

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	高層免震建物の風応答時における鋼材ダンパーの吸収エネルギー評価のための等価 1 質点系モデル
Title(English)	An equivalent SDOF model for steel damper energy dissipation of base-isolated tall buildings subjected to wind loads
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. 607-608
Citation(English)	, , , pp. 607-608
発行日 / Pub. date	2023, 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時における鋼材ダンパーの吸収エネルギー評価のための等価 1 質点系モデル

免震建物	風応答	鋼材ダンパー
吸収エネルギー	1 質点系モデル	1 次モード

正会員 ○銭晓鑫*
同 佐藤大樹**

1 はじめに

高層免震建物の耐風設計では、時刻歴風応答解析を用いない鋼材ダンパーの疲労損傷の予測手法が求められている。吉江らは、エネルギーの釣合に基づいて弾塑性 1 質点系モデルでの風力によるダンパーの吸収エネルギーの予測手法を提案した。ダンパーの吸収エネルギーが予測できた場合、その疲労損傷を予測することは容易になる。しかし、高層免震建物におけるダンパーの吸収エネルギーを予測するために、多質点系モデル (Fig.1(a) の MDOF model と呼ぶ) を 1 質点系モデルに縮約する必要がある。そこで、本報では高層免震建物の風応答時における鋼材ダンパーの吸収エネルギー評価のための等価 1 質点系モデル (Fig.1(b) の EQ model と呼ぶ) を提案し、そのダンパーの吸収エネルギーの精度を検証する。また、上部構造を剛体とした簡易な 1 質点系モデル (Fig.1(c) の RI model と呼ぶ) も用いて EQ model と比較する。

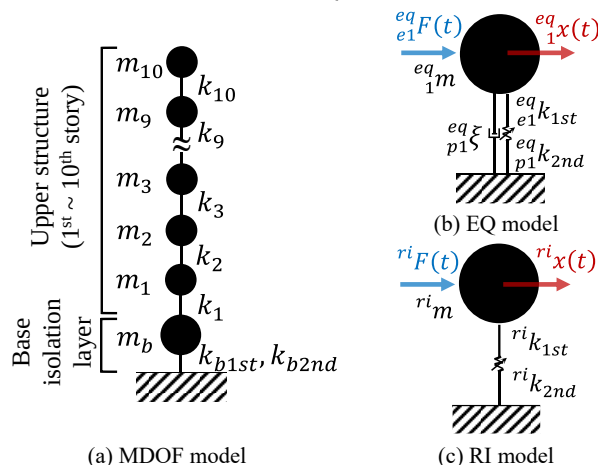


Fig. 1 Analytical models

2 解析モデルと風力の作成方法

2.1 MODF model と風力

対象建物は鋼材ダンパーを有する高層免震建物とする。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 とする。なお、免震建物の調査結果により、上部構造の減衰定数 (初期剛性比例型) を 3 種 ($\xi_u = 1\%$, 2% , 5%)、上部構造の固有周期を 5 種 ($T_u = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ s)、免震周期を 5 種 ($T_b = 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0$ s) 選定した。免震層は、面密度 $\rho_b = 3644$ kg/m², 減衰定数 $\xi_b = 0$, ダンパー量 $\alpha_{sy} = 0.03$, ダンパーの降伏変形 $\delta_{sy} = 2.5$ cm とする。上述の建物を MDOF model (Fig. 1(a)) に置換する。ここで、 m_b と $m_1 \sim m_n$: 免震層と 1 層~最上層の質量, k_{b1st} と k_{b2nd} : 免震層の 1 次剛性と 2 次剛性, $k_1 \sim k_n$: 1 層~最上層の剛性 (上部構造の 1 次モードが直線となるように決定する) を表す。

本報では、風方向と風直交方向の風力を考慮する。基本風速 36 m/s, 再現期間 500 年, 地表面粗度区分 III の仮定により、建物頂部の平均風速 $U_H = 50.41$ m/s となる。風洞実験の層風

力係数に基づいて、1 層~最上層の 10 分間風力 $F_1(t) \sim F_n(t)$ (時間刻み $\Delta t = 0.05$ s) を 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。

2.2 EQ model の 1 次モードと質量

免震層が弾性状態時の MDOF model に対して、その固有値解析の基礎方程式は次式で表される。

$$([{}_eK] - e_1\omega^2 [M])\{e_1\varphi\} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $[M]$: m_b と $m_1 \sim m_n$ を組み合わせた質量マトリクス, $[{}_eK]$: k_{b1st} と $k_1 \sim k_n$ を組み合わせた剛性マトリクスを表し、それぞれ次式で表される。 $\{e_1\varphi\}$: $[M]$ と $[{}_eK]$ を用いた場合の MDOF model の 1 次モード (弾性 1 次モードと呼ぶ), $e_1\omega$: MDOF model の弾性 1 次モードの固有円振動数を表す。

$$[M] = \begin{bmatrix} m_b & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix} \quad (2) \quad [{}_eK] = \begin{bmatrix} k_{b1st} + k_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

一方、免震層が塑性状態時の MDOF model に対して、その固有値解析の基礎方程式は次式で表される。

$$([{}_pK] - p_1\omega^2 [M])\{p_1\varphi\} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $[{}_pK]$: k_{b2nd} と $k_1 \sim k_n$ を組み合わせた剛性マトリクスを表し、次式で表される。 $\{p_1\varphi\}$: $[M]$ と $[{}_pK]$ を用いた場合の MDOF model の 1 次モード (塑性 1 次モードと呼ぶ), $p_1\omega$: MDOF model の塑性 1 次モードの固有円振動数を表す。

$$[{}_pK] = \begin{bmatrix} k_{b2nd} + k_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

以上の $\{e_1\varphi\}$ と $\{p_1\varphi\}$ を、次式のように EQ model (Fig. 1(b)) の質量 ${}^{eq}_1m = 1$ で正規化する。

$${}^{eq}_1m = \{e_1\varphi\}^T [M] \{e_1\varphi\} = \{p_1\varphi\}^T [M] \{p_1\varphi\} = 1 \quad (6)$$

2.3 EQ model の 1 次剛性、2 次剛性と降伏変位

EQ model の 1 次剛性 ${}^{eq}_1k_{1st}$ と 2 次剛性 ${}^{eq}_1k_{2nd}$ はそれぞれ次式で表される。

$${}^{eq}_1k_{1st} = \{e_1\varphi\}^T [{}_eK] \{e_1\varphi\} \quad (7) \quad {}^{eq}_1k_{2nd} = \{p_1\varphi\}^T [{}_pK] \{p_1\varphi\} \quad (8)$$

弾性多質点系モデルに対して、その 1 次モードが卓越していることから、EQ model の降伏せん断力 ${}^{eq}_1Q_y$ は弾性 1 次モード $\{e_1\varphi\}$ を用いて、次式で表される。

$${}^{eq}_1Q_y = \{\Delta_{e1}\varphi_b, \Delta_{e1}\varphi_1, \dots, \Delta_{e1}\varphi_n\} \{Q_{by}, e_1Q_{1(by)}, \dots, e_1Q_{n(by)}\}^T \quad (9)$$

ここで、 $\Delta_{e1}\varphi_b$ と $\Delta_{e1}\varphi_1 \sim \Delta_{e1}\varphi_n$: $\{e_1\varphi\}$ の場合の免震層と 1 層~最上層の層間変位, Q_{by} : MDOF model が $\{e_1\varphi\}$ で振動していると仮定した場合、免震層の応答変位が初めて降伏変位となった時の 1 層~最上層のせん断力を表し、次式で表される。

$$e_1Q_{i(by)} = Q_{by} \cdot \Delta_{e1}\varphi_i / \Delta_{e1}\varphi_b \quad (10)$$

EQ model の降伏変位 ${}^{eq}_1x_y$ は次式で表される。

$${}^{eq}_1x_y = {}^{eq}_1Q_y / {}^{eq}_1k_{1st} \quad (11)$$

以上の式により算出した EQ model の復元力特性 (せん断力 ${}^{eq}_1Q$ と変位 ${}^{eq}_1x$ の関係) を Fig. 2 に示す。 $k_1 \sim k_n$ は T_u に依存するため、 T_u の変化に伴う式(3)における $[{}_eK]$ と式(5)における $[{}_pK]$ の変化により、式(1)における $\{e_1\varphi\}$ と式(4)における $\{p_1\varphi\}$

も変化する。 $\{e_1\varphi\}$ と $\{p_1\varphi\}$ が変わると、式(7)における ${}^{eq}_1k_{1st}$ 、式(8)における ${}^{eq}_1k_{2nd}$ 、式(9)における ${}^{eq}_1Q_y$ および式(11)における ${}^{eq}_1x_y$ も変わる。したがって、Fig. 2(a)より T_u がEQ modelの復元力特性に与える影響が大きい。一方、以上の式により、Fig. 2(b)において T_b の影響も確認できる。

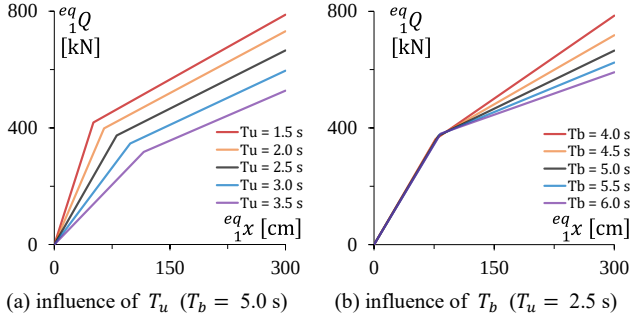


Fig. 2 Restoring force characteristics of the EQ model

2.4 EQ modelの減衰定数

ξ_u の影響を考慮したEQ modelの減衰定数 ${}^{eq}_1\xi$ は、塑性1次モード $\{p_1\varphi\}$ を用いて、Biggs略算法により次式で表される。なお、 $\{p_1\varphi\}$ を用いる理由は ξ_u を過大に評価することを避けるためである。

$${}^{eq}_1\xi = \frac{p\xi_b \cdot pW_b + \sum_{i=1}^n p\xi_i \cdot pW_i}{pW_b + \sum_{i=1}^n pW_i} \quad (12)$$

ここで、 $p\xi_b$ と $p\xi_i$ ：MDOF modelにおける免震層が塑性状態時の免震層と i 層の減衰定数を表し、次式で表される。

$$p\xi_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_b \cdot p_1\omega}{k_{b2}} \quad (13) \quad p\xi_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_i \cdot p_1\omega}{k_i} \quad (14)$$

ここに、 pW_b と pW_i ：MDOF modelにおける免震層が塑性状態時の免震層と i 層の最大ポテンシャルエネルギーを表し、次式で表される。

$$pW_b = \frac{1}{2} \cdot k_{b2} \cdot p_1\varphi_b^2 \quad (15) \quad pW_i = \frac{1}{2} \cdot k_i \cdot p_1\varphi_i^2 \quad (16)$$

ここで、 c_b ：免震層の減衰係数 ($c_b = 0$)、 c_i ： i 層の減衰係数 (剛性比例減衰)を表す。

以上の式により算出した ${}^{eq}_1\xi$ をFig. 3に示す。式(5)により、 $\{p_1\varphi\}$ の算出に必要な $[pK]$ は T_u による $k_1 \sim k_n$ と T_b による k_{b2nd} で表されるため、Fig. 3より T_u と T_b が ${}^{eq}_1\xi$ に与える影響がある。また、 ξ_u を過大に評価することを避けるための $\{p_1\varphi\}$ を用いることにより、 ${}^{eq}_1\xi$ は ξ_u よりも小さいことが分かる。

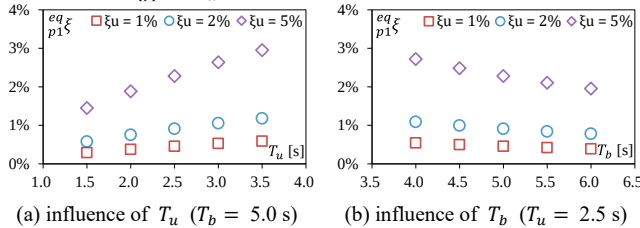


Fig. 3 Damping ratio of the EQ model

2.5 EQ modelの風力

EQ modelの風力 ${}^{eq}_1F(t)$ は、安全側で評価となるように弾性1次モード $\{e_1\varphi\}$ を用いて、次式で表される。

$${}^{eq}_1F(t) = \{e_1\varphi\}^T \{F(t)\} \quad (18)$$

ここで、 $\{F(t)\}$ ： $F_b(t)$ と $F_1(t) \sim F_n(t)$ を組み合わせた風力ベクトルを表す。

2.6 RI modelと風力

RI model (Fig. 1(c))の質量 ${}^{ri}_1m$ 、1次剛性 ${}^{ri}_1k_{1st}$ 、2次剛性 ${}^{ri}_1k_{2nd}$ 、降伏変位 ${}^{ri}_1x_y$ および風力 ${}^{ri}_1F(t)$ はそれぞれ次式で表さ

れる。ただし、RI modelの減衰定数 ${}^{ri}_1\xi = 0$ とする。

$${}^{ri}_1m = m_b + \sum_{i=1}^n m_i \quad (19) \quad {}^{ri}_1k_{1st} = k_{b1st} \quad (20)$$

$${}^{ri}_1k_{2nd} = k_{b2nd} \quad (21) \quad {}^{ri}_1x_y = x_{by} \quad (22)$$

$${}^{ri}_1\xi = \xi_b \quad (23) \quad {}^{ri}_1F(t) = \sum_{i=1}^n F_i(t) \quad (24)$$

以上の式から、EQ modelと異なり、 ξ_u と T_u がRI modelのパラメータに与える影響が全くないことが確認できる。

3 ダンパーの吸収エネルギーの精度検証

EQ modelとRI modelにおける単位時間当たりの鋼材ダンパーの吸収エネルギー ${}^{eq}_1\dot{W}_s$ と ${}^{ri}_1\dot{W}_s$ はそれらのループが囲まれた面積を用いて算出でき、MDOFにおける単位時間当たりの鋼材ダンパーの吸収エネルギー $\dot{W}_s$ は免震層のループが囲まれた面積を用いて算出できる。Fig. 4に風直交方向の ${}^{eq}_1\dot{W}_s$ 、 ${}^{ri}_1\dot{W}_s$ と $\dot{W}_s$ の比較を示す (40 波アンサンブル平均)。ほとんどの場合では、EQ modelの ${}^{eq}_1\dot{W}_s$ の誤差は15%以下となり、精度が高いことが確認できる。なお、個別の ${}^{eq}_1\dot{W}_s$ の誤差は少し15%を超えているが、EQ modelの ${}^{eq}_1\xi$ と ${}^{eq}_1F(t)$ の算出にそれぞれ安全側で評価となる $\{p_1\varphi\}$ と $\{e_1\varphi\}$ を用いたため、 ${}^{eq}_1\dot{W}_s$ は $\dot{W}_s$ の安全側の値となっている。一方、前述のように ξ_u と T_u がRI modelのパラメータに与える影響がないため、Fig. 4(a)よりRI modelの ${}^{ri}_1\dot{W}_s$ は変わらなくて精度が全体的に極めて低い。また、 T_b の影響があるが、Fig. 4(b)より ${}^{ri}_1\dot{W}_s$ は依然として非常に低い。これは、Fig. 5のEQ modelの応答変位PSD (パワースペクトル密度)、RI modelの応答変位PSDとMDOF modelにおける免震層の応答変位PSDを比較すると、RI modelとMDOF modelにおける免震層の振動数 (ピークの横座標) が異なるからだと考えられる。その一方、EQ modelとMDOF modelにおける免震層の振動数がほとんど一致する。ここで、Fig. 5における f ：振動数、 σ^2 ：時刻歴応答変位の分散を表す。

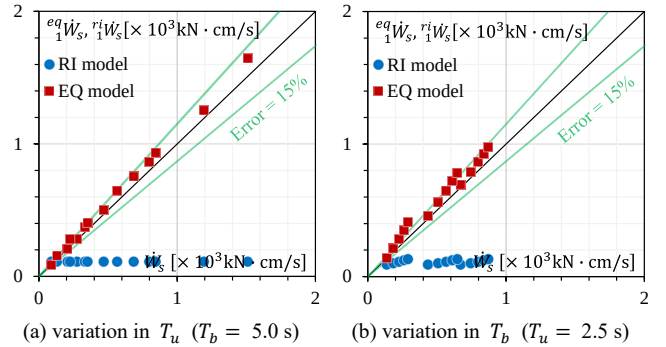


Fig. 4 Comparison of $\dot{W}_s$, ${}^{eq}_1\dot{W}_s$ and ${}^{ri}_1\dot{W}_s$ in across-wind direction

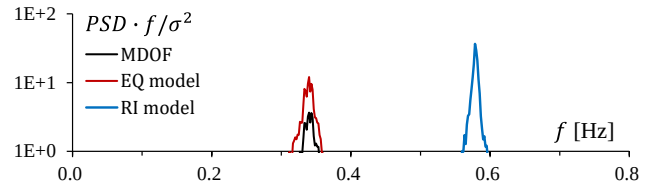


Fig. 5 Comparison of PSD in across-wind direction ($\xi_u = 2\%$, $T_u = 2.5$ s, $T_b = 5.0$ s, ensemble average)

4 まとめ

本報では、主にEQ modelの作成方法を説明し、風直交方向でその鋼材ダンパーの吸収エネルギー ${}^{eq}_1\dot{W}_s$ の精度が全体的に高いことが確認できた。

* 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.