

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風応答解析による免震ダンパーの疲労損傷評価 建物アスペクト比が疲労損傷度に与える影響
Title(English)	Evaluation of Fatigue Damage of Seismic Isolation Dampers by Wind Response Analysis Effects of Building Aspect Ratio on Fatigue Damage Degree
著者(和文)	銭晓鑫, 佐藤大樹, 馬橋聖生
Authors(English)	Xiaoxin Qian, Daiki Sato, Sei Mabashi
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 497-500
Citation(English)	, , , pp. 497-500
発行日 / Pub. date	2019, 3

風応答解析による免震ダンパーの疲労損傷評価 建物アスペクト比が疲労損傷度に与える影響

構造—振動

正会員 ○ 銭曉鑫^{*1}
// 馬橋聖生^{*1}

正会員 佐藤大樹^{*2}

超高層免震建物 アスペクト比 免震ダンパー
台風シミュレーション 風応答解析 疲労損傷

1 はじめに

近年、人々の建物の安全性・居住性に対する意識が高まるとともに、集合住宅や事務所ビルに免震構造が積極的に採用され、特に高さ 60m 以上の超高層建物への適用も拡大している。しかし、建物が高層化すると、地震力に対して相対的に風外力が大きくなる。その上、地震力と異なり、風外力は長時間繰り返し作用するという特徴があるため、免震層に及ぼす影響を考えなければならない。風外力が長時間作用することを考えると、建物の最大応答値が許容値を超えていないことを確認するだけでなく、長時間繰り返しによる免震ダンパーの疲労損傷の累積に対する安全性の検証も必要である。

本研究では、超高層免震建物を研究対象として、台風シミュレーションを利用して、異なる建物アスペクト比が免震ダンパーの疲労損傷度（以下、 D 値）に与える影響について評価することを目的とする。なお、風向の設定は強風イベント全時刻において一定 (0°) とする。本論で異なるアスペクト比に基づき、はじめに解析モデルの最大応答値を比較し、次に免震層の挙動に注目し、免震ダンパーの 10 分間の疲労損傷度（以下、 D_{10} 値）と頂部平均風速 U_H の関係性を提案し、最後に得られた関係式により求めた予測値 $P D$ と風応答解析による精算値 $F D$ の比較を行う。

2 解析モデルの概要

超高層免震建物の解析モデルを Fig. 1 に示し、その構造諸元を Table 1 に示す。解析モデルは、高さ $H = 100\text{m}$ 、辺長比 $B/L = 1$ の建物に相当する 11 質点せん断型モデルとする。本論でアスペクト比 $a = 4, 5$ を有する対象建物について検討を行う。上部構造は、固有周期 $T_u = 2.5\text{s}$ 、密度 $\rho_u = 250\text{kg/m}^3$ とし、免震層は、固有周期 $T_0 = 6.0\text{s}$ 、面密度 $\rho_0 = 3644\text{kg/m}^2$ 、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_{dv} = 0.03$ とした。なお、風外力の入力風向角は全時刻において 0° の 1 風向とする。

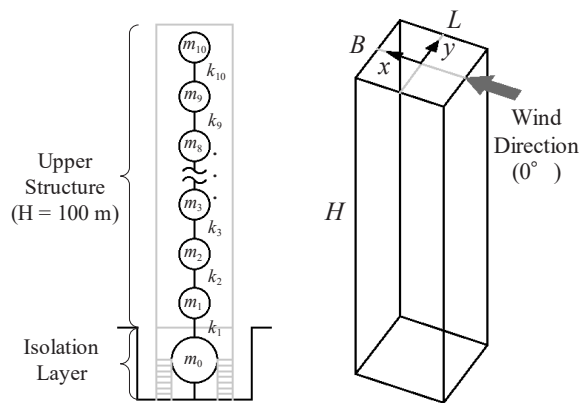


Fig. 1 Analytical model

Table 1 Parameters of the analytical model

Aspect ratio (a)		4	5	[-]
Width (B)		25	20	[m]
Length (L)		25	20	[m]
Height (H)		100		[m]
Upper structure	Density (ρ_u)	250		[kg/m ³]
	Natural period (T_u)	2.5		[s]
	Damping ratio (h)	2.0		[%]
Isolation layer	Areal density (ρ_0)	3644		[kg/m ²]
	Natural period (T_0)	6.0		[s]
Yield shear force coefficient of steel damper (α_{dv})		0.03		[-]

上部構造各層の剛性 $u k_i$ は、1 次固有モードが直線となるように式 (1) により決定した¹⁾。各層特性の計算結果を Fig. 2 と Table 2 に示す。

$$u k_i = \frac{u s \omega^2 \cdot m_i \cdot u s \phi_i + u k_{i+1} (u s \phi_{i+1} - u s \phi_i)}{u s \phi_i - u s \phi_{i-1}} \quad (1)$$

ここで、 $u s \omega$: 上部構造のみの s 次固有円振動数 ($= 2\pi/T_u$)、 m_i : i 層の質量、 $u s \phi_i$: 上部構造 i 層の s 次モードベクトルを表す。ただし、 $u k_{11} = 0$ 、 $u s \phi_0 = 0$ とする。Fig. 3 にダンパー、アイソレータ、およびそれらを組み合わせた免震層

の復元力特性を示す。免震層の諸元は式 (2) ~ (4)を用いて決定する。なお、ダンパーの2次剛性比は0としている。

$$Q_{dy} = (W_u + W_b) \cdot \alpha_{dy} \quad (2)$$

$$k_{d1} = Q_{dy} / \delta_{dy} \quad (3)$$

$$k_f = \frac{4\pi^2(W_u + W_b)}{1T_0^2 \cdot g} \quad (4)$$

ここで、 Q_{dy} : 免震層ダンパーの降伏耐力、 k_{d1} : ダンパーの初期剛性、 δ_{dy} : ダンパーの降伏変形 (= 2.80cm)、 α_{dy} : ダンパー降伏せん断力係数 (= 0.03)、 k_f : 免震層アイソレータの1次剛性、 g : 重力加速度を表す。以上の結果を用いて免震層の1次剛性 k_{01} 、2次剛性 k_{02} 、降伏耐力 Q_{0y} は式(5)~(7)で算出される。

$$k_{01} = k_{d1} + k_f \quad (5)$$

$$k_{02} = k_f \quad (6)$$

$$Q_{0y} = k_{01} \cdot \delta_{dy} \quad (7)$$

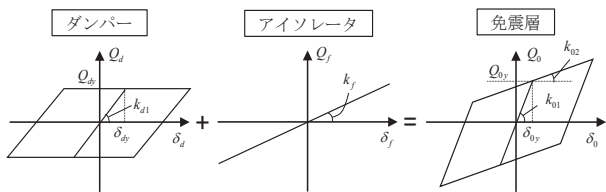


Fig. 3 Restoring force characteristics of isolation layer

3 風外力の概要

Fig. 4 に、台風シミュレーション²⁾より得られた頂部平均風速 U_H の時刻歴変化を示す。本解析では、東京都に発生が予測される強風イベントの中から、地上高さ 10 m の最大平均風速が再現期間 500 年相当のものに近く、頂部最大平均風速付近の継続時間が短いもの、長いもの（以下、S500, L500）をそれぞれ 5 波ずつ用意する。本解析では、基本風速 $U_0 = 38$ m/s、再現期間 500 年相当の風速 $U_{500} = 40$ m/s とする。また、頂部最大平均風速は式(8)より算出する³⁾。

$$U_H = U_{500} K_D K_S E_H \quad (8)$$

ここで、 K_D : 風向係数 (= 1)、 K_S : 季節係数 (= 1)、 E_H : 風速の鉛直分布係数（地表面粗度区分IIIに換算）を表す。上式より求めた 10 分間頂部平均風速 $U_H = 50.41$ m/s である。本解析では台風の発生から終了までの全時刻の内、地上高さ 10 m における風速が 10 m/s より大きくなった時刻から 10 m/s を下回った時刻までを一つの強風イベントと定義している。

時刻歴風外力は、頂部平均風速の時刻歴波形と、風洞実験結果⁴⁾より 10 分間毎の各層風外力を作成し、文献⁵⁾

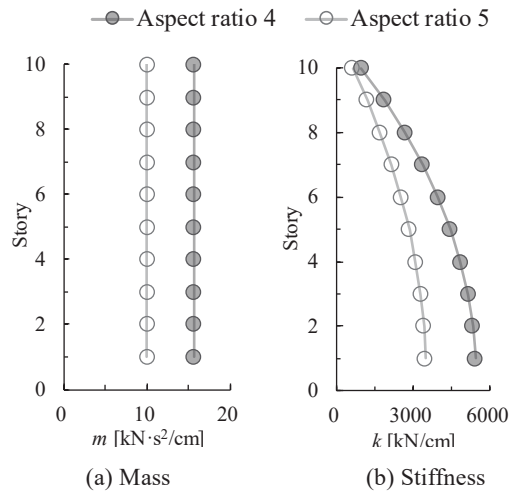
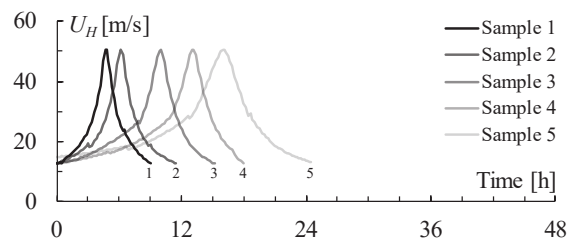


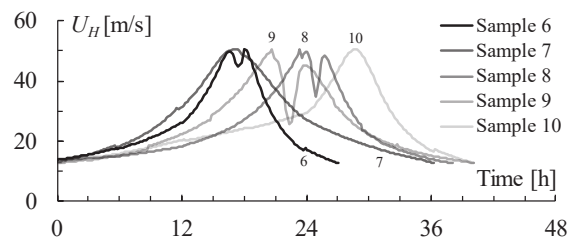
Fig. 2 Characteristics of upper structure

Table 2 Characteristics of each story

Aspect ratio		a = 4		a = 5	
i	m_i	k_i	m_i	k_i	
Upper structure	10	15.6	986.96	10.0	631.65
	9	15.6	1875.22	10.0	1200.14
	8	15.6	2664.79	10.0	1705.47
	7	15.6	3355.67	10.0	2147.63
	6	15.6	3947.84	10.0	2526.62
	5	15.6	4441.32	10.0	2842.45
	4	15.6	4836.11	10.0	3095.11
	3	15.6	5132.19	10.0	3284.60
	2	15.6	5329.59	10.0	3410.94
	1	15.6	5428.28	10.0	3474.10
Isolation layer	0	22.8	2076.09	14.6	1328.69



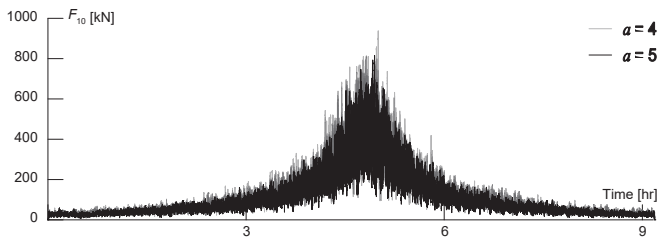
(a) S500



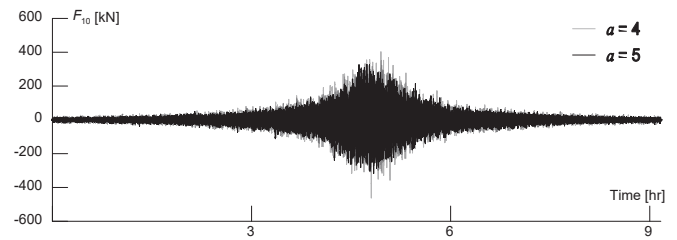
(b) L500

Fig. 4 Average wind speed of typhoon samples

を参考に 10 分間毎の風外力をつなぎ合わせることで、一つの強風イベントを作成する。また、それぞれのサンプルにおいて、使用する層風力係数の組み合わせを変更することにより Wave 1 ~ 5 までの風外力を作成している。



(a) x-direction



(y) y-direction

Fig. 5 Wind force acting at 10th story (Sample 1 Wave 1)

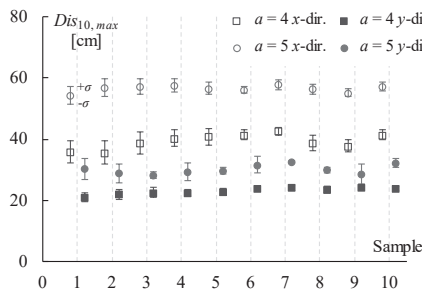


Fig. 6 Max. displacement at 10th story

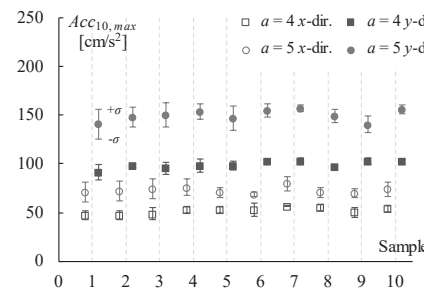


Fig. 7 Max. acceleration at 10th story

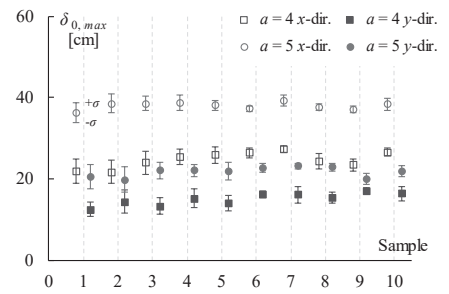


Fig. 8 Max. deformation of isolation layer

Fig. 5 に、モデル頂部（10 層）に作用する風外力 F_{10} の時刻歴波形を示す。ここでは、紙幅の都合により例として、Sample 1 の Wave 1 の x 方向および y 方向の頂部風外力波形を示す。図に示したように、アスペクト比の減少による見附面積の増大のため、風外力も増大することがわかる。

4 時刻歴風応答解析の結果

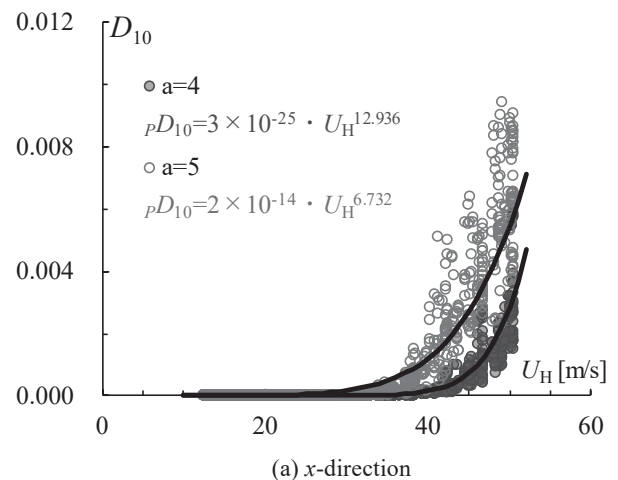
4.1 最大応答値

Fig. 6~7 に風応答解析による解析モデル頂部（10 層）の最大応答変位 $Dis_{10, max}$ および最大応答加速度 $Acc_{10, max}$ を示す。それぞれ 5 波のアンサンブル平均により評価する。Fig. 6 の最大応答変位について、頂部の最大応答値が台風継続時間の増加とともに増大する傾向が見られない。また、風方向 (x 方向) と風直交方向 (y 方向) の最大応答変位を比較すると、風方向の方が大きな応答を示している。Fig.7 の最大応答加速度について、風方向と風直交方向を比較すると、風直交方向の方が大きな応答を示している。さらに、アスペクト比 4 のモデルにはより大きい風外力が作用しているが、大きい質量と剛性を持っているため、アスペクト比 5 のモデルより小さい風応答を示している。

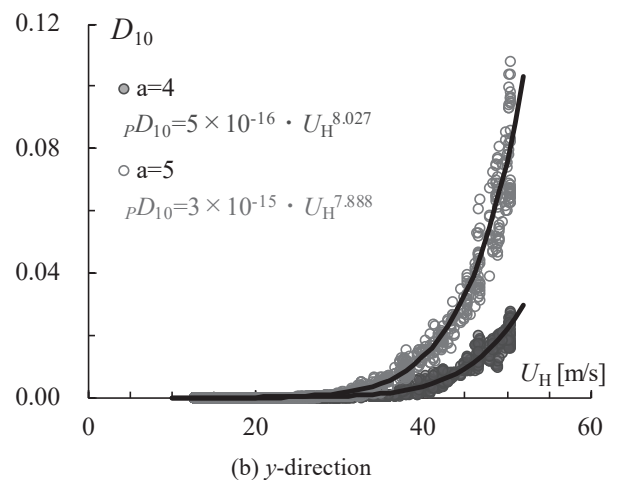
Fig. 8 に免震層の最大変形 $\delta_{0, max}$ を示す。頂部の最大応答変位と同様に、免震層の最大変形が台風継続時間の増加とともに増大する傾向が見られない。そして、風直交方向より、風方向の方が大きな応答を示している。

4.2 $D_{10} - U_H$ 関係式の作成

Fig. 9 に S500 の風方向 (x 方向) および風直交方向 (y 方向) 10 分間 D 値 D_{10} と頂部平均風速 U_H の関係を示す。



(a) x-direction



(b) y-direction

Fig. 9 $D_{10} - U_H$ relationship (S500)

解析結果より、平均風速の増大に伴い、10 分間 D 値も次第に増大することが確認できる。図内に示される黒曲線は 40 m/s 以降の解析結果より、最小二乗法を用いて算出

された近似曲線である。式(9)に関係式を用いた予測値 ${}_pD_{10}$ と頂部平均風速 U_H の関係式を示す。

$${}_pD_{10} = C \cdot U_H^a \quad (9)$$

4.3 予測値 ${}_pD$ と精算値 ${}_fD$ を比較

Fig. 10 と Table 3 に、異なるアスペクト比における免震ダンパーの疲労損傷度の精算値 ${}_fD$ と予測値 ${}_pD$ を示す。 ${}_fD$, ${}_pD$ は以下の式(10)~(11)で算出される。

$${}_fD = \sum {}_fD_{10}(U_H^i) \quad (10)$$

$${}_pD = \sum {}_pD_{10}(U_H^i) \quad (11)$$

図に示したように、サンプルにより D 値の大小関係が変化している。Sample 7 より Sample 8~10 のほうが継続時間が長い、Sample 7 が一番大きな D 値を示している。そのため、強風イベントの継続時間だけではなく、各 10 分間の平均風速の大きさも D 値の変化に影響を及ぼす。そして、 ${}_fD$ と ${}_pD$ はほぼ一致していることが確認できる。そのため、得られた $D_{10} - U_H$ の関係式が信頼できると考えられる。さらに、アスペクト比 4 よりもアスペクト比 5 のほうが D 値が大きいため、建物アスペクト比が疲労損傷度に与える影響が大きいと考えられる。

5 まとめ

本論では、台風シミュレーションを用いて、風向角が全時刻一定 (0°) の場合に、異なる建物アスペクト比が超高層免震建物における免震ダンパーの疲労損傷度に与える影響についての検討を行った。風応答も、疲労損傷度も、アスペクト比 4 よりアスペクト比 5 のほうが大きいということが確認できる。特に D 値についての比較において、その傾向が顕著であるため、建物アスペクト比が疲労損傷度に与える影響が大きいと考えられる。なお、精算値 ${}_fD$ と予測値 ${}_pD$ はほぼ一致であるため、将来 $D_{10} - U_H$ の関係式を用いて、 D 値を予測することができると考えられる。

今回の解析モデルは高さ 100m、辺長比 1、アスペクト比 4 と 5 の 2 種類のモデルであった。今後は高さや辺長比など対象建物の形状が異なる場合について検討を行う。さらに、風の入射角が 0° の場合だけでなく、角度を有する場合や、台風通過時のように時刻とともに風向が変化する場合についても検討を行う必要がある。

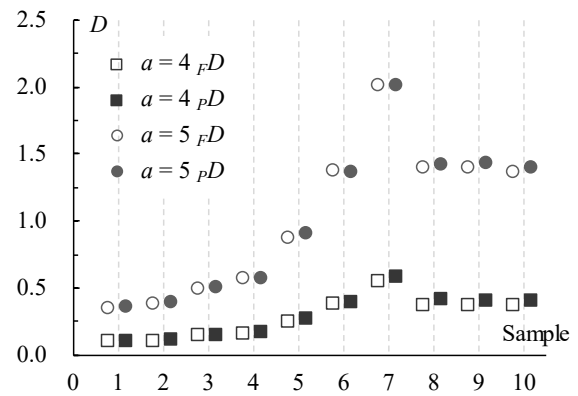


Fig. 10 Comparison of ${}_fD$ and ${}_pD$

Table 3 Comparison of ${}_fD$ and ${}_pD$

	a=4			a=5		
	${}_fD$	${}_pD$	安全率	${}_fD$	${}_pD$	安全率
Sample 1	0.093	0.102	1.095	0.338	0.352	1.039
Sample 2	0.097	0.110	1.136	0.374	0.382	1.024
Sample 3	0.143	0.144	1.013	0.485	0.500	1.031
Sample 4	0.151	0.165	1.090	0.561	0.571	1.019
Sample 5	0.240	0.260	1.085	0.865	0.900	1.041
Sample 6	0.373	0.391	1.049	1.368	1.355	0.990
Sample 7	0.542	0.581	1.074	2.006	2.011	1.003
Sample 8	0.368	0.404	1.097	1.390	1.414	1.017
Sample 9	0.361	0.402	1.112	1.393	1.430	1.026
Sample 10	0.367	0.403	1.099	1.362	1.397	1.025

謝辞

本研究は、日建設計株式会社、泉創建エンジニアリング、神奈川大学工学研究所大熊武司客員教授、東京工業大学佐藤研究室による新耐風設計法研究会の皆様の多大なる協力を頂きまして、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振幅依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 635 号, pp.75-82, 2009.1
- 2) 団栗直希, 西嶋一欽: 確率台風モデルに基づくハザード適合最尤台風の決定方法, 平成 29 年度京都大学防災研究所研究講演発表会, B19, 2018.3
- 3) 建築物荷重指針・同解説 (2004), 日本建築学会, pp.321-434, 2004
- 4) 丸川比佐夫, 大熊武司, 北村春幸, 吉江慶祐, 鶴見俊雄, 佐藤大樹: 風洞実験に基づく高層建物の多層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, B-1, pp.193-194, 2010.7
- 5) 鈴木雅靖, 竹中康雄, 近藤明洋, 飯場正紀, 大熊武司, 松井正宏: 高層免震建築物の風応答時刻歴解析による検討 (その 3 風向変化を伴う 3 方向風力時刻歴波形の作成), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.613-614, 2011.8

*1 東京工業大学 大学院生

*2 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.