

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ XÂY DỰNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC KIẾN TRÚC HÀ NỘI

VŨ HUY HOÀNG

**NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ
CỦA CẤU KIỆN THÉP TẠO HÌNH NGUỘI
CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT XÂY DỰNG

Hà Nội - Năm 2025

Công trình được hoàn thành tại Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS. TS. Vũ Quốc Anh

2. PGS. TS. Phạm Cao Hùng

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ
cấp trường tại Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

Vào hồi ... giờ, ngày ... tháng ... năm 202

Có thể tìm hiểu luận án tại Thư viện quốc gia Việt Nam và
Thư viện Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

MỞ ĐẦU

1. *Tính cấp thiết của đề tài*

Phương pháp Cường độ trực tiếp (Direct Strength Method hay DSM) do Schafer và Peköz đề xuất đưa ra một cách tiếp cận mới và hiệu quả trong việc thiết kế các cấu kiện chịu uốn của kết cấu thép tạo hình nguội (cold-formed steel hay CFS). Phương pháp này tính toán độ bền uốn thông qua các ứng suất tới hạn đàn hồi của toàn bộ tiết diện.

Vì các công thức tính toán theo DSM hiện tại được xây dựng dựa trên các số liệu thí nghiệm và mô phỏng của cấu kiện chịu uốn quanh trục đối xứng, do đó khi áp dụng phương pháp DSM cho cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng, độ bền uốn thu được thường rất an toàn.

Rõ ràng, việc thiết kế cấu kiện CFS chịu uốn quanh trục không đối xứng bằng phương pháp DSM hiện hành còn tồn tại nhiều bất cập cần giải quyết, vì vậy, đề tài “***Nghiên cứu ứng xử của cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng***” là cần thiết và có tính thực tiễn. Luận án sẽ tập trung vào cấu kiện thép tiết diện chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng.

2. *Mục đích nghiên cứu*

Điều chỉnh công thức DSM (công thức tính toán độ bền theo phương pháp DSM) để dự đoán chính xác hơn độ bền của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng.

3. *Mục tiêu nghiên cứu*

- a) Xây dựng phương pháp giải tích xác định hệ số mất ổn định của cả tiết diện.

- b) Đề xuất công thức thực hành hỗ trợ xác định ứng suất tới hạn của cấu kiện thép chữ C nghiên cứu trong luận án.
- c) Đề xuất các điều chỉnh để nâng cao độ chính xác của công thức DSM khi dự đoán độ bền của cấu kiện thép tạo hình nguội nghiên cứu trong luận án.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng: Độ bền theo phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM) của cấu kiện thép tạo hình nguội

Phạm vi nghiên cứu:

Thép các bon cán nóng và thép dập nguội cường độ cao

Tiết diện chữ C

Chịu uốn một phương, quanh trục không đối xứng, bản bụng chịu nén

5. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp thu thập số liệu

Phương pháp mô phỏng

Phương pháp phân tích và tổng hợp

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Kết quả nghiên cứu có thể được tham khảo để điều chỉnh nội dung thiết kế cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn trong tiêu chuẩn.

7. Kết quả nghiên cứu chính và những đóng góp mới của luận án

Xây dựng phương pháp Độ cứng biên (RSM) có khả năng xác định ứng suất tới hạn của cấu kiện có tiết diện hở.

Đề xuất công thức thực hành ba đoạn để tính ứng suất tới hạn của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.

Đề xuất quan hệ tuyến tính giữa các tham số của công thức DSM với tỷ lệ kích thước tiết diện (B/H) khi áp dụng cho cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.

8. Cấu trúc của luận án

Ngoài các nội dung quy định bao gồm phần Mở đầu, Danh mục chữ viết tắt, bảng biểu, hình vẽ, Kết luận và kiến nghị, Tài liệu tham khảo và Phụ lục, cấu trúc chính của luận án bao gồm 4 chương.

NỘI DUNG LUẬN ÁN

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CẤU KIỆN THÉP TẠO HÌNH NGUỘI CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG

1.1. Giới thiệu về kết cấu thép tạo hình nguội

Giới thiệu định nghĩa, vật liệu, tiết diện của kết cấu thép tạo hình nguội cũng như các phương pháp tạo hình nguội, ưu nhược điểm so với kết cấu thép cán nóng, ứng dụng và lịch sử phát triển ở Việt Nam và trên thế giới.

1.2. Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội

Giới thiệu về các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội trên thế giới. Từ đó lựa chọn sử dụng tiêu chuẩn AISI S100 của Mỹ cho luận án.

1.3. Các phương pháp thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội

1.3.1. Phương pháp Bề rộng hữu hiệu (EWM)

Trình bày nguyên lý của phương pháp Bề rộng hữu hiệu.

1.3.2. Phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM)

Trình bày nguyên lý của phương pháp Cường độ trực tiếp.

1.3.3. Các phương pháp số

Các phương pháp số có thể giải quyết các bài toán kết cấu thép tạo hình nguội nhưng phức tạp, do đó chỉ phù hợp cho mục đích nghiên cứu.

1.3.4. Phương pháp được lựa chọn cho luận án

Phương pháp Cường độ trực tiếp được lựa chọn cho nghiên cứu của luận án do tính đơn giản, dễ áp dụng.

1.4. Tầm quan trọng và ứng dụng của trạng thái chịu uốn quanh trục không đối xứng

Sử dụng các số liệu thống kê khẳng định tầm quan trọng của trạng thái chịu uốn quanh trục không đối xứng thông qua các ứng dụng thực tế như xà gồ, cột chịu lực hai phương...

1.5. Phương pháp Cường độ trực tiếp: Vấn đề về độ bền uốn quanh trục không đối xứng

Nhiều nhà nghiên cứu đã nhận thấy khi sử dụng phương pháp DSM để xác định độ bền chịu uốn quanh trục không đối xứng, kết quả thường thiên về quá an toàn. Mục này thống kê các nghiên cứu đã có về vấn đề này. Một số nhận xét đã được đưa ra, trong đó khẳng định cần phải có nghiên cứu cải tiến công thức DSM hiện hành cho cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng để có thể dự đoán chính xác hơn độ bền của loại cấu kiện này.

1.6. Ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

1.6.1. *Vai trò của ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo của toàn bộ tiết diện trong phương pháp DSM*

Ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ và ổn định méo rất quan trọng với phương pháp DSM vì đây là giá trị đầu vào của công thức độ bền.

1.6.2. *Các phương pháp xác định ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ của toàn bộ tiết diện theo AISI S100*

Có hai phương pháp được tiêu chuẩn AISI S100 sử dụng để xác định ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ của toàn bộ tiết diện, bao gồm nghiệm giải tích và phương pháp số. Nghiệm giải tích dễ sử dụng nhưng độ chính xác thấp, vì thế cần được cải tiến.

1.6.3. *Một số đề xuất hiện có nhằm cải tiến công thức giải tích để xác định ứng suất tới hạn của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén*

Bài toán mất ổn định của toàn bộ tiết diện có thể được giải thông qua bài toán mất ổn định của một tấm đơn (Timoshenko, Bleich với phương pháp Hệ số chống xoay) hoặc giải đồng thời cho toàn bộ tiết diện, bao gồm phương pháp chính xác của Bulson, phương pháp năng lượng, các phương pháp số và các phương pháp khác. Mỗi phương pháp đều có những mặt hạn chế nhất định. Chưa có phương pháp giải tích hoàn chỉnh áp dụng cho cấu kiện chịu lực phức tạp. Do đó, luận án sẽ tìm kiếm một hướng giải quyết vấn đề ổn định cục bộ của các cấu kiện đang được nghiên cứu bằng phương pháp giải tích.

Một số biểu thức giải tích để tính hệ số mất ổn định của tiết diện chữ C nghiên cứu trong luận án đã được phát triển nhưng độ chính xác còn hạn chế do chưa xem xét toàn diện sự ảnh hưởng của các tham số, vì thế cần tiếp tục được cải thiện.

1.7. Mục tiêu và nội dung của luận án

Từ các nội dung trên, luận án đặt ra các mục tiêu sau:

Phát triển phương pháp giải tích để giải quyết bài toán mất ổn định đàn hồi của toàn bộ tiết diện.

Xây dựng công thức dự đoán mô men tới hạn đàn hồi của tiết diện chữ C.

Cải tiến công thức tính toán độ bền uốn theo DSM để áp dụng cho cấu kiện chữ C.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ KHOA HỌC ĐỂ THIẾT LẬP CÔNG THỨC ĐỘ BỀN THEO PHƯƠNG PHÁP DSM

Chương này trình bày các lý thuyết sử dụng trong CHƯƠNG 3 và CHƯƠNG 4.

2.1. Phương pháp xây dựng công thức xác định độ bền uốn theo DSM

2.1.1. Phương pháp xây dựng công thức DSM hiện hành

Quy trình này được Schafer và Peköz sử dụng để xây dựng công thức gốc của DSM dựa trên kết quả của 574 mẫu thí nghiệm chịu uốn.

2.1.2. Công thức DSM điều chỉnh đề xuất bởi Oey và Papangelis

Quy trình thứ hai được thực hiện bởi Oey và Papangelis cũng dùng để xây dựng biểu thức DSM nhưng sử dụng 33 dữ liệu mô phỏng số của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục yếu với bản bụng chịu nén. Các tác giả dùng phân tích ổn định đàn hồi (phương pháp Dải hữu hạn) để tính toán mô men mất ổn định cục bộ, phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến (NLFEA) để xác định độ bền. Mô hình ứng suất-biến dạng được sử dụng là đường cong phi tuyến hai đoạn

Ramberg-Osgood. Khiếm khuyết hình học đã được xem xét trong mô hình thông qua dạng mất ổn định cục bộ đầu tiên. Các hệ số của công thức DSM hiện hành đã được đề xuất điều chỉnh và độ tin cậy của các đề xuất này đã được đánh giá.

2.2. Mô men tới hạn đàn hồi của toàn bộ tiết diện

2.2.1. Phương pháp Hệ số chống xoay

Bleich trình bày phương pháp chia tiết diện thành các tấm thành phần, chịu ảnh hưởng của các tấm lân cận thông qua hệ số chống xoay và được giải quyết theo bài toán mất ổn định của tấm đơn.

2.2.2. Phương pháp xem xét tiết diện như một tổng thể

Bulson đề xuất phương pháp giải bài toán mất ổn định cục bộ của tổ hợp tấm một cách đồng thời nhưng chỉ cho trường hợp chịu nén đều đơn giản.

2.2.3. Tấm chữ nhật chịu ứng suất nén tuyến tính có điều kiện biên tổng quát

Kang đã giới thiệu một phương pháp giải chính xác bài toán mất ổn định của tấm chữ nhật chịu ứng suất nén tuyến tính có điều kiện biên tổng quát sử dụng hàm chuỗi đa thức.

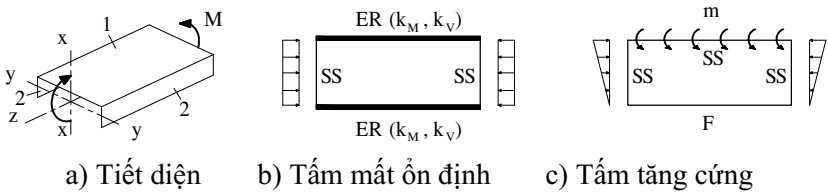
2.3. Nhận xét chương

Chương này đã giới thiệu các lý thuyết về độ bền theo phương pháp DSM, các phương pháp giải tích hiện có để xác định ứng suất tới hạn đàn hồi do mất ổn định cục bộ của toàn bộ tiết diện và nghiên cứu mới nhất về ổn định của tấm mỏng có điều kiện biên tổng quát chịu ứng suất nén phân bố không đều.

CHƯƠNG 3. XÂY DỰNG CÔNG THỨC GIẢI TÍCH ĐỂ XÁC ĐỊNH HỆ SỐ MẤT ỔN ĐỊNH CỤC BỘ CỦA CẦU KIẾN CHỮ C CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG VỚI BÀN BỤNG CHỊU NÉN

Chương này sẽ phát triển phương pháp Độ cứng biên (RSM) dùng để giải quyết mất ổn định cục bộ đàn hồi của toàn bộ tiết diện và sử dụng phương pháp này xây dựng công thức xác định hệ số mất ổn định cục bộ của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.

3.1. Phương pháp Độ cứng biên giải quyết bài toán mất ổn định cục bộ đàn hồi của toàn bộ tiết diện



Hình 3.1 Mô hình tính của phương pháp RSM

Phương pháp Độ cứng biên, viết tắt là RSM, sử dụng các giả thiết sau:

Trạng thái ban đầu của bài toán mất ổn định là trạng thái cân bằng của cầu kiện khi chịu tải trọng;

Tiết diện được cấu tạo từ các tấm liên tiếp;

Tiết diện có dạng hở. Các điều kiện biên ngoài cùng đã biết;

Tiết diện được hình thành bởi các tấm thép đặt vuông góc với nhau. Góc uốn giữa các tấm bị bỏ qua;

Vật liệu làm việc trong giai đoạn đàn hồi.

3.1.1. *Mở rộng bài toán tấm chữ nhật chịu ứng suất phân bố tuyến tính có điều kiện biên tổng quát trên hai cạnh dọc*

Nghiên cứu của Kang về vấn đề ổn định của các tấm chữ nhật chịu ứng suất nén tuyến tính có điều kiện biên tổng quát trên cạnh dọc được mở rộng, biểu diễn dưới dạng ma trận và sử dụng trong phần này.

Các hàm độ võng được biểu diễn bằng chuỗi lũy thừa như sau

$$w = \sum_{i=0}^{\infty} \sin m \cdot C_{m,i}^* \quad (3.1)$$

Từ đó thu được

$$w = K_{m,w} C_m^* \sin m \quad (3.2)$$

$$K_{m,w} = C_m^* \sin m \quad (3.3)$$

$$M_y = K_{m,M} C_m^* \sin m \quad (3.4)$$

$$V_{yT} = K_{m,VT} C_m^* \sin m \quad (3.5)$$

Hệ phương trình cân bằng được viết như sau

$$K_m^* C_m^* = P \quad (3.6)$$

Trong đó K_m^* là ma trận độ cứng 4×4 , được tạo thành bởi bốn ma trận độ cứng phụ K_{m0} , K_{m1} , K_{m2} , và K_{m3} có kích thước 1×4 , mỗi ma trận này có thể là một trong bốn ma trận $K_{m,w}$, $K_{m,\theta}$, $K_{m,M}$, hoặc $K_{m,VT}$ của các biểu thức (3.2) đến (3.5). Khi i tiến tới vô cùng, ma trận độ cứng K_m^* trong biểu thức (3.6) hội tụ tới một ma trận xác định.

3.1.2. *Độ cứng chống xoay trên cạnh dọc của tấm chịu ứng suất nén tuyến tính*

Cho cạnh $y = 0$ chịu mô men $M_0 \sin m$ và xác định góc xoay tương ứng θ , từ đó xác định được độ cứng chống xoay của tấm của cạnh này là

$$k_M \frac{D}{bC_{m,1}} lu \quad (3.7)$$

3.1.3. Độ cứng lò xo

Một tấm tăng cứng thành phần có thể được coi là dầm đàn hồi có sơ đồ đơn giản và chịu tải trọng hình sin. Độ cứng lò xo mà tấm tăng cứng cung cấp cho tấm liên kề được xác định bằng cách chia tải trọng q cho độ võng w

$$k_V = \frac{m^2}{a^2} N_{cr,m} \quad N \quad (3.8)$$

Tiết diện để xác định độ cứng lò xo bao gồm tiết diện tấm tăng cứng và một nửa bề rộng của mỗi tấm liên kề. Lực dọc trục N của tiết diện tăng cứng là tổng của các lực dọc trục N_i của mỗi tiết diện thành phần.

3.1.4. Xác định ứng suất tới hạn của tấm mất ổn định

Độ cứng trên biên của tấm mất ổn định được xác định thông qua quá trình lặp từ tấm ngoài cùng tiến dần tới tấm mất ổn định. Kết quả sinh ra bài toán tìm trị riêng đa thức. Phương pháp giải trình bày trong là phương pháp thử dần với điều kiện định thức của ma trận K_m^* bằng 0.

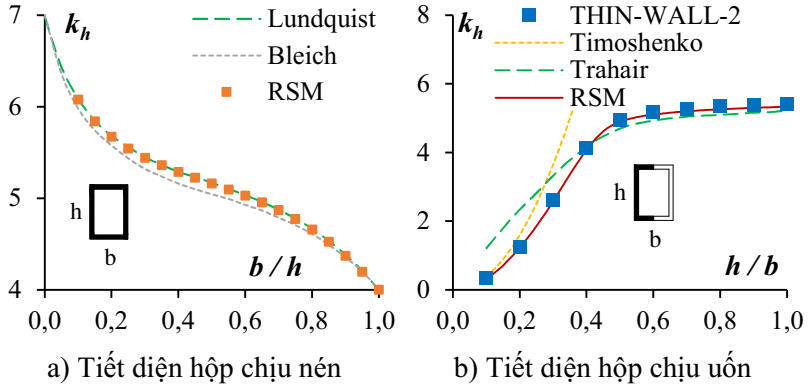
3.1.5. Kiểm chứng phương pháp

Kết quả so sánh của RSM cho thấy phương pháp này cho kết quả tương tự với các phương pháp khác trong tất cả các biểu đồ có sẵn với sai số nhỏ và ở mức 2%. Ngoài ra, kết quả của RSM cũng phù hợp với các phương pháp số khác.

3.1.6. Độ cứng âm

Nghiên cứu này đề xuất sử dụng độ cứng âm. Tấm tăng cứng có thể làm suy yếu tấm mất ổn định bằng cách cung cấp độ cứng âm

thông qua cạnh chung giữa chúng. Do đó, ứng suất tới hạn của tấm tăng cứng sẽ tăng lên trong khi ứng suất tới hạn của tấm mất ổn định lại giảm xuống cho đến khi hai giá trị bằng nhau.



Hình 3.2 Kiểm chứng phương pháp RSM

3.2. Sử dụng phương pháp RSM để xây dựng công thức xác định hệ số mất ổn định của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

Phần này đề xuất các công thức để xác định hệ số mất ổn định của các cấu kiện thành mỏng tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Các công thức này được xây dựng từ quá trình phân tích tham số và hồi quy trên dữ liệu thu được từ phương pháp RSM. Các giả thiết sau được sử dụng:

Tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

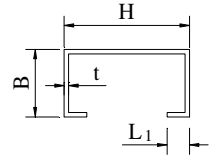
Vật liệu làm việc trong giai đoạn đàn hồi

Cấu kiện bị mất ổn định cục bộ tại bản bụng chịu nén

3.2.1. Phạm vi biến thiên của tham số nghiên cứu

Các thông số thay đổi trong phạm vi:

$H = 200 \text{ mm}$, $B = 15 \sim 500 \text{ mm}$, $L_1 = 0 \sim 90 \text{ mm}$,
 $t = 0,7 \sim 3,2 \text{ mm}$, hình thành nên 1576 mô hình.

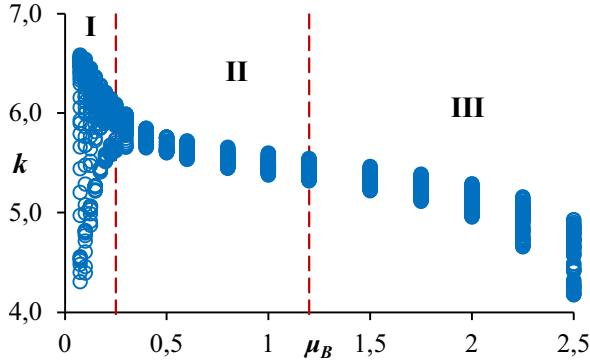


3.2.2. Mô hình và phương pháp tính

Mô hình tính của cầu kiện chịu uốn tiết diện chữ C là dầm đơn giản, được gia tải mô men tập trung ở hai đầu.

3.2.3. Kết quả tính toán và nhận xét

Dạng mất ổn định của tất cả tiết diện nghiên cứu đều là mất ổn định cục bộ của bản bụng.



Hình 3.3 Quan hệ giữa hệ số mất ổn định với tỷ lệ B/H

Hình 3.3 thể hiện kết quả tính toán hệ số mất ổn định theo phương pháp RSM. Sự biến thiên của hệ số mất ổn định theo bề rộng bản cánh (μ_B) trong Hình 3.3 có quy luật rõ ràng và chia làm 3 vùng.

3.2.4. Xây dựng công thức xác định hệ số mất ổn định

Dựa trên Hình 3.3, ứng suất tới hạn đàn hồi tại mặt phẳng trung bình của cầu kiện thành mỏng chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén được đề xuất xác định theo công thức

$$cr \quad k^* \frac{{}^2E}{12 \quad 1 \quad {}^2} \quad \frac{t}{H} \quad {}^2 \quad (3.9)$$

với

$$k^* \quad C \quad C_R k \quad (3.10)$$

$$C_R \quad 1 \quad 0,18 \quad {}_R \quad 34,6 \quad {}_R^2 \quad (3.11)$$

$$C \quad 1,04 \quad 0,04 \quad {}_{0.3} \quad {}_B \quad 0,5 \quad (3.12)$$

$$1,0 \quad {}_B \quad 0,5$$

Bảng 3.1 Hệ số chủ đạo (k) để xác định hệ số mất ổn định

	0,075	_B	_{B0}	_{B0}	_B	1,2	1,2	_B
k_0	$\frac{{}_B}{B0} \quad 0,075$	5,45	${}_{B0}^{0,05}$	5,45	${}_B^{0,05}$	5,73	0,95	${}_b^2$
	$\frac{{}_B}{B0} \quad 0,075$	k_0				0,98	${}_b^2$	${}_b^3$
						0,36	0,2	${}_L \quad {}_b^3$
với	$k_0 \quad 7,2 \quad \frac{0,1}{L}$	0,97	${}_t$	4,2		với	${}_b \quad {}_B$	0,5

Ghi chú

$${}_B \quad \frac{B}{H} \quad {}_t \quad \frac{t}{H} \quad 100 \quad {}_L \quad \frac{L_1}{H}$$

$${}_{B0} \quad 0,21 \quad 0,34 \quad {}_{L}^{0,4} \quad 0,06 \quad {}_t \quad 0,08$$

Phạm vi áp dụng

$$0,075 \quad {}_B \quad 2,5 \quad 0,35 \quad {}_t \quad 1,6 \quad 0 \quad {}_L \quad 0,45$$

3.2.5. Độ tin cậy của công thức đề xuất

Công thức đề xuất trong luận án đã được so sánh với các công thức của Ahdab và Ding và cho thấy độ chính xác cao hơn, như thể hiện trong Bảng 3.2.

Công thức đề xuất trong luận án cũng phù hợp nhất với kết quả mô phỏng của THIN-WALL-2 và CUFSM (xem Hình 3.4).

3.3. Nhận xét chương

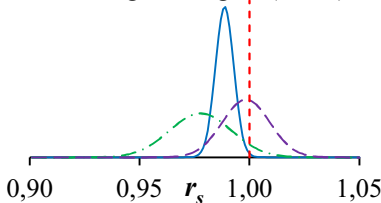
Kết quả kiểm chứng cho thấy RSM có sai số khoảng 2%, qua đó phản ánh độ chính xác và tiềm năng của RSM trong ứng dụng thực tế. Công thức đề xuất trong luận án dùng để tính toán ứng suất tới hạn của cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén có độ chính xác cao hơn so với các công thức đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây.

Bảng 3.2 Độ chính xác của các biểu thức được đề xuất

Đoạn	Công thức đề xuất		Ahdab và cộng sự		Ding và cộng sự	
	$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$
Đoạn 1	-18,4	5,7	-7,3	36,4	-30,1	13,4
Đoạn 2	-5,0	5,6	-6,5	9,9	-23,8	6,8
	(-1,8)	(4)	(-1,9)	(9,9)	(0,7)	(6,8)
Đoạn 3	-0,7	4,2	-20,2	18,2	-	-
Tổng	-18,4	5,7	-20,2	36,4	-30,1	13,4

Nghiên cứu (COV)

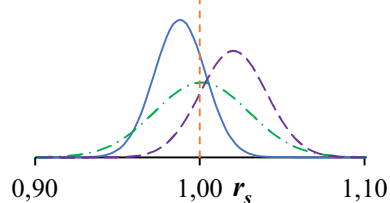
- Đề xuất (0,004)
- - - Ahdab và cộng sự (0,015)
- - - Ding và cộng sự (0,011)



a) Kết quả của THIN-WALL-2

Nghiên cứu (COV)

- Đề xuất (0,016)
- - - Ahdab và cộng sự (0,029)
- - - Ding và cộng sự (0,02)



b) Kết quả của CUFSM

Hình 3.4 Độ tương đồng so với kết quả mô phỏng số

CHƯƠNG 4. ĐỀ XUẤT CẢI TIẾN CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH ĐỘ BỀN CỦA CẦU KIẾN THÉP CHỮ C TẠO HÌNH NGUỘI CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG VỚI BẢN BỤNG CHỊU NÉN

Chương này tiến hành nghiên cứu và đề xuất công thức hiệu chỉnh để nâng cao độ chính xác về khả năng dự đoán độ bền của cầu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.

4.1. Ứng dụng phương pháp phân tích phi tuyến để xác định độ bền

Phương pháp phân tích phi tuyến tính hình học và vật liệu có xét đến các khiếm khuyết (GMNIA) và phần mềm ABAQUS được sử dụng để xác định độ bền.

4.1.1. Mô hình vật liệu

Vật liệu sử dụng bao gồm thép các bon cán nóng (sử dụng mô hình hai đoạn thẳng kết hợp với cứng hóa phi tuyến) hoặc thép cán nguội (sử dụng mô hình Ramberg-Osgood hai đoạn).

4.1.2. Khiếm khuyết hình học ban đầu

Dạng mất ổn định cục bộ của bản bụng được sử dụng để biểu diễn sự phân bố của khiếm khuyết hình học dọc theo chiều dài của cầu kiện với hệ số phóng đại 0,66t.

4.1.3. Xây dựng sơ đồ tính

Mô hình dầm đơn giản được sử dụng để nghiên cứu độ bền của các cầu kiện chữ C chịu uốn thuần túy quanh trục không đối xứng.

4.1.4. Lựa chọn kiểu phần tử tính toán và chia lưới phần tử

Mô hình của cầu kiện được phân chia thành các phần tử tám S4R với kích thước lưới bằng $H/40$.

4.1.5. Lựa chọn bộ mẫu số liệu dùng cho mô phỏng số

Phạm vi biến thiên của các tham số trong khoảng: $H = 100 \sim 400$ mm, $t = 0,8 \sim 3,2$ mm, $B/H = 0,2 \sim 2,5$, $L_1/H = 0,04 \sim 0,18$, $F_y = 250 \sim 550$ MPa. Tổng số tạo nên 1440 mô hình.

4.1.6. Dùng phương pháp EWM để đánh giá công thức DSM hiện hành

Độ bền uốn theo phương pháp EWM của các tiết diện nghiên cứu đã được tính toán. Sự khác biệt giữa kết quả của hai phương pháp EWM và DSM được quan sát với giá trị lớn nhất là 2,6 lần, chứng tỏ DSM cần phải có những cải tiến để chính xác hơn.

4.2. Kiểm chứng mô hình số

Trước khi chính thức xây dựng cơ sở dữ liệu độ bền, quy trình xây dựng mô hình tính sử dụng Python cần được kiểm chứng với các nghiên cứu hiện có để đảm bảo tính chính xác.

4.2.1. So sánh với kết quả của Oey và Papangelis

Độ tương đồng giữa kết quả mô phỏng của luận án và của Oey và Papangelis có giá trị trung bình là 1,014 và COV là 0,011, chứng tỏ rằng mô hình trong nghiên cứu này tương đồng với mô hình sử dụng trong nghiên cứu của Oey và Papangelis.

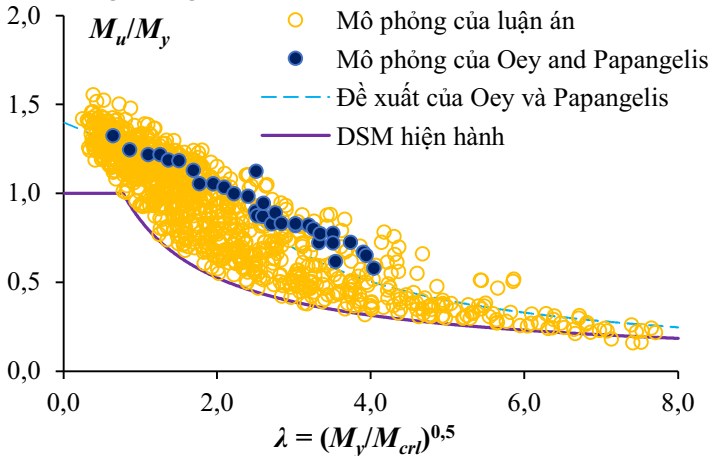
4.2.2. So sánh với kết quả thực nghiệm

Độ bền mô phỏng số trong luận án và độ bền xác định từ kết quả thí nghiệm của Yu, Fan và Winter rất tương đồng, chứng tỏ rằng mô hình trong nghiên cứu này là đáng tin cậy và có thể được sử dụng trong các nội dung tiếp theo.

4.3. Kết quả mô phỏng

Hình 4.1 hiển thị kết quả mô phỏng độ bền của ABAQUS.

Khi phạm vi biến thiên của các tham số hình học đầu vào được mở rộng, đường cong DSM hiện hành gần như nằm dưới tất cả dữ liệu mới với hệ số an toàn rất lớn, thúc đẩy việc cải tiến công thức DSM hiện hành để gia tăng độ chính xác.



Hình 4.1 Kết quả mô phỏng độ bền của ABAQUS

4.4. Đề xuất cải tiến công thức tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén theo phương pháp DSM

4.4.1. Đánh giá kết quả mô phỏng

Dữ liệu độ bền được nhóm theo tỷ lệ B/H . Khi B/H nhỏ, các điểm dữ liệu nằm xa đường cong DSM hiện hành. Khi B/H tăng, độ bền giảm, các điểm dữ liệu hạ thấp dần và tiệm cận đường cong DSM hiện hành tại $B/H = 2,5$. Dạng lũy thừa của công thức DSM hiện hành tiếp tục được quan sát thấy với mọi tỷ lệ B/H . Do đó, các công thức độ bền uốn mới dưới hình thức của công thức DSM hiện hành có thể được đề xuất.

4.4.2. Đề xuất công thức dự đoán độ bền uốn

Các công thức độ bền mới được đề xuất dựa trên công thức DSM hiện hành có xét đến sức kháng dẻo với một số điều chỉnh như sau

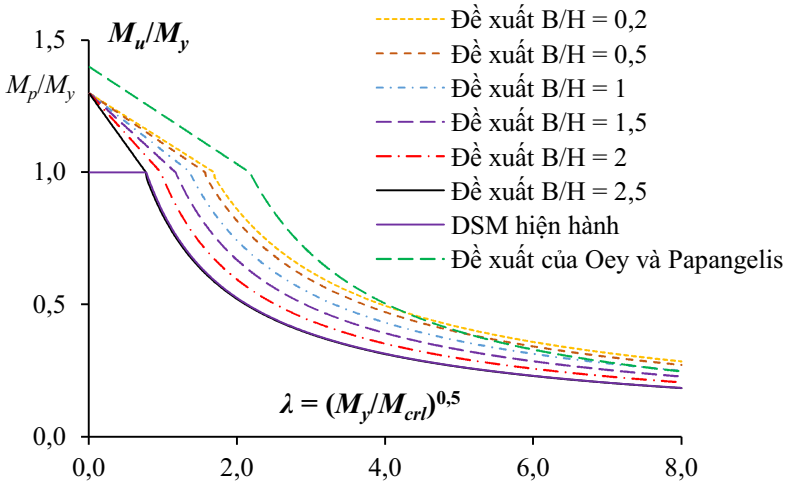
$$\text{Khi } \begin{matrix} 0 & M_u & 1 \\ & / & 0 \end{matrix} \begin{matrix} M_p \\ & / & 0 \end{matrix} \begin{matrix} M_y \\ & / & 0 \end{matrix} \quad (4.1)$$

$$\text{Khi } \begin{matrix} 0 & M_u & C \\ & / & 0 \end{matrix} \begin{matrix} M_{cr} \\ & / & 0 \end{matrix} \begin{matrix} M_y \\ & / & 0 \end{matrix} \quad (4.1)$$

trong đó các hệ số λ_0 , C , và ψ là các hàm của tỷ lệ tiết diện B/H , được xác định bởi

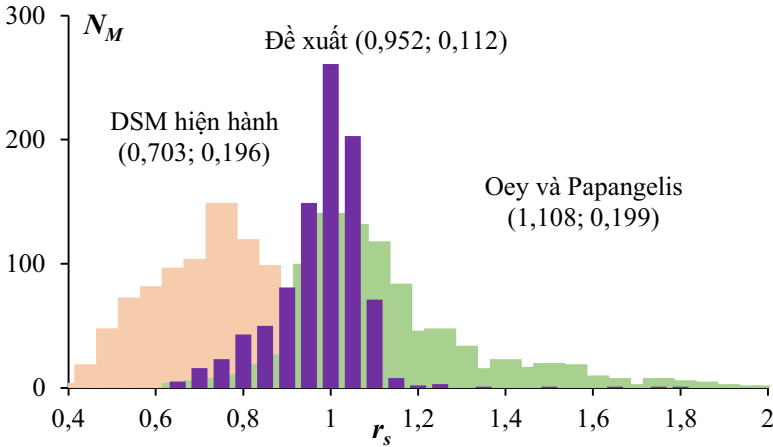
$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 1,77 - 0,4 B/H \\ C &= 1,55 - 0,22 B/H \\ \psi &= 0,065 B/H \end{aligned} \quad (4.2)$$

Kết quả bảng đồ thị được thể hiện trong hình dưới.



Hình 4.2 Đường cong độ bền đề xuất theo tỷ lệ B/H

Kết quả đánh giá công thức DSM đề xuất được thể hiện trên Hình 4.3.

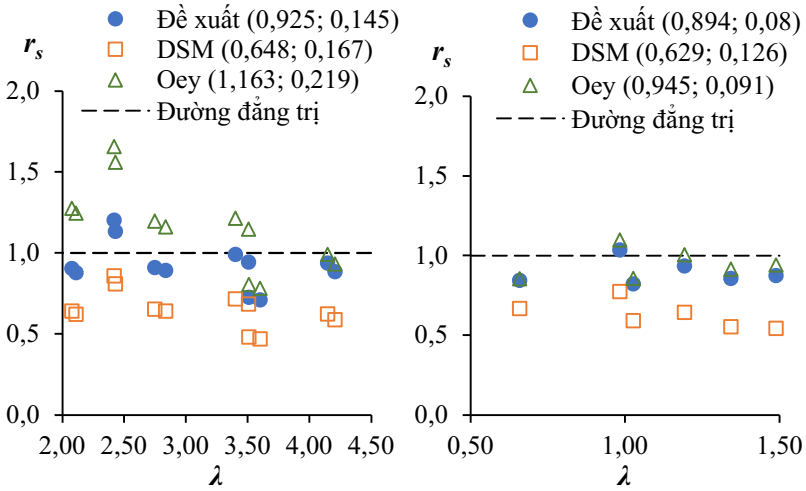


Hình 4.3 Phân phối xác suất của độ tương đồng của các công thức DSM đề xuất và hiện hành

4.5. Kiểm chứng công thức đề xuất

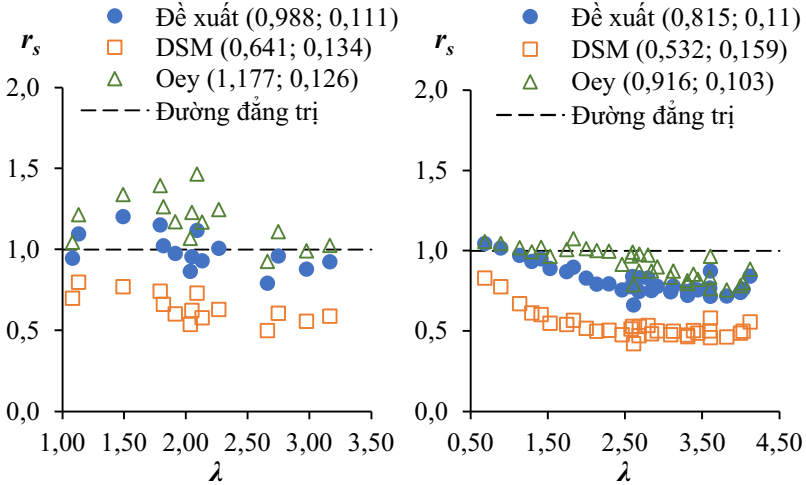
Công thức độ bền đề xuất được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm của Winter, Yu và Laboube, và Fan và cộng sự. Kết quả cho thấy công thức đề xuất trong luận án có độ chính xác cao (độ tương đồng trung bình bằng 0,947), trong khi công thức DSM hiện hành thiên về quá an toàn (độ tương đồng trung bình bằng 0,695), còn công thức do Oey và Papangelis đề xuất thiên về không an toàn (độ tương đồng trung bình bằng 1,101).

Đặc biệt, công thức độ bền đề xuất trong luận án có khả năng dự đoán tốt hơn hai công thức còn lại đối với tỷ lệ tiết diện cao ($B/H = 1,0$) nhưng không vượt trội ở tỷ lệ B/H thấp.



a) Với thí nghiệm của Yu

b) Với thí nghiệm của Fan



c) Với thí nghiệm của Winter

d) Với mô phỏng của Oey

Hình 4.4 Kiểm chứng với kết quả thí nghiệm và mô phỏng số

4.6. Đánh giá độ tin cậy của công thức đề xuất

Chỉ số độ tin cậy được xác định theo tiêu chuẩn AISI S100 tương ứng với hệ số an toàn 0,9 là 2,55 và lớn hơn chỉ số độ tin cậy mục tiêu, qua đó khẳng định độ tin cậy của các công thức đề xuất.

4.7. Ví dụ áp dụng

Một ví dụ đã được trình bày để minh họa cách ứng dụng của công thức độ bền đề xuất trong luận án.

4.8. Nhận xét chương

CHƯƠNG 4 đề xuất biểu thức DSM mới để tính toán độ bền của cấu kiện thành mỏng tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng nén. Công thức đề xuất đã mở rộng hơn và chính xác hơn công thức DSM hiện hành và công thức do Oey và Papangelis đề xuất.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Nhận thấy những mặt hạn chế của công thức độ bền tính theo phương pháp DSM trong tiêu chuẩn AISI S100 khi áp dụng cho tiết diện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén, luận án đã tiến hành nghiên cứu để đề xuất cải tiến độ chính xác của công thức. Một phương pháp xác định hệ số mất ổn định cục bộ của toàn bộ tiết diện (phương pháp Độ cứng biên RSM) đã được xây dựng ở CHƯƠNG 3 kết hợp với công thức thực hành dạng đóng giúp tính toán mô men tới hạn của toàn bộ tiết diện, một trong những giá trị đầu vào cần thiết của công thức tính toán độ bền theo DSM. Phương pháp RSM được phát triển từ phương pháp Hệ số chống xoay của Bleich, với ba cải tiến chính, bao gồm: i) sử dụng hàm

độ võng tổng quát dạng chuỗi lũy thừa thay cho các hàm cụ thể; ii) bổ sung độ cứng kháng uốn (k_V) trong mặt phẳng của các tấm thành phần; iii) đưa ra khái niệm “Bộ phận tăng cứng” có thể bao gồm nhiều bản tăng cứng và dùng quy trình lặp để tính toán độ cứng của bộ phận tăng cứng. Nhờ các cải tiến trên, phương pháp RSM đã được mở rộng cho các cấu kiện có tiết diện và hình thức chịu lực phức tạp, bao gồm cấu kiện tiết diện chữ C chịu uốn.

Mô men tới hạn của toàn bộ tiết diện đã được tính toán theo công thức thực hành được luận án đề xuất ở CHƯƠNG 3 dựa trên kết quả tính toán theo phương pháp RSM. Phân tích phần tử hữu hạn trong ABAQUS đã được sử dụng để tính toán độ bền của 1440 tiết diện sử dụng thép các bon cán nóng và thép cán nguội. Nhờ đó, mối quan hệ giữa độ bền và mô men tới hạn được đánh giá và các điều chỉnh cho công thức DSM hiện hành đã được đề xuất để nâng cao độ chính xác khi áp dụng cho các cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Công thức DSM đề xuất đã được kiểm chứng với nhiều số liệu thí nghiệm và mô phỏng khác nhau.

Trong quá trình thực hiện, luận án đã thu được một số kết quả như sau:

Những đóng góp mới của luận án

1. Xây dựng phương pháp giải tích mới (RSM) để giải quyết bài toán mất ổn định đàn hồi cục bộ của toàn bộ tiết diện. Phương pháp RSM có thể áp dụng cho các tiết diện hở dạng bản thép gấp liên tục với sai số rất nhỏ, khoảng 2% so với các kết quả giải tích và mô phỏng số bằng các phương pháp khác đã được công bố, mở đường cho việc áp dụng phương pháp giải tích cho các dạng tiết diện phức tạp chịu lực tổng quát trong thực tế.

2. Xây dựng công thức thực hành để xác định hệ số mất ổn định của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Ưu điểm so với các công thức đã được đề xuất trước đây bao gồm: hình thức đơn giản hơn; độ chính xác cao hơn (sai số lớn nhất giảm khoảng 2 lần khi so sánh với công thức hiện có của Ding và Ahdab); phạm vi ứng dụng rộng hơn; xét được nhiều yếu tố hơn; giảm sự phụ thuộc vào phần mềm chuyên dụng.

3. Đề xuất công thức độ bền mới theo DSM để áp dụng cho cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Công thức cải tiến thiết lập mối quan hệ của độ bền với tỷ lệ tiết diện B/H , nhờ đó đạt được độ chính xác cao hơn đáng kể (tăng 1,36 lần) so với công thức DSM hiện hành.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án

Mở rộng công thức DSM đề xuất cho các dạng hình học và vật liệu khác, trong đó bao gồm các hợp kim.

Mở rộng công thức DSM đề xuất cho cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu kéo. Sự phát triển độ bền của trường hợp chịu lực này khác với trường hợp bản bụng chịu nén do mất ổn định méo là dạng mất ổn định chủ đạo.

Kiến nghị

Nghiên cứu trong luận án cũng như nhiều nghiên cứu khác đã chỉ ra rằng công thức DSM hiện hành còn tồn tại bất cập khi áp dụng cho cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng. Do đó, đơn vị biên soạn tiêu chuẩn có thể xem xét các đề xuất của luận án để cải thiện độ chính xác của công thức DSM hiện hành.

Ngoài ra, đề xuất của luận án về công thức độ bền trong luận án cho tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục bất đối xứng đã được kiểm chứng với các dữ liệu thí nghiệm cũng như một lượng lớn số liệu mô phỏng, vì vậy có đủ độ tin cậy để các kỹ sư kết cấu và các nhà thiết kế áp dụng cho kết cấu thép tạo hình nguội trong thực tế.

**DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN
QUAN ĐẾN LUẬN ÁN**

1. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, *Enhanced strength prediction of cold-formed lipped channels bent about asymmetrical axis*, Journal of Constructional Steel Research, 2025, Vol. 236. Elsevier B.V. ISSN 0143-974X. **SCIE Q1**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109941>
2. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, *Approximate formula for local buckling in thin-walled channels bent about the asymmetrical axis*, Journal of Constructional Steel Research, 2025, Vol. 232. Elsevier B.V. ISSN 0143-974X. **SCIE Q1**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109647>
3. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, *Local buckling coefficients for thin-walled lipped channels under bending about asymmetrical axis*. Results in Engineering, 2025. Vol. 26. Elsevier B.V. ISSN 2590-1230. **ESCI Q1**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104935>
4. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, *Global Buckling Strength of Girts with Inner Flange in Compression*. Civil Engineering Journal, 2024. Vol. 10. Salehan Institute of Higher Education. ISSN 2676-6957. **Scopus Q1**. DOI: <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-11-05>
5. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, *Convergence study on asymmetrically flexural problem of cold-formed channel sections*. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2024. Vol. 20. ASV Publishing House. ISSN 2587-9618. **Scopus Q3**. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-4-23-30>
6. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham. *Evaluation of the software's reliability in solving the buckling problem of the cold-formed plain c-section member bending about its asymmetrical axis*. in *Structural Health Monitoring & Engineering Structures*

Conference, Da Nang, Vietnam, Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Springer Nature. ISSN 2366-2557. **Scopus**. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-0399-9_62

7. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham. *Calculation Guide of Cold-Formed Channel Girts by AISI S100 Using DSM Analytical Solution*. in *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures, CIGOS 2024*. 2024. Ho Chi Minh City, Vietnam. Springer Nature. ISSN 2366-2557. **Scopus**. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1972-3_20
8. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham. *Behavior of Cold-Formed Channels with a V-shape Web Stiffener Bending About the Asymmetrical Axis*. in *7th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures, CIGOS 2024*. 2024. Ho Chi Minh City, Vietnam. Springer Nature. ISSN 2366-2557. **Scopus**. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1972-3_18
9. Vu, H.H. *Accurate model for simply supported plates*. In *XXVII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2024)*. 2024. E3S Web of Conferences. ISSN 2267-1242. **Scopus**. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453303002>
10. Hoàng V.H. *Kiểm tra độ bền uốn kết hợp của thép tạo hình nguội theo tiêu chuẩn AISI S100 (AISI S100 to check cold-formed flexural members for biaxial bending strength)*. Tạp chí xây dựng. 2024. Số 4. ISSN 2734-9888.
11. Hoàng, V.H., N.T.T. Hương. *Độ bền của cầu kiện chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng theo các phương pháp của Tiêu chuẩn AISI S100 (Ultimate strength of flexural cold-formed channel members subjected to asymmetrical axis bending using AISI S100 methods)*. Tạp chí xây dựng. 2025. Số 11. ISSN 2734-9888.