

Công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ của thép hộp chữ nhật chịu uốn đều

Formulas determining the local critical stress of rectangular hollow sections under pure bending

Chiêm Đặng Tứ Quốc⁽¹⁾, Bùi Hùng Cường⁽²⁾

Tóm tắt

Bài báo đề xuất các công thức xác định ứng suất tới hạn gây mất ổn định cục bộ của thanh thép hộp chữ nhật rỗng chịu uốn thuần túy kể đến sự tương tác giữa bản cánh và bản bụng khi các tỷ số bề rộng với chiều cao tiết diện, chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng thay đổi. Ứng suất tới hạn cục bộ được xác định bằng phương pháp Dải hữu hạn bán giải tích trong chương trình CUFSM. Dựa vào kết quả thu được, từ đó đưa ra đường cong dự đoán và đề xuất phương pháp xác định hệ số ổn định đối với thanh thép chữ nhật rỗng chịu uốn đều. Độ tin cậy của các công thức đề xuất được đảm bảo khi có hệ số thay đổi thấp và hệ số xác định cao khi so sánh với kết quả của phương pháp số.

Từ khóa: Mất ổn định cục bộ, Tương tác bản cánh và bản bụng, Ứng suất tới hạn cục bộ, Tiết diện chữ nhật rỗng

Abstract

The paper proposes formulas for determining the critical stress that causes local instability in hollow rectangular steel sections subjected to pure bending, taking into account the interaction between the flange and the web as the ratios of section width to height, flange thickness, and web thickness vary. The local critical stress is determined using the Semi-Analytical Finite Strip Method in the CUFSM program. Based on the obtained results, prediction curves and methods for determining the stability coefficient for hollow rectangular steel sections under uniform bending are provided. The reliability of the proposed formulas is validated when the variation coefficient is low and the determination coefficient is high compared with results from numerical methods.

Key words: Local buckling, flange-web interaction, Local critical stress, Rectangular hollow section

1. Đặt vấn đề

Thanh thép hộp chữ nhật rỗng được sử dụng nhiều trong các công trình xây dựng như dầm thép hộp, xà gồ, thanh dàn thép, cột ống thép nhồi bê tông, trụ cầu... Một trong những điều kiện đảm bảo sức chịu tải cho thanh thép hộp chữ nhật là ổn định cục bộ. Khi bản bụng hoặc bản cánh của thanh thép bị mất ổn định cục bộ sẽ kéo theo sự tương tác giữa các bản này. Một số tác giả đã nghiên cứu ổn định về cấu kiện chịu uốn [1–4]. Các tiêu chuẩn kết cấu thép [5,6] đưa ra công thức tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho thanh thép hộp chữ nhật rỗng thiên về an toàn khi bỏ qua sự tương tác giữa bản cánh và bản bụng (giả thiết vị trí giao nhau các bản này là liên kết khớp). Gần đây, Seif và Schafer [2] đã đề xuất các phương trình tính toán hệ số ổn định cho các cấu kiện có tiết diện khác nhau chịu nén dọc trục và chịu uốn khi kể đến sự tương tác này. Vieira và cs. [1] trình bày các công thức để xác định hệ số ổn định và các dạng mất ổn định cho thanh thép hộp chữ nhật rỗng tạo hình nguội chịu nén dọc trục và chịu uốn có kể đến sự tương tác giữa các tấm trong cấu kiện dựa vào phương pháp Dầm Tổng Quát.

Công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho thanh thép hộp chữ nhật chịu uốn thuần túy kể đến sự tương tác giữa các tấm trong tiết diện được sử dụng bởi Trahair [7] được trình bày như sau:

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

trong đó σ_{cr} là ứng suất tới hạn cục bộ, k_{σ} là hệ số ổn định, E là mô đun đàn hồi của vật liệu thép, ν là hệ số Poisson, b_f là bề rộng bản cánh và t_f là chiều dày bản cánh. Trong công thức có thể thấy ứng suất tới hạn cục bộ phụ thuộc vào tỷ số t_f/b_f và hệ số ổn định k_{σ} . Cách xác định hệ số ổn định cho thanh thép hộp chữ nhật rỗng chịu uốn đều được Trahair [7] sử dụng là phương pháp tra biểu đồ. Hệ số ổn định bị ảnh hưởng bởi tỷ số h_w/b_f (được trình bày trong phần sau). Cách xác định chính xác hệ số ổn định đó là dựa vào các phần mềm mô phỏng số (Abaqus, Ansys,...) hoặc sử dụng các phương pháp phần tử hữu hạn hoặc phương pháp dải hữu hạn bán giải tích trong chương trình CUFSM. Điều này rất hữu ích cho những kỹ sư thiết kế trong việc thiết lập các công thức tính toán trong excel hoặc các ngôn ngữ lập trình, và rất thuận tiện cho việc chọn mặt cắt tối ưu trong lúc tính toán.

2. Đề xuất công thức tính toán hệ số ổn định

Trong mục này, sử dụng chương trình CUFSM để xác định ứng suất gây mất ổn định cục bộ tới hạn cho thanh thép hộp chữ nhật rỗng chịu uốn đều, sau đó dùng phương pháp nghiên cứu tham số và xử lý xác suất thống kê để đề xuất các phương trình xấp xỉ xác định hệ số ổn định cho những thanh thép này.

2.1. Bản cánh và bản bụng bằng nhau

Thực hiện phân tích ổn định đối với ba nhóm mẫu khảo sát được trình bày trong Bảng 1 bằng chương trình CUFSM và đường cong quan hệ $\sigma - L/h$ được trình bày trong Hình 1. Đường cong ứng suất ổn định – chiều dài thanh do Hancock [8] tìm ra, nhờ đó dễ dàng xác định được ứng suất tới hạn cục bộ của thanh thép hộp chữ nhật thông qua các điểm cực tiểu trên đường cong, và đường cong này còn được biết đến là “đường cong chữ ký” (signature curve).

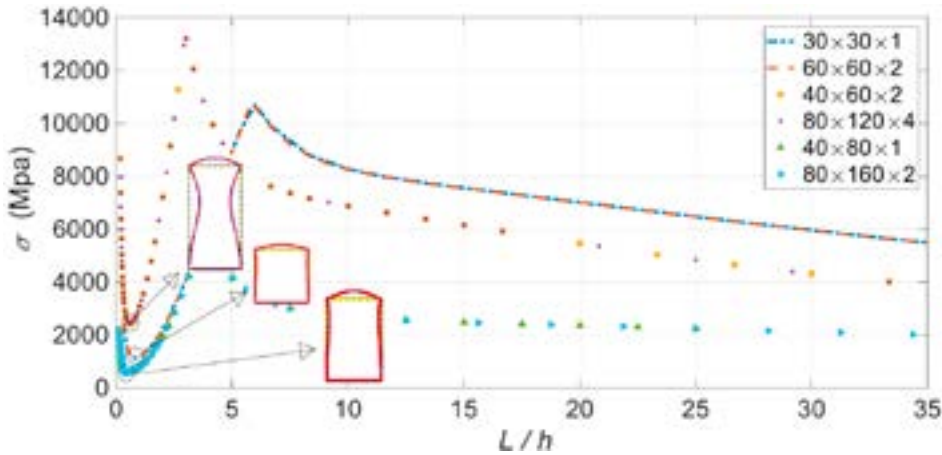
⁽¹⁾ThS, tuquoc4171@gmail.com

⁽²⁾PGS.TS, Giảng viên cao cấp, khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, ĐT: 0948766297; Email: cuongbh@huce.edu.vn

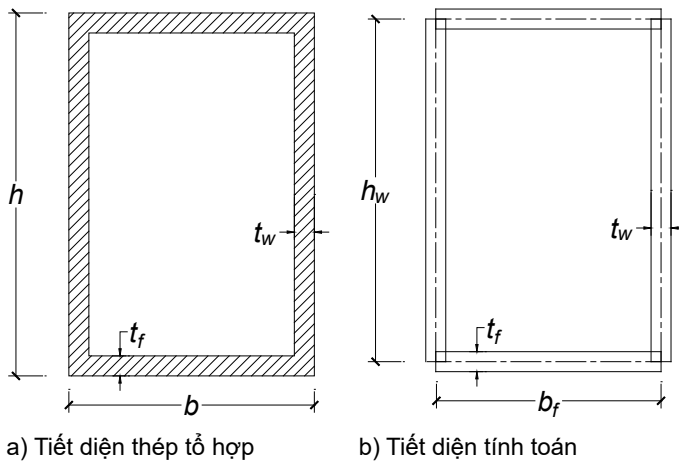
Ngày nhận bài: 30/9/2024

Ngày sửa bài: 04/10/2024

Ngày duyệt đăng: 07/10/2024



Hình 1. Kết quả phân tích mối quan hệ $\sigma - L/h$ trong chương trình CUFSM



Hình 2. Mặt cắt ngang thép hộp chữ nhật rỗng

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

		b_f (mm)	h_w (mm)	$t_f(t_w)$ (mm)
Nhóm 1	Mẫu 1	30	30	1,0
	Mẫu 2	60	60	2,0
Nhóm 2	Mẫu 1	40	60	2,0
	Mẫu 2	80	120	4,0
Nhóm 3	Mẫu 1	40	80	1,0
	Mẫu 2	80	160	2,0

Kết quả khảo sát được trình bày trong Hình 1 cho thấy ứng suất tới hạn cục bộ không bị ảnh hưởng bởi tỷ số L/h mà phụ thuộc vào tỷ số t_f/b_f và hệ số ổn định (được trình bày trong công thức (1)). Thanh thép chữ nhật rỗng có giá trị ứng suất tới hạn cục bộ (điểm cực tiểu trên đường cong $\sigma - L/h$ trong Hình 1) bằng nhau khi có cùng tỷ số h_w/b_f và t_f/t_w tại điểm giá trị L/h như nhau. Như vậy, việc xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho thanh thép hộp chữ nhật chịu uốn đều có thể bỏ qua ảnh hưởng của tỷ số L/h .

Công thức xác định hệ số ổn định cho thanh thép chữ nhật rỗng tạo hình nguội hai đầu liên kết khớp chịu uốn đều được đề xuất bởi Seif và Schafer [2] được trình bày như sau:

$$\frac{1}{k_h} = \frac{0,19}{(h_w/b_f)^3} + 0,03 \quad (2)$$

$$k_b = k_h \left(\frac{b_f}{h_w} \right)^2 \quad (3)$$

trong đó k_h là hệ số ổn định của bản bụng, k_b là hệ số ổn định bản cánh, h_w là chiều cao tiết diện, b_f là bề rộng cấu kiện.

Trong công thức (1) chỉ đề cập đến tỷ số t/b , nhưng ứng suất ổn định không những bị ảnh hưởng bởi tỷ số t/b mà còn tỷ số h_w/b_f (được thể hiện trong Hình 3 và Hình 4). Vì thế, khi đề xuất phương trình xác định hệ số ổn định k_σ thì phải xem xét tỷ số này. Phương trình đề xuất xác định hệ số ổn định có dạng như sau:

$$k_\sigma = -a_1 \left(\frac{h_w}{b_f} \right)^3 + b_1 \left(\frac{h_w}{b_f} \right)^2 - c_1 \left(\frac{h_w}{b_f} \right) + d_1$$

khi $1,0 \leq h_w/b_f < 2,5$

$$k_\sigma = a_2 e^{-b_2(h_w/b_f)} \quad (4)$$

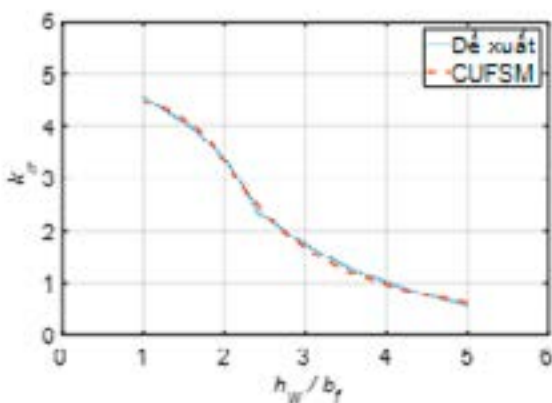
khi $2,5 \leq h_w/b_f \leq 5,0$

trong đó $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, d_1$ là các hệ số cần tìm, $e=2,718$. Do ứng suất tới hạn cục bộ không bị ảnh hưởng bởi tỷ số L/h , vì thế khi phân tích ổn định đối với thanh thép hộp rỗng chịu uốn thuần túy chỉ phân tích sự thay đổi của kích thước hình học mặt cắt ngang như thay đổi tỷ số chiều cao với bề rộng tiết diện và tỷ số chiều dày bản cánh với chiều dày bản bụng. Phạm vi nghiên cứu sẽ được giới hạn như sau: tỷ số h_w/b_f của thanh thép hộp chữ nhật rỗng nằm trong khoảng $1,0 \leq h_w/b_f \leq 5,0$ với bước nhảy là 0,1.

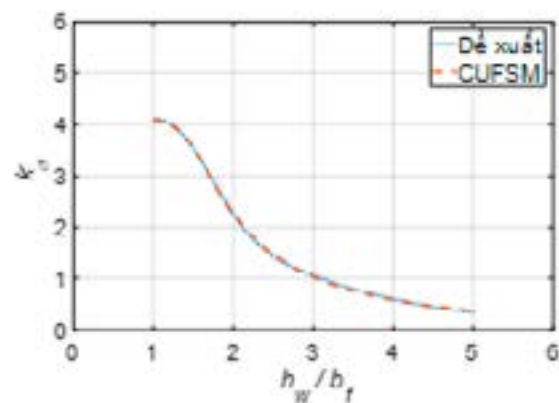
Dùng chương trình CUFSM để xác định ứng suất tới hạn cục bộ, sau đó dùng phương trình để xác định ngược lại hệ số ổn định. Từ các kết quả thu được, đưa ra đường cong dự đoán phù hợp cho hệ số ổn định bằng phương pháp bình phương bé nhất. Vì thế, các hệ số trong công thức được xác định lần lượt như sau $a_1=0,53$; $b_1=2,15$; $c_1=3,2$; $d_1=6,9$; $a_2=13,15$; $b_2=0,482$ tương ứng với hệ số biến thiên CoV là thấp nhất với 0,018 và hệ số xác định R^2 là cao nhất với 0,9990. Công thức đề xuất xác định hệ số ổn định cho thanh thép hộp chữ nhật rỗng chịu uốn đều với tỷ số $t_f/t_w=1,0$ được viết lại như sau:

Bảng 3. Công thức đề xuất xác định hệ số ổn định

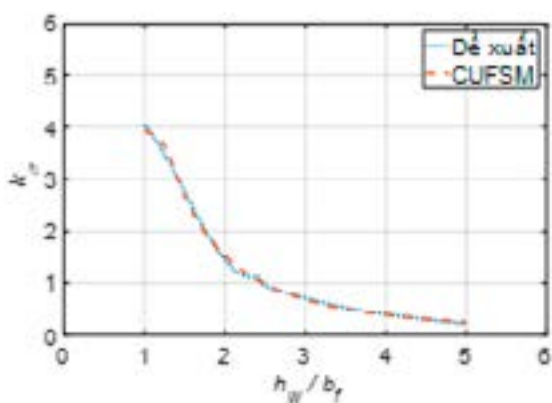
Tỷ số	Công thức đề xuất
$t_f / t_w = 1,5$	$k_\sigma = -0,542 \left(\frac{h_w}{b_f}\right)^3 + 2 \left(\frac{h_w}{b_f}\right)^2 - 3,4 \left(\frac{h_w}{b_f}\right) + 6,5$ khi $1,0 \leq h_w / b_f < 2,5$ $k_\sigma = 8,75e^{-0,539(h_w/b_f)}$ khi $2,5 \leq h_w / b_f \leq 5,0$
$t_f / t_w = 2,0$	$k_\sigma = 1,7 \left(\frac{h_w}{b_f}\right)^3 - 9,05 \left(\frac{h_w}{b_f}\right)^2 + 13,4 \left(\frac{h_w}{b_f}\right) - 1,95$ khi $1,0 \leq h_w / b_f < 2,5$ $k_\sigma = 5,8e^{-0,567(h_w/b_f)}$ khi $2,5 \leq h_w / b_f \leq 5,0$
$t_f / t_w = 2,5$	$k_\sigma = 1,48 \left(\frac{h_w}{b_f}\right)^3 - 6,7 \left(\frac{h_w}{b_f}\right)^2 + 7,13 \left(\frac{h_w}{b_f}\right) + 2,14$ khi $1,0 \leq h_w / b_f < 2,5$ $k_\sigma = 4e^{-0,578(h_w/b_f)}$ khi $2,5 \leq h_w / b_f \leq 5,0$
$t_f / t_w = 3,0$	$k_\sigma = -1,69 \left(\frac{h_w}{b_f}\right)^3 + 10,7 \left(\frac{h_w}{b_f}\right)^2 - 23,4 \left(\frac{h_w}{b_f}\right) + 18,6$ khi $1,0 \leq h_w / b_f < 2,5$ $k_\sigma = 2,8e^{-0,577(h_w/b_f)}$ khi $2,5 \leq h_w / b_f \leq 5,0$



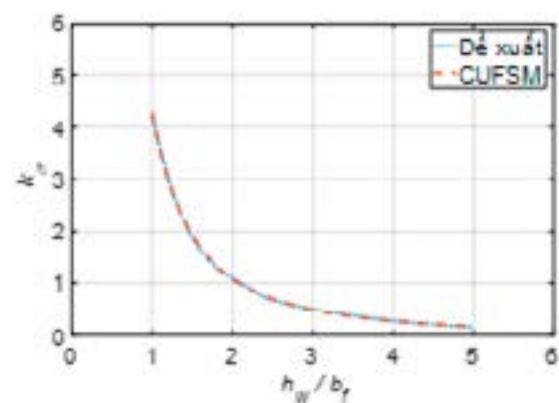
a) $t_f / t_w = 1,5$



b) $t_f / t_w = 2,0$



c) $t_f / t_w = 3,0$



d) $t_f / t_w = 3,0$

Hình 5. So sánh kết quả giữa công thức đề xuất và chương trình CUFSM

bình xấp xỉ bằng 1,0 và hệ số biến thiên rất nhỏ, cụ thể là tất cả các tỷ số trong Bảng 4 đều nhỏ hơn 0,05 và hệ số xác định cao khi tất cả các tỷ số đều có giá trị lớn hơn 0,9970.

Để xác định hệ số ổn định cho thanh thép hộp chữ nhật rỗng chịu uốn thuần túy khi tỷ số t_f/t_w không nằm trong Bảng 4 có thể dùng phương pháp nội suy để xác định k_σ .

3. Ví dụ tính toán

Phần này trình bày những ví dụ tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho thanh thép hộp chữ nhật tổ hợp hàn hai đầu liên kết khớp chịu uốn đều, các đặc trưng hình học được trình bày trong Bảng 5. Kết quả từ công thức đề xuất được so sánh với kết quả của chương trình CUFSM và kết quả của Seif và Schafer [2]. Ngoài ra, để tăng độ tin cậy của công thức đề xuất thì kết quả thu được từ công thức đề xuất cũng được so sánh với kết quả của chương trình THIN-WALL [9], chương trình này cũng được thiết lập dựa trên phương pháp dải hữu hạn bán giải tích.

Bảng 5. Kích thước hình học

Tên cấu kiện	h (mm)	h (mm)	t_w (mm)	t_w (mm)
R1-1	400	400	10	10
R1-2	400	1000	10	10
R2-1	400	600	15	10
R2-2	400	1200	15	10
R3-1	400	600	20	10
R3-2	400	1200	20	10
R4-1	400	600	25	10
R4-2	400	1200	25	10
R5-1	400	600	30	10
R5-2	400	1200	30	10

Từ các số liệu được nêu trong Bảng 5, xác định ứng suất gây mất ổn định tới hạn cho các thanh thép hộp chữ nhật rỗng liên kết hai đầu khớp chịu uốn đều, biết mô đun đàn hồi là $E = 210000$ (MPa) và hệ số Poisson $\nu = 0,3$.

Xét cấu kiện R1-1, các đặc trưng hình học ban đầu:

Bề rộng: $b_f = b - t_w = 400 - 10 = 390$ (mm);

Chiều cao: $h_w = h - t_f = 400 - 10 = 390$ (mm);

Chiều dày bản cánh: $t_f = 10$ (mm)

Chiều dày bản bụng: $t_w = 10$ (mm)

Thanh thép có tỷ số $h_w / b_f = 1,0$, hệ số ổn định được xác định như sau:

Phương trình (5):

$$k_\sigma = -0,53 \left(\frac{h_w}{b_f} \right)^3 + 2,15 \left(\frac{h_w}{b_f} \right)^2 - 3,2 \left(\frac{h_w}{b_f} \right) + 6,9 = 5,32$$

Ứng suất tới hạn cục bộ:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_f}{b_f} \right)^2 = 5,32 \times \frac{\pi^2 \times 210000}{12(1-0,3^2)} \left(\frac{10}{390} \right)^2 = 663,9 \text{ (MPa)}$$

Làm tương tự cho các mẫu còn lại trong Bảng 5, kết quả tính toán được thống kê trong Bảng 6.

Kết quả được trình bày trong Bảng 6 chỉ ra rằng khi tính toán ứng suất ổn định tới hạn cho thanh thép hộp chữ nhật rỗng chịu uốn đều theo công thức đề xuất rất sát với kết quả của chương trình CUFSM, và sai lệch của các kết quả khi tính theo các công thức đề xuất so với kết quả của chương trình CUFSM được thể hiện trong các dấu ngoặc đều dưới 5%, trong khi đó sai lệch khi tính theo công thức của Seif và Schafer [2] lên tới 19,2% đối với cấu kiện R1-1. Vì thế, các công thức đề xuất xác định hệ số ổn định cho thanh thép chữ nhật chịu uốn đều cũng như ứng suất tới hạn cục bộ đều có độ tin cậy cao.

4. Kết luận

Bài báo đã sử dụng phương pháp Dải hữu hạn bán giải tích trong chương trình CUFSM để đề xuất các công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ của thanh thép hộp chữ nhật chịu uốn thuần túy. Kết quả tính toán cho thấy ứng suất ổn định của thanh thép chữ nhật rỗng chịu uốn đều không phụ thuộc vào tỷ số chiều dài với chiều cao cấu kiện khi thanh thép này có cùng tỷ số h_w/b_f và t_f/t_w . Do đó, các công thức đề xuất tính toán ứng suất ổn định tới hạn đã kể đến sự tương tác giữa bản cánh và bản bụng. Các công thức được thiết lập khi tỷ số giữa bề dày bản cánh và chiều dày bản

Bảng 6. Kết quả tính toán ứng suất ổn định tới hạn

Tên cấu kiện	$\sigma_{cr, CUFSM}$ (MPa)	$\sigma_{cr, THIN-WALL}$ (MPa)	$\sigma_{cr, Seif}$ (MPa)	$\sigma_{cr, Seif}$ (MPa)
R1-1	667,3	667,3	663,9 (0,5%)	539,2 (-19,2%)
R1-2	501,1	501,2	482,7 (3,7%)	450,2 (-10,2%)
R2-1	1161,4	1161,7	1142,9 (1,6%)	-
R2-2	458,8	458,9	477,6 (-4,1%)	-
R3-1	1789,9	1790,3	1773,9 (0,9%)	-
R3-2	502,9	503,2	520,7 (-3,5%)	-
R4-1	2158,3	2160,1	2208,2 (2,3%)	-
R4-2	525,7	526,1	546,8 (-4,0%)	-
R5-1	2266,5	2269,7	2339,7 (3,2%)	-
R5-2	539,4	539,7	556,9 (-3,3%)	-

bụng t_f/t_w thay đổi trong phạm vi từ 1,0 đến 3,0 và tỷ số giữa chiều cao với bề rộng tiết diện h_w/b_f thay đổi từ 1,0 đến 5,0.

Các công thức đề xuất đảm bảo độ tin cậy khi so sánh với một nghiên cứu đã được công bố gần đây, đồng thời

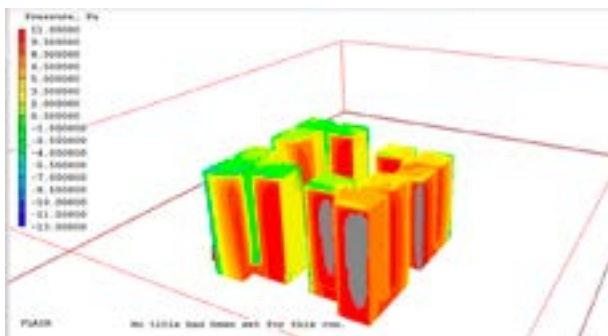
cũng so sánh với kết quả của phương pháp mô phỏng số (chương trình CUFSM) thì có hệ số biến thiên thấp đều dưới 0,05 và hệ số xác định cao đều trên 0,9970./.

Tài liệu tham khảo

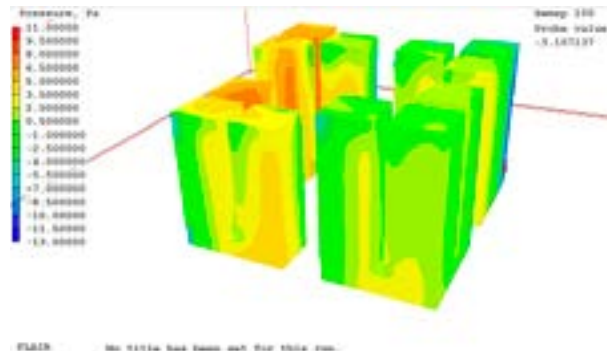
1. Vieira, L., Gonçalves, R., and Camotim, D., "On the local buckling of RHS members under axial force and biaxial bending", *Thin-Walled Structures*, 129 (February): 10–19 (2018).
2. Seif, M. and Schafer, B. W., "Local buckling of structural steel shapes", *Journal Of Constructional Steel Research*, 66 (10): 1232–1247 (2010).
3. Bùi, H. C., "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*, 11: 12–23 (2012).
4. Phạm, N. H. and Nguyễn, L. T., "Khảo sát khả năng chịu uốn của tiết diện thép hộp chữ nhật tạo hình nguội theo phương pháp cường độ liên tục", *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng*, 3: 28–34 (2022).
5. "AISI S100 - 16. North American specifications for the design of cold-formed steel structural members", (2016).
6. "Eurocode 3. Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements", (2006).
7. Trahair, N. S., Bradford, M. A., Nethercot, D. A., and Gardner, L., "The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3", 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, (2008).
8. Hancock, G. J., "LOCAL DISTORTIONAL AND LATERAL BUCKLING OF I-BEAMS", *Journal Of The Structural Division*, 104: 1787–1798 (1978).
9. Papangelis, J. P. and Hancock, G. J., "Computer analysis of thin-walled structural members", *Computers And Structures*, 56 (1): 157–176 (1995).

Mô phỏng môi trường gió ngoài trời...

(tiếp theo trang 21)



Hình 19. Biểu đồ áp suất gió ở phía đón gió



Hình 20. Biểu đồ áp suất gió ở phía khuất gió

gió và phía khuất gió của tòa nhà là -2 ~ 11Pa, có khả năng thông gió tự nhiên trong nhà tốt và tạo điều kiện thuận lợi cho người dùng mở cửa sổ để thông gió. Theo hướng gió Tây Bắc, giá trị áp suất gió của bề mặt trong nhà và ngoài trời của mặt tiền tòa nhà trên 0,5Pa. Dự án này đáp ứng yêu cầu "chênh lệch áp suất gió giữa bề mặt trong nhà và ngoài trời lớn hơn". 50% cửa sổ bên ngoài có thể mở được lớn hơn 0,5Pa". 1 điểm.

Theo tiêu chí 4.2.6 của "Tiêu chuẩn đánh giá công trình xanh" (GB/T 50378-2014), dự án này có thể đạt 3 điểm, so với điểm tối đa là 6 điểm. Số điểm này thể hiện công trình đạt 50% yêu cầu của tiêu chí về môi trường gió ngoài nhà. Để đánh giá được công trình theo tiêu chuẩn xanh thì cần các nghiên cứu đánh giá các tiêu chí còn lại để có được số điểm cụ thể, từ đó so sánh với tiêu chuẩn để xếp loại công trình./.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Hữu Dũng, *Phát triển công trình xanh và đô thị xanh tại Việt Nam*, *Tạp chí Kinh doanh và Công Nghệ*, Số 01, 2019.
2. Tâm Linh, *Tổng quan chung cư HH Linh Đàm quận Hoàng Mai*, *Onehousing.vn*, 2023. Available: <https://onehousing.vn/blog/quy-mo-va-mat-do-xay-dung-chung-cu-hh-linh-dam-quan-hoang-mai-nhu-the-nao-n17t>, 10/8/2024.
3. GB/T 50378-2014, *Assesment standard for green buiding*, 中国建筑工业出版社, 2014.
4. Trần Xuân Tâm, *Bàn về thông gió tự nhiên trong các công trình xây dựng ở Việt nam*, *Tạp chí Công thương*, Số 9, 2022.
5. WANG Fei, XIAO Yong-quan, *Simulation and evaluation of building cluster's wind environment with PHOENICS software*. *山东建筑工程学院学报*, 2005, 5: 39-42.
6. Phương Anh, *Giới thiệu tổng quan và khái quát về địa lý thành phố Hà Nội*, *hanoi.gov.vn*, 2014. Available: <https://hanoi.gov.vn/diachihanoi/-/hn/RtLibd2X8kEn/1001/124742/gioi-thieu-tong-quan-va-khai-quat-ve-ia-li-thanh-pho-ha-noi.html>, 15/8/2024.
7. JGJ286 – 2013, *Design standard for thermal environment of urban residential areas*, 中国建筑工业出版社, 2013.
8. H.K.Versteeg, W.Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics*, 2007.