

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ KHÁNG GIÓ CỦA CÁC HỆ GIẪNG NGOÀI DẠNG DÀN CHO NHÀ NHIỀU TẦNG

WIND PERFORMANCE EVALUATION OF TRUSS-TYPE OUTRIGGER SYSTEMS FOR MULTI-STORY BUILDINGS

KS Đoàn Đức Thành - HVCH Ngành Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP HCM;

Email: 23xd06@uah.edu.vn

ThS. Tang Văn Út Kiến - Tư vấn giám sát, Công ty TNHH Thiết Kế và Quản Lý DSPCons Việt Nam.

Email: tangkienxd@gmail.com

PGS.TS Vũ Tân Văn* - GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP HCM;

Email: van.vutan@uah.edu.vn. *Corresponding author

Tóm tắt: Bài báo trình bày mô hình nhà nhiều tầng được rời rạc hóa bằng hệ nhiều bậc tự do, trong đó hệ giằng ngoài (outrigger) được mô phỏng bằng lò xo xoay tương đương, nhằm phân tích ảnh hưởng của hệ thống này đến tần số, dạng dao động riêng và đáp ứng động của nhà nhiều tầng dưới tác động của tải trọng gió. Bên cạnh đó, bốn kiểu dàn giằng (kiểu X, kiểu K, kiểu N và kiểu KB) được phân tích và so sánh thông qua chỉ số độ cứng xoay tương đương K_r . Kết quả cho thấy hệ dàn kiểu X đạt hiệu quả giảm chuyển vị đỉnh cao nhất (56,7%), kế đến là kiểu K (55,6%), trong khi hệ dàn kiểu N và KB tuy đơn giản về cấu tạo nhưng cho hiệu quả thấp hơn đáng kể. Đáp ứng dọc gió (along-wind) được xác định theo phổ Kaimal và so sánh giữa các phương án bố trí outrigger. Kết quả khẳng định hệ giằng ngoài làm tăng đáng kể độ cứng tổng thể, giảm chu kỳ dao động và giảm thiểu chuyển vị đỉnh khi bố trí trong vùng $(0.7 - 0.8)H$. Những ảnh hưởng này không nên bỏ qua kể cả trong giai đoạn phân tích sơ bộ.

Từ khóa: Đáp ứng động, tải trọng gió, nhà cao tầng, hệ giằng ngoài, cấu hình dàn outrigger.

Abstract: This paper presents a multi-degree-of-freedom (MDOF) discretized model of multi-story buildings in which outrigger systems are represented by equivalent rotational springs, with the aim of investigating their influence on natural frequencies, mode shapes, and dynamic responses under wind loading. In addition, four outrigger truss configurations - X-type, K-type, N-type, and KB-type - are analyzed and compared through the equivalent rotational stiffness index K_r . The results indicate that the X-type truss achieves the highest peak displacement reduction (56.7%), closely followed by the K-type (55.6%), whereas the N-type and KB-type, despite their simpler configurations, yield considerably lower effectiveness. The along-wind dynamic response is determined using the Kaimal power spectral density and compared across different outrigger arrangements. The results confirm that outrigger systems significantly increase overall lateral stiffness, reduce natural periods, and minimize peak displacement when positioned within the range of $(0.7 - 0.8)H$. These effects should not be neglected even at the preliminary design stage.

Keywords: Dynamic response, wind load, high-rise buildings, outrigger system, outrigger truss configuration.

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển mạnh mẽ của công trình nhà cao tầng trong hai thập kỷ qua đặt ra những thách thức ngày càng lớn đối với kỹ thuật thiết kế kết cấu. Các đổi mới trong kỹ thuật kết cấu kết hợp với xu hướng giảm nhẹ vật liệu xây dựng đã làm giảm đáng kể khối lượng, độ cứng và đặc tính cản của các công trình hiện đại. Hệ quả là nhiều vấn đề về hiệu năng kết cấu xuất hiện, đặc biệt dưới tác động của tải trọng ngang. Chuyển vị ngang và gia tốc dao động của nhà nhiều tầng cần được kiểm soát hiệu quả nhằm thỏa mãn các yêu cầu về sử dụng bình thường và tiêu chí tiện nghi của cư dân[1].

Một trong những giải pháp phổ biến nhất hiện nay là ứng dụng hệ giằng ngoài (outrigger system). Hiệu quả của hệ giằng ngoài trong kiểm soát đáp ứng kết

cấu dưới tải trọng gió đã được chứng minh và ứng xử tĩnh của hệ này đã được nghiên cứu rộng rãi. Smith và Salim[2] đã tổng hợp công thức tối ưu hóa độ cứng chống chuyển vị của kết cấu có hệ giằng ngoài, tiếp theo Lame[3] đề xuất phương pháp tối ưu hóa thông qua áp dụng các công thức này. Hoenderkamp và Bakker[4] đã mô hình hóa hệ giằng ngoài như lò xo xoay tương đương trong phân tích đáp ứng gió động và xác lập quan hệ giữa độ cứng xoay K_r với chuyển vị đỉnh. Tổng quan của Alhaddad et al.[5] đề cập rằng kiểu dàn giằng có thể thay đổi từ vách đặc đến các hình học dàn khác nhau và ảnh hưởng trực tiếp đến độ cứng và độ dẻo cung cấp cho kết cấu, song chưa có nghiên cứu nào thực hiện so sánh định lượng có hệ thống giữa các kiểu dàn giằng này kết hợp với phân tích khả năng kháng gió.

Về mặt cấu tạo, dàn giằng có thể được thiết kế theo nhiều kiểu giằng khác nhau (Hình 1), tiêu biểu là hệ dàn kiểu X (hai thanh xiên chéo trong một panel), hệ dàn kiểu K (thanh xiên gấp nhau tại điểm giữa thanh đứng) và hệ dàn kiểu N (thanh đứng kết hợp thanh xiên đơn theo từng panel), cùng với hệ dàn kiểu KB (biến thể của kiểu K có bổ sung thanh giằng). Sự khác biệt này có ý nghĩa thực tiễn lớn trong giai đoạn lựa chọn sơ bộ hệ giằng, nhưng cho đến nay vẫn chưa được nghiên cứu định lượng và so sánh trực tiếp trong ngữ cảnh phân tích đáp ứng gió động.

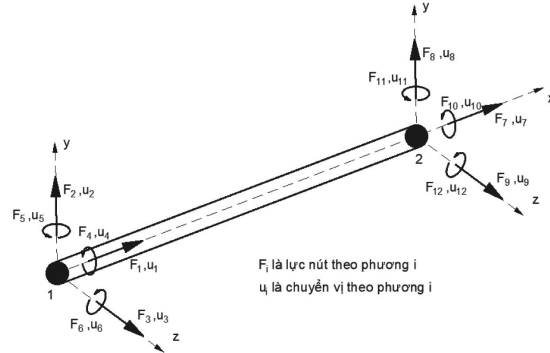
Bài báo này xây dựng mô hình thanh dầm ba chiều, tích hợp lò xo xoay mô phỏng hệ giằng ngoài, nhằm đạt đồng thời ba mục tiêu: (i) So sánh định lượng bốn kiểu dàn outrigger - kiểu X, kiểu K, kiểu N và kiểu KB - thông qua các chỉ số K_r để cung cấp cơ sở lựa chọn kiểu dàn ngay từ giai đoạn thiết kế sơ bộ; (ii) Khảo sát ảnh hưởng của vị trí và số lượng tầng giằng đến tần số và dạng dao động riêng; (iii) Phân tích đáp ứng dọc gió (along-wind) theo phổ Kaimal và so sánh hiệu quả giảm chuyển vị đỉnh, gia tốc đỉnh giữa các phương án.

2. MÔ HÌNH NHÀ NHIỀU TẦNG

2.1. Mô hình dầm console rời rạc nhiều bậc tự do

Nhà nhiều tầng chịu tải trọng ngang được mô hình hóa bằng hệ dầm console rời rạc nhiều bậc tự do (MDOF), trong đó mỗi tầng được đại diện bởi một phần tử dầm không gian với 6 bậc tự do tại mỗi nút, bao gồm ba chuyển vị tịnh tiến và ba chuyển vị quay. Khối lượng của hệ dầm - sàn tại mỗi tầng được quy đổi về khối lượng tập trung và chia đều cho hai nút của phần tử thanh, khối lượng của hệ cột và vách được giả thiết phân bố đều dọc theo chiều dài phần tử tương ứng, khối lượng tập

trung m_j gắn tại nút tầng tương ứng (Hình 1). Kết cấu được rời rạc hóa thành n phần tử dầm ba chiều, mỗi phần tử có chiều dài L_i , mô đun đàn hồi E_i , mô đun xoắn G_i , mô men quán tính tiết diện $I_{x,i}$, $I_{y,i}$, và hệ số cắt $\phi_{y,i}$, $\phi_{z,i}$ theo các phương y và z tương ứng (Hình 2).



Hình 2 Mô hình thanh dầm 3D

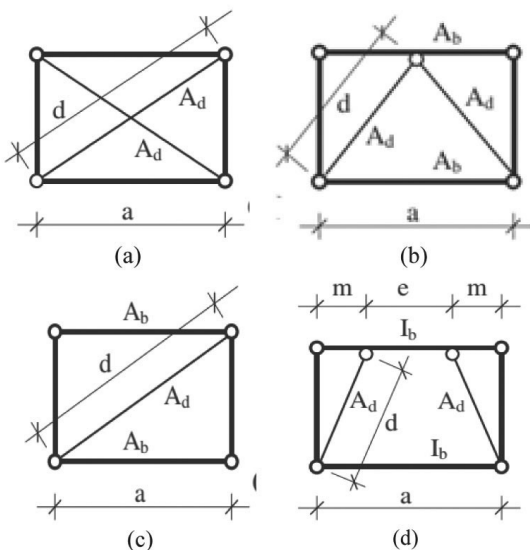
Ma trận độ cứng phần tử cho phần tử thứ i có chiều dài L_i được xác định theo công thức sau:

$$\mathbf{k}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{11} & \mathbf{k}_{12} \\ \mathbf{k}_{21} & \mathbf{k}_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó:

$$\mathbf{k}_{11} = \begin{bmatrix} \frac{E_i A_i}{L_i}, 0, 0, 0, 0, 0; \\ 0, \frac{12E_i I_{z,i}}{L_i^3 (1 + \phi_{y,i})}, 0, 0, 0, \frac{6E_i I_{z,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}; \\ 0, 0, \frac{12E_i I_{y,i}}{L_i^3 (1 + \phi_{z,i})}, 0, -\frac{6E_i I_{z,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}, 0; \\ 0, 0, 0, \frac{G_i J_{x,i}}{L_i}, 0, 0; \\ 0, 0, -\frac{6E_i I_{y,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{z,i})}, 0, \frac{(4 + \phi_{z,i}) E_i I_{y,i}}{L_i (1 + \phi_{z,i})}, 0; \\ 0, \frac{6E_i I_{z,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}, 0, 0, 0, \frac{(4 + \phi_{y,i}) E_i I_{z,i}}{L_i (1 + \phi_{y,i})} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{k}_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{E_i A_i}{L_i}, 0, 0, 0, 0, 0; \\ 0, -\frac{12E_i I_{z,i}}{L_i^3 (1 + \phi_{y,i})}, 0, 0, 0, \frac{6E_i I_{z,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}; \\ 0, 0, -\frac{12E_i I_{y,i}}{L_i^3 (1 + \phi_{z,i})}, 0, -\frac{6E_i I_{z,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}, 0; \\ 0, 0, 0, -\frac{G_i J_{x,i}}{L_i}, 0, 0; \\ 0, 0, \frac{6E_i I_{y,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{z,i})}, 0, \frac{(2 - \phi_{z,i}) E_i I_{y,i}}{L_i (1 + \phi_{z,i})}, 0; \\ 0, -\frac{6E_i I_{z,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}, 0, 0, 0, \frac{(2 - \phi_{y,i}) E_i I_{z,i}}{L_i (1 + \phi_{y,i})} \end{bmatrix} \quad (3)$$



Hình 1 Các dạng kiểu dàn dùng cho hệ giằng ngoài [4]: (a) Kiểu X, (b) Kiểu K, (c) Kiểu N (d) Kiểu KB

$$\mathbf{k}_{21} = \mathbf{k}_{12}$$

$$\mathbf{k}_{22} = \begin{bmatrix} \frac{E_i A_i}{L_i}, 0, 0, 0, 0, 0; \\ 0, \frac{12E_i I_{z,i}}{L_i^3 (1 + \phi_{y,i})}, 0, 0, 0, -\frac{6E_i I_{z,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}; \\ 0, 0, \frac{12E_i I_{y,i}}{L_i^3 (1 + \phi_{z,i})}, 0, \frac{6E_i I_{z,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}, 0; \\ 0, 0, 0, \frac{G_i J_{x,i}}{L_i}, 0, 0; \\ 0, 0, \frac{6E_i I_{y,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}, 0, \frac{(4 + \phi_{z,i}) E_i I_{y,i}}{L_i (1 + \phi_{z,i})}, 0 \\ 0, -\frac{6E_i I_{z,i}}{L_i^2 (1 + \phi_{y,i})}, 0, 0, 0, \frac{(4 + \phi_{z,i}) E_i I_{z,i}}{L_i (1 + \phi_{y,i})} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Đối với kết cấu có hệ giằng ngoài, ảnh hưởng của từng hệ giằng đến kết cấu được quy đổi thành lò xo xoay tương đương với độ cứng K_s đặt tại nút tầng tương ứng vị trí lắp đặt hệ giằng ngoài. Độ cứng xoay tương đương K_s của hệ giằng ngoài tại một nút được xác định theo nguyên lý cộng góc xoay thành phần.

Đối với hệ giằng dạng dàn, tổng góc xoay θ của cánh tay giằng tại vị trí kết nối với lõi kết cấu gồm hai thành phần: (i) θ_1 do biến dạng dọc trục của cột ngoại vi; (ii) θ_2 do biến dạng cắt trong dàn giằng. Từ $K_s = 1/\theta$, độ cứng xoay tổng hợp được xác định theo công thức [4]:

$$K_s = \left(\frac{2L}{d^2 E A_c} + \frac{d}{12 E I_0} + \frac{1}{G A_0 h} \right)^{-1} \quad (6)$$

Trong đó: $L(m)$ là cao độ vị trí hệ giằng ngoài tính từ mặt đất; $d(m)$ là khoảng cách giữa hai cột ngoại vi; $E A_c(N)$ là độ cứng dọc trục cột ngoại vi; $E I_0(Nm^2)$ là độ cứng chống uốn hiệu dụng của dàn giằng; $G A_0(N)$ là độ cứng chống cắt của dàn giằng; $h(m)$ là chiều cao của dàn giằng. Trên thực tế, $E I_0$ và

$G A_0$ thường rất lớn nên $K_s \approx \frac{d^2 E A_c}{2L}$, tức biến dạng

dọc trục của cột biên là thành phần cung cấp độ cứng xoay chủ yếu.

2.2. Ma trận độ cứng tổng thể

Ma trận độ cứng tổng thể K được xây dựng theo quy trình ba bước.

- Bước 1: Hợp nhất ma trận độ cứng phần tử của n phần tử dầm Timoshenko để thu được K^0 .

- Bước 2: Cộng trực tiếp độ cứng xoay $K_s(j)$ của hệ giằng ngoài thứ j vào phần tử đường chéo tương ứng bậc tự do góc xoay tại nút đặt outrigger, thu được K^1 .

- Bước 3: Loại bỏ các hàng và cột ứng với bậc tự

(4) do cố định tại nút đáy, thu được ma trận độ cứng K kích thước $(2n - 6) \times (2n - 6)$ dùng cho phân tích trị riêng.

2.3. Ma trận khối lượng và phương trình chuyển động

Nhà nhiều tầng với sàn cứng tuyệt đối cho phép tập trung khối lượng tại các nút tầng. Ma trận khối lượng M là ma trận đường chéo với các phần tử khối lượng tập trung m_j tại mỗi nút. Phương trình chuyển động của hệ nhiều bậc tự do được viết:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (7)$$

Trong đó: $\mathbf{x}(t)$ là véc-tơ chuyển vị tổng quát (chuyển vị ngang và góc xoay tại các nút tự do); $\mathbf{C}$ là ma trận cản, với $\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K}$, trong đó α và β là các hệ số cản Rayleigh, được xác định từ các tỷ số cản ξ_j ứng với tần số dao động riêng thứ j , ω_j [5]; $\mathbf{F}(t)$ là véc-tơ tải trọng gió ngoài phân bố theo chiều cao công trình.

2.4. Phân tích trị riêng – Chu kỳ và dạng dao động

Chu kỳ dao động riêng T_j và dạng dao động Φ_j được xác định từ bài toán trị riêng của hệ dao động tự do không cản:

$$\mathbf{K}\Phi_j = \omega_j^2 \mathbf{M}\Phi_j, \quad T_j = 2\pi/\omega_j \quad (8)$$

Trong đó: ω_j^2 là trị riêng thứ j của bài toán trị riêng tổng quát $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$.

Mô hình được lập trình toàn bộ trong môi trường MATLAB, sau đó được kiểm chứng bằng cách so sánh chu kỳ dao động riêng và dạng dao động với mô hình phần tử hữu hạn xây dựng trong phần mềm ETABS. Kết quả cho thấy sai số chu kỳ giữa hai mô hình đều nhỏ hơn 9%, xác nhận độ tin cậy và tính chính xác của phương pháp rời rạc hóa kết cấu nhà nhiều tầng kết hợp với hệ giằng ngoài.

3. TÁC ĐỘNG CỦA GIÓ – PHẢN ỨNG KẾT CẤU

3.1. Vận tốc gió

Do tính chất ngẫu nhiên, dừng (stationary) của gió, vận tốc gió tại độ cao z và thời điểm t được phân tích thành hai thành phần [6]:

$$\mathbf{V}(z, t) = \bar{\mathbf{V}}(z) + \mathbf{v}(z, t) \quad (9)$$

Trong đó $\bar{\mathbf{V}}(z)$ là vận tốc gió trung bình theo chiều cao (thành phần tĩnh); $\mathbf{v}(z, t)$ là thành phần vận tốc gió nhiễu loạn ngẫu nhiên. Vận tốc gió trung bình theo chiều cao được xác định theo quy luật lũy thừa [5]:

$$\bar{\mathbf{V}}(z) = \bar{\mathbf{V}}_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (10)$$

Trong đó: $\bar{\mathbf{V}}_{ref}$ là vận tốc gió trung bình tại độ cao tham chiếu, z_{ref} ; α là số mũ của biểu đồ phân bố tốc độ gió.

Cường độ nhiễu loạn, $I_v(z)$ và thang chiều dài tích phân của xoáy, $L_v(z)$ đặc trưng cho mức độ rối và quy mô không gian của xoáy nhiễu loạn tại độ cao tương đương, z_s :

$$I_v(z) = \sigma_v / \bar{V}_z \quad (11)$$

$$L_v(z) = \ell(z_s/10)^{\bar{\epsilon}} \quad (12)$$

Với σ_v độ lệch chuẩn thành phần nhiễu loạn dọc gió; ℓ và $\bar{\epsilon}$ là các hằng số địa hình (lấy theo bảng 10 của tài liệu [7]). Giá trị $I_v(z)$ giảm, giá trị của $L_v(z)$ tăng theo độ cao phản ánh mức độ rối giảm, kích thước xoáy lớn hơn ở các độ cao lớn hơn.

3.2. Mật độ phổ vận tốc gió

Sự phân bố năng lượng của thành phần vận tốc gió nhiễu loạn ngẫu nhiên, $v(z,t)$ được mô tả qua hàm mật độ phổ vận tốc, $S_v(f)$. Các mô hình mật độ phổ vận tốc gió khác nhau thường được sử dụng trong tiêu chuẩn thiết kế trên thế giới [9], [10]. Theo tài liệu [8], mô hình phổ Kaimal có thể biểu diễn dưới dạng như sau:

$$\frac{f S_v(f)}{\sigma_v^2} = \frac{n 6.868}{(1 + n 10.302)^{5/3}} \quad (13)$$

Trong đó: tần số thu gọn (không thứ nguyên) $n = f L_z(x) / \bar{V}$, f là tần số của dao động rối vận tốc gió (đơn vị: Hz).

3.3. Phản ứng của kết cấu theo phương dọc gió

Phản ứng của kết cấu nhà nhiều tầng do thành phần nhiễu loạn, $v(z,t)$ gây ra được phân tích trong miền tần số theo phương pháp phổ phản ứng. Đối với dạng dao động thứ j , phương trình chuyển động tương ứng như sau:

$$\hat{M}_j \ddot{\eta}_j(t) + \hat{C}_j \dot{\eta}_j(t) + \hat{K}_j \eta_j(t) = \hat{Q}_j(t) \quad (14)$$

Trong đó: $\hat{M}_j, \hat{C}_j, \hat{K}_j$, và $\hat{Q}_j(t)$ lần lượt là khối lượng, độ cản, độ cứng, và ngoại lực do thành phần nhiễu loạn của gió gây ra tương ứng với dạng dao động thứ j .

3.4. Mật độ phổ của tải trọng

Mật độ phổ tải trọng theo phương dọc gió,

$$S_{\hat{Q}_j}(\omega) = \frac{\rho^2 B^2}{4} J_v^2(\omega) \quad (15)$$

với, $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ là khối lượng riêng không khí, và $J_v(\omega)$ là hàm chấp nhận liên hợp, phản ánh mức độ tương quan tải trọng gió theo chiều cao do thành phần nhiễu loạn của gió gây ra.

$$J_v^2(\omega) = \int_0^H \int_0^H \Phi \Gamma^2(\Delta_a + \Delta_b) dx_1 dx_2 \quad (16)$$

Với:

$$\Phi = \phi_y(x_1) \phi_y(x_2) \quad (17)$$

$$\Gamma = V(x_1) V(x_2) \quad (18)$$

$$\Delta_a = A_y(x_1) A_y(x_2) \frac{S_{uu}(\Delta x, \omega)}{\sigma_u^2} \quad (19)$$

$$A_y(x_i) = 2 \frac{D}{B} \bar{C}_D I_u(x_i); i = 1, 2 \quad (20)$$

$$B_y(x_i) = \left(\frac{D}{B} C'_D - C_L \right) I_v(x_i); i = 1, 2 \quad (21)$$

$$B_y(x_i) = \left(\frac{D}{B} C'_D - C_L \right) I_v(x_i); i = 1, 2 \quad (22)$$

Trong đó, B, D và H lần lượt là chiều dài, chiều rộng (vuông góc với hướng gió), và chiều cao của tòa nhà. Ngoài ra, các hàm mật độ phổ chéo, $S_{uu}(\Delta x, \omega)$ và $S_{vv}(\Delta x, \omega)$ mô tả mật độ dao động theo phương ngang gió và phương dọc gió ở một tần số nhất định giữa hai điểm cách nhau một khoảng: $\Delta x = |x_2 - x_1|$

$$\frac{S_{mn}(\Delta x, \omega)}{\sigma_n^2} = \frac{S_n(\omega)}{\sigma_n^2} \hat{C}_{o_{mn}}(\Delta x, \omega) \quad (23)$$

Trong đó, $n = u, v$ và phổ đồng pha chuẩn hóa, $\hat{C}_{o_{mn}}(\Delta x, \omega)$ được tính như sau:

$$\hat{C}_{o_{mn}}(\Delta x, \omega) = e^{-C_{mn} \frac{f \Delta x}{\bar{V}_{mn}(x)}}, f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (24)$$

Với, $C_{mn} = 9$ là hệ số suy giảm theo phương đứng mô tả phạm vi không gian của tương quan rối [6].

3.5. Hàm phản ứng kết cấu

Bỏ qua ảnh hưởng của độ cứng khí động, hàm phản ứng kết cấu phụ thuộc vào tần số, ω xét đến độ cản khí động như sau:

$$\hat{H}_j(\omega) = \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^2 + 2i(\zeta_i - \zeta_{aei}) \frac{\omega}{\omega_i} \right]^{-1} \quad (25)$$

Trong đó,

$$\zeta_{aei} = - \frac{\rho B^2}{4 \tilde{m}_y} \left(\frac{2 C_D D}{B^2 \omega_y} \right) \frac{\int_0^H \phi_y^2 V(x) dx}{\int_0^H \phi_y^2 dx} \quad (26)$$

với: $\tilde{m}_y$

3.6. Độ lệch chuẩn của đáp ứng kết cấu

Sử dụng dạng dao động với các thành phần dịch chuyển theo phương dọc gió, y độ lệch chuẩn chuyển vị của kết cấu do thành phần nhiễu loạn gió gây ra tại độ cao x :

$$\sigma_{r_y}^2(x) = \int_0^\infty S_{r_y}(x, \omega) d\omega \quad (27)$$

hay

$$\sigma_{r_y}(x) = \left| \phi_y(x_r) \right| \frac{\rho B^3}{2 \tilde{m}_y} \left(\frac{1}{B \omega_y} \right)^2 \times \left[\int_0^\infty \hat{H}_y(\omega) \cdot \hat{J}_y^2(\omega) d\omega \right]^{1/2} \quad (28)$$

Độ lệch chuẩn gia tốc của kết cấu do thành phần nhiễu loạn gió gây ra tại độ cao x được xác định như sau:

$$\sigma_{a_y}^2(x) = \omega_y^4 \cdot \int_0^\infty S_{r_y}(x, \omega) d\omega \quad (29)$$

hay

$$S_{a_y}(\omega) = \omega^4 \rho B \left(\frac{|\hat{H}_y(\omega)|^2}{2\tilde{m}_y \omega_y^2} \right) \hat{J}_y^2(\omega) \quad (30)$$

Trong đó, $\hat{J}_y^2(\omega)$ là hàm chấp nhận liên hợp chuẩn hóa, được xác định như sau:

$$\hat{J}_y^2 = J_y^2(\omega) / \left(\int_L \phi_y^2 dx \right)^2 \quad (31)$$

4. VÍ DỤ SỐ

4.1. Thông số công trình và hệ giằng

Công trình nghiên cứu là nhà chung cư cao tầng $H = 244$ m, gồm 68 tầng, hệ kết cấu chính là lõi cứng BTCT kết hợp cột biên, liên kết qua hệ giằng ngoài dàn thép. Tải trọng gió xác định theo TCVN 2737:2023, địa hình loại B, vận tốc gió cơ bản $V_0 = 30$ m/s. Thông số đầu vào chính tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số đầu vào mô hình số

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Chiều cao công trình, H	244	m
Số tầng, n	68	tầng
Độ cứng uốn (phương X), $EI_x (\times 10^9)$	8,533	kN·m ²
Độ cứng uốn (phương Y), $EI_y (\times 10^9)$	14,506	kN·m ²
Độ cứng dọc trục cột biên, $EA_{col} (\times 107)$	8,53	kN
Cánh tay đòn outrigger, L	18	m
Chiều cao dàn Outrigger, h	4	m
Số panel dàn, n_{panel}	2	–
Vận tốc gió cơ bản, V_0	30	m/s

4.2. So sánh bốn kiểu dàn outrigger

Bốn kiểu dàn được so sánh gồm: (1) Hệ X; (2) Hệ K; (3) Hệ N; (4) Hệ KB. Vị trí đặt hệ giằng ngoài dạng dàn lấy tại $x_0 = 0,73H$ (tầng 50). Để bảo đảm tính tương đương khi so sánh, bốn cấu hình dàn được mô hình với cùng tiết diện thanh cánh và thanh xiên ($A_b = A_d = 1584 \text{ cm}^2$). Do số lượng và chiều dài thanh xiên khác nhau giữa các kiểu, tổng khối lượng thép sử dụng cho dàn cũng khác nhau: kiểu X có cấu tạo hai thanh chéo trên mỗi panel nên nặng nhất (90.640 kg) nhưng cũng đạt độ cứng xoay K_r lớn nhất; kiểu KB nhẹ nhất (59.740 kg) song độ cứng thấp nhất. Như vậy, chênh lệch K_r giữa các

kiểu phản ánh hiệu quả của hình học bố trí thanh xiên, không phải do khác biệt tiết diện cấu kiện

Bảng 2. Thông số tiết diện cấu kiện của bốn kiểu dàn outrigger

Kiểu dàn	A_b thanh cánh (cm^2)	A_d thanh xiên (cm^2)	Tổng KL thép (kg)	K_r (kN·m/rad)
X	1584	1584	90.640	$4,67 \times 10^7$
K	1584	1584	69.260	$4,39 \times 10^7$
N	1584	1584	72.670	$1,36 \times 10^7$
KB	1584	1584	59.740	$0,347 \times 10^7$

Hệ dàn X có chỉ số K_r cao nhất ($4,67 \times 10^7$ kN·m/rad) và hiệu quả giảm chuyển vị đỉnh tốt nhất (56,7%); hệ dàn K bám sát ngay sau (55,6%). Hệ dàn N tuy đơn giản về cấu tạo nhưng hiệu quả thấp hơn nhiều (22,0%), còn hệ KB cho hiệu quả thấp nhất (8,3%). Thông số tiết diện cấu kiện của bốn cấu hình được trình bày trong Bảng 3. Như vậy, khi so sánh ở cùng điều kiện tiết diện thanh ($A_b = A_d$), hệ dàn X và K vượt trội về độ cứng xoay tương đương và khả năng giảm chuyển vị đỉnh. Kết quả so sánh về độ cứng, và hiệu quả giảm chuyển vị của bốn kiểu dàn được thể hiện ở Bảng 3.

Bảng 3. Độ cứng và chuyển vị của các kiểu dàn (tại tầng 50, $x/H = 0,73$)

Thông số	X	K	N	KB
K_r (kN·m/rad) $\times 10^7$	4,67	4,39	1,36	0,347
Chuyển vị đỉnh (mm)	312,66	320,86	563,60	662,48
Hiệu quả giảm chuyển vị	56,7%	55,6%	22,0%	8,3%

4.3. Vị trí tối ưu của một hệ outrigger

Chương trình MATLAB khảo sát toàn bộ vị trí từ tầng 20 đến tầng 65. Tại mỗi tầng, ma trận độ cứng

Bảng 4. Chuyển vị đỉnh, gia tốc đỉnh và tần số dao động riêng sử dụng một outrigger loại X

Tầng đặt OT	x/H	Chuyển vị đỉnh (mm)	Hiệu quả giảm Δ_x (%)	f_1 dọc gió (Hz)	f_2 ngang gió (Hz)	Gia tốc đỉnh (m/s^2)
Không OT	0	722,25	–	0,106	0,082	0,193
20	0,29	625,02	13,5%	0,112	0,089	0,198
30	0,44	439,61	39,1%	0,118	0,096	0,160
40	0,58	337,19	53,3%	0,122	0,100	0,132
45	0,65	318,66	55,9%	0,123	0,101	0,128
50	0,73	312,66	56,7%	0,123	0,101	0,126
55	0,80	311,71	56,8%	0,123	0,101	0,123
60	0,87	351,09	51,4%	0,122	0,099	0,134
65	0,94	453,63	37,2%	0,121	0,098	0,170

được cập nhật và bài toán trị riêng được giải lại, sau đó tính chuyển vị và gia tốc RMS đỉnh. Bảng 3 trình bày kết quả tại các vị trí đại diện ở $V_0 = 30 \text{ m/s}$.

Kết quả cho thấy rõ ba vùng đặc trưng: (i) Tầng 20 - 40 - hiệu quả thấp do cánh tay đòn ngắn; (ii) Vùng tối ưu chuyển vị đỉnh tập trung quanh tầng 50–55 ($x/H = 0,73\text{--}0,80$), đạt mức giảm cao nhất khoảng 56,8%; (iii) Khi tiếp tục nâng outrigger lên cao hơn (tầng 60–65), hiệu quả lại suy giảm (chỉ còn 51,4% rồi 37,2%) do cánh tay đòn kháng lật rút ngắn. Vùng tầng 45–55 cho hiệu quả gần như tương đương (chênh lệch Δ_x chỉ vài phần trăm), tạo sự linh hoạt kiến trúc trong bố trí tầng kỹ thuật.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày mô hình thanh Timoshenko 3D nhiều bậc tự do tích hợp lò xo xoay mô phỏng hệ giằng ngoài, được lập trình toàn bộ trong MATLAB và kiểm chứng với ETABS (sai số chu kỳ dao động $< 9\%$). Đây là cơ sở để so sánh định lượng bốn kiểu dàn outrigger (kiểu X, kiểu K, kiểu N và kiểu KB) thông qua chỉ số thống nhất K_p , đồng thời phân tích đáp ứng dọc gió theo phổ Kaimal kết hợp hàm chấp nhận liên hợp và phương pháp chống chất dạng dao động trong miền tần số. Kết quả cho thấy trong bốn cấu hình khảo sát, hệ dàn kiểu X cho hiệu quả giảm chuyển vị đỉnh cao nhất (56,7%), kế đến là kiểu K (55,6%); hệ N và KB kém hơn đáng kể. Đối với công trình khảo sát, vị trí đặt outrigger hiệu quả nhất nằm trong vùng $x \approx 0,73H\text{--}0,80H$ (quanh tầng 50–55), tại đó chuyển vị đỉnh và gia tốc đỉnh đều đạt giá trị nhỏ nhất; bố trí outrigger cao hơn hoặc thấp hơn vùng này đều làm giảm hiệu quả.

Ảnh hưởng của hệ giằng ngoài đến đặc tính động (chu kỳ dao động riêng và dạng dao động) là đáng kể và không nên bỏ qua trong phân tích kết cấu, kể cả trong giai đoạn phân tích sơ bộ. Sự hiện diện của hệ giằng ngoài làm tăng độ cứng tổng thể của kết cấu, dẫn đến giảm chu kỳ dao động riêng và hạn chế góc xoay tại các vị trí lắp đặt giằng. Ảnh hưởng của hệ giằng ngoài đến chu kỳ và dạng dao động là lớn nhất khi giằng được lắp đặt tại vị trí có độ cong lớn nhất trong dạng dao động tương ứng của kết cấu chưa có giằng. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Taranath, B. S. (2016). *Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction*. CRC Press, Boca Raton.
- [2] Smith, B. S., & Salim, I. (1983). Formulae for optimum drift resistance of outrigger braced tall building structures. *Computers & Structures*, 17(1), 45-50.
- [3] Lame, A. (2008). *Optimization of outrigger structures* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

- [4] Hoenderkamp, J. C. D., & Bakker, M. C. M. (2003). Analysis of high-rise braced frames with outriggers. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 12(4), 335-350.
- [5] Alhaddad, W., Halabi, Y., Xu, H., & Lei, H. (2020). Outrigger and Belt-Truss System Design for High-Rise Buildings: A Comprehensive Review Part II—Guideline for Optimum Topology and Size Design. *Advances in Civil Engineering*, 2020, Article 2589735.
- [6] Strømmen, E. N. (2014). *Structural dynamics* (pp. 229-247). Switzerland: Springer International Publishing.
- [7] TCVN 2737:2023: Tải trọng và tác động, Bộ Khoa học và Công nghệ, 2023.
- [8] Simiu, E., & Scanlan, R. H. (1996). *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design* (Vol. 688). New York: John Wiley & Sons.
- [9] CEN (European Committee for Standardization). 2005. Eurocode 1: Actions on Structures — Part 1-4: General Actions — Wind Actions. EN 1991-1-4:2005+A1:2010. Brussels: CEN.
- [10] ASCE (American Society of Civil Engineers). 2016. *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. ASCE/SEI 7-16. Reston, VA: ASCE.