

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	変動風力を受ける超高層免震建物の固有周期に基づくエネルギー性状の研究
Title	
著者(和文)	齋藤元紀, 佐藤大樹, 吉江慶祐, 池上昌志, 佐藤利昭, 北村春幸
Authors	Genki Saito, Daiki Sato, Keisuke Yoshie, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会大会学術講演梗概集, vol. B-2, , pp. 587-588
Citation(English)	, vol. B-2, , pp. 587-588
発行日 / Pub. date	2015, 9
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: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110010005143">http://ci.nii.ac.jp/naid/110010005143</a>

## 変動風力を受ける超高層免震建物の固有周期に基づくエネルギー性状の研究

準会員○齋藤 元紀<sup>1)</sup> 佐藤 大樹<sup>2)</sup> 吉江 慶祐<sup>3)</sup>  
池上 昌志<sup>4)</sup> 佐藤 利昭<sup>5)</sup> 北村 春幸<sup>5)</sup>

超高層免震建物 多質点系 風洞実験 弾塑性応答

## 1. はじめに

近年、地震対策として超高層建物に免震層を設置する例が多く見られる。超高層免震建物では、地震より風外力のほうが大きくなり、免震層が塑性化することが考えられるため、弾塑性範囲における応答評価の必要性が高まっている。風応答評価法としては、鈴木ら<sup>1)</sup>が、超高層免震建物を対象とし、エネルギーの釣り合いに基づく構造物の弾塑性風応答予測手法を提案した。しかし、風向 $0^\circ$ 、辺長比1.0の構造物でしか確認しておらず、適用範囲の拡張が必要となる。

そこで本報では、弾塑性構造物の応答予測に必要なエネルギー性状を、時刻歴応答解析に基づき検証する。

## 2. 解析対象モデルおよび風外力の概要

本報における検証対象建物の解析モデルを図1に示す。解析モデルは、上部構造を1次モードが直線のモデルとし、その下に免震層を設置した11質点せん断型モデルとする。構造減衰は、上部構造のみの減衰定数 $\gamma_h=2\%$ の剛性比例型とし、免震層には内部粘性減衰を考慮しない。ダンパーの降伏変位 $\delta_y=0.028\text{ m}$ とし、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_y$ (=免震層におけるダンパーの降伏耐力/総重量、以下、ダンパー量)=0.02, 0.04, 0.06, 0.10は4種類を用いる。免震層の諸元は(1)~(3)式より算出される。

$${}_{1d}K = ({}_uW + {}_bW) \cdot \alpha_y / \delta_y \quad (1)$$

$${}_{1f}K = 4\pi^2 ({}_uW + {}_bW) / ({}_bT^2 \cdot g) \quad (2)$$

$${}_{1b}K = {}_{1f}K + {}_{1d}K \quad (3)$$

ここで、 ${}_{1d}K$ : 免震層におけるダンパーの初期剛性、 ${}_uW$ : 上部構造総重量、 ${}_bW$ : 免震層重量、 ${}_{1f}K$ : 免震層におけるアイソレータの初期剛性、 ${}_bT$ : 上部構造を剛体とした場合の免震層の周期(以下、免震層周期)、 $g$ : 重力加速度、 ${}_{1b}K$ : 免震層の初期剛性とする。

検証対象は、基準モデルを免震層周期 ${}_bT=6.0\text{ s}$ 、上部構造密度 ${}_u\rho=175.0\text{ kg/m}^3$ としたM1-T6modelと定義する。基

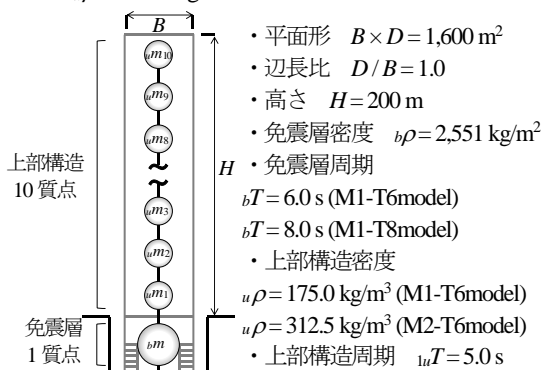


図1 弾塑性解析モデル概要

準モデルから免震層周期のみ ${}_bT=8.0\text{ s}$ と変更したM1-T8model、上部構造密度 ${}_u\rho=312.5\text{ kg/m}^3$ と変更したM2-T6modelとする。解析パラメータをダンパー量、風力入力方向、上部構造密度および免震層周期とする。表1に各モデルそれぞれの免震層の初期剛性を用いて11質点系の固有値解析から求めた1次固有周期 ${}_{1T}$ 、表2にモデルごとの免震層におけるアイソレータの初期剛性を示す。

構造物に作用する風外力は風洞実験結果<sup>3)</sup>による層風力の時刻歴波形を用いた。実験気流は「建築物荷重指針・同解説」<sup>4)</sup>の地表面粗度区分Ⅲの気流を目標に作成された。頂部風速 $U_H=63.8\text{ m/s}$ (再現期間500年)とし、応答値は30波の応答のアンサンブル平均結果により検証した。検証用風力は平均成分を含まない変動成分のみの風方向風力および風直交方向風力とする。図2に風力入力方向ごとの頂部層風力のパワースペクトル密度 $S_{F10}$ を示す。

## 3 応答変位に基づくエネルギー性状の検証

本章では、免震層応答変位の標準偏差 ${}_b\sigma_x$ に基づき解析パラメータの違いによるエネルギー入力 $E_{input}$ の検証を行う。図3(a), (b)に風方向および風直交方向における $E_{input}$ をそれぞれ示す。図3(a), (b)より、パラメータによらず応答変位が増加すると $E_{input}$ は増加することがわかる。図3(a)より、免震層周期は異なり上部構造密度が等しいM1-T8 model( $\Delta$ 印)とM1-T6model( $\bullet$ 印)において、応答変位が同程度の場合、風方向の $E_{input}$ は同程度となった。図3(b)より、応答変位が同程度の場合、上部構造密度は等しくても免震層周期が長い方ほど風直交方向の $E_{input}$ は小さくなった。図3(a), (b)より、免震層周期は等しく上部構造密度が異なるM2-T6model( $\square$ 印)とM1-T6 model( $\bullet$ 印)において、風方向、風直交方向ともに上部構造密度が高い方ほど $E_{input}$ は小さくなった。

## 4 等価周期に基づくエネルギー性状の検証

本章では、上部構造密度 ${}_u\rho$ および免震層周期 ${}_bT$ が、エネルギー入力 $E_{input}$ に対する免震層の履歴吸収エネルギーの比

表1 1次固有周期 ${}_{1T}$

$\alpha_y$	M1-T6	M1-T8	M2-T6
0.02	5.36 s	5.38 s	5.37 s
0.04	5.19 s	5.20 s	5.20 s
0.06	5.13 s	5.13 s	5.14 s
0.10	5.08 s	5.08 s	5.09 s

表2 アイソレータの初期剛性 ${}_{1f}K$

	M1-T6	M2-T6	M1-T8
${}_{1f}K$ kN/m	65,887	114,138	37,061

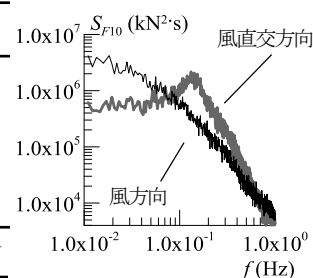


図2 頂部層風力のパワースペクトル密度

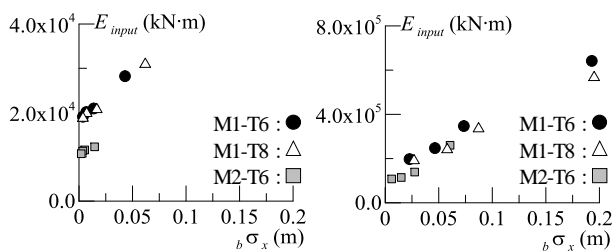


図3 応答変位に基づく入力エネルギーの変化

$\alpha_p$  (後述)に与える影響を、等価周期 ${}_1T_{eq}$ を用いて検証する。なお、等価周期 ${}_1T_{eq}$ は、免震層における弾塑性系と等価線形系のそれぞれの1サイクルあたりのひずみエネルギーのつりあい条件から求められる等価剛性 ${}_bK_{eq}$ を用いて、11質点系の固有値解析から求めた建物の1次固有周期としている。 ${}_bK_{eq}$ は(4)式より算出される<sup>5)</sup>。

$${}_bK_{eq} = {}_bK \cdot \left\{ 1 - (1 - \alpha) e^{-\frac{b\delta_y^2}{2b\sigma_x^2}} + (1 - \alpha) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{b\delta_y}{2b\sigma_x} \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{b\delta_y}{\sqrt{2}b\sigma_x} \right) \right) \right\} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha$ : 免震層の剛性比 (= 免震層の2次剛性 / 免震層の初期剛性)、 $b\delta_y$ : 免震層の降伏変位 (= 0.028 m) である。なお、免震層応答変位の標準偏差 $b\sigma_x$ は時刻歴応答解析結果を用いる。

図4(a), (b)に風方向および風直交方向における $E_{input}$ をそれぞれ示す。図4より、パラメータによらず等価周期が長くなると $E_{input}$ は大きくなるのがわかる。これは、図2からもわかるように、周期が長くなる事で、風力のパワーが増大しているためである。風方向と風直交方向それぞれの最大の $E_{input}$ を比較すると、風直交方向の方が応答は大きく等価周期は長いので、 $E_{input}$ は大きくなり風方向の10倍以上の値となった。図4(a)より、風方向において、免震層周期は異なり上部構造密度が等しいM1-T8 model( $\Delta$ 印)とM1-T6model( $\bullet$ 印)の $E_{input}$ を比較すると、 $E_{input}$ は同程度となった。図4(b)より、等価周期が同程度の場合上部構造密度が等しくても免震層周期が長いと風直交方向の $E_{input}$ は小さく、図3の応答変位の結果と同様の傾向を示した。図4(a), (b)より、免震層周期は等しく上部構造密度が異なるM2-T6model( $\square$ 印)とM1-T6model( $\bullet$ 印)の $E_{input}$ を比較すると、風方向、風直交方向ともに上部構造密度が高い方ほど $E_{input}$ は小さく、こちらも応答変位と同様の傾向を示した。

パラメータがエネルギー入力 $E_{input}$ に対する免震層の履歴吸収エネルギーの比 $\alpha_p$ に与える影響を検証する。 $\alpha_p$ は、エネルギー入力に占める免震層の履歴吸収エネルギーの分担率を表し、(5)式より算出される。各モデルそれぞれの等価周期 ${}_1T_{eq}$ を、免震層の初期剛性 ${}_bK$ を用いて11質点固有値解析から求めた建物の1次固有周期 ${}_1T$ で除した値を $\alpha_T$ と定義し、 $\alpha_T$ に基づき $\alpha_p$ を検証する。なお、 $\alpha_T$ は、塑性化による固有周期の変化率を表し、(6)式より算出される。

$$\alpha_p = {}_bW_p / E_{input}, \quad \alpha_T = {}_1T_{eq} / {}_1T \quad (5), (6)$$

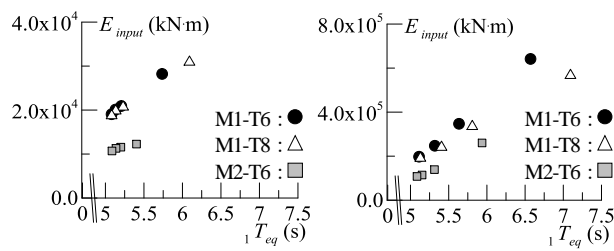


図4 等価周期に基づく入力エネルギーの変化

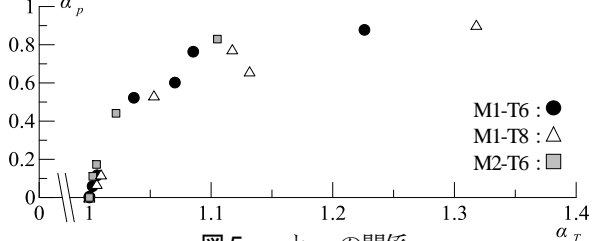


図5  $\alpha_p$ と $\alpha_T$ の関係

図5に各モデルにおける $\alpha_p$ と $\alpha_T$ の関係を示す。なお、解析モデルごとに風方向および風直交方向をあわせた結果を示している。図5より、パラメータによらず、 $\alpha_T$ が小さい範囲において、 $\alpha_p$ の増加に伴い $\alpha_p$ は急激に増加していることがわかる。しかし、 $\alpha_T$ が大きくなると、 $\alpha_p$ は1に漸近するが、 $\alpha_p$ に上限値が存在することが確認できる。 $\alpha_T$ が同程度の場合、M1-T6model( $\bullet$ 印)およびM1-T8model( $\Delta$ 印)は、免震層周期が異なり上部構造密度が等しいが、 $\alpha_p$ は概ね同程度になった。M1-T6model( $\bullet$ 印)およびM2-T6model( $\square$ 印)は、免震層周期が等しく上部構造密度が異なるが、M1-T6model および M1-T6model の比較結果と同様に $\alpha_T$ が同程度の場合 $\alpha_p$ は概ね同程度になった。以上より、 $\alpha_T$ が同程度の場合、塑性化の度合いによりばらつきはあるものの、 $\alpha_p$ は概ね同程度になることから、 $\alpha_p$ は風力入力方向、免震層周期 ${}_bT$ および上部構造密度 ${}_b\rho$ に比べ固有周期の変化による影響を受けることが確認できた。

#### 4. まとめ

本報では、弾塑性構造物の応答予測に必要なエネルギー性状を、時刻歴応答解析に基づき検証し、固有周期の変化率が同程度の場合、塑性化の度合いの差によりばらつきはあるものの、エネルギー入力に占める免震層の履歴吸収エネルギーの分担率 $\alpha_p$ は概ね同程度になることから、 $\alpha_p$ は風力入力方向、免震層周期および上部構造密度に比べ固有周期の変化による影響を受けることを確認した。

#### 謝辞

本研究は、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、東京工業大学佐藤研究室による新耐風設計法研究会の成果の一部です。特に、本研究を進めるにあたり、大熊武司教授、(株) 泉創建エンジニアリングの丸川比佐夫博士、片桐紘台博士、鶴見俊雄氏からご指導を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 吉江慶祐, 北村春幸, 大熊武司: エネルギーの釣合に基づく平均成分を有する広帯域性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608号, pp21-28, 2006.10
- 2) 鈴木悠也, 佐藤大樹, 吉江慶祐, 北村春幸: エネルギーの釣合に基づく変動風力を受ける超高層免震建物の応答予測手法, 日本建築学会学術講演梗概集B-2, pp281-282, 2010.7
- 3) 丸川比佐夫, 大熊武司, 北村春幸: 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), 学術講演梗概集, pp193-194, 2010.7
- 4) 日本建築学会: 建物荷重指針・同解説, 2004
- 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, pp59-66, 2005.3

\*1 東京工業大学(元東京理科大学)

\*2 東京工業大学

\*3 株式会社 日建設計

\*4 前田建設工業(元東京理科大学)

\*5 東京理科大学

\*1 Tokyo Institute of Technology

\*2 Tokyo Institute of Technology.

\*3 Nikken Sekkei Ltd

\*4 Maeda Corporation

\*5 Tokyo University of Science