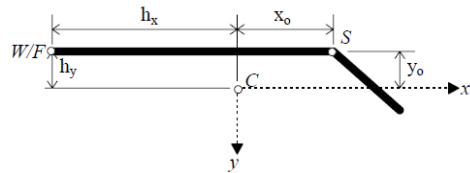
t - Chiều dày của phần tử; w - Chiều rộng phần tử bản.

a1) Mất ổn định cục bộ của bản cánh

5.1.2. Mất ổn định méo

Để xác định ứng suất mất ổn định méo ta có thể dùng phương pháp giải tích hoặc phương pháp số. Theo Mục 3.4.2 [2] ta xác định được các đặc trưng hình học của cánh nén như sau:

$h_o = A = 200 \text{ (mm)}; b_o = B = 85 \text{ (mm)}$
 $d_o = C = 20 \text{ (mm)}; h = h_o - t = 197 \text{ (mm)}$
 $b = b_o - t = 82 \text{ (mm)}; d = C - t / 2 = 18,5 \text{ (mm)}$
 $A_f = (b + d)t = 301,5 \text{ (mm}^2\text{)};$



Hình 4. Kích thước hình học của cánh

$I_{xf} = \frac{t(t^2b^2 + 4bd^3 + t^2bd + d^4)}{12(b + d)} = 5,642.10^3 \text{ (mm}^4\text{)}; I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3)}{12(b + d)} = 2,1396.10^5 \text{ (mm}^4\text{)}$
 $I_{xyf} = \frac{tb^2d^2}{4(b + d)} = 1,7174.10^4 \text{ (mm}^4\text{)}; x_{of} = \frac{b^2}{2(b + d)} = 33,4527 \text{ (mm)}; y_{of} = \frac{-d^2}{2(b + d)} = -1,7027 \text{ (mm)}$
 $h_{xf} = \frac{-b^2 + 2db}{2(b + d)} = -48,5473 \text{ (mm)}; J_f = \frac{1}{3}bt^3 + \frac{1}{3}dt^3 = 904,5 \text{ mm}^4; C_{wf} = 0 \text{ mm}^6$

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

$L_{crd} = \left\{ \frac{6\pi^4 h_o (1 - \mu^2)}{t^3} \left[I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] \right\}^{1/4} = 579,7140 \text{ (mm)}$
(20)

$\Rightarrow L = L_m = L_{crd} = 579,7140 \text{ mm}$

Độ cứng chống xoay đàn hồi của bản cánh:

$k_{\phi fe} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \left[EI_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 GJ_f = 7,0932.10^3 \text{ (N)}$
(21)

Độ cứng chống xoay đàn hồi của bản bụng lấy với vị trí nối giữa bản cánh và bản bụng:

$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{6h_o(1 - \mu^2)} = 5,0192.10^3 \text{ (N)}$
(22)

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

$k_{\phi fg} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \left\{ A_f \left[(x_{of} - h_{xf})^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of} (x_{of} - h_{xf}) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right] + I_{xf} + I_{yf} \right\} = 27,9254 \text{ (mm}^2\text{)}$
(23)

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

$k_{\phi wg} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{th_o^3}{60} = 11,7471 \text{ (mm}^2\text{)}$
(24)

Ứng suất gây mất ổn định méo đàn hồi:

$F_{crd} = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{k_{\phi fg} + k_{\phi wg}} = 305,31 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
(25)

Tải trọng tới hạn gây mất ổn định méo đàn hồi:

$P_{crd} = A_g F_{crd} = 3,5982.10^5 \text{ (N)}$

Tải trọng tới hạn gây chảy ở thớ biên chịu nén của tiết diện:

$P_y = A_g F_y = 4,066.10^5 \text{ (N)}$

Hệ số độ mảnh đối với dạng mất ổn định méo theo công thức (10):

$\lambda_d = 1,063 > 0,561$

Cường độ tiêu chuẩn mất ổn định méo:

$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y = 2,9007.10^5 \text{ (N)}$

Cường độ tính toán mất ổn định méo:

$\phi_c P_{nd} = 0,85.2,9007.10^5 = 246.560 \text{ (N)}$

5.1.3 Tổng hợp kết quả tính toán

Bảng 4. Cường độ tính toán ổn định cục bộ

Chiều dài (m)	Phương pháp giải tích (KN)		Phương pháp số (KN)	Sai số (%)	
	Phương pháp phần tử	Phương pháp tương tác		Δ_1	Δ_2
2,5	152,30	165,78	163,78	7,01	1,22
4,0	82,67	82,67	82,67	0,00	0,00

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Trong đó: Δ_1, Δ_2 (%) lần lượt là sai lệch về giá trị cường độ tính toán mất ổn định cục bộ giữa phương pháp phần tử, phương pháp tương tác so với phương pháp số.

Bảng 5. Cường độ tính toán mất ổn định méo

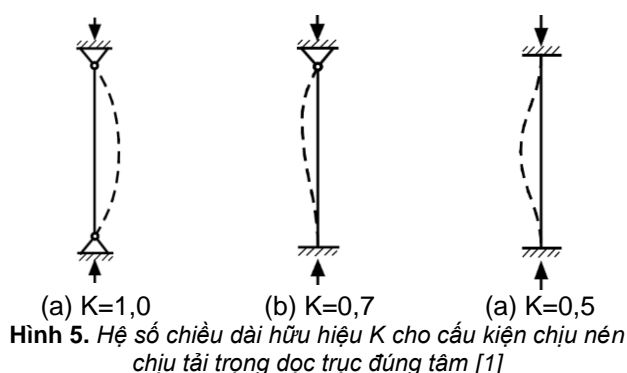
Tiết diện	Phương pháp giải tích (KN)	Phương pháp số (KN)	Sai số Δ_3 (%)
C200x85x20x3,0	246,560	246,547	0,01

Trong đó: Δ_3 (%) là sai lệch về giá trị cường độ tính toán mất ổn định méo giữa phương pháp giải tích so với phương pháp số.

5.2 Khảo sát mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo cho các tiết diện chữ C, Z, mũ (HU) chịu nén

Trình tự tính toán tương tự như mục 4 và mục 5.1, tiến hành khảo sát mất ổn định cục bộ và mất

ổn định méo cho cấu kiện thép tạo hình nguội có chiều dài 2,5m chịu tải trọng nén dọc trục đúng tâm có dạng tiết diện chữ C, Z, mũ (HU). Hình 5 mô tả với các trường hợp liên kết hai đầu là khớp-khớp, ngàm-khớp, ngàm-ngàm, tương ứng có hệ số chiều dài hữu hiệu K như sau (dạng mất ổn định của cột thể hiện bằng nét đứt):



5.2.1 Trường hợp cấu kiện có hai đầu là khớp

Bảng 6. Kết quả tính toán cho cấu kiện hai đầu khớp

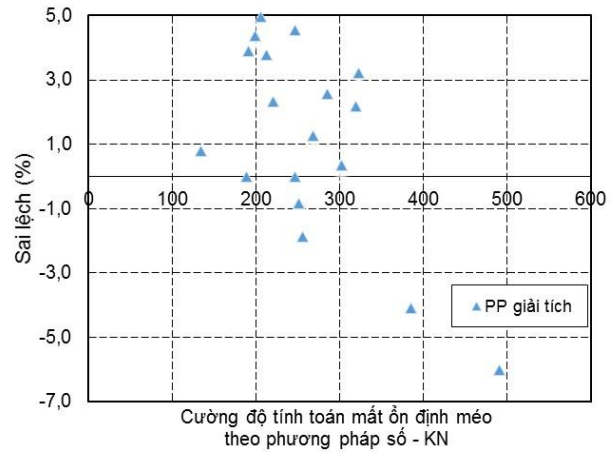
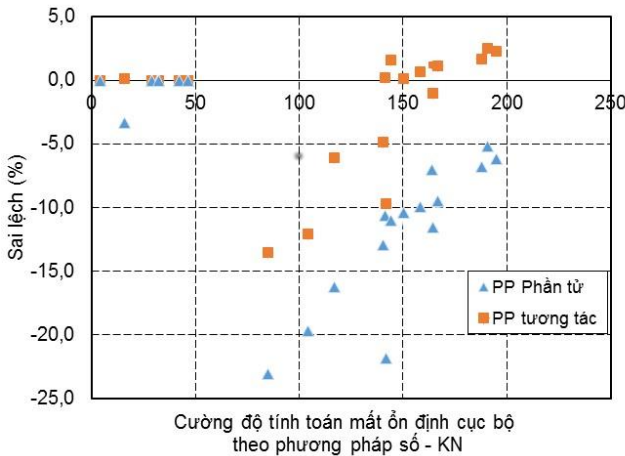
TT	Tiết diện	Cường độ tính toán mất ổn định cục bộ ($\phi_c P_{nl}$ - KN)					Cường độ tính toán mất ổn định méo ($\phi_c P_{nd}$ - KN)		
		Phương pháp giải tích		Phương pháp số	Δ_1 (%)	Δ_2 (%)	Phương pháp giải tích	Phương pháp số	Δ_3 (%)
		Phương pháp phần tử	Phương pháp tương tác						
1	C200x85x20x3	152,30	165,78	163,78	-7,01	1,22	246,56	246,55	3,31
2	C200x95x20x3	180,73	195,36	190,56	-5,16	2,52	249,60	251,71	-0,84
3	C200x85x25x3	175,22	191,02	187,94	-6,77	1,64	271,73	268,29	1,28
4	C200x85x30x3	182,74	199,26	194,84	-6,21	2,27	292,78	285,48	2,56
5	C200x85x20x2,5	122,31	133,62	140,49	-12,94	-4,89	188,63	188,63	0,00
6	C200x85x20x2,0	83,77	91,74	104,33	-19,71	-12,07	135,43	134,34	0,81
7	C250x70x20x3,0	110,68	127,94	141,64	-21,86	-9,68	225,23	220,10	2,33
8	C250x75x25x2,5	145,47	162,71	164,43	-11,53	-1,05	257,69	246,45	4,56
9	Z200x57x25x3	134,76	150,50	150,36	-10,38	0,09	221,01	212,94	3,79
10	Z200x52x25x3	126,40	141,76	141,46	-10,65	0,21	216,06	205,82	4,98
11	Z200x57x30x3	142,63	159,34	158,31	-9,90	0,65	238,68	224,74	6,21
12	Z200x57x35x3	150,71	168,46	166,56	-9,51	1,14	251,96	233,09	8,09
13	Z200x57x25x2,5	98,10	109,91	117,06	-16,20	-6,11	170,02	161,65	5,18
14	Z200x57x25x2,0	65,29	73,40	84,89	-23,08	-13,54	121,41	113,44	7,02
15	Z250x57x25x3,0	15,34	15,90	15,87	-3,33	0,16	207,61	198,93	4,36
16	Z250x52x25x3,0	128,18	146,25	144,02	-10,99	1,55	198,85	191,37	3,91
17	HU200x200x35x3	4,08	4,08	4,08	0,00	0,00	326,48	319,48	2,19
18	HU200x180x35x3	31,76	31,76	31,76	0,00	0,00	333,73	323,31	3,22
19	HU200x200x30x3	42,29	42,29	42,29	0,00	0,00	303,80	302,73	0,35
20	HU200x200x35x2,5	28,90	28,90	28,90	0,00	0,00	251,64	256,39	-1,85
21	HU230x150x42x3,5	46,62	46,62	46,62	0,00	0,00	461,34	490,74	-5,99
22	HU230x150x42x3,0	32,22	32,22	32,22	0,00	0,00	369,54	385,22	-4,07

Ghi chú: Δ_1, Δ_2 (%) lần lượt là sai lệch về giá trị cường độ tính toán mất ổn định cục bộ giữa phương pháp phần tử, phương pháp tương tác so với phương pháp số; Δ_3 (%) là sai lệch về giá trị

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

cường độ tính toán mất ổn định méo giữa phương pháp giải tích so với phương pháp số.

Kết quả được biểu diễn trên biểu đồ phần trăm như sau:



Hình 6. Cường độ tính toán mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo của cấu kiện có liên kết hai đầu là khớp

Nhận xét: Đối với trường hợp cấu kiện hai đầu khớp, sai lệch kết quả tính toán giữa phương pháp số (dùng phần mềm CUFSM) và phương pháp giải tích là nhỏ. Đặc biệt kết quả tính toán bằng phương

pháp tương tác cho kết quả gần đúng với kết quả của phương pháp số.

5.2.2. Trường hợp cấu kiện có liên kết hai đầu là ngàm-khớp

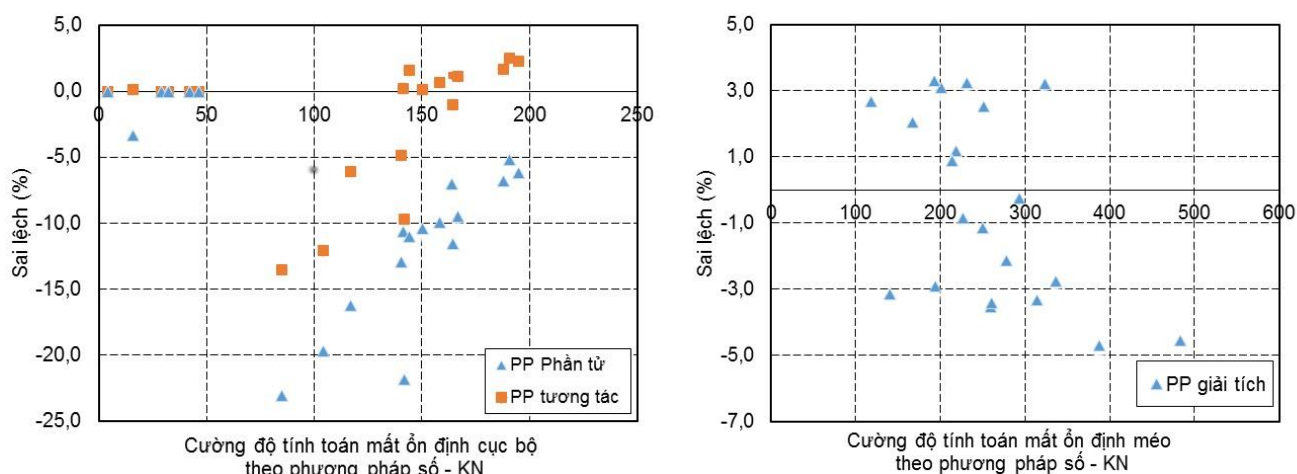
TT	Tiết diện	Cường độ tính toán mất ổn định cục bộ ($\phi_c P_{nl}$ - KN)					Cường độ tính toán mất ổn định méo ($\phi_c P_{nd}$ - KN)		
		Phương pháp giải tích		Phương pháp số	Δ_1 (%)	Δ_2 (%)	Phương pháp giải tích	Phương pháp số	Δ_3 (%)
		Phương pháp phân tử	Phương pháp tương tác						
1	C200x85x20x3	186,88	203,94	198,23	-5,72	2,88	246,55	249,39	-1,14
2	C200x95x20x3	209,07	226,33	219,86	-4,91	2,94	249,60	258,75	-3,54
3	C200x85x25x3	203,21	221,91	215,08	-5,52	3,18	271,73	277,60	-2,12
4	C200x85x30x3	211,05	230,51	223,58	-5,60	3,10	292,78	293,47	-0,23
5	C200x85x20x2,5	144,01	157,58	164,88	-12,66	-4,43	188,63	194,28	-2,91
6	C200x85x20x2,0	98,74	108,28	122,54	-19,42	-11,64	135,43	139,80	-3,13
7	C250x70x20x3,0	142,43	165,26	186,88	-23,78	-11,57	225,23	227,14	-0,84
8	C250x75x25x2,5	178,49	200,17	206,08	-13,39	-2,87	257,69	251,35	2,52
9	Z200x57x25x3	165,97	186,00	185,97	-10,75	0,02	221,01	218,41	1,19
10	Z200x52x25x3	158,76	178,79	178,98	-11,29	-0,10	216,06	214,19	0,87
11	Z200x57x30x3	174,22	195,28	193,39	-9,91	0,97	238,68	231,20	3,24
12	Z200x57x35x3	181,77	203,79	200,34	-9,27	1,72	251,96	238,96	5,44
13	Z200x57x25x2,5	122,32	137,48	146,14	-16,30	-5,93	170,02	166,60	2,05
14	Z200x57x25x2,0	83,19	93,77	108,07	-23,02	-13,23	121,41	118,25	2,67
15	Z250x57x25x3,0	42,79	47,22	47,49	-9,89	-0,57	207,61	201,39	3,09
16	Z250x52x25x3,0	158,56	181,50	181,63	-12,70	-0,07	198,85	192,47	3,31
17	HU200x200x35x3	39,76	39,76	39,76	0,00	0,00	326,48	335,69	-2,74
18	HU200x180x35x3	113,27	113,27	113,27	0,00	0,00	333,73	323,31	3,22
19	HU200x200x30x3	139,82	139,82	139,82	0,00	0,00	303,80	314,22	-3,32
20	HU200x200x35x2,5	109,86	109,86	109,86	0,00	0,00	251,64	260,50	-3,40
21	HU230x150x42x3,5	138,01	138,01	138,01	0,00	0,00	461,34	483,32	-4,55
22	HU230x150x42x3,0	111,00	111,00	111,00	0,00	0,00	369,54	387,77	-4,70

Ghi chú: Δ_1, Δ_2 (%) lần lượt là sai lệch về giá trị cường độ tính toán mất ổn định cục bộ giữa phương pháp phân tử, phương pháp tương tác so với phương pháp số; Δ_3 (%) là sai lệch về giá trị

cường độ tính toán mất ổn định méo giữa phương pháp giải tích so với phương pháp số.

Kết quả được biểu diễn trên biểu đồ phần trăm như sau:

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG



Hình 7. Cường độ tính toán mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo của cấu kiện có liên kết hai đầu là ngàm-khớp

Nhận xét: Đối với trường hợp cấu kiện có liên kết hai đầu là ngàm-khớp, sai lệch kết quả tính toán giữa phương pháp số (dùng phần mềm CUFSM) và phương pháp giải tích là nhỏ. Đặc biệt kết quả tính

toán bằng phương pháp tương tác cho kết quả gần đúng với kết quả của phương pháp số.

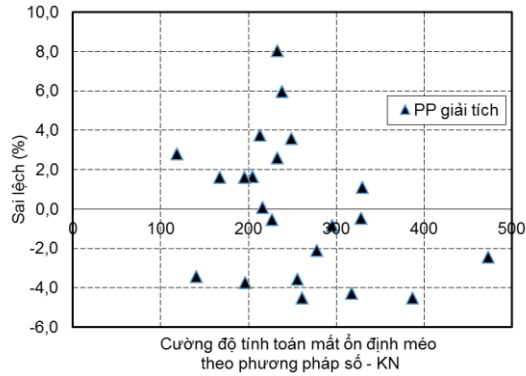
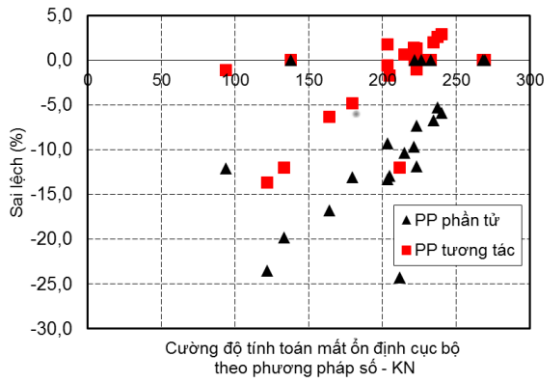
5.2.3 Trường hợp cấu kiện có liên kết hai đầu là ngàm

TT	Tiết diện	Cường độ tính toán mất ổn định cục bộ ($\phi_c P_{nI}$ - KN)					Cường độ tính toán mất ổn định méo ($\phi_c P_{nD}$ - KN)		
		Phương pháp giải tích		Phương pháp số	Δ_1 (%)	Δ_2 (%)	Phương pháp giải tích	Phương pháp số	Δ_3 (%)
		Phương pháp phân tử	Phương pháp tương tác						
1	C200x85x20x3	206,92	226,07	223,24	-7,31	1,27	246,55	255,70	-3,58
2	C200x95x20x3	224,67	243,39	237,29	-5,32	2,57	249,60	261,38	-4,51
3	C200x85x25x3	218,73	239,04	234,44	-6,70	1,96	271,73	277,58	-2,11
4	C200x85x30x3	225,75	246,74	239,84	-5,87	2,88	292,78	295,28	-0,85
5	C200x85x20x2,5	156,01	170,84	179,52	-13,10	-4,84	188,63	195,98	-3,75
6	C200x85x20x2,0	106,90	117,29	133,37	-19,85	-12,06	135,43	140,25	-3,44
7	C250x70x20x3,0	160,22	186,18	211,69	-24,31	-12,05	225,23	226,40	-0,52
8	C250x75x25x2,5	196,39	220,48	222,90	-11,89	-1,09	257,69	248,80	3,57
9	Z200x57x25x3	184,44	207,02	203,43	-9,34	1,76	221,01	213,01	3,76
10	Z200x52x25x3	178,44	201,32	204,93	-12,93	-1,76	216,06	215,90	0,07
11	Z200x57x30x3	192,60	216,19	214,91	-10,38	0,60	238,68	232,61	2,61
12	Z200x57x35x3	199,52	223,99	220,99	-9,71	1,36	251,96	237,77	5,97
13	Z200x57x25x2,5	136,41	153,53	163,97	-16,81	-6,37	170,02	167,31	1,62
14	Z200x57x25x2,0	93,14	105,11	121,80	-23,53	-13,70	121,41	118,09	2,81
15	Z250x57x25x3,0	82,27	92,58	93,64	-12,14	-1,13	207,61	204,25	1,65
16	Z250x52x25x3,0	176,36	202,18	203,46	-13,32	-0,63	198,85	195,73	1,59
17	HU200x200x35x3	137,69	137,69	137,69	0,00	0,00	326,48	327,97	-0,45
18	HU200x180x35x3	232,79	232,79	232,79	0,00	0,00	333,73	330,08	1,11
19	HU200x200x30x3	269,16	269,16	269,16	0,00	0,00	303,80	317,34	-4,26
20	HU200x200x35x2,5	221,57	221,57	221,57	0,00	0,00	251,64	232,87	8,06
21	HU230x150x42x3,5	268,15	268,15	268,15	0,00	0,00	461,34	472,91	-2,45
22	HU230x150x42x3,0	226,35	226,35	226,35	0,00	0,00	369,54	387,05	-4,52

Ghi chú: Δ_1, Δ_2 (%) lần lượt là sai lệch về giá trị cường độ tính toán mất ổn định cục bộ giữa phương pháp phân tử, phương pháp tương tác so với phương pháp số; Δ_3 (%) là sai lệch về giá trị

cường độ tính toán mất ổn định méo giữa phương pháp giải tích so với phương pháp số.

Kết quả được biểu diễn trên biểu đồ phần trăm như sau:



Hình 8. Cường độ tính toán mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo của cấu kiện có liên kết hai đầu là ngàm

Nhận xét: Đối với trường hợp cấu kiện có liên kết hai đầu là ngàm, sai lệch kết quả tính toán giữa phương pháp số (dùng phần mềm CUFSM) và phương pháp giải tích là nhỏ. Đặc biệt kết quả tính toán bằng phương pháp tương tác cho kết quả gần đúng với kết quả của phương pháp số.

5.3 Nhận xét chung

- Từ kết quả khảo sát mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo cho thấy sai lệch về kết quả tính toán giữa phương pháp số (dùng phần mềm CUFSM) và phương pháp giải tích là nhỏ. Đặc biệt kết quả tính toán bằng phương pháp tương tác cho kết quả gần đúng với kết quả của phương pháp số, do vậy lý thuyết tính toán mất ổn định cục bộ của Schafer, B.W. (2002) [6] cho cấu kiện chịu nén có tiết diện mở là phù hợp. Việc khảo sát mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo bằng việc sử dụng phần mềm CUFSM cho kết quả đáng tin cậy;

- Việc sử dụng phần mềm trong tính toán ứng suất gây mất ổn định cục bộ và ứng suất gây ổn định méo, tính toán khả năng chịu lực của cấu kiện làm giảm rất nhiều khối lượng tính toán, dễ dàng khảo sát để lựa chọn tiết diện phù hợp một cách chính xác.

6. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu phương pháp cường độ trực tiếp trong tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội chịu nén theo Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [1], với sự hỗ trợ của phần mềm CUFSM trong phân tích mất ổn định của tiết diện. Kết quả tính toán ở ví dụ cho thấy ảnh hưởng mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo đến khả năng chịu lực của cấu kiện. Mất ổn định tổng thể thường xảy ra với cấu kiện dài (hay cấu kiện có độ mảnh cao), trong khi mất ổn định cục bộ có xu hướng xảy ra với những cấu kiện ngắn (hay độ mảnh thấp) dẫn đến giảm khả năng chịu lực của các cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội.

Khảo sát mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo cho cấu kiện chịu nén khi sử dụng phương pháp số (phần mềm CUFSM) và phương pháp giải tích cho thấy sai lệch về kết quả tính toán giữa hai

phương pháp là nhỏ. Đồng thời kiến nghị sử dụng phương pháp tương tác của Schafer, B.W. (2002) [6] khi tính toán mất ổn định cục bộ cho cấu kiện chịu nén có tiết diện mở bằng giải tích.

Kết quả tính toán khi phần mềm CUFSM có độ tin cậy cao. Mặt khác, việc áp dụng phần mềm CUFSM vào tính toán các đặc trưng hình học và phân tích ổn định cấu kiện thép tạo hình nguội sẽ tạo ra sự thay đổi lớn về công cụ tính toán, đem lại nhiều lợi ích, thuận tiện cho việc nghiên cứu và cho thực hành thiết kế kết cấu công trình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. American Iron and Steel Institute, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2016 Edition, Washington, DC.
2. American Iron and Steel Institute, Cold-Formed Steel Design - Vol 1, 2013 Edition, Steel Market Development Institute.
3. 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.
4. B. W. Schafer and T. Peköz (1998), "Direct Strength Prediction of Cold-Formed Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions", in *Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*.
5. Cheung, Y.K. (1976), "Finite strip method in structural analysis", 1st Edition ed., Oxford; New York: Pergamon Press.
6. Schafer, B.W. (2002). "Local, Distortional, and Euler Buckling in Thin-walled Columns". *ASCE, Journal of Structural Engineering*. 128 (3) 289-299.
7. Schafer, B.W., Ádány, S. (2006). "Buckling analysis of Cold-Formed steel members using CUFSM: Conventional and constrained finite strips methods", *18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, October 26-27, Orlando, Florida*.

Ngày nhận bài: 03/8/2020.

Ngày nhận bài sửa lần cuối: 23/9/2020.

*(Calculations of Cold-Formed Steel Member Capacity under compression
using Direct Strength Method according to AISI S100-16 Standard)*