

NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ TỐI ƯU CỦA SƯỜN TĂNG CƯỜNG DỌC CỦA DẦM CẦU THÉP CHỊU UỐN

Phạm Thái Hoàn^a, Phạm Văn Trung^b, Vũ Quang Việt^{b,*}

^a*Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng, số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

^b*Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam, số 484 Lạch Tray, Hải Phòng, Việt Nam*

Nhận ngày 11/04/2020, Sửa xong 11/09/2020, Chấp nhận đăng 14/09/2020

Tóm tắt

Sườn tăng cường dọc (STCD) thường được sử dụng để tăng cường cho bản bụng của dầm cầu thép có chiều cao lớn nhằm tránh mất ổn định cục bộ của bản bụng, dẫn đến giảm khả năng chịu uốn của dầm. Bài báo này trình bày phương pháp xác định vị trí tối ưu và độ cứng chống uốn yêu cầu của STCD cho dầm cầu thép chịu uốn bằng thuật toán tối ưu sử dụng phương pháp điểm trong (Interior Point Algorithm, IPA). Mô hình phân tử hữu hạn của dầm thép có sườn tăng cường được xây dựng và phân tích bằng phần mềm ABAQUS với lựa chọn phân tích mất ổn định. Thuật toán IPA được sử dụng trong phần mềm MATLAB để xác định vị trí tối ưu và độ cứng chống uốn yêu cầu của STCD bằng cách tối đa hóa giá trị hằng số mất ổn định thu được từ phân tích mất ổn định trong ABAQUS. Kết quả phân tích thu được phù hợp với các kết quả đã công bố trong các nghiên cứu trước đây, cho thấy tính chính xác và tin cậy của phương pháp đề xuất. Bên cạnh đó, bài báo cũng khảo sát ảnh hưởng của tính liên tục của STCD đến vị trí tối ưu và độ cứng chống uốn yêu cầu của STCD của dầm cầu thép.

Từ khoá: phân tích mất ổn định; dầm thép; sườn tăng cường dọc; Abaqus2Matlab; ABAQUS.

DETERMINATION OF OPTIMUM STIFFENER LOCATION OF STEEL PLATE GIRDER BRIDGES UNDER BENDING

Abstract

In recent years, longitudinal stiffeners are commonly used to strengthen for deep girder web in order to avoid web bend-buckling that may lead to a significant reduction of the bending resistance of the girders. This paper presents a method to determine the optimum location and required flexural rigidity of the stiffener of the steel girder bridge under bending by using the Interior Point optimization algorithm (IPA). A finite element (FE) model of stiffened plate girders under bending is developed and analyzed in ABAQUS software using buckling analysis. The IPA algorithm is used in MATLAB to determine the optimum location and required flexural rigidity of the stiffener by maximizing the buckling coefficients obtained from buckling analysis in ABAQUS. In order to ensure the accuracy of the method, the results obtained from this research are compared with analogous results found in the literature. In addition, the effect of continuity of the longitudinal stiffener on its optimum location and required flexural rigidity is also investigated.

Keywords: buckling analysis; steel girders; longitudinal stiffener; Abaqus2Matlab; ABAQUS.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(4V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(4V)-03) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Trong các dầm cầu thép nhịp lớn, dầm thép có bản bụng mảnh thường được sử dụng rộng rãi vì lý do kinh tế. Tuy nhiên, độ mảnh của bản bụng phải được kiểm soát để tránh mất ổn định cục bộ,

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: vietvq@vamaru.edu.vn (Việt, V. Q.)

dẫn đến giảm đáng kể sức kháng uốn của dầm. Để nâng cao độ mảnh và sức kháng oằn của bản bụng, sườn tăng cường dọc (STCD) thường được sử dụng rộng rãi. Khoảng sáu thập kỷ trước đây, vấn đề tối ưu hóa của dầm thép mặt cắt chữ I cũng đã được đề cập, tuy nhiên do chưa có nhiều công cụ tính toán số nên các nghiên cứu chủ yếu sử dụng phương pháp lý thuyết gần đúng hoặc thực nghiệm trên một số lượng nhỏ kết cấu dầm thép với các giả thuyết thiên về an toàn (giả thiết các biên trên và biên dưới của bản bụng được coi là các gối tựa. . .). Điều này dẫn đến các thiết kế thực tế có hệ số an toàn khá lớn và do đó không kinh tế. Tuy nhiên một số kết quả nghiên cứu vẫn được sử dụng trong các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu cho đến ngày nay.

Đối với các nghiên cứu về vị trí tối ưu d_0 của STCD, bằng thí nghiệm cho các dầm thép chữ I mặt cắt đối xứng chịu mô men uốn thuần túy, Dubas [1] và Cooper [2] đã đề xuất vị trí tối ưu của STCD ở tại vị trí $0,2D$ trong đó D là chiều cao của bản bụng tính từ bản cánh chịu nén của dầm. Kết quả này cũng được đề nghị trong một số nghiên cứu gần đây [3–6]. Tuy nhiên, kết quả này chỉ áp dụng được cho trường hợp dầm thép chữ I có mặt cắt đối xứng mà không áp dụng được cho trường hợp mặt cắt không đối xứng. Gần đây, Frank và Helwig [7] đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để xác định vị trí tối ưu của STCD cho dầm thép mặt cắt không đối xứng với giả định biên trên và biên dưới là các gối tựa. Dựa vào kết quả phân tích, các tác giả đã đề xuất vị trí tối ưu ở tại vị trí $0,4D_c$ trong đó D_c là chiều cao miền chịu nén của bản bụng tính từ đỉnh bản bụng của dầm thép. Kết quả này hiện được sử dụng trong tiêu chuẩn AASHTO-LRFD [8]. Gần đây hơn, bằng cách xem xét đến ảnh hưởng của bản cánh dầm thép, Cho và Shin [9] và Elbanna và cs. [10] đã tìm ra vị trí tối ưu của STCD tương ứng ở tại vị trí $0,425D_c$ và $0,42D_c$. Tuy nhiên các nghiên cứu này không đề cập tới việc xác định độ cứng chống uốn yêu cầu, γ_{rq} , của STCD cho dầm thép.

Mục tiêu của nghiên cứu này là đề xuất phương pháp xác định d_0 và γ_{rq} của STCD cho dầm cầu thép chịu uốn có xét đến ảnh hưởng của bản cánh bằng thuật toán tối ưu thông qua việc kết hợp sử dụng hai phần mềm MATLAB [11] và ABAQUS [12]. ABAQUS đóng vai trò là phần mềm phân tích kết cấu còn MATLAB đóng vai trò là phần mềm tối ưu hóa kết cấu. Sự làm việc tương tác qua lại giữa hai phần mềm này được kết nối bằng công cụ Abaqus2Matlab [13]. Thông qua quy trình tối ưu ở trên, vị trí tối ưu d_0 và độ cứng chống uốn yêu cầu γ_{rq} của STCD được đề xuất. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của tính liên tục của STCD đến d_0 và γ_{rq} cũng được xem xét trong nghiên cứu này.

2. Quy trình tối ưu hóa

Các thông số d_0 và γ_{rq} của STCD của dầm thép được xác định thông qua việc tối đa hóa hằng số mất ổn định k_b . Vị trí bố trí STCD trên bản bụng của dầm thép có giá trị k_b lớn nhất sẽ là vị trí tối ưu.

2.1. Hằng số mất ổn định k_b và độ cứng chống uốn γ

Hằng số mất ổn định k_b được xác định dựa trên phân tích mất ổn định trong ABAQUS và dựa vào lý thuyết mất ổn định cổ điển của tấm chịu tải trọng uốn. Từ phân tích mất ổn định trong ABAQUS, các giá trị riêng λ_i được xác định, tuy nhiên ta chỉ cần quan tâm tới giá trị riêng nhỏ nhất λ_{cr} . Từ đó lực tới hạn F_{cr} được xác định dựa theo công thức sau:

$$F_{cr} = \lambda_{cr} Q^N \quad (1)$$

trong đó Q^N là tải trọng ban đầu tác động vào tấm.

Theo lý thuyết mất ổn định cổ điển của tấm chịu tải trọng uốn, lực tới hạn F_{cr} được xác định dựa theo công thức sau:

$$F_{cr} = k_b \frac{\pi^2 E t^3}{12(1 - \nu^2) D} \quad (2)$$

Từ các phương trình (1) và (2), hằng số k_b được xác định.

Trong thực tế, STCD thường được thiết kế có độ cứng chống uốn tối thiểu để đảm bảo không có chuyển vị ngang tại các vị trí tiếp xúc giữa bản bụng và STCD khi bản bụng bị mất ổn định. Độ cứng chống uốn của STCD được xác định theo công thức dưới đây:

$$\gamma = \frac{EI_s}{DD_{plate}} \quad (3)$$

trong đó D_{plate} là độ cứng uốn của bản bụng; I_s là mô men quán tính của STCD được xác định theo điều 6.10.11.3.3 trong tài liệu [8]; D là chiều cao bản bụng; t là chiều dày của bản bụng; ν là hệ số Poisson của thép; E là mô đun đàn hồi của vật liệu thép làm dầm.

2.2. Thiết lập bài toán tối ưu hóa

Mục đích của phần này là thiết lập bài toán để xác định d_0 và γ_{rq} của STCD cho dầm thép chịu uốn. Bài toán được xử lý theo trình tự hai bước như sau:

Bước 1:

Hàm mục tiêu được sử dụng để tối đa hóa giá trị k_b để xác định d_0 của STCD:

$$\text{Tối đa hóa giá trị: } k_b(X) = \frac{12(1 - \nu^2)D}{\pi^2 E t^3} (F(X))_{cr} \quad (4)$$

$$\text{Chịu ràng buộc } 0 \leq X \leq D \quad (5)$$

trong đó biến số thiết kế X là vị trí của STCD.

Bước 2:

Sau khi xác định được vị trí tối ưu của STCD, hàm mục tiêu được sử dụng để tối thiểu hóa giá trị của độ cứng chống uốn γ của STCD, được biểu diễn dưới dạng sau:

$$\text{Tối thiểu hóa giá trị: } \gamma = \frac{EI_s(b_s, t_s)}{DD_{plate}} \quad (6)$$

$$\text{Chịu ràng buộc } 50 \leq b_s \leq 300 \text{ (mm)} \quad (7)$$

$$0 \leq t_s \leq 30 \text{ (mm)} \quad (8)$$

$$b_s - 14t_s \leq 0 \quad (9)$$

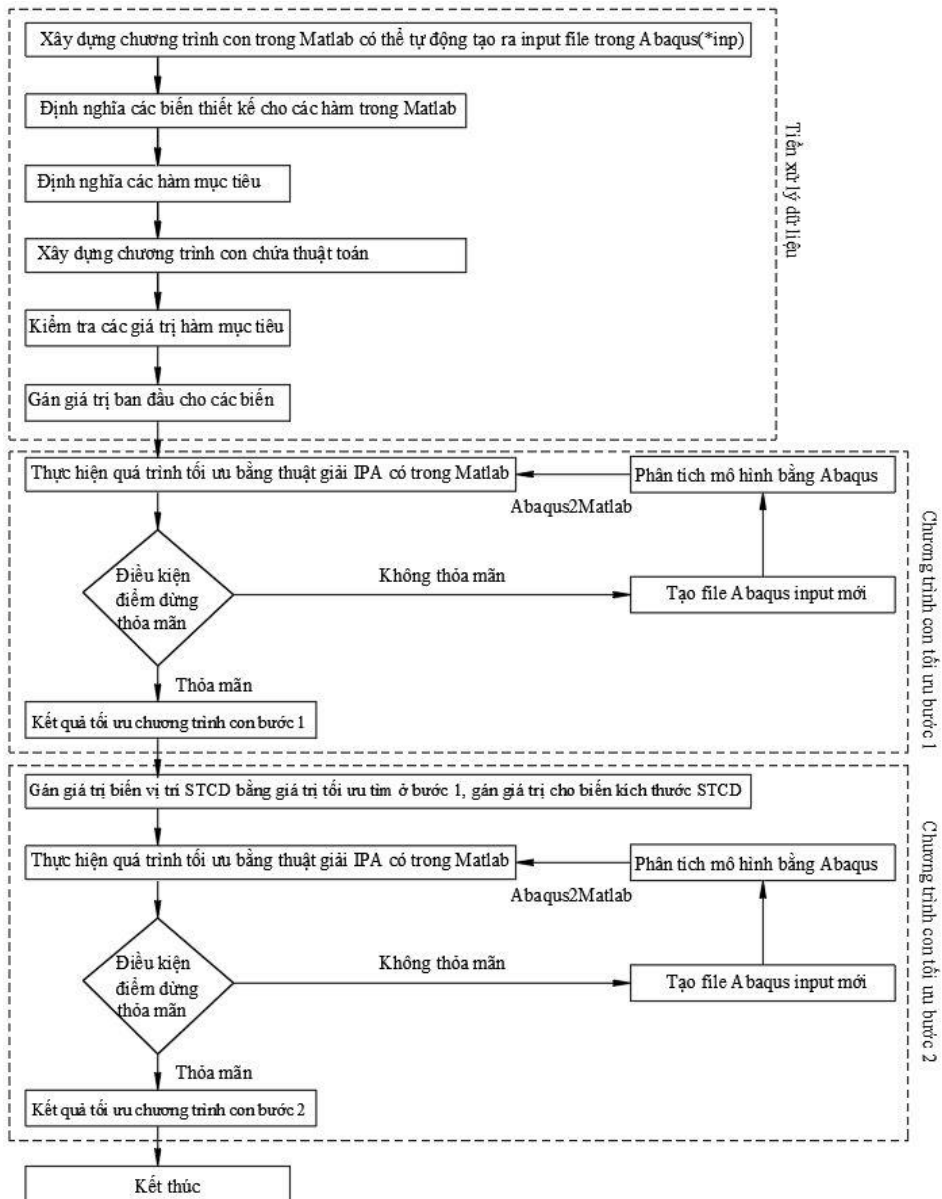
$$dstif - 0,05 \leq 0 \quad (10)$$

trong đó các biến số thiết kế b_s và t_s lần lượt là bề rộng và chiều dày của STCD. Phạm vi biến thiên của b_s và t_s trong (7) và (8) được chọn đã bao gồm tất cả các giá trị có thể được dùng trong thiết kế thực tế. Điều kiện ràng buộc (9) để tránh mất ổn định cục bộ của STCD (căn cứ vào yêu cầu của tiêu chuẩn AASHTO LRFD [8]). Điều kiện ràng buộc (10) nhằm đảm bảo không có chuyển vị ngang tại vị trí tiếp xúc giữa STCD và sườn dầm.

2.3. Thiết lập quy trình tối ưu hóa

Quy trình tối ưu hóa để xác định d_0 và γ_{rq} của STCD của dầm thép chịu uốn và công cụ Abaqus2Matlab [14] được sử dụng cho quy trình tối ưu hóa được thể hiện trong Hình 1. Cần lưu ý rằng công cụ Abaqus2Matlab cho phép dữ liệu được chuyển đổi qua lại giữa hai phần mềm ABAQUS và MATLAB, do đó thuận lợi cho quá trình tối ưu. Quá trình tối ưu hóa thể hiện trong Hình 1 sẽ kết thúc khi tiêu chuẩn dừng được thỏa mãn. Các bước chính của quy trình này bao gồm:

Bước 1: Xây dựng một chương trình con trong Matlab để khi chạy trong Matlab sẽ tự động tạo ra một file ABAQUS input (*.inp).



Hình 1. Sơ đồ quá trình tối ưu hóa theo hai bước

Bước 2: Định nghĩa các biến trong chương trình con được xây dựng ở trên (bao gồm biến vị trí và biến kích thước của STCD).

Bước 3: Định nghĩa các hàm mục tiêu cho bài toán tối ưu như được đề cập trong mục 2.2.

Bước 4: Xây dựng một chương trình con chính chứa thuật toán tối ưu có sẵn trong thư viện của MATLAB (sử dụng hàm *fmincon*). Trong chương trình con này cũng định nghĩa các giá trị khởi tạo ban đầu cho các biến thiết kế.

Bước 5: Tính toán các giá trị của các hàm mục tiêu. Kết quả thu được từ phân tích mất ổn định trong ABAQUS sẽ được chuyển sang MATLAB để tính toán các giá trị của hàm mục tiêu phục vụ cho quá trình tối ưu hóa.

Bước 6: Thực hiện quá trình tối ưu hóa sử dụng thuật toán IPA. Chi tiết mô tả thuật toán IPA được trình bày trong tài liệu [4].

Bước 7: Kiểm tra điều kiện dừng đã thỏa mãn hay chưa. Nếu điều kiện dừng đã thỏa mãn, quá trình tối ưu sẽ kết thúc, nếu chưa thỏa mãn sẽ chuyển sang bước tiếp theo.

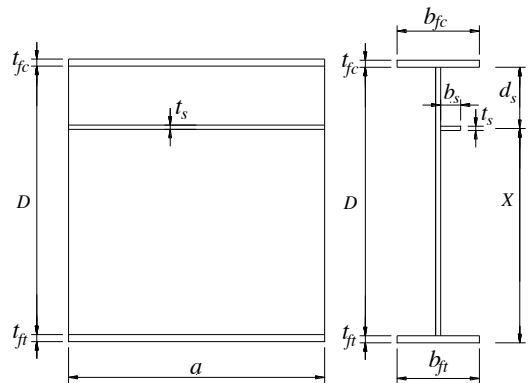
Bước 8: Khởi tạo file ABAQUS input mới bằng cách thay đổi giá trị của biến thiết kế.

Bước 9: Tiến hành phân tích mô hình ABAQUS tương ứng với giá trị biến mới.

Bước 10: Lặp lại các bước từ 6-9 cho đến khi hội tụ thỏa mãn yêu cầu điểm dừng.

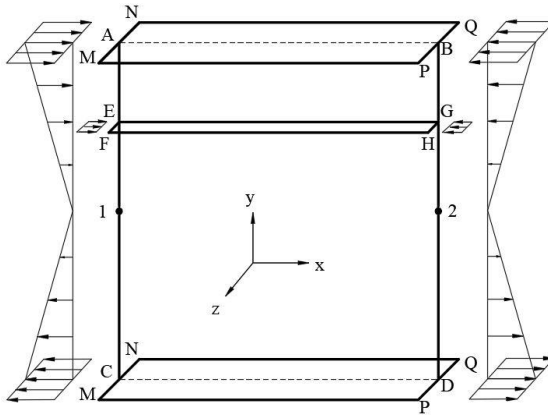
2.4. Mô hình phần tử hữu hạn

Mô hình phần tử hữu hạn của dầm thép có STCD được xây dựng sử dụng phần mềm ABAQUS nhằm xác định giá trị riêng nhỏ nhất thu được từ phân tích mất ổn định, từ đó xác định được hằng số k_b . Hình 2 minh họa kích thước hình học của dầm thép được sử dụng trong nghiên cứu này. Để giảm thời gian tính toán, phân tích kết cấu, nghiên cứu này chỉ khảo sát một đoạn dầm với các điều kiện về tải trọng và điều kiện biên được đặt vào để có thể tạo ra ứng xử uốn trong đoạn dầm tương đương với ứng xử uốn của một dầm thông thường. Chiều cao và chiều dày của bản bụng được chọn lần lượt là $D = 3000$ mm và $t_w = 9$ mm, chiều rộng và chiều dày bản cánh trên và bản cánh dưới được chọn lần lượt là $b_{fc} = 600$ mm và $t_{fc} = 54$ mm. Các thông số hình học của dầm được lựa chọn tương tự trong nghiên cứu trước đây [10] với mục đích kiểm chứng các kết quả thu được từ mô hình phần tử hữu hạn. Các thuộc tính vật liệu của thép sử dụng bao gồm mô đun đàn hồi $E = 210000$ N/mm², hệ số Poisson là 0,3. Phần tử tám S4R được sử dụng để mô phỏng cho tất cả các bộ phận của kết cấu thép thành mỏng cho độ chính xác cao [5, 6, 15–20]. Kích thước lưới phần tử sử dụng là 40 mm. Lưu ý rằng kích thước phần tử được lựa chọn cẩn thận thông qua phân tích sự hội tụ của mô hình như đã được trình bày trong tài liệu tham khảo [4]. Tải trọng và điều kiện biên sử dụng trong mô hình phần tử hữu hạn được thể hiện như trong Hình 3.



Hình 2. Mô tả kích thước của dầm thép có STCD

Các kết quả thu được từ phân tích mô hình phần tử hữu hạn này được so sánh với các kết quả trong nghiên cứu của Elbanna và cs. [10] nhằm kiểm chứng tính chính xác của mô hình mô phỏng. Bảng 1 trình bày kết quả so sánh giá trị hằng số k_b thu được từ nghiên cứu này và nghiên cứu của Elbanna và cs. [10] đối với các vị trí bố trí STCD (d_s) khác nhau và các tỷ số chiều dài trên chiều cao bản bụng dầm ($\varphi = \frac{a}{D}$) khác nhau.



Biên	U_x	U_y	U_z	θ_x	θ_y	θ_z
AB & CD	-	-	-	-	-	-
AC & BD	-	-	R	-	-	-
MN & PQ	-	-	R	R	R	-
EF & GH	-	-	R	R	R	-
Điểm 1	R	R	-	-	-	-
Điểm 2	-	R	-	-	-	-
-	Chuyển vị tự do		R	Hạn chế chuyển vị		

Hình 3. Tải trọng và điều kiện biên trong mô hình phần tử hữu hạn

Bảng 1. So sánh hằng số k_b giữa nghiên cứu này và của Elbanna và cs. [10]

φ	Vị trí STCD d_s	Hệ số k_b		Khác nhau (%)	
		Mô hình PTHH	Elbanna và cs. [10]		
1,0	0,1D	71,49	71,58		0,13
	0,21D	176,50	177,25		0,42
	0,4D	69,47	68,85		0,89
2,0	0,1D	70,88	71,04		0,23
	0,21D	176,94	180,07		1,74
	0,4D	68,71	67,76		1,38

Từ kết quả của Bảng 1 có thể thấy rằng sự khác nhau của hệ số k_b thu được từ mô hình phần tử hữu hạn trong nghiên cứu này và của Elbanna và cs. [10] là rất nhỏ ở tất cả các trường hợp so sánh. Do đó có thể kết luận rằng mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trong nghiên cứu này là đáng tin cậy và có thể sử dụng cho quá trình tối ưu hóa.

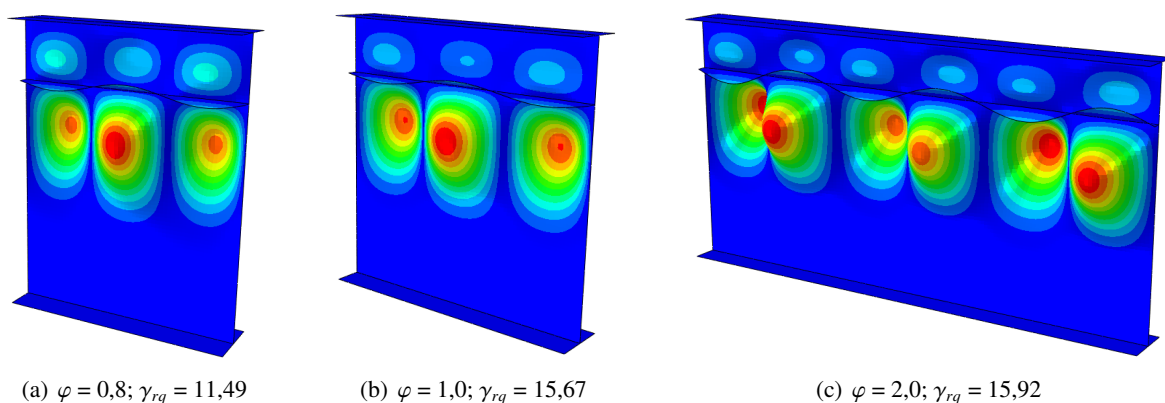
3. Tối ưu hóa vị trí và độ cứng chống uốn yêu cầu của STCD

Trong mục này, quy trình tối ưu hóa đã đề cập ở mục 2.3 được sử dụng để xác định d_0 và γ_{rq} của STCD. Để xét đến ảnh hưởng của tỷ số chiều dài trên chiều cao của bản bụng, các tỷ số $\varphi = 0,8; 1$ và 2 đã được sử dụng. Tỷ số giới hạn độ mảnh của bản bụng và bản cánh được cố định với giá trị lần lượt là $\lambda_w = 333,33$ và $\lambda_{bf} = 11,11$. Kết quả tối ưu hóa được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tối ưu hóa d_0 và γ_{rq} của STCD

φ	d_0/D	d_0/D_c	b_s	b_s/t_s	t_s	γ_{rq}
0,8	0,21	0,42	103,44	11,87	8,71	11,49
1	0,21	0,42	113,15	11,91	9,50	15,67
2	0,21	0,42	113,67	11,91	9,54	15,92

Có thể nhận thấy từ Bảng 2, vị trí tối ưu của STCD đạt được tại $d_0/D = 0,21$ tính từ mép dưới của bản cánh dưới của dầm thép đối với các tỷ số φ khác nhau. Kết quả này hoàn toàn trùng hợp với kết quả thu được từ nghiên cứu của Elbanna và cs. [10]. Rõ ràng rằng với dầm thép đối xứng (có bản cánh trên và bản cánh dưới giống nhau), thì vị trí tối ưu mà có xét đến ảnh hưởng của bản cánh là $d_0/D_c = 0,42$. Kết quả này cũng đã được đề xuất bởi Kim và cs. [19] và gần giống với kết quả thu được từ nghiên cứu của Cho và Shin [9] với $d_0/D_c = 0,425$. Các kết quả này có độ chính xác cao hơn so với quy định trong tiêu chuẩn AASHTO LRFD [8] với vị trí tối ưu của STCD được quy định tại $d_0/D_c = 0,4$ cho dầm thép có mặt cắt không đối xứng. Nguyên nhân là do d_0 của STCD được đề xuất bởi AASHTO LRFD [8] đã dựa vào nghiên cứu của Frank và Helwig [7], trong đó ảnh hưởng của các bản cánh của dầm thép không được kể đến. Các dạng mất ổn định của dầm khi STCD được đặt tại vị trí tối ưu của nó được thể hiện trên Hình 4. Có thể thấy khi STCD được đặt tại vị trí tối ưu thì mất ổn định cục bộ đã xảy ra cả ở phần bản bụng phía trên và phía dưới STCD. Dạng mất ổn định cục bộ của phần bản bụng phía dưới STCD được thể hiện là các nửa bước sóng hình sin.



Hình 4. Các dạng mất ổn định của dầm thép tương ứng với các tỷ số φ khác nhau

Bên cạnh đó, Bảng 2 cũng thể hiện các giá trị γ_{rq} của STCD tương ứng với các tỷ số φ khác nhau cho dầm thép có $\lambda_w = 333,33$ và $\lambda_{bf} = 11,11$. Các kết quả này được so sánh với kết quả thu được từ công thức xác định γ_{rq} quy định trong tiêu chuẩn AASHTO LRFD [8] và được thể hiện ở Bảng 3.

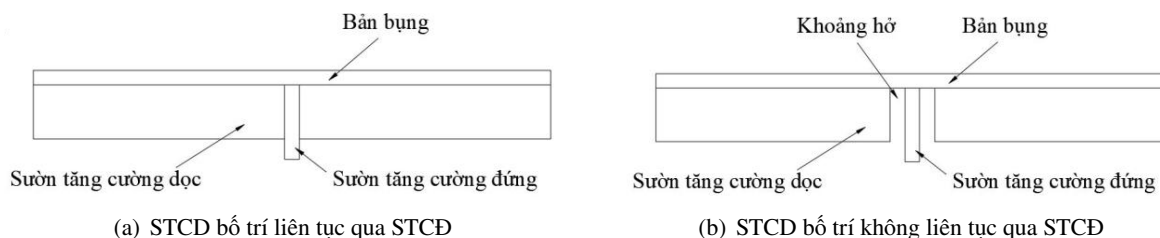
Bảng 3. So sánh γ_{rq} giữa nghiên cứu này và tiêu chuẩn AASHTO LRFD [8]

φ	γ_{rq}			
	Nghiên cứu này	Tài liệu [4]	Tài liệu [6]	AASHTO LRFD [8]
0,8	11,49	11,34	10,98	15,35
1,0	15,67	15,83	15,74	24,79
2,0	15,92	38,33	37,76	103,41

Có thể nhận thấy giá trị γ_{rq} thu được từ nghiên cứu này thấp hơn rất nhiều giá trị đề xuất theo AASHTO LRFD, đặc biệt khi tỷ số φ tăng. Phát hiện này cũng đã được báo cáo trong các nghiên cứu [4, 6]. Nguyên nhân giá trị γ_{rq} đề xuất trong tiêu chuẩn lớn hơn nhiều so với nghiên cứu này là do khi tính toán theo tiêu chuẩn dầm thép được giả thiết như một tấm có bốn biên tựa trên các gối tựa và bỏ qua sự ảnh hưởng của bản cánh dầm thép.

4. Ảnh hưởng của tính liên tục của STCD

Trong thiết kế thực tế, STCD có thể được bố trí liên tục hoặc không liên tục qua sườn tăng cường đứng (STCĐ) như Hình 5.

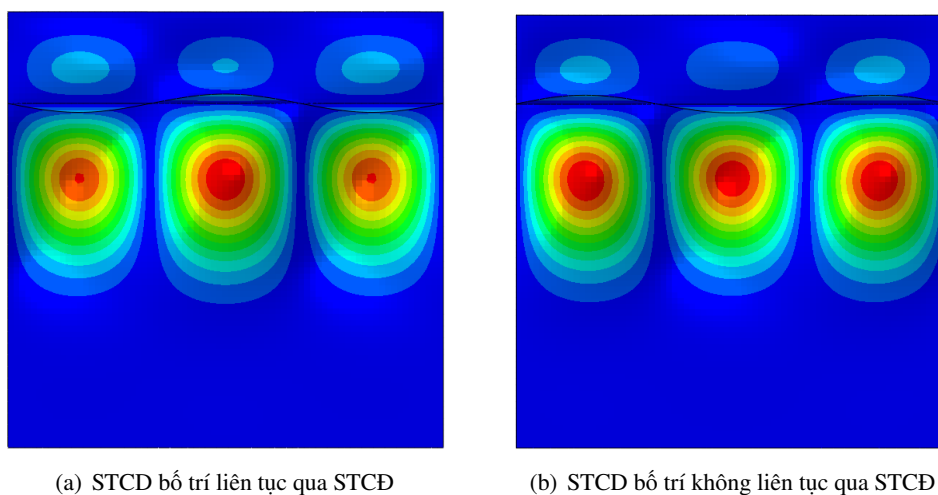


Hình 5. Các dạng bố trí STCD

Để kể đến ảnh hưởng của tính liên tục của STCD, tải trọng sẽ được đặt vào vị trí STCD như Hình 3. Ngược lại, để xét đến tính không liên tục của STCD thì sẽ không đặt tải trọng vào vị trí hai đầu của STCD. Quy trình tối ưu hóa được thực hiện tương tự như đã trình bày trong mục 2. Kết quả so sánh ảnh hưởng của tính liên tục của STCD đến d_0 và γ_{rq} của STCD được thể hiện trong Bảng 4 trong khi Hình 6 so sánh các dạng mất ổn định cục bộ của hai trường hợp này.

Bảng 4. Ảnh hưởng của tính liên tục của STCD

φ	STCD bố trí liên tục		STCD bố trí không liên tục	
	d_0/D_c	γ_{rq}	d_0/D_c	γ_{rq}
0,8	0,42	11,49	0,412	12,36
1,0	0,42	15,67	0,411	15,95
2,0	0,42	15,92	0,410	16,51



Hình 6. Các dạng mất ổn định cục bộ tương ứng với việc bố trí STCD

Có thể nhận thấy từ Bảng 4, khi STCD được bố trí không liên tục qua STCĐ thì vị trí tối ưu của STCD nằm cách mép dưới của bản cánh dưới một đoạn khoảng $0,41D_c$, trong khi nếu được bố trí liên tục qua STCĐ thì vị trí tối ưu của nó là $0,42D_c$. Bên cạnh đó, khi STCD bố trí không liên tục thì độ cứng chống uốn yêu cầu của nó cao hơn so với trường hợp bố trí STCD liên tục qua STCĐ.

5. Kết luận

Bài báo này đã trình bày một phương pháp xác định vị trí tối ưu và độ cứng chống uốn yêu cầu của STCD của dầm cầu thép chịu uốn bằng thuật toán tối ưu IPA thông qua việc kết hợp sử dụng hai phần mềm thương mại ABAQUS và MATLAB. Công cụ Abaqus2Matlab đã được sử dụng để chuyển đổi dữ liệu qua lại giữa hai phần mềm này nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình tối ưu hóa do đó tận dụng tối đa hiệu quả của hai phần mềm ABAQUS và MATLAB trong quy trình tối ưu. Một số kết luận có thể được rút ra như sau:

- Vị trí tối ưu của STCD của dầm thép chịu uốn nằm cách mép dưới bản cánh trên của dầm thép một khoảng lần lượt là $0,42D_c$ và khoảng $0,41D_c$ cho trường hợp bố trí STCD liên tục và không liên tục qua STC đứng.
- Độ cứng chống uốn yêu cầu theo đề xuất của tiêu chuẩn AASHTO LRFD là quá an toàn.
- Việc giả thiết STCD bố trí liên tục hoặc không liên tục qua STCĐ ảnh hưởng đáng kể đến vị trí tối ưu và độ cứng chống uốn yêu cầu của STCD.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2019.322.

Tài liệu tham khảo

- [1] Dubas, C. (1948). A contribution to the study of buckling of stiffened plates. *3rd Congr. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, page 129.
- [2] Cooper, P. B. (1970). Strength of longitudinally stiffened plate girders. *J. Struct. Div.*, 93.
- [3] Maiorana, E., Pellegrino, C., Modena, C. (2011). Influence of longitudinal stiffeners on elastic stability of girder webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(1):51–64.
- [4] Alinia, M. M., Moosavi, S. H. (2008). A parametric study on the longitudinal stiffeners of web panels. *Thin-Walled Structures*, 46(11):1213–1223.
- [5] Vu, Q.-V., Papazafeiropoulos, G., Graciano, C., Kim, S.-E. (2019). Optimum linear buckling analysis of longitudinally multi-stiffened steel plates subjected to combined bending and shear. *Thin-Walled Structures*, 136:235–245.
- [6] Vu, Q.-V., Truong, V.-H., Papazafeiropoulos, G., Graciano, C., Kim, S.-E. (2019). Bend-buckling strength of steel plates with multiple longitudinal stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 158:41–52.
- [7] Frank, K. H., Helwig, T. A. (1995). Buckling of webs in unsymmetric plate girders. *Engineering Journal*, 32(2):43–53.
- [8] AASHTO (2012). *AASHTO LRFD, Bridge design specifications*. Sixth.
- [9] Cho, E.-Y., Shin, D.-K. (2011). Elastic web bend-buckling analysis of longitudinally stiffened I-section girders. *International Journal of Steel Structures*, 11(3):297–313.
- [10] Elbanna, A. A., Ramadan, H. M., Mourad, S. A. (2014). Buckling enhancement of longitudinally and vertically stiffened plate girders, *J. Engineering Appl. Sci.*, 61:351–370.
- [11] [11]MathWorks, Inc. (2017). *MATLAB R2017b*.
- [12] ABAQUS (2014). *Analysis User's Manual version 6.14*. Dassault Systems.

- [13] Papazafeiropoulos, G., Muñoz-Calvente, M., Martínez-Pañeda, E. (2017). [Abaqus2Matlab](#).
- [14] Papazafeiropoulos, G., Muñoz-Calvente, M., Martínez-Pañeda, E. (2017). [Abaqus2Matlab: a suitable tool for finite element post-processing](#). *Advances in Engineering Software*, 105:9–16.
- [15] Viet, V. Q., Ha, H., Hoan, P. T. (2019). [Evaluation of ultimate bending moment of circular concrete-filled double skin steel tubes using finite element analysis](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 13(1):21–32.
- [16] Eom, S.-S., Vu, Q.-V., Choi, J.-H., Park, H.-H., Kim, S.-E. (2019). [Flexural behavior of concrete-filled double skin steel tubes with a joint](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 155:260–272.
- [17] Việt, V. Q., Hùng, T. V., Hoàn, P. T. (2019). [Nghiên cứu khả năng chịu uốn của ống tròn hai lớp thép nhồi bê tông có liên kết mối nối bằng mô phỏng phần tử hữu hạn](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 13(4V):115–128.
- [18] Truong, V.-H., Papazafeiropoulos, G., Pham, V.-T., Vu, Q.-V. (2019). [Effect of multiple longitudinal stiffeners on ultimate strength of steel plate girders](#). *Structures*, Elsevier, 22:366–382.
- [19] Kim, H. S., Park, Y. M., Kim, B. J., Kim, K. (2018). [Numerical investigation of buckling strength of longitudinally stiffened web of plate girders subjected to bending](#). *Structural Engineering and Mechanics*, 65(2):141–154.
- [20] Do, Q. T., Huynh, V. N., Tran, D. T. (2020). [Numerical studies on residual strength of dented tension leg platforms under compressive load](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 14(3):96–109.