

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	等価線形化によるスペクトルモーダル法を用いた超高層免震建物の弾塑性風応答予測法
Title(English)	Elasto-plastic wind response prediction for high-rise baseisolated building using spectral modal method based on equivalent linearization
著者(和文)	二村夏樹, 佐藤大樹, 桑素彦, 川又哲也, 平井宏幸, 得能将紀
Authors(English)	Natsuki Futamura, Daiki Sato, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Hiroyuki Hirai, Masaki Tokunou
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 709-710
Citation(English)	, , , pp. 709-710
発行日 / Pub. date	2022, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

等価線形化によるスペクトルモーダル法を用いた超高層免震建物の弾塑性風応答予測法

正会員	○二村夏樹*1	同	佐藤大樹*2
同	桑素彦*3	同	川又哲也*3
同	平井宏幸*3	同	得能将紀*3

超高層免震建物 予測法 等価線形

1. はじめに

近年超高層建物にも免震構造が採用されるようになってきている。しかし、免震構造は長周期側に卓越したエネルギーをもつ風外力に対して応答が増大する可能性がある。そのため応答が塑性範囲に及ぶことが懸念されるが、建物の弾性的挙動を前提とする現行の耐風設計では、免震層が弾性限界を超える場合には時刻歴風応答解析が必要であり¹⁾、実用的な手法が望まれる。建築物荷重指針・同解説¹⁾(以下、荷重指針)による手法を準用した予測法として、等価線形化によるスペクトルモーダル法を用いることが考えられる。しかし、この際の免震建物の構造特性(減衰定数など)の設定について明言しているものは殆どみられず、荷重指針においても、免震層の規準化振動変位を用いたモード補正が示されているものの免震建物の周期や減衰定数の設定については言及されていない¹⁾。よって免震建物の構造特性の実用的な算出方法を示すことが望まれる。また免震層のパラメータによる予測値の差異を視覚的に把握することは設計時において非常に有用である。本報では、等価線形化によるスペクトルモーダル法を用いた弾塑性風応答予測法の提案を目的とする。

2. 検討モデルおよび風外力概要²⁾

上部構造縮約 10 質点、免震層 1 質点の 11 質点系等価せん断モデルを用いる(図 1)。上部構造の 1 次固有周期 $1T_u = 3.0$ s、建築密度は 180 kg/m^3 とし、質量は高さ方向に一様と想定した。上部構造の内部粘性減衰は $1T_u$ に対して $h_u = 2\%$ の初期剛性

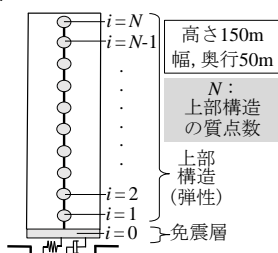


図1 検討モデル

比例型とする。免震層は天然ゴム系積層ゴム支承(NRB)と高摩擦弾性すべり支承(ESB)とオイルダンパー(OD)で構成されるとする(図2)。なお、図中の K_{ESB} , δ_{ESBy} , Q_{ESB0} : ESBの1次剛性、すべり出し変位および荷重、 C_v : ODの1次減衰係数を表す。免震層の面密度 $\rho_0 = 3644 \text{ kg/m}^2$ とし、免震周期 $T_0 = 6.1$ s とする²⁾。ESBのすべり出しせん断力係数 α_s (0.01~0.05)、ODのリリーフせん断力係数 α_D (0~0.05)の合計が0.01~0.05となる計15通りの組み合わせを作成した。なお、 α_s , α_D は0.01刻みとする。

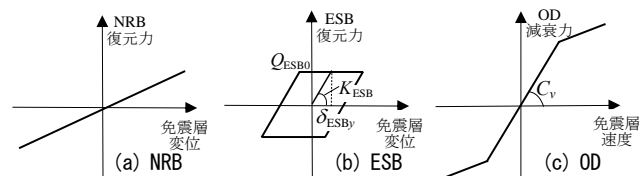


図2 各免震部材の復元力特性および減衰力特性

風洞実験(地表面粗度区分Ⅲ¹⁾)より得られた風外力を用いる²⁾。実験データを検討モデルの高さ、上部構造の質点数および基本風速 $U_0 = 36 \text{ m/s}$ での再現期間500年風外力へと変換を行っている¹⁾。1波につき0.05秒刻み14000ステップ(700s)とし9波取り出している。なお、解析時の過渡応答の影響を避けるため各波形の前後に50sのエンベロープを設け、中間の600sでの応答を評価に用いる。また9波のアンサンブル平均により評価する。図3に頂部層風力のパワースペクトル密度(PSD) S_{F10} を示す。

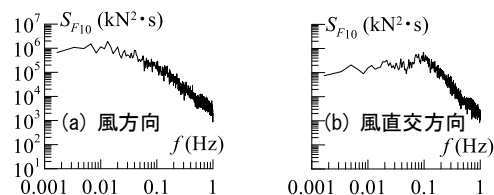


図3 頂部層風力のパワースペクトル密度

3. 免震層の最大風荷重の予測手順

風方向については、風外力の平均成分に対する応答と変動成分に対する応答に分離して予測を行う。分離した風外力が作用したときの荷重の足し合わせにより全成分に対する最大荷重を概ね評価できることを確認している²⁾。

Step I. \bar{P}_0 の算出(風方向)

免震層の平均風荷重 \bar{P}_0 を上部構造 i 層目の平均風外力 \bar{F}_i との力の釣合から、式(1)より算出する。

$$\bar{P}_0 = \sum_{i=1}^N \bar{F}_i \quad (1)$$

Step II-0. $\hat{\delta}'_0$ の設定

免震層の最大変動変位 $\hat{\delta}'_0$ を適宜設定する。

Step II-1. k_{eq0} の算出

免震層の等価剛性 k_{eq0} を式(2)より算出する。

$$k_{eq0} = \begin{cases} k_{01} & (\hat{\delta}'_0 \leq \delta_{0y}) \\ \{Q_{0y} + k_{02}(\hat{\delta}'_0 - \delta_{0y})\} / \hat{\delta}'_0 & (\hat{\delta}'_0 > \delta_{0y}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 k_{01} , k_{02} : 免震層の1次剛性および2次剛性、 Q_{0y} , δ_{0y} : 免震層のすべり出し荷重および変位を表す。

Step II-2. if_{eq} , $\{1\phi_{eq}\}$ の算出

免震建物全体の1次等価固有振動数 ${}_1\omega_{eq}$ 、1次等価固有モード $\{{}_1\phi_{eq}\}$ を式(3)より算出する。

$$\{[K_{eq}] - {}_1\omega_{eq}^2[M]\} \{{}_1\phi_{eq}\} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $[K_{eq}]$ 、 $[M]$ ：全体等価剛性および質量マトリクスを表す。 ${}_1\omega_{eq}$ を用いて1次等価固有振動数 ${}_1f_{eq}$ を算出する。

Step II-3. ${}_1h_{eq}$ の算出

建物全体の1次等価減衰定数 ${}_1h_{eq}$ を式(4)より算出する。

$${}_1h_{eq} = \frac{\sum_{i=0}^N h_{eqi} E_{eqi}}{\sum_{i=0}^N E_{eqi}} \quad (4)$$

ここで、 h_{eqi} ： i 層目の等価減衰定数を表す。また E_{eqi} ： i 層目の弾性ひずみエネルギーを表し、式(5)より算出される。

$$E_{eqi} = \begin{cases} (1/2) k_i \delta_{eqi}^2 & (1 \leq i \leq N) \\ (1/2) k_{eq0} \delta'_{i0}{}^2 & (i=0) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 δ_{eqi} ： i 層目の層間変位を表す。免震層の等価減衰定数 h_{eq0} は、風応答時の各サイクルの振幅 δ'_{i0} が0から最大振幅 δ'_0 まで変化することを考慮し履歴減衰および粘性減衰を平均化し、式(6)より算出される³⁾。

$$h_{eq0} = \frac{1}{\delta'_0} \int_0^{\delta'_0} \frac{\Delta E_{eq0ESB}(\delta'_{i0}) + \Delta E_{eq0OD}(\delta'_{i0})}{4\pi E_{eq0}(\delta'_{i0})} d\delta'_{i0} = h_{eq0ESB} + h_{eq0OD} \quad (6)$$

ここで、 ΔE_{eq0ESB} 、 ΔE_{eq0OD} ：ESB、ODのサイクルエネルギーを表す。ESBによる免震層の等価減衰定数 h_{eq0ESB} は、免震層の2次剛性比 β_0 を用いて式(7)より算出される³⁾。

$$h_{eq0ESB} = \begin{cases} 0 & (\mu'_0 \leq 1) \\ \frac{2}{\pi \mu'_0 \beta_0} \ln \frac{\beta_0(\mu'_0 - 1) + 1}{\mu'_0 \beta_0} & (\mu'_0 > 1) \end{cases} \quad (7)$$

ここで μ'_0 ：最大塑性率(δ'_0 / δ_{y0})を表す。ODによる免震層の等価減衰定数 h_{eq0OD} は式(8)、(9)より算出される³⁾。

$$h_{eq0OD} = \frac{C_v {}_1\omega_{eq}}{2\delta'_0} \int_0^{\delta'_0} \frac{1}{k_{eq0}(\delta'_{i0})} d\delta'_{i0} = \begin{cases} \frac{C_v {}_1\omega_{eq}}{2k_{01}} & (\mu'_0 \leq 1) \\ \frac{C_v {}_1\omega_{eq}}{2k_{01}\mu'_0} + \frac{C_v {}_1\omega_{eq}}{2k_{02}\mu'_0} \left(\mu'_0 - 1 + a \ln \frac{1+a}{\mu'_0+a} \right) & (\mu'_0 > 1) \end{cases} \quad (8)$$

$$a = (1/\beta_0) - 1 \quad (9)$$

上部構造の減衰定数 h_{eqi} は、式(10)より算出される。

$$h_{eqi} = \Delta E_{eqi} / 4\pi E_{eqi} \quad (1 \leq i \leq N) \quad (10)$$

ここで、 ΔE_{eqi} ： i 層目のサイクルエネルギーを表し、 i 層目の剛性 k_i を用いて式(11)より算出される。

$$\Delta E_{eqi} = 2\pi h_u k_i \delta_{eqi} \quad (1 \leq i \leq N) \quad (11)$$

Step II-4. ${}_1\sigma_{eq0}$ 、 ${}_1g_{eq0}$ 、 \hat{P}^1_{eq0} の算出

免震層変位の標準偏差 ${}_1\sigma_{eq0}$ を式(12)より算出する。

$${}_1\sigma_{eq0} = \sqrt{\int_0^\infty {}_1S_{eq0}(f) df} \quad (12)$$

ここで、 ${}_1S_{eq0}(f)$ ：免震層の変動変位 PSD を表し、式(13)より算出される。

$${}_1S_{eq0}(f) = |{}_1H_{eq}(f)|^2 {}_1S_{F_{eq}}(f) {}_1\phi_{eq0}^2 \quad (13)$$

ここで、 $|{}_1H_{eq}(f)|$ ：力学的アドミッタンス、 ${}_1S_{F_{eq}}(f)$ ：1次モード風力の PSD を表す。 ${}_1f_{eq}$ を用いて荷重指針¹⁾を準用し、免震層のピークファクター ${}_1g_{eq0}$ を式(14)より算出する。

$${}_1g_{eq0} = \{2 \ln(600 {}_1f_{eq}) + 1.2\}^{0.5} \quad (14)$$

免震層の最大変動荷重 \hat{P}^1_{eq0} を式(15)より算出する。

$$\hat{P}^1_{eq0} = k_{eq0} {}_1g_{eq0} {}_1\sigma_{eq0} \quad (15)$$

$\hat{\delta}'_0$ と \hat{P}^1_{eq0} の関係をスケルトンカーブ上にプロットし、適宜 Step II-0に戻り、別の $\hat{\delta}'_0$ を設定し同様の計算を行う。

Step II-5. $\hat{P}^1_{eq0,SMA}$ の算出

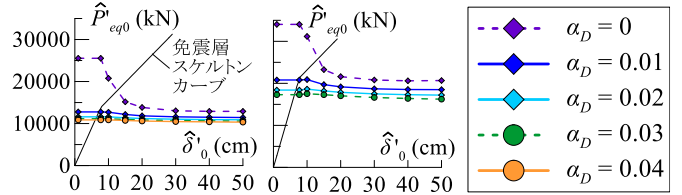
プロットと免震層のスケルトンカーブが交わる点を免震層の最大変動変位の予測値 $\hat{P}^1_{eq0,SMA}$ として算出する。

Step III. $\hat{P}_{0,SMA}$ の算出 (風方向)

\bar{P}_0 と $\hat{P}^1_{eq0,SMA}$ を足し合わせることで、全成分の免震層の最大変位の予測値 $\hat{P}_{0,SMA}$ を算出する。

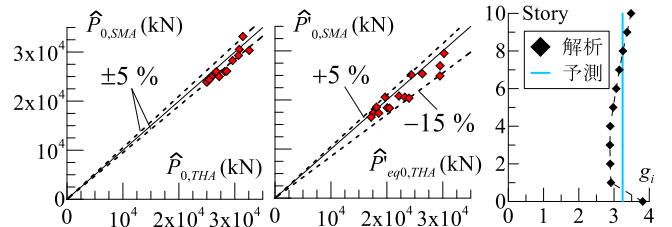
4. 予測結果および予測精度の検証

図4に変動成分の予測結果例、図5に免震層の最大風荷重の予測精度を示す。図5より風方向は概ね誤差5%以内、風直交方向は誤差15%以内で予測可能である。過小評価の一因として、解析結果の免震層のピークファクターは上部構造に対して大きいケースがみられるが(図6)、予測では各層のピークファクター g_i が一定と仮定して ${}_1f_{eq}$ を用いている(式(14))ことが挙げられる。



(a) 風方向 $\alpha_S = 0.01$ (b) 風直交方向 $\alpha_S = 0.02$

図4 変動成分の予測結果例



(a) 風方向全成分 (b) 風直交方向

図5 免震層の最大風荷重の予測精度

図6 g_i 例 (風直交方向 S1D0)

5. おわりに

本報では、弾塑性風応答予測法を提案し、本検討モデルにおいては精度良く予測できることを確認した。予測法の適用範囲について今後検討していく予定である。

謝辞

本報告は、戸田建設株式会社、東京工業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。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建築物荷重指針・同解説 (2015), 日本建築学会, 2015.2
- 2) 二村夏樹, 他 8 名: 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 68 号, pp. 85-90, 2022.2
- 3) 二村夏樹, 他 5 名: 高摩擦弾性すべり支承を有する超高層免震建物の振動のランダム性を考慮した弾塑性風応答予測, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 317-320, 2022.3

*1 戸田建設株式会社 (元東京工業大学)

*2 東京工業大学

*3 戸田建設株式会社

*1 TODA Corporation (formerly Tokyo Institute of Technology)

*2 Tokyo Institute of Technology

*3 TODA Corporation