

ẢNH HƯỞNG CỦA MỨC ĐỘ LIÊN KẾT KHÁNG CẮT ĐẾN ỨNG XỬ UỐN CỦA DẦM LIÊN HỢP THÉP – BÊ TÔNG SỬ DỤNG LIÊN KẾT KHÁNG CẮT DẠNG PERFOBOND: PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Lê Văn Phước Nhân^{a,b,*}, Bùi Đức Vinh^{a,b}, Hồ Đức Duy^{a,b}, Lê Thái Sơn^c, Lưu Trần Hữu Tín^{a,b}

^aKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh,

268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bĐại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, quận Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^cCông ty TNHH Xây Dựng Bất Động Sản MD Land,

175 đường Nguyễn Thị Thập, quận 7, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 25/12/2020, Sửa xong 06/03/2021, Chấp nhận đăng 10/03/2021

Tóm tắt

Hai mẫu dầm liên hợp kích thước lớn sử dụng liên kết Perfobond được thí nghiệm để khảo sát ứng xử uốn của dầm. Dầm thép có tiết diện T ngược và liên kết kháng cắt dạng Perfobond được gắn với nhau dọc theo chiều dài dầm liên hợp thép – bê tông. Phần thép và Perfobond được làm từ thép SS400, phần bê tông được chế tạo bằng bê tông C60/75. Sự khác nhau giữa hai dầm liên hợp thép – bê tông là số lỗ liên kết trong liên kết kháng cắt dạng Perfobond. Một dầm được bố trí 10 lỗ liên kết và dầm kia được bố trí 22 lỗ liên kết trong mỗi dầm. Mục tiêu của nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của mức độ liên kết đến ứng xử uốn của dầm liên hợp thép – bê tông sử dụng liên kết kháng cắt dạng Perfobond, như: khả năng chịu tải, chuyển vị, biến dạng tương đối giữa dầm thép và bản bê tông, các dạng phá hoại của dầm liên hợp. Kết quả thực nghiệm cho thấy hình thái liên kết ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử uốn của dầm liên hợp thép – bê tông.

Từ khóa: dầm liên hợp; liên kết kháng cắt; liên kết kháng cắt Perfobond; mức độ liên kết; biến dạng trượt tương đối; ứng xử uốn.

EFFECT OF DEGREE OF SHEAR CONNECTION ON BENDING BEHAVIOUR OF STEEL – CONCRETE COMPOSITE BEAM USING PERFOBOND SHEAR CONNECTION: EXPERIMENTAL APPROACH

Abstract

Two large scale steel concrete composite beams using Perfobond shear connectors were tested to investigate bending behavior. Steel girders with inverse Tee section and Perfobond shear connectors were attached each other along beam length of steel – concrete composite beams. Steel girders and shear connection Perfobonds were made of steel SS400, concrete slabs were made of concrete grade of C60/75. The difference between these beams was the number of dowels in shear connectors. One of them had 10 dowels and the other had 22 dowels. The aim of study focused on the effect of degree of connection on bending behavior of steel concrete composite beam using Perfobond shear connectors, such as load capacity, deflection, relative slip between concrete slabs and steel girders, and failure mode of beams. The experimental results showed that numbers of dowels affected significantly on bending behavior of steel concrete composite beam.

Keywords: composite beam; shear connector; Perfobond shear connector; degree of connection; relative slip; bending behaviour.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(1V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(1V)-04) © 2021 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: lvphan@hcmut.edu.vn (Nhân, L. V. P.)

1. Giới thiệu

Liên kết kháng cắt dạng Perfobond đã được nhiều tác giả trên thế giới nghiên cứu từ lâu. Nhiều thí nghiệm với các mẫu nhỏ được nén nhằm nghiên cứu ứng xử của liên kết kháng cắt. Bên cạnh đó, các tác giả cũng đã thực hiện nhiều thí nghiệm với mẫu đầm có kích thước thực tế nhằm nghiên cứu ứng xử uốn của dầm liên hợp thép – bê tông.

E. C. Oguejiofor và M. U. Hosain (1994) đã tiến hành thí nghiệm nén trên 40 mẫu nhỏ có liên kết kháng cắt dạng perfobond để nghiên cứu một số tham số liên quan đến khả năng kháng cắt của liên kết [1, 2]. E.G. Oguejiofor và M.U. Hosain (1995) đã thực hiện thí nghiệm trên 6 mẫu dầm liên hợp với liên kết kháng cắt dạng perfobond nằm trong bản bê tông. Khảo sát này là nghiên cứu ứng xử của dầm có kích thước thực và mối liên hệ giữa các kết quả thu được so với kết quả của mẫu nhỏ khi chịu nén [3]. B. Jurkiewicz và J. M. Hottier (2005) đã nghiên cứu ứng xử tĩnh của dầm liên hợp thép – bê tông sử dụng một loại liên kết Perfobond có cải tiến về hình thức liên kết [4]. Kết quả thí nghiệm cho thấy ứng xử tương tự với dầm liên hợp thép bê tông với các liên kết cổ điển đã được sử dụng trước đó: miền đàn hồi, miền dẻo, độ dai lớn, dạng phá hoại uốn (khớp dẻo), độ trượt tương đối giữa dầm thép và bản bê tông khá bé. Brian Uy (2006) nghiên cứu ảnh hưởng của liên kết một phần lên vùng moment âm của dầm liên hợp và nút khung. Thí nghiệm chứng minh rằng ảnh hưởng của liên kết không hoàn toàn làm gia tăng độ xoay nhưng không làm giảm khả năng chịu lực của mẫu [5]. L. F. Costa-Neves và cộng sự (2008) thực hiện thí nghiệm nén trên 12 mẫu thử nhằm đánh giá ứng xử kết cấu của mẫu sử dụng liên kết kháng cắt dạng perfobond và T-perfobond. Khả năng chịu lực của liên kết, độ dai và dạng phá hoại được mô tả và thảo luận bằng cách so sánh các kết quả từ các mô hình phân tích có sẵn [6]. Ngoài ra, tác giả cũng đã thí nghiệm nén trên 18 mẫu thử sử dụng liên kết kháng cắt T-Perfobond (Perfobond dạng chữ T) để nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày bản bê tông, cường độ chịu nén của bê tông, hình dáng các liên kết kháng cắt, vị trí tương đối của liên kết đối với hướng của lực tác dụng, số lỗ liên kết kháng cắt và sự sắp đặt các lỗ đến ứng xử của liên kết. Kết quả được trình bày và thảo luận tập trung vào ứng xử kết cấu của liên kết dạng T-perfobond trên các phương diện: khả năng truyền lực cắt, độ dai và các dạng phá hoại [7]. Chi-Young Jung (2008) tiến hành thí nghiệm để đánh giá khả năng chịu cắt của liên kết kháng cắt dạng Y-perfobond, đây là loại liên kết có khả năng chịu cắt và độ dai lớn hơn so với các liên kết kháng cắt dạng perfobond thông dụng [8]. Se-Jun Park (2014) đã nghiên cứu trên mẫu nén để kiểm tra ứng xử của liên kết kháng cắt dạng Y-perfobond (perfobond dạng chữ Y) [9]. W. Lorenc, M. Kozuch, S. Rowiński tiến hành thí nghiệm trên 19 mẫu thử nhỏ để đánh giá khả năng chịu tải của phần thép liên kết được bố trí qua lỗ perfobond [10].

Ở Việt Nam, Huỳnh Phúc Linh (2011) nghiên cứu độ bền và độ võng nứt của dầm liên hợp có thép hình chữ I nằm hoàn toàn trong bê tông. Dầm bê tông tiết diện chữ nhật không có bản sàn bê tông cốt thép, không sử dụng liên kết kháng cắt nào [11]. Chu Thị Hải Vinh (2013) nghiên cứu mô hình ứng xử và khả năng truyền lực của liên kết perfobond ứng dụng trong kết cấu liên hợp bê tông – thép [12]. Nghiên cứu được thực hiện trên 6 nhóm mẫu để đánh giá ảnh hưởng của các thông số như cường độ chịu nén của bê tông thường, số thanh thép qua lỗ liên kết đến ứng xử cơ học của liên kết kháng cắt dạng perfobond. Đào Duy Kiên (2014) và cộng sự nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu lực và ứng xử của dầm liên hợp thép - bê tông sử dụng liên kết cắt kiểu perfobond đối với bê tông thường, thép hình tiết diện chữ I [13]. Trong nghiên cứu này, các dầm được chế tạo có cường độ chịu nén của bê tông và số thép qua lỗ khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của cường độ bê tông và thép thanh qua lỗ liên kết dạng perfobond đến ứng xử uốn của dầm thực. Nguyễn Thị Ngọc Diễm (2014) nghiên cứu cơ chế truyền lực và khả năng kháng cắt của liên kết perfobond tiết diện mở bằng thí nghiệm nén đẩy đơn (Single Push-out Test) [14]. Nghiên cứu được thực hiện trên 15 mẫu chia đều cho 5 nhóm để

khảo sát ứng xử cơ học của liên kết kháng cắt dạng perfobond sử dụng cho dầm liên hợp với thép hình chữ T ngược. Lê Hoàng Phương (2015) nghiên cứu thực nghiệm ứng xử chịu lực của dầm liên hợp bê tông - thép sử dụng liên kết perfobond. Chương trình thí nghiệm được tiến hành trên 6 mẫu dầm thực, thép hình có tiết diện T ngược, sử dụng bê tông thường, bản bê tông có vát cánh [15]. Trần Minh Tiến (2016) tiến hành thí nghiệm trên hai dầm liên hợp, sơ đồ liên tục hai nhịp nhằm nghiên cứu ứng xử của dầm liên tục thép - bê tông cốt thép sử dụng liên kết perfobond với mức độ kháng cắt không hoàn toàn. Trong nghiên cứu này, nhóm cũng tiến hành khảo sát sự phân bố lại nội lực của dầm và biến dạng trượt giữa thép và bê tông trong dầm liên tục [16]. Đinh Thái Hòa (2017) nghiên cứu thực nghiệm sự phân bố truyền lực lên các liên kết kháng cắt dạng perfobond trong dầm liên hợp để đánh giá sâu hơn cơ chế phân phối lực trong mỗi liên kết của dầm thực. Kết quả cũng được so sánh với cơ chế truyền lực của liên kết kháng cắt perfobond theo mô hình thí nghiệm nén đẩy [17]. Nguyễn Thế Phong (2018) thực hiện khảo sát thực nghiệm ứng xử của dầm đơn giản thép bê tông sử dụng liên kết kháng cắt dạng crestbond và bê tông cường độ cao bằng mô phỏng Ansys nhằm đánh giá khả năng chịu lực, độ võng và biến dạng trượt tương đối giữa thép hình và bản bê tông [18]. Lê Thái Sơn (2019) thực hiện nghiên cứu thực nghiệm ứng xử uốn dầm liên hợp với thép hình tiết diện T ngược với bê tông cường độ cao. Mục tiêu nghiên cứu này nhằm đánh giá ảnh hưởng của mức độ kháng cắt đến ứng xử uốn của dầm. Bên cạnh đó là khảo sát ứng xử uốn của dầm liên hợp sử dụng bê tông cường độ cao [19]. Hàn Ngọc Đức (2019) nghiên cứu sức kháng trượt dọc của chốt bê tông trong dầm liên hợp rỗng chiều cao nhỏ qua thí nghiệm đẩy. Trong nghiên cứu này, tác giả khảo sát cơ chế truyền lực trượt dọc của dầm liên hợp có tiết diện dầm thép rỗng và chiều cao nhỏ với các hình dạng khác nhau của chốt bê tông chịu cắt nằm chìm trong bản sàn bê tông là khác biệt so với chốt thép có mũ chịu cắt. Trong bài báo này, sức kháng trượt dọc của chốt bê tông trong dầm liên hợp rỗng có chiều cao thấp sẽ được xem xét. Sức kháng trượt dọc theo lý thuyết cho chốt bê tông chịu cắt được xác định dựa theo tiêu chuẩn EN [20]. Nguyễn Trung Kiên (2020) đã thực hiện phân tích sự làm việc của dầm liên hợp thép – bê tông khoét lỗ bản bụng bằng phương pháp mô phỏng số [21]. Dầm liên hợp sử dụng liên kết chốt (stud) đường kính 19mm, chiều cao chốt là 100mm, khoảng cách chốt 150mm và thép hình được khoét lỗ đường kính 380mm, khoảng cách ác lỗ là 570mm nhằm phản ánh khả năng ứng dụng mô phỏng cho việc phân tích ứng xử của dầm liên hợp. Trần Đăng Khoa (2020) đã nghiên cứu ứng xử của dầm liên hợp với thép hình tiết diện I, sử dụng liên kết kháng cắt dạng perfobond bằng mô phỏng Ansys [22]. Trong nghiên cứu này, tác giả đã mô phỏng một dầm với những thông số đầu vào đúng với các thông số của thí nghiệm thực nhằm đánh giá tính khả dụng khi sử dụng phương pháp mô phỏng trong việc phân tích ứng xử uốn của dầm liên hợp. Bên cạnh đó, các bài toán khác cũng được mô phỏng với các thông số thay đổi như số lượng thép qua lỗ liên kết, cường độ chịu nén của bê tông nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số đến ứng xử uốn của dầm.

Trong nghiên cứu này, các mẫu có kích thước lớn sẽ được thí nghiệm để khảo sát ứng xử chịu uốn của dầm liên hợp thép – bê tông sử dụng liên kết kháng cắt dạng perfobond liên tục. Trong đó, dầm thép có tiết diện là chữ T ngược được gắn liền với liên kết kháng cắt perfobond thông qua việc cắt thép từ tấm thép lớn không sử dụng đường hàn. Phần thép được cắt có dạng ô mê ga (Ω) nằm bên trong bản bê tông được xem là thành phần liên kết kháng cắt cho dầm liên hợp. Sơ đồ thí nghiệm mẫu dầm là sơ đồ bốn điểm uốn nhằm đảm bảo ứng xử uốn thuần túy tại đoạn giữa dầm (bỏ qua trọng lượng bản thân dầm). Hai dầm liên hợp thép – bê tông cùng được chế tạo từ bê tông có mác C60/75 nhưng khác nhau về số liên kết, mẫu dầm thứ nhất có 10 liên kết (CB1) và mẫu dầm còn lại có 22 liên kết (CB2). Ứng xử uốn trong nghiên cứu này bao gồm: khả năng chịu lực, độ võng, biến dạng trượt tương đối giữa bê tông và dầm thép, các dạng phá hoại của dầm.

2. Đặc trưng vật liệu dùng trong chương trình thí nghiệm

2.1. Bê tông

Cấp phối bê tông bao gồm các thành phần: xi măng PC40, cát, đá, nước, silica fume, tro bay, phụ gia giảm nước với tỉ lệ được liệt kê trong Bảng 1. Hai nhóm mẫu hình trụ (GC1 và GC2) D150×H300 được tạo và dưỡng hộ cùng với mẫu dầm, thí nghiệm xác định cường độ nén được thực hiện đồng thời cùng thời điểm với thí nghiệm uốn của mẫu dầm [23]. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của bê tông được trình bày trong Bảng 2.

2.2. Thép kết cấu và cốt thép cho bê tông

Mỗi lỗ của liên kết kháng cắt perfobond được bố trí hai thanh thép gân D12mm ngang qua lỗ và một lớp thép thanh có đường kính $D = 10$ mm với khoảng cách 150 mm được đặt cấu tạo gần lớp mặt trên của bản bê tông, phía trên liên kết kháng cắt. Các đặc trưng cơ học của thép hình và thép thanh được trình bày trong Bảng 3.

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

Thành phần	Đơn vị	Khối lượng cho 1 m ³
Xi măng PC40	kg	500,0
Cát sông	kg	607,0
Đá nghiền 10×20	kg	1023,0
Nước	lít	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_cyl}	Giới hạn biến dạng nén ϵ_{limit} (%)
GC1	MPa	60,40	2,055
GC2	MPa	63,39	2,082

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

Các thông số không thí nghiệm được sử dụng kết quả do nhà sản xuất cung cấp

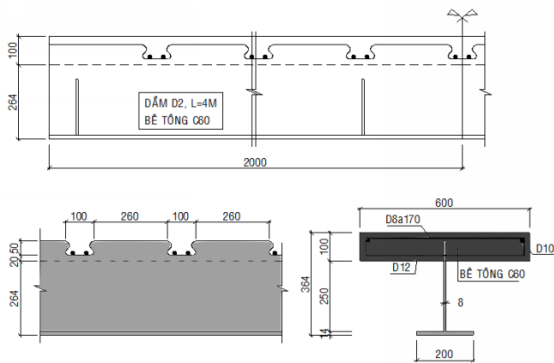
3. Chương trình thí nghiệm

3.1. Mẫu thí nghiệm

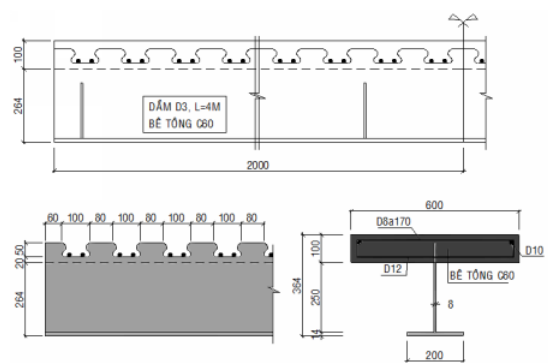
Trong nghiên cứu này hai dầm liên hợp thép – bê tông sử dụng liên kết kháng cắt dạng perFOBOND được tạo và định danh CB1 và CB2. Cả hai dầm đều được chế tạo bởi bê tông C60/75 nhưng có số liên kết khác nhau như trình bày trong Bảng 4 và Hình 1 bên dưới. Dầm thép có tiết diện T ngược được cắt từ thép bản, một trong hai cạnh được cắt bằng máy CNC để tạo ra liên kết kháng cắt dạng PerFOBOND với các lỗ có hình chữ Ω . Phần nằm bên trong bản bê tông được xem là liên kết kháng cắt, phần nằm bên ngoài bản bê tông được xem là tiết diện dầm thép. Đặc điểm của loại liên kết trong nghiên cứu này là liên kết kháng cắt dạng PerFOBOND và thép hình liền nhau, không cần hàn như phương pháp

Bảng 4. Các thông số của hai 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

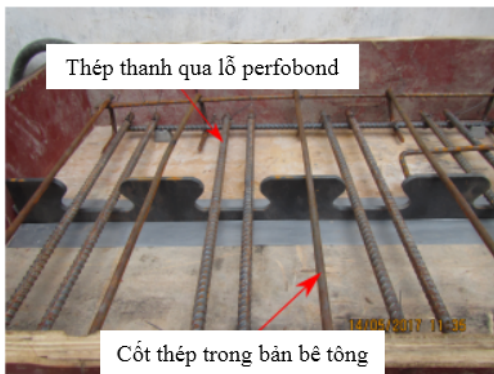


(a) Tiết diện dầm CB1



(b) Tiết diện dầm CB2

Hình 1. Tiết diện dầm liên hợp thép – bê tông CB1 và CB2



Hình 2. Dầm thép tiết diện T ngược và liên kết kháng cắt dạng perFOBOND

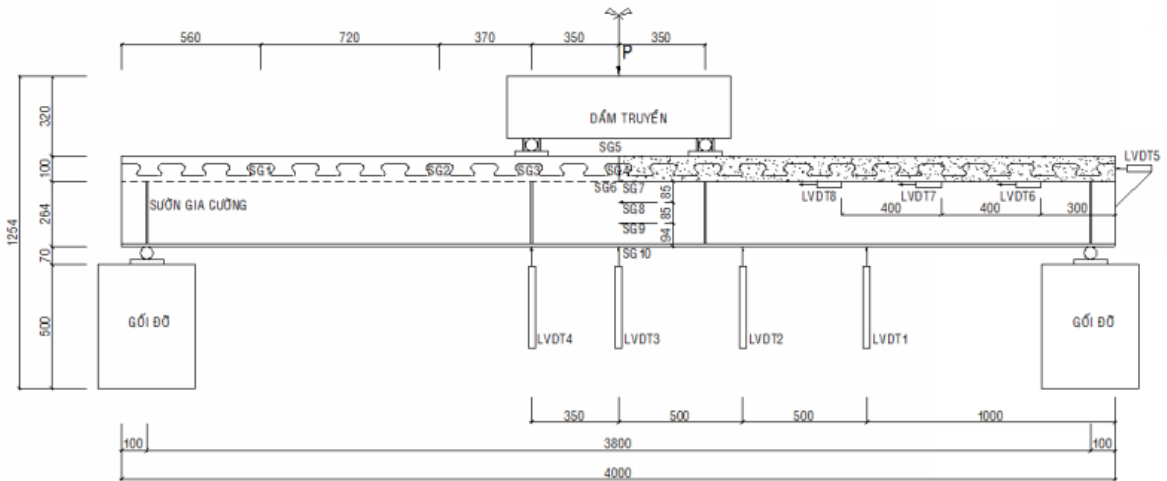


Hình 3. Thép thanh được đặt bố trí ngang qua lỗ liên kết

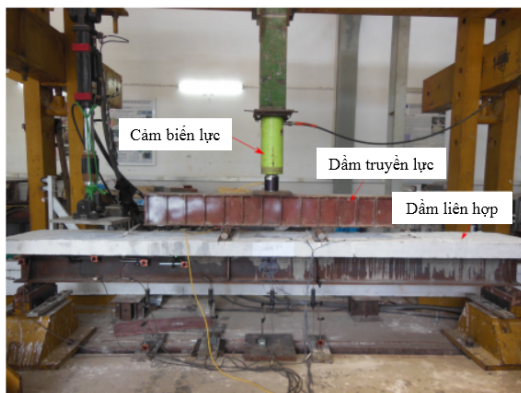
thông thường. Phần bên dưới dầm thép được hàn với bản cánh để tạo ra dầm thép có tiết diện chữ T ngược, như được thể hiện trong Hình 2, thép thanh đặt ngang qua lỗ liên kết được minh họa trong Hình 3.

3.2. Lắp đặt thí nghiệm

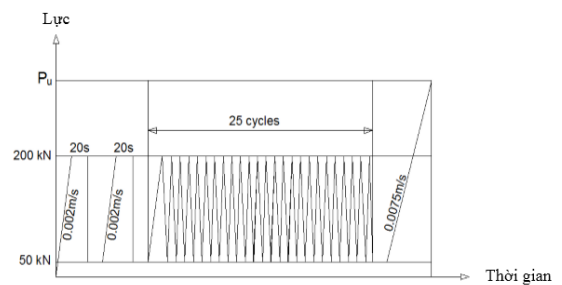
Dầm thí nghiệm có chiều dài 4m được đặt trên 2 gối tựa và lực uốn được đặt tại 2 điểm như thể hiện ở Hình 4. Hình ảnh thực tế về thí nghiệm này được minh họa trong Hình 5. Các cảm biến chuyển vị LVDT1, LVDT2, LVDT3 và LVDT4 được sử dụng để đo độ võng tại các vị trí dọc dầm cách gối tựa lần lượt là 0,9 m, 1,4 m, 1,9 m (giữa nhịp). Các cảm biến chuyển vị LVDT5, LVDT6, LVDT7 và LVDT8 được gắn vào dầm để đo biến dạng trượt tương đối giữa dầm thép và bản bê tông như hình minh họa. Cảm biến lực với 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. Mô hình thí nghiệm cho dầm liên hợp



Hình 5. Lắp đặt thí nghiệm trong thực tế



Hình 6. Quy trình gia tải

3.3. Quy trình gia tải và tiến hành thí nghiệm

Quy trình gia tải thí nghiệm dầm chịu uốn được tiến hành theo hướng dẫn của Eurocode 4 [24], trong đó tải được chia làm ba giai đoạn, như sau:

Giai đoạn 1: tăng tải từ 0 đến $40\%P_u$, với P_u là tải phá hoại dự kiến, được xác định theo các công thức tính toán của Eurocode 4 với tất cả các hệ số bằng 1, sau đó lặp lại hai lần.

Giai đoạn 2: tăng tải từ $10\%P_u$ đến $40\%P_u$, và lặp lại 25 lần nhằm loại bỏ lực ma sát giữa bản bê tông và dầm thép cũng như các biến dạng dư trong thí nghiệm vì thế trong quá trình xử lý kết quả thí nghiệm, biến dạng trong giai đoạn 1 và giai đoạn 2 được loại bỏ.

Giai đoạn 3: tăng tải từ $10\%P_u$ đến P_u cho đến khi dầm bị phá hoại. Quy trình gia tải thí nghiệm được minh họa trong Hình 6.

Trong suốt quá trình thí nghiệm, tốc độ gia tải được điều khiển bằng tay với độ chính xác tương đối theo thông số đo thời gian thực trên máy tính, số liệu thí nghiệm liên tục được cập nhật và lưu lại bởi phần mềm.

3.4. Kết quả thí nghiệm

Kết quả thí nghiệm: lực phá hoại, độ võng giữa nhịp và các vị trí khác, biến dạng trượt tương đối giữa dầm thép và bản bê tông được mô tả trong Bảng 5. Kết quả thí nghiệm cho thấy khả năng chịu tải của dầm CB2 với 22 lỗ liên kết cao hơn khả năng chịu tải của dầm CB1 với 10 lỗ liên kết. Ứng với tải phá hoại của mỗi dầm, độ võng tại vị trí giữa dầm CB2 lớn hơn độ võng tại vị trí giữa dầm CB1, trong khi biến dạng trượt tương đối giữa thép hình và bản bê tông của dầm CB2 nhỏ hơn biến dạng tương đối giữa thép hình và bản bê tông của dầm CB1. Dạng phá hoại của hai dầm được mô tả trong Bảng 6.

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm

Mẫu dầm	$P_{max} (P_u)$ (kN)	Chuyển vị giữa dầm ứng với tải phá hoại (mm)	Biến dạng trượt tương đối giữa dầm thép và bản bê tông (mm)
CB1	487,9	40,96	4,13
CB2	622,2	92,57	1,54

Bảng 6. Dạng phá hoại của dầm

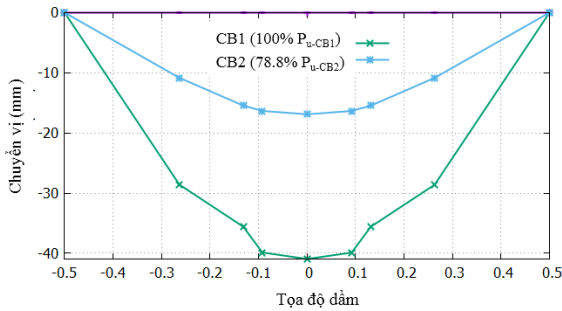
Mẫu dầm	Dạng phá hoại
CB1	Phá hoại dẻo xảy ra tại liên kết kháng cắt dạng perfobond
CB2	Phá hoại dẻo xảy ra trong dầm thép và bản bê tông

4. Phân tích ứng xử của dầm

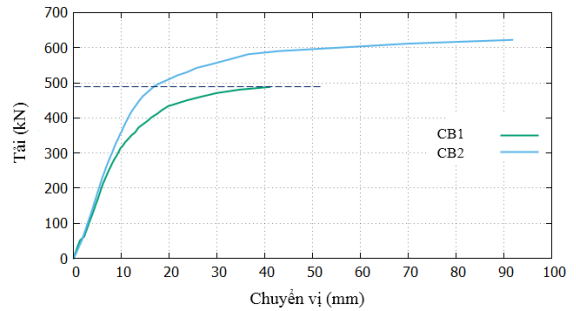
4.1. Đường cong quan hệ giữa tải trọng và độ võng

Kết quả thí nghiệm cho thấy khả năng chịu tải của dầm CB2 là 622,2 kN, trong khi khả năng chịu tải của dầm CB1 chỉ 487,9 kN. Điều này có nghĩa là khả năng chịu lực của dầm CB2 cao hơn khả năng chịu tải của dầm CB1 khoảng 27,53%. Hình 7 minh họa đường cong biểu diễn độ võng dọc theo

trục dầm của hai dầm ứng với tải phá hoại của dầm CB1 ($P_{u_CB1} = 487,9$ kN), tương đương với 78,8% P_{u_CB2} của dầm CB2. Ứng với mức tải này, độ võng giữa dầm của CB1 và CB2 lần lượt là 40,96 mm và 16,91 mm, như trong Hình 8. Rõ ràng, độ võng của dầm CB2 chỉ bằng 58,72% so với độ võng dầm CB1 tại thời điểm phá hoại của dầm CB1. Điều này cho thấy hình thái liên kết có ảnh hưởng đáng kể đến độ cứng của dầm liên hợp thép – bê tông sử dụng liên kết kháng cắt dạng perfobond.



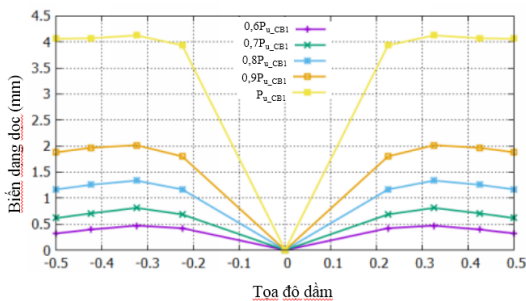
Hình 7. Chuyển vị của dọc dầm CB1 và CB2 ứng với tải trọng $P_{u_CB1} = 487,9$ kN



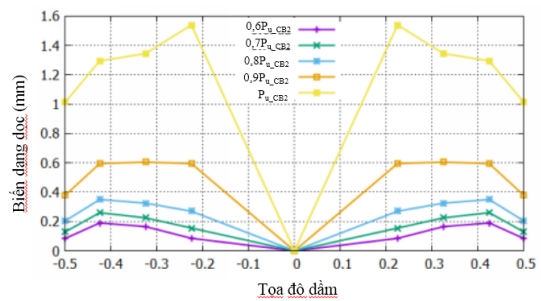
Hình 8. Đường cong quan hệ tải trọng và chuyển vị của dầm CB1 & CB2

4.2. Biến dạng trượt tương đối giữa bản bê tông và dầm

Dưới tác động của tải trọng, bản bê tông và dầm thép sẽ trượt tương đối lên nhau. Biến dạng trượt tương đối giữa bản bê tông và dầm thép được đo ghi nhận từ số liệu đo được thông qua các thiết bị đo LVDT5, LVDT6, LVDT7 và LVDT8 và được biểu diễn trong Hình 9 và Hình 10 tương ứng với hai dầm CB1 và CB2. Kết quả cho thấy biến dạng trượt tương đối giữa bản bê tông và dầm thép đạt giá trị lớn nhất (trong ba vị trí đo biến dạng trượt tương đối) tại vị trí 1000 mm kể từ gối tựa (LVDT8). Đây là vị trí gần nơi đặt tải tập trung nên xuất hiện moment và lực cắt cùng lớn. Giá trị biến dạng trượt bắt đầu lớn ứng với cấp tải 90% P_u . Biến dạng tương đối giữa bản bê tông và dầm thép ứng với tải phá hoại của mỗi dầm lần lượt là 4,13 mm đối với CB1 và 1,54 mm đối với CB2 và nhỏ hơn 6 mm, do đó có thể xem liên kết kháng cắt được xem là liên kết không dẻo (theo Eurocode 4).

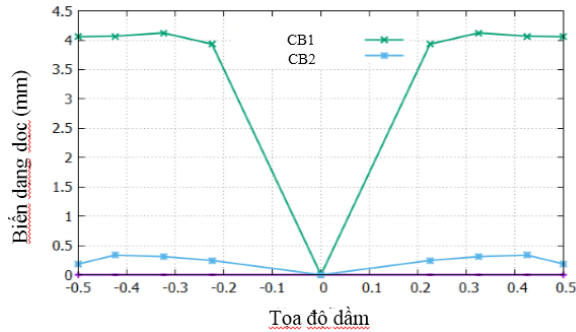


Hình 9. Biến dạng trượt tương đối dọc trục của dầm CB1 ứng với các cấp tải



Hình 10. Biến dạng trượt tương đối dọc trục của dầm CB2 ứng với các cấp tải

Ứng với tải phá hoại của dầm CB1 ($P_{u_CB1} = 487,9$ kN), biến dạng tương đối giữa bản bê tông và dầm thép trong dầm CB2 chỉ là 0,335 mm, khoảng 8,11% so với dầm CB1 như thể hiện trong Hình 11. Điều này có được là do khả năng kháng cắt của liên kết perfobond dầm CB2 lớn hơn có khả năng kháng cắt của liên kết perfobond trong dầm CB1.

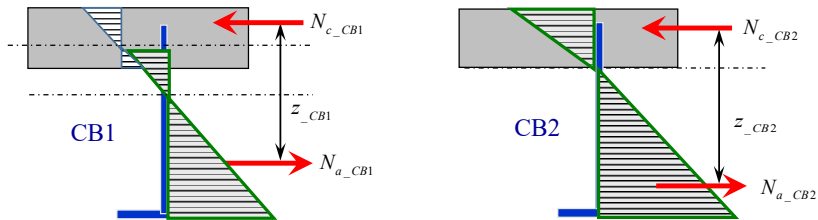


Hình 11. So sánh biến dạng trượt dọc trục của dầm CB1 và CB2 ứng với lực phá hoại $P_{u_CB1} = 487,9 \text{ kN}$ ($= 78,8\%P_{u_CB2}$)

4.3. Ảnh hưởng của mức độ liên kết

Như đã nêu ra ở phần trước, do số lượng chốt liên kết kháng cắt của dầm CB2 cao hơn gấp đôi so với dầm CB1, như vậy mức độ liên kết (degree of connection $\eta = N_c/N_{c,f}$) của dầm CB2 có thể xem gấp đôi mức độ liên kết của dầm CB1.

Quan sát đồ thị ở Hình 11, có thể thấy rằng ở cấp tải lớn nhất (P_{u_CB1}) thì tại tiết diện khoảng 0,3L từ giữa nhịp, độ trượt tương đối giữa bản bê tông và dầm thép của CB1 là 4,13 mm. Khi đó giả thiết tiết diện phẳng sau khi dầm bị uốn không còn đúng, biến dạng trên bản bê tông hình thành hai vùng nén (thở trên) và kéo thở dưới. Như vậy, lực nén N_{c_CB1} sẽ giảm đáng kể do diện tích vùng nén giảm. Tương tự như vậy ở phần dầm thép cũng hình thành hai vùng biến dạng kéo nén rõ rệt, hợp lực N_{a_CB1} cũng giảm do diện tích vùng kéo giảm. Mô men kháng uốn $M_{u_CB1} = N_{a_CB1} \times z_{CB1}$ sẽ nhỏ hơn so với $M_{u_CB2} = N_{a_CB2} \times z_{CB2}$, do $N_{a_CB1} < N_{a_CB2}$ và $z_{CB1} < z_{CB2}$ như giải thích ở Hình 12.



Hình 12. Biến dạng tại tiết diện 0,3L từ giữa nhịp CB1 (trái) và CB2 (phải)

Một điểm cần chú ý là với dầm CB1 thì ứng suất kéo trong bản bê tông sẽ làm giảm khả năng kháng cắt của liên kết, hiện tượng phá loại cắt và tách ngược (uplift) tại liên kết sẽ xảy ra. Trên bề mặt của bản bê tông sẽ xuất hiện các vết nứt dọc lớn trước dẫn đến dầm sụp đổ hoàn toàn.

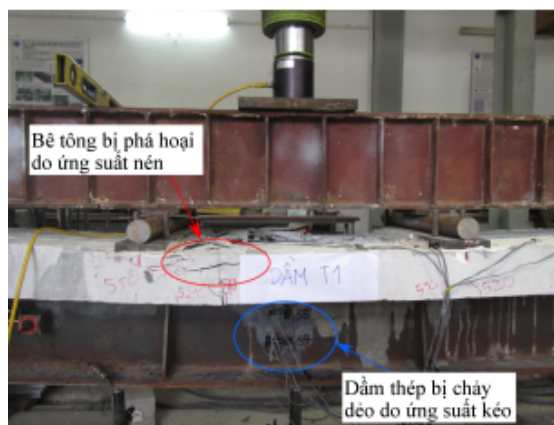
4.4. Các dạng phá hoại

Dạng phá hoại của dầm CB1 xảy ra tại các liên kết kháng cắt dạng perfobond. Trước tiên, bê tông bị phá hoại trước tại các vị trí của perfobond và các vị trí gần gối tựa, sau đó các vị trí giữa dầm bị phá hoại. Sau khi liên kết kháng cắt bị phá hoại, dầm thép và bản bê tông không thể tiếp tục làm việc cùng nhau, dầm thép và bản bê tông bắt đầu trượt lên nhau và dấu hiệu phá hoại xuất hiện ở vị trí giữa dầm như Hình 13. Trong khi đó, dầm CB2 bị phá hoại do ứng suất kéo trong dầm thép và ứng suất

nén trong bản bê tông. Điều này cho thấy dầm CB2 đạt đến độ bền uốn dẻo. Vết nứt dọc xảy ra trên bề mặt bản bê tông và dọc theo phía trên liên kết kháng cắt perfobond như thể hiện ở Hình 14.



Hình 13. Phá hoại của dầm CB1



Hình 14. Phá hoại của dầm CB2

5. Kết luận

Kết quả khảo sát thực nghiệm ứng xử uốn của hai dầm liên hợp thép – bê tông sử dụng liên kết kháng cắt dạng perfobond với số lượng lỗ liên kết khác nhau, kết quả cho thấy sự khác nhau về hình thái liên kết ảnh hưởng đáng kể đến các đại lượng cần khảo sát như sau:

- + Khả năng chịu tải của dầm CB2 lớn hơn khả năng chịu tải dầm CB1 là 27,53%.
- + Ứng với tải phá hoại của dầm CB1 (bằng 78,8% tải phá hoại của dầm CB2), độ võng của dầm CB2 nhỏ hơn độ võng của dầm CB1 khoảng 58,72%.
- + Biến dạng trượt tương đối giữa dầm thép và bản bê tông của cả hai dầm đều nhỏ hơn 6 mm, nên liên kết kháng cắt thuộc dạng liên kết dai. Biến dạng trượt tương đối của dầm CB2 chỉ bằng 8,11% so với biến dạng trượt của dầm CB1 ứng với tải phá hoại của dầm CB1.
- + Dạng phá hoại của dầm CB1 xảy ra tại liên kết kháng cắt dạng perfobond, bê tông bị phá hoại trước tại vị trí của các liên kết kháng cắt perfobond và vị trí gần gối tựa. Trong khi đó, phá hoại của dầm CB2 là do ứng suất kéo trong dầm thép đạt đến giới hạn chảy và ứng suất nén trong bản bê tông đạt đến cường độ chịu nén, dầm CB2 đạt đến độ bền uốn dẻo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số C2020-20-16. Các thí nghiệm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm công trình, khoa Kỹ thuật xây dựng - ĐHBK TP. HCM. Lời cảm ơn cũng xin được gửi đến công ty Hoàng Vinh TRCC đã hỗ trợ thiết bị đo lường.

Tài liệu tham khảo

- [1] Veldanda, M. R., Hosain, M. U. (1992). *Behaviour of perfobond rib shear connectors: push-out tests. Canadian Journal of Civil Engineering*, 19(1):1–10.
- [2] Oguejiofor, E. C., Hosain, M. U. (1994). *A parametric study of perfobond rib shear connectors. Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(4):614–625.

- [3] Oguejiofor, E. C., Hosain, M. U. (1995). [Tests of full-size composite beams with perfobond rib connectors](#). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(1):80–92.
- [4] Jurkiewicz, B., Hottier, J. M. (2005). [Static behaviour of a steel–concrete composite beam with an innovative horizontal connection](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 61(9):1286–1300.
- [5] Loh, H. Y., Uy, B., Bradford, M. A. (2004). The effects of partial shear connection in the hogging moment regions of composite beams: Part I—Experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(6):897–919.
- [6] Vianna, J. d. C., Costa-Neves, L., Vellasco, P. d. S., De Andrade, S. (2009). [Experimental assessment of Perfobond and T-Perfobond shear connectors' structural response](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 65(2):408–421.
- [7] Vianna, J. d. C., Costa-Neves, L. F., Vellasco, P. d. S., de Andrade, S. A. L. (2008). [Structural behaviour of T-Perfobond shear connectors in composite girders: An experimental approach](#). *Engineering Structures*, 30(9):2381–2391.
- [8] Kim, S.-H., Choi, K.-T., Park, S.-J., Park, S.-M., Jung, C.-Y. (2013). [Experimental shear resistance evaluation of Y-type perfobond rib shear connector](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 82:1–18.
- [9] Kim, S.-H., Heo, W.-H., Woo, K.-S., Jung, C.-Y., Park, S.-J. (2014). [End-bearing resistance of Y-type perfobond rib according to rib width–height ratio](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 103:101–116.
- [10] Lorenc, W., Kożuch, M., Rowiński, S. (2014). [The behaviour of puzzle-shaped composite dowels—Part I: Experimental study](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 101:482–499.
- [11] Linh, H. P., Chinh, H. H. (2011). Độ bền và độ võng nút của dầm liên hợp có thép hình nằm hoàn toàn trong bê tông cốt thép. *Hội nghị khoa học và công nghệ trường Đại học Bách Khoa Tp. HCM lần thứ 12*, 1–10.
- [12] Vinh, C. T. H. (2013). *Mô hình ứng xử và khả năng truyền lực của liên kết Perfobond ứng dụng trong kết cấu composite bê tông – thép*. Đại học Bách Khoa TP. HCM.
- [13] Vinh, C. T. H. (2014). *Đánh giá khả năng chịu lực và ứng xử của dầm composite bê tông - thép sử dụng liên kết cắt kiểu Perfobond*. Đại học Bách Khoa TP. HCM.
- [14] Diễm, N. T. N. (2014). *Cơ chế truyền lực và khả năng kháng cắt của liên kết Perfobond tiết diện mở trong dầm liên hợp tiết diện T ngược*. Đại học Bách Khoa TP. HCM.
- [15] Phương, L. H. (2015). *Ứng xử chịu lực của dầm liên hợp bê tông - thép tiết diện chữ T ngược sử dụng liên kết Perfobond*. Đại học Bách Khoa TP. HCM.
- [16] Tiến, T. M. (2016). *Ứng xử của dầm liên tục thép - bê tông cốt thép sử dụng liên kết perfobond với mức độ kháng cắt không hoàn toàn*. Đại học Bách Khoa TP. HCM.
- [17] Hòa, Đ. T. (2017). *Khảo sát phân bố truyền lực lên các liên kết kháng cắt dạng perfobond trong dầm liên hợp*. Đại học Bách Khoa TP. HCM.
- [18] Phong, N. T. (2018). *Khảo sát thực nghiệm ứng xử của dầm đơn giản thép + bê tông sử dụng liên kết kháng cắt dạng Crestbond và bê tông cường độ cao*. Đại học Lạc Hồng.
- [19] Sơn, L. T. (2019). *Khảo sát thực nghiệm ứng xử uốn của dầm liên hợp thép-BTCT tiết diện T ngược sử dụng bê tông cường độ cao*. Đại học Bách Khoa TP. HCM.
- [20] Đức, H. N., Tuấn, V. A., Dũng, T. M. (2019). [Sức kháng trượt dọc của chốt bê tông trong dầm liên hợp rỗng chiều cao nhỏ qua thí nghiệm đẩy](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCVN)-ĐHXD*, 13(5V):1–8.
- [21] Kiên, N. T., Hiếu, N. T., Hoàng, N. N. (2020). Phân tích sự làm việc của dầm liên hợp thép – bê tông khoét lỗ bản bụng bằng phương pháp mô phỏng số. *Tạp chí Xây Dựng*, (1-2020):29–32.
- [22] Khoa, T. Đ. (2020). *Đánh giá ứng xử của dầm liên hợp sử dụng liên kết perfobond bằng mô phỏng*. Đại học Lạc Hồng.
- [23] TCVN 10306:2014. *Bê Tông Cường Độ Cao – Thiết Kế Thành Phần Mẫu Hình Trụ*. Tổng cục Đường bộ Việt Nam, Bộ Giao Thông Vận Tải.
- [24] Eurocode 4 EN 1994-1-1:2004. *Design of composite steel and concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings*. The European Standard.