

Nghiên cứu và tính toán sự làm việc của các liên kết điển hình trong kết cấu thép của các công trình dân dụng và công nghiệp

■ **ThS. TRẦN VĂN TÙNG^(*); TRẦN MINH HẢI**

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email: ^(*)tungtv@vamaru.edu.vn

TÓM TẮT: Trong những năm gần đây, kết cấu thép đã trở nên ngày càng phổ biến không chỉ trong các công trình công nghiệp mà còn trong các công trình nhà dân dụng. Xuất phát từ nhu cầu thực tế như vậy, việc nghiên cứu và tối ưu hóa khung thép là yêu cầu cần thiết để đem tính hiệu quả về mặt kỹ thuật và kinh tế.

Nghiên cứu về sự làm việc của khung kết cấu thép, ngoài việc tập trung vào kiểm tra tính bền và ổn định của các cấu kiện chính thì việc phân tích các nút liên kết cũng đóng vai trò quan trọng. Nếu liên kết không đủ khả năng chịu lực, nó có thể là nguyên nhân dẫn đến sự phá hoại toàn bộ công trình. Trong bài báo này, tác giả tập trung vào phân tích các dạng liên kết như liên kết cứng, mềm và nửa cứng. Đối tượng phân tích sẽ chủ yếu là liên kết giữa các cấu kiện chính như dầm, cột vì có nội lực tương đối lớn để nêu bật sự khác nhau đối với từng loại liên kết khi phân tích.

Dựa vào lý thuyết và phần mềm phân tích theo phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán chính xác sự làm việc của các liên kết, so sánh và lựa chọn dạng liên kết lý thuyết phù hợp với từng liên kết thực tế của công trình thép dân dụng.

TỪ KHÓA: Liên kết cứng, liên kết nửa cứng.

ABSTRACT: In recent years, steel structures have become increasingly prevailing not only in industrial buildings but also in civil ones. Originating from such practical demands, research and optimization of steel frames is a necessary requirement to bring about technical and economic efficiency.

Research on the performance of steel structural frames, in addition to focusing on checking the durability and stability of the main components, analyzing the connection nodes also plays a vital role. If the connection is not strong enough to bear the force, it can lead to the destruction of the entire structure. In this topic, the author focuses on analyzing types of connections such as rigid, pin, and semi-rigid connections. The object of analysis will mainly be the connection between main components such as beams and columns because

there are relatively large internal forces to highlight the differences for each type of connection when analyzing.

Based on theory and analytical software using the finite element method to accurately calculate the working of the connections, then make a comparison and choose a theoretical connection type to be aligned with each actual connection of civil steel constructions.

KEYWORDS: Rigid connection, semi-rigid connection.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Một số loại thép phổ biến được sử dụng trong kết cấu xây dựng nêu ra bởi Tiêu chuẩn ASTM như sau:

- Thép carbon loại: A36/A366M, A53/A53M, A500 và A501 và A529/529M, hàm lượng carbon trong thép càng cao thì độ cứng và độ bền cũng tăng theo.

- Thép hợp kim thấp cường độ cao loại: A572/A572M. Đây là loại thép hợp kim thấp cường độ cao rất thông dụng dùng cho thép hình và thép tấm với hàm lượng hợp kim giới hạn nhỏ hơn 10%.

- Thép hợp kim và hợp kim thấp được nhiệt luyện loại: A852/A852M, A514/A514M với đặc tính cơ học, cường độ chảy dẻo rất cao.

Phân loại các phương pháp thiết kế:

- Phương pháp thiết kế theo độ bền cho phép ASD.

- Phương pháp thiết kế theo hệ số tải trọng và hệ số sức kháng LRFD: Theo độ bền thiết kế.

2. CÁC LOẠI HỆ KHUNG CHỊU TẢI TRỌNG NGANG TRONG KẾT CẤU THÉP

2.1. Hệ thanh giằng

- Dễ dàng thiết kế kết cấu để chịu tải trọng ngang (thường gây ra bởi gió và động đất) và giúp giảm khối lượng dầm và hầu hết các cột (thanh giằng nhận tiếp nhận tải trọng ngang do đó cột chỉ chịu nén);

- Các liên kết trong công trình có thể chỉ gồm ứng xử chịu lực dọc và lực cắt, do đó sẽ nhẹ và tiết kiệm.

2.2. Hệ khung chịu mô-men (khung cứng)

- Tận dụng hoàn toàn không gian của các nhịp mà không có bất kỳ cản trở nào;

- Với liên kết khớp tại chân đế sẽ giúp tiết kiệm về chi phí phần nền móng (ngay cả đối với hệ giằng, vì nó có thể tạo lực kéo và đòi hỏi những cấu tạo chịu kéo phức tạp và tốn kém hơn);

- Bền vững khi chịu tải trọng động đất.

2.3. Hệ khung với liên kết ngàm ở chân đế

- Không hạn chế không gian sử dụng;
- Kích thước cột lớn tạo cảm giác an toàn và chắc chắn hơn cho công trình;

- Khả năng chịu tải động đất kém (Tiêu chuẩn ASCE không khuyến khích sử dụng hệ kết cấu này cho những công trình thuộc vùng thường xuyên có động đất).

3. PHÂN LOẠI LIÊN KẾT TRONG KẾT CẤU THÉP

3.1. Liên kết mô-men ngàm hoàn toàn

- Liên kết mô-men ngàm hoàn toàn là liên kết với nút cứng hay liên kết liên tục.

- Mô-men ngàm hoàn toàn còn được biết đến như là liên kết với nút khung cứng hay liên kết liên tục. Liên kết mô-men ngàm hoàn toàn có độ cứng đủ để giữ cho không xuất hiện góc xoay tương đối giữa các cấu kiện liên kết.

3.2. Liên kết khớp

Liên kết khớp chịu cắt, hay còn gọi là liên kết khớp được lý tưởng hóa với độ cứng xoay bằng không và cấu kiện được đỡ tự do xoay. Tuy nhiên, trong thực tế, liên kết vẫn có khả năng kháng một lượng mô-men nhất định.

3.3. Liên kết mô-men bán phần (nửa cứng)

Ứng xử của liên kết mô-men nửa cứng đó là cho phép một góc xoay tương đối xuất hiện. Nó mang tính trung gian về góc xoay giữa loại liên kết chịu cắt đơn giản và liên kết ngàm hoàn toàn. Liên kết mô-men nửa cứng được phép sử dụng khi có đủ những dữ liệu sát thực để xác định được phần trăm độ cứng của liên kết so với ngàm hoàn toàn.

3.4. Phân tích các chi tiết liên kết

3.4.1. Liên kết bu-lông

3.4.1.1. Trạng thái liên kết của bu-lông

Có 2 trạng thái liên kết bu-lông thường được sử dụng:

a) Liên kết giới hạn trượt (Slip-critical connection)

Còn được gọi là liên kết ma sát, nghĩa là kiểm soát không cho phép trượt xảy ra.

* Ứng dụng:

- Sự trượt được xem là ảnh hưởng tới khả năng làm việc của kết cấu do biến dạng quá mức hoặc là nguyên nhân dẫn đến sự giảm khả năng chịu lực hoặc ổn định cho kết cấu;

- Liên kết cần xem vấn đề mối hoặc liên kết dùng kích thước lỗ bu-lông to quá cỡ hoặc lỗ dạng rãnh song song với hướng của tải.

b) Liên kết loại chịu ép mặt (Bearing-type connection)

- Được sử dụng khi vấn đề trượt không là yếu tố quyết định phá hoại và liên kết bắt đầu trượt khi chịu tải trọng (nghĩa là vẫn cho phép trượt xảy ra);

- Với những liên kết chịu mỏi, liên kết bu-lông chịu kéo cường độ cao và tất cả liên kết loại giới hạn trượt phải được căng trước một lực kéo, lực căng trước vào khoảng 70% cường độ chịu kéo tối thiểu của bu-lông.

3.4.1.2. Khả năng chịu lực của bu-lông.

- Độ bền chịu lực của 1 bu-lông đơn:

$$R_n \leq \phi R_n; \phi = 0,75(LRFD) \quad (1)$$

Trong đó:

R_n - Độ bền chịu lực danh nghĩa được tính toán như sau:
a) Độ bền chịu kéo đứt cho 1 bu-lông.

$$R_n = F_u(0,75A_b) = F_u A_b \quad (2)$$

Trong đó:

F_{nt} - Ứng suất kéo danh nghĩa của bu-lông, bằng $0,75F_u$;

F_u - Ứng suất tới hạn bu-lông;

A_b - Diện tích nguyên của mặt cắt ngang qua phần không chứa ren (mm^2).

b) Độ bền chịu cắt đứt cho 1 bu-lông.

$$R_n = 0,9m A_s(0,625F_u) = (0,563)m A_s = F_m m A_b \quad (3)$$

Trong đó:

m - Số mặt phẳng cắt;

$A_s = A_b$ - Khi phần ren không nằm trong mặt cắt;

$A_s = 0,8A_b$ - Khi phần ren nằm trong mặt cắt;

A_b - Diện tích nguyên của mặt cắt ngang qua phần không chứa ren;

F_u - Ứng suất cắt danh nghĩa của bu-lông.

c) Độ bền chống trượt, R_n được tính như sau

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \quad (4)$$

Trong đó:

μ - Hệ số trượt trung bình cho bề mặt loại A và B, hoặc đạt được từ thí nghiệm;

$D_u = 1,13$ - Hệ số nhân kể đến tỷ số cường độ căng trước bu-lông trung bình và cường độ căng trước bu-lông tối thiểu;

h_f - Hệ số kể đến tấm đệm;

n_s - Số mặt trượt;

T_b - Cường độ căng trước tối thiểu của bu-lông.

d) Độ bền chịu ép tại mặt lỗ bu-lông

$$R_n = A \times \tau_u^{plate} = 2l_c l_p (0,6F_u) = 1,2l_c l_p F_u \quad (5)$$

Trong đó:

l_c - Khoảng cách, theo hướng tải trọng, giữa cạnh của hai lỗ gần kề hoặc từ cạnh của 1 lỗ đến cạnh của tấm ($l_c = L_e - d_n/2$);

t_p - Bề dày của tấm liên kết;

d_n - Đường kính lỗ bu-lông tiêu chuẩn (Bảng J3.3M - AISC 16).

e) Độ bền chịu nén

Khi tham gia liên kết sẽ chịu nén ở giới hạn chảy dẻo và mất ổn định sẽ được xác định bằng công thức như sau:

1. Khi: $L_c/r \leq 25$ thì

$$\phi_c R_n = \phi_c F_y A_g; \phi_c = 0,9(LRFD) \quad (6)$$

2. Khi: $L_c/r > 25$ tiết diện được xem là mảnh và tính toán như sau:

$$\phi_c R_n = \phi_c F_{cr} A_g; \phi_c = 0,9(LRFD) \quad (7)$$

- Khi: $KL/r \leq 4,71\sqrt{E/F_y} \rightarrow F_{cr} = (0,658)^{F_y/E} F_y$ (8)

- Khi: $KL/r > 4,71\sqrt{E/F_y} \rightarrow F_{cr} = 0,877F_y \leq F_y$ (9)

Trong đó:

$L_c = KL$ - Chiều dài hữu hiệu của cấu kiện;

K - Hệ số chiều dài hữu hiệu;

L - Chiều dài đoạn không giằng theo phương dọc cấu kiện;

$r = \min(r_x, r_y)$, ($r_x = \sqrt{I_x/A}$; $r_y = \sqrt{I_y/A}$) - Bán kính quán tính của tiết diện uốn quanh trục yếu;

A - Diện tích nguyên mặt cắt ngang;

E - Mô-đun đàn hồi của thép 200.000 MPa;

$\phi_c = 0,9$ - Hệ số giảm kháng chịu nén, LRFD;

F_{cr} - Ứng suất mất ổn định tới hạn;

$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$ - Ứng suất Euler.

3.4.2. Liên kết hàn góc

3.4.2.1. Diện tích hữu hiệu của đường hàn (10)

$$A_{wc} = L_c \times t_c$$

Trong đó:

L_c - Chiều dài hữu hiệu của đường hàn;
 t_c - Bề dày hữu hiệu của đường hàn, bằng khoảng cách ngắn nhất từ đỉnh vuông đến bề mặt đường hàn.

3.4.2.2. Chiều dài hữu hiệu đường hàn góc L_c .

a) Về mặt cường độ

$L_c \geq 4h_f$ (11)

b) Với đường hàn ở góc biên

Đường hàn chạy dọc song song với ứng suất từ tải trọng truyền đến biên của cấu kiện chịu tải dọc trục, cụ thể ở đây là đường hàn giữa bản cánh và bản bụng của dầm thép tổ hợp L = Chiều dài đường hàn.

- Khi:

$L \leq 100.h_f \rightarrow L_c =$ Chiều dài thực tế.

- Khi:

$100.h_f < L \leq 300.h_f \rightarrow L_c = B \times$ (chiều dài thực tế).

Trong đó:

$\beta (\leq 1,0) = 1,2 - 0,002(L/h_f)$

- Khi:

$L > 300.h_f \rightarrow L_c = 0,6 \times$ (chiều dài thực tế)

c) Mỗi hàn gián đoạn (không liên tục)

$L_c = \sum L_i$

Trong đó: L_i - Chiều dài đường hàn của từng đoạn $\geq 4h_f$ hoặc 40 mm.

d) Với loại nút ghép 2 tấm

$L_c \geq 5t_{prmin}$ hoặc 25 mm.

Với t_{prmin} - Chiều dày tấm nhỏ hơn.

Đường hàn góc sẽ chịu cắt khi liên kết bản mã vào bụng hoặc cánh cột.

3.4.2.3. Độ bền thiết kế R_n

Là giá trị nhỏ hơn của độ bền chịu cắt của kim loại cấu kiện liên kết và độ bền chịu cắt của kim loại đường hàn.

- Kim loại cấu kiện liên kết bị phá hoại:

$R_n = 0,6.F_u.A_{nv}; \phi = 0,75$ (LRFD) (1.12)

- Kim loại đường hàn:

$R_n = 0,6.F_{fxx}.A_c; \phi = 0,75$ (LRFD) (1.13)

Trong đó:

$0,6.F_u$ - Cường độ chịu cắt của cấu kiện liên kết, (F_u - Cường độ tới hạn);

A_{nv} - Diện tích thực chịu cắt của cấu kiện liên kết;

$0,6.F_{fxx}$ - Cường độ chịu cắt của kim loại đường hàn

(với F_{fxx} - Cấp bền que hàn);

A_c - Diện tích hữu hiệu của đường hàn.

4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

4.1. Mô hình tính toán

* Thông số mô hình:

Số nhịp: 2.

+ Nhịp AB: 4,11(m).

+ Nhịp BC: 3,17(m).

- Số bước cột: 5.

- Số tầng: 3.

- Thông số vật liệu: Theo tiêu chuẩn Mỹ AISC/LRFD 360-16.

+ Mác thép: A36M.

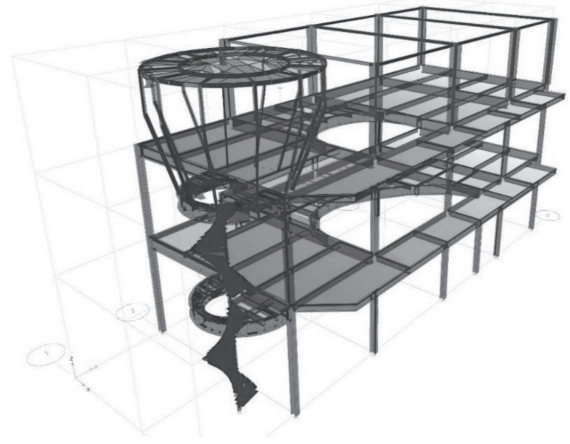
+ Tiết diện dầm chính: 450x200x10x8 (mm).

+ Dầm phụ: 250x150x8x6 (mm).

+ Cột: 200x200x12x8 (mm).

+ Bu-lông: Loại cường độ cao Nhóm A (có phần ren).

Đường kính d22.



Hình 4.1: Mô hình tính toán

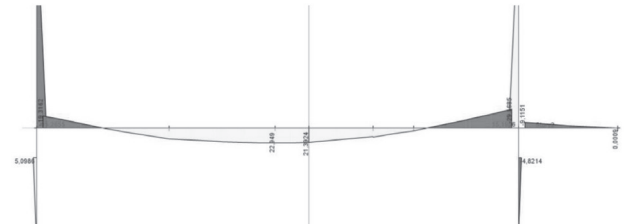
4.2. Phân tích kết quả

Tác giả tiến hành phân tích 2 mô hình khác nhau:

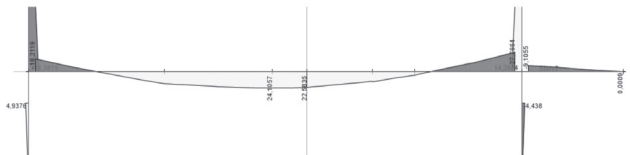
- Mô hình số 01: Sử dụng liên kết cứng được phân bố phù hợp theo các chi tiết liên kết chính (dầm chính và cột) của mô hình tính toán.

- Mô hình số 02: Sử dụng liên kết nửa cứng theo các chi tiết liên kết chính (dầm chính và cột) của mô hình tính toán.

Tác giả tiến hành áp dụng phần mềm Etabs để tiến hành phân tích kết quả nội lực theo phương pháp phân tử hữu hạn, tiến hành so sánh 1 cấu kiện dầm điển hình theo vị trí chịu nội lực nguy hiểm nhất, chúng ta tiến hành so sánh biểu đồ mô-men và lực cắt theo 2 mô hình.



Hình 4.2: Biểu đồ mô-men cho 1 cấu kiện dầm điển hình (LK nút cứng)



Hình 4.3: Biểu đồ mô-men cho 1 cấu kiện dầm điển hình (LK nửa cứng)

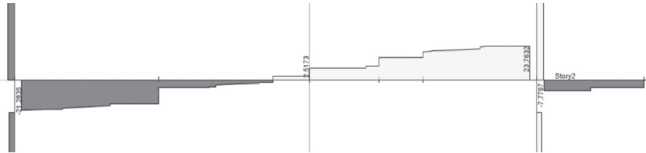
Theo kết quả tính toán của biểu đồ nội lực mô-men được phân bố tại 3 vị trí của cấu kiện dầm điển hình theo bảng sau:

Bảng 4.1. Phân tích nội lực mô-men tại 1 cấu kiện dầm điển hình

Mô hình	M (T.m) Vị trí 0 dầm	M (T.m) Vị trí L/2 dầm	M (T.m) Vị trí L dầm
01 (LK cứng)	-19,32	22,95	-29,69
02 (LK nửa cứng)	-18,2	24,11	-27,76
Chênh lệch (%)	5,8%	-4,8%	6,5%

Dựa theo kết quả *Bảng 4.1* biểu đồ nội lực mô-men, chúng ta có thể thấy mô-men tại 2 vị trí đầu dầm phân tích theo mô hình 2 (liên kết nửa cứng) thì có giá trị nhỏ hơn so với nội lực tại mô hình số 01 (liên kết cứng) lần lượt 5,8% và 6,5%. Tại vị trí giữa dầm, mô hình 2 lại có nội lực lớn hơn mô hình 1 khoảng 4,8%, dựa theo bảng phân tích, nội lực được phân bố đều theo 3 vị trí tại mô hình 2 so với mô hình 1.

So sánh giữa biểu đồ lực cắt của dầm điển hình theo 2 mô hình thì sự chênh lệch không đáng kể. Từ đó, tác giả kết luận được, liên kết nửa cứng và cứng sẽ tác dụng nhiều vào biểu đồ nội lực mô-men hơn so với biểu đồ lực cắt.



Hình 4.4: Biểu đồ mô-men cho 1 cấu kiện dầm điển hình (LK cứng và nửa cứng)

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

5.1.1. Liên kết khớp

Theo kiểm tra độ bền chịu lực của nhóm bu-lông và độ bền chịu lực của bản bích và bụng dầm xác định được số lượng bu-lông liên kết là 3 bu-lông, với đường kính d22 và sử dụng bản mã liên kết vào bụng dầm, liên kết chịu được lực cắt tối đa là 10,85 T theo kết quả nội lực xuất từ mô hình tính toán, từ đó tác giả nhận thấy liên kết này sẽ phù hợp với nút có nội lực nhỏ không đáng kể, phù hợp với những công trình hay hệ kết cấu dàn chịu tải trọng nhẹ; có thể áp dụng liên kết khớp tại chân cột để triệt tiêu mô-men.

5.1.2. Liên kết cứng

Trạng thái làm việc của liên kết cứng sẽ chịu tác dụng đồng thời của mô-men và lực cắt, tác giả đã ứng dụng vào trong tính toán liên kết giữa dầm chính và cột. Theo kiểm tra độ bền chịu kéo và chịu mô-men của nhóm bu-lông và kiểm tra độ bền của bản bích, bản bụng cột thì tác giả tính toán được số lượng 8 bu-lông đường kính d22 và kết hợp bản bích dày 20 mm, sườn gia cường bản bích dày 8 mm, liên kết chịu được mô-men và lực cắt tối đa lần lượt là $M = 29,17$ T.m và $Q = 23,76$ T thỏa mãn nội lực tác dụng vào liên kết. Từ đó có thể thấy, liên kết cứng sẽ phù hợp với những nút có nội lực tương đối lớn, áp dụng cho những công trình chịu tải trọng từ vừa đến nặng.

5.1.3. Liên kết nửa cứng

So với trạng thái làm việc của liên kết cứng, liên kết nửa cứng sẽ phân bố nội lực mô-men đều hơn so với liên kết cứng; tác giả ứng dụng vào trong tính toán liên kết giữa dầm chính và cột với mô hình có liên kết đàn hồi. Theo kiểm tra độ bền chịu kéo và chịu mô-men của nhóm bu-lông và kiểm tra độ bền của bản bích, bản bụng cột thì tác giả thiết kế số lượng 8 bu-lông nhưng với đường kính nhỏ hơn d20 và kết hợp bản bích dày 18 mm, sườn gia cường bản bích dày 8 mm thỏa mãn nội lực tác dụng vào liên kết

với các giá trị lần lượt là $M = 27,76$ T.m và $Q = 23,76$ T. Từ đó có thể thấy, liên kết nửa cứng thiết kế tối ưu hơn so với liên kết cứng khi nội lực mô-men nhỏ hơn dẫn đến tiết diện và đường kính bu-lông sẽ nhỏ hơn.

5.2. Kiến nghị

Về cơ sở lý thuyết, để mô phỏng trạng thái làm việc chính xác của liên kết nửa cứng, tác giả đã dựa theo lý thuyết liên kết đàn hồi, xác định độ cứng của các phần tử cấu kiện, từ đó xác định được hệ số liên kết đàn hồi để đưa vào khai báo trong mô hình tính toán. Bài báo cũng chỉ tập trung vào tính toán một số dạng liên kết điển hình trong kết cấu thép, do đó tùy theo từng trường hợp bài toán cụ thể khác nhau thì hệ số liên kết đàn hồi sẽ thay đổi và sẽ ảnh hưởng đến việc phân tích nội lực của mô hình và của nút liên kết. Vì vậy, bài báo nên được coi là 1 tài liệu tham khảo và có thể áp dụng trong một số bài toán cụ thể.

Do bài báo tập trung vào lý thuyết và tính toán nên tác giả đề xuất tiếp tục hướng nghiên cứu về mô phỏng các loại liên kết khi chịu tải trọng về trạng thái biến dạng và phá hoại để phản ánh chính xác nhất trạng thái làm việc của các liên kết ngoài thực tế.

Về tính ứng dụng, kỹ sư có thể sử dụng để tài và kết quả tính toán để làm tài liệu tham khảo để từ đó ứng dụng tính toán vào các liên kết kết cấu thép trong thực tế, lựa chọn những loại liên kết theo lý thuyết phù hợp nhất với trạng thái làm việc thực tế của liên kết đó, để đưa ra kết quả tính toán chính xác nhất, đem lại sự hiệu quả và tối ưu về mặt tính toán.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Dr.Akbar R. Tamboli (2017), *Handbook of Structural Steel Connection Design and Details*.
- [2]. AISC 360-10, *Specification for structural steel building*.
- [3]. GS. TS. Đoàn Định Kiến, TS. Nguyễn Song Hà, KS. Hoàng Kim Vũ (2018), *Thiết kế kết cấu thép theo quy phạm Hoa Kỳ AISC 360-10*.
- [4]. TS. Trần Văn Phúc, ThS. Lê Hoàng Vũ (2020), *Thiết kế liên kết trong kết cấu thép theo TC Mỹ AISC/LRFD 360-16*.
- [5]. TS. Vũ Quốc Anh (2012), *Tính toán và thiết kế khung thép liên kết đàn hồi*.
- [6]. PGS. TS. Phạm Văn Hội, Nguyễn Quang Viên, Phạm Văn Tư, Lưu Văn Tường (2006), *Kết cấu thép 1 - Cấu kiện cơ bản*, NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
- [7]. TCVN 5575-2012, *Tiêu chuẩn về kết cấu thép*.

Ngày nhận bài: 03/5/2024

Ngày nhận bài sửa: 20/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 06/6/2024