

CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH ỨNG SUẤT ỔN ĐỊNH CỤC BỘ CỦA THÉP HỘP CHỮ NHẬT CHỊU NÉN ĐÚNG TÂM

Chiêm Đăng Tứ Quốc^{a,*}, Bùi Hùng Cường^b

^a*Thị trấn Châu Hưng, Vĩnh Lợi, Bạc Liêu, Việt Nam*

^b*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 26/6/2024, Sửa xong 28/7/2024, Chấp nhận đăng 13/8/2024

Tóm tắt

Khi hiện tượng mất ổn định ở bản cánh hoặc bản bụng của thanh thép hộp chữ nhật xảy ra sẽ kéo theo biến dạng của bản còn lại. Do đó, việc tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cũng như khả năng chịu lực tới hạn cho thanh thép chữ nhật phải xem xét đến sự tương tác của bản cánh và bản bụng. Bài báo đề xuất các công thức tính toán ứng suất tới hạn gây mất ổn định cục bộ của thanh thép chữ nhật rỗng chịu nén đúng tâm kể đến sự tương tác giữa bản bụng và bản cánh khi các tỷ số bề rộng với chiều cao, tỷ số chiều dày bản cánh với chiều dày bản bụng thay đổi. Kết quả phân tích ổn định đối với thanh thép chữ nhật rỗng chịu nén đúng tâm cho thấy ứng suất tới hạn cục bộ không phụ thuộc vào tỷ số chiều dài với chiều cao mà phụ thuộc vào tỷ số chiều dày với bề rộng và tỷ số bề rộng với chiều cao. Ứng suất tới hạn cục bộ được xác định bằng phương pháp dải hữu hạn bán giải tích trong chương trình CUFSM. Các công thức được đề xuất để xác định hệ số ổn định dựa trên nghiên cứu tham số và xử lý xác suất thống kê. Độ tin cậy của các công thức đề xuất được đảm bảo với hệ số biến thiên thấp và hệ số xác định cao.

Từ khoá: ứng suất tới hạn; hệ số ổn định; tương tác cánh-bụng; tiết diện chữ nhật rỗng; nén đúng tâm; phương pháp dải hữu hạn.

FORMULAS DETERMINING THE LOCAL CRITICAL STRESS OF RECTANGULAR HOLLOW SECTIONS UNDER AXIAL COMPRESSION

Abstract

When the buckling occurs in either the flange or the web of a rectangular hollow steel section, it will lead to the deformation in the remaining part. Therefore, the calculation of local critical stress and the ultimate load-carrying capacity of the rectangular steel section must take into account the interaction between the flange and the web. This paper proposes formulas for calculating the local critical stress causing local buckling of an axially compressed rectangular hollow steel section, considering the interaction between the web and the flange when the width-to-height ratio and the flange thickness-to-web thickness ratio vary. The stability analysis results for the axially compressed rectangular hollow steel sections indicate that the local critical stress is independent of the length-to-height ratio but depends on the thickness-to-width ratio and the width-to-height ratio. The local critical stress is determined using the semi-analytical finite strip method within the CUFSM software. The proposed formulas for determining the stability coefficient are based on parametric studies and probabilistic statistical processing. The reliability of the proposed formulas is ensured by a low coefficient of variation and a high determination coefficient.

Keywords: critical stress; buckling coefficient; flange-web interaction; rectangular hollow sections; axial compression; finite strip method.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(4V\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(4V)-06) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tuquoc4171@gmail.com (Quốc, C. Đ. T.)

1. Đặt vấn đề

Thanh thép chữ nhật rỗng được sử dụng nhiều trong lĩnh vực xây dựng, ví dụ như: cột thép, cột thép nhồi bê tông, kết cấu dầm sàn, kết cấu giằng của nhà công nghiệp, nhà cao tầng, kết cấu dầm khoan trên biển, ... Một trong những vấn đề để đảm bảo khả năng chịu lực của thanh thép hộp là ổn định cục bộ. Khi bản bụng hoặc bản cánh của thanh thép hộp bị mất ổn định sẽ kéo theo sự tương tác giữa các bản này. Công thức (1) dùng để xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho thanh thép chữ nhật rỗng được sử dụng bởi Trahair [1], trong công thức này thì ứng suất tới hạn cục bộ phụ thuộc vào tỷ số chiều dày với bề rộng và hệ số ổn định. Tuy nhiên Trahair [1] không đưa ra công thức cụ thể xác định hệ số ổn định mà dùng cách tra biểu đồ. Phương pháp dải hữu hạn bán giải tích được phát triển bởi Cheung [2] khi dùng lý thuyết tấm của Kirchhoff để xây dựng các dải hữu hạn. Một số tác giả đã dùng phương pháp này xây dựng chương trình CUFSM [3] để xác định ứng suất tới hạn cục bộ. Gần đây, tác giả [4, 5] đã ứng dụng phương pháp dải hữu hạn bán giải tích để phân tích ổn định kết cấu tấm và kết cấu thanh thành mỏng. Đã có một số nghiên cứu đề cập đến sự tương tác giữa bản bụng và bản cánh khi thanh thép chữ nhật bị mất ổn định cục bộ, Seif và Schafer [6] dùng phương pháp dải hữu hạn bán giải tích để xác định ứng suất ổn định cục bộ cho các thanh thép có nhiều tiết diện khác nhau và đề xuất những công thức tính toán hệ số ổn định cho những tiết diện này khi chịu nén đúng tâm và chịu uốn kể đến sự tương tác này. Các tác giả trong [7] đã trình bày công thức để xác định hệ số ổn định cho thanh thép hộp chữ nhật rỗng thành mỏng kể đến sự tương tác giữa bản bụng và bản cánh khi dùng lý thuyết dầm tổng quát, và đề xuất những phương trình xác định hệ số ổn định cho thanh thép hộp chữ nhật chịu nén và chịu uốn, Vieira và cs. [7] chỉ trình bày cụ thể công thức đối với những tỷ số chiều cao với bề rộng là 1,0; 2,0; 3,0 và 4,0.

Một số thí nghiệm đã được tiến hành bởi Kuwamura [8] để đánh giá ứng xử ổn định cục bộ của thanh thép hộp chịu nén. Shi và cs. [9] đã làm thí nghiệm cột ngắn chịu nén đúng tâm làm từ vật liệu thép Q460 để xem xét ổn định khi tỷ số bề rộng với chiều dày tăng lên. Một số tác giả [10–12] nghiên cứu ổn định của cột thép chịu nén đúng tâm khi sử dụng vật liệu cường độ cao. Ngoài ra, các nghiên cứu về ổn định của cột thép chịu nén trong môi trường nhiệt độ cao cũng được quan tâm bởi nhiều tác giả [13–16]. Ứng xử ổn định cục bộ đối với thép hộp chữ nhật rỗng cũng được quan tâm bởi Tang và cs. [17]. Phân tích ổn định cục bộ đối với các tấm trục hướng với những điều kiện biên khác nhau cũng được tiến hành bởi Qiao và Shan [18]. Một mô hình phần tử hữu hạn ổn định đàn hồi cũng được sử dụng để đánh giá ứng xử của thép hộp chữ nhật trong kết cấu liên hợp bởi Uy và Bradford [19]. Bên cạnh đó, một số tác giả [20, 21] đề xuất công thức tính toán tải tới hạn và hệ số tương tác kể đến sự tương tác giữa bản cánh và bản bụng. Bui [22] dùng phương pháp dải hữu hạn bán giải tích để đánh giá ứng xử ổn định của ống thép tròn chịu uốn đều. Nguyễn [23] cũng quan tâm đến ổn định cục bộ bản bụng của cột thép chữ I tổ hợp chịu nén lệch tâm. Đặng và cs. [24] dùng phương pháp năng lượng kết hợp phương pháp giải tích để phân tích ổn định của thanh thành mỏng chịu tải trọng khác nhau và có điều kiện biên phức tạp. Trần và Hoàng [25] dùng phương pháp sai phân hữu hạn để tính ổn định cho cột có độ cứng tiết diện thay đổi theo quy luật bất kỳ.

Tiêu chuẩn Châu Âu [26] và tiêu chuẩn Hoa Kỳ [27] đã trình bày công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ thiên về an toàn khi bỏ qua tương tác giữa bản cánh và bản bụng (xem như liên kết khớp giữa cánh và bụng). Để xác định chính xác ứng suất tới hạn cục bộ thì cần dùng đến phương pháp số trong đó phương pháp dải hữu hạn bán giải tích là phương pháp thích hợp để tính toán ứng suất ổn định tới hạn. Nghiên cứu này sử dụng chương trình CUFSM 4.05 để tính ứng suất tới hạn cục bộ của thanh thép hộp chữ nhật rỗng, sau đó áp dụng nghiên cứu tham số và xử lý xác suất thống kê để đưa ra công thức xác định hệ số ổn định, qua đó xác định được ứng suất tới hạn cục bộ từ phương trình (1):

$$\sigma_{cr} = \frac{k_{\sigma}\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

trong đó σ_{cr} là ứng suất tới hạn cục bộ, E là mô đun đàn hồi của vật liệu thép; ν là hệ số Poisson; k_σ là hệ số ổn định; t và b lần lượt là chiều dày và bề rộng của tấm. Để tính toán chính xác ứng suất tới hạn cục bộ của thanh thép hộp chữ nhật cần kể đến tương tác giữa bản bụng và bản cánh, phương pháp dải hữu hạn bán giải tích rất thích hợp và đáp ứng được yêu cầu này bởi vì phương pháp này cho phép vẽ được đường cong thể hiện quan hệ giữa ứng suất ổn định và chiều dài thanh, nhờ đó dễ dàng xác định được ứng suất tới hạn cục bộ qua điểm cực tiểu của đường cong.

2. Đề xuất công thức xác định hệ số ổn định

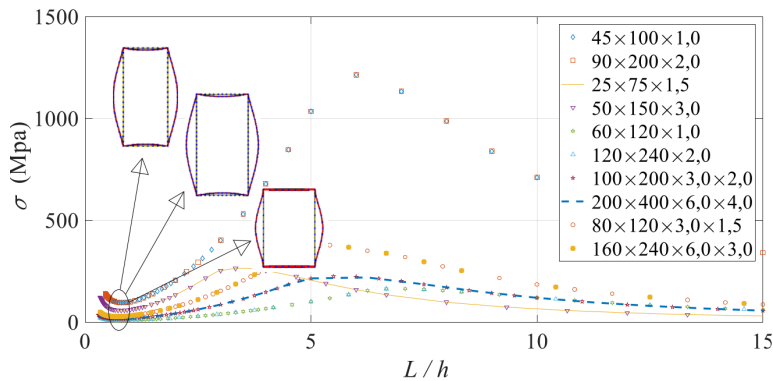
Trong phần này, dựa vào kết quả phân tích đối với các thanh thép chữ nhật trong chương trình CUFSM, sau đó đề xuất phương trình xác định hệ số ổn định từ những kết quả đạt được. Để đánh giá độ chính xác và tính ứng dụng của những công thức đề xuất, kết quả tính toán hệ số ổn định từ các công thức đề xuất sẽ được so sánh với kết quả của phương pháp số và nghiên cứu đã công bố của tác giả khác.

2.1. Ảnh hưởng của tỷ số chiều dài với chiều cao

Thực hiện phân tích ổn định đối với những thanh thép chữ nhật rộng khác nhau bằng chương trình CUFSM, năm nhóm mẫu khác nhau được tiến hành khảo sát có đặc trưng hình học được trình bày trong (Bảng 1), các kết quả phân tích thu được được trình bày trong (Hình 1).

Bảng 1. Kích thước hình học của các mẫu khảo sát

		b_f (mm)	h_w (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	L (mm)
Nhóm 1	Mẫu 1	45	100	1,0	1,0	5000
	Mẫu 2	90	200	2,0	2,0	10000
Nhóm 2	Mẫu 1	25	75	1,5	1,5	5000
	Mẫu 2	50	150	3,0	3,0	10000
Nhóm 3	Mẫu 1	60	120	1,0	1,0	5000
	Mẫu 2	120	240	2,0	2,0	10000
Nhóm 4	Mẫu 1	100	200	3,0	2,0	5000
	Mẫu 2	200	400	6,0	4,0	10000
Nhóm 5	Mẫu 1	80	120	3,0	1,5	5000
	Mẫu 2	160	240	6,0	3,0	10000



Hình 1. Ảnh hưởng của tỷ số chiều dài với chiều cao lên ứng suất ổn định

Căn cứ vào kết quả trong Hình 1, những điểm ứng suất ổn định có cùng tỷ số chiều dày với bề rộng, tỷ số bề rộng với chiều cao và tỷ số chiều dài với chiều cao bằng nhau thì như nhau. Khi chiều dài thanh thép chữ nhật thay đổi thì hình dạng và giá trị của đường cong $\sigma - L/h$ trong Hình 1 vẫn không thay đổi, do đó có thể khẳng định rằng những giá trị ứng suất tới hạn cục bộ (điểm cực tiểu được trình bày trong Hình 1) của thanh thép chữ nhật rộng không phụ thuộc vào chiều dài cấu kiện cũng như tỷ số L/h . Qua đó có thể thấy được ứng suất tới hạn cục bộ chỉ phụ thuộc vào tỷ số chiều dày với bề rộng và hệ số ổn định (được trình bày trong công thức (1)). Ngoài ra, đối với những thanh thép chữ nhật có chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng khác nhau (nhóm mẫu 4 và 5 được trình bày trong Bảng 1) thì ứng suất ổn định cũng không phụ thuộc vào tỷ số L/h .

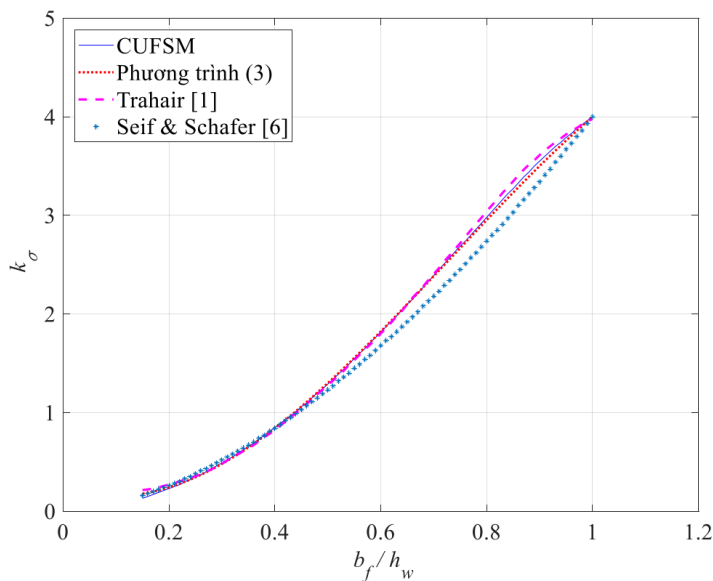
2.2. Công thức đề xuất đối với thanh thép chữ nhật có chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng bằng nhau

Công thức đề xuất xác định hệ số ổn định được thiết lập dựa vào kết quả phân tích trong chương trình CUFSM kết hợp với phương pháp nghiên cứu tham số và xử lý xác suất thống kê. Mặt khác, ứng suất tới hạn cục bộ không chỉ phụ thuộc vào tỷ số chiều dày với bề rộng mà còn bị ảnh hưởng bởi tỷ số bề rộng với chiều cao (kết quả phân tích được thể hiện trong Hình 2), do đó, công thức đề xuất để xác định hệ số ổn định sẽ xem xét đến tỷ số này. Phương trình đề xuất xác định hệ số ổn định có dạng như sau:

$$k_{\sigma} = -a\left(\frac{b_f}{h_w}\right)^3 + b\left(\frac{b_f}{h_w}\right)^2 - c\left(\frac{b_f}{h_w}\right) + d \quad (2)$$

trong đó các hệ số a, b, c và d là các hệ số cần tìm, b_f là bề rộng, h_w là chiều cao.

Phân tích ổn định đối với các thanh thép chữ nhật hai đầu liên kết khớp chịu nén đúng tâm có tỷ số bề rộng với chiều cao thay đổi từ 0,15 đến 1,0 với bước nhảy thay đổi là 0,01, với mỗi tỷ số bề rộng với chiều cao thì xác định được một giá trị hệ số ổn định tương ứng, sau đó dùng phương pháp bình phương bé nhất để đưa ra đường cong dự đoán. Các hệ số a, b, c và d trong phương trình (2) có giá trị lần lượt là $a = 4,8$, $b = 10,5$, $c = 1,95$ và $d = 0,25$ tương ứng với hệ số biến thiên (CoV) thấp nhất là



Hình 2. Ảnh hưởng của tỷ số bề rộng với chiều cao lên hệ số ổn định đối với thanh thép chữ nhật có chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng bằng nhau

0,054 và hệ số xác định (R^2) cao nhất với 0,9997. Phương trình (2) được viết lại như sau:

$$k_{\sigma} = -4,8 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^3 + 10,5 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^2 - 1,95 \left(\frac{b_f}{h_w} \right) + 0,25 \quad (3)$$

Căn cứ vào kết quả trong Hình 2, đường cong dự đoán theo phương trình (3) và kết quả của Trahair [1] thì tiệm cận với kết quả của chương trình CUFSM. Trong khi đó, kết quả thu được từ Seif và Schafer [6] thì lại có sự sai lệch đáng kể đối với tỷ số bề rộng với chiều cao thay đổi từ 0,5 đến 0,9.

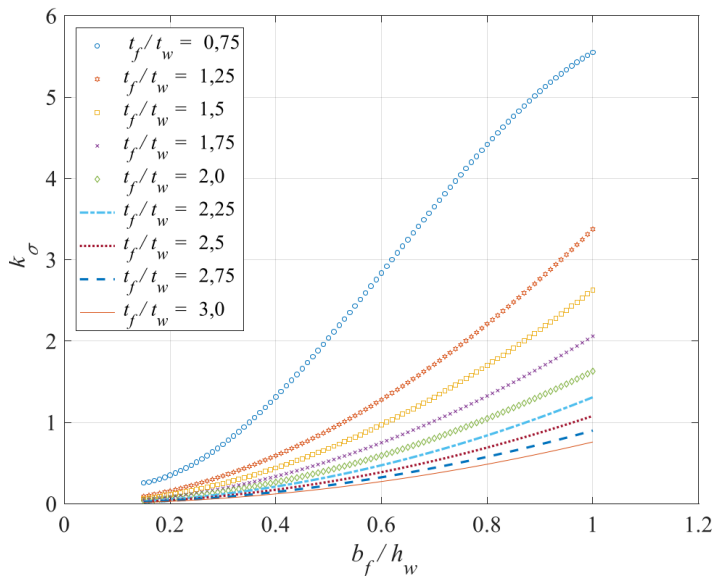
Căn cứ vào kết quả trong Bảng 2, công thức đề xuất để xác định hệ số ổn định có kết quả tương đồng với chương trình CUFSM khi giá trị trung bình (μ) là 1,009 và hệ số biến thiên (CoV) là 0,054. Trong khi đó, kết quả của Trahair [1], Seif và Schafer [6] có sự sai lệch với kết quả của chương trình CUFSM khi có μ lần lượt là 1,029 và 0,983 tương ứng với CoV là 0,101 và 0,078. Ngoài ra, kết quả thu được từ phương trình (3) có hệ số xác định R^2 là 0,9997 cao hơn so với Trahair [1], Seif và Schafer [6] khi có giá trị R^2 lần lượt là 0,9991 và 0,9868.

Bảng 2. So sánh kết quả tính toán hệ số ổn định đối với tỷ số $t_f/t_w = 1$

Phương pháp tính toán	μ	CoV	R^2
Trahair [1]	1,029	0,101	0,9991
Seif & Schafer [6]	0,983	0,078	0,9868
Phương trình (3)	1,009	0,054	0,9997

2.3. Công thức đề xuất đối với thanh thép chữ nhật có chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng khác nhau

Tương tự như cách xác định hệ số ổn định đối với thanh thép chữ nhật có chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng bằng nhau, trong mục này chỉ trình bày kết quả đạt được từ việc phân tích. Mỗi quan hệ giữa hệ số ổn định và tỷ số bề rộng với chiều cao từ chương trình CUFSM (được thể hiện trong Hình 3), các công thức đề xuất (Bảng 3), so sánh kết quả tính toán hệ số ổn định (Hình 4 và Bảng 4).



Hình 3. Ảnh hưởng của tỷ số bề rộng với chiều cao lên hệ số ổn định đối với thanh thép chữ nhật có chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng khác nhau

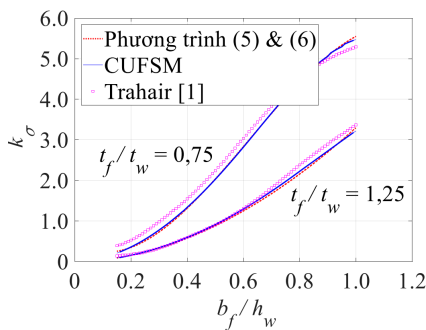
Căn cứ vào kết quả trong Hình 3, đường cong đối với tỷ số $t_f/t_w = 0,75$ có hình dạng giống với đường cong của tỷ số $t_f/t_w = 1,0$. Do đó, phương trình đề xuất cho tỷ số $t_f/t_w = 0,75$ có dạng giống với phương trình (2). Bên cạnh đó, tất cả các tỷ số còn lại thì công thức đề xuất có dạng hàm số mũ như sau:

$$k_{\sigma} = a \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^b \quad (4)$$

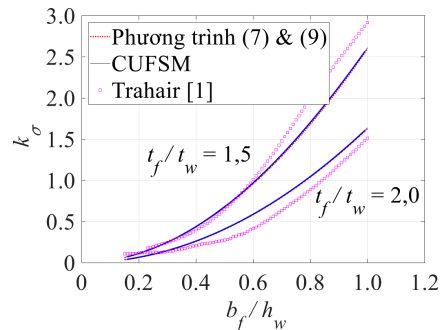
Bảng 3. Phương trình đề xuất để tính toán hệ số ổn định

Tỷ số	Phương trình đề xuất tính toán hệ số ổn định	
$t_f/t_w = 0,75$	$k_{\sigma} = -10,5 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^3 + 19,6 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^2 - 4 \left(\frac{b_f}{h_w} \right) + 0,45$	(5)
$t_f/t_w = 1,25$	$k_{\sigma} = 3,3 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^{1,9}$	(6)
$t_f/t_w = 1,5$	$k_{\sigma} = 2,6 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^{1,95}$	(7)
$t_f/t_w = 1,75$	$k_{\sigma} = 2,1 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^2$	(8)
$t_f/t_w = 2,0$	$k_{\sigma} = 1,63 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^2$	(9)
$t_f/t_w = 2,25$	$k_{\sigma} = 1,3 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^2$	(10)
$t_f/t_w = 2,5$	$k_{\sigma} = 1,1 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^2$	(11)
$t_f/t_w = 2,75$	$k_{\sigma} = 0,9 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^2$	(12)
$t_f/t_w = 3,0$	$k_{\sigma} = 0,76 \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^2$	(13)

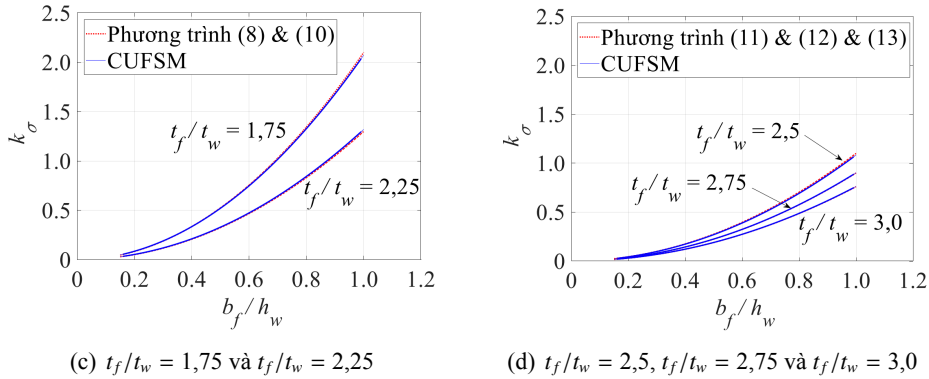
Kết quả được trình bày trong Hình 4 cho thấy rằng các đường cong được tính toán từ công thức đề xuất thì tiệm cận với các kết quả của chương trình CUFSM đối với tất cả các thanh thép chữ nhật rỗng có chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng khác nhau. Trái lại, kết quả của Trahair [1] thì có sự sai lệch rõ ràng trong Hình 4(a) và (b).



(a) $t_f/t_w = 0,75$ và $t_f/t_w = 1,25$



(b) $t_f/t_w = 1,5$ và $t_f/t_w = 2,0$



Hình 4. Ảnh hưởng của tỷ số bề rộng với chiều cao lên hệ số ổn định đối với thanh thép chữ nhật có chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng khác nhau

Từ Bảng 4 cho thấy kết quả tính toán dựa vào công thức đề xuất có sự tương đồng với kết quả của chương trình CUFSM khi có giá trị trung bình xấp xỉ bằng 1,0 và hệ số biến thiên bé hơn 0,04 cho tất cả các trường hợp được trình bày trong Bảng 4. Trái lại, kết quả của Trahair [1] thì có hệ số biến thiên lớn đối với tất cả các tỷ số và đều lớn hơn 0,090, đáng chú ý là giá trị CoV đối với tỷ số $t_f/t_w = 2,0$ lên đến 0,428. Ngoài ra, hệ số xác định từ các công thức đề xuất cũng lớn hơn 0,9980 cho tất cả các tỷ số.

Bảng 4. So sánh kết quả theo các phương pháp tính toán

Tỷ số	Công thức đề xuất			Trahair [1]		
	μ	CoV	R^2	μ	CoV	R^2
$t_f/t_w = 0,75$	0,994	0,039	0,9998	1,138	0,157	0,9895
$t_f/t_w = 1,25$	0,977	0,015	0,9983	1,045	0,090	0,9907
$t_f/t_w = 1,5$	0,989	0,002	0,9997	1,059	0,091	0,9349
$t_f/t_w = 1,75$	1,003	0,013	0,9996	-	-	-
$t_f/t_w = 2,0$	0,990	0,009	0,9999	0,949	0,428	0,9295
$t_f/t_w = 2,25$	0,982	0,006	0,9994	-	-	-
$t_f/t_w = 2,5$	1,014	0,004	0,9992	-	-	-
$t_f/t_w = 2,75$	0,996	0,003	1,0000	-	-	-
$t_f/t_w = 3,0$	0,997	0,002	1,0000	-	-	-

Để xác định hệ số ổn định của thanh thép chữ nhật rộng đối với tỷ số t_f/t_w không nằm trong Bảng 4 có thể dùng phương pháp nội suy để xác định.

3. Ví dụ tính toán

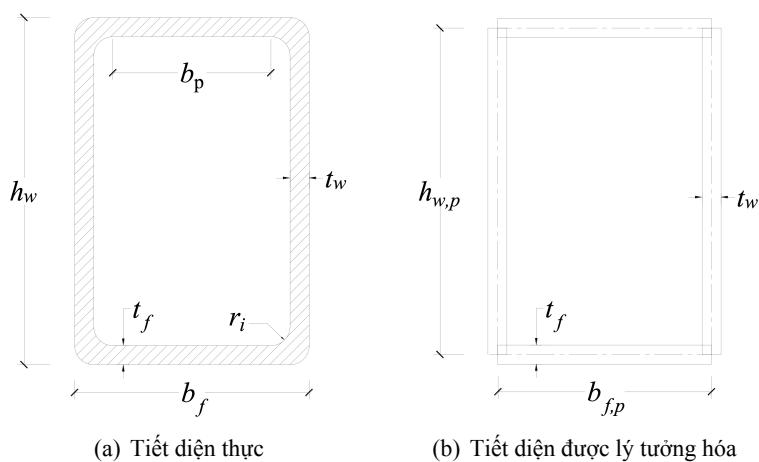
Phần này trình bày các ví dụ tính toán ứng suất tối hạn cục bộ cho các thanh thép chữ nhật tạo hình nguội và tổ hợp hàn có hai đầu liên kết khớp chịu nén đúng tâm. Kích thước hình học của các thanh thép chữ nhật được trình bày trong Bảng 5 và kết quả tính toán được thể hiện trong Bảng 6. Ngoài ra, để đánh giá độ tin cậy của các công thức đề xuất, và cũng thể hiện được những công thức được thiết lập mang tính tổng quát không phụ thuộc vào các kết quả cụ thể của chương trình CUFSM, kết quả tính toán cũng được so sánh với kết quả của chương trình THIN-WALL [28].

Xét các thanh thép chữ nhật tạo hình nguội (R1-1 và R1-2) và tổ hợp hàn (R2-1 đến R10-2) có các thông số hình học được trình bày trong Bảng 5, vật liệu thép có mô đun đàn hồi $E = 210000$ (MPa)

Bảng 5. Kích thước hình học

Tên cấu kiện	b_f (mm)	h_w (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	r_i (mm)
R1-1	50	100	2,0	2,0	2,0
R1-2	100	100	2,0	2,0	2,0
R2-1	500	1000	15	20	-
R2-2	1000	1000	15	20	-
R3-1	500	1000	25	20	-
R3-2	1000	1000	25	20	-
R4-1	500	1000	30	20	-
R4-2	1000	1000	30	20	-
R5-1	500	1000	17,5	10	-
R5-2	1000	1000	17,5	10	-
R6-1	500	1000	20	10	-
R6-2	1000	1000	20	10	-
R7-1	500	1000	22,5	10	-
R7-2	1000	1000	22,5	10	-
R8-1	500	1000	25	10	-
R8-2	1000	1000	25	10	-
R9-1	500	1000	27,5	10	-
R9-2	1000	1000	27,5	10	-
R10-1	500	1000	30	10	-
R10-2	1000	1000	30	10	-

và hệ số Poisson $\nu = 0,3$. Để đơn giản hóa trong việc tính toán đối với thanh thép chữ nhật thành mỏng tạo hình nguội, trong tiêu chuẩn [29] đã bỏ qua ảnh hưởng của các góc cong khi thỏa mãn điều kiện về chiều dày và bề rộng cấu kiện như Hình 5.



Hình 5. Mặt cắt ngang của thép hộp chữ nhật tạo hình nguội

Thanh thép chữ nhật R1-1 có các đặc trưng hình học như sau: $b_f = 50$ (mm), $b_{f,p} = 48$ (mm), $h_w = 100$ (mm), $h_{w,p} = 98$ (mm), $t_f = t_w = 2,0$ (mm), $r_i = 2,0$ (mm), do đây là thanh thép tạo hình nguội nên cần kiểm tra điều kiện bỏ qua ảnh hưởng của các góc cong theo tiêu chuẩn Châu Âu [29]

như sau:

$$\begin{cases} r_i \leq 5t \\ r_i \leq 0,10b_p \end{cases} \quad (14)$$

trong đó r_i là bán kính trong, t là bề dày, b_p là bề rộng phẳng bản cánh.

Như vậy thanh thép R1-1 thỏa mãn điều kiện bỏ qua ảnh hưởng của các góc cong.

$$\text{Công thức (3): } k_\sigma = -4,8 \left(\frac{b_{f,p}}{h_{w,p}} \right)^3 + 10,5 \left(\frac{b_{f,p}}{h_{w,p}} \right)^2 - 1,95 \left(\frac{b_{f,p}}{h_{w,p}} \right) + 0,25 = 1,25.$$

$$\text{Công thức (1): } \sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_f}{b_{f,p}} \right)^2 = 411,8 \text{ (MPa)}.$$

Thanh thép chữ nhật tổ hợp hàn R2-1 có các đặc trưng hình học như sau: $b_f = 500$ (mm), $b_{f,p} = 480$ (mm), $h_w = 1000$ (mm), $h_{w,p} = 985$ (mm), $t_f = 15$ (mm) và $t_w = 20$ (mm).

$$\text{Công thức (5): } k_\sigma = -10,5 \left(\frac{b_{f,p}}{h_{w,p}} \right)^3 + 19,5 \left(\frac{b_{f,p}}{h_{w,p}} \right)^2 - 4 \left(\frac{b_{f,p}}{h_{w,p}} \right) + 0,45 = 1,916.$$

$$\text{Công thức (1): } \sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_f}{b_{f,p}} \right)^2 = 355,2 \text{ (MPa)}.$$

Kết quả tính toán ứng suất tối hạn cục bộ của những thanh thép hộp chữ nhật rỗng được thể hiện trong Bảng 5 thì được tính toán tương tự như trên và được trình bày trong Bảng 6.

Bảng 6. Kết quả tính toán

Các mẫu	$\sigma_{cr,CUF\text{SM}}$ (MPa)	$\sigma_{cr,THIN-WALL}$ (MPa)	σ_{cr} (MPa)	$\sigma_{cr,Seif\text{ và } Schafer}$ (MPa)	$\sigma_{cr,Trahair}$ (MPa)
R1-1	408,7	408,7	411,8 (-0,8%)	391,7 (4,2%)	405,8 (0,7%)
R1-2	316,3	316,3	316,2 (0,0%)	316,2 (0,0%)	314,5 (0,5%)
R2-1	361,7	361,7	355,2 (1,8%)	-	402,2 (-11,2%)
R2-2	238,6	238,6	241,5 (-1,2%)	-	234,0 (1,9%)
R3-1	458,0	458,0	442,0 (3,5%)	-	448,1 (2,2%)
R3-2	400,8	400,8	411,6 (-2,7%)	-	416,4 (-3,9%)
R4-1	500,8	500,8	488,9 (2,4%)	-	481,6 (3,8%)
R4-2	472,4	472,4	471,8 (0,1%)	-	518,6 (-9,8%)
R5-1	128,3	128,3	126,5 (1,5%)	-	-
R5-2	125,1	125,2	126,5 (-1,0%)	-	-
R6-1	132,3	132,3	128,9 (2,6%)	-	87,5 (33,9%)
R6-2	132,1	132,1	128,9 (2,5%)	-	117,3 (11,2%)
R7-1	134,7	134,7	130,7 (2,9%)	-	-
R7-2	135,0	135,0	130,7 (3,2%)	-	-
R8-1	136,5	136,5	137,3 (-0,5%)	-	-
R8-2	136,8	136,8	137,3 (-0,3%)	-	-
R9-1	138,0	138,0	136,6 (1,0%)	-	-
R9-2	138,2	138,3	136,6 (1,2%)	-	-
R10-1	139,3	139,3	138,0 (0,9%)	-	-
R10-2	139,5	139,5	138,0 (1,1%)	-	-

Căn cứ vào kết quả được trình bày trong Bảng 6, ứng suất tối hạn cục bộ được xác định dựa vào những công thức đề xuất thì có sự tương đồng với kết quả của chương trình CUFSM và chương trình

THIN-WALL, khi sai số cho tất cả các trường hợp đều dưới 4,0%. Trong khi đó công thức đề xuất của Seif và Schafer [6] thì có sai số là 4,2% cho tỷ số $t_f/t_w = 1,0$. Bên cạnh đó, kết quả tính toán dựa trên biểu đồ của Trahair [1] thì có sai số rất lớn lên đến khoảng 34% cho tỷ số $t_f/t_w = 2,0$ đối với chương trình CUFSM. Do đó, các công thức đề xuất xác định hệ số ổn định cũng như xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho thanh thép chữ nhật chịu nén đều có độ tin cậy cao.

4. Kết luận

Bài báo sử dụng phương pháp dải hữu hạn bán giải tích trong chương trình CUFSM để xác định ứng suất tới hạn cục bộ của thanh thép hộp chữ nhật rỗng chịu nén đúng tâm. Kết quả phân tích cho thấy ứng suất tới hạn cục bộ không phụ thuộc vào chiều dài thanh cũng như tỷ số L/h , mà phụ thuộc vào tỷ số chiều dày với bề rộng và tỷ số bề rộng với chiều cao. Do đó các công thức tính toán hệ số ổn định cũng như là ứng suất tới hạn cục bộ cho thanh thép chữ nhật rỗng được đề xuất khi kể đến sự tương tác giữa bản cánh và bản bụng, các công thức được thiết lập với tỷ số bề dày bản cánh với bề dày bản bụng thay đổi từ 0,75 đến 3,0.

Các công thức đề xuất đảm bảo độ tin cậy khi so sánh với một số nghiên cứu đã được công bố, đồng thời kết quả thu được có hệ số biến thiên rất thấp $CoV \leq 4,0\%$ và hệ số xác định rất cao $R^2 > 0,9980$ khi so sánh với kết quả của phương pháp số.

Tài liệu tham khảo

- [1] Trahair, N. S., Bradford, M. A., Nethercot, D. A., Gardner, L. (2008). *The behaviour and design of steel structures to EC3*. Taylor & Francis, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon.
- [2] Cheung, Y. K. (1976). *Finite strip method in structural analysis*. Pergamon Press, England.
- [3] Schafer, B. W., Ádany, S. (2006). Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. *Proceedings of the Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Orlando, Florida, 39–54.
- [4] Bùi, H. C. (2012). Phân tích ổn định đàn hồi tấm và thanh thành mỏng bằng phương pháp dải hữu hạn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 6(1):12–23.
- [5] Bui, H. C. (2009). Buckling analysis of thin-walled sections under general loading conditions. *Thin-Walled Structures*, 47(6–7):730–739.
- [6] Seif, M., Schafer, B. W. (2010). Local buckling of structural steel shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(10):1232–1247.
- [7] Vieira, L., Gonçalves, R., Camotim, D. (2018). On the local buckling of RHS members under axial force and biaxial bending. *Thin-Walled Structures*, 129:10–19.
- [8] Kuwamura, H. (2003). Local buckling of thin-walled stainless steel members. *Steel Structures*, 3(3): 191–201.
- [9] Shi, G., Zhou, W., Bai, Y., Lin, C. (2014). Local buckling of 460MPa high strength steel welded section stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 100:60–70.
- [10] Schillo, N., Feldmann, M. (2015). Local buckling behaviour of welded box sections made of high strength steel: Comparing experiments with EC3 and general method. *Steel Construction*, 8(3): 179–186.
- [11] Yoo, J.-H., Kim, J.-W., Yang, J.-G., Kang, J.-W., Lee, M.-J. (2013). Local buckling in the stub columns fabricated with HSA800 of high performance steel. *International Journal of Steel Structures*, 13(3): 445–458.
- [12] Shi, G., Zhou, W., Lin, C. (2015). Experimental investigation on the local buckling behavior of 960 MPa high strength steel welded section stub columns. *Advances in Structural Engineering*, 18(3):423–437.
- [13] Yang, K.-C., Chen, S.-J., Lin, C.-C., Lee, H.-H. (2005). Experimental study on local buckling of fire-resisting steel columns under fire load. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(4):553–565.
- [14] Gunalan, S., Bandula Heva, Y., Mahendran, M. (2015). Local buckling studies of cold-formed steel compression members at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 108:31–45.

- [15] Wang, W., Li, X., Al-azzani, H. (2021). [Experimental study on local buckling of high-strength Q960 steel columns at elevated temperatures](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 183:106716.
- [16] Rokilan, M., Mahendran, M. (2021). Design of cold-formed steel columns subject to local buckling at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 179:106539.
- [17] Tang, Y., Yau, Y. k., Wilkinson, T., Tahmasebinia, F. (2019). [Local buckling behaviour of rectangular hollow section under combined bending and shear](#). *Proceedings of the 17th International Symposium on Tubular Structures(ISTS17)*, Research Publishing Services, 512–519.
- [18] Qiao, P., Shan, L. (2005). [Explicit local buckling analysis and design of fiber–reinforced plastic composite structural shapes](#). *Composite Structures*, 70(4):468–483.
- [19] Uy, B., Bradford, M. A. (1996). [Elastic local buckling of steel plates in composite steel-concrete members](#). *Engineering Structures*, 18(3):193–200.
- [20] Bock, M., Real, E. (2015). [Effective width equations accounting for element interaction for cold-formed stainless steel square and rectangular hollow sections](#). *Structures*, 2:81–90.
- [21] Gardner, L., Fieber, A., Macorini, L. (2019). [Formulae for calculating elastic local buckling stresses of full structural cross-sections](#). *Structures*, 17:2–20.
- [22] Cuong, B. H. (2021). [Local buckling of thin-walled circular hollow section under uniform bending](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(4):88–98.
- [23] Nguyễn, Đ. H. (2017). Vấn đề ổn định cục bộ bản bụng cột thép tiết diện chữ I tổ hợp chịu nén lệch tâm theo TCVN 5575:2012. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 11:94–99.
- [24] Đặng, H. M., Nguyễn, H. P., Nguyễn, V. Đ., Phùng, V. B. (2017). Phân tích ổn định của thanh mỏng dưới tác dụng của hệ tải trọng và điều kiện biên phức tạp. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 25.
- [25] Trần, T. T. V., Hoàng, V. B. (2017). Tính ổn định cột có độ cứng tiết diện thay đổi bằng phương pháp sai phân hữu hạn. *Tạp chí Kiến trúc - Xây dựng*, 27:23–26.
- [26] Eurocode 3 (2006). *Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements*. Brussels, Belgium.
- [27] AISI S100 - 16 (2016). *North American specifications for the design of cold-formed steel structural members*. Chicago, IL, USAs.
- [28] Papangelis, J. P., Hancock, G. J. (1995). [Computer analysis of thin-walled structural members](#). *Computers & Structures*, 56(1):157–176.
- [29] Eurocode 3 (2006). *Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. Brussels, Belgium.