

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	風速・風向変化が免震層残留変形に及ぼす影響
Title(English)	INFLUENCE OF WIND SPEED AND WIND DIRECTION CHANGE ON RESIDUAL DEFORMATION OF ISOLATION LAYER
著者(和文)	銭晓鑫, 佐藤大樹
Authors(English)	Xiaoxin Qian, Daiki Sato
出典(和文)	風工学シンポジウム講演梗概集, , No. 26, pp. 132-137
Citation(English)	National Symposium on Wind Engineering Proceeding, , No. 26, pp. 132-137
発行日 / Pub. date	2020, 11

## 風速・風向変化が免震層残留変形に及ぼす影響

### INFLUENCE OF WIND SPEED AND WIND DIRECTION CHANGE ON RESIDUAL DEFORMATION OF ISOLATION LAYER

銭 晓鑫<sup>1)</sup> 佐藤大樹<sup>2)</sup>

Xiaoxin QIAN<sup>1)</sup> and Daiki SATO<sup>2)</sup>

#### ABSTRACT

In recent years, the base-isolated system has been applied to more and more tall buildings. However, as the building gets taller, wind force may increase, which may lead to the residual deformation occurred in the isolation layer because of the plasticized steel dampers. When evaluating the residual deformation of the isolation layer, it is not enough to use the 10-minute wind force with no change in wind speed and wind direction as introduced in the existing wind-resistant design. In the case of a typhoon considering wind speed and wind direction change, because of the wind force against the isolation layer deformation, overestimation on the residual deformation may occur if the 10-minute wind force is used. Therefore, by numerical studies on a MODF model, this paper focuses on the residual deformation of the isolation layer in typhoon simulation to provide useful information for practical design.

Key Words: Base-isolated building, typhoon simulation, wind speed and wind direction change, isolation layer, residual deformation

#### 1. はじめに

近年、人々の建物の安全性・居住性に対する意識が高まるとともに、免震構造が超高層建物への適用が拡大している<sup>1)</sup>。しかし、免震建物の高層化に伴い、風の影響が強くなるため、免震ダンパーが塑性化する可能性がある。その場合、免震層に残留変形が生じる恐れがあり、その検討が必要となる。現行の耐風設計では、風速・風向が一定の10分間風力を用いた免震層残留変形の評価を行っている<sup>2)</sup>。しかし、実際の台風は、風速・風向が時々刻々と変化するため、風速・風向が一定の10分間風力を用いると、免震層の残留変形に過大評価となる可能性があると考えられる。筆者ら<sup>3)</sup>は、風向変化を考慮する場合、免震層変形と反対方向の風力が存在し、揺れ戻し効果で免震層残留変形が小さくなることを示している。

そこで本報の目的は、超高層免震建物を研究対象とし、多質点系せん断モデルを用いた時刻歴応答解析を行い、10分間風力と台風シミュレーションによる免震層残留変形を比較し、文献<sup>3)</sup>での結果の一部により詳細な考察を追加報告する。

---

<sup>1)</sup> 東京工業大学建築学系 大学院生 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

<sup>2)</sup> 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

## 2. 解析モデルの概要

Fig. 1(a)に示すように、解析モデルは高さ  $H = 100$  m、辺長比  $B/L = 1$  (横幅  $B =$  奥行  $D = 25$  m)、アスペクト比  $Ar = 4 (= H/(BL)^{1/2})$  の対象建物に等価する 11 質点せん断型縮約モデル (上部構造 10 質点 + 免震層 1 質点) とする。本解析では、ねじれ振動を考慮せず、 $x$  方向と  $y$  方向をそれぞれ解析する。Fig. 1(b)の構造諸元より、上部構造は、密度  $\rho_u = 250$  kg/m<sup>3</sup>、基礎固定時の 1 次固有周期  $T_u = 2.5$  s ( $= 0.025H$ )、減衰定数  $\zeta_u = 0.02$  とする。免震層は、面密度  $\rho_b = 3644$  kg/m<sup>2</sup>、免震周期  $T_b = 5.0$  s、免震ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_{dy} = 0.03$  とする。ここでは、上部構造  $i$  層の剛性  $k_{ui}$  は、1 次固有振動モードが直線となるように式 (1) により決定した<sup>4)</sup>。

$$k_{ui} = \frac{{}_1\omega_u^2 \cdot m_{ui} \cdot {}_1\varphi_{ui} + k_{ui+1} ({}_1\varphi_{ui+1} - {}_1\varphi_{ui})}{{}_1\varphi_{ui} - {}_1\varphi_{ui-1}} \quad (1)$$

ここで、 ${}_1\omega_u$ : 上部構造の 1 次固有円振動数、 $m_{ui}$ : 上部構造  $i$  層の質量、 ${}_1\varphi_{ui}$ : 上部構造  $i$  層の 1 次モードベクトルを表す。ただし、 $k_{u11} = 0$ 、 ${}_1\varphi_{u0} = 0$  とする。

上部構造各層の質量分布および剛性分布はそれぞれ Fig. 2(a)、(b)に示す。

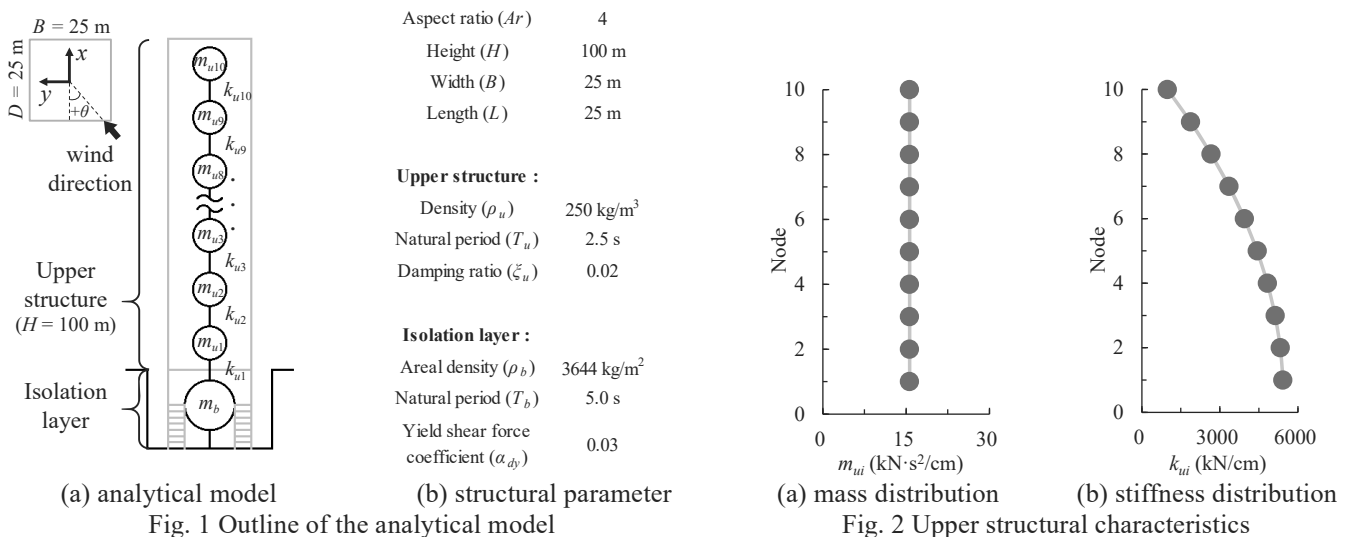


Fig. 1 Outline of the analytical model

Fig. 2 Upper structural characteristics

## 3. 台風シミュレーションの概要

Fig. 3(a)~(j)に示すように、本解析では、継続時間が異なる台風を 10 個のサンプル (Sample 1~10)<sup>5)</sup> 選定した。図における横軸の単位 h は時間 (hour) を表している。Sample 1 の継続時間が最も短く 9 時間とし、Sample 9、10 の継続時間が最も長く 40 時間である。図における実線は、建物頂部の平均風速  $U_H$  (10 分間平均) の時刻歴変化を表している。全てのサンプルにおいて、頂部平均風速のピークは等しく 50.41 m/s (基本風速 36 m/s、再現期間 500 年、地表面粗度区分 III として換算した<sup>6)</sup>) とする。ただし、Sample 6 (1<sup>st</sup> peak: 49.54 m/s, 2<sup>nd</sup> peak: 50.41 m/s)、Sample 8 (1<sup>st</sup> peak: 50.41 m/s, 2<sup>nd</sup> peak: 48.21 m/s) および Sample 9 (1<sup>st</sup> peak: 50.41 m/s, 2<sup>nd</sup> peak: 45.13 m/s) は台風の目に伴い 2 回風速のピークを有する。一方、図におけるプロットは、風向の時刻歴変化を表している。風向の設定については、10 分間毎の風向を、風洞実験<sup>7)</sup> が行なわれた角度 (22.5°刻み) のうち、最も近い角度に置換している。定義する風向  $\theta = 0^\circ$  とは、Fig. 1(a)に示したような建物横幅  $B$  に正対する角度を表す。

本解析では、3 種類の風力波形 (10\_000, A\_000 と T\_000) を考慮した。10\_000 は、現行の耐風設計に用いられる風速 ( $U_H = 50.41$  m/s に固定)・風向 ( $\theta = 0^\circ$  に固定) が一定の 10 分間風力である。A\_000 は、風向 ( $\theta = 0^\circ$  に固定) が一定であり、Fig. 3 の風速変化 (実線) のみを有する台風を想定した風力である。T\_000 は、風速変化に加えて風向変化 (プロット) も有する台風を想定した風力である。ただし、T\_000 における最大平均風速時 ( $U_H = 50.41$  m/s 時) の風

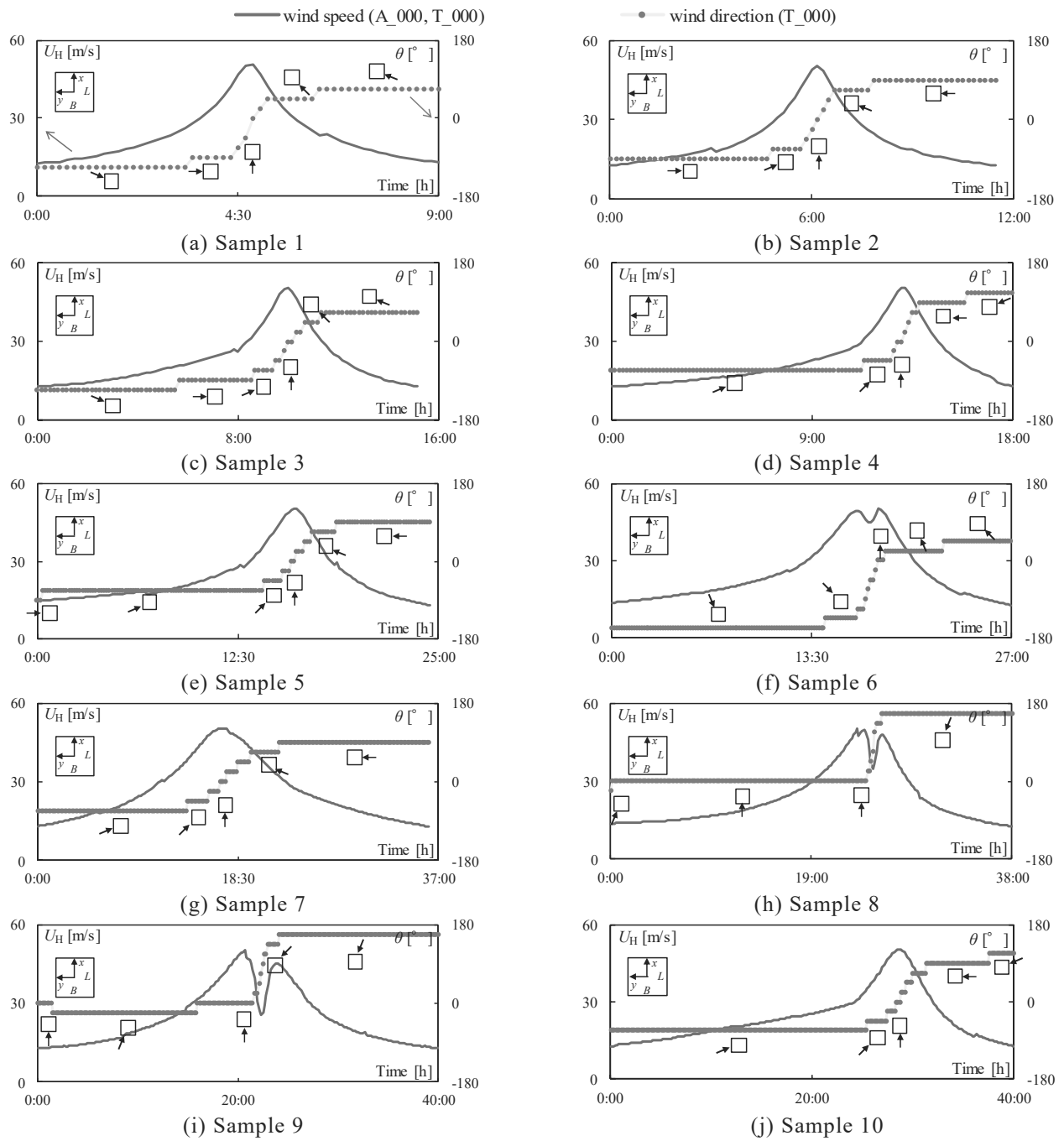


Fig. 3 Time history of wind speed and wind direction

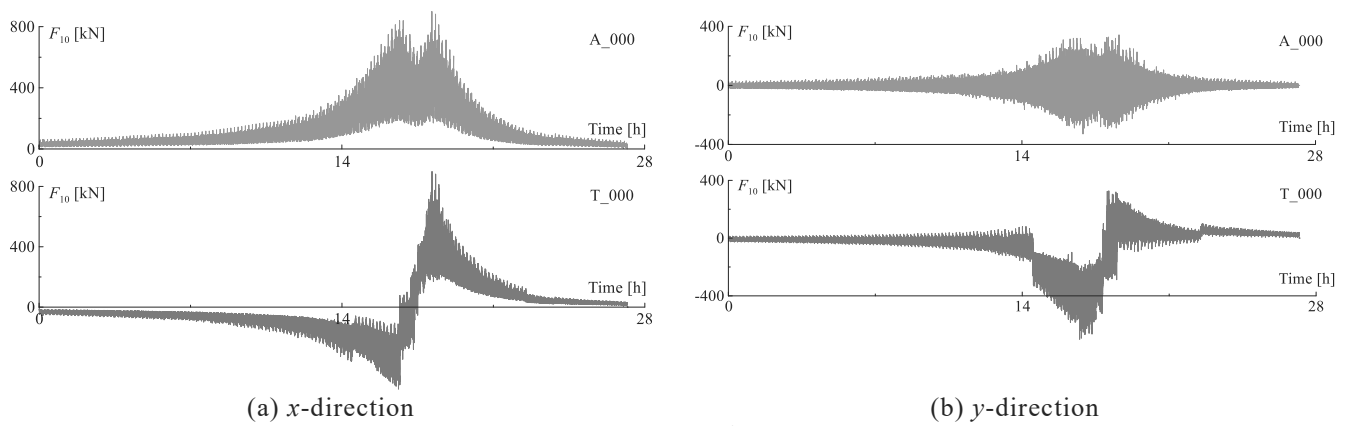


Fig. 4 Example of wind forces at 10<sup>th</sup> story (Sample 6, Wave 1)

向は  $\theta = 0^\circ$  に固定した。ここでは、T\_000 を設定する目的は、風速・風向変化を有する T\_000 に対して、風速・風向が一定の 10\_000 を用いた免震層残留変形についての評価では過大に評価される可能性があるかどうかを考察する (T\_000 vs. 10\_000)。さらに、A\_000 を設定する目的は、T\_000 に対して風速変化のみを有する A\_000 もで、依然として過大に評価される可能性があるかどうかを考察する (T\_000 vs. A\_000) ことで、免震層残留変形の評価に風向変化を考慮することの有効性を示す。各風力波形では 10 波 (Wave 1~10) 作成している。なお、解析開始時と終了時の過渡応答を避けるため、各風力波形の先頭および後尾に 50 秒間のエンベロープを設けた。

Fig. 4(a), (b) に作成した 10 層の風力  $F_{10}$  の時刻歴波形の一例 (Sample 6, Wave 1) を示す。Fig. 4(a) の  $x$  方向では、A\_000 は風向変化を有しないため、全時刻平均成分を持ち、風力の大きさは主に風速 (Fig. 3(f) を参照) に依存する。ただし Fig. 4(b) の  $y$  方向では、A\_000 は全時刻平均成分を持たない。一方、A\_000 に対して風向変化を有する T\_000 は、 $x$  と  $y$  方向の風力は風速・風向により決まる。ただし、最大平均風速時の風向は、A\_000、T\_000 とも  $\theta = 0^\circ$  に固定しているため、Fig. 4(a) より A\_000 と T\_000 の最大風力は一致であることが見られた。

#### 4. 免震層残留変形の評価

Fig. 5(a), (b) に免震層残留変形  $\delta_{br}$  (10 波のアンサンブル平均) を示す。Fig. 5(a) の  $x$  方向では、各台風サンプルに対して、A\_000 と 10\_000 の値は概ね一致 (即ち  $A_{000} \approx 10_{000}$ ) であることが見られた。しかし、T\_000 と 10\_000 を比較すると、Sample 4、8、9 において、T\_000 に対して 10\_000 は過大評価となった。特に Sample 8、9 における T\_000 の値はマイナスを示しているため、風向変化による揺れ戻し効果は顕著である。ただし、ほかの Sample において、その揺れ戻し効果は軽微である。つまり、T\_000 と 10\_000 を比較することで、 $T_{000} \leq 10_{000}$  ということがわかる。一方、T\_000 と A\_000 を比較することで、 $T_{000} \leq A_{000}$  という結論が得られた。以上の  $T_{000} \leq A_{000} \approx 10_{000}$  により、免震層残留変形の評価に風向変化を考慮することが有効である。なお、T\_000 に対して 10\_000、A\_000 は  $x$  方向で過大評価が存在する可能性があるが、安全側で評価できると考えられる。Fig. 5(b) より、Fig. 5(a) の  $x$  方向と比べて  $y$  方向の免震層残留変形が相対的に小さいことが見られ、 $y$  方向の結果についての検討はここでは省略する。

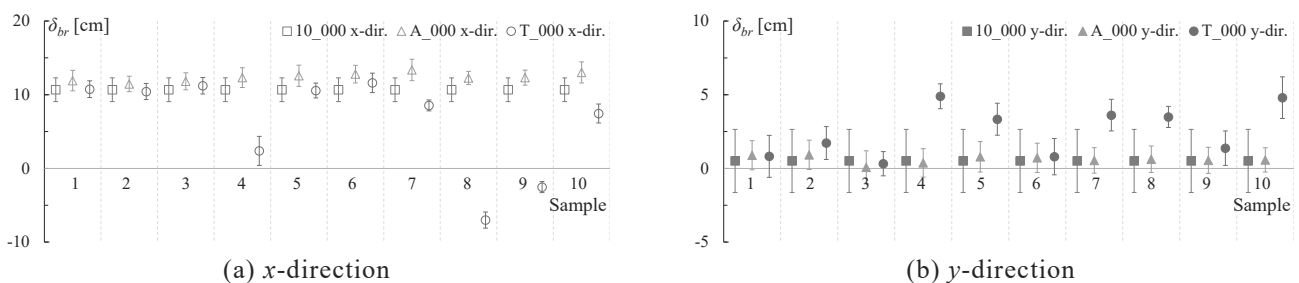


Fig. 5 Residual deformation of isolation layer (10 waves ensemble)

Fig. 5(a) より、10\_000、A\_000 と比べて、T\_000 の残留変形が同等 (例えば Sample 2)、小さい (例えば Sample 4)、顕著に小さい (例えば Sample 8) 場合がある。これから、免震層のループ (免震層の変形  $\delta_b$  とせん断力  $Q_b$  の関係) を用いて上述の差異が生じている原因を深く考察する。Fig. 6(a)~(d) に免震層のループ ( $x$  方向、T\_000、Sample 2、Wave 1) を示す。図にける免震層残留変形の推定値  ${}_p\delta_{br}$  (Presumed residual deformation) が免震層最大変形および免震層の 1 次剛性を用いて次式<sup>3)</sup>で算出できる。

$${}_p\delta_{br} = \frac{\delta_{bmax} (k_{b1} - k_{b2}) + \delta_{by} (k_{b2} - k_{b1})}{k_{b1}} \quad (2)$$

ここで、 $\delta_{bmax}$ : 免震層の最大変形、 $\delta_{by}$ : 免震層の降伏変形 (=2.8 cm)、 $k_{b1}$ : 免震層の 1 次剛性、 $k_{b2}$ : 免震層の 2 次剛性を表す。

× Maximum deformation △ Residual deformation ▲ Presumed residual deformation — All results — Current results

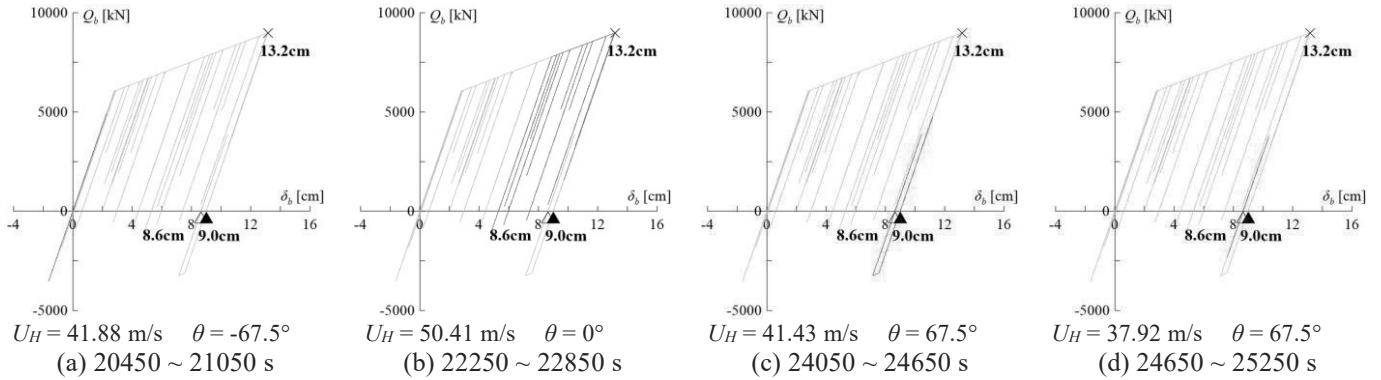


Fig. 6 Loop of isolation layer (x-direction, T\_000, Sample 2, Wave 1)

× Maximum deformation △ Residual deformation ▲ Presumed residual deformation — All results — Current results

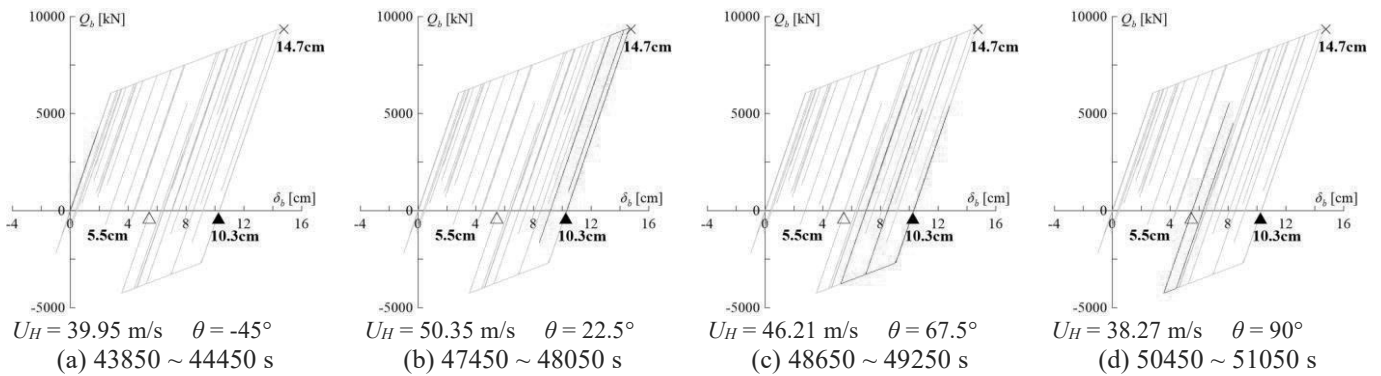


Fig. 7 Loop of isolation layer (x-direction, T\_000, Sample 4, Wave 1)

× Maximum deformation △ Residual deformation ▲ Presumed residual deformation — All results — Current results

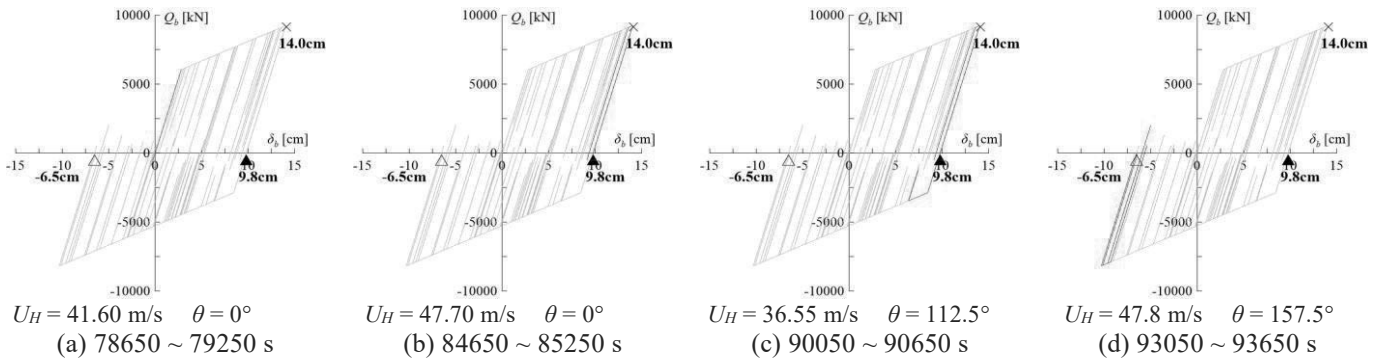


Fig. 8 Loop of isolation layer (x-direction, T\_000, Sample 8, Wave 1)

Fig. 6(a)の20450~21050秒(600秒間)では、初期にx方向の風力が相対的に小さいため、免震層が弾性範囲内で振動している。それから、Fig. 6(b)の22250~22850秒では、風力の増大に伴い、免震層が塑性化し、最大変形 $\delta_{bmax}$ (Maximum deformation)が13.2 cmとなっている。Fig. 6(c)の24050~24650秒とFig. 6(d)の24650~25250秒では、免震層最大変形との反対方向の風力が小さいため、免震層は弾性範囲内で振動し、最終的に残留変形 $\delta_{br}$ (Residual deformation)が8.6 cmとなり、残留変形の推定値9.0 cmと比べてわずかに等しい。

Fig. 7(a)~(d)に免震層のループ(x方向, T\_000, Sample 4, Wave 1)を示す。Fig. 6(a)と同様に、Fig. 7(a)では、免震層が弾性範囲内で振動しており、Fig. 7(b)では最大変形が14.7 cmに達している。しかし、Fig. 7(c)では、反対方向風力が存在しているため、免震層は揺れ戻し効果で塑性範囲に入った。Fig. 7(d)では、より大きな反対方向風力が存在し、免震層は揺れ戻しを続け、最終的に残留変形が5.5 cmとなり、残留変形の推定値10.3 cmと比べて小さい。

Fig. 8(a)~(d)に免震層のループ(x 方向, T\_000, Sample 8, Wave 1)を示す。Fig. 8(b)では, 免震層最大変形が 14.0 cm に達している。それから, Fig. 8(c)では, 反対方向風力による揺れ戻し効果で免震層塑性範囲に入ったことがわかる。しかし, Fig. 8(d)では, 風速が 47.8 m/s と大きい, かつ風向が 157.5°とし 180°(免震層変形と反対の方向)に接近しているため, 反対方向風力が非常に大きくなり, 強い揺れ戻し効果で最終的に残留変形が最大変形との逆方向の -6.5 cm となり, 残留変形の推定値 9.8 cm と比べて顕著に小さい。

以上により, 免震層変形と反対方向の風力による揺れ戻し効果が存在しても, その風力が小さい場合, T\_000 に対して 10\_000、A\_000 は過大評価とならない。しかし, 風速・風向変化による反対方向風力が大きい場合, 揺れ戻し効果で免震層残留変形が小さくなり, 過大評価となる。そのため, その揺れ戻し効果も反対方向風力の大きさにより決まると考えられる。

## 5. まとめ

本報では, 超高層免震建物を研究対象として, 多質点系モデルを用いた時刻歴応答解析により, 10 分間風力と台風シミュレーション(Sample 1~10)による免震層残留変形を比較した。ここでは, 3 種類の風力 (10\_000 : 耐風設計に用いられる風速・風向変化が一定の 10 分間風力を表す。A\_000 : 風速変化のみを有する台風を想定した風力を表す。T\_000 : 風速・風向変化を有する台風を想定した風力を表す。) を用いて検討した。得られた結論を以下にまとめる。

- (1)  $T_{000} \leq A_{000} \leq 10_{000}$  により, 免震層残留変形の評価に風向変化を考慮することが有効である。なお, T\_000 に対して 10\_000、A\_000 は過大評価となる可能性があるが, 安全側で評価できると考えられる。
- (2) 免震層変形と反対方向の風力が小さい場合, T\_000 に対して 10\_000、A\_000 は過大評価とならない (例えば Sample 2)。しかし, 風速・風向変化による反対方向風力が大きい場合, 揺れ戻し効果で免震層残留変形が小さくなり, 過大評価となる (例えば Sample 4、8)。

## 謝辞

本研究の一部は, JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(JPMJOP1723)によるものです。

## 参考文献

- 1) 日本免震構造協会運営委員会, 2018 年度免震制振建物データ集積結果, MENSIN, No. 105, pp. 21-26, 2019
- 2) 日本免震構造協会, 免震建築物の耐風設計指針, pp. 115-117, 2012.9
- 3) 銭曉鑫, 佐藤大樹, 台風シミュレーションに基づく免震層の残留変形評価, 第 66 回構造工学シンポジウム, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol. 66B, pp. 323-329, 2020.3
- 4) 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
- 5) 団栗直希, 西嶋一欽, 確率台風モデルに基づくハザード適合最尤台風の決定方法, 平成 29 年度京都大学防災研究所研究講演発表会, B19, 2018.3
- 6) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説 (2015), pp. 321-434, 2015.2
- 7) 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 矩形高層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