

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	多質点系モデルを用いた変動風力を受ける超高層免震建物の応答評価
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	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 541-544
Citation(English)	, , , pp. 541-544
発行日 / Pub. date	2015, 3
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: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009947936

多質点系モデルを用いた変動風力を受ける超高層免震建物の応答評価

構造—振動

准会員 ○ 齋藤 元紀*1 正会員 佐藤 大樹*2 同 吉江 慶祐*3
同 池上 昌志*1 同 佐藤 利昭*1 同 北村 春幸*1

風外力 多質点系 超高層免震建物
弾塑性応答

1. はじめに

現在、建物は風荷重に対して弾性範囲で設計が行われている。近年、地震への対策として免震層を設置する超高層建物が多く見られる。建物の固有振動数を低くすることで地震の影響を小さくしている超高層免震建物だが、風外力は低振動数側でパワーが卓越するため、風荷重が増加し、免震層が塑性化する場合が考えられる。したがって、風外力に対して弾塑性範囲における応答評価が必要となる。風応答評価法として、吉江ら¹⁾はエネルギー釣合に基づく弾塑性範囲における1質点系の風応答予測手法を研究しており、その有効性を示した。また、鈴木ら^{2), 3)}は、風向0°、辺長比D/B(D(奥行き)×B(幅))D/B=1.0の超高層免震建物を対象としたエネルギー釣合に基づく弾塑性風応答予測手法を提案し、その有効性を示した。しかし、それはD/B=1.0の建物のみでの検討であったため、本手法を様々な形状の建物に適用できるか検証する必要がある。

本報では、その基礎段階として、弾塑性範囲における超高層免震建物応答に影響を与える要因を時刻歴応答解析に基づき検証する。検討対象として、風力入力方向、風力の再現期間、辺長比D/B、上部重量 ${}_uW$ 、免震周期 ${}_bT$ 、ダンパーの降伏せん断力係数 ${}_d\alpha_y$ とする。

2. 解析対象モデルと風外力の概要

2.1 解析対象モデル

検討対象建物の解析モデルを図1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=200m、上部構造を1次モードが直線のモデル⁴⁾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1次固有周期 ${}_uT=5.0$ sに対して、減衰定数2%の剛性比例とし、免震層には内部粘性減衰を考慮しない。上部構造総重量 ${}_uW$ は、上部構造密度 ${}_u\rho=1,715.0$ N/m³の ${}_uW=548,800$ kNと、 ${}_u\rho=3,062.5$ N/m³の ${}_uW=980,000$ kNの2種類とし、重量は高さ方向に一定とした。図2に検討対象建物の平面図と風向の定義を示す。建物の平面形は、辺長比D/B=1.0, 2.0, 3.0の3種類

を用いる。なお、本報では、平面積を等しく1,600 m²と設定するため、辺長比ごとにD, Bが異なる。免震層重量 ${}_bW$ は免震層密度 ${}_b\rho=25,000$ N/m³の ${}_bW=4,082$ kNとし、免震周期 ${}_bT=6.0, 8.0$ sの2種類を用いる。免震層の剛性は上部構造総重量、免震層重量、免震周期により変化するため、(1)~(6)式より算出している。検討対象は、基準モデルを、D/B=1.0、 ${}_uW=548,800$ kN、 ${}_bT=6.0$ sとしたD1-M1-T6modelとする。その他の検討モデルとして、D1-M1-T6modelからD/B=2.0としたD2-M1-T6model、D/B=3.0としたD3-M1-T6model、 ${}_uW=980,000$ kNとしたD1-M2-T6model、 ${}_bT=8.0$ sとしたD1-M1-T8modelを使用する。図3に免震層の復元力特性を示す。ダンパーの降伏変位 ${}_d\delta_y=0.028$ mとする。なお、本報ではダンパーの降伏せん断力係数 ${}_d\alpha_y$ を解析パラメータとして ${}_d\alpha_y=0.02, 0.04, 0.06, 0.10$ の4種類を用いる。

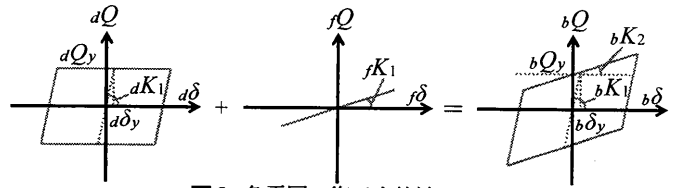


図3 免震層の復元力特性

免震層におけるダンパーの降伏耐力 ${}_dQ_y$ 、1次剛性 ${}_dK_1$ は(1)~(2)式を用いて算出される。

$${}_dQ_y = ({}_uW + {}_bW) \cdot {}_d\alpha_y \tag{1}$$

$${}_dK_1 = \frac{{}_dQ_y}{{}_d\delta_y} \tag{2}$$

免震層におけるアイソレータの1次剛性 ${}_fK_1$ は(3)式を用いて算出される。

$${}_fK_1 = \frac{4\pi^2({}_uW + {}_bW)}{{}_bT^2 \cdot g} \tag{3}$$

ここで、g: 重力加速度とする。

免震層の1次剛性 ${}_bK_1$ 、2次剛性 ${}_bK_2$ 、降伏耐力 ${}_bQ_y$ は(4)~(6)式を用いて算出される。なお、ダンパーの2次剛性比を0.017とする。

$${}_dK_1 = {}_fK_1 + {}_dK_1 \tag{4}$$

$${}_dQ_y = {}_bK_1 \cdot {}_b\delta_y \tag{5}$$

$${}_dK_2 = {}_fK_1 + 0.017 {}_dK_1 \tag{6}$$

2.2 風外力の概要

構造物に作用する風外力は風洞実験結果⁵⁾を用いた。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。実験模型は縮小率1/400として、高さH=0.5m、D/B=1.0, 2.0, 3.0、平面積A=0.01 m²の角柱模型とし、層風力は10層分測定した。実験方法および実験条件の詳細に関しては文献5)を参照され

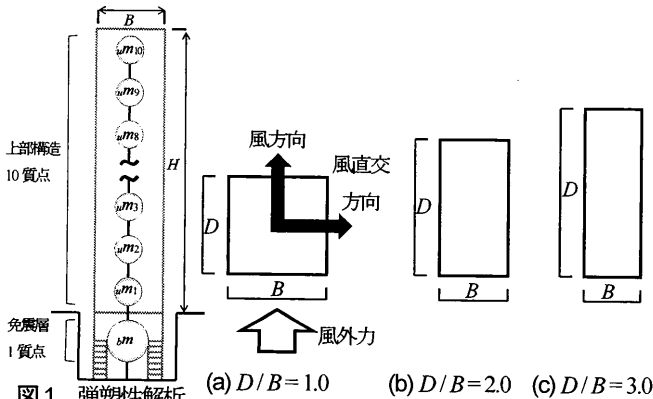


図1 弾塑性解析モデル概要

図2 建築対象建物の平面図と風向の定義

たい。本報における検討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と風直交方向風力とする。風速は、再現期間 500 年に相当の頂部風速 $U_H = 63.8 \text{ m/s}$ および再現期間 100 年相当 $U_H = 54.9 \text{ m/s}$ の 2 種類を用いる。なお、頂部風力 F_{10} は、再現期間 500 年相当の風力において、風方向では、頂部風力の最大値 $F_{10max} = 2,017 \text{ kN}$ 、頂部風力の標準偏差 $\sigma_{F10} = 558 \text{ kN}$ 、風直交方向では、 $F_{10max} = 2,133 \text{ kN}$ 、 $\sigma_{F10} = 572 \text{ kN}$ 、再現期間 100 年相当の風力において、風方向では、 $F_{10max} = 1,499 \text{ kN}$ 、 $\sigma_{F10} = 417 \text{ kN}$ 、風直交方向では、 $F_{10max} = 1,577 \text{ kN}$ 、 $\sigma_{F10} = 425 \text{ kN}$ とした。再現期間 500 年相当の風力はすべての解析モデルに使用し、再現期間 100 年相当の風力は D1-M1-T6model にのみ使用する。検討用風力波形は 1 組につき 10 質点分の変動風力波形を 0.05 s 刻み 13,000 ステップとし、風洞実験結果から応答の評価時間部分が重ならないように 650 s × 30 組を取り出した。解析開始時の過渡応答の影響を避けるため、各風力波形の先頭 50 s にエンベロープを設けた後、50 ~ 650 s の間(10 分)で各応答を評価する。本報では、30 波の応答のアンサンブル平均結果により応答を評価した⁷⁾。図 4 に頂部層風力のパワースペクトル密度 S_{F10} を示す。図 4(a) は再現期間 500 年相当の $D/B = 1.0, 2.0, 3.0$ における S_{F10} 、図 4(b) は風力の再現期間 500 年および 100 年における S_{F10} をそれぞれ示す。なお、各検討対象モデルの免震層と上部構造を合わせた 11 質点固有値解析をして得られたシステムの固有振動数 f の中で最大振動数および最小振動数の値を図 4 に示す。図 4(i)(a) に着目すると、風力の再現期間が長い方が S_{F10} は大きくなるのがわかる。図 4(i)(b) は、図 4(i)(a) と同様の傾向がみられる。図 4(ii)(a) に着目すると、本報の解析範囲では風方向、風直交方向ともに D/B が大きくなるほど S_{F10} は小さくなるのがわかる。図 4(ii)(b) について、約 $0.1 < f < 0.8 \text{ Hz}$ の範囲では D/B が小さい方ほど S_{F10} は大きくなるのがわかる。一方、この範囲以外では、 D/B が大きい方ほど S_{F10} は大きくなるのがわかる。図 4(ii)(a)、図 4(ii)(b) を比較すると、 D/B が同じ場合、風方向より風直交方向の方が S_{F10} は大きいことがわかる。

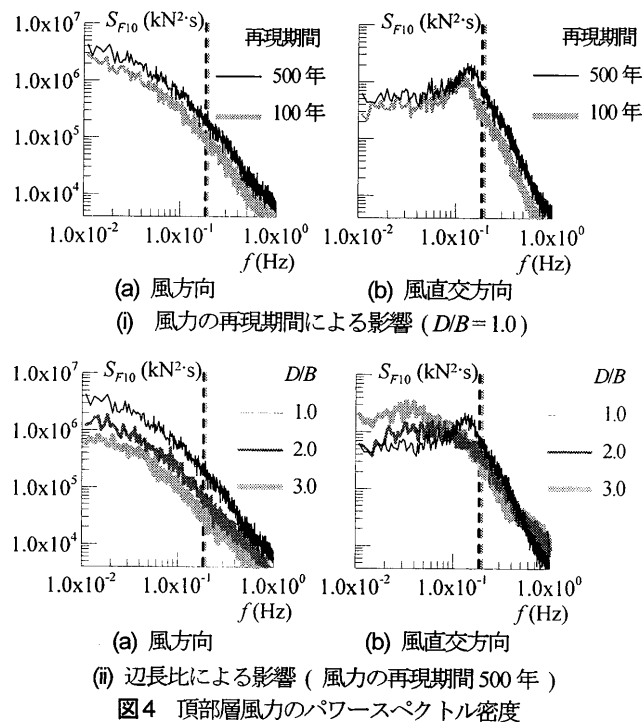


図 4 頂部層風力のパワースペクトル密度

3. 時刻歴応答解析に基づく応答変位および吸収エネルギー変化

3.1 パラメータの違いによる応答変位高さ方向分布の変化

本節では、時刻歴応答解析により得られた応答値を用いて、パラメータの違いによる応答変位の変化を確認する。図 5 に風方向および風直交方向におけるパラメータごとの応答変位の標準偏差における高さ方向分布を示す。縦軸に層数 story、横軸に各層の応答変位 x_i の標準偏差 σ_{xi} とする。図 5 に着目すると、ダンパーの降伏せん断力係数 $a\alpha_y$ が同じ場合、すべてのパラメータにおいて、風方向より風直交方向の方が応答値は大きいことがわかる。これは、風方向より風直交方向の方が風力は大きいためである (図 4 参照)。すべてのパラメータにおいて、免震層の塑性化にかかわらず、上部構造の応答変位の標準偏差の高さ方向分布が直線的となることがわかる。なお、免震層が塑性化するほど上部構造の高さ方向分布は、傾きが大きくなっていく。これは、免震層が塑性化することで多くのエネルギーを吸収し、上部構造が吸収するエネルギーが少なくなっているためと考えられる(4 章後述)。以上より、風外力による応答変位は、風力入力方向、風力の再現期間、 D/B 、 w/W および bT の違いによらず、鈴木ら^{2), 3)} が提案したように、2 質点系で予測することができると考えられる。

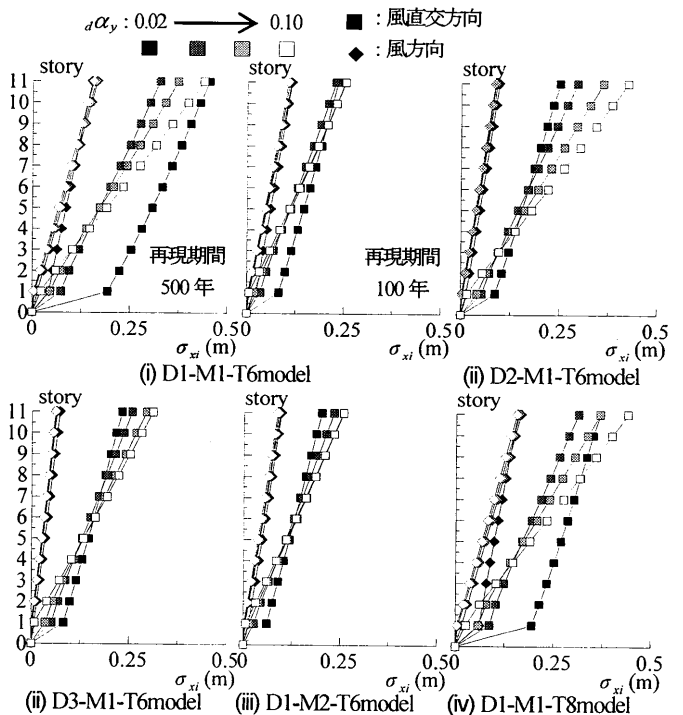


図 5 パラメータごとの応答変位高さ方向分布の変化

3.2 パラメータの違いによる免震層応答変位の変化

本節では、風外力を受ける超高層免震建物のパラメータの違いによる免震層の応答変位の変化を確認する。図 6 に風方向および風直交方向におけるパラメータの違いによる免震層の応答変位の標準偏差 $b\sigma_x$ を示す。縦軸に $b\sigma_x$ 、横軸に $a\alpha_y$ とする。図 6 に着目すると、すべてのパラメータにおいて、 $a\alpha_y$ が大きくなると $b\sigma_x$ は小さくなるのがわかる。これは、 $a\alpha_y$ が大きくなることで免震層の降伏耐力が大きくなり塑性化しにくくなるためである。なお本報に載せていないが、パラメータごとに免震層が塑性化する $a\alpha_y$ は異なり、 $a\alpha_y = 0.10$ ではすべてのパラメータにおいて、免震層がほぼ弾性状態にあることをループから確認した。 $a\alpha_y$ が同じ場合の $b\sigma_x$ の変化をパラメータ

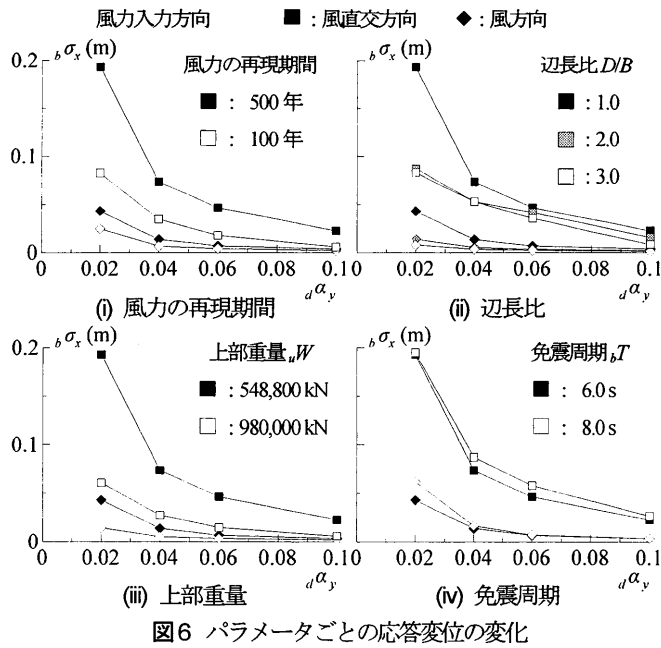


図6 パラメータごとの応答変位の変化

ごとに検証する。図6(i)に着目すると、風方向および風直交方向ともに、風力の再現期間が長くなると $b\sigma_x$ は大きくなることわかる。これは、風力の再現期間が長くなると風外力が大きくなるためである(図4(a)参照)。 $d\alpha_y$ が大きくなると、風力の再現期間500年および100年それぞれの $b\sigma_x$ の差は小さくなることわかる。図6(ii)に着目すると、風方向および風直交方向ともに、辺長比 D/B が大きくなるほど $b\sigma_x$ は小さくなることわかる。これは、 D/B が大きくなると、建物の見付面積が小さくなり風外力が小さくなるためと考えられる(図4(b)参照)。図6(iii)に着目すると、風方向および風直交方向ともに、上部重量 uW が重くなると $b\sigma_x$ は小さくなることわかる。これは、 uW が重くなることで免震層の降伏耐力が大きくなるためと考えられる。図6(iv)に着目すると、風方向および風直交方向ともに、免震周期 bT が長くなると $b\sigma_x$ は大きくなることわかる。これは、 bT が長くなることで免震層と上部構造を合わせたシステムの固有周期が長くなり、入力風力が大きくなるためと考えられる(図4(b)参照)。

3.3 パラメータの違いによる吸収エネルギーの変化

本節では、パラメータの違いによる吸収エネルギーの変化を確認する。なお、前節の結果より風外力を受ける建物の応答は風方向より風直交方向の方が大きいことから、風直交方向のみ検討を行う。

図7に風直交方向におけるパラメータの違いによる建物全体の吸収エネルギー W 、免震層の吸収エネルギー bW_p を示す。なお、 W は上部構造全層の吸収エネルギー uW_p と bW_p の和で表される。縦軸に W, bW_p 、横軸に $d\alpha_y$ とする。図7に着目すると、すべてのパラメータにおいて、 $d\alpha_y$ が大きくなると bW_p は小さくなり、 $d\alpha_y=0.10$ では免震層がほとんどエネルギーを吸収していないことがわかる。これは前述したように、 $d\alpha_y=0.10$ において免震層が弾性状態になるためである。 $d\alpha_y$ が同じ場合の W, bW_p の変化をパラメータごとに検証する。図7(i)に着目すると、 $d\alpha_y$ が同じ場合、風力の再現期間が長くなると W, bW_p は大きくなることわかる。図7(ii)に着目すると、 $d\alpha_y$ が同じ場合、 D/B が大きくなるほど W および bW_p は小さくなる

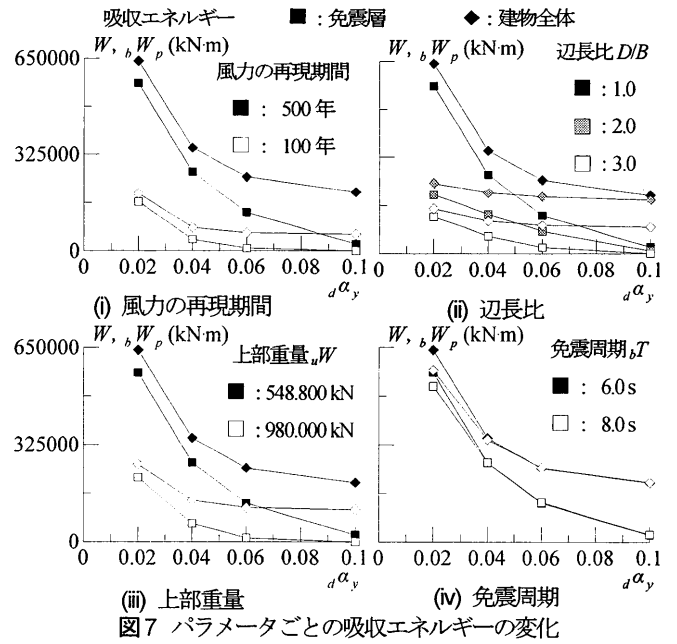


図7 パラメータごとの吸収エネルギーの変化

ことがわかる。図6(iii)に着目すると、 $d\alpha_y$ が同じ場合、 uW が重くなると W および bW_p は小さくなることわかる。図6(iv)に着目すると、 $d\alpha_y$ が同じ場合、 bT の違いによらず W, bW_p は同程度になることわかる。図7(i)~(iv)の傾向はそれぞれ図6(i)~(iv)の $b\sigma_x$ と似た傾向がみられることから、文献8)で確認された W および bW_p と $b\sigma_x$ の関係が、多質点系の時刻歴解析でも確認された。

4. 応答解析に基づく免震層の吸収エネルギーの評価

前章では、パラメータが建物の応答変位と吸収エネルギーに与える影響を確認した。本章では建物全体の吸収エネルギー W に占める免震層の吸収エネルギー bW_p の割合 α_p を用いてパラメータが α_p に与える影響を検討する。なお、 α_p は(7)式によって算出される。

$$\alpha_p = \frac{bW_p}{uW_h + bW_p} = \frac{bW_p}{W} \quad (7)$$

4.1 風力入力方向およびダンパーの降伏せん断力係数による影響

本節では、風力入力方向および $d\alpha_y$ が α_p に与える影響を検討する。図8に風力入力方向、風力の再現期間および $d\alpha_y$ の違いによるDI-M1-T6modelの α_p を示す。縦軸に α_p 、横軸に免震層応答変位標準偏差の塑性率 $b\mu_{rms}$ とする。なお、 $b\mu_{rms}$ は(8)式より算出される。

$$b\mu_{rms} = \frac{b\sigma_x}{b\delta_y} \quad (8)$$

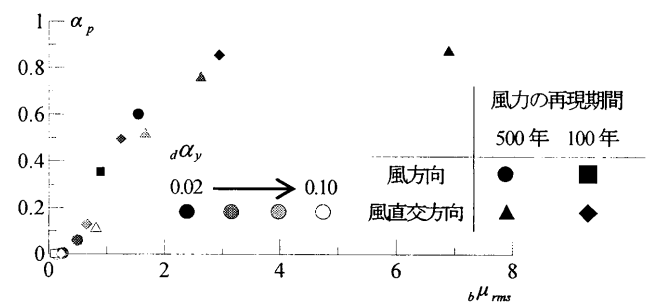


図8 α_p の風力入力方向および $d\alpha_y$ による影響
 $D/B=1.0, uW=548,800 \text{ kN}, bT=6.0 \text{ s}$

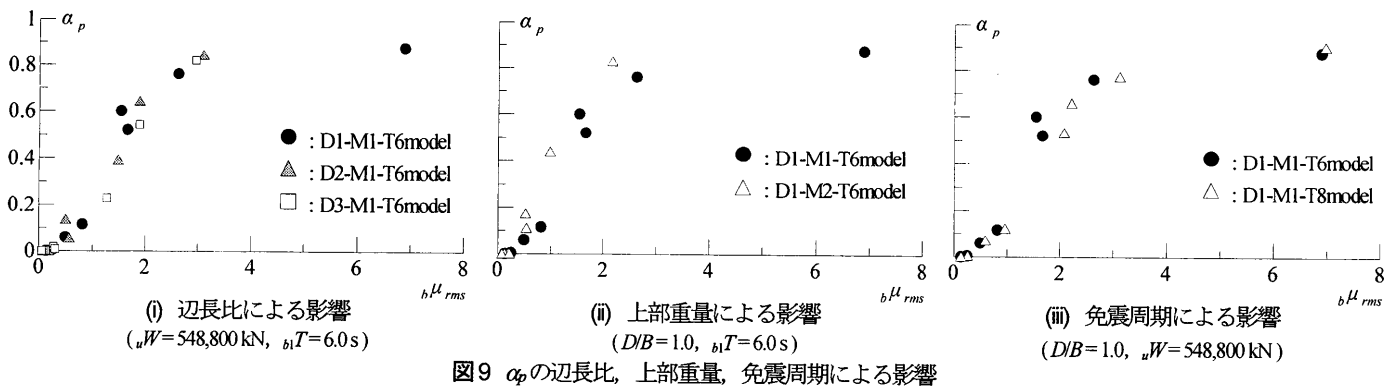


図9 α_p の辺長比, 上部重量, 免震周期による影響

図8に着目すると, 風力入力方向の違いによらず, $b\mu_{rms}$ が大きくなるほど α_p が大きくなることがわかった。 $b\mu_{rms}$ が同程度の場合, 風力入力方向の違いによらず α_p は同程度になることがわかる。風力の再現期間が長くなると, $b\mu_{rms}$, α_p は大きくなる。 α_p は, $b\mu_{rms}$ が同程度の場合, 風力の再現期間の違いによらず同程度になることがわかる。以上より, $b\mu_{rms}$ が同程度の場合, 風力入力方向, 風力の再現期間および α_y が α_p に与える影響は小さいと考えられる。

4.2 辺長比, 上部重量, 免震周期による影響

本節では, 辺長比 D/B , 上部重量 uW および免震周期 b_1T が α_p に与える影響を検討する。図9(i)に D/B , 図9(ii)に uW , 図9(iii)に b_1T の違いによる α_p をそれぞれ示す。縦軸に α_p , 横軸に $b\mu_{rms}$ とする。図9に着目すると, すべてのパラメータにおいて, $b\mu_{rms}$ が大きくなると α_p が大きくなることがわかる。図9(i)に着目すると, $b\mu_{rms}$ が同程度の場合, D/B の違いによらず α_p は同程度になることがわかる。これより, D/B が α_p に与える影響は小さいと考えられる。図9(ii)に着目すると, $b\mu_{rms}$ が同程度の場合, uW が大きくなると α_p はわずかに大きくなるが, その差は小さいため, 同程度と考えることができる。これより, uW が α_p に与える影響は小さいと考えられる。図9(iii)に着目すると, α_p が同程度の場合, b_1T が大きくなると $b\mu_{rms}$ は大きくなる。これは前述したように b_1T が大きくなると $b\sigma_x$ は大きくなるが, bW_p は同程度のためである。しかし, この差は小さいため, b_1T が α_p に与える影響は小さいと考えられる。本図10に本報におけるすべてのパラメータ(風力入力方向, 風力の再現期間, D/B , uW , b_1T ケース)による α_p を示す。縦軸に α_p , 横軸に $b\mu_{rms}$ とする。図10に着目すると, α_p は $1 < b\mu_{rms} < 2$ の範囲で, $b\mu_{rms}$ が同程度の場合, パラメータの差異によるばらつきはあるが, 概ね同程度になることがわかる。これより, パラメータの差異によらず, $b\mu_{rms}$ が同程度の場合, α_p は同程度になると考えられる。以上より, 本報の検討範囲では, 風力入力方向, 風力の再現期間, α_y , D/B , uW および b_1T

が α_p に与える影響は小さく, α_p は $b\mu_{rms}$ のみによって決定されることがわかった。

5. まとめ

本報では, 弾塑性範囲における超高層免震建物応答に影響を与える要因を時刻応答解析に基づき検証した。検討対象として, 風力入力方向, 風力の再現期間, 辺長比 D/B , 上部重量 uW , 免震周期 b_1T , ダンパーの降伏せん断力係数 α_y とした。以下に知見を示す。

- (1) 風外力による応答変位は, 風力入力方向, 風力の再現期間, D/B , uW および b_1T の違いによらず, 鈴木ら^{2), 3)} が提案した2質点系で予測することができると考えられる。
- (2) 本報の検討範囲では, 建物全体の吸収エネルギーに占める免震層の吸収エネルギー α_p は, 免震層応答変位標準偏差の塑性率 $b\mu_{rms}$ が大きくなると大きくなることを確認した。
- (3) 本報の検討範囲では, α_p は, 風力入力方向, 風力の再現期間, D/B , uW , b_1T , α_y の違いによる影響は小さく, $b\mu_{rms}$ のみによって決定される値であることが確認された。

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, 片桐樹台博士, 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) 平井 宏幸, 佐藤 大樹, 吉江 慶祐, 鈴木 悠也, 北村 春幸: 多質点系モデルを用いた変動風力を受ける超高層免震建物の上部構造の応答評価, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp283-284, 2010.7
- 4) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲朗: 粘弾性ダンパーの振動数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, pp21-28, 2006.10
- 5) 片桐樹台, 大熊武司, 鶴見俊雄: 高層免震建築物の一般化風力特性, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp.139-140, 2010.9
- 6) 日本建築学会: 建物荷重指針・同解説, 2004
- 7) 平井 宏幸, 吉江 慶祐, 佐藤 大樹: 風洞実験より得られた層風力のサンプル数が高層建築物の時刻歴風応答評価に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, pp79-84, 2012.6
- 8) 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, 第589号, pp59-66, 2005.3

*1 東京理科大学 *2 東京工業大学 *3 日建設計

