

# XÂY DỰNG

TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG  
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

## Ảnh hưởng của các cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc đến ứng xử kết cấu của dầm liên hợp lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm

Effect of interface shear reinforcement on structural behavior of prefabricated composite girders with precast Deck-to-Girder continuous connections

### ► TS Diệp Thành Hưng

Phân hiệu tại TP Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: hungdt\_ph@utc.edu.vn

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 09/4/2026

Ngày sửa bài: 21/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 27/4/2026

Ngày xuất bản Online: 06/5/2026

Tác giả liên hệ:

Email: hungdt\_ph@utc.edu.vn

### TÓM TẮT

Gần đây, nhiều nghiên cứu quan trọng đã tập trung vào việc phát triển các giải pháp bền vững và ổn định cho công tác xây dựng và sửa chữa cầu đường bộ trên toàn thế giới. Trong số đó, các dầm liên hợp lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm đã được đề xuất nhằm nâng cao khả năng thi công bằng cách loại bỏ các trở ngại tại hiện trường. Trong nghiên cứu này, phân tích phần tử hữu hạn của dầm liên hợp lắp ghép đã được thực hiện và xác minh thông qua việc so sánh với các kết quả thực nghiệm tương tự. Các nghiên cứu tham số đã được tiến hành để khảo sát ảnh hưởng của các cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc đến ứng xử kết cấu của dầm liên hợp lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm.

Kết quả nghiên cứu cho thấy đối với các trường hợp được thiết kế với lượng cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc phù hợp, khả năng làm việc kết cấu của dầm liên hợp lắp ghép được đảm bảo và dầm liên hợp biểu hiện dạng phá hủy uốn dẻo điển hình. Ngược lại, đối với các trường hợp được thiết kế với lượng cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc không hữu hiệu, toàn bộ cốt thép chịu cắt được quan sát thấy đạt tới cường độ chảy tại mặt tiếp xúc, do đó, dầm liên hợp lắp ghép có xu hướng mất khả năng chịu lực do phá hủy cắt tại mặt tiếp xúc. Tiêu chuẩn thiết kế cầu AASHTO LRFD được cho là đảm bảo an toàn cần thiết cho kết cấu dầm liên hợp lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm thép. Tuy nhiên, cần tiến hành thêm các thực nghiệm và phân tích để chứng minh tính ứng

dụng đầy đủ hơn của loại kết cấu này và thiết kế được đề xuất cho lĩnh vực kỹ thuật cầu.

**Từ khóa:** Phân tích phần tử hữu hạn; ứng xử cắt mặt tiếp xúc; mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm; dầm liên hợp lắp ghép.

## ABSTRACT

Significant research has recently focused on developing durable and resilient solutions for highway bridge construction and rehabilitation worldwide. Among these, prefabricated composite girders with precast deck-to-girder continuous connections have been proposed to enhance constructability by removing on-site obstacles. In this study, finite element analysis of a prefabricated composite girder was conducted and validated through comparison with the similar experimental results. A series of numerical parametric studies was performed to investigate the effect of interface shear reinforcement on the structural behavior of prefabricated composite girders with precast deck-to-girder continuous connections.

Research results indicate that for cases designed with an adequate amount of interface shear reinforcement, the structural performance of prefabricated composite girders is ensured, and prefabricated composite girders exhibit a typical ductile flexural failure mode. Conversely, for cases designed with insufficient interface shear reinforcement, all interface shear reinforcement was observed to reach yield strength; therefore, the structure tends to lose its capacity due to the shear failure at the interface. The AASHTO LRFD Bridge Design Specifications are considered to provide the necessary level of safety for prefabricated composite girders with precast deck-to-girder continuous connections. However, further experimental studies and analytical investigations are required to more comprehensively validate the practical applicability of this structural system and the proposed design approach in the field of bridge engineering.

**Keywords:** Finite element analysis, interface shear behavior, precast deck-to-girder continuous connections, prefabricated composite girder.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

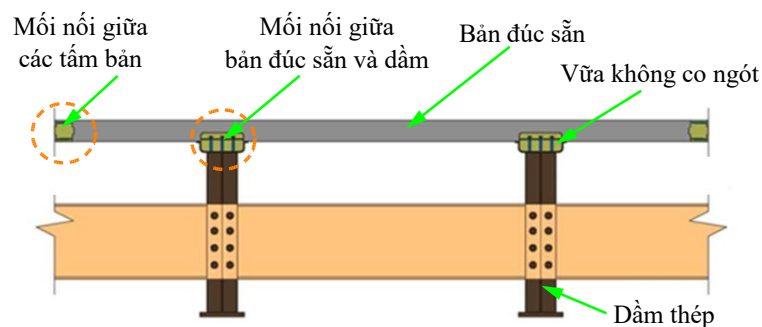
Các công nghệ thi công tiên tiến ngoài công trường sử dụng các bộ phận cầu lắp ghép đang được phát triển liên tục. Mặc dù hệ thống lắp ghép đã được áp dụng cho nhiều bộ phận cầu khác nhau, nhưng bản mặt cầu lắp ghép nổi lên như một trong những ứng dụng phổ biến nhất. Bản mặt cầu lắp ghép đã được sử dụng để đẩy nhanh tiến độ thi công từ những năm 1970 [1]. Việc áp dụng ban đầu chủ yếu tập trung ở các dự án thay thế bản mặt cầu, khi yêu cầu tiến độ thi công nhanh nhằm giảm thiểu sự cản trở giao thông tại các khu vực đông dân cư. Kể từ đó, bản mặt cầu lắp ghép đã được nghiên cứu rộng rãi thông qua cả thí nghiệm trong phòng và điều tra công trường [2].

Trong các loại bản mặt cầu lắp ghép, hệ tấm bản toàn chiều dày là một lựa chọn tối ưu. Có hai giải pháp thường dùng để neo các liên kết cốt vào tấm bản bê tông toàn chiều

dày: (1) Sử dụng các hố cục bộ tại vị trí từng dầm chủ trong trường hợp bố trí nhóm đỉnh cốt rời rạc và (2) sử dụng các rãnh dọc trên từng tấm bản, nằm trên toàn bộ các dầm chủ trong trường hợp liên kết cốt liên tục [3]. Với giải pháp thứ nhất, đã có nhiều nghiên cứu đáng kể về sự làm việc liên hợp giữa dầm thép và bản bê tông đúc sẵn khi sử dụng nhóm đỉnh cốt số lượng lớn [4-6].

Tuy nhiên, việc sử dụng nhóm đỉnh cốt cho liên kết cốt còn tồn tại nhiều thách thức như phân bố ứng suất cốt không đều, hiện tượng nâng bản và phá hủy cục bộ của vữa trong hố cốt [4,7]. Gần đây, El-Khier và Morcouc (2021) [8] đã phát triển một dạng mối nối mới giữa bản bê tông đúc sẵn và dầm, khai thác ưu điểm vượt trội về khả năng kháng cắt, tính công tác và độ bền lâu của bê tông tính năng siêu cao (UHPC), nhằm đơn giản hóa chế tạo và lắp dựng. Một giải pháp tiềm năng khác là sử dụng các mối nối liên tục thay thế cho mối nối điểm. Graybeal (2012, 2014) [9,10] đã đề xuất dầm liên hợp mà dầm bê tông đúc sẵn liên kết với các tấm bản lắp ghép thông qua kênh bơm vữa. Các thử nghiệm cũng được tiến hành nhằm khảo sát ứng xử uốn của các dầm liên hợp lắp ghép này và khả năng chịu lực của mối nối. Kết quả cho thấy đây là dạng mối nối tiềm năng cho các cấu kiện cầu lắp ghép.

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào dạng mối nối hố cốt, vốn tồn tại một số nhược điểm như đã đề cập, hoặc dạng mối nối kênh liên tục sử dụng UHPC - loại này được xem là thiếu kinh tế trong một số trường hợp do cần khối lượng UHPC lớn, và chủ yếu được nghiên cứu cho dầm bê tông. Vì vậy, Diệp Thành Hưng và cộng sự (2022, 2023) [11,12], Byung Ho Choi và cộng sự (2024) [13] đã đề xuất giải pháp dầm liên hợp lắp ghép với tấm bản mặt cầu và dầm thép được liên kết nhờ bơm vữa không co ngót vào kênh liên tục bên trên dầm thép, nhằm tạo nên hiệu ứng liên hợp giữa bản và dầm, như thể hiện ở Hình 1.



Hình 1. Dầm liên hợp lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm thép [12].

Các công trình nghiên cứu về kết cấu dầm liên hợp lắp ghép cho công trình cầu tại Việt Nam còn hạn chế. Nghiên cứu giải pháp kết cấu và công nghệ thi công nhanh các công trình cầu đường bộ tại TP Hồ Chí Minh [14]. Ngô Văn Minh và Phạm Thanh Tùng (2020) [15] phân tích hiệu quả kinh tế - kỹ thuật và khả năng áp dụng dầm liên hợp bán lắp ghép VFT cho chiều dài nhịp vừa và nhỏ ở Việt Nam. Nghiên cứu bản mặt cầu lắp ghép UHPC ứng dụng trong xây dựng cầu nhanh tại Việt Nam [16]. Đối với kết cấu dầm liên hợp lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm, các cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc đóng vai trò quan trọng. Tuy nhiên chưa có nghiên cứu nào điều tra ảnh hưởng

của chúng từ đó đánh giá khả năng áp dụng của các tiêu chuẩn hiện hành cho các dầm lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm ở Việt Nam. Trong nghiên cứu này, phân tích phần tử hữu hạn của dầm liên hợp lắp ghép đã được thực hiện và xác minh thông qua việc so sánh với các kết quả thực nghiệm tương tự. Các nghiên cứu tham số đã được tiến hành nhằm khảo sát ảnh hưởng của các cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc đến ứng xử kết cấu của dầm liên hợp lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm từ đó đánh giá khả năng áp dụng của tiêu chuẩn AASHTO LRFR [17] đối với các dầm liên hợp lắp ghép.

## 2. CƯỜNG ĐỘ CHỊU CẮT TẠI MẶT TIẾP XÚC

Hình 2 minh họa các mặt phẳng cắt của mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm, trong đó các liên kết chịu cắt biểu thị cho cốt thép chịu cắt hoặc các neo đinh chống cắt.

Theo quy định trong tiêu chuẩn AASHTO LRFD (Điều 5.7.4.3), cường độ cắt danh định tại mặt tiếp xúc ( $V_{ni}$ ) được tính toán theo công thức sau:

$$V_{ni} = cA_{cv} + \mu(A_{vf}f_y + P_c)$$

$$V_{ni} \leq K_1f'_cA_{cv} \tag{1}$$

$$V_{ni} \leq K_2A_{cv}$$

Trong đó:

$c$ : Hệ số dính bám;

$\mu$ : Hệ số ma sát;

$A_{cv}$ : Diện tích mặt bê tông được huy động để truyền lực cắt tiếp xúc;

$A_{vf}$ : Diện tích cốt thép chịu cắt tiếp xúc đi qua mặt phẳng cắt trong diện tích  $A_{cv}$ ;

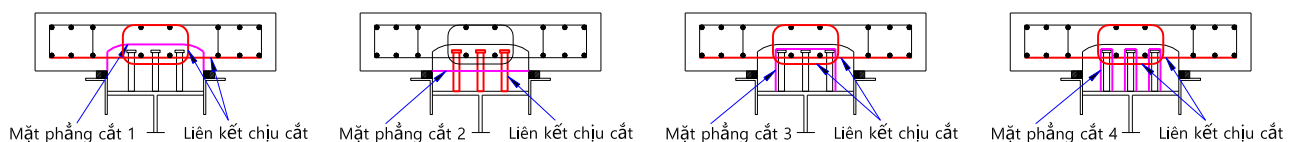
$P_c$ : Lực nén thường xuyên có hiệu vuông góc với mặt tiếp xúc, nếu là lực kéo  $P_c = 0$ ;

$f_y$ : Cường độ chảy của cốt thép nhưng giá trị thiết kế không quá 420 Mpa;

$f'_c$ : Cường độ chịu nén quy định tuổi 28 ngày của bê tông yếu hơn trong hai bê tông ở hai phía của mặt tiếp xúc;

$K_1$ : Tỷ lệ phần cường độ bê tông có khả năng tham gia chịu lực cắt tiếp xúc;

$K_2$ : Sức kháng cắt tiếp xúc giới hạn;

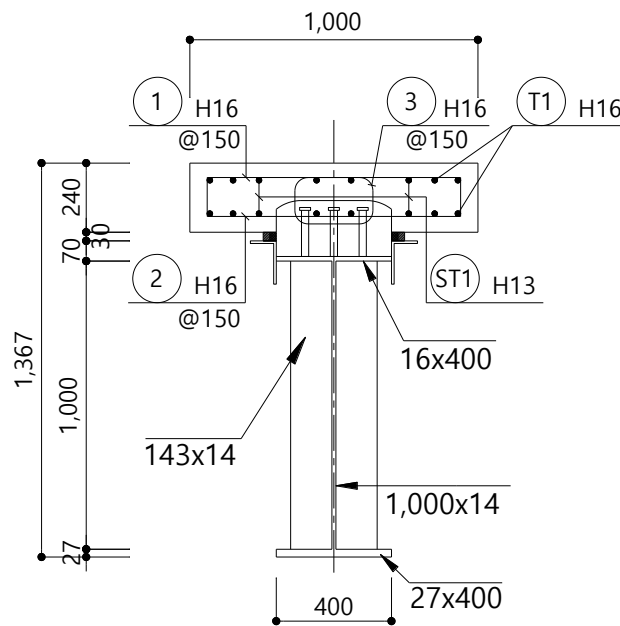


Hình 2. Các mặt phẳng cắt tiềm năng của mối nối chịu cắt liên tục.

### 3. MÔ HÌNH HÓA PHẦN TỬ HỮU HẠN

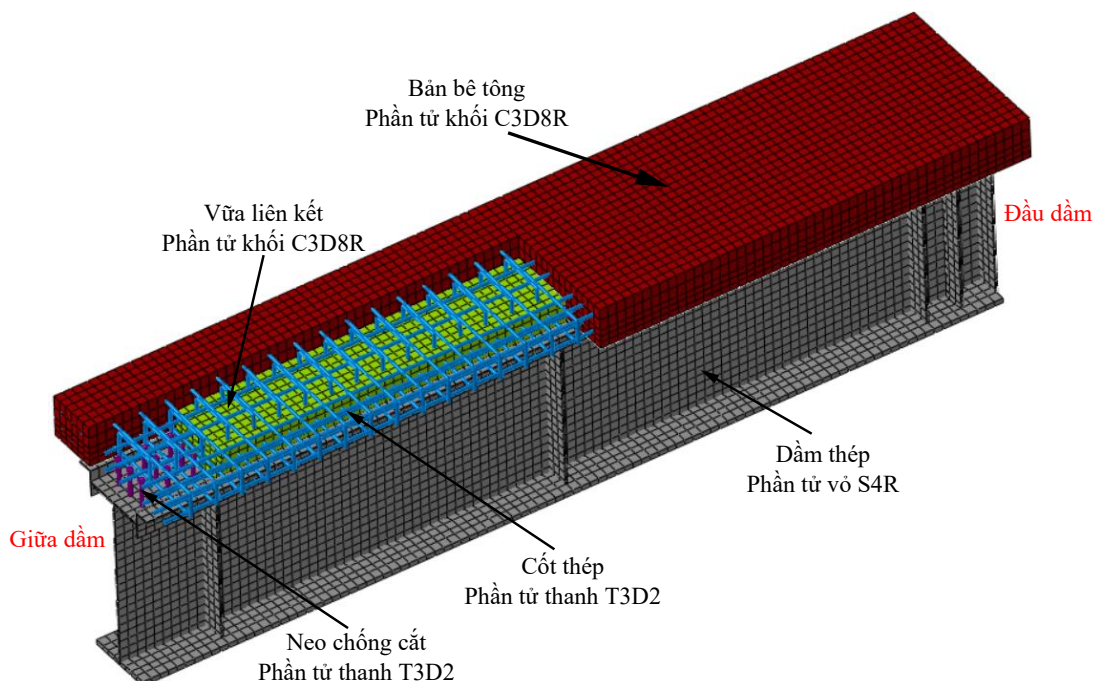
#### 3.1. Dầm liên hợp lắp ghép

Dầm liên hợp lắp ghép có chiều dài 10,000 mm, Hình 3 thể hiện mặt cắt ngang của dầm liên hợp lắp ghép. Bê tông đúc sẵn và vữa liên kết có cường độ chịu nén lần lượt là 24 MPa và 44 MPa. Thép kết cấu được sử dụng cho dầm thép và các sườn tăng cường, trong đó thép HSB380 được dùng cho bản bụng và thép SM355B được dùng cho các bộ phận còn lại. Dựa trên lý thuyết tính toán được trình bày trong mục 2, trường hợp cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc tối ưu được sử dụng với đường kính 16 mm (cốt thép số 2 và số 3) mà đáp ứng điều kiện liên kết cắt toàn phần.



Hình 3. Mặt cắt ngang dầm liên hợp lắp ghép.

#### 3.2. Loại và kích thước phần tử



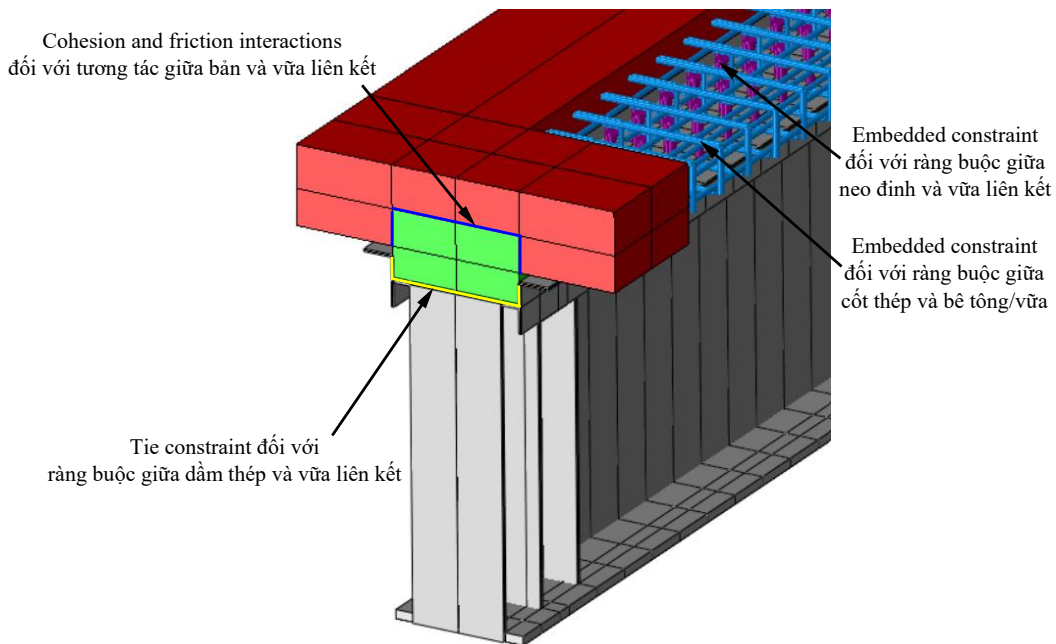
Hình 4. Loại và lưới phần tử.

Trong nghiên cứu này, phân tích phần tử hữu hạn của dầm liên hợp lắp ghép được thực hiện bằng phần mềm ABAQUS (2020) [18]. Do sự đối xứng của kết cấu, chỉ một nửa dầm liên hợp lắp ghép được mô hình hóa để giảm thời gian phân tích. Các loại phần tử được sử dụng bao gồm phần tử khối C3D8R cho bản bê tông và vữa liên kết, phần tử vỏ S4R cho dầm thép, phần tử thanh T3D2 cho neo chống cắt và cốt thép. Kích thước lưới phần tử phù hợp được lựa chọn nhằm cân bằng giữa độ chính xác và thời gian phân tích, thông qua một nghiên cứu hội tụ lưới kết quả kích thước 50 mm được xác định là tối ưu. Hình 4 thể hiện loại và lưới phần tử hữu hạn.

### 3.3. Điều kiện ràng buộc và tương tác

Sự tương tác giữa các bộ phận được mô phỏng thông qua việc áp dụng các phương pháp phù hợp tại từng vị trí, như thể hiện trong Hình 5.

Các bề mặt tiếp xúc giữa bản bê tông đúc sẵn và vữa liên kết đóng vai trò quan trọng. Sự truyền lực cắt tại mặt tiếp xúc chủ yếu được chi phối bởi các cơ chế dính bám và ma sát, do đó, mô phỏng số của mặt tiếp xúc này (tức là các đặc trưng của mặt tiếp xúc) được xem xét thông qua các tương tác dính bám và ma sát. Trong nghiên cứu này, các đặc trưng mặt tiếp xúc được lựa chọn dựa trên giả thiết mặt tiếp xúc nhẵn.



Hình 5. Các điều kiện ràng buộc và tương tác.

Để mô phỏng ảnh hưởng của lực dính tại mặt tiếp xúc này, mô hình ứng xử kết dính dựa trên bề mặt (surface-based cohesive behavior) được áp dụng, bắt đầu với mô hình kéo-tách (traction-separation model), tiếp theo là quá trình bắt đầu và phát triển hư hỏng; tổng thể được gọi là mô hình vùng kết dính (cohesive zone model - CZM). Theo đó, bề mặt tiếp xúc được giả thiết có ứng xử đàn hồi tuyến tính, được biểu diễn bằng một ma trận hiển tạo liên hệ giữa các lực kéo và các độ tách như sau:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Để mô phỏng sự khởi phát hư hỏng tại mặt tiếp xúc, tiêu chí lực kéo bậc hai (quadratic traction criterion) đã được lựa chọn trong số các tùy chọn sẵn có của ABAQUS:

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (3)$$

Độ tách hiệu dụng ( $\delta_m$ ) được xem xét nhằm mô tả sự tiến triển hư hỏng dưới tác động tổng hợp của các độ tách theo phương pháp tuyến và các phương tiếp tuyến tại mặt tiếp xúc:

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} \quad (4)$$

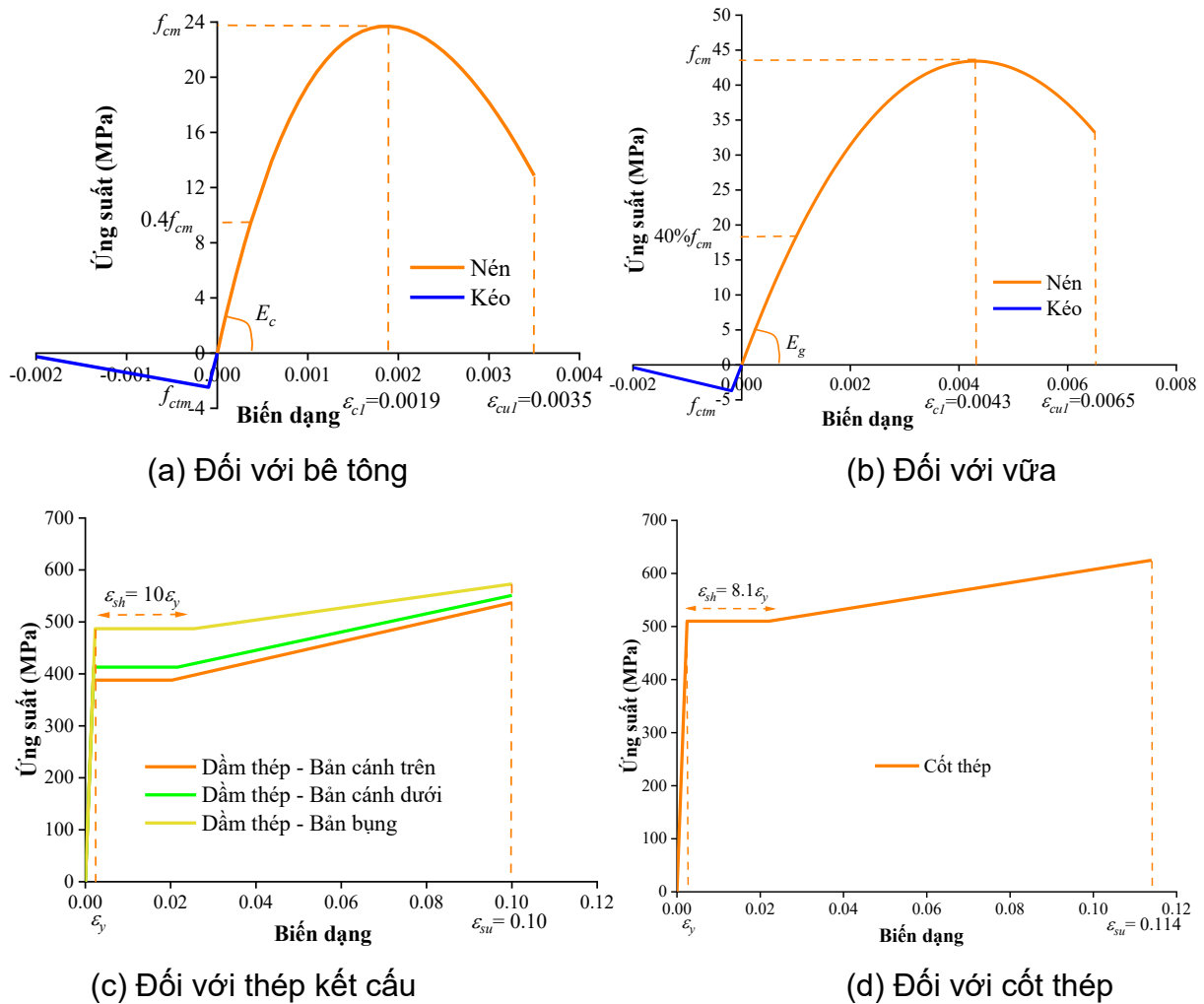
Tổng quát, các hệ số độ cứng độc lập ( $K_{nn}$ ,  $K_{ss}$ ,  $K_{tt}$ ), các giá trị lực kéo cực đại ( $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $t_t^0$ ) và độ tách hiệu dụng tại trạng thái phá hủy hoàn toàn ( $\delta_m^f$ ) được sử dụng để mô phỏng sự phá hủy dính bám tại mặt tiếp xúc giữa vữa liên kết và bản bê tông đúc sẵn. Trong nghiên cứu này, các hệ số độ cứng ( $K_{nn}$ ,  $K_{ss}$ ,  $K_{tt}$ ) được lấy bằng 10 N/mm<sup>3</sup> dựa trên việc tổng hợp và đánh giá một số nghiên cứu trước đây [19-21]. Giá trị lực kéo cực đại theo phương pháp tuyến ( $t_n^0$ ) được lựa chọn bằng cường độ bám dính chịu kéo là 0.5 MPa, dựa trên kết quả thí nghiệm kéo trực tiếp được công bố trong các tài liệu tham khảo [20,22]. Các giá trị lực kéo cực đại theo các phương cắt ( $t_s^0$ ,  $t_t^0$ ) được lấy bằng lực dính là 0.52 MPa theo quy định của AASHTO LRFD [17]. Sau khi phân tích các số liệu từ tài liệu tham khảo [23,24], trong nghiên cứu này có thể giả thiết rằng giá trị độ tách hiệu dụng tại trạng thái phá hủy hoàn toàn ( $\delta_m^f$ ) được lấy bằng 1 mm.

Đối với ảnh hưởng của ma sát tại mặt tiếp xúc này, một hàm phạt được áp dụng theo các phương tiếp tuyến của mặt tiếp xúc, với hệ số ma sát được lấy bằng 0.6 theo quy định của AASHTO LRFD [17].

### 3.4. Điều kiện biên và tải trọng

Phân tích uốn bốn điểm điển hình đã được thực hiện nhằm khảo sát ảnh hưởng của các cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc đến ứng xử kết cấu của dầm liên hợp lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm. Khoảng cách từ đầu dầm đến điểm đặt tải là 4,500 mm. Gối đỡ của dầm liên hợp lắp ghép được khống chế chuyển vị tịnh tiến theo các phương X và Y. Mặt phẳng tại giữa nhịp của dầm liên hợp lắp ghép được áp dụng điều kiện biên đối xứng, theo đó các chuyển vị quay  $R_x$ ,  $R_y$  và chuyển vị tịnh tiến  $U_z$  của tất cả các nút trên mặt phẳng này đều bị khống chế.

### 3.5. Mô hình vật liệu



Hình 6. Mối quan hệ ứng suất - biến dạng cho các vật liệu.

Quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông đúc sẵn được thể hiện trong Hình 6a. Đối với các đặc trưng chịu nén, đường cong ứng suất - biến dạng được xác định theo Phương trình (5) được trình bày trong Eurocode 2 [25]. Đối với các đặc trưng chịu kéo, đường cong song tuyến tính được áp dụng. Cường độ chịu kéo của bê tông ( $f_{ctm}$ ) được tính toán theo Phương trình (6) của Eurocode 2 [25].

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \tag{5}$$

Trong đó:

$$\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1}$$

$$k = 1.05 E_{cm} | \epsilon_{c1} | / f_{cm}$$

$$E_{cm} = 22 (f_{cm} / 10)^{0.3} \text{ (} E_{cm} \text{ đơn vị GPa, } f_{cm} \text{ đơn vị MPa)}$$

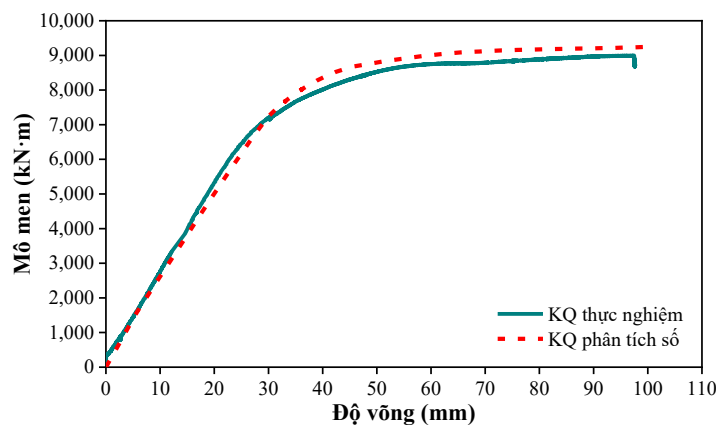
$$f_{ctm} = 0.3 f_{cm}^{(2/3)} \tag{6}$$

Đối với các đặc trưng chịu nén của vữa liên kết, đường cong ứng suất-biến dạng được xây dựng dựa trên kết quả thí nghiệm vật liệu của vữa có cường độ chịu nén là 44

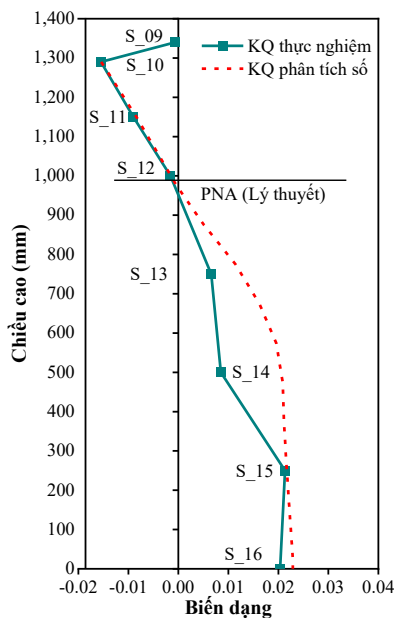
MPa kết hợp với các quy định của Eurocode 2 [25]. Quan hệ ứng suất-biến dạng chịu nén được đề xuất trong Eurocode 2 [25] được sử dụng, trong đó các dữ liệu thí nghiệm của vữa, bao gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và biến dạng tại ứng suất cực đại, được áp dụng. Đối với các đặc trưng chịu kéo của vữa, đường cong song tuyến tính được áp dụng. Cường độ chịu kéo của vữa ( $f_{ctm}$ ) được tính toán theo Phương trình (6) của Eurocode 2 [25]. Hình 6b thể hiện đường cong ứng suất-biến dạng của vật liệu vữa.

Các bộ phận thép được mô hình hóa bằng quan hệ ứng suất-biến dạng ba đoạn tuyến tính theo đề xuất của Ko và Lee (2021) [26], như thể hiện trong Hình 6c và 6d.

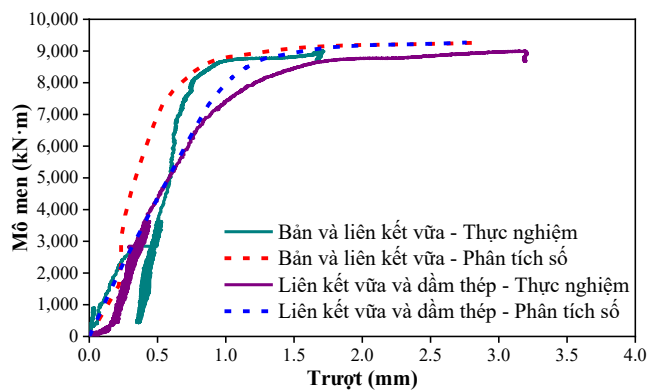
### 3.6. Xác minh mô hình phần tử hữu hạn



(a) Ứng xử uốn



(b) Phân bố biến dạng theo chiều cao dầm



(c) Phân bố trượt

Hình 7. So sánh giữa các kết quả phân tích phần tử hữu hạn và thực nghiệm.

Mẫu thử nghiệm tương tự trong nghiên cứu thực nghiệm của Byung Ho Choi và cộng sự (2026) [27] đã được sử dụng để xác minh mô hình. Như thể hiện trong Hình 7a, ứng xử uốn thu được từ phân tích số và thực nghiệm có sự tương đồng tốt với nhau. Kết

quả thực nghiệm cho thấy cường độ mô men uốn đạt 8,997.97 kN·m, trong khi mô hình phần tử hữu hạn dự đoán giá trị đó là 9,247.30 kN·m, tương ứng với mức dự đoán cao hơn 2.77% so với thực nghiệm.

Hình 7b minh họa sự phân bố biến dạng theo chiều cao dầm tại mặt cắt giữa nhịp dưới tải trọng tới hạn. Có thể nhận thấy sự tương đồng tốt giữa phân bố biến dạng thu được từ phân tích số và thực nghiệm. Hình 7c thể hiện sự phân bố độ trượt tại đầu dầm. Kết quả cho thấy sự phù hợp tốt về phân bố độ trượt giữa phân tích phần tử hữu hạn và thực nghiệm.

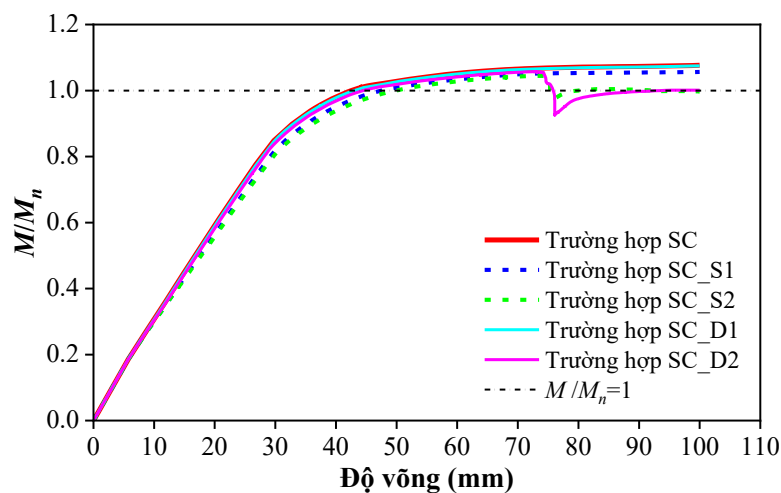
#### 4. ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC CỐT THÉP CHỊU CẮT MẶT TIẾP XÚC

Cường độ cắt tại mặt tiếp xúc chịu ảnh hưởng mạnh bởi hàm lượng cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc; do đó, nghiên cứu này điều tra ảnh hưởng của các cốt thép chịu cắt đến ứng xử của dầm liên hợp lắp ghép. Các mô hình trong nghiên cứu tham số về cốt thép chịu cắt được xây dựng bằng cách thay đổi đường kính hoặc khoảng cách bố trí của cốt thép chịu cắt tại mặt tiếp xúc. Trường hợp cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc tối ưu (Trường hợp SC), đáp ứng điều kiện liên kết cắt toàn phần, được sử dụng làm mô hình cơ sở cho các nghiên cứu tham số này. Việc thay đổi khoảng cách bố trí cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc được áp dụng cho các trường hợp SC\_S1 và SC\_S2, trong khi các trường hợp SC\_D1 và SC\_D2 tương ứng với việc thay đổi đường kính cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc nhằm hình thành các trường hợp điều tra tham số. Bảng 1 trình bày đặc trưng của các mô hình được sử dụng trong nghiên cứu tham số.

Bảng 1. Nội dung nghiên cứu tham số ảnh hưởng của cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc.

Trường hợp	Đường kính cốt thép ngang (mm)	Đường kính cốt thép vòng (mm)	Khoảng cách cốt thép (mm)	$V_{ui}$ (N/mm)	$V_{ni}$ (N/mm)	Kiểm tra	Mức độ liên kết chịu cắt ( $V_{ni} / V_{ui}$ )	Liên hợp
SC	16	16	150	1,626.25	1,629.35	OK	1.00	Toàn phần
SC_S1	16	16	250	1,626.25	1,097.00	NG	0.67	Bán phần
SC_S2	16	16	350	1,626.25	868.85	NG	0.53	Bán phần
SC_D1	13	16	150	1,626.25	1,403.21	NG	0.86	Bán phần
SC_D2	10	13	150	1,626.25	997.71	NG	0.61	Bán phần

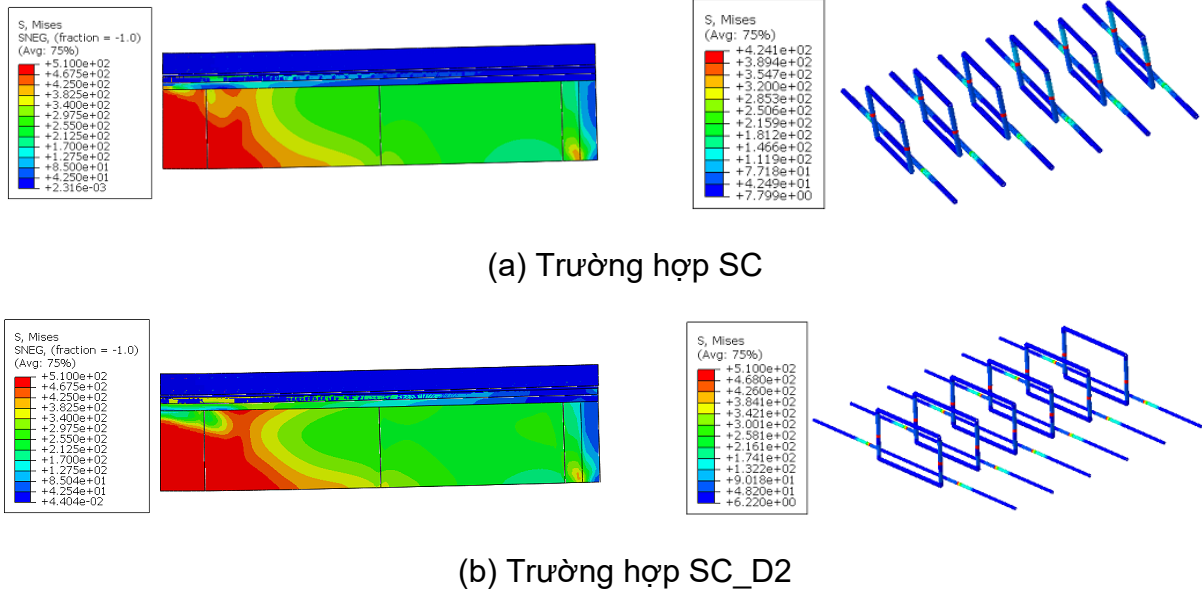
Theo lý thuyết tính toán cường độ cắt tại mặt tiếp xúc, cường độ chảy của cốt thép chi phối cường độ cắt tại mặt tiếp xúc. Do đó, để quan sát trạng thái phá hủy của dầm liên hợp lắp ghép do phá hủy cắt tại mặt tiếp xúc trong trường hợp toàn bộ cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc đạt tới cường độ chảy, sau khi cường độ chảy của cốt thép chịu cắt tại mặt tiếp xúc được đạt đến, sự giảm ứng suất của cốt thép này được giả thiết. Cốt thép dọc và cốt thép ngang phía trên được mô hình hóa bằng đường cong ứng suất-biến dạng ba đoạn tuyến tính theo đề xuất của Ko và Lee (2021) [26], trong khi cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc (cốt thép ngang phía dưới và cốt thép dạng vòng) được mô hình hóa theo đường cong ứng suất-biến dạng giả thiết.



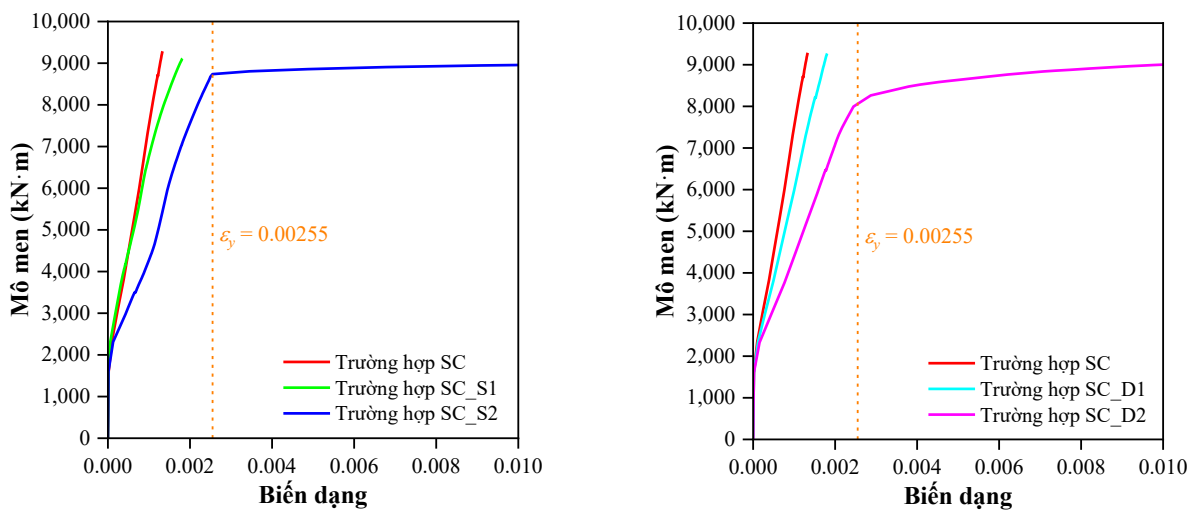
Hình 8. Đường cong tỷ số mô men-độ võng đối với các trường hợp.

Hình 8 trình bày đường cong tỷ số mô men-độ võng đối với các trường hợp trong nghiên cứu tham số về ảnh hưởng của các cốt thép chịu cắt. So với trường hợp liên kết cắt toàn phần, đối với các trường hợp được thiết kế theo điều kiện liên kết cắt bán phần, độ cứng của dầm và khả năng chịu mô men uốn đều bị suy giảm. Ngoài ra, trong các trường hợp có mức độ liên kết không hữu hiệu (các trường hợp SC\_S2 và SC\_D2), đã xảy ra phá hủy cắt tại mặt tiếp xúc, dẫn đến khả năng làm việc của liên kết không được đảm bảo. Các trường hợp SC\_S1 và SC\_D1 vẫn cho thấy khả năng đảm bảo làm việc của kết cấu, do đó, có thể xem xét áp dụng điều kiện liên kết cắt bán phần trong một số điều kiện nhất định, tuy nhiên cần được thiết kế riêng biệt và thận trọng.

Hình 9 trình bày các dạng phá hủy đối với các trường hợp điển hình. Đối với trường hợp được thiết kế theo điều kiện liên kết cắt toàn phần, như thể hiện trong Hình 9a, ứng suất trong cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc chưa đạt tới cường độ chảy, trong khi gần như toàn bộ tiết diện của dầm liên hợp lắp ghép đã đạt cường độ chảy. Do đó, khả năng làm việc của liên kết được đảm bảo và dầm liên hợp lắp ghép bị phá hủy theo cơ chế uốn. Đối với trường hợp được thiết kế với mức độ liên kết không hữu hiệu (SC\_D2), có thể quan sát thấy tất cả các cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc trong trường hợp này đạt cường độ chảy tại mặt phẳng cắt 1 trước các bộ phận khác (các vùng xung quanh trục trung hòa của dầm liên hợp lắp ghép chưa bị chảy trên phạm vi lớn), như thể hiện trong Hình 9b. Do đó, kết cấu có xu hướng mất khả năng chịu lực do phá hủy cắt tại mặt tiếp xúc.



Hình 9. Ứng suất Mises của dầm liên hợp và các cốt thép chịu cắt tại tải trọng tới hạn.



Hình 10. Mối quan hệ mô men-biến dạng của các cốt thép ngang điển hình.

Hình 10 minh họa quan hệ mô men-biến dạng của cốt thép ngang điển hình trong vùng chịu cắt tại mặt tiếp xúc. Từ Hình 10 có thể thấy rằng, đối với các trường hợp được thiết kế với mức độ liên kết không hữu hiệu (SC\_S2 và SC\_D2), cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc đạt tới biến dạng chảy; do đó, kết cấu có xu hướng mất khả năng chịu lực do phá hủy cắt tại mặt tiếp xúc. Đối với các trường hợp còn lại, biến dạng lớn nhất của cốt thép ngang không đạt tới biến dạng chảy của cốt thép, vì vậy khả năng làm việc của liên kết được đảm bảo và dầm liên hợp lắp ghép bị phá hủy theo cơ chế uốn. Do ảnh hưởng của mô hình dính bám, biến dạng tại mặt tiếp xúc của cốt thép ngang ban đầu tăng không đáng kể; tuy nhiên, sau khi lực dính bám bắt đầu bị phá vỡ, biến dạng tăng lên rõ rệt, phản ánh hiệu ứng kẹp chi phối cường độ cắt tại mặt tiếp xúc. Vì vậy, đường cong mô

men-biến dạng không có dạng tuyến tính đơn trong vùng biến dạng đàn hồi của cốt thép ngang.

## 5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, phân tích phần tử hữu hạn của dầm liên hợp lắp ghép đã được thực hiện và xác minh thông qua việc so sánh với các kết quả thực nghiệm tương tự, sau đó các nghiên cứu tham số được tiến hành. Trên cơ sở các kết quả thu được, những kết luận sau đây được rút ra:

- Đối với các trường hợp được thiết kế với lượng cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc phù hợp, khả năng làm việc kết cấu của dầm liên hợp lắp ghép được đảm bảo và dầm liên hợp biểu hiện dạng phá hủy uốn dẻo điển hình.

- Đối với các trường hợp được thiết kế với lượng cốt thép chịu cắt mặt tiếp xúc không hữu hiệu, toàn bộ cốt thép chịu cắt được quan sát thấy đạt tới cường độ chảy tại mặt tiếp xúc, do đó, kết cấu có xu hướng mất khả năng chịu lực do phá hủy cắt tại mặt tiếp xúc.

- Tiêu chuẩn thiết kế cầu AASHTO LRFD được cho là đảm bảo an toàn cần thiết cho kết cấu dầm liên hợp lắp ghép với mối nối liên tục giữa bản đúc sẵn và dầm. Tuy nhiên, cần tiến hành thêm các thực nghiệm và phân tích để chứng minh tính ứng dụng đầy đủ hơn của loại kết cấu này và thiết kế được đề xuất cho lĩnh vực kỹ thuật cầu.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Haber, Z., and Graybeal, B. Performance of Grouted Connections for Prefabricated Bridge Deck Elements; Report no. FHWA-HIF-19-003; FHWA-Federal Highway Administration: Washington, DC, USA, 2018.

[2] Biswas, M. Precast Bridge Deck Design Systems. PCI Journal, 31, 40-94, 1986.

[3] Tawadrous, R. Design of Shear Pocket Connections in Full-Depth Precast Concrete Bridge Deck Systems. Doctorate Dissertation, Durham School of Architectural Engineering and Construction, University of Nebraska, 2017.

[4] Badie, S. S., Girgis, A., Tadros, M. K., and Nguyen, N. T. Relaxing the Stud Spacing Limit for Full-Depth Precast Concrete Deck Panels Supported on Steel Girders (Phase I). Journal of Bridge Engineering, 15 (5), 482-492, 2010.

[5] Huh, B., Lam, C., and Tharmabala, B. Effect of Shear Stud Clusters in Composite Girder Bridge Design. Canadian Journal of Civil Engineering, 42, 259-272, 2015.

[6] Xu, C., Sugiura, K., Masuya, H., Hashimoto, K., and Fukada, S. Experimental Study on the Biaxial Loading Effect on Group Stud Shear Connectors of Steel-Concrete Composite Bridges. Journal of Bridge Engineering, 20, 04014110, 2015.

[7] Ovuoba, B. and Prinz, G. S. Headed Shear Stud Fatigue Demands in Composite Bridge Girders Having Varied Stud Pitch, Girder Depth, and Span Length. Journal of

Bridge Engineering, 23 (11), 04018085, 2018.

[8] El-Khier, M. A. and Morcou, G. Precast Concrete Deck-to-Girder Connection Using Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Shear Pockets. Engineering Structures, 248, 113082, 2021.

[9] Graybeal, B. Ultra-High Performance Concrete Composite Connections for Precast Concrete Bridge Decks. Report no. FHWA-HRT-12-041, FHWA-Federal Highway Administration, Washinton, DC, USA, 2012.

[10] Graybeal, B. Ultra-High-Performance Concrete Connections for Precast Concrete Bridge Decks. PCI Journal, 59(4), 48-62, 2014.

[11] Diep, H. T., Jang, M., Moon, J., and Choi, B. H. Numerical Analysis on Plastic Moment Capacity of Prefabricated Steel Girders with Injection Channel Connections. International Journal of Steel Structures, 22 (6), 1722-1733, 2022.

[12] Diep, H. T., Moon J., and Choi B. H. Structural Performance of Prefabricated Composite Girders for Railway Bridges along with Girder-to-Deck Interface Connections for Mechanical Injection. Applied Sciences, 13 (11), 6686, 2023.

[13] Choi, B. H., Diep, H. T., and Moon, J. Flexural Performance of Prefabricated Composite Girders along with Precast Deck-to-Girder Continuous Connections. International Journal of Steel Structures, 24 (1), 95-108, 2024.

[14] Nguyễn, V. T., và Ngô, C. P. Nghiên cứu giải pháp kết cấu và công nghệ thi công nhanh công trình cầu đường bộ tại TP. Hồ Chí Minh. Đề tài cấp Thành phố, 2015.

[15] Ngô, V. M., và Phạm, T. T. Phân tích hiệu quả kinh tế - kỹ thuật và khả năng áp dụng dầm liên hợp bán lắp ghép VFT cho chiều dài nhịp vừa và nhỏ ở Việt Nam. Giao thông vận tải, 2020.

[16] Phạm, D. H., Khúc, Đ. T. (2021). Nghiên cứu bản mặt cầu lắp ghép UHPC ứng dụng trong xây dựng cầu nhanh tại Việt Nam. Giao thông Vận tải, Số 7, 28–31.

[17] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th Edition (2020).

[18] ABAQUS (2020). ABAQUS analysis user's guide.

[19] Bouwsema, W. H. (2021). The Pull-Out and Shear Resistance of a Lattice Girder from a Precast Concrete Floor Plate during a 4-Point Bending Test. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands.

[20] Setyanto, S. B. (2021). Numerical Study of Interface Behaviour in Composite SHCC-Concrete Beams. Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

[21] Han, Y., Wang, J., and Zhang, E. (2022). Experimental Study of Interfacial Bond Properties between CGM and Existing Concrete. Applied Sciences, 12 (24), 12623.

[22] Haber, Z. B., Munoz, J. F., I. De la Varga, and Graybeal, B. A. (2018). Bond Characterization of UHPC Overlays for Concrete Bridge Decks: Laboratory and Field

Testing. *Construction and Building Materials*, 190, 1056–1068.

[23] Dudziak, S., JackiewiczRek, W., and Kozyra, Z. (2021). On the Calibration of a Numerical Model for Concrete-to-Concrete Interface. *Materials*, 14 (23), 7204.

[24] Jang, H. O., Lee, H. S., Cho, K., and Kim, J. (2018). Numerical and Experimental Analysis of the Shear Behavior of Ultrahigh-Performance Concrete Construction Joints. *Advances in Materials Science and Engineering*, 6429767.

[25] CEN (Comité Européen de Normalisation) (2004). Design of Concrete Structures. In *Eurocode 2, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings*.

[26] Ko, S. H. and Lee, J. H. (2021). Monotonic Tension and Compression Stress-Strain Model for Longitudinal Reinforcement. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 33 (6), 551-559.

[27] Choi, B. H, Thusa, B., Diep, H. T., and Moon, J. (2026). Structural Performance Evaluation of Steel Composite Girders with Prefabricated Deck-to-Girder Connection along with Non-Shrink Grout Properties for Hydraulic Injection. *International Journal of Steel Structures*, Accepted.