

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	高層免震建物の風応答解析用等価弾塑性 1 質点系モデルの提案 その 1: 縮約モデルの作成方法の概要
Title(English)	An equivalent elastic-plastic SDOF model for wind response analysis of base-isolated tall buildings (Part 1: Outline of modelling method of reduced models)
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. 713-714
Citation(English)	, , , pp. 713-714
発行日 / Pub. date	2022, 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解析用等価弾塑性1質点系モデルの提案 その1: 縮約モデルの作成方法の概要

正会員  
同

○銭晓鑫\*  
佐藤大樹\*\*

免震建物                      縮約モデル                      1質点系モデル  
風応答解析                      エネルギー入力                      アンサンブル

### 1 はじめに

近年、人々の安全性と居住性に対する意識が高まるとともに、免震技術は徐々に高層建物に採用されている。しかし、免震建物の高層化に伴い、受ける風力の増大および建物の長周期化のため、より大きな風応答が生じる恐れがある。高層免震建物の弾塑性風応答を評価する場合、通常時刻歴風応答解析が必要となるが、弾塑性多質点系モデルを用いる場合は多くの時間を要する。解析の負荷を低減するために、縮約した弾性上部構造と縮約しない弾塑性免震層を組み合わせた縮約モデルを用いることが有効と確認されている<sup>1)</sup>。その一方、エネルギー入力の予測を通じて<sup>2)</sup>、エネルギーの釣合に基づく弾塑性1質点系モデルの高精度な風応答予測手法が提案されている<sup>3)</sup>。以上より、多質点系モデルからさらに1質点系モデルへ縮約できれば、高層免震建物の風応答予測は容易になる。そこで本研究の目的は、高層免震建物の風応答を予測するための等価弾塑性1質点系モデルを提案し、その精度を検討する。また、上部構造を剛体とした簡易な弾塑性1質点系モデルと弾塑性2質点系モデル<sup>4)</sup>も用いて提案するモデルの精度と比較する。本報その1では、上述の3種の縮約モデルの作成方法を説明する。

### 2 弾塑性11質点系モデルと風力の概要

対象建物は高層免震建物とする (Fig. 1)。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/m<sup>3</sup>とする。免震層は、面密度 $\rho_b = 3644$  kg/m<sup>2</sup>, 減衰定数 $\xi_b = 0$ とする。上述の対象建物を弾塑性11質点系せん断型にモデル化し (Fig. 2), 上部構造は高さにより10質点 (1~10層と呼ぶ) に等分し, 免震層は1質点で表す。1~10層の剛性 $k_1 \sim k_{10}$ は, 上部構造の1次固有モードが直線となるように決定する<sup>5)</sup>。免震層の1次剛性 $k_{b1}$ と2次剛性 $k_{b2}$ については, Fig. 3に示すアイソレータ, ダンパーおよび免震層の復元力特性の関係から分かる。パラメータの変化が縮約モデルの精度に与える影響を考察するために, Table 1における上部構造の減衰定数 $\xi_u$  (初期剛性比例型) を3種選定し, 上部構造の固有周期 $T_u$ , 免震周期 $T_b (=2\pi\sqrt{m_b/k_f})$ , ダンパー量 $\alpha_{dy} (=Q_{dy}/(m_b + \sum_{i=1}^n m_i)g)$  および免震層の降伏変位 $x_{by}$ については免震建物の調査結果<sup>6)</sup>によりそれぞれ5種選定する。また, パラメータの過多による解析の回数が大幅に増えることを避けるために, ここでは Main model を設定する。

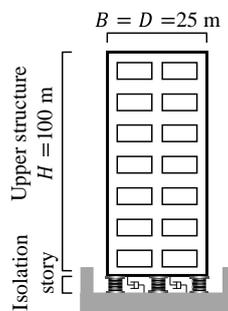


Fig. 1 Target building

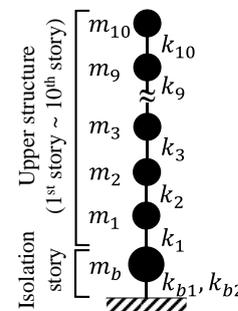


Fig. 2 11DOF model

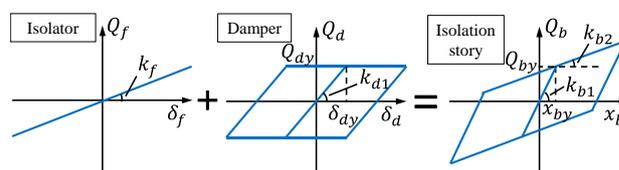


Fig. 3 Restoring force characteristics of isolation story

Table 1 Structural parameter

		1%, 2%, 5%
Damping ratio of upper structure	$\xi_u$ [-]	1%, 2%, 5%
Natural period of upper structure	$T_u$ [s]	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5
Natural period of isolation story	$T_b$ [s]	4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0
Yield shear force coefficient of damper	$\alpha_{dy}$ [-]	0.020, 0.025, 0.030, 0.035, 0.040
Yield displacement of isolation story	$x_{by}$ [cm]	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5

Main model

本報では, 風方向 (平均成分あり) と風直交方向の風力を有する。基本風速 36 m/s, 再現期間 500 年, 地表面粗度区分 III とし, 対象建物頂部の平均風速  $U_H = 50.41$  m/s とする<sup>7)</sup>。1~10 層の 10 分間風力 (時間刻み  $\Delta t = 0.05$  s)  $F_1(t) \sim F_{10}(t)$  は, 風洞実験の層風力係数に基づいて 40 波 (Wave 01~40) 作成する。ただし, 免震層の風力  $F_b(t) = 0$  とする。また, 解析における過度応答を避けるために, すべての風力波形の前後に 50 秒間のエンベロープを追加する。

### 3 3種の縮約モデルと風力の概要

#### 3.1 等価弾塑性1質点系モデル

等価弾塑性1質点系モデル (SDOF(eq)), 上部構造を剛体とした簡易な弾塑性1質点系モデル (SDOF(st)) と弾塑性2質点系モデル (2DOF) をそれぞれ Fig. 4~6 に示す。初めに本報で提案する SDOF(eq) について述べる。弾塑性11質点系モデル (11DOF) の1次モードに基づいて, Fig. 4における SDOF(eq)の質量 ${}^{eq}m$ , 1次剛性 ${}^{eq}k_1$ と2次剛性 ${}^{eq}k_2$ はそれぞれ次式で求められる。

$${}^{eq}m = \{e_1\varphi\}^T [M] \{e_1\varphi\} \quad (1) \quad [M] = \begin{bmatrix} m_b & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_{10} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^{eq}k_1 = \{e_1\varphi\}^T [{}^eK] \{e_1\varphi\} \quad (3) \quad [{}^eK] = \begin{bmatrix} k_{b1} + k_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{10} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^{eq}k_2 = \{p_1\varphi\}^T [{}^pK] \{p_1\varphi\} \quad (5) \quad [{}^pK] = \begin{bmatrix} k_{b2} + k_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{10} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $[M]$ ：免震層の質量 $m_b$ と1~10層の質量 $m_1 \sim m_{10}$ を用いた質量マトリクス、 $\{e_1\varphi\}$ ：免震層の1次剛性 $k_{b1}$ と1~10層の剛性 $k_1 \sim k_{10}$ を用いた剛性マトリクス $[{}^eK]$ の場合の1次固有モード（以降、弾性1次モードと呼ぶ）、 $\{p_1\varphi\}$ ：免震層の2次剛性 $k_{b2}$ と1~10層の剛性 $k_1 \sim k_{10}$ を用いた剛性マトリクス $[{}^pK]$ の場合の1次固有モード（以降、塑性1次モードと呼ぶ）を表す。

SDOF(eq)の降伏せん断力 ${}^{eq}Q_y$ は次式で算出できる。

$${}^{eq}Q_y = \{\Delta_{e1}\varphi_b, \Delta_{e1}\varphi_1, \dots, \Delta_{e1}\varphi_{10}\} \begin{Bmatrix} Q_{by} \\ e_1Q_{1y} \\ \vdots \\ e_1Q_{10y} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $\Delta_{e1}\varphi_b$ と $\Delta_{e1}\varphi_1 \sim \Delta_{e1}\varphi_{10}$ ：11DOFの1次固有モードにおける免震層と1~10層の層間モード形、 $e_1Q_{1y} \sim e_1Q_{10y}$ ：11DOFが弾性1次固有モードで振動していると仮定した場合、免震層が降伏する時の1~10層のせん断力を表し、次式で算出できる。

$$e_1Q_{iy} = \frac{Q_{by}}{\Delta_{e1}\varphi_b} \cdot \Delta_{e1}\varphi_i \quad (8)$$

そこで、SDOF(eq)の降伏変位 ${}^{eq}x_y$ は次式で算出できる。

$${}^{eq}x_y = \frac{{}^{eq}Q_y}{{}^{eq}k_1} \quad (9)$$

以上より、SDOF(eq)のせん断力 ${}^{eq}Q$ と変位 ${}^{eq}x$ の関係をFig. 7(a)~(d)に示す。Fig. 7より、Table 1におけるパラメータが ${}^{eq}k_1$ 、 ${}^{eq}k_2$ および ${}^{eq}x_y$ に与える影響が確認できる。

SDOF(eq)の減衰定数 ${}^{eq}\xi$ （初期剛性比例型）は、次式で求められる<sup>8)</sup>。

$$\frac{{}^{eq}\xi}{p_1\zeta} = \frac{{}^{eq}\xi_b \cdot pW_b + \sum_{i=1}^n {}^{eq}\xi_i \cdot pW_i}{pW_b + \sum_{i=1}^n pW_i} \quad (10)$$

ここで、11DOFにおける免震層と $i$ 層の等価減衰定数 ${}^{eq}\xi_b$ 、 ${}^{eq}\xi_i$ は式(11)(12)で求められ<sup>8)</sup>、免震層と $i$ 層の最大ポテンシャルエネルギー $pW_b$ 、 $pW_i$ は塑性1次モード $\{p_1\varphi\}$ を用いて式(13)(14)で求められる<sup>8)</sup>。

$$\frac{{}^{eq}\xi_b}{p_1\zeta_b} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_b \cdot p_1\omega}{k_{b2}} \quad (11) \quad \frac{{}^{eq}\xi_i}{p_1\zeta_i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_i \cdot p_1\omega}{k_i} \quad (12)$$

$$pW_b = \frac{1}{2} \cdot k_{b2} \cdot p_1\varphi_b^2 \quad (13) \quad pW_i = \frac{1}{2} \cdot k_i \cdot p_1\varphi_i^2 \quad (14)$$

ここで、 $c_b$ と $c_i$ ：11DOFの免震層と $i$ 層の減衰係数、 $p_1\omega$ ： $[{}^pK]$ を用いた11DOFの塑性1次固有円振動数を表す。

弾性1次モード $\{e_1\varphi\}$ によるSDOF(eq)の風力 ${}^{eq}F(t)$ と塑性1次モード $\{p_1\varphi\}$ によるSDOF(eq)の風力 ${}^{eq}F(t)$ を比較した結果により、 ${}^{eq}F(t)$ のほうが大きくなることを確認したため、本報では ${}^{eq}F(t)$ を採用する。

$${}^{eq}F(t) = \{e_1\varphi\}^T \{F(t)\} \quad (15)$$

ここで、 $\{F(t)\}$ ：免震層の風力 $F_b(t)$ と1~10層の風力 $F_1(t) \sim F_{10}(t)$ の風力ベクトルを表す。

### 3.2 上部構造を剛体とした簡易な弾塑性1質点系モデル

Fig. 5に示すSDOF(st)の質量 ${}^{st}m$ は式(16)で表される。1次剛性 ${}^{st}k_1$ と2次剛性 ${}^{st}k_2$ はそれぞれ11DOFにおける免震層の1次剛性 $k_{b1}$ と2次剛性 $k_{b2}$ に等しい。SDOF(st)は上部構造を剛体と仮定しているため、減衰定数はゼロとなる。風力 ${}^{st}F(t)$ については式(17)で表される。

$${}^{st}m = m_b + \sum_{i=1}^n m_i \quad (16) \quad {}^{st}F(t) = \sum_{i=1}^n F_i(t) \quad (17)$$

### 3.3 弾塑性2質点系モデル

Fig. 6に示す2DOFの上部構造の質量 ${}^{2D}m_u$ は式(18)で表され、免震層の質量 ${}^{2D}m_b$ は11DOFにおける免震層の質量 $m_b$ に等しい。上部構造の剛性 ${}^{2D}k_u$ は式(19)で表され、免震層の1次剛性 ${}^{2D}k_{b1}$ と2次剛性 ${}^{2D}k_{b2}$ は、それぞれ11DOFにおける免震層の1次剛性 $k_{b1}$ と2次剛性 $k_{b2}$ に等しい。上部構造の減衰定数 ${}^{2D}\xi_u$ （初期剛性比例型）は式(20)で表される。2DOFの上部構造の風力 ${}^{2D}F_u(t)$ は式(21)で表される。

$${}^{2D}m_u = \sum_{i=1}^n m_i \quad (18) \quad {}^{2D}k_u = \frac{4\pi^2 \cdot {}^{2D}m_u^2}{T_u^2} \quad (19)$$

$${}^{2D}\xi_u = \xi_u \quad (20) \quad {}^{2D}F_u(t) = \sum_{i=1}^n F_i(t) \quad (21)$$

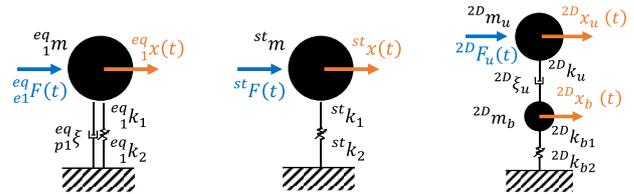


Fig. 4 SDOF(eq)

Fig. 5 SDOF(st)

Fig. 6 2DOF

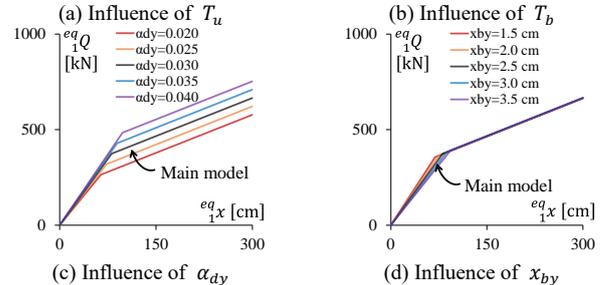
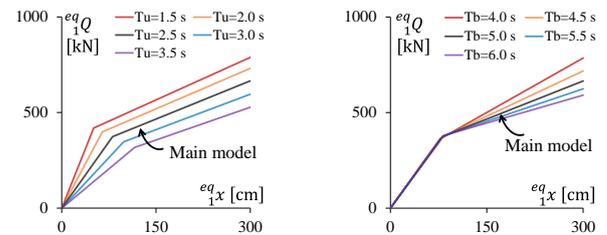


Fig. 7  ${}^{eq}Q - {}^{eq}x$  relationship of SDOF(eq)

## 4 まとめ

本報その1では、提案する等価弾塑性1質点系モデル、上部構造を剛体とした簡易な弾塑性1質点系モデルおよび弾塑性2質点系モデルの作成方法を説明した。

\* 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.