

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	超高層免震建物の風応答および免震ダンパーの疲労損傷に関する基礎研究
Title(English)	Basic Study on Wind Responses of Super-Tall Buildings and Fatigue Damage of Seismic Isolation Dampers
著者(和文)	銭曉鑫, 佐藤大樹, 馬橋聖生
Authors(English)	Xiaoxin Qian, Daiki Sato, Sei Mabashi
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , pp. 257-258
Citation(English)	Summaries of technical papers of annual meeting, , pp. 257-258
発行日 / Pub. date	2019, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

超高層免震建物の風応答および免震ダンパーの疲労損傷に関する基礎研究

超高層免震建物	風応答解析	疲労損傷
免震ダンパー	風向変化	残留変形

正会員	○銭晓鑫*
同	佐藤大樹**
同	馬橋聖生***

1 はじめに

近年、人々の安全性・居住性に対する意識が高まるとともに、超高層建物に免震構造が次第に採用されている。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、地震力と異なり、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、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、免震ダンパーの疲労損傷に対する安全性の検証も必要である。現行の日本耐風設計は、構造物の風応答時の最大荷重効果（各部の変形や応力）を平均化時間 10 分とした統計データを基に評価が行われている。しかし、台風においては、風速・風向が時々刻々と変化するため、風応答および疲労損傷についての検討は明らかにする必要がある。そのため、本報では台風シミュレーションを用いた風応答および疲労損傷の評価によって、設計実務に有益な情報を提供することを目的とする。

2 解析モデルの概要

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 $a = 4$ の鋼構造物に相当する 11 質点せん断型モデル（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。上部構造は、固有周期 $T_u = 2.5\text{s}$ 、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 $T_0 = 6.0\text{s}$ 、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。上部構造 i 層の剛性 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¹⁾。

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

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

なお、計算により得られた上部構造 i 層の質量 ${}_u m_i$ および剛性 ${}_u k_i$ は Fig. 2 のようなプロットになる。

3 風外力の概要

Fig. 3 に、台風シミュレーション²⁾より算出された建物頂部平均風速 U_H の時刻歴変化を示す。本解析では、東京都に発生が予測される台風の中から、頂部最大平均風速付近の継続時間が短いもの、長いもの（以下、S500、L500）をそれぞれ 5 つのサンプルを選定した。Sample 6, 8, 9 は台風の目に伴い 2 回風速のピークを有する。なお、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

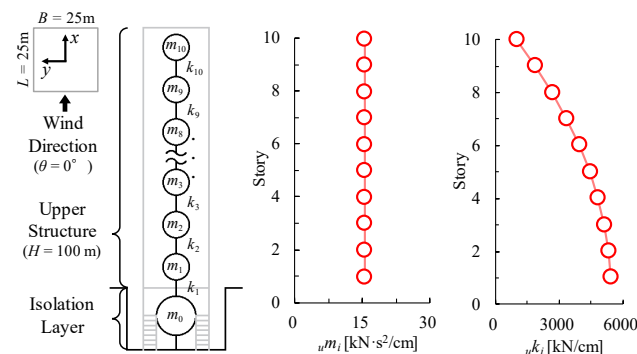


Fig. 1 Analytical model

Fig. 2 Structural characteristics

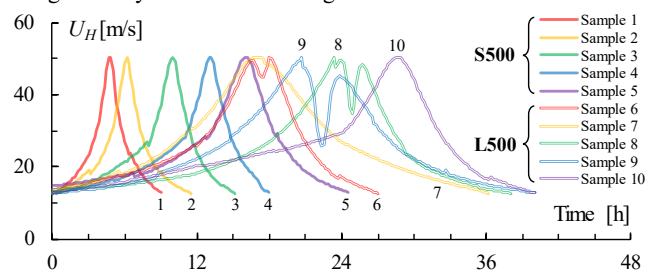


Fig. 3 Average wind speed

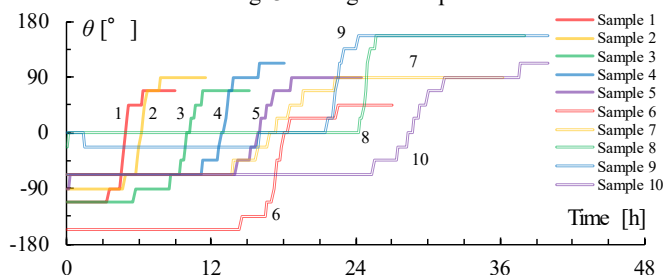


Fig. 4 Wind direction after replacement (T_000)

て換算した³⁾。Fig. 4 に、風洞実験⁴⁾が行われた角度に置換した風向の時刻歴波形を示し、定義する風向 $\theta = 0^\circ$ とは建物幅 B に正対する角度を表す。本解析では、台風全時刻において風向が $\theta = 0^\circ$ （以下、A_000）と最大平均風速時の風向が $\theta = 0^\circ$ （以下、T_000）に設定した。また、各台風サンプルにおいて、使用する層風力係数の組み合わせを変更することにより 5 波の風外力時刻歴波形を作成している。

4 時刻歴風応答解析の結果

本章では、A_000 と T_000 の場合に、建物の最大応答値、免震層の残留変形および免震ダンパーの疲労損傷度の結果を示し、それぞれ 5 波のアンサンブル平均により評価する。

4.1 建物の最大応答値

Fig. 5~7 に解析モデル頂部の最大変位 $Dis_{10, \max}$ 、最大加速度 $Acc_{10, \max}$ および免震層の最大変形 $\delta_{0, \max}$ を示す。各応

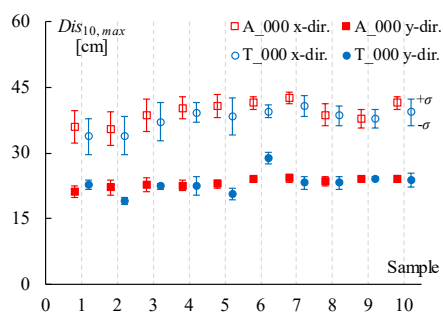


Fig. 5 Max. displacement at 10th story

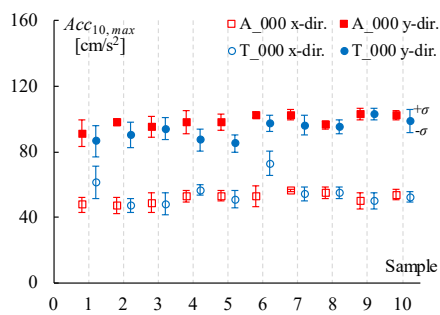


Fig. 6 Max. acceleration at 10th story

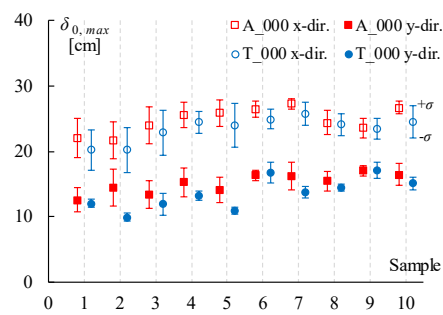


Fig. 7 Max. deformation of isolation layer

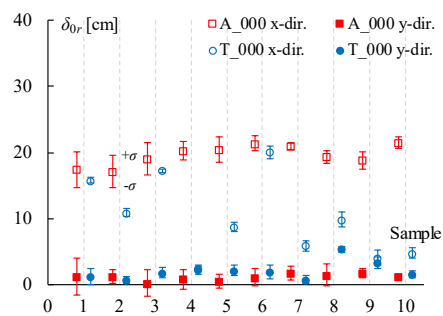


Fig. 8 Residual deformation of isolation layer

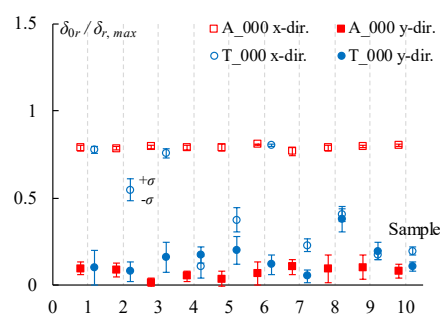


Fig. 9 Residual deformation / Max. deformation

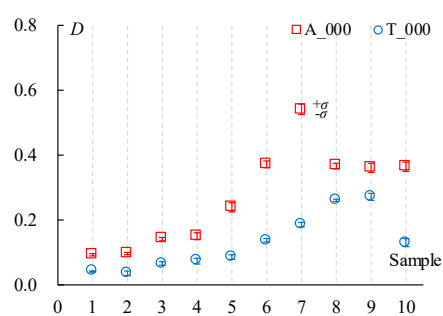


Fig. 10 D value

答値について、大きな値を示す方向 (x or y) に着目すると、各台風サンプルにおける A_000 と T_000 の値はほぼ一致であることが確認できる。これは A_000 と T_000 の最大風速が等しく、最大平均風速時の風向も等しいため、最大応答値の大きな違いが見られなく、概ね A_000 で検討しても安全側の評価ができると思われる。また、各図において、x 方向で大きな標準偏差 (バラツキ) を示しているため、アンサンブル数についても増やす必要がある⁵⁾。

4.2 免震層の残留変形

Fig. 8 に免震層の残留変形 δ_{0r} を示し、Fig. 9 に免震層最大変形 $\delta_{0,max}$ に対する免震層残留変形 δ_{0r} の比を示す。最大風速時に風方向応答、つまり平均変位を有する x 方向における A_000 の残留変形 δ_{0r} は台風によらず概ね等しく (Fig. 8)、最大変形の 0.8 倍程度であった (Fig. 9)。T_000 における δ_{0r} は A_000 より小さな値となり、その値は台風によって大きく異なる。これは風向変化によって免震層の平均変形異なるためである。一方、y 方向は最大風速時に風直交方向の応答となるため、平均変位が小さい。そのため、A_000 と T_000 の値はほぼ一致する結果となった。

4.3 免震ダンパーの疲労損傷度

本解析では、免震ダンパーの疲労損傷度 D 値は、Rain-flow 法より算出した免震層変位の全振幅ごとに、Miner 則を用いて算出する。Fig. 10 に、A_000 と T_000 の疲労損傷度 D 値を示し、各 D 値はそれぞれ x 方向と y 方向の疲労損傷度の和、即ち $D = D_x + D_y$ で表す。台風の継続時間に、Sample 9 と 10 が一番長い (Fig. 3)、A_000 では Sample 7 が一番大きな D 値を示している。一方、T_000 において Sample 9 が一番大きな D 値を示してあり、必ずしも継続時

間に比例しない。さらに、T_000 より A_000 のほうが大きな値を示し、その比は 1.3~2.8 倍程度となり、過大に評価している。

5 まとめ

本報では、台風シミュレーションを用いた超高層免震建物の最大応答値、免震層の残留変形および免震ダンパーの疲労損傷度についての検討を行った。耐風設計において、最大応答値は風向変化を考慮しなくても適正に安全側の評価ができる。ただし、残留変形と疲労損傷度に対して、過大な評価となるため、風向変化を考慮した評価が望ましい。

本報では、ある 1 例に過ぎないため、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もある。また、大きな標準偏差を示している応答については、アンサンブル数を増やす必要がある。

謝辞

本研究は、(株)日建設計、(株)泉創建エンジニアリング、神奈川大学、東京工業大学佐藤研究室による新耐風設計法研究会の皆様との多大なる協力をいただきました。また、解析に用いた台風シミュレーションの結果は京都大学西嶋研究室より提供していただいたものです。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 建築物荷重指針・同解説 2004、日本建築学会、pp.321-434
- 4) 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
- 5) 齋藤元紀、佐藤大樹、吉江慶祐、大熊武司、片桐純治、北村春幸：風力のサンプル数が超高層免震建築物の弾塑性風応答評価に及ぼす影響、日本建築学会技術報告集、Vol. 22、No. 53、pp. 65-70、2017.2

*東京工業大学 大学院生

**東京工業大学 准教授・博士 (工学)

*** (株)竹中工務店 (元東京工業大学)

* Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

** Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

*** Takenaka Corporation