

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	高層免震建物の風応答を対象とした弾塑性1質点系モデルの作成手法
Title(English)	Modeling method of SDOF models based on wind responses of base-isolated tall buildings
著者(和文)	銭曉鑫, 佐藤大樹
Authors(English)	Xiaoxin Qian, Daiki Sato
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 649-650
Citation(English)	, , , pp. 649-650
発行日 / Pub. date	2021, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

高層免震建物の風応答を対象とした弾塑性 1 質点系モデルの作成手法

正会員 ○銭曉鑫*
同 佐藤大樹**免震建物 1 質点系モデル 変動風力
エネルギー入力 弾塑性応答

1 はじめに

既往研究では、吉江ら^{1,2)}はエネルギーの釣合に基づくエネルギー入力の予測を通じて、弾塑性 1 質点系モデルの風応答を予測した。しかし、高層免震建物のような多質点系モデルの風応答を予測する場合では、1 質点系を用いて多質点系へ拡張する作業が必要となる。そこで本報では、多質点系モデルから弾塑性 1 質点系モデルの作成手法を示し、時刻歴応答解析によりその妥当性を検討する。

2 11 質点系モデルとその風力

対象建物は高層免震建物とし、上部構造は高さ $H=100$ m、幅 $B=25$ m、奥行 $D=25$ m、密度 $\rho_u=250$ kg/m³、上部構造の 1 次固有周期 $T_u=2.5$ s、減衰定数 $\xi_u=0.02, 0.05, 0.10$ (3 種)とする。なお、上部構造の 1 次固有モードは直線モードと仮定した。免震層は面密度 $\rho_b=3644$ kg/m²、免震周期 $T_b=4, 6$ s (2 種)、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_{dy}=0.01\sim0.04$ (4 種)、降伏変位 $x_{by}=2.8$ cm とする。上述の対象建物を 11 質点系せん断型 (上部構造 10 質点+免震層 1 質点) にモデル化する。

対象建物の頂部平均風速は $U_H=50.41$ m/s (基本風速 36 m/s、再現期間 500 年、地表面粗度区分Ⅲとして換算³⁾)とする。本報では、風直交方向の風力のみを検討する。上部構造 1~10 層の風力は、風洞実験の結果⁴⁾より換算した 10 分間風力を 40 波作成している。ただし、免震層の風力は 0 とする。なお、解析における過度応答を避けるために、作成した風力波形の前後に 50 秒間のエンベロープを設けた。

3 1 質点系モデルとその風力

11 質点系モデルの固有値解析により、Fig. 1 に示した 1 質点系モデル (1 次モード) の質量 ${}_1m$ 、1 次剛性 ${}_1k_1$ と 2 次剛性 ${}_1k_2$ はそれぞれ次式で求められる。

$${}_1m = \{\phi\}^T [M] \{\phi\} \quad (1) \quad [M] = \begin{bmatrix} m_b & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_{u10} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}_1k_1 = \{\phi\}^T [{}^eK] \{\phi\} \quad (3) \quad [{}^eK] = \begin{bmatrix} k_{b1} + k_{u1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{u10} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}_1k_2 = \{\phi\}^T [{}^pK] \{\phi\} \quad (5) \quad [{}^pK] = \begin{bmatrix} k_{b2} + k_{u1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{u10} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $[M]$: 免震層の質量 m_b と上部構造 1~10 層の質量 $m_{u1}\sim m_{u10}$ を合わせた質量マトリクス、 $\{\phi\}$: 免震層の 1 次剛性 k_{b1} と上部構造の剛性 $k_{u1}\sim k_{u10}$ を合わせた剛性マトリクス $[{}^eK]$ による 1 次固有モード、 $\{\phi\}$: 免震層の 2 次剛

性 k_{b2} と上部構造の剛性を合わせた剛性マトリクス $[{}^pK]$ による 1 次固有モードを表す。

Modal analysis により、11 質点系モデルにおける免震層の降伏変位 x_{by} は次式で表される。

$$x_{by} = \sum_{s=1}^N s x_y \cdot {}^e\phi_b \quad (7)$$

ここで、 $s x_y$: s 次モードの降伏変位、 ${}^e\phi_b$: 剛性マトリクス $[{}^eK]$ による s 次固有モードを表す。

上式より、1 質点系モデルの降伏変位 ${}_1x_y$ は次式で表される。

$${}_1x_y = \frac{x_{by}}{{}^e\phi_b} \left(1 - \sum_{s=2}^N s x_y \cdot {}^e\phi_b / {}^e\phi_b \right) \quad (8)$$

上式において、 $()$ 内の高次モードの影響の代わりに、補正係数 γ を用いると、 ${}_1x_y$ は次式で近似できる。

$${}_1x_y \approx \gamma \frac{x_{by}}{{}^e\phi_b} \quad (9)$$

ここで、高次モードの影響を無視する場合では、 $\gamma=1.0$ となる。高次モードの影響を考慮する場合では、式(8)から分かるように、 $\gamma<1.0$ となる。

以上により求めた 1 質点系モデルの 1 次剛性 ${}_1k_1$ 、2 次剛性 ${}_1k_2$ と降伏変位 ${}_1x_y$ (ここでは例として $\gamma=1.0, 0.7$)を Fig. 2 に示す。ここで、 ${}_1x$ 、 ${}_1Q$: 1 質点系モデルの応答変位とせん断力を表す。

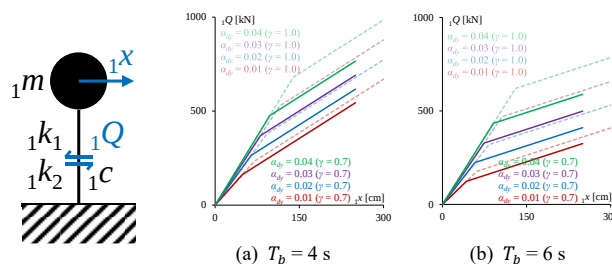


Fig. 1 SDOF model Fig. 2 ${}_1k_1$, ${}_1k_2$ and ${}_1x_y$ (e.g. $\gamma=1.0, 0.7$)

また、1 質点系モデルの減衰係数 ${}_1c$ は次式で表される。

$${}_1c = 2 {}_1\xi \sqrt{{}_1m \cdot {}_1k_1} \quad (10)$$

ここで、 ${}_1\xi$: 1 質点系モデルの減衰定数を表す。本報では、 ${}_1\xi = \xi_u = 0.02, 0.05, 0.10$ と仮定する。

一方、1 質点系モデルの風力 ${}_1F(t)$ については次式で求められる。

$${}_1F(t) = \{\phi\}^T [F(t)] \quad (11)$$

ここで、 $[F(t)]$: 免震層と上部構造 1~10 層の風力を合わせた風力ベクトルを表す。

4 時刻歴応答解析の結果

4.1 $\gamma = 1.0$ の場合

単位時間当たりの 1 質点系モデルと 11 質点系モデルのエネルギー入力 ${}_1\dot{E}_{input}$, $\dot{E}_{input}$ およびそれらの比 $\lambda_{E,input}$ は次式で求められる^{1,2)}。

$${}_1\dot{E}_{input} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} {}_1F(t) \cdot {}_1\dot{x}(t) dt \quad (12)$$

$$\dot{E}_{input} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} F_{ui}(t) \cdot \dot{x}_{ui}(t) dt \quad (13)$$

$$\lambda_{E,input} = {}_1\dot{E}_{input} / \dot{E}_{input} \quad (14)$$

ここで, ${}_1\dot{x}(t)$: 1 質点系モデルの応答速度, $F_{ui}(t)$, $\dot{x}_{ui}(t)$: 11 質点系モデルにおける上部構造 i 層の風力と応答速度, t_0 : 風力波形の継続時間を表す。

Fig. 3 に $\lambda_{E,input}$ の 40 波アンサンブル平均した結果を示す。Fig. 3(a)の $T_b = 4$ s の場合では, $\lambda_{E,input}$ は 0.70~0.91 となり, 11 質点系のエネルギー入力 $\dot{E}_{input}$ と比べて, 1 質点系のエネルギー入力 ${}_1\dot{E}_{input}$ は全体的に小さい。Fig. 3(b)の $T_b = 6$ s の場合では, $\lambda_{E,input}$ は 0.52~0.87 となり, 同様に 1 質点系のエネルギー入力は全体的に小さい。

一方, 11 質点系モデルの免震層最大変位 $x_{b,max}$ は直接時刻歴応答解析から得られ, 1 質点系モデルの免震層最大変位 ${}_1x_{b,max}$ は次式で換算できる。

$${}_1x_{b,max} = ({}_1x_{max} - {}_1x_y) {}_1^p\phi_b + x_{by} \quad (15)$$

ここで, ${}_1x_{max}$: 1 質点系モデルの最大変位, ${}_1^p\phi_b$: 1 次固有モード $\{{}_1^p\phi\}$ における免震層の固有ベクトルを表す。

そこで, 1 質点系と 11 質点系の免震層最大変位の比 $\lambda_{x,b,max}$ は次式で定義する。

$$\lambda_{x,b,max} = {}_1x_{b,max} / x_{b,max} \quad (16)$$

Fig. 4 に $\lambda_{x,b,max}$ の 40 波アンサンブル平均した結果を示す。Fig. 4 より, 11 質点系の免震層最大変位 $x_{b,max}$ と比べて, 1 質点系の免震層最大変位 ${}_1x_{b,max}$ も全体的に小さい。

4.2 $\gamma = 0.7$ の場合

前節では, エネルギー入力も免震層最大変位も 1 質点系モデルは相対的に小さいことが分かった。この原因として, 高次モードの影響を無視したことがあげられる。そのため本節では, 高次モードの影響を考慮する (ここでは例として $\gamma = 0.7$) 場合の結果を示す。Fig. 5 に $\gamma = 0.7$ の場合の $\lambda_{E,input}$ を示す。Fig. 5(a)の $T_b = 4$ s の場合では, $\lambda_{E,input}$ は 0.89~1.07 となり, 1 質点系と 11 質点系のエネルギー入力は概ね一致する。Fig. 5(b)の $T_b = 6$ s の場合では, $\lambda_{E,input}$ は 0.70~1.16 となり, $\gamma = 1.0$ の場合より, 1 質点系のエネルギー入力は 11 質点系のエネルギー入力に近い値を示す。

同様に, Fig. 6 における $\lambda_{x,b,max}$ の結果より, 高次モードの影響を考慮すれば ($\gamma = 0.7$), $\gamma = 1.0$ の場合より, 1 質点系の免震層最大変位は 11 質点系の免震層最大変位に近い値を示す。このことから, 1 質点系モデルの降伏変位を設定する際に, 1.0 以下の補正係数 γ が必要だと考えられる。

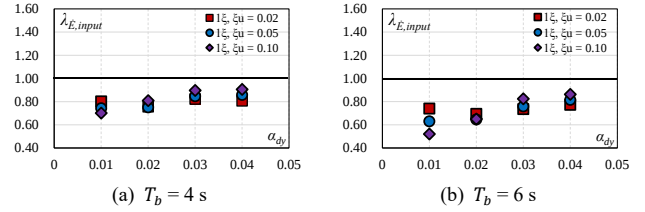


Fig. 3 Results of $\lambda_{E,input}$ ($\gamma = 1.0$)

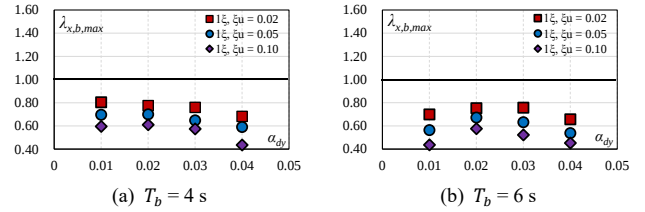


Fig. 4 Results of $\lambda_{x,b,max}$ ($\gamma = 1.0$)

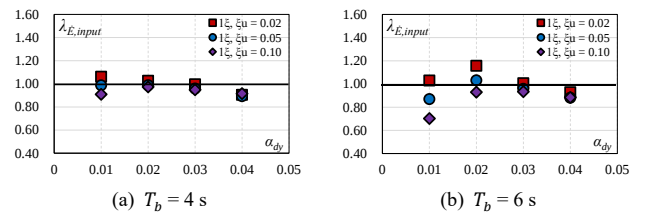


Fig. 5 Results of $\lambda_{E,input}$ ($\gamma = 0.7$)

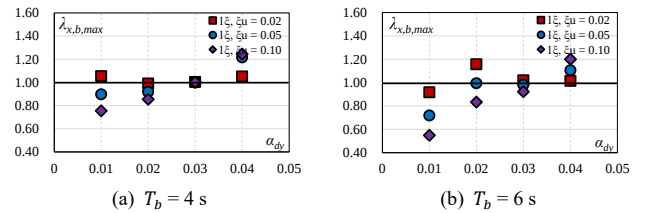


Fig. 6 Results of $\lambda_{x,b,max}$ ($\gamma = 0.7$)

5 まとめ

本報では, 11 質点系モデルの風応答を対象とした弾塑性 1 質点系モデルの作成手法を示し, 時刻歴応答解析によりその妥当性を検討した。1 質点系モデルの降伏変位を設定する際に, 高次モードの影響を考慮すれば (1.0 以下の補正係数 γ を採用), 1 質点系と 11 質点系のエネルギー入力および免震層最大変位は概ね一致する。ただし, γ の適用範囲については, 今後の課題となる。

謝辞

本研究の一部は, JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1723) によるものです。

参考文献

- 1) 吉江慶佑, 北村春幸, 大熊武司: 変動風力による弾塑性構造物への総エネルギー入力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 68, No. 572, pp. 31-38, 2003.10
- 2) 吉江慶佑, 北村春幸, 大熊武司: エネルギーの釣合に基づく変動風力を受ける弾塑性構造物の応答予測手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 70, No. 589, pp. 59-66, 2005.10
- 3) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 4) 丸川比佐夫, 大熊武司, 北村春幸, 吉江慶佑, 鶴見俊雄, 佐藤大樹: 風洞実験に基づく高層建物の多層風力によるエネルギー入力性状 (その 2) 矩形高層建築物に作用する層風力特性, 日本建築学会学術講演梗概集, Vol. B-1, pp. 193-194, 2010.7

*東京工業大学 大学院生

**東京工業大学 准教授・博士 (工学)

*Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

**Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.