

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	等価SDOFモデルを用いた高層免震建物の風応答の推定手法
Title(English)	Estimation method of wind-induced responses of baseisolated tall buildings using equivalent SDOF model
著者(和文)	銭 曉鑫, 佐藤大樹
Authors(English)	Xiaoxin Qian, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 437-440
Citation(English)	, , , pp. 437-440
発行日 / Pub. date	2025, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

等価 SDOF モデルを用いた高層免震建物の風応答の推定手法

構造—振動

正会員 ○ 銭晓鑫^{*1}

正会員 佐藤大樹^{*1}

免震建物 風応答 等価モデル

鋼材ダンパー オイルダンパー

1 はじめに

免震構造は、地震時に建物の安全性を確保し、居住者の快適性を向上させる効果が広く認識されており、近年では高層建物への適用が積極的に進められている。この中でも、免震層に鋼材ダンパーとオイルダンパーを組み合わせる手法で、地震エネルギーをより効果的に吸収し、優れた耐震性能を発揮することが報告されている¹⁾。一方、日本のように地震や台風が頻発する地域では、高層免震建物の耐風性能が重要視され、とりわけ風応答に対する正確な評価は設計上の重要な課題となっている。

風応答を正確に評価するためには、多自由度 (MDOF) モデルを用いた時刻歴解析が一般的に行われているが、この解析には膨大な時間を要する。先行研究²⁾では、筆者らが鋼材ダンパーのみを採用した高層免震建物を対象に、免震層のエネルギー吸収を効率的に推定するための等価 1 自由度モデル (以下、ES モデル) が提案し、その有効性を確認している。しかし、前述の鋼材ダンパーとオイルダンパーを組み合わせた場合において、この ES モデルが適用可能であるか、特に風応答の正確な推定が可能であるかについては、依然として明らかにされていない。

そこで本報では、鋼材ダンパーとオイルダンパーを組み合わせた高層免震建物を対象に、時刻歴風応答解析により、免震層の最大変形と残留変形、および上部構造の最大変位分布を ES モデルに基づいての推定手法を提案し、その適用性を検証する。

2 MDOF モデルと風力の概要

Fig. 1(a)に示すように、対象建物は鋼材ダンパーとオイルダンパーを組み合わせた高層免震建物である。上部構造は、高さ $H_u = 100$ m、幅 $B_u = 25$ m、奥行 $D_u = 25$ m、密度 $\rho_u = 250$ kg/m³とする。免震層は、積層ゴム、鋼材ダンパーとオイルダンパーで構成され、その面密度 $\rho_b = 3644$ kg/m²とする。解析を簡略化するために、Fig. 1(b)に示すように、対象建物を MDOF モデルに置換する。上部構造は 10 質点系モデルで表し、固有周期 $T_u = 2.5$ s、減衰定数 $\xi_u = 2\%$ (初期剛性比例型) とする。また、1~10 層の質量 $m_{u1} \sim m_{u10}$ は同

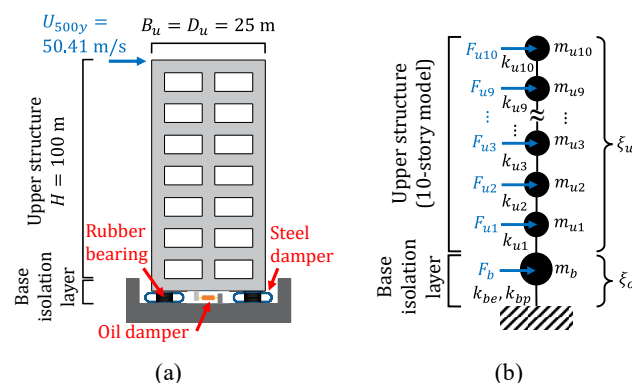


Fig. 1 (a) Base-isolated tall building and (b) its idealized shear-type MDOF model

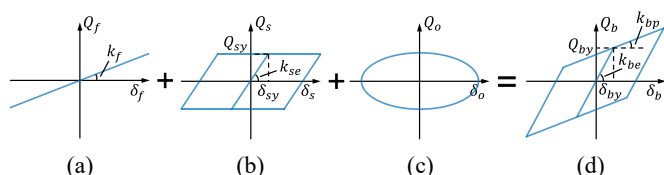


Fig. 2 Shear force-deformation relationship: (a) rubber bearing (Q_f - δ_f relationship), (b) steel damper (Q_s - δ_s relationship), (c) oil damper (Q_o - δ_o relationship), and (d) isolation layer (Q_b - δ_b relationship)

じ値と仮定し、 H_u 、 B_u 、 D_u と ρ_u を用いて算出される。1~10 層の剛性 $k_{u1} \sim k_{u10}$ は上部構造の 1 次モードが直線となるように決定する³⁾。免震層は弾塑性 1 質点系モデルで表し、免震周期 $T_f = 5$ s とし、質量 m_b は B_u 、 D_u と ρ_b を用いて算出される。また、免震層のほかのパラメータ (1 次剛性 k_{be} 、2 次剛性 k_{bp} 、降伏せん断力 Q_{by} と降伏変形 $\delta_{by} = 2.5$ cm) については、Figs. 2(a)-(d)に示すように、積層ゴム、鋼材ダンパー、オイルダンパーおよび免震層の復元力特性の関係により求められる⁴⁾。さらに、風応答に与える影響を考察するために、設計上のいくつかの重要なパラメータについて、以下の設定を行う⁵⁾：

- ① オイルダンパーの減衰定数 $\xi_o = 10\%$, 20% , 30% (降伏後剛性比例型)
- ② 上部構造の固有周期 $T_u = 1.5$ s, 2.0 s, 2.5 s, 3.0 s, 3.5 s
- ③ ダンパー量 $\alpha_{sy} = 0.020, 0.025, 0.030, 0.035, 0.040$

なお、以上の ξ_o は降伏後剛性比例型減衰に従うが、初期剛性比例減衰に従う ξ'_o に変換することが可能であり、その関係は次式で定義する。

$$\xi'_o = \xi_o \cdot \frac{\omega_{bp}}{\omega_{be}} \quad (1)$$

ここで、 ω_{be} と ω_{bp} は次式で表される。

$$\omega_{be} = \sqrt{\frac{k_{be}}{m_b + \sum_{i=1}^{10} m_{ui}}} \quad (2a)$$

$$\omega_{bp} = \sqrt{\frac{k_{bp}}{m_b + \sum_{i=1}^{10} m_{ui}}} \quad (2b)$$

以上の変換後の減衰定数 ξ'_o は、後述の ES モデルの減衰定数を算出する際に用いられる。

一方、基本風速 36 m/s、再現期間 500 年、地表面粗度区分 III と仮定した場合、建物頂部の平均風速 $U_H = 50.41$ m/s となる (Fig. 1(a))。これに基づき、風洞実験で得られた層風力係数を用いて、上部構造 1~10 層の 700 秒間風力 $F_{u1} \sim F_{u10}$ (時間刻み $\Delta t = 0.05$ s) を 10 波 (Wave 1~10) 作成した。ただし、免震層の風力 $F_b = 0$ とする。また、風直交方向の風力と比較して、風方向の風力は平均成分を有するため、高層免震建物においてより大きな風応答を引き起こすと報告されている⁶⁾。したがって、本報では風方向の風力のみを考慮した。Fig. 3 に計算によって得られた風力の一例 (10 層、Wave 01) を示す。風方向では変動成分だけではなく、大きな平均成分を有していることが見られる。また、解析における過大応答を避けるために、各風力波形の前後 50 秒間をエンベロープとして設定した。

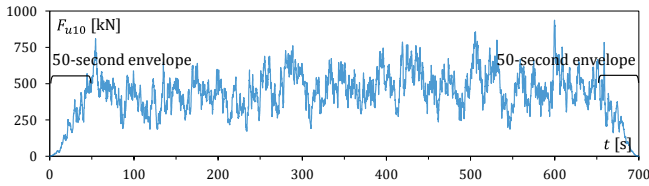


Fig. 3 Wind force at the 10th story of the upper structure F_{u10} (Along-wind, Wave 1)

3 提案した ES モデルと風力の概要

Fig. 4 に示す ES モデルと風力の作成手法については²⁾、以下の Step 1 から Step 5 を用いて簡潔に説明する。

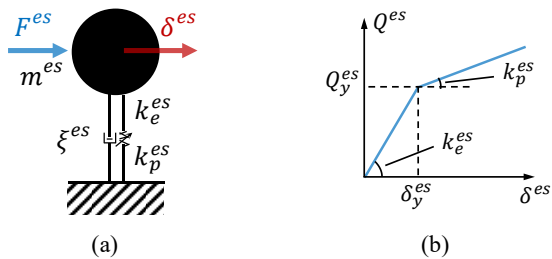


Fig. 4(a) ES model and (b) its shear force-deformation relationship (Q^{es} - δ^{es} relationship)

Step 1: 弾性と塑性 1 次モードの取得

免震層が弾性状態または塑性状態にある場合、MDOF モデルの固有方程式は次式で表される。

$$([K_e] - \omega_e^2[M])\{\varphi_e\} = \{0\} \quad (3a)$$

$$([K_p] - \omega_p^2[M])\{\varphi_p\} = \{0\} \quad (3b)$$

ここで、 $\{\varphi_e\}$ と $\{\varphi_p\}$: 免震層が弾性状態と塑性状態にある場合の MDOF モデルの 1 次モード (以下、弾性 1 次モードと塑性 1 次モード)、 $\{\omega_e\}$ と $\{\omega_p\}$: 弾性 1 次モードと塑性 1 次モードの固有円振動数、 $[M]$: MDOF モデルの質量マトリクス、 $[K_e]$ と $[K_p]$: 弾性 1 次モードと塑性 1 次モードに対応する MDOF モデルの剛性マトリクスを表す。これらのうち、 $[M]$ 、 $[K_e]$ と $[K_p]$ はそれぞれ次式で表される。

$$[M] = \begin{bmatrix} m_b & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_{u10} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[K_e] = \begin{bmatrix} k_{be} + k_{u1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{u10} \end{bmatrix} \quad (5a)$$

$$[K_p] = \begin{bmatrix} k_{bp} + k_{u1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{u10} \end{bmatrix} \quad (5b)$$

次に、以上の $\{\varphi_e\}$ と $\{\varphi_p\}$ を次式のように正規化する。

$$\{\varphi_e\}^T [M] \{\varphi_e\} = \{\varphi_p\}^T [M] \{\varphi_p\} = 1 \quad (6)$$

Step 2: 質量と剛性の算出

Step 1 で正規化された $\{\varphi_e\}$ と $\{\varphi_p\}$ に基づき、ES モデルの質量 m^{es} は次式のように 1 に規定される。

$$m^{es} = \{\varphi_e\}^T [M] \{\varphi_e\} = \{\varphi_p\}^T [M] \{\varphi_p\} = 1 \quad (7)$$

同様に、正規化された $\{\varphi_e\}$ と $\{\varphi_p\}$ に基づき、ES モデルの 1 次剛性 k_e^{es} と 2 次剛性 k_p^{es} は次式で算出される。

$$k_e^{es} = \{\varphi_e\}^T [K_e] \{\varphi_e\} \quad (8a)$$

$$k_p^{es} = \{\varphi_p\}^T [K_p] \{\varphi_p\} \quad (8b)$$

Step 3: 降伏変形とせん断力の算出

正規化された $\{\varphi_e\}$ に基づき、ES モデルの降伏変形 δ_y^{es} は次式で算出される。

$$\delta_y^{es} = \delta_{by} / \varphi_{eb} \quad (9)$$

ここで、 φ_{eb} : $\{\varphi_e\}$ における免震層の要素を表す。

上式で得られた δ_y^{es} を用いて、ES モデルの降伏せん断力 Q_y^{es} は次式によって算出される。

$$Q_y^{es} = \delta_y^{es} \cdot k_e^{es} \quad (10)$$

Step 4: 減衰定数の算出

ES モデルが初期剛性比例型減衰モデルを仮定する場合、その減衰定数 ξ^{es} は、2 章で定義した ξ'_o を用いて次式により算出される⁷⁾。

$$\xi^{es} = \xi_o^{es} + \xi_u^{es} = \frac{\xi'_o \cdot W_b}{W_b + \sum_{i=1}^{10} W_{ui}} + \frac{\sum_{i=1}^{10} \xi_u \cdot W_{ui}}{W_b + \sum_{i=1}^{10} W_{ui}} \quad (11)$$

ここで、 ξ_o^{es} と ξ_u^{es} ：ESモデルにおけるオイルダンパーと上部構造の減衰定数を表す。 W_b と W_{ui} ：免震層と上部構造*i*層における最大ポテンシャルエネルギーを表し、それぞれ正規化された $\{\varphi_e\}$ に基づき次式により算出される。

$$W_b = \frac{1}{2} \cdot k_{be} \cdot \Delta\varphi_{eb}^2 \quad (12a)$$

$$W_{ui} = \frac{1}{2} \cdot k_{ui} \cdot \Delta\varphi_{eui}^2 \quad (12b)$$

ここで、 $\Delta\varphi_{eb}$ と $\Delta\varphi_{eui}$ ： $\{\varphi_e\}$ の層間モード形 $\{\varphi_e\}$ における免震層と上部構造*i*層の要素を表す。

Step 5: 風力の算出

正規化された $\{\varphi_e\}$ に基づき、ESモデルの風力 F^{es} は次式により算出される。

$$F^{es} = \{\varphi_e\}^T \{F\} \quad (13)$$

ここで、 $\{F\}$ ：免震層の風力 F_b と上部構造 1~10 層の風力 $F_{u1} \sim F_{u10}$ で構成される風力ベクトルを表す。

以上のESモデルと風力の作成において、 $\{\varphi_e\}$ および $\{\varphi_p\}$ を選択する理由については、先行研究²⁾に詳しく記載されているため、本報ではその詳細を省略する。

4 等価 SDOF モデルに基づく風応答の推定手法

2章で示したMDOFモデルと3章で提案したESモデルを用いて風応答時刻歴解析を実施し、本章では、それらの免震層の最大変形と残留変形、および上部構造の最大変位分布を比較することで、ESモデルの推定精度を評価するとともに、その適用性を検証する。

4.1 免震層の最大変形

MDOFモデルの免震層とESモデルは異なる復元力特性を有しているため、ESモデルの最大変形を用いてMDOFモデルの免震層の最大変形を直接比較することはできない。したがって、ESモデルの最大変形 δ_{max}^{es} からESモデルに対応する免震層の最大変形 δ_{bmax}^{es} への換算が必要となり、その換算式を次式のように提案する。

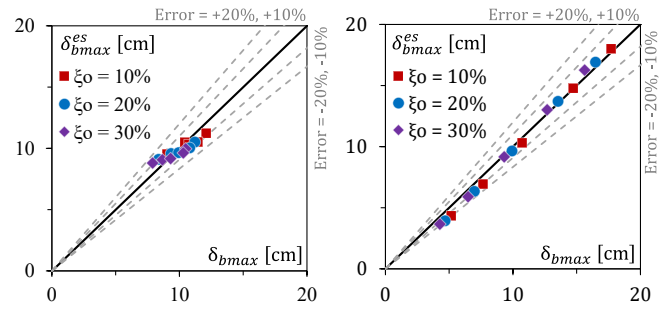
$$\delta_{bmax}^{es} = \delta_{by} + (\delta_{max}^{es} - \delta_y^{es}) \cdot \varphi_{pb} \quad (14)$$

ここで、 φ_{pb} ： $\{\varphi_p\}$ における免震層の要素を表す。

Fig. 5にMDOFモデルの免震層の最大変形 δ_{bmax} （横軸）と、ESモデルに対応する免震層の最大変形 δ_{bmax}^{es} （縦軸）の比較を示す。各プロットは、10波のアンサンブル平均による結果を表す（以下の4.2節と4.3節も同様）。Fig. 5(a)では、異なる上部構造の周期 T_u を考慮した場合、オイルダンパーの減衰定数 $\xi_o = 10\%$ 、 20% で、MDOFモデルの δ_{bmax} に対するESモデルの δ_{bmax}^{es} の誤差が10%以内であることが確認され、推定精度が高いことが示された。また、 $\xi_o = 30\%$ では、一部の δ_{bmax}^{es} の誤差がわずかに10%を超えているものの、依然として高い推定精度を示している。さらに、3章で述べたように、ESモデルは弾性または塑性1次モードのみに基づいて作成されているため、 T_u の増大に伴う高次モードの影響が大きくなり、それにより δ_{bmax}^{es} の推定

精度が大幅に低下することが想定される。しかし、Fig. 5(a)の結果から、実際にはこのような現象は見られず、高次モードからの影響が小さいことが確認された。

Fig. 5(b)では、異なるダンパー量 α_{sy} を考慮した場合、 $\xi_o = 10\%$ 、 20% 、 30% で、MDOFモデルの δ_{bmax} に対するESモデルの δ_{bmax}^{es} の誤差が全体的に20%以内であることが確認された。特に、免震層の最大塑性率が高い範囲（すなわち、免震層の最大変位 ≥ 10 cm）では、 δ_{bmax}^{es} の誤差が5%以内に収まり、推定精度が非常に高いことが示された。



(a) Var. in T_u ($\alpha_{sy} = 0.03$) (b) Var. in α_{sy} ($T_u = 2.5$ s)
Fig. 5 Comparison of maximum deformation of the isolation layer between the MDOF and ES models (ensemble average)

4.2 免震層の残留変形

ESモデルの残留変形を用いてMDOFモデルの免震層の残留変形を直接推定することは困難である。しかし、Fig. 6に示すMDOFモデルの免震層のループ（ $\xi_o = 10\%$ 、 $T_u = 2.5$ s, Wave 1, 0~700 s）から、何らかの関係が存在する可能性が示唆される。Fig. 6(a)では、 $\alpha_{sy} = 0.04$ の場合、免震層の最大変形 δ_{bmax} （A点）が分かれば、免震層の復元力特性を用いることで、免震層の残留変形 δ_{br} （B点）を求めることが可能である。4.1節において、ESモデルに対応する免震層の最大変形 δ_{bmax}^{es} は高い推定精度を示しているため、Fig. 6(a)における関係を利用し、ESモデルに対応する免震層の残留変形 δ_{br}^{es} を次式で提案する。

$$\delta_{br}^{es} = \frac{\delta_{bmax}^{es}(k_{be} - k_{bp}) + \delta_{by}(k_{bp} - k_{be})}{k_{be}} \quad (15)$$

Fig. 6(b)では、 $\alpha_{sy} = 0.02$ の場合、わずかな揺戻し効果により、実際の免震層の残留変形はB点ではなくC点となる。しかし、B点とC点の差異が非常に小さいため、Fig. 6(b)の場合でも、依然として上式を用いることが可能であると考えられる。

Fig. 7にMDOFモデルの免震層の残留変形 δ_{br} （横軸）と、ESモデルに対応する免震層の残留変形 δ_{br}^{es} （縦軸）の比較を示す。Fig. 7(a)では、上部構造の周期 T_u を変化させた場合、MDOFモデルの δ_{br} に対するESモデルの δ_{br}^{es} の誤差が全体的に20%以内に収まっており、推定精度の高さが確認された。一方、Fig. 7(b)では、ダンパー量 α_{sy} を変化させた場合でも、同様に誤差が概ね20%以内であることが示され、ESモデルが高い推定精度を有することがわかる。

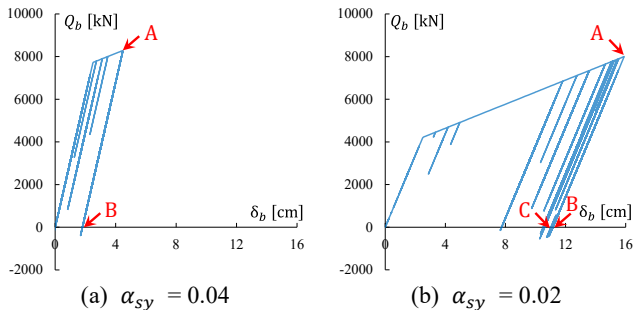


Fig. 6 Hysteresis loop of the isolation layer of the MDOF model ($\xi_o = 10\%$, $T_u = 2.5$ s, Wave 1, 0~700 s)

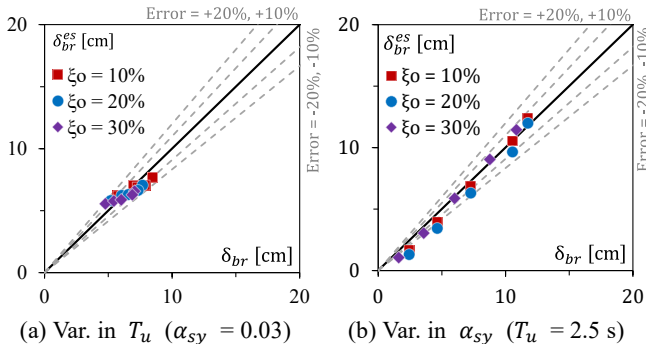


Fig. 7 Comparison of residual deformation of the isolation layer between the MDOF and ES models (ensemble average)

4.3 上部構造の最大変位分布

4.1 節における免震層の最大変形の高精度な推定に基づき、ES モデルに対応する上部構造 i 層の最大変位を、次式のように提案する。

$$x_{uimax}^{es} = \delta_{by} \cdot \frac{\varphi_{ei}}{\varphi_{eb}} + (\delta_{bmax}^{es} - \delta_{by}) \cdot \frac{\varphi_{pi}}{\varphi_{pb}} \quad (16)$$

一例として ($T_u = 2.5$ s, $\alpha_{sy} = 0.03$)、Fig. 8 に MDOF モデルにおける上部構造 i 層の最大変位 x_{uimax} と、ES モデルに対応する上部構造 i 層の最大変位 x_{uimax}^{es} の比較を示す。ここで、免震層の最大変位は免震層の最大変形と等しい。また、縦軸の表記において、 b は免震層、 G は地面を表す。Fig. 8(a) では、 $\xi_o = 10\%$ の場合、ES モデルの x_{uimax}^{es} は MDOF モデルの x_{uimax} と非常に近いことが示された。さらに、Figs. 8(b)、(c) に示されるように、 $\xi_o = 20\%$ 、 30% の場合でも、ES モデルの x_{uimax}^{es} は MDOF モデルの x_{uimax} と非常に近く、ES モデルを用いることで上部構造の最大変位分布を高精度に推定できることが確認された。ほかのケース (例えば、異なる T_u もしくは異なる α_{sy}) の場合でも、同じ結論が得られる。この上部構造の最大変位分布の高精度な推定は、4.1 節で述べた免震層の最大変形の高精度な推定によるものである。さらに、MDOF モデルにおける上部構造の最大変位がほぼ直線的な分布を示すこと (すなわち、高次モードの影響が小さいこと) が、この高精度な推定の要因の一つと考えられる。

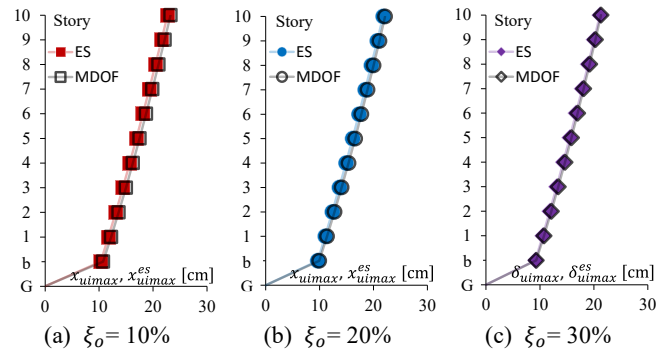


Fig. 8 Comparison of maximum displacement distribution of the upper structure between the MDOF and ES models (case of $T_u = 2.5$ s and $\alpha_{sy} = 0.03$)

5 まとめ

本報では、筆者らが先行研究²⁾で提案した等価 1 自由度 (ES) モデルを拡張し、時刻歴解析を用いて、オイルダンパーおよび鋼材ダンパーを有する高層免震建物の風応答を効率的に推定する手法を新たに提案した。得られた結論を以下に示す。

- (1) ES モデルの最大変形に基づき、ES モデルに対応する免震層の最大変形への換算式を提案した。多自由度 (MDOF) モデルにおける免震層の最大変形と比較した結果、ES モデルの推定精度が高いことが示された。
- (2) 免震層の最大変形の高精度な推定値に基づき、ES モデルに対応する免震層の残留変形および上部構造の最大変位分布の換算式をそれぞれ提案した。MDOF モデルとの解析結果を比較したところ、ES モデルの推定精度が高いことが確認された。

以上の結論から、この ES モデルの適用性が高いことが確認された。構造エンジニアは、耐風設計の初期段階において、この ES モデルを用いることで、高層免震建物の風応答を効率的に推定することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 松田 和浩, 笠井 和彦, 東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた超高層免震建物の動的挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 2014, 79 巻, 704 号, p. 1445-1455
- 2) Qian X, Sato D, Osabel DM. Equivalent SDOF Models for Estimating Isolation-Layer Energy Dissipation in Base-Isolated Tall Buildings under Strong Winds. Buildings. 2024; 14(2):329
- 3) 佐藤 大樹, 笠井 和彦, 田村 哲郎, 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 2009, 74 巻, 635 号, p. 75-82
- 4) 日本建築学会, 免震構造設計指針, 2013
- 5) 大宮 幸, 北村 春幸, 長周期地震動対策に備えた直近の免震建物の構造特性に関する調査・分析, 日本建築学会技術報告集, 2019, 25 巻, 59 号, p. 61-66
- 6) 銭 曉鑫, 佐藤 大樹, 台風シミュレーションに基づく免震層の残留変形評価, 構造工学論文集 B, 2020, 66B 巻, p. 323-329
- 7) José M. Roesset, Robert V. Whitman, Ricardo Dobry, Modal Analysis for Structures with Foundation Interaction, Structures Publication No. 329, 1972