

Khảo sát thực nghiệm biến dạng của dầm liên hợp thép bê tông với mức độ liên kết kháng cắt khác nhau

Lê Văn Phước Nhân*, Bùi Đức Vinh, Lê Thái Sơn

Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP Hồ Chí Minh, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh,
268 Lý Thường Kiệt, phường 14, quận 10, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

Ngày nhận bài 30/6/2021; ngày chuyển phản biện 3/7/2021; ngày nhận phản biện 22/7/2021; ngày chấp nhận đăng 28/7/2021

Tóm tắt:

Chương trình thí nghiệm được thực hiện trên hai dầm liên hợp thép bê tông, sử dụng liên kết kháng cắt dạng perfobond nhằm khảo sát biến dạng của dầm liên hợp với mức độ liên kết kháng cắt khác nhau. Thép làm perfobond và dầm thép tiết diện T được cắt chung từ thép tấm mà không cần nối với nhau bằng đường hàn như khi áp dụng đối với tiết diện dầm thép chữ I. Số lỗ liên kết được bố trí trong 2 dầm lần lượt là 10 và 22 lỗ để tạo ra sự khác biệt về mức độ liên kết. Nghiên cứu tập trung đánh giá ảnh hưởng của mức độ liên kết đến biến dạng của dầm liên hợp. Các biến dạng được khảo sát bao gồm: biến dạng của bản bê tông, dầm thép và của liên kết perfobond. Kết quả cho thấy, mức độ liên kết có ảnh hưởng đáng kể đến các biến dạng của dầm liên hợp thép bê tông.

Từ khóa: biến dạng trượt tương đối, dầm liên hợp, hình thái liên kết kháng cắt perfobond, liên kết kháng cắt, ứng xử uốn.

Chỉ số phân loại: 2.1

1. Đặt vấn đề

Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm liên hợp thép bê tông đã được tiến hành bởi nhiều nhà khoa học, với các liên kết kháng cắt truyền thống như liên kết chốt (stud) hay liên kết thép góc và U. Đó là các liên kết đã được đưa vào các tiêu chuẩn của nhiều nước trên thế giới. Riêng liên kết kháng cắt perfobond hiện vẫn chưa được áp dụng một cách chính thống, tuy nhiên nghiên cứu về dạng liên kết này ngày càng phát triển vì tính hiệu quả của liên kết mang lại. Khởi đầu là các nghiên cứu nén đẩy trên các mẫu nhỏ nhằm nghiên cứu khả năng chịu lực của liên kết, sau đó là các thí nghiệm được thực hiện trên các mẫu dầm thực nhằm đánh giá khả năng ứng dụng của loại hình liên kết này cho cấu kiện dầm liên hợp thép - bê tông. M.R. Veldanda và cs (1992) [1] đã thực hiện thí nghiệm nén đẩy trên 48 mẫu, sử dụng liên kết kháng cắt perfobond nhằm khảo sát ứng xử cơ học của loại hình liên kết này. Kết quả cho thấy, liên kết kháng cắt dạng perfobond có thể sử dụng hiệu quả cho dầm liên hợp thép - bê tông. E.C. Oguejiofor và cs (1994) [2] đã thực hiện trên 40 mẫu thí nghiệm nén đẩy để nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số đến ứng xử cơ học của liên kết kháng cắt dạng perfobond. Các thông số đó là số lỗ perfobond, khoảng cách các lỗ, cốt thép ngang và cường độ chịu nén của bê tông. Từ đó, các tác giả đã đưa ra các công thức tính khả năng chịu cắt của liên kết kháng cắt dạng perfobond. Kết quả cho thấy, khả năng kháng cắt của liên kết perfobond tăng khi số lỗ liên kết tăng cũng như khoảng cách của các lỗ nên đặt cách nhau ít nhất 2,25 lần đường kính lỗ. I. Valente và

cs (2004) [3] đã nghiên cứu ứng xử của liên kết kháng cắt perfobond sử dụng bê tông nhẹ với mục tiêu chính là mô tả ứng xử của liên kết, phân tích và so sánh sự đóng góp của các thành phần khác nhau đối với độ trượt tương đối giữa thép và bê tông. Các thông số như: cường độ chịu nén của bê tông nhẹ, cách bố trí cốt thép và khoảng cách các lỗ perfobond được khảo sát để so sánh kết quả thu được với các kết quả thí nghiệm của các tác giả nghiên cứu trước khi sử dụng bê tông thường. J.D.C. Vianna và cs (2008) [4, 5] đã tiến hành thí nghiệm trên 12 mẫu nén đẩy nhằm nghiên cứu ứng xử kết cấu của liên kết kháng cắt dạng perfobond và T-perfobond để khảo sát khả năng kháng cắt, độ dai của liên kết và các dạng phá hoại. Kết quả cho thấy, các dạng liên kết này có khả năng mang lại tính kinh tế và là giải pháp hiệu quả cho việc truyền lực cắt trong kết cấu liên hợp.

Ngoài việc thí nghiệm trên các mẫu nhỏ nén đẩy, các tác giả cũng tiến hành thí nghiệm trên các mẫu lớn với kích thước thực, nhằm đánh giá ứng xử của dầm khi sử dụng các liên kết kháng cắt khi dầm chịu uốn. B.S. Jayas và cs (1989) [6] đã tiến hành thí nghiệm 4 dầm liên hợp tiết diện thực để nghiên cứu ứng xử uốn và dự đoán khả năng chịu tải của dầm liên hợp sử dụng liên kết kháng cắt dạng đinh chốt. E.G. Oguejiofor và cs (1995) [7] tiến hành thí nghiệm 6 mẫu dầm liên hợp bê tông - thép sử dụng liên kết kháng cắt perfobond với mục đích nghiên cứu ứng xử của liên kết kháng cắt trên tiết diện dầm thực và mối liên quan giữa kết quả khi nghiên cứu trên dầm thực và mẫu thí nghiệm nén đẩy. Trong đó, số thép qua lỗ liên kết và hình

*Tác giả liên hệ: Email: lvpnhan@hcmut.edu.vn

Experimental observation of steel-concrete composite beam with different shear connection degrees

Van Phuoc Nhan Le*, Duc Vinh Bui, Thai Son Le

Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology,
Vietnam National University - Ho Chi Minh City,
268 Ly Thuong Kiet Street, Ward 14, District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam

Received 30 June 2021; revised 22 July 2021; accepted 28 July 2021

Abstract:

The test program was carried out on two steel-concrete composite beams using perfobond shear connectors in order to investigate strains of steel-concrete composite beams with different shear connection degrees. The steel used for perfobond and steel girder with T inverse section was cut together from steel plate without using weld connection as applying to steel girder with I section. Some holes settled in beams were 10 holes and 22 holes to create the difference of shear connection degree. The study concentrated on evaluating the effect of shear connection degree on the steel-concrete composite strain. The observed strains included strain of concrete slabs, the strain of steel girders, and strain of perfobond shear connectors. The results showed that shear connection degree significantly affected strains of steel-concrete composite beams.

Keywords: bending behaviour, composite beam, figuration, perfobond shear connector strain, shear connector.

Classification number: 2.1

thái liên kết được thay đổi để đánh giá ảnh hưởng của các thông số này đến ứng xử uốn của dầm. B. Uy và cs (2006) [8] thực hiện nghiên cứu ảnh hưởng của liên kết kháng cắt một phần đến moment âm. Thí nghiệm đã làm rõ một số khái niệm quan trọng và làm nổi bật những lợi ích khi sử dụng liên kết kháng cắt một phần được yêu cầu. Đặc biệt, thí nghiệm cho thấy rằng, ảnh hưởng của liên kết kháng cắt không hoàn toàn đem đến khả năng xoay, không làm ảnh hưởng nhiều đến khả năng chịu lực của dầm. S.H. Kim và cs (2014) [9] đã nghiên cứu trên mẫu nén để kiểm tra ứng xử của liên kết kháng cắt dạng Y-perfobond (perfobond dạng chữ Y). W. Lorenc và cs (2014) [10] đã nghiên cứu trên 19 mẫu nén đẩy để đánh giá sức chịu tải của phần thép được bố trí qua lỗ perfobond. S.H. He và cs (2017) [11] đã thực hiện thí nghiệm nén đẩy đơn đối với các liên kết perfobond dùng với vữa có cường độ siêu cao (ultra-high performance concrete - UHPC) trong các mối nối cầu liên hợp thép - bê tông. Thí nghiệm được tiến hành trên 24 mẫu để tính toán

sử dụng cho các liên kết trong các mối nối cầu. Ảnh hưởng của nhiều thông số như liên kết bề mặt giữa bản perfobond với bê tông, các chốt liên kết trong các lỗ và thể tích của các sợi trong UHPC lên ứng xử của liên kết được thảo luận một cách sâu hơn. J.C. Gud và cs (2019) [12], đã nghiên cứu thực nghiệm khả năng kháng cắt của liên kết kháng cắt dạng perfobond tổ hợp bằng thí nghiệm nén đẩy. Đồng thời, mô phỏng phần tử hữu hạn được xây dựng để mô phỏng thí nghiệm và nghiên cứu sâu hơn cơ cấu trong suốt quá trình gia tải. S.M. Kalantari và cs (2019) [13] đưa ra phương pháp cơ bản dự đoán sự làm việc của liên kết perfobond trong kết cấu liên hợp. Nhiều thông số được xét đến trong việc dự đoán khả năng chịu lực của liên kết trong khung liên hợp. Các thông số bao gồm: cường độ chịu nén của bê tông, diện tích các chốt liên kết, diện tích thép qua lỗ và chiều cao liên kết. L. Tian và cs (2020) [14] đã nghiên cứu khả năng kháng cắt của liên kết perfobond sử dụng xi măng kết dính cao.

Ở Việt Nam, T.H.V Chu và cs (2016) [15] đã khảo sát thực nghiệm ứng xử kháng cắt của liên kết kháng cresbond sử dụng cho kết cấu liên hợp thép bê tông. Đây là một dạng liên kết có hình dáng giống với liên kết perfobond trước đây, có lỗ liên kết mở và tiết diện là một hình elip. Các vấn đề được khảo sát bao gồm: khả năng chịu lực, biến dạng trượt và ảnh hưởng của các tham số đến ứng xử cơ học của liên kết. J.H. Le và cs (2020) [16] đã nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của dầm liên hợp sử dụng liên kết kháng cắt crestbond. Nghiên cứu được thực hiện trên 3 dầm liên hợp sử dụng thép hình chữ I nhằm khảo sát ứng xử uốn qua các đại lượng khả năng chịu lực, biến dạng trượt tương đối giữa bản bê tông và dầm thép, dạng phá hoại dầm. Trong nghiên cứu này, dầm thép sử dụng có tiết diện chữ T ngược, thép làm perfobond được cắt liên với thép làm dầm bằng CNC mà không cần sử dụng liên kết hàn. Việc đánh giá biến dạng của dầm liên hợp thông qua kết quả thực nghiệm trên hai dầm có mức độ liên kết khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của mức độ liên kết đến biến dạng của dầm liên hợp.

Đặc trưng vật liệu dùng trong chương trình thí nghiệm

Bê tông có mác C60/75 được sử dụng cho 2 dầm liên hợp, tiết diện thép hình dạng T ngược có cùng kích thước nhưng khác nhau về số lỗ liên kết kháng cắt với mục đích tạo ra sự khác nhau về mức độ liên kết trong 2 dầm. Số lỗ liên kết trong 2 dầm liên hợp thép bê tông lần lượt là 10 (dầm CB1) và 22 lỗ (dầm CB2). Từ thép tấm, dầm thép tiết diện T ngược và perfobond được cắt chung với nhau bằng máy CNC tạo thành một phần gắn liền nhau mà không cần đến đường hàn để nối liên kết perfobond với thép hình như thường được sử dụng đối với thép hình chữ I. Liên kết perfobond có hình dạng chữ ô-mê-ga (Ω) ngược. Hai dầm được thí nghiệm với mô hình 4 điểm uốn để nhận được ứng xử uốn thuần túy trong đoạn nằm giữa hai điểm đặt tải tập trung (bỏ qua trọng lượng bản thân dầm).

2.1. Bê tông

Thành phần cấp phối bê tông được trình bày ở bảng 1 với tỷ lệ tương ứng của xi măng PC40, cát, đá, nước, silica fume, tro bay và phụ gia giảm nước. Hai nhóm mẫu hình trụ (GC1 và GC2) D150×H300 được đúc và dưỡng hộ trong cùng điều kiện và thời điểm với mẫu dầm. Các thí nghiệm nén để xác định tính chất cơ học của mẫu bê tông sẽ được tiến hành cùng lúc với thí nghiệm uốn các dầm. Kết quả nén mẫu bê tông được trình bày ở bảng 2.

Bảng 1. Thành phần cốt liệu trong bê tông C60/75.

Thành phần	Đơn vị	Khối lượng/m ³
Xi măng PC40	kg	500,0
Cát sông	kg	607,0
Đá nghiền 10×20	kg	1023,0
Nước	l	170,0
Silica fume	kg	18,0
Tro bay	kg	70,0
Phụ gia tăng dẻo	kg	6,50

Bảng 2. Cường độ chịu nén của bê tông.

Nhóm mẫu	Đơn vị	Cường độ nén mẫu trụ $f_{c,dy}$	Giới hạn biến dạng nén ϵ_{limit} (%)
GC1	MPa	60,40	2,055
GC2	MPa	63,39	2,082

2.2. Thép hình và thanh

Thép thanh có gân đường kính 12 mm được bố trí ngang qua lỗ liên kết và thép thanh đường kính 10 mm với khoảng cách 150 mm được bố trí trong bản bê tông, gần với bề mặt của bản bê tông. Các đặc trưng cơ học của thép hình và thép thanh được trình bày ở bảng 3.

Bảng 3. Các thông số của thép hình và thép thanh.

Thông số	Đơn vị	Thép thanh	Thép hình
Giới hạn chảy f_y	MPa	330	250
Giới hạn bền f_u	MPa	500	390
Biến dạng dẻo ϵ_y	%	1,8	1,8
Mô đun đàn hồi E	GPa	200	200

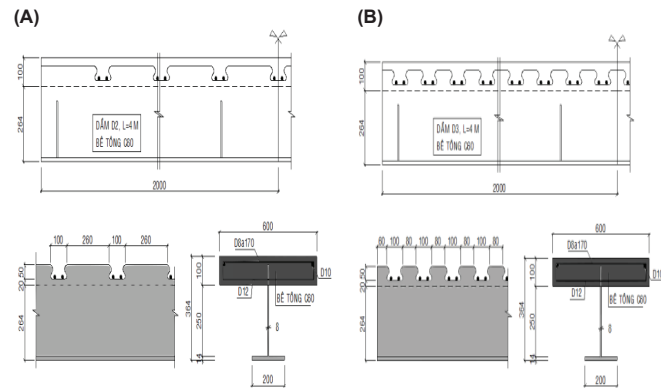
Chú thích: các thông số không thí nghiệm được sử dụng kết quả do nhà sản xuất cung cấp.

3. Chương trình thí nghiệm

3.1. Mẫu thí nghiệm

Hai dầm liên hợp thép - bê tông sử dụng liên kết kháng cắt dạng perfobond được ký hiệu là CB1 và CB2. Chi tiết dầm theo phương dọc và tiết diện ngang được thể hiện ở hình 1, trong đó số khoảng cách giữa các lỗ liên kết trong dầm

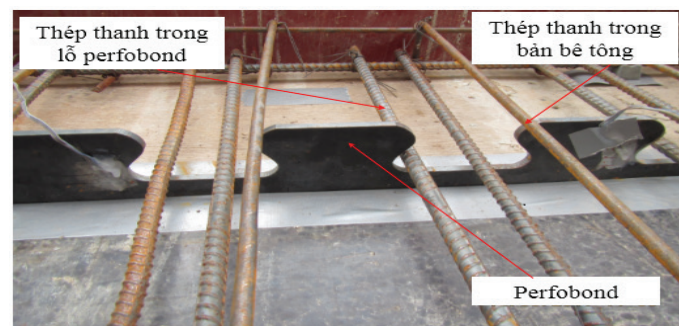
CB1 lớn hơn khoảng cách này ở CB2, do số lỗ liên kết được bố trí khác nhau trong 2 dầm. Các thông số về dầm cũng được mô tả ở bảng 4. Hình 2 minh họa thép thanh đặt trong bản bê tông và thép thanh đặt qua lỗ liên kết perfobond, hình 3 minh họa dầm thép chữ T ngược và perfobond được cắt ra từ thép tấm bằng máy CNC.



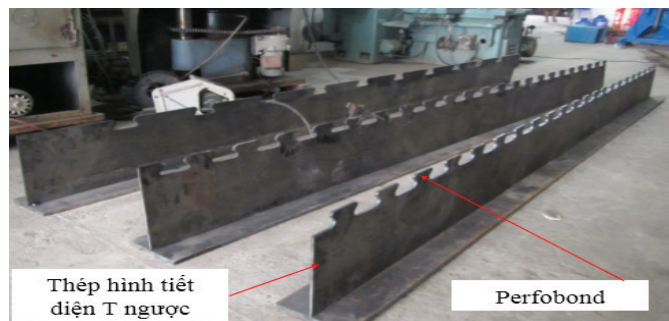
Hình 1. Tiết diện dầm liên hợp thép - bê tông CB1 (A) và CB2 (B).

Bảng 4. Các thông số của 2 dầm CB1 và CB2.

Dầm	Tiết diện	Bê tông	Chiều dày bản bê tông (mm)	Số liên kết
CB1	T264×200	C60	100	10
CB2	T264×200	C60	100	22



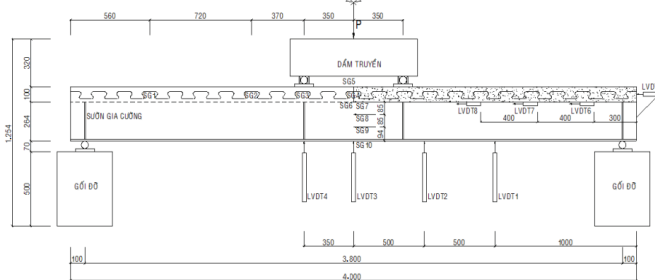
Hình 2. Thép thanh được bố trí trong lỗ perfobond và bản bê tông.



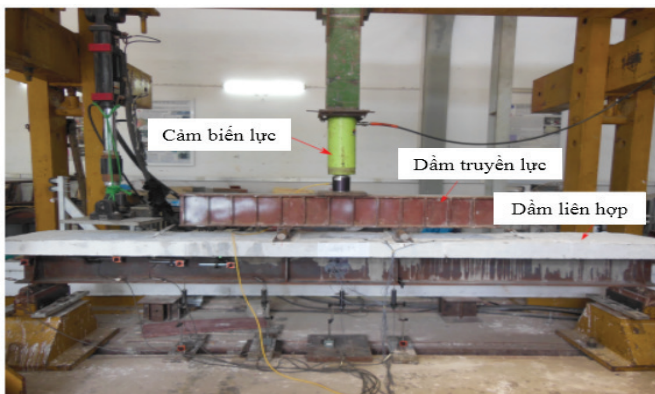
Hình 3. Cấu tạo của thép hình tiết diện T ngược và liên kết perfobond.

3.2. Lắp đặt thí nghiệm

Dầm được thí nghiệm có chiều dài 4 m được đặt trên 2 gối tựa cách nhau 3,8 m, lực tác dụng lên dầm truyền lực tạo ra hai lực tập trung cho mô hình thí nghiệm dầm 4 điểm uốn như ở hình 4. Các cảm biến dạng kế SG1, SG2, SG3 và SG4 được gắn trên liên kết kháng cắt perfobond tại vị trí cách đầu dầm tương ứng là 560, 1280, 1650 và 2000 mm (giữa dầm) để đo biến dạng của liên kết kháng cắt. Các biến dạng kế SG5 và SG6 được gắn vào mặt trên và dưới của bản bê tông để đo biến dạng của bản bê tông. Để khảo sát biến dạng của dầm thép, SG7 được gắn vào mặt dưới của cánh trên dầm thép, SG8 và SG9 được gắn vào bụng dầm thép và SG10 được gắn vào mặt dưới của cánh dưới dầm thép. Hình 5 minh họa thực tế thí nghiệm uốn của dầm liên hợp với cảm biến lực có cấp tải 1000 kN được sử dụng để ghi nhận giá trị tổng lực uốn tác dụng lên mẫu. Tất cả các thiết bị được lắp đặt, kiểm tra và hiệu chỉnh trước khi tiến hành thí nghiệm. Dữ liệu thí nghiệm được ghi nhận tự động bằng hệ máy tính với tần suất 1 lần/giây.



Hình 4. Sơ đồ thí nghiệm dầm 4 điểm uốn.



Hình 5. Thí nghiệm uốn dẻo liên hợp.

3.3. Quy trình gia tải

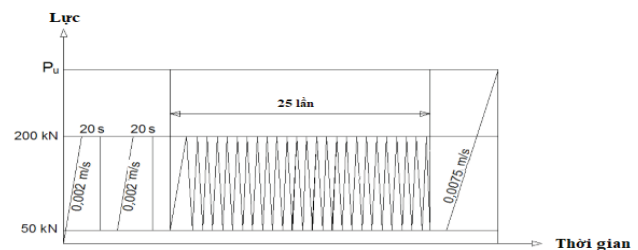
Thí nghiệm uốn của dầm được thực hiện với quy trình gia tải đã được hướng dẫn theo Eurocode 4 [17], các giai đoạn gia tải được tiến hành như sau:

Giai đoạn 1: Tăng tải từ 0 đến 40% P_u , với P_u là tải phá hoại được tính theo công thức cho bởi EC4 [17], mức độ liên kết giả định là hoàn toàn, các hệ số điều kiện làm việc

của bê tông, thép hình lấy bằng 1. Lặp lại 2 lần việc gia tải trong giai đoạn này.

Giai đoạn 2: Tài được tăng tải từ 10 đến 40% P_u . Việc gia tải này được lặp lại 25 lần với mục đích khử các biến dạng dư trong thí nghiệm. Vì vậy, khi xử lý kết quả thu được, biến dạng trong giai đoạn 1 và 2 sẽ bị loại bỏ và không được tính đến trong phân tích.

Giai đoạn 5: Tăng tải từ 10 đến 100% P_u và tiếp tục tăng tải cho đến khi dầm bị phá hoại. Quá trình gia tải thí nghiệm thể hiện ở hình 6. Dữ liệu đo sẽ được lưu lại một cách liên tục trong suốt quá trình thực hiện thí nghiệm.



Hình 6. Quy trình gia tải.

4. Kết quả thí nghiệm và phân tích ứng xử của dầm

Bảng 5 trình bày kết quả thí nghiệm về lực phá hoại, biến dạng tại mặt trên và dưới bản bê tông, tại mặt dưới của dầm thép và của perfobond tại vị trí giữa dầm. Sức chịu tải của dầm CB2 với 22 lỗ liên kết tăng 27,5% so với sức chịu tải của dầm CB1 với 10 lỗ liên kết.

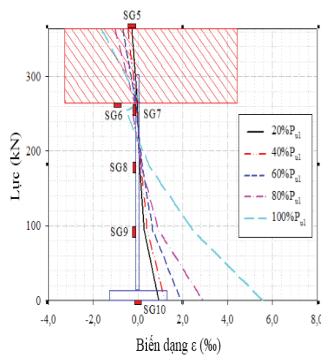
Bảng 5. Kết quả thí nghiệm.

Mẫu dầm	P _a (kN)	Biến dạng tại mặt trên của bản bê tông (%)	Biến dạng tại mặt dưới của bản bê tông (%)	Biến dạng tại mặt dưới của cánh dầm thép (%)	Biến dạng của liên kết kháng cắt perforebond tại giữa dầm (%)
CB1	487,9	-1,643	0,109	5,574	0,130
CB2	622,2	-1,786 ^(*)	2,067	14,370	0,004

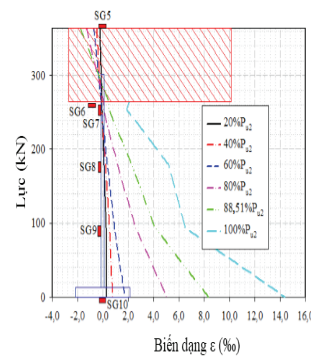
(¹): đạt được với tải bằng 550,8 kN, sau giá trị này biến dạng kể bị đứt nên không thể nhận thêm được giá trị nào nữa.

4.1. Biến dạng trong dầm liên hợp

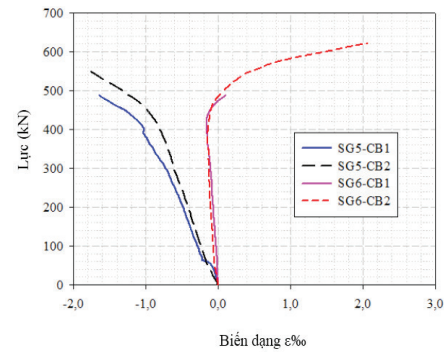
Biến dạng của dầm liên hợp được đo bởi các biến dạng kế được gắn trên bề tông là SG5 tại mặt trên và SG6 ở mặt dưới của bản bê tông. Các biến dạng kế SG7, SG8, SG9 và SG10 được gắn trên thép hình như ở hình 4. Kết quả nhận được cho thấy, biến dạng của dầm liên hợp tăng dần theo cấp tải, trong đó, mặt trên của bản bê tông của dầm CB1 chưa đạt đến biến dạng giới hạn của bê tông và biến dạng mặt trên bản bê tông của dầm CB2 đạt 1,786‰ ứng với cấp tải 550,8 kN (88,51% P_{u2}). Sau cấp tải này, cảm biến SG5 bị đứt nên không thể nhận được các giá trị biến dạng tại mặt trên bản bê tông dầm CB2 kể từ đó (hình 7 và 8). Đường không (zero line) của 2 dầm đều nằm phía trên mặt dưới bản bê tông, đồng nghĩa với việc biến dạng mặt dưới của bản bê tông sẽ chịu kéo.



Hình 7. Biến dạng của dầm CB1 qua từng cấp tải.



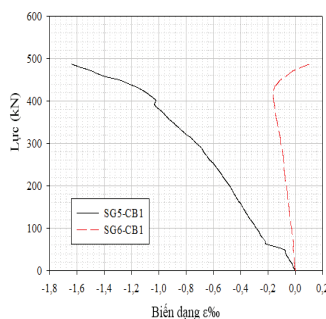
Hình 8. Biến dạng của dầm CB2 qua từng cấp tải.



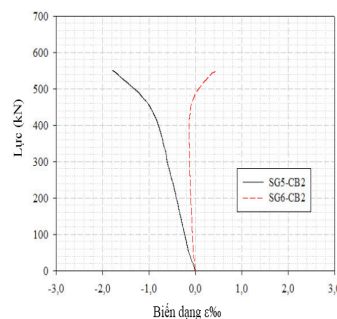
Hình 11. Biến dạng tại mặt trên và dưới của bản bê tông dầm CB1 và CB2.

4.2. Biến dạng của bản bê tông

Biến dạng của bản bê tông dầm CB1 và CB2 được khảo sát dựa trên số liệu thu được từ biến dạng kế SG5 và SG6 gắn tại mặt trên và dưới bản bê tông, kết quả này được biểu diễn ở hình 9 và 10. Cả 2 dầm có biến dạng mặt trên bản bê tông là nén và biến dạng mặt dưới là kéo. Biến dạng mặt trên của bản bê tông ứng với tải phá hoại đều bé hơn giới hạn biến dạng nén của bê tông C60 ($\epsilon_{\text{limit}}=2,082\%$), trong đó, biến dạng nén tại mặt trên bản bê tông dầm CB2 là 1,786% Trong khi đó, biến dạng ở mặt trên bản bê tông trong dầm CB1 chỉ là 1,64%. Hình 11 so sánh biến dạng của bản bê tông tại mặt trên và dưới của 2 dầm CB1 và CB2. Ở cùng giá trị tải trọng, biến dạng mặt trên bản bê tông của dầm CB2 nhỏ hơn CB1. Ứng với tải phá hoại của dầm CB1 ($P_u=487,9$ kN), biến dạng tại mặt trên bản bê tông dầm CB2 là 1,229%, tức là chỉ bằng 74,8% so với CB1. Biến dạng mặt dưới của bản bê tông trong 2 dầm không chênh lệch nhiều và đều là biến dạng kéo. Cụ thể, biến dạng mặt dưới bản bê tông dầm CB1 là 0,109%, CB2 là 0,013%, như vậy biến dạng mặt dưới của bản bê tông dầm CB2 bằng 0,12% so với dầm CB1. Biến dạng mặt dưới của bản bê tông dầm CB2 chuyển sang trạng thái chịu kéo nhiều hơn so với CB1. Điều này có thể giải thích do khả năng kháng cắt của liên kết perfbond trong dầm CB2 cao hơn so với CB1 đã làm cho bản bê tông kéo dài khả năng chịu nén, bê tông chậm phá hoại hơn so với CB1.



Hình 9. Biến dạng tại mặt trên và dưới của bản bê tông dầm CB1.

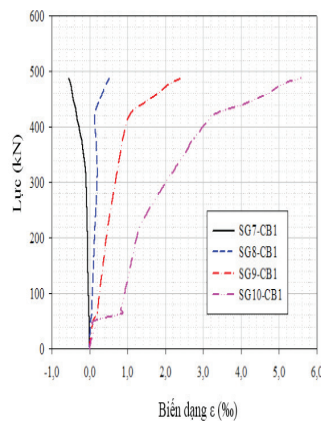


Hình 10. Biến dạng tại mặt trên và dưới của bản bê tông dầm CB2.

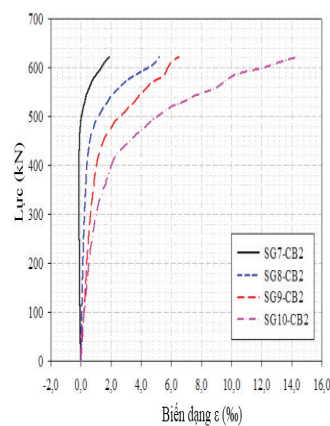
4.3. Biến dạng của dầm thép

Biến dạng trong thép hình của dầm CB1 và CB2 được khảo sát thông qua các biến dạng kế SG7, SG8, SG9 và SG10. Hình 12 và 13 biểu diễn biến dạng trong thép hình tại các vị trí của biến dạng kế. Biến dạng của thép hình tăng dần theo sự gia tăng của tải trọng, ban đầu biến dạng vẫn còn bé hơn biến dạng dẻo của thép, sau đó biến dạng tăng dần từ thớ chịu dưới cùng và lan dần lên phần bụng thép hình. Hình 14 trình bày so sánh biến dạng của thép hình trong 2 dầm tại các vị trí biến dạng kế SG7, SG8, SG9 và SG10. Kết quả cũng cho thấy, tại vị trí gần mặt dưới bản bê tông (SG7), biến dạng của thép hình trong dầm CB1 hoàn toàn chịu nén trong suốt quá trình chịu tải, kết quả này chứng tỏ do mức độ liên kết một phần nên dầm CB1 chưa có được ứng xử liên hợp hoàn toàn. Trong khi đó, tại vị trí này, biến dạng thép hình trong dầm CB2 ban đầu chịu nén, sau đó chuyển sang trạng thái chịu kéo khi cấp tải bắt đầu lớn hơn 500 kN và biến dạng tại vị trí này vẫn bé hơn biến dạng dẻo của thép khi dầm bị phá hoại. Điều đó cho thấy, vị trí này vẫn còn làm việc trong giai đoạn đàn hồi trong suốt quá trình chịu tải (hình 14A). Hình 14B cho thấy, biến dạng của thép hình trong 2 dầm CB1 và CB2 tại vị trí SG8 đều chịu kéo, cùng một mức tải tác dụng biến dạng trong thép hình tại vị trí này trong dầm CB1 bé hơn CB2 và cả 2 dầm đều có biến dạng bé hơn so với biến dạng dẻo của thép. Tại vị trí này, biến dạng của thép hình trong dầm CB2 cũng bắt đầu vượt quá biến dạng dẻo ở mức tải khoảng 560 kN. Hình 14C biểu diễn biến dạng của thép hình tại vị trí SG9. Tại vị trí này, biến dạng trong thép hình của dầm CB1 lớn hơn của CB2 không đáng kể và khi gần đạt tải tới hạn của dầm CB1 thì biến dạng tại vị trí này của 2 dầm bắt đầu vượt qua biến dạng dẻo của thép.

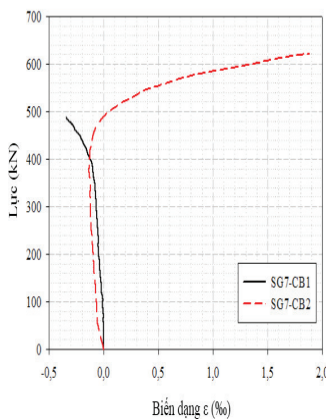
Tại vị trí đáy dầm (SG10), biến dạng dẻo xuất hiện với tải trọng khoảng 300 kN đối với dầm CB1 và 480 kN đối với CB2. Có thể thấy, vùng biến dạng dẻo trong dầm CB2 nhiều hơn vùng biến dạng dẻo trong CB1, giá trị biến dạng dẻo trong dầm CB2 cũng lớn hơn giá trị biến dạng dẻo trong CB1. Điều này được cho là do mức độ liên kết kháng cắt



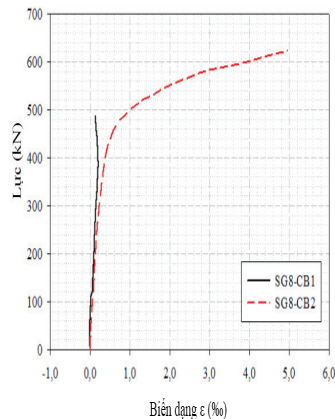
Hình 12. Biến dạng trong dầm thép của dầm CB1.



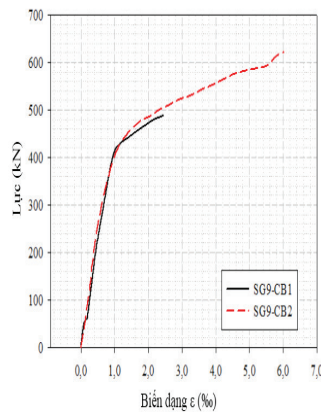
Hình 13. Biến dạng trong dầm thép của dầm CB2.



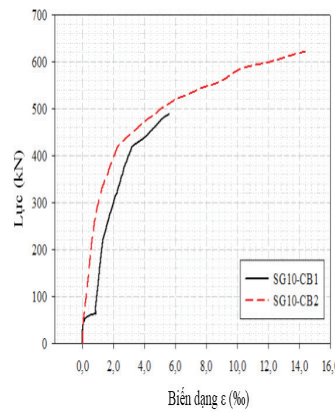
(A) Biến dạng tại SG7.



(B) Biến dạng tại SG8.



(C) Biến dạng tại SG9.



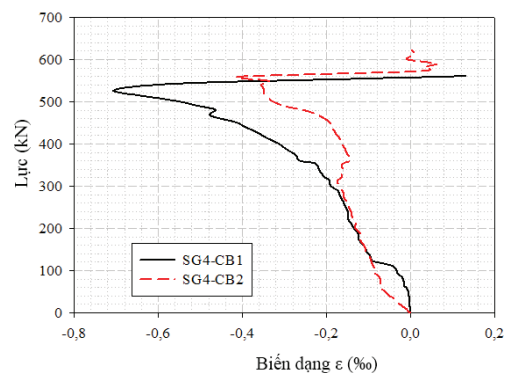
(D) Biến dạng tại SG10.

Hình 14. So sánh biến dạng của thép hình trong dầm CB1 và CB2.

của dầm CB2 lớn hơn so với CB1 nên có thể hình thành ứng xử uốn dẻo tốt hơn, vì vậy, sức chịu tải của dầm CB2 lớn hơn CB1. Ứng với tải phá hoại của dầm CB1, $P_{u1}=487,87$ kN ($\approx 78,4\% P_{u2}$), biến dạng tại mặt dưới của cánh dưới thép hình dầm CB1 là 5,574‰, CB2 là 4,649‰, tức là biến dạng tại vị trí này của thép hình CB2 bằng 83,4% so với CB1.

4.4. Biến dạng của perFOBOND

Hình 15 biểu diễn biến dạng của perFOBOND tại vị trí giữa dầm CB1 và CB2. Phần lớn trong suốt thời gian chịu tải, biến dạng của perFOBOND chủ yếu chịu nén. Đến khi dầm gần bị phá hoại thì biến dạng này có xu hướng chịu kéo. Điều này được cho là do dầm bắt đầu xuất hiện vết nứt, bản bê tông bắt đầu mất dần khả năng chịu lực nên giá trị biến dạng của perFOBOND bắt đầu đổi dấu (từ nén sang kéo). Biến dạng của perFOBOND ứng với tải phá hoại của dầm CB1 và CB2 lần lượt là 0,13 và 0,004‰. Ứng với tải phá hoại dầm CB1, $P_{u1}=487,87$ kN, biến dạng của perFOBOND vẫn còn chịu nén với giá trị là -0,392‰. Biến dạng trong perFOBOND còn rất bé so với biến dạng dẻo của thép. Rõ ràng, dầm liên hợp có mức độ liên kết cao hơn sẽ làm cho bản bê tông phía dưới chưa bị nứt nên dầm thép và bản bê tông vẫn còn duy trì ứng xử liên hợp lâu hơn so với dầm CB1.



Hình 15. Biến dạng của perFOBOND trong dầm CB1 và CB2 tại vị trí giữa dầm.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã phân tích ảnh hưởng của mức độ liên kết đến biến dạng của dầm liên hợp thép - bê tông sử dụng liên kết kháng cắt dạng perFOBOND. Kết quả cho thấy, mức độ liên kết ảnh hưởng đáng kể đến biến dạng của dầm liên hợp. Liên kết kháng cắt dạng perFOBOND có mức độ liên kết cao hơn sẽ cho biến dạng trong bản bê tông, thép hình và perFOBOND bé hơn, đồng thời sức chịu tải cũng tăng hơn so với dầm có ít lỗ liên kết perFOBOND hơn, cụ thể:

(1) Biến dạng của bản bê tông giảm đáng kể khi số lượng lỗ liên kết tăng. Tại thời điểm bị phá hoại, $P_{u1}=487,87$ kN $\approx 78,4\% P_{u2}$, biến dạng của mặt trên bản bê tông dầm CB2 bằng 74,8% so với biến dạng của bản bê tông CB1; biến dạng mặt dưới của bản bê tông CB2 bằng 0,12% so với biến dạng mặt dưới của CB1.

(2) Biến dạng trong thép hình bé hơn khi dầm liên hợp có số lỗ perFOBOND tăng. Ứng với tải phá hoại của dầm CB1 ($P_{u1}=487,87$ kN $\approx 78,4\% P_{u2}$), biến dạng tại mặt dưới của cánh dưới thép hình dầm CB2 bằng 83,4% so với biến dạng

tại mặt dưới CB1. Mặt khác, với mức độ liên kết cao hơn sẽ làm tăng phạm vi làm việc dẻo của thép hình trong dầm liên hợp.

(3) Biến dạng trong liên kết kháng cắt perfobond giảm khi mức độ liên kết tăng. Tại vị trí giữa dầm, ứng với tải phá hoại dầm CB1 ($P_{ul}=487,87$ kN), biến dạng của perfobond ở vị trí giữa dầm trong CB2 vẫn còn chịu nén, trong khi biến dạng perfobond trong dầm CB1 chịu kéo do một phần bê tông đã bị nứt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M.R. Veldanda, M.U. Hosain (1992), "Behaviour of perfobond rib shear connectors: Push-out test", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **19**(1), pp.1-10, DOI: 10.1139/192-001.
- [2] E.C. Oguejiofor, M.U. Hosain (1994), "A parametric study of perfobond rib shear connectors", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **21**(4), pp.614-625, DOI: 10.1139/194-063.
- [3] I. Valente, P.J.S. Cruz (2004), "Experimental analysis of perfobond shear connection between steel and lightweight concrete", *Journal of Constructional Steel Research*, **60**(3-5), pp.465-479, DOI: 10.1016/S0143-974X(03)00124-X.
- [4] J.D.C. Vianna, L.F.C. Neves, P.C.G.D.S. Vellasco, et al. (2008a), "Experimental assessment of perfobond and T-perfobond shear connectors' structural response", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(2), pp.408-421, DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.02.011.
- [5] J.D.C. Vianna, L.F.C. Neves, P.C.G.D.S. Vellasco, et al. (2008b), "Structural behaviour of T-perfobond shear connectors in composite girders: An experimental approach", *Engineering Structures*, **30**(9), pp.2381-2391, DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.01.015.
- [6] B.S. Jayas, M.U. Hosain (1989), "Behaviour of headed studs in composite beams: Full-size tests", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **16**(5), pp.712-724, DOI: 10.1139/189-106.
- [7] E.G. Oguejiofor, M.U. Hosain (1995), "Tests of full-size composite beams with perfobond rib connectors", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **22**(1), pp.80-92, DOI: 10.1139/195-008.
- [8] B. Uy, H.Y. Loh, M. Bradford (2006), "The effects of partial shear connection in hogging moment regions of composite beams and joints", *Journal of Constructional Steel Research*, **60**(6), pp.897-919, DOI: 10.1016/j.jcsr.2003.10.007.
- [9] S.H. Kim, W.H. Heo, K.S. Woo, et al. (2014), "End-bearing resistance of Y-type perfobond rib according to rib width-height ratio", *Journal of Constructional Steel Research*, **103**(5), pp.101-116, DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.08.003.
- [10] W. Lorenc, M. Kozuch, S. Rowinski (2014), "The behavior of puzzle-shaped composite dowels - Part I: Experimental study", *Journal of Constructional Steel Research*, **101**, pp.482-499, DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.05.013.
- [11] S.H. He, Z. Fang, A.S. Mosallam (2017), "Push-out tests for perfobond strip connectors with UHPC grout in the joints of steel-concrete hybrid bridge girders", *Engineering Structures*, **135**, pp.177-190, DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.01.008.
- [12] J.C. Gud, D. Liu, W.Q. Deng, et al. (2019), "Experimental study on the shear resistance of a comb-type perfobond rib shear connector", *Journal of Constructional Steel Research*, **158**, pp.279-289, DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.032.
- [13] S.M. Kalantari, S.M. Mortazavi, M.S. Tafazzoli (2019), "Fuzzy-based approach to predict the performance of shear connectors in composite structures", *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, **3-4**, pp.1-11, DOI: 10.22115/SCCE.2020.215906.1165.
- [14] L. Tian, T. Liu, T. Li, et al. (2020), "Shear resistance of novel perforated shaped steel engineerf cemenetious composite (ECC) connectors", *Advanced Steel Construction*, **16**(1), pp.30-36, DOI:10.18057/IJASC.2020.16.1.4.
- [15] T.H.V. Chu, D.V. Bui, V.P.N. Le, et al. (2016), "Shear resistance behaviors of a newly puzzle shape of crestbond rib shear connector: An experimental study", *Lecture Notes in Civil Engineering*, **8**, pp.1157-1182, DOI: 10.1007/978-981-10-6713-6_23.
- [16] J.H. Ahn, D.K. Dao, V.P.N. Le, et al. (2016), "Behavior of steel and concrete composite beams with a newly puzzle shape of crestbond rib shear connector: An experimental study", *Structural Engineering and Mechanics*, **60**(6), pp.1001-1019, DOI: 10.12989/sem.2016.60.6.1001.
- [17] The European Standard EN 1994-1-1:2004 (2004), *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*.