

NGHIÊN CỨU CÁC THAM SỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN ỨNG XỬ CỦA NHÀ CAO TẦNG VÀ SIÊU CAO TẦNG SỬ DỤNG HỆ LỖI – OUTRIGGER DƯỚI TÁC DỤNG TẢI TRỌNG NGANG

Đặng Thanh Dương¹, Đoàn Công Trường², Nguyễn Hữu Quyền³

^{1, 2, 3}Viện Khoa học công nghệ xây dựng

Email: ¹duongdt.ibst@gmail.com, 0974348590; ²truongdc.ibst@gmail.com, 0965052000;

³quyennh.ibst@gmail.com, 0904928728

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses2-9>

TÓM TẮT: Nhà cao tầng và siêu cao tầng đã và đang được triển khai xây dựng ngày càng nhiều tại Việt Nam. Hầu hết các tòa nhà cao nhất Việt Nam đều sử dụng hệ core + outrigger để đảm bảo tính ổn định tổng thể cho công trình. Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số đến ứng xử tổng thể của nhà cao tầng và siêu cao tầng có hệ kết cấu lõi kết hợp dầm outrigger chịu tác dụng của tải trọng ngang. Mô hình phân tích bao gồm các công trình nhà cao tầng được thiết lập và tính toán thông qua phần mềm ETABS với các cấu tạo hệ outrigger khác nhau (vị trí bố trí, phương pháp phân tích...). Kết quả thu được cho phép đánh giá ảnh hưởng của hệ outrigger đến ổn định tổng thể của công trình khi chịu tải trọng ngang (chuyển vị đỉnh, chuyển vị tương đối giữa các tầng (drift), ...).

TỪ KHÓA: Nhà siêu cao tầng, ổn định tổng thể, core+outrigger, tải trọng ngang.

ABSTRACTS: High-rise and super high-rise buildings have been increasingly constructed in Vietnam. Most of the tallest buildings in the country adopt the core + outrigger system to ensure the overall stability of the structure. This investigates the influence of various parameters on the overall behavior of high-rise and super high-rise buildings with core-outrigger structural systems under lateral loads. The analytical models consist of high-rise buildings developed and calculated using ETABS software, with different outrigger configurations (such as positioning, and analysis methods,...). The results allow for an evaluation of the outrigger system's impact on the overall stability of the structure under lateral loading, including top displacement, inter-story drift, ...).

KEYWORDS: Super high-rise buildings; overall stability; core + outrigger system; lateral loads.

1. TỔNG QUAN

Sự phát triển kinh tế, tốc độ đô thị hóa nhanh chóng và gia tăng của dân số đang tạo ra cả cơ hội và thách thức lớn, đặc biệt là ở các nước đang phát triển. Quá trình này thu hút dân cư di chuyển về thành thị để tìm kiếm việc làm nhưng cũng gây áp lực lên hạ tầng, môi trường cũng như nhu cầu về nhà ở không ngừng tăng, đặc biệt tại các thành phố lớn như TP. Hà Nội, TP. Hồ Chí Minh, Hải Phòng, Đà Nẵng,.... Do đó việc phát triển những dự án nhà cao tầng hoặc siêu cao tầng là xu hướng thời đại và ngày càng phổ biến.

Tuy nhiên, việc xây dựng các tòa nhà cao tầng hoặc siêu cao tầng không phải là vấn đề đơn giản. Bởi vì chúng thường là những công trình chịu ảnh hưởng đầu tiên do các vấn đề ngoại cảnh như: động đất, gió bão. Các cơn gió hoặc động đất bất

thường có thể gây nên những ảnh hưởng không lường cho các tòa nhà cao tầng. Ví dụ vào ngày 28/3/2025, tòa nhà 30 tầng dự kiến sẽ là trụ sở của Văn phòng Kiểm toán Nhà nước Thái Lan bị sụp đổ sau trận động đất 7.7 độ richter xảy ra ở Myanmar. Thế nên các ảnh hưởng của lực ngang tác động lên công trình đều đang được nghiên cứu kỹ lưỡng và ngày càng xuất hiện nhiều phương pháp để hạn chế chuyển vị và tăng tính ổn định tổng thể cho công trình. Có thể kể đến 1 vài phương pháp sau đây: hệ ống (tube), hệ ống trong ống (tube in tube), hệ bó ống (bundled tube), hệ lõi BTCT, hệ lõi chống (buttress core), hệ core+outrigger,...

Việt Nam đang là một nước trong giai đoạn phát triển nên số lượng nhà siêu cao tầng là không nhiều. Theo như tìm hiểu của tác giả, số lượng

công trình có chiều cao lớn hơn 200m được thể hiện ở bảng 1:

Bảng 1 – Thông kê số lượng công trình siêu cao tầng (chiều cao lớn hơn 200m) ở Việt Nam [14]

Chiều cao	Hà Nội	TP. HCM	Cả nước
≥200 m	4	1	5
≥250 m	1	1	2
≥300 m	1	1	2

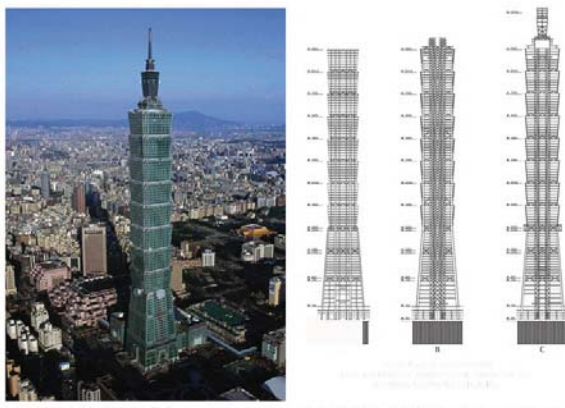
Bảng 2 tác giả làm rõ hơn về chiều cao, hệ kết cấu chính của 1 số tòa nhà đã liệt kê ở bảng 1:

Bảng 2 – Chi tiết chiều cao và hệ kết cấu chính

Tên công trình	Chiều cao	Tầng	Hệ kết cấu chính
Landmark 81 (TP.HCM)	461,2 m	81	Core + RC outrigger
Keangnam Landmark Tower (HN)	336 m	72	Core + Steel outrigger
Lotte Center Hà Nội	267,1 m	65	Core + Steel outrigger
Bitexco Financial Tower (TP.HCM)	262,5 m	68	Core + Steel outrigger + Belt Truss

Ta có thể thấy hiện nay hệ outrigger được ứng dụng phổ biến như một hệ chịu lực chính trong hầu hết các tòa nhà cao tầng trên thế giới cũng như tại Việt Nam. Một số công trình tiêu biểu như Burj Khalifa (cao 828 m) và Shanghai Tower (cao 632 m) [9].

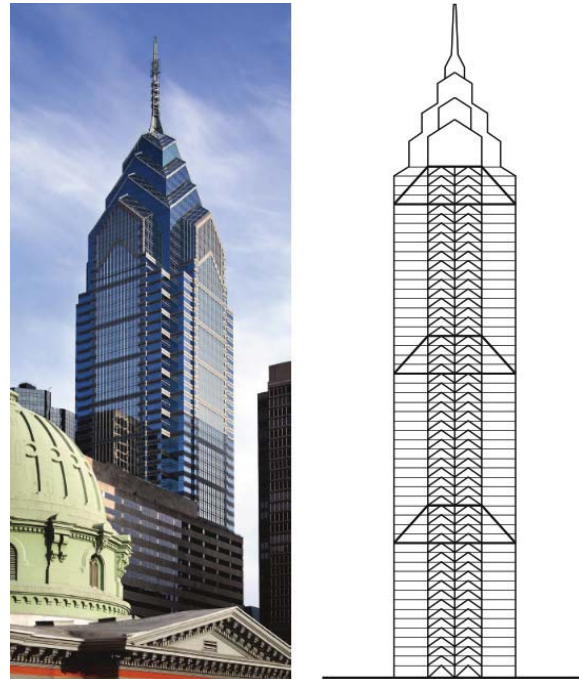
Theo các nghiên cứu, hệ outrigger - được sử dụng rộng rãi nhằm nâng cao độ cứng ngang và ổn định tổng thể của công trình cao tầng - được xem là một trong những hệ kết cấu chịu lực hiệu quả nhất [10].



Hình 1: Taipei Financial Center Corp [13]

Việc giảm thiểu thiệt hại do động đất hay gió bão đối với các tòa nhà cao tầng là vấn đề hết sức quan trọng [11]. Ngay cả khi hệ outrigger bị hư

hỏng trong quá trình động đất, nó không gây sụp đổ công trình và hầu như không ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu lực thẳng đứng của tòa nhà [12]. Do đó, hệ outrigger có thể được xem như một cấu kiện tiềm năng cho việc tiêu tán năng lượng, giúp giảm dao động và hạn chế hư hại cho các công trình cao tầng. Một số hình ảnh nhà cao tầng trên thế giới có ứng dụng hệ kết cấu:



Hình 2: One Liberty Place, Philadelphia [13]

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết

Lõi trung tâm (Central Core) của công trình thường được cấu tạo bằng bê tông cốt thép, có thể thấy rằng bộ phận này là kết cấu chính duy nhất có khả năng chịu tải trọng ngang đối với các tòa nhà cao tầng trung bình.

Hệ lõi này đôi khi được kết hợp thêm với khung chịu mô men hoặc giàn trong lõi nhằm tăng cường khả năng kháng tải trọng ngang. Tuy nhiên, khi chiều cao công trình vượt quá 150 m, hệ lõi chịu lực đơn thuần không thể cung cấp đủ độ cứng ngang để giữ chuyển vị do gió hoặc động đất trong giới hạn cho phép.

Vì lý do đó, hệ kết cấu outrigger được xem là một trong những hệ kết cấu chịu lực hiệu quả đối với các tòa nhà cao tầng chịu tải trọng ngang.

Theo các tài liệu nghiên cứu như Luận án Tiến sĩ kỹ thuật của Tiến sĩ Nguyễn Hồng Hải năm 2015

về “Nghiên cứu sự làm việc của nhà cao tầng bê tông cốt thép có tầng cứng chịu tác động của động đất ở Việt Nam” và “Parameter study of outrigger-braced tall building structures” của Smith, B. S., & Salim, I xuất bản năm 1981 vị trí tối ưu khi đặt các tầng cứng là khoảng $0,5H$ (H là tổng chiều cao công trình) đối với nhà cao tầng có 1 tầng cứng; nếu bố trí 2 tầng thì vị trí tối ưu là $0,5H$ và ở đỉnh; nếu bố trí 3 tầng cứng trở lên thì nên bố trí với khoảng cách đều từ đỉnh công trình. [1] [8]

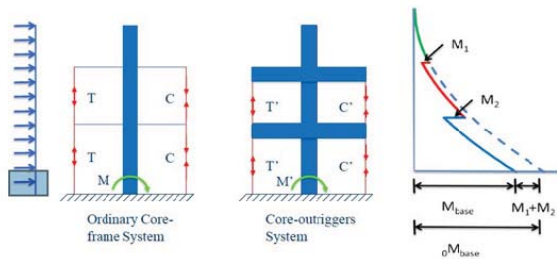
2.2 Phương pháp nghiên cứu

Ứng xử của công trình cao tầng có thể được so sánh với ứng xử của một dầm công xôn (cantilever) được liên kết ngàm tại móng khi chịu tác dụng của tải trọng ngang.

Trong mô hình công xôn này, mô men uốn và lực cắt lớn phát sinh tại khu vực ngàm cố định, trong khi chuyển vị lớn xuất hiện tại đầu tự do.

Để hạn chế các chuyển vị này, cần đảm bảo độ cứng ngang đủ lớn chống lại tác dụng của tải trọng ngang.

Thay vì tăng kích thước tiết diện của các cầu kiện, giải pháp hợp lý hơn là nâng cao hiệu quả làm việc của toàn bộ hệ kết cấu chịu lực.



Hình 3: Nguyên lý hệ outrigger
(Chung & Sunu, 2015) [7]

Trong nghiên cứu này, ba trường hợp công trình cao 60 tầng, chiều cao tầng là 4m được thiết kế mô phỏng, dựa trên dữ liệu thu thập được, nhằm đánh giá ảnh hưởng của các lựa chọn hệ kết cấu khác nhau đến khả năng chịu lực của công trình, trong đó chỉ sử dụng hệ outrigger làm biến số nghiên cứu chính.

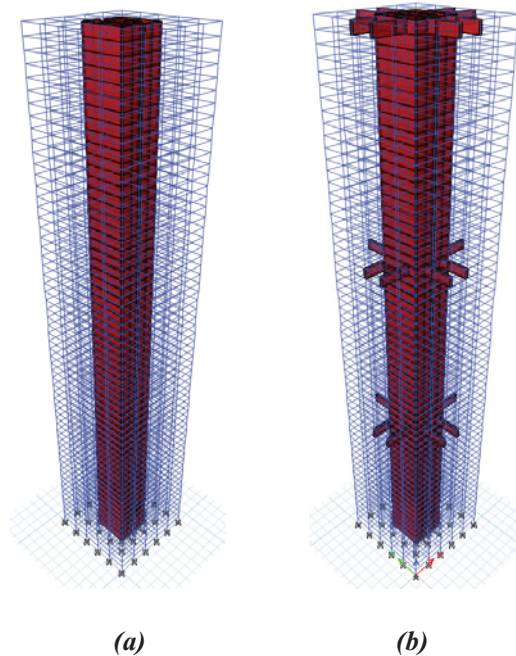
Nguyên lý làm việc của hệ outrigger [Hình 3] là tạo ra các tầng có độ cứng lớn tại một số vị trí nhất định theo chiều cao của công trình. Số lượng và outrigger được bố trí: TH1 là không có outrigger, TH2 là bố trí tại tầng 30 ($0,5H$), TH3 là bố trí 3 tầng cứng với khoảng cách đều tại các tầng 20, 40 và 60. Các tầng outrigger giả định là các tầng kỹ thuật, tầng lánh nạn tùy theo yêu cầu kiến trúc,...

Mô hình nhà được giả thiết với hình khối kiến trúc vuông và mặt bằng kết cấu đối xứng nhằm đảm bảo phân bố độ cứng cân bằng và giảm thiểu hiệu ứng xoắn khi chịu tải trọng ngang. Ước tính chiều rộng $\times$ chiều dài là $43,5 \text{ m} \times 43,5 \text{ m}$. Lõi trung tâm có kích thước khoảng 17m dày 1m. Cầu kiện cột có tiết diện $2 \times 2 \text{ m}$; $1,8 \times 1,8 \text{ m}$; $1,5 \times 1,5 \text{ m}$ (giảm tiết diện theo chiều cao tầng). Cầu kiện dầm có tiết diện $0,6 \times 0,8 \text{ m}$. Vật liệu bê tông sử dụng B50 cho vị trí lõi trung tâm và cầu kiện cột; B45 cho cầu kiện dầm; hệ outrigger wall sử dụng bê tông B50 dày 1,2 m.

Các mô hình kết cấu được mô phỏng và tính toán bằng phần mềm ETABS. Mô hình tính bao gồm đầy đủ các phần tử kết cấu không gian: Lõi cứng, cột, dầm, hệ outrigger.

Hình 4(a) thể hiện mô hình gồm hệ lõi trung tâm, cột, dầm, không sử dụng hệ Outrigger Wall.

Hình 4(b) thể hiện mô hình đơn giản hóa của công trình cao tầng có sử dụng hệ Outrigger Wall, gồm lõi trung tâm, cột, dầm, và hệ outrigger mở rộng kết nối đến các cột biên ngoài.



Hình 4

Tải trọng bản thân (Dead Load): Phần mềm Etabs tính toán;

Tĩnh tải (SDL): $3 \text{ (kN/m}^2\text{)}$;

Hoạt tải (Live Load): $4 \text{ (kN/m}^2\text{)}$

Tải trọng ngang do gió (Wind): giả thiết công trình ở Hải Phòng, dạng địa hình A, vùng gió IV.

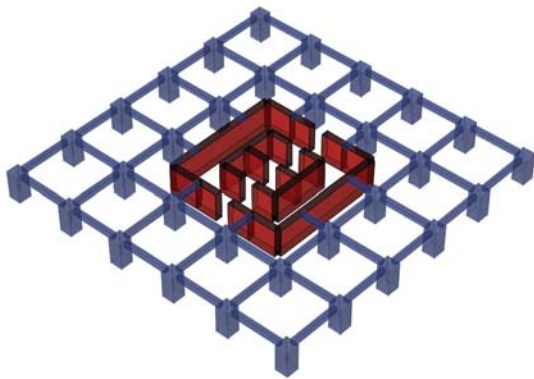
Tải trọng gió ngang phân bố theo chiều cao (tính toán áp dụng TCVN 2737:2023 Tải trọng và tác động) [2], [4].

Tải trọng ngang do động đất (earthquake): giả thiết đất nền loại D, đỉnh gia tốc nền tham chiếu là $0,1g$. Phương pháp phân tích theo Response Spectrum [2], [5].

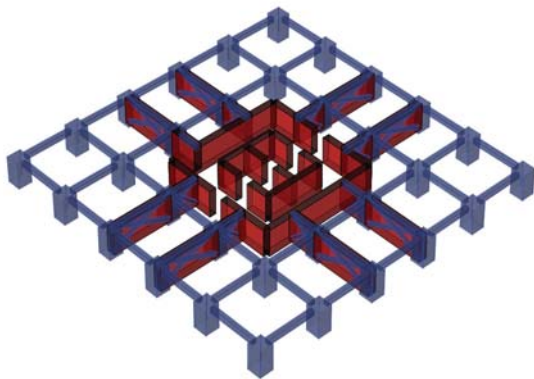
Tổ hợp tải trọng tuân theo TCVN 2737:2023 Tải trọng và tác động. [4]

Các thông số được phân tích bao gồm:

1. Chu kỳ dao động riêng.
2. Chuyển vị đỉnh (story displacements).
3. Chuyển vị lệch tầng (story drift).
4. Hiệu ứng P-delta.



Hình 5. Sơ đồ minh họa trường hợp không sử dụng hệ Outrigger Wall



Hình 6. Sơ đồ minh họa hệ Outrigger Wall điển hình

3. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH – ĐÁNH GIÁ

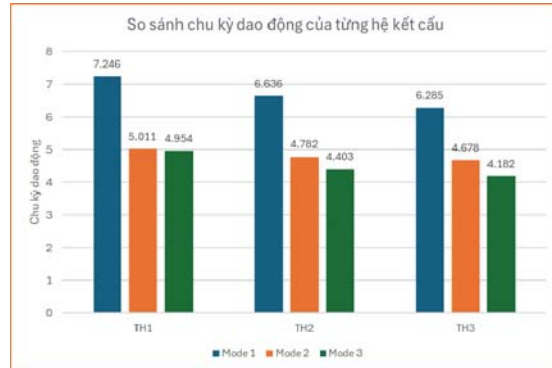
3.1 So sánh các đặc trưng dao động của công trình

Khi xem xét các chu kỳ dao động (periods) biểu thị một chu kỳ dao động hoàn chỉnh của công trình dưới tác dụng tải trọng ngang, có thể nhận

thấy rằng giá trị chu kỳ của mô hình có hệ outrigger nhỏ hơn so với mô hình khung thông thường [hình 7].

Giá trị Mode 1 của TH1 (không có outrigger) là 7,246 giây, trong khi Mode 1 của TH2 (có 01 outrigger) là 6,636 giây (tức giảm 8,4%), Mode 1 của TH3 (có 03 outrigger) là 6,285 giây (tức giảm 13,2%) so với TH1.

Tương tự, giá trị Mode 2 của TH2, TH3 giảm 4,56% và 6,6% so với Mode 2 của TH1.



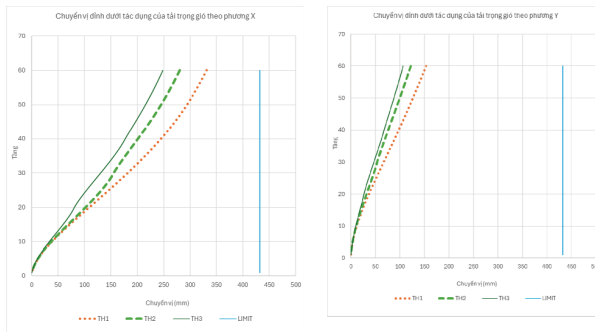
Hình 7. So sánh chu kỳ dao động của ba mode đầu tiên cho 3 mô hình

3.2 Ảnh hưởng của outrigger đến chuyển vị dưới tác dụng của tải trọng ngang

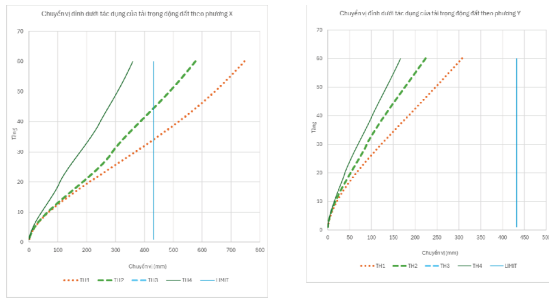
3.2.1 So sánh chuyển vị đỉnh (story displacements) của công trình

Theo phương X, chuyển vị ngang lớn nhất dưới tác dụng của tải trọng gió của TH1 là 331,5 mm, trong khi TH2 là 280,1 mm và TH3 là 248,4 (mm. Tương ứng với giá trị giảm là 15,5% và 25,06% so với TH1 (Hình 8);

Theo phương Y, giá trị giảm chuyển vị ngang TH2 và TH3 tương ứng 20,44% và 30,55% so với TH1 có giá trị chuyển vị đỉnh (153,4mm). Kết quả phân tích được thể hiện (Hình 8(a)), (Hình 8(b)).



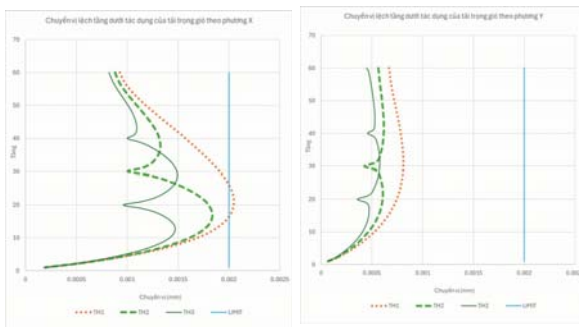
Hình 8(a). Chuyển vị ngang tại đỉnh dưới tác dụng tải trọng gió



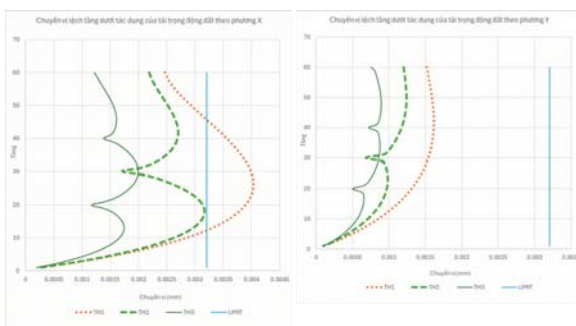
Hình 8(b). Chuyển vị ngang tại đỉnh dưới tác dụng tải trọng động đất.

3.2.2 So sánh chuyển vị lệch tầng (story drifts) của công trình

Chuyển vị lệch tầng (story drifts) của công trình bê tông cốt thép là một thông số quan trọng trong đánh giá an toàn động đất và gió. Đây là đặc trưng cần được kiểm soát đặc biệt trong hệ khung chịu lực và thông thường được giải quyết bằng cách bổ sung các phần tử chịu cắt (shear elements) như tường lõi hoặc hệ outrigger.



Hình 9(a). Chuyển vị lệch tầng dưới tác dụng tải trọng gió



Hình 9(b). Chuyển vị lệch tầng dưới tác dụng tải trọng động đất (Earthquake)

Xét trường hợp chuyển vị lệch tầng dưới tải trọng động đất theo phương X, độ lệch tầng lớn nhất của TH1 là 0,00205, trong khi TH2 đạt 0,00184, tương ứng giảm 10,2%; TH3 đạt 0,0014 tương ứng giảm 31,7%. Điều này giúp kết cấu đáp ứng tốt các yêu cầu về chuyển vị ngang giới hạn của tiêu chuẩn (giới hạn ~1/500 đến 1/700 tùy yêu

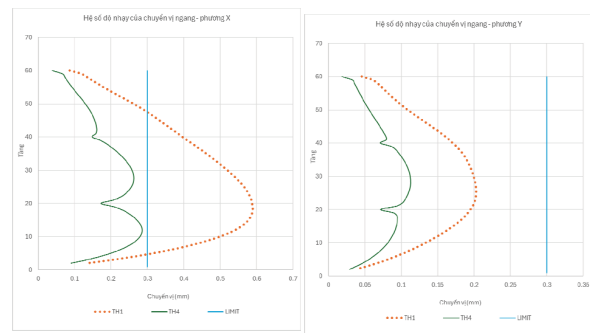
cầu cấu tạo) [4]. Kết quả phân tích được thể hiện (Hình 9(a)), (Hình 9(b)).

Sự giảm đáng kể chuyển vị lệch tầng khẳng định rằng hệ outrigger giúp tăng cứng rõ rệt theo cả hai phương chính của công trình, đặc biệt tại các tầng bố trí outrigger.

Nhờ đó, biến dạng tương đối giữa các tầng được giảm thiểu, góp phần tăng khả năng kháng chấn và độ bền lâu dài của kết cấu khung - lõi.

3.3 Ảnh hưởng của outrigger đến hiệu ứng phi tuyến P-Delta

Về phương pháp phân tích, khi xét đến hiệu ứng P-Δ (phi tuyến hình học), kết cấu không có outrigger (TH1) thể hiện mức độ mất ổn định lớn hơn, trong khi kết cấu có outrigger (TH3) hầu như không bị ảnh hưởng đáng kể. Các so sánh được thể hiện ở (hình 10), ta có thể thấy đối với hệ kết cấu không sử dụng outrigger, nhiều tầng bị vượt giới hạn cho phép là 0,3[5]. Ngược lại với hệ sử dụng outrigger, hệ số độ nhạy chỉ dao động khoảng từ 0,1 - 0,2. Điều này cho thấy outrigger giúp tăng hệ số an toàn chống lật của toàn hệ, giảm thiểu ảnh hưởng của lực ngang.



Hình 10. Hệ số độ nhạy của chuyển vị ngang

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element Analysis) được thực hiện nhằm xem xét hiệu quả của hệ outrigger ứng dụng trong xây dựng nhà cao tầng.

Kết quả cho thấy mô hình có sử dụng hệ outrigger thể hiện độ cứng kết cấu cao hơn rõ rệt.

Nhờ đó, chuyển vị tổng thể và lệch tầng của công trình giảm đáng kể nhờ sự cải thiện trong ứng xử kết cấu tổng thể.

Dựa trên kết quả phân tích, các đặc trưng ứng xử kết cấu được tổng hợp và trình bày dưới dạng các nhận định trong nghiên cứu này như sau:

1. Hệ outrigger giúp tăng độ cứng ngang bằng cách hạn chế chuyển vị của công trình, đặc biệt dưới tác dụng của tải trọng ngang. Trong quan điểm thiết kế, điều này đồng nghĩa với việc tần số dao động riêng của công trình tăng và chu kỳ dao động tự nhiên giảm, qua đó nâng cao khả năng ổn định tổng thể.

2. Khi độ cứng ngang tăng và chu kỳ dao động giảm, khả năng chịu lực của các phần tử kết cấu trở nên hiệu quả hơn; nội lực trong các tiết diện giảm, cho phép sử dụng tiết diện nhỏ hơn. Việc giảm kích thước tiết diện dẫn đến giảm khối lượng tổng thể của công trình, và do đó giảm tải trọng truyền xuống móng.

3. Tải trọng ngang như động đất và gió gây ra chuyển vị lớn và hiệu ứng bậc hai (P-Delta) đáng kể. Kết quả phân tích cho thấy việc sử dụng hệ outrigger làm tăng độ cứng tổng thể, giảm chuyển vị cực đại, và hạn chế rõ rệt các hiệu ứng bậc hai.

4. Vị trí bố trí hệ outrigger có ảnh hưởng quan trọng đến hiệu quả hệ kết cấu. Đối với hệ kết cấu bố trí 1 tầng cứng ứng dụng outrigger, vị trí tối ưu thường vào khoảng giữa chiều cao công trình (0,5H) tại đó hiệu quả giảm chuyển vị là lớn nhất; 2 tầng thì vị trí tối ưu là 0,5H và ở đỉnh; nếu bố trí 3 tầng cứng trở lên thì nên bố trí với khoảng cách đều từ đỉnh công trình. [1] và [8]

5. Ngoài các tác động tích cực đến kết cấu. Hệ outrigger áp dụng trong nhà cao tầng được đánh giá sẽ đem lại hiệu quả về kinh tế nếu nghiên cứu thiết kế tối ưu được vị trí tầng cứng, kích thước hình học cấu kiện. Từ đó cho thấy tiềm năng tiết kiệm chi phí xây dựng đáng kể.

Những kết quả nghiên cứu này góp phần cung cấp cơ sở khoa học, định hướng cho các quyết định lựa chọn hệ kết cấu chịu lực và thiết kế tối ưu hóa về mặt kỹ thuật lẫn kinh tế trong quá trình thiết kế các công trình nhà cao tầng tại Việt Nam. Trong tương lai, có thể mở rộng nghiên cứu bằng cách khảo sát thêm ảnh hưởng của các tham số khác (ví dụ: độ cứng tương đối giữa lõi và khung; khảo sát biến dạng co giãn không đồng đều của cấu kiện chịu lực dọc; khảo sát sự hình thành khớp dẻo tại tầng cứng). Hoặc so sánh giữa các phương án hệ outrigger như hệ outrigger dạng giàn thép, hệ BRB outrigger,... Cũng như xác minh kết quả tính toán bằng thực nghiệm trên mô hình thu nhỏ để có cái nhìn tổng quát về ứng xử của hệ outrigger.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Hồng Hải (2015). “Nghiên cứu sự làm việc của nhà cao tầng bê tông cốt thép có

tầng cứng chịu tác động của động đất ở Việt Nam”. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng.

- [2] QCVN 02:2022/BXD Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng
- [3] Phạm Tiến Cường, Nguyễn Văn Thông (2019). "Phân tích ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến P-Delta đến kết cấu nhà cao tầng chịu tải trọng ngang lớn". Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông Vận tải, số 31 (02/2019).
- [4] TCVN 2737:2023 Tải trọng và tác động.
- [5] TCVN 9386:2012 Thiết kế công trình chịu động đất.
- [6] Taranath, B. S. (2010) Reinforced concrete design of tall buildings, Taylor and Francis group, CRS Press, New York, USA, 921 p.
- [7] CHUNG, K. & SUNU, W. 2015. Outrigger systems for tall buildings in Korea. International Journal of High-Rise Buildings, Volume: 4, 209-217.
- [8] Smith, B. S., & Salim, I. (1981). Parameter study of outrigger-braced tall building structures. Journal of the Structural Division, 107(10), 2001-2014.
- [9] Günel, M., & Ilgin, H. (2014). Tall buildings: structural systems and aerodynamic form.
- [10] Wu, J. R., & Li, Q. S. (2003). Structural performance of multi-outrigger-braced tall buildings.
- [11] Lu, X., Lv, Z., & Xu, L. (2022). Investigation of a self-centering frictional energy dissipation outrigger equipped to supertall buildings.
- [12] Lu, X., Lu, X., Zhang, W., & Ye, L. (2011). Collapse simulation of a super high-rise building subjected to extremely strong earthquakes
- [13] Hi Sun Choi, Goman Ho, Leonard Joseph & Neville Mathias. Outrigger Design for High - Rise Buildings.
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_buildings_in_VietNam.