

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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1 平均成分と変動成分の分離方法の検討と免震ダンパーの疲労損傷評価
Title(English)	
著者(和文)	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
Authors(English)	Tomokazu Murakami, Daiki Sato, TETSURO TAMURA, Yoshiyuki Fugo, Keisuke Yoshie, KAZUHIKO KASAI, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 397-400
Citation(English)	, , , pp. 397-400
発行日 / Pub. date	2016, 3

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1 平均成分と変動成分の分離方法の検討と免震ダンパーの疲労損傷評価

構造—振動 正会員 ○ 村上智一^{*1} 同 佐藤大樹^{*1} 同 田村哲郎^{*1} 同 普後良之^{*2}
同 吉江慶祐^{*3} 同 笠井和彦^{*1} 同 佐藤利昭^{*4} 同 北村春幸^{*4}
風観測 超高層免震建物 風応答振幅
Rainflow 法 移動平均 疲労損傷評価

1. はじめに

近年、超高層建物にも免震構造が採用されることが多くなり¹⁾、地震応答や風応答に関する様々な研究報告がされている。免震ダンパーの疲労損傷評価もその一例であるが、風応答を対象とした疲労損傷評価の実例は未だ少ない。免震建物の高層化により建物の固有周期が長くなることで地震力は小さくなるのに対して、風荷重は大きくなるため、設計時や免震ダンパー交換時の目安を考える上で風応答における疲労損傷を調査する重要性が高まっている²⁾。現行の耐風設計は弾性設計で行なわれており、最大応答値のみを対象としているため統計的に安定していると考えられる10分間で評価を行なっているが^{3,4)}、継続時間が影響する疲労を評価する場合は、10分間では不十分である。また、現行の耐風設計では平均成分を有する風外力に対して、平均成分や変動成分の影響を考慮した方法を用いている。しかし、台風や強風時における免震層変位の実挙動は統計的な安定性を仮定している風洞実験と異なり、平均成分や風向、そして変動成分の標準偏差などが時々刻々と変化している⁵⁾。そこで本報では、時々刻々と変化する平均成分と変動成分を適切に分離し、各成分が疲労に与える影響を検討した上で、10分間毎のデータを用いて強風イベント全体における免震ダンパーの疲労損傷度を評価する事が出来る手法を提案する事を目的とする。本報その1では、実建物の観測記録を用いて、超高層免震建物の強風時における免震層変位の波形分離方法の検討および各成分が免震ダンパーの疲労損傷度に与える影響を分析する。

2. 建物概要および計測概要

東京工業大学すずかけ台キャンパス（横浜市緑区）では、超高層免震建物として図1に示す総合研究棟2号館（以後、J2棟）がある。この建物では複数層における応答加速度、免震層変位および建物頂部北側の風向風速が常時観測されている⁶⁻⁸⁾。J2棟は、2005年竣工、地上20階、塔屋2階、高さ91.35mの総合研究棟であり、塔状比約5.3、辺長比3の非常に扁平な形状の超高層免震建物である。免震層は天然ゴム系積層ゴム（NRB1100、NRB1200）計16基、鋼製ダンパー計14基、オイルダンパー2基から構成されている。そのうちNRB1100は、鋼製ダンパーと一体型の積層ゴムとして用いられている（12基、図2中■⁹⁾）。表1に鋼製ダンパー概要を示す。図2に免震層の概要を示す。免震層では、層間変形を広い範囲で高精度に計測できるように、小変形用（±100mmレンジ）と大変形用（±500mmレンジ）の変位計が並列で設置されている¹⁰⁾。本報では、微小地震や風応答を記録できる小変形用（X方向に2箇所、Y方向に1箇所、図4）の変位計の観測記録を用いる。X方向では、振れ中心が2つの変位計の中央にあることを確認しているため^{11,12)}、両変位計の平均を用いることで振れ成

分を除き並進成分を算出している。ただし、変位計による計測値には初期値にずれが生じている可能性があるため、各強風イベントの免震層変位から免震層が変位していない強風発生前の微風時の10分間の平均値を初期値のずれとしてゼロ点補正（オフセット）を行っている。なお、本報では、観測記録より頂部風速5m/s以下を免震層が変位しない微風と判断した。

3. 風応答観測記録概要

本報では、J2棟単体時期における観測データの内、最大瞬間風速が大きい強風イベントのデータ caseA（2006年3月19日）、caseB（2006年10月6日）、caseC（2007年9月6日~9月7日、台風9号(T0709)）、caseD（2007年10月27日、台風20号(T0720)）、caseE（2008年4月18日）を使用する。図3に各強風イベントの風速と風向を示す。図3(c)内の矢印は、最大瞬間風速発生時付近の風向変化を示す。なお、風向は10分間における最多風向を示している。caseAでは18時50分に、caseBでは15時40分に、caseCでは1時10分に、caseDでは16時20分に、caseEでは7時50分にそれぞれ最大瞬間風速を記録している。図3より、全ての強風イベントにおいて風速の平均成分が時々刻々と変化していることが分かる。横浜地方気象台における1991年6月~2011年5月（観測データは1時間毎のデータ）の20年間の日最大平均風速を対象として求めたグンベルパラメータを用いて再現期間を求めた。その結果、caseDの風速の再現期間は1年未満と推定されている^{13,14)}。各強風イベント発生時の風向を横浜地方気象台のデータと比較すると全強風イベントにおいて非常に高い相関性があると事が確認できる⁹⁾。なお、caseCは停電により風速データが欠損していると考えられる時間が複数存在するため、10分間の中で風速データが0m/sとなっているプロットを欠測と判断し除外している。また、横浜地方気

表1 鋼材ダンパー概要

ダンパー基数			降伏変位 (mm)	降伏荷重 (kN)	ダンパー部 高さh (mm)
一体型	別置型	計			
12	2	14	31.7	304	374



図1 J2棟の外観
(北西より望む)

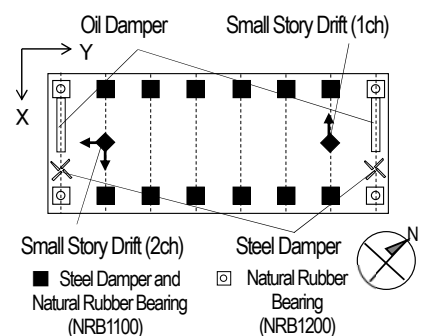


図2 免震層の概要⁹⁾

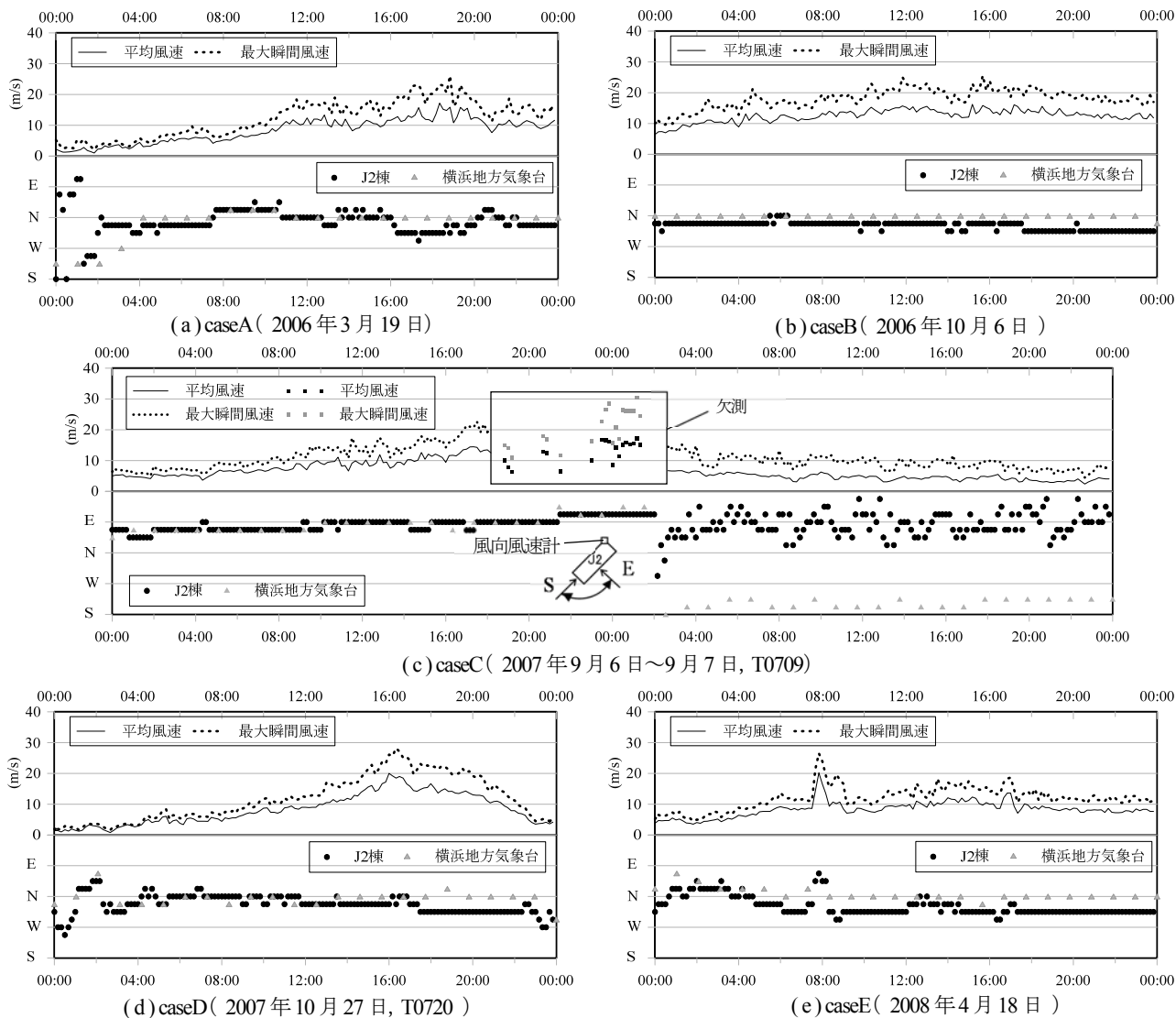


図3 各強風イベントの風速風向

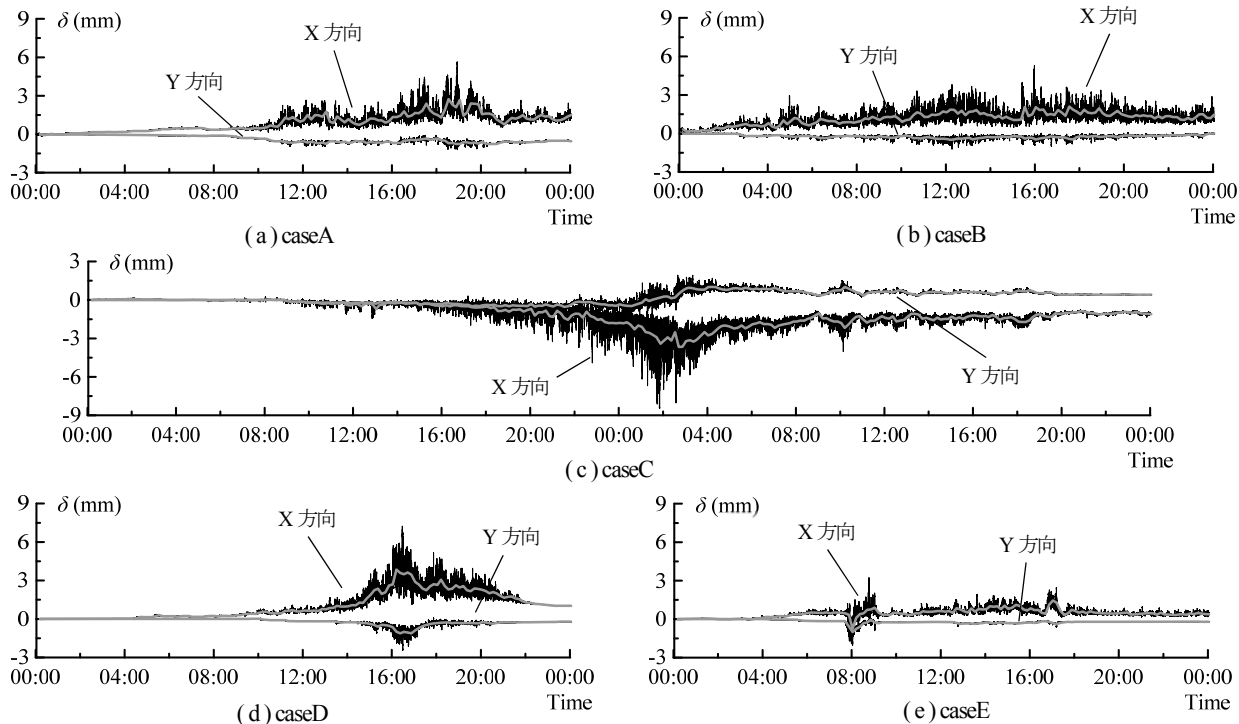


図4 免震層変位の時刻歴波形 (— 全成分 — 10分間の平均値)

象台のデータより、caseC の2時以降にJ2棟屋上の矢羽根式風向計は建物の陰に入っているため正しく計測されていないと考えられる。

4. 平均成分と変動成分の分離方法の検討

本章では、現行の耐風設計の方法を準用し、平均成分と変動成分を分けて評価するため、強風時における実挙動の免震層変位波形においても平均成分と変動成分の分離を試みる。

図4に各強風イベントの免震層変位の時刻歴波形を示す。灰色の線は10分間毎の平均値の時系列変化を示している。なお、図4では1日または2日の結果を示しているが、本報では前述したように風速5m/s以下を免震層が変位しない風速と判断し、風速5m/sから再び風速が5m/s以下になるまでを疲労損傷評価の対象時間としている。実際の台風や強風時における応答は風洞実験と異なり、平均成分が時々刻々と変化している(図4)。そのため、従来の10分間平均に対応しながら連続した変動成分が得られる分離方法が必要である。図5(a)は風応答時における30分間の免震層変位の模式図を示している。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5(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う。そこで本報では、連続的な変動成分が得られるように移動平均を用いた平均成分と変動成分の分離を検討する。表2に波形の分離方法の定義を示す。本報では、図5に示した分離方法をAveと呼び、移動平均時間を300秒、600秒、900秒で行なう。(以降、MA300、MA600、MA900と呼ぶ)。図6(a)(b)に波形分離結果の一例としてcaseDのX方向の全成分において最大値が発生した10分間の平均成分および変動成分の波形を示す。図6(a)より、最大変位発生時10分間の平均成分は、移動平均処理後も平均成分が大きな振幅を有しているMA300を除いて従来の10分間平均(Ave)と同等の値を示しており、平均成分に殆ど差がないことが分かる。また、図6(b)よりMA600、MA900の最大変位発生時10分間の変動成分の波形は10分間の平均値を除いた変動成分の波形に非常に近い値をとることが分かる。図7に波形全体の10分間毎の変動成分の標準偏差 σ_{Ave} に対するMA300、MA600およびMA900の変動成分の標準偏差 σ の比を示す。図7よりMA600、MA900の10分間毎の変動成分の標準偏差は σ_{Ave} と概ね等しくなっていることが確認でき、移動平均時間として600秒で十分であると判断出来る。図8にcaseDのX方向のMA600の波形全体の変動成分を示す。図8よりMA600による変動成分の波形は平均成分を概ね取り除けている事がわかる。以上より、強風時の免震層変位波形は、平均成分と変動成分の分離方法としてMA600を用いるものとする。

5. 免震ダンパーの疲労損傷評価方法

5.1 疲労損傷度算出方法

本報では、X方向およびY方向それぞれに対して損傷評価を行う。疲労損傷度Dは、JSSIで修正された¹⁵⁾ Rainflow法^{16, 17)}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。

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

ここで、 D_k : 全振幅 δ_k の疲労損傷度

np : レインフロー振幅の数

N_k : 全振幅 δ_k のサイクル数(1または1/2サイクル)

$N_{f(\delta_k)}$: δ_k における破断回数(式(2))である。

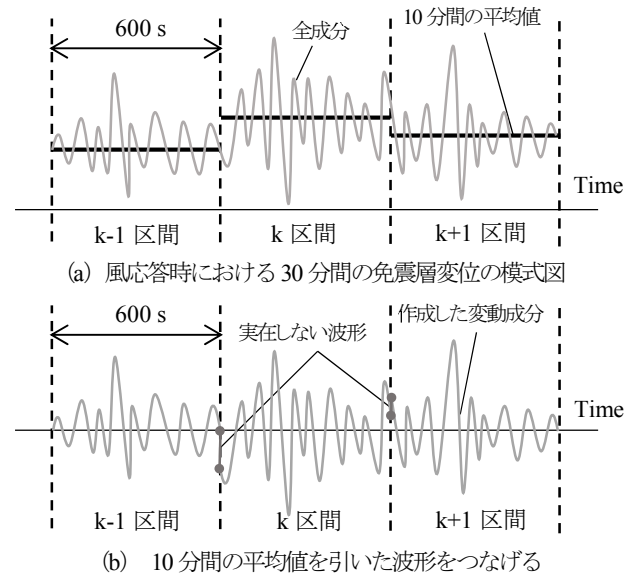


図5 10分間の平均値を用いた波形分離方法

表2 波形の分離方法の定義

分離法名	平均成分	変動成分
全成分	処理なし	
Ave	10分間毎の平均値	全成分 - 10分間毎の平均値
MA300	移動平均300秒	全成分 - 移動平均300秒
MA600	移動平均600秒	全成分 - 移動平均600秒
MA900	移動平均900秒	全成分 - 移動平均900秒

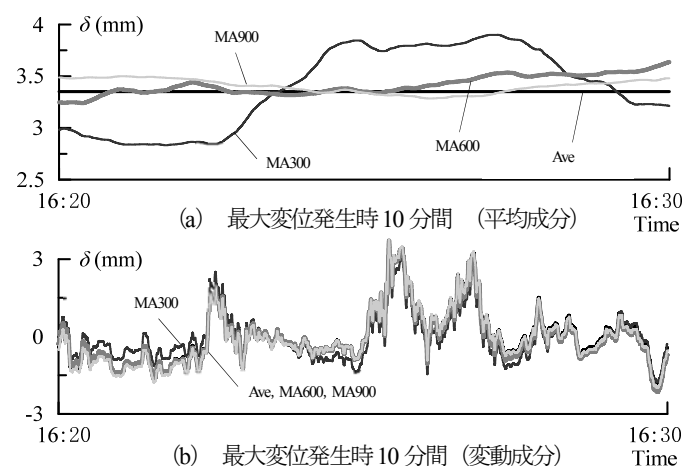


図6 波形分離結果の一例(caseD, X方向)

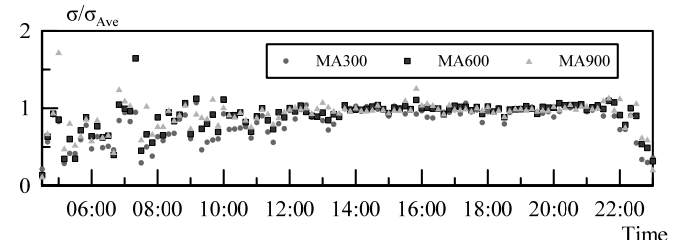


図7 波形全体の10分間毎の変動成分の標準偏差の比較

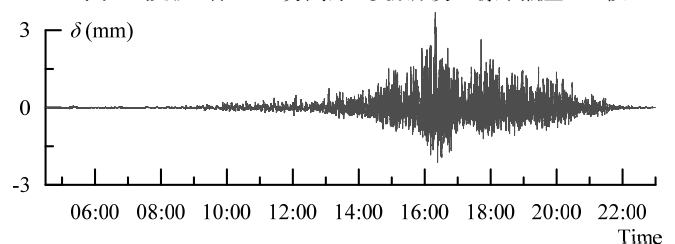


図8 波形全体の変動成分(caseD, X方向, MA600)

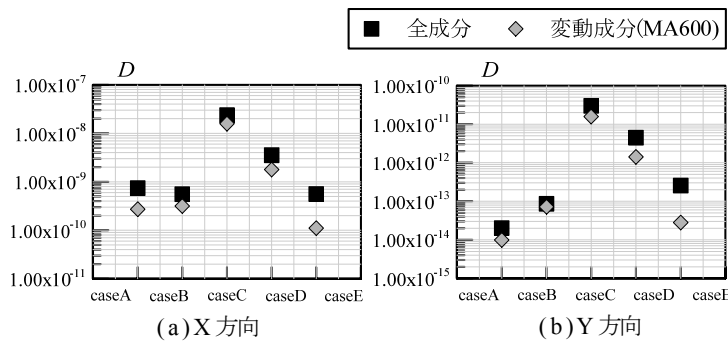


図9 全成分および変動成分の疲労損傷度の比較

鋼材ダンパーの疲労性能を評価する疲労曲線として、Manson-Coffin 式¹⁸⁾を適用する。破断回数 N_k は免震層の平均せん断変形角 γ_k (%) との関係式(2)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 (表1) で除した (式(3)) で表される¹⁹⁾。

$$\gamma_k = 35 N_{f(\delta_k)}^{-0.15} + 3620 N_{f(\delta_k)}^{-0.80} \quad (2)$$

$$\gamma_k = \frac{\delta_k}{h} \times 100 \quad (3)$$

本報では変位計の分解能より、D 値の算出は、0.1 mm 以下を除いた全ての δ_k を対象として D 値の評価を行う。

5.2 全成分と変動成分の疲労損傷度の比較

図9に各強風イベントの全成分および MA600 の変動成分の疲労損傷度の比較を示す。表3にその値を示す。図9より強風イベント、方向に関わらず全成分による D 値は MA600 の変動成分による D 値よりも大きい事が分かる。この D 値の差は、平均成分による D 値である。表3より、MA600 の変動成分の D 値は全成分の D 値に比べ約0.1~0.8 倍と強風イベント、方向により異なっており、台風と台風以外の違いは見られなかった。以上より、10 分間毎の D 値の合計で全体の D 値を評価する場合は免震層の応答性状を適切に考慮した平均成分の D 値の評価が必要であることが分かった。

6. まとめ

本報その1では、実建物の観測記録を用いて、超高層免震建物の強風時における免震層変位の波形分離方法の検討および各成分が免震ダンパーの疲労損傷度に与える影響を分析する。以下に知見を示す。

- (1) 強風時の実挙動における免震層変位波形は移動平均 600 秒を用いることで従来の 10 分間平均と同等に概ね平均成分と変動成分に分離できることを確認した。
- (2) 強風イベント、方向に関わらず、平均値の影響により全成分の D 値は変動成分の D 値より大きい値を示した。
- (3) 変動成分の D 値は全成分の D 値に比べ約0.1~0.8 倍と強風イベント、方向により異なっていることが分かった。よって、10 分間毎のデータで強風イベント全体の D 値を評価するためには、免震層の応答性状を適切に考慮した平均成分の D 値の評価が必要であることがわかった。

表3 全成分および変動成分の疲労損傷度

	方向	全成分	変動成分 (MA600)	変動成分/全成分
caseA	X	7.41×10^{-10}	2.72×10^{-10}	0.37
	Y	2.01×10^{-14}	9.86×10^{-15}	0.49
caseB	X	5.54×10^{-10}	3.17×10^{-10}	0.57
	Y	8.64×10^{-14}	7.18×10^{-14}	0.83
caseC	X	2.36×10^{-8}	1.58×10^{-8}	0.67
	Y	3.01×10^{-11}	1.57×10^{-11}	0.52
caseD	X	3.54×10^{-9}	1.78×10^{-9}	0.50
	Y	4.46×10^{-12}	1.41×10^{-12}	0.32
caseE	X	5.58×10^{-10}	1.11×10^{-10}	0.20
	Y	2.57×10^{-13}	2.80×10^{-14}	0.11

- 2) 西嶋一欽, 佐藤大樹: 変動風圧による免震装置の疲労損傷に対する設計・維持管理計画の枠組み構築に向けた基礎的検討, 建築物の安全性・信頼性 Vol.8 JCOSSAR2015 論文集, pp.575-579, 2015.10
- 3) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 4) 日本免震構造協会: 免震建築物の耐風設計指針
- 5) 扇谷匠己, 神田亮, 山下志道, 梁川幸盛, 佐藤大樹, 原田浩之, 中村達太郎: 台風通過時に高層免震建物に作用する風外乱の作成とその応答に関する研究, 構造工学論文集 Vol.59B, pp.427-433, 2013.3
- 6) 松田和浩, 笠井和彦: 東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた超高層免震建物の動的挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第704号, pp.1445-1455, 2014.10
- 7) Kazuhiro MATSUDA, Kazuhiko KASAI, Hajime YAMAGIWA and Daiki SATO : Response of Base-Isolated Building during the 2011 Great East Japan Earthquake, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, September 2012
- 8) Daiki Sato, Yoji Ooki, Hitoshi Monikawa, Satoshi Yamada, Hiroyasu Sakata, Hiroaki Yamanaka, Kazuhiko Kasai, Akira Wada and Haruyuki Kitamura : Evaluation of Seismically Isolated Tall Building Based on Long-term Monitoring, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 2008
- 9) 菊池岳史, 藤森智, 竹内徹, 和田章: メガブレースを用いた超高層免震鋼構造建築物の設計, 日本建築学会技術報告集, 第22号, pp.217-222, 2005.12
- 10) 大木洋司, 山下志通, 盛川仁, 山田哲, 坂田弘安, 山中浩明, 笠井和彦, 和田章: 超高層免震建物の長期観測システム構築に関する具体的な取り組み, 日本建築学会技術報告集, 第21号, pp.73-77, 2005.6
- 11) 佐藤大樹, 市原義孝, 大木洋司, 盛川仁, 山田哲, 坂田弘安, 山中浩明, 笠井和彦, 和田章, 北村春幸: 観測記録に基づく超高層免震建物の応答特性に関する研究 その1 建物概要および地震応答特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.309-310, 2008.9
- 12) 市原義孝, 佐藤大樹, 大木洋司, 盛川仁, 山田哲, 坂田弘安, 山中浩明, 笠井和彦, 和田章, 北村春幸: 観測記録に基づく超高層免震建物の応答特性に関する研究 その2 風応答特性および振動数の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.311-312, 2008.9
- 13) 佐藤大樹, 鈴木勇人, 田村哲郎, 普後良之, 中村修, 笠井和彦, 北村春幸: 超高層免震建物の観測記録に基づく風応答の分析, 第22回風工学シンポジウム, pp.251-256, 2012
- 14) Daiki Sato, Tetsuro Tamura, Yoshiyuki Fugo, Osamu Nakamura, Akira Katamura, Kazuhiko Kasai and Haruyuki Kitamura : Wind-induced Response Characteristic Evaluation of High-rise Seismic Isolated Building Based on Observed Records, Proceedings of the 14th International Conference on Wind Engineering (ICWE14), 2106, June 2015
- 15) 日本免震構造協会: 第7回技術報告会梗概集, pp.89-98, 2015.9
- 16) 遠藤遼雄, 安在弘幸: 簡明にされたレインフローアルゴリズム「PV 差法」について, 材料, Vol.30, No.328, pp.89-93, 1981.1
- 17) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 2012年改訂版, pp.95-98, 技報堂, 2012.6
- 18) SSManson : Therman Stress and Low Cycle Fatigue, McGraw-Hill, 1966 Engineering, ASME, pp.565-571, 1961.12
- 19) 吉敷祥一, 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

参考文献

- 1) 日本免震構造協会運営委員会: 2013年度免震制振建物データ集積結果, MENSHEIN, No.85, pp.37-42, 2014.8

- *1 東京工業大学
- *2 (株) 風工学研究所
- *3 (株) 日建設計
- *4 東京理科大学