T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

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
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, Ｉ, , pp. 401-404
Citation(English)	, Ｉ, , pp. 401-404
発行日 / Pub. date	2016, 3

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2015年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2016年3月

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

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　平均成分　疲労損傷評価手法

1.　はじめに

本報その1では，強風時の実挙動による免震層変位波形の平均成分と変動成分の分離方法の検討を行い，各成分が免震ダンパーの疲労損傷に与える影響を分析した。平均成分の影響により，全成分のD値は変動成分のみのD値に比べて大きく，その値は強風イベント，方向によって大きく差が生じているということが分かった。これより，平均成分を有する風応答の場合，免震建物の応答性状を適切に考慮して平均成分によるD値を評価する必要があることが分かった。一方で，現行の耐風設計では，10分間の平均成分および変動成分の統計値に基づき最大応答を評価している[1, 2]。しかし，継続時間に大きく依存する疲労評価について，10分間での応答との対応を検討した例はほとんどない[3, 4]。特に実際の観測記録を用いた検討は皆無であると言える。

本報その2では，変動成分全体のD値と10分間毎のD値の対応について検討する。さらに，その検討結果を踏まえて平均成分の影響を考慮した，平均成分を有する風応答における疲労損傷評価手法を提案する。

2.　変動成分の波形の周期の分析

表1に変動成分全体のD値(D'_{all})と10分間毎に切り出した変動成分波形のD値の和($\Sigma D'_{10}$)との比較結果を示す。ここで，変動成分の波形は，本報その1での検討結果に基づき移動平均時間600秒(MA600)での結果を用いている。表1より，$\Sigma D'_{10}$はD'_{all}に比べ約0.5～約0.9倍と小さいことが分かる。これは，10分間毎に波形を切り出した事で変動成分に含まれる周期10分以上の振幅を評価できなくなっていることが原因と考えられる。そこで，変動成分全体に含まれる振幅とその周期について詳細な分析を行なう。

図1(a)～(e)に変動成分全体の波形をRainflow法[5~7]によって各振幅に分解し，それぞれの振幅ごとに算出したD値と周期の分析を示す。図中の縦線は周期10分を示す。本報では，Rainflow法により各振幅に分解した波形を，1または1/2サイクルとしてカウントし，それぞれの開始と終了時間の差から周期を算出している。図1より，変動成分全体の波形には台風（caseC，caseD）と台風以外（caseA，caseB，caseE）に関わらず，周期が10分を超える波形が数多く存在しており，かつ比較的D値が大きいものも多いことが確認できる。つまり，従来の10分間に基づく手法では，変動成分波形から10分以上の周期を有する波形によるD値を評価できないことが分かる。

以上より本報では，分離した平均成分によって，平均成分および周期が10分を超える波形の影響を評価することを試みる。

3.　平均成分と周期が10分を超える波形の評価手法

3.1　評価手法（手法1）の概要

本報その1および2章より，平均成分と変動成分を別々に評価するという現行の耐風設計の考え方を準用し，かつ10分間毎の波形を用いて全体のD値を評価するためには，平均成分と10分を超える周期のD値を，平均成分を基にした評価から算出する必要性があることを示した。本章では，免震層変位の観測記録において，10分間毎の平均値および最大値，最小値と最大値最小値の発生時間が既知であるとし，10分間毎のデータを用いて全体のD値を算出する手法を示す。

はじめに，全成分のD値は平均成分のD値と変動成分のD値の和で表せるものとして，次式より算出する。

$$D_{all} = \overline{D}_{all} + D'_{all} \tag{1}$$

ここで，D_{all}：全成分のD値，
$\overline{D}_{all}$：平均成分のD値，D'_{all}：変動成分のD値を表す。

変動成分のD値は10分間毎のD値の合計($\Sigma D'_{10}$)で表すため，式(1)は式(2)のように表せる。

$$D_{all} = \overline{D}_{all} + \sum_{k=1}^{n'} D'_{10} \tag{2}$$

ここで，D'_{10}：10分間毎の変動成分のD値，n'：10分間毎のデータのデータ数を示す。

ただし，2章で述べたように$\Sigma D'_{10}$は周期が10分以上の波形を評価出来ないのでD'_{all}に対して小さい値となる。そこで，平均成分を基に周期が10分間を超える波形の評価方法を示す。図2(a)(b)(c)に平均成分および周期が10分を超える波形の評価方法の模式図を示す。はじめに，図2(a)に示すように既知である最大値と最小値をプロットする（操作1）。次に図2(b)に示すようにその最大値，最小値を発生時間を考慮して，最大値と最小値を結び，時刻歴波形を作成し（操作2），Rainflow法により振幅を評価する（操作3）。図3に操作2による最大値と最小値をつないだ時刻歴波形の模式図を示す。ここで，図2(c)より，10分間毎の各区間の最大値，最小値による1/2サイクルは$\Sigma D'_{10}$の算出時において，必ず各区間の最大値最小値の1/2サイクルの振幅として現れるので，この重複している振幅をD値の合計値から引く（操作4）。以上の結果は，式(3)で表される。

$$D_{all} = \sum_{i=1}^{n} \overline{D} + \sum_{k=1}^{n'} D'_{10} - \sum_{k=1}^{n'} D''_{10} \tag{3}$$

ここで，$\overline{D}$：周期が10分を超える波形と平均成分の影響によるD値
D''_{10}：重複している振幅によるD値（図2(b)）を示す。

表1 移動平均600秒による変動成分全体のD値と10分間毎の変動成分のD値の和の比較結果

	caseA		caseB		caseC		caseD		caseE	
方向	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
D'_{all}	2.72×10^{-10}	9.86×10^{-15}	3.17×10^{-10}	7.18×10^{-14}	1.58×10^{-8}	1.57×10^{-11}	1.78×10^{-9}	1.41×10^{-12}	1.11×10^{-10}	2.80×10^{-14}
$\Sigma D'_{10}$	2.21×10^{-10}	5.31×10^{-15}	2.47×10^{-10}	3.99×10^{-14}	1.36×10^{-8}	1.01×10^{-11}	1.48×10^{-9}	1.06×10^{-12}	6.18×10^{-11}	1.51×10^{-14}
$\Sigma D'_{10}/D'_{all}$	0.81	0.54	0.78	0.56	0.86	0.64	0.83	0.75	0.56	0.54

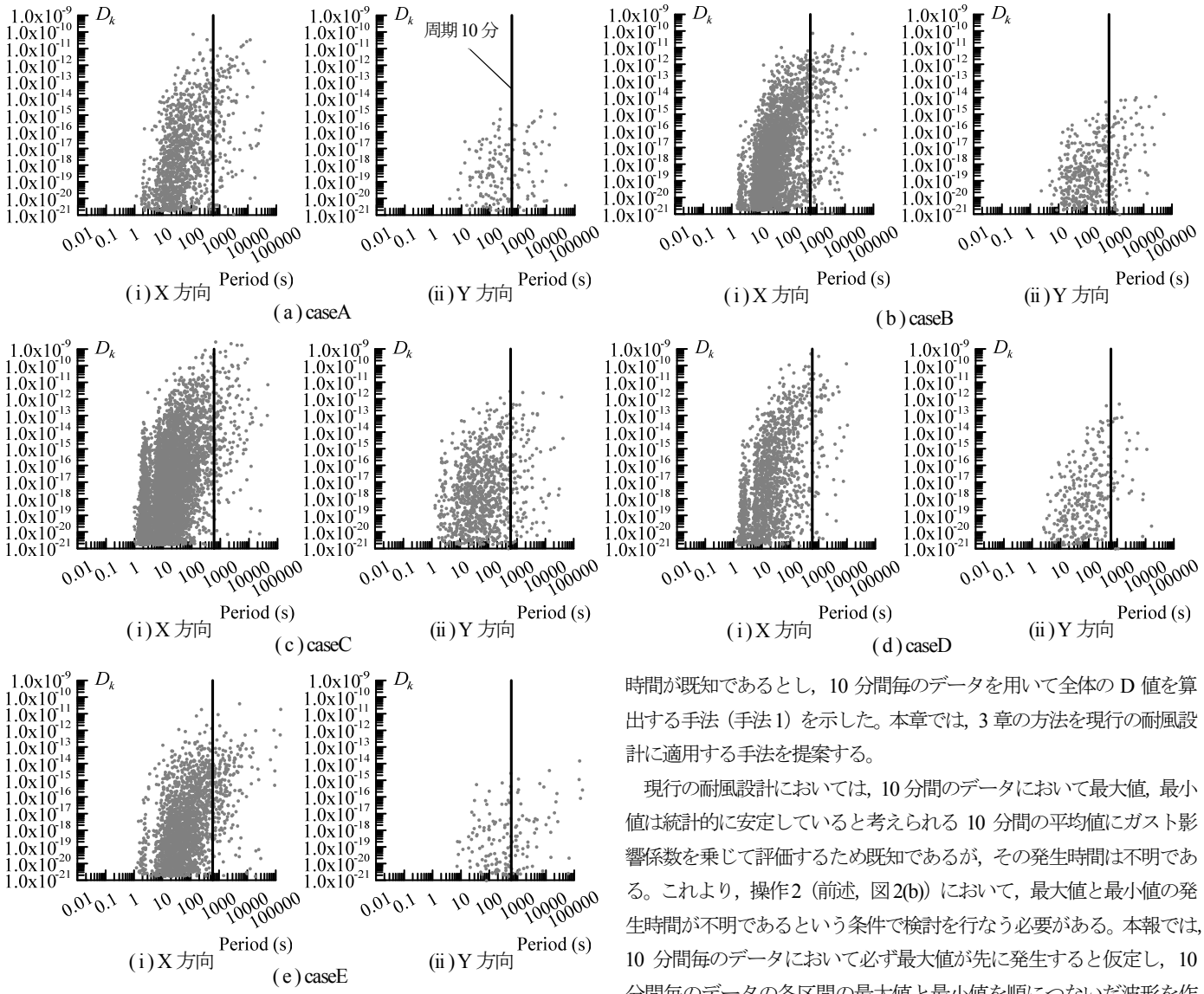


図1 移動平均600秒の変動成分のD値と周期の分析

以上の操作を用いた評価方法を手法1とする。

3.2 手法1の結果

図4に操作2の結果の一例として，caseDのX方向における全成分の最大値発生時周辺の50分間の結果を示す。図5に全成分のD値と手法1によるD値の比較を示す。表2にその数値を示す。図5，表2より，手法1によるD値は全成分のD値に比べ，全強風イベント，方向で異なっているが，約1～約1.1倍と安全側に評価できていることが分かる。

4. 耐風設計法に準じた評価手法（手法2）

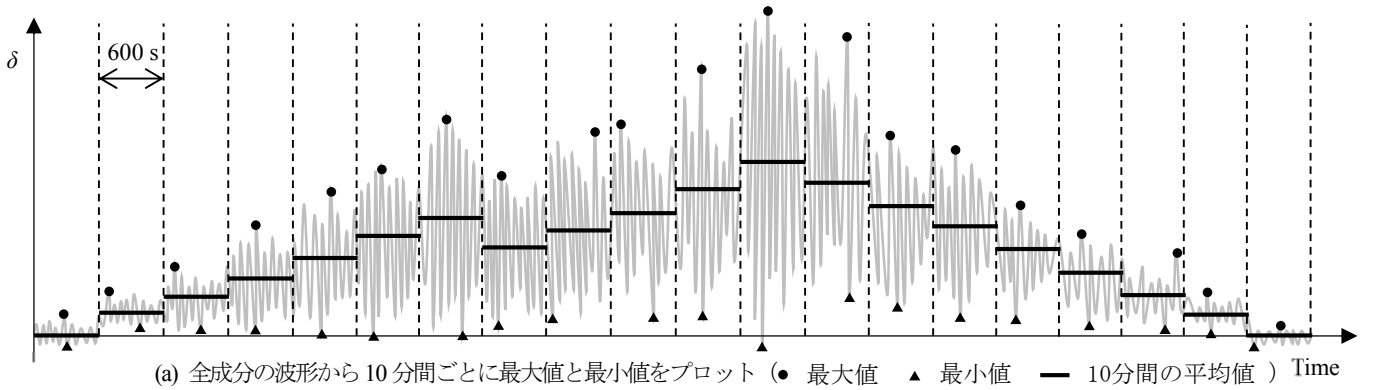
4.1 評価手法の概要

3章では，10分間毎の平均値および最大値，最小値およびその発生時間が既知であるとし，10分間毎のデータを用いて全体のD値を算出する手法（手法1）を示した。本章では，3章の方法を現行の耐風設計に適用する手法を提案する。

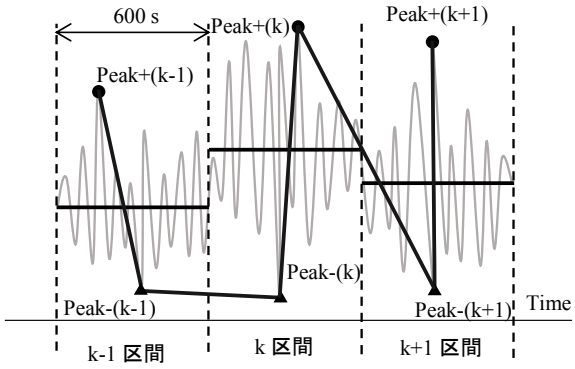
現行の耐風設計においては，10分間のデータにおいて最大値，最小値は統計的に安定していると考えられる10分間の平均値にガスト影響係数を乗じて評価するため既知であるが，その発生時間は不明である。これより，操作2（前述，図2(b)）において，最大値と最小値の発生時間が不明であるという条件で検討を行なう必要がある。本報では，10分間毎のデータにおいて必ず最大値が先に発生すると仮定し，10分間毎のデータの各区間の最大値と最小値を順につないだ波形を作成し（操作2'，図6），その波形に対しRainflow法で$\bar{D}_{all}$を評価する。前章と同様に重複している振幅によるD値（$\Sigma D''_{10}$）を引き，式(3)より全体のD値（D_{all}）を算出する。以上の方法を手法2とする。

4.2 手法2の結果

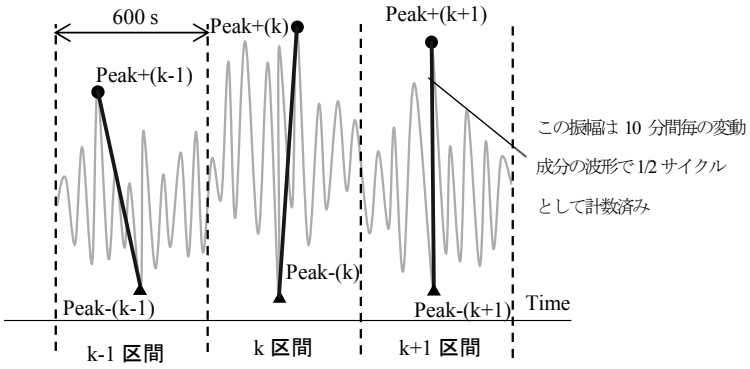
図7に操作2'の結果の一例として，caseDのX方向における全成分の最大値発生時周辺の50分間の結果を示す。図8に全成分のD値と手法1，手法2によるD値の比較を示す。表3に手法2によるD値を示す。図8より，手法2によるD値は強風イベント，方向によらず全成分のD値より大きく評価できていることが分かる。また，表3よりその値は約1～約1.2倍であり強風イベント，方向によらず手法1よりも安全側に評価できていることが分かる。以上のことから，10分間毎のデータの最大値最小値を既知とすることで，10分間毎のデータから全成分のD値が評価できることが分かった。現行の耐風設計にお



(a) 全成分の波形から 10 分間ごとに最大値と最小値をプロット（● 最大値　▲ 最小値　━ 10分間の平均値 ）



(b) 最大値最小値波形の作成方法



(c) 重複している振幅の詳細

図2　平均成分と周期が 10 分間を超える波形の評価手法の模式図

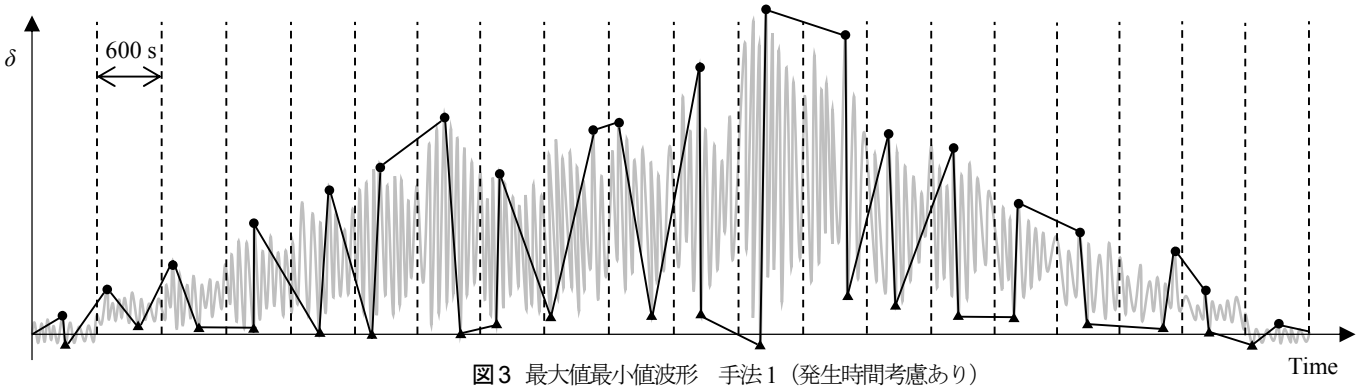


図3　最大値最小値波形　手法 1（発生時間考慮あり）

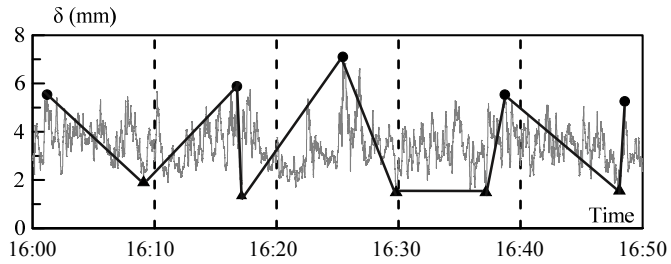
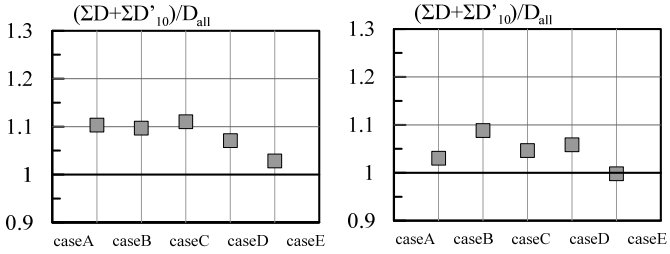


図4　操作 2 の一例（caseD，X 方向）



(a) X 方向　　(b) Y 方向

図5　全成分と手法 1 の比較

表2　手法 1 による D 値

	方向	D_{all}	$\sum_{k=1}^{n'} D'_{10}$	$\sum_{k=1}^{n'} \overline{D}$	$\sum_{k=1}^{n'} D''_{10}$	$\sum_{i=1}^{n} \overline{D} + \sum_{k=1}^{n'} D'_{10} - \sum_{k=1}^{n'} D''_{10}$	$\sum_{i=1}^{n} \overline{D} + \sum_{k=1}^{n'} D'_{10} - \sum_{k=1}^{n'} D''_{10} \Big/ D_{all}$
caseA	X	7.41×10^{-10}	2.85×10^{-10}	6.85×10^{-10}	1.53×10^{-10}	8.17×10^{-10}	1.10
	Y	2.01×10^{-14}	5.27×10^{-15}	1.93×10^{-14}	3.81×10^{-15}	2.07×10^{-14}	1.03
caseB	X	7.37×10^{-10}	2.56×10^{-10}	6.87×10^{-10}	1.34×10^{-10}	8.09×10^{-10}	1.10
	Y	9.31×10^{-14}	3.98×10^{-14}	8.73×10^{-14}	2.57×10^{-14}	1.01×10^{-13}	1.09
caseC	X	2.36×10^{-8}	1.44×10^{-8}	1.70×10^{-8}	5.16×10^{-9}	2.62×10^{-8}	1.11
	Y	3.01×10^{-11}	1.02×10^{-11}	2.72×10^{-11}	6.00×10^{-12}	3.14×10^{-11}	1.05
caseD	X	3.54×10^{-9}	1.38×10^{-9}	2.99×10^{-9}	5.87×10^{-10}	3.79×10^{-9}	1.07
	Y	4.46×10^{-12}	1.14×10^{-12}	4.16×10^{-12}	5.72×10^{-13}	4.72×10^{-12}	1.06
caseE	X	5.58×10^{-10}	7.51×10^{-11}	5.46×10^{-10}	4.72×10^{-10}	5.74×10^{-10}	1.03
	Y	2.57×10^{-13}	2.43×10^{-14}	2.50×10^{-13}	1.79×10^{-14}	2.57×10^{-13}	1.00

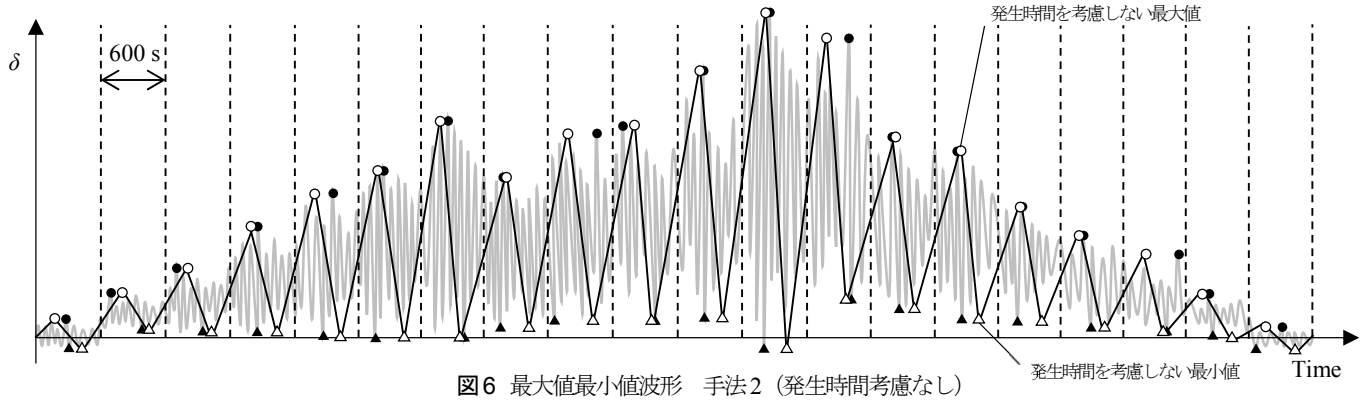


図6 最大値最小値波形　手法2（発生時間考慮なし）

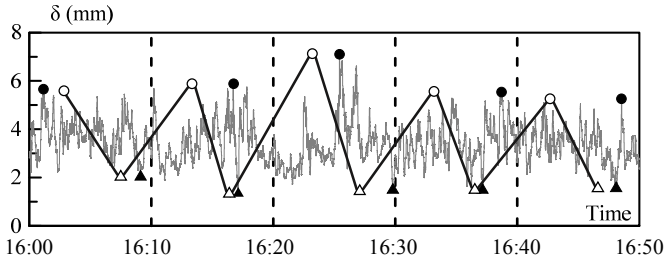
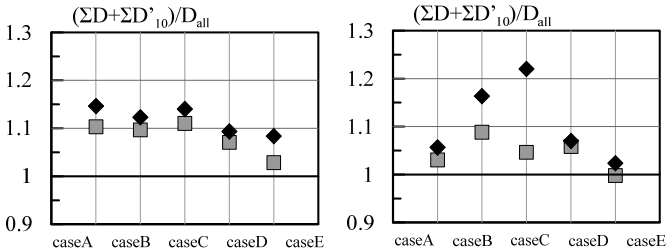


図7 操作2'の一例（caseD，X 方向）



(a) X 方向　　(b) Y 方向

図8 全成分と手法1，手法2の比較（■ 手法1　◆ 手法2）

表3 手法2によるD値

	方向	D_{all}	$\sum_{k=1}^{n'} D'_{10}$	$\sum_{k=1}^{n'} \overline{D}$	$\sum_{k=1}^{n'} D''_{10}$	$\sum_{i=1}^{n} \overline{D} + \sum_{k=1}^{n'} D'_{10} - \sum_{k=1}^{n'} D''_{10}$	$\sum_{i=1}^{n} \overline{D} + \sum_{k=1}^{n'} D'_{10} - \sum_{k=1}^{n'} D''_{10} \Big/ D_{all}$
caseA	X	7.41×10^{-10}	2.85×10^{-10}	7.17×10^{-10}	1.53×10^{-10}	8.49×10^{-10}	1.15
	Y	2.01×10^{-14}	5.27×10^{-15}	1.98×10^{-14}	3.81×10^{-15}	2.13×10^{-14}	1.06
caseB	X	7.37×10^{-10}	2.56×10^{-10}	7.07×10^{-10}	1.34×10^{-10}	8.28×10^{-10}	1.12
	Y	9.31×10^{-14}	3.98×10^{-14}	9.43×10^{-14}	2.57×10^{-14}	1.08×10^{-13}	1.16
caseC	X	2.36×10^{-8}	1.44×10^{-8}	1.77×10^{-8}	5.16×10^{-9}	2.69×10^{-8}	1.14
	Y	3.01×10^{-11}	1.02×10^{-11}	3.25×10^{-11}	6.00×10^{-12}	3.67×10^{-11}	1.22
caseD	X	3.54×10^{-9}	1.38×10^{-9}	3.07×10^{-9}	5.87×10^{-10}	3.87×10^{-9}	1.09
	Y	4.46×10^{-12}	1.14×10^{-12}	4.21×10^{-12}	5.72×10^{-13}	4.77×10^{-12}	1.07
caseE	X	5.58×10^{-10}	7.51×10^{-11}	5.77×10^{-10}	4.72×10^{-10}	6.04×10^{-10}	1.08
	Y	2.57×10^{-13}	2.43×10^{-14}	2.57×10^{-13}	1.79×10^{-14}	2.63×10^{-13}	1.02

いては，ガスト影響係数を用いた検討を行なうため，観測記録においてもガスト影響係数を用いた検討を行なう予定である。

5. まとめ

本報その2では，変動成分全体のD値と10分間毎のD値の対応について検討した。さらにその検討結果を踏まえて平均成分の影響を考慮した平均成分を有する風応答における疲労損傷評価手法を提案した。今回，観測記録で得られた限られた記録の中ではあるが，以下に知見を示す。

(1) 変動成分全体の波形は台風と台風以外に関わらず周期が 10 分を超える波形が数多く存在しており，比較的D値が大きいものも多いことが確認できた。つまり，従来の10分間に基づく手法では，10分以上の周期のD値を評価できないことが分かった。

(2) 最大値および最小値の発生時刻が既知である場合において，本報での提案手法1によるD値は，全成分のD値に比べ，強風イベント，方向により異なるが，約1倍～約1.1倍と安全側に評価できていることが分かった。

(3) 10分間毎のデータの最大値および最小値の発生時刻が不明な場合においても（手法2），10分間毎のデータから全成分のD値が評価できることが分かった。

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丸川比佐夫博士，片桐純治博士，(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ご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) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015
2) 日本免震構造協会：免震建築物の耐風設計指針
3) 松井正宏，大熊武司，田村幸雄：耐風設計で考慮すべき強風イベントの等価継続時間，日本風工学会年次研究発表会，pp.157-158，2011.4
4) 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
5) 日本免震構造協会：第7回技術報告会梗概集，pp.89-98，2015.9
6) 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
7) 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

*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