



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

Collapse analysis of the State Audit Office Building in Thailand after the earthquake using ETABS-based nonlinear method

Phạm Phú Anh Huy^{a,b,*}, Nguyễn Đức Tuấn^c, Nguyễn Thanh Tùng^c, Nguyễn Văn Vương^c
Pham Phu Anh Huy^{a,b,*}, Nguyen Duc Tuan^c, Nguyen Thanh Tung^c, Nguyen Van Vuong^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*Lớp K28XDD, Khoa Xây dựng, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^c*K28XDD Class, Faculty of Civil Engineering, School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam*

(Ngày nhận bài: 12/05/2025, ngày phản biện xong: 26/05/2025, ngày chấp nhận đăng: 07/06/2025)

Tóm tắt

Bài báo này phân tích các nguyên nhân kỹ thuật dẫn đến sự sụp đổ của tòa nhà Văn phòng Kiểm toán Nhà nước (SAO) tại Bangkok, Thái Lan, sau trận động đất mạnh 7.7 độ Richter xảy ra tại Myanmar vào tháng 3 năm 2025. Thông qua mô hình phân tích phi tuyến 3D sử dụng phần mềm ETABS, kết hợp với dữ liệu về thiết kế và thi công thực tế, nghiên cứu xác định ba nguyên nhân chính gây ra sự cố: (1) chất lượng vật liệu xây dựng không đảm bảo, đặc biệt là thép cường độ thấp; (2) thiết kế kháng chấn không đầy đủ, thể hiện qua các đặc trưng động học như chuyển vị đỉnh, chuyển vị tương đối giữa các tầng và chu kỳ dao động cơ bản T_1 ; và (3) công tác giám sát thi công lỏng lẻo và thiếu sự phối hợp kỹ thuật. Kết quả phân tích động học cho thấy hệ kết cấu thiếu độ cứng và dễ xảy ra cộng hưởng khi chịu tác động động đất. Dựa trên các phát hiện này, bài báo đề xuất các giải pháp cụ thể nhằm cải thiện thiết kế kháng chấn, nâng cao chất lượng vật liệu và tăng cường kiểm soát thi công, qua đó giảm thiểu rủi ro cho các công trình cao tầng tại khu vực có nguy cơ địa chấn.

Từ khóa: sập công trình cao tầng; động đất; chất lượng vật liệu; thiết kế kết cấu; giám chấn; giám sát thi công; khả năng kháng chấn.

Abstract

This paper investigates the technical causes behind the collapse of the State Audit Office (SAO) building in Bangkok, Thailand, following a magnitude 7.7 earthquake that struck Myanmar in March 2025. Utilizing a nonlinear 3D analytical model developed in ETABS, combined with information from the building's design and construction phases, the study identifies three primary causes of the failure: (1) substandard construction materials, particularly low-quality steel; (2) insufficient seismic design, as evidenced by structural dynamic characteristics such as peak displacement, inter-story drift, and the fundamental period T_1 ; and (3) inadequate construction supervision and poor technical coordination. The dynamic analysis further reveals that the structural system lacked adequate stiffness and was susceptible to resonance under seismic excitation. Based on these findings, the paper proposes targeted solutions to improve seismic design, material quality, and construction supervision, thereby reducing earthquake-induced risks for high-rise buildings in seismic-prone areas.

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

Keywords: high-rise building collapse; earthquake; material quality; structural design; damping system; construction supervision; seismic resistance.

1. Giới thiệu chung

Vào ngày 28 tháng 3 năm 2025, một trận động đất mạnh 7.7 độ Richter xảy ra tại Myanmar đã gây ra ảnh hưởng nghiêm trọng đến nhiều khu vực lân cận, trong đó có Thái Lan. Một trong những sự cố đáng chú ý nhất là sự sụp đổ hoàn toàn của tòa nhà Văn phòng Kiểm toán Nhà nước (SAO) cao 33 tầng tại thủ đô Bangkok, trong khi công trình đang trong giai đoạn thi công. Mặc dù tác động địa chấn là nguyên nhân trực tiếp, nhưng các yếu tố kỹ thuật như thiết kế kháng chấn không đầy đủ, chất lượng vật liệu kém và công tác giám sát thi công lỏng lẻo đã góp phần quyết định vào mức độ nghiêm trọng của sự cố [1–4]. Đây là hồi chuông cảnh báo đối với các quốc gia đang phát triển có hạ tầng cao tầng nằm trong vùng nguy cơ địa chấn.

Trong những thập kỷ qua, nhiều công trình nghiên cứu và thực tiễn trên toàn cầu đã chỉ ra mối liên hệ trực tiếp giữa thiết kế động học không phù hợp và hiện tượng sụp đổ kết cấu trong điều kiện động đất mạnh. Một ví dụ kinh điển là vụ sập đoạn cao tốc Hanshin dài khoảng 600m trong trận động đất Kobe năm 1995 tại Nhật Bản. Nguyên nhân chủ yếu được xác định là do sự cộng hưởng giữa tần số dao động của kết cấu cầu và phổ rung động nền, dẫn đến mất ổn định hệ trụ cột và phá hủy toàn bộ kết cấu [5, 6]. Hiện tượng cộng hưởng này được xem là một trong những cơ chế chính gây ra sự khuếch đại dao động và làm gia tăng đáng kể nguy cơ phá hoại đối với công trình cao tầng hoặc kết cấu nhịp lớn. Các nghiên cứu gần đây tại Thổ Nhĩ Kỳ, đặc biệt là sau trận động đất kép tại Gaziantep và Kahramanmaraş năm 2023, tiếp tục làm rõ vai trò của thiết kế động học trong việc xác định khả năng kháng chấn thực tế. Papazafeiropoulos và cộng sự [7] đã sử dụng dữ liệu gia tốc nền để ước lượng phản ứng dao động của các tòa nhà cao tầng trong khu vực ảnh

hưởng. Kết quả cho thấy nhiều công trình có chu kỳ dao động riêng vượt quá giới hạn an toàn, dẫn đến mức độ biến dạng tầng lớn và hư hại nghiêm trọng ở các cấu kiện chịu lực. Các nghiên cứu sau đó chỉ ra rằng sai lệch trong thiết kế chu kỳ dao động cơ bản T_1 , kết hợp với việc bỏ qua các yếu tố tương tác công trình - nền đất, là nguyên nhân khiến tòa nhà dễ dàng rơi vào trạng thái cộng hưởng và phá hủy cục bộ hoặc toàn phần [8]. Bên cạnh các yếu tố thiết kế động học, vấn đề chất lượng vật liệu và giám sát thi công cũng được đề cập rộng rãi như các yếu tố góp phần quan trọng làm suy yếu cấu trúc. Nghiên cứu của Kim và cộng sự [9] đã cho thấy rằng vật liệu thép không đạt yêu cầu về giới hạn chảy và khả năng chịu kéo có thể làm suy giảm nghiêm trọng năng lực chịu uốn và nén của các cấu kiện chính như cột và dầm. Cùng quan điểm, Akkaya và cộng sự [10] nhấn mạnh rằng sự thiếu kiểm tra vật liệu trong quá trình thi công dẫn đến nguy cơ sử dụng vật liệu không đạt chuẩn, gây ra các khuyết tật tiềm ẩn trong kết cấu bê tông cốt thép. Điều này đặc biệt nguy hiểm đối với các công trình cao tầng ở khu vực có hoạt động địa chấn cao, nơi mà năng lực phân tán năng lượng và độ dẻo của vật liệu là yếu tố then chốt giúp công trình duy trì ổn định sau va chấn.

Một hướng nghiên cứu quan trọng khác là phát triển các phương pháp và công cụ giám sát thi công và kiểm soát chất lượng nhằm đảm bảo tuân thủ thiết kế, nâng cao hiệu quả và chất lượng thi công. Nghiên cứu của Feng và cộng sự [11] cho thấy rằng hệ thống giám sát lỏng lẻo, thiếu kiểm tra định kỳ và không kiểm soát được nguồn gốc vật liệu là các yếu tố thường gặp dẫn đến các lỗi thi công nghiêm trọng. Galappaththi và Rao [12, 13] đã chỉ ra rằng ngay cả những sai lệch nhỏ trong vị trí lắp đặt kết cấu chịu lực hoặc sai sót trong khâu gia cố cũng có thể gây mất ổn định cục bộ, đặc biệt là khi không được khắc

phục kịp thời. Những kết luận này nhấn mạnh rằng việc tuân thủ các tiêu chuẩn kiểm định, giám sát độc lập và kiểm tra xuyên suốt vòng đời thi công là điều kiện tiên quyết để đảm bảo hiệu năng kháng chấn cho công trình. Gần đây, với sự phát triển của công nghệ, các công trình gần đây đã tích hợp trí tuệ nhân tạo và dữ liệu viễn thám trong đánh giá sau thảm họa, như nghiên cứu của Yu và cộng sự [14], nhằm xác định các vùng bị hư hỏng nặng do thiết kế động học không phù hợp. Kết quả cho thấy các công trình có tần số dao động không đồng bộ với đặc trưng nền đất thường chịu tổn thất lớn nhất, làm nổi bật nhu cầu tối ưu hóa thiết kế dao động ngay từ giai đoạn đầu của dự án. Từ đó, việc đánh giá đúng chu kỳ dao động cơ bản, kết hợp với lựa chọn cấu kiện và vật liệu thích hợp, là giải pháp chủ động để giảm thiểu rủi ro sập đổ trong điều kiện động đất ngày càng phức tạp.

Mặc dù các tiêu chuẩn thiết kế hiện đại như Eurocode 8 [15] và ASCE/SEI 41-23 [16] đã đưa ra khung kỹ thuật đầy đủ cho công trình chịu động đất, khoảng cách giữa lý thuyết và thực tiễn triển khai vẫn còn đáng kể. Trong nhiều dự án, việc lựa chọn cấu kiện không hợp lý, bỏ qua dao động riêng, và thiếu hệ thống giảm chấn đã dẫn đến tăng rủi ro sụp đổ. Bên cạnh đó, quá trình thi công thiếu giám sát, đặc biệt trong việc kiểm tra vật liệu đầu vào như thép và bê tông, càng làm suy yếu năng lực chịu lực của công trình [11–13]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tập trung làm rõ nguyên nhân kỹ thuật dẫn đến sự cố sập đổ của tòa nhà SAO thông qua phân tích hai yếu tố cốt lõi: kết quả thiết kế và quá trình thi công. Bằng cách xây dựng mô hình phân tích phi tuyến động học sử dụng phần mềm ETABS, kết hợp với dữ liệu thực tế, nghiên cứu nhằm: (1) cải thiện quy trình thiết kế thông qua phân tích đặc tính dao động của công trình; (2) nâng cao hiệu quả giám sát thi công bằng cách chỉ ra các sai sót trong kiểm soát vật liệu và lắp đặt; và (3) đề xuất ứng dụng vật liệu và công nghệ tiên tiến để tăng

khả năng kháng chấn. Những đóng góp này không chỉ hữu ích cho việc nâng cao an toàn công trình tại Thái Lan mà còn mang giá trị tham khảo cho các khu vực có nguy cơ địa chấn tương tự.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích hậu kiểm (post-event forensic analysis) nhằm xác định nguyên nhân kỹ thuật dẫn đến sự cố sập đổ của tòa nhà SAO sau trận động đất lớn xảy ra tại Myanmar vào tháng 3 năm 2025. Phương pháp tiếp cận được triển khai qua ba giai đoạn chính như sau:

2.1. Thu thập và tổng hợp dữ liệu thực tế

Quá trình phân tích được xây dựng trên cơ sở dữ liệu hậu kiểm toàn diện, bao gồm ba nhóm thông tin chính: (i) hồ sơ thiết kế và bản vẽ kỹ thuật của tòa nhà SAO do công ty Meinhardt (Thái Lan) thiết kế [17], trong đó thể hiện rõ cấu hình hệ kết cấu chịu lực chính, cấu kiện sàn dự ứng lực, đặc tính vật liệu và thông số hình học của các cấu kiện bê tông cốt thép; (ii) dữ liệu thực tế và thông tin liên quan đến quá trình thi công, chất lượng vật liệu và hoạt động giám sát kỹ thuật, được tổng hợp từ các nguồn báo chí và báo cáo điều tra chính thức. Đặc biệt, các sai phạm nghiêm trọng như sử dụng thép không đạt tiêu chuẩn của hãng Sky, vi phạm trong quy trình giám sát thi công, và sự tồn tại của các chữ ký kỹ sư giả mạo trên hồ sơ kỹ thuật đã được ghi nhận, phản ánh mức độ thiếu kiểm soát chất lượng nghiêm trọng trong toàn bộ quá trình xây dựng [1–4].

Bên cạnh đó, dữ liệu hình ảnh và video hiện trường được thu thập từ truyền thông Thái Lan và quốc tế đóng vai trò quan trọng trong việc tái hiện hiện tượng sụp đổ và xác định khu vực chịu ảnh hưởng nghiêm trọng. Các thông tin về tâm chấn và gia tốc nền tại Bangkok cũng được sử dụng để xây dựng phổ phản ứng thiết kế phục vụ mô phỏng động đất. Việc tổng hợp và đồng bộ hóa các nguồn dữ liệu trên không chỉ giúp mô

hình hóa chính xác điều kiện thực tế của công trình trong phần mềm ETABS, mà còn tạo cơ sở vững chắc cho quá trình phân tích nguyên nhân sập đổ dựa trên tiêu chuẩn Eurocode 8 [15] và ASCE/SEI 41-23 [16].

2.2. Phân tích kết cấu bằng mô hình số

Dựa trên các tài liệu thiết kế, thông tin thi công và dữ liệu thu thập từ hiện trường sau sự cố, mô hình kết cấu ba chiều (3D) của tòa nhà SAO được xây dựng lại trong môi trường phần mềm ETABS - v22 [18] nhằm mô phỏng toàn diện hệ thống chịu lực chính. Quá trình phân tích mô hình được thực hiện dưới hai dạng: (i) phân tích tuyến tính (linear analysis) nhằm đánh giá sơ bộ phản ứng kết cấu dưới tác động của tải trọng tĩnh và động đất thiết kế; và (ii) phân tích phi tuyến (nonlinear analysis) sử dụng mô hình vật liệu phi tuyến và phân bố mô men phi tuyến để mô phỏng ứng xử thực tế của kết cấu khi vượt qua giới hạn đàn hồi.

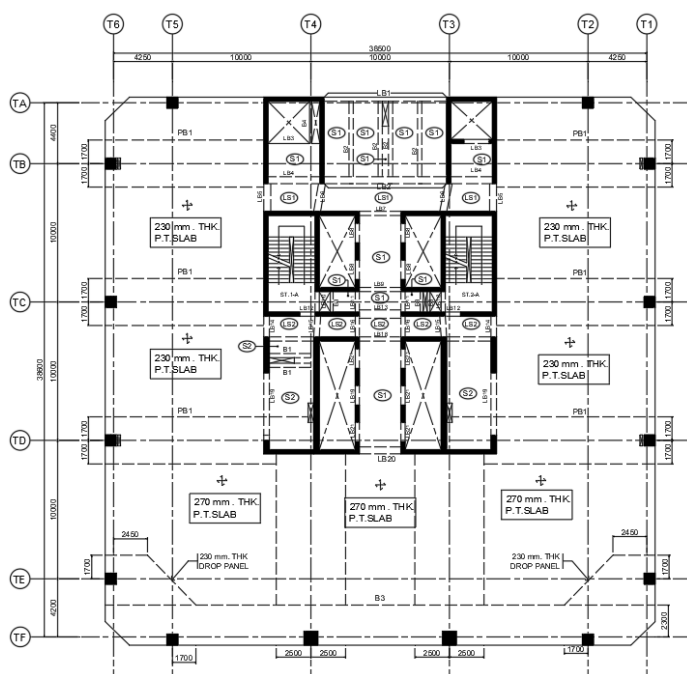
Tải trọng động đất được xác định dựa trên trận động đất mạnh 7.7 độ Richter xảy ra tại Myanmar vào tháng 3 năm 2025, với gia tốc nền điều chỉnh do vị trí công trình cách tâm chấn khoảng 1000km. Phổ phản ứng được xây dựng theo quy định của Eurocode 8 [15] và ASCE/SEI 41-23 [16] để phản ánh chính xác đặc trưng dao động nền. Trọng tâm của phân tích là đánh giá khả năng chịu lực tổng thể, mức độ biến dạng của kết cấu (chuyển vị đỉnh, chuyển vị tương đối tầng), chu kỳ dao động cơ bản T_1 và nguy cơ cộng hưởng với sóng địa chấn. Mô hình được hiệu chỉnh và kiểm chứng bằng dữ liệu hiện trường sau sự cố đã được công bố nhằm đảm bảo độ tin cậy của các kết quả phân tích. Các kết quả thu được từ mô hình số là cơ sở để nhận diện các điểm yếu nội tại trong thiết kế hiện tại, từ đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm tăng cường khả năng kháng chấn và độ ổn định kết cấu của công trình.

2.3. Thiết lập tiêu chí động học và đối chiếu tiêu chuẩn

Để đánh giá đầy đủ khả năng đáp ứng động đất của công trình, nghiên cứu đã thiết lập một tập hợp các chỉ số động học then chốt làm cơ sở phân tích và so sánh. Các chỉ tiêu bao gồm: chu kỳ dao động cơ bản T_1 (first-mode natural period), chuyển vị đỉnh Δ (roof displacement), độ lệch tầng δ/h (inter-story drift) của kết cấu. Những thông số này không chỉ phản ánh trực tiếp đặc trưng dao động và biến dạng của công trình khi chịu tác động địa chấn, mà còn là cơ sở để đánh giá mức độ an toàn và ổn định tổng thể trong điều kiện ngoài miền đàn hồi. Toàn bộ các chỉ số động học được đối chiếu với các giới hạn kỹ thuật quy định trong hai bộ tiêu chuẩn kháng chấn phổ biến hiện nay, bao gồm Eurocode 8 [15] và ASCE/SEI 41-23 [16]. Việc so sánh định lượng giữa kết quả mô phỏng từ mô hình số với các tiêu chí giới hạn của tiêu chuẩn cho phép xác định mức độ sai lệch và lượng hóa rõ ràng khả năng chịu động đất thực tế của kết cấu. Đồng thời, đối chiếu này cũng đóng vai trò làm cơ sở đánh giá hiệu quả của các phương án cải tiến cấu trúc trong các phần phân tích tiếp theo.

3. Mô hình hóa tòa nhà SAO bằng phần mềm ETABS

Công trình SAO là một tòa nhà cao tầng gồm 33 tầng (3 tầng hầm và 30 tầng nổi) [2, 3]. Hình chiếu mặt bằng và phối cảnh ba chiều của công trình được trình bày tại Hình 1, trong khi mô hình hóa kết cấu trên phần mềm ETABS phiên bản 22 [18] được thể hiện tại Hình 2. Về hệ kết cấu chịu lực chính, công trình sử dụng tổ hợp giữa hệ vách-lõi bê tông cốt thép (BTCT) và hệ cột bố trí quanh chu vi công trình. Đồng thời, hệ kết cấu ngang bao gồm sàn ứng suất trước kết hợp với hệ dầmбет.



(a) Mặt bằng



(b) Phối cảnh 3D

Hình 1. Mặt bằng và phối cảnh tòa nhà SAO [2][17]

Liên quan đến đặc tính vật liệu, các thông số chính được sử dụng trong mô hình bao gồm: bê tông có cường độ nén 280ksc (27.4MPa), được áp dụng cho các kết cấu nền móng như cọc, móng và sàn mặt đất. Bên cạnh đó, bê tông có cường độ nén 350ksc (34.3 MPa) được sử dụng cho sàn ứng suất trước và toàn bộ các cấu kiện kết cấu ở các tầng từ tầng 20 trở lên, bao gồm tường lõi, cột và dầm liên kết. Ngoài ra, để tăng khả năng chịu tải cho các tầng dưới, bê tông có cường độ cao nhất là 500ksc (49MPa) được áp dụng cho các cột, tường lõi và dầm liên kết từ móng đến tầng 19. Về cốt thép, công trình sử dụng hai loại chính. Cụ thể, thép cường độ cao là thép cán nóng có gân, đáp ứng tiêu chuẩn ASTM A615/A615M-22 [19], với giới hạn chảy đảm bảo là 4000ksc (392MPa) cho đường kính từ (12-20)mm và 5000ksc (490MPa) cho đường kính từ (25-32)mm. Đồng thời, thép mềm sử dụng là loại tròn trơn, cũng tuân thủ tiêu chuẩn ASTM A615/A615M-22, với giới hạn chảy đảm bảo là 2400ksc (235MPa). Đối với các cấu kiện dự ứng lực, cáp được sử dụng là loại 7 sợi xoắn, đáp ứng tiêu chuẩn ASTM A416/A416M-12 [20], có cường độ chịu kéo lên tới 1860MPa.

Tiếp theo, xét về hình học của các cấu kiện, kích thước tiết diện dầm thay đổi từ (400×600)mm đến (500×1000)mm; trong khi đó, dầmбет có chiều cao cố định 500mm và bề rộng dao động từ 600mm đến 3400mm. Đối với cột, tiết diện dao động trong khoảng từ (800×800)mm đến (1200×1200)mm. Tương tự, chiều dày sàn dao động từ 230mm đến 250mm, còn tường vách và lõi có chiều dày trong khoảng 250mm đến 300mm [17].

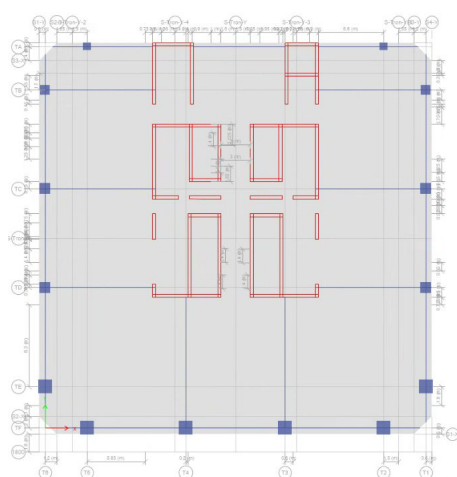
Trong quá trình mô hình hóa trên ETABS, các phần tử cột và dầm được định nghĩa là phần tử Frame; các cấu kiện như sàn và vách-lõi được mô hình hóa tương ứng là phần tử Slab và Wall. Cần lưu ý rằng, chân cột và vách-lõi được giả định là liên kết ngàm, tức là không xét đến ảnh hưởng của nền đất và móng, trong khi các liên kết còn lại được mô hình hóa là liên kết nút cứng nhằm đảm bảo tính toàn vẹn cấu trúc của hệ kết cấu. Đối với tải trọng động đất, công trình được tính toán bằng phương pháp phân tích phi tuyến theo phổ phản ứng. Phổ phản ứng thiết kế được lấy theo các quy định trong Eurocode 8 (EC-8) [21] và ASCE/SEI 41-23 [16]. Cụ thể, kịch bản động đất được xét đến là trận động đất mạnh với

độ lớn 7.7 theo thang Richter, tương ứng với gia tốc nền trong khoảng 0.4g đến 0.8g. Tuy nhiên, do vị trí công trình nằm cách tâm chấn khoảng 1000km, giá trị gia tốc nền được điều chỉnh và lấy khoảng 0.06g nhằm phản ánh chính xác hơn tác động động đất thực tế [22, 23]. Quá trình phân tích kết cấu được thực hiện trên phần mềm ETABS nhằm đánh giá đầy đủ khả năng chịu lực của các phần tử kết cấu dưới tác động đồng thời của tải trọng tĩnh và động đất. Đặc biệt, phân tích tập trung vào tần số dao động riêng và khả năng cộng hưởng với sóng địa chấn, với trọng tâm là các tầng cao của công trình. Qua đó, khả năng xuất hiện dao động quá mức được đánh giá nhằm xác định nguy cơ phá hoại của kết cấu. Trên cơ sở kết quả phân tích, các khuyến nghị về giải pháp cải thiện, tăng cường khả năng chịu động đất và nâng cao chất lượng vật liệu được đề xuất nhằm đảm bảo an toàn và hiệu quả sử dụng công trình.

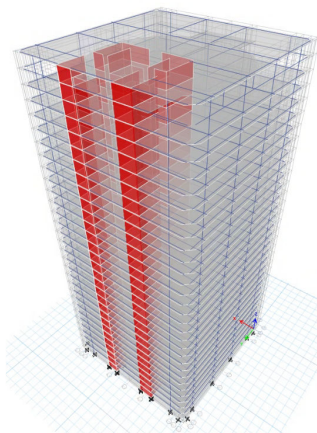
4. Kết quả và thảo luận

Dựa trên các dữ liệu thiết kế, đặc tính vật liệu và điều kiện thi công của công trình SAO tại Bangkok, cùng với mô hình kết cấu được xây dựng trong phần mềm ETABS, nghiên cứu đã tiến hành phân tích động học nhằm đánh giá nguyên nhân kỹ thuật dẫn đến sự sập đổ của công trình dưới tác động của động đất. Phần này trình bày chi tiết các kết quả phân tích theo từng khía cạnh trọng yếu, bao gồm đánh giá thiết kế kết cấu, chất lượng vật liệu xây dựng, sự thiếu chuẩn bị cho động đất trong thiết kế kết cấu, hiện tượng cộng hưởng (Resonance) và tác động từ các tầng cao, quá trình giám sát và thi công công trình. Các phân tích này là cơ sở để xác định rõ mối quan hệ giữa các yếu tố kỹ thuật và ứng xử của công trình trong điều kiện địa chấn, từ đó đưa ra các khuyến nghị cải thiện phù hợp.

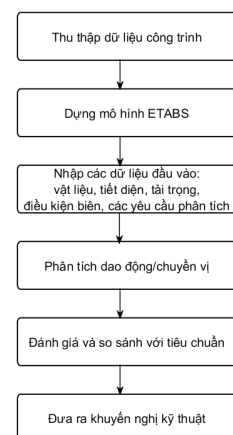
4.1. Đánh giá kết quả thiết kế



(a) Mặt bằng



(b) Mô hình 3D



(c) Sơ đồ phân tích

Hình 2. Mô hình công trình trên phần mềm ETABS và sơ đồ phân tích

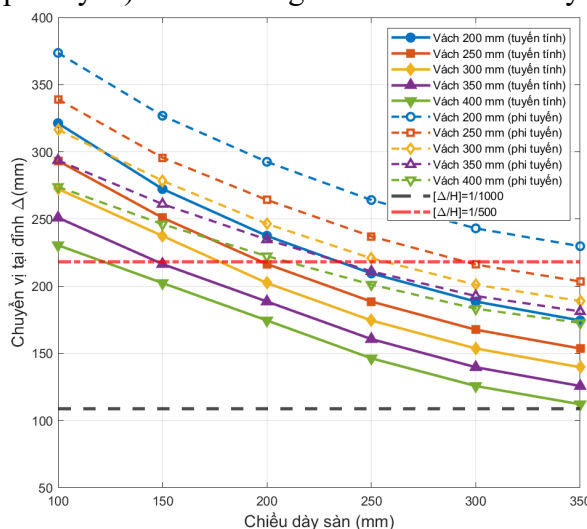
Hình 3 thể hiện kết quả tính toán chuyển vị đỉnh (Δ), chuyển vị tương đối giữa các tầng (δ/h), và chu kỳ dao động cơ bản T_1 tương ứng với chiều dày sàn thay đổi từ 100mm đến 350mm, chiều dày vách-lỗ thay đổi từ 200mm đến 400mm trong 2 trường hợp phân tích tuyến tính và phi tuyến. Kết quả đồng thời được so sánh với quy định của 2 tiêu chuẩn Eurocode 8 [15] và ASCE/SEI 41-23 [16].

4.1.1. Ảnh hưởng của chiều dày sàn và vách-lỗ đến chuyển vị đỉnh (Δ)

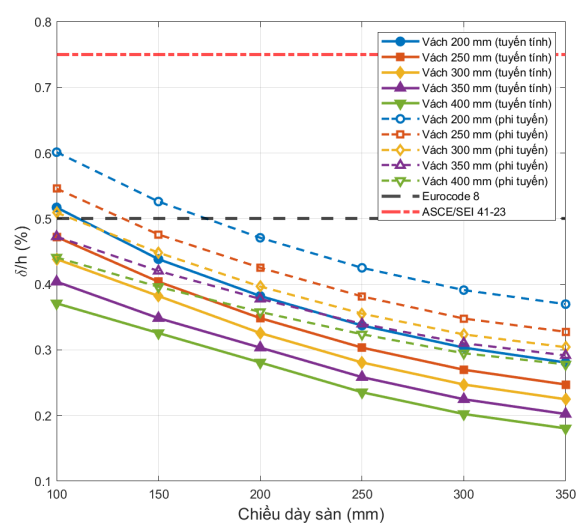
Chuyển vị đỉnh (Δ) là một trong những chỉ số quan trọng phản ánh khả năng biến dạng toàn phần của công trình dưới tác động của tải trọng ngang, đặc biệt là động đất. Kết quả từ Hình 3(a) cho thấy rõ xu hướng suy giảm chuyển vị đỉnh khi chiều dày của sàn và vách-lỗ tăng. Cụ thể, đối với các mô hình có chiều dày sàn tăng từ

200mm đến 300mm, và chiều dày vách-lỗ tăng từ 200mm đến 400mm, giá trị chuyển vị đỉnh giảm đáng kể theo từng cấp tăng độ dày. Phân tích tuyến tính cho thấy chuyển vị giảm gần tuyến tính theo mức tăng chiều dày cấu kiện, phản ánh mối quan hệ gần như tỷ lệ nghịch giữa độ cứng và độ lệch tổng thể của kết cấu. Ngược lại, phân tích phi tuyến cho thấy mức giảm chuyển vị chậm hơn, đặc biệt ở các cấu hình có chiều dày lớn, do mô hình phi tuyến đã xét đến hiện tượng mềm đi và hình thành biến dạng dẻo tại các khu vực chịu mô men lớn. Mức chênh lệch giữa hai phương pháp phân tích (tuyến tính và phi tuyến) trở nên đáng kể hơn khi chiều dày

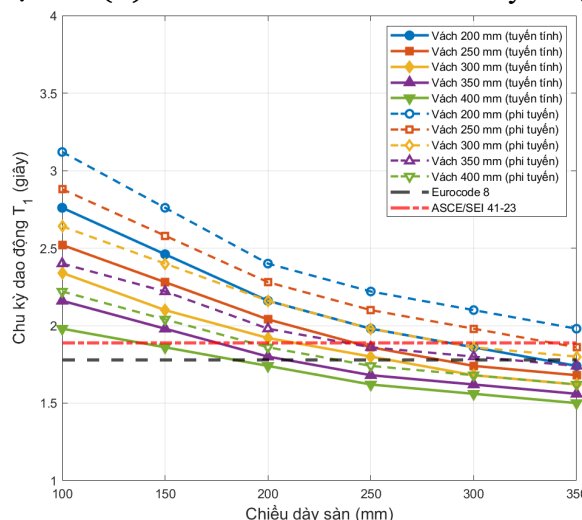
vách và sàn nhỏ. Điều này phản ánh rằng ở các hệ kết cấu có độ cứng thấp, tác động của phi tuyến trở nên nổi bật hơn. Tuy nhiên, khi độ cứng kết cấu tăng lên (với sàn $\geq 250\text{mm}$ và vách-lỗ $\geq 300\text{mm}$), sự khác biệt giữa hai phương pháp dần thu hẹp, cho thấy kết cấu hoạt động chủ yếu trong miền đàn hồi hoặc bán đàn hồi. Một điểm đáng lưu ý là trong tất cả các hệ kết cấu có chiều dày sàn $\geq 250\text{mm}$ và chiều dày vách-lỗ $\geq 300\text{mm}$, chuyển vị đỉnh đều nhỏ hơn giới hạn cho phép ($[\Delta/H] = 1/500 - 1/1000$) để đảm bảo tính khả dụng và an toàn vận hành của công trình sau động đất.



(a) Quan hệ giữa chiều dày sàn và vách-lỗ với chuyển vị đỉnh (Δ)



(b) Quan hệ giữa chiều dày sàn và vách-lỗ với chuyển vị tầng tương đối (δ/h)



(c) Quan hệ giữa chiều dày sàn và vách-lỗ với chu kỳ dao động T_1

Ghi chú: δ là chuyển vị tương đối lớn nhất giữa 2 tầng liên kế; h là chiều cao tầng

Hình 3. Kết quả phân tích trên phần mềm ETABS

4.1.2. Ảnh hưởng của chiều dày sàn và vách-lối đến chuyển vị tương đối giữa 2 tầng (δ/h)

Chuyển vị tầng tương đối (δ/h) là một chỉ số quan trọng trong đánh giá khả năng chống biến dạng của công trình dưới tác động của tải trọng ngang, đặc biệt là trong thiết kế chống động đất. Giá trị này biểu thị mức độ nghiêng tương đối giữa hai tầng liên tiếp và có mối liên hệ trực tiếp đến sự ổn định kết cấu cũng như mức độ hư hại tiềm ẩn của các thành phần phi kết cấu (tường ngăn, lớp hoàn thiện, thiết bị nội thất,...). Kết quả từ Hình 3(b) cho thấy δ/h giảm rõ rệt khi chiều dày của sàn và vách-lối tăng. Đối với các trường hợp chiều dày sàn $\geq 250\text{mm}$ và chiều dày vách-lối $\geq 300\text{mm}$, giá trị δ/h tại tất cả các tầng đều nhỏ hơn 0.5%. Mức này không chỉ nằm dưới giới hạn tối đa được khuyến nghị trong Eurocode 8 [15] và ASCE/SEI 41-23 [16] (thường dao động từ 0.5% đến 0.75%, tùy thuộc vào cấp độ an toàn yêu cầu), mà còn tiệm cận các tiêu chí thiết kế phục vụ khả năng sử dụng sau động đất. Đặc biệt, hiệu ứng giảm δ/h rõ ràng hơn ở các tầng thấp – nơi lực cắt tầng và mô men uốn lớn hơn – cho thấy ảnh hưởng đáng kể của độ cứng tăng lên từ vách-lối và sàn đối với kiểm soát biến dạng trong khu vực chịu tải trọng cao. Khi chiều dày vách tăng từ 200mm lên 400mm, sự giảm δ/h có thể lên tới (40-60)%, chứng tỏ hiệu quả trực tiếp của việc tăng độ cứng cục bộ trong việc cải thiện ổn định ngang tổng thể. Phân tích phi tuyến cho kết quả δ/h lớn hơn so với phân tích tuyến tính ở tất cả các trường hợp, phản ánh tác động của biến dạng dẻo và giảm độ cứng và phân bố mô men phi tuyến trong kết cấu. Tuy nhiên, xu hướng tổng thể vẫn nhất quán δ/h giảm theo chiều dày tăng của sàn và vách. Từ góc độ thiết kế, δ/h dưới 0.5% không chỉ đáp ứng yêu cầu an toàn mà còn cải thiện đáng kể khả năng duy trì chức năng sử dụng sau động đất, đặc biệt trong các công trình quan trọng như tòa nhà SAO. Do đó, hệ kết cấu với sàn $\geq 250\text{mm}$ và vách-lối $\geq 300\text{mm}$ có thể được xem là giải pháp thiết kế tối ưu khi xem xét hiệu năng dịch chuyển tầng dưới điều kiện tải trọng động đất.

4.1.3. Ảnh hưởng của chiều dày sàn và vách-lối đến chu kỳ dao động (T_1)

Chu kỳ dao động cơ bản T_1 là đại lượng đặc trưng phản ánh dao động chính của công trình dưới tác động của tải trọng động như động đất. Đây là tham số then chốt trong việc xác định phổ phản ứng động đất, tính toán nội lực, và đánh giá mức độ nhạy cảm của công trình đối với dao động nền. Kết quả từ Hình 3(c) cho thấy rằng T_1 có xu hướng giảm đáng kể khi chiều dày của sàn và vách-lối tăng. Cụ thể, khi chiều dày vách-lối tăng từ 200mm lên 400mm và chiều dày sàn tăng từ 100mm lên 350mm, chu kỳ dao động giảm liên tục, đặc biệt rõ rệt trong khoảng từ (100-250)mm chiều dày sàn, trước khi tiệm cận giá trị ổn định khi sàn dày trên 300mm. Điều này phản ánh sự gia tăng đáng kể về độ cứng tổng thể của hệ kết cấu khi các cấu kiện chính chịu uốn và cắt được gia cường. Sự gia tăng độ cứng dẫn đến giảm biên độ dao động, qua đó làm giảm chu kỳ dao động của hệ.

Phân tích phi tuyến cho kết quả chu kỳ lớn hơn so với phân tích tuyến tính ở tất cả chiều dày khảo sát. Sự chênh lệch này xuất phát từ đặc tính mô hình phi tuyến có xét đến ảnh hưởng của biến dạng dẻo và sự suy giảm độ cứng do tác động của tải trọng lớn. Những yếu tố này làm giảm độ cứng hiệu dụng của kết cấu, dẫn đến tần số dao động thấp hơn và chu kỳ dài hơn. Sự khác biệt giữa hai phương pháp phân tích trở nên rõ rệt hơn ở các cấu hình có độ cứng thấp (vách-lối và sàn mỏng), cho thấy ảnh hưởng đáng kể của phi tuyến trong các công trình có độ linh hoạt cao hoặc tỷ lệ chiều cao lớn.

Đáng chú ý, khi chiều dày sàn đạt từ 250mm trở lên và chiều dày vách-lối từ 300mm trở lên, giá trị T_1 nằm trong khoảng tương đương hoặc thấp hơn so với các giá trị tính toán theo công thức kinh nghiệm trong Eurocode 8 (1.89s) và ASCE/SEI 41-23 (1.78s). Điều này cho thấy kết cấu trong các tổ hợp này đáp ứng tốt yêu cầu về độ cứng tối thiểu theo tiêu chuẩn thiết kế hiện

hành. Qua đó, kết quả mô phỏng khẳng định vai trò thiết yếu của việc lựa chọn chiều dày hợp lý cho các cấu kiện trọng yếu (sàn và vách-lối) trong việc kiểm soát đáp ứng động học của công trình cao tầng chịu tải trọng động đất.

4.1.4. Đánh giá thiết kế cấu kiện chịu lực chính của công trình SAO

Tòa nhà SAO được thiết kế với hệ kết cấu sàn phẳng có chiều dày phổ biến là 230mm (một số khu vực đạt đến 270mm), kết hợp với hệ vách-lối bê tông cốt thép chịu lực có chiều dày đồng đều 250mm. Dựa trên kết quả phân tích động học và chuyển vị thu được từ mô hình số, có thể đưa ra các nhận định đánh giá như sau:

Về chuyển vị đỉnh Δ : kết cấu thực tế của tòa nhà (sàn 230mm, vách-lối 250mm), chuyển vị đỉnh đạt khoảng 280mm trong trường hợp phân tích tuyến tính và 360mm trong trường hợp phân tích phi tuyến. Cả hai giá trị này đều vượt ngưỡng giới hạn chuyển vị toàn phần theo tiêu chuẩn, với mức không chế thấp nhất được xác định là $[\Delta] = H/500 = 218\text{mm}$. Kết quả này cho thấy hệ kết cấu hiện hành chưa đáp ứng yêu cầu về kiểm soát biến dạng toàn phần khi chịu tác động động đất thiết kế, đặc biệt trong điều kiện làm việc ngoài miền đàn hồi.

Về chuyển vị tương đối tầng (δ/h): Giá trị chuyển vị tương đối giữa các tầng đạt khoảng 0.50% (tuyến tính) và 0.58% (phi tuyến). Trong khi giá trị này nằm dưới giới hạn tối đa 0.75% của tiêu chuẩn ASCE/SEI 41-23, thì lại tiệm cận và vượt nhẹ mức không chế nghiêm ngặt hơn là 0.5% được quy định trong Eurocode 8 đối với các công trình quan trọng. Điều này cho thấy hệ kết cấu hiện tại chỉ đạt ngưỡng tối thiểu yêu cầu, nhưng không đảm bảo đầy đủ độ ổn định biến dạng tầng theo tiêu chuẩn quốc tế. Do đó, cần xem xét đánh giá chi tiết hơn ở giai đoạn thiết kế kỹ thuật, đặc biệt tại các tầng có nội lực lớn hoặc hệ vách bị gián đoạn.

Về chu kỳ dao động cơ bản T_1 : $T_1 = 2.3\text{s}$ đối với mô hình tuyến tính và 2.6s đối với mô hình phi tuyến. So sánh với các giá trị ước tính từ

công thức thực nghiệm của Eurocode 8 (1.89s) và ASCE/SEI 41-23 (1.78s), có thể thấy chu kỳ thực tế lớn hơn đáng kể. Sự sai lệch này phản ánh rằng hệ kết cấu hiện tại có độ cứng tổng thể chưa đủ, dẫn đến dao động chậm hơn và biên độ lớn hơn dưới tác động của tải trọng động. Điều này có thể ảnh hưởng bất lợi đến độ bền, khả năng sử dụng và hiệu năng năng lượng của công trình trong điều kiện động đất mạnh.

Phân tích tổng hợp các tham số đáp ứng động lực học của kết cấu công trình SAO cho thấy cấu hình hiện tại chưa đáp ứng đầy đủ các yêu cầu thiết kế theo các tiêu chuẩn Eurocode 8 và ASCE/SEI 41-23 về chuyển vị đỉnh (Δ), chuyển vị tầng tương đối (δ/h), và chu kỳ dao động cơ bản T_1 . Các giá trị này ghi nhận ở mức lớn, cho thấy độ cứng tổng thể của hệ kết cấu thấp, từ đó làm tăng nguy cơ dao động mạnh ở các tầng trên cao và gây nên biến dạng tương đối giữa 3 tầng lớn, có thể đây được xác định là một trong những nguyên nhân dẫn đến sự sụp đổ của công trình trong trận động đất xảy ra tại Myanmar ngày 28 tháng 3 năm 2025; các nguyên nhân khác sẽ được phân tích chi tiết trong phần sau của bài báo. Trong bối cảnh công trình tọa lạc tại khu vực có nguy cơ động đất trung bình đến cao như Bangkok, việc tăng cường độ cứng tổng thể là cần thiết nhằm nâng cao năng lực chịu lực phi tuyến và cải thiện đáp ứng động lực học. Các giải pháp kỹ thuật được đề xuất bao gồm: (i) tăng chiều dày vách-lối tại các khu vực trọng yếu lên tối thiểu 300 mm; (ii) bổ sung vách tầng cứng tại các tầng có chuyển vị lớn; và (iii) tích hợp hệ thống giảm chấn hoặc thiết bị điều khiển dao động. Để đánh giá hiệu quả của các giải pháp này, nhóm nghiên cứu đã tiến hành xây dựng thêm hai mô hình phân tích: (1) phương án 1 sử dụng kết cấu sàn ứng lực trước với dầm bê tông và vách-lối dày 300mm; (2) phương án 2 sử dụng kết cấu sàn sườn thông thường cùng với vách-lối dày 300mm. Kết quả trong Bảng 1 cho thấy mức độ cải thiện đáng kể về các chỉ số động học cũng như mức độ tiệm cận và đáp ứng các tiêu chuẩn thiết kế động đất Eurocode 8 và ASCE/SEI 41-23.

Bảng 1. So sánh thiết kế kết cấu hiện tại và đề xuất cho tòa nhà SAO

Tiêu chí kỹ thuật	Thiết kế hiện tại	Đề xuất thay đổi		Cải thiện so với hiện tại
	Hệ sàn ứng lực trước - dầm bê tông dày 230mm, vách-lõi dày 250mm	PA1: Hệ sàn ứng lực trước - dầm bê tông dày 300mm, vách-lõi dày 300mm	PA2: Hệ sàn sườn thông thường dày 300mm, vách-lõi dày 300mm	
Chu kỳ dao động $T_1(s)$	2.60	2.30	2.00	Giảm (11.5-23.1)%
Chuyển vị đỉnh $\Delta(mm)$	360	280	210	Giảm (22.2-41.7)%
Chuyển vị tương đối $\delta/h(\%)$	0.58	0.48	0.36	Giảm (17.2-38.0)%
Khả năng cộng hưởng	Không	Không	Không	-
Mức độ phù hợp với tiêu chuẩn thiết kế	Không đạt: vượt $\Delta, \delta/h, T_1$ cao	Gần đạt: Δ đạt, δ/h đạt, T_1 cải thiện	Đáp ứng đầy đủ cả $\Delta, \delta/h, T_1$	Cải thiện từng bước

Ghi chú: Phổ phản ứng thiết kế lấy theo ASCE/SEI 41-23 và EC-8 theo điều kiện địa chất tại Bangkok với gia tốc nền cực đại trong phạm vi (0.1-0.8)s, vì vậy khả năng cộng hưởng là không có; kết quả trong Bảng 1 là kết quả phân tích phi tuyến.



(a) Công trình lúc thi công



(b) Công trình lúc sụp đổ



(c) Công trình sau khi sụp đổ

Hình 4. Hình ảnh sụp đổ công trình [1, 2, 24]

4.2. Chất lượng vật liệu xây dựng

Một trong những yếu tố quan trọng nhất trong việc phân tích sự cố sụp tòa nhà SAO là chất lượng vật liệu xây dựng, đặc biệt là thép sử dụng trong kết cấu tòa nhà. Việc sử dụng thép không đạt chuẩn đã đóng vai trò quyết định trong sự mất ổn định của công trình khi gặp tác động mạnh từ trận động đất. Dựa trên các thông tin từ sự cố sụp đổ tòa nhà [1–4], dưới đây, chúng tôi sẽ phân tích chi tiết về chất lượng vật liệu xây dựng và tác động của chúng đối với khả năng chịu lực của công trình.

- *Vật liệu thép không đạt chuẩn*: Thép sử dụng trong công trình được xác định là loại mang nhãn hiệu “Sky”, do Công ty Xin Ke Yuan Steel sản xuất tại tỉnh Rayong, Thái Lan [1, 4]. Sau sự cố, các mẫu thép được lấy và phân tích cho thấy không đạt yêu cầu về các đặc tính cơ lý cần thiết cho kết cấu công trình cao tầng. Cụ thể, thép không đáp ứng tiêu chuẩn về khối lượng, thành phần hóa học và khả năng chịu lực kéo. Kết quả thử nghiệm cho thấy thép có độ bền kéo thấp, khả năng chịu nén kém, và thiếu độ đàn hồi cần thiết để phục hồi sau khi chịu tải trọng lớn. Điều

này làm gia tăng nguy cơ biến dạng và phá vỡ kết cấu, đặc biệt dưới tác động của lực động như động đất.

- *Tác động của thép chất lượng kém đối với khả năng chịu lực của kết cấu:* Việc sử dụng thép không đạt chuẩn đã ảnh hưởng nghiêm trọng đến khả năng chịu lực của các cấu kiện chính trong công trình. Cột và sàn, vốn là các bộ phận chịu tải trọng chủ yếu và đảm bảo ổn định tổng thể, đã bị suy giảm độ bền khi sử dụng thép kém chất lượng. Sự thiếu hụt về cường độ kéo và khả năng chịu nén của thép làm tăng nguy cơ nứt, biến dạng hoặc gãy của các cấu kiện này khi chịu tác động của động đất. Đáng lưu ý, sàn được thiết kế theo dạng bê tông cốt thép ứng lực trước, vốn yêu cầu thép có độ bền cao để duy trì khả năng chịu tải trọng lớn và ổn định dưới lực chấn động. Tuy nhiên, thép không đạt tiêu chuẩn trong sàn đã làm giảm nghiêm trọng khả năng kháng uốn và chịu tải, tạo điều kiện cho các khe nứt xuất hiện và làm suy yếu toàn bộ hệ sàn trong điều kiện tải trọng động.

- *Ảnh hưởng đến kết cấu cột và sàn:* Cột và sàn của tòa nhà là các bộ phận quan trọng trong việc chịu tải trọng và bảo vệ sự ổn định của tòa nhà. Việc sử dụng thép không đạt chuẩn trong cột và sàn làm giảm khả năng chịu lực của các kết cấu này, đặc biệt khi phải chịu các lực tác động từ động đất. Cột và sàn không đủ độ bền sẽ dễ dàng bị nứt, cong vênh hoặc gãy, dẫn đến sự mất ổn định của tòa nhà.

Chất lượng vật liệu xây dựng, đặc biệt là thép sử dụng trong các kết cấu chịu lực, đóng vai trò quyết định trong việc đảm bảo an toàn và ổn định của công trình cao tầng. Trong trường hợp của tòa nhà SAO, việc sử dụng thép không đạt tiêu chuẩn đã làm suy yếu khả năng chịu lực của các kết cấu quan trọng, khiến tòa nhà không thể chịu được lực tác động mạnh từ động đất. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kiểm tra chất lượng vật liệu trong suốt quá trình thiết kế, thi công và bảo trì công trình.

4.3. Sự thiếu chuẩn bị cho động đất trong thiết kế kết cấu

Mặc dù tòa nhà SAO là một công trình lớn, nhưng có thể thấy rằng thiết kế ban đầu không tính đến đầy đủ các yếu tố tác động từ động đất. Các tòa nhà cao tầng, đặc biệt là ở các khu vực có nguy cơ động đất cao, cần phải có các biện pháp gia cố kết cấu đặc biệt để chống lại tác động động đất, chẳng hạn như sử dụng hệ thống giảm chấn, kết cấu vững chắc hơn cho cột và sàn, hoặc ứng dụng các kỹ thuật xây dựng đặc biệt để giảm thiểu tác động của động đất. Thiết kế không tính đến yếu tố động đất khiến tòa nhà không đủ khả năng chịu đựng các lực chấn động mạnh. Các kết cấu bê tông cốt thép chịu lực chính trong tòa nhà không đủ độ bền và độ linh hoạt để phục hồi sau các tác động chấn động mạnh. Điều này có thể được giải thích một phần là do chất lượng thép không đạt tiêu chuẩn, nhưng cũng có thể do việc thiếu các biện pháp ứng phó đặc biệt đối với chấn động trong quá trình thiết kế và thi công.

4.4. Hiện tượng cộng hưởng (Resonance) và tác động từ các tầng cao

Trong một số tình huống, động đất có thể gây ra hiện tượng cộng hưởng, khi tần số dao động tự nhiên của tòa nhà trùng với tần số của sóng động đất. Khi cộng hưởng xảy ra, sự dao động của tòa nhà sẽ được khuếch đại, làm tăng độ mạnh của các rung động và có thể dẫn đến sự sụp đổ của công trình. Tòa nhà cao tầng dễ bị ảnh hưởng bởi hiện tượng cộng hưởng hơn vì các tầng cao có thể dao động với tần số khác biệt so với các tầng dưới. Một tòa nhà cao tầng có các tầng trên sẽ bị dao động mạnh hơn so với các tầng dưới. Khi động đất xảy ra, các tầng trên cùng sẽ bị lệch và tạo ra sự mất ổn định cho toàn bộ kết cấu. Trong trường hợp tòa nhà SAO, nếu các tầng cao hơn không được thiết kế để giảm thiểu tác động của động đất, sự dao động mạnh sẽ dẫn đến sự phá vỡ kết cấu và gây ra sự sụp đổ.

4.5. Quá trình thi công và giám sát

4.5.1. Sự thiếu giám sát trong quá trình thi công

Trong thi công công trình cao tầng, kiểm soát chất lượng vật liệu xây dựng, đặc biệt là thép và bê tông, là yếu tố then chốt nhằm đảm bảo độ bền và an toàn kết cấu. Tuy nhiên, kết quả kiểm định tại công trình cho thấy thép sử dụng không đạt yêu cầu kỹ thuật, cho thấy đã có thiếu sót trong quá trình kiểm tra vật liệu ngay từ khâu cung ứng. Đáng lưu ý, nhà máy “Sky” - đơn vị cung cấp thép - đã bị đình chỉ hoạt động do vi phạm tiêu chuẩn chất lượng, nhưng thép từ nguồn này vẫn được sử dụng trong công trình, làm gia tăng rủi ro kết cấu [1–3]. Bên cạnh đó, công tác giám sát thi công không được thực hiện đầy đủ, dẫn đến việc thép kém chất lượng được lắp đặt vào các bộ phận kết cấu chính mà không được phát hiện. Việc thiếu kiểm tra định kỳ và không tuân thủ quy trình kỹ thuật đã tạo điều kiện cho các sai sót trong bố trí, gia cố và thi công kết cấu xảy ra, ảnh hưởng nghiêm trọng đến khả năng chịu lực của công trình. Những yếu tố này có thể đã góp phần làm suy yếu kết cấu, khiến công trình không đủ khả năng chống chịu lực động đất và dẫn đến sự cố sụp đổ.

4.5.2. Vi phạm các quy trình kiểm tra và tiêu chuẩn xây dựng

Trong quá trình thi công, các tiêu chuẩn xây dựng và các quy định về an toàn cần phải được tuân thủ nghiêm ngặt để đảm bảo chất lượng công trình. Tuy nhiên, việc không tuân thủ các tiêu chuẩn này có thể gây ra sự cố nghiêm trọng, như trong trường hợp của tòa nhà SAO. Các nghiên cứu sau sự cố cho thấy việc sử dụng thép không đạt chuẩn và thiếu các biện pháp gia cố cho công trình có thể xuất phát từ sự thiếu sót trong việc thực hiện đúng quy trình xây dựng và kiểm tra. Nếu các yêu cầu về thiết kế và thi công được kiểm tra và tuân thủ đầy đủ, có thể sự cố đã được ngăn chặn. Việc kiểm tra chất lượng công trình, từ vật liệu cho đến kết cấu sau mỗi giai đoạn thi công, là một phần không thể thiếu trong việc đảm bảo an toàn. Tuy nhiên, nếu quy

trình kiểm tra không được thực hiện một cách đầy đủ và chuyên sâu, những sai sót trong thi công có thể không được phát hiện kịp thời. Điều này đặc biệt nguy hiểm đối với các công trình cao tầng, nơi các sai sót nhỏ trong thi công có thể dẫn đến hậu quả nghiêm trọng. Trong trường hợp này, quá trình giám sát không đủ chặt chẽ có thể là một trong những nguyên nhân chính dẫn đến việc sử dụng thép kém chất lượng và thiếu gia cố kết cấu trong quá trình xây dựng.

4.5.3. Quản lý và điều phối thi công không hiệu quả

Quản lý thi công không hiệu quả có thể dẫn đến việc không kiểm soát được tiến độ và chất lượng công việc. Trong trường hợp này, nếu các giai đoạn thi công không được giám sát cẩn thận hoặc không có sự điều phối hợp lý giữa các bên liên quan, các công việc có thể bị cắt xén hoặc không được thực hiện đúng cách. Điều này có thể dẫn đến việc sử dụng vật liệu không đạt chất lượng hoặc việc thi công kết cấu không đúng kỹ thuật, làm giảm khả năng chịu lực của tòa nhà. Các nhà thầu và các đơn vị thi công cần phải chịu trách nhiệm trong việc đảm bảo chất lượng công trình từ khâu chuẩn bị vật liệu cho đến khi hoàn thành xây dựng. Trong vụ sập tòa nhà này, có thể có sự thiếu trách nhiệm trong việc lựa chọn nhà cung cấp vật liệu, cũng như trong quá trình giám sát và kiểm tra chất lượng vật liệu. Việc lựa chọn thép kém chất lượng từ nhà sản xuất không đạt tiêu chuẩn cho thấy sự thiếu cẩn trọng trong việc lựa chọn nhà cung cấp và kiểm tra vật liệu trước khi sử dụng.

4.5.4. Thiếu công tác đào tạo và huấn luyện cho đội ngũ thi công

Để đảm bảo chất lượng công trình, đội ngũ thi công cần phải có kiến thức chuyên môn vững vàng về các quy trình xây dựng và các tiêu chuẩn kỹ thuật. Nếu đội ngũ thi công không được đào tạo đầy đủ hoặc thiếu kinh nghiệm, nguy cơ xảy ra các sai sót trong quá trình thi công là rất lớn. Những sai sót này có thể ảnh hưởng trực tiếp đến

chất lượng kết cấu công trình, như trong trường hợp này là sự thiếu vững chắc của các kết cấu thép và bê tông trong tòa nhà. Nếu đội ngũ thi công không được đào tạo đầy đủ về các biện pháp kiểm tra và khắc phục sự cố, họ sẽ khó có thể phát hiện và xử lý kịp thời các vấn đề kỹ thuật trong quá trình thi công. Điều này càng làm tăng khả năng xảy ra sự cố nghiêm trọng trong công trình, như việc sử dụng thép không đạt chuẩn và thi công không đúng kỹ thuật trong tòa nhà SAO.

4.5.5. Quản lý chất lượng trong toàn bộ quá trình xây dựng

Một hệ thống quản lý chất lượng chặt chẽ từ giai đoạn thiết kế, thi công cho đến hoàn thiện công trình là điều kiện tiên quyết để đảm bảo an toàn. Tuy nhiên, sự thiếu hụt trong quản lý chất lượng đã dẫn đến việc sử dụng vật liệu không đạt yêu cầu và thi công không đúng kỹ thuật. Điều này không chỉ ảnh hưởng đến chất lượng công trình mà còn làm gia tăng nguy cơ gặp sự cố khi có tác động từ các yếu tố bên ngoài, như động đất. Quá trình thi công và giám sát trong xây dựng tòa nhà SAO có những thiếu sót nghiêm trọng, dẫn đến việc sử dụng vật liệu kém chất lượng và thi công không đạt tiêu chuẩn. Thiếu giám sát chặt chẽ trong suốt quá trình thi công, kết hợp với quản lý chất lượng kém và thiếu trách nhiệm của các bên liên quan, đã góp phần vào sự sập đổ của công trình. Điều này cho thấy sự quan trọng của việc tuân thủ quy trình kiểm tra và giám sát chất lượng chặt chẽ trong quá trình thi công để đảm bảo an toàn cho công trình, đặc biệt là đối với các công trình cao tầng.

4.6. Khuyến nghị trong thiết kế và thi công để ngăn ngừa sự cố tương tự

Bài học từ sự cố sập tòa nhà SAO, chúng ta có thể rút ra nhiều bài học quan trọng trong thiết kế, thi công và giám sát công trình. Những bài học này không chỉ áp dụng cho các công trình ở Thái Lan mà còn có thể áp dụng cho các dự án xây dựng khác ở những khu vực có nguy cơ động đất hoặc những khu vực có yêu cầu khắt khe về

an toàn xây dựng. Từ các phân tích trên, chúng tôi sẽ đề xuất một vài khuyến nghị cụ thể:

- Cần đánh giá các điều kiện động học của công trình (chuyển vị đỉnh, chuyển vị tương đối tầng, chu kỳ dao động, cộng hưởng) dưới dạng động phi tuyến theo tiêu chuẩn kháng chấn hiện hành để đảm bảo độ chính xác. Trường hợp không đáp ứng yêu cầu động học, có thể thay đổi phương án kết cấu hoặc tăng cường hệ thống giảm chấn thông qua các giải pháp như: thiết bị giảm chấn khối lượng điều chỉnh (Tuned Mass Damper - TMD), thiết bị giảm chấn chất lỏng điều chỉnh (Tuned Liquid Damper - TLD), thiết bị giảm chấn nhớt (Viscous Damper - VD) hoặc thiết bị giảm chấn ma sát (Friction Damper - FD), v.v... tại các vị trí quan trọng. Việc lựa chọn cần dựa trên phân tích chi tiết động học công trình và điều kiện địa chất cụ thể.

- Trong thiết kế kết cấu công trình cao tầng, hệ dầm-sàn không chỉ đóng vai trò chịu tải trọng bản thân và tải trọng sử dụng, mà còn hoạt động như một tấm cứng ngang (diaphragm) có chức năng truyền và phân phối tải trọng ngang (gió, động đất) đến các hệ kết cấu chịu lực chính như khung, vách, lõi. Do đó, cần đặc biệt lưu ý khi lựa chọn phương án kết cấu sàn nhằm bảo đảm hiệu quả làm việc tổng thể của hệ kết cấu.

- Kiểm tra và kiểm soát chất lượng vật liệu xây dựng là yếu tố then chốt trong đảm bảo an toàn kết cấu. Việc lựa chọn vật liệu đạt tiêu chuẩn, đặc biệt là thép và bê tông, cần dựa trên các chỉ tiêu cơ lý như độ bền kéo, khả năng chịu nén và độ dẻo dai. Các nhà cung cấp phải có chứng nhận chất lượng và uy tín rõ ràng. Trong suốt quá trình thi công, cần triển khai kiểm tra định kỳ và liên tục nhằm giám sát chất lượng vật liệu đầu vào. Đội ngũ kỹ sư và giám sát viên cần hiện diện tại công trường để đảm bảo vật liệu sử dụng luôn đáp ứng yêu cầu kỹ thuật và an toàn.

- Tăng cường giám sát và kiểm tra trong quá trình thi công là điều kiện tiên quyết để đảm bảo chất lượng và an toàn công trình. Cần triển khai hệ thống giám sát thi công nghiêm ngặt với sự

tham gia của các chuyên gia kỹ thuật, nhằm kiểm tra từng giai đoạn thi công và đảm bảo tuân thủ đầy đủ các tiêu chuẩn thiết kế. Đặc biệt, các cấu kiện chịu lực chính như cột, dầm và sàn phải được kiểm tra kỹ lưỡng. Nhà thầu và các đơn vị thi công có trách nhiệm thực hiện đúng quy định và kịp thời khắc phục mọi sai sót, đồng thời báo cáo đầy đủ cho các cơ quan chức năng để ngăn ngừa sự cố nghiêm trọng.

- Đào tạo và huấn luyện đội ngũ thi công và giám sát là yếu tố thiết yếu nhằm đảm bảo chất lượng và an toàn công trình. Lực lượng thi công cần được trang bị kiến thức đầy đủ về tiêu chuẩn kỹ thuật, biện pháp phòng ngừa sự cố và phương pháp thi công hiện đại. Việc nâng cao trình độ chuyên môn và nhận thức kỹ thuật sẽ góp phần giảm thiểu sai sót trong quá trình thi công và đảm bảo công trình được thực hiện đúng quy trình, đáp ứng yêu cầu an toàn kết cấu.

- Sự phối hợp chặt chẽ giữa các bên thiết kế và thi công là điều kiện cần thiết để đảm bảo chất lượng và tính nhất quán trong thực hiện công trình. Các yêu cầu kỹ thuật từ bản thiết kế cần được truyền đạt đầy đủ và chính xác đến đội ngũ thi công, đồng thời quá trình thi công phải tuân thủ nghiêm ngặt các chỉ dẫn này. Mọi sai sót phát sinh trong thi công cần được phát hiện và xử lý kịp thời nhằm ngăn ngừa tác động tiêu cực đến kết cấu và an toàn công trình.

5. Kết luận

Dựa trên các thông tin thiết kế và quá trình sập đổ của tòa nhà SAO bài báo đã sử dụng phương pháp phân tích tuyến tính lần phi tuyến thông qua phần mềm ETABS, kết hợp với dữ liệu thực tế về vật liệu, quá trình thi công và giám sát công trình. Kết quả phân tích cho thấy những hệ quả nghiêm trọng của việc không tuân thủ đầy đủ các nguyên tắc thiết kế kháng chấn, kiểm soát chất lượng vật liệu và giám sát thi công trong xây dựng công trình cao tầng tại khu vực có nguy cơ địa chấn. Phân tích mô hình kết cấu và đánh giá đặc tính động học đã chỉ ra mối liên hệ rõ rệt

giữa sự thiếu hụt độ cứng, việc sử dụng vật liệu không đạt chuẩn - đặc biệt là thép - và các sai sót trong thi công, dẫn đến sự mất ổn định của công trình dưới tác động của động đất.

Bên cạnh các kết luận kỹ thuật, bài báo cũng phân tích sâu các yếu tố ảnh hưởng như chất lượng vật liệu xây dựng và sự thiếu nhất quán trong cơ chế phối hợp giữa các bên liên quan, từ thiết kế, thẩm tra đến thi công và nghiệm thu. Thiếu sự liên thông trong truyền đạt yêu cầu kỹ thuật, kết hợp với sự buông lỏng trong giám sát hiện trường, đã làm suy giảm nghiêm trọng chất lượng công trình và góp phần trực tiếp vào sự sụp đổ khi chịu rung động bất lợi. Các khuyến nghị cải tiến an toàn cũng đã được bài báo phân tích và đề xuất.

Tuy nhiên, nghiên cứu này vẫn còn một số hạn chế. Cụ thể như phân tích động học chỉ được thực hiện trong khuôn khổ điều kiện biên lý tưởng, chưa xét đến ảnh hưởng của nền đất thực tế và phi tuyến vật liệu trong điều kiện tải trọng cực hạn. Dữ liệu thực nghiệm từ hiện trường sau sự cố còn hạn chế và chưa đủ chi tiết để xác minh toàn bộ các giả thiết kỹ thuật. Chưa có đánh giá định lượng về hiệu quả của các giải pháp giảm chấn hoặc tái thiết kế trong các kịch bản địa chấn khác nhau.

Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu bao gồm: (1) áp dụng các mô hình phân tích phi tuyến, như phân tích pushover và mô phỏng lịch sử thời gian thực, để đánh giá giới hạn chịu tải của hệ kết cấu; (2) kết hợp phân tích địa kỹ thuật chi tiết nhằm đánh giá ảnh hưởng của điều kiện nền đất đến tần số dao động riêng và khả năng khuếch đại sóng địa chấn; (3) phát triển các giải pháp thiết kế tiên tiến với vật liệu hiệu năng cao như bê tông siêu tính năng (UHPC) và thép hợp kim cường độ cao; (4) tích hợp hệ thống giám chấn chủ động và bán chủ động nhằm nâng cao hiệu quả kháng chấn; (5) ứng dụng công nghệ cảm biến thông minh và hệ thống giám sát theo thời gian thực để phát hiện sớm các bất thường trong kết cấu; và (6) xây dựng cơ sở dữ liệu lớn

về các công trình đã sụp đổ để hỗ trợ phân tích định lượng rủi ro và đề xuất cải tiến tiêu chuẩn thiết kế.

Thông qua việc triển khai đồng bộ các hướng nghiên cứu này, ngành xây dựng tại các khu vực có nguy cơ địa chấn sẽ có nền tảng khoa học vững chắc để thiết kế và vận hành các công trình an toàn, bền vững, đồng thời nâng cao khả năng chống chịu trước các tác động môi trường ngày càng khó lường trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu.

Tài liệu tham khảo

- [1] VNA. (2025). Thailand investigates Bangkok building collapse after Myanmar earthquake. *Vietnam Plus 2025*, online.
- [2] Post Reporters. (2025) 30 fake engineers' signatures on State Audit building documents. *Bangkok Post 2025*, online.
- [3] VNA. (2023). State Audit Office building collapse. *VNExpress International*, online.
- [4] Panu Wongcha-um. (2025). Thai watchdog had flagged concerns over building that collapsed in earthquake. *Reuters*, online.
- [5] Park R. (1996). An analysis of the failure of the columns of a 600 metre length of the Hanshin elevated expressway during the Great Hanshin Earthquake of 17 January 1995. *Bulletin of New Zealand society for Earthquake engineering* (29), 73-82. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.29.2.73-82>.
- [6] Johansen A, Saleur H, Sornette D. (2000). "New evidence of earthquake precursory phenomena in the 17 January 1995 Kobe earthquake, Japan". *European physical Journal B* (15), 551-5. <https://doi.org/10.1007/s100510051159>.
- [7] Papazafeiropoulos G, Plevris V, Kahramanmaraş Gaziantep. (2023). "Türkiye Mw 7.8 Earthquake on 6 February 2023: Strong Ground Motion and Building Response Estimations". *Buildings* (13), 1194-1205. <https://doi.org/10.3390/buildings13051194>.
- [8] Ozturk M, Arslan MH, Korkmaz HH. (2023). "Effect on RC buildings of 6 February 2023 Turkey earthquake doublets and new doctrines for seismic design". *Engineering failure analysis* (153), 107521. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107521>.
- [9] Kim SB, Kim MS, Choi J, Kim H, Kim DJ, Lee YH. (2013). A study of structural material quantities of high-rise residential buildings. *13th East Asia-Pacific conference on Structural engineering and construction. EASEC, Sapporo*, p. 219-36.
- [10] Akkaya Y, Goksu C. (2023). Specifications and Inspection Methods for Construction of Earthquake Resistant Structures. *International conference on Energy and Environmental science, Springer*, p. 529-36.
- [11] Feng J, Wang Y, Zhang K. (2020). "Evaluation of the quality supervision system for construction projects in China considering the quality behavior risk transmission". *Symmetry (Basel)* (12), 1660.
- [12] Galappaththi LL, Perera KKA, Jayawardana AK. (2016). Investigation on structural issues caused due to lack of quality assurance and quality control (QA/QC) practices and methods to rectify the observed issues in construction sites. *Proceedings of the Annual sessions of Institution of Engineers*, p. 28-34.
- [13] Rao AS, Radanovic M, Liu Y, Hu S, Fang Y, Khoshelham K. (2022). "Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications". *Automation in Construction* (36), 104099. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104099>.
- [14] Yu X, Hu X, Song Y, Xu S, Li X, Song X. (2024). "Intelligent assessment of building damage of 2023 Turkey-Syria Earthquake by multiple remote sensing approaches". *Npj Nat Hazards* (1), 3. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00003-0>.
- [15] European standard. (2005). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*. England: European committee for standardization.
- [16] Fanella DA. (2023). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784416112>.
- [17] Công ty Meinhardt - Thái Lan. (2019). *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) Tháng 4 năm 2019*. Thái Lan: Meinhardt.
- [18] Computers & Structures Inc. (2016). *CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*. USA: Computers & Structures Inc.
- [19] ATSM. (2022). *Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement*. USA: Advancing standards transforming market. https://doi.org/10.1520/A0615_A0615M-22.
- [20] ATSM. (2012). *Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/A0416_A0416M-12.
- [21] British Standard. (2025). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part, 1, 1998-1. vol. 10. 2005*, England: European committee for standardization.
- [22] Boore DM, Atkinson GM. (2008). "Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at

- Spectral Periods between 0.01s and 10.0s". *Earthquake spectra* (24), 99-138. <https://doi.org/10.1193/1.2830434>.
- [23] Chiou B-J, Youngs RR. (2008). "An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra". *Earthquake spectra* (24), 173-215. <https://doi.org/10.1193/1.2894832>.
- [24] Piancastelli L. (2022). "Common mistakes and their fixes in earthquake-resistant buildings". *Acadlore transactions on Geosciences* (1), 12-21.