



Phân tích tác động của khối xây chèn đến ứng xử động đất của khung bê tông cốt thép có xét lỗ mở và tầng mềm

Analysis of the impact of infill masonry on the seismic behavior of reinforced concrete frames with openings and soft stories

Phạm Phú Anh Huy^{a,b*}, Lê Cao Vinh^{a,b}, Nguyễn Văn Tiền^{b,c}
Pham Phu Anh Huy^{a,b*}, Le Cao Vinh^{a,b}, Nguyen Van Tien^{b,c}

^a*Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^a*Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam*

^b*Khoa Xây dựng, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^b*Faculty of Civil Engineering, School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam*

^c*Công ty TNHH Xây dựng Hữu Tiên, Đà Nẵng, Việt Nam*

^c*Huu Tien Limited Construciton Company, Da Nang, 550000, Viet Nam*

(Ngày nhận bài: 03/03/2025, ngày phản biện xong: 28/05/2025, ngày chấp nhận đăng: 17/06/2025)

Tóm tắt

Bài báo phân tích ảnh hưởng của tường xây chèn (TXC) có lỗ mở đến sự làm việc của khung bê tông cốt thép (BTCT) dưới tác động của động đất. Thông qua mô hình phân tích số, bài báo đánh giá các thông số kết cấu quan trọng bao gồm chuyển vị ngang (Δ), mô men uốn (M) và lực cắt (Q) tại chân cột, với các giá trị tỷ lệ mở lỗ 0-100%, và độ dày tường chèn $d = (70 - 330)mm$ cho các trường hợp lỗ đối xứng, không đối xứng và tầng mềm. Kết quả cho thấy khi tỷ lệ mở lỗ tăng, độ cứng tổng thể của hệ khung giảm, làm tăng chuyển vị ngang, mô men uốn lớn hơn và sự thay đổi lực cắt tại chân cột. Trong trường hợp lỗ đối xứng và không đối xứng, TXC mỏng ($d = 70mm, 110mm$) dễ làm khung bị suy giảm khả năng chịu tải và độ cứng hơn so với tường chèn dày ($d = 220mm, 330mm$), đặc biệt khi tỷ lệ mở lỗ vượt 60%. Bên cạnh đó, tầng mềm làm giảm đáng kể độ cứng của hệ khung, dẫn đến chuyển vị ngang lớn hơn và giảm khả năng chịu tải ngang. Trên cơ sở đó, bài báo đã đề xuất một số khuyến nghị thiết kế, bao gồm giới hạn tỷ lệ mở lỗ dưới 60% để duy trì độ cứng tổng thể, ưu tiên lỗ mở đối xứng để cải thiện sự phân bố ứng suất, và sử dụng tường chèn dày hơn ($\geq 220mm$) nếu tỷ lệ mở lỗ vượt 60% để giảm tác động tiêu cực đến hệ khung. Những kết quả này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho thiết kế và tối ưu hóa khung BTCT có TXC, giúp đảm bảo độ ổn định và khả năng chịu tải ngang của công trình.

Từ khóa: Khung bê tông cốt thép; tường xây chèn; tỷ lệ mở lỗ; tải trọng ngang; độ cứng kết cấu.

Abstract

The study analyzed the influence of infill masonry walls (IMWs) with openings on the behavior of reinforced concrete (RC) frames under seismic loading. Through numerical modeling, key structural parameters including lateral displacement (Δ), bending moment (M), and base shear (Q) were evaluated for various opening ratios (0–100%) and wall thicknesses $d = (70 - 330)mm$, considering symmetric openings, asymmetric openings, and soft-story configurations. The results showed that as the opening ratio increased, the overall stiffness of the frame decreased, leading to larger lateral displacements, higher bending moments, and variations in base shear forces. In the cases of symmetric and asymmetric openings, thinner infill walls ($d = 70mm, 110mm$) caused more significant reductions in load-bearing capacity and stiffness compared to thicker walls ($d = 220mm, 330mm$), particularly when the opening ratio exceeded 60%. Furthermore, the presence of a soft story substantially reduced the frame's stiffness, resulting in greater lateral displacements and diminished lateral load resistance. Based on these findings, the study proposed several design

recommendations, including limiting the opening ratio to below 60% to maintain overall stiffness, prioritizing symmetric opening layouts to improve stress distribution, and employing thicker infill walls ($\geq 220\text{mm}$) when high opening ratios are required to mitigate adverse effects on the structural system. These results provided a scientific basis for the design and optimization of RC frames with IMWs, contributing to enhanced structural stability and seismic load resistance.

Keywords: Reinforced concrete frames; infilled masonry walls; opening ratio; lateral loads; structural stiffness.

1. Đặt vấn đề

TXC trong khung BTCT đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện độ cứng và khả năng chịu tải ngang của hệ kết cấu. Tuy nhiên, khi có lỗ mở trên TXC, đặc tính cơ học của khung thay đổi đáng kể, ảnh hưởng đến độ bền, khả năng chịu tải và phân bố ứng suất. Các yếu tố như tỷ lệ mở lỗ, vị trí lỗ, và độ dày TXC có tác động lớn đến khả năng làm việc của khung BTCT, đặc biệt trong điều kiện chịu tải trọng động đất. Do đó, việc nghiên cứu sự ảnh hưởng của TXC có lỗ mở đến hệ kết cấu là cần thiết để đưa ra các giải pháp thiết kế tối ưu, đảm bảo độ ổn định và an toàn của công trình. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng TXC có thể làm thay đổi nguyên tắc thiết kế truyền thống của khung BTCT, đặc biệt trong việc phân bố độ cứng giữa dầm và cột. Phan Văn Huệ [1] đã chỉ ra rằng sự tương tác giữa TXC và khung làm tăng độ cứng uốn của dầm, từ đó làm thay đổi nguyên tắc thiết kế “dầm yếu - cột khỏe” trong tiêu chuẩn thiết kế kháng chấn. Kết quả phân tích tĩnh phi tuyến cho thấy, khi xét đến TXC, độ cứng của hệ khung BTCT tăng lên đáng kể, dẫn đến sự thay đổi trong cơ chế phá hoại dẻo theo tiêu chuẩn TCVN 9386:2012 [2]. Tương tự, Đinh Lê Khánh Quốc [3] đã đề xuất mô hình thanh chéo tương đương cải tiến, giúp mô phỏng chính xác hơn sự phân bố nội lực trong TXC, đặc biệt là khi có sự hiện diện của lỗ mở. Kết quả phân tích cho thấy mô hình này có thể phản ánh tốt hơn khả năng chịu tải ngang của khung BTCT có TXC so với các mô hình truyền thống.

Các nghiên cứu thực nghiệm khác cũng cho thấy lỗ mở trong TXC có tác động đáng kể đến sự ổn định của hệ thống. Dalibor Burilo và cộng sự [4] đã thử nghiệm một mô hình khung BTCT có TXC bằng gạch trên bàn rung, mô phỏng

mười chuyển động nền từ trận động đất Montenegro năm 1979. Kết quả cho thấy độ lệch tâm ngẫu nhiên, do sự hư hại không đồng đều của TXC, có thể vượt quá giá trị quy định trong các tiêu chuẩn thiết kế. Điều này làm tăng nguy cơ xoắn không mong muốn của công trình, đặc biệt trong điều kiện động đất, và cần được xem xét kỹ lưỡng ngay cả đối với các công trình thông thường. Umar và cộng sự [5] đã thực hiện thử nghiệm giả tĩnh trên hai mô hình khung BTCT có TXC với tỷ lệ thực tế, trong đó một mẫu có cửa sổ lệch tâm và một mẫu có cửa sổ đối xứng. Kết quả cho thấy, khung có TXC với ít lỗ mở hơn thể hiện khả năng chịu tải ngang tốt hơn, độ cứng cao hơn và tiêu tán năng lượng hiệu quả hơn so với khung có nhiều lỗ mở. Đặc biệt, lỗ không đối xứng và lỗ góc có xu hướng làm giảm đáng kể khả năng chịu tải ngang, do sự phân bố ứng suất không đồng đều và tạo ra các khu vực yếu trong kết cấu. Polyakov [6] đã tiến hành các thí nghiệm thực nghiệm trên các khung có tường xây chèn, đề xuất rằng hệ thống chèn hoạt động như một khung giằng, với tường tạo thành các “thanh chống” chịu nén. Crisafulli và cộng sự [7] cung cấp một tổng quan về các phương pháp phân tích khung có TXC, bao gồm các mô hình vi mô và mô hình vĩ mô, nhấn mạnh những ưu và nhược điểm của từng phương pháp. Asteris [8] đã đề xuất một tiêu chí thực tế để mô tả sự tách rời giữa khung và TXC, nhằm mô phỏng chính xác hơn ứng xử phức tạp của khung có TXC dưới tải trọng ngang. Phương pháp này tính toán chiều dài tiếp xúc và ứng suất tiếp xúc giữa TXC và khung như một phần tích hợp của giải pháp, thay vì giả định một cách tùy tiện.

Sự tương tác giữa khung BTCT và TXC đóng vai trò quan trọng trong ứng xử kết cấu của công trình, đặc biệt khi xét đến các yếu tố như độ dày

$$W_0 = \sqrt{\alpha_h^2 + \alpha_l^2} \quad (1)$$

Trong đó $\alpha_h = h_c$ là chiều dài đoạn tiếp xúc giữa cột và TXC; $\alpha_l = l_b$ là chiều dài đoạn tiếp xúc giữa dầm và TXC; $\alpha_h = \frac{\pi}{2\lambda_h}$; $\alpha_l = \frac{\pi}{2\lambda_l}$;
 $\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_w d}{4E_f I_{ch}}} \sin 2\theta$; $\lambda_l = \sqrt[4]{\frac{E_w d}{4E_f I_{bl}}} \sin 2\theta$;
 $E_w = E_f$ là mô-đun đàn hồi của TXC.

Chiều rộng của thanh chống xiên ảnh hưởng lớn đến độ chính xác của mô hình, Mainstone [10] đã đề xuất bề rộng hiệu dụng như phương trình (2).

$$W_{ds} = 0,175 \sqrt{l^2 + h^2} (\lambda_h h)^{-0,4} \quad (2)$$

Trong đó l là chiều dài của TXC; h là chiều cao của TXC; λ_h là một hệ số liên quan đến tỷ lệ chiều cao tường và chiều dài khung, thường được lấy từ các tiêu chuẩn thiết kế và phụ thuộc vào các yếu tố như độ cứng của khung, tải trọng và tính chất vật liệu; h là chiều cao của TXC.

2.2. Mô hình phần tử hữu hạn (Finite Element Model)

Phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) được sử dụng để mô hình hóa chi tiết TXC và sự tương tác với khung BTCT, cho phép phân tích phi tuyến của kết cấu, bao gồm nứt, biến dạng lớn và phá hoại của TXC. PTHH mô phỏng chính xác đặc tính vật liệu và hình học, vượt trội hơn so với phương pháp phân tích tuyến tính trong việc dự đoán ứng xử kết cấu dưới tải trọng phức tạp. Phương pháp này có thể áp dụng cho nhiều loại kết cấu với hình dạng và điều kiện biên đa dạng. Tuy nhiên, PTHH yêu cầu dữ liệu chi tiết về vật liệu, hình học và điều kiện biên để đảm bảo độ chính xác, đồng thời cần phần mềm chuyên dụng và khả năng tính toán cao, đặc biệt đối với kết cấu lớn hoặc phức tạp. Thời gian và chi phí tính toán cũng cần được xem xét, nhất là trong các nghiên cứu chuyên sâu hoặc tối ưu hóa thiết kế. PTHH đã được ứng dụng rộng rãi trong phân tích ứng xử của khung BTCT có TXC, như trong các nghiên cứu [3, 8].

2.3. Mô hình khớp dẻo tập trung (Concentrated plastic hinge model)

Mô hình khớp dẻo tập trung giả định rằng biến dạng dẻo chỉ xảy ra tại các khớp dẻo ở đầu các cấu kiện, trong khi phần còn lại duy trì trạng thái đàn hồi. Các khớp dẻo này đóng vai trò chuyển tiếp từ trạng thái đàn hồi sang dẻo, thường xuất hiện tại các vị trí liên kết. Phương pháp này giúp đơn giản hóa mô hình phân tích nhưng vẫn mô phỏng hợp lý hành vi kết cấu dưới tải trọng. TXC được mô hình hóa dưới dạng phần tử đàn hồi hoặc phi tuyến đơn giản, với nứt và phá hoại tập trung tại các khu vực xác định trước. Phương pháp khớp dẻo tập trung đặc biệt hữu ích trong phân tích tĩnh phi tuyến (pushover analysis), giúp đánh giá khả năng chịu lực của kết cấu dưới tải trọng động hoặc tĩnh. Tuy nhiên, phương pháp này có hạn chế khi áp dụng cho các bài toán phức tạp, đặc biệt khi cần phân tích chi tiết hành vi phi tuyến ngoài các vùng khớp dẻo [11, 12].

2.4. Mô hình vi mô (Micro modeling)

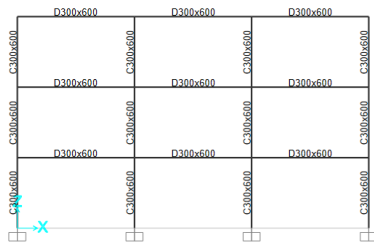
Phương pháp mô hình vi mô mô phỏng chi tiết từng thành phần của TXC, bao gồm các viên gạch, mạch vữa và sự tương tác với khung BTCT. Mỗi thành phần tường được mô hình hóa riêng biệt, cho phép phân tích các lực và ứng xử cơ học giữa các vật liệu. Phương pháp này mô phỏng chính xác các đặc trưng phi tuyến của TXC dưới tác động ngang, như sự phát triển vết nứt, biến dạng cục bộ và phá hoại của từng phần tử. Mô hình vi mô giúp đánh giá phân bố ứng suất, sự lan truyền vết nứt và biến dạng không đồng đều, rất quan trọng trong phân tích tương tác giữa vật liệu trong tường chèn và khung BTCT. Tuy nhiên, phương pháp này yêu cầu dữ liệu chi tiết về vật liệu và hình học, dẫn đến khối lượng tính toán lớn và đòi hỏi phần mềm mạnh mẽ, làm tăng độ phức tạp và không phù hợp với phân tích nhanh hoặc mô phỏng quy mô lớn. Mô hình vi mô thường được sử dụng trong nghiên cứu chuyên sâu hoặc khi cần phân tích chi tiết

các hiện tượng mà mô hình đơn giản không thể mô phỏng chính xác [9, 13].

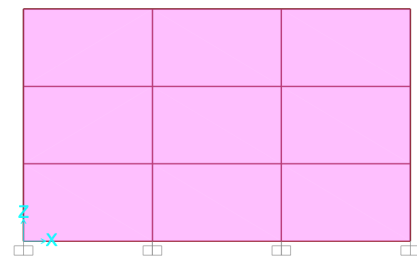
3. Bài toán nghiên cứu

Nhóm tác giả đã sử dụng các kết quả nghiên cứu thực nghiệm và quy định về các thông số cơ học của gạch đất sét nung, khối xây của các tác giả và tiêu chuẩn [14–17]. Đồng thời, dựa trên các công thức đề xuất của các nghiên cứu đã trình bày trong Mục 2, nhóm tác giả phát triển mô hình số nhằm đánh giá ảnh hưởng của khối xây chèn đến chuyển vị ngang cũng như nội lực trong cột khung. Mô hình số được xây dựng dựa trên các giả thiết cụ thể như (1) vật liệu làm việc đàn hồi (2); quan hệ giữa lực và chuyển vị là phi tuyến; (3) sự làm việc chung giữa tường và khung BTCT là lý tưởng; (4) khối xây gạch làm việc đồng nhất, các chỉ tiêu cơ lý được lấy theo điều kiện sản xuất tại Việt Nam. Để nghiên cứu

tác động của TXC đến sự làm việc của khung BTCT, nhóm tác giả lựa chọn mô hình khung phẳng 3 tầng chịu tác động của các loại tải trọng, bao gồm tải trọng tĩnh do trọng lượng bản thân kết cấu, tải trọng tĩnh từ trọng lượng TXC, hoạt tải sử dụng, và tải trọng động đất theo TCVN 9386:2012 [2] (với giả thiết nền loại C). Mặc dù ảnh hưởng của tường xây chèn đến sự làm việc của khung BTCT đã được nhiều tác giả trong và ngoài nước nghiên cứu, tuy nhiên, việc xem xét ảnh hưởng của khối xây bằng gạch đất sét nung sản xuất tại Việt Nam, cùng với ảnh hưởng của các loại lỗ mở trong tường đến sự làm việc của khung BTCT dưới tác động của tải trọng ngang vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Do đó, mục tiêu của bài báo là phân tích sự làm việc của khung BTCT, cụ thể là chuyển vị ngang, mô men uốn, lực cắt tại chân cột xét đến ảnh hưởng của tường xây chèn khi có và không có lỗ mở.



(a) Kích thước tiết diện dầm và cột khung

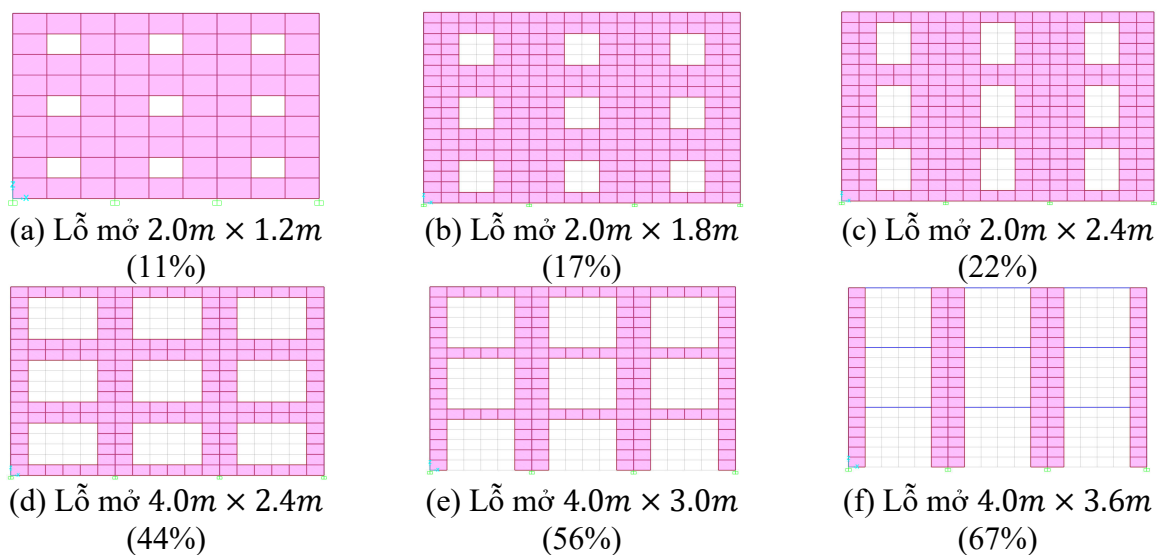


(b) Bố trí tường chèn khung

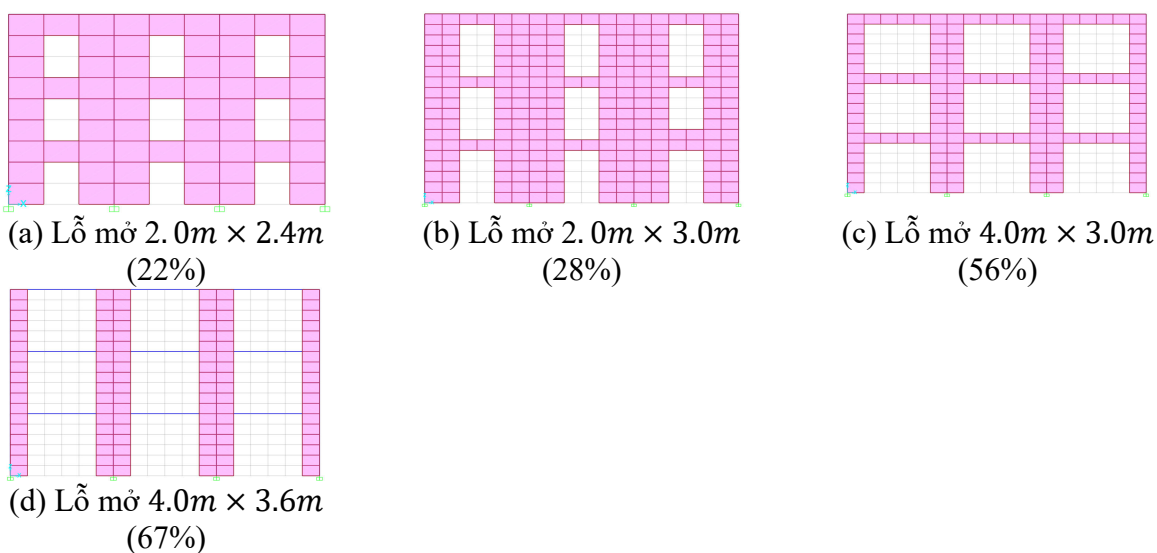
Hình 4. Kích thước tiết diện dầm, cột khung, và bố trí TXC

Để đánh giá ảnh hưởng của TXC và lỗ mở trong tường đến sự làm việc của khung BTCT, nhóm tác giả sử dụng mô hình khung BTCT 3 tầng, 3 nhịp (Hình 4) với các thông số thiết kế cụ thể như sau: nhịp $L = 6m$, chiều cao tầng $h = 3.6m$, bê tông có cường độ chịu nén tính toán $11.5MPa$, cốt thép có giới hạn chảy $300MPa$. Kích thước dầm được chọn là $b \times h = (300 \times 600)mm$, với cốt thép nhịp và gối dầm được bố trí $5\phi 25$. Kích thước cột là $b \times h = (300 \times 600)mm$, với cốt thép dọc $10\phi 25$ được bố trí xung quanh chu vi cột. Tải trọng động đất được mô phỏng dưới dạng lực tĩnh ngang tương đương

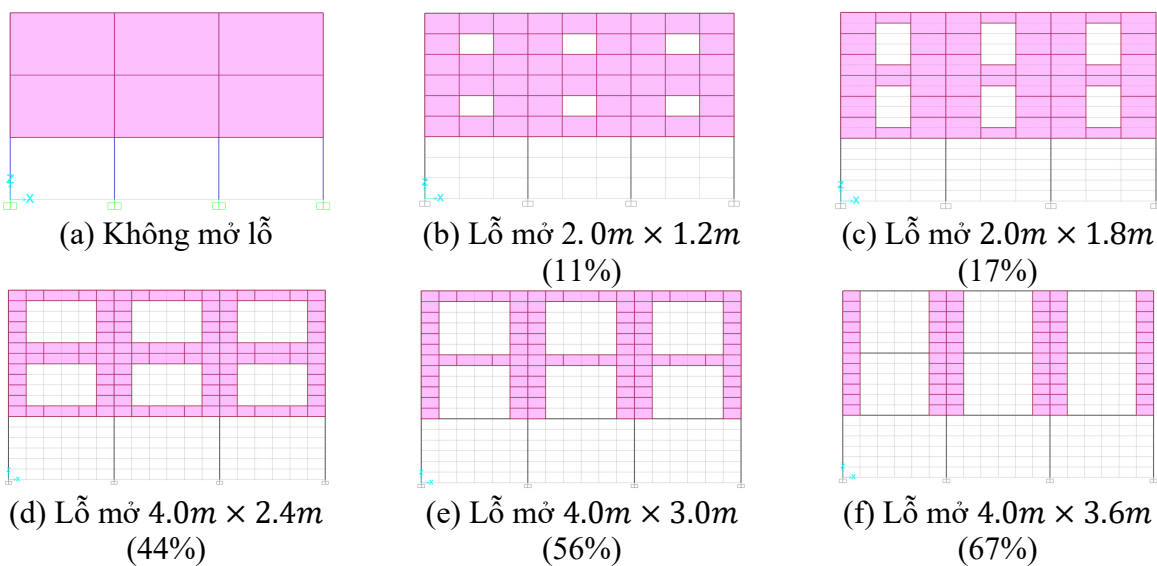
đặt tại nút với giá trị $100kN$. Trong nghiên cứu, tường xây chèn được xây bằng gạch đất sét nung 6 lỗ – loại gạch phổ biến tại Việt Nam – với kích thước $170 \times 140 \times 60mm$, cường độ chịu nén tính toán của khối xây là $1.3MPa$ (tương ứng khối xây sử dụng phổ biến tại Việt Nam bằng gạch mác 75 và vữa xi măng mác 50) và mô đun đàn hồi $3360MPa$ [17]. Ba phương án tạo lỗ trong tường được xem xét, bao gồm lỗ cửa sổ (lỗ đối xứng), lỗ cửa đi (lỗ không đối xứng) và mô hình tầng mềm (không có tường xây ở tầng 1). Các phương án này được minh họa trong các Hình 5, 6 và 7.



Hình 5. Các phương án mở lỗ cửa sổ (lỗ đối xứng)



Hình 6. Các phương án mở lỗ cửa đi (lỗ không đối xứng)

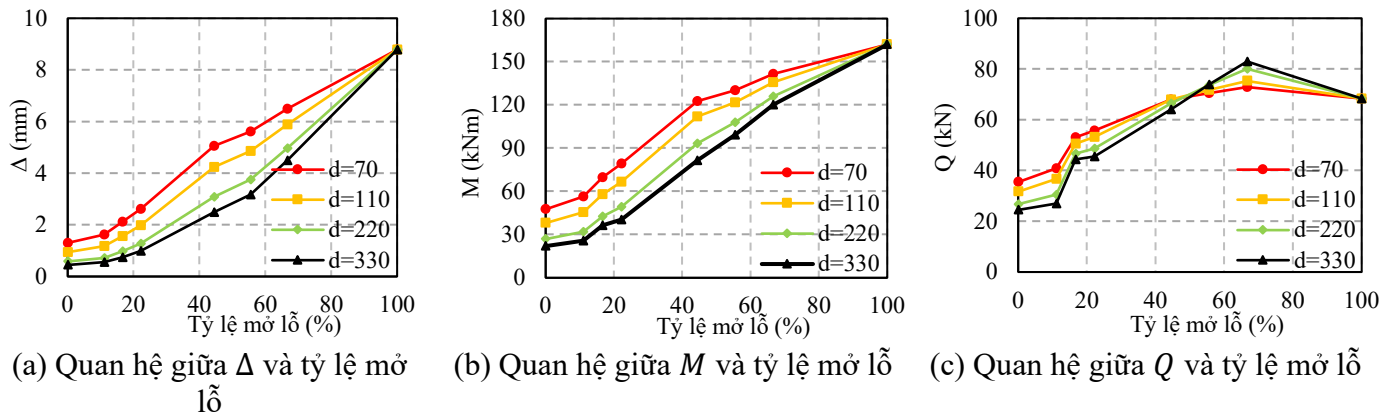


Hình 7. Các phương án tăng mềm

4. Kết quả và thảo luận

Bài toán phân tích được thực hiện trên phần mềm Sap2000 version 26 [18] kết hợp với code trên Matlab [19]. Để thực hiện tính toán các tác giả đã giả thiết TXC làm việc đồng thời với khung BTCT, phương pháp phân tích tĩnh phi

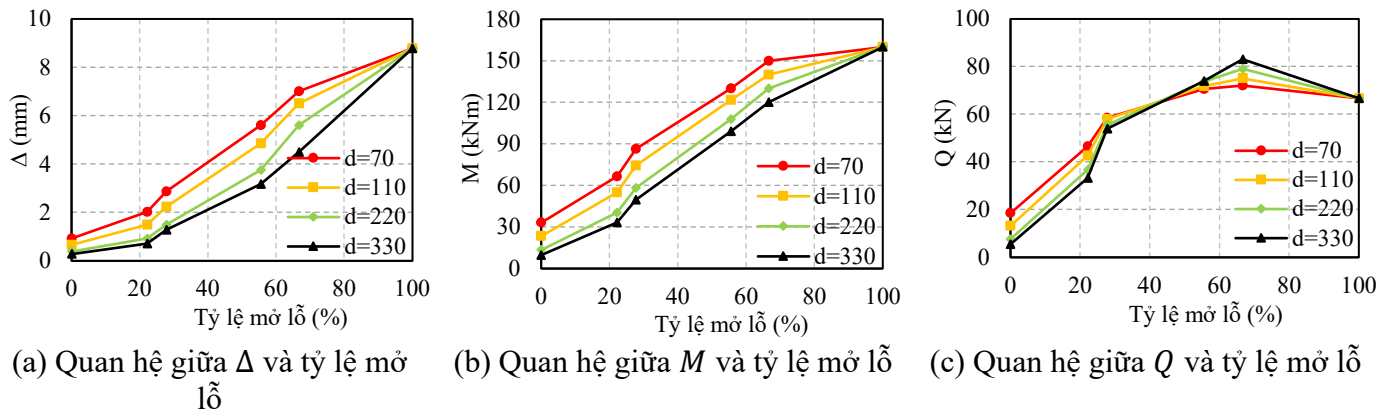
tuyến được áp dụng để nghiên cứu. Mối quan hệ giữa tỷ lệ mở lỗ (%) trên TXC và sự làm việc của khung BTCT thông qua các đại lượng như chuyển vị ngang (Δ), mô men uốn (M) và lực cắt (Q) lớn nhất tại chân cột. Kết quả nghiên cứu được thể hiện từ Hình 8 đến 11.



Hình 8. Chuyển vị ngang (Δ), mômen (M) và lực cắt (Q) tại chân cột, trường hợp lỗ cửa sổ (lỗ đối xứng)

Hình 8 minh họa ảnh hưởng của tỷ lệ mở lỗ (%) đến các thông số kết cấu của khung BTCT, bao gồm chuyển vị ngang (Δ), mô men uốn (M), và lực cắt (Q) tại chân cột, với các chiều dày TXC khác nhau ($d = 70mm, 110mm, 220mm, 330mm$) – đây là các kích thước phổ biến được sử dụng trong xây dựng tại Việt Nam. Kết quả phân tích cho thấy xu hướng chung rằng khi tỷ lệ mở lỗ tăng, Δ của khung cũng tăng, bất kể độ dày của tường chèn. Tường chèn mỏng hơn ($d = 70mm$ và $110mm$) có Δ lớn hơn đáng kể so với các tường dày hơn ($d = 220mm$ và $330mm$), cho thấy rằng tường chèn mỏng ít có khả năng chống chịu với tải trọng ngang hơn. Tường dày hơn ($d = 330mm$) duy trì chuyển vị nhỏ nhất, phản ánh độ cứng và khả năng chịu tải tốt hơn. M tại chân cột khung cũng có xu hướng tăng dần khi tỷ lệ mở lỗ tăng. Giống như chuyển vị ngang, các tường mỏng hơn ($d = 70mm$ và

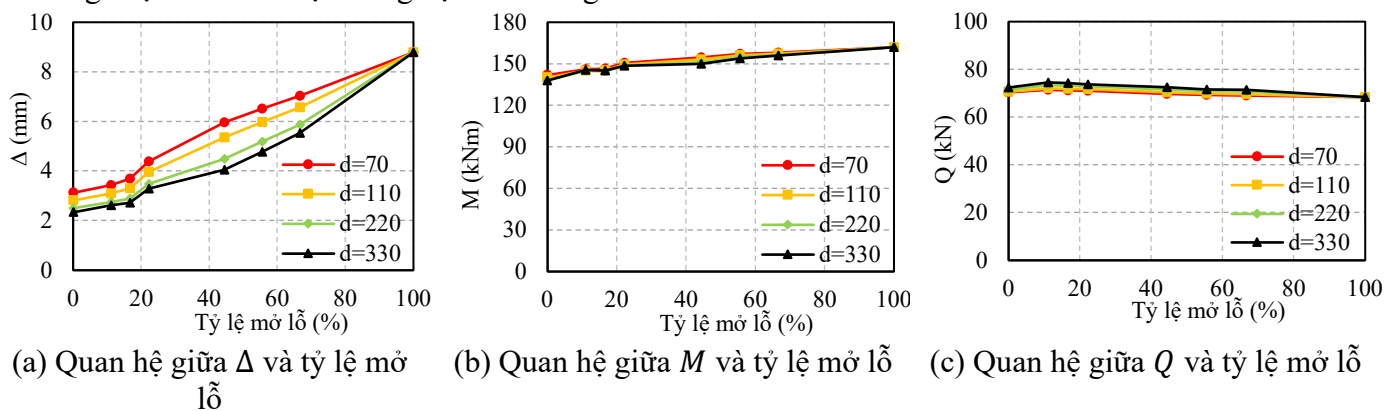
$110mm$) có M lớn hơn so với các tường dày hơn, trong khi tường dày nhất ($d = 330mm$) có mô men uốn nhỏ nhất, chứng tỏ khả năng chống chịu tốt hơn đối với tác động uốn. M tăng đều đặn theo tỷ lệ mở lỗ, tuy nhiên, tốc độ gia tăng có xu hướng chậm lại khi tỷ lệ mở lỗ đạt 60%-100%. Đối với Q tại chân cột khung, giá trị này có xu hướng tăng khi tỷ lệ mở lỗ tăng đến khoảng 60%, sau đó giảm nhẹ khi tỷ lệ mở lỗ tiếp tục tăng đến 100%. Các tường chèn mỏng hơn ($d = 70mm$ và $110mm$) cho thấy tốc độ gia tăng lực cắt nhanh hơn khi tỷ lệ mở lỗ tăng từ 0% đến 60%, nhưng khi tỷ lệ mở lỗ vượt quá 60%, lực cắt bắt đầu giảm. Trong khi đó, tường dày hơn ($d = 220mm$ và $330mm$) có lực cắt (Q) ổn định hơn khi tỷ lệ mở lỗ vượt qua 60%, cho thấy khả năng chống chịu tốt hơn trước lực cắt.



Hình 9. Chuyển vị ngang (Δ), mô men uốn (M) và lực cắt (Q) tại chân cột, trường hợp lỗ cửa đi.

Hình 9 biểu diễn mối quan hệ giữa Δ , M , Q và tỷ lệ mở lỗ (%) tại chân cột khung trong trường hợp lỗ cửa đi. Kết quả cho thấy khi tỷ lệ mở lỗ tăng, Δ cũng tăng lên. Sự gia tăng này trở nên rõ rệt hơn khi tỷ lệ mở lỗ vượt 40%, với mức độ biến dạng tăng nhanh khi tỷ lệ mở lỗ đạt 100%. Hình 9(a) cho thấy tường mỏng ($d = 70\text{mm}$) có Δ lớn hơn đáng kể so với các tường dày hơn ($d = 110\text{mm}$, 220mm , và 330mm). Điều này chỉ ra rằng khi độ dày tường nhỏ, khả năng chống biến dạng giảm, làm cho hệ kết cấu trở nên nhạy cảm hơn với tỷ lệ mở lỗ lớn. Tương tự như chuyển vị ngang, M cũng có xu hướng tăng khi tỷ lệ mở lỗ tăng, tuy nhiên, sự gia tăng này diễn ra tuyến tính hơn. Điều này cho thấy khi tỷ lệ mở lỗ tăng, khả năng chịu uốn của hệ khung bị ảnh hưởng dần

dần theo cách có thể dự đoán trước. Đối với tường dày hơn ($d = 330\text{mm}$), mức tăng M thấp hơn so với các tường mỏng hơn, cho thấy khả năng chịu lực của tường dày tốt hơn, giúp hệ kết cấu duy trì độ cứng tốt hơn ngay cả khi có lỗ mở. Bên cạnh đó, Q có xu hướng tăng nhanh khi tỷ lệ mở lỗ tăng từ 0% đến khoảng 60%, sau đó đạt cực đại và có xu hướng giảm nhẹ khi tỷ lệ mở lỗ tiếp tục tăng đến 100%. Điều này có thể do sự thay đổi trong phân bố ứng suất và biến dạng của hệ kết cấu, khi các phần tử chịu lực thay đổi cách truyền tải trọng. Đối với tường dày hơn ($d = 330\text{mm}$), lực cắt cao hơn so với các tường mỏng hơn, phản ánh khả năng chịu lực cắt tốt hơn của tường có độ dày lớn hơn.



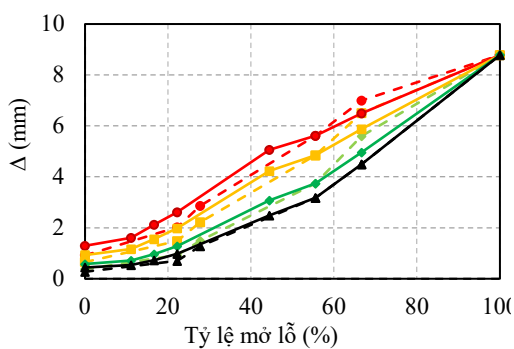
Hình 10. Chuyển vị ngang (Δ), mô men uốn (M) và lực cắt (Q) tại chân cột, trường hợp tầng mềm.

Hình 10 mô tả mối quan hệ giữa Δ , M , Q với tỷ lệ mở lỗ trong cột khung của trường hợp tầng mềm. Kết quả phân tích cho thấy Δ tăng khi tỷ lệ mở lỗ tăng, bất kể giá trị chiều dày TXC (d).

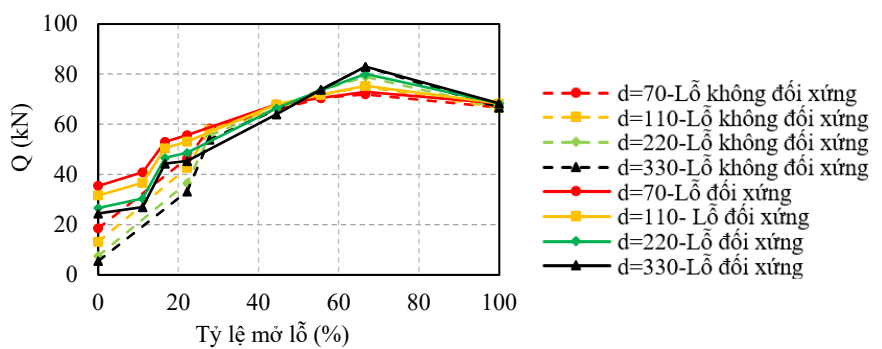
Δ lớn nhất được ghi nhận ở tường có chiều dày nhỏ nhất ($d = 70\text{mm}$), chứng tỏ rằng tường mỏng hơn có khả năng chịu lực kém hơn và dễ bị biến dạng hơn. Khi d tăng, mức độ gia tăng

của Δ giảm đi, điều này cho thấy rằng tường dày hơn có tác dụng hạn chế sự biến dạng của hệ khung do tải trọng ngang tác động lên cột. M có xu hướng tăng khi tỷ lệ mở lỗ tăng, với giá trị M xảy ra tại tỷ lệ mở lỗ cao nhất. Đối với tất cả các giá trị d , M có xu hướng tăng tuyến tính theo tỷ lệ mở lỗ, cho thấy sự thay đổi có thể dự đoán trước khi hệ kết cấu chịu tác động của tải trọng ngang. Tường dày hơn ($d = 220\text{mm}$ và 330mm) duy trì khả năng chịu mô men uốn tốt hơn so với tường mỏng hơn, nhưng sự khác biệt giữa các tường dày không quá lớn, cho thấy rằng

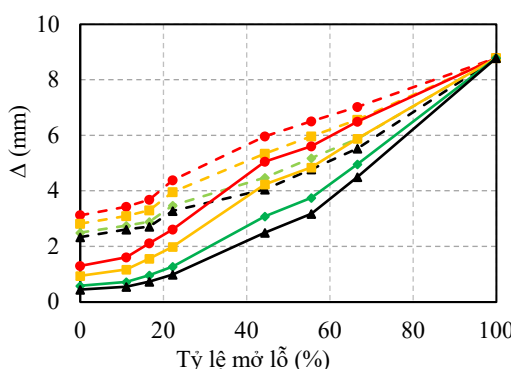
khi tỷ lệ mở lỗ cao, khả năng chịu mô men uốn của hệ khung chủ yếu dựa vào khung BTCT hơn là tường xây chèn. Mặc khác, Q có xu hướng giảm dần khi tỷ lệ mở lỗ tăng, ngoại trừ một số trường hợp đặc biệt. Sự giảm dần của Q rõ rệt nhất ở tường có chiều dày nhỏ ($d = 70\text{mm}$), chứng tỏ rằng tường mỏng không hỗ trợ đáng kể khả năng chịu lực cắt của cột khi có lỗ mở lớn. Điều này cho thấy rằng khả năng chịu lực cắt của cột khung giảm dần khi tỷ lệ mở lỗ tăng, đặc biệt là với các TXC mỏng hơn.



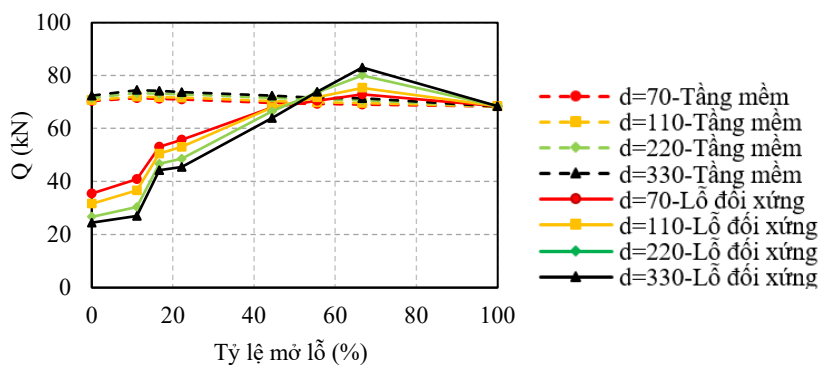
(a) So sánh (Δ) cho 2 trường hợp lỗ đối xứng (Hình 5) và không đối xứng (Hình 6)



(b) So sánh (Q) tại chân cột cho 2 trường hợp lỗ đối xứng (Hình 5) và không đối xứng (Hình 6)



(c) So sánh (Δ) cho 2 trường hợp lỗ đối xứng (Hình 5) và tầng mềm (Hình 7)



(d) So sánh (Q) tại chân cột cho 2 trường hợp lỗ đối xứng (Hình 5) và tầng mềm (Hình 7)

Hình 11. So sánh chuyển vị ngang (Δ) và lực cắt (Q) cho các trường hợp.

Kết quả trong Hình 11 minh họa rõ nét ảnh hưởng của tỷ lệ mở lỗ đến chuyển vị ngang (Δ) và lực cắt chân cột (Q) đối với các trường hợp lỗ đối xứng, không đối xứng, và tầng mềm. Hình 11(a) cho thấy rằng với cùng một độ dày tường và tỷ lệ mở lỗ, sự khác biệt về chuyển vị Δ giữa

lỗ đối xứng và lỗ không đối xứng là không đáng kể khi tỷ lệ mở lỗ dưới 60%. Tuy nhiên, từ mức 60% trở lên, lỗ không đối xứng gây ra chuyển vị Δ lớn hơn (ngoại trừ tường dày 330mm). Điều này chứng minh rằng sự bất đối xứng trong cấu hình lỗ làm suy giảm sự cân bằng độ cứng và gây

nên phân bố ứng suất không đều, từ đó dẫn đến biến dạng tổng thể lớn hơn khi tỷ lệ mở lỗ lớn. Đặc biệt, khi tường có độ dày lớn ($d = 330mm$), sự chênh lệch Δ giữa 2 trường hợp là bé cho mọi tỷ lệ mở lỗ, cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc kiểm soát biến dạng ngang khi bố trí tường dày. Hơn thế nữa, Hình 11(b) cho thấy xu hướng Q tăng mạnh đến khoảng 60% tỷ lệ mở lỗ, sau đó giảm nhẹ. Tuy nhiên, điểm đáng chú ý là Q trường hợp lỗ đối xứng cao hơn so với lỗ không đối xứng ở cùng tỷ lệ mở lỗ, đặc biệt rõ rệt khi tỷ lệ dưới 40%. Các đường biểu diễn Q của nhóm lỗ đối xứng duy trì giá trị cao hơn ổn định và đồng đều hơn, minh chứng cho khả năng phân phối tải trọng tốt hơn nhờ vào sự cân bằng hình học.

Trong khi Hình 11(c) cho thấy sự khác biệt đáng kể về Δ giữa trường hợp tăng mềm và lỗ mở đối xứng. Với cùng tỷ lệ mở lỗ và độ dày tường chèn, trường hợp tăng mềm luôn có giá trị Δ cao hơn rõ rệt so với lỗ đối xứng, đặc biệt trong khoảng dưới 80% tỷ lệ mở lỗ. Sự khác biệt này càng rõ rệt khi tường mỏng ($d = 70mm, 110mm$), phản ánh tác động bất lợi mạnh mẽ của tăng mềm tới độ cứng tổng thể. Bên cạnh đó, Hình 11(d) mô tả biến thiên của Q theo tỷ lệ mở lỗ giữa trường hợp tăng mềm so với lỗ đối xứng. Trong trường hợp lỗ đối xứng đạt cực đại Q tại trong khoảng gần 70% tỷ lệ mở lỗ, thì tăng mềm giữ giá trị Q tương đối ổn định, dao động quanh mức 70 – 80kN, gần như không chịu ảnh hưởng lớn bởi sự thay đổi tỷ lệ mở lỗ. Điều này cho thấy rằng ở trường hợp tăng mềm, tải trọng chủ yếu được truyền qua khung BTCT mà không có sự tham gia hiệu quả của tường chèn. Ngược lại, ở trường hợp lỗ đối xứng, tường chèn đóng vai trò tích cực trong phân bố nội lực, sau đó suy giảm khi hệ dần mất độ cứng do mở lỗ quá lớn.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã phân tích chi tiết ảnh hưởng của TXC với các dạng lỗ mở và tăng mềm đến

ứng xử của khung BTCT khi chịu tác động tải trọng động đất. Các kết quả thu được cho thấy rằng tỷ lệ mở lỗ và độ dày của TXC đóng vai trò quyết định đến độ cứng tổng thể, mức độ chuyển vị ngang (Δ), mô men uốn (M), và lực cắt (Q) tại chân cột khung. Khi tỷ lệ mở lỗ tăng, hệ khung mất dần độ cứng, dẫn đến chuyển vị ngang và mô men uốn tăng cao, đồng thời gây ra biến đổi lực cắt tại chân cột. Khung với TXC mỏng hơn ($d = 70mm$ và $110mm$) dễ bị suy giảm khả năng chịu tải và độ cứng so với các tường dày hơn ($d = 220mm$ và $330mm$), đặc biệt khi tỷ lệ mở lỗ vượt ngưỡng 60%. Đáng chú ý, trường hợp tăng mềm thể hiện rõ nét ảnh hưởng tiêu cực đến độ cứng và khả năng chịu tải của khung, dẫn đến tăng mạnh chuyển vị ngang và suy giảm hiệu quả kiểm soát biến dạng, làm tăng nguy cơ mất ổn định dưới tác động tải trọng ngang. Kết quả nghiên cứu cho thấy nên sử dụng tường chèn dày hơn ($\geq 220mm$), hạn chế tỷ lệ mở lỗ vượt 60% và ưu tiên lỗ mở đối xứng để giảm tác động tiêu cực đến hệ khung.

Tuy nhiên, nghiên cứu này còn một số hạn chế như chỉ xét mô hình phẳng và chưa tính toán đầy đủ các hiệu ứng phi tuyến cũng như các tác động động lực học của động đất và gió. Để tăng tính ứng dụng và chính xác hơn, các nghiên cứu tương lai nên mở rộng phân tích phi tuyến, mô hình ba chiều và tiến hành thực nghiệm kiểm chứng. Kết quả của nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng, hỗ trợ các kỹ sư và nhà thiết kế tối ưu hóa kết cấu khung BTCT có TXC, đảm bảo an toàn và hiệu quả trong thực tiễn xây dựng.

Tài liệu tham khảo

- [1] Huệ, P. V. (2019). "Ảnh hưởng của tường chèn tới việc kiểm soát cơ cấu phá hoại khung bê tông cốt thép chịu động đất". Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng - Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, (13), 58–72. [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(4V\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(4V)-06).
- [2] Viện Khoa học Công nghệ - Bộ Xây dựng. (2012). *Thiết kế công trình chịu động đất (TCVN 9386:2012)*. Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng.
- [3] Quốc, Đ. L. K..(2017). *Ứng xử của khung phẳng bê tông cốt thép có tường xây chèn dưới tác động của tải trọng ngang*. Thành phố Hồ Chí Minh: Đại học

- Bách khoa - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.
- [4] Burilo, D., Markulak, D., Dokšanović, T., Penava, D. (2023). "Reliability assessment of masonry infilled RC frame building's earthquake performance through accidental torsion consideration". *Civil engineering Journal* (9), 483–96. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-02-017>.
- [5] Umar, M., Ali, S., Shahzada, K., Naqash, M. T., Ali, W. (2020). "Assessment of seismic capacity for reinforced concrete frames with perforated unreinforced brick masonry infill wall". *Civil engineering Journal* (6), 2397–415. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091625>.
- [6] Polyakov, S. V. "On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall". Translation by Earthquake engineering research Institute (1), 1–9.
- [7] Crisafulli, F.J., Carr, A. J., Park, R. (2000). "Analytical modelling of infilled frame structures". *Bulletin of New Zealand society for Earthquake engineering* (33), 30–47. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.33.1.30-47>.
- [8] Asteris, P.G. (2008). "Finite element micro-modeling of infilled frames". *Electronic Journal of Structural engineering* (8), 1–11.
- [9] Stafford, S. B. (1967). "Methods for predicting the lateral stiffness and strength of multi-storey infilled frames". *Building science Journal* (2), 247–57. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(67\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0007-3628(67)90027-8).
- [10] Mainstone, R. J. (1971). On the stiffness and strength of infilled frames. *Proceedings of Institution of Civil engineers, 1971*. London, England: Institution of Civil Engineers.
- [11] El-Kholy, A. M., Sayed, S. M., El-Assaly, M. M., Ismail, M. K. (2025). "Modeling of masonry infilled RC frames with different aspect ratios using plastic hinge and equivalent strut". *Journal of Engineering and Applied science* (72), 18-28. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00556-x>.
- [12] Huệ, P. V. (2020). *Ảnh hưởng của tường chèn đến phản ứng của hệ khung bê tông cốt thép chịu động đất* (Luận án tiến sỹ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Hà Nội).
- [13] Surendran, S. B., Kaushik, H. B. (2012). "Masonry infill RC frames with openings: review of in-plane lateral load behaviour and modeling approaches". *Open construction and Building technology Journal* (6), 126-154.
- [14] Trung, N. V., Tình, N. T., Quyên, N. T. L., Qui, D. T. (2024). "Nghiên cứu sử dụng bùn thải làm nguyên liệu sản xuất gạch đất sét nung". *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng* (1), 36-43. <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2024.638>.
- [15] Viện Khoa học Công nghệ - Bộ Xây dựng. (2009). *TCVN 1450:2009 – Gạch rỗng đất sét nung*. Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng.
- [16] Viện Khoa học Công nghệ - Bộ Xây dựng. (2014). *TCVN 1451:1986 Gạch đặc đất sét nung*. Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng.
- [17] Viện Khoa học Công nghệ - Bộ Xây dựng. (2011). *Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 5573:2011, Kết cấu gạch đá và gạch đá cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế*. Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng.
- [18] Computers and Structures Inc. (2016). *SAP2000® version 19.0. 0 release notes 2016*. Walnut Creek, California, USA: CSI.
- [19] Dart-Enander, E., Part-Enander, E., Sjoberg, A. (1999). *The MATLAB 5 handbook*. Reading, Massachusetts, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.