

# Nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng phân tích ứng xử chịu uốn của dầm bản trong công trình cầu bê tông cốt thép 30 năm tuổi

## Experimental and numerical analysis of the flexural behavior of slab beam in a 30-year-old reinforced concrete bridge

Nguyễn Huy Cường, Vũ Văn Hiệp\*, Hồ Thị Hoài

Trường Đại học Giao thông vận tải

\*Tác giả liên hệ: vvhiiep@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 27/8/2024; Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2024

### Tóm tắt:

Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm phân tích ứng xử chịu uốn của một dầm bản bê tông cốt thép 30 năm tuổi, được tháo dỡ để xây cầu mới. Kết quả cho thấy dầm chịu ba giai đoạn chính: giai đoạn đàn hồi, giai đoạn hình thành các vết nứt, và giai đoạn phá hoại, với tải trọng cực đại đạt 226 kN. Dạng phá hoại chủ yếu là do uốn, bê tông vùng nén bị ép vỡ, cốt thép chịu kéo chảy dẻo và vết nứt mở rộng đến 1,2 mm. Đồng thời, mô hình mô phỏng số trên phần mềm ATENA được xây dựng để phân tích cụ thể ứng xử chịu uốn của dầm, và so sánh với kết quả thực nghiệm. Kết quả này cung cấp dữ liệu định lượng quan trọng cho việc đánh giá khả năng chịu lực và đề xuất giải pháp sửa chữa, gia cường hiệu quả kết cấu.

**Từ khóa:** Dầm bản; Bê tông cốt thép; Cầu; 30 năm tuổi; Ứng xử chịu uốn; ATENA.

### Abstract:

This paper presents experimental results analyzing the flexural behavior of a 30-year-old reinforced concrete bridge that was dismantled for replacement. The results revealed that the beam underwent three main phases: elastic, cracking, and failure, with a maximum load capacity of 226 kN. The primary failure mode was flexural, characterized by concrete crushing in the compression zone, yielding of the tensile reinforcement, and crack widening up to 1.2 mm. Simultaneously, a numerical model using ATENA software was developed to specifically analyze the flexural behavior of the beam and compare it with experimental results. These results provide important quantitative data for assessing load-bearing capacity and proposing effective repair and strengthening solutions.

**Keywords:** Slab beam; Reinforced concrete; Bridge; 30-year-old; Flexural behavior; ATENA.

### 1. Giới thiệu

Sự phát triển của hệ thống giao thông đường bộ là một yếu tố thiết yếu trong mọi nền kinh tế hiện đại. Mạng lưới giao thông vận tải đóng một vai trò quan trọng trong việc tăng cường sản xuất, việc làm và khả năng tiếp cận, trong đó, cầu là thành phần quan trọng [1]. Ở Việt Nam, nhiều cây cầu đã xây dựng trên 30 năm, và do

đó, một số đã vượt quá tuổi thọ thiết kế. Tuy nhiên, hiện có rất ít dữ liệu thực nghiệm về đặc tính kết cấu của chúng thông qua các nghiên cứu thực nghiệm. Bởi chi phí bảo trì cho các cây cầu cũ ngày càng tăng, dữ liệu về khả năng làm việc dài hạn của kết cấu cầu là rất quan trọng để hỗ trợ các cơ quan quản lý đưa ra các chính sách, giải pháp xử lý. Việc bảo trì và gia cố các cây cầu hiện tại thường dựa vào việc kiểm tra

trực quan định kỳ. Tuy nhiên, một số loại hư hỏng của cầu bê tông cốt thép (BTCT) không thể được phát hiện bằng cách kiểm tra trực quan. Cấu trúc BTCT có các đặc tính phụ thuộc nhiều vào thời gian, chẳng hạn như co ngót và từ biến của bê tông, khả năng chịu mỏi của vật liệu. Ngoài ra, hiện tượng ăn mòn có thể ảnh hưởng đến tính chất cơ học của vật liệu và khả năng dính bám của các thanh cốt thép. Cho đến nay, thử nghiệm tải trọng phá hủy toàn diện trên kết cấu cầu đã được báo cáo trong các tài liệu nước ngoài, chủ yếu với cầu bê tông dự ứng lực (BTDUL), tuy nhiên, chưa được thực hiện ở Việt Nam.

Pepe và cộng sự [2] đã thực hiện các thử nghiệm tải trọng trên ba dầm được lấy từ Sorell Causeway, một cây cầu đường bộ bằng bê tông dự ứng lực (BTDUL) dài 457 m đã tồn tại 45 năm ở Úc. Họ phát hiện rằng khả năng chịu tải của các dầm giảm rõ rệt, đặc biệt ở những dầm bị nứt và ăn mòn nghiêm trọng. Eder và cộng sự [3] đã kiểm tra hai dầm chữ I BTDUL, dài 13,7 m và có tuổi thọ 50 năm, nhằm đánh giá hiệu quả của mặt cắt liên hợp. Taffe và cộng sự [4] đã nghiên cứu tình trạng của một cây cầu BTDUL 45 năm tuổi, sau khi phát hiện thép dự ứng lực và cốt thép bị hư hỏng nghiêm trọng, cây cầu đã bị phá hủy. Shenoy [5] đã tiến hành thí nghiệm trên hai dầm hộp BTDUL tháo rời từ một cây cầu có tuổi thọ 27 năm, với chiều dài nhịp 16,5 m. Dù một trong số các dầm có dấu hiệu hư hỏng nhẹ, cả hai vẫn thể hiện tính dẻo và khả năng chịu uốn cao hơn mức dự kiến. Zwicky [6] đã thử nghiệm ba dầm BTDUL dài 21 m được thu hồi từ một mặt cầu 30 năm tuổi và áp dụng các thiết lập thử nghiệm khác nhau để dự đoán khả năng chịu uốn và cắt. Halsey và cộng sự [7] đã thử nghiệm phá hủy hai dầm chữ T ngược BTDUL được tháo dỡ từ một cây cầu 40 năm tuổi, với nhịp dài 7,62 m. Các thí nghiệm cho thấy hiệu ứng liên hợp đã đạt được hoàn toàn, mặc dù bề mặt của dầm không nhám và đai được lắp đặt theo yêu cầu của chỉ dẫn kỹ thuật AASHTO. Pepe và cộng sự [8] đã thực hiện thí nghiệm đến phá hoại trên ba dầm

BTDUL bị xuống cấp, thu hồi từ một cây cầu 45 năm tuổi tiếp xúc với môi trường biển khắc nghiệt. Kết quả cho thấy, không có dầm đạt khả năng chịu lực như thiết kế ban đầu, sự phá hoại được cho là do hư hỏng dần dần của các bó cáp dự ứng lực.

Cầu dầm bản có chiều dài nhịp từ 6 đến 9 m là một dạng kết cấu cầu phổ biến tại Việt Nam, đặc biệt trong các khu vực nông thôn và vùng ngoại ô, nơi yêu cầu về tải trọng không quá lớn. Với ưu điểm về khả năng thi công nhanh chóng, chi phí thấp và độ bền cao, cầu dầm bản thường được sử dụng cho các nhịp cầu ngắn, điển hình là cầu dầm bản có chiều dài khoảng 6 m. Trong môi trường khắc nghiệt và lưu lượng xe quá tải, cùng với việc bảo trì không đầy đủ, các cầu dầm bản ở Việt Nam dễ xuống cấp, dẫn đến vết nứt và giảm khả năng chịu lực nếu không được kiểm soát tốt. Ở Việt Nam, cầu BTCT thường được bảo trì định kỳ, nhưng do hạn chế về nguồn lực và công nghệ, việc bảo trì chủ yếu dựa vào kiểm tra trực quan và sửa chữa hư hỏng rõ rệt. Thông tin về thi công và bảo trì không được lưu trữ đầy đủ, gây khó khăn trong việc đánh giá chính xác tình trạng của cầu, đặt ra những thách thức lớn đối với việc duy trì và nâng cao khả năng chịu lực của các cầu này.

Bài báo này tóm tắt các kết quả thực nghiệm và mô phỏng số nhằm phân tích sự làm việc của dầm bản đầy đủ (full-scale) được lấy từ cầu Bến Chọ, một cây cầu 30 năm tuổi tại xã Hương Bình, huyện Hương Khê, tỉnh Hà Tĩnh, đã được tháo dỡ vào năm 2024 và thay thế bằng một cây cầu mới. Thông qua việc phân tích này, các dữ liệu định lượng cần thiết để đánh giá tình trạng hiện tại của các cầu và đề xuất các biện pháp bảo trì, sửa chữa hợp lý.

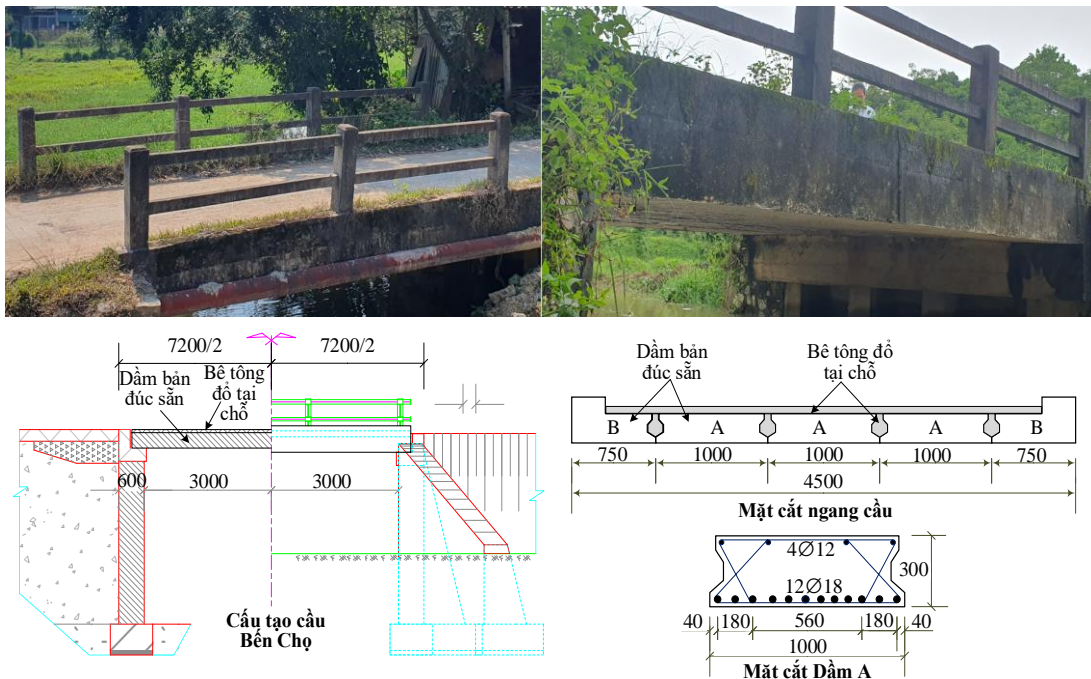
Thí nghiệm thuộc chuỗi nghiên cứu về ứng dụng vật liệu bê tông cốt lưới dệt trong sửa chữa và tăng cường dầm cầu cũ. Các kết quả thí nghiệm gia cường bằng vật liệu này sẽ được công bố trong các bài báo tiếp theo.

## 2. Đặc điểm của cây cầu được nghiên cứu

### 2.1. Cấu tạo dầm cầu

Theo kế hoạch bảo trì cơ sở hạ tầng tại xã Hương Bình, huyện Hương Khê, tỉnh Hà Tĩnh, một cây cầu BTCT 30 năm tuổi, được xây dựng từ năm 1995, đã ngừng khai thác và được phá dỡ vào năm 2024. Cây cầu này nằm trong khu vực đồi núi và không bị ảnh hưởng bởi môi trường biển. Trước khi phá dỡ, lớp bê tông đổ tại chỗ trên bề mặt cầu đã được đục tẩy. Các dầm của cầu dạng bản có chiều dài 6,6 m, được đặt trên hai gối với chiều dài nhịp là 6 m. Chiều

dày của bản dầm được thiết kế là 300 mm, đủ để đảm bảo độ cứng cần thiết cho việc chịu lực. Cầu có chiều rộng là 4,5 m, được tổ hợp bởi 05 dầm bản đúc sẵn, gồm 03 bản loại A có bề rộng 1000 mm, và 02 bản loại B có bề rộng 750 mm dạng tiết diện chữ L. Tất cả các dầm được kết nối bằng mối nối ướt, và lớp bề mặt bê tông đổ tại chỗ dày 50 mm. Đối với dầm bản loại A, cốt thép chủ được bố trí tại thớ dưới của dầm, với 12 thanh đường kính 18 mm, và cốt thép đai có đường kính 6 mm, được bố trí cách nhau 300 mm. Chi tiết và mặt cắt ngang của dầm BTCT này được trình bày trong Hình 1.



**Hình 1.** Hiện trạng ban đầu và cấu tạo cầu Bến Chợ.

Do cầu nằm ngoài khu vực đô thị và không là đường cao tốc, hồ sơ bảo trì không được lưu giữ đầy đủ vì chưa được chú ý, quan tâm. Do đó, bản vẽ hoàn công của cầu bị thất lạc. Trước khi phá dỡ cầu, đã tiến hành kiểm tra kỹ lưỡng và phát hiện một số vết nứt có bề rộng rất nhỏ ở khu vực giữa nhịp. Hơn 10 vị trí cũng xuất hiện vết nứt, tất cả các vết nứt đều có độ rộng nhỏ hơn 0,15 mm. Quá trình tháo dỡ bao gồm các giai đoạn đục tẩy, tách dầm nâng và vận chuyển. Đầu tiên, lớp bê tông đổ tại chỗ dày 50 mm trên bề mặt dầm tiến hành đục tẩy. Sau đó, các phiến dầm BTCT cẩn thận tách rời (Hình 2). Tiếp theo, hai dầm bản loại A được cẩu lên bằng thiết bị nâng hạ chuyên dụng để tránh gây

ra hư hỏng thêm trong quá trình di chuyển. Các phiến dầm sau đó hạ xuống và đặt lên phương tiện vận chuyển để đưa đến phòng thí nghiệm Vật liệu và kết cấu xây dựng của Trường Đại học Giao thông vận tải. Tại đây, các dầm được kiểm tra chi tiết về tính chất vật liệu, khả năng chịu lực, và tiến hành thí nghiệm đến khi phá hoại. Trong bài báo này, kết quả thí nghiệm uốn của một dầm bản được trình bày. Dầm còn lại được tăng cường bằng vật liệu bê tông cốt lưới dệt, và sẽ được trình bày trong bài báo sau. Dựa trên các dữ liệu định lượng thu thập được để đánh giá tình trạng hiện tại của dầm, một nghiên cứu tiếp theo về các phương pháp sửa chữa và gia cường dầm còn lại được thực hiện.



Hình 2. Quá trình tháo dỡ và thu hồi dầm bản của cầu Bến Chợ.

## 2.2. Thí nghiệm vật liệu

Bê tông từ dầm cầu đã được khoan rút lõi để tạo mẫu thử nghiệm. Bốn mẫu bê tông có kích thước tiêu chuẩn là 110 mm x 220 mm được khoan từ dầm cầu và thí nghiệm, nhằm xác định đúng cường độ chịu nén của bê tông hiện trạng trong dầm. Quá trình rút lõi được thực hiện cẩn thận để đảm bảo mẫu bê tông không bị nứt hoặc hư hại trong quá trình lấy mẫu. Cường độ chịu nén trung bình của các mẫu thử là 22,4 MPa.

Cốt thép chủ từ dầm cầu được lấy mẫu và thử nghiệm để đánh giá khả năng chịu kéo, trong đó, ba thanh cốt thép từ các vị trí khác nhau của cầu được thử nghiệm đảm bảo tính đại diện. Giới hạn chảy của cốt thép đo được khoảng 352,3 MPa, với giai đoạn chảy không quá rõ ràng, ngắn hơn nhiều so với cốt thép hiện nay. Cường độ chịu kéo bền đạt 554,8 MPa, và mô đun đàn hồi của cốt thép được xác định xấp xỉ 198,3 GPa.



Mẫu nén bê tông

Mẫu kéo cốt thép

Hình 3. Thí nghiệm xác định cường độ của vật liệu.

## 3. Thí nghiệm uốn dầm cầu

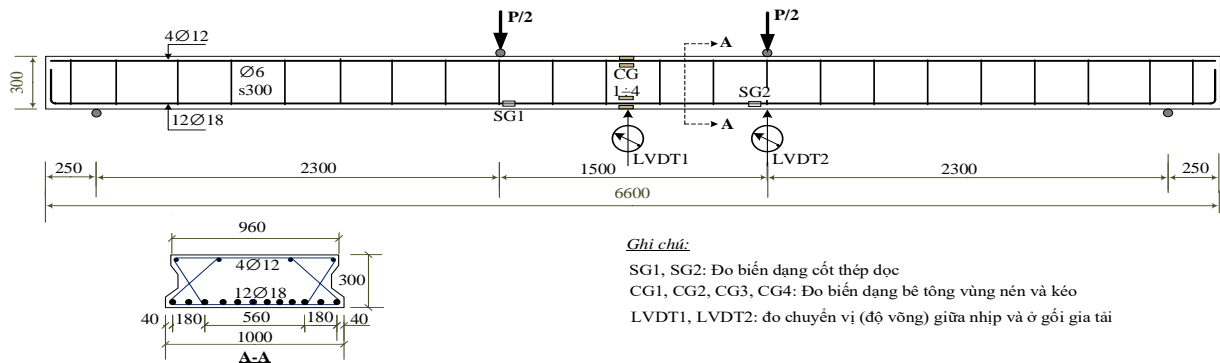
### 3.1. Thiết lập thí nghiệm

Dầm cầu được đặt vào khung thí nghiệm để tiến hành kiểm tra khả năng chịu uốn dưới tải trọng tĩnh. Tải trọng được áp dụng theo sơ đồ uốn bốn điểm, trong đó, lực được truyền qua hai điểm đặt tải, tạo ra một vùng mô men uốn thuần túy giữa hai điểm này. Chiều dài nhịp chịu uốn là

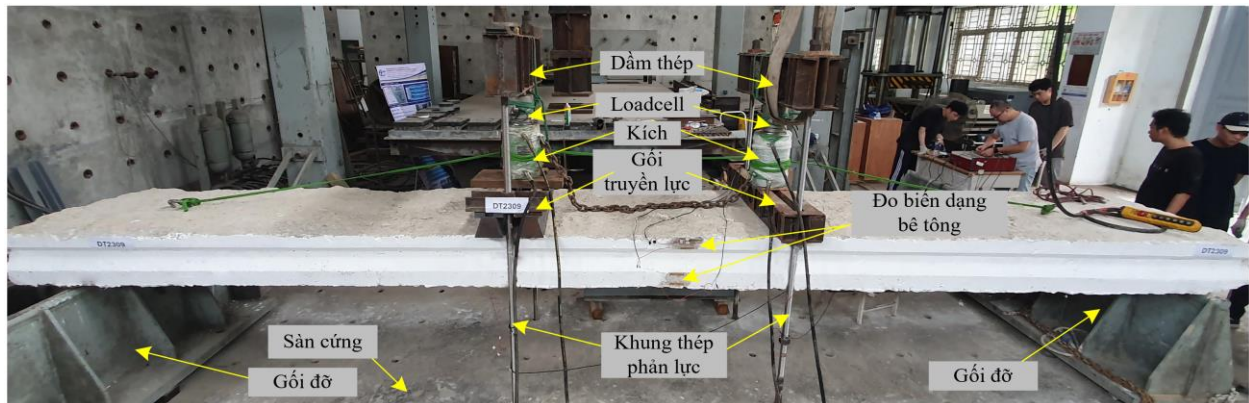
6,1 m, tương ứng với hai đoạn chiều dài chịu cắt 2,3 m, và khu vực chịu uốn thuần túy dài 1,5 m (Hình 4). Các kích thước này được lựa chọn gần với chiều dài nhịp dầm trong thực tế, cũng như cấu tạo hệ sàn cứng (strong floor) của phòng thí nghiệm. Hệ thống thí nghiệm được thiết lập như sau: Hai kích thủy lực có công suất 1000 kN, mỗi chiếc được sử dụng để tạo tải

trọng thông qua một hệ khung phản lực (Hình 5). Tải trọng được áp dụng bằng cách đẩy chống lại một khung phản lực neo chặt vào sàn cứng để đảm bảo độ ổn định và chính xác của thí

nghiệm. Ban đầu, dầm được gia tải đến 5 kN, sau đó, hạ tải về 0, nhằm khử các biến dạng sai lệch và độ rơ của hệ thống thí nghiệm.



**Hình 4.** Cấu tạo dầm thí nghiệm.



**Hình 5.** Thiết lập hệ thống thí nghiệm.

Quá trình thí nghiệm tuân theo quy trình không chế bằng lực, trong đó, tải trọng được tăng dần theo các bước khoảng 1 kN. Tải trọng được tăng cho đến khi dầm xuất hiện các dấu hiệu hư hỏng nghiêm trọng hoặc đạt đến tải trọng tối đa dầm có thể chịu. Giá trị lực được kiểm soát và đối chiếu thông qua hệ thống đồng hồ đo áp suất, cũng như thông qua hai thiết bị đo lực (loadcell) được gắn phía trên kích. Điều này cho phép kiểm soát chặt chẽ sự gia tăng tải trọng và quan sát các ứng xử chịu lực của dầm trong từng giai đoạn của thí nghiệm. Toàn bộ hệ thống được thiết kế nhằm mô phỏng chính xác các điều kiện tải trọng thực tế dầm có thể gặp phải trong quá trình sử dụng, từ đó, thu thập dữ liệu cần thiết để đánh giá sự làm việc của dầm dưới tác động của tải trọng gây uốn. Tại các thời điểm đặc trưng như thời điểm bê tông bị nứt, cốt thép bị kéo chảy, tải trọng tương ứng với trạng thái giới hạn sử dụng và trạng thái giới hạn cường độ

được duy trì tải trọng để đánh giá kỹ lưỡng sự làm việc của dầm.

Độ võng của dầm tại giữa nhịp được đo bằng hai cảm biến LVDT (Linear Variable Differential Transformer), giúp xác định mức độ biến dạng tổng thể của dầm dưới tác động của tải trọng. Biến dạng của cốt thép chủ tại vùng kéo được ghi lại bằng các cảm biến dạng lá điện trở dán trực tiếp lên bề mặt cốt thép. Bốn lá điện trở đo biến dạng bê tông bố trí dọc theo chiều cao của dầm tại vị trí giữa nhịp để theo dõi biến dạng trong quá trình thí nghiệm uốn. Lá đầu tiên được đặt gần bề mặt trên của dầm, trong vùng nén của bê tông, lá tiếp theo nằm trong vùng chuyển tiếp giữa nén và kéo. Lá thứ ba và lá thứ tư nằm gần bề mặt dưới, trong vùng kéo mạnh nhất. Cách bố trí này cho phép đo lường biến dạng từ vùng nén đến vùng kéo, cung cấp dữ liệu chi tiết về sự phân bố ứng

suất trong dầm dưới tác động của tải trọng. Sự phát triển của vết nứt được theo dõi và ghi nhận bằng thước đo độ rộng vết nứt tại các giai đoạn tải trọng khác nhau.

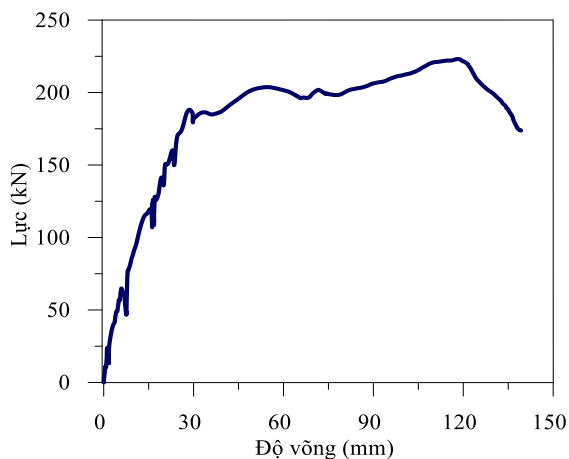
### 3.2. Kết quả thí nghiệm

Dạng phá hoại của dầm cầu trong thí nghiệm chủ yếu là phá hoại do uốn, thể hiện rõ qua sự xuất hiện và mở rộng của các vết nứt thẳng góc

với trục dầm tại vùng kéo. Những vết nứt này mở rộng lớn và nhanh chóng khi tải trọng đạt mức cực đại, làm giảm khả năng chịu lực của kết cấu (Hình 6). Đồng thời, bê tông ở vùng nén bị ép vỡ, mất khả năng chịu nén và gây ra sự mất ổn định của dầm. Cốt thép chịu kéo đã bị chảy dẻo với biến dạng lớn và bước vào giai đoạn tái bền.



**Hình 6.** Dạng phá hoại và cấu trúc vết nứt.



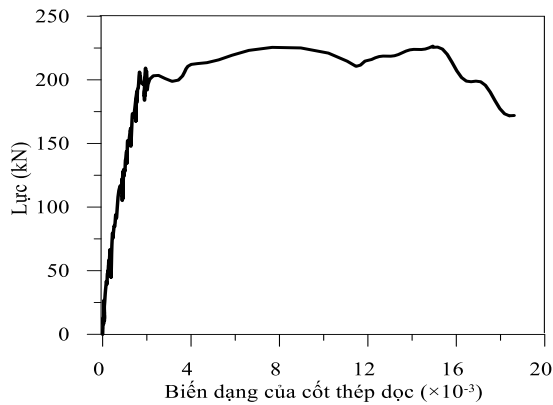
**Hình 7.** Quan hệ giữa lực - độ võng.

Dữ liệu từ thí nghiệm về quan hệ lực - độ võng ở giữa nhịp dầm và lực - biến dạng của cốt thép trong dầm cầu được thể hiện ở Hình 7 và Hình 8. Cần lưu ý rằng, giá trị lực tác dụng biểu diễn tại các hình này được thu nhận từ loadcell, chưa xét đến trọng lượng bản thân của dầm (xấp xỉ 50 kN). Từ Hình 7, có thể thấy, dầm đã trải qua ba giai đoạn làm việc chính khi tải trọng tăng dần, từ giai đoạn làm việc đàn hồi đến khi các vết nứt liên tục xuất hiện và mở rộng, cuối cùng là giai đoạn phá hoại. Ở giai đoạn đầu, khi lực tải còn thấp, dầm cầu và cốt thép chủ yếu hoạt động trong vùng đàn hồi. Tại đây, mối quan hệ giữa lực và độ võng, cũng như giữa lực và biến dạng cốt thép, đều biểu hiện một cách gần như tuyến tính. Cụ thể, khi tải trọng tăng từ 0 đến

khoảng 60 kN, độ võng của dầm tăng một cách tỉ lệ thuận với lực, và biến dạng của cốt thép cũng tăng đều, không có hiện tượng biến dạng dư sau khi lực được gỡ bỏ. Điều này phản ánh rằng kết cấu dầm còn cứng vững, và các thành phần của dầm, bao gồm cả bê tông và cốt thép, vẫn duy trì được trạng thái ban đầu, không có dấu hiệu hư hỏng rõ rệt.

Tại ngưỡng tải trọng khoảng 60 kN, các vết nứt có thể quan sát được tại vùng kéo ở bề mặt dưới của dầm. Cần lưu ý rằng, các vết nứt này có xu hướng xuất hiện và mở rộng tại những nơi đã có vết nứt nhỏ quan sát được trước khi thí nghiệm. Vì vậy, độ cứng của dầm (thể hiện bởi góc nghiêng giữa lực - chuyển vị) không bị suy giảm nhiều. Khi tải trọng tăng lên, các vết nứt liên tiếp xuất hiện và mở rộng ở khu vực chịu uốn thuần túy. Lúc này, biến dạng của cốt thép cũng tăng nhanh hơn, đạt khoảng  $1,8 \div 2\%$ , cho thấy rằng cốt thép đã bắt đầu vượt qua giới hạn đàn hồi và chuyển sang trạng thái biến dạng dẻo. Đây là một giai đoạn quan trọng, vì sự xuất hiện và phát triển của các vết nứt trong bê tông có thể dẫn đến sự suy giảm độ cứng của dầm rõ ràng hơn. Cụ thể, tại mức tải trọng khoảng 150 kN, bề rộng của các vết nứt đã tăng từ 0,2 mm lên đến khoảng 0,5 mm. Sự gia tăng này không chỉ cho thấy bê tông trong vùng kéo đang dần

mất khả năng chống lại ứng suất, còn là dấu hiệu rõ ràng của sự suy giảm độ cứng tổng thể của dầm. Kết cấu dầm bắt đầu thể hiện sự suy yếu rõ rệt, khi các vết nứt mở rộng dẫn đến giảm khả năng chịu lực của bê tông, đồng thời, tăng cường ứng suất trong cốt thép, gây ra biến dạng dẻo không thể đảo ngược. Tại thời điểm này, các vết nứt do uốn - cắt cũng xuất hiện ở khu vực có lực cắt.

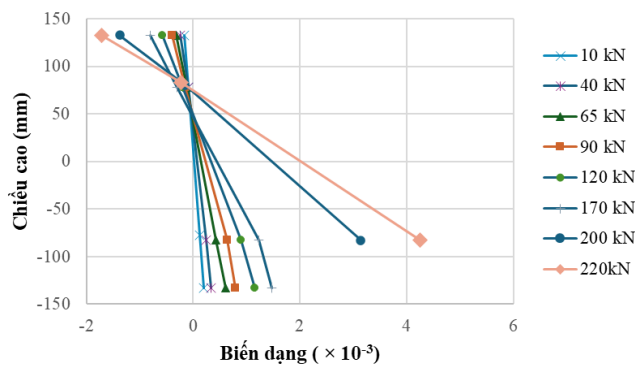


**Hình 8.** Quan hệ giữa lực – biến dạng của cốt thép dọc.

Giai đoạn cuối cùng của quá trình này là khi dầm cầu bước vào phá hoại toàn diện. Khi lực đạt đến mức cực đại, khoảng 226 kN, dầm cầu không còn khả năng chịu tải thêm. Tại thời điểm này, cốt thép tại vùng kéo đã đạt giới hạn chảy, với biến dạng lên đến 16 ‰, cho thấy cốt thép đã chịu biến dạng dẻo cực đại và không thể quay trở lại trạng thái ban đầu. Cần lưu ý rằng, qua thí nghiệm kéo dọc trực với thanh cốt thép được lấy từ dầm cầu Bến Chợ, loại thép này có giai đoạn chảy dẻo không quá rõ ràng, ngắn hơn so với cốt thép hiện nay. Điều này chứng tỏ tại thời điểm sắp phá hoại, cốt thép đã vượt qua giai đoạn dẻo, chuyển tiếp sang giai đoạn tái bền, và

ứng suất trong cốt thép đã lớn hơn cường độ chịu kéo chảy. Với thời điểm này, bê tông ở vùng nén bắt đầu bị ép vỡ, không thể tiếp tục chịu thêm mô men uốn, dẫn đến sự phá hoại của dầm cầu. Bề rộng các vết nứt tiếp tục gia tăng một cách đột ngột, đạt đến 1,2 mm hoặc hơn, đặc biệt là ở giữa nhịp, nơi ứng suất uốn lớn nhất. Độ võng của dầm cũng tăng đột biến, lên đến 120 ÷ 140 mm, biểu hiện sự mất ổn định nghiêm trọng của kết cấu dưới tác động của tải trọng lớn.

Hình 9 biểu diễn sự phân bố biến dạng theo chiều cao dưới các mức tải trọng từ 10 kN đến 220 kN. Trục hoành thể hiện biến dạng của bê tông, trong đó, giá trị âm đại diện cho biến dạng nén, giá trị dương là biến dạng kéo. Trục tung biểu thị chiều cao của dầm. Từ biểu đồ có thể thấy, với mức tải trọng tăng dần, biến dạng trong dầm thay đổi rõ rệt. Tại các mức tải nhỏ (10 kN đến 90 kN), dầm chủ yếu làm việc trong vùng đàn hồi, biến dạng nén và kéo chưa quá lớn, cho thấy kết cấu vẫn giữ được tính ổn định, mặt cắt tương đối phẳng. Tuy nhiên, khi tải trọng tăng lên 120 kN và cao hơn, giá trị biến dạng tăng đáng kể, đặc biệt ở vùng chịu kéo, như vậy, sự xuất hiện và phát triển của các vết nứt làm suy giảm độ cứng của dầm. Ở tải trọng 220 kN, biến dạng dương tăng lên rõ rệt, chứng tỏ cốt thép chịu kéo đã bước vào giai đoạn chảy dẻo, trong khi biến dạng nén ở bê tông đạt giá trị tối đa trước khi bê tông bị ép vỡ. Biến dạng này chưa xét đến trọng lượng của bản thân dầm BTCT gây ra. Đồng thời, khi tải trọng tác dụng trên 190 kN, lá điện trở đo biến dạng CG4 ở thứ dưới không còn ghi nhận được dữ liệu.

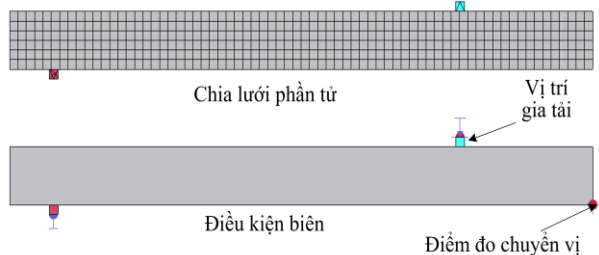


**Hình 9.** Sự phân bố biến dạng của bê tông theo chiều cao dầm.

## 4. Nghiên cứu mô phỏng số

### 4.1 Thiết lập mô hình mô phỏng

Ứng xử chịu lực của kết cấu dầm bản được mô phỏng bằng phần mềm phân tử hữu hạn ATENA do Cervenka Consulting phát triển. Bờ dầm có tính đối xứng về kích thước hình học và tải trọng, chỉ một nửa dầm được mô hình hóa bằng cách áp dụng các điều kiện biên thích hợp. Một số chi tiết uốn cong trên dầm thực tế được loại bỏ khỏi mô hình để tránh các yếu tố phức tạp trong quá trình sinh lưới phân tử hữu hạn, để không ảnh hưởng đến kết quả tính toán. Điều kiện biên của các nút ở giữa nhịp được ràng buộc chống chuyển vị theo phương dọc và phương ngang dầm. Vị trí gối ràng buộc chuyển vị theo phương đứng và phương ngang dầm.



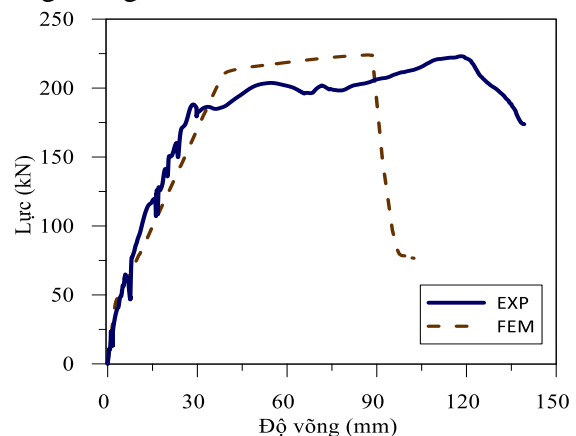
**Hình 10.** Mô hình FEM trên phần mềm ATENA.

Phần bê tông dầm được mô phỏng bằng các phần tử khối, với mô hình vật liệu CC3DNonLinCementitious2 được tích hợp sẵn của ATENA. Đối với cốt thép, mô hình đàn hồi - dẻo lý tưởng được sử dụng với giá trị cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của cốt thép được xác định từ thực nghiệm. Liên kết giữa bê tông và các thanh cốt thép được định nghĩa là dính bám tuyệt đối. Các tham số phân tích được thiết lập là “Standard Newton - Raphson”, tùy chọn mặc định của ATENA. Để thu được kết quả phân tích trong quá trình mô phỏng, nhiều “điểm quan sát” được đặt tại các vị trí, bao gồm độ võng ở giữa nhịp, phản lực ở gối đỡ, biến dạng và ứng suất ở một số điểm chiều cao tiết diện của dầm. Tải trọng được áp dụng theo từng bước nhỏ để mô phỏng quá trình gia tải thực nghiệm. Trong ATENA, điều này được thực hiện bằng cách áp dụng tải trọng tăng dần từ không cho đến khi dầm xuất hiện các dấu hiệu hư hỏng. Trong quá trình này, phần mềm thực

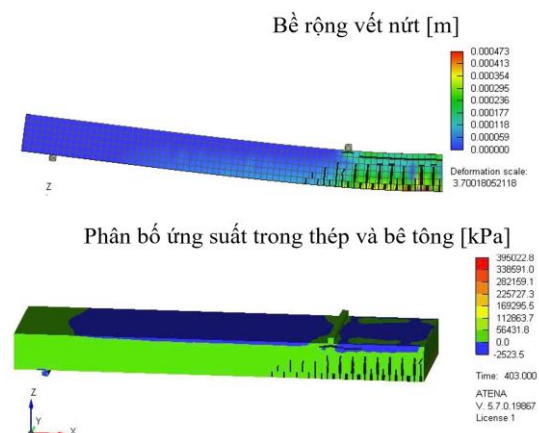
hiện theo dõi sự phát triển của ứng suất, biến dạng, và các vết nứt trong bê tông.

### 4.2 Phân tích kết quả mô phỏng và so sánh với thí nghiệm

Hình 11 so sánh kết quả mô phỏng số (FEM) và thí nghiệm thực tế (EXP) cho thấy sự tương đồng về quan hệ lực - độ võng của dầm, cũng như về dạng phá hoại và cấu trúc vết nứt. Sự sai lệch về khả năng chịu lực chỉ xấp xỉ 2,5%. Tuy nhiên, độ cứng sau khi nứt của dầm mô phỏng có phần nhỏ hơn so với dầm thí nghiệm. Đồng thời, chuyển vị tại thời điểm phá hoại của dầm mô phỏng xấp xỉ 90 mm, nhỏ hơn khá nhiều so với dầm thí nghiệm. Sự phá hoại của dầm FEM chủ yếu là do uốn, với các vết nứt thẳng đứng mở rộng tại vùng kéo. Cốt thép trong vùng kéo cũng vượt quá giới hạn chảy, tương tự như trong thí nghiệm thực tế.



**Hình 11.** So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm.



**Hình 12.** Cấu trúc vết nứt và sự phân bố ứng suất

Hình 12 mô phỏng cấu trúc, bề rộng vết nứt và phân bố ứng suất trong dầm cầu. Có thể thấy,

các vết nứt tập trung chủ yếu ở vùng kéo tại khu vực giữa nhịp. Các vết nứt chính xuất hiện ở giữa nhịp, mở rộng và phát triển lên vùng nén khi tải trọng tiếp tục tăng. Ứng suất lớn tập trung ở vùng kéo, đặc biệt là khu vực các vết nứt lớn, trong khi, vùng nén đã gần đạt đến giới hạn cường độ chịu nén của bê tông dầm. Cốt thép ở khu vực giữa nhịp bước vào giai đoạn chảy dẻo, tiếp nhận toàn bộ lực kéo, giúp duy trì khả năng chịu lực của dầm.

## 5. Kết luận

Nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm phân tích ứng xử chịu uốn của dầm bản bê tông cốt thép 30 năm tuổi từ cầu Bến Chọ nhằm đánh giá khả năng chịu lực và độ bền của kết cấu sau nhiều năm sử dụng. Kết quả cho thấy dầm cầu trải qua ba giai đoạn làm việc chính: Giai đoạn đàn hồi, giai đoạn hình thành các vết nứt, và giai đoạn phá hoại. Trong giai đoạn đàn hồi, mối quan hệ giữa lực và độ võng, cũng như lực và biến dạng cốt thép đều tuyến tính, phản ánh sự cứng vững của kết cấu ban đầu. Khi tải trọng vượt ngưỡng 60 kN, các vết nứt đầu tiên xuất hiện và mở rộng ở vùng kéo phía dưới của dầm. Biến dạng cốt thép tăng nhanh, và các vết nứt mở rộng lên đến 0,5 mm khi tải trọng đạt khoảng 150 kN, cho thấy sự suy giảm độ cứng của dầm. Giai đoạn phá hoại xảy ra khi tải trọng đạt 226 kN, với biến dạng cốt thép lên đến  $16 \times 10^{-3}$  và bê tông vùng nén bị ép vỡ. Bề rộng vết nứt tăng đột ngột, đặc biệt ở giữa nhịp, dẫn đến sự sụp đổ toàn diện của kết cấu. Dạng phá hoại chính do uốn, với các vết nứt thẳng góc mở rộng, bê tông vùng nén bị vỡ, và cốt thép bị chảy dẻo. Kết quả mô phỏng số và thí nghiệm thực tế cho thấy sự tương đồng tốt về quan hệ lực - độ võng và dạng phá hoại của dầm, với sai lệch khả năng chịu lực chỉ 2,5%. Kết quả nghiên cứu cung cấp dữ liệu quan trọng về khả năng chịu lực của dầm cầu cũ, góp phần vào việc đề xuất các biện pháp sửa chữa, gia cường phù hợp, nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kiểm tra và bảo trì định kỳ

để kéo dài tuổi thọ của các cây cầu trong hệ thống giao thông.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giao thông vận tải trong đề tài mã số DT2309.

## Tài liệu tham khảo

- [1] F. Biondini and D. M. Frangopol, *Life-cycle design, assessment and maintenance of structures and infrastructure systems*. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2019.
- [2] T. M. Papé and R. E. Melchers, "The effects of corrosion on 45-year-old pre-stressed concrete bridge beams," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 7, no. 1-2, pp. 101-108, 2011, doi: 10.1080/15732471003588411.
- [3] R. W. Eder, R. A. Miller, T. M. Baseheart, and J. A. Swanson, "Testing of two 50-year-old precast post-tensioned concrete bridge girders," *PCI Journal*, vol. 50, no.3, pp. 90-95, 2005, doi: 10.15554/pcij.05012005.90.95.
- [4] A. Taffe, B. Hillemeier, and A. Walther, "Condition Assessment of a 45-year old prestressed concrete bridge using NDT and verification of the results," *e-Journal of Nondestructive Testing*, 2010.
- [5] C. V. Shenoy and G. C. Frantz, "Structural tests of 27-year-old prestressed concrete bridge beams," *PCI Journal*, vol. 36, no. 5, pp. 80-90, 1991, doi: 10.15554/pcij.09011991.80.90.
- [6] D. L. Zwicky, "Structural evaluation of 30-year-old prestressed concrete girders," In *Proc. 3rd Int. PhD Symp. in Civ. Eng.*, Vienna, Austria, 2000, pp. 5-7.
- [7] H. T. Halsey and R. Miller, "Destructive testing of two forty-year-old prestressed concrete bridge beams," *PCI Journal*, vol. 41, no. 5, pp. 84-93, 1996, doi: 10.15554/pcij.09011996.84.93.
- [8] R. E. Melchers and T. Pape, "Performance of 45-year-old corroded prestressed concrete beams," in *Proc. ICE Struct. Build.*, vol. 166, no. 10, pp. 547-559, 2013, doi: 10.1680/stbu.11.00016.