

**ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ ĐẾN ĐỘ CỨNG XOAY CỦA
LIÊN KẾT MẶT BÍCH GIỮA DẦM VÀ BẢN BỤNG CỘT**
PARAMETRIC STUDY ON THE ROTATIONAL STIFFNESS
OF BEAM-TO-COLUMN WEB END PLATE CONNECTIONS

VŨ QUỐC ANH^{a,*}, NGUYỄN TRẦN HIẾU^b

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

^bKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Tác giả đại diện: Email: anhvq@hau.edu.vn

Ngày nhận 01/03/2025, Ngày sửa 28/03/2025, Chấp nhận 30/03/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol1-5>

Tóm tắt: Sự phân phối nội lực giữa các cấu kiện trong khung thép phụ thuộc nhiều vào độ cứng của nút khung, vì thế độ cứng nút cần được đánh giá một cách chính xác và kể tới trong mô hình phân tích kết cấu tổng thể. Nhiều nghiên cứu đã được triển khai nhằm xác định độ cứng nút khung giữa dầm với bản cánh cột, tuy nhiên các nghiên cứu về độ cứng nút khung giữa dầm và bản bụng cột còn tương đối hạn chế. Bài báo trình bày một nghiên cứu đánh giá độ cứng xoay của liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột dựa trên phương pháp thành phần phần tử hữu hạn (CBFEM). Bài báo gồm hai phần chính. Phần đầu tiên trình bày về mô hình phân tích độ cứng nút khung bằng CBFEM và đánh giá mức độ tin cậy của mô hình CBFEM thông qua so sánh với kết quả mô phỏng và kết quả thu được từ một thí nghiệm sơ tầm từ tài liệu tham khảo. So sánh cho thấy mô hình CBFEM có khả năng dự đoán tương đối chính xác độ cứng xoay của liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột. Phần tiếp theo triển khai một nghiên cứu tham số nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố như: cấu tạo liên kết, chiều dày mặt bích, đường kính và cấp độ bền bu lông tới độ cứng xoay của nút.

Từ khóa: độ cứng xoay; liên kết mặt bích; liên kết dầm và bản bụng cột; mô phỏng số; phần tử hữu hạn; CBFEM.

Abstract: The distribution of internal forces between members in a steel frame depends largely on the rotational stiffness of the frame joints, therefore, it is necessary to accurately evaluate the stiffness of steel joints and take them into account in the global structural analysis. While the stiffness of beam-to-column flange connections has been the topic of many previous studies, research on the stiffness of beam-to-column web end plate connections is still limited. This paper presents a study to evaluate the

stiffness of beam-to-column web end plate connections using the component-based finite element method (CBFEM). The paper consists of two main parts. The first part introduces the model for analyzing the rotational stiffness of steel joints based on CBFEM and evaluates the reliability of the CBFEM model by comparing the numerical results with experimental results from literature. The comparison shows that the CBFEM model is capable of accurately predicting the rotational stiffness of beam-to-column web end plate connections. The next part conducts a parametric study to evaluate the influence of factors such as joint configuration, plate thickness, bolt grade, and bolt diameter on the rotational stiffness of the joint.

Keywords: rotational stiffness; end plate connection; beam-to-column web connection; numerical modeling; finite element; CBFEM.

1. Tổng quan về độ cứng xoay của liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột

Nhà thép nhiều tầng thường sử dụng giải pháp kết cấu chịu lực hỗn hợp gồm cả sơ đồ khung chịu lực và sơ đồ giằng chịu lực. Theo phương trục khỏe của cột, liên kết giữa dầm và bản cánh cột được cấu tạo là cứng, khung có khả năng chịu cả tải trọng đứng và tải trọng ngang. Theo phương trục yếu của cột, liên kết giữa dầm và bản bụng cột thường chỉ cấu tạo là khớp, do đó cột chỉ chịu tải trọng đứng. Để chịu tải trọng ngang như gió, động đất, khung cần bố trí thêm các thanh giằng chéo. Giải pháp kết cấu chịu lực hỗn hợp như vậy hợp lý về chịu lực cũng như kinh tế nên được sử dụng khá phổ biến. Tuy nhiên, các thanh giằng chéo này làm giảm không gian sử dụng bên trong công trình, gây khó khăn cho việc bố trí thiết bị, hàng hóa hoặc khi thay đổi công năng sử dụng, đồng thời ảnh hưởng đến thẩm mỹ của công trình.

Chính vì thế, một số công trình hiện nay lựa chọn giải pháp sơ đồ khung chịu lực theo cả hai phương, trong đó liên kết giữa dầm và bản cánh cũng như bản bụng cột đều được cấu tạo là cứng như Hình 1. Việc loại bỏ thanh giằng chéo tạo ra không

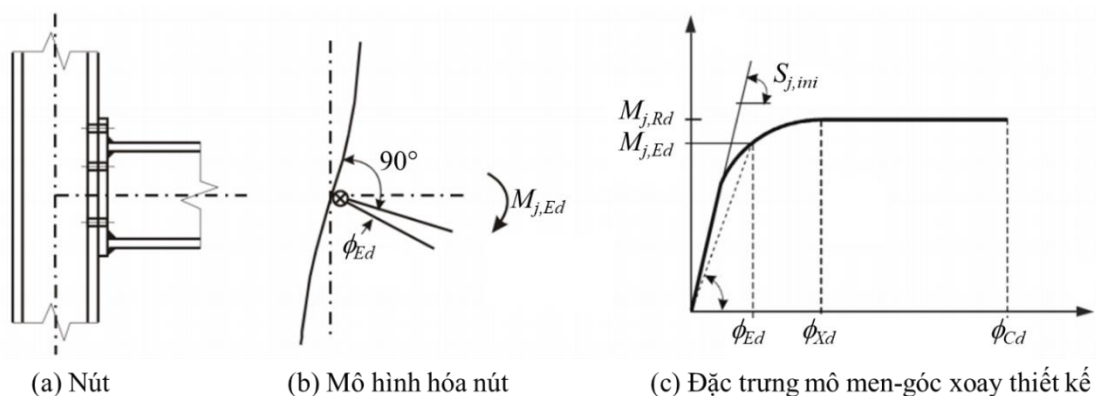
gian thông thoáng, linh hoạt hơn, đặc biệt phù hợp cho các công trình như nhà xưởng, nhà kho hoặc tòa nhà thương mại có yêu cầu không gian lớn. Phương án này cũng đơn giản hóa quá trình thi công lắp dựng và bảo trì.



Hình 1. Giải pháp sơ đồ khung chịu lực theo cả hai phương (Nguồn ảnh: Tập đoàn thép Đại Dĩnh)

Mặc dù có nhiều ưu điểm, một trong những khó khăn khi sử dụng giải pháp sơ đồ khung chịu lực theo cả hai phương là cấu tạo nút cứng giữa dầm và bản bụng cột. Thực tế, rất khó cấu tạo liên kết làm việc cứng tuyệt đối mà hầu hết đều có độ cứng hữu hạn. Mặc dù tiêu chuẩn TCVN 5575:2024 [1] đã đề cập tới dạng liên kết có độ cứng hữu hạn nhưng chưa đưa ra phương pháp cụ thể xác định độ cứng của liên kết cũng như phân loại một cách định lượng. Một số tiêu

chuẩn tiên tiến trên thế giới đã có quy định tương đối rõ ràng về vấn đề trên. Cụ thể, theo Tiêu chuẩn EN 1993-1-8:2005 [2], một nút (Hình 2(a)) có thể được mô hình hóa như một lò xo xoay tại giao điểm các trục của cấu kiện như Hình 2(b). Đặc trưng của lò xo có thể được biểu thị dưới dạng đường cong quan hệ giữa mô men uốn $M_{j,Ed}$ tác dụng tại nút và góc xoay tương ứng ϕ_{Ed} giữa các cấu kiện liên kết như Hình 2(c).



Hình 2. Đặc trưng mô men góc xoay thiết kế của nút [2]

Đường cong này thường được gọi là đặc trưng mô men-góc xoay thiết kế và được xác định bằng ba đại lượng chính:

- Khả năng chịu uốn thiết kế $M_{j,Rd}$;
- Độ cứng xoay S_j ;
- Khả năng xoay tính toán ϕ_{Cd} của nút.

Tiêu chuẩn [2] quy định phương pháp phân loại nút theo hai tiêu chí chính: cường độ và độ cứng. Nếu phân loại theo độ cứng, một nút có thể được phân loại là cứng, khớp hoặc nửa cứng tùy thuộc vào độ cứng xoay của nó bằng cách so sánh độ cứng xoay ban đầu $S_{j,ini}$ với các giới hạn phân loại như

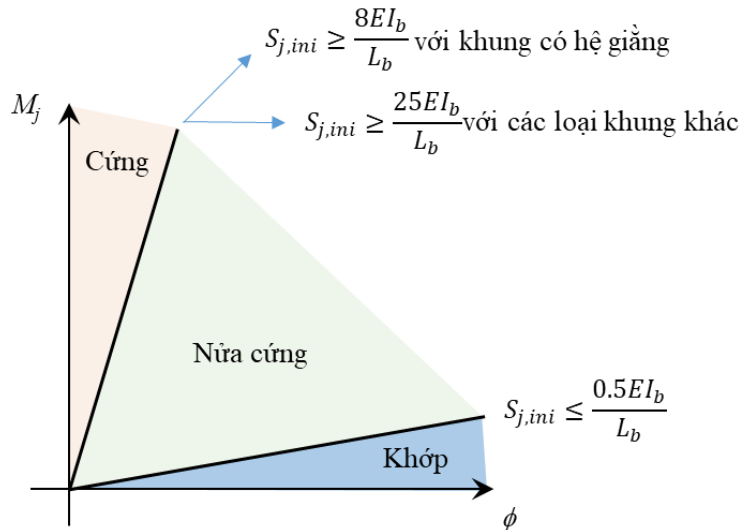
Hình 3, trong đó I_b , L_b lần lượt là mô men quán tính của tiết diện dầm và nhịp dầm.

Mục 6.3.1 tiêu chuẩn EN 1993-1-8:2005 [2] đưa ra phương pháp xác định độ cứng đối với nút tiết diện chữ H hoặc I. Phương pháp này có tên gọi là phương pháp thành phần, thuật ngữ tiếng Anh là Component Method (CM). Cụ thể, độ cứng xoay của nút được xác định từ độ mềm của các bộ phận cơ bản, mỗi bộ

phần được đại diện bởi hệ số độ cứng đàn hồi k_i theo công thức:

$$S_{j,ini} = \frac{Ez^2}{\mu \sum \frac{1}{k_i}} \quad (1)$$

trong đó: k_i là hệ số độ cứng của bộ phận cơ bản i ; z là cánh tay đòn; μ là tỉ lệ độ cứng $S_{j,ini}/S_j$.



Hình 3. Phân loại nút theo độ cứng [2]

Đối với dạng liên kết mặt bích, các bộ phận cơ bản được cho trong Bảng 6.11 của tài liệu [2], tuy nhiên bảng này không cung cấp công thức xác định độ cứng của thành phần bản bụng cột chịu uốn. Hay nói cách khác độ cứng của liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột chưa được đề cập tới trong tiêu chuẩn.

Thực tế, đã có một số nghiên cứu trên thế giới khảo sát độ cứng xoay của dạng liên kết kể trên. Đầu tiên, có thể kể đến thí nghiệm về liên kết mô men giữa dầm và bản bụng cột của Rentschler, Chen và Driscoll năm 1980 [3], nghiên cứu về ứng xử của nút nửa cứng giữa dầm và bản bụng cột của Neves và Gomes năm 1996 [4]. Năm 2002, de Lima và cộng sự [5] dựa trên kết quả thí nghiệm và mô phỏng phần tử hữu hạn (PTHH) đã đề xuất một mô hình dự đoán độ cứng xoay của nút nửa cứng giữa dầm và bản bụng cột trong đó có kể tới độ cứng uốn của bản bụng cột. Tiếp đó, năm 2011, Tahir và cộng sự [6] đã phát triển mô hình PTHH phi tuyến để phân tích liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột và kiểm chứng với kết quả thí nghiệm. Gần đây, Pan, Wang và cộng sự cũng đã thực hiện một số nghiên cứu thí

nghiệm và mô phỏng số nút liên kết giữa dầm và bản bụng cột [7,8].

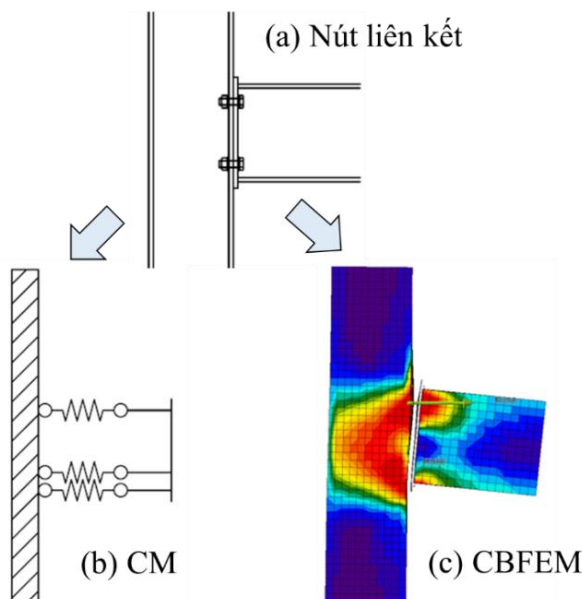
Hầu hết các nghiên cứu kể trên đều xác định độ cứng xoay của nút bằng thực nghiệm hoặc thông qua phương pháp PTHH. Những cách tiếp cận kể trên khó có thể áp dụng trong công tác thiết kế thực tế. Hiện nay, một phương pháp thiết kế liên kết có tên gọi Component-based finite element method (CBFEM) do GS Wald và cộng sự phát triển [9,10] cho phép xác định độ bền cũng như độ cứng xoay của liên kết. Đặc biệt, CBFEM đã được phát triển thành phần mềm thương mại có tên gọi IDEA Statica với giao diện trực quan, dễ sử dụng, giúp kỹ sư có thể tiếp cận một cách dễ dàng.

Bài báo trình bày một nghiên cứu khảo sát độ cứng xoay của liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột bằng CBFEM. Phần tiếp theo của bài báo gồm hai phần chính. Mục 2 trình bày tổng quan về mô hình CBFEM cũng như đánh giá mức độ tin cậy của mô hình CBFEM thông qua so sánh với kết quả thí nghiệm sưu tầm từ tài liệu tham khảo. Mục 3 triển khai một nghiên cứu tham số nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố như: cấu tạo liên kết, chiều dày

mặt bích, đường kính bu lông cũng như chiều dày bản bụng cột tới độ cứng xoay của nút. Một số kết luận được trình bày trong Mục 4.

2. Xác định độ cứng xoay của liên kết bằng CBFEM

2.1 Tổng quan về mô hình CBFEM



Hình 4. Mô hình CM và mô hình CBFEM nút liên kết bằng mặt bích giữa dầm và cột

CBFEM là sự kết hợp của CM và phương pháp PTHH. Nếu như CM tách nút thành một hệ lò xo trong đó mỗi lò xo đại diện cho một bộ phận của nút thì trong CBFEM, nút liên kết được tách thành từng thành phần như bản thép, bu lông, đường hàn. Các bản thép trong CBFEM được mô hình bằng các phần tử tấm vật liệu đàn dẻo lý tưởng. Mỗi bu lông trong CBFEM được mô tả bằng một lò xo phi tuyến tại vị trí trục của bu lông được liên kết với thành lỗ bằng các ràng buộc. Bộ phận đường hàn cũng được mô tả bằng các phần tử tấm đàn dẻo và được liên kết với các bản thép bằng ràng buộc đa điểm. Mô hình này cho phép giảm đáng kể khối lượng tính toán so với phương pháp PTHH thông thường nhưng vẫn đảm bảo mô tả được chính xác sự làm việc của nút liên kết. Hình 4 thể hiện sự khác nhau giữa mô hình CM và mô hình CBFEM khi mô phỏng một nút liên kết bu lông mặt bích giữa dầm và cột.

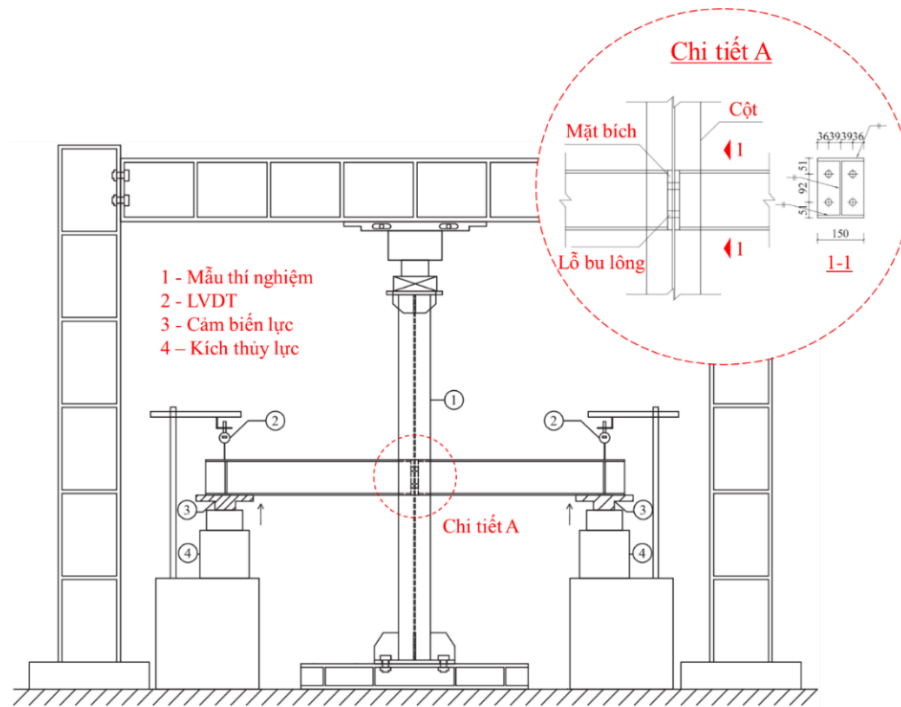
Hiện nay, một số phần mềm như IDEA StatiCa, PROFIS Engineering của hãng Hilti, Advance Design Connection của hãng Gritec đã sử dụng phương pháp CBFEM để phân tích sự làm việc của nút liên kết. Các mô hình nút liên kết trong nghiên cứu được xây dựng bằng phần mềm IDEA StatiCa.

2.2 Kiểm chứng kết quả phân tích độ cứng xoay liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột bằng CBFEM

a. Thí nghiệm độ cứng xoay liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột

Thí nghiệm khảo sát độ cứng xoay của nút liên kết bằng mặt bích giữa dầm và bản bụng cột sử dụng để kiểm chứng mô hình CBFEM được thực hiện bởi Pan, Chen, Wang và Lu năm 2018 [7]. Mẫu thí nghiệm gồm hai đoạn dầm tiết diện H194x150x6x9 chiều dài 1000 mm liên kết với bản bụng của cột tiết diện H244x175x7x11 chiều dài 2000 mm thông qua mặt bích kích thước 194x150x20 mm bằng bốn bu lông M20 cấp độ bền 10.9. Đặc trưng cơ học của vật liệu chế tạo mẫu thí nghiệm được tổng hợp trong Bảng 1.

Thí nghiệm được bố trí như Hình 5 trong đó, hai đầu cột đều được giữ cố định. Kích thủy lực được bố trí phía dưới đầu tự do của dầm nhằm gia tải lực tập trung. Đầu trên dầm có bố trí LVDT để đo chuyển vị. Góc xoay của liên kết sẽ được tính gián tiếp từ chuyển vị đứng của đầu dầm. Do những yếu tố ngẫu nhiên trong chế tạo mẫu và thí nghiệm, đường cong mô men-góc xoay hai phía liên kết có sự khác nhau. Để loại bỏ những khác biệt này, dữ liệu của cả hai phía liên kết đã được tính trung bình trước khi so sánh với kết quả mô phỏng. Kết quả thí nghiệm sẽ được trình bày trong Mục 2.2(b).



Hình 5. Bố trí thí nghiệm [7]

Bảng 1. Đặc trưng cơ học vật liệu thép của mẫu thí nghiệm [7]

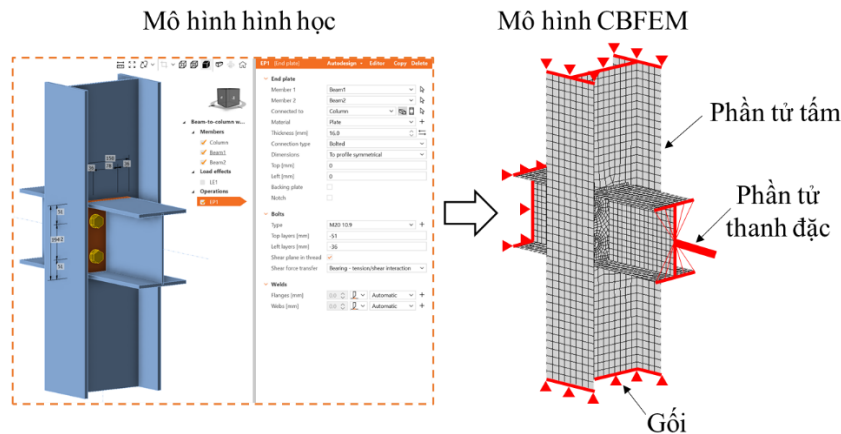
Vị trí	Giới hạn chảy f_y (MPa)	Giới hạn bền f_u (MPa)	Mô-đun đàn hồi E (GPa)
Dầm	263,5	466,9	204,8
Cột	262,4	435,3	196,0
Mặt bích	253,1	396,6	210,0
Bu lông	940	1040	206,0

b. Xây dựng mô hình CBFEM

Đầu tiên, bốn loại vật liệu bao gồm: vật liệu thép cho cột, vật liệu thép cho dầm, vật liệu thép cho bản thép và vật liệu thép cho bu lông được khai báo với các đặc trưng cơ học f_y , f_u và E tương ứng theo Bảng 1. Để dựng mô hình hình học của liên kết, phần mềm IDEA StatiCa cung cấp bộ công cụ có tên gọi “manufacturing operation”. Trong nghiên cứu, liên kết mặt bích giữa dầm và cột thép được mô hình bằng operation “End Plate” với các thông số như Hình 6. Cấu kiện cần phân tích độ cứng xoay sẽ được khai báo là “analysed member”, các cấu kiện còn lại được coi là gối. Chiều dài cấu kiện “analysed member” chỉ được sử dụng để tính toán các giá trị giới hạn khi phân loại

nút (đại lượng L_b trong Hình 3) nhưng không sử dụng để tính toán giá trị độ cứng thực tế.

Trước khi phân tích, mô hình hình học được tự động chuyển đổi sang mô hình CBFEM. Cụ thể, một đoạn cấu kiện có chiều dài $1,25h$ sẽ được mô hình hóa thành phần tử dạng tám trong đó h là chiều cao tiết diện cấu kiện. Hầu hết các bản thép được mô hình bằng phần tử tám tứ giác bốn nút trừ khu vực hình dạng phức tạp sẽ sử dụng phần tử tám tam giác. Nhằm mô tả chính xác hơn ứng xử của kết cấu, một đoạn cấu kiện dạng phần tử thanh đặc được bổ sung vào phía sau như mô tả trên Hình 6. Chiều dài của phần tử thanh đặc này trong phân tích độ cứng xoay của nút lấy bằng $0,5h$ trong đó h là chiều cao tiết diện cấu kiện.

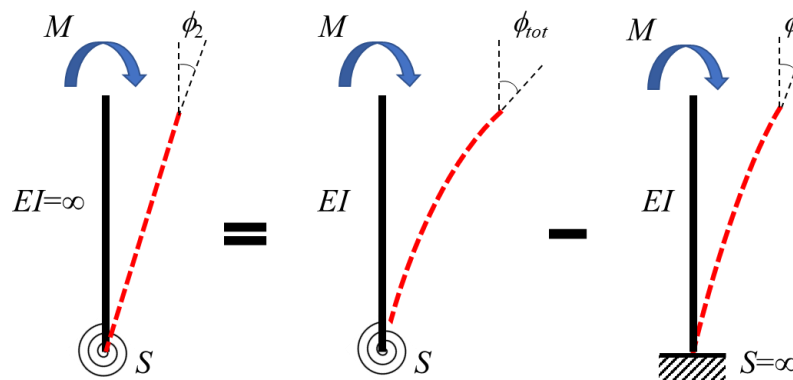


Hình 6. Mô hình mẫu thí nghiệm trong phần mềm IDEA StatiCa

Đường cong mô men-góc xoay của liên kết được xây dựng bằng cách tăng dần giá trị mô men M tác dụng và xác định góc xoay tương ứng của liên kết ϕ_2 . Tại mỗi cấp tải, góc xoay của liên kết ϕ_2 được tính bằng hiệu của tổng góc xoay ϕ_{tot} trừ góc xoay

của cấu kiện ϕ_1 như minh họa trong Hình 7. Độ cứng xoay của liên kết được tính bằng công thức:

$$S = \frac{M}{\phi_2} \quad (2)$$



Hình 7. Cách xác định góc xoay của liên kết

c. Kết quả và nhận xét

Kết quả phân tích độ cứng xoay của liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột bằng CBFEM được trình bày trong Hình 8. Bên cạnh đó, kết quả thí nghiệm và mô phỏng ANSYS trong [7] cũng được trình bày lại trên Hình 8 để thuận tiện so sánh. Dựa trên kết quả thu được, có thể đưa ra một số nhận xét như sau:

- Về mặt tổng thể, đường cong mô men-góc xoay của liên kết thu được từ thí nghiệm [7], ANSYS [7] và CBFEM là khá tương đồng, đặc biệt hai đường cong ANSYS và CBFEM gần như trùng khớp, cho thấy khả năng mô phỏng sự làm việc liên kết của CBFEM;

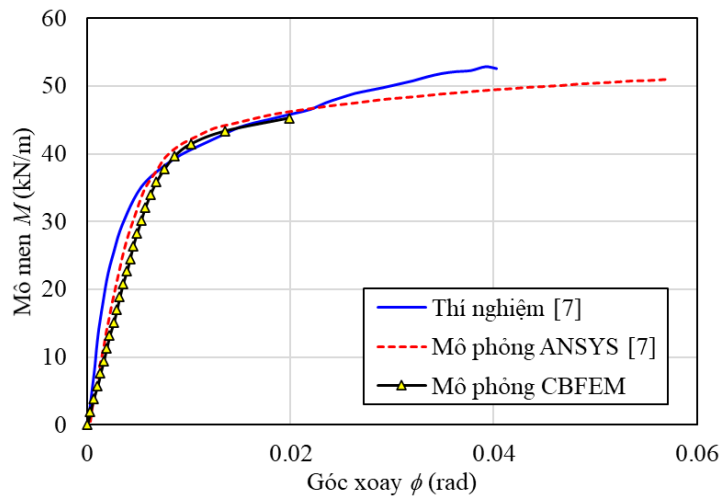
- Trong cả ba kết quả trên, khi mô men M dưới 30 kN.m, quan hệ mô men và góc xoay gần như

tuyến tính thể hiện liên kết đang làm việc trong giai đoạn đàn hồi. Sau giai đoạn này, độ dốc của cả ba đường đều bắt đầu giảm. Quan hệ mô men-góc xoay không còn tuyến tính nữa phản ánh liên kết bắt đầu chuyển sang giai đoạn dẻo. Ứng với mô men $M=30$ kN.m, góc xoay thu được từ thí nghiệm, mô phỏng ANSYS và mô phỏng CBFEM lần lượt là $\phi_{thí nghiệm}=3,73$ mrad, $\phi_{ANSYS}=4,7$ mrad và $\phi_{CBFEM}=5,3$ mrad. Như vậy, độ cứng xoay ban đầu của liên kết thu được từ thực nghiệm lớn nhất ($S_{j,ini}^{thí nghiệm}=8043$ kN.m.rad⁻¹), tiếp theo là ANSYS ($S_{j,ini}^{ANSYS}=6383$ kN.m.rad⁻¹), cuối cùng là CBFEM ($S_{j,ini}^{CBFEM}=5769$ kN.m.rad⁻¹);

- Như vậy có thể thấy kết quả mô phỏng CBFEM phản ánh khá đúng sự làm việc của liên kết, tuy nhiên độ cứng ban đầu thu được từ CBFEM có sự chênh lệch với thí nghiệm và mô phỏng bằng ANSYS. Sai khác này

có thể do sự hạn chế của mô hình vật liệu cũng như bu lông sử dụng trong CBFEM. Tuy nhiên nhìn tổng thể thì sự khác biệt không quá lớn. Bên cạnh đó, kết quả dự

đoán độ cứng xoay của CBFEM nhỏ hơn độ cứng xoay thí nghiệm cho thấy sử dụng CBFEM trong công tác thiết kế thực tế sẽ thiên về an toàn.



Hình 8. So sánh đặc trưng mô men-góc xoay của liên kết giữa thí nghiệm và mô phỏng CBFEM

3. Khảo sát tham số

Trong phần này, một khảo sát tham số được thực hiện nhằm đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố như: cấu tạo của liên kết, chiều dày bản mã, đường kích bu lông và cấp độ bền của bu lông đến độ cứng xoay của nút.

3.1 Ảnh hưởng của cấu tạo liên kết

Trong phần này, nghiên cứu sẽ đánh giá độ cứng xoay của 5 dạng cấu tạo liên kết mặt bích giữa dầm và bản bụng cột thường sử dụng trong thực tế, bao gồm:

- CT1: liên kết mặt bích trực tiếp vào bản bụng cột, bu lông chỉ bố trí bên trong khu vực bản bụng dầm (Hình 9(a));

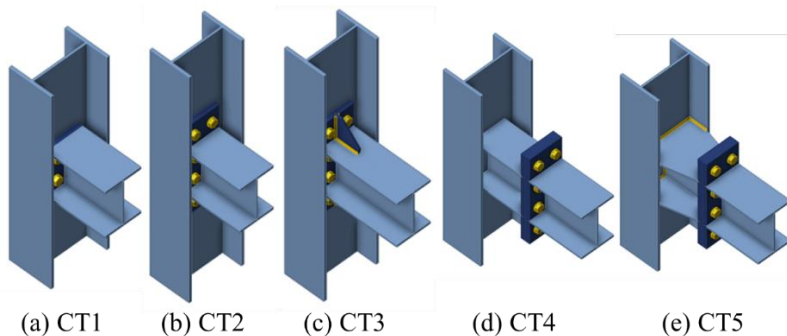
- CT2: liên kết mặt bích trực tiếp vào bản bụng cột, có bổ sung thêm bu lông phía bên ngoài cánh dầm, không sử dụng sườn gia cường (Hình 9(b));

- CT3: liên kết mặt bích trực tiếp vào bản bụng cột, có bổ sung thêm bu lông phía bên ngoài cánh dầm và bố trí sườn gia cường (Hình 9(c));

- CT4: mặt bích không bắt trực tiếp vào bản bụng cột mà nối với một đoạn dầm ngắn hàn trước vào bản bụng cột (Hình 9(d));

- CT5: tương tự như loại 4 nhưng đoạn dầm ngắn được mở rộng và hàn với cả cánh cột và bụng cột (Hình 9(e)).

Trong cả năm trường hợp trên, dầm chỉ bố trí một phía. Vật liệu, tiết diện cột, dầm, kích thước mặt bích và bu lông tương tự như mẫu thí nghiệm trình bày trong Mục 2.



Hình 9. Năm dạng cấu tạo liên kết dầm với bản bụng cột phổ biến

Xây dựng mô hình CBFEM và thực hiện phân tích độ cứng xoay nút khung tương tự như đã trình bày trong Mục 2. Giả thiết chiều dài của dầm trong

tất cả các trường hợp L_b đều bằng 4 m. Kết quả độ cứng ban đầu và phân loại của năm dạng cấu tạo nút khung được tổng hợp trong Bảng 2.

Bảng 2. Độ cứng xoay ban đầu của nút có cấu tạo khác nhau

Cấu tạo liên kết	Độ cứng xoay ban đầu $S_{j,ini}$ (kN.m.rad ⁻¹)	Phân loại nút
CT1	400	Khớp
CT2	1300	Nửa cứng
CT3	1600	Nửa cứng
CT4	1100	Nửa cứng
CT5	34400	Cứng

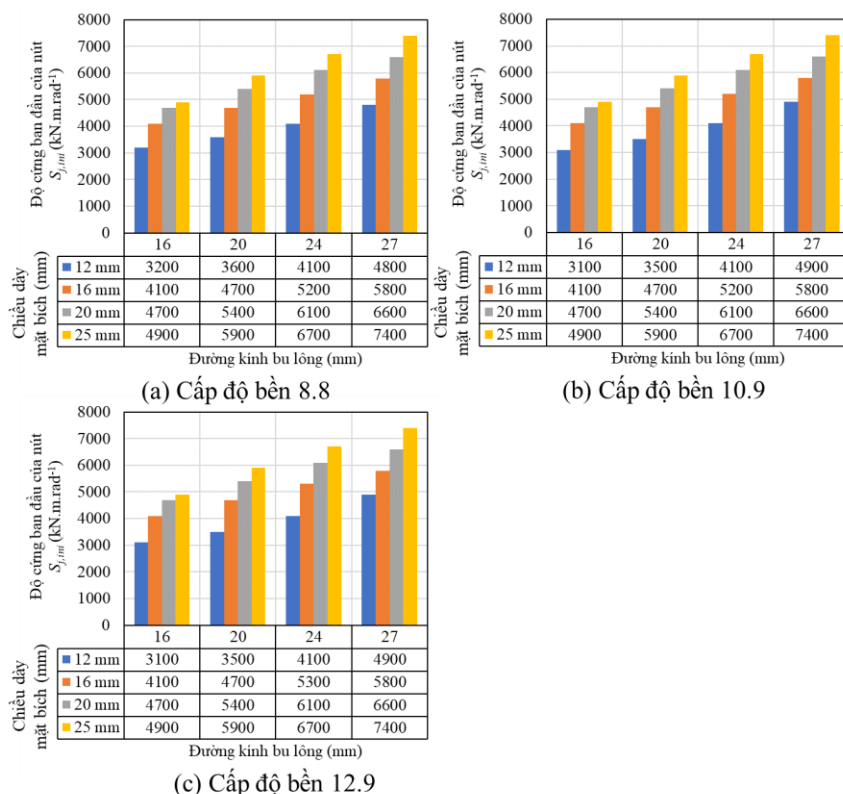
Từ kết quả khảo sát, một số nhận xét được rút ra như sau:

- Trong trường hợp chỉ có dầm một phía, độ cứng nút $S_{j,ini}^{CT1}=400$ kN.m.rad⁻¹. Việc bố trí thêm bu lông phía bên ngoài cánh dầm hoặc hàn trực tiếp dầm vào bụng cột và nối bằng mặt bích phía bên ngoài giúp tăng độ cứng nút khung nhưng không có tác dụng đáng kể. Cụ thể, khi bu lông bố trí bên ngoài cánh cột, độ cứng nút $S_{j,ini}^{CT2}=1300$ kN.m.rad⁻¹. Nếu bố trí thêm sườn, độ cứng nút tăng lên $S_{j,ini}^{CT3}=1300$ kN.m.rad⁻¹. Cá biệt trường hợp hàn trước một đoạn dầm vào bụng cột và nối bằng mặt bích phía bên nút, độ cứng chỉ đạt $S_{j,ini}^{CT4}=1100$ kN.m.rad⁻¹, nhỏ hơn CT2 và CT3. Tuy nhiên, nếu bố trí dầm hai phía như mẫu thí nghiệm, độ cứng đạt $S_{j,ini}=5769$ kN.m.rad⁻¹. Như vậy có thể thấy một trong những yếu tố ảnh hưởng lớn tới độ cứng nút chính là độ cứng uốn của bản bụng cột. Trong những trường hợp chỉ bố trí dầm một phía, bản bụng cột chịu uốn. Do bản bụng cột có chiều dày khá mỏng nên độ cứng uốn của bản bụng cột tương đối bé, dẫn đến độ cứng của nút rất nhỏ;

- Trong trường hợp đoạn dầm được hàn cả với bản cánh cột chịu uốn, độ cứng nút tăng mạnh ($S_{j,ini}^{CT5}=34400$ kN.m.rad⁻¹). Như vậy, biện pháp huy động thêm bản cánh cột chịu uốn rất hiệu quả khi muốn tăng độ cứng tổng thể của nút khung.

3.2 Ảnh hưởng của các bộ phận trong liên kết

Tiếp theo, nghiên cứu thực hiện đánh giá ảnh hưởng của chiều dày bản mã, cấp độ bền và đường kính bu lông tới độ cứng xoay của liên kết. Cụ thể, bốn cấp chiều dày của mặt bích được khảo sát bao gồm: 12 mm, 16 mm, 20 mm và 25 mm. Các cấp độ bền của bu lông sử dụng trong khảo sát gồm: cấp độ bền 8.8, cấp độ bền 10.9 và cấp độ bền 12.9. Cuối cùng, 4 đường kính bu lông được khảo sát bao gồm M16, M20, M24 và M27. Nhằm loại bỏ ảnh hưởng độ cứng uốn bản bụng cột, trong tất cả các trường hợp, dầm đều bố trí hai phía và bu lông chỉ bố trí phía bên trong khu vực bản bụng cột. Kết quả khảo sát được trình bày trong Hình 10.



Hình 10. Ảnh hưởng của các bộ phận trong liên kết đến độ cứng xoay của nút

Căn cứ trên kết quả thu được, có thể thấy:

- Khi thay đổi cấp độ bền bu lông, độ cứng xoay của nút gần như không thay đổi. Điều này là hoàn toàn hợp lý vì trong CBFEM, bu lông được mô hình bằng các lò xo có độ cứng $k=EA_s/L_b$ hoàn toàn không phụ thuộc vào cường độ của vật liệu bu lông.

- Trong cả ba trường hợp cấp độ bền 8.8, 10.9 và 12.9, khi tăng chiều dày mặt bích từ 16 mm lên 25 mm, độ cứng ban đầu của nút $S_{j,ini}$ tăng gần như tuyến tính từ 3100 lên 4900 kN.m.rad⁻¹. Tương tự, khi tăng đường kính bu lông từ 16 mm lên 27 mm, $S_{j,ini}$ cũng tăng tương ứng. Như vậy, độ cứng nút khung tỷ lệ thuận với kích thước mặt bích và bu lông.

4. Kết luận và kiến nghị

Bài báo trình bày một nghiên cứu khảo sát độ cứng xoay của nút có dầm liên kết với bản bụng cột bằng mặt bích và bu lông. Bằng cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn dựa trên độ cứng thành phần, nghiên cứu đã đánh giá độ cứng xoay của hàng loạt liên kết với các yếu tố thay đổi như cấu tạo liên kết, chiều dày mặt bích, cấp độ bền và đường kính bu lông. Nhiều quan sát đã được rút ra dựa trên kết quả thu được từ khảo sát. Thông qua nghiên cứu, có thể thấy CBFEM là một công cụ tin cậy để đánh giá độ cứng nút khung. Do độ cứng uốn của bản bụng cột rất nhỏ nên nút liên kết giữa dầm và bản bụng cột thường có độ cứng không lớn. Để tăng độ cứng cho loại nút này nên bố trí dầm hai phía để cân bằng mô men hoặc huy động thêm sự làm việc của bản cánh cột.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin cảm ơn Công ty Cổ phần Công nghệ và Tư vấn CIC đã hỗ trợ bản quyền phần mềm IDEA StatiCa sử dụng trong nghiên cứu!

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 5575:2024 (2024). *Kết cấu thép – Tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [2] BS EN 1993-1-8:2005 (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints*. UK.
- [3] Rentschler, G. P., Chen, W. F., Driscoll, G. C. (1980). *Tests of beam-to-column web moment connections*. Journal of the Structural Division, 106(5), 1005-1022.
- [4] Neves, L. C., Gomes, F. (1996). *Semi-rigid behaviour of beam-to-column minor-axis joints*. IABSE reports, 207-218.
- [5] De Lima, L. R. O., De Andrade, S. A. L., Vellasco, P. D. S., da Silva, L. S. (2002). *Experimental and mechanical model for predicting the behaviour of minor axis beam-to-column semi-rigid joints*. International journal of mechanical sciences, 44(6), 1047-1065.
- [6] Tahir, M. M., Juki, I., Yong, L. H., Mohammad, S., Ngian, S. P. (2011). *Finite element analysis of flush end-plate connections connected to column web*. International Journal of Steel Structures, 11, 247-258.
- [7] Pan, J., Chen, S., Wang, Z., & Lu, H. (2018). *Initial rotational stiffness of minor-axis flush end-plate connections*. Advances in Mechanical Engineering, 10(1), 1687814017745397.
- [8] Wang, P., Pan, J., Wang, Z., Li, B., & Qin, J. (2020). *Experimental and numerical investigation of stiffened angle connection in a minor axis*. Science Progress, 103(4), 0036850420973521.
- [9] Wald, F., Sabatka, L., Kabelac, J., Kolaja, D., Pospisil, M. (2015). *Structural Analysis and Design of Steel Connections Using Component Based Finite Element Model (CBFEM)*. Journal of Civil Engineering and Architecture, 9, 895-901.
- [10] Wald, F., Vild, M., Kurikova, M., Kabelac, J., Sekal, D., Maier, N., et al. (2020). *Component based finite element design of steel joints*. Civil Engineering Design, 2(3), 78-89.