

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	弾性応答におけるスペクトルモーダル法を用いた弾性すべり支承を有する超高層免震建物に作用する組合せ風荷重の評価
Title(English)	Evaluation of combined wind loads acting on a high-rise seismically isolated building with elastic sliding bearings using the spectral modal method in elastic response
著者(和文)	立元拓, 佐藤大樹, 陳引力, 稲井慎介, 桑素彦, 川又哲也, 得能将紀, 丸尾純也, 三須基規
Authors(English)	Taku Tatsumoto, Daiki Sato, Yinli Chen, Shinsuke Inai, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Masaki Tokunou, Junya Maruo, Motoki Misu
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, , pp. 1021-1022
Citation(English)	, 構造II, , pp. 1021-1022
発行日 / Pub. date	2025, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

弾性応答におけるスペクトルモーダル法を用いた  
弾性すべり支承を有する超高層免震建物に作用する組合せ風荷重の評価

正会員	○立元拓*1	同	佐藤大樹*2
同	陳引力*2	同	稲井慎介*3
同	桑素彦*3	同	川又哲也*3
同	得能将紀*3	同	丸尾純也*3
同	三須基規*4		

組合せ風荷重 弾性すべり支承 耐風設計

## 1 はじめに

免震建築物の耐風設計指針 (2023) <sup>1)</sup> (以下、耐風設計指針) では、風方向、風直交方向、ねじり方向の組合せた風荷重を用いて、免震層のランクの評価を行う。特に、免震層が風荷重に対して弾性挙動をする場合 (以下、ランク A) は、建築物荷重指針・同解説 (2015) <sup>2)</sup> (以下、荷重指針) によって時刻歴解析を用いずに風応答の諸元を算出できる。荷重指針では、モーダルパラメータを設定することで、スペクトルモーダル法に基づき風荷重を評価する方法が用いられている。しかし、ランク A であっても高層免震建物において、モーダルパラメータの設定方法については明らかではない <sup>3)</sup>。そこで、本報では、ランク A 時のモーダルパラメータの設定および組合せ風荷重を予測することを目的とし、弾性すべり支承とオイルダンパーを有する超高層免震建物を対象に、スペクトルモーダル法を用いて算出した組合せ風荷重と時刻歴解析による免震層のせん断力を比較する。

## 2 スペクトルモーダル法を用いた風荷重の予測手法

### 2.1 ランク A 時のモーダルパラメータの算出方法

本報で対象とする免震層は天然ゴム系積層ゴム支承 (NRB)、弾性すべり支承 (ESB)、オイルダンパー (OD) で構成される。ランク A 時の免震建物全体の 1 次固有円振動数  ${}_1\omega$ 、1 次固有モード  $\{ {}_1\phi \}$  を次式により算出する。

$$\{ [K] - {}_1\omega^2 [M] \} \cdot \{ {}_1\phi \} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $[K]$ : 全体剛性マトリクス、 $[M]$ : 全体質量マトリクスを表す。

免震建物全体の 1 次減衰定数  ${}_1h$  を、次式より算出する。

$${}_1h = \frac{\sum_{i=0}^N h_i E_i}{\sum_{i=0}^N E_i} \quad (2)$$

ここで、 $h_i$ :  $i$  層目の減衰定数、 $E_i$ :  $i$  層目の弾性ひずみエネルギーを表す。

### 2.2 スペクトルモーダル法を用いた風荷重の算出方法

免震層の応答変位の標準偏差  $\sigma_{InM0}$  は次式で算出される。

$$\begin{aligned} \sigma_{InM0} &= {}_1\phi_0 \sqrt{\int_0^\infty {}_1S_{q0}(f) df} \\ &= {}_1\phi_0 \sqrt{\int_0^\infty \frac{1}{{}_1K^2} |\chi_i(f)|^2 S_F(f) df} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 ${}_1S_{q0}$ : 1 次モーダル変位の PSD,  $S_F(f)$ : 1 次モーダル風力  $\tilde{F}(t)$  の PSD,  ${}_1K$ : モーダル剛性、 $|\chi_i(f)|$ : 機械的アドミッタンスを表す。

したがって、免震層の風直交方向の最大変形  $\delta_{0max}$  時における風荷重  $W_{InML}$  は次式で表される。

$$W_{InML} = \delta_{0max} \cdot k_{01} = \sigma_{InM0} \cdot g_{RLB} \cdot k_{01} \quad (4)$$

ここで、 $g_{RLB}$ : 荷重指針に基づき算出したピークファクター、 $k_{01}$ : 免震層の 1 次剛性を表す。一方、免震層の風方向の風荷重  $W_{InMD}$  は、平均風荷重  $\bar{W}_{InMD}$  と変動風荷重  $W'_{InMD}$  の和として次式で表す。

$$\begin{aligned} W_{InMD} &= \bar{W}_{InMD} + W'_{InMD} \\ &= \sum_1^N \bar{F}_i + \sigma_{InM0} \cdot g_{RLB} \cdot k_{01} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\bar{F}_i$ :  $i$  層目の風方向風外力の平均風力を表す。

### 2.3 最大風荷重の算出方法

図 1 に組合せ風荷重 (赤実線) と免震層のすべり出し荷重  $Q_{0y}$  (黒破線) の関係を示す。最大風荷重  $W_{max}$  は原点から赤実線の各点までの距離  $W_{r1} \sim W_{r4}$  の最大の値となる (式 (6))。

$$W_{max} = \text{Max}(W_{r1}, W_{r2}, W_{r3}, W_{r4}) \quad (6)$$

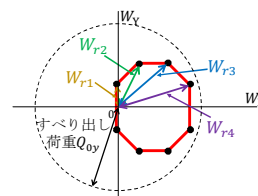


図 1 各組合せ風荷重の原点から距離

## 3 ランク A となる免震層の設計例

### 3.1 対象免震建物の概要

本報では、地上 25 階、高さ  $H = 100$  m、建物幅  $B = 64$  m、建物奥行  $D = 30$  m、アスペクト比  $H/\sqrt{BD} = 2.3$  の超高層免震建物の立体モデルを用いる。図 2 に各建物モデルの全体俯瞰図、表 1 に建物モデルの諸元を示す。

免震層は天然ゴム系積層ゴム支承 (NRB)、弾性すべり支承 (ESB)、オイルダンパー (OD) で構成される。

風外力の風向は  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  の 2 ケースとする。風向  $0^\circ$  では X 方向が風方向、Y 方向が風直交方向であり、風向  $90^\circ$  では X 方向が風直交方向、Y 方向が風方向となる。

Evaluation of combined wind loads acting on a high-rise seismically isolated building with elastic sliding bearings using the spectral modal method in elastic response

TATSUMOTO Taku\*1, SATO Daiki\*2, CHEN Yinli\*2, INAI Shinsuke\*3, KUWA Motohiko\*3, KAWAMATA Tetsuya\*3, TOKUNO Masaki\*3, MARUO Junya\*3, MISU Motoki\*4

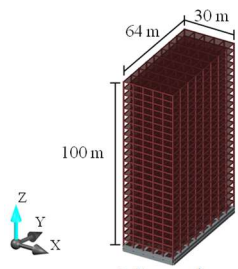


図2 建物モデル

		重量 $M_{ug}$ [kN]	377693
上部構造	固有周期	$T_{ux}$ [s]	2.21
		$T_{uy}$ [s]	2.01
		$T_{uz}$ [s]	2.00
	減衰定数 $h_u$		0.01

### 3.2 免震層の設計例

以下にランク A となる免震層の推定方法の流れを示す。  
Step.1 : NRB, ESB, OD の数および配置を仮定し、長期軸力に基づきすべり出し荷重 $Q_{0y}$ を算出する。

Step.2 : 式 (1) および (2) に基づき、モーダルパラメータを決定する。

Step.3 : モーダルパラメータを用いて、式 (6) より、最大風荷重 $W_{max}$ を算出する。

Step.4 : 算出した最大風荷重 $W_{max}$ がすべり出し荷重 $Q_{0y}$ を上回る場合は、免震層の配置を見直し、OD もしくは ESB の数を増大させる (Step.1 に戻る)。

図3に Step.1 ~ Step.4 より算出した最大風荷重 $W_{max}$ と ESB の数の関係を示す。なお、図中の縦軸の ( ) 内には、 $W_{r1} \sim W_{r4}$  うち最大風荷重 $W_{max}$ となるものを示す。図3から風向 $0^\circ$ の場合、ESBが16個、ODが各方向20個、風向 $90^\circ$ の場合、ESBが4個、ODが各方向10個の免震層において、最大風荷重 $W_{max}$ がすべり出し荷重 $Q_{0y}$ と概ね一致し、ランク A の応答となる限界値であることが推定できる。そのため、それぞれの免震層において組合せ風荷重の精度検証を行う。なお、免震層のモデル名は「ESB(数)OD(各方向の数)」とする。

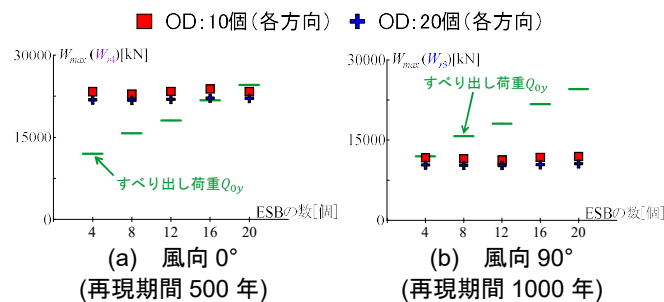


図3 ESB の数と最大風荷重 $W_{max}$ との関係

## 4 時刻歴解析を用いた設計例の検証

### 4.1 風外力概要

風力は風洞実験結果<sup>4)</sup>を用いた。実験データを上部構造の質点数及び基本風速 $U_0 = 36 \text{ m/s}$ での風外力へと変換を行っている。なお、過渡応答の影響を避けるため、各波形の前半に50秒のエンベロープを設け、中間の600秒(10分間)での応答を評価に用いた。

### 4.2 組合せ風荷重の予測精度の検証

図4に免震層のせん断力(X方向: $Q_{0x}$ , Y方向: $Q_{0y}$ )とスペクトルモーダル法に基づく組合せ風荷重の比較を示す。なお、耐風設計指針では、アスペクト比が3未満かつランク A となる場合、より簡便な方法に基づき組合せ(式(7), 以下, 簡便法)による風荷重を評価可能とするため、簡便法による結果(青線)も併せて示している。

$$W_L = \gamma W_D \quad \gamma = 0.35 D/B \text{ かつ } \gamma \geq 0.2 \quad (7)$$

図4より、応答のランクを確認すると、応答にはばらつきがみられるものの、いずれのモデルにおいても免震層の最大せん断力は、概ねすべり出し荷重 $Q_{0y}$ 以下に収まり、ランク A となることが確認できる。また、組合せ風荷重 $W_{InM}$ の予測精度について確認すると、いずれのモデルにおいても、スペクトルモーダル法に基づく組合せ風荷重は時刻歴解析値と概ね一致することが確認できる。また、簡便法に基づく組合せ風荷重は、風直交方向において時刻歴解析値と比べて誤差が大きくなっており、簡便法を用いる場合には注意が必要である。

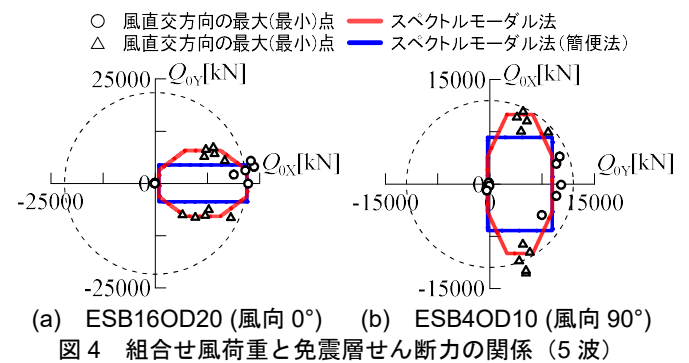


図4 組合せ風荷重と免震層せん断力の関係 (5波)

## 5 まとめ

本報では、弾性すべり支承とオイルダンパーを有する超高層免震建物を対象に応答ランク A 時のモーダルパラメータの設定および組合せ風荷重の予測を行った。本手法を用いることで、ランク A 時の組合せ風荷重を高精度に予測できることを示した。

### 参考文献

- 1) 日本免震構造協会：免震建築物の耐風設計指針 (2023), 2023.3
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説 (2015), 2015
- 3) 立元拓, 佐藤大樹, 陳引力, 稲井慎介, 桑素彦, 川又哲也, 得能将紀, 丸尾純也, 三須基規：弾性すべり支承を有する超高層免震建物に作用する組合せ風荷重の評価, 日本建築学会技術報告集, 第31巻, 第78号, pp.681-686, 2025.6
- 4) 二村夏樹, 佐藤大樹, 稲井慎介, 桑素彦, 川又哲也, 石田琢志, 平井宏幸, 得能将紀, 丸尾純也：高摩擦弾性すべり支承を有する超高層免震建物に対する時刻歴風応答解析を用いたクリープ性を考慮した簡易風応答評価, 日本建築学会技術報告集, 第28巻, 第68号, pp.85-90, 2022.2

\*1 元東京科学大学  
\*2 東京科学大学  
\*3 戸田建設株式会社  
\*4 SWCC 株式会社

\*1 Former Institute of Science Tokyo  
\*2 Institute of Science Tokyo  
\*3 TODA Corporation  
\*4 SWCC Corporation