T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

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)					
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				

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

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 ¹⁾。その一方, エネルギー入力 の予測を通じて 2), 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³⁾。 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⁴⁾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 $\rho_{\mu} = 250$ kg/m^3 とする。免震層は、面密度 ρ_h = 3644 kg/m²、減衰定 数ξ_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k1~k10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 5)。免震層の 1 次剛性k_{b1}と 2 次剛性 k_{h2}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 ξ_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 α_{dy} $(=Q_{dy}/(m_b + \sum_{i=1}^n m_i)g)$ および免震層の降伏変位xbvについては免震建物の調査結 果のによりそれぞれ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。

An equivalent elastic-plastic SDOF model for wind response analysis of base-isolated tall buildings (Part 1: Outline of modelling method of reduced models)

正会員	○銭暁鑫*
同	佐藤大樹**



Fig. 3 Restoring force characteristics of isolation story

Table 1 Structural parameter										
Damping ratio of upper structure		[-]		1%,	2%,	5%				
Natural period of upper structure		[s]	1.5,	2.0,	2.5,	3.0,	3.5			
Natural period of isolation story		[s]	4.0,	4.5,	5.0,	5.5,	6.0			
Yield shear force coefficient of damper		[-]	0.020, 0	.025,	0.030,	0.03	5, 0.040			
Yield displacement of isoaltion story		[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 なる ⁷⁾。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 $^{eq}_{1m}$, 1 次剛性 $^{eq}_{1k_1}$ と 2 次剛性 $^{eq}_{1k_2}$ はそれぞれ次式で求められる。

$${}^{eq}_{1}m = \{{}_{e1}\varphi\}^{T}[M]\{{}_{e1}\varphi\} \quad (1) \qquad [M] = \begin{bmatrix} m_{b} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_{10} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^{eq}_{1}k_{1} = \{{}_{e1}\varphi\}^{T}[{}_{e}K]\{{}_{e1}\varphi\} \quad (3) \qquad [{}_{e}K] = \begin{bmatrix} k_{b1} + k_{1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{10} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^{eq}_{1}k_{2} = \{{}_{p1}\varphi\}^{T}[{}_{p}K]\{{}_{p1}\varphi\} \quad (5) \qquad [{}_{p}K] = \begin{bmatrix} k_{b2} + k_{1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{10} \end{bmatrix} \quad (6)$$

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、 $\{_{e1}\varphi\}$: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 $[_{e}K]$ の場合の 1 次固有モード(以降,弾性 1 次モードと呼ぶ)、 $\{_{p1}\varphi\}$: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 $[_{p}K]$ 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 $^{eq}_{1}Q_{y}$ は次式で算出できる。

$${}^{eq}_{1}Q_{y} = \left\{ \Delta_{e1}\varphi_{b}, \Delta_{e1}\varphi_{1}, \cdots, \Delta_{e1}\varphi_{10} \right\} \left\{ \begin{array}{c} Q_{by} \\ e_{1}Q_{1y} \\ \vdots \\ e_{1}Q_{10y} \end{array} \right\}$$
(7)

ここで、 $\Delta_{e1}\varphi_b \ge \Delta_{e1}\varphi_{1-2}\Delta_{e1}\varphi_{10}$: 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。

$$_{e1}Q_{iy} = \frac{Q_{by}}{\Delta_{e1}\varphi_b} \cdot \Delta_{e1}\varphi_i \tag{8}$$

そこで、SDOF(eq)の降伏変位 ${}^{eq}_1 x_y$ は次式で算出できる。

$${}^{eq}_{1}x_y = \frac{{}^{eq}_{1}Q_y}{{}^{eq}_{1}k_1} \tag{9}$$

以上より、SDOF(eq)のせん断力 ${}^{eq}_{1}Q$ と変位 ${}^{eq}_{1}x$ 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 ${}^{eq}_{1}k_{1}$ 、 ${}^{eq}_{1}k_{2}$ および ${}^{eq}_{1}x_{y}$ に与える影響が確認できる。

SDOF(eq)の減衰定数 $_{p1}^{eq}\xi$ (初期剛性比例型)は、次式で 求められる⁸⁾。

$${}^{eq}_{p1}\xi = \frac{{}^{eq}_{p}\xi_b \cdot {}_{p}W_b + \sum_{i=1}^{n} {}^{eq}_{p}\xi_i \cdot {}_{p}W_i}{{}_{p}W_b + \sum_{i=1}^{n} {}^{p}_{i}W_i}$$
(10)

ここで、11DOF における免震層とi層の等価減衰定数 ${}^{eq}_{p}\xi_{b}$, ${}^{eq}_{p}\xi_{i}$ は式(11)(12)で求められ⁸、免震層とi層の最大ポテン シャルエネルギー ${}_{p}W_{b}$ 、 ${}_{p}W_{i}$ は塑性1次モード $\{{}_{p1}\varphi\}$ を用 いて式(13)(14)で求められる⁸。

$${}^{eq}_{p}\xi_{b} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_{b} \cdot p_{1}\omega}{k_{b2}} \qquad (11) \qquad {}^{eq}_{p}\xi_{i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_{i} \cdot p_{1}\omega}{k_{i}} \qquad (12)$$

 ${}_{p}W_{b} = \frac{1}{2} \cdot k_{b2} \cdot {}_{p1}\varphi_{b}^{2}$ (13) ${}_{p}W_{i} = \frac{1}{2} \cdot k_{i} \cdot {}_{p1}\varphi_{i}^{2}$ (14) ここで、 $c_{b} \geq c_{i} : 11\text{DOF}$ の免震層とi層の減衰係数、 ${}_{p1}\omega : [{}_{n}K]$ 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 (e_q) の風力 $e_{e_1}^{e_q}F(t)$ と塑 性 1 次モード $\{p_1\varphi\}$ による SDOF (e_q) の風力 $p_{p_1}^{e_q}F(t)$ を比較し た結果により、 $e_{e_1}^{e_q}F(t)$ のほうが大きくなることを確認した ため、本報では $e_{e_1}^{e_q}F(t)$ を採用する。 $e_{e_1}^{e_q}F(t) = \{e_{e_1}\varphi\}^T \{F(t)\}$ (15)

* 東京工業大学 大学院生

**東京工業大学 准教授・博士(工学)

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stm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stF(t)については式(17)で表される。

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



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。

* Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

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