



Ảnh hưởng của chiều dày sàn và vách đến khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình bê tông cốt thép cao tầng dưới các kịch bản mất nhiều cột: Nghiên cứu trường hợp tòa nhà SAO, Thái Lan

Influence of Slab and Shear Wall Thickness on the Progressive Collapse Resistance of a High-Rise Reinforced Concrete Building under Multiple Column Removal Scenarios: A Case Study of the SAO Building, Thailand

Nguyễn Đức Tuấn^a, Nguyễn Thanh Tùng^a, Nguyễn Văn Vương^a, Phạm Phú Anh Huy^{b*, c}
Nguyen Duc Tuan^a, Nguyen Thanh Tung^a, Nguyen Van Vuong^a, Pham Phu Anh Huy^{b*, c}

^aLớp K28XDD, Khoa Xây dựng, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân

^aK28XDD Class, Faculty of Civil Engineering, School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

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

^bInstitute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

^cTrường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^cSchool of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

(Ngày nhận bài: 19/6/2026, ngày phản biện xong: 04/7/2026, ngày chấp nhận đăng: 9/7/2026)

Tóm tắt

Sụp đổ lũy tiến là một trong những dạng phá hoại nghiêm trọng nhất đối với nhà cao tầng bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt khi hư hỏng cục bộ xảy ra trong điều kiện công trình đang chịu tác động động đất. Nghiên cứu này đề xuất một quy trình phân tích tích hợp ETABS–Python–MATLAB nhằm đánh giá khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình Văn phòng Kiểm toán Nhà nước (SAO), Bangkok, Thái Lan, dưới tác động kết hợp giữa động đất và các kịch bản mất đồng thời từ 1 đến 8 cột. ETABS được sử dụng để thực hiện phân tích động phi tuyến theo lịch sử thời gian, Python hỗ trợ tự động hóa các kịch bản phân tích thông qua API, trong khi MATLAB đảm nhiệm xử lý và đánh giá kết quả. Nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của chiều dày sàn (150–350 mm) và chiều dày vách (200–600 mm) đến phản ứng động và khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình. Kết quả cho thấy số lượng cột bị loại bỏ là tham số ảnh hưởng lớn nhất đến ứng xử kết cấu, với ngưỡng hư hỏng tới hạn xuất hiện khi khoảng 5–6 cột bị loại bỏ. Việc tăng chiều dày sàn từ 150 mm lên 350 mm giúp giảm khoảng 20–23% chuyển vị, giảm gần 19% hệ số khuếch đại động và chỉ số sụp đổ, đồng thời làm tăng hơn 25% lực kéo catenary. Trong khi đó, tăng chiều dày vách từ 200 mm lên 600 mm giúp giảm khoảng 28–33% chuyển vị, giảm gần 28% chỉ số sụp đổ và tăng khoảng 32% chỉ số độ bền vững của kết cấu. Phân tích mối quan hệ giữa chỉ số sụp đổ và tỷ số độ cứng tương đối cho thấy việc gia tăng độ cứng của hệ vách giúp cải thiện đáng kể ứng xử tổng thể nhưng chưa đủ để loại bỏ hoàn toàn nguy cơ sụp đổ lũy tiến. Khả năng chống sụp đổ của công trình phụ thuộc vào sự kết hợp giữa độ cứng của hệ vách và khả năng huy động hiệu quả các cơ chế màng và dây treo trong hệ dầm–sàn.

Từ khóa: Sụp đổ lũy tiến, bê tông cốt thép, mất cột, cơ chế catenary, chỉ số hư hỏng, ETABS, Python, MATLAB

*Tác giả liên hệ: Phạm Phú Anh Huy
Email: phampanhhuy@duytan.edu.vn

Abstract

Progressive collapse is one of the most critical failure modes in reinforced concrete (RC) high-rise buildings, particularly when localized structural damage occurs during seismic excitation. This study proposes an integrated ETABS–Python–MATLAB framework to evaluate the progressive collapse resistance of the State Audit Office (SAO) building in Bangkok, Thailand, subjected to combined earthquake loading and simultaneous removal of one to eight columns. ETABS is employed to perform nonlinear time-history analyses, Python automates model generation and analysis through the application programming interface (API), and MATLAB is used for post-processing and performance evaluation. Parametric analyses are conducted to investigate the influence of slab thickness (150–350 mm) and shear wall thickness (200–600 mm) on structural response and collapse resistance. The results indicate that the number of removed columns is the dominant factor governing structural behaviour, with a critical damage threshold occurring at approximately five to six removed columns. Increasing the slab thickness from 150 mm to 350 mm reduces structural displacement by approximately 20–23%, decreases the dynamic amplification factor and collapse index by about 19%, and increases catenary tensile force by more than 25%. Increasing the shear wall thickness from 200 mm to 600 mm provides greater improvements, reducing displacement by approximately 28–33%, decreasing the collapse index by about 28%, and increasing the robustness index by approximately 32%. The relationship between the collapse index and the relative stiffness ratio indicates that although a stiffer shear wall system substantially improves global structural performance, it alone cannot eliminate the risk of progressive collapse. Overall, the progressive collapse resistance of RC high-rise buildings depends on the combined contribution of shear-wall stiffness and the effective development of membrane and catenary actions within the beam–slab system.

Keywords: progressive collapse, reinforced concrete building, column removal, catenary action, damage index, ETABS, Python, MATLAB

1. Đặt vấn đề

Trong hơn hai thập kỷ qua, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm đánh giá khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình bê tông cốt thép (BTCT). Các công trình của Izzuddin và cộng sự [1], Marjanishvili [2], Kaewkulchai và Williamson [3] đã đặt nền tảng cho các phương pháp phân tích sụp đổ lũy tiến dựa trên phản ứng động và cơ chế đường truyền tải trọng thay thế (alternate load path). Đối với kết cấu BTCT, các nghiên cứu của Qian và Li [4], Yu và Tan [5] đã làm rõ ứng xử động của hệ kết cấu sau khi xảy ra mất cột. Đồng thời, các tác giả chỉ ra rằng khả năng tái phân phối nội lực cùng với độ dẻo của kết cấu đóng vai trò quyết định trong việc ngăn chặn sự lan truyền phá hoại.

Bên cạnh cơ chế tái phân phối nội lực của hệ khung, nhiều nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số đã chứng minh rằng khả năng chống sụp đổ lũy tiến còn phụ thuộc đáng kể vào sự phát triển của các cơ chế chịu lực phi tuyến trong giai đoạn sau khi mất cột. Regan [6] là một trong những nghiên cứu đầu tiên chỉ ra vai trò của “cơ chế dây treo - catenary action” trong các cấu kiện BTCT bị hư hỏng nghiêm trọng. Sau đó, Kim và

An [7] cho thấy lực kéo dọc phát triển trong dầm có thể hình thành các đường truyền tải trọng thay thế hiệu quả khi kết cấu làm việc trong miền biến dạng lớn. Gần đây hơn, Wang và cộng sự [8] chứng minh rằng bản sàn có thể tham gia đáng kể vào quá trình truyền lực thông qua “cơ chế màng - membrane action”. Cơ chế này giúp giảm sự tập trung nội lực cục bộ và nâng cao độ bền dư của hệ kết cấu sau khi mất cấu kiện chịu lực.

Mặc dù đã đạt được nhiều kết quả quan trọng, phần lớn các nghiên cứu hiện nay vẫn tập trung vào các kịch bản mất một cột đơn lẻ theo hướng dẫn của GSA (General Services Administration) hoặc UFC (Unified Facilities Criteria) [9,10]. Nhiều mô hình nghiên cứu sử dụng khung phẳng hai chiều hoặc phương pháp phân tích tĩnh tương đương nhằm giảm chi phí tính toán [1–3]. Các giả thiết này cho phép đánh giá sơ bộ khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình. Tuy nhiên, chúng chưa phản ánh đầy đủ bản chất không gian của hệ kết cấu cũng như sự tương tác giữa phản ứng động, phi tuyến vật liệu và phi tuyến hình học trong các điều kiện tải trọng cực hạn.

Đối với các công trình nằm trong vùng có nguy cơ động đất, khoảng trống nghiên cứu còn

rõ rệt hơn. Thực tế cho thấy nhiều sự cố sụp đổ xảy ra sau các trận động đất lớn không bắt nguồn từ sự phá hoại đồng thời của toàn bộ hệ kết cấu. Thay vào đó, quá trình phá hoại thường khởi phát từ các vùng hư hỏng cục bộ trước khi phát triển thành cơ chế sụp đổ lan truyền. Dưới tác động của động đất mạnh, một số cột hoặc nhóm cột có thể bị suy giảm đáng kể khả năng chịu lực do nứt, chảy dẻo, mất ổn định cục bộ hoặc phá hoại liên kết. Khi công trình đang dao động, sự mất khả năng làm việc của các cấu kiện này có thể gây ra quá trình tái phân phối tải trọng đột ngột, từ đó làm gia tăng đáng kể phản ứng động của toàn bộ hệ kết cấu. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện có chỉ xem xét bài toán mất cột dưới tác động của tải trọng trọng lực hoặc trong điều kiện phân tích tĩnh tương đương. Trong khi đó, các nghiên cứu đánh giá đồng thời ảnh hưởng của động đất, mất nhiều cột và sự tương tác giữa hệ khung–sàn–vách trong mô hình không gian ba chiều vẫn còn tương đối hạn chế [4,5,8].

Một khoảng trống nghiên cứu quan trọng khác là việc định lượng đóng góp tương đối của hệ sàn và hệ vách đối với khả năng chống sụp đổ lũy tiến trong điều kiện động đất. Mặc dù nhiều nghiên cứu đã chứng minh vai trò của “cơ chế màng” trong bản sàn cũng như ảnh hưởng tích cực của lõi vách đến độ cứng tổng thể của công trình [8], vẫn còn thiếu các nghiên cứu tham số đánh giá đồng thời ảnh hưởng của chiều dày sàn, chiều dày vách và mức độ hư hỏng cục bộ dưới tác động kết hợp của động đất và mất cột. Vì vậy, cơ chế tương tác giữa khung, sàn và vách trong việc hình thành các đường truyền tải trọng thay thế, duy trì ổn định tổng thể và hạn chế sự lan truyền phá hoại vẫn chưa được làm rõ đầy đủ.

Xuất phát từ các khoảng trống nghiên cứu nêu trên, bài báo này tập trung đánh giá khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình BTCT cao tầng dưới tác động kết hợp giữa động đất và các kích bản mất nhiều cột đồng thời. Mô hình công

trình được xây dựng bằng phương pháp phân tích động phi tuyến theo lịch sử thời gian, có xét đến phi tuyến vật liệu, phi tuyến hình học và hiệu ứng P– Δ . Quá trình phân tích được thực hiện trên nền tảng tích hợp ETABS–Python–MATLAB. Trong đó, động đất được mô phỏng thông qua các bản ghi gia tốc nền, còn các kích bản mất cột được kích hoạt tại những thời điểm công trình đang dao động. Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của số lượng cột bị loại bỏ, chiều dày bản sàn và chiều dày hệ vách đến phản ứng động, khả năng tái phân phối tải trọng, sự phát triển của “cơ chế dây treo”, mức độ tổn thương kết cấu và nguy cơ sụp đổ lũy tiến của công trình.

Điểm mới chính của nghiên cứu bao gồm:

(1) Đánh giá ứng xử sụp đổ lũy tiến của công trình BTCT không gian ba chiều dưới tác động kết hợp giữa động đất và các kích bản mất nhiều cột đồng thời;

(2) Phân tích định lượng ảnh hưởng của chiều dày sàn đến khả năng huy động “cơ chế màng” và “cơ chế dây treo” trong quá trình tái phân phối tải trọng sau mất cột;

(3) Làm rõ vai trò của hệ vách cứng trong việc kiểm soát phản ứng động, hạn chế hiệu ứng P– Δ và nâng cao độ bền dư của công trình trong điều kiện hư hỏng nghiêm trọng;

(4) Thiết lập mối quan hệ giữa chỉ số sụp đổ và tỷ số độ cứng tương đối giữa hệ vách và hệ sàn nhằm đánh giá hiệu quả của các giải pháp tăng cường độ cứng trong thiết kế chống sụp đổ lũy tiến.

Kết quả nghiên cứu góp phần bổ sung cơ sở khoa học cho việc đánh giá độ bền dư và khả năng chống sụp đổ lũy tiến của nhà cao tầng BTCT dưới tác động đa hiểm họa. Đồng thời, nghiên cứu cung cấp cơ sở tham khảo cho việc phát triển các giải pháp thiết kế nhằm nâng cao mức độ an toàn của công trình trong điều kiện động đất mạnh.

2. Cơ sở lý thuyết của nghiên cứu

2.1. Cơ chế sụp đổ lũy tiến và tái phân phối tải trọng

Sụp đổ lũy tiến (progressive collapse) là hiện tượng trong đó sự phá hoại cục bộ của một hoặc một số cấu kiện chịu lực dẫn đến sự lan truyền hư hỏng và có thể gây mất ổn định một phần hoặc toàn bộ công trình. Theo các hướng dẫn của GSA và UFC, đây là một dạng phá hoại không tương xứng, trong đó hậu quả cuối cùng lớn hơn nhiều so với nguyên nhân khởi phát ban đầu [9,10]. Bản chất của hiện tượng này là sự gián đoạn đột ngột của đường truyền tải trọng ban đầu, buộc hệ kết cấu phải thiết lập trạng thái cân bằng mới thông qua các đường truyền tải trọng thay thế.

Khi một hoặc nhiều cột bị mất khả năng chịu lực, tải trọng trọng lực được phân phối lại cho các cấu kiện lân cận, làm gia tăng lực dọc, mô men uốn và lực cắt trong khu vực hư hỏng. Nếu hệ kết cấu không có đủ khả năng chịu lực dự phòng hoặc không tồn tại các đường truyền tải trọng thay thế hiệu quả, hư hỏng sẽ tiếp tục lan rộng và dẫn đến sụp đổ lũy tiến [1–3].

Khả năng chống sụp đổ lũy tiến thường được đánh giá thông qua độ bền dư của hệ kết cấu, phản ánh khả năng duy trì sức chịu tải sau khi xảy ra hư hỏng cục bộ. Giá trị của chỉ số này sẽ được định nghĩa dưới dạng chỉ số bền vững (Robustness Index, RI) [15]:

$$RI = P_d/P_0 \quad (1)$$

trong đó P_d là khả năng chịu tải của công trình sau khi xảy ra hư hỏng cục bộ và P_0 là khả năng chịu tải ban đầu.

Các nghiên cứu của Izzuddin và cộng sự [1], Marjanishvili [2], Kaewkulchai và Williamson [3] cũng như Sasani và cộng sự [11,12] đã chỉ ra rằng độ bền dư của công trình phụ thuộc chủ yếu vào khả năng tái phân phối nội lực, độ dẻo và số lượng đường truyền tải trọng thay thế trong hệ kết cấu. Do đó, việc đánh giá nguy cơ sụp đổ lũy

tiến cần xem xét đồng thời ứng xử cục bộ của các cấu kiện và ứng xử tổng thể của toàn bộ công trình.

2.2. Cơ chế màng (membrane action) và cơ chế dây treo (catenary action)

Sau khi xảy ra mất cột, chuyển vị tại khu vực hư hỏng tăng nhanh, làm thay đổi đường truyền tải trọng của hệ kết cấu. Khi biến dạng vượt quá giới hạn làm việc thông thường, các cấu kiện không còn truyền tải chủ yếu thông qua cơ chế chịu uốn mà chuyển sang huy động lực kéo dọc để duy trì trạng thái cân bằng. Đối với dầm bê tông cốt thép, hiện tượng này được gọi là “cơ chế dây treo”. Khi độ võng tiếp tục gia tăng, lực kéo trong cốt thép phát triển đáng kể và dần trở thành thành phần chịu lực chủ yếu. Nhiều nghiên cứu của Regan [6], Kim và An [7], Yi và cộng sự [13], Qian và Li [14] đã chỉ ra rằng “cơ chế dây treo” giữ vai trò quan trọng trong việc duy trì khả năng mang tải của kết cấu và hạn chế sự lan truyền phá hoại sau khi xảy ra mất cột. Trong giai đoạn này, khả năng chịu tải của cấu kiện có thể được xấp xỉ theo biểu thức sau:

$$P = 2T \sin \theta \quad (2)$$

trong đó T là lực kéo dọc trong cấu kiện và θ là góc nghiêng của dầm biến dạng. Công thức (2) cho thấy khả năng chịu tải của hệ phụ thuộc trực tiếp vào khả năng phát triển lực kéo trong cấu kiện.

Bên cạnh “cơ chế dây treo” của dầm, bản sàn BTCT có thể phát triển “cơ chế màng” khi xuất hiện biến dạng lớn trong mặt phẳng. Khi đó, tải trọng được phân phối thông qua các ứng suất kéo và nén trong bản sàn, cho phép huy động sự tham gia của nhiều cấu kiện ngoài vùng hư hỏng trực tiếp. Cơ chế này làm giảm sự tập trung nội lực, tăng khả năng tái phân phối tải trọng và nâng cao độ bền dư của hệ kết cấu [8,14].

Đối với các công trình không gian nhiều tầng, “cơ chế dây treo” của hệ dầm và “cơ chế màng” của bản sàn thường phát triển đồng thời và tạo

thành các đường truyền tải trọng thay thế quan trọng sau khi xảy ra mất cột. Vì vậy, việc mô hình hóa đầy đủ hai cơ chế này là yêu cầu cần thiết để đánh giá chính xác khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình BTCT.

2.3. Vai trò của hệ vách cứng trong chống sụp đổ lũy tiến

Trong các công trình cao tầng BTCT, hệ vách cứng hoặc lõi trung tâm là thành phần chịu tải trọng ngang chủ yếu và đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì độ cứng cũng như ổn định tổng thể của công trình. Ngoài chức năng kháng gió và động đất, hệ vách còn góp phần nâng cao khả năng chống sụp đổ lũy tiến thông qua việc tham gia tái phân phối tải trọng sau khi xảy ra hư hỏng cục bộ. Khi một hoặc nhiều cột bị mất khả năng chịu tải, tải trọng từ khu vực hư hỏng có thể được truyền thông qua hệ dầm–sàn đến lõi vách, qua đó làm giảm sự tập trung nội lực trong các cấu kiện lân cận và hạn chế sự lan truyền phá hoại [17].

Các nghiên cứu của Lu và cộng sự [18,19] cho thấy độ cứng của hệ lõi vách có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng duy trì ổn định tổng thể của công trình dưới các tác động cực hạn. Khi độ cứng vách tăng lên, chuyển vị ngang giảm, hiệu ứng P- Δ được kiểm soát hiệu quả hơn và độ bền dư của hệ kết cấu được cải thiện. Điều này cho thấy hệ vách không chỉ là cấu kiện chịu tải trọng ngang mà còn là thành phần quan trọng trong việc hình thành các đường truyền tải trọng thay thế sau hư hỏng. Mặc dù vai trò của hệ vách đối với ứng xử động đất đã được nghiên cứu rộng rãi, các nghiên cứu đánh giá định lượng ảnh hưởng của độ cứng vách đến khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình BTCT dưới tác động kết hợp giữa động đất và mất cột vẫn còn hạn chế. Đây là một trong những nội dung được xem xét trong nghiên cứu này.

2.4. Ảnh hưởng của động đất đến khả năng chống sụp đổ lũy tiến

Khác với các bài toán mất cột dưới tải trọng trọng lực, công trình chịu động đất luôn tồn tại

dao động và lực quán tính trong suốt quá trình làm việc. Dưới tác động của động đất mạnh, nhiều cấu kiện có thể đã xuất hiện vết nứt, phát triển khớp dẻo hoặc suy giảm độ cứng trước khi xảy ra hiện tượng mất cột. Do đó, độ bền dư của công trình trong điều kiện động đất thường thấp hơn đáng kể so với trạng thái ban đầu.

Khi một hoặc nhiều cột bị mất trong quá trình công trình đang dao động, trạng thái cân bằng nội lực bị phá vỡ đột ngột và tạo ra phản ứng động bổ sung trong hệ kết cấu. Sự kết hợp giữa lực quán tính và tải trọng tái phân phối làm gia tăng đáng kể nội lực trong các cấu kiện lân cận, từ đó thúc đẩy sự phát triển của phá hoại lan truyền. Khandelwal và cộng sự [16] cho thấy phản ứng động này có thể làm tăng đáng kể nội lực cực đại so với các phân tích tĩnh tương đương.

Mức độ khuếch đại động thường được đánh giá thông qua hệ số khuếch đại động (Dynamic Amplification Factor – DAF):

$$DAF = R_{dyn}/R_{sta} \quad (3)$$

trong đó R_{dyn} và R_{sta} lần lượt là phản ứng động cực đại và phản ứng tĩnh tương ứng. Theo các hướng dẫn GSA và UFC, giá trị DAF có thể vượt quá 2,0 trong các trường hợp mất cột đột ngột [9,10].

Bên cạnh đó, chuyển vị ngang lớn do động đất có thể làm gia tăng hiệu ứng bậc hai P- Δ :

$$M_{P-\Delta} = P \cdot \Delta \quad (4)$$

trong đó P là lực nén dọc và Δ là chuyển vị ngang. Khi chuyển vị tăng lên, mô men thứ cấp phát triển nhanh và có thể làm giảm đáng kể khả năng ổn định của hệ kết cấu [18,19].

Vì vậy, khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình chịu động đất không chỉ phụ thuộc vào khả năng chịu lực của từng cấu kiện mà còn phụ thuộc vào độ bền dư của hệ kết cấu, khả năng tái phân phối tải trọng, sự tham gia của hệ sàn và hệ vách, cũng như mức độ phát triển của các cơ chế chịu lực phi tuyến sau hư hỏng.

2.5. Tương tác giữa động đất và hiện tượng mất nhiều cột

Trong điều kiện động đất mạnh, công trình không chỉ chịu tác động của tải trọng quán tính mà còn có thể xuất hiện các vùng hư hỏng cục bộ tại nhiều vị trí khác nhau do sự hình thành khớp dẻo, phá hoại cắt, mất ổn định cục bộ hoặc hư hỏng liên kết. Trong trường hợp này, sự mất khả năng chịu lực của một nhóm cột có thể xảy ra gần như đồng thời hoặc liên tiếp trong một khoảng thời gian rất ngắn. Khác với bài toán mất một cột đơn lẻ, hiện tượng mất nhiều cột làm suy giảm đáng kể số lượng đường truyền tải trọng thay thế và làm tăng nhanh nhu cầu chịu lực của các cấu kiện còn lại.

Về mặt cơ học, khi số lượng cột bị loại bỏ tăng lên, tải trọng trọng lực không chỉ được phân phối lại cho các cấu kiện lân cận mà còn được truyền đến các vùng kết cấu xa hơn thông qua hệ dầm-sàn và lõi vách. Sự tái phân phối này làm gia tăng đồng thời mô men uốn, lực cắt và lực kéo dọc trong nhiều cấu kiện, từ đó thúc đẩy sự phát triển của “cơ chế màng” và “cơ chế dây treo”. Tuy nhiên, nếu mức độ hư hỏng vượt quá khả năng tái phân phối tải trọng của hệ kết cấu, quá trình lan truyền phá hoại sẽ xảy ra và dẫn đến sụp đổ lũy tiến.

Đối với công trình đang dao động dưới tác động động đất, phản ứng động phát sinh do mất cột xảy ra trên nền một trạng thái ứng suất–biến dạng đã tồn tại trước đó. Do vậy, khả năng chống sụp đổ lũy tiến phụ thuộc không chỉ vào độ bền của từng cấu kiện mà còn phụ thuộc vào trạng thái hư hỏng tích lũy, mức độ suy giảm độ cứng và khả năng duy trì các đường truyền tải trọng thay thế của toàn bộ hệ kết cấu.

2.6. Các chỉ số đánh giá khả năng chống sụp đổ lũy tiến

Để đánh giá định lượng mức độ tổn thương và khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình, nghiên cứu sử dụng hai chỉ số đặc trưng gồm Collapse Index (CI) và Robustness Index

(RI). Các chỉ số này được xác định từ các đại lượng phản ứng thu được sau phân tích phi tuyến trên ETABS và được xử lý trên nền tảng MATLAB. Trong đó, CI được đề xuất như một chỉ số tổng hợp nhằm phản ánh đồng thời ảnh hưởng của biến dạng, phản ứng động và sự suy giảm độ cứng của hệ kết cấu sau khi xảy ra mất cột. Chỉ số này được xây dựng trên cơ sở ba đại lượng phản ứng đã được chuẩn hóa, bao gồm chuyển vị cực đại (Δ_{max}), hệ số khuếch đại động (DAF) và tỷ số độ cứng còn lại của kết cấu K_d/K_0 (trong đó K_0 là độ cứng ban đầu của công trình trước khi xảy ra hư hỏng, K_d là độ cứng tương đương sau khi mất cột, được xác định từ tỷ số giữa tải trọng tác dụng và chuyển vị tương ứng trong quá trình phân tích phi tuyến). Ba thành phần này được tổng hợp theo phương pháp trung bình cộng với trọng số bằng nhau nhằm phản ánh đồng thời ba khía cạnh quan trọng của ứng xử kết cấu, gồm mức độ biến dạng, ảnh hưởng của tải trọng động và khả năng duy trì độ cứng sau hư hỏng. Giá trị CI càng lớn cho thấy mức độ tổn thương của kết cấu càng nghiêm trọng và nguy cơ sụp đổ lũy tiến càng cao. Bên cạnh đó, hệ số RI (mục 2.1) phản ánh mức độ duy trì khả năng chịu lực của công trình sau sự cố mất cấu kiện. Giá trị RI càng lớn chứng tỏ kết cấu có độ bền dư cao hơn và khả năng duy trì trạng thái cân bằng tốt hơn sau hư hỏng cục bộ.

Bên cạnh đó, căn cứ trên các nghiên cứu [9,10,15,19] để lượng hóa mức độ đóng góp tương đối của hệ vách đối với độ cứng tổng thể của công trình, nghiên cứu đề xuất sử dụng tỷ số độ cứng tương đối:

$$\eta = EI_{wall}/(EI_{wall} + EI_{slab}) \quad (5)$$

trong đó: EI_{wall} là tổng độ cứng uốn tương đương của hệ vách theo phương khảo sát, được xác định bằng tổng EI của các vách tham gia chịu tải ngang; EI_{slab} là tổng độ cứng uốn tương đương của hệ sàn theo cùng phương khảo sát, được xác định từ tổng độ cứng uốn của các dải sàn tham gia truyền lực đến hệ khung–vách. Giá

trị η nằm trong khoảng từ 0 đến 1 và phản ánh tỷ phần độ cứng do hệ vách đóng góp vào khả năng chống sụp đổ của công trình. Tham số này cho phép đánh giá đồng thời vai trò của hệ vách và hệ sàn trong việc hình thành các đường truyền tải trọng thay thế và duy trì ổn định tổng thể sau hư hỏng.

3. Mô hình đề xuất mô phỏng sụp đổ lũy tiến

3.1. Mô hình đề xuất và quy trình phân tích ETABS–Python–MATLAB

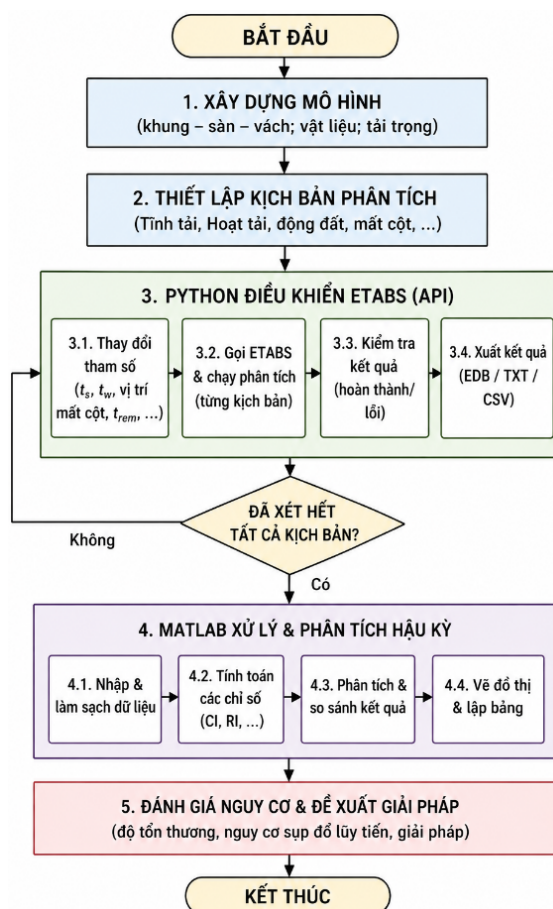
Nghiên cứu đề xuất một quy trình phân tích tích hợp giữa ETABS, Python và MATLAB nhằm đánh giá khả năng chống sụp đổ lũy tiến của kết cấu bê tông cốt thép dưới các kịch bản mất cột (Hình 1). Trong quy trình này, ETABS được sử dụng để xây dựng mô hình phần tử hữu hạn và thực hiện phân tích phi tuyến; Python được sử dụng để tự động hóa quá trình thiết lập mô hình, thực hiện các trường hợp phân tích và thu thập kết quả thông qua giao diện API; trong khi MATLAB đảm nhiệm công tác hậu xử lý, đánh giá các chỉ tiêu phản ứng kết cấu và trực quan hóa dữ liệu. Sự kết hợp này cho phép khảo sát số lượng lớn kịch bản phân tích với độ chính xác và hiệu quả tính toán cao.

Mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trên nền tảng ETABS dưới dạng không gian ba chiều. Dầm và cột được mô hình hóa bằng phần tử Frame phi tuyến, trong khi sàn và vách được mô hình hóa bằng phần tử Shell nhằm phản ánh đồng thời ứng xử uốn và ứng xử màng của kết cấu. Tải trọng tác dụng bao gồm tải trọng bản

thân, tải trọng thường xuyên và hoạt tải theo điều kiện của mô hình kiểm chứng. Ứng xử phi tuyến vật liệu được mô phỏng bằng hệ khớp dẻo tập trung bố trí tại hai đầu dầm và cột theo khuyến nghị của FEMA 356 và ASCE 41. Khớp dẻo M3 được sử dụng cho dầm, trong khi khớp dẻo tương tác P–M2–M3 được áp dụng cho cột nhằm xét đồng thời ảnh hưởng của lực dọc và mô men uốn. Các trạng thái hiệu năng được đánh giá theo các mức sử dụng ngay (Immediate Occupancy, IO), an toàn sinh mạng (Life Safety, LS), ngăn ngừa sụp đổ (Collapse Prevention, CP).

Để mô phỏng chính xác ứng xử của kết cấu sau khi xảy ra mất cột, mô hình xét đầy đủ phi tuyến hình học thông qua tùy chọn Large Displacement Analysis và hiệu ứng P– Δ . Hiệu ứng này phản ánh sự gia tăng nội lực thứ cấp do tương tác giữa lực nén dọc và chuyển vị ngang của cấu kiện, góp phần đánh giá chính xác hơn khả năng ổn định của hệ kết cấu trong điều kiện biến dạng lớn.

Bên cạnh đó, các cơ chế chịu lực thay thế sau khi mất cột cũng được xem xét trong mô hình. Sự kết hợp giữa phân tích phi tuyến hình học, khả năng chịu kéo của hệ dầm và sự phát triển khớp dẻo cho phép mô phỏng quá trình chuyển đổi từ cơ chế chịu uốn sang cơ chế kéo khi chuyển vị tăng cao. Đồng thời, việc sử dụng phần tử Shell giúp phản ánh “cơ chế màng” của hệ sàn, góp phần tái phân phối tải trọng từ khu vực mất cột sang các vùng lân cận và làm tăng khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình.

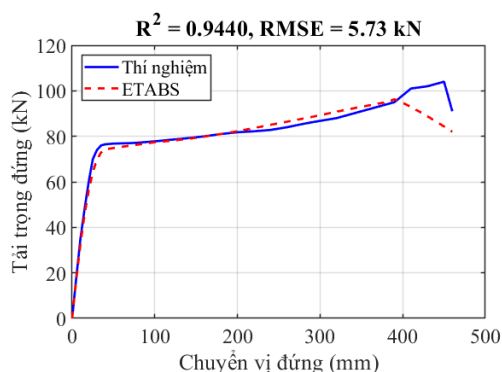


Hình 1. Quy trình phân tích tích hợp ETABS–Python–MATLAB

3.2. Kiểm chứng mô hình số

Để đánh giá độ tin cậy của mô hình, kết quả mô phỏng ETABS được kiểm chứng với dữ liệu thực nghiệm của [20] về khung BTCT 3 tầng – 4 nhịp chịu kích bản mất cột giữa tầng 1 (Hình 2). Mô hình số được xây dựng với các thông số hình học, vật liệu, điều kiện biên và tải trọng tương ứng với mô hình thực nghiệm. Dầm và cột được mô hình hóa bằng phần tử Frame phi tuyến, bản sàn bằng phần tử Shell, đồng thời xét hiệu ứng $P-\Delta$ và chuyển vị lớn. Việc kiểm chứng được thực hiện thông qua so sánh quan hệ tải trọng đứng – chuyển vị đứng tại vị trí cột bị loại bỏ. Kết quả cho thấy mô hình ETABS mô phỏng tốt xu hướng ứng xử của kết cấu trong toàn bộ quá trình tải, từ giai đoạn cơ chế uốn và vòm nén (compressive arch action) đến giai đoạn phát triển “cơ chế dây treo”. Tải trọng cực đại từ mô hình số đạt khoảng 95 kN tại chuyển vị 390 mm, trong khi kết quả thực nghiệm đạt khoảng 104 kN tại chuyển vị 450 mm. Sai khác này chủ yếu

do các giả thiết đơn giản hóa trong mô hình vật liệu và liên kết. Đánh giá định lượng cho thấy hệ số xác định đạt $R^2 = 0,9440$ và sai số quân phương trung bình $RMSE = 5,73$ kN. Giá trị R^2 cao và $RMSE$ nhỏ cho thấy mức độ phù hợp tốt giữa mô hình số và kết quả thực nghiệm. Nhìn chung, mô hình ETABS đề xuất có khả năng tái hiện hợp lý ứng xử của kết cấu dưới kích bản mất cột và đủ độ tin cậy để sử dụng trong các nghiên cứu tham số tiếp theo về sụp đổ lũy tiến.



Hình 2. Kiểm chứng mô hình đề xuất với [20]

4. Bài toán nghiên cứu

Toà nhà kiểm toán nhà nước (SAO) Thái Lan là công trình BTCT cao tầng gồm 33 tầng, trong đó có 3 tầng hầm và 30 tầng nổi. Để đơn giản hóa mô hình, nghiên cứu không xét đến hệ tường vây tầng hầm và ảnh hưởng của áp lực đất. Các tầng hầm được giả thiết có sơ đồ kết cấu tương tự các tầng điển hình và được mô hình hóa như các tầng thông thường. Giả thiết này cho phép tập trung đánh giá ứng xử của phần thân công trình dưới các kích bản mất cột, đồng thời phù hợp với mục tiêu nghiên cứu về sụp đổ lũy tiến. Hệ kết cấu chịu lực chính của công trình bao gồm lõi-vách BTCT kết hợp với hệ cột bố trí quanh chu vi. Hệ sàn sử dụng sàn ứng suất trước kết hợp với dầm бет nhằm đáp ứng yêu cầu về không gian kiến trúc và khả năng chịu tải [21]. Hình học công trình, mặt bằng kết cấu và mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trên ETABS phiên bản 22 [22] và được trình bày trong Hình 3a và 3b.

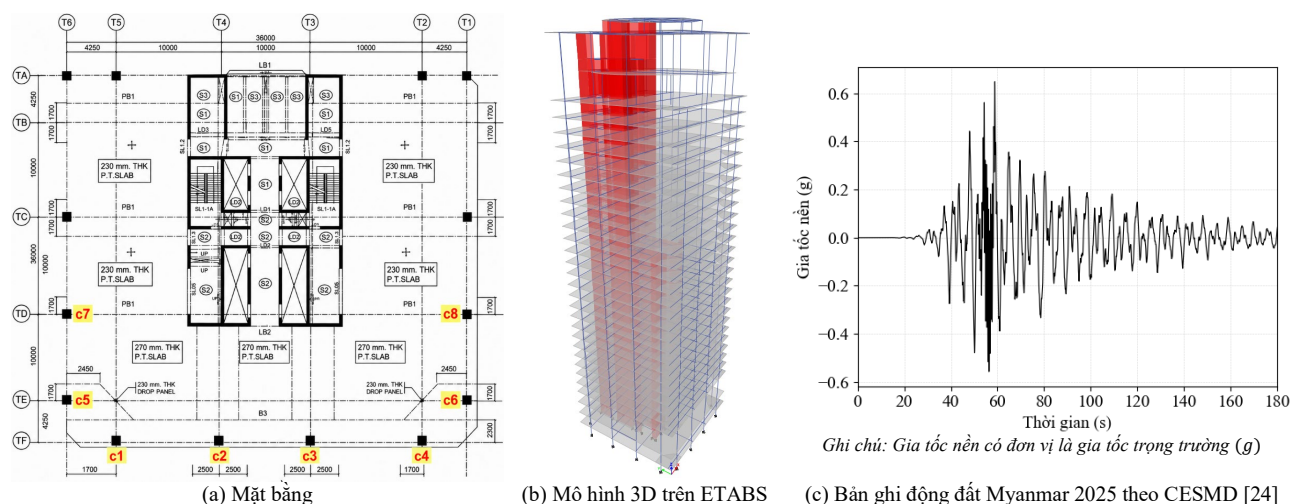
Các thông số vật liệu được khai báo theo hồ sơ và thông tin kỹ thuật của công trình SAO [23]. Bê tông cường độ 500 ksc (tương đương khoảng 49 MPa) được sử dụng cho các cấu kiện đứng như cột và vách; bê tông 350 ksc (tương đương khoảng 34 MPa) được sử dụng cho sàn và các cấu kiện thông thường; trong khi bê tông móng và cọc có cường độ 280 ksc (tương đương khoảng 27,5 MPa). Thép cốt chịu lực được sử dụng SD50 (tương ứng giới hạn chảy khoảng 500 MPa), còn thép đai và thép cấu tạo sử dụng SD40 (tương ứng khoảng 400 MPa).

Sự cố sụp đổ của công trình SAO sau trận động đất Myanmar năm 2025 đặt ra yêu cầu đánh giá lại khả năng chống sụp đổ lũy tiến của các công trình BTCT cao tầng sử dụng hệ kết cấu

khung-vách-sàn. Đối với loại công trình này, khả năng chống sụp đổ không chỉ phụ thuộc vào sức chịu tải của từng cấu kiện mà còn chịu ảnh hưởng của độ cứng tổng thể, khả năng tái phân phối tải trọng và mức độ huy động các cơ chế truyền lực thay thế như cơ chế màng (membrane action) và cơ chế dây treo (catenary action) sau khi xảy ra hư hỏng cục bộ.

Trong nghiên cứu này, bản ghi gia tốc nền được lựa chọn từ trận động đất Myanmar năm 2025, là sự kiện địa chấn ảnh hưởng trực tiếp đến công trình SAO. Dữ liệu gia tốc được thu thập từ cơ sở dữ liệu của Trung tâm Dữ liệu Gia tốc Công trình (Center for Engineering Strong Motion Data, CESMD, USA) [24] (Hình 3c). Trước khi sử dụng trong phân tích lịch sử thời gian trên ETABS, bản ghi được hiệu chỉnh theo phổ phản ứng thiết kế của Eurocode 8 nhằm bảo đảm phù hợp với điều kiện thiết kế của công trình. Trong quá trình hiệu chỉnh, các đặc trưng của bản ghi như bước thời gian, thời lượng và dạng sóng được giữ nguyên, trong khi biên độ được điều chỉnh để đáp ứng phổ mục tiêu.

Mô hình phần tử hữu hạn của công trình được xây dựng trên ETABS phiên bản 22 kết hợp với quy trình phân tích tích hợp ETABS-Python-MATLAB. ETABS được sử dụng để thực hiện phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian có xét đến phi tuyến vật liệu, phi tuyến hình học và hiệu ứng P- Δ . Python hỗ trợ tự động hóa quá trình cập nhật tham số, kích hoạt các kích bản mất cột và thu thập dữ liệu phản ứng kết cấu thông qua giao diện lập trình ứng dụng (API). MATLAB được sử dụng để xử lý dữ liệu và đánh giá các chỉ số đặc trưng liên quan đến nguy cơ sụp đổ lũy tiến.



Hình 3. Mặt bằng, mô hình 3D trên ETABS và bản ghi động đất toà nhà SAO

Quá trình phân tích được thực hiện theo bốn bước. Trước hết, mô hình được thiết lập dưới tác dụng của tải trọng trọng lực. Tiếp theo, bản ghi động đất được áp dụng thông qua phân tích lịch sử thời gian. Sau đó, các kịch bản mất đồng thời từ cột c1 đến c8 của tầng 1 (Hình 3a) được kích hoạt trong khi công trình vẫn đang dao động. Cuối cùng, phản ứng động, khả năng tái phân phối tải trọng và nguy cơ sụp đổ lũy tiến của công trình được đánh giá trên cơ sở các kết quả phân tích.

Hai tham số thiết kế chính được khảo sát gồm chiều dày sàn ($t_s = 150 - 350 \text{ mm}$) và chiều dày vách ($t_w = 200 - 600 \text{ mm}$). Ảnh hưởng của các tham số này được đánh giá thông qua các chỉ tiêu gồm chuyển vị đứng cực đại, chuyển vị đỉnh công trình, hệ số khuếch đại động (DAF), chu kỳ dao động cơ bản, lực kéo (catenary force), chỉ số sụp đổ (Collapse Index) và chỉ số độ bền vững (Robustness Index). Trên cơ sở đó, nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của động đất đến khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình dưới các kịch bản mất nhiều cột, đồng thời làm rõ vai trò của chiều dày sàn và chiều dày vách đối với độ bền dư và khả năng tái phân phối tải trọng. Bên cạnh đó, hiệu quả của quy trình tích hợp ETABS–Python–MATLAB cũng được xem xét thông qua khả năng tự động hóa quá trình phân tích và đánh giá định lượng nguy cơ sụp đổ lũy tiến của nhà cao tầng BTCT.

5. Kết quả phân tích và thảo luận

5.1. Ảnh hưởng của chiều dày sàn và vách đến chuyển vị đỉnh công trình

Hình 4 và 5 trình bày sự thay đổi của chuyển vị đỉnh công trình theo số lượng cột bị loại bỏ đối với các phương án chiều dày sàn và chiều dày vách khác nhau. Nhìn chung, chuyển vị đỉnh tăng dần khi số lượng cột bị loại bỏ tăng từ 1 lên 8. Đáng chú ý, tốc độ gia tăng chuyển vị trở nên rõ rệt khi số lượng cột bị loại bỏ đạt khoảng 5–6, phản ánh sự suy giảm nhanh độ cứng tổng thể và khả năng duy trì trạng thái cân bằng của hệ kết cấu khi vùng hư hỏng mở rộng.

Sự gia tăng chuyển vị có thể được giải thích bởi quá trình tái phân phối tải trọng sau khi các cột chịu lực bị loại bỏ. Khi số lượng cột mất đi tăng lên, các đường truyền tải trọng ban đầu bị gián đoạn và tải trọng buộc phải truyền qua hệ dầm–sàn và lõi vách. Quá trình này làm tăng biến dạng tổng thể của công trình, đồng thời làm cho hiệu ứng P– Δ và sự suy giảm độ cứng hiệu dụng trở nên rõ rệt hơn.

Đối với các phương án thay đổi chiều dày sàn, xu hướng giảm chuyển vị được ghi nhận trong toàn bộ phạm vi khảo sát khi chiều dày sàn tăng từ 150 mm lên 350 mm. Ở kịch bản mất đồng thời tám cột, chuyển vị đỉnh giảm từ khoảng 520 mm xuống gần 400 mm, tương ứng giảm khoảng 23%. Kết quả này cho thấy việc tăng chiều dày

sàn góp phần nâng cao độ cứng uốn của hệ kết cấu, từ đó cải thiện khả năng tái phân phối tải trọng sau khi xảy ra mất cột.

Ảnh hưởng của chiều dày vách còn rõ rệt hơn so với chiều dày sàn. Khi chiều dày vách tăng từ 200 mm lên 600 mm, chuyển vị đỉnh cực đại tại kích bản mất tám cột giảm từ khoảng 545 mm xuống còn khoảng 365 mm, tương ứng giảm gần 33%. Đồng thời, khoảng cách giữa các đường cong tăng nhanh khi số lượng cột bị loại bỏ vượt quá năm, cho thấy hiệu quả của việc gia tăng độ cứng hệ vách trở nên nổi bật hơn trong các kích bản hư hỏng nghiêm trọng. Những kết quả này cho thấy hệ vách có vai trò quan trọng trong việc duy trì độ cứng tổng thể và kiểm soát biến dạng của công trình dưới các kích bản mất nhiều cột.

5.2. Ảnh hưởng của chiều dày sàn và vách đến hệ số khuếch đại động (DAF)

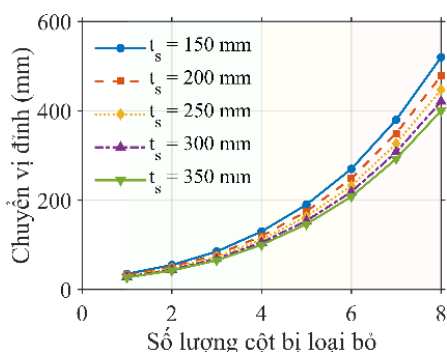
Hình 6 và 7 thể hiện sự biến thiên của hệ số khuếch đại động (DAF) theo số lượng cột bị loại bỏ đối với các phương án chiều dày sàn và chiều dày vách khác nhau. DAF tăng liên tục khi số lượng cột bị loại bỏ tăng từ 1 đến 8, phản ánh sự gia tăng mức độ nhạy cảm của kết cấu đối với phản ứng động sau khi mất cột. Từ khoảng 6 cột trở lên, độ dốc của các đường cong tăng nhanh hơn, cho thấy phản ứng động trở nên rõ rệt khi khả năng tái phân phối tải trọng của hệ kết cấu bắt đầu suy giảm.

Sự gia tăng của DAF xuất phát từ việc loại bỏ đột ngột các cột chịu lực, làm phá vỡ trạng thái

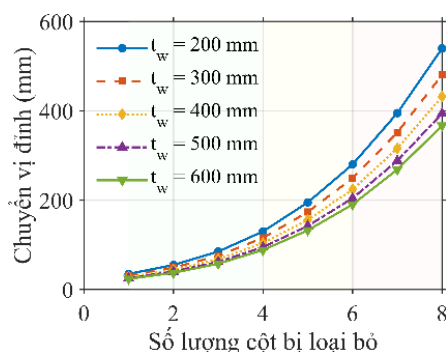
cân bằng ban đầu và giải phóng năng lượng đàn hồi tích lũy trong kết cấu. Khi số lượng cột bị loại bỏ tăng lên, tải trọng phải truyền qua các đường truyền thay thế dài hơn và kém hiệu quả hơn, dẫn đến sự gia tăng chuyển vị động và biên độ dao động của công trình.

Đối với các phương án thay đổi chiều dày sàn, DAF giảm trên toàn bộ phạm vi khảo sát khi chiều dày sàn tăng từ 150 mm lên 350 mm. Tại kích bản mất đồng thời tám cột, DAF giảm từ khoảng 1,80 xuống 1,45, tương ứng gần 19%. Sự suy giảm này cho thấy sàn dày hơn giúp tăng độ cứng của hệ kết cấu, hạn chế biến dạng tức thời và giảm biên độ dao động phát sinh sau khi mất cột. Đồng thời, điều kiện làm việc của hệ dầm-sàn trở nên thuận lợi hơn cho sự phát triển của cơ chế màng, qua đó cải thiện khả năng tái phân phối tải trọng trong mặt bằng công trình.

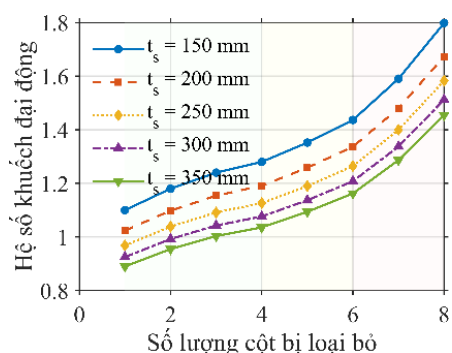
Ảnh hưởng của chiều dày vách được ghi nhận rõ rệt hơn. Khi chiều dày vách tăng từ 200 mm lên 600 mm, DAF tại kích bản mất tám cột giảm từ khoảng 1,86 xuống 1,33, tương ứng khoảng 28%. Khoảng cách giữa các đường cong tăng dần khi số lượng cột bị loại bỏ lớn hơn năm, cho thấy hiệu quả của việc gia tăng độ cứng hệ vách trở nên nổi bật hơn trong các kích bản hư hỏng nghiêm trọng. Việc duy trì độ cứng tổng thể của công trình nhờ hệ vách góp phần làm giảm phản ứng động và hạn chế sự khuếch đại chuyển vị sau khi xảy ra mất cột.



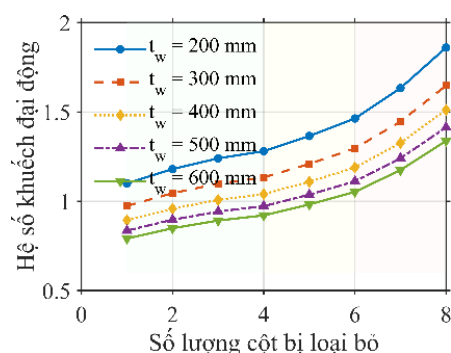
Hình 4. Ảnh hưởng của t_s đến chuyển vị đỉnh công trình



Hình 5. Ảnh hưởng của t_w đến chuyển vị đỉnh công trình



Hình 6. Ảnh hưởng của t_s đến hệ số khuếch đại động (DAF)



Hình 7. Ảnh hưởng của t_w đến hệ số khuếch đại động (DAF)

5.3. Ảnh hưởng của chiều dày sàn và vách đến sự phát triển lực kéo (catenary force)

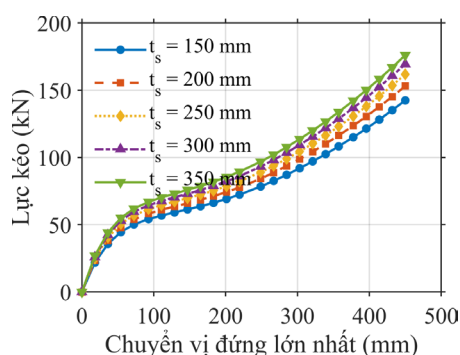
Hình 8 và 9 minh họa mối quan hệ giữa lực kéo trong hệ dầm–sàn và chuyển vị đứng tại vùng mất cột đối với các phương án chiều dày sàn và chiều dày vách khác nhau. Lực kéo tăng liên tục theo chuyển vị đứng, phản ánh quá trình chuyển đổi từ cơ chế chịu uốn sang cơ chế chịu kéo sau khi xảy ra mất cột. Khi chuyển vị tiếp tục gia tăng, lực kéo trong cốt thép và các cấu kiện liên kết phát triển mạnh hơn, góp phần duy trì khả năng mang tải ngay cả khi độ cứng chịu uốn của hệ kết cấu đã suy giảm đáng kể.

Đối với các phương án thay đổi chiều dày sàn, lực kéo tăng đáng kể khi chiều dày sàn tăng từ 150 mm lên 350 mm. Tại mức chuyển vị khoảng 450 mm, lực kéo tăng từ khoảng 143 kN lên gần 180 kN, tương ứng hơn 25%. Mức tăng này cho thấy sàn dày hơn không chỉ nâng cao độ cứng ban đầu mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển của cơ chế màng và khả năng huy động

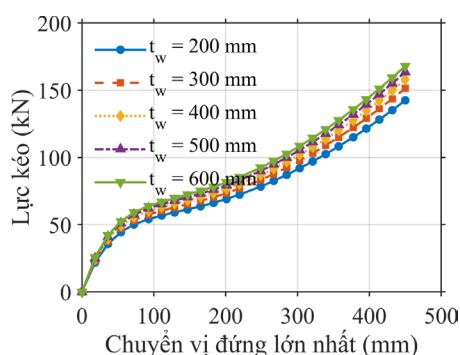
lực kéo của hệ dầm–sàn trong giai đoạn biến dạng lớn.

Ảnh hưởng của chiều dày vách cũng được ghi nhận theo cùng xu hướng. Với cùng một mức chuyển vị, lực kéo tăng từ khoảng 143 kN lên gần 170 kN khi chiều dày vách tăng từ 200 mm lên 600 mm, tương ứng khoảng 19%. Việc gia tăng độ cứng của hệ vách giúp duy trì ổn định tổng thể và các đường truyền tải trọng thay thế, qua đó tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển của lực kéo trong hệ dầm–sàn.

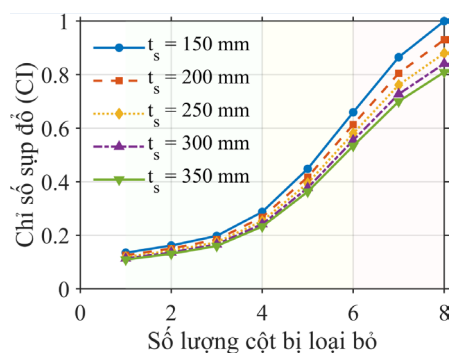
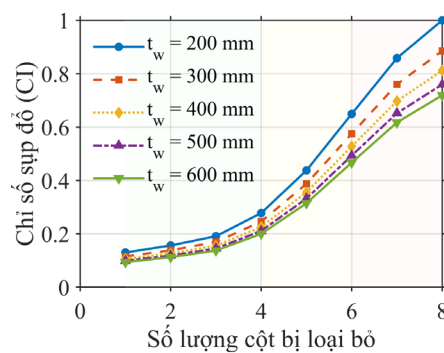
So sánh hai nhóm tham số cho thấy chiều dày sàn có ảnh hưởng trực tiếp hơn đến sự phát triển của lực kéo so với chiều dày vách. Trong khi hệ dầm–sàn chỉ phối khả năng huy động lực kéo ở giai đoạn biến dạng lớn, hệ vách chủ yếu góp phần duy trì độ cứng tổng thể và ổn định của công trình. Những kết quả này nhấn mạnh vai trò của cơ chế dây treo như một cơ chế truyền lực thay thế quan trọng, góp phần nâng cao độ bền dư và hạn chế sự lan truyền phá hoại sau khi xảy ra mất nhiều cột.



Hình 8. Ảnh hưởng của t_s đến sự phát triển lực kéo



Hình 9. Ảnh hưởng của t_w đến sự phát triển lực kéo

Hình 10. Ảnh hưởng của t_s đến chỉ số sụp đổHình 11. Ảnh hưởng của t_w đến chỉ số sụp đổ

5.4. Ảnh hưởng của chiều dày sàn và vách đến chỉ số sụp đổ (CI)

Hình 10 và 11 trình bày sự thay đổi của chỉ số sụp đổ (CI) theo số lượng cột bị loại bỏ đối với các phương án chiều dày sàn và chiều dày vách khác nhau. CI tăng liên tục khi số lượng cột bị loại bỏ tăng từ 1 đến 8, phản ánh sự suy giảm dần độ bền dư và khả năng tái phân phối tải trọng của hệ kết cấu. Từ khoảng 5–6 cột bị loại bỏ, tốc độ gia tăng của CI trở nên rõ rệt hơn, cho thấy công trình tiến gần đến trạng thái giới hạn và nguy cơ lan truyền hư hỏng tăng nhanh.

Sự gia tăng của CI gắn liền với quá trình suy giảm các đường truyền tải trọng thay thế sau khi nhiều cột bị loại bỏ đồng thời. Khi khả năng tái phân phối tải trọng giảm, chuyển vị, nội lực và mức độ phi tuyến trong các cấu kiện lân cận đều tăng lên, dẫn đến sự tích lũy hư hỏng và làm chỉ số sụp đổ tăng nhanh.

Đối với các phương án thay đổi chiều dày sàn, CI giảm trên toàn bộ phạm vi khảo sát khi chiều dày sàn tăng từ 150 mm lên 350 mm. Tại kịch bản mất đồng thời tám cột, CI giảm từ khoảng 1,00 xuống 0,81, tương ứng gần 19%. Mức giảm này phản ánh khả năng tái phân phối tải trọng được cải thiện nhờ độ cứng lớn hơn của hệ sàn, qua đó hạn chế sự phát triển của hư hỏng lan truyền sau khi xảy ra mất cột.

Ảnh hưởng của chiều dày vách còn rõ rệt hơn. Khi chiều dày vách tăng từ 200 mm lên 600 mm, CI tại kịch bản mất tám cột giảm từ khoảng 1,00 xuống 0,72, tương ứng gần 28%. Khoảng cách

giữa các đường cong tăng nhanh khi số lượng cột bị loại bỏ vượt quá năm, cho thấy hiệu quả của việc tăng độ cứng hệ vách trở nên rõ rệt hơn trong các kịch bản hư hỏng nghiêm trọng. Việc duy trì độ cứng tổng thể của công trình giúp kiểm soát chuyển vị, hạn chế hiệu ứng P- Δ và nâng cao hiệu quả của các đường truyền tải trọng thay thế.

So với chiều dày sàn, chiều dày vách tạo ra mức cải thiện lớn hơn đối với chỉ số sụp đổ trong phạm vi các trường hợp khảo sát. Trong khi việc tăng chiều dày sàn chủ yếu hỗ trợ sự phát triển của cơ chế màng và cơ chế dây treo trong hệ dầm–sàn, việc tăng chiều dày vách giúp cải thiện đáng kể độ cứng tổng thể và độ bền dư của công trình. Những kết quả này cho thấy việc gia tăng độ cứng hệ vách là một giải pháp hiệu quả để giảm nguy cơ sụp đổ lũy tiến, đặc biệt khi mức độ hư hỏng vượt quá ngưỡng khoảng 5–6 cột bị loại bỏ.

5.5. Ảnh hưởng của chiều dày sàn và vách đến chỉ số độ bền vững kết cấu (RI)

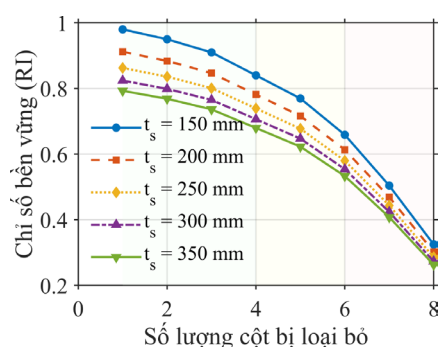
Hình 12 và 13 biểu diễn sự thay đổi của chỉ số độ bền vững kết cấu (RI) theo số lượng cột bị loại bỏ đối với các phương án chiều dày sàn và chiều dày vách khác nhau. RI giảm liên tục khi số lượng cột bị loại bỏ tăng từ 1 đến 8, phản ánh sự suy giảm dần của độ bền dư và khả năng duy trì ổn định của hệ kết cấu sau hư hỏng. Mức suy giảm trở nên rõ rệt hơn khi số lượng cột bị loại bỏ vượt quá khoảng 5–6, cho thấy khả năng duy trì sức chịu tải của công trình giảm nhanh trong các kịch bản hư hỏng nghiêm trọng.

Đối với các phương án thay đổi chiều dày sàn, RI tăng khi chiều dày sàn tăng từ 150 mm lên 350 mm. Tại kích bản mất đồng thời tám cột, RI tăng từ khoảng 0,27 lên 0,32, tương ứng gần 19%. Mức cải thiện này phản ánh khả năng tái phân phối tải trọng hiệu quả hơn và sự gia tăng độ bền dư của công trình khi độ cứng hệ sàn được nâng cao.

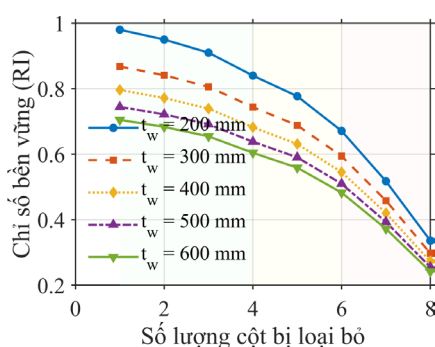
Ảnh hưởng của chiều dày vách còn rõ rệt hơn. Khi chiều dày vách tăng từ 200 mm lên 600 mm, RI tăng từ khoảng 0,25 lên 0,33 tại kích bản mất tám cột, tương ứng khoảng 32%. Việc gia tăng độ cứng của hệ vách giúp duy trì ổn định tổng

thể của công trình, hạn chế ảnh hưởng của hiệu ứng P- Δ và cải thiện khả năng duy trì sức chịu tải sau khi xảy ra mất cột.

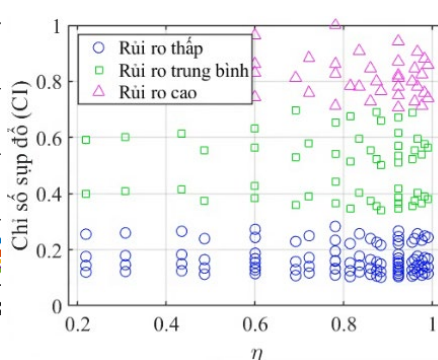
So với chiều dày sàn, việc tăng chiều dày vách mang lại mức cải thiện lớn hơn đối với chỉ số RI, đặc biệt khi số lượng cột bị loại bỏ vượt quá năm. Kết quả này cho thấy hệ vách có đóng góp đáng kể vào việc nâng cao độ bền dư của công trình; tuy nhiên, khả năng chống sụp đổ lũy tiến vẫn phụ thuộc đồng thời vào hiệu quả của các cơ chế truyền lực thay thế trong hệ dầm-sàn, như sẽ được phân tích ở mục 5.6.



Hình 12. Ảnh hưởng của t_s đến chỉ số độ bền vững kết cấu (RI)



Hình 13. Ảnh hưởng của t_w đến chỉ số độ bền vững kết cấu (RI)



Hình 14. Mối quan hệ giữa chỉ số sụp đổ (CI) và tỷ số độ cứng tương đối (η)

5.6. Mối quan hệ giữa chỉ số sụp đổ (CI) và tỷ số độ cứng tương đối (η)

Hình 14 thể hiện mối quan hệ giữa chỉ số sụp đổ (CI) và tỷ số độ cứng tương đối giữa hệ vách và hệ sàn (η). Các điểm dữ liệu được phân thành ba nhóm gồm nguy cơ thấp ($CI < 0,30$), nguy cơ trung bình ($0,30 \leq CI < 0,70$) và nguy cơ cao ($CI \geq 0,70$). Giá trị η thay đổi từ khoảng 0,20 đến gần 1,00, trong khi CI phân bố trong khoảng 0,10–1,00. Tuy nhiên, các điểm dữ liệu phân tán trên toàn bộ miền khảo sát và không hình thành xu hướng tăng hoặc giảm rõ rệt theo η .

Các trường hợp có nguy cơ thấp chủ yếu tập trung trong khoảng $CI = 0,10$ – $0,30$ và xuất hiện trên hầu hết dải giá trị của η , phản ánh khả năng tái phân phối tải trọng vẫn được duy trì khi mức độ hư hỏng còn hạn chế. Ngược lại, các trường hợp thuộc nhóm nguy cơ trung bình và nguy cơ

cao phân bố rộng trong khoảng $\eta = 0,60$ – $1,00$. Đáng lưu ý, nhiều trường hợp có $CI \geq 0,70$ vẫn xuất hiện ngay cả khi η lớn hơn 0,80, cho thấy việc gia tăng độ cứng tương đối của hệ vách chưa đủ để loại bỏ hoàn toàn nguy cơ sụp đổ lũy tiến trong các kịch bản hư hỏng nghiêm trọng.

Một đặc điểm đáng chú ý là tại cùng một giá trị η , chỉ số CI vẫn biến thiên trong phạm vi khá rộng, từ mức nguy cơ thấp đến nguy cơ cao. Điều này cho thấy khả năng chống sụp đổ lũy tiến không chỉ chịu ảnh hưởng của độ cứng tương đối giữa hệ vách và hệ sàn mà còn phụ thuộc vào mức độ hư hỏng của kết cấu và hiệu quả của quá trình tái phân phối tải trọng sau khi xảy ra mất cột. Vì vậy, mặc dù việc gia tăng độ cứng của hệ vách góp phần cải thiện ứng xử tổng thể của công trình, khả năng chống sụp đổ lũy tiến vẫn cần được đánh giá đồng thời với hiệu quả huy

động các cơ chế truyền lực thay thế, bao gồm cơ chế màng và cơ chế dây treo trong hệ dầm–sàn.

6. Kết luận

Nghiên cứu này đã phát triển quy trình phân tích tích hợp ETABS–Python–MATLAB nhằm đánh giá khả năng chống sụp đổ lũy tiến của công trình bê tông cốt thép cao tầng dưới tác động kết hợp giữa động đất và các kích bản mất nhiều cột đồng thời. Từ các kết quả thu được, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

(1) Số lượng cột bị loại bỏ là tham số ảnh hưởng lớn nhất đến ứng xử của công trình. Khi số lượng cột tăng từ 1 lên 8, chuyển vị đỉnh, hệ số khuếch đại động (DAF) và chỉ số sụp đổ (CI) đều tăng đáng kể, trong khi chỉ số độ bền vững (RI) giảm liên tục do khả năng tái phân phối tải trọng suy giảm. Một ngưỡng hư hỏng tới hạn được xác định trong khoảng 5–6 cột bị loại bỏ, tại đó các chỉ tiêu phản ứng thay đổi nhanh, phản ánh sự suy giảm rõ rệt của độ bền dư và sự gia tăng nguy cơ lan truyền phá hoại.

(2) Việc tăng chiều dày sàn từ 150 mm lên 350 mm giúp giảm khoảng 20–23% chuyển vị đỉnh, giảm gần 19% hệ số DAF và chỉ số CI, đồng thời làm tăng hơn 25% lực kéo catenary và cải thiện chỉ số RI. Kết quả này cho thấy hệ dầm–sàn không chỉ góp phần gia tăng độ cứng mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển của cơ chế màng và cơ chế dây treo, qua đó nâng cao khả năng truyền tải trọng thay thế sau khi xảy ra mất cột.

(3) Ảnh hưởng của chiều dày vách được ghi nhận rõ rệt hơn so với chiều dày sàn đối với hầu hết các chỉ tiêu đánh giá. Khi chiều dày vách tăng từ 200 mm lên 600 mm, chuyển vị giảm khoảng 28–33%, hệ số DAF giảm khoảng 28%, chỉ số CI giảm gần 28%, trong khi chỉ số RI tăng khoảng 32%. Những kết quả này cho thấy việc gia tăng độ cứng của hệ vách giúp cải thiện đáng kể khả năng kiểm soát chuyển vị, hạn chế hiệu ứng P– Δ và duy trì độ bền dư của công trình trong các kích bản mất nhiều cột.

(4) Phân tích mối quan hệ giữa chỉ số sụp đổ (CI) và tỷ số độ cứng tương đối (η) cho thấy việc tăng độ cứng của hệ vách góp phần cải thiện ứng xử tổng thể của công trình, nhưng không phải là yếu tố quyết định duy nhất đối với khả năng chống sụp đổ lũy tiến. Đối với cùng một giá trị η , chỉ số CI vẫn có thể thay đổi đáng kể tùy thuộc vào mức độ hư hỏng và khả năng tái phân phối tải trọng của hệ kết cấu. Điều này cho thấy khả năng huy động hiệu quả các cơ chế truyền lực thay thế của hệ dầm–sàn đóng vai trò quan trọng trong việc hạn chế sự lan truyền phá hoại sau khi mất cột.

(5) Từ góc độ thiết kế, kết quả nghiên cứu cho thấy việc nâng cao khả năng chống sụp đổ lũy tiến cần được xem xét đồng thời thông qua việc bảo đảm độ cứng thích hợp của hệ vách và khả năng phát triển hiệu quả của cơ chế màng và cơ chế dây treo trong hệ dầm–sàn. Quy trình tích hợp ETABS–Python–MATLAB được đề xuất cho phép tự động hóa quá trình xây dựng mô hình, thực hiện số lượng lớn kích bản phân tích và xử lý kết quả, qua đó hỗ trợ hiệu quả các nghiên cứu tham số và đánh giá khả năng chống sụp đổ lũy tiến của nhà cao tầng bê tông cốt thép.

Nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế do chỉ xem xét một công trình điển hình và một bản ghi động đất đã được hiệu chỉnh theo phổ thiết kế. Trong tương lai, cần mở rộng nghiên cứu cho nhiều loại công trình, nhiều kích bản động đất và điều kiện đa hiểm họa khác nhau, đồng thời kết hợp phân tích độ tin cậy, đánh giá bất định mô hình và dữ liệu thực nghiệm nhằm nâng cao tính tổng quát và độ tin cậy của phương pháp đề xuất.

Tài liệu tham khảo

- [1] Izzuddin, B.A., Vlassis, A.G., Elghazouli, A.Y., & Nethercot, D.A. (2007). "Assessment of progressive collapse in multi-storey buildings". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings* 160(4), 197–205. DOI: 10.1680/stbu.2007.160.4.197
- [2] Marjanishvili, S.M. (2004). "Progressive analysis procedure for progressive collapse". *Journal of Performance of Constructed Facilities* 18(2), 79–85. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2004)18:2(79)

- [3] Kaewkulchai, G., & Williamson, E.B. (2004). "Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis". *Computers & Structures* 82(7–8), 639–651. DOI: 10.1016/j.compstruc.2003.12.001
- [4] Qian, K., & Li, B. (2017). "Dynamic and residual behavior of reinforced concrete floors following instantaneous removal of a column". *Engineering Structures* 148, 175–184. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.06.059
- [5] Yu, J., & Tan, K.H. (2013). "Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam-column sub-assemblages". *Engineering Structures* 55, 90–106. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.08.040
- [6] Regan, P.E. (1975). "Catenary action in damaged concrete structures". *ACI Special Publication SP-48*, 191–224.
- [7] Kim, J., & An, D. (2008). "Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action". *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 18(4), 455–465. DOI: 10.1002/tal.448
- [8] Wang, Y., Zhang, B., Gu, X.L., & Lin, F. (2022). "Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of RC frame structures considering transverse beam and slab effects". *Journal of Building Engineering* 47, 103908. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103908
- [9] General Services Administration. (2016). *Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance*. Washington, DC, USA.
- [10] Department of Defense. (2009). *Unified Facilities Criteria UFC 4-023-03: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse*. Washington, DC, USA.
- [11] Sasani, M., & Kropelnicki, J. (2007). "Progressive collapse analysis of an RC structure". *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 17(4), 757–771. DOI: 10.1002/tal.375
- [12] Sasani, M., Bazan, M., & Sagioglu, S. (2007). "Experimental and analytical progressive collapse evaluation of an actual reinforced concrete structure". *ACI Structural Journal* 104(6), 731–739.
- [13] Yi, W.J., He, Q.F., Xiao, Y., & Kunnath, S.K. (2008). "Experimental study on progressive collapse-resistant behavior of reinforced concrete frame structures". *ACI Structural Journal* 105(4), 433–439.
- [14] Qian, K., & Li, B. (2013). "Performance of three-dimensional reinforced concrete beam-column substructures under column-removal scenario". *Journal of Structural Engineering* 139(4), 584–594. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000630
- [15] Starossek, U. (2009). *Progressive Collapse of Structures*. London, UK: Thomas Telford Publishing.
- [16] Khandelwal, K., El-Tawil, S., & Sadek, F. (2009). "Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames". *Journal of Constructional Steel Research* 65(3), 699–708. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.02.007
- [17] Fu, F. (2016). *Structural Analysis and Design to Prevent Disproportionate Collapse*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- [18] Lu, X., Lu, X.Z., Guan, H., & Ye, L.P. (2013). "Collapse simulation of reinforced concrete high-rise building induced by extreme earthquakes". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 42(5), 705–723. DOI: 10.1002/eqe.2240
- [19] Adam, J.M., Parisi, F., Sagaseta, J., & Lu, X. (2018). "Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century". *Engineering Structures* 173, 122–149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
- [20] Fu, Q.L., Tan, L., Long, B., & Kang, S.B. (2023). "Numerical investigations of progressive collapse behaviour of multi-storey reinforced concrete frames". *Buildings* 13(2), 533. DOI: 10.3390/buildings13020533
- [21] Huy, P.P.A., Tuấn, N.Đ., Tùng, N.T., & Vương, N.V. (2025). "Phân tích sự sụp đổ tòa nhà Văn phòng Kiểm toán Nhà nước Thái Lan sau động đất bằng phương pháp phi tuyến trên ETABS". *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Duy Tân* 3(70), 1–16.
- [22] Computers & Structures, Inc. (2016). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*. Walnut Creek, CA, USA: Computers & Structures, Inc.
- [23] Meinhardt (Thailand) Ltd. (2019, April). *Bản thiết kế tòa nhà làm việc mới của Văn phòng Kiểm toán Nhà nước – Giai đoạn 4: Bản vẽ thi công hoàn chỉnh Final Drawing* [Technical design drawings].
- [24] Center for Engineering Strong Motion Data. (2025). *Internet Quick Report: 28 March 2025 Myanmar earthquake Event ID: us7000pn9s*. Truy cập ngày 07/07/2026, từ https://www.strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/iqr_dist_DM2.pl?IQRID=us7000pn9s