

ỨNG XỬ CHỌC THÙNG CỦA SÀN PHẪNG BÊ TÔNG CỐT THÉP BỊ ĂN MÒN: ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU DÀY SÀN, DIỆN TÍCH VÙNG ĂN MÒN VÀ HÀM LƯỢNG CỐT THÉP

Phạm Chí Thành^a, Nguyễn Ngọc Tân^b, Chu Thanh Bình^{b,*}

^aKhoa Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 24/4/2025, Sửa xong 29/6/2025, Chấp nhận đăng 07/7/2025

Tóm tắt

Bài báo này trình bày các kết quả phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) nhằm khảo sát ứng xử chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt thép (BTCT) bị ăn mòn tại liên kết sàn–cột. Các mô hình PTHH ba chiều được kiểm chứng dựa trên dữ liệu thực nghiệm, sau đó được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của ba tham số chính: (i) chiều dày sàn, (ii) diện tích vùng ăn mòn cốt thép, và (iii) hàm lượng cốt thép chịu kéo. Kết quả cho thấy chiều dày sàn có ảnh hưởng đáng kể đến sức kháng chọc thủng. Trong khi đó, diện tích vùng ăn mòn không làm thay đổi nhiều sức kháng chọc thủng nhưng ảnh hưởng rõ rệt đến độ dẻo và bề rộng vết nứt bê tông ở vùng chọc thủng. Ngoài ra, khi tăng hàm lượng cốt thép, tải trọng phá hoại tăng lên nhưng độ dẻo của sàn giảm. Các mô hình phân tích cũng cho thấy sự thay đổi dạng phá hoại từ dẻo (do cốt thép bị chảy dẻo) sang giòn (do chọc thủng) tùy theo hàm lượng của cốt thép bị ăn mòn. Nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế và đánh giá khả năng chịu lực còn lại của sàn phẳng BTCT chịu tác động của môi trường ăn mòn.

Từ khóa: ứng xử chọc thủng; bê tông cốt thép bị ăn mòn; sàn phẳng; liên kết sàn–cột; phân tích phần tử hữu hạn.

PUNCHING SHEAR BEHAVIOR OF CORRODED REINFORCED CONCRETE FLAT SLABS: EFFECTS OF SLAB THICKNESS, CORRODED AREA, AND REINFORCEMENT RATIO

Abstract

This paper presents the results of finite element analyses to investigate the punching shear behavior of corroded reinforced concrete (RC) flat slabs at slab–column connections. Three-dimensional finite element models were validated against experimental data and then used to examine the effects of three key parameters: (i) slab thickness, (ii) area of corroded reinforcement, and (iii) tensile reinforcement ratio. The results show that slab thickness significantly influences the punching shear capacity. While the area of corroded reinforcement does not greatly affect the punching strength, it has a notable impact on ductility and the width of concrete cracks in the punching region. Additionally, increasing the reinforcement ratio leads to higher maximum loads but reduces the ductility of the slab. The analysis also reveals a transition in failure mode from ductile (due to reinforcement yielding) to brittle (due to punching shear), depending on the extent of reinforcement corrosion. This study contributes to the scientific basis for designing and assessing the residual capacity of RC flat slabs exposed to corrosive environments.

Keywords: punching shear; corroded reinforced concrete; flat slab; slab–column connection; finite element analysis.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(4V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(4V)-01) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Mở đầu

Hệ kết cấu sàn phẳng BTCT xuất hiện vào đầu thế kỷ XX, được sử dụng phổ biến kể từ đó tới nay, đặc biệt trong các công trình dân dụng do bố trí mặt bằng linh hoạt, lắp đặt ván khuôn dễ dàng. Tuy nhiên, do không có đầm nên khả năng chịu lực của sàn phẳng bị chi phối bởi sức kháng chọc thủng tại liên kết sàn–cột [1]. Trong thiết kế sàn phẳng BTCT, tính toán sức kháng chọc thủng là một trong những kiểm tra quan trọng nhằm đảm bảo an toàn kết cấu. Theo tiêu chuẩn thiết kế TCVN 5574:2018 [2], sức kháng chọc thủng của bản sàn chịu lực tập trung là tổng nội lực giới hạn chịu bởi bê tông và cốt thép ngang trong vùng chọc thủng. Công thức tính toán cho thấy sức kháng chọc thủng tỷ lệ thuận

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: binhct@huce.edu.vn (Bình, C. T.)

với cường độ chịu kéo của bê tông, chu vi đường bao của vùng chọc thủng, chiều cao làm việc quy đổi của tiết diện, giới hạn chảy của cốt thép. Tuy nhiên, mô hình lý thuyết chưa xét đến ảnh hưởng của sự suy giảm vật liệu do tác động của các điều kiện môi trường như ăn mòn cốt thép. Đối với công trình BTCT chịu tác động của các tác nhân xâm thực như ion clorua, khí CO₂, hiện tượng ăn mòn cốt thép thường xảy ra và gây suy giảm đáng kể khả năng chịu lực. Quá trình ăn mòn không chỉ làm giảm tiết diện cốt thép, mà còn ảnh hưởng đến cường độ bám dính giữa cốt thép và bê tông, gây nứt bê tông và phá hoại lớp bảo vệ, từ đó làm thay đổi phân bố nội lực tại liên kết sàn-cột [3–5]. Những thay đổi này có thể khiến kết cấu sàn phẳng bị phá hoại sớm, hoặc thay đổi dạng phá hoại từ cơ chế uốn sang cơ chế chọc thủng [6–8], làm cho công thức lý thuyết trở nên kém an toàn trong một số trường hợp.

Cho đến nay, nhiều nghiên cứu đã tập trung phân tích ứng xử chọc thủng của sàn phẳng hoặc liên kết sàn-cột trong hệ kết cấu. Phần lớn nghiên cứu được thực hiện bằng phương pháp thực nghiệm nhằm kiểm tra tải trọng chọc thủng, tải trọng phá hoại và phân tích cơ chế chọc thủng tại liên kết sàn-cột [9–14]. Đồng thời, các nhà khoa học đã và đang nghiên cứu các giải pháp kỹ thuật (vật liệu, thiết kế, gia cường) để cải thiện sức kháng chọc thủng của hệ kết cấu sàn phẳng [15–19]. Tuy nhiên, các nghiên cứu chủ yếu được thực hiện trên hệ kết cấu không bị ăn mòn cốt thép, để lại một khoảng trống đáng kể về ứng xử cơ học của sàn phẳng BTCT bị ăn mòn. Điều này đặt ra sự cần thiết của chủ đề nghiên cứu này, đặc biệt quan trọng đối với kết cấu công trình chịu tác động của tác nhân xâm thực (ion clorua, khí cacbonic) gây ra ăn mòn cốt thép hoặc công trình cũ có tuổi thọ cao.

Trong thực tế, ăn mòn cốt thép là vấn đề cấp bách trong lĩnh vực xây dựng, một trong các nguyên nhân chính làm xuống cấp và hư hỏng các công trình hiện hữu [20, 21], đặt ra thách thức lớn cho độ bền vững và tuổi thọ của công trình BTCT, đặc biệt là công trình chịu tác động của môi trường biển hoặc khí hậu biển. Ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đến ứng xử cơ học của kết cấu BTCT đã nổi lên như một chủ đề quan trọng trong những thập kỷ gần đây, với nhiều nghiên cứu được thực hiện trên thế giới [22–24] và ở Việt Nam [25–30]. Dưới tác động của ăn mòn cốt thép, khả năng chịu lực của kết cấu bị suy giảm đáng kể, do sự hình thành và phát triển các vết nứt bê tông dẫn đến tiết diện chịu lực bị giảm, thậm chí bong tróc lớp bê tông bảo vệ, cường độ bám dính giữa cốt thép và bê tông bị giảm, cường độ của bê tông trong vùng ăn mòn cũng bị giảm. Ngoài ra, kết cấu có thể bị phá hoại đột ngột do ảnh hưởng của hiện tượng ăn mòn điểm, gây ra đứt cốt thép chịu kéo dưới tác dụng của tải trọng, dẫn đến sụp đổ một phần hoặc sụp đổ lũy tiến hệ kết cấu.

Trên thế giới, một số nghiên cứu thực nghiệm đã tiến hành trên các mẫu sàn BTCT bị ăn mòn nhằm đánh giá sức kháng chọc thủng. Nghiên cứu của Qian và cs. [6] đã tiến hành thí nghiệm trên 12 mẫu liên kết sàn-cột nhằm xác định ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến ứng xử chọc thủng của sàn phẳng. Nghiên cứu này chỉ ra rằng sức kháng chọc thủng giảm khoảng 21,5% đến 31,4% khi mức độ ăn mòn trung bình trong khoảng từ 15,8% đến 23,0% theo mất mát khối lượng. Vùng chọc thủng trên sàn bị ăn mòn cốt thép rộng hơn so với sàn đối chứng (không bị ăn mòn cốt thép). Trước đó, Aoude và cs. [31] đã tiến hành một nghiên cứu thực nghiệm trên 6 mẫu sàn phẳng hai phương bị hư hỏng cục bộ do ăn mòn hoặc bê tông bị tách lớp, chỉ ra rằng sức kháng chọc thủng bị giảm và vết nứt bê tông mở rộng hơn. Gần đây, Gomaa và cs. [32] cũng đã nghiên cứu sức kháng chọc thủng của liên kết sàn-cột bằng thí nghiệm gia tốc ăn mòn điện hóa. Các kết quả thu được cũng khẳng định sự suy giảm đáng kể sức kháng chọc thủng của các mẫu thử bị ăn mòn cốt thép. Hệ sàn phẳng có thể bị hư hỏng nhanh hơn, thậm chí xảy ra chọc thủng sớm hơn dưới tác động của ăn mòn cốt thép tại liên kết sàn-cột.

Các kết quả thực nghiệm cung cấp số liệu trực tiếp, tin cậy về sức kháng chọc thủng của sàn phẳng bị ăn mòn cốt thép, được sử dụng để so sánh và kiểm tra kết quả tính toán bởi mô hình lý thuyết và mô hình số. Tuy nhiên, các phát hiện từ thực nghiệm chỉ đại diện cho một số lượng mẫu thí nghiệm nhất

định, trong khi đòi hỏi nhiều nguồn lực về thiết bị thí nghiệm, thời gian và tài chính. Đó là lý do vì sao phương pháp số ngày càng được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu vật liệu và kết cấu xây dựng. Mô hình số được xây dựng bằng phương pháp PTHH dựa trên các mô hình vật liệu có sẵn hoặc được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây, cho phép khảo sát một hay nhiều tham số ảnh hưởng hoặc các điều kiện biên khác nhau của mô hình vật lý. Gần đây, Pham và cs. [7] đã xây dựng và phát triển các mô hình PTHH ba chiều nhằm khảo sát ảnh hưởng các tham số, như mức độ ăn mòn cốt thép, cường độ chịu nén của bê tông và tiết diện cột, đến sức kháng chọc thủng của sàn phẳng BTCT bị ăn mòn tại liên kết sàn–cột. Nghiên cứu này tái khẳng định ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến sức kháng chọc thủng của sàn phẳng, trong đó chỉ ra sức kháng chọc thủng được cải thiện khi tăng tiết diện cột.

Bài báo này giới thiệu các kết quả phân tích của 9 mô hình PTHH được phát triển tiếp từ nghiên cứu của Pham và cs. [7], nhằm tiếp tục khảo sát ba tham số chính ảnh hưởng đến sức kháng chọc thủng của sàn phẳng BTCT bị ăn mòn, bao gồm: (i) chiều dày sàn; (ii) diện tích vùng ăn mòn; (iii) hàm lượng cốt thép chịu kéo. Nghiên cứu cung cấp các kết quả đầy đủ hơn về khả năng chịu lực và ứng xử chọc thủng của sàn phẳng BTCT với cốt thép chịu kéo bị ăn mòn khoảng 20% xung quanh liên kết sàn–cột.

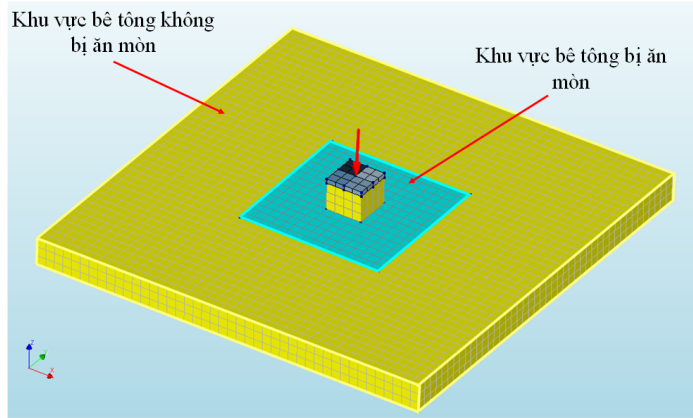
2. Mô phỏng sàn phẳng BTCT bị ăn mòn cốt thép

2.1. Xây dựng mô hình PTHH ba chiều

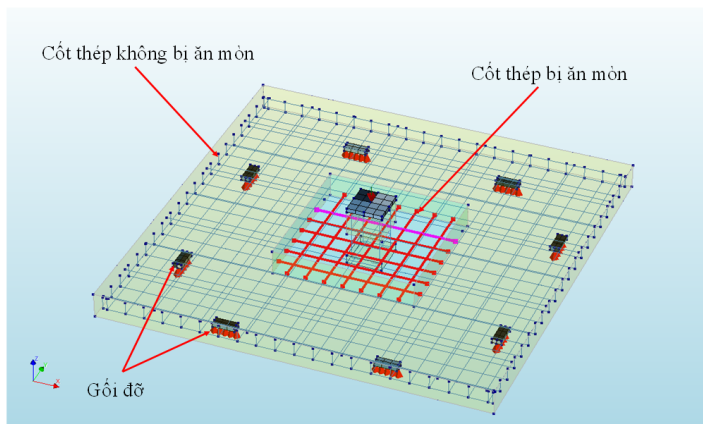
Trong nghiên cứu này, hai mô hình PTHH ba chiều được xây dựng bằng phần mềm DIANA FEA, cho hai mẫu sàn bị ăn mòn cốt thép tại liên kết sàn–cột, ký hiệu là S1-10 và S1-30. Hình 1(a) minh họa sự rời rạc hóa các phần tử bê tông của một mẫu sàn điển hình, với kích thước hình vuông là 2200×2200 mm và chiều dày sàn 150 mm. Diện tích vùng ăn mòn cốt thép là 800×800 mm, được bố trí ở chính giữa bản sàn. Một cột BTCT được bố trí ở giữa bản sàn, có tiết diện mặt cắt ngang là 200×200 mm và chiều cao là 350 mm (bao gồm chiều dày sàn).

Bê tông được mô phỏng bằng các phần tử khối đẳng tham số có 20 nút, với kích thước lưới là $30 \times 30 \times 30$ mm. Mỗi quan hệ ứng suất – biến dạng của bê tông khi chịu nén và chịu kéo được mô phỏng bằng mô hình lý thuyết, đã được trình bày chi tiết trong nghiên cứu của Nguyen và cs. [33]. Cường độ chịu nén của bê tông là 39,3 MPa đối với mẫu sàn S1-10 và 40,9 MPa đối với mẫu sàn S1-30, như báo cáo trong nghiên cứu của Qian và cs. [6]. Dựa trên giá trị cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo của bê tông trong hai mẫu sàn được xác định lần lượt là 3,3 MPa và 3,6 MPa. Trong khi đó, trong vùng ăn mòn cốt thép, bê tông bị xuống cấp, thậm chí bị hư hỏng, do ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép. Do đó, cường độ chịu nén và chịu kéo của bê tông trong vùng ăn mòn phải được tính toán lại dựa trên mức độ ăn mòn cốt thép. Kết quả tính toán chỉ ra rằng, cường độ chịu nén và chịu kéo của bê tông trong vùng này của mẫu sàn S1-10 có các giá trị tính toán là 29,7 MPa và 2,9 MPa, tương ứng với mức độ ăn mòn trung bình là 9,6%. Tương tự, cường độ chịu nén và chịu kéo của bê tông trong vùng ăn mòn của mẫu sàn S1-30 cũng được tính toán, thu được các giá trị lần lượt là 24,4 MPa và 2,5 MPa, tương ứng với mức độ ăn mòn trung bình là 20,3%.

Ngoài ra, năng lượng phá hoại của bê tông khi chịu nén và chịu kéo cũng được tính toán và khai báo khi xây dựng các mô hình PTHH. Năng lượng phá hoại nén, ký hiệu G_c (N/mm), được xác định bằng 250 lần năng lượng phá hoại kéo, ký hiệu G_f (N/mm), cho bê tông nằm ngoài và trong vùng ăn mòn cốt thép. Ở ngoài vùng ăn mòn, G_f và G_c của bê tông được xác định bằng 0,0979 N/mm và 24,475 N/mm đối với mẫu sàn S1-10 và bằng 0,1002 N/mm và 25,06 N/mm đối với mẫu sàn S1-30. Ngược lại, trong vùng ăn mòn cốt thép, G_f và G_c của bê tông được xác định bằng 0,0836 N/mm và 20,9 N/mm đối với mẫu sàn S1-10. Trong khi đó, G_f và G_c của bê tông giảm xuống tương ứng là 0,0751 N/mm và 18,76 N/mm đối với mẫu sàn S1-30.



(a) Mô hình bê tông



(b) Mô hình cốt thép và gối tựa

Hình 1. Mô hình PTHH ba chiều của sàn phẳng bị ăn mòn cốt thép

Hình 1(b) minh họa mô hình các thanh thép ở ngoài và trong vùng bị ăn mòn, cũng như các gối tựa bằng thép bố trí ở dưới sàn bê tông. Cốt thép lớp trên của sàn được cấu tạo bằng các thanh thép D10 mm (đường kính danh nghĩa) với khoảng cách đều là 260 mm. Theo kết quả thí nghiệm [6], giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép lớp trên lần lượt là 558 và 717 MPa. Trong nghiên cứu này, cốt thép lớp trên không bị ăn mòn. Cốt thép lớp dưới của sàn được cấu tạo bằng các thanh thép D12 mm (đường kính danh nghĩa) với khoảng cách đều là 105 mm. Giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép lớp dưới lần lượt là 532 và 695 MPa. Ở ngoài vùng ăn mòn, cường độ bám dính giữa cốt thép và bê tông không bị ảnh hưởng, coi như bám dính tuyệt đối. Ngược lại, trong vùng ăn mòn, đường kính còn lại của các thanh thép bị ăn mòn được tính toán dựa trên mức độ ăn mòn trung bình, lấy bằng 9,6% đối với mẫu sàn S-10 và 20,3% đối với mẫu sàn S1-30. Để đơn giản hóa quá trình mô phỏng, giả thuyết ăn mòn đồng đều đã được áp dụng khi tính toán đường kính còn lại của cốt thép bị ăn mòn. Đồng thời, cường độ bám dính giữa cốt thép bị ăn mòn và bê tông bị hư hỏng trong vùng ăn mòn được xác định theo mô hình dính-trượt chỉ ra trong *fib* Model Code 2010 [34] và đã áp dụng thành công trong một số nghiên cứu trước đây [33, 35, 36]. Trong nghiên cứu này, các mô hình PTHH được kiểm chứng dựa trên các kết quả thí nghiệm của hai mẫu sàn S1-10 và S1-30, chưa đạt đến mức độ ăn mòn nghiêm trọng (thường lớn hơn 30%), do đó có thể bỏ qua ảnh hưởng của hiện tượng ăn mòn điểm. Tuy nhiên, cần thừa nhận rằng áp dụng giả thuyết ăn mòn đồng đều là một hạn chế của quá trình mô phỏng cốt

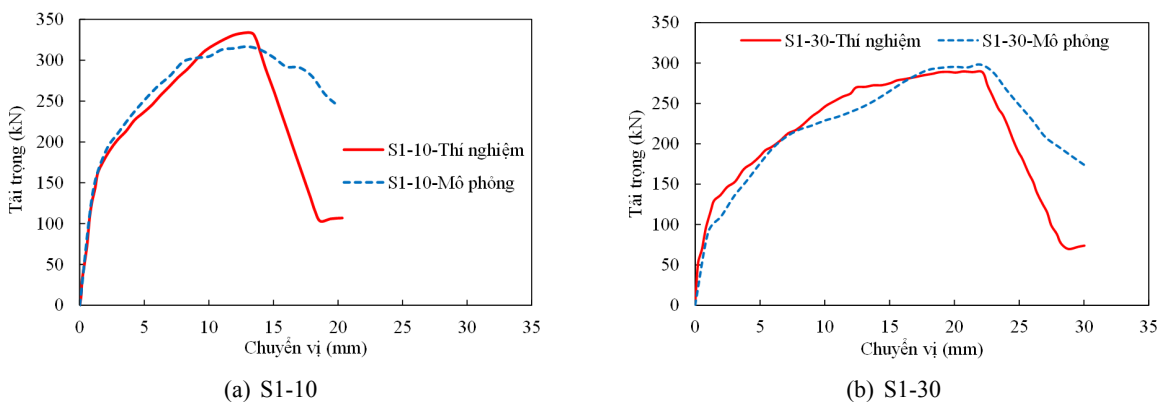
thép bị ăn mòn do ion clorua.

Trong nghiên cứu này, cốt thép được mô phỏng bằng các phần tử giàn có ba nút. Mô hình vật liệu của cốt thép khi chịu kéo được mô tả trong hai giai đoạn. Giai đoạn đầu, trước khi đạt đến giới hạn chảy, mối quan hệ ứng suất – biến dạng là tuyến tính với mô đun đàn hồi E_s bằng 200 GPa. Giai đoạn sau là giai đoạn củng cố của cốt thép, mối quan hệ ứng suất – biến dạng là tuyến tính với mô đun tiếp tuyến lấy bằng 1/100 mô đun đàn hồi. Mô hình ứng suất – biến dạng của cốt thép, cũng như mô hình bám dính giữa cốt thép và bê tông được trình bày chi tiết trong nghiên cứu của Nguyen và cs. [33] cho hai trường hợp: (i) không bị ăn mòn và (ii) bị ăn mòn.

2.2. Kiểm chứng mô hình phần tử hữu hạn

Độ chính xác của các mô hình PTHH đã được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả thí nghiệm trong nghiên cứu của Qian và cs. [6] với kết quả thu được từ phân tích PTHH, bao gồm: (1) biểu đồ tải trọng – chuyển vị, (2) sơ đồ vết nứt và (3) dạng phá hoại. Hình 2 so sánh các biểu đồ tải trọng – chuyển vị cho từng mẫu sàn, S1-10 và S1-30. Có thể thấy rằng các kết quả phân tích mô hình PTHH thể hiện chính xác ứng xử kết cấu của hai mẫu sàn trong giai đoạn vật liệu làm việc đàn hồi, tương ứng khi chuyển vị nhỏ hơn 2 mm. Sau khi bê tông nứt do tác động của tải trọng, các kết quả phân tích mô hình tiếp tục mô tả tương đối chính xác ứng xử phi tuyến của hai mẫu sàn, đặc biệt dự đoán chính xác giá trị tải trọng lớn nhất (tải trọng phá hoại), ký hiệu P_{max} (kN). Đối với mẫu sàn S1-10, tải trọng lớn nhất thu được từ thí nghiệm và mô phỏng lần lượt là 335 và 317 kN, với sai số là 5,4%. Chuyển vị tại tải trọng lớn nhất, ký hiệu $\delta_{P_{max}}$, quan sát được từ thí nghiệm và mô phỏng lần lượt là 13,3 và 13,0 mm. Trong khi đó, tải trọng lớn nhất của mẫu sàn S1-30 được ghi nhận bằng 289 kN từ thí nghiệm và bằng 298 kN từ mô phỏng với sai số là 3,1%. Chuyển vị tương ứng thu được từ thí nghiệm và mô phỏng lần lượt là 20,7 và 22,0 mm, như chỉ ra trong Bảng 1. Ở giai đoạn phá hoại (sau khi đạt tải trọng lớn nhất), độ chính xác của hai mô hình PTHH bị giảm do tác động của sự phá hoại chọc thủng.

Hơn nữa, Hình 3 cho thấy sơ đồ vết nứt quan sát từ mô hình PTHH thể hiện chính xác sơ đồ vết nứt quan sát thấy trên mặt dưới của hai mẫu sàn S1-10 và S1-30. Các vết nứt hình thành và đi xuyên qua tâm của hai mẫu sàn. Trong đó, vết nứt ngang và vết nứt dọc có chiều dài tương ứng với kích thước sàn. Ngoài ra, kết quả phân tích thể hiện trong Hình 4 chứng minh rằng, hai mô hình PTHH bị phá hoại do chọc thủng liên kết sàn–cột, tương tự như dạng phá hoại quan sát thấy trên hai mẫu sàn S1-10 và S1-30. Diện tích vùng chọc thủng lớn hơn khi tăng mức độ ăn mòn cốt thép. Kết quả PTHH thể hiện được xu hướng này và phù hợp với kết quả thí nghiệm. Khi quan sát thí nghiệm, sẽ khó khăn

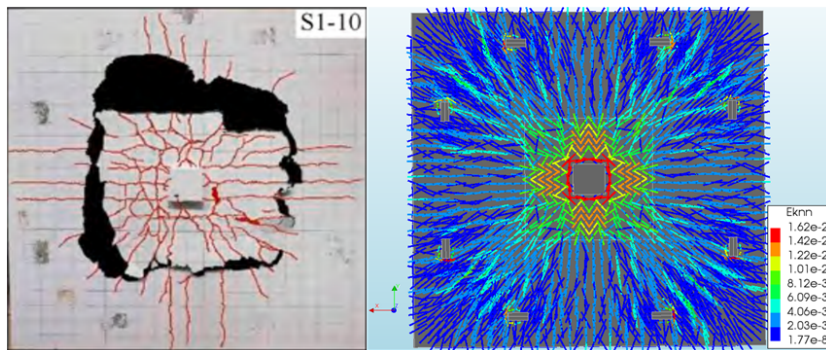


Hình 2. So sánh biểu đồ tải trọng – chuyển vị thu được từ thí nghiệm và mô phỏng

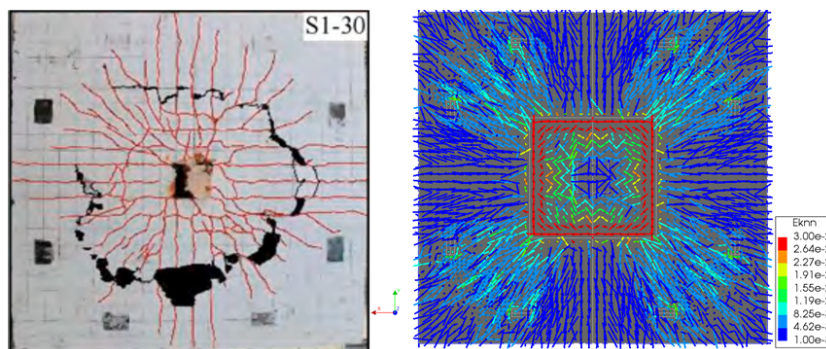
Bảng 1. So sánh các kết quả giữa thí nghiệm và mô phỏng

Tên mẫu	Tải trọng (kN)		$\frac{P_{max}^{PTHH}}{P_{max}^{TN}}$	Chuyển vị (mm)		$\frac{\delta_{P_{max}}^{PTHH}}{\delta_{P_{max}}^{TN}}$	Dạng phá hoại
	P_{max}^{TN}	P_{max}^{PTHH}		$\delta_{P_{max}}^{TN}$	$\delta_{P_{max}}^{PTHH}$		
S1-10	335	317	0,946	13,3	13,0	0,977	Chọc thủng
S1-30	289	298	1,031	20,7	22,0	1,063	Chọc thủng

Ghi chú: TN là kết quả thí nghiệm; PTHH là kết quả phân tích mô hình PTHH.



(a) S1-10



(b) S1-30

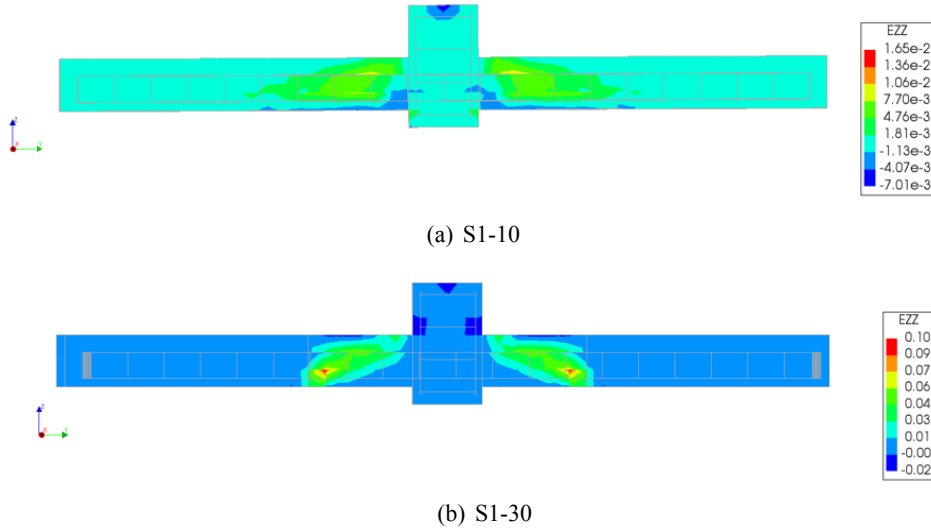
Hình 3. So sánh sơ đồ vết nứt quan sát từ thí nghiệm và mô phỏng

khi muốn xác định sự thay đổi bề rộng vết nứt trong vùng bê tông bị phá hoại chọc thủng. Ngược lại, mô hình PTHH cho phép quan sát sự mở rộng vết nứt do phá hoại chọc thủng, như thể hiện trên Hình 4(a) và Hình 4(b). Kết quả chỉ ra, vết nứt do phá hoại chọc thủng trên mẫu sàn S1-30 mở rộng lớn hơn so với mẫu sàn S1-10. Kết quả phân tích PTHH chỉ ra rằng sự phát triển của dạng phá hoại chọc thủng tại liên kết sàn–cột liên quan trực tiếp đến mức độ ăn mòn cốt thép. Như vậy, có thể kết luận rằng các mô hình PTHH ba chiều xây dựng trong nghiên cứu này đạt được độ chính xác cần thiết để mô phỏng ứng xử kết cấu của sàn phẳng BTCT bị ăn mòn, đặc biệt là sự phá hoại chọc thủng tại liên kết sàn–cột.

3. Kết quả khảo sát tham số

3.1. Ảnh hưởng của chiều dày sàn

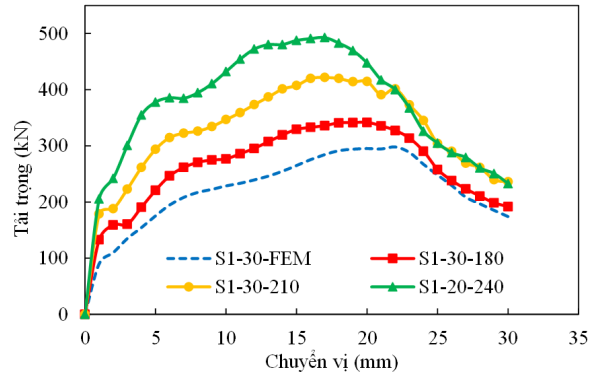
Trong mục này, ba mô hình PTHH được phát triển dựa trên mô hình S1-30-FEM có chiều dày sàn là 150 mm, vùng ăn mòn là 800×800 mm tương ứng với 13,2% diện tích sàn và mức độ ăn mòn trung



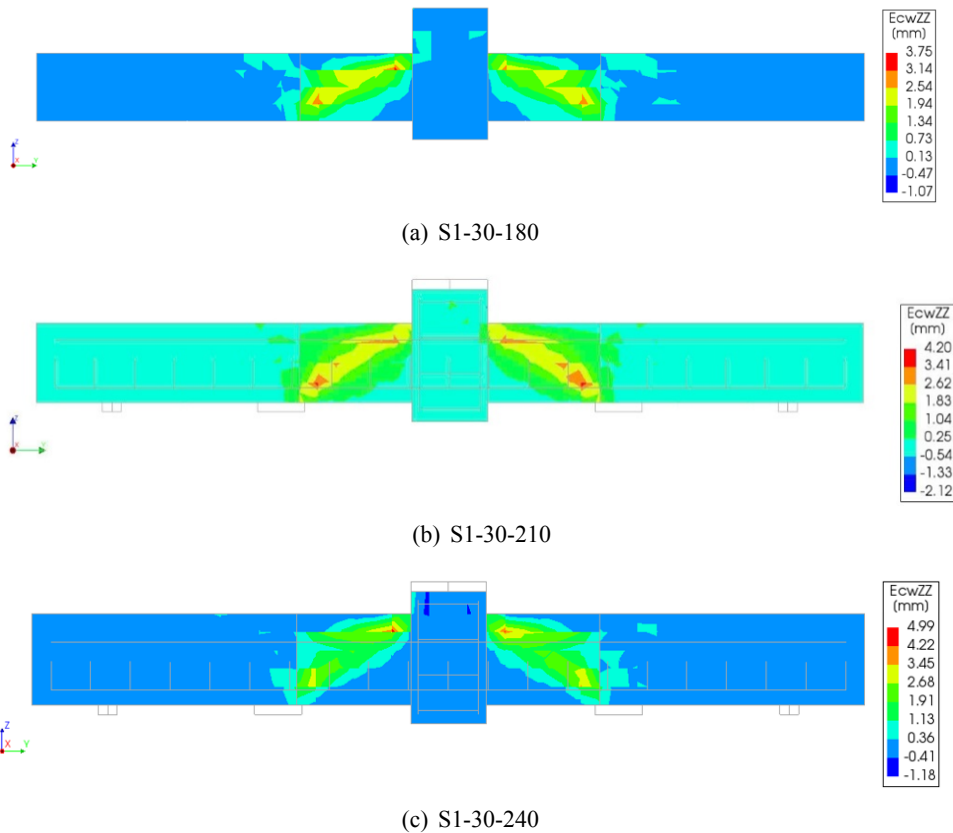
Hình 4. Bề rộng vết nứt bê tông do phá hoại chọc thủng

binh là 20,3%. Ba mô hình ký hiệu là S1-30-180, S1-30-210 và S1-30-240, tương ứng với chiều dày sàn lần lượt là 180, 210 và 240 mm. Các tính chất cơ học của vật liệu và cường độ bám dính giữa cốt thép và bê tông được mô phỏng hoàn toàn tương tự mô hình S1-30-FEM. Đường kính và khoảng cách cốt thép trong các mô hình là giống nhau, chỉ thay đổi khoảng cách giữa lớp trên và lớp dưới, trong khi giữ nguyên chiều dày lớp bê tông bảo vệ. Trong nghiên cứu này, diện tích vùng ăn mòn chiếm 13,2% diện tích sàn, được giữ cố định nhằm khảo sát riêng ảnh hưởng của chiều dày sàn. Đây là cách tiếp cận phổ biến trong phân tích tham số bằng mô hình số, giúp làm rõ vai trò của một biến duy nhất mà không bị nhiễu bởi các yếu tố ảnh hưởng khác. Việc cố định diện tích vùng ăn mòn cũng phản ánh thực tế ở nhiều công trình cũ, nơi phạm vi ăn mòn không tăng đều theo chiều dày kết cấu mà phụ thuộc vào điều kiện môi trường và vết nứt bê tông.

Hình 5 thể hiện các biểu đồ tải trọng – chuyển vị thu được từ kết quả phân tích ba mô hình mới và so sánh với mô hình S1-30-FEM. Có thể thấy rằng độ cứng ban đầu (trước khi bê tông bị nứt) của mô hình tăng lên khi tăng chiều dày sàn. Lưu ý rằng, trong mô hình PTHH, vết nứt bê tông do ăn mòn cốt thép không được kể đến, để đơn giản hóa quá trình mô phỏng. Khi tăng tải trọng tác dụng, cho thấy độ phân hóa rõ ràng hơn về độ cứng giữa các mô hình. Độ cứng của mô hình S1-30-FEM giảm mạnh kể từ giá trị tải trọng 100 kN. Trong khi đó, độ cứng của mô hình S1-30-240 bắt đầu suy giảm kể từ giá trị tải trọng 200 kN, cao gấp hai lần so với mô hình S1-30-FEM. Khả năng chịu lực của mô hình tăng đáng kể khi tăng chiều dày sàn. Kết quả thu được chỉ ra, tải trọng lớn nhất (tải trọng phá hoại) tăng từ 298 kN trên mô hình S1-30-FEM lên 342 kN trên S1-30-180, 422 kN trên S1-30-210 và 493 kN trên S1-30-240. Tải trọng phá hoại của mẫu sàn S1-30 tăng 65,3% khi chiều dày sàn tăng lên 1,6 lần (từ 150 mm lên 240 mm). Do đó, khả năng chịu lực của sàn phẳng bị ăn mòn chịu ảnh hưởng đáng kể bởi chiều dày sàn. Kết quả thu được phù hợp với mô hình lý thuyết tính toán kiểm tra sức kháng chọc thủng của sàn không bị ăn mòn cốt thép, cũng như phù hợp với kết quả của các nghiên cứu trước đây. Ví dụ, Qian và cs. [37] chỉ ra rằng sức kháng chọc thủng có thể tăng khoảng 60-70% khi chiều dày sàn tăng 1,4 lần (từ 125 mm lên 175 mm) cho cả hai trường hợp: mẫu sàn S1-10 có mức độ ăn mòn trung bình 9,6% và sàn đối chứng. Nghiên cứu này cũng cho thấy độ dẻo của sàn giảm đi đáng kể khi tăng chiều dày, chuyển vị tại tải trọng phá hoại giảm khoảng 35-40% khi chiều dày sàn tăng từ 125 lên 175 mm. Như vậy, so với sàn không bị ăn mòn, thì sức kháng chọc thủng của sàn bị ăn mòn chịu ảnh hưởng rõ ràng hơn bởi chiều dày sàn.



Hình 5. Biểu đồ tải trọng – chuyển vị khi thay đổi chiều dày sàn



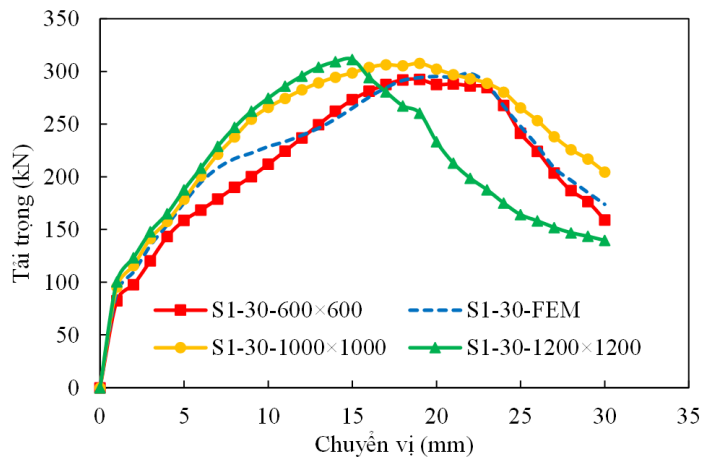
Hình 6. Bề rộng vết nứt do phá hoại chọc thủng khi thay đổi chiều dày sàn

Ngoài ra, quá trình phân tích mô hình PTHH cho phép quan sát sự hình thành và mở rộng của các vết nứt bê tông do tác động của tải trọng, đặc biệt là vết nứt do cơ chế chọc thủng, như minh họa trên Hình 6. Khi tăng chiều dày sàn, khả năng chịu lực của mô hình tăng lên, kéo theo sự cải thiện khả năng chịu biến dạng, nên bề rộng vết nứt trong vùng chọc thủng có xu hướng tăng lên. Tại thời điểm phá hoại, bề rộng lớn nhất của vết nứt trên mô hình S1-30-180 được xác định là 3,75 mm, trong khi đó kết quả của hai mô hình S1-30-210 và S1-30-240 lần lượt là 4,20 mm và 4,99 mm. Bề rộng vết nứt tăng lên phản ánh rõ hơn khả năng phân bố ứng suất của sàn có chiều dày lớn. Ngoài ra, khi tăng chiều dày sàn, vùng chọc thủng có xu hướng mở rộng vượt ra ngoài phạm vi vùng ăn mòn. Phát hiện

này là hợp lý về mặt cơ học vì vùng ăn mòn chỉ tạo ra suy yếu cục bộ, còn ứng xử tổng thể phụ thuộc vào độ cứng của toàn bộ bản sàn và khả năng phân bố ứng suất. Khi sàn dày hơn, năng lượng đàn hồi lớn hơn, đồng thời khả năng duy trì trạng thái làm việc đàn hồi kéo dài hơn trước khi xảy ra phá hoại, do đó, các vết nứt có xu hướng phát triển mạnh hơn về phạm vi, không còn giới hạn trong vùng ăn mòn.

3.2. Ảnh hưởng của diện tích vùng ăn mòn

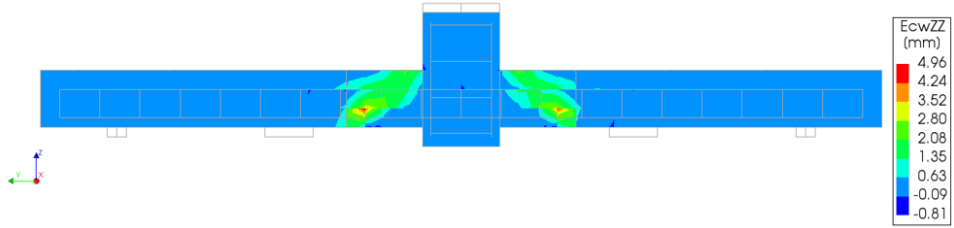
Tiếp theo, ba mô hình PTHH được phát triển từ mô hình kiểm chứng S1-30-FEM, ký hiệu S1-30-600×600, S1-30-1000×1000 và S1-30-1200×1200, nhằm khảo sát ảnh hưởng của diện tích vùng ăn mòn cốt thép chịu kéo đến khả năng chịu lực và ứng xử chọc thủng của sàn phẳng BTCT. Trong mô phỏng, diện tích vùng ăn mòn được thay đổi từ 600×600 mm đến 1000×1000 mm và 1200×1200 mm, chiếm khoảng 7,4%, 20,7% và 29,8% diện tích sàn, trong khi các tính chất cơ học của vật liệu, mức độ ăn mòn trung bình là 20,3% và các thông số khác được giữ nguyên như mô hình S1-30-FEM. Lựa chọn khảo sát vùng ăn mòn với các diện tích khác nhau (tỷ lệ diện tích vùng ăn mòn/ diện tích sàn) là dựa trên thực tế, sự ăn mòn thường không xảy ra trên toàn bộ sàn, mà trường hợp nguy hiểm nhất là vùng ăn mòn xảy ra xung quanh liên kết sàn–cột. Việc mô phỏng nhiều cấp độ diện tích vùng ăn mòn giúp đánh giá toàn diện mối quan hệ giữa vùng hư hỏng do ăn mòn và sức kháng chọc thủng của sàn phẳng.



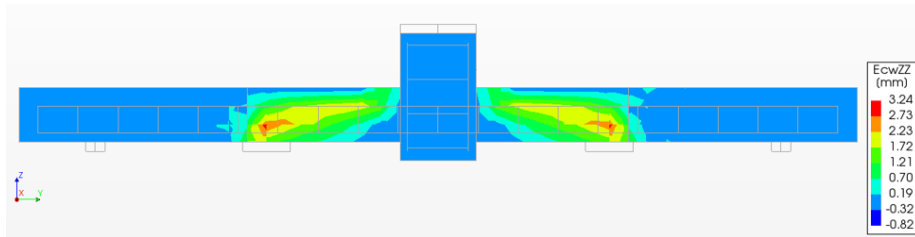
Hình 7. Biểu đồ tải trọng – chuyển vị khi thay đổi diện tích vùng ăn mòn cốt thép

Hình 7 trình bày biểu đồ tải trọng – chuyển vị thu được từ bốn mô hình, cho thấy độ cứng ban đầu gần tương đương nhau khi tải trọng nhỏ hơn 100 kN. Khi tăng tải trọng tác dụng, sự phân hóa giữa các mô hình thể hiện rõ hơn. Mô hình S1-30-600×600 đạt tải trọng lớn nhất 292 kN tại chuyển vị 19 mm, trong khi mô hình S1-30-1200×1200 có tải trọng phá hoại tăng nhẹ lên 311 kN nhưng chuyển vị tương ứng giảm xuống còn 15 mm. Điều này cho thấy sức kháng chọc thủng tổng thể không thay đổi đáng kể, tuy nhiên độ dẻo của sàn bị suy giảm khi mở rộng vùng ăn mòn. Trong khi đó, Hình 8 minh họa phạm vi vùng chọc thủng và bề rộng vết nứt tương ứng trên ba mô hình. Khi tăng diện tích vùng ăn mòn, vùng phá hoại (chu vi đường bao của vùng chọc thủng) cũng tăng theo, tuy nhiên bề rộng vết nứt bê tông có xu hướng giảm, từ 4,96 mm trên mô hình S1-30-600×600 xuống còn 1,28 mm trên mô hình S1-30-1200×1200. Kết quả này phản ánh xu hướng chuyển từ dạng phá hoại dẻo sang phá hoại giòn, do vùng ăn mòn lan rộng làm suy yếu khả năng phân bố lại nội lực trong vùng chịu cắt.

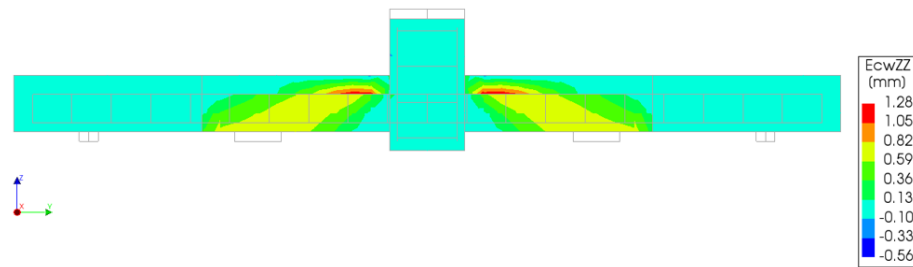
Như vậy, khi diện tích vùng ăn mòn nhỏ hơn 30% diện tích sàn và mức độ ăn mòn trung bình là 20,3%, thì tham số này ảnh hưởng không đáng kể đến khả năng chịu lực, ngược lại ảnh hưởng đáng



(a) S1-30-600×600



(b) S1-30-1000×1000



(c) S1-30-1200×1200

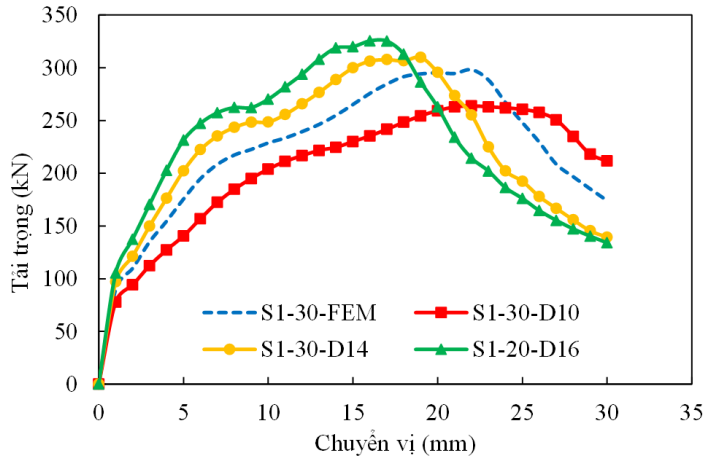
Hình 8. Bề rộng vết nứt do phá hoại chọc thủng khi thay đổi diện tích vùng ăn mòn

kể đến độ dẻo của sàn và bề rộng vết nứt bê tông trong vùng chọc thủng. Phát hiện này phù hợp với các kết quả nghiên cứu của Aoude và cs. [31] thực hiện trên các mẫu sàn có kích thước tương đương là $2300 \times 2300 \times 150$ mm, tuy nhiên thiếu thông tin chi tiết về mức độ ăn mòn cốt thép. Nghiên cứu này chỉ ra rằng, khi vùng hư hỏng (tách lớp bê tông) chiếm 8,6% diện tích sàn thì khả năng chịu lực được cải thiện khoảng 3,6% so với sàn đối chứng. Ngược lại, khi mở rộng vùng hư hỏng đến 39,2% diện tích sàn thì tải trọng phá hoại cũng chỉ giảm khoảng 3% so với sàn đối chứng. Sức kháng chọc thủng của sàn bị ăn mòn cốt thép chỉ suy giảm rõ ràng, khoảng 12% so với sàn đối chứng, khi vùng hư hỏng chiếm 66,1% diện tích sàn. Đồng thời, nghiên cứu này cũng xác nhận sự tăng bề rộng vết nứt bê tông khi mở rộng vùng hư hỏng. Tương tự, một nghiên cứu số của Qian và cs. [37] khảo sát mẫu sàn S1-10 với mức độ ăn mòn trung bình là 9,6%, thì sức kháng chọc thủng chỉ bị ảnh hưởng đáng kể, giảm khoảng 17% so với sàn đối chứng, khi vùng ăn mòn mở rộng ra toàn bộ diện tích sàn.

3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép

Trong mục này, mô hình S1-30-FEM đã kiểm chứng với lớp cốt thép dưới D12 mm (đường kính danh nghĩa) và khoảng cách đều 105 mm, được phát triển để khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đến khả năng chịu lực và ứng xử chọc thủng của sàn phẳng BTCT bị ăn mòn. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép được khảo sát bằng cách thay đổi đường kính của các thanh thép ở lớp dưới của sàn. Ba mô hình ký hiệu lần lượt là S1-30-D10, S1-30-D14 và S1-30-D16 được mô phỏng sử dụng

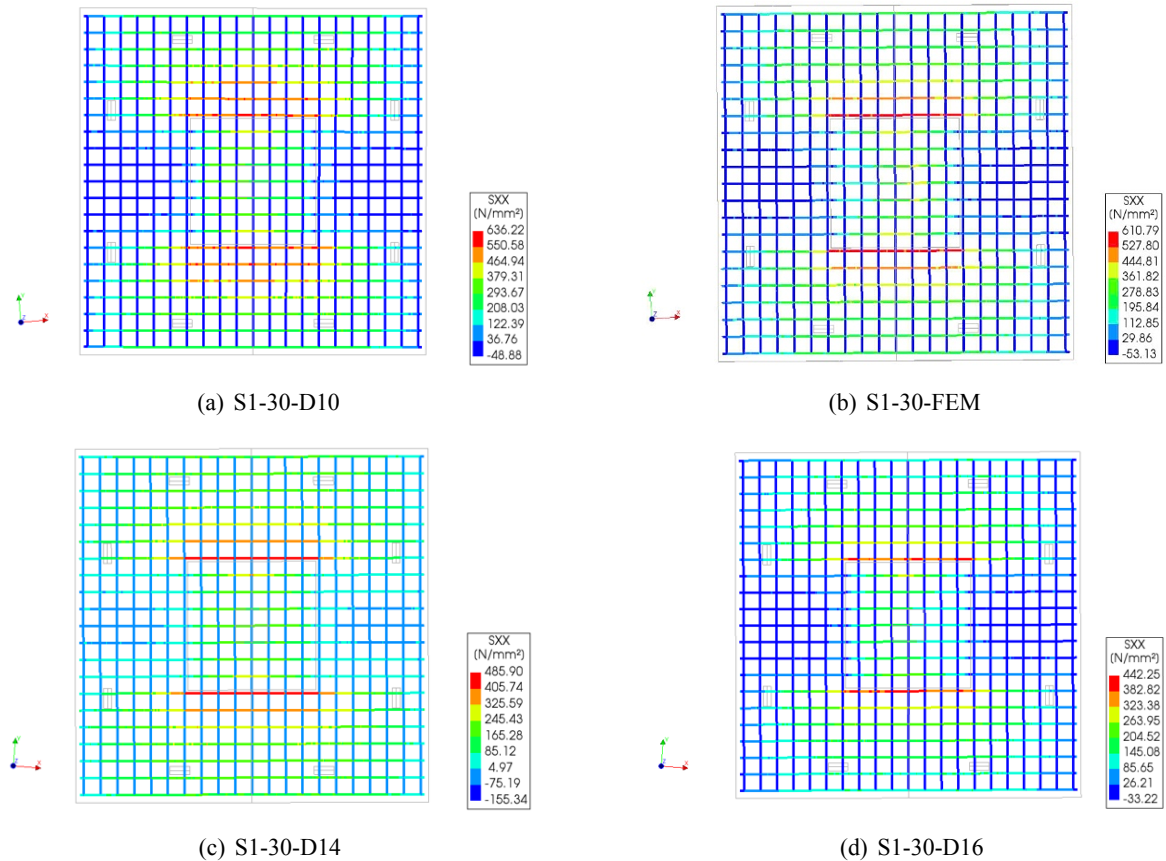
các thanh cốt thép có đường kính danh nghĩa 10, 14 và 16 mm trong vùng không ăn mòn. Khoảng cách giữa các thanh thép là bằng nhau, từ tâm đến tâm là 105 mm. Các tính chất cơ học của cốt thép (giới hạn chảy, giới hạn bền và mô đun đàn hồi) được giữ nguyên khi thay đổi đường kính cốt thép, và tương tự như mô hình S1-30-FEM. Trong khi đó, lớp cốt thép trên được cấu tạo hoàn toàn giống nhau giữa các mô hình. Vùng ăn mòn được mô phỏng với cùng một diện tích là 800×800 mm và mức độ ăn mòn trung bình là 20,3%.



Hình 9. Biểu đồ tải trọng – chuyển vị khi thay đổi hàm lượng cốt thép

Hình 9 giới thiệu các biểu đồ tải trọng – chuyển vị của ba mô hình mới và so sánh với mô hình S1-30-FEM. Có thể thấy rằng độ cứng ban đầu của bốn mô hình gần như tương tự nhau, do vật liệu làm việc trong miền đàn hồi khi tải trọng nhỏ hơn 75 kN. So với mẫu S1-30-FEM, tải trọng lớn nhất của mô hình S1-30-D14 tăng 3,2% (308 kN so với 298 kN) và của mô hình S1-30-D16 tăng 9,2% (325 kN so với 298 kN). Ngược lại, tải trọng lớn nhất của mô hình S1-30-D10 giảm 11,5% so với mô hình S1-30-FEM (264 kN so với 298 kN). Các kết quả thu được chỉ ra rằng sức kháng chọc thủng của mẫu sàn S1-30 (mức độ ăn mòn trung bình là 20,3%) tăng 23,4% khi tăng đường kính cốt thép lớp dưới từ D10 lên D16 mm, tương ứng với hàm lượng cốt thép chịu kéo tăng 2,56 lần. Trong khi đó, kết quả nghiên cứu số của Qian và cs. [37] cho thấy sức kháng chọc thủng của mẫu sàn S1-10 (mức độ ăn mòn trung bình là 9,6%) tăng 40,1% và chuyển vị tại tải trọng phá hoại giảm 25,7% khi hàm lượng cốt thép tăng 2,05 lần (từ 0,74% lên 1,52%). Do đó, ảnh hưởng tích cực của việc tăng hàm lượng cốt thép đến sức kháng chọc thủng của sàn sẽ giảm đi khi cốt thép chịu kéo bị ăn mòn nghiêm trọng hơn tại liên kết sàn–cột.

Ngoài ra, khi tăng hàm lượng cốt thép, chuyển vị tương ứng với tải trọng lớn nhất bị giảm, khoảng 27,3%, đạt giá trị 16 mm trên mô hình S1-30-D16 và 22 mm trên mô hình S1-30-D10. Do đó, độ dẻo của sàn giảm đi đáng kể khi tăng hàm lượng cốt thép chịu kéo. Hơn nữa, Hình 10 minh họa sự phân bố ứng suất kéo trong cốt thép lớp dưới ở trạng thái phá hoại của bốn mô hình. Ứng suất chịu kéo của cốt thép trong mô hình S1-30-D10 vượt quá 532 MPa (giới hạn chảy), nhưng chưa đạt đến 695 MPa (giới hạn bền), nên cốt thép lớp dưới đã bị chảy dẻo nhưng chưa bị đứt. Do đó, mô hình S1-30-D10 chuyển từ dạng phá hoại giòn do chọc thủng sang phá hoại dẻo do cốt thép bị chảy dẻo. Ngược lại, ứng suất chịu kéo trong cốt thép lớp dưới của hai mô hình S1-30-D14 và S1-30-D16 tại thời điểm phá hoại đều nhỏ hơn 532 MPa, nên chưa bị chảy dẻo. Dạng phá hoại của các mô hình này bị chi phối bởi cơ chế chọc thủng. Như vậy, khi tăng hàm lượng cốt thép chịu kéo thì sức kháng chọc thủng của sàn được cải thiện, nhưng độ dẻo của sàn bị giảm, phát hiện này chỉ ra sự thay đổi của dạng phá hoại, từ cơ chế dẻo sang cơ chế chọc thủng.



Hình 10. Phân bố ứng suất chịu kéo trong cốt thép tại thời điểm phá hoại

4. Kết luận

Dựa trên hai mô hình PTHH ba chiều được kiểm chứng, nghiên cứu này đã phát triển một số mô hình nhằm khảo sát ảnh hưởng của ba tham số quan trọng, đó là (i) chiều dày sàn, (ii) diện tích vùng ăn mòn cốt thép và (iii) hàm lượng cốt thép chịu kéo, đến khả năng chịu lực và ứng xử chọc thủng của sàn phẳng BTCT bị ăn mòn tại liên kết sàn–cột. Một số kết luận chính được rút ra từ các kết quả phân tích, như sau:

- Khả năng chịu lực của sàn phẳng bị ăn mòn cốt thép chịu ảnh hưởng đáng kể bởi chiều dày sàn. Khi vùng ăn mòn chiếm 13,2% diện tích sàn và mức độ ăn mòn trung bình là 20,3% thì khả năng chịu lực tăng khoảng 65,3% khi tăng chiều dày sàn từ 150 lên 240 mm. Đồng thời, bề rộng của vết nứt bê tông trong vùng chọc thủng cũng tăng lên khi tăng chiều dày sàn.
- Khi diện tích vùng ăn mòn nhỏ hơn 30% diện tích sàn và mức độ ăn mòn trung bình là 20,3% thì tham số này ảnh hưởng không đáng kể khả năng chịu lực của sàn, ngược lại ảnh hưởng đáng kể đến độ dèo của sàn và bề rộng của vết nứt bê tông trong vùng chọc thủng.
- Khi mức độ ăn mòn trung bình là 20,3%, hàm lượng cốt thép ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu lực của sàn phẳng. Khả năng chịu lực tăng 23,4% khi tăng đường kính cốt thép từ D10 lên D16 mm. Ngoài ra, khi hàm lượng cốt thép thấp thì dạng phá hoại của sàn bị chi phối bởi cơ chế chảy dẻo của cốt thép. Ngược lại, khi tăng hàm lượng cốt thép thì dạng phá hoại của sàn chuyển sang cơ chế chọc thủng.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE) trong đề tài mã số 11-2025/KHXD-TĐ.

Tài liệu tham khảo

- [1] Koppitz, R., Kenel, A., Keller, T. (2013). [Punching shear of RC flat slabs – Review of analytical models for new and strengthening of existing slabs](#). *Engineering Structures*, 52:123–130.
- [2] TCVN 5574:2018. *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*.
- [3] Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., Betelu, S. (2020). [Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring](#). *Construction and Building Materials*, 269:121240.
- [4] Angst, U. M. (2023). [Steel corrosion in concrete – Achilles’ heel for sustainable concrete?](#) *Cement and Concrete Research*, 172:107239.
- [5] Tian, Y., Zhang, G., Ye, H., Zeng, Q., Zhang, Z., Tian, Z., Jin, X., Jin, N., Chen, Z., Wang, J. (2023). [Corrosion of steel rebar in concrete induced by chloride ions under natural environments](#). *Construction and Building Materials*, 369:130504.
- [6] Qian, K., Li, J.-S., Huang, T., Weng, Y.-H., Deng, X.-F. (2022). [Punching shear strength of corroded reinforced concrete slab-column connections](#). *Journal of Building Engineering*, 45:103489.
- [7] Pham, C. T., Du, D. H., Bui, T.-T., Nguyen, N. T. (2025). Modeling Punching Shear Behavior of Locally Corroded Reinforced Concrete Slab-Column Connections. Huynh, D., Doan, H., Cao, T., Watson, P., editors, *Proceedings of the 3rd Vietnam Symposium on Advances in Offshore Engineering*, Singapore, Springer Nature Singapore, 590:569–576.
- [8] Zheng, B., Zheng, W., Wang, L., Zhang, Y. (2023). [Effect of column size on punching behavior of flat slabs with square columns: Numerical investigation](#). *Journal of Building Engineering*, 79:107937.
- [9] Teng, S., Chanthabouala, K., Lim, D. T. Y., Hidayat, R. (2018). [Punching shear strength of slabs and influence of low reinforcement ratio](#). *ACI Structural Journal*, 115(1):139–150.
- [10] Urban, T., Goldyn, M., Krawczyk, L., Sowa, Ł. (2019). [Experimental investigations on punching shear of lightweight aggregate concrete flat slabs](#). *Engineering Structures*, 197:109371.
- [11] Schmidt, P., Kueres, D., Hegger, J. (2019). [Punching shear behavior of reinforced concrete flat slabs with a varying amount of shear reinforcement](#). *Structural Concrete*, 21(1):235–246.
- [12] Shatarat, N., Salman, D. (2022). [Investigation of punching shear behavior of flat slabs with different types and arrangements of shear reinforcement](#). *Case Studies in Construction Materials*, 16:e01028.
- [13] Zamri, N. F., Mohamed, R. N., Awalluddin, D., Abdullah, R. (2022). [Experimental evaluation on punching shear resistance of steel fibre reinforced self-compacting concrete flat slabs](#). *Journal of Building Engineering*, 52:104441.
- [14] Vargas, D., Lantsoght, E. O. L., Genikomsou, A. S. (2022). [Flat Slabs in Eccentric Punching Shear: Experimental Database and Code Analysis](#). *Buildings*, 12(12):2092.
- [15] Lapi, M., Ramos, A. P., Orlando, M. (2019). [Flat slab strengthening techniques against punching-shear](#). *Engineering Structures*, 180:160–180.
- [16] Said, M., Adam, M. A., Arafa, A. E., Moatasem, A. (2020). [Improvement of punching shear strength of reinforced lightweight concrete flat slab using different strengthening techniques](#). *Journal of Building Engineering*, 32:101749.
- [17] Ricker, M., Feiri, T., Nille-Hauf, K., Adam, V., Hegger, J. (2021). [Enhanced reliability assessment of punching shear resistance models for flat slabs without shear reinforcement](#). *Engineering Structures*, 226:111319.
- [18] Isufi, B., Pinho Ramos, A. (2021). [A review of tests on slab-column connections with advanced concrete materials](#). *Structures*, 32:849–860.
- [19] Ghayeb, H. H., Atea, R. S., Al-Kannoon, M. A.-A., Lee, F. W., Wong, L. S., Mo, K. H. (2023). [Performance of reinforced concrete flat slab strengthened with CFRP for punching shear](#). *Case Studies in Construction Materials*, 18:e01801.

- [20] James, A., Bazarchi, E., Chiniforush, A. A., Panjebashi Aghdam, P., Hosseini, M. R., Akbarnezhad, A., Martek, I., Ghodoosi, F. (2019). [Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: A review](#). *Construction and Building Materials*, 224: 1026–1039.
- [21] Hu, J., Zhang, S., Chen, E., Li, W. (2022). [A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete \(RC\) structures](#). *Construction and Building Materials*, 325:126718.
- [22] Soltani, M., Safiey, A., Brennan, A. (2019). [A state-of-the-art review of bending and shear behaviors of corrosion-damaged reinforced concrete beams](#). *ACI Structural Journal*, 116(3):53–63.
- [23] Vu, N. S., Li, B. (2018). [Seismic performance assessment of corroded reinforced concrete short columns](#). *Journal of Structural Engineering*, 144(4):04018018.
- [24] Daneshvar, K., Moradi, M., Ahmadi, K., Hajiloo, H. (2021). [Strengthening of corroded reinforced concrete slabs under multi-impact loading: Experimental results and numerical analysis](#). *Construction and Building Materials*, 284:122650.
- [25] Nguyễn, N. Đ., Tân, N. N. (2019). [Dự báo khả năng chịu lực còn lại của cột BTCT chịu nén lệch tâm phẳng có cốt thép dọc bị ăn mòn](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 13(2V): 53–62.
- [26] Tan, N. N., Hiep, D. V. (2020). [Empirical models of corrosion rate prediction of steel in reinforced concrete structures](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 14(2):98–107.
- [27] Anh, T. H., Giang, N. H., Tân, N. N. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường kháng uốn của dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn bằng tấm sợi composite CFRP](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 15(1V):1–16.
- [28] Thao, N. T. T., Tung, T. P. S., Nhan, N. D., Tan, N. N. (2022). [Assessing the shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams corroded under chloride attacks](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 16(3):97–110.
- [29] Tan, N. N., Thao, N. T. T., Van, N. T., Hieu, D. D. (2022). [Assessing the shear behavior of corroded steel fiber reinforced concrete beams without shear reinforcement using nonlinear finite element analysis](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 16(3):152–165.
- [30] Nguyen Ngoc, T., Tran Hoai, A., Dang Vu, H., Nguyen Hoang, G. (2024). [Experimental study, numerical simulation and GRNN model for predicting the flexural loading capacity of corroded reinforced concrete beams](#). *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 28(2):347–379.
- [31] Aoude, H., Cook, W. D., Mitchell, D. (2014). [Effects of simulated corrosion and delamination on response of two-way slabs](#). *Journal of Structural Engineering*, 140(1):04013023.
- [32] Gomaa, A. M., Lotfy, E. M., Khafaga, S. A., Hosny, S., Ahmed, M. A. (2023). [Experimental, numerical, and theoretical study of punching shear capacity of corroded reinforced concrete slab-column joints](#). *Engineering Structures*, 289:116280.
- [33] Nguyen, T. K., Nguyen, N. T. (2021). [Finite element investigation of the shear performance of corroded RC deep beams without shear reinforcement](#). *Case Studies in Construction Materials*, 15:e00757.
- [34] fib (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Germany.
- [35] Pham, T. T., Nguyen, N. T., Nguyen, T.-T. T., Nguyen, N. L. (2023). [Numerical analysis of the shear behavior for steel fiber reinforced concrete beams with corroded reinforcing bars](#). *Structures*, 57:105081.
- [36] Nguyen, T. K., Nguyen, N. T., Tran, H. A., Nguyen, H. G., Tran, P. (2024). [Three-dimensional nonlinear finite element analysis of corroded reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets](#). *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 28(10):2217–2243.
- [37] Qian, K., Liu, J.-G., Yu, X.-H., Weng, Y.-H. (2022). [Experimental and numerical investigation of punching shear capacity of corroded reinforced concrete slab-column connections](#). *Structures*, 43: 1548–1557.