

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	台風シミュレーションに基づく免震層の残留変形評価
Title(English)	EVALUATION OF RESIDUAL DEFORMATION IN SEISMIC ISOLATION LAYER BASED ON TYPHOON SIMULATION
著者(和文)	銭曉鑫, 佐藤大樹
Authors(English)	Xiaoxin Qian, Daiki Sato
出典(和文)	構造工学論文集, Vol. 66B, , pp. 323-329
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 66B, , pp. 323-329
発行日 / Pub. date	2020, 3
権利情報	日本建築学会

## 台風シミュレーションに基づく免震層の残留変形評価

### EVALUATION OF RESIDUAL DEFORMATION IN SEISMIC ISOLATION LAYER BASED ON TYPHOON SIMULATION

銭曉鑫\*, 佐藤大樹\*\*  
*Xiaoxin QIAN and Daiki SATO*

A seismic isolation system is designed to reduce the seismic responses of a building, and it has been applied to more and more super-tall buildings. However, for those seismically isolated super-tall buildings in the design for wind, large and long-duration wind loads may cause large wind-induced responses of the buildings, leading to the residual deformation in the seismic isolation layer. Therefore, by analyzing a multi-degree-of-freedom model via typhoon simulation, this paper investigates the maximum wind-induced responses and the residual deformation. Furthermore, the authors clarify how the wind speed and wind direction influence the above analytical results.

**Keywords :** *Seismically isolated super-tall building, Seismic isolation damper, Typhoon simulation, Change in wind speed and wind direction, Wind-induced response, Residual deformation*  
超高層免震建物, 免震ダンパー, 台風シミュレーション, 風速・風向変化, 風応答, 残留変形

#### 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, 集合住宅や事務所ビルに免震構造が積極的に採用され, 特に高さ 60m 以上の超高層建物への適用が拡大している<sup>1)</sup>。しかし, 建物の高層化に伴い, 地震力に対して相対的に風外力が大きくなる。その上, 地震力と比べて, 風外力は長時間繰り返し作用するという特徴があるため, 塑性化しやすい免震ダンパーに及ぼす影響を考えなければならない。大きな風外力が長時間作用することを考えると, 建物の最大応答値が許容値を超えていないことを確認するだけではなく, 免震ダンパーの塑性変形量の累積, すなわち免震層の残留変形に与える影響についての評価も必要である。

現行の耐風設計は建物全体が弾性範囲に留めているので, 基本的には 10 分間の風力に対して最大応答値の評価を行っている<sup>2)</sup>。しかし, 上述したように免震建物の高層化により, 設計時想定する風速レベルにおいては免震ダンパーの塑性化設計が必要となっている。免震ダンパーの塑性化を許容した場合, 免震層の残留変形の評価も必要となってくる。さらに, 台風の観測においては, 風速・風向が時々刻々と変化するため, これまでの風速・風向が一定の 10 分間の風力を用いた評価では不十分であることが考えられる。そのため, 風速・風向変化を考慮した台風シミュレーションに基づく評価が必要となる。

既往研究では, 村上ら<sup>3)</sup>が, 強風時の観測記録に基づく超高層免

震建物の頂部風速と免震層平均変位の関係から, 強風イベント終了時に免震層に残留変形が発生していることを確認した。小川ら<sup>4)</sup>が, 多質点系モデルによる超高層免震建物の免震層残留変形についての評価を行った。ただし, 検討用風力は 10 分間の風直交方向風力のみとし, 風速・風向変化を考慮した免震層残留変形についての検討はまだ行われていない。馬橋ら<sup>5)</sup>が, 3次元フレーム解析モデルを用いた一方向入力, 三方向同時入力ともに, 強風イベント終了時には残留変形を確認した。ただし, 検討用台風サンプルは 1 例に過ぎないため, ほかの台風サンプルの場合は異なる残留変形となる可能性もある。そこで, 本報では既往研究を踏まえて, 様々な台風サンプルを採用し, 風速・風向変化が超高層免震建物の最大応答値だけではなく免震層残留変形に与える影響について検討し, 設計実務に有益な情報を提供することを目的とする。

本論文の構成を以下に示す。2 章では, 多質点系モデルおよびその構造諸元について述べる。3 章では, 時刻歴風応答解析に用いられる風速・風向および作成した風外力の時刻歴について説明する。4 章では, 風速・風向変化が最大応答値に与える影響についての検討を行う。5 章では, 残留変形を評価した上で, 弾性剛性を用いた残留変形の推定値と比較し, その整合性を示す。6 章では, 本論文のまとめと今後の課題を提示する。

\*東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生・修士 (工学)

\*\*東京工業大学科学技術創成研究院 准教授・博士 (工学)

Graduate Student, School of Environment and Society,  
Tokyo Institute of Technology, M. Eng.  
Associate Prof., Institute of Innovation Research,  
Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

## 2. 多質点系モデルの概要

Fig. 1 に示すように、解析モデルは高さ  $H = 100\text{m}$ 、辺長比  $B/L = 1$ 、アスペクト比  $Ar = 4$  の鋼構造建物に相当する 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) <sup>9)</sup> 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。上部構造は、基礎固定時の 1 次固有周期  $T_u = 2.5\text{s}$  ( $= 0.025H$ )、密度  $\rho_u = 250\text{kg/m}^3$ 、減衰定数  $h = 2\%$  とし、免震層は、固有周期  $T_0 = 5.0\text{s}$ 、面密度  $\rho_0 = 3644\text{kg/m}^2$ 、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_{dy} = 0.03$  とした。計算により得られた上部構造  $i$  層の質量  ${}_u m_i$ 、 $i$  層の剛性  ${}_u k_i$  および 1 次固有モードは Fig. 2 のようなプロットになる。上部構造  $i$  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 (1) により決定した <sup>7)</sup>。

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

ここで、 ${}_u \omega$  : 上部構造の  $s$  次固有円振動数、 ${}_u m_i$  : 上部構造  $i$  層の質量、 ${}_u \phi_i$  : 上部構造  $i$  層の  $s$  次モードベクトルを表す。ただし、 ${}_u k_{11} = 0$ 、 ${}_u \phi_0 = 0$  とする。

Fig. 3 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す。免震層の復元力特性について、時間依存性および繰り返し依存性を考慮していない。免震層の諸元は式 (2) ~ (4) 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。

$$Q_{dy} = (W_u + W_b) \cdot \alpha_{dy} \quad (2)$$

$$k_{d1} = Q_{dy} / \delta_{dy} \quad (3)$$

$$k_f = \frac{4\pi^2 (W_u + W_b)}{T_0^2 \cdot g} \quad (4)$$

ここで、 $Q_{dy}$  : 免震層ダンパーの降伏耐力、 $k_{d1}$  : ダンパーの初期剛性、 $\delta_{dy}$  : ダンパーの降伏変形 ( $= 2.80\text{cm}$ )、 $\alpha_{dy}$  : ダンパー降伏せん断力係数 ( $= 0.03$ )、 $k_f$  : 免震層アイソレータの 1 次剛性、 $W_u$  : 上部構造の総重量、 $W_b$  : 免震層の重量、 $g$  : 重力加速度を表す。

以上の結果を用いて免震層の 1 次剛性  $k_{01}$ 、2 次剛性  $k_{02}$ 、降伏耐力  $Q_{0y}$  は式 (5) ~ (7) で算出される。

$$k_{01} = k_{d1} + k_f \quad (5)$$

$$k_{02} = k_f \quad (6)$$

$$Q_{0y} = k_{01} \cdot \delta_{dy} \quad (7)$$

## 3. 風外力の概要

Fig. 4 の実線は、台風シミュレーション <sup>8)</sup> より算出された建物頂部の平均風速  $U_H$  (10 分間の平均) の時刻歴変化を表している。なお、横軸の単位  $h$  は時間 (hour) を表している。建物頂部最大平均風速は  $U_{H,max} = 50.41\text{m/s}$  である (再現期間 500 年相当し、地上高さ 100m、地表面粗度区分 III として換算した <sup>9)</sup>)。本解析では、東京都に発生が予測される台風の中から、台風の継続時間が異なるものを 10 個のサンプル (Sample 1~10) を選定した。Sample 1 の継続時間が最も短

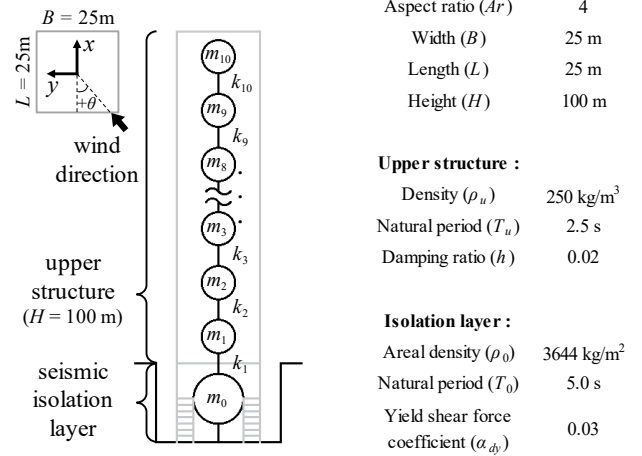


Fig. 1 Multi-degree-of-freedom model

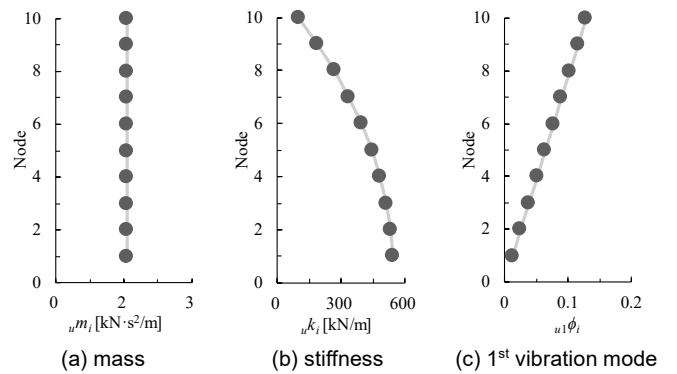


Fig. 2 Upper structural characteristics

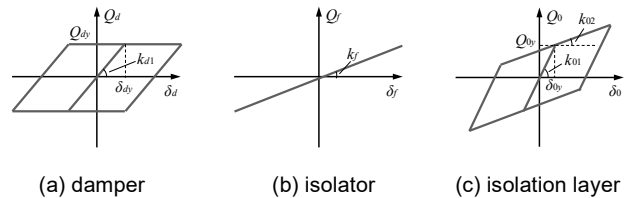


Fig. 3 Restoring force characteristics in seismic isolation layer

く 9 時間とし、Sample 9, 10 の継続時間が最も長く 40 時間とする。その中に Sample 6 (1<sup>st</sup> peak: 49.54m/s, 2<sup>nd</sup> peak: 50.41m/s)、Sample 8 (1<sup>st</sup> peak: 50.41m/s, 2<sup>nd</sup> peak: 48.21m/s) と Sample 9 (1<sup>st</sup> peak: 50.41m/s, 2<sup>nd</sup> peak: 45.13m/s) は台風の目に伴い 2 回風速のピークを有する。Fig. 4 のプロットは、風向の時刻歴変化を表している。風向の設定については、台風シミュレーションより得られた 10 分間毎の風向の値を、風洞実験 <sup>10)</sup> が行なわれた角度 ( $22.5^\circ$  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 に示したような建物幅  $B$  に正対する角度を表す。また、各台風サンプルにおいて、風洞実験による試験体各層で計測された層風力係数の組み合わせを変更することにより 10 波の風外力時刻歴波形 (Wave 1~10) を作成している <sup>9)</sup>。本解析では、風速・風向変化が異なる 3 種類の台風波形 (10\_000, A\_000, 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 ( $U_{H,max} = 50.41\text{m/s}$  に固定)・風向変化 ( $\theta = 0^\circ$  に固定) がなく、かつ継続時間が 10 分間のみの波形である。A\_000

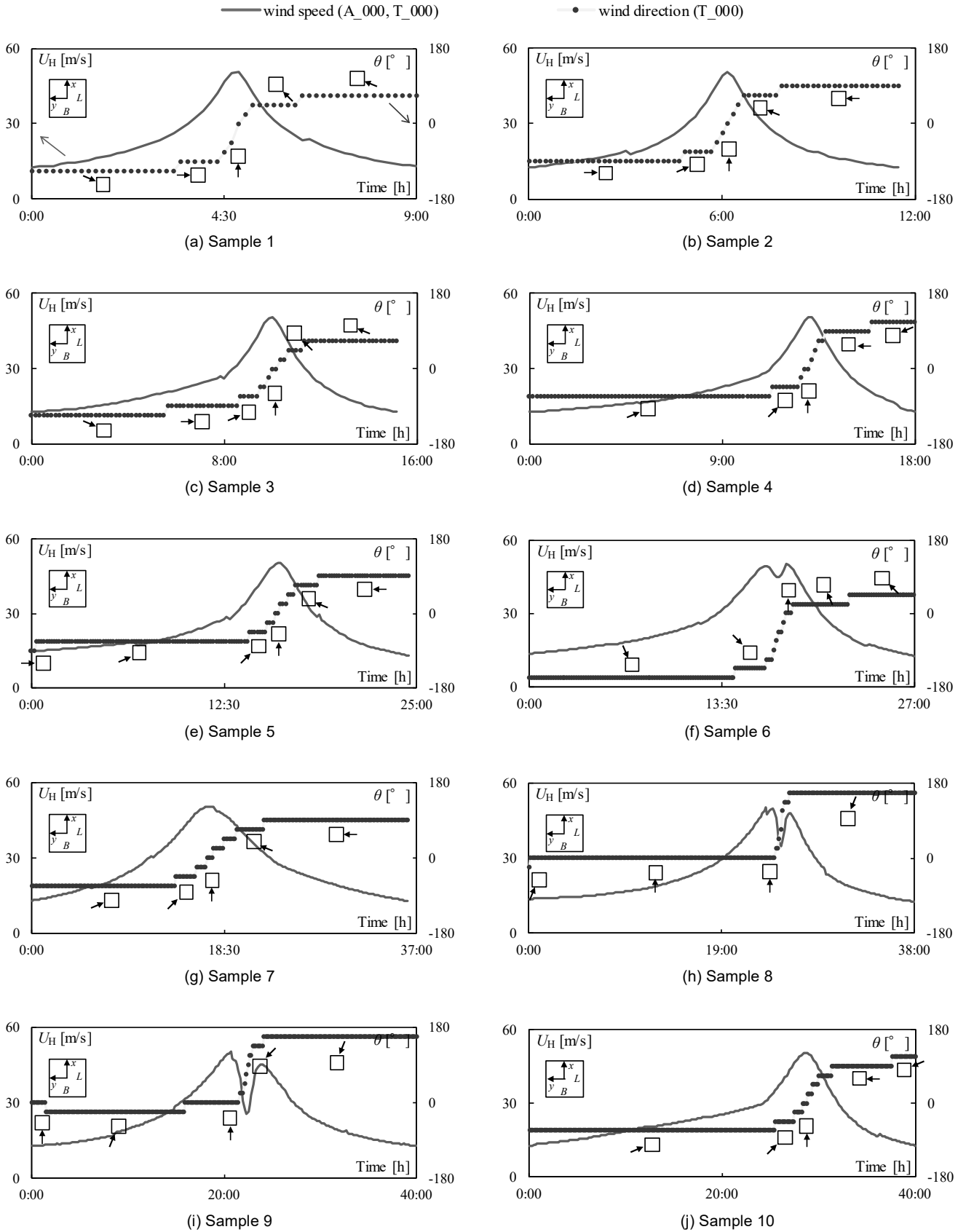


Fig. 4 Time history of wind speed and wind direction

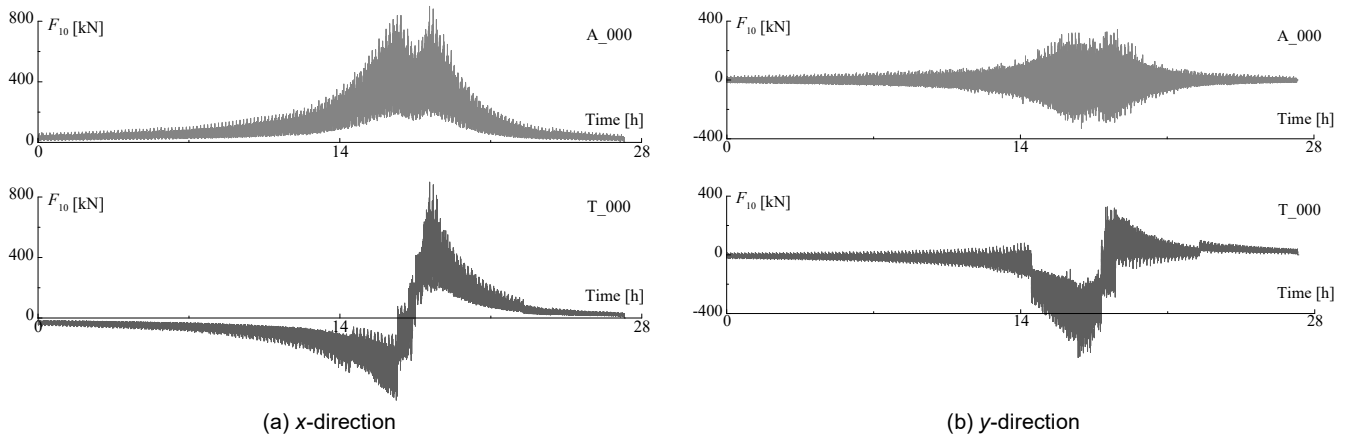


Fig. 5 An example of wind force at 10<sup>th</sup> story (Sample 6, Wave 1)

は、Fig. 4 の風速変化（実線）のみを考慮した継続時間が全時刻の波形である。T\_000 は、風速変化（実線）に加えて風向変化（プロット）も考慮した継続時間が全時刻の波形である。ただし、T\_000 における最大風速時の風向が  $\theta = 0^\circ$  に固定した。000 については、最大風速時の風向が  $\theta = 0^\circ$  を表す。A\_000 を設定する目的は、10\_000 に比べて風速変化を考慮すると、建物の最大応答値はどのように変化するか、特に免震層の残留変形はどのように変化することを考察する。ただし、風向変化を考慮しない A\_000 は過大な評価となる可能性があり、より一層の検討のために風向変化を考慮した T\_000 を設定している。Fig. 5 に作成した 10 層の風力  $F_{10}$  の時刻歴波形を示す。なお、横軸の単位 h は時間 (hour) を表している。ここでは、代表例として、Sample 6, Wave 1 の x 方向と y 方向それぞれの風力波形を示している。Fig. 5 より、A\_000 は風向変化を考慮しないため、x 方向では全時刻平均成分を持ち、y 方向では全時刻平均成分を持たない。一方、風向変化を考慮した T\_000 は、x と y 方向では平均成分を持たない場合もある。

#### 4. 建物の最大応答変位

Fig. 6 に解析モデル各層 x 方向の最大応答変位 (最大絶対値)  $Dis_{max}$  を示す。高さ方向で各層の最大変位分布は概ね直線となっている。x 方向で、同じ種類の台風波形の場合に、最大応答変位は台風サンプルによらず大きく変化する。また、各台風サンプルにおいて、A\_000 は 10\_000 より大きな値を示しているため、風速変化を考慮すると、最大応答変位が増大する傾向が見られる。さらに、A\_000 と T\_000 を比較すると、最大風速が等しく、最大風速時の風向も等しいが、T\_000 のほうが小さな値を示している。そのため、風向変化を考慮しない A\_000 は、最大変位を安全側で評価できると考えられる。

Fig. 7 に解析モデル各層 y 方向の最大応答変位 (最大絶対値)  $Dis_{max}$  を示す。各台風サンプルにおいては、概ね T\_000 の値 < A\_000 の値という結果となっている。ただし、Sample 1 と 6 において、A\_000 の値 < T\_000 の値という例外が見られる。Fig. 5(b) の 10 層の風力時刻歴波形 (Sample 6, Wave 1, y 方向) より、A\_000 の風力は平均成分を持たないため、 $\pm 400\text{kN}$  の範囲で変動し、Fig. 8 における y 方向の最大変位は +20.6cm となっている。一方、T\_000 は、一部分の風力が -400kN を超えているため、最大変位は -25.3cm に達した。Fig. 7 の最大応答変位は、最大絶対値で表せるため、T\_000 ほうが大きな

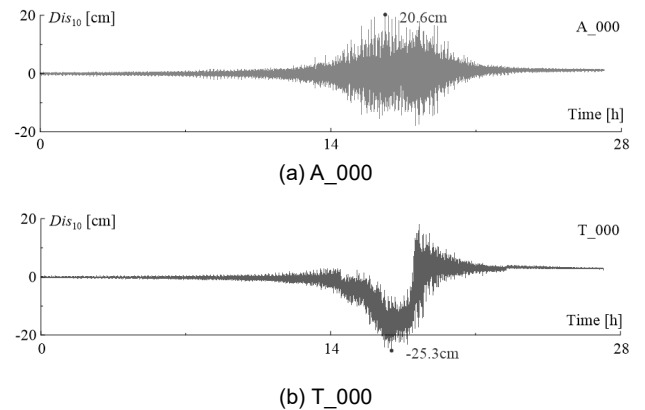


Fig. 8 Time history of displacement at 10<sup>th</sup> story (Sample 6, wave 1, y-direction)

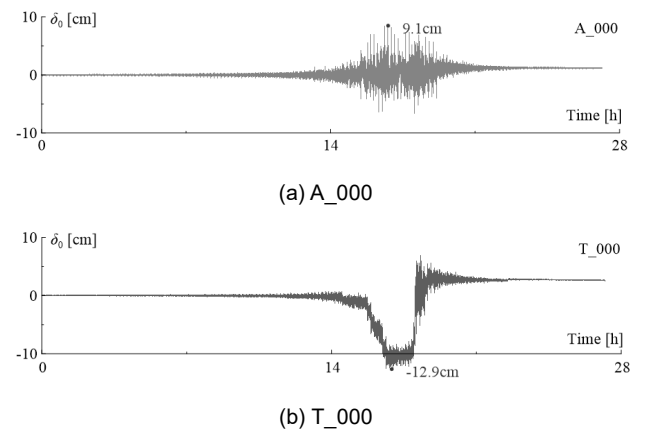


Fig. 9 Time history of deformation in isolation layer (Sample 6, wave 1, y-direction)

値を示している。Sample 1 の例外についても、Sample 6 の例外と同様の原因であると確認した。

Fig. 6, 7 の免震層の最大変形 (最大絶対値)、すなわち 0 層の最大変位は概ね 10 層最大変位の半分であることが見られる。Fig. 6 の x 方向では、同じ種類の台風波形の場合に、最大応答変位は台風サンプルによらず大きく変化する。また、各台風サンプルにおいて、T\_000 の値 < A\_000 の値という結果になっているため、風向変化を

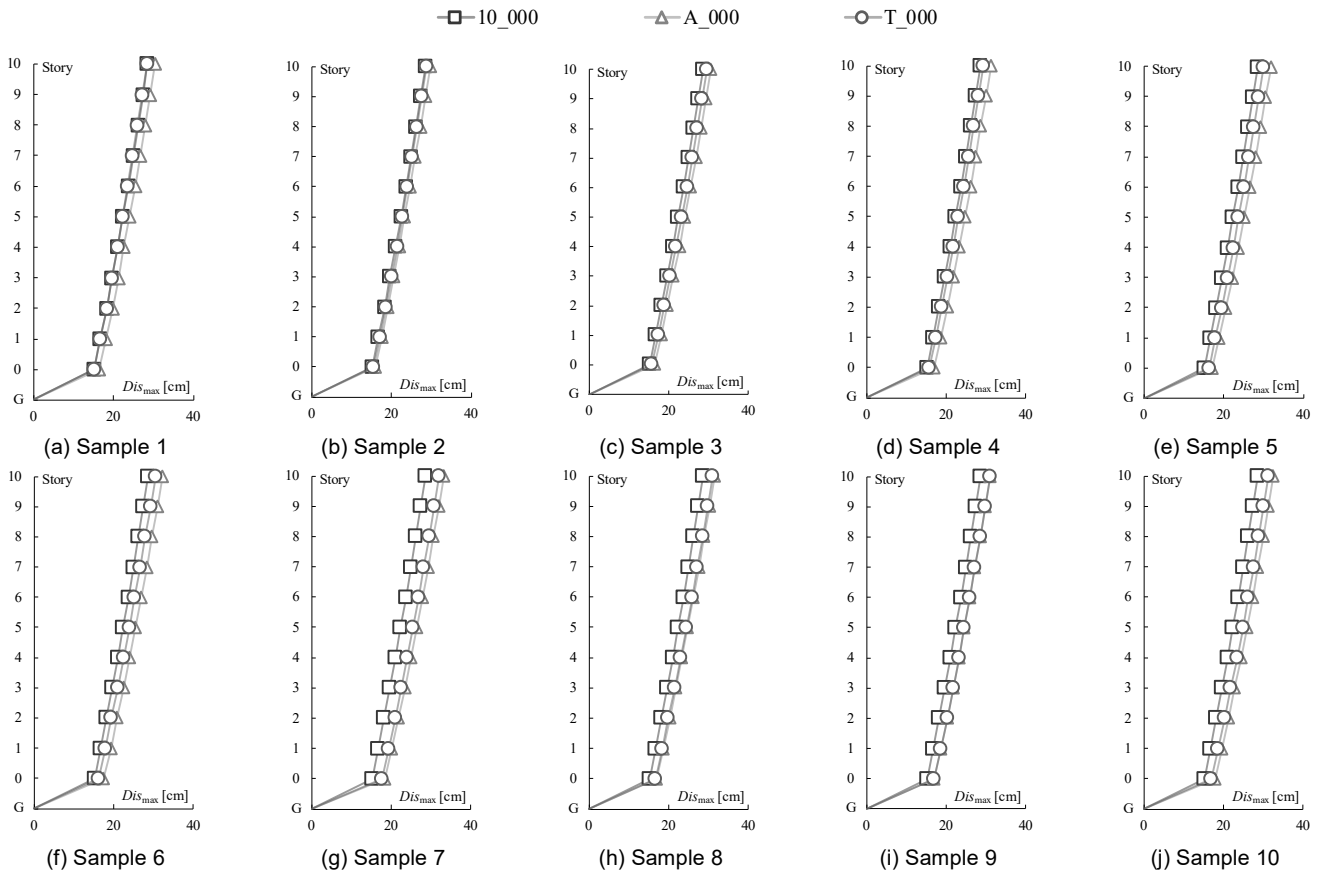


Fig. 6 Maximum displacement in x-direction

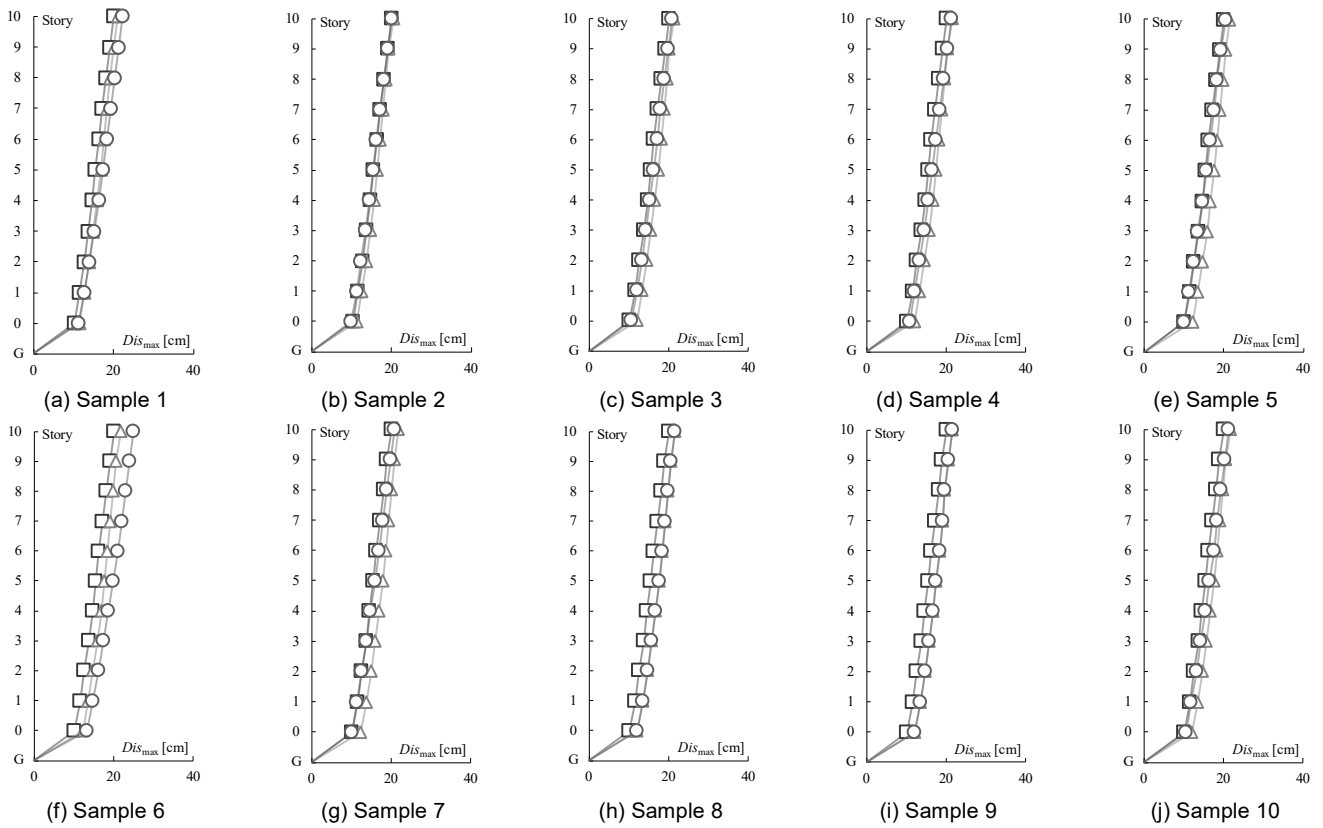


Fig. 7 Maximum displacement in y-direction

考慮しない A\_000 は、免震層最大変形を安全側で評価できると考えられる。ただし、Fig. 7 の y 方向では、Sample 1 と 6 において、A\_000 の値 < T\_000 の値という結果が見られる。例として、Fig. 9 に免震層変形の時刻歴波形 (Sample 6, Wave 1, y 方向) を示す。A\_000 の最大変形は+9.1cm となり、T\_000 の最大変形は-12.9cm に達した。T\_000 の y 方向で、より大きな風力が存在するため、T\_000 のほうが大きな値を示している。

## 5. 免震層の残留変形

### 5.1 解析値についての評価

Fig. 10 に免震層の残留変形  $\delta_{or}$  を示す。x 方向において、各台風サンプルにおける A\_000 の値は概ね等しいことがわかる。ただし、T\_000 の値は大きく変化しているため (Sample 4, 8, 9)、風向変化が残留変形に与える影響があることを確認した。Fig. 10 の x 方向より、風向変化を考慮しない A\_000 は、残留変形を過大な評価となる可能性がある。そのため、免震層残留変形の評価に、風向変化を考慮する必要があると考えられる。y 方向では、平均成分を持たない A\_000 では、残留変形がほとんど 0 であることが見られる。ただし、T\_000 では、風向変化の影響で平均成分を持つ場合もあるため、残留変形が生じている。ただし、x 方向に比べて y 方向の残留変形が相対的に小さくて、履歴ループに関する説明はここでは省略する。

上述の Sample 4, 8, 9 における A\_000 と T\_000 の x 方向の履歴ループ (免震層変形  $\delta_0$  と層せん断力  $Q_0$  の関係) を Fig. 11 に示す。Fig. 11(a) の Sample 4 において、風向変化を考慮しない A\_000 の免震層塑性変形量は一方に増大しており、最大変形が 13.7cm に達し、残留変形が 9.5cm となっている。一方、風向変化を考慮した T\_000 は、最大変形が 14.7cm に達した後、最大変形と逆方向の大きな風力が存在するため、残留変形が 5.5cm となっている。Fig. 11(b), (c) の Sample 8 と Sample 9 についても、最大変形と逆方向の大きな風力も存在するため、残留変形が -6.5cm と -3.6cm になっている。

### 5.2 初期剛性を用いた残留変形の推定

本節は最大変形の座標と免震層 1 次剛性を用いて残留変形を推定する。免震層の最大せん断力を  $Q_{0,max}$  で表すと、Fig. 3(c) と Fig. 11 の A\_000 により、 $Q_{0,max}$  は式(8)あるいは式(9)で算出できる。

$$Q_{0,max} = k_{01}(\delta_{0,max} - p \delta_{or}) \quad (8)$$

$$Q_{0,max} = k_{02}(\delta_{0,max} - \delta_{0y}) + k_{01} \cdot \delta_{0y} \quad (9)$$

式(8)と式(9)により、式(10)が得られる。

$$k_{02}(\delta_{0,max} - \delta_{0y}) + k_{01} \cdot \delta_{0y} = k_{01}(\delta_{0,max} - p \delta_{or}) \quad (10)$$

よって、式(11)が得られる。

$$p \delta_{or} = \frac{\delta_{0,max}(k_{01} - k_{02}) + \delta_{0y}(k_{02} - k_{01})}{k_{01}} \quad (11)$$

式(11)より、免震層最大変形  $\delta_{0,max}$  が既知の場合、残留変形の推定値  $p \delta_{or}$  が得られる。さらに、推定した残留変形の整合率  $p \delta_{or} / \delta_{or}$  は Fig. 12 のようなプロットになる。Fig. 12 の残留変形推定値の整合率より、上述の推定方法を使うと、A\_000 における整合率がちょうど 1.0 となる。しかし、T\_000 の風向変化の影響のため、解析値に比べて推

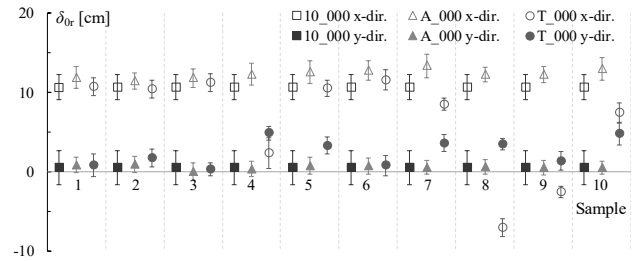
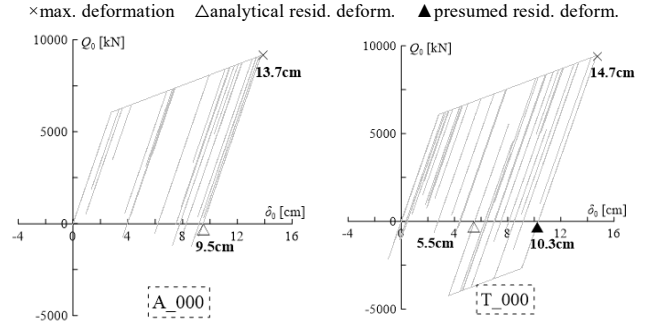
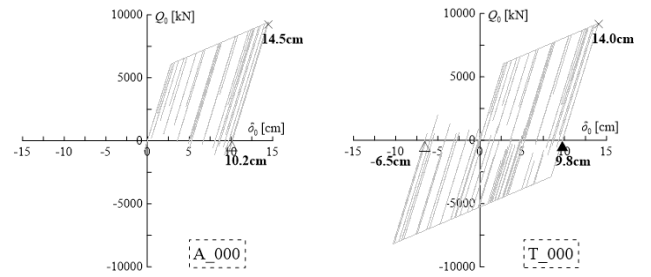


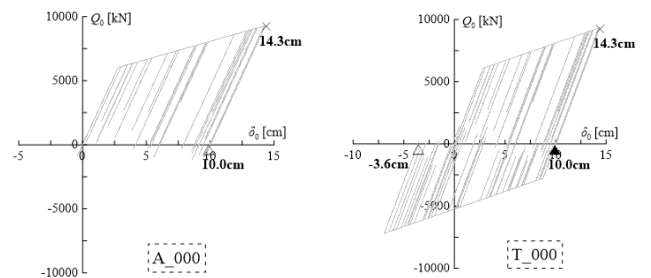
Fig. 10 Residual deformation in seismic isolation layer



(a) Sample 4, Wave 1, x-direction



(b) Sample 8, Wave 1, x-direction



(c) Sample 9, Wave 1, x-direction

Fig. 11 Time history loop in isolation layer

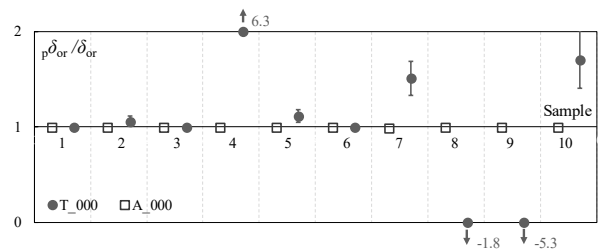


Fig. 12 Error of presumed residual deformation in x-direction

定値が過大となる場合があり、その整合率  $\rho_{\delta_{or}} / \delta_{or}$  は-5.3~6.3 と大きい。なお、整合率がマイナスを示すのは、風向が変化することで、最大応答発生時と反対の平均風速が作用しているためである。式(11)による残留変形の推定値は、 $T_{000}$  の解析値に対して過大な推定値となる可能性がある。

## 6 まとめ

本論文では、超高層免震建物を研究対象として、風速・風向変化を考慮した台風シミュレーションに基づく時刻歴風応答解析を行った。風速・風向変化が異なる3種類(10\_000: 現行の耐風設計に用いられる風速・風向変化がなく、かつ継続時間が10分間のみの波形である。A\_000: 風速変化のみを考慮した継続時間が全時刻の波形である。T\_000: 風速変化に加えて風向変化も考慮した継続時間が全時刻の波形である。)を用いた解析を行い、それぞれの建物の最大応答変位および免震層の残留変形についての検討を行った。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 建物最大変位と免震層最大変形について、 $x$  方向では、 $T_{000}$  の値より  $A_{000}$  の値のほうが大きいことにより、風向変化を考慮しない  $A_{000}$  は、最大変位を安全側で評価できる。しかし、 $y$  方向では、風向変化の影響で、 $T_{000}$  のほうが大きな値を示している場合がある。
- (2) 免震層残留変形について、 $x$  方向では、免震層最大変形と逆向きの風力が存在するため、 $A_{000}$  は過大な評価となる。また、推定式による残留変形の推定値は、 $T_{000}$  の解析値に対して過大な推定値となる可能性がある。

現行の耐風設計で基本的には10分間の風力に対して最大応答値の評価を行っている。本論文では、継続時間が長い台風シミュレーションによる最大応答値および残留変形の評価を通じて設計実務に有益な情報を提供した。ただし、本論文はあくまでも特定な対象建

物についての検討を行った。情報が不十分な現時点で、建物形状やダンパー量などの諸元が変わった場合は異なる結論となる可能性がある。さらに、設計実務において、風速・風向変化を考慮した風応答および残留変形の予測手法の提案が求められる。これについては今後の課題とする。

## 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:2015年度免震制振建物データ集積結果, MENSIN, No.85, pp.37-42, 2014.8
- 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) 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, 第62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. 62B, pp. 329-337, Mar. 2016
- 4) 小川諒, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 早田友彦, 佐藤利昭, 北村春幸. 多質点系モデルによる超高層免震建物の風応答評価 - 免震層残留変形評価の試案 -, 日本建築学会関東支部研究報告集, 一般社団法人日本建築学会, Mar. 2014
- 5) 馬橋聖生, 佐藤大樹. 3次元フレーム解析モデルを用いた超高層免震建物の時刻歴風応答解析 一方向入力と三方向連成入力による免震層応答の比較, 第65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. 65B, pp. 1-8, Mar. 2019
- 6) 片桐純治, 大熊武司, 安井八紀, 丸川比佐夫, 鶴見俊雄. 高層免震建築物の風応答解析のための縮約モデルに関する検討, 日本建築学会技術報告集, 日本建築学会, Vol. 17, No. 36, pp. 461-466, Jun. 2011.
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 建築物荷重指針・同解説2004, 日本建築学会, pp.321-434
- 10) 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