

Nghiên cứu khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt liệu keramzit theo mô hình vết nứt tới hạn

Study on punching shear capacity of keramzit lightweight aggregate concrete flat slabs based on Critical shear crack theory

> THS PHẠM TRUNG HIẾU^{1,*}, PGS.TS NGUYỄN HÙNG PHONG², TS TRẦN VIỆT TÂM²

¹Văn phòng Đăng ủy phường Hải An, TP Hải Phòng

²Nhóm chuyên môn Công trình bê tông cốt thép, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email: hieupham9892@gmail.com

TÓM TẮT

Khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng bê tông nhẹ cốt liệu rỗng đã được đề cập trong các tiêu chuẩn thiết kế trên thế giới, tuy nhiên việc áp dụng còn hạn chế. Bài báo đề xuất một mô hình tính toán khả năng chống chọc thủng của bản sàn bê tông nhẹ dựa trên lý thuyết vết nứt tới hạn (CSCT). Mô hình đề xuất được phát triển từ việc phân tích cơ chế phá hoại có kể đến đường kính, tính chất cốt liệu và góc xoay của bản, phản ánh sát hơn ứng xử của bản bê tông nhẹ sau nứt. Kết quả của mô hình tính toán đề xuất được kiểm chứng trên các dữ liệu thực nghiệm của 26 mẫu sàn được công bố trong các nghiên cứu uy tín trên thế giới. Kết quả kiểm chứng cho thấy mô hình đề xuất dự báo khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng bê tông nhẹ chính xác và có độ tin cậy đảm bảo.

Từ khóa: Bê tông cốt liệu nhẹ; khả năng chống chọc thủng; lý thuyết vết nứt tới hạn CSCT.

ABSTRACT

The punching shear resistance of lightweight aggregate concrete flat slabs has been addressed in numerous design standards; however, their application remains subject to several limitations. This paper proposes a model for predicting the punching shear resistance of slabs based on the Critical Shear Crack Theory (CSCT). The proposed model is developed through an analysis of the failure mechanism considering both aggregate diameter and slab rotation, thereby providing a more realistic representation of the post-cracking behavior of lightweight concrete. The model is validated against experimental data reported in reputable international studies. The validation results demonstrate that the proposed model can predict punching shear resistance with good accuracy and reliability.

Keywords: Lightweight aggregate concrete; punching shear resistance; Critical Shear Crack Theory (CSCT).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sàn phẳng bê tông cốt thép được sử dụng phổ biến trong các công trình dân dụng và công nghiệp nhờ ưu điểm giảm chiều cao tầng, tăng tính linh hoạt cho việc bố trí không gian kiến trúc và thuận lợi trong thi công. Ngày nay, bê tông cốt liệu nhẹ (Lightweight Aggregate Concrete - LWAC) càng được quan tâm trong xây dựng nhờ khả năng giảm tải trọng bản thân kết cấu, góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế và giảm tác động đến môi trường. Tuy nhiên, do có mô đun đàn hồi thấp hơn, cường độ chịu kéo nhỏ hơn và cơ chế cài cốt liệu khác so với bê tông thường, khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt liệu nhẹ có thể suy giảm so với bê tông thường và cần được đánh giá bằng các mô hình tính toán phù hợp.

Hiện nay, các tiêu chuẩn thiết kế như TCVN 5574:2018 [1], ACI 318-19 [2], Eurocode 2 [3], Fib Model Code 2010 [4] đều đã đề cập đến khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng bê tông nhẹ, tuy nhiên do cơ sở tính khác nhau nên cho kết quả dự báo khác

nhau. Trong Fib Model Code 2010 [4] và nghiên cứu của Aurelio Muttoni [5], đường kính cốt liệu hiệu quả của bê tông nhẹ được giả thiết bằng không ($d_g = 0$) để xét đến sự suy giảm cơ chế cài cốt liệu trong vết nứt do hiện tượng phá vỡ các hạt cốt liệu. Kết quả nghiên cứu của Caratelli [6] lại cho thấy các hạt cốt liệu không bị phá vỡ, không quan sát thấy sự suy giảm đáng kể của cơ chế cài cốt liệu. Việc xác định góc xoay của bản tương đối phức tạp do phụ thuộc vào kết quả phân tích mô men tác dụng và mô men kháng uốn của tiết diện. Những hạn chế này cho thấy cần tiếp tục hoàn thiện mô hình tính toán khả năng chống chọc thủng đối với sàn bê tông nhẹ.

Tên cơ sở lý thuyết vết nứt tới hạn (CSCT), bài báo phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt liệu nhẹ và đề xuất một mô hình và công thức tính toán mới. Trong mô hình đề xuất, đường kính cốt liệu hiệu quả được xác định như một hàm phụ thuộc vào khối lượng riêng của bê tông và kích thước cốt liệu

lớn nhất của hạt; đồng thời góc xoay của bản được xác định thông qua tỷ số biến dạng cốt thép thay cho tỷ số mô men.

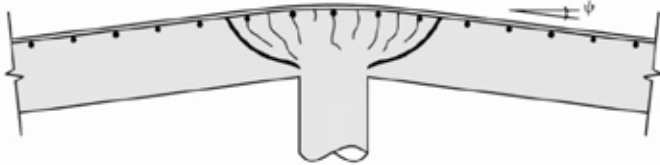
2. LÝ THUYẾT VẾT NỨT TỚI HẠN XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG CHỐNG CHỌC THÙNG CỦA SÀN PHẪNG BÊ TÔNG CỐT THÉP

Lý thuyết vết nứt tới hạn (Critical Shear Crack Theory - CSCT) là cơ sở lý thuyết được áp dụng để mô tả cơ chế phá hoại chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt thép; theo đó khả năng kháng chọc thủng được tính theo công thức:

$$V_{Rdc} = k_{\psi} \frac{\sqrt{f_c}}{\gamma_c} b_0 d_v \text{ với } k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \times k_{dg} \times \psi \times d} \leq 0,6 \quad (1)$$

Trong đó: f_c : cường độ chịu nén của bê tông (MPa); b_0 : chu vi đáy tháp chọc thủng; d_v : chiều cao làm việc vùng chịu cắt; k_{ψ} : hệ số phụ thuộc vào góc xoay (ψ) của sàn, đường kính cốt liệu (k_{dg}) và chiều cao trung bình làm việc theo 2 phương (d).

Khác với các phương pháp thiết kế truyền thống dựa chủ yếu vào cường độ chịu kéo của bê tông. Mô hình vết nứt tới hạn cho rằng khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt thép bị chi phối bởi sự hình thành và mở rộng của vết nứt nghiêng quanh cột. Khi tải trọng tăng, bản sàn xuất hiện biến dạng xoay tại vùng liên kết cột - sàn; bản sàn bị xoay làm vết nứt nghiêng mở rộng, suy giảm khả năng truyền lực cắt qua vùng bê tông chịu nén và qua mặt nứt.



Hình 1. Góc xoay ψ của bản sàn

Góc xoay phản ánh mức độ biến dạng của vùng liên kết cột - sàn dưới tác dụng của tải trọng và có quan hệ trực tiếp với độ mở của vết nứt tới hạn. Khi góc xoay tăng, độ mở vết nứt tăng theo, làm suy giảm khả năng truyền lực cắt qua mặt nứt do giảm hiệu quả cài cốt liệu. Vì vậy, khả năng chống chọc thủng của sàn giảm dần khi góc xoay tăng.

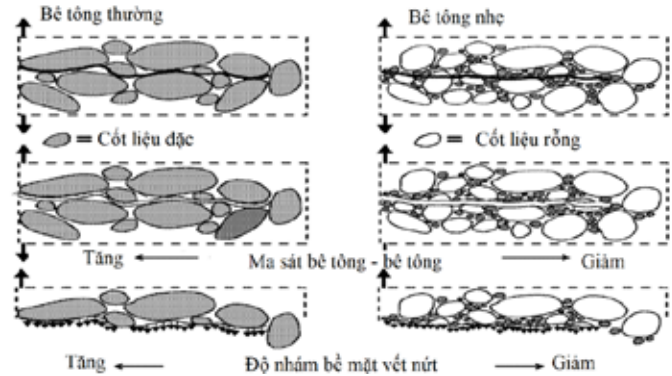
Bên cạnh đó, kích thước cốt liệu lớn nhất và đường kính cốt liệu hiệu quả (d_g) có vai trò quan trọng vì ảnh hưởng đến cơ chế cài cốt liệu trên mặt nứt. Đối với bê tông thường, khi vết nứt phát triển cắt qua bê tông, lực cắt có thể được truyền một phần nhờ hiệu ứng cài cốt liệu hai bên mặt nứt. Nếu vết nứt đi xuyên qua cốt liệu hoặc cốt liệu có cường độ thấp bị nghiêng vỡ, khả năng cài cốt liệu bị suy giảm. Vì vậy, mô hình có thể được điều chỉnh thông qua việc xác định lại (d_g), xét đến đặc điểm cốt liệu, đường đi của vết nứt và mức độ phá hoại qua cốt liệu.

3. CƠ CHẾ PHÁ HOẠI CHỌC THÙNG SÀN BÊ TÔNG NHẹ KERAMZIT

Đối với sàn bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu rỗng keramzit, do cường độ của hạt keramzit thấp hơn cốt liệu đá tự nhiên, vết nứt nghiêng trong vùng chọc thủng thường phát triển xuyên qua hạt cốt liệu. Hiện tượng này làm suy giảm đáng kể cơ chế cài cốt liệu, dẫn đến khả năng truyền lực cắt qua mặt nứt thấp hơn so với bê tông thường.

Sự suy giảm hiệu quả cài cốt liệu trong bê tông nhẹ làm giảm ma sát giữa hai mặt nứt và khả năng truyền lực cắt qua vết nứt, do đó các vết nứt có xu hướng phát triển nhanh hơn và vùng phá hoại được hình thành ở mức tải trọng thấp hơn so với bê tông thường có cùng cường độ chịu nén.

Kalus et al. (2025) [8] ghi nhận biến dạng của cốt thép không vượt quá biến dạng chảy tại thời điểm phá hoại. Kết quả này cho thấy phá hoại chọc thủng xảy ra trước khi hệ cốt thép chịu kéo được huy động hoàn toàn, cho rằng khả năng chịu lực của liên kết cột - sàn bị chi phối chủ yếu bởi cơ chế chọc thủng của bê tông thay vì cơ chế phá hoại do uốn.



Hình 2. Vết nứt do phá hoại chọc thủng của Bê tông (Wille và Dehn) [7]

Những đặc điểm trên cho thấy cơ chế chống chọc thủng của sàn bê tông nhẹ cốt liệu keramzit chịu ảnh hưởng mạnh bởi đặc tính của cốt liệu nhẹ, sự giảm hiệu ứng cài cốt liệu và ứng suất của cốt thép khi phá hoại. Những yếu tố này có thể được xem xét nhằm tăng độ chính xác của công thức khi áp dụng đối với sàn phẳng bê tông nhẹ.

4. ĐỀ XUẤT TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG CHỐNG CHỌC THÙNG CỦA SÀN PHẪNG BÊ TÔNG CỐT LIỆU NHẹ THEO LÝ THUYẾT VẾT NỨT TỚI HẠN

4.1. Xét ảnh hưởng của kích thước cốt liệu đến khả năng chống chọc thủng

Kích thước cốt liệu ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng truyền lực cắt qua mặt nứt. Khi kích thước cốt liệu tăng, bề mặt nứt trở nên gồ ghề hơn, làm tăng hiệu ứng cài cốt liệu và ma sát giữa hai mặt nứt, từ đó nâng cao khả năng truyền lực cắt. Ngược lại, cốt liệu nhỏ tạo ra bề mặt nứt tương đối phẳng, làm giảm hiệu quả cài cốt liệu và khả năng truyền lực qua vết nứt.

Trong fib Model Code 2010 [4], ảnh hưởng của cốt liệu được xét thông qua đường kính cốt liệu hiệu quả d_g . Đối với bê tông thường, giá trị d_g được xác định theo kích thước cốt liệu lớn nhất sử dụng trong cấp phối (d_{max}). Tuy nhiên, đối với bê tông cốt liệu nhẹ, tiêu chuẩn giả thiết $d_g = 0$ do cho rằng cốt liệu nhẹ thô bị nghiêng vỡ khi phá hoại xảy ra và không còn tham gia đáng kể vào cơ chế cài cốt liệu.

Caratelli và cộng sự [6] cho rằng giả thiết $d_g = 0$ trong fib Model Code 2010 [4] chưa phản ánh đầy đủ vai trò của cơ chế cài cốt liệu trong bê tông nhẹ, do các hạt cốt liệu nhẹ không phải lúc nào cũng bị phá vỡ hoàn toàn và bề mặt phá hoại vẫn tồn tại độ nhám đáng kể do ảnh hưởng của cốt liệu mịn. Vì vậy, tác giả đề xuất sử dụng đường kính cốt liệu hiệu quả d_g có xét đến mức độ phá vỡ của cốt liệu nhẹ khi đánh giá khả năng chống chọc thủng $d_g = (0,5 \div 0,9) d_{max}$ với d_{max} là kích thước hạt lớn nhất của cốt liệu lớn nhất dạng cầu.

Công thức đề xuất của Caratelli và cộng sự [6] chỉ phản ánh kích thước hạt, không phản ánh chất lượng cơ học của hạt nhẹ (nhẹ/yếu). Deifalla (2020) [9] trong nghiên cứu của mình đề xuất đường kính cốt liệu hiệu quả d_g nên được xác định như một hàm phụ thuộc vào khối lượng riêng của bê tông ρ_c (kg/m^3), nhằm phản ánh một cách hợp lý hơn mối quan hệ giữa đặc tính vật liệu của bê tông cốt liệu nhẹ và cơ chế truyền lực cắt qua vết nứt.

$$d_g = \left(\frac{\rho_c}{2400} \right)^3 \times d_{max} \quad (2)$$

Theo Eurocode 2 [3], ảnh hưởng của bê tông nhẹ đến các đặc trưng cơ học được xét thông qua tỷ số chuẩn hóa ($\rho_c/2200$), trong đó 2200 kg/m³ là giới hạn trên khối lượng thể tích của bê tông nhẹ. Nhận thấy ảnh hưởng của khối lượng thể tích bê tông đến các đặc trưng cơ học có tính phi tuyến, nghiên cứu đề xuất hiệu chỉnh đường kính cốt liệu hiệu quả (d_g) theo khối lượng thể tích bê tông, với giá trị tham chiếu 2200 kg/m³ theo Eurocode 2 [3], nhằm phản ánh ảnh hưởng của bê tông nhẹ đến cơ chế cài cốt liệu, cụ thể:

$$d_g = \left(\frac{\rho_c}{2200} \right)^3 \times d_{\max} \quad (3)$$

Trong đó: số mũ 3 là được kế thừa từ cách tiếp cận của Deifalla (2020) [9], còn giá trị 2200 kg/m³ được lựa chọn để bảo đảm tính thống nhất với các quy định của Eurocode 2 [3] đối với bê tông nhẹ; $d_{\max}$: kích thước hạt lớn nhất của cốt liệu thô dạng cầu.

Goldyn (2023) [10] chỉ ra rằng cốt liệu mịn tự nhiên vẫn góp phần tạo độ nhám bề mặt vết nứt và duy trì khả năng truyền lực cắt trong bê tông nhẹ. Vì vậy, nghiên cứu đề xuất giới hạn (d_g) không nhỏ hơn kích thước hạt lớn nhất của cốt liệu mịn tự nhiên (cát tự nhiên) ($d_{\max,s}$).

$$d_g = \left(\frac{\rho_c}{2200} \right)^3 \times d_{\max} \geq d_{\max,s} \quad (4)$$

Trong trường hợp không có số liệu về kích thước hạt lớn nhất của cốt liệu $d_{\max}$, có thể giả thiết (d_g) bằng kích thước hạt lớn nhất của cốt liệu mịn tự nhiên ($d_{\max,s}$).

$$d_g = d_{\max,s} \quad (5)$$

Đối với bê tông thông dụng, giá trị $d_{\max,s}$ này thường nằm trong khoảng từ 4 mm đến 5 mm.

4.2. Đề xuất biểu thức tính gần đúng góc xoay ψ của bản sàn

Theo fib Model Code 2010 [4], biểu thức tính góc xoay của bản sàn được đề xuất:

$$\psi = 1,5 \times \frac{r_s}{d} \times \frac{f_{yd}}{E_s} \times \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{1,5} \quad (6)$$

Trong đó: m_s : mô men trung bình trên một đơn vị chiều dài dùng để tính toán cốt thép chịu uốn trong dải cột (support strip) theo phương đang xét; m_R : mô men chịu uốn thiết kế trung bình trên một đơn vị chiều dài của dải cột, cũng theo phương đang xét.

Theo đề xuất của Taehun Ha et al. (2015) [11] thay vì sử dụng tỷ số (m_s/m_R), có thể xem xét sử dụng tỷ số biến dạng ($\varepsilon_s/\varepsilon_y$), cho phép đánh giá hợp lý hơn trạng thái làm việc thực tế của cốt thép trong điều kiện phá hoại chọc thủng:

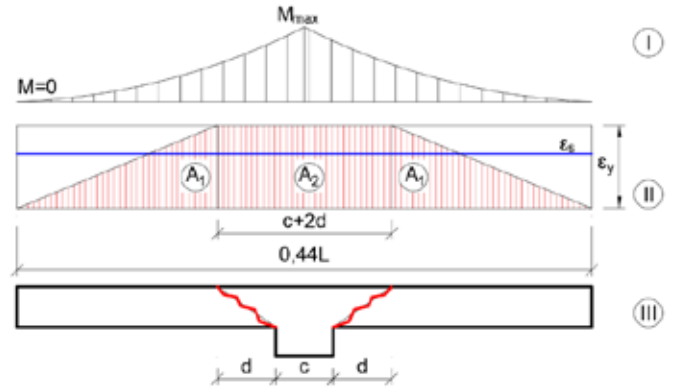
$$\frac{m_s}{m_R} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} \quad (7)$$

Trong đó: ε_s là biến dạng trung bình của cốt thép trong dải cột; ε_y là biến dạng chảy dẻo của cốt thép.

Đồng thời khi đó hệ số 1.5 được thay thế bằng hệ số 1,2 theo mức tính toán gần đúng cấp III (LoA III) của fib Model Code 2010 [4] đối với phá hoại chọc thủng.

Trong thực hành thiết kế, nội lực của sàn thường được xác định bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), còn cốt thép trong dải cột được bố trí dựa trên mô men trung bình trong phạm vi bề rộng liên quan đến chu vi chọc thủng ($s_0 = c + 2d$). Tương tự như biểu đồ biến dạng của cốt thép (Taehun Ha et al. 2015 [11]; Kalus et al. 2025 [8]), giả thiết dạng phân bố ứng suất, trong đó biến dạng của cốt thép chịu kéo đạt giá trị ε_y trong chu vi tháp chọc thủng và giảm dần đến giá trị 0 tại vị trí mô men bằng 0 theo quy luật đường parabol. Đối với bê tông nhẹ, do tính chất giòn hơn của vật liệu và vết nứt chọc thủng cắt qua cốt liệu, sự phá hoại xảy ra đột ngột hơn,

cơ chế dẻo giảm đi, do đó giả thiết ứng suất (biến dạng) trong cốt thép ngoài phạm vi tháp chọc thủng (Hình A₁) là phân bố tuyến tính (Hình 3).



I - Biểu đồ mô men;

II - Biểu đồ biến dạng của cốt thép dọc trong dải sàn trên cột;

III - Sơ đồ sàn và tháp chọc thủng;

L - nhịp sàn; c - kích thước cột; d - bề rộng một phía tháp chọc thủng;

A₁ - diện tích biểu đồ biến dạng cốt thép ngoài tháp chọc thủng;

A₂ - diện tích biểu đồ biến dạng cốt thép trong tháp chọc thủng;

A - diện tích tổng thể của biểu đồ biến dạng cốt thép

Hình 3. Phân bố biến dạng trong cốt thép dọc dài sàn

Với giả thiết $d \approx L/30$, bằng biến đổi hình học, ta có

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} = \frac{2A_1 + A_2}{A} = 0,576 + 0,038 \times \frac{c}{d} \quad (8)$$

Tổng hợp các biến đổi trên lại, ta có thể tính góc xoay của bản bằng công thức:

$$\psi = 1,2 \frac{r_s}{d} \frac{f_y}{E_s} \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{1,5} = k_{m1} \frac{r_s}{d} \frac{f_y}{E_s} \quad (9)$$

$$k_{m1} = 1,2 \times \left(0,576 + 0,038 \times \frac{c}{d} \right)^{1,5}$$

Trong đó: f_c : cường độ chịu nén của bê tông mẫu lăng trụ; f_y : giới hạn chảy của cốt thép dọc; E_s : mô đun đàn hồi của thép; r_s : là vị trí mà mô men uốn hướng tâm bằng 0 so với trục gối.

4.3. Tổng hợp công thức để xuất tính toán khả năng chống chọc thủng của sàn bê tông cốt liệu nhẹ

Từ kết quả các đề xuất kể đến kích thước hạt cốt liệu nhẹ và góc xoay, ta có công thức tính khả năng chống chọc thủng của sàn bê tông cốt liệu nhẹ như sau:

$$F \leq V_{Rd,c} = k_{\psi} \times \frac{\sqrt{f_c}}{\gamma_c} \times b_0 \times d \quad (10)$$

$$\text{Trong đó: } k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \times k_{dg} \times \psi \times d} \quad (11)$$

$$k_{dg} = \begin{cases} \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 & (\text{khi } d_{\max} \leq 16\text{mm}) \\ 1,0 & (\text{khi } d_{\max} > 16\text{mm}) \end{cases} \quad (12)$$

$$d_g = \left(\frac{\rho_c}{2200} \right)^3 \times d_{\max} \geq d_{\max,s} \quad (13)$$

$$\psi = 1,2 \frac{r_s}{d} \frac{f_y}{E_s} \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{1,5} = k_{m1} \frac{r_s}{d} \frac{f_y}{E_s} \quad (14)$$

$$k_{m1} = 1,2 \times \left(0,576 + 0,038 \times \frac{c}{d} \right)^{1,5} \quad (15)$$

Bảng 1. Kết quả kiểm chứng công thức đề xuất đối với các nghiên cứu thực nghiệm sàn phẳng bê tông nhẹ được công bố

STT	Nghiên cứu thực nghiệm của nhóm tác giả	Mẫu	V_{prop} (kN)	V_{test} (kN)	V_{test}/V_{prop}
1	A.A.Zaher và cộng sự [12]	L1	84,70	110	1,30
2		L2	39,64	50	1,26
3		L3	151,90	175	1,15
4		L6	105,10	115	1,09
5		L7	133,07	155	1,16
6	Youm và cộng sự [13]	L-MSW	744,33	862	1,16
7		L-SH-C	511,87	552	1,08
8		L-CL-S	536,33	626,3	1,17
9	Carmo và cộng sự [14]	S1-LC60	156,48	175,7	1,12
10		S2-LC30	115,37	127,6	1,11
11		S1-LC45	138,31	147,4	1,07
12		S2-LC45	139,25	167,4	1,20
13	Goldyn và cộng sự [15]	LC-0.47-0	451,81	520	1,15
14	Al-Asadi và cộng sự [16]	S1-L.W	45,63	57	1,25
15	Mohamed và cộng sự [17]	S1	258,66	340	1,31
16	Clarke và cộng sự [18]	M1	173,88	205	1,18
17		M3	198,62	206	1,04
18		M4	190,14	218	1,15
19		M12	234,62	218	0,93
20		M13	262,48	295	1,12
21		M14	177,90	186	1,05
22		M16	155,15	182	1,17
23		M18	175,73	195	1,11
24		M26	238,85	234	0,98
25	Hognestad E và cộng sự [19]	H1 L3	252,28	311,37	1,23
26		H1 L4	256,95	311,37	1,21

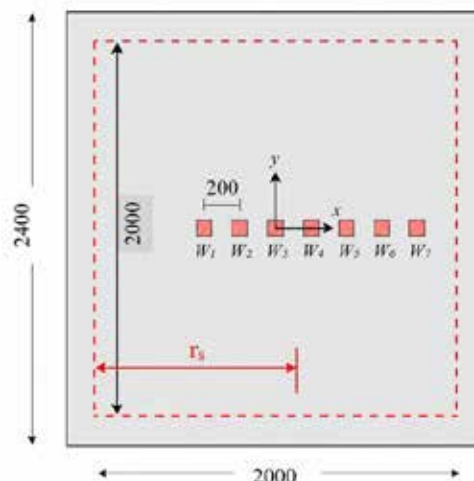
5. KIỂM CHỨNG ĐỐI VỚI CÁC NGHIÊN CỨU ĐÃ CÔNG BỐ

5.1. Kiểm chứng với nghiên cứu thực nghiệm của Angelo

Caratelli [6]

Angelo Caratelli [6] nghiên cứu khả năng chống chọc thủng của bản sàn bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu đất sét nung nở LECA và tro rác thải sinh hoạt (L-MSW). Mẫu thí nghiệm là bản sàn vuông kích thước $2,4 \times 2,4$ m, dày 200 mm, không bố trí cốt thép chống chọc thủng, chịu tải tập trung thông qua bản thép vuông cạnh 400 mm tại vị trí cột giữa có kích thước 400×400 mm. Bê tông sử dụng cốt liệu LECA có kích thước lớn nhất 15 mm, kích thước hạt cát lớn nhất 5 mm, đạt khối lượng thể tích 2064 kg/m^3 và cường độ nén trung bình 58,6 MPa. Kết quả thí nghiệm cho thấy tải trọng phá hoại chọc thủng đạt 862 kN, tương ứng với chuyển vị cực hạn khoảng 19 mm.

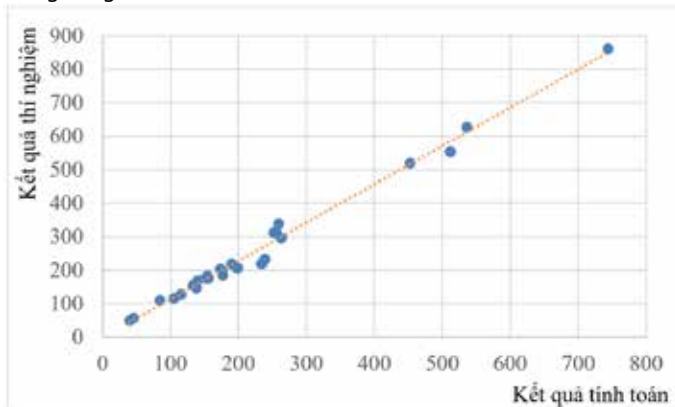
Thay số vào công thức (10) có được sức kháng chọc thủng theo lý thuyết: $V_{prop} = 744,33$ (kN). Tải trọng phá hoại chọc thủng cực hạn: $V_{test} = 862$ kN. Tỷ số khả năng chọc thủng theo thực nghiệm và theo mô hình đề xuất $V_{test}/V_{prop} = 1,16 > 1,0$ cho thấy kết quả tính toán của mô hình thiên về an toàn và có độ chính xác đảm bảo.



Hình 4. Sơ đồ mẫu sàn thí nghiệm của nhóm tác giả Angelo Caratelli [6]

5.2. Kiểm chứng mô hình đối với 26 mẫu thí nghiệm

Trên cơ sở các nghiên cứu thực nghiệm về phá hoại chọc thủng sàn bê tông cốt liệu nhẹ của các tác giả trên thế giới, kiểm chứng công thức đề xuất (10) đối với 26 mẫu thí nghiệm được tổng hợp trong Bảng 1.



Hình 5. Biểu đồ kiểm chứng công thức (10) và các thí nghiệm sàn phẳng bê tông nhẹ. Kết quả cho thấy tỷ số giữa tải trọng chọc thủng theo thực nghiệm và theo công thức đề xuất (10) trung bình là 1,14 với hệ số biến động (COV) bằng 0,08. Kết quả này cho thấy mô hình đề xuất có độ chính xác, mức độ phân tán nhỏ và có độ dự trữ an toàn hợp lý.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất mô hình và công thức tính toán khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng bê tông nhẹ dựa trên lý thuyết vết nứt tới hạn, có xét tới ảnh hưởng của tính chất và kích thước cốt liệu keramzit, khối lượng thể tích bê tông nhẹ, đường kính cốt liệu mịn lớn nhất và ảnh hưởng của góc xoay của sàn phẳng bê tông nhẹ. Công thức đề xuất đã được kiểm chứng với 26 mẫu thí nghiệm được tổng hợp từ 10 bài báo quốc tế khoa học uy tín. Tỷ số trung bình giữa tải trọng gây chọc thủng theo thực nghiệm và theo công thức đề xuất là 1,14, hệ số biến động $COV = 0,08$ cho thấy mô hình có độ chính xác, mức độ phân tán nhỏ và có độ dự trữ an toàn hợp lý.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 5574:2018. Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2018.
- [2] ACI 318R-19. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute 318R-19, Farmington Hills, MI, USA, 2019.
- [3] Eurocode 2 (EC2). Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992-1-1, Brussels, Belgium., 2004.
- [4] Fédération Internationale du Béton (fib). Fib Model Code for Concrete Structures 2010, MC 2010, Berlin, Germany, 2013, doi: 10.1002/9783433604090.
- [5] A. Muttoni. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. ACI Struct. J., vol. 105, no. 4, pp. 440-450, 2008, doi: 10.14359/19858.
- [6] A. Caratelli, S. Imperatore, A. Meda and Z. Rinaldi. Punching shear behavior of lightweight fiber reinforced concrete slabs. Compos. Part B Eng., vol. 99, pp. 257-265, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.06.045.
- [7] K. Wille and F. Dehn. Fracture Mechanical Behaviour of Lightweight Aggregate Concrete. in Proc. Int. Conf. Role of Concrete in Sustainable Development, Dundee, U.K., 2003, pp. 527-535, doi: 10.1680/rocisd.32477.0051.
- [8] M. Kalus, J. Ungermann, M. Classen and J. Hegger. Punching shear in flat slab systems - Experimental quantification of unconsidered system influences. Struct. Concr., vol. 27, no. 2, pp. 1406-1420, 2026, doi: 10.1002/suco.70234.
- [9] A. Deifalla. Design of lightweight concrete slabs under two-way shear without shear reinforcements: A comparative study and a new formula. Eng. Struct., vol. 222, no. 111076, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111076.

[10] M. Goldyn. Application of the Critical Shear Crack Theory for calculation of punching shear capacity of lightweight aggregate concrete slabs. Arch. Civ. Eng., vol. 69, no. 1, pp. 55-70, 2023, doi: 10.24425/ace.2023.144159.

[11] T. Ha, M.-H. Lee, J. Park, and D.-J. Kim. Effects of openings on the punching shear strength of RC flat plate slabs without shear reinforcement. Struct. Des. Tall Spec. Build., vol. 24, no. 13, pp. 895-911, 2015, doi: 10.1002/tal.1217.

[12] A. A. Zaher, A. A. Abdelrahman, A. S. Eldeib and A. A. Mohamed. Punching Shear Behavior of Lightweight Foamed RC Slabs. Int. J. Appl. Innov. Eng. Manag., vol. 4, no. 7, pp. 67-74, 2015.

[13] K. S. Youm, J. J. Kim, and J. Moon. Punching shear failure of slab with lightweight aggregate concrete and low reinforcement ratio. Constr. Build. Mater., vol. 65, pp. 92-102, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.097.

[14] R. N. F. Carmo, H. Costa, and M. Rodrigues. Experimental study of punching failure in LWAC slabs with different strengths. Mater. Struct., vol. 49, no. 7, pp. 2611-2626, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0671-x.

[15] M. Goldyn, L. Krawczyk, W. Rzyński, and T. Urban. Experimental investigations on punching shear of flat slabs made from lightweight aggregate concrete. Arch. Civ. Eng., vol. 64, no. 4, pp. 293-306, 2018, doi: 10.2478/ace-2018-0058.

[16] S. T. Abd Alkarem and A. K. Al-Asadi. Effect of Crimped Steel Fiber Ratios on Punching Shear Strength of Lightweight Concrete Slabs. Samarra J. Eng. Sci. Res., vol. 2, no. 4, pp. 24-41, 2024.

[17] M. Said, M. A. Adam, A. E. Arafa, and A. Moatasem. Improvement of punching shear strength of reinforced lightweight concrete flat slab using different strengthening techniques. J. Build. Eng., vol. 32, no. 101749, 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101749.

[18] J. L. Clarke and F. K. Birjandi. Punching shear resistance of lightweight aggregate concrete slabs. Mag. Concr. Res., vol. 42, no. 152, pp. 171-176, 1990, doi: 10.1680/mac.1990.42.152.171.

[19] E. Hognestad, R. C. Elstner and J. A. Hanson. Shear strength of reinforced structural lightweight aggregate concrete slabs. ACI J. Proc., vol. 61, no. 6, pp. 643-656, 1964, doi: 10.14359/7800.