

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	弾性すべり支承を有する超高層免震建物を対象とした弾性応答におけるスペクトルモーダル法による組合せ風荷重の予測 その3 免震層の設計
Title(English)	Prediction of combined wind loads using the spectral modal method for elastic response of a high-rise seismically isolated building with elastic sliding bearings Part 3 Design of seismic isolation layer
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 Tokuno, Junya Maruo, Motoki Misu
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 433-436
Citation(English)	, , , pp. 433-436
発行日 / Pub. date	2025, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

弾性すべり支承を有する超高層免震建物を対象とした弾性応答における
スペクトルモーダル法による組合せ風荷重の予測

その 3 免震層の設計

構造－振動

正会員 ○ 立元拓^{*1}

正会員 佐藤大樹^{*2}

〃 陳引力^{*3}

〃 稲井慎介^{*4}

組合せ風荷重 スペクトルモーダル法

〃 桑素彦^{*5}

〃 川又哲也^{*5}

弾性すべり支承 耐風設計

〃 得能将紀^{*6}

〃 丸尾純也^{*4}

〃 三須基規^{*6}

1 はじめに

本報その 2 では、スペクトルモーダル法に基づく組合せ風荷重の予測手法の精度検証を行い、ランク A 応答時の組合せ風荷重を概ね精度よく予測できることを示した。本報その 3 では、スペクトルモーダル法に基づき予測した組合せ風荷重を用いて、ランク A および最大風荷重がすべり出し荷重を上回る免震層の設計を行う。また、設計した免震層でのせん断力の時刻解析結果を確認することで、応答を予測した免震層の設計が可能であることを確認する。

2 風外力の概要

風外力はその 1 と同様に風洞実験結果¹²⁾を用い、風方向、風直交方向、ねじり方向の 3 方向同時入力とする。風向 α は建物モデル 4.2 の場合は 0° の 1 ケース、建物モデル 2.3 の場合は 0° 、 90° の 2 ケースとし、風向 0° においては X 方向が風方向、Y 方向が風直交方向であり、風向 90° においては X 方向が風直交方向、Y 方向が風方向となる。風洞実験により得られた時刻歴データを建物モデルの高さ、基準風速 $U_0 = 36 \text{ m/s}$ での再現期間 50~1000 年の風外力へと変換を行った。(建物モデル 4.2 の場合、再現期間 50 年(設計風速 $U_H = 43.1 \text{ m/s}$)、建物モデル 2.3_0° の場合、再現期間 500 年(設計風速 $U_H = 50.4 \text{ m/s}$)、建物モデル 2.3_90° の場合、再現期間 1000 年(設計風速 $U_H = 52.6 \text{ m/s}$)とした。) 1 組につき 0.05 秒刻みの 650 秒とし、5 組取り出した。さらに、本報では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、その後の 600 秒(10 分間)での応答を評価に用いた。

3 ランク A の応答となる免震層の推定

図 1 に各建物モデルにおける免震層の配置と風外力作用時の最大ベースシア係数の関係を示す。また、比較とし

てそれぞれの免震層配置での弾性すべり支承がすべり出す際のベースシア係数を併記している。

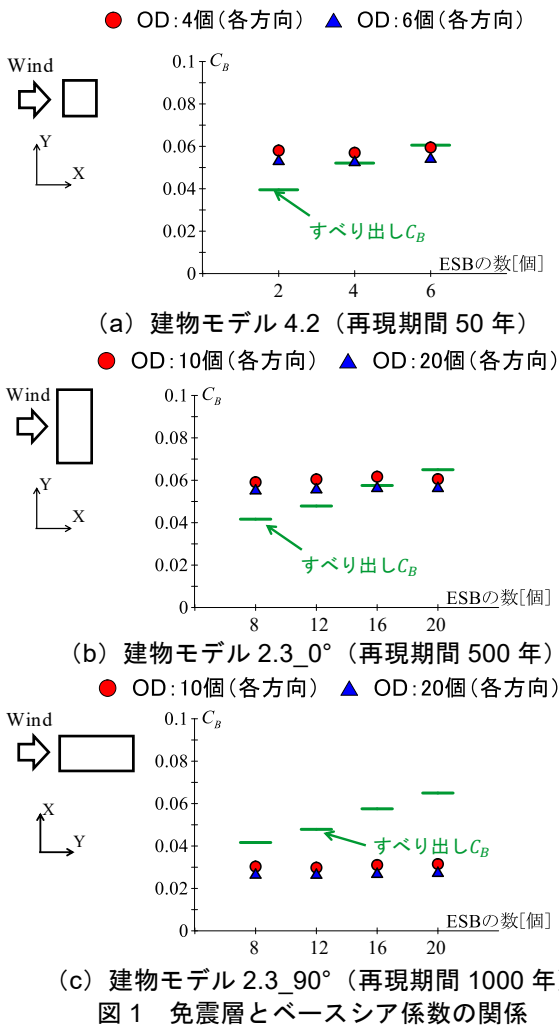


図 1 免震層とベースシア係数の関係

Prediction of combined wind loads using the spectral modal method for elastic response of a high-rise seismically isolated building with elastic sliding bearings
Part 3 Design of seismic isolation layer

Taku Tatsumoto, Daiki Sato, Yinli Chen, Shinsuke Inai, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Masaki Tokuno, Junya Maruo, Motoki Misu

図 1 から建物モデル 4.2 の場合、ESB が 6 個、OD が 6 個の免震層で最大ベースシア係数がすべり出しベースシア係数を下回るため、ランク A の応答となることが予測される。また、ESB が 4 個、OD が 4 個の免震層で最大ベースシア係数がすべり出しベースシア係数を上回るため、最大風荷重がすべり出し荷重を上回ることが予測される。同様に、建物モデル 2.3_0° の場合、ESB が 20 個、OD が 10 個の免震層でランク A、ESB が 16 個、OD が 10 個の免震層で最大風荷重がすべり出し荷重を上回る応答となることが予測される。建物モデル 2.3_90° の場合、ESB が 8 個、OD が 10 個の免震層でランク A の応答となることが予測される。そのため、これらの免震層を用いて、3 方向同時入力による時刻歴解析を行う。

4 解析モデルの概要

解析に用いた建物モデルの上部構造については、本報その 1 に示した通りである。3 章で推定した各モデルの免震層の配置を図 2 に示す。表 1 に各モデルのせん断力係数 α_s 、 α_D 、免震層の固有周期 T_b の値を示す。各免震層のモデル名は「S(α_s)D(α_D)」とする。

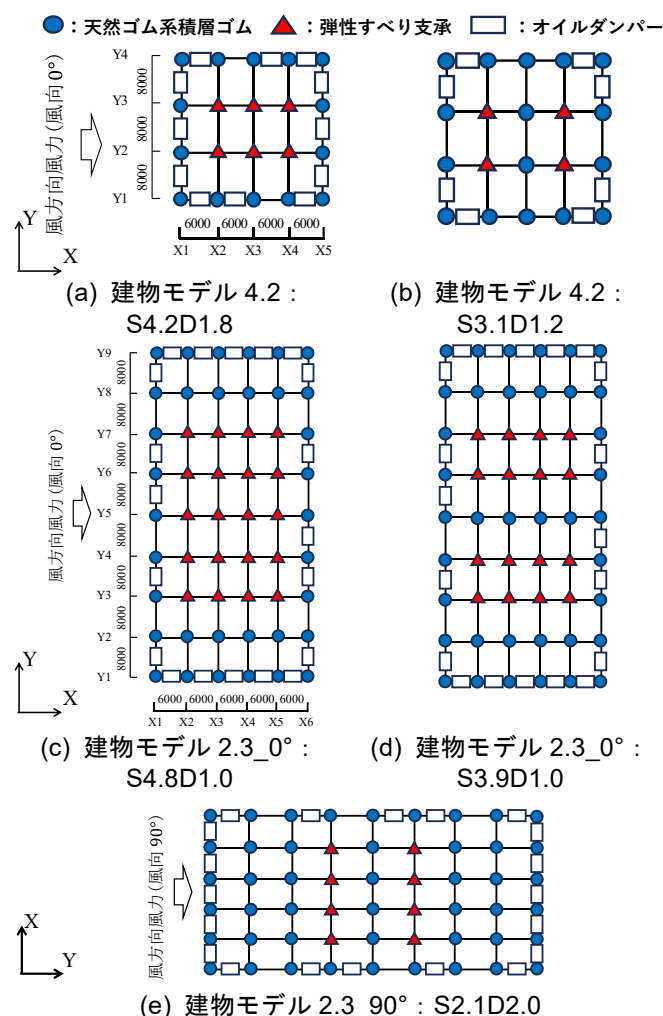


図 2 免震層配置図

表 1 各モデル諸元

建物モデル	免震層	α_s ($\times 10^{-2}$)	α_D ($\times 10^{-2}$)	T_b [s]
4.2	S4.2D1.8	4.2	1.8	4.77
	S3.1D1.2	3.1	1.2	4.46
2.3_0°	S4.8D1.0	4.8	1.0	5.40
	S3.9D1.0	3.9	1.0	5.11
2.3_90°	S2.1D2.0	2.1	2.0	4.65

5 各モデルの組み合わせ風荷重の評価

図 3～5 に時刻歴解析において 3 方向の風外力を加えた際の各方向の免震層のせん断力 (X 方向: Q_{0x} , Y 方向: Q_{0y}) の最大値、最小値をプロットしたもの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。プロットは○が風方向の最大または最小となる点、△が風直交方向の最大または最小となる点を表す。また、図中の破線は免震層のすべり出し荷重を示しており、0 と風方向荷重の平均 W_{mean} を中心とした二つの円である。図 3 より、建物モデル 4.2 の S4.2D1.8 の場合、5 波の応答は、いずれも 0 中心とした円に収まり、ランク A の応答であることが確認できる。また、建物モデル 4.2 の S3.1D1.2 の場合、ほとんどの波において 0 中心とした円を超え、最大風荷重がすべり出し荷重を上回ることが確認できる。図 4 より、建物モデル 2.3_0° の S4.8D1.0 の場合、5 波のうち 2 波を除いて応答は 0 中心とした円に収まり、ランク A の応答であることが確認できる。また、建物モデル 2.3_0° の S3.9D1.0 の場合、ほとんどの波において最大風荷重がすべり出し荷重を上回ることが確認できる。図 5 より、建物モデル 2.3_90° の S2.1D2.0 の場合、5 波の応答は、いずれも 0 中心とした円に収まり、ランク A の応答であることが確認できる。

表 2 に各モデルの免震層の最大せん断力および最大変位を示す。なお、最大せん断力および最大変位はいずれも各波の応答の原点からの距離が最大となる値の 5 波のアンサンブル平均値である。表 2 から、ランク A の応答が予測される建物モデル 4.2 の S4.2D1.8、建物モデル 2.3_0° の S4.8D1.0、建物モデル 2.3_90° の S2.1D2.0 の最大せん断力および最大変位はすべり出し荷重およびすべり出し変位を下回り、ランク A の応答であることが確認できる。また、最大風荷重がすべり出し荷重を上回ることが予測される建物モデル 4.2 の S3.1D1.2、建物モデル 2.3_0° の S3.9D1.0 の最大せん断力および最大変位はすべり出し荷重およびすべり出し変位を上回ることが確認できる。以上のことから、各モデルの予測と解析結果は一致しており、スペクトルモーダル法に基づいた組合せ風荷重を用いて、ランク A および最大風荷重がすべり出し荷重を上回る場合の免震層を予測して設計することが可能であることが確認できる。

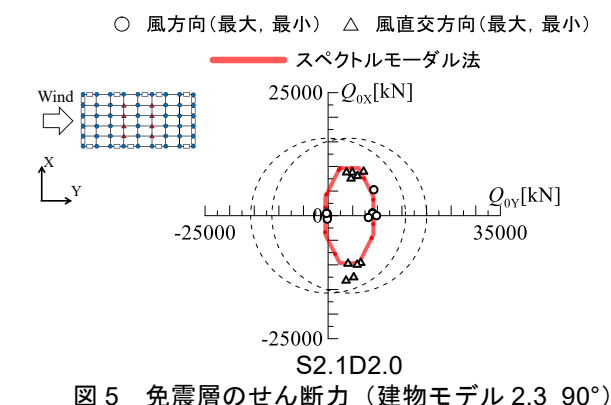
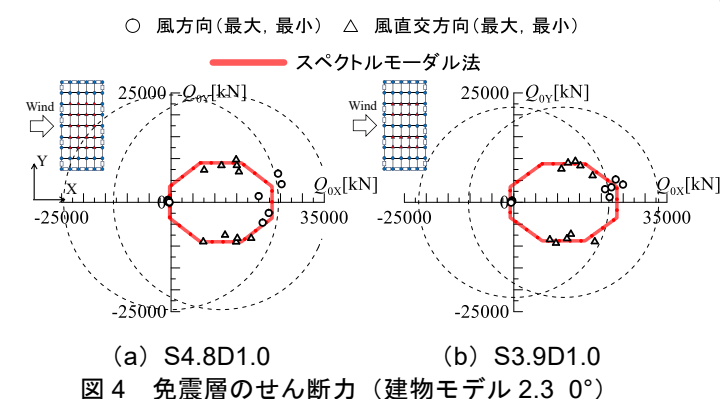
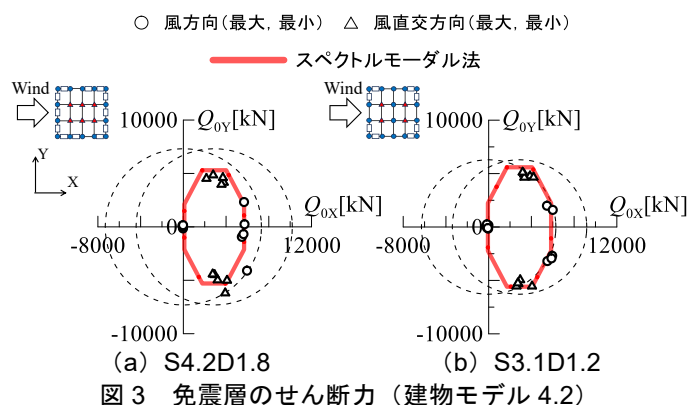


表2 免震層の応答

建物 モデル	免震層	すべり 出し 荷重 [kN]	すべり 出し 変位 [cm]	最大 せん 断力 [kN]	最大 変位 [cm]
4.2	S4.2D1.8	7314	7.46	6397	6.70
	S3.1D1.2	6296	8.21	6567	8.75
2.3_0°	S4.8D1.0	24548	8.04	22971	7.96
	S3.9D2.0	21741	8.28	22941	10.3
2.3_90°	S2.1D2.0	15735	8.89	13396	7.53

6 まとめ

本報では、弾性すべり支承を有する超高層免震建物を対象とし、スペクトルモーダル法を用いた免震層が弾性範囲に留まる範囲（ランク A）における組合せ風荷重の予測手

法の提案を行った。また、予測した組合せ風荷重と時刻歴応答解析結果を比較することで本予測手法の精度検証を行った。さらに、予測した組合せ風荷重から、ランク A および最大風荷重がすべり出し荷重を上回る場合の免震層の設計を行い、時刻歴解析結果を確認することで応答を予測した免震層の設計が可能であることを確認した。

- (1) 免震層弾性時の等価減衰定数、等価固有周期、等価振動モードを用いたスペクトルモーダル法に基づき、ランク A 応答時の組合せ風荷重の予測手法を示した。いずれのモデルにおいても、予測した組合せ風荷重は時刻歴解析結果に対して、概ね誤差 10%程度であった。
- (2) スペクトルモーダル法に基づき算出した風荷重からランク A および最大風荷重がすべり出し荷重を上回る場合の免震層の設計を行った。得られた応答には、ばらつきがあるものの各モデルの最大せん断力および最大変位の 5 波のアンサンブル平均値とすべり出し荷重およびすべり出し変位を比較すると、いずれのモデルにおいても応答と予測は一致した。そのため、スペクトルモーダル法に基づき予測した組合せ風荷重を用いて、ランク A 時の免震層を設計することが可能である。

謝辞

本報告は、戸田建設株式会社、SWCC 株式会社および東京科学大学佐藤研究室の共同研究の成果の一部をまとめたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 免震建築物の耐風設計指針 (2023), 日本免震構造協会, 2023.3
- 2) 吉江慶祐 他: 時刻歴風応答解析におけるアンサンブル平均のばらつき, 日本建築学会大会学術講演梗概, 構造-I, pp.233-234, 2005.7
- 3) 平井宏幸 他: 風洞実験より得られた層風力のサンプル数が高層建築物の時刻歴風応答評価に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 39 号, pp.489-494, 2012.6
- 4) 佐藤大樹 他: アンサンブル平均数が風応答評価に及ぼす影響 その 1 既往論文に基づくアンサンブル平均数の調査, 日本建築学会大会学術講演梗概, 構造-I, pp.259-260, 2016.8
- 5) 齋藤元紀 他: 風力のサンプル数が超高層免震建築物の弾塑性風応答評価に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, 第 23 巻, 第 53 号, pp.65-70, 2017.2
- 6) 建築物荷重指針・同解説 (2015), 日本建築学会, 2015.2
- 7) 立元拓 他: 弾性すべり支承を有する超高層免震建物における組合せ荷重によるせん断力の評価 風工学シンポジウム講演梗概集第 28 巻, pp.159-166, 2024.12
- 8) 立元拓 他: 弾性すべり支承を有する超高層免震建物を対象とした荷重指針に基づく組合せ荷重の評価, 日本

建築学会大会学術講演梗概集，構造-II，pp.725-726，2024.7

- 9) 二村夏樹 他：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
- 10) 免震部材標準品リスト -2009-，日本免震構造協会，2009.10
- 11) 佐藤大樹 他：低速度領域における摩擦係数の変化を考慮した弾性すべり支承の解析モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第89巻，第821号，pp.719-726，2024.7
- 12) 立元拓 他：荷重指針に基づく風応答時におけるベースシア係数の評価 その1 風洞実験気流および風力特性に関する検討，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.473-476，2024.3
- 13) 二村夏樹 他：等価線形化によるスペクトルモデル法を用いた超高層免震建物の弾塑性風応答予測法，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造-II，pp.709-710，2022.7
- 14) 笠井和彦 他：等価線形化手法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法，日本建築学会構造系論文集，第68

巻，第571号，pp.53-62，2003.9

- 15) 笠井和彦 他：粘性減衰・履歴減衰を併用する構造における動的特性と地震最大応答予測法，日本建築学会構造系論文集，第70巻，第591号，pp.43-51，2005.5

附録 A 免震層の最大速度

表 A1 に各モデルの免震層の最大速度を示す。表 A1 より，いずれも建物モデルにおいても免震層の最大速度はオイルダンパーのリリーフ速度32[cm/s]を下回ることが確認できる。

附録 B 免震層のせん断力の最大値および最小値について

図 B1 に3方向同時入力の時刻歴解析(THA) ($\xi_u = 0.01$) による重心位置での免震層のせん断力(1波，継続時間600秒)および各方向の最大値，最小値を示す。また比較として，荷重指針に基づく組合せ風荷重 W ($\xi_{AIJ} = 0.01, 0.02, 0.1$) およびスペクトルモデル法に基づく組合せ風荷重を併記する。図 B1 における時刻歴解析値(THA)の各方向の最大値および最小値が本報その2における図6の最大(最小)点[1波]と対応する。

表 A1 免震層の最大速度

建物モデル	設計風速 U_H [m/s]	免震層の最大速度[cm/s]							
		S3.1D0.6		S3.1D1.2		S4.2D0.6		S4.2D1.2	
		X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
4.2	35	3.87	7.91	2.90	6.35	2.72	6.03	2.23	4.90
2.3_0°	40	3.41	2.89	2.61	2.12	3.07	2.38	2.37	1.82
2.3_90°	60	10.4	4.78	8.33	3.56	8.70	4.25	7.05	3.37

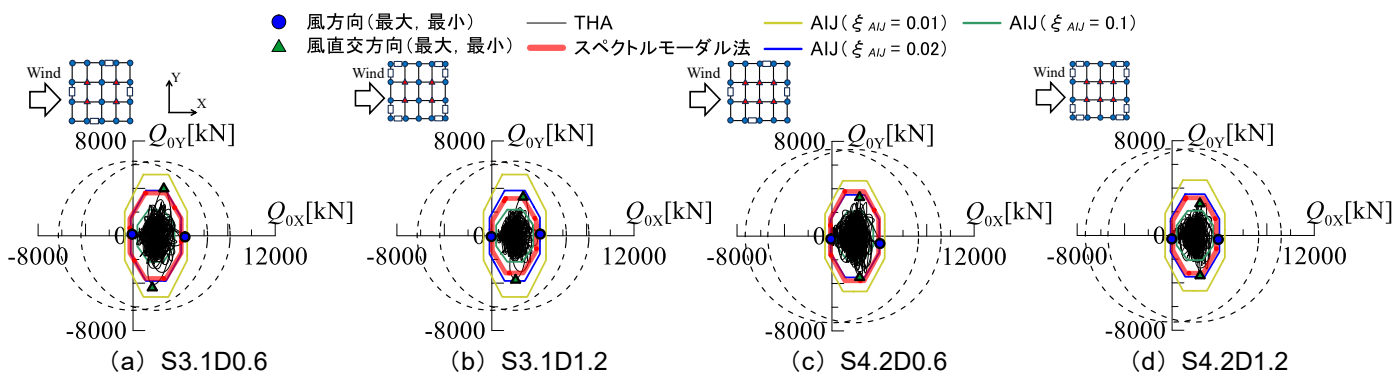


図 B1 免震層のせん断力 (建物モデル 4.2, $U_H = 35$ m/s, 1 波)

*1 東京科学大学環境・社会理工学院 大学院生

*2 東京科学大学 総合研究院 准教授・博士 (工学)

*3 東京科学大学 総合研究院 助教・博士 (学術)

*4 戸田建設株式会社 技術研究所

*5 戸田建設株式会社 構造設計部

*6 SWCC 株式会社

Grad.Student, School of Environment and Society, Institute of Science Tokyo

Associate Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.

Assistant Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Ph.D.

Technology Research Institute, TODA Corporation

Structural Design Department, TODA Corporation

SWCC Corporation