

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	台風シミュレーションを用いた免震ダンパーの累積損傷評価
Title(English)	EVALUATION OF FATIGUE DAMAGE OF SEISMIC ISOLATION DAMPERS USING TYPHOON SIMULATION
著者(和文)	馬橋聖生, 佐藤大樹
Authors(English)	Sei Mabashi, Daiki Sato
出典(和文)	第25回風工学シンポジウム論文集, Vol. 25, , pp. 373-378
Citation(English)	PROCEEDINGS OF THE 25th NATIONAL SYMPOSIUM ON WIND ENGINEERING, Vol. 25, , pp. 373-378
発行日 / Pub. date	2018, 12

台風シミュレーションを用いた免震ダンパーの累積損傷評価

EVALUATION OF FATIGUE DAMAGE OF SEISMIC ISOLATION DAMPERS USING TYPHOON SIMULATION

○馬橋 聖生¹⁾ 佐藤 大樹¹⁾
Sei MABASHI¹⁾, Daiki SATO¹⁾

ABSTRACT

From the experience of numerous earthquake disasters, the interest in isolation structure is rising. Recently, seismic isolation structures have been actively adopted in high-rise buildings as the isolation technology improves. However, when adopting the seismic isolation structure in a high-rise building, its usefulness is questioned against wind loads having properties different from those of earthquakes, and one of the issues is to evaluate fatigue damage degree of the seismic isolation damper. In this study, we analyze the wind response using wind external force created based on the typhoon simulation and show the adequate wind direction and the validity of the equivalent duration in the 10 minute evaluation shown in the current wind resistance design guidelines.

Key Words: Wind force, 10 minute evaluation, Fatigue damage, Wind direction

1. はじめに

日本では多くの震災の経験から建物の安全性に対する意識が高まり、大地震時においても主架構が損傷しない免震構造の需要が高まった。最近では、免震技術の向上に伴い超高層建物にも免震構造が積極的に採用されるようになってきた¹⁾。風外力は地震と異なり、長時間続くという特徴があるため、その特徴を十分に考慮した設計が必要であると考えられる。その上、建物が高層化すると地震力に対して相対的に風荷重が大きくなる傾向があり、免震建物の場合はその傾向が顕著であるため、免震ダンパーの疲労損傷度（以下、 D 値）の評価を喫緊の課題のひとつとしている。

現行の耐風設計は、原則として構造物の弾性範囲に対する設計となっており、構造物の風応答時の最大荷重効果を評価して行われる。この時、風速の変動を平均化時間 10 分とした統計データを基にするため、耐風設計もこれに従って評価時間 10 分間として構築されている。また、累積的な影響を受ける D 値についても、この考えに基づき最大荷重効果が期待される最大平均風速発生時 10 分間における値を基に等価継続時間を決定し設計が行なわれている²⁾。しかし、10 分間評価の際に考慮すべき風向や等価継続時間の最適時間について明確に提示した例は少なく、また、免震層変形に影響される D 値では、強風イベントや用いる風洞実験結果によってばらつきが発生すること³⁾が懸念されている。

本報では、台風シミュレーションの結果を用い、検討地点に発生が予測される強風イベントを作成し、平均風速の変化形状・継続時間・風向をパラメータにとり時刻歴風応答解析を行ない、免震層の D 値の特性について、5 波のアンサンブル平均値を示す。

¹⁾ 東京工業大学

2. 検討用解析モデル概要

Fig. 1 に検討対象モデル概要を示し、Table 1 に解析モデルの諸元を示す。解析モデルは、超高層免震建築物を対象とした高さ $H = 100 \text{ m}$ の 11 質点せん断型モデルとし、辺長比 $B/D = 1$ とした正方形の面積を有している。上部構造は、1 次固有周期 ${}_uT_0 = 2.5 \text{ s}$ 、建物密度 ${}_u\rho = 250 \text{ kg/m}^3$ の総重量 ${}_uW = 98000 \text{ kN}$ とし、重量は高さ方向に一様であると仮定した。また、Fig. 1 に示される灰色の矢印は風外力を表しており、建物幅 B に対して正対する方向を風向 0° としている。

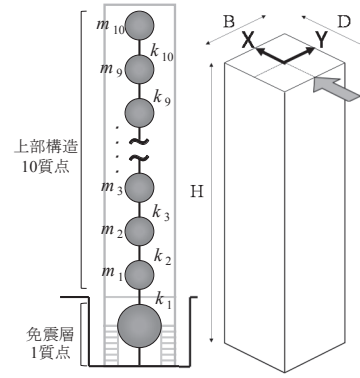


Fig. 1 Analysis model

Fig. 2 に上部構造特性を示し、Fig. 3 にダンパー、アイソレーター、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。上部構造の各層の剛性 ${}_uk_i$ は 1 次固有モードが直線となるよう式 (1) より求めた⁴⁾

$${}_uk_i = \frac{{}_u\omega^2 \cdot m_i \cdot {}_u\phi_i + {}_uk_{i+1} ({}_u\phi_{i+1} - {}_u\phi_i)}{{}_u\phi_i - {}_u\phi_{i-1}} \quad (1)$$

ここで、 ${}_u\omega$: 上部構造のみの s 次固有円振動数 ($= 2\pi/{}_uT_u$)、 m_i : i 層の質量、 ${}_u\phi_i$: 上部構造 i 層の s 次モードベクトルを表す。ただし、 ${}_uk_{i+1} = 0$ 、 ${}_u\phi_0 = 0$ とする。上部構造の構造減衰は上部構造の 1 次固有周期に対して $h = 2\%$ の剛性比例型とし、免震層には内部粘性を考慮しない。免震層は免震周期 ${}_1T_0 = 6.0 \text{ s}$ 、面密度 $\rho_b = 3644 \text{ kg/m}^2$ の重量 $W_b = 14284.5 \text{ kN}$ とした。

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 ($= 2.80 \text{ cm}$)、 α_{dy} : ダンパー降伏せん断力係数 ($= 0.04$)、 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。

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

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

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

Table 1 Analysis model specification

平面積	A	$[\text{m}^2]$	400
辺長比	B/D	$[-]$	1.0
高さ	H	$[\text{m}]$	100
上部構造	密度 ρ_u	$[\text{kg/m}^3]$	250
	1次周期 ${}_1T_u$	$[\text{s}]$	2.5
	減衰定数 h	$[\%]$	2.0
免震層	面密度 ρ_b	$[\text{kg/m}^2]$	3644
	免震周期 ${}_1T_0$	$[\text{s}]$	6.0
ダンパー降伏せん断力係数	α_y	$[-]$	0.04

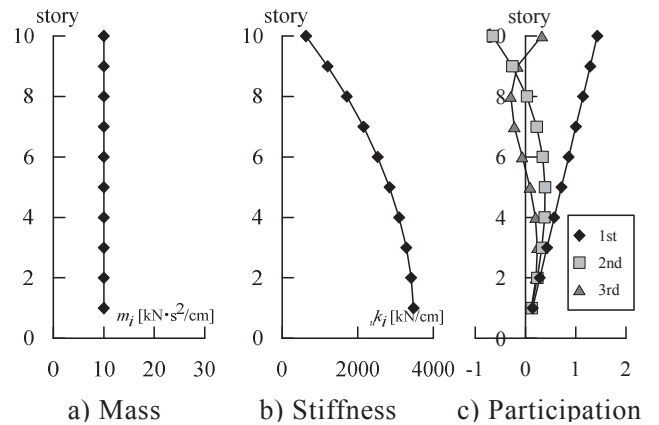


Fig. 2 Upper building characteristics

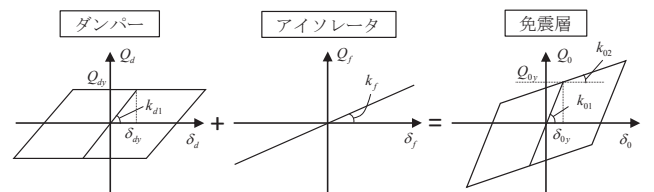


Fig. 3 Isolation layer restoring force characteristics

3. 入力風外力概要

3.1 強風イベントの風速変化時刻歴

解析モデルに入力する風外力は、台風シミュレーション⁵⁾を基に、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 年相当のものに近いものを 5 つ用意し作成する。本解析では、再現期間 500 年相当の風速 U_{500} を 40 m/s とした。

今回使用する強風イベントの時刻歴波形は、最大平均風速付近の継続時間が短いものと長いもの（以下、S500, L500）を各 5 サンプルずつ用意する。Fig. 4 (a), (b)に、台風シミュレーションより得られた頂部平均風速を、再現期間 500 年相当の 10 分間頂部平均風速 U_H へ増幅させた時刻歴波形を示す。なお、10 分間頂部平均風速 U_H は式 (8)より求めた²⁾。

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

ここで、 K_D ：風向係数 ($K_D = 1$)、 K_S ：季節係数 ($K_S = 1$)、 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。式 (8)より求めた 10 分間頂部平均風速 U_H は 50.33 m/s であった。

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。

3.2 強風イベントの風向変化時刻歴

Fig. 5 (a), (b)に、台風シミュレーションより得られた風向変化の時刻歴波形と本解析に用いるため置換した後の風向変化の時刻歴波形を示す（それぞれ Fig. 5 (a), (b)内に示す破線、実線）。本解析では、台風シミュレーションより得られた風向を、風洞実験を行なった風向に置換する。この際、各刻みの角度から正負 11.25°の範囲における風向をその範囲の支配角度へと置換（Fig. 6 参照）し、置換後の風向における風洞実験の結果を用いて風外力を作成している。

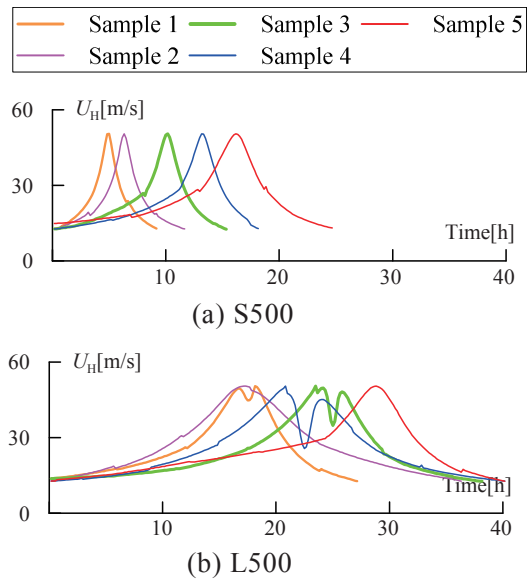


Fig. 4 Average wind speed

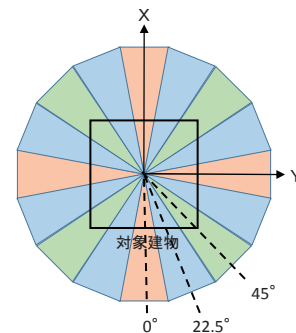


Fig. 6 Method of replacement of wind

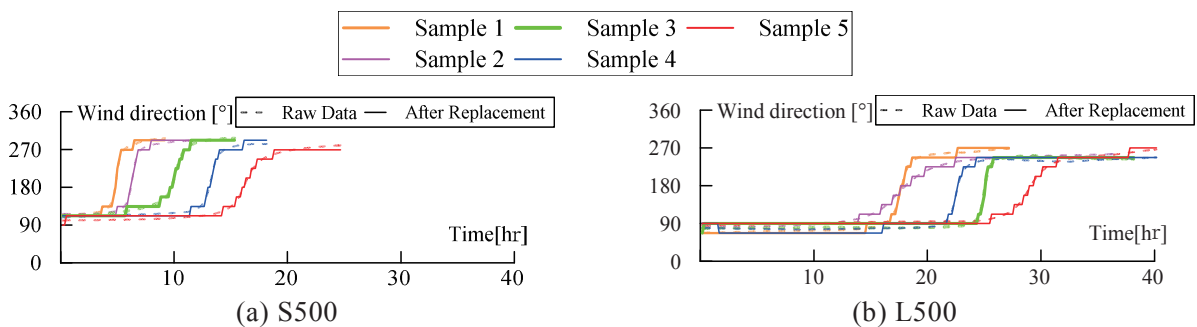


Fig. 5 Wind direction

3.3 風洞実験概要および長時間風外力の作成

構造物に作用する風外力の変動成分には、風洞実験結果⁶⁾を用いた。実験気流は「建築物荷重指針・同解説」²⁾の地表面粗度区分Ⅲの気流を目標に作成されたものである。風向は建物の X 方向（Fig. 1 参

照) に正対する角度を 0° とする。風力は時計回りに 22.5° ごとに X, Y 方向それぞれ計 528000 個のデータを 2 回に分けて計測されている。本報では、検討用風力波形は 0.05 s 刻みで作成した。

台風のように長時間の風外力を作成する場合、風洞実験に基づいた異なる時間、風向の風力波形を繋げる必要が生じる。このとき、不連続な接続により特異な応答が生じないように、それぞれの風力波形の負担率を徐々に変化させながら繋いでいる⁴⁾。また、解析開始時および終了時の過渡応答を避けるため、各風力波形の先頭および後尾 50 秒間にエンベロープを設けた⁷⁾。

本解析では強風イベントの最大平均風速発生時 10 分間において風向を固定した場合、強風イベント全時刻において同一の風向に設定した場合、台風シミュレーションの風向変化に基づき風向を変化させ、最大平均風速時 10 分間の風向を任意の風向に設定する場合の 3 ケースの風外力を作成する。Table 2 に、それぞれの解析条件を示す記号の一覧を示す。また、本解析では、10 series では 10 波、A series, M series では 5 波作成しアンサンブル平均値を示している。

Table 2 Wind direction parameters

10 series	10_000	10分間 0° 固定
	10_225	10分間 22.5° 固定
	10_450	10分間 45° 固定
A series	A_000	全時刻 0° 固定
	A_225	全時刻 22.5° 固定
	A_450	全時刻 45° 固定
M series	M_000	最大風速時 0°
	M_225	最大風速時 22.5°
	M_450	最大風速時 45°

Fig. 7 (a), (b) に本解析で作成した頂部風外力 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、S500-M_000-Sample 1 の X 方向, Y 方向それぞれの頂部風外力波形を示す。

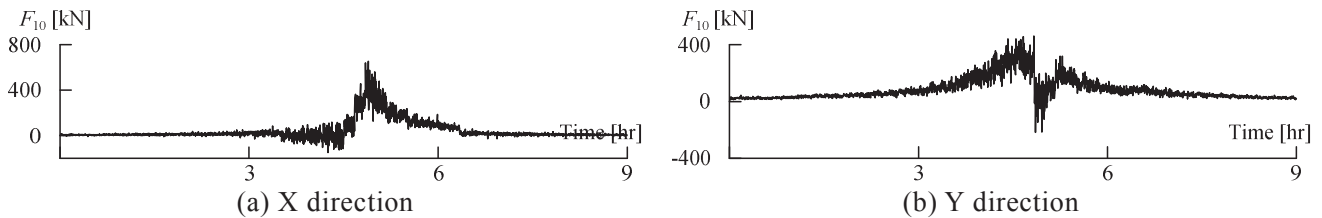


Fig. 7 Wind external force time history at 10th story of S500 - M_000 -

4. 時刻歴風応答解析結果

4.1 累積損傷評価

Fig. 8 (a), (b) に免震層変位の時刻歴波形を示す。ここでは例として、S500-M_000-Sample 1 の X 方向, Y 方向それぞれの免震層変位波形を示す。

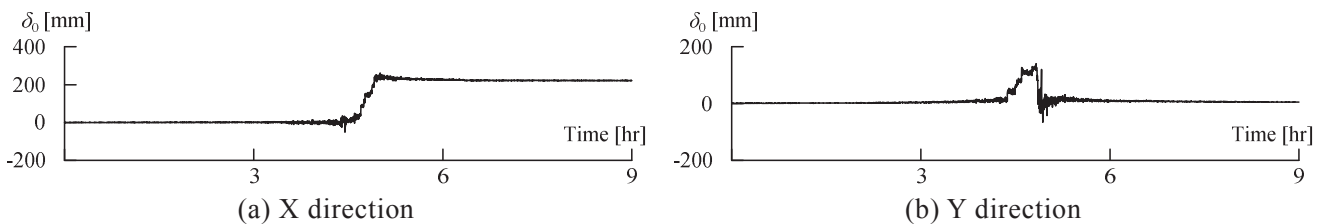


Fig. 8 Displacement of isolated layer of S500 - M_000 - Sample 1

Table 3 ~ 5 に、各解析条件における免震ダンパーの疲労損傷度 D 値を示し、Fig. 9 に、A series と M series における D 値の比較図を示す。 D 値を評価する方法として、免震層の時刻歴変位波形からひずみ振幅を算出し、それぞれの振幅に対し Miner 則を用いて算出する^{8, 9)}。免震ダンパーのひずみ振幅のカウントに関してレインフロー法を使用する。ここで、本解析では評価軸である X 方向, Y 方向においてそれぞれ一方向のみ独立で解析を行なった結果を示している。Table 3 に示す Wave 1 ~ 10 とは、風洞実験から得た層風力係数の内、異なったデータ範囲を用いて風外力を作成したことを示しており、10 分間における D 値の結果は 10 波のアンサンブル平均値として示す。同様に A series, M series においても、10 分間風外力を作成する際に用いる層風力係数の組み合わせを変えることにより異なった時刻歴波形を有する波形を 5 波作成し、アンサンブル平均値として示している。

Table 3 D value of 10 series

Case	x-direction			y-direction		
	10_000	10_225	10_450	10_000	10_225	10_450
Wave 1	0.003	0.002	0.002	0.032	0.006	0.002
Wave 2	0.003	0.001	0.001	0.027	0.006	0.001
Wave 3	0.001	0.002	0.002	0.033	0.008	0.002
Wave 4	0.003	0.001	0.003	0.049	0.006	0.003
Wave 5	0.004	0.003	0.001	0.042	0.006	0.001
Wave 6	0.003	0.001	0.001	0.041	0.006	0.001
Wave 7	0.004	0.002	0.002	0.040	0.007	0.002
Wave 8	0.004	0.001	0.002	0.038	0.007	0.002
Wave 9	0.002	0.002	0.002	0.059	0.008	0.002
Wave 10	0.001	0.001	0.001	0.031	0.007	0.001
Ave	0.003	0.002	0.002	0.039	0.007	0.002
x+y				0.042	0.009	0.003
C.V.	0.31	0.33	0.26	0.23	0.11	0.26

Table 4 D value of A series

	Sample	1	2	3	4	5
S500	A_000	0.16	0.20	0.25	0.25	0.41
	A_225	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05
	A_450	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
L500	A_000	0.65	0.93	0.67	0.63	0.64
	A_225	0.09	0.14	0.09	0.07	0.09
	A_450	0.04	0.06	0.03	0.03	0.04

Table 3 ~ 5 より、D 値については、10 series, A series の両解析条件において風向 0°の場合において最大値を示していることが確認できる。一方で M series については、最大値を示す風向に一定の傾向は示されず、強風イベントにより全ての風向で最大値を示すことを確認した。これは、累積的な影響が示される D 値では、最大平均風速以外のときに建物にとって最も厳しい状況が継続した場合、免震ダンパーの D 値は大きくなるという傾向が原因であると考えられる。また、変動係数について、10 series では約 0.1 ~ 0.3 程度を示すが、A series, M series では約 0.03 ~ 0.15 程度を示す事がわかっている。

Fig. 9 より、全サンプルにおいて A_000 が D 値の最大値を示しており、風向変化を考慮した M series の場合、最大平均風速時の風向に依存せず、サンプルにより D 値の大小関係が変化している。また、S500 においては、ほとんどのサンプルにおいて、強風イベントの継続時間の増大に伴い D 値も増大しているが、L500 ではあまり変化が無く、サンプルにより突出して大きな値を示す場合がある。

4.2 等価継続時間

Table 6 に 10_000 における D 値に対する A series の各風向における D 値の倍率を示し、Table 7 に 10_000 における D 値に対する M series の各風向における D 値の倍率を示す。

Table 6 D value of A series divided by 10_000

		A_000 / 10_000	A_225 / 10_000	A_450 / 10_000
S500	Sample 1	3.9	0.5	0.2
	Sample 2	4.7	0.6	0.3
	Sample 3	5.9	0.8	0.4
	Sample 4	6.0	0.9	0.5
	Sample 5	9.7	1.3	0.6
L500	Sample 1	15.4	2.1	0.9
	Sample 2	22.1	3.3	1.4
	Sample 3	16.0	2.2	0.8
	Sample 4	15.1	1.7	0.7
	Sample 5	15.2	2.1	1.0

Table 7 D value of M series divided by 10_000

		M_000 / 10_000	M_225 / 10_000	M_450 / 10_000
S500	Sample 1	1.6	0.5	1.6
	Sample 2	1.5	1.4	1.2
	Sample 3	2.1	1.4	1.8
	Sample 4	2.6	2.0	2.2
	Sample 5	2.8	3.3	3.6
L500	Sample 1	4.6	3.9	7.0
	Sample 2	5.8	8.2	8.8
	Sample 3	10.1	5.0	2.5
	Sample 4	10.6	4.2	3.0
	Sample 5	4.3	6.2	5.8

Table 6 より、D 値が最大値を示す風向 0°における強風イベント全時刻での D 値は 10 分間評価の約 4 ~ 22 倍程度であることが確認できる。一方で Table 7 より、風向変化を考慮した場合の強風イベント全時刻での D 値は 10 分間評価の約 1.5 ~ 11 倍程度であることが確認できる。

これより、最大平均風速時 10 分間の疲労損傷度評価を用いた等価継続時間に関して、実強風イベントを想定した平均風速変化・風向変化を考慮すると、最大で 110 分程度で等価な値を得られると考えられ、これに安全率を見込んだ値を提案する必要があると考えられる。

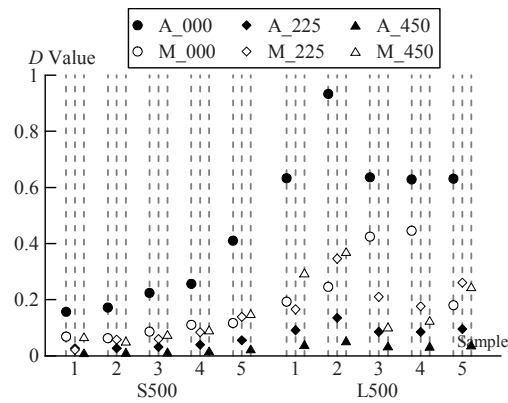


Fig. 9 D value comparison of A series and M series

Table 5 D value of M series

	Sample	1	2	3	4	5
S500	M_000	0.07	0.06	0.09	0.11	0.12
	M_225	0.02	0.06	0.06	0.08	0.14
	M_450	0.07	0.05	0.08	0.09	0.15
L500	M_000	0.19	0.25	0.42	0.45	0.18
	M_225	0.18	0.35	0.21	0.18	0.26
	M_450	0.30	0.37	0.10	0.13	0.25

5. まとめ

本報では、超高層免震建物などに風荷重が作用した際の免震ダンパーの応答特性を把握することを目的とし、検討対象建物の解析モデル、台風シミュレーションを基に風外力を作成し、アンサンブル平均値を示した。以下に、本報で得られた知見を示す。

- (1) 風向変化を考慮しない場合 (10 series, A series), 建物幅 B に正対する風向 0° の疲労損傷度 D 値が最大を示す結果になった。これは、風外力が最も大きく作用する角度であるため、免震層変位がほかの角度に比べ大きくなったことによるものと考えられる。
- (2) 強風イベント中の風向変化の有無について、強風イベント中に時々刻々と風向が変化する場合 (M series), D 値の最大値は最大風速時 10 分間の風向に関わらず一定の傾向を示さない。これは、風向の変化形状や建物形状などに依存すると考えられる。
- (3) 強風イベントの継続時間と D 値の関係性について、免震層の応答時間が増大するに伴い D 値が増大することが考えられるが、本解析では S 500 と L 500 でその特徴は異なり、S 500 では増加傾向を示したが、L 500 では一定の値に近い値を示す結果が多く確認された。
- (4) 最大平均風速時 10 分間の D 値を用いた等価継続時間は、A_000 で約 4~22 倍程度、M_000 で約 1.5~11 倍程度であることが確認できた。これより本解析モデルにおいては風向変化を考慮しない場合で最大 220 分、風向変化を考慮する場合で最大 110 分程度が妥当な値であると考えられる。

6. 今後の課題

本解析結果は、台風シミュレーションを用いた時刻歴風応答解析を特定の検討用解析モデルについて示したものである。そのため今後は、ダンパー量や免震周期、建物形状などを変化させたパラメータスタディを行い、等価継続時間に関するデータの備蓄を行なう必要があると考える。

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ご多大なる協力と、京都大学防災研究所共同研究 (平成 28 年度一般共同研究 28G-03) の成果によるものです。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会運営委員会：2015 年度免震制振建物データ集積結果, MENSIN, No.85, pp.37-42, 2014.8
- 2) 日本免震構造協会：免震建築物の耐風設計指針, pp.115-117, 2012.9
- 3) 齋藤元紀, 佐藤大樹, 吉江慶祐, 大熊武司, 片桐純治, 北村春幸：風力のサンプル数が超高層免震建築物の弾塑性風応答評価に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, 22 巻, 53, pp.65-70, 2017.2
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 村上智一, 佐藤大樹, 田村哲郎, 笠井和彦, 吉江慶祐, 普後良之, 北村春幸：風応答観測記録に基づく超高層免震建物の免震ダンパーの疲労損傷評価 (その 3 弾塑性風応答解析モデルを用いた提案手法の妥当性の検討), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1019~1020, 2017
- 9) 吉敷祥一, 大河原勇太, 山田哲, 和田章：免震構造用 U 字型鋼材ダンパーの繰返し変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 624 号, pp.333-340, 2008.2