

Nghiên cứu ứng xử chịu chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt thép có lỗ mở

Nguyễn Quang Sĩ^{1*}, Nguyễn Hoàng Quân², Nguyễn Xuân Huy², Lê Đăng Dũng²

¹ Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông Vận tải

² Khoa Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải

TỪ KHOA

Mô phỏng số
Sàn phẳng
Chọc thủng
Lỗ mở

TÓM TẮT

Sàn phẳng bê tông cốt thép (BTCT) được áp dụng nhiều trong các công trình dân dụng hiện đại do có thể linh hoạt trong bố trí kiến trúc, thi công nhanh và hiệu quả kinh tế. Tuy nhiên, loại sàn này có thể bị phá hoại đột ngột, đặc biệt là khi có sự xuất hiện của lỗ mở gần vị trí cột/ vách. Nghiên cứu này đánh giá khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng BTCT có lỗ mở theo các tiêu chuẩn ACI 318 – 19, Eurocode 2, BS 8110 – 1997, đồng thời so sánh với kết quả thực nghiệm đã được công bố. Sau đó, mô hình phần tử hữu hạn dùng phần mềm Cast3M được xây dựng để mô phỏng ứng xử chọc thủng của loại sàn này. Mô hình cho thấy sự tương đồng với kết quả thực nghiệm về các phương diện đường cong lực – chuyển vị, lực – biến dạng và dạng phá hoại mẫu. Kết quả chỉ ra rằng, lỗ mở gần cột làm giảm đáng kể khả năng chọc thủng của sàn, khi dịch chuyển vị trí lỗ mở ra xa cột thì sức kháng chọc thủng có thể tăng lên 15%. Ngoài ra, sàn có lỗ mở hình tròn có khả năng chịu chọc thủng lớn hơn khoảng 10% so với sàn có lỗ mở hình vuông và chữ nhật khi diện tích các lỗ mở là tương đương.

KEYWORDS

Numerical
Flat slabs
Punching shear
Opening

ABSTRACT

Reinforced concrete (RC) flat slabs are widely used in modern civil buildings due to their flexibility in architectural layout, rapid construction, and cost efficiency. However, these slabs are susceptible to sudden brittle failure, particularly when openings are located near columns or walls. This study evaluates the punching shear capacity of RC flat slabs with openings in accordance with ACI 318 – 19, Eurocode 2, and BS 8110 – 1997 and compares the calculated results with previously published experimental data. Subsequently, a finite element (FE) model was developed in Cast3M to simulate the punching shear behavior of the slabs. The model exhibited good agreement with experimental observations in terms of load–deflection curves, load–strain relationships, and failure patterns. The results indicate that openings adjacent to the column significantly reduce the slab's punching shear strength, while moving the openings farther away can increase the capacity by up to 15%. Moreover, slabs with circular openings demonstrated approximately 10% higher punching capacity compared to those with square or rectangular openings of equivalent area.

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, sàn phẳng BTCT là giải pháp kết cấu được sử dụng rộng rãi để thay thế cho sàn BTCT truyền thống vì chúng có nhiều ưu điểm vượt trội như tăng chiều cao thông thủy của tầng, giảm chiều cao và tăng diện tích sử dụng của công trình. Hơn nữa, do quá trình lắp đặt ván khuôn và cốt thép đơn giản nên rút ngắn thời gian thi công, từ đó góp phần giảm chi phí xây dựng công trình.

Tuy nhiên, thực tế trong quá trình thi công và sử dụng, việc tạo các lỗ mở trên sàn thường khó tránh khỏi để bố trí hệ thống kỹ thuật như thông gió, chiếu sáng, điều hòa không khí, cấp thoát nước, điện, phòng cháy chữa cháy... Các lỗ mở kỹ thuật này thường tập trung gần cột (và/ hoặc vách) để tối ưu hóa không gian sử dụng (Hình 1). Trong một số trường hợp, các lỗ mở kích thước lớn được tạo ra trên sàn nhằm đáp ứng các yêu cầu về mặt kiến trúc như các lỗ mở để lấy sáng, thông tầng hoặc bố trí thang thoát hiểm (Hình 2). Thậm chí, nhiều lỗ mở còn

được bổ sung sau khi công trình đã hoàn thành để cải tạo hoặc nâng cấp hệ thống kỹ thuật.

Sự xuất hiện của lỗ mở trên sàn làm giảm đáng kể khả năng chịu lực cắt, đặc biệt là ở vùng liên kết giữa sàn và cột – nơi tập trung ứng suất lớn. Lỗ mở làm gián đoạn tính liên tục của cả bê tông và cốt thép, do đó, độ cứng tổng thể và khả năng chịu chọc thủng của sàn giảm mạnh, tăng nguy cơ phá hoại giòn trên sàn. Đây là phá hoại đột ngột với các vết nứt dạng hình nón hoặc hình chóp phát triển ở vùng đầu cột, có thể dẫn đến phá hủy toàn bộ của công trình (Hình 3).

Nhiều nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng xử chọc thủng của sàn phẳng BTCT đã được tiến hành. Các nghiên cứu này tập trung vào việc phân tích ảnh hưởng của các thông số như kích thước, vị trí, số lượng, hình dạng của các lỗ mở đến khả năng chịu chọc thủng của sàn. Nghiên cứu của El-Shafiey và cộng sự [3] chỉ ra rằng, lỗ mở gần cột có thể làm giảm 51 % lực chọc thủng so với sàn không có lỗ mở. Khi tăng khoảng cách lỗ mở đến cột từ 0 mm lên 300 mm thì lực chọc thủng có

*Liên hệ tác giả: sinq_ph@utc.edu.vn

Nhận ngày 23/10/2025, sửa xong ngày 28/10/2025, chấp nhận đăng ngày 29/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2025.1158>

thể tăng lên 36 %. Ngoài ra, khả năng chọc thủng của sàn có lỗ mở hình tròn cao hơn 18,88 % so với sàn có lỗ mở hình vuông có diện tích tương đương. Augustin và cộng sự [4] đã nghiên cứu các sàn phẳng BTCT có lỗ mở hình chữ nhật trong các mẫu sàn hình bát giác. Kết quả cho thấy độ cứng của sàn giảm 68% khi lỗ mở cách cột một khoảng d , và 73 % khi lỗ mở được đặt ở khoảng cách $2d$ (d là chiều cao có hiệu của sàn). Tương tự, Susanto Teng và cộng sự [5] đã nghiên cứu ứng xử chọc thủng của các sàn phẳng BTCT có cột hình chữ nhật và lỗ mở hình chữ nhật. Nghiên cứu chỉ ra rằng các lỗ mở gần cột làm giảm đáng kể khả năng chịu chọc thủng và các lỗ mở được đặt dọc theo cạnh dài của cột mang lại hiệu quả cao hơn.

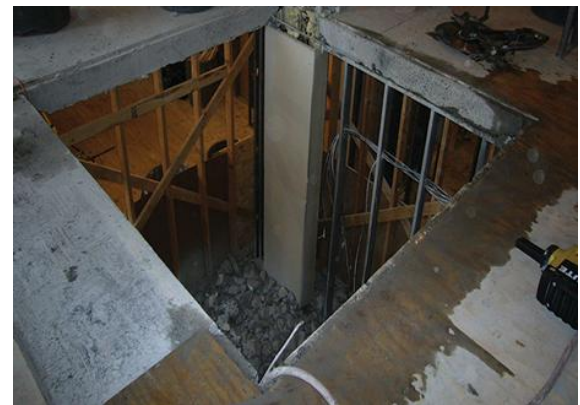
Ngoài các nghiên cứu về thực nghiệm, một số nghiên cứu về mô phỏng số bằng phần mềm phần tử hữu hạn (PTHH) như Ansys hoặc Abaqus cũng được tiến hành [6-8]. Các nghiên cứu mô phỏng chỉ ra sự tương đồng cao với kết quả thực nghiệm về các phương diện như đường cong lực – chuyển vị, dạng phá hoại mẫu. Các mô hình sau khi kiểm chứng với kết quả thực nghiệm có thể được sử dụng để khảo sát tham số, giúp tiết kiệm đáng kể thời gian và chi phí vì không cần phải thực hiện trên các mẫu thực nghiệm. Điều này cho thấy tính hiệu quả và độ tin cậy của phương pháp PTHH trong việc nghiên cứu kết cấu này.

Như đã trình bày trước đó, sự phá hoại của sàn phẳng BTCT có lỗ mở là phá hoại giòn. Do đó, kết cấu này cần phải có sự tính toán, đánh giá và kiểm soát chặt chẽ, đặc biệt là ở vị trí liên kết giữa cột và sàn. Các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông cốt thép như ACI 318 – 19 [9] của Mỹ, Eurocode 2 [10] của Châu Âu, BS8110 – 1997 [11] của Anh, và TCVN 5574:2018 [12] tại Việt Nam cũng đã đưa ra các hướng dẫn về tính toán lực chọc thủng của sàn phẳng BTCT có lỗ mở. Tổng thể, các tiêu chuẩn đều thừa nhận rằng sự hiện diện của lỗ mở sẽ làm giảm diện tích chịu tải tại đầu cột, dẫn đến giảm khả năng chịu chọc

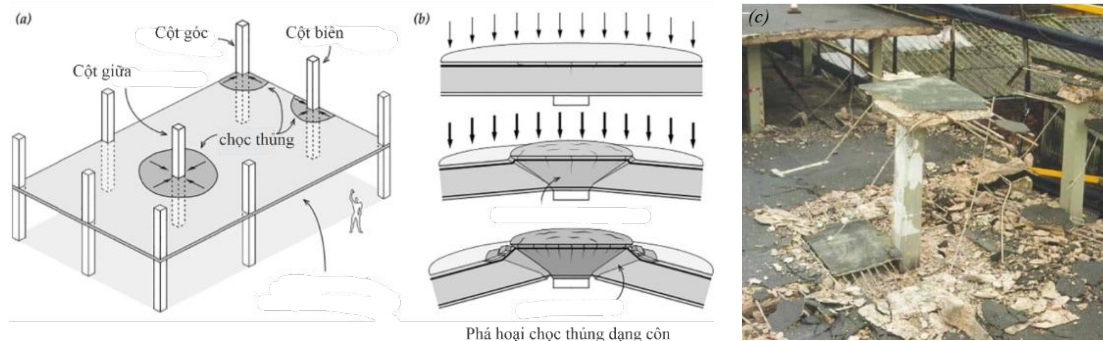
thủng. Tuy nhiên, các yếu tố như tương tác giữa các lỗ mở, hình dạng và số lượng lỗ mở vẫn chưa được xem xét trong các tiêu chuẩn này.



Hình 1. Lỗ mở kỹ thuật tại khu vực gần cột.



Hình 2. Lỗ mở lớn trong sàn.



Hình 3. Dạng phá hoại chọc thủng trong sàn: (a) dạng phá hoại điển hình, (b) các giai đoạn phá hoại sàn ở cột giữa [1], (c) Phá hoại ở công trình Piper's Row Car Park, Wolverhampton, UK, 1997 [2].

Ha và cộng sự [13] đã thực hiện nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt thép có lỗ mở, nghiên cứu so sánh khả năng chịu lực chọc thủng của các mẫu sàn theo thí nghiệm với kết quả dự đoán theo các tiêu chuẩn ACI 318-11 [14], CEB-FIP Model Code 1990 [15] và fib Model Code 2010 [16]. Kế thừa cơ sở dữ liệu thực nghiệm đó, nghiên cứu này tiến hành tính toán sức kháng

chọc thủng của sàn theo tiêu chuẩn ACI 318-19 (phiên bản cập nhật của ACI 318-11), đồng thời mở rộng phạm vi bằng cách bổ sung thêm hai tiêu chuẩn Eurocode 2 và BS 8110 – 1997 nhằm đưa ra sự so sánh toàn diện hơn giữa các tiêu chuẩn hiện hành. Bên cạnh đó, mô hình phần tử hữu hạn bằng phần mềm Cast3M cũng được xây dựng để mô phỏng ứng xử chọc thủng của sàn phẳng có lỗ mở, sau đó, nghiên cứu tham

số được tiến hành để xem xét ảnh hưởng của vị trí và hình dạng lỗ mở đến khả năng chịu chọc thủng. Cách tiếp cận kết hợp giữa phân tích theo tiêu chuẩn và mô phỏng số này giúp hiểu rõ hơn cơ chế chịu lực chọc thủng, đồng thời hỗ trợ công tác thiết kế và tối ưu hóa cấu tạo của sàn phẳng bê tông cốt thép có lỗ mở.

2. Tính toán lực chọc thủng của sàn phẳng BTCT có lỗ mở

Trong phần này, sức kháng chọc thủng của sàn BTCT có lỗ mở được tính toán theo các tiêu chuẩn ACI 318-19 [9], Eurocode 2 [10] và BS 8110-1997 [11]. Các kết quả này được so sánh với kết quả thực nghiệm được tiến hành bởi Ha và cộng sự [13] để đánh giá độ chính xác và khả năng áp dụng của từng tiêu chuẩn thiết kế.

2.1. Tóm tắt nghiên cứu thực nghiệm thực hiện bởi Ha và cộng sự

Ha và cộng sự [13] đã tiến hành thí nghiệm để xác định ứng xử chọc thủng của sàn phẳng BTCT có lỗ mở. Tám mẫu thí nghiệm đều là mẫu sàn hình vuông, kích thước 2200x2200 mm, chiều dày sàn là 200 mm (chiều cao có hiệu của sàn là 180 mm). Cột kích thước 300x300 mm được đặt ở chính giữa của sàn. Sự khác biệt giữa các mẫu sàn là số lượng và cách bố trí lỗ mở trong sàn (minh họa trong Hình 4). Các lỗ mở trong sàn đều có đường kính 150 mm, đây là kích thước lỗ mở tối đa để lắp đặt hệ thống ống nước và dẫn điện theo quy định của Hàn Quốc. Chi tiết vị trí các lỗ mở sàn được tóm tắt trong Bảng 1.

Bê tông sử dụng trong mẫu thí nghiệm có cường độ chịu nén trung bình là 27 MPa. Cốt thép lớp trên của sàn sử dụng thép đường kính 10 mm với khoảng cách các thanh thép là 150 mm. Cốt thép dọc lớp dưới của sàn sử dụng kết hợp các thanh có đường kính 16 mm và 19 mm, khoảng cách giữa các thanh thép cũng là 150 mm (hàm lượng cốt thép bằng 1,16 %). Cốt thép cột sử dụng 4 thanh đường kính 19 mm, cốt thép đai trong cột sử dụng đường kính 10 mm với khoảng cách là 80 mm.

Các thiết bị đo chuyển vị LVDTs cũng được sử dụng để đo độ võng ở vị trí chính giữa của sàn. Ngoài ra, thiết bị cảm biến điện trở (Strain Gauges – SG) được gắn vào cốt thép dọc lớp dưới của sàn để đo biến dạng của thép chịu lực của sàn trong quá trình gia tải. Hình 5 thể hiện việc bố trí thép trong các mẫu sàn thí nghiệm và vị trí của cảm biến để đo biến dạng trong cốt thép sàn.

Phần tiếp theo của bài báo trình bày các công thức tính toán để xác định lực chọc thủng lớn nhất của sàn phẳng BTCT có lỗ mở theo các tiêu chuẩn thiết kế khác nhau và so sánh các kết quả dự đoán theo các tiêu chuẩn với kết quả thực nghiệm được tiến hành bởi Ha và cộng sự [13].

2.2. Tiêu chuẩn tính toán

Lực chọc thủng tới hạn của sàn phẳng BTCT có lỗ mở (không có cốt thép ngang) theo tiêu chuẩn ACI 318 – 19 [9] được xác định là giá trị nhỏ nhất trong các biểu thức sau:

$$V_{c,1} = 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \lambda \lambda_s \sqrt{f'_c} d b_0 \quad (1)$$

$$V_{c,2} = 0,083 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_0}\right) \lambda \sqrt{f'_c} d b_0 \quad (2)$$

$$V_{c,3} = 0,33 \lambda \lambda_s \sqrt{f'_c} d b_0 \quad (3)$$

Trong đó:

$V_{c,1}, V_{c,2}, V_{c,3}$ là giá trị sức kháng chọc thủng danh định (kN), được tính toán theo ba công thức (1), (2) và (3).

β – tỷ số giữa cạnh dài và cạnh ngắn của cột hoặc vùng chịu tải trọng.

d – chiều cao có hiệu của sàn.

λ – hệ số xét đến ảnh hưởng của trọng lượng thể tích của bê tông đến sức kháng cắt. $\lambda = 1,0$ đối với bê tông thường, đối với bê tông nhẹ, λ được lấy theo điều 19.2.4 trong tiêu chuẩn ACI 318 – 19 nhưng không vượt quá 0,85.

λ_s – hệ số điều chỉnh sức kháng chọc thủng, được xác định theo công thức:

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004d}} \leq 1,0 \quad (4)$$

f'_c – cường độ chịu nén của bê tông.

b_0 – chu vi chịu lực của sàn tại khu vực đầu cột, được xác định từ mép cột ra một khoảng $d/2$.

α_s – hệ số, có giá trị bằng 40 đối với cột giữa, 30 đối với cột biên và 20 đối với cột góc.

Khả năng chịu chọc thủng của sàn phẳng BTCT không có cốt thép chịu cắt theo tiêu chuẩn Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) [10], được xác định theo công thức:

$$V_c = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} d b_0 \quad (5)$$

Trong đó:

f_{ck} – cường độ chịu nén đặc trưng của mẫu hình trụ (MPa).

d – chiều cao có hiệu của sàn.

k – hệ số, xác định theo công thức:

$$k = 1 + \left(\frac{200}{d}\right)^{1/2} \leq 2 \quad (6)$$

$C_{Rd,c}$ – hệ số cường độ chịu cắt của bê tông, được xác định theo công thức:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (7)$$

γ_c – hệ số an toàn cục bộ của bê tông, ở trạng thái giới hạn sử dụng được quy định trong phụ lục Quốc gia. Giá trị kiến nghị trong trường hợp không có trong quy định Quốc gia là bằng 1,0.

Tỷ lệ cốt thép dọc chịu kéo được xác định theo công thức:

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0,02 \quad (8)$$

b_0 – chu vi chịu lực của sàn tại khu vực đầu cột, được xác định bằng khoảng cách từ mép cột ra một đoạn $2d$, sao cho chiều dài của đường chu vi này là nhỏ nhất.

Theo tiêu chuẩn BS 8110 - 1997 [11], lực chọc thủng cực hạn của sàn phẳng BTCT không có cốt thép chịu cắt được xác định theo công thức:

$$V_c = \frac{0,79}{\gamma_m} \left(\frac{100 A_s}{b d}\right)^{1/3} \left(\frac{400}{d}\right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25}\right)^{1/3} d b_0 \quad (9)$$

Trong đó:

$\frac{A_s}{b d}$ là hàm lượng cốt thép chịu uốn, giá trị của hàm lượng này không lớn hơn 3.

$\frac{400}{d}$ là hệ số kể đến vị trí của cột, (giá trị không vượt quá 1.0).

f_{cu} là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông, giá trị không lớn hơn 40 MPa.

γ_m là hệ số, giá trị $\gamma_m = 1,25$.

b_0 – chu vi có hiệu để tính toán lực chọc thủng xung quanh cột, được xác định bằng khoảng cách từ cột ra một khoảng $1,5d$.

Kết quả tính toán lực chọc thủng của mẫu sàn theo các tiêu chuẩn được tóm tắt trong Bảng 2. Kết quả cho thấy, lực chọc thủng tính toán theo các tiêu chuẩn có giá trị tương đối gần với kết quả thực nghiệm với giá trị trung bình là 0,9988; 1,005 và 1,16 tương ứng với $\frac{P_{test}}{P_{ACI}}$, $\frac{P_{test}}{P_{EC2}}$ và $\frac{P_{test}}{P_{BS}}$. Các giá trị này cho thấy các tiêu chuẩn kể trên có khả năng dự đoán lực chọc thủng của sàn phẳng BTCT có lỗ mở gần bằng với kết quả thực nghiệm. Ngoài ra, kết quả lực chọc thủng tính toán theo tiêu chuẩn Eurocode 2 và BS 8110 – 1997 cho kết quả thấp hơn so với giá trị thực nghiệm, điều này có nghĩa là hai tiêu chuẩn này đang thiên về hướng an toàn cho thiết kế.

3. Mô hình mô phỏng số

3.1. Xây dựng mô hình

Phần mềm PTHH Cast3M [17] được sử dụng để mô phỏng các sàn thí nghiệm. Trong nghiên cứu này, hai mẫu sàn bao gồm sàn đối chứng (CO) và sàn một lỗ mở (H1) được mô phỏng để kiểm chứng với kết quả thí nghiệm.

Các phần tử bê tông sàn và cột được miêu tả bằng phần tử lục diện 8 nút (CUB8) mỗi nút có ba bậc tự do là ba chuyển vị thẳng theo ba phương U_x , U_y và U_z . Để đảm bảo điều kiện hội tụ và thời gian chạy mô hình, kích thước phần tử được lựa chọn là 25 mm. Phần tử thanh 2 nút tuyến tính (SEG2) được sử dụng để mô tả cho các phần tử cốt thép, mỗi nút cũng có ba bậc tự do là ba chuyển vị thẳng theo ba phương U_x , U_y và U_z . Đinh bám giữa bê tông và cốt thép được giả thiết là đinh bám tuyệt đối.

Hình 6 mô tả các phần tử trong mô hình mô phỏng của sàn H1. Liên kết khớp được sử dụng để khai báo các gối tựa trong mô hình, tương ứng với điều kiện gối tựa trong thí nghiệm thực tế. Gối trái của sàn được khống chế hai bậc tự do U_y và U_z , gối phải của sàn khống chế bậc tự do U_z . Gối dưới được ràng buộc hai bậc tự do U_y và U_z trong khi gối trên cố định bậc tự do U_z .

Mô hình hư hại Mazars [18] được sử dụng để khai báo ứng xử của vật liệu bê tông sàn và cột. Mô hình này cho phép mô tả ứng xử phức tạp của vật liệu bê tông như ứng chịu nén một, hai và ba trục thông qua đại lượng hư hại có hiệu D . Đại lượng D này cho phép miêu tả sự suy giảm độ cứng của mẫu. Ở trạng thái mẫu bị nứt, đại lượng này cho phép miêu tả sự phát triển của vết nứt đồng thời tránh cho các vết nứt bị xâm nhập vào nhau (unilateral contact). Ngoài ra, các loại tải trọng khác nhau: tải trọng động, tải trọng tĩnh, tải trọng lặp cũng được mô hình mô phỏng tương đối chính xác.

Ứng xử của cốt thép được miêu tả đơn giản hóa bằng mô hình đàn dẻo lý tưởng với hai thông số về vật liệu là giới hạn chảy của thép f_y , mô đun đàn hồi của cốt thép E_s (Hình 7).

3.2. Kết quả mô phỏng

3.2.1. Đường cong lực – chuyển vị

Đồ thị biểu diễn quan hệ lực – chuyển vị tại vị trí giữa sàn (bên dưới cột) thu được từ mô hình mô phỏng (FEM) và kết quả thực nghiệm (EXP) được trình bày trong Hình 8. Kết quả cho thấy sự tương đồng giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm của cả mẫu đối chứng (CO) và một lỗ mở (H1). Đường cong cũng thể hiện được sự thay đổi độ cứng của mẫu sau khi nứt xuất hiện. Bên cạnh đó, Bảng 3 trình bày giá trị lớn nhất của lực chọc thủng sàn tại thời điểm sàn bị phá hoại, giá trị lực chọc thủng lớn nhất này không có sự khác biệt lớn so với kết quả thực nghiệm, với sai số chỉ là 2,95 %.

3.2.2. Dạng phá hoại mẫu

Dạng phá hoại mẫu của sàn mô phỏng và thực nghiệm được miêu tả trong Hình 9. Vết nứt trong mô hình mô phỏng khá tương đồng với kết quả thực nghiệm với các vết nứt phát triển từ cột về phía bốn góc sàn (vết nứt xuyên tâm – radial cracks). Ngoài ra, một số vết nứt ngang cũng xuất hiện. Hiện tượng này có thể lý giải là do sự thay đổi cơ chế truyền tải trọng của sàn từ sàn hai phương về một phương.

3.2.3. Quan hệ lực – biến dạng thép

Đường cong quan hệ lực – biến dạng trong cốt thép chịu lực của sàn thu được từ thiết bị cảm biến điện trở (SG) của mẫu sàn đối chứng CO được thể hiện trong Hình 10. Kết quả cho thấy, đường cong thu được từ thí nghiệm chia làm hai giai đoạn: (1) giai đoạn biến dạng nhỏ, tương ứng với trạng thái sàn chưa bị nứt và (2) giai đoạn biến dạng tăng nhanh đến giá trị cực đại sau khi vết nứt xuất hiện. Ngược lại, kết quả thu được từ mô hình mô phỏng cho thấy sự tăng biến dạng trong thép gần như là tuyến tính, mặc dù có thể thấy sự thay đổi nhỏ về độ dốc tại thời điểm bê tông sàn bị nứt. Điều này có thể giải thích là do giả thiết đinh bám tuyệt đối giữa bê tông và cốt thép trong mô hình mô phỏng. Tuy nhiên, kết quả thực nghiệm và mô phỏng số vẫn cho thấy sự phù hợp về biến dạng cực đại của thép sàn.

Ngoài ra, biến dạng của thép đo được tại thời điểm sàn bị phá hoại là $2,5 \times 10^{-3}$, vẫn thấp hơn một chút so với giá trị biến dạng chảy của thép ($2,51 \times 10^{-3}$), điều này càng khẳng định rằng dạng phá hoại của sàn thí nghiệm là do cắt (chọc thủng) chứ không phải phá hoại do uốn.

3.3. Khảo sát tham số

Mô hình mô phỏng ở trên cho thấy sự tương đồng với kết quả thực nghiệm về đường cong lực – chuyển vị, dạng phá hoại mẫu, đường cong lực – biến dạng. Trên cơ sở đó, khảo sát tham số bằng mô hình PTHH được tiến hành nhằm xem xét ảnh hưởng của vị trí lỗ mở, hình dạng lỗ mở đến ứng xử chọc thủng của sàn.

3.3.1. Ảnh hưởng của vị trí lỗ mở

Phần này xem xét ảnh hưởng của vị trí lỗ mở đến khả năng chọc thủng của sàn phẳng BTCT có lỗ mở. Khoảng cách của lỗ mở đến mép cột trong sàn H1 (lỗ mở cách mép cột 75mm) thay đổi về 0 mm (mẫu H1-0) và 150 mm (mẫu H1-150). Các thông số về hình học, vật liệu, hàm lượng cốt thép... được giữ nguyên. Hình 11 thể hiện đường cong lực – chuyển vị của sàn có các khoảng cách từ lỗ mở đến mép cột khác nhau. Quan sát thấy rằng, sự suy giảm độ cứng của sàn sau khi nứt là rõ rệt ở mẫu H1-0, trong khi độ cứng của mẫu H1 và H1-150 là cao hơn. Khi tăng khoảng cách lỗ mở từ mép cột từ 0mm lên 75 mm và 150 mm thì giá trị lực chọc thủng lớn nhất của sàn cũng tăng lên 13 % và 15 %, tương ứng tăng từ 509,38 kN đối với sàn H1-0 thành 545,62 kN (mẫu H1) và 574,9 kN (mẫu H1-150).

Dạng phá hoại của mẫu H1-0 và H1-150 được thể hiện trong Hình 12. Đối với mẫu H1-0, các vết nứt xuất hiện xung quanh vùng cột và lỗ mở, cho thấy ứng suất tập trung cục bộ đáng kể ở vị trí này. Bên cạnh đó, một số vết nứt xiên từ cột ra mép sàn, cho thấy đây là dạng phá hoại chọc thủng. Ở mẫu H1-150, do lỗ mở nằm xa cột nên ứng suất

phân bố đều hơn, nên mật độ vết nứt ở gần cột là ít hơn. Tuy nhiên, cơ chế phá hoại của mẫu này vẫn là phá hoại do chọc thủng.

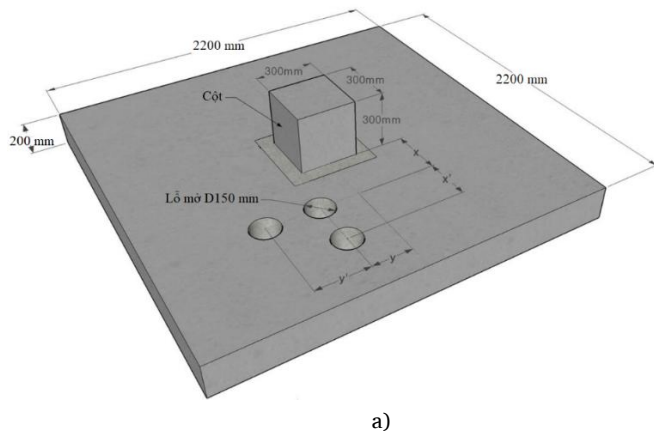
3.3.2. Ảnh hưởng của hình dạng lỗ mở

Mục tiêu của phần này là nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng lỗ mở đến ứng xử chọc thủng của sàn phẳng BTCT có lỗ mở. Lỗ mở có dạng hình vuông 130x130 mm (mẫu H1-130x130) và hình chữ nhật 100x175 mm (mẫu H1-100x175) được lựa chọn dựa trên cơ sở diện tích của 2 lỗ mở này tương đương với diện tích lỗ mở hình tròn đường kính 150 mm (mẫu H1), các thông số khác của sàn được giữ nguyên. Hình 13 thể hiện ảnh hưởng của hình dạng lỗ mở đến khả năng chọc thủng của sàn. Có thể thấy rằng, hình dạng lỗ mở ít ảnh hưởng đến độ cứng tổng thể của sàn. Tuy nhiên, việc thay đổi hình dạng lỗ mở từ hình tròn sang hình vuông và hình chữ nhật (diện tích tương đương) thì khả năng chọc thủng của sàn giảm từ 545,62 kN xuống còn 496,53 kN và 497,29 kN, tương ứng với mức giảm lần lượt là 9,88 % và 9,72 %. Dạng phá hoại mẫu sàn có lỗ mở hình vuông và chữ nhật được thể hiện trong Hình 14, cả hai mẫu đều có cơ chế phá hoại chọc thủng, với các vết nứt tập trung nhiều ở vùng cột.

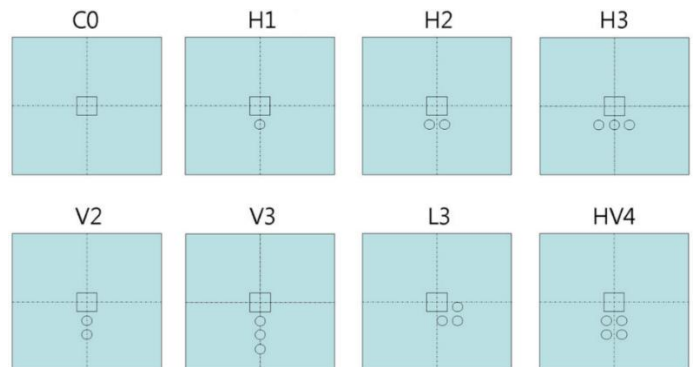
Bảng 1. Thông số của mẫu sàn thí nghiệm [13].

Sàn	x (mm)	x' (mm)	y (mm)	y' (mm)	Ghi chú
CO	-	-	-	-	Mẫu sàn đối chứng (sàn không có lỗ mở)
H1	150	-	0	-	Một lỗ mở theo phương ngang
H2	150	-	112,5	-	Hai lỗ mở theo phương ngang
H3	150	-	0	225	Ba lỗ mở theo phương ngang
V2	150	225	0	-	Hai lỗ mở theo phương đứng
V3	150	225	0	-	Ba lỗ mở theo phương đứng
L3	150	225	112,5	225	Ba lỗ mở bố trí ở 2 mặt và góc cột
HV4	150	225	112,5	-	Bốn lỗ mở bố trí theo cả hai phương dọc và ngang

Ghi chú:
 x, x', y, y' biểu thị tọa độ tâm của các lỗ mở so với mặt cột (mm)
Tất cả các lỗ mở có kích thước 150 mm.

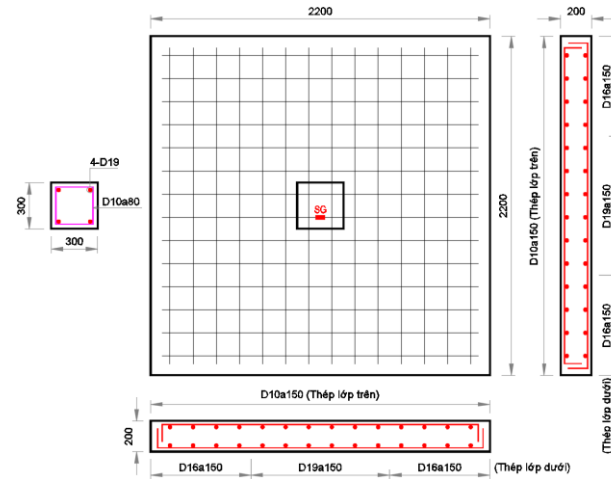


a)



b)

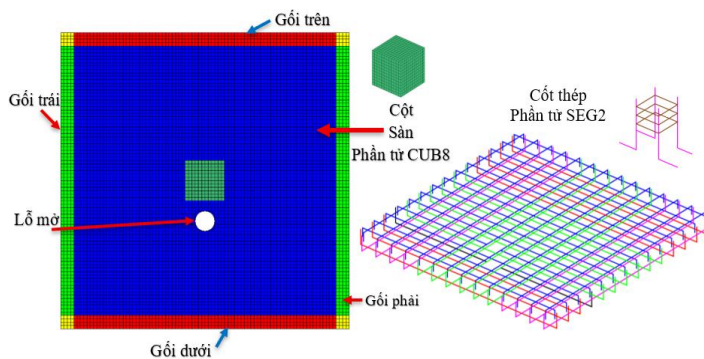
Hình 4. Cấu tạo mẫu thí nghiệm: (a) Kích thước mẫu sàn thí nghiệm (b) Vị trí lỗ mở trong các mẫu thí nghiệm [13].



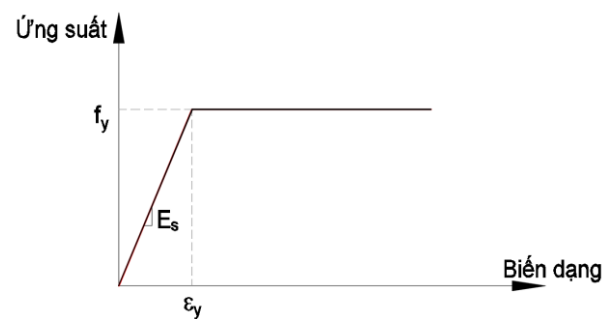
Hình 5. Bố trí thép trong các mẫu thí nghiệm [13].

Bảng 2. So sánh lực chọc thủng giữa kết quả thực nghiệm và theo các tiêu chuẩn.

Mẫu thí nghiệm	Lực chọc thủng (kN)				Tỷ lệ lực chọc thủng thực nghiệm và theo các tiêu chuẩn		
	Thực nghiệm P_{test}	ACI 318-19 P_{ACI}	Eurocode 2 P_{EC2}	BS 8110-1997 P_{BS}	$\frac{P_{test}}{P_{ACI}}$	$\frac{P_{test}}{P_{EC2}}$	$\frac{P_{test}}{P_{BS}}$
C0	590,2	598,60	558,21	503,10	0,99	1,06	1,17
H1	550,2	559,94	544,52	470,61	1,05	1,01	1,17
H2	517,3	515,98	500,27	433,47	1,00	1,03	1,19
H3	452,9	464,54	466,22	390,20	0,97	0,97	1,16
V2	556,9	559,94	544,52	470,61	0,99	1,02	1,18
V3	546,5	559,94	544,52	470,61	0,98	1,00	1,16
L3	418,2	423,38	472,35	403,08	0,99	0,89	1,04
HV4	517,9	507,87	488,01	426,89	1,02	1,06	1,21
Trung bình					0,9988	1,005	1,16
Độ lệch chuẩn					0,025	0,055	0,054



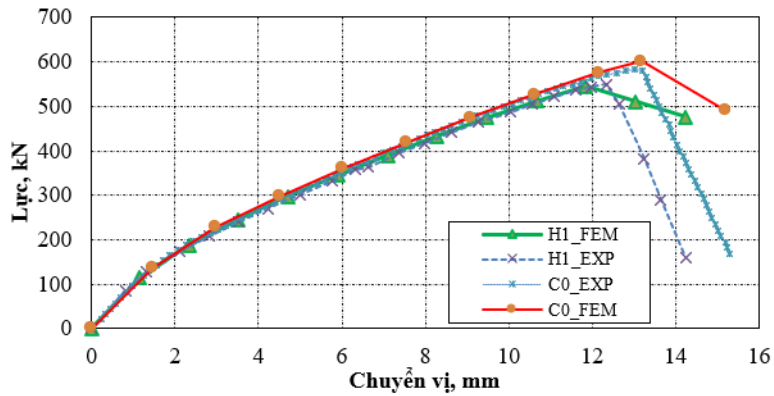
Hình 6. Các phần tử trong mô hình mô phỏng.



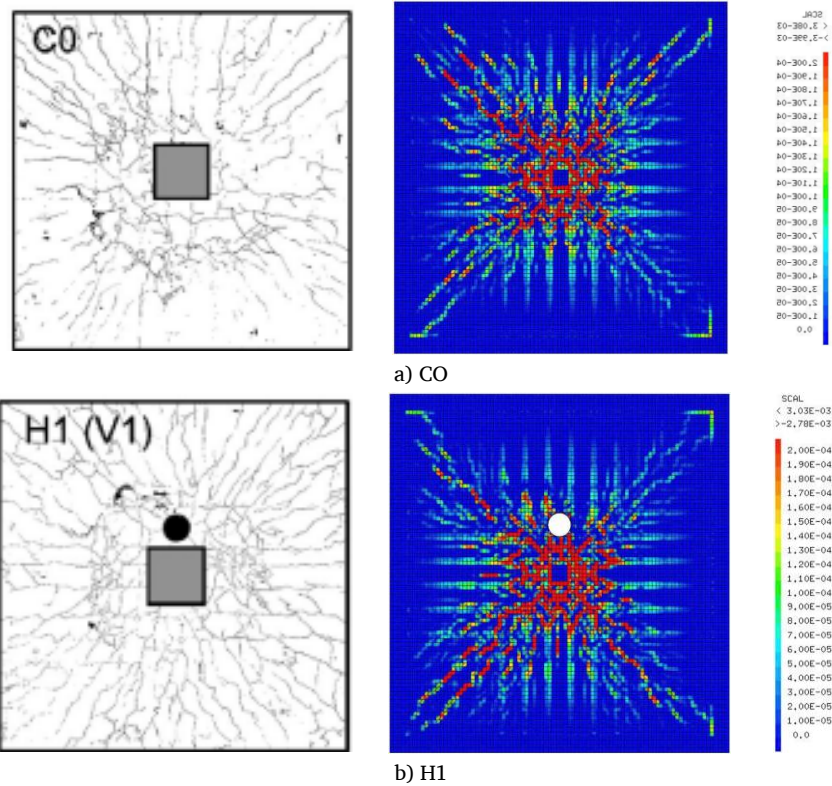
Hình 7. Ứng xử đàn dẻo lý tưởng cho cốt thép.

Bảng 3. So sánh kết quả lực chọc thủng của sàn thí nghiệm và mô phỏng.

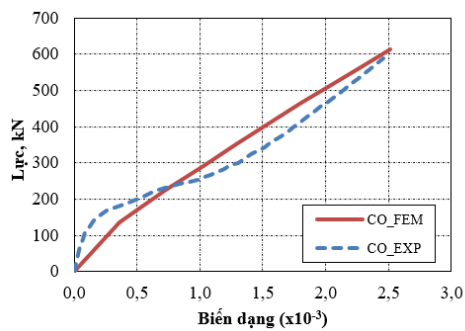
Sàn	Lực chọc thủng sàn P_u (kN)		
	Thí nghiệm (EXP)	Mô phỏng (FEM)	Sai số (%)
CO	584,02	601,26	2,95 %
H1	549,02	545,62	0,62 %



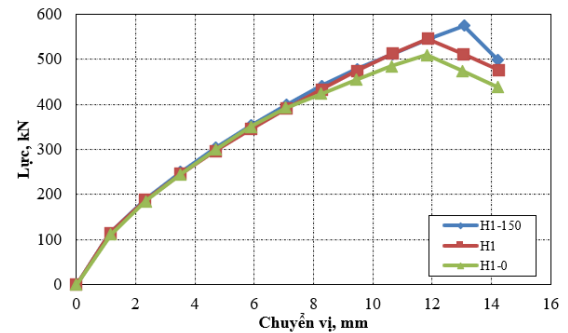
Hình 8. So sánh lực – chuyển vị của sàn mô phỏng với kết quả thực nghiệm.



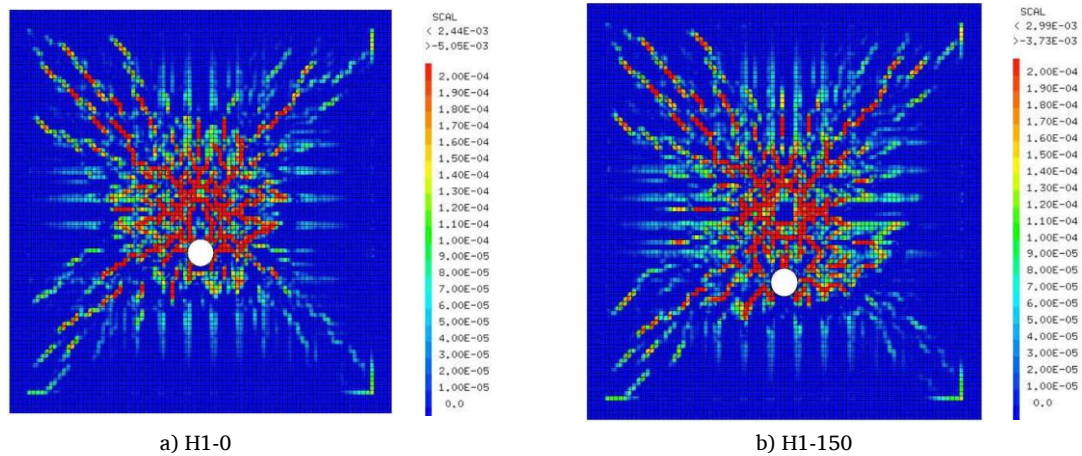
Hình 9. Dạng phá hoại mẫu của sàn thí nghiệm và mô phỏng số.



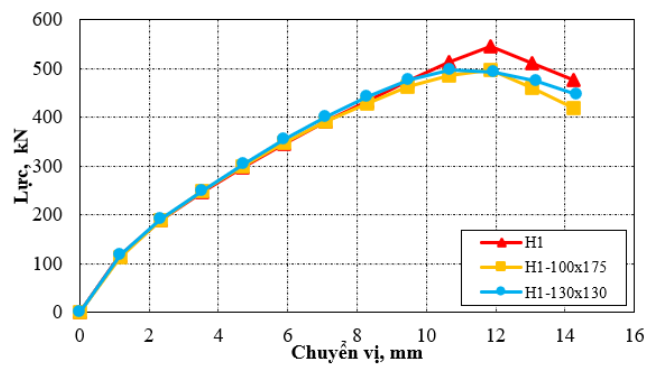
Hình 10. Quan hệ lực – biến dạng trong thép của mẫu sàn C0.



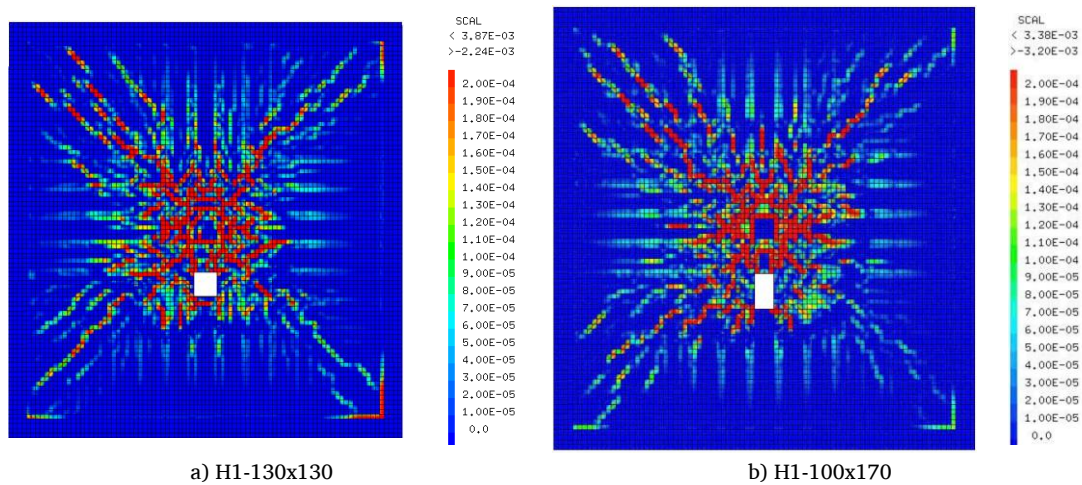
Hình 11. Đường cong lực – chuyển vị của sàn với các khoảng cách từ lỗ mở đến mép cột khác nhau.



Hình 12. Dạng phá hoại của mẫu H1-0 và H1-150.



Hình 13. Quan hệ lực – chuyển vị của sàn với các hình dạng lỗ mở khác nhau.



Hình 14. Dạng phá hoại của mẫu sàn H1-130x130 và H1-100x170.

4. Kết luận và kiến nghị

Bài báo trình bày nghiên cứu ứng xử chịu chọc thủng của sàn phẳng BTCT có lỗ mở thông qua việc tính toán theo các tiêu chuẩn, so sánh với kết quả thực nghiệm và mô phỏng bằng phần mềm PTHH Cast3M. Một số kết luận được rút ra như sau:

- Kết quả tính toán theo các tiêu chuẩn ACI 318 – 19, Eurocode 2 và BS 8110 – 1997 cho thấy sự phù hợp với kết quả thực nghiệm. Khi so sánh với kết quả thực nghiệm, tiêu chuẩn BS 8110 – 1997 cho kết quả gần nhất, thể hiện khả năng dự đoán hợp lý của tiêu chuẩn, trong khi tiêu chuẩn ACI 318 – 19 và Eurocode 2 cho giá trị nhỏ hơn, thể hiện xu hướng thiên về an toàn.

- Mô hình PTHH sử dụng mô hình hư hại Mazars trong Cast3M cho thấy sự tương đồng với kết quả thí nghiệm về đường cong lực – chuyển vị, dạng phá hoại, đường cong lực – biến dạng. Chênh lệch giá trị lực chọc thủng lớn nhất giữa mô phỏng và thực nghiệm chỉ là 2,95 %.
- Vị trí của lỗ mở ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng chịu chọc thủng của sàn. Khi lỗ mở đặt sát cột, sức kháng chọc thủng giảm đáng kể, ngược lại, khi di chuyển lỗ mở ra xa cột 150 mm, khả năng chịu lực tăng lên 15 %.
- Hình dạng lỗ mở cũng ảnh hưởng đến ứng xử chọc thủng của sàn: khi thay đổi lỗ mở hình tròn hay hình vuông hoặc chữ nhật có diện tích tương đương thì lực chọc thủng giảm khoảng 10 %.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số **T2025-PHII_CT-003**.

Tài liệu tham khảo

- [1]. F. Brantschen, "Influence of bond and anchorage conditions of the shear reinforcement on the punching strength of RC slabs," *Switzerland: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne*, 2016.
- [2]. H. M. Elsanadedy, Y. A. Al-Salloum, and S. H. Alsayed, "Prediction of punching shear strength of HSC interior slab-column connections," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 473–485, Mar. 2013, doi: 10.1007/s12205-013-1971-8.
- [3]. T. F. El-Shafiey, A. M. Atta, A. Hassan, and M. Elnasharty, "Effect of opening shape, size and location on the punching shear behaviour of RC flat slabs," *Structures*, vol. 44, pp. 1138–1151, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.08.076.
- [4]. T. Augustin, L. Fillo, and J. Halvonik, "Punching resistance of slab-column connections with openings," *Structural Concrete*, vol. 21, no. 1, pp. 278–290, Feb. 2020, doi: 10.1002/suco.201900158.
- [5]. Susano Teng, H. K. Cheong, and J. Z. Geng, "Punching Shear Strength of Slabs with Openings and Supported on Rectangular Columns," *SJ*, vol. 101, no. 5, 2004, doi: 10.14359/13390.
- [6]. V. C. Pinto, V. Branco, and D. R. Oliveira, "Punching in two-way RC flat slabs with openings and L section columns," *EC*, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print, July 2019, doi: 10.1108/EC-12-2018-0596.
- [7]. L. Kormosova, J. Halvonik, and L. Majtanová, "Safety of the Models for Assessment of Punching Resistance of Flat Slabs with Openings Adjacent to the Columns," *SSP*, vol. 309, pp. 186–192, Aug. 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.309.186.
- [8]. G. P. Balomenos, A. S. Genikomsou, and M. A. Polak, "Investigation of the effect of openings of interior reinforced concrete flat slabs," *Structural Concrete*, vol. 19, no. 6, pp. 1672–1681, Dec. 2018, doi: 10.1002/suco.201700201.
- [9]. ACI Committee 318 "ACI CODE-318-19(22): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022)." American Concrete Institute, 2019. doi: 10.14359/51716937.
- [10]. "Eurocode 2, Design of concrete structures - part 1: General rules and rules for buildings, Commission of the European Communities, 2002."
- [11]. "British Standards Institution. (1997). Structural Use of Concrete, BS8110: Part 1—Code of Practice for Design and Construction, London."
- [12]. "TCVN 5574:2018. Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam."
- [13]. T. Ha, M. Lee, J. Park, and D. Kim, "Effects of openings on the punching shear strength of RC flat-plate slabs without shear reinforcement," *Structural Design Tall Build*, vol. 24, no. 15, pp. 895–911, Oct. 2015, doi: 10.1002/tal.1217.
- [14]. R. W. Poston and American Concrete Institute, Eds., *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary: an ACI standard*, 1. print. Farmington Hills, Mich: ACI, 2011.
- [15]. "CEB-FIP Model Code 90." Comité Euro-International du Béton, Thomas Telford: London, UK 1993.
- [16]. "Model Code 2010. 1," in Bulletin / Fédération Internationale du Béton, no. 65, Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2012.
- [17]. "CAST3M." [Online]. Available: <https://www-cast3m.cea.fr/>
- [18]. J. Mazars, "A description of micro- and ~acroscale damage of concrete structures," *Eng Fract Mech* 25, pp. 729–737, 1986.