

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	観測記録に基づく超高層免震建物の風応答変位振幅の確率密度分布と免震ダンパーの疲労損傷の分析
Title	
著者(和文)	村上智一, 佐藤大樹, 田村哲郎, 笠井和彦, 池上昌志, 吉江慶祐, 佐藤利昭, 北村春幸
Authors	Tomokazu Murakami, Daiki Sato, TETSURO TAMURA, KAZUHIKO KASAI, Masashi Ikegami, Keisuke Yoshie, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , pp. 549-552
Citation(English)	, , pp. 549-552
発行日 / Pub. date	2015, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009947938

観測記録に基づく超高層免震建物の風応答変位振幅の 確率密度分布と免震ダンパーの疲労損傷の分析

構造—振動

準会員 ○ 村上智一^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2} 同 田村哲郎^{*2} 同 笠井和彦^{*2}
同 吉江慶祐^{*3} 同 池上昌志^{*1} 同 佐藤利昭^{*1} 同 北村春幸^{*1}

風観測 超高層免震建物 風応答振幅
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、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。しかし、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、免震ダンパーが塑性化する場合が考えられる。従って、設計時や免震ダンパー交換時の目安を考えるためにも地震応答だけではなく、風応答における疲労損傷も調査することは重要である。

本報では、東京工業大学すずかけ台キャンパスの超高層免震建物である J2 棟を対象とし、超高層免震建物の免震層変位極値の確率密度分布と免震ダンパーの疲労損傷の分析結果を報告する。

2. 建物概要および計測概要

図1にJ2棟の立面図を示す。J2棟は、地上20階、塔屋2階、高さ91.85mの鉄骨造超高層建物であり、平面形状15.8m×46.2m、上部構造の塔状比が5に達する扁平な形状の建物である。1階の半分以上が周囲の土に埋もれている為、1階と2階の間に免震層を設けた中間免震構造を採用している。上部構造はCFT構造を用いた鉄骨構造、基礎および1階は鉄筋コンクリート造である。構造形式は、上部構造の梁間方向がブレース付ラーメン構造、桁行方向が純ラーメン構造となっている。免震層は直径1100mm、1200mmの天然ゴム系積層ゴム（NRB1100、NRB1200）計16基、鋼材ダンパー計14基、オイルダンパー2基から構成されている。そのうち直径1100mmのものは、鋼材ダンパーと一体型の積層ゴムとして用いられている。鋼材ダンパー概要を表1に示す。建築地盤は第1種地盤であり、建物の基礎形式は直接基礎となっている。なお、この建物の短辺方向をX方向、長辺方向をY方向と定義する。

の短辺方向をX方向、長辺方向をY方向と定義する。

図2に加速度計設置位置を、図3に免震層変位計配置図を示す²⁾。免震層（MF）には計13chの変位計が設置されている。J2棟内には計27chの加速度計、建物頂部には2つの風速計（南側：超音波式風速計、北側：三杯式風速計）が設置されている。データ処理として加速度記録は0.1-5.0Hzのバンドパスフィルターをかけている。免震層の変位波形は微風時の変形を全体から引き、データの先頭に0を加えることで、はじまりの変位を0にオフセットしている。小変形用の変位計はX方向のみ2つ計測している為（図3）、X方向はF022とF040の変位計に同処理を行った後の両変位計の平均値を用いている。

3. 風応答観測記録概要

本報では、観測記録の中で最大瞬間風速が大きいT0709（2007年9月6日～2007年9月7日）、T0720（2007年10月27日）を使用する。表2に風観測記録の概要を示す。図4にT0709およびT0720接近時の風速と風向および免震層変位の全時刻履歴波形を示す。図内の数値は免震層変位最大値（絶対値）を示す。図5にT0709およびT0720の経路を示す。T0709およびT0720発生時に南側の超音波式風速計のデータが全日欠損している為、T0709、T0720は共に北側の三杯式風速計での結果を示している。なお、最大瞬間風速については平均化時間を3秒間としている。表2より、最大瞬間風速に関してはT0709の方が大きいことが分かる。T0907は9月7日で1時10分、T0720では、16時20分に最大瞬間風速を記録しているが、T0907の風速のピーク帯においてデータの欠損がいくつか確認される。免震層変位は、T0709においてX方向は2007年9月7日の1時40分に、Y方向は同日の2時30分に最大となっており、T0720においては16時20分に両方向が最大

表1 鋼材ダンパー概要

名称	ダンパー本数			降伏変位 (mm)	降伏荷重 (kN)	ダンパー部 高さh (mm)
	X	Y	計			
NSUD55	2	2	4	31.7	304	374

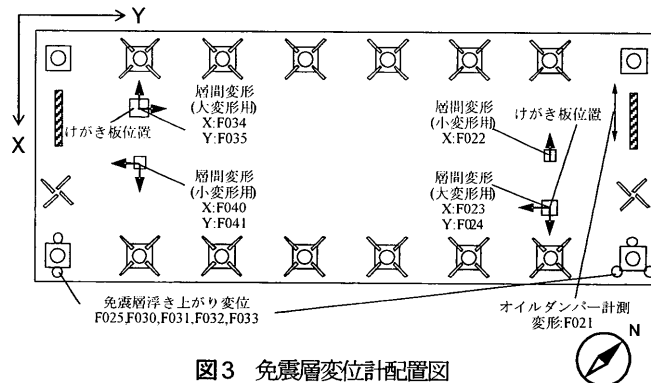


図3 免震層変位計配置図

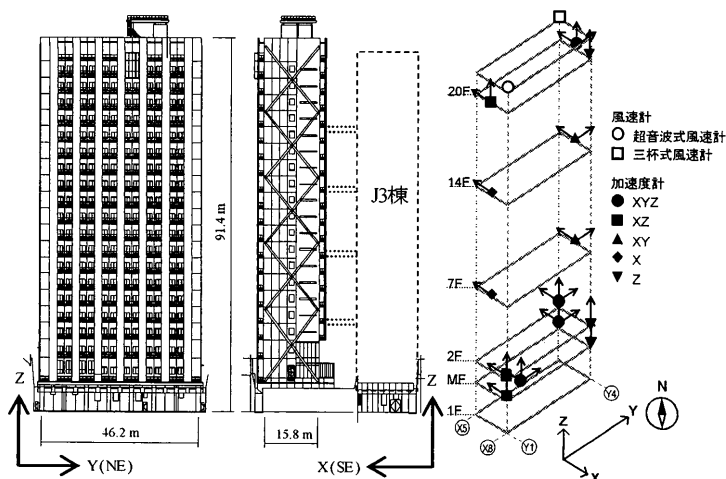


図1 J2棟立面図

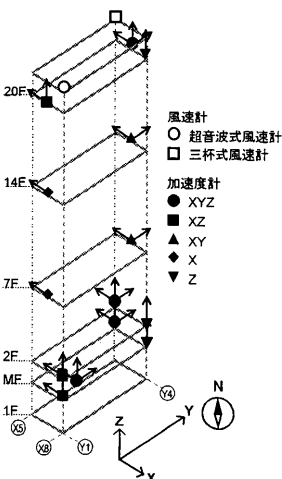
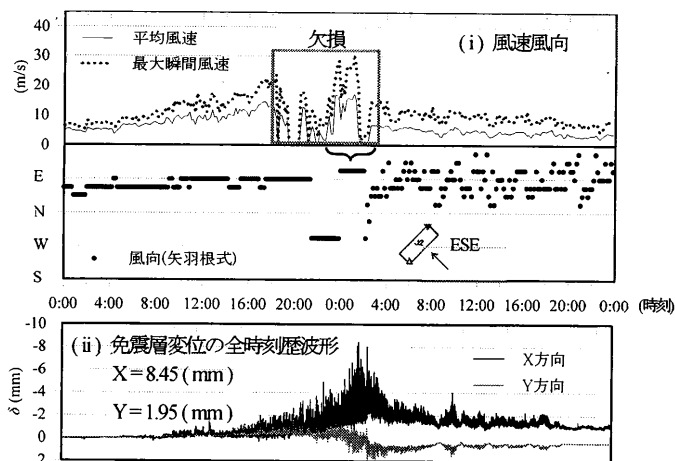
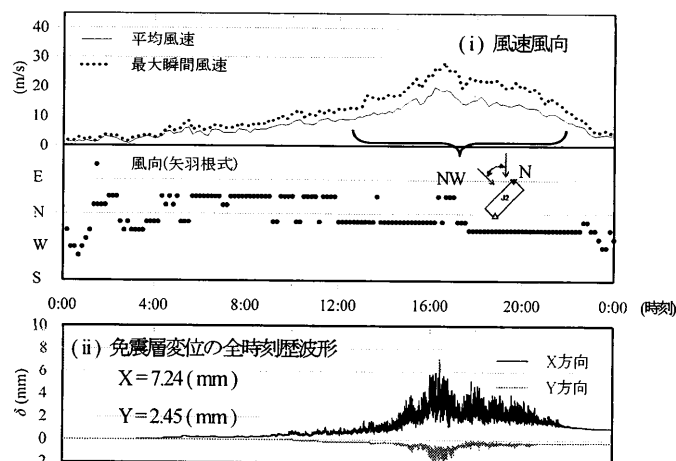


図2 加速度計設置位置



(a) T0709 (2007.9.6~2007.9.7)



(b) T0720 (2007.10.27)

図4 台風接近時の風速風向および免震層変位の全時刻履歴波形

となっている。図4より、両台風が過ぎ去り、風速が落ち着いた後にも平均変位が存在していることが確認できる。これより、両台風が通過した後に残留変形が生じていると考えられる³⁾。

図6に建物頂部(20階)で最大加速度を記録した時刻における、北側の加速度計の最大加速度とその標準偏差の高さ方向分布を示す。T0709においてX方向は2007年9月7日の2時30分に、Y方向は同日の1時40分に最大となっており、T0720においては16時20分に両方向が最大となっている。図6より、最大瞬間風速の大きいT0709のほうが各階で加速度が大きくなっていることが分かる。また、上層階になる程最大加速度と標準偏差が大きくなる傾向を示している。図7に最大変位発生時10分間の免震層変位のオービットを示す。図内の数値は免震層変位最大値(絶対値)を示す。なお、図7においてT0709は免震層の最大変位発生時間がX方向とY方向で異なるためX方向が最大となる1時40分での結果を示している。図7よりT0709のY方向のみ正側と負側にまたがっている。X方向の変位はT0709の方が大きい、Y方向の変位はT0720の方が大きいことが分かる。

4. 免震層変位極値の確率密度分布の分析

図8にT0709およびT0720の台風全体における免震層変位極値(全変位振幅)の確率密度分布を示す。なお、免震層変位極値は、免震層変位の時刻履歴波形にRainflow法⁴⁾を用いて算出した。 Δ_i は全変位振幅区間 i の中央値を示す。ただし、確率密度分布の算出において、変位計の分解能²⁾より0.1mm以下の全変位振幅は無効と判断し、確率密度分布からは除外する。図内の数値は免震層変位の時刻履歴波形の標準偏差 σ を示す。各台風の方法ごとに比較すると、X方向とY方向では異なった形状をしていることが分かる。短辺方向であるX方向に比べ、長辺方向であるY方向は殆ど変位せず、両台風ともY方向の最大変位はX方向の約3割程度であった。各台風のX方向同士の分布形状にほとんど違いがないといえるがY方向はT0709が1mm付近に集中した形状となっている。 σ において、T0709の場合、Y方向はX方向の2分の1の値であるのに対し、T0720の場合、Y方向はX方向の4分の1程度の値であった。

次に、免震層の最大変位発生時10分間と台風全体における免震層変位極値(全変位振幅)の確率密度分布の比較を行う。本報では、図

表2 風観測記録概要

名称	年月日	最大平均		最大瞬間		平均風速 (m/s)
		風速	風向	風速	風向	
T0709	07/09/06, 07	17.2	ESE	30.6	ESE	6.3
T0720	07/10/27	20	NNW	28.2	NNW	8.3

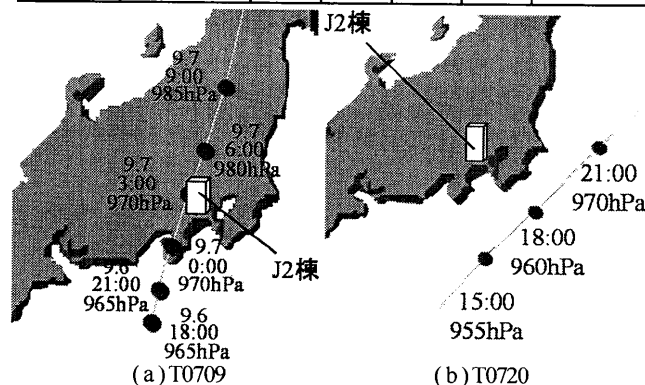


図5 台風の経路

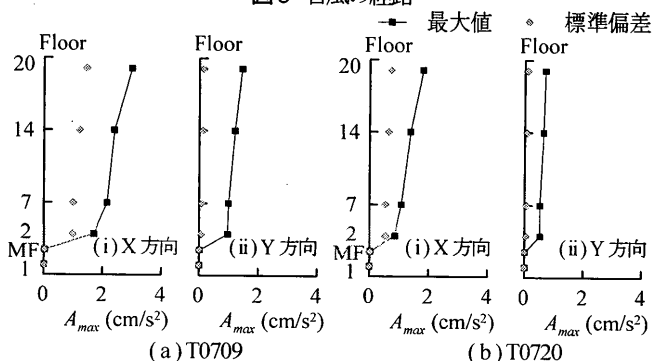


図6 最大加速度高さ方向分布

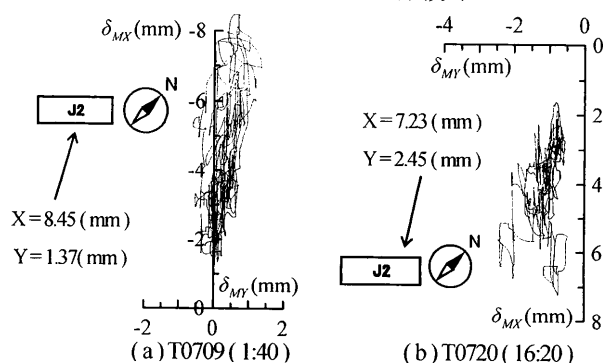


図7 最大変位発生時10分間の免震層変位のオービット

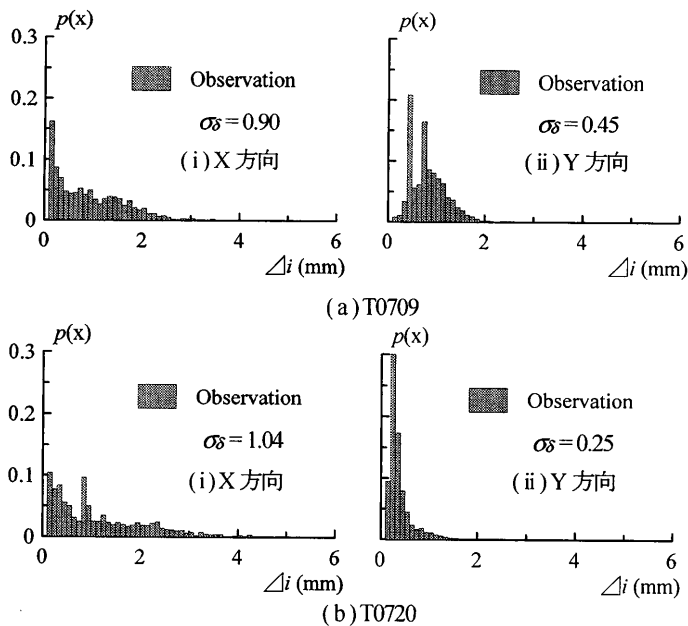


図8 免震層変位極値の確率密度分布（台風全体）

4より、両台風において最大変位発生時10分間の風向は建物のX方向に正対しているため、X方向を風方向、Y方向を風直交方向であると考え。図9にT0709およびT0720の最大変位発生時10分間の確率密度分布を示す。図内の数値は σ_ξ を示す。図9より台風毎に見ると、最大変位発生時10分間の確率密度分布は台風全体の確率密度分布と比べ、分布形状は殆ど変わらないといえるが、 σ_ξ は、両方向で最大全変位振幅が大きいT0709の方が大きい。方向毎に見ると、X方向は台風全体の方が分布形状が緩やかであるが、Y方向の分布形状は殆ど変わらないといえる。 σ_ξ を見ると、台風全体と最大変位発生時10分間の σ_ξ の大小関係に決まった傾向がないことが分かる。弾塑性系応答の風直交方向におけるゼロクロスピーク変位の確率密度分布はレーリー分布に近似出来る事が解析により確認されている⁹⁾。レーリー分布の確率密度関数は以下の式で表される。

$$p_{\text{Rayleigh}}(\xi; \sigma_\xi) = \frac{\xi}{\sigma_\xi^2} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\xi^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 ξ : 確率変数、 σ_ξ : 免震層変位極値の標準偏差であり、確率密度関数の算出に用いる、標準偏差の算出においても確率密度分布と同様に0.1mm以下の全変位振幅を無効と判断する。図9(a)(ii)、(b)(ii)より、風直交方向では免震層変位極値の確率密度分布はレーリー分布で概ね近似出来る事が観測記録からも確認できた。

5. 免震ダンパーの疲労損傷の分析

5.1 疲労損傷度評価方法

本報では、X方向およびY方向それぞれの1方向の免震層変位を対象として損傷評価を行う。疲労損傷度Dは、図8に示した全変位振幅区間 i の中央値 Δ_i 毎に、Miner則を用いて算出する。

$$D = \sum D_i = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_f} \quad (2)$$

ここで、 D_i : 全変位振幅区間 i の疲労損傷度（区間損傷度）

N_i : 全変位振幅区間 i の中央値 Δ_i の繰返し回数

N_f : Δ_i における破断回数（式(3)）である。

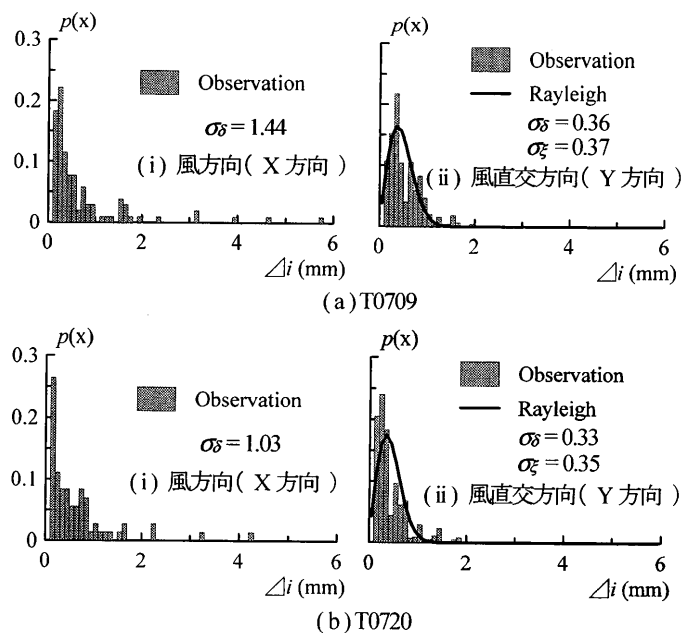


図9 免震層変位極値の確率密度分布（最大変位発生時10分間）

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⁹⁾を適用する。破断回数 N_f は免震層の平均せん断変形角 γ (%) との関係式である式(3)に、ニュートン法を用いて数式を回帰することで算出する。なお、 γ は、全変位振幅 δ_i を免震ダンパー高さ h （表1）で除した（式(4)）で表される⁷⁾。

$$\gamma_i = 35 N_f^{-0.15} + 3620 N_f^{-0.80} \quad (3)$$

$$\gamma_i = \frac{\delta_i}{h} \times 100 \quad (4)$$

ここで、全変位振幅 δ_i には全変位振幅区間 i の中央値 Δ_i を用いる。図10に上記の方法により算出した全変位振幅損傷図とその拡大図を示す。区間損傷度 D_i はそれぞれの全変位振幅区間 i における中央値 Δ_i の繰返し回数 N_i を1回と仮定した結果を示している。なお、本報では変位計の分解能より、D値の算出は、0.1mm以下の全変位振幅を除いた全ての Δ_i を対象として行う。

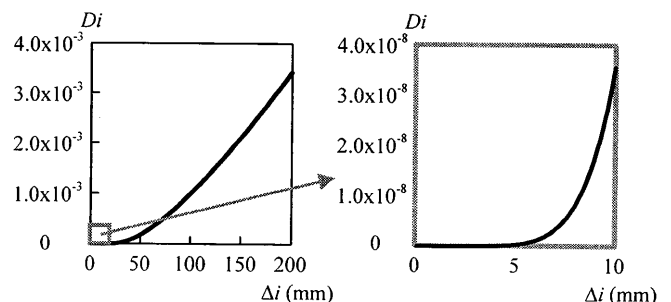


図10 Manson-Coffin式より算出した全変位振幅損傷図

表3 免震ダンパーの疲労損傷度

名称	方向	D値（全体）	D値（10分間）
T0709	X	6.77×10^{-8}	1.57×10^{-8}
	Y	1.42×10^{-8}	2.38×10^{-11}
T0720	X	3.30×10^{-8}	4.33×10^{-9}
	Y	5.35×10^{-10}	1.24×10^{-11}
本震 （三陸沖）	X	0.013	—
	Y	0.013	—
余震 （茨城県沖）	X	1.99×10^{-4}	—
	Y	0.002	—

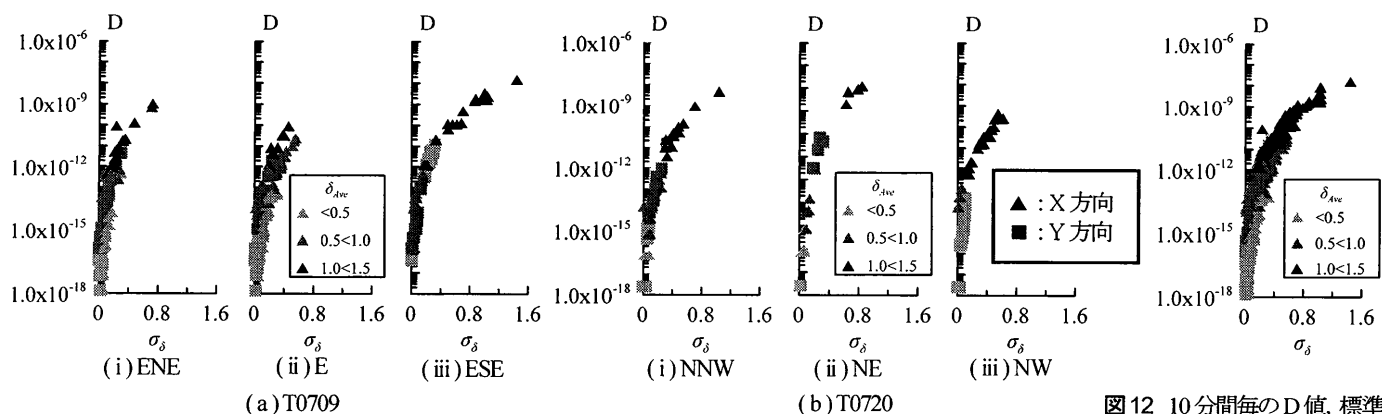


図 11 各風向と 10 分間毎の D 値、標準偏差、平均変位の関係

図 12 10 分間毎の D 値、標準偏差、平均変位の関係

5.2 免震ダンパーの疲労損傷度の分析

表 3 に T0709 および T0720 の台風全体、最大変位発生時 10 分間、東北地方太平洋沖地震の本震（最大変位：X=62.8mm, Y=97.4mm）および余震（最大変位：X=33.1mm, Y=67.9mm）の D 値を示す。東北地方太平洋沖地震の D 値およびその算出過程については文献 8）を参照されたい。表 3 より T0709, T0720 の D 値は東北地方太平洋沖地震の本震、余震の D 値に比べ極めて小さいことが分かる。各台風の D 値を比較すると台風全体、最大変位発生時 10 分間共に最大全変位振幅の大きい T0709 の方が大きいことが分かる。最大変位発生時 10 分間に対する台風全体の D 値の割合は、T0709 の X 方向で約 23%、Y 方向で約 0.2%、T0720 の X 方向で約 13%、Y 方向で約 2%と各台風全体と最大変位発生時 10 分間の D 値の比率に大きな違いがあり、その違いは各台風、各方向で異なる。これは、図 10 の拡大図を見て分かるように風応答のような小さい振幅レベルのものに関しては最大全変位振幅の大きさが D 値に大きな影響を与えるためだと考えられる。

5.3 疲労損傷度と標準偏差の比較

図 11 に各風向の 10 分間毎の免震層変位の D 値、標準偏差、平均変位の関係を示す。各台風の風向は図 4 の台風全体の風向から頻度が高い順にそれぞれ 3 つを選定している。なお、平均変位は絶対値として結果を示している。図 11 より、10 分間の標準偏差が大きい程 D 値が大きくなる傾向を示すことが分かる。平均変位も同様の傾向を示している。各台風で風向毎に比較すると、T0709, T0720 は共に分布形状に殆ど違いはなく、概ね一致しているといえるが、図 11(a) (iii) より、T0709 の方がやや大きい値をとっている分布が存在することが分かる。これは、5.2 節で述べたように風応答変位のような小さい振幅レベルのものに関しては最大全変位振幅の大きさが D 値に大きな影響を与えるためであると考えられる。図 12 に各台風の 10 分間毎の D 値の全プロットを示す。図 12 より、風速の大きさや風向、免震層最大変位の相違に関わらず分布形状は概ね一致しており、上記で述べた傾向に沿っている。これより、台風や風向で 10 分間の D 値は免震層変位の標準偏差と平均変位で評価できる可能性がある。

6. まとめ

本報では、東京工業大学すずかけ台キャンパスの超高層免震建物である J2 棟を対象とし、超高層免震建物の免震層変位極値の確率密度分布と免震ダンパーの疲労損傷の分析結果を報告した。以下に知見を示す。

- (1) T0709, T0720 通過後も免震層に平均変位が存在していたことより、残留変形が生じているのではないかと考えられる。
- (2) 風直交方向では免震層変位極値の確率密度分布はレーリー分布に概ね近似出来る事が観測記録からも確認された。
- (3) T0709, T0720 の D 値は東北地方太平洋沖地震の本震、余震の D 値に比べ極めて小さい。
- (4) 最大変位発生時 10 分間に対する台風全体の D 値の割合は T0709X 方向で約 23%、Y 方向で約 0.2%、T0720 の X 方向で約 13%、Y 方向で約 2%と各台風全体と最大変位発生時 10 分間の D 値には大きく違いがあり、その違いは各台風、各方向で異なる。
- (5) 台風や風向によらず 10 分間の免震層変位の標準偏差が大きい程 D 値が大きくなる傾向を示すことが分かった。平均変位も同様の傾向を示している。

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。(株)風工学研究所の勝村章氏、普後良之氏は貴重なご助言を頂きました。本研究を進めるにあたり、日本建築学会風波 WG、日本免震構造協会、風設計部会および神奈川大学大熊武司教授、(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震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。また、本研究で用いた J2 棟の加速度・変位観測データは、東京工業大学 GCOE プログラムから提供して頂いたものであります。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 2) 大木洋司、山下忠通、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取り組み、日本建築学会技術報告集、第 21 号、pp.73-77、2005.6
- 3) 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
- 4) 遠藤達雄、松石正典、光永公一、小林角市、高橋清文：「Rain Flow Method」の提案とその応用、九州工業大学研究報告(工学)、No.28、pp.33-62、1974.3
- 5) 吉江慶祐、北村春幸、大熊武司：エネルギーの釣合に基づく変動風力を受ける弾塑性構造物の応答予測手法、日本建築学会構造系論文集、第 589 号、pp.59-66、2005.3
- 6) SSManson: Therman Stress and Low Cycle Fatigue, McGraw-Hill, 1966 Engineering, ASME, pp.565-571, 1961.12
- 7) 吉野孝一、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
- 8) 本郷貴之、佐藤大樹、福田優輝、北村春幸：東北地方太平洋沖地震記録に基づく免震建物に設置されている鋼材ダンパーの疲労損傷度評価、2011 年度日本建築学会関東支部研究発表会、2013、2012.3

*1 東京理科大学

*2 東京工業大学

*3 (株)日建設計