

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
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, 北村春幸
Authors(English)	Tomokazu Murakami, Daiki Sato, TETSURO TAMURA, Yoshiyuki Fugo, Keisuke Yoshie, KAZUHIKO KASAI, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 421-424
Citation(English)	, , , pp. 421-424
発行日 / Pub. date	2017, 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

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 北村春幸^{*4}

風応答観測 超高層免震建物 Rainflow 法
10 分間 弾塑性風応答解析 疲労損傷評価手法

1. はじめに

本報その1¹⁾、その2²⁾では、強風イベント全体の免震層変位波形における、10分を超える周期をもつ振幅の存在を明らかにし、実観測記録に基づき10分間毎に分離した時刻歴波形のみを用いて強風イベント全体の免震ダンパーの疲労損傷を簡易に評価できる方法を提案した。しかし、免震層が弾性範囲に留まる実観測記録のみを用いて検討しており、耐風設計で用いられているような免震層が塑性化する風速レベルの応答変位波形に関する提案手法の妥当性は検討していないといった問題点が挙げられる。そこで本報その3では、はじめに、本報その2で示した提案手法1と2(2章、後述)の比較を行なう。次に、解析モデルを用いて免震層が弾塑性挙動をした風応答変位波形においても確認を行なう。ただし、免震層が弾塑性挙動をする風速は観測されていないため、本報では平均風速も複雑に上下する実際の台風イベントの風観測データを元に、最大風速が再現期間500年になるような模擬波形を作成する。また解析モデルに対しても固有周期および鋼材ダンパーの降伏せん断力係数を変化させたパラメータスタディを行なう。

2. 提案手法の概要

以下に提案手法の概要を再掲する。平均成分を有する強風イベント内に存在する周期が10分以上の波形によるD値を \tilde{D} と定義し、評価手法のD値(D_E)を、 \tilde{D} と10分間毎のデータのD値の合計($\sum D'_{10}$)を用いて式(1)で算出する²⁾。

$$D_E = \tilde{D} + \sum_{j=1}^{n'} D'_{10} \quad (1)$$

ここで、 j : 10分間のステップ、 n' : 10分間毎のデータ数

\tilde{D} は、10分間毎の最大値(δ_{max})と最小値(δ_{min})をつなげて作成した波形(図1(a))を用いて算出される。なお、ここで用いる δ_{max} 、

表1 10分間における最大値最小値波形の算出方法

	最大値・最小値	発生時刻
手法1	観測記録	観測記録
手法2	観測記録	必ず最大値が最初に発生する

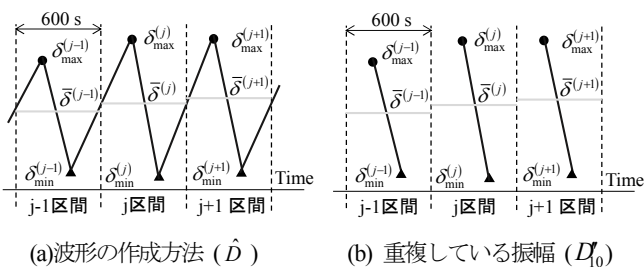


図1 評価手法の概要 (\tilde{D})

δ_{min} とは平均成分を含んだ値である。まず、図1(a)の波形に対してRainflow法^{3,4)}で評価した全振幅を用いて算出したD値を \hat{D} と定義する。この \hat{D} には、式(1)の $\sum D'_{10}$ を算出する際にすでにカウントしている部分が図1(b)に示すように、10分間毎に1/2サイクルずつ含まれる。この重複部分のD値を D''_{10} と定義し、 \tilde{D} を式(2)により算出する。

$$\tilde{D} = \hat{D} - \sum_{j=1}^{n'} D''_{10} \quad (2)$$

ここでは免震層変位の観測記録において、10分間毎の最大値、最小値およびその発生時刻が既知であるとし、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提案手法1、最大値最小値は観測記録の値を使用するが、発生時刻を規定せず必ず最大値が先に発生するものを提案手法2と呼ぶ(表1)。 \hat{D} は、それぞれの手法(表1)により10分間毎の最大値最小値を用いて作成した波形(図2)を用いて求める。なお、最大値最小値波形において提案手法2はそれぞれの10分間の区間で最大値が先に発生するので、提案手法1に比べてRainflow振幅が必ず多く算出され(図3)、D値は提案手法2のほうが大きくなるのが分かる。

- 発生時刻を考慮した最大値 ▲ 発生時刻を考慮した最小値
- 発生時刻を考慮しない最大値 △ 発生時刻を考慮しない最小値

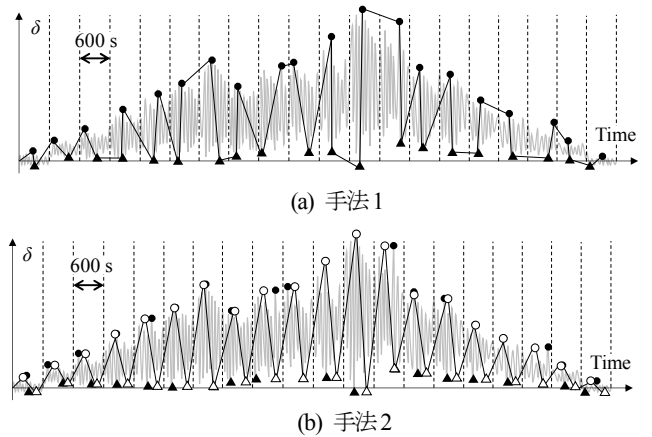


図2 最大値最小値波形の模式図 (\hat{D})

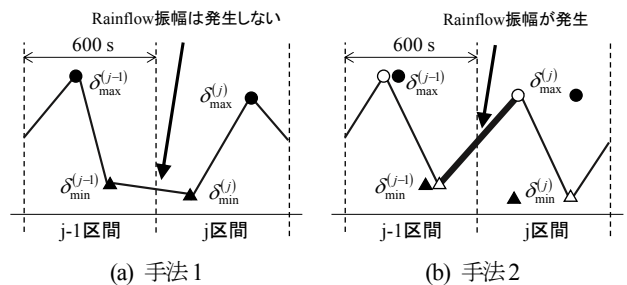


図3 提案手法1と2の振幅の比較

3. 解析モデルおよび風外力の概要

3.1 解析モデルの概要

検討対象建物の解析モデルを図4に示す。解析モデルは、超高層免震建物を対象とした高さ $H = 120\text{m}$ の11質点せん断型モデルとした。上部構造は、1次固有周期 ${}_uT_0 = 2.4\text{s}$ 、建物密度 ${}_u\rho = 1715\text{N/m}^3$ の総重量 246960kN とし、重量は高さ方向に一様であると想定した。図5に上部構造の刺激関数を示す。上部構造の各層の剛性 ${}_u k_i$ は、1次固有モードが直線となるように式(3)により決定した⁵⁾。

$${}_u k_i = \frac{{}_u s \omega^2 \cdot m_i \cdot \phi_i + {}_u k_{i+1} ({}_u s \phi_{i+1} - {}_u s \phi_i)}{{}_u s \phi_i - {}_u s \phi_{i-1}} \quad \{i = 1 \sim n\} \quad (3)$$

ここで、 ${}_u s \omega$: 上部構造のみの s 次固有円振動数 ($= 2\pi / {}_u s T$)、 m_i : i 層の質量、 ${}_u s \phi_i$: 上部構造 i 層の s 次モードベクトルを表す。ただし、 ${}_u k_{i+1} = 0$ 、 ${}_u s \phi_0 = 0$ 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 $h = 1\%$ の剛性比例型とし、免震層には内部粘性を考慮しない。免震層は免震周期を 4.0s 、 5.0s の2通り、面密度 ${}_b w = 25000\text{N/m}^2$ の重量 30000kN とした。図6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(4)~(6)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。

$${}_d Q_y = ({}_u W + {}_b W) \cdot {}_d \alpha_y \quad (4)$$

$${}_d k_1 = {}_d Q_y \cdot {}_d \delta_y \quad (5)$$

$${}_f k = \frac{4\pi^2 ({}_u W + {}_b W)}{{}_f T \cdot g} \quad (6)$$

ここで、 ${}_d Q_y$: 免震層ダンパーの降伏耐力、 ${}_u W$: 上部構造の重量、 ${}_b W$: 免震層の重量、 ${}_d k_1$: ダンパーの初期剛性、 ${}_d \delta_y$: ダンパーの降伏変位 ($= 3.17\text{cm}$)、 ${}_d \alpha_y$: ダンパー降伏せん断力係数 ($= 0.02, 0.03$)、 ${}_f k$: 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。

3.2 風外力の概要

構造物に作用する風外力は風洞実験結果を用いた。図7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」⁶⁾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 $1/352$ となる。計測はサンプリング周波数 800Hz で行なっ

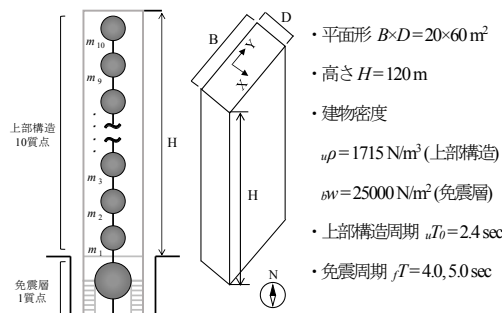


図4 弾塑性解析モデル概要

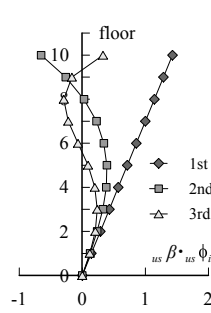


図5 刺激関数

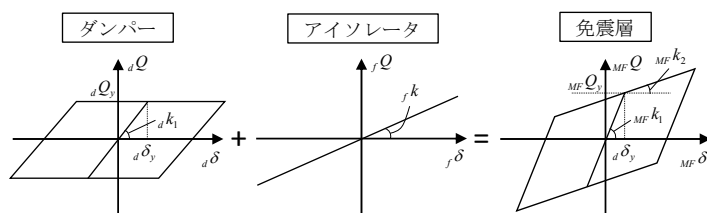
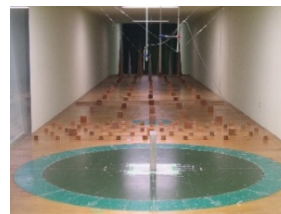


図6 免震層復元力特性の作成

た。風向は建物のY方向(図4)に正対する角度を0度として時計回りに5度ごとにX, Y方向それぞれ計81920個のデータを3回にわけて計測されている(表2)。本報では、検討用風力波形は0.02s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16384個のデータを一つのユニットとして、5波のデータにわけて使用した。層風力係数を層風力の時刻歴波形に変換する際は風洞実験で設定した頂部高さの実験風速に応じた時間のスケールをサンプリング周波数に乗じて求め、解析モデルのスケールに線形補完して算出した。ここで、強風イベントの開始または終了時刻付近の低風速部分では風洞実験において設定したアナログフィルタの周波数 300Hz を実換算すると構造モデルの固有振動数を下回る。このような低風速の時間はイベント全体の時間の $1/3$ 程度を占めるため、イベント全体のD値を評価するには風洞実験データの補完に注意が必要と考えた。そこで本報では、以下の手順(表3)でサンプリング周波数を10倍の 8000Hz に補完したものを使用している。補完する周波数領域に関して 100Hz 以上にスペクトルピークが無いことを確認の上、 $100\text{Hz} \sim 250\text{Hz}$ のスペクトル勾配をそのまま $250 \sim 4000\text{Hz}$ まで延長した。次に、層間、軸間の相関⁷⁾を確認するために各層、風向で $\sqrt{\text{coh}}$ を確認した。層間、軸間の $\sqrt{\text{coh}}$ は、 250Hz 以上の範囲において無相関であるとみなせたため、 $250 \sim 4000\text{Hz}$ の範囲では層間、軸間の相関は無視できると仮定した。補完後の i 層の風力の時刻歴波形 $F_i(t)$ は式(7)で定義できる。

$$F_i(t) = \sum_{k=1}^N (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t) \quad (7)$$

ここで、 N : 4000Hz まで拡張したスペクトルのデータ数を表す。



- ・縮尺 1/352
- ・サンプリング周波数 800Hz
- ・アナログフィルタ 300Hz
- ・頂部高さの実験風速 12.9m/s
- ・地表面粗度区分Ⅲ
- ・8層分計測

図7 風洞実験概要

表2 層風力計測時の波形のデータ数

計測回	1	2	3
波形のデータ数	32768	32768	16384

表3 時刻歴波形の補完手順の概略

手順	
1	元の波形から平均値を引く
2	スペクトルをフーリエ変換(FFT)で求める
3	250~4000Hzのスペクトルを作成する
4	補完後の時刻歴を作成する
5	補完後の時刻歴に平均値を加える

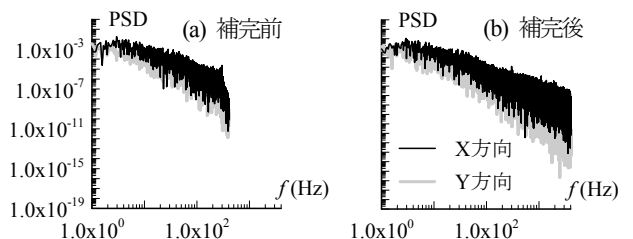


図8 高さ2/3位置における層風力係数のパワースペクトル密度

a_k, b_k は、 $\omega_k=0\sim 250\text{Hz}$ においては実験値からフーリエ変換 (FFT) で求められ、 $250\sim 4000\text{Hz}$ においては、式(8)、(9)に示すガウス確率分布関数を用いてランダムに作成した⁸⁾。

$$p(a_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{a_k^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (8)$$

$$p(b_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{b_k^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (9)$$

$$\sigma_k^2 = 2S_p \omega_k \Delta\omega \quad (10)$$

$p(a_k), p(b_k)$: ガウス確率密度関数, S_p : 補完後のスペクトル

図8に高さ2/3位置における層風力係数のパワースペクトル密度を補完前と補完後で示す。なお、風向は0度である。

4. 再現期間500年の強風イベントを用いた提案手法の妥当性の検討

4.1 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(3.2節、前述)あたり、10分間の風外力を作成する。層風力は8層分計測されているため、解析モデルに層風力を与える際には各層の支配高さに応じて8層分の風力を10質点に比率で分配した。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、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

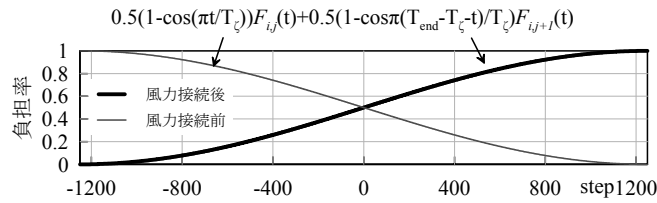


図9 風力の負担率の定義

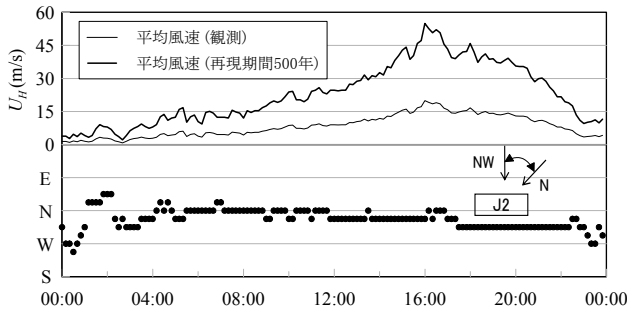


図10 caseD (T0720) の風速風向および再現期間500年の風速

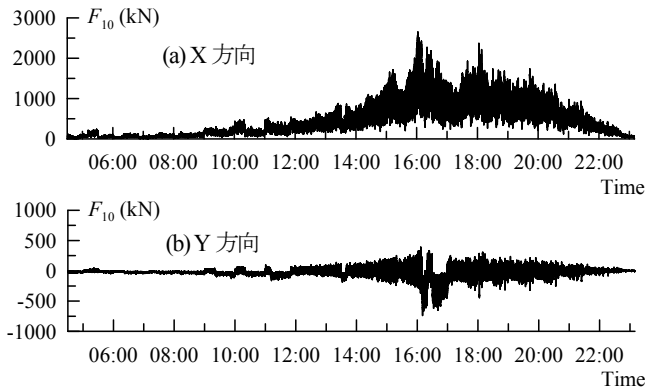


図11 頂部層風力の時刻歴波形

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(11)、(12)に示すような三角関数 $\zeta(t)$ を50秒間分(2500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9)⁹⁾。また、解析開始時および終了時における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(11)、(12)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¹⁰⁾。

$$\zeta(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{T_\zeta} t \right) \quad (t = 0 \sim T_\zeta) \quad (11)$$

$$\zeta(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{T_\zeta} (T_{end} - T_\zeta - t) \right) \quad (t = \{T_{end} - T_\zeta\} \sim T_{end}) \quad (12)$$

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

4.2 再現期間500年の強風イベントおよび免震層変位波形の作成

強風イベントの風速はcaseD¹¹⁾の風速を増幅させたものを使用する。風向はcaseDと同じとする。図10にcaseDの観測記録および再現期間500年レベルに増幅した風速と風向を示す。なお、図中の矢印は建物に対する風向を示している。風速は、「建築物の荷重指針・同解説」⁶⁾の神奈川県における地表面粗度区分Ⅲに則し、再現期間500年相当の頂部風速 $U_H = 54.9 \text{ m/s}$ がcaseD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。風向は観測条件により、

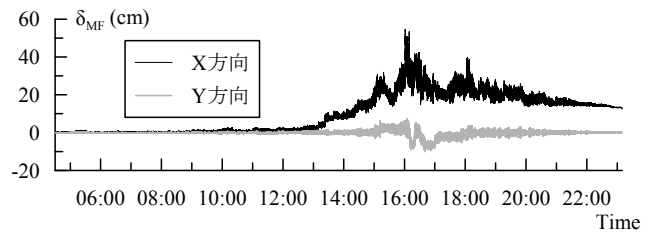


図12 免震層変位の時刻歴波形 ($a\alpha_y = 0.02, fT = 5.0\text{s}$, 第1波)

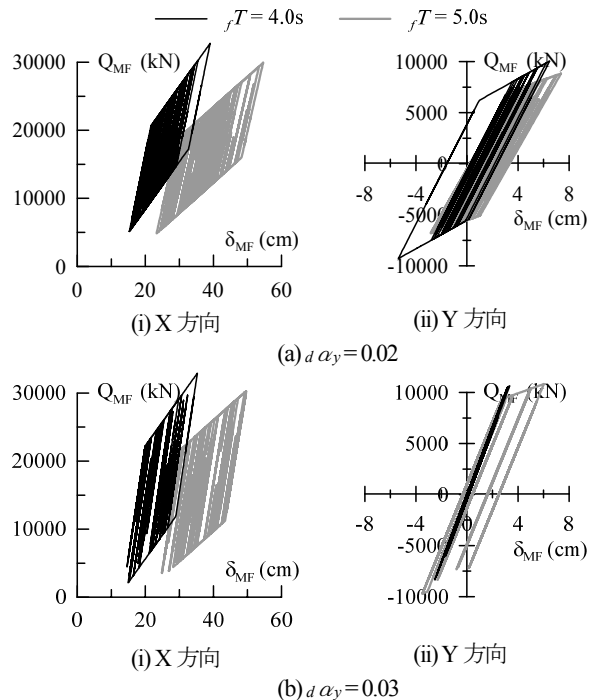


図13 最大平均風速発生時10分間の免震層履歴曲線(第1波)

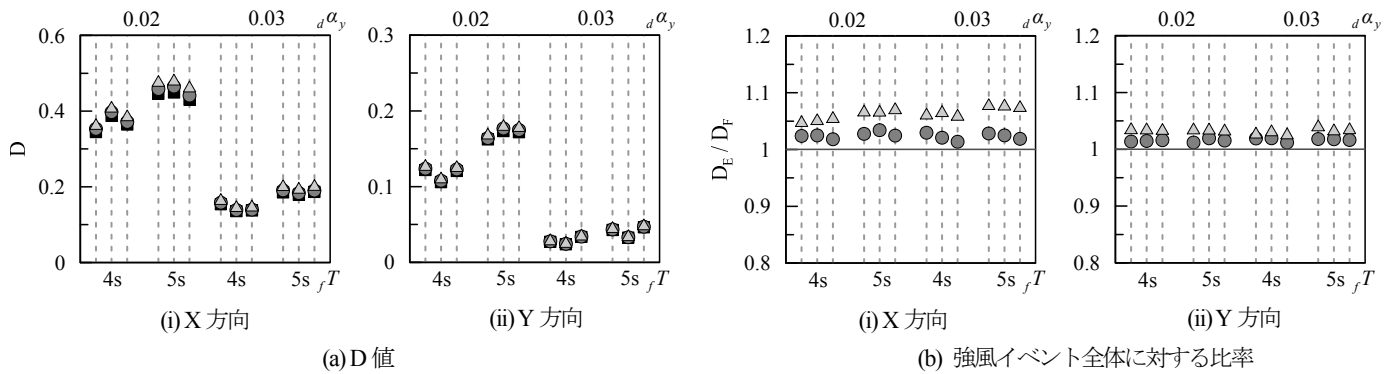


図14 再現期間500年の強風イベントによるD値と提案手法によるD値(左から第1, 2, 3波) ■ D_F ● D_{E1} ▲ D_{E2}

風洞実験と最大で2.5度のずれが生じるため、風向変化前10分間の風向から近いものを採用した。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3波を作成した。図11に解析モデルの頂部層風力の時刻歴波形の一例を示す。X方向においては、強風イベント全体を通して概ね建物の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。また、Y方向は平均風力を殆どもたないことが分かる。図12に免震層変位の時刻歴波形の一例を、図13に最大平均風速発生時の10分間の免震層履歴曲線をダンパー降伏せん断力係数 $d\alpha_y$ ごとに示す。図12より、X方向においては、平均風力の影響を受け、平均変位が時々刻々と変化していることが分かる。図13より、Y方向においては殆ど0点を中心に履歴を描いているが、X方向においては $d\alpha_y$ によらず平均風力の影響で $fT=5.0s$ のとき約35cmほどオフセットした状態で免震層が履歴を描いていることが分かる。

4.3 提案手法の妥当性の検討

図14に解析により算出した再現期間500年の強風イベントによる免震ダンパーのD値と提案手法のD値を示す。図14より、強風イベント全体のD値は同一の風力波形において $fT=5.0s$ の解析モデルのほうが大きくなっていることが分かる。また、 $d\alpha_y$ が0.03のほうがD値が小さくなった。提案手法1のD値(D_{E1})は解析ケース、方向により違いが見られるが強風イベント全体のD値に対して約1.01~1.03倍と安全側を示していることが分かる。また、提案手法2(D_{E2})においても約1.03~1.08倍を示していることが分かる。以上より、本報で検討した範囲では、免震層が弾塑性挙動を示す変位波形においても、提案手法が妥当であることを示した。

5. まとめ

本報その3では、弾塑性風応答解析モデルを用いて本報その1、その2で提案した10分間毎のデータのみを用いた強風イベント全体の免震ダンパーの疲労損傷評価手法の妥当性を免震層が弾塑性挙動をした風応答変位波形において検討を行なった。以下に知見を示す。

- (1) 提案手法2が提案手法1に対してRainflow振幅が必ず多く発生し、D値が大きくなる理由を示した。
- (2) 強風イベント全体のD値は免震周期が4sの解析モデルに比べ、5sの解析モデルのほうがD値が大きくなった。
- (3) 解析モデルを用いて算出した再現期間500年風速の免震層変位波形において、提案手法のD値は強風イベント全体に対して約

1.01倍~1.08倍と安全性の評価となり本報で検討した範囲では提案手法は妥当であることを示した。

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、(株)日建設計、東京理科大学北村研究室による新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棟の風洞実験データは、(株)風工学研究所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) 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、日本建築学会関東支部研究報告集(CD-ROM), 2044, pp.397-400, 20163
- 2) 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, 20163
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説, 2015
- 7) 丸川比佐夫、大熊武司、丹羽秀聡、寺本隆幸、北村春幸、吉江慶祐：動的天秤データを利用した高層建築物の時刻歴風力シミュレーションに関する研究、第12回風工学シンポジウム論文集, pp.207-212, 1992.12
- 8) 鹿島出版会：確率論手法による振動解析
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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, 20163

*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