



LOCAL BUCKLING STRENGTH OF 4 EDGE SIMPLY SUPPORTED STEEL PLATES WITH CONSIDERING SBHS500 AND SBHS700 STEEL GRADES

Dang Viet Duc*

University of Thuyloi, No 175 Tay Son Street, Dong Da, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 08/10/2024

Revised: 14/01/2025

Accepted: 10/02/2025

Published online: 15/02/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.2.2>

* *Corresponding author*

Email: dangvietduc@gmail.com; Tel: +84936020377

Abstract. For a steel structure, the local buckling strength of 4 edge simply supported steel plates under compression is an essential design factor. By using high performance steels, this design factor can be improved considerably. Numerous steel plates are investigated by using the finite element model, nonlinear behavior assumption for normal and high performance steel grades. The steel plate model which takes into account the conservative levels of residual stress and initial deflection are agreeable to investigate and evaluate the design equation of the steel plate local buckling strength of the current Japan Specifications for Highway Bridges. The numerical analysis results indicates that the design equation of the Japan Specifications for Highway Bridge is un-conservative in intermediate range of slenderness parameter R and with the same value of R , the normalized compressive strength (σ_u/σ_y) of high performance steel plates is slightly greater than that of conventional steel plates, especially within the intermediate range.

Keywords: Non-linear FE model, SBHS steels, conventional steels, residual stress, initial displacement.

© 2025 University of Transport and Communications



KHẢO SÁT SỨC KHÁNG MẤT ỔN ĐỊNH CỤC BỘ CỦA TẮM THÉP CÓ XÉT ĐẾN CẤP THÉP TÍNH NĂNG CAO SBHS500 VÀ SBHS700

Đặng Việt Đức*

Trường Đại học Lợi, Số 175 Tây Sơn, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 08/10/2024

Ngày nhận bài sửa: 14/01/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/02/2025

Ngày xuất bản Online: 15/02/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.2.2>

* Tác giả liên hệ

Email: dangvietduc@gmail.com; Tel: +84936020377

Tóm tắt. Sức kháng mất ổn định cục bộ của tấm thép chịu nén kê giản đơn 4 cạnh là giá trị thiết kế quan trọng của một kết cấu công trình thép. Với ứng dụng của thép tính năng cao sẽ nâng cao đáng kể giá trị thiết kế này. Một số lượng lớn tấm thép kê 4 cạnh được khảo sát với áp dụng mô hình số theo phương pháp phần tử hữu hạn và giả thiết phi tuyến khi mô tả ứng xử của cấp vật liệu thép thông thường và thép tính năng cao SBHS. Mô hình xét đến ứng suất dư và biến dạng ban đầu ở mức giới hạn cho phép để đánh giá công thức thiết kế sức kháng mất ổn định cục bộ của tấm thép trong quy trình thiết kế cầu đường bộ Nhật Bản hiện hành. Kết quả phân tích số chỉ ra công thức trong quy trình thiết kế Nhật Bản hiện hành là không an toàn trong phạm vi trung gian của tham số độ mảnh R của tấm thép và với cùng mức độ tham số độ mảnh R , ứng suất dư và biến dạng ban đầu, sức kháng của tấm đối chiếu với giá trị chảy dẻo (σ_u/σ_y) với cấp thép tính năng cao sẽ lớn hơn một chút của tấm với cấp thép thông thường.

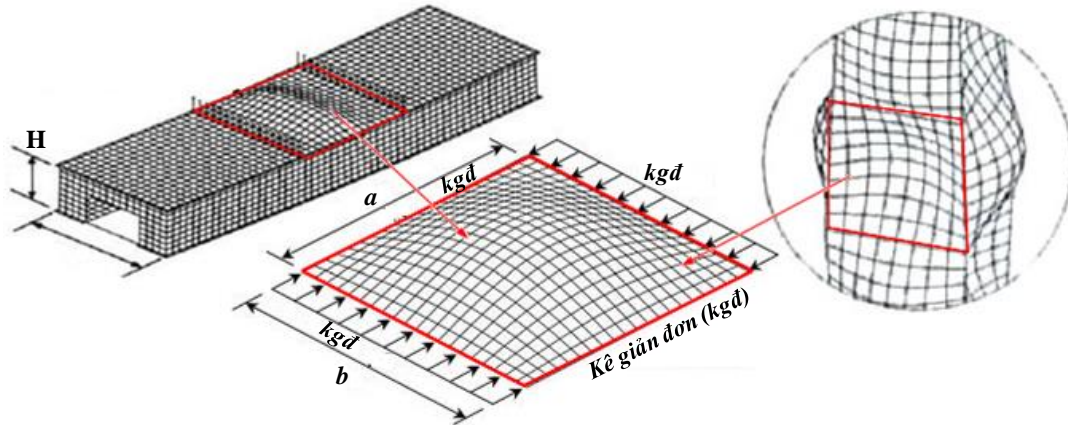
Từ khóa: mô hình phương pháp phần tử hữu hạn phi tuyến, cấp thép tính năng cao, ứng suất dư, chuyển vị ban đầu.

@2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. GIỚI THIỆU

Từ năm 2008, 2 cấp thép tính năng cao áp dụng cho kết cấu cầu là SBHS500 và SBHS700 đã được tiêu chuẩn hóa trong tiêu chuẩn công nghiệp Nhật Bản (Japanese Industrial Standard) [1]. Ưu điểm của 2 cấp thép này là cường độ chảy dẻo lớn, có tính hàn tốt, không cần gia nhiệt khi hàn với cấp thép SBHS500 và khoảng 50°C cho cấp thép SBHS700. Tuy

nhiên đặc tính sau đàn hồi của 2 cấp thép mới này có một số điểm khác biệt so với các cấp thép thông thường: đó là hầu như không có vùng biến dạng dẻo sau đàn hồi, hoặc sẽ rất nhỏ, tổng biến dạng dẻo và tỷ số cường độ chịu kéo/giá trị chảy dẻo nhỏ hơn so với các loại thép thông thường.



Hình 1. Tấm thép đại diện cho khả năng chịu nén của của kết thép loại không có sườn tăng cường.

Sức kháng chịu lực của kết cấu thép nói chung có quan hệ đặc biệt đến sức kháng mất ổn định cục bộ (SKMODCB) của các bộ phận chịu nén. Dwight và Moxham [2] dựa trên các thí nghiệm đã kết luận sức kháng mất ổn định nén của thép tấm không phụ thuộc nhiều vào dạng điều kiện biên ở cạnh của các tấm. Fukumoto và Itoh [3] khảo sát 793 thí nghiệm trong đó 13% là thí nghiệm với cột thép thấp có mặt cắt hộp đã chỉ ra rằng không có sự khác biệt giữa sức kháng nén của 1 tấm đơn ứng với thành hộp so với sức kháng tổng thể của hộp, xét theo giá trị ứng suất. Như vậy để khảo sát sức kháng mất ổn định nén của 1 bộ phận kết cấu thép không có sườn tăng cường, chỉ cần xác định SKMODCB của tấm thép đại diện, như thể hiện ở hình 1.

Công thức thiết kế SKMODCB của thép tấm trong các quy trình hiện hành thường được thể hiện theo dạng một hàm với biến số là tham số độ mảnh của tấm R. Tham số độ mảnh của tấm thép R (slenderness parameter) được biểu diễn như trong công thức (1) với b, t, σ_y , E, ν và k theo thứ tự là chiều rộng, chiều dày của tấm thép, cường độ chảy dẻo, modul đàn hồi, hệ số nở hông của vật liệu thép, và tham số mất ổn định của điều kiện biên tấm thép.

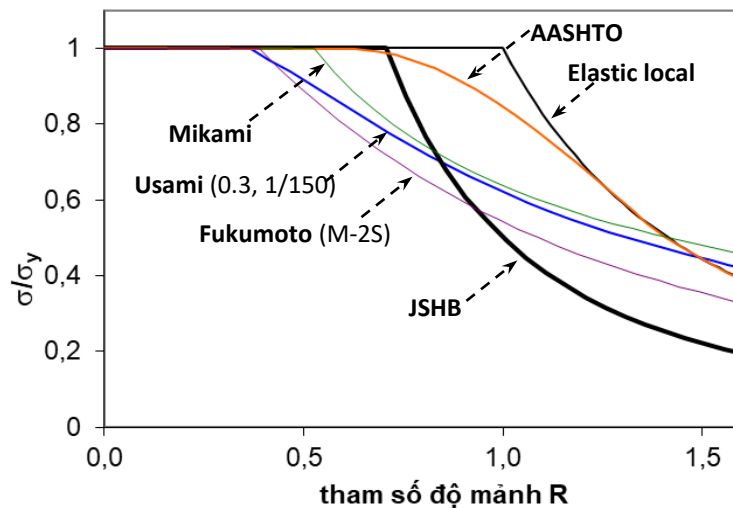
$$R = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_E}} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_u}{\sigma_y} &= 1 & R \leq 0,7 \\ \frac{\sigma_u}{\sigma_y} &= \frac{0,7}{R^2} & R > 0,7 \end{aligned} \quad (2)$$

SKMODCB của thép tấm theo quy trình thiết kế cầu đường bộ Nhật Bản [4] được biểu diễn ở công thức (2). Công thức thiết kế của quy trình Nhật Bản được đề xuất chủ yếu dựa trên khảo sát các cấp thép thông thường và tấm thép có độ dày <60mm, và dựa trên kết quả phân tích một tấm chịu nén hình chữ nhật trình bày trong Timoshenko và Gere [5] với giả thiết vật liệu đàn hồi và chuyển vị nhỏ. Tuy nhiên từ năm 1996 quy trình đã cho phép sử dụng

các tấm thép có chiều dày lên tới 100m. Ngoài ra rất nhiều nghiên cứu đã chỉ ra SKMODCB của tấm thép chịu ảnh hưởng lớn từ đặc tính sau đàn hồi của vật liệu thép.

Usami trong [6] bằng các mô hình số đã báo cáo khảo sát về SKMODCB của các tấm thép đơn kê 4 cạnh với các mức ứng suất dư (σ_{rc}/σ_y) lần lượt là 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; và 0,5 và các mức phòng móp (biến dạng) ban đầu với các mức (W_0/b) là 1/150; 1/200; 1/250; 1/300; 1/500; và 1/1000. Các giá trị (σ_{rc}/σ_y) và (W_0/b) sẽ được giải thích ở phần sau. Trong mô hình số mô tả tấm thép, giả thiết dẻo hoàn hảo được áp dụng cho sự làm việc của vật liệu thép. Giả thiết này sẽ chỉ phù hợp với vật liệu thép truyền thống với thêm chảy lớn, trong đó như đã trình bày cấp thép mới có thêm chảy rất nhỏ và thậm chí có thể không có. Bên cạnh đó nghiên cứu trong [6] cũng chỉ xét đến cấp thép có $\sigma_y=350$ MPa và tấm thép có chiều dày 10mm.



Hình 2. SKMODCB của quy trình thiết kế Nhật Bản biểu diễn với các kết quả nghiên cứu khác.

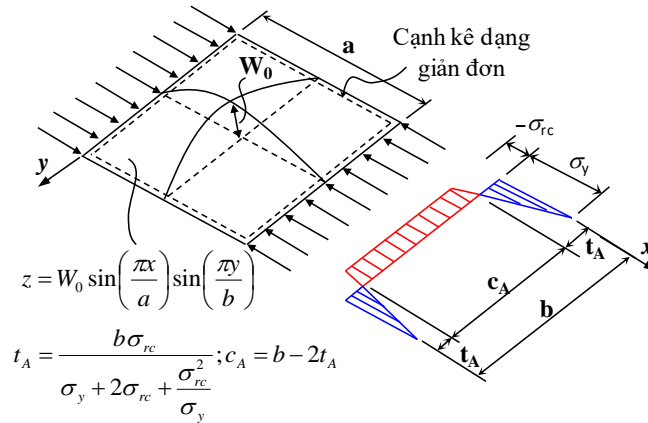
Khi xét đến ảnh hưởng của biến dạng dư do hàn tỉ lệ (σ_{rc}/σ_y) là thông số được xem xét, trong đó σ_{rc} là giá trị ứng suất dư tuyệt đối phân bố trong vùng nén, Nishino và cộng sự [7] đã tiến hành 8 thí nghiệm nén cột thấp với 4 mẫu chế tạo từ cấp thép truyền thống A7 và 4 mẫu mới loại thép cường độ cao A514. Nghiên cứu đã báo cáo rằng tỉ lệ (σ_{rc}/σ_y) trong mẫu cột thép cường độ cao nhỏ hơn so với trong mẫu cột cấu tạo từ thép thường. Komatsu [8] cũng thực hiện một loạt các đo đạc về ứng suất dư với 2 cấp thép thường và 2 cấp thép cường độ cao. Kết quả đo đạc cũng cho ra các kết quả với chiều hướng tương tự như được Nishino và cộng sự trình bày trong [7]. Các nghiên cứu Fukumoto và Itoh [3], Usami [6], và Mikami và cộng sự [9] đã chỉ ra rằng SKMODCB của thép tấm theo quy trình thiết kế hiện hành của Nhật Bản (JSHB) không đủ an toàn trong khoảng giá trị của $R = 0,5 \div 0,8$, các báo cáo vừa đề cập được thể hiện ở hình 2. Do vậy công thức thiết kế của quy trình hiện hành Nhật Bản cần phải được khảo sát kỹ lưỡng hơn và thậm chí phải cập nhật lại.

SKMODCB của thép tấm cũng bị ảnh hưởng rất lớn bởi ứng xử sau đàn hồi của vật liệu thép, đặc biệt là các cấp thép cường độ (tính năng) cao mới. Nghiên cứu các ảnh hưởng của đặc tính sau đàn hồi thép cường độ cao, Rasmussen và Hancock đã có những nhận định trong [10] rằng đối với các tấm đặc chắc (giá trị R nhỏ) tỉ lệ σ_u/σ_y (ứng suất nén cực hạn/ứng suất chảy dẻo) của các tấm thép cường độ cao sẽ nhỏ hơn so với của thép tấm thép thường do tỉ lệ ứng suất tới hạn/ ứng suất chảy dẻo của thép thường cao hơn. Với R trong phạm vi lớn hơn 0,55; tỉ lệ σ_u/σ_y của thép tấm cường độ cao sẽ cho giá trị lớn hơn so với của thép thường. Lý do của tác giả là trong phạm vi R này SKMODCB của tấm thép cường độ cao sẽ ít bị ảnh hưởng bởi

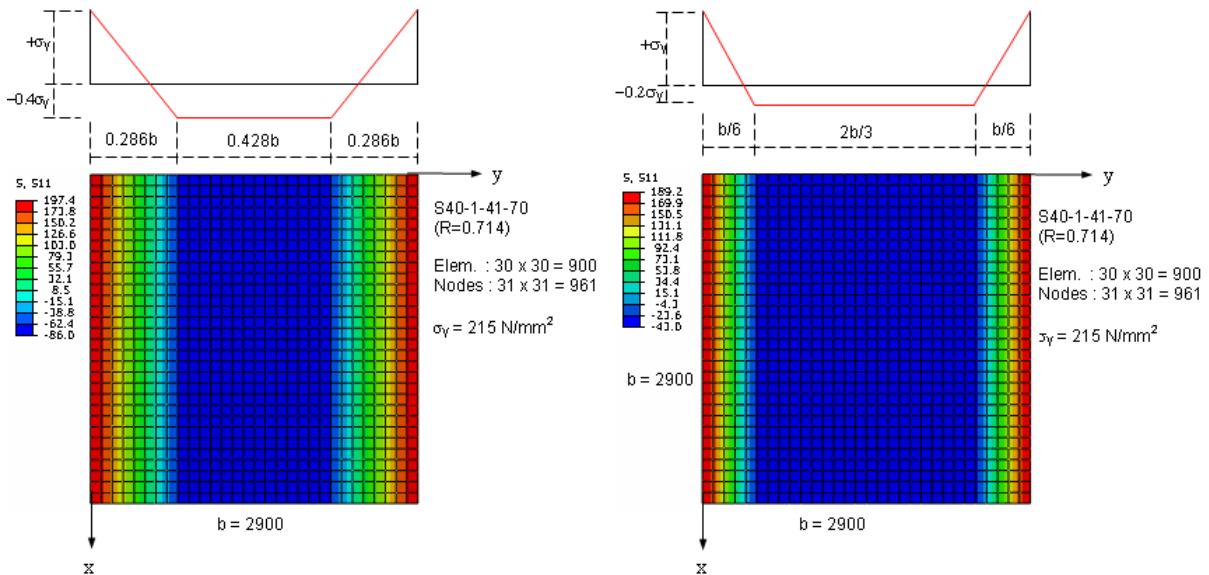
ứng suất dư hơn so với của tấm thép cấu tạo từ các cấp thép thường. Tuy nhiên trong nghiên cứu này không có những nhận xét và phân tích ảnh hưởng đặc tính sau đàn hồi của vật liệu thép đến các tấm được cấu tạo từ các cấp thép khác nhau nhưng cùng mức độ ứng suất dư và biến dạng ban đầu.

Nội dung của bài báo này là trình bày nghiên cứu áp dụng mô hình số tấm thép vuông kê 4 cạnh áp dụng giả thiết đàn dẻo để xét tới ứng xử sau đàn hồi của vật liệu thép thường và vật liệu thép cường độ cao và phi tuyến hình học khi mất ổn định xảy ra. Từ kết quả SKMODCB thu được sẽ khảo sát đánh giá lại mức độ tin cậy của công thức thiết kế của quy trình thiết kế Nhật Bản hiện hành và đánh giá so sánh kết quả với những nghiên cứu khác.

2. MÔ HÌNH PHÂN TÍCH TẤM THÉP



Hình 3. Mô hình kết cấu của tấm thép khảo sát.

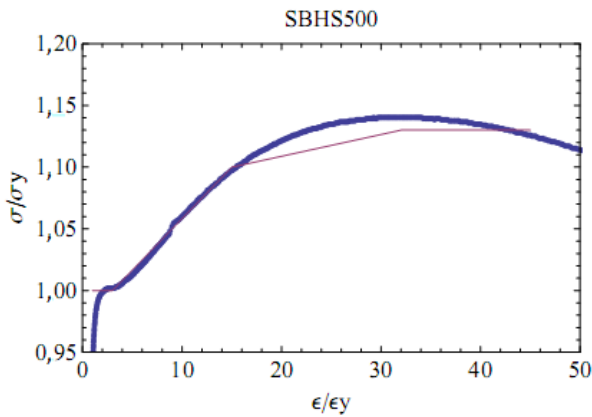


Hình 4. Ứng suất dư được mô tả trong mô hình tấm thép.

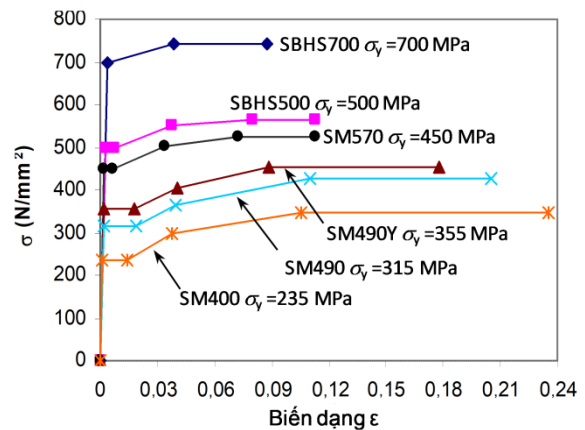
Mô hình kết cấu của tấm thép được áp dụng để khảo sát trong nghiên cứu được mô tả như trong hình 2, rời rạc bởi các phần tử “tấm” 4 nút, loại S4R định nghĩa bởi phần mềm ABAQUS [11]. Mô hình này sẽ xét đến yếu tố không hoàn hảo về mặt hình học, dựa vào đặc điểm nửa mặt sóng mất ổn định định do nén trong một tấm bản thép, biến dạng (độ phồng móp) ban đầu lý tưởng hóa có dạng mặt hình sin sẽ được áp dụng cho mô hình phân tích. Biến

dạng lớn nhất nằm giữa tấm và không lớn hơn giá trị $b/150$, là giới hạn lớn nhất mà quy trình thiết kế Nhật Bản hiện hành [4] cho phép. Điều kiện biên ở các cạnh là dạng kê đơn giản. Ngoài ra nghiên cứu còn mô tả phân bố ứng suất dư do xét đến yếu tố chế tạo các phân tử kết cấu thép bằng phương pháp hàn. Đường hàn ở 2 cạnh bên song song của tấm với nhiệt độ rất cao sẽ tạo ra phân bố ứng suất kéo tương đương với cường độ dẻo của vật liệu thép. Với điều kiện cân bằng trong phân bố ứng suất trên một mặt phẳng tấm sẽ có vùng phân bố ứng suất nén để cân bằng với vùng phân bố ứng suất kéo ở gần cạnh đường hàn. Chiều dài và giá trị vùng ứng suất nén này sẽ ảnh hưởng đáng kể đến SKMODCB của tấm thép. Giá trị để khảo sát trong nghiên cứu được lấy với mức độ $\sigma_{rx}/\sigma_y = -0,4$ Dạng phân bố ứng suất dư do hàn được lý tưởng hóa dựa trên tham khảo nghiên cứu của Ueda và Yao thể hiện trong [12] với giá trị và chiều dài phân bố kéo và nén được thể hiện trong hình 3. Ứng suất dư được mô tả trong mô hình tấm thép là các phân bố ứng suất ở trạng thái ban đầu như thể hiện trong hình 4.

Để tạo ra một tải trọng gây nén trong tấm, phương pháp kiểm soát chuyển vị với chuyển vị thẳng cường bức theo hướng tác dụng lực trên phạm vi 1 cạnh được áp dụng như thể hiện trong hình 3. Đây là một phương pháp phổ biến áp dụng trong các mô hình số phân tích đàn dẻo theo thuật toán phương pháp phần tử hữu hạn (PP PTHH) để có thể khảo sát ứng xử của mô hình kết cấu sau khi đã đạt được sức kháng làm việc tới hạn.



Hình 5. Lý tưởng hóa quan hệ ứng suất biến dạng của vật liệu thép từ kết quả thí nghiệm.

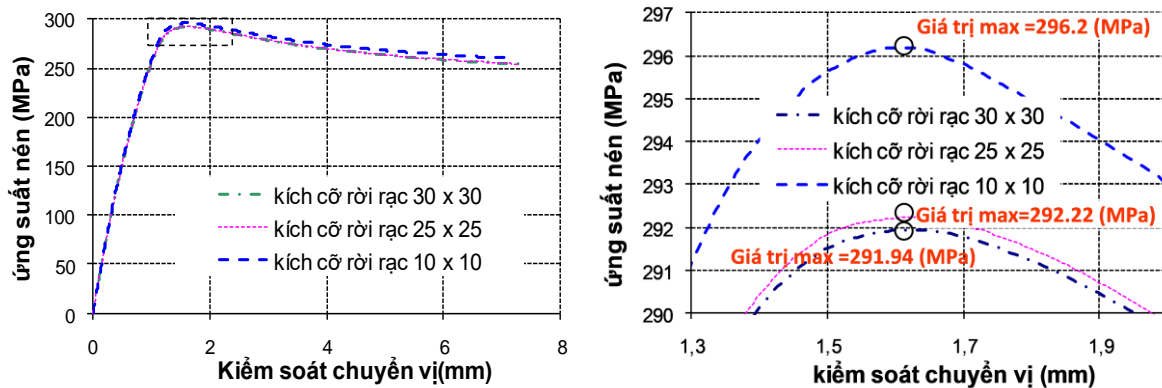


Hình 6. Mô phỏng gần đúng đặc tính đàn dẻo của vật liệu thép.

Đặc tính đàn dẻo của vật liệu thép được mô tả bằng phương trình lý tưởng của Prandtl-Reuss và giả thiết chảy dẻo của vật liệu theo mặt phẳng von Mises. Đường quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu thép được ghi nhận từ thí nghiệm thực tế và từ đó được lý tưởng hóa thành dạng các đoạn thẳng để thuận tiện cho việc áp dụng trong mô hình phân tích (hình 5). Hình 6 thể hiện quan hệ ứng suất biến dạng của 6 cấp thép khảo sát trong nghiên cứu đã được lý tưởng hóa bao gồm 4 cấp thông thường và 2 cấp tính năng SBHS500 và SBHS700.

Để đảm bảo kết quả SKMODCB đạt được sự hội tụ khi xét đến kích cỡ rời rạc của mô hình tấm, nghiên cứu đã thực hiện khảo sát mô hình tấm có kích thước 580x580 (mm) với 3 sự phân chia 10 x 10; 25 x 25; và 30 x 30 (phần tử). Kết quả khảo sát sự hội tụ của mô hình phụ thuộc vào mức độ phân chia phần tử được thể hiện ở hình 7. Với tấm được chia 30 x 30 so với tấm 10 x 10 (phần tử) kết quả giảm đi xấp xỉ 1,5% giá trị. So sánh giá trị ứng suất nén lớn nhất thu được của tấm được chia 30 x 30 với tấm 25 x 25 (phần tử) mức giảm xấp xỉ 0,2%. Vậy mô hình tấm thép với mức chia 30 x 30 (phần tử) được xem như đạt yêu cầu về

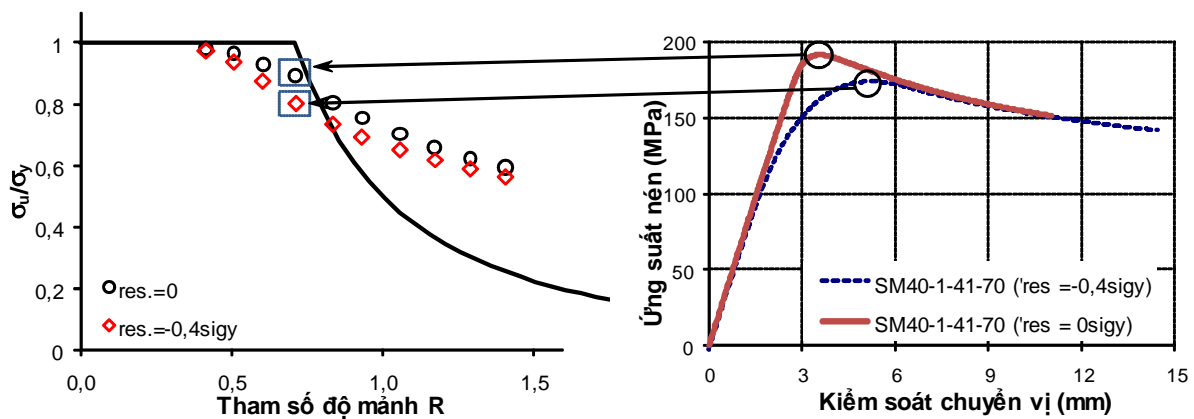
mức độ hội tụ kết quả phân tích. Tất cả các mô hình tấm thép được khảo sát trong nghiên cứu đều được áp dụng mức rời rạc 30 x 30 (phần tử).



Hình 7. Nghiên cứu hội tụ cho kích cỡ rời rạc của mô hình tấm thép.

Kết hợp với 4 cấp vật liệu thép thường và 2 cấp vật liệu thép tính năng cao SBHS, nghiên cứu sẽ xét đến rất nhiều các thông số hình học của tấm để có thể khảo sát các giá trị tham số độ mảnh R của tấm thay đổi trong khoảng từ 0,4 đến 1,4.

Sau khi kết thúc quá trình phân tích tính toán, phần mềm cung cấp các giá trị phản lực theo phương x tại cạnh tấm cố áp dụng chuyển vị kiểm soát ở mỗi cấp phân tích, từ đó xác định được ứng suất nén trung bình trong tấm. Đường quan hệ giữa ứng suất nén trung bình trong tấm và chuyển vị kiểm soát để tạo nên lực nén tại mỗi cấp phân tích sẽ được ghi nhận và từ đó xác định được giá trị tới hạn σ_u như biểu diễn như trong hình 8. SKMODCB được sử dụng và phân tích trong nghiên cứu sẽ được thể hiện dưới dạng tỉ lệ ứng suất nén trung bình tới hạn (tối đa) trong tấm như đã trình bày σ_u chia cho ứng suất chảy dẻo của cấp vật liệu thép được phân tích σ_y và được biểu diễn ứng với tham số độ mảnh R để có thể so sánh kết quả khảo sát với quy trình thiết kế và các nghiên cứu khác, như được trình bày trong hình 8.



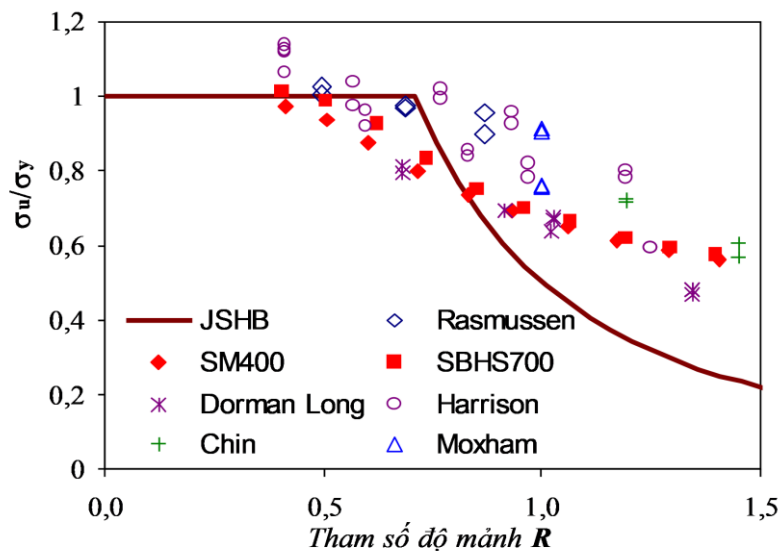
Hình 8. Xác định và thể hiện SKMODCB của tấm thép.

3. PHÂN TÍCH MÔ HÌNH & ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

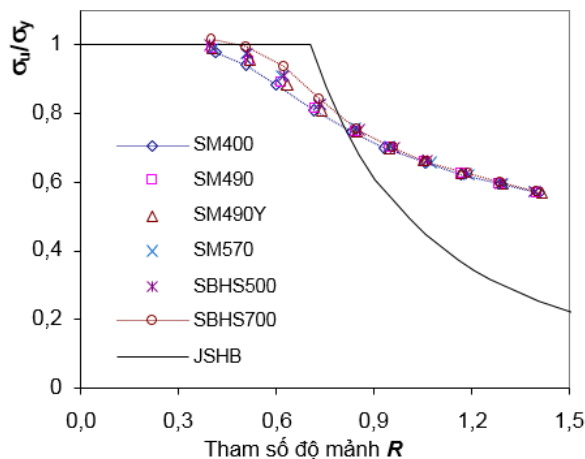
Kết quả phân tích tấm thép với mức phòng móp ban đầu và ứng suất dư bắt lớn nhất mà quy trình cho phép được thể hiện trong hình 9, cùng với các kết quả thí nghiệm được báo cáo ở các nghiên cứu được tham khảo. Kết quả được biểu diễn trong hình chỉ ra rằng với

mức phòng móp ban đầu và ứng suất dư bất lợi nhất SKMODCB của mô hình tấm thép trong nghiên cứu nằm ở vùng biên dưới của các kết quả được biểu diễn cùng. Điều này thể hiện tính chính chính xác và tin cậy của kết quả phân tích mô hình số được áp dụng trong nghiên cứu.

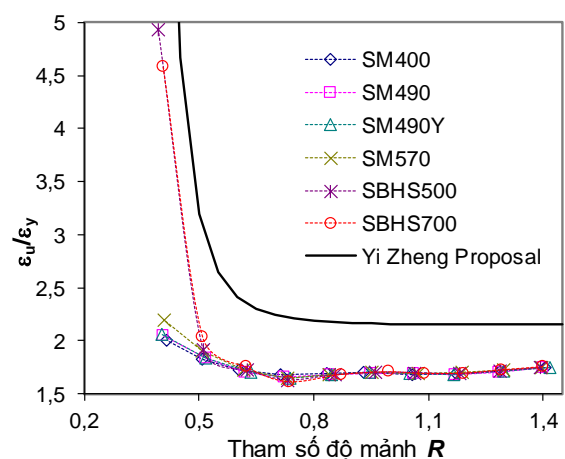
Kết quả SKMODCB của thép tấm khảo sát trong nghiên cứu ứng với 6 cấp thép và 10 nhóm tham số độ mảnh R từ 0,4 đến 1,4 được thể hiện ở hình 10. Kết quả cho thấy giá trị sức kháng quy định bởi quy trình thiết kế Nhật Bản quá thiên về an toàn trong khoảng R từ 0,5 đến 0,8; và không đủ mức an toàn khi $R > 0,85$. Nếu đánh giá sức kháng theo tiêu chí là tỉ số giữa sức kháng cực hạn thu được từ mô hình phân tích số và cường độ chảy dẻo (σ_u/σ_y) thì sức kháng của các tấm thép với cấp thép tính năng cao sẽ lớn hơn sức kháng của tấm thép có cấp thông thường xét cùng mức ứng suất dư và độ phòng móp ban đầu. Với tấm thép được cấu tạo từ các cấp thép càng cao thì SKMODCB càng lớn. Mức độ chênh lệch lớn nhất giữa các cấp thép khác nhau ứng với giá trị R nằm trong khoảng 0,5÷0,7. Trong phạm vi $R > 0,8$ mức độ chênh lệch về tương quan sức kháng (σ_u/σ_y) giữa các cấp thép là không đáng kể.



Hình 9. Kết quả SKMODCB trong nghiên cứu được biểu diễn với các kết quả được trình bày trong [7].

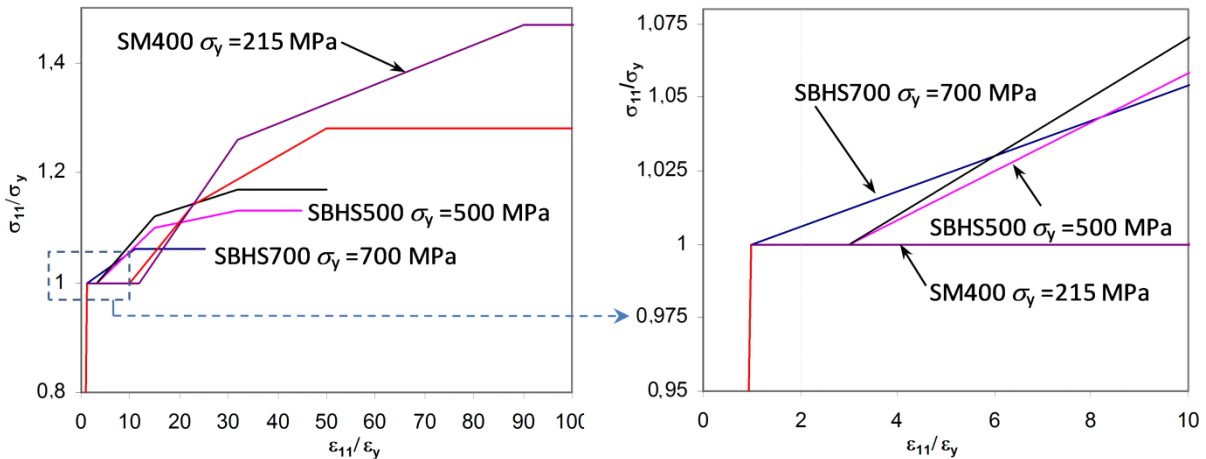


Hình 10. SKMODCB của thép tấm khảo sát trong nghiên cứu.



Hình 11. Biến dạng tới hạn của thép tấm mất ổn định cục bộ.

Để đánh giá ảnh hưởng của vùng thêm chảy (dẻo) và tái bền của vật liệu thép đến sức kháng chịu nén của tấm thép có thể xem xét mức biến dạng theo hướng nén của tấm tại thời điểm bắt xuất hiện hiện tượng mất ổn định cục bộ. Biến dạng của tấm thép khi mất ổn định do nén đối chiếu với biến dạng chảy dẻo được biểu diễn ở hình 11. Tỷ số ϵ_u/ϵ_y cho phép đánh giá mức độ phát huy vùng làm việc sau đàn hồi của các cấp thép khác nhau. Từ hình 11 cho thấy trong dải $R \leq 0,5$ tấm thép cấu tạo từ thép tính năng cao phát huy vùng làm việc sau đàn hồi tốt hơn so với các tấm thép cấu tạo từ cấp thép truyền thống, thể hiện ở giá trị ϵ_u/ϵ_y . Với các cấp thép thông thường khi mất ổn định $\epsilon_u/\epsilon_y \approx 2$, còn với cấp thép tính năng cao tỉ lệ $\epsilon_u/\epsilon_y > 2$.



Hình 12. Đặc tính vật liệu của các cấp thép trong phạm vi $2 \epsilon_y$.

Quan hệ ứng suất biến dạng xung quanh mức $2\epsilon_y$ của các cấp thép được giới thiệu ở hình 12. Đây là vùng biến dạng hoàn toàn dẻo đối với các cấp thép thông thường nhưng đã là giai đoạn tái bền với cấp thép SBHS700 và bắt đầu tái bền với cấp thép SBHS500 và SM570. Có thể nhận định với điều kiện không hoàn hảo về độ phòng móp và ứng suất dư ở mức giới hạn lớn nhất cho phép và tham số độ mảnh R trong phạm vi $\leq 0,5$, các tấm với cấp vật liệu thép truyền thống xuất hiện hiện tượng mất ổn định khi biến dạng nén bắt đầu nằm trong vùng chảy dẻo trong khi các tấm với cấp thép SBHS tiếp tục phát triển biến dạng nén khi chịu tải trọng nén tác dụng, tận dụng vùng tái bền của vật liệu để tăng sức kháng nén của kết cấu. Hiện tượng vừa được phân tích có xu hướng trái với nhận định của Rasmussen và Hancock trong [10], được trình bày trong phần giới thiệu.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Xét với mức độ tối đa của ứng suất dư và và phòng móp, SKMODCB của tấm thép quy định bởi quy trình Nhật Bản hiện hành quá thiên về an toàn với R trong phạm vi $0,5 \div 0,8$ và không đủ an toàn trong phạm vi $R > 0,85$.

Với cùng mức ứng suất dư (σ_{rc}/σ_y) và phòng móp ban đầu (W_0/b) các cấp thép càng cao thì sẽ tạo nên SKMODCB của tấm thép càng cao xét theo tiêu chí (σ_u/σ_y), đặc biệt R nằm trong khoảng $0,5 \div 0,7$.

Tấm thép áp dụng cấp vật liệu SBHS500 và SBHS700 có SKMODCB tốt hơn so với các cấp thép thông thường về cả giá trị tới hạn tuyệt đối và giá trị đối chiếu (σ_u/σ_y), kể cả R trong khoảng $\leq 0,5$; trái với xu thế về SKMODCB của tấm thép với các cấp thép khác nhau mà Rasmussen và Hancock nhận định trong [10].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Japanese Industrial Standard, JIS G 3140, Higher yield strength steel plates for bridges, 2008
- [2]. J. B.Dwight, K. E. Moxham, Welded steel plates in compression, Structural Engineer, 1969.
- [3]. Fukumoto Y., Itoh Y., Basic compressive strength of steel plates from test data, PROC. OF JSCE No.334/I-1, 1984.
- [4]. Japan Road Association, Specifications for Highway Bridges – part II, Steel Bridges, 2002.
- [5]. S. Timoshenko, and J. M. Gere, Theory of Elastic Stability, 2nd ED., McGraw-Hill, New York, 1961.
- [6]. T. Usami, Effective width of locally buckled plates in compression and bending, Journal of Structural Engineering, ASCE, 119 (1993) 1358-1373. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1993\)119:5\(1358\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:5(1358))
- [7]. F. Nishino, Y. Ueda, and L. Tall, Experimental Investigation of the Buckling of Plates with Residual stress, Fritz Engineering Laboratory Report No.209.3, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania, USA, 1966.
- [8]. S. Komatsu, M. Ushio, T.Kitada, An experimental study on residual stress and initial deformations of stiffened plates, JSCE, 1977.
- [9]. I. Mikami, M. Dogaki, H. Yonezawa, Inelastic buckling of continuous stiffened plates under compression, Proc. of JSCE, 298 (1980) 17-30, (in Japanese).
- [10]. K. J. R.Rasmussen, J. G.Hancock, Plate slenderness limits for high strength steel sections, J. Construct. Steel Research, 23 (1992) 74-96. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(92\)90037-F](https://doi.org/10.1016/0143-974X(92)90037-F)
- [11]. ABAQUS. User's Manual, Version 6.8, Hibbitt, Karls-son&Sorensen, Inc., Pawtucket, Rhode Island, USA, 2008.
- [12]. Y.Ueda, T. Yao, Compressive Strength of Plate Elements with Welding Residual Stresses and Deformation, Colloquium on Applications of Numerical Techniques in Welding, IIW, 1978.