

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風応答解析による超高層免震建物の免震ダンパーの疲労損傷評価 - 建物形状と風速レベルが疲労損傷度に与える影響 -
Title(English)	
著者(和文)	馬橋聖生, 佐藤大樹
Authors(English)	Sei Mabashi, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 597-600
Citation(English)	, , , pp. 597-600
発行日 / Pub. date	2018, 3

風応答解析による超高層免震建物の免震ダンパーの疲労損傷評価 ー建物形状と風速レベルが疲労損傷度に与える影響ー

構造ー振動

正会員 ○ 馬橋聖生*1 同 佐藤大樹*1

風応答観測 超高層免震建物 10 分間

平均成分 変動成分 弾塑性風応答解析

1. はじめに

本報では超高層免震建物に対し風荷重が作用した際の免震ダンパーの疲労損傷度の特性把握を目的としている。風応答時における免震ダンパーの疲労損傷度評価に関する先行研究¹⁾では、風応答実観測記録に基づく免震ダンパーの疲労損傷度評価がなされ、現行の日本の耐風設計において用いられる、最大荷重効果が期待される評価時間 10 分間毎に分離した時刻歴波形のみを用いた場合の疲労損傷度の合計値($\Sigma D'_{10}$)が、全時刻で評価した場合の疲労損傷度(D_F)を大きく下回することを示した(図1)。その原因として、風方向の振幅には、風荷重の平均成分による影響が大きく、周期 10 分を超える振幅が正当に評価されていないことを挙げている。しかし、ここで得られた知見は対象とされる建物形状が限定的であり、かつ再現期間が 100 年や 500 年といった大きな風速レベルの結果に対しても有用であるかは未解明である。

そこで本報では、超高層免震建物を想定した弾塑性解析モデルを作成し、実際に観測された強風イベントの平均風速から、風洞実験結果³⁾を基に再現期間 1 年, 100 年, 500 年相当の強風イベントを作成する。作成したそれぞれの強風イベントから得られた免震ダンパーの疲労損傷度と、先行研究¹⁾において示される $\Sigma D'_{10}$ と D_F との対応関係について検討する。

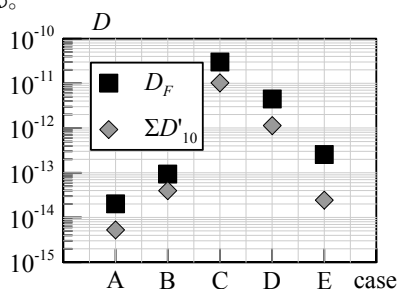


図1 観測記録における免震ダンパーの疲労損傷度¹⁾

2. 解析モデルおよび風外力の概要

2.1 解析モデルの概要

検討対象建物の解析モデル概要を図2に示し、解析モデルの諸元を表1に示す。解析モデルは、超高層免震建物を対象とした高さ $H=100$ m の 11 質点せん断型モデルとし、建物のアスペクト比に変化が及ばないよう平面積 A を一定としたまま辺長比 $D/B=1, 2, 3$ となるモデルを 3 つ作成した。上部構造は、1 次固有周期 ${}_uT_0=2.5$ s、建物密度 ${}_u\rho=2450$ N/m³ の総重量 ${}_uW=98000$ kN とし、重量は高さ方向に一樣であると想定した。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に式(1)により決定した²⁾。

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

ここで、 ${}_u\omega$: 上部構造のみの s 次固有円振動数 ($=2\pi/{}_uT$)、 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 ${}_fT=6.0$ s、面密度 ${}_b\rho=35711$ N/m² の重量 ${}_bW=14284.4$ kN とした。図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している。ここで、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。

$${}_dQ_y = ({}_uW + {}_bW) \cdot {}_d\alpha_y \quad (2)$$

$${}_dk_1 = {}_dQ_y \cdot {}_d\delta_y \quad (3)$$

$${}_fk = \frac{4\pi^2({}_uW + {}_bW)}{{}_fT \cdot g} \quad (4)$$

ここで、 ${}_dQ_y$: 免震層ダンパーの降伏耐力、 ${}_uW$: 上部構造の重量、 ${}_bW$: 免震層の重量、 ${}_dk_1$: ダンパーの初期剛性、 ${}_d\delta_y$: ダンパーの降伏変位 ($=2.80$ cm)、 ${}_d\alpha_y$: ダンパー降伏せん断力係数 ($=0.04$) ${}_fk$: 免震層におけるアイソレータの 1 次剛性、 g : 重力加速度を表す。

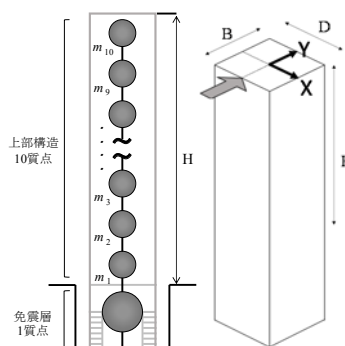


図2 弾塑性解析モデル概要

表1 弾塑性解析モデル諸元

		Model 1	Model 2	Model 3
D/B	[-]	1	2	3
D	[m]	20	28.4	34.8
B	[m]	20	14.2	11.6
A	[m ²]	400		
${}_u\rho$	[N/m ³]	2450		
${}_bW$	[N/m ²]	35711		
${}_uT_0$	[s]	2.5		
${}_fT$	[s]	6.0		

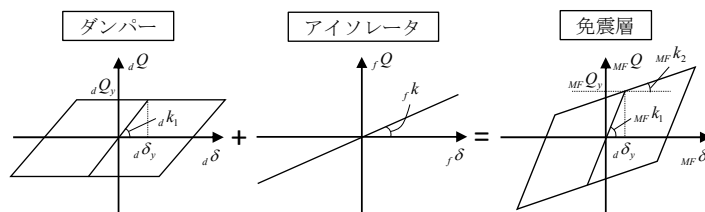
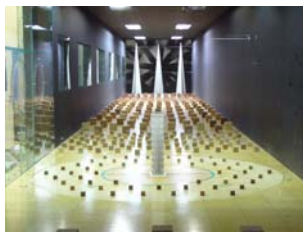


図3 免震層復元力特性

2.2 風外力の概要

構造物に作用する風外力は風洞実験結果³⁾を用いた。図4に風洞実験の概要を示す。実験気流は「建築物荷重指針・同解説」⁴⁾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。解析モデルと実験模型の縮尺は1/200となる。計測はサンプリング周波数1000Hzで行なった。風向は建物のY方向(図1)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0.05s刻みで作成した。また、1波あたり10分間相当のデータを作成するため12000個のデータを一つのユニットとして、10波のデータにわけて使用した。



- ・縮尺 1/200
- ・サンプリング周波数 1000Hz
- ・アナログフィルタ 400Hz
- ・頂部高さの実験風速 10m/s
- ・地表面粗度区分Ⅲ
- ・10層分計測

図4 風洞実験概要

3. 再現期間別強風イベントの作成方法

3.1 長時間風外力の作成方法

風外力は、風洞実験結果1ユニット(2.2節、前述)あたり、10分間の風外力を作成する。10分間相当の風力データから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、10分間の風力波形の最後尾付近の波形と始まりの部分とを式(5)、(6)に示すような三角関数 $\zeta(t)$ を50秒間分(1000ステップ)乗じて重ね合わせることで、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(図5)⁵⁾。また、解析開始時および終了時においての過渡応答を避けるため、強風イベントの各風力波形の先頭および後尾50秒間に式(5)、(6)に示す三角関数 $\zeta(t)$ を乗じることでエンベロープを設けた²⁾。

$$\zeta(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{T_{\zeta}} t \right) \quad (t = 0 \sim T_{\zeta}) \quad (5)$$

$$\zeta(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{T_{\zeta}} (T_{\text{end}} - T_{\zeta} - t) \right) \quad (t = \{T_{\text{end}} - T_{\zeta}\} \sim T_{\text{end}}) \quad (6)$$

ここで、 $\zeta(t)$: 風力波形に乗じる三角関数の値、

T_{ζ} : エンベロープを設ける時間

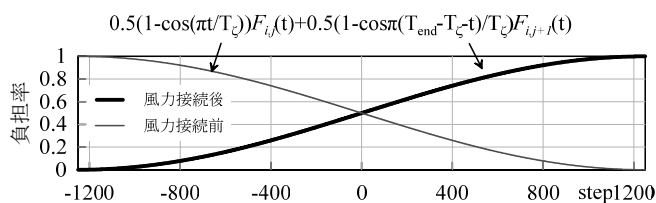


図5 風力の負担率の定義

3.2 再現期間ごとのおよび免震層変位波形の作成

強風イベントの風速は2007.10.27 東京工業大学 J2 棟にて観測された強風イベント(Case D)⁶⁾の風速を増幅させたものを使用する。風向は

風方向の免震ダンパーの疲労損傷度が顕著に示されるよう、見付け面積が大きくなるY方向(図1)に正対する方向に対し0°とする。図6にcase D⁶⁾の観測記録および各再現期間相当に増幅した風速を示す。ここで、各再現期間における頂部風速 U_H は「建築物の荷重指針・同解説」⁴⁾の東京都における地表面粗度区分Ⅲに則し、式(7)~(11)より算出し、各再現期間相当の頂部風速がcase D⁶⁾の強風イベント内の10分間の最大平均風速になるように全体の風速を増幅した。

$$U_H = U_0 k_{Rw} K_D K_S E_H \quad (7)$$

$$k_{Rw} = 0.63(\lambda_U - 1) \ln t_R - 2.9\lambda_U + 3.9 \quad (8)$$

$$\lambda_U = \frac{U_{500}}{U_0} \quad (9)$$

$$E_H = E_r E_g \quad (10)$$

$$E_r = 1.7 \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^a \quad (11)$$

ここで、 U_H : 設計風速、 U_0 : 基本風速(38m/s)、 k_{Rw} : 再現期間換算係数、 K_D : 風向係数($K_D=1.0$)、 K_S : 季節係数($K_S=1.0$)、 E_H : 基準高さ H における風速の鉛直分布係数、 U_{500} : 地表面粗度区分Ⅱの地上高さ10mにおける再現期間500年の風速、 E_r : 平坦とみなせる状況での風速の鉛直分布係数、 E_g : 小形地での風速の鉛直分布係数($E_g=1.0$)。

式(7)~(11)より100年、500年の頂部風速を算出した。再現期間1年についても文献4)より求めた。

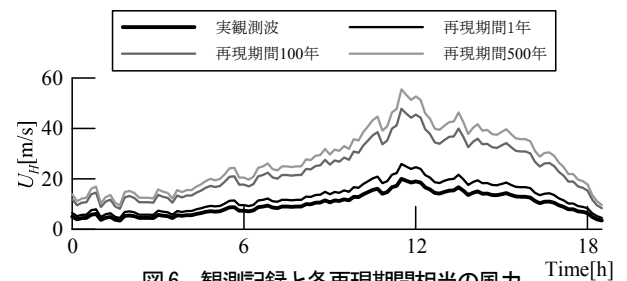


図6 観測記録と各再現期間相当の風力

強風イベントは、10分間において使用するユニットを入れ替えることでX方向、Y方向ともに10波を作成した。図7に解析モデルの頂部層風力の時刻歴波形の一例を示す。

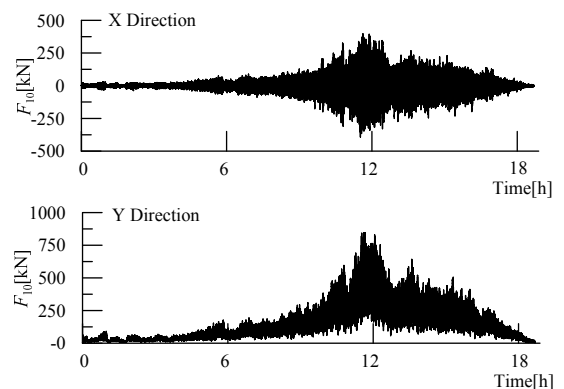


図7 頂部風力の時刻歴波形(再現期間500年)

X 方向においては、風外力の入力方向に対し直行しているため平均成分をほとんど持たず、Y 方向においては風方向の風力のため平均風力が時々刻々と変化している様子が分かる。このことから、本報では平均成分の影響を把握する目的で Y 方向についての免震層ダンパーの疲労損傷度を算出し、それぞれの再現期間について比較を行なう。

4. 風応答解析

4.1 平均成分と変動成分の分離方法

本報では、入力した強風イベントから得た免震層変位の時刻歴波形から平均成分を抽出し分離する必要がある。本節ではその方法を示す。

図 8. (a)に風応答時における 30 分間の免震層変位の模式図を示す。従来の様に 10 分間毎の平均値（図中黒線）を用いて平均成分を除くと図 8. (b)に示すように、波形のつなぎ目に実在しない波形を作り出してしまふ。そこで、連続的な変動成分が得られるように移動平均(600 秒間)を用いた平均成分と変動成分の分離を行なう。

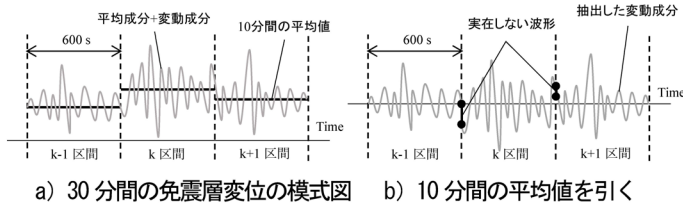


図 8 10 分間の平均値を用いた波形分離方法

4.2 強風イベントの再現期間別免震層変位

図 9 に各モデルに各再現期間相当の強風イベントを入力した際の Y 方向の免震層変位の時刻歴波形の一例を示し、図 10 に免震層履歴曲線の一例を示す。図 9 より、風荷重の入力方向における免震層変位では、平均成分が時々刻々と変化していることが確認できる。また、全ての再現期間において、辺長比 D/B が増大するにつれ最大変位、平均成分ともに増大していることが確認できる。これは、風荷重の受圧面積が増大したことが原因であると考えられる。

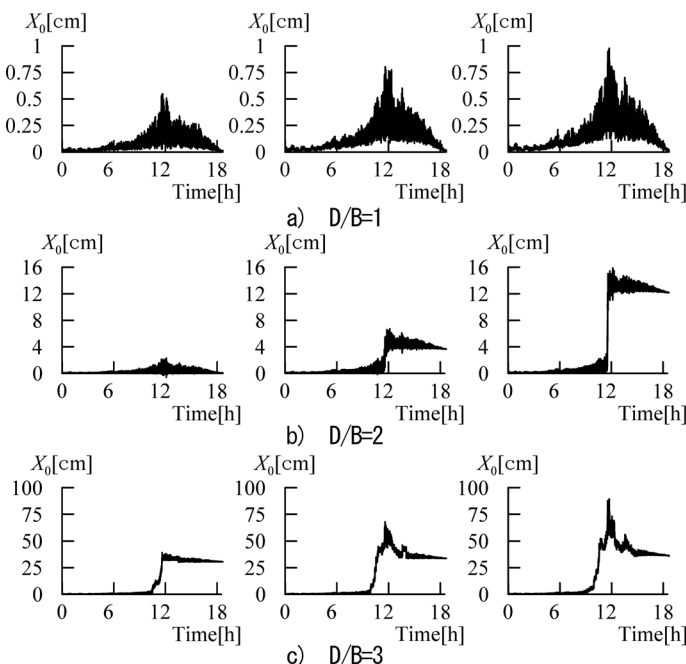


図 9 免震層変位の時刻歴波形

図 9, 10 より再現期間 1 年相当の強風イベントでは免震層変位が弾性範囲に留まり、免震ダンパーのエネルギー吸収効果が発揮されていないことが確認できる。また、Model 2, Model 3 の再現期間 100 年相当の強風イベント、Model 1, Model 2, Model 3 の再現期間 500 年相当の強風イベントを入力した場合で免震ダンパーが塑性範囲に達し、風荷重入力後に残留変形が確認できる。

4.3 疲労損傷度の算出方法

疲労損傷度 (D 値) は、Rinaflow 法⁷⁾より算出した免震層変位の全振幅 δ_k 毎に、Miner 則を用いて算出する。

$$D = \sum D_k = \sum_{k=1}^{np} \frac{N_k}{N_{f(\delta_k)}} \quad (12)$$

ここで、 D_k : 全振幅 δ_k の疲労損傷度、 np : 振幅の総数、 N_k : δ_k のサイクル数、 $N_{f(\delta_k)}$: δ_k における破断回数を表す。

破断回数 N_f は免震層の平均せん断変形角 γ (%) との関係 (式(13)) に、Newton 法を用いて数式を回帰することで算出する。なお、 γ_k は、全変位振幅 δ_k を免震ダンパー高さ h (374mm、で除した式(14)で表される⁸⁾。

$$\gamma_k = 35N_{f(\delta_k)}^{-0.15} + 3620N_{f(\delta_k)}^{-0.80} \quad (13)$$

$$\gamma_k = \frac{\delta_k}{h} \times 100 \quad (14)$$

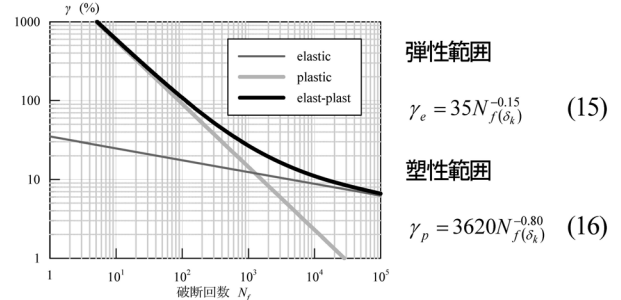


図 11 U 型ダンパーの疲労性能

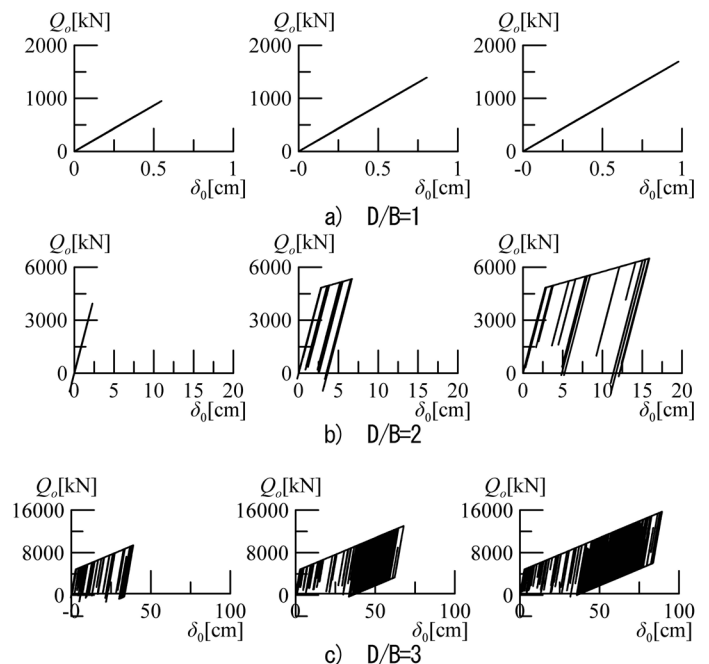


図 10 免震層履歴曲線

4.4 解析結果

図12に風応答解析により求めた各再現期間の強風イベントによる免震ダンパーの疲労損傷度 D_F と10分間毎の疲労損傷度の合計値 $\Sigma D'_{10}$ を示す。

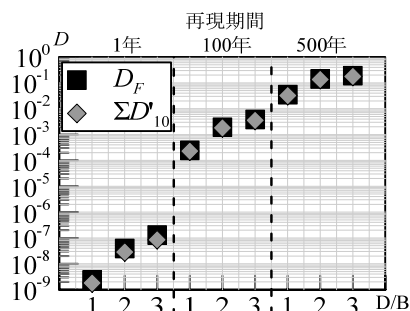


図12 風応答解析による免震ダンパーの疲労損傷度

図12より、風速レベルの再現期間が増大するにつれて、免震ダンパーの疲労損傷度が増大していることが確認できる。これは図9から分かるように、解析モデルに作用する風外力の増大に伴い免震層の最大変位が増大し、D値が増大していると考えられる。また同様に辺長比D/Bの増大により、風外力の受圧面積が大きくなると建物に作用する風荷重が増大し、免震層変位が大きくなることでD値が増大する。

強風イベントが作用している全時刻において Rainflow 法を用いて算出した精解値 D_F と免震層変位を10分間隔に区切り求めたD値を合計した値 $\Sigma D'_{10}$ を比較すると、再現期間1年相当の風速レベルにおいては D_F に対する $\Sigma D'_{10}$ の値は約0.7倍程度と小さな値を示しているが、風速レベルが再現期間100年、500年と大きな場合、約0.9倍程度とほとんど差がないことが確認できる。このことから、風速レベルが大きな場合、免震層変位の変動成分による疲労損傷度全体への影響が支配的であり、平均成分による影響が小さいことが確認できる。先行の研究⁷⁾では D_F に対する $\Sigma D'_{10}$ の値が0.1~0.6倍程度であると述べられているため、観測記録による免震ダンパーの疲労損傷度特性と、本解析によって得られた免震ダンパーの疲労損傷度特性では、疲労損傷度全体に対する変動成分の支配率が異なることが確認できる。

5. まとめ

本報では、建物形状と入力する風力レベルをパラメータとした超高層免震建物を想定した弾塑性風応答解析モデルを作成し、免震ダンパーの疲労損傷度特性を確認した。以下に知見を示す。

- (1) 風向を最大受圧面に対して0°として風荷重を入力する場合、辺長比の増大に伴い免震ダンパーの疲労損傷度も増大する。
- (2) 本解析では、免震層が弾性範囲で留まる場合と塑性範囲に至る場合の両方の結果を得たが、免震ダンパーが塑性した場合であっても、弾性範囲に留まっている場合と比べ、免震ダンパーの疲労損傷度の精解値 D_F に対する平均成分 $\Sigma D'_{10}$ の割合はほとんど変わらず、関連性が深くないことが確認できた。
- (3) 先行の研究⁷⁾で用いられている観測された平均風速に最も近い、風速レベルが再現期間1年相当の強風イベントの場合、精解値 D_F に対し $\Sigma D'_{10}$ の割合は比較的小さな値を示したが、先行研究と比べると大きく、観測記録による結果との間に差異が生じた。

6. 今後の検討内容

本研究では、建物形状と風速レベルを変化させた弾塑性風応答解析モデルを用い、先行の研究⁷⁾で示された観測記録を用いた免震ダンパーの疲労損傷度特性と風応答解析による免震ダンパーの疲労損傷度特性との間に差異があることを示した。しかし、現段階ではこの原因が明らかではないため、今後の検討で原因の追求が必要であると考ええる。

謝辞

本研究は、東京工業大学田村研究室、(株)風工学研究所、東京理科大学北村研究室、東京工業大学佐藤研究室による研究会の成果の一部です。本研究を進めるにあたり、神奈川大学工学研究所大熊武司客員教授、(株)泉創建エンジニアリング、(株)日建設計、東京理科大学北村研究室による新耐風設計法研究会から貴重な意見をいただきました。ここに記して、感謝の意を表します。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 村上智一、佐藤大樹、田村哲郎、普後良之、吉江慶祐、笠井和彦、佐藤利昭、北村春幸：強風時の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法の分析—その2 10分間毎のデータを用いた免震ダンパーの疲労損傷評価手法の提案、日本建築学会関東支部研究報告集(CD-ROM), 2045, pp.401-404, 2016.3
- 2) 佐藤大樹、笠井和彦、田村哲郎：粘弾性ダンパーの振動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
- 3) 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 矩形荷重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
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、2015
- 5) 鈴木雅晴、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
- 6) 村上智一、佐藤大樹、田村哲郎、普後良之、吉江慶祐、笠井和彦、佐藤利昭、北村春幸：強風時の観測記録に基づく超高層免震建物の実挙動の分析、構造工学論文集、Vol.62B, pp.329-337, 2016.3
- 7) 遠藤達雄、安在弘幸：簡明にされたレインフローアルゴリズム「P/V差法」について、材料、Vol.30, No.328, pp.89-93, 1981.1
- 8) S.S.Manson: Therman Stress and Low Cycle Fatigue, McGraw-Hill, 1966 Engineering, ASME, pp.565-571, 1961.12
- 9) 吉敷洋一、大河原勇太、山田哲、和田章：免震構造用U字形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

*1 東京工業大学