

# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ỨNG XỬ CẮT CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ LỖ MỞ HÌNH TRÒN VÀ HÌNH CHỮ NHẬT TRONG NHỊP CHỊU CẮT

Nguyễn Trung Hiếu<sup>a,\*</sup>, Đặng Việt Hưng<sup>a</sup>, Nguyễn Tuấn Anh<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

<sup>b</sup>*Công ty TNHH Một thành viên Tư vấn và Xây dựng Nam Giang, Bắc Giang, Việt Nam*

Nhận ngày 02/6/2023, Sửa xong 14/6/2023, Chấp nhận đăng 04/7/2023

## Tóm tắt

Mục tiêu của bài báo nhằm đánh giá ảnh hưởng của lỗ mở hình tròn và hình chữ nhật trên kết cấu dầm bê tông cốt thép (BTCT) với tỷ lệ nhịp chịu cắt/chiều cao làm việc nhỏ. 03 mẫu dầm BTCT với cùng kích thước hình học, cấu tạo cốt thép và cường độ bê tông được chế tạo và tiến hành thí nghiệm. 01 mẫu dầm không có lỗ mở là mẫu đối chứng, 02 mẫu dầm còn lại lần lượt có một lỗ mở hình tròn và một lỗ mở hình chữ nhật trong nhịp chịu cắt (hai lỗ mở có cùng diện tích). Lỗ mở hình tròn có đường kính  $d_0 = 100$  mm và lỗ mở hình chữ nhật có kích thước  $80 \times 120$  mm. Các mẫu dầm được thí nghiệm đến phá hoại theo sơ đồ ba điểm tải, với tỷ lệ nhịp chịu cắt/chiều cao làm việc  $a/d = 1,48$ , nhằm xác định cơ chế phá hoại, dạng nứt xiên, độ võng và khả năng chịu cắt. Các kết quả thu được cho thấy lỗ mở hình tròn và hình chữ nhật, khi nằm trên đường nối giữa điểm tác dụng tải trọng và gối tựa, làm giảm đáng kể khả năng chịu cắt của dầm. Bên cạnh đó, một công thức đơn giản, dựa trên cơ sở mô hình giàn ảo, được đề xuất nhằm xác định khả năng chịu cắt của dầm BTCT có lỗ mở. Kết quả tính toán theo công thức này cho kết quả dự báo phù hợp với kết quả thực nghiệm.

*Từ khóa:* dầm; lỗ mở; lực cắt; phá hoại; mô hình giàn ảo.

## EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON THE SHEAR BEHAVIOUR OF CONCRETE BEAMS WITH CIRCULAR AND RECTANGULAR OPENINGS IN SHEAR SPAN

### Abstract

The objective of this study is to experimentally and analytically evaluate the influence of circular and rectangular openings in reinforced concrete (RC) beams with a low shear span-to-depth ratio. Three RC beam specimens with the same geometrical dimensions, reinforcement detailing, and concrete compressive strength were cast and tested in the current experimental investigation. One RC beam without opening is referred to as the control specimen, whereas the other two RC beams had circular and rectangular openings in the shear span (both openings had the same areas), respectively. The circular opening had a diameter of  $d_0 = 100$  mm, and the rectangular opening had dimensions of  $80 \times 120$  mm. All beam specimens were tested to failure under three-point loading scheme, with a small shear span-to-depth ratio of  $a/d = 1.48$ , to determine their failure modes, diagonal cracking, mid-span deflection, and ultimate shear strengths. The beams had a small shear span-to-depth ratio in order to observe the shear behavior. The obtained test results show that the circular and rectangular openings can significantly reduce the ultimate shear strength of RC beams if the web opening intersects the load path between the load point and the support. Additionally, a simplified analytical model based on the Strut-and-Tie model is proposed to predict the ultimate shear strength of RC beams with openings. The calculation results are compared with the experimental results, showing good agreement.

*Keywords:* reinforced concrete beam; opening; shear; failure; strut-and-tie model.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(4V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4V)-08) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [hieunt@huce.edu.vn](mailto:hieunt@huce.edu.vn) (Hiếu, N. T.)

## 1. Đặt vấn đề

Trong các công trình xây dựng, hệ thống đường ống kỹ thuật (ống cứu hỏa, ống cấp thoát nước, ống thông gió, cấp khí...) thường được bố trí chạy dưới đáy dầm như minh họa trên Hình 1. Trong trường hợp này, hệ đường ống kỹ thuật sẽ làm giảm không gian làm việc của công trình. Để khắc phục vấn đề này, có thể bố trí đường ống kỹ thuật chạy xuyên qua dầm BTCT (Hình 2). Vị trí đường ống xuyên qua dầm có thể được để lỗ chờ từ trước khi đổ bê tông dầm nhưng trên thực tế, trong phần lớn trường hợp thì các vị trí lỗ này được tạo sau bằng cách khoan tạo lỗ.



Hình 1. Hệ thống kỹ thuật chạy dưới đáy dầm



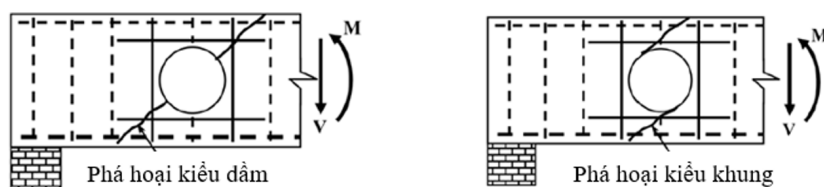
Hình 2. Hệ thống kỹ thuật chạy xuyên qua dầm

Tại các vị trí lỗ mở, tiết diện dầm bị giảm yếu. Phụ thuộc vào độ lớn của lỗ mở trên dầm và mức độ tác dụng của tải trọng, tại vị trí lỗ mở có thể xuất hiện tình trạng nứt, làm giảm khả năng khả năng chịu lực và độ cứng của dầm. Trên Hình 3 minh họa trường hợp xuất hiện tình trạng nứt tại vị trí lỗ mở dưới tác dụng của tải trọng sử dụng. Trong trường hợp này, việc lựa chọn kích thước của lỗ mở, vị trí lỗ mở và số lượng lỗ mở trên dầm rõ ràng chưa được tính đến từ giai đoạn thiết kế và chỉ được thực hiện ở giai đoạn thi công, không xét đến giải pháp tăng cường lỗ mở dẫn đến tình trạng nứt như trên Hình 3.



Hình 3. Nứt tại vị trí lỗ mở trên dầm [1]

Tùy thuộc vào yêu cầu, lỗ mở trên dầm có thể xuất hiện ở vùng uốn (vùng có mô men uốn lớn, thường ở khu vực giữa nhịp dầm) hoặc trong nhịp chịu cắt (vùng có lực cắt lớn, với dầm chịu tác dụng của tải trọng tập trung là khoảng giữa gối tựa dầm và vị trí tác dụng tải trọng tập trung). Trong trường hợp lỗ mở xuất hiện trong nhịp chịu cắt của dầm tùy thuộc vào kích thước của lỗ mở, tình trạng nứt trên dầm có thể xảy ra theo dạng nứt thông thường (kiểu dầm) và dạng nứt kiểu khung, như trên Hình 4.



Hình 4. Hai dạng phá hoại tại vị trí lỗ mở trong nhịp chịu cắt của dầm [2]

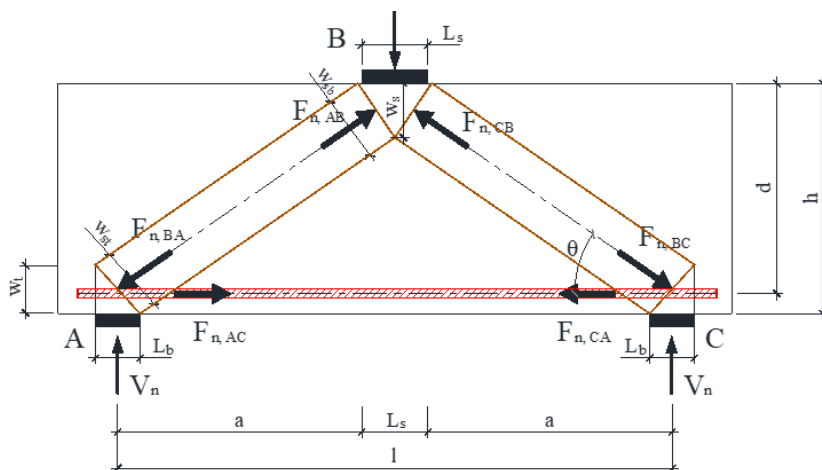
Nghiên cứu về ảnh hưởng của lỗ mở đến khả năng chịu lực của dầm BTCT đã được nhiều tác giả quan tâm, nghiên cứu, tập trung vào một số vấn đề như tỷ lệ nhịp chịu cắt/chiều cao làm việc của dầm, dạng tiết diện dầm, ảnh hưởng của cốt đai xiên, ảnh hưởng của cường độ bê tông, vị trí lỗ mở trên dầm [1–15]. Mansur [2, 3] đã tiến hành nghiên cứu sự làm việc dầm BTCT có lỗ mở ở vùng chịu uốn và trong nhịp chịu cắt (với tỷ lệ nhịp chịu cắt/chiều cao làm việc, ký hiệu  $a/d$ , lớn hơn 2). Dựa trên kết quả thu được các tác giả đã đề xuất được giải pháp cấu tạo cốt thép cho các vị trí lỗ mở trên dầm và đề xuất mô hình tính toán khả năng chịu lực của dầm BTCT có lỗ mở. Ashour và Rishi [4] đã thí nghiệm 16 dầm liên tục, dạng dầm cao, có lỗ mở hình chữ nhật nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của cốt đai xiên và kích thước lỗ mở đến sự làm việc của dầm. Kết quả cho thấy ảnh hưởng rõ ràng của cốt đai xiên quanh vị trí lỗ mở và sự suy giảm khả năng chịu lực đáng kể khi lỗ mở nằm trong nhịp chịu cắt. Tan, và cs. [5] đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của cốt xiên trong trường hợp dầm cao có lỗ mở hình chữ nhật và kiến nghị sử dụng mô hình giàn ảo để đánh giá khả năng chịu lực cắt của dầm có lỗ mở. Yang, và cs. [6] đã thí nghiệm 32 dầm cao có lỗ mở hình chữ nhật nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của cường độ bê tông chế tạo dầm, kích thước lỗ mở và tỷ lệ nhịp chịu cắt/chiều cao làm việc đến khả năng chịu cắt của dầm có lỗ mở. Bên cạnh đó, một số tác giả [7–12] tập trung vào việc nghiên cứu những vấn đề liên quan đến áp dụng mô hình giàn ảo (Strut-and-Tie Model) trong việc tính toán khả năng làm việc của dầm BTCT khi có lỗ mở.

Có thể thấy, các nghiên cứu với trường hợp dầm BTCT có lỗ mở hình tròn, nhất là lỗ mở có tỷ lệ đường kính lỗ/chiều cao làm việc của tiết diện lớn hơn 40% hoặc lỗ mở nằm trong nhịp chịu cắt với tỷ lệ  $a/d$  nhỏ hơn 2 còn hạn chế.

Nội dung của bài báo trình bày một nghiên cứu thực nghiệm đánh giá sự làm việc chịu cắt của dầm bê tông cốt thép đơn giản, có lỗ mở nằm trong nhịp chịu cắt, với tỷ số  $a/d < 2$ . Lỗ mở được lựa chọn trong nghiên cứu này là dạng lỗ mở sau (không được định trước từ giai đoạn thiết kế, không bố trí cốt thép tăng cường quanh lỗ mở), có dạng hình tròn và hình chữ nhật (có cùng diện tích) và bố trí ở giữa chiều cao dầm. Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm và Kiểm định công trình, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

## 2. Tính toán khả năng chịu cắt của dầm theo mô hình giàn ảo (Strut-and-Tie Model)

Xét trường hợp dầm BTCT có tiết diện ngang  $b \times h$  chịu tác dụng của tải trọng tập trung  $P$  tác dụng ở giữa nhịp như trên Hình 5. Khả năng chịu cắt của dầm có thể xác định dựa theo phương pháp mô hình giàn ảo (Strut- and -Tie Model- STM) dựa theo chỉ dẫn trong tiêu chuẩn ACI 318-2019 [16].



Hình 5. Sơ đồ tính toán khả năng chịu cắt của dầm theo mô hình giàn ảo

Sử dụng mô hình STM để tính toán khả năng chịu cắt của dầm được tóm tắt qua các bước như sau:  
 Tính toán các kích thước nút dầm (A, B, C):

$$w_t = 2(h - d); \quad w_s = 0,8w_t; \quad jd = h - 0,5w_t - 0,5w_s \quad (1)$$

Góc nghiêng của thanh chống AB và CB so với phương nằm ngang:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{jd}{a + \frac{L_s}{2}} \right) \quad (2)$$

Bề rộng thanh chống chéo AB, CB ở chân và đỉnh thanh chống được xác định theo công thức:

$$w_{sb} = L_s \sin \theta + w_t \cos \theta; \quad w_{st} = L_b \sin \theta + w_s \cos \theta \quad (3)$$

Cường độ chịu nén hiệu quả của bê tông, ký hiệu  $f_{ce}$ , được xác định trên cơ sở cường độ chịu nén đặc trưng  $f'_c$ , theo công thức sau:

$$f_{ce} = 0,85\beta_s f'_c \quad \text{lấy} \quad \beta_s^A = 0,8 \quad \text{và} \quad \beta_s^B = 1,0 \quad (4)$$

Khả năng chịu lực của nút giàn A (hay C) và nút B được xác định theo các công thức sau:

$$V_{n,A1} = f_{ce} L_s b; \quad V_{n,A2} = f_{ce} w_t b \tan \theta; \quad V_{n,A3} = f_{ce} w_{sb} b \sin \theta \quad (5)$$

$$V_{n,B1} = f_{ce} L_b b; \quad V_{n,B2} = f_{ce} w_s b \tan \theta; \quad V_{n,B3} = f_{ce} w_{st} b \sin \theta \quad (6)$$

Khả năng chịu lực nén của thanh chống AB và CB bằng nhau và được xác định theo các công thức sau đây:

$$w_{eff} = \min(w_{st}, w_{sb}) \quad (7)$$

$$V_{n,AB} = V_{n,CD} = f_{ce} w_{eff} b \sin \theta \quad (8)$$

Khả năng chịu kéo của thanh giằng AD được xác định dựa trên cơ sở khả năng chịu kéo của cốt thép dọc,  $f_y$ , và diện tích cốt thép dọc  $A_s$  theo công thức sau:

$$F_{n,AD} = A_s f_y \quad (9)$$

Khả năng chịu cắt của dầm xác định theo mô hình STM, ký hiệu  $V_n$ , được xác định theo công thức sau:

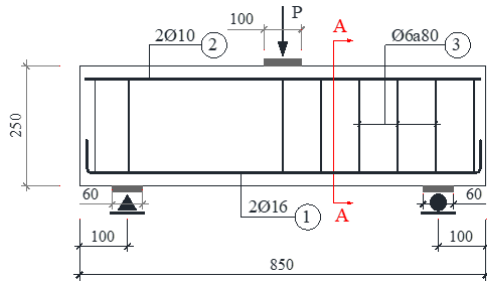
$$V_n = \min(V_{n,B1}; V_{n,B2}; V_{n,B3}; V_{n,A1}; V_{n,A2}; V_{n,A3}; V_{n,AB}; V_{n,BC}; V_{n,AD}) \quad (10)$$

### 3. Nghiên cứu thực nghiệm

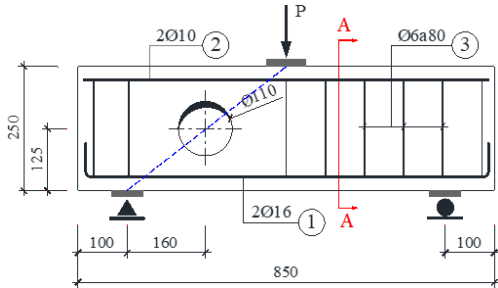
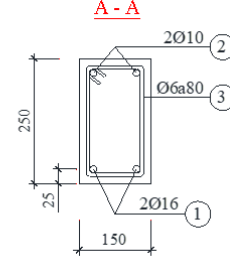
#### 3.1. Mẫu thí nghiệm và vật liệu chế tạo

03 mẫu dầm BTCT có cùng kích thước hình học, cường độ bê tông và cấu tạo cốt thép được chế tạo. Các mẫu dầm có kích thước tiết diện ngang  $b \times h = 150 \times 250$  mm, chiều dài 850 mm. Bê tông sử dụng chế tạo dầm có cấp độ bền B30. Cốt thép chế tạo dầm gồm có cốt thép dọc chịu kéo 2Ø16, cốt thép đai Ø6. Trong số các mẫu dầm thí nghiệm, 01 mẫu dầm không có lỗ mở, ký hiệu B-0, là mẫu dầm đối chứng, 01 mẫu dầm có lỗ mở hình tròn, ký hiệu B-1.1, có đường kính lỗ mở  $d_0 = 110$  mm và 01 mẫu dầm có lỗ mở hình chữ nhật, ký hiệu B-2.1, có kích thước lỗ mở  $80 \times 120$  mm. Kích thước lỗ mở được lựa chọn phù hợp với trường hợp lỗ mở lớn và hai lỗ mở có cùng diện tích (chiều cao lỗ mở hình tròn lớn hơn lỗ mở hình chữ nhật). Tâm của lỗ mở hình tròn và lỗ mở hình chữ nhật đều nằm trên đường thẳng đi qua gối tựa bên trái và điểm tác dụng tải trọng.

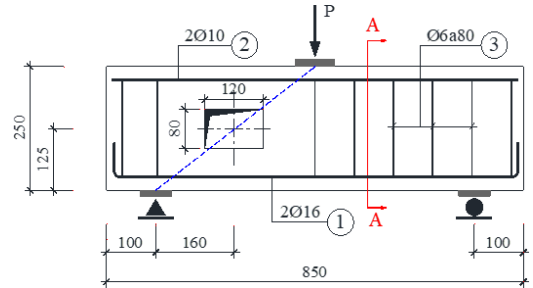
Trên Hình 6 trình bày kích thước hình học và cấu tạo của các mẫu dầm thí nghiệm.



(a) Mẫu dầm đối chứng B-0



(b) Mẫu dầm có lỗ mở hình chữ nhật B-1.1



(c) Mẫu dầm có lỗ mở hình tròn B-2.1

Hình 6. Chi tiết kích thước và cấu tạo các mẫu thí nghiệm

Trên Bảng 1 giới thiệu thành phần cấp phối vật liệu chế tạo bê tông và kết quả thí nghiệm nén xác định cường độ chịu nén của bê tông, thực hiện trên 03 mẫu thử hình trụ  $D \times H = 150 \times 300$  mm ở tuổi 28 ngày. Đối với cốt thép dọc  $\varnothing 16$  và cốt thép đai  $\varnothing 6$ , kết quả thí nghiệm kéo cho giới hạn chảy lần lượt bằng 380 MPa và 330 MPa.

Bảng 1. Thành phần cấp phối vật liệu chế tạo bê tông (đơn vị kg/m<sup>3</sup>)

| Xi măng PCB 30 (kg) | Cát vàng (kg) | Đá dăm $1 \times 2$ (kg) | Nước (kg) | Cường độ chịu nén R28 (MPa) |
|---------------------|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------------|
| 390                 | 680           | 1210                     | 185       | 34,7                        |

Với các thông số về kích thước hình học, cấu tạo cốt thép, cường độ chịu kéo của cốt thép, cường độ chịu nén của bê tông, tính toán được khả năng chịu cắt của dầm theo mô hình giàn ảo. Tổng hợp kết quả tính toán được trình bày trong Bảng 2.

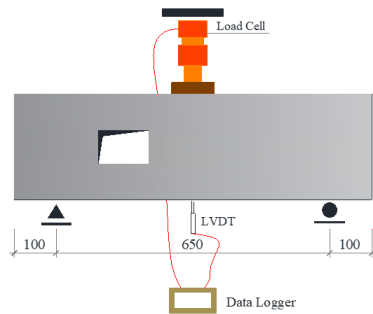
Bảng 2. Khả năng chịu cắt của dầm theo mô hình giàn ảo

| $\theta$ (độ)   | $w_t$ (mm)      | $w_s$ (mm)      | $j_d$ (mm)      | $w_{sb}$ (mm)   | $w_{st}$ (mm)   | $w_{eff}$ (mm)  | $f_{ce}$ (MPa)  | $V_{n,A1}$ (kN) |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 310             | 60              | 48              | 196             | 103             | 56              | 56              | 21,3            | 319,5           |
| $V_{n,A2}$ (kN) | $V_{n,A3}$ (kN) | $V_{n,B1}$ (kN) | $V_{n,B2}$ (kN) | $V_{n,B3}$ (kN) | $V_{n,AB}$ (kN) | $V_{n,CB}$ (kN) | $F_{n,AD}$ (kN) | $V_n$ (kN)      |
| 115,8           | 169,5           | 95,8            | 115,8           | 169,5           | 92,2            | 92,2            | 184,8           | 92,2            |

### 3.2. Sơ đồ thí nghiệm và bố trí dụng cụ đo

Các mẫu dầm được thí nghiệm theo sơ đồ dầm đơn giản với nhịp làm việc  $l$  của dầm bằng 650 mm. Dầm chịu tác dụng của một tải trọng tập trung  $P$  ở giữa nhịp dầm. Với sơ đồ thí nghiệm này, tỷ số giữa nhịp dầm và chiều cao  $l/h$  bằng 2,6 và tỷ số giữa nhịp chịu cắt (khoảng cách từ gối tựa đến vị trí tác dụng tải trọng) và chiều cao làm việc của tiết diện  $a/d$  bằng 1,48. Thí nghiệm được tiến hành nhằm xác định tải trọng cực hạn tác dụng và cơ chế phá hoại của các mẫu dầm.





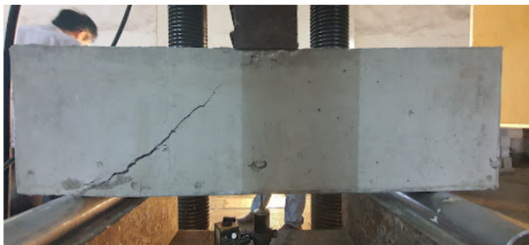
Hình 7. Sơ đồ thí nghiệm và hình ảnh minh họa

Tải trọng tập trung được tạo ra bằng cách sử dụng kích thủy lực kết hợp hệ khung phản lực. Độ lớn của tải trọng tác dụng lên dầm được đo bằng dụng cụ đo lực điện tử (load-cell). Chuyển vị của dầm ở vị trí giữa nhịp được đo bằng một dụng cụ đo chuyển vị điện tử (LVDT). Dụng cụ đo lực và đo chuyển vị được kết nối với một bộ thu thập, xử lý số liệu (Datalogger TDS 530) cho phép ghi nhận tự động và đồng thời các số liệu thí nghiệm. Thí nghiệm được tiến hành cho đến khi các mẫu thử bị phá hoại hoàn toàn.

#### 4. Phân tích và đánh giá kết quả

##### 4.1. Cơ chế phá hoại các mẫu thí nghiệm

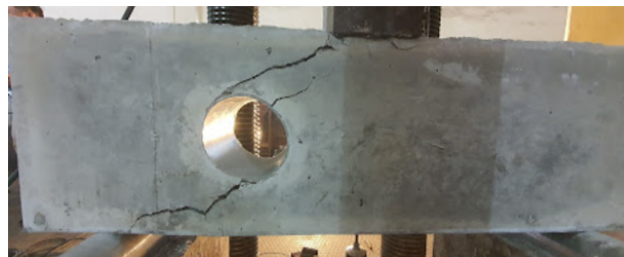
Trên Hình 8 trình bày hình ảnh phá hoại của các mẫu dầm thí nghiệm. Có thể thấy tất cả các mẫu thí nghiệm đều bị phá hoại do lực cắt. Với mẫu dầm đối chứng, vết nứt xiên hình thành và phát triển từ vị trí gối tựa đến vị trí tác dụng của tải trọng. Dạng phá hoại này phù hợp với kết quả nghiên cứu



(a) Mẫu đối chứng B-0



(b) Mẫu có lỗ mở hình chữ nhật B-1.1



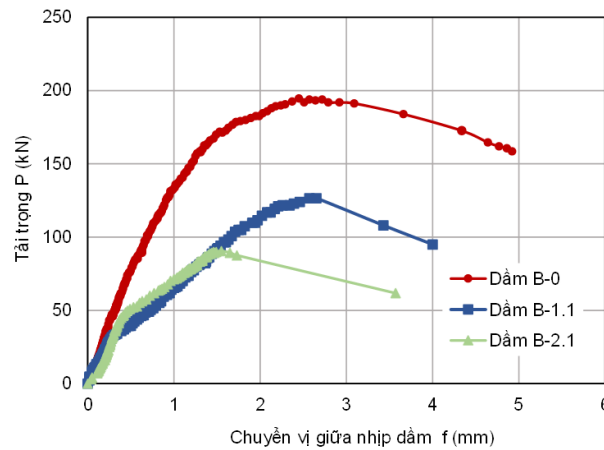
(c) Mẫu có lỗ mở hình tròn B-2.1

Hình 8. Hình ảnh phá hoại điển hình của các mẫu dầm thí nghiệm

gần đây trình bày trong các nghiên cứu [17, 18] với các tỷ lệ nhíp chịu cắt/chiều cao làm việc khác nhau. Với hai mẫu dầm có lỗ mở, vết nứt phát triển từ vị trí gối tựa và điểm đặt tải đến các điểm ở góc lỗ mở theo quỹ đạo song song. Đây là dạng nứt điển hình trong trường hợp các lỗ mở trên dầm là lỗ mở lớn và phù hợp với kết quả nghiên cứu của một số tác giả [2, 5, 6].

#### 4.2. Quan hệ tải trọng – chuyển vị của các mẫu dầm

Trên Hình 9 trình bày biểu đồ quan hệ tải trọng và chuyển vị ở giữa nhíp của các mẫu dầm thí nghiệm. Từ kết quả trên biểu đồ cho thấy, dầm B-0 bị phá hoại ở tải trọng 190 kN, dầm B-1.1 và B-2.1 lần lượt bị phá hoại ở tải trọng 127 kN và 93 kN. Như vậy mức độ suy giảm khả năng chịu cắt của dầm có lỗ mở chữ nhật và lỗ mở tròn so với dầm đối chứng lần lượt là 33% và 51%. Kết quả này cho thấy rõ ảnh hưởng đáng kể của lỗ mở đến sự suy giảm khả năng chịu cắt của dầm.



Hình 9. Quan hệ tải trọng - chuyển vị của 03 mẫu dầm thí nghiệm

Với dầm có lỗ mở chữ nhật, do chiều cao lỗ mở 80 mm nhỏ hơn 110 mm của dầm có lỗ mở tròn nên khả năng chịu lực cao hơn 27% so với dầm có lỗ mở tròn (hai lỗ mở có cùng diện tích). Kết quả này cho thấy rõ ảnh hưởng của chiều cao lỗ mở đến sự suy giảm khả năng chịu cắt.

Cả ba mẫu dầm đều bắt đầu xuất hiện vết nứt xiên do lực cắt gây ra ở tải trọng khoảng 45 kN. Sau khi xuất hiện vết nứt, độ cứng của các mẫu dầm có lỗ mở suy giảm nhanh hơn đáng kể so với dầm không có lỗ mở. Đây cũng là điều cần lưu ý khi tạo các lỗ mở trên dầm.

#### 4.3. Công thức đơn giản tính toán khả năng chịu cắt của dầm có lỗ mở theo mô hình giàn ảo

Kết quả tính toán cho thấy, khả năng chịu cắt của dầm phụ thuộc vào kích thước của thanh chống chịu nén. Dựa trên cơ sở xác định bề rộng của thanh chống chịu nén theo mô hình giàn ảo, công thức xác định bề rộng thanh nén, ký hiệu  $w_{sb}^o$  và  $w_{st}^o$ , khi có lỗ mở có chiều cao  $d_0$  được đề xuất như sau:

$$w_{sb}^o = \left(1 - \frac{d_0}{d}\right) w_{sb} = \left(1 - \frac{d_0}{d}\right) (L_s \sin \theta + w_t \cos \theta) \quad (11)$$

$$w_{st}^o = \left(1 - \frac{d_0}{d}\right) w_{st} = \left(1 - \frac{d_0}{d}\right) (L_b \sin \theta + w_s \cos \theta) \quad (12)$$

Trên Bảng 3 trình bày kết quả tính toán khả năng chịu cắt của dầm có lỗ mở dựa trên cơ sở công thức đề xuất (11) và (12). So sánh với kết quả thực nghiệm cho thấy tính toán khả năng chịu cắt của dầm BTCT có/không có lỗ mở cho kết quả phù hợp với sai số nhỏ.

Bảng 3. So sánh kết quả tính toán khả năng chịu cắt của các mẫu dầm theo mô hình giàn ảo và theo thực nghiệm

| Tên dầm | Chiều cao lỗ mở $d_0$ (mm) | Bề rộng thanh chịu nén |               | Khả năng chịu cắt theo tính toán (kN) | Khả năng chịu cắt theo thực nghiệm (kN) | Chênh lệch (%) |
|---------|----------------------------|------------------------|---------------|---------------------------------------|---|----------------|
|         |                            | $w_{sb}$ (mm)          | $w_{st}$ (mm) |                                       |   |                |
| B-0     | 0                          | 103                    | 56            | 92,2                                  | 95                                      | 3,9%           |
| B-1.1   | 80                         | 66                     | 36            | 59,2                                  | 63,5                                    | 7,3%           |
| B-2.1   | 110                        | 52                     | 28            | 46,0                                  | 46,5                                    | 1,1%           |

## 5. Kết luận

Nội dung bài báo trình bày nghiên cứu sự làm việc của dầm BTCT có lỗ mở trong nhịp chịu cắt, với trường hợp  $a/d = 1,48 < 2$ . Dựa trên những kết quả thu được, có thể rút ra những nhận xét sau:

- Lỗ mở trong nhịp chịu cắt làm suy giảm đáng kể khả năng chịu cắt và độ cứng của dầm. Với cùng diện tích lỗ mở, lỗ mở hình tròn có chiều cao lỗ mở lớn hơn chiều cao lỗ mở hình chữ nhật thì sự suy giảm khả năng chịu cắt của dầm có lỗ mở hình tròn lớn hơn so với dầm có lỗ mở hình chữ nhật.

- Cơ chế phá hoại của dầm có lỗ mở lớn trong nhịp chịu cắt là phá hoại kiểu khung. Căn cứ dạng phá hoại này, cần lưu ý bố trí thêm cốt dọc và cốt đai ở nhánh phía trên và phía dưới lỗ mở.

- Đề xuất công thức đơn giản xác định khả năng chịu cắt của dầm BTCT có lỗ mở trong nhịp chịu cắt dựa trên mô hình giàn ảo. Công thức đề xuất có xét đến ảnh hưởng của tỷ số chiều cao lỗ mở/chiều cao làm việc của dầm cho kết quả phù hợp với thực nghiệm.

Những kết quả thu được từ nghiên cứu này là cơ sở cho việc lựa chọn giải pháp lỗ mở trên dầm BTCT trong thực tế xây dựng. Những nghiên cứu tiếp theo liên quan đến các giải pháp gia cường lỗ mở trên dầm, nhất là trường hợp lỗ mở sau, như gia cường bằng tấm sợi composite, gia cường bằng cách tăng chiều cao tiết diện dầm sẽ được trình bày trong các bài báo tiếp theo.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Hiếu, N. T. (2022). *Hư hỏng, sửa chữa, gia cường kết cấu công trình - Phần kết cấu bê tông cốt thép và kết cấu gạch đá*. Nhà Xuất bản Xây dựng.
- [2] Mansur, M. A., Tan, K.-H. (1999). *Concrete beams with openings: analysis and design*, volume 20. CRC Press.
- [3] Mansur, M. A. (2006). Design of reinforced concrete beams with web openings. *Proceedings of the 6th Asia-Pacific structural engineering and construction conference (ASPEC 2006)*, Kuala Lumpur, Malaysia, Citeseer, 5–6.
- [4] Ashour, A. F., Rishi, G. (2000). [Tests of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams with Web Openings](#). *ACI Structural Journal*, 97(3):418–426.
- [5] Tan, K. H., Tang, C. Y., Tong, K. (2004). [Shear strength predictions of pierced deep beams with inclined web reinforcement](#). *Magazine of Concrete Research*, 56(8):443–452.
- [6] Yang, K.-H., Eun, H.-C., Chung, H.-S. (2006). [The influence of web openings on the structural behavior of reinforced high-strength concrete deep beams](#). *Engineering Structures*, 28(13):1825–1834.
- [7] Somes, N. F., Corley, W. G. (1974). Circular openings in web of continuous beams. Shear in Reinforced Concrete. *Special Publication SP-42, American Concrete Institute*, 359–398.
- [8] Amiri, J. V., Alibygie, M. H. (2004). Effect of small circular opening on the shear and flexural behavior and ultimate strength of reinforced concrete beams using normal and high strength concrete. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada*, 18.
- [9] Wei, W. (1998). *Concrete beams with small openings under bending and shear*. MEng. Thesis, National Univeristy of Singapore.
- [10] Hu, O. E., Tan, K. H., Liu, X. H. (2007). [Behaviour and strut-and-tie predictions of high-strength concrete deep beams with trapezoidal web openings](#). *Magazine of Concrete Research*, 59(7):529–541.



- [11] Mau, S. T., Hsu, T. (1987). [Shear Strength Prediction for Deep Beams With Web Reinforcement](#). *ACI Structural Journal*, 84(6):513–523.
- [12] Campione, G., Minafò, G. (2011). [Experimental Investigation on Compressive Behavior of Bottle-Shaped Struts](#). *ACI Structural Journal*, 108(3).
- [13] Hwang, S. J., Lu, W. Y., Lee, H. J. (2000). [Shear Strength Prediction for Reinforced Concrete Corbels](#). *ACI Structural Journal*, 97(4):543–552.
- [14] Tjhin, T. N., Kuchma, D. A. (2007). [Integrated analysis and design tool for the strut-and-tie method](#). *Engineering Structures*, 29(11):3042–3052.
- [15] Russo, G., Venir, R., Pauletta, M. (2005). [Reinforced Concrete Deep Beams- Shear Strength Model and Design Formula](#). *ACI Structural Journal*, 102(3):429–437.
- [16] ACI Committee 318-19 (2019). *Building code requirements for structural concrete*. American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- [17] Hùng, N. M., Lành, L. P., Hiếu, N. T. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường vai cột bằng tấm sợi composite gốc các bon CFRP](#). *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15(5V):146–156.
- [18] Hùng, H. M., Hiếu, N. T. (2021). [Hiệu quả gia cường kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi các bon](#). *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15(1V):102–111.