

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	断面形状の異なる超高層免震建物の多質点系モデルを用いた風応答評価
Title	
著者(和文)	小川 諒, 吉江慶祐, 佐藤 大樹, 平井 宏幸, 北村春幸
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 82, No. 0, 2021
Citation(English)	, Vol. 82, No. 0, 2021
発行日 / Pub. date	2012, 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/110009571507

断面形状の異なる超高層免震建物の多質点系モデルを用いた風応答評価

准会員○小川諒^{*1} 正会員 吉江慶祐^{*2} 同 佐藤大樹^{*1}
同 平井宏幸^{*1} 同 北村春幸^{*1}

構造—振動

風外力 多質点系 超高層免震建物

辺長比 弾塑性応答

1. はじめに

現在、建築物は風荷重に対して弾性範囲で設計が行われている。しかし、一般に風外力のパワーは建築物の固有振動数より低振動数側で卓越するのに対し、超高層免震建物は、通常の建築物と比較して固有振動数が低いため、風荷重が増加し、免震層が塑性化する場合も考えられる。近年、免震建物の高層化が進んでおり、風外力に対する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^{1,2)}が、風向 0° 、辺長比1.0の超高層免震建物を対象とし、エネルギーの釣合に基づく構造物の弾塑性風応答を予測する手法を提案し、その有効性を示した。しかし、風力は地上の受圧面から建物に直接作用し、かつ建築物の形状に依存することから、この応答予測手法を様々な風向および辺長比で検討し、適用範囲を確認する必要がある。

そこで本報では、異なる風向および建物形状に対する弾塑性構造物の応答予測に必要な弾塑性風応答性状を時刻歴応答解析に基づき検証する。

2. 解析モデルおよび風外力の概要

2.1. 解析モデル

本報では、上部構造を1次モードが直線のモデル(図1)とし、その下に免震層を設定した11質点せん断型モデルを用いた。図2に対象モデルの概要を示す。上部構造の減衰定数は $h=2\%$ の剛性比例とする。図3に検討建物の平面図と風向の定義を示す。なお本報では平面積 $B \times D$ を等しく 1600 m^2 と設定しているため、辺長比ごとにそれぞれ D, B が異なる。ダンパー、アイソレーター、免震層の復元力特性を図4に示す。なお、本報ではダンパーの降伏せん断力係数 $a\alpha_y$ を解析パラメーターとして $a\alpha_y=0.02, 0.04, 0.06$ としている。免震層の諸元は(1)~(3)式を用いて決定される。

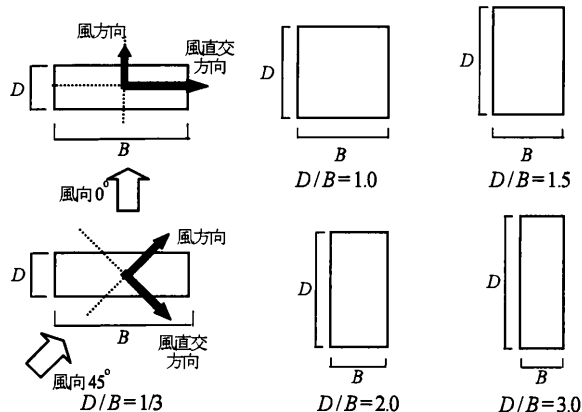


図3 検討建物の平面図と風向の定義

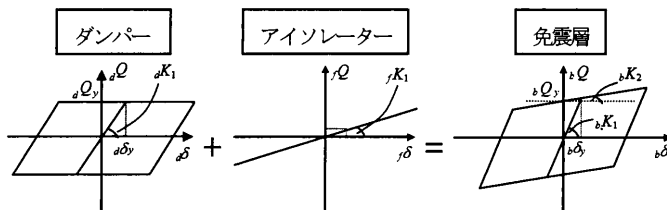


図4 免震層復元力特性の作成

$${}_a Q_y = ({}_a W + {}_b W) \cdot {}_a \alpha_y \tag{1}$$

$${}_a K_1 = {}_a k_0 \cdot {}_a \delta_y \tag{2}$$

$${}_a k_0 = \frac{{}_a Q_y}{{}_a \delta_y} = \frac{1}{{}_a \delta_y} \tag{3}$$

ここで、 ${}_a Q_y$: 免震層ダンパーの降伏耐力、 ${}_a W$: 免震層の重量、 ${}_b W$: 上部構造の重量、 ${}_a K_1$: ダンパーの初期剛性、 ${}_a k_0$: ダンパーの降伏耐力あたりの初期剛性(=36kN/m/kN)、 ${}_a \delta_y$: ダンパーの降伏変位(=1/ ${}_a k_0=2.78\text{cm}$)。

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を用いた。実験気流は「建築物荷重指針・同解説」の地表面粗度区分Ⅲの気流を目標に作成された。実験模型は高さ $H=50\text{ cm}$ 、辺長比 $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ 、平面積 $A=100\text{ cm}^2$ の角柱模型とし、層風力は10層分測定した。風洞実験方法および実験条件の詳細については文献3)を参照されたい。風速は再現期間500年に相当するレベルとして、頂部風速 $U_H=63.8\text{ m/s}$ を想定した。応答値は30波のアンサンブル平均により評価した。検討用風力波形は0.05秒刻み13000ステップの10質点分の変動層風力波形を1組とし、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秒×30組を取り出した。解析開始時の過渡応答の

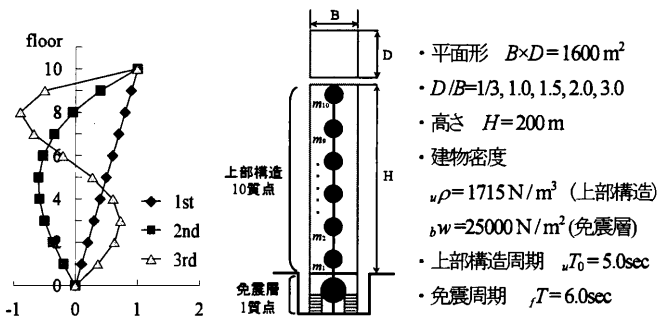


図1 振動モード分布

図2 弾塑性解析モデル概要

影響を避けるため、各風力波形の先頭 50 秒にエンベロープを設けた後、50 ～ 650 秒の 10 分間で応答を評価する。解析は、免震層を含めた 11 質点せん断型モデルの時刻歴応答解析により行った。また、検討用風力を風方向風力（平均成分有り）および風直交方向風力とする。表 1 に解析パラメーターを示す。図 5 (a), (b) に風向 $0^\circ, 45^\circ$ の頂部層風力のパワースペクトル密度を、 $D/B=1.0, 3.0$ を代表として示す。

表 1 解析パラメーター

風力	風方向（平均成分有り），風直交方向
風向	$0^\circ, 45^\circ$
D/B	1/3, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0

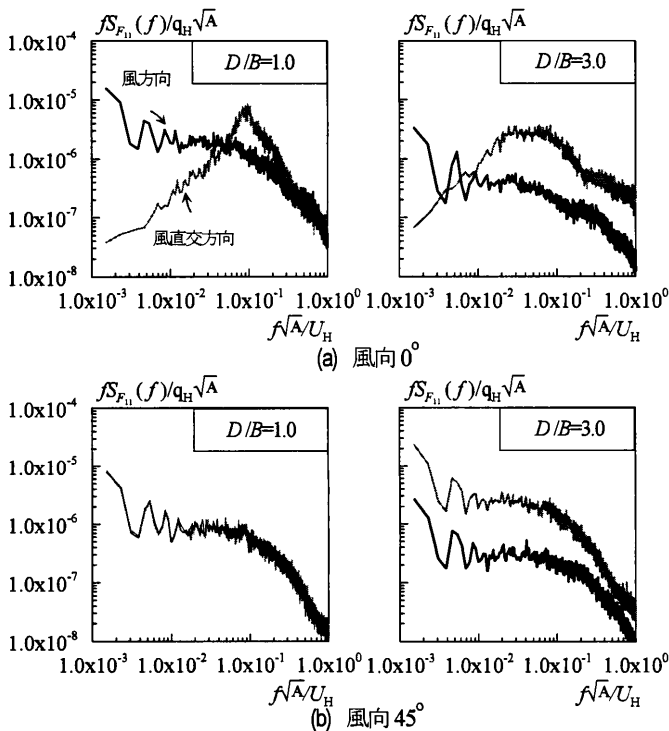


図 5 頂部層風力のパワースペクトル密度

3. 辺長比と風向の違いによる層風力および応答変化

3.1. 辺長比と風向による層風力の変化

図 6 (a), (b) に辺長比および風向 ($0^\circ, 45^\circ$) の違いによる建物頂部の最大層風力 $F_{11, max}$ を風方向、風直交方向それぞれ示す。なお、風向 45° の場合、 $D/B=1/3$ と 3.0 の結果は同値となっている。図 6 (a) より、風方向の風向 0° に着目すると、辺長比が大きくなるほど見付け面積は小さくなるので、層風力は小さくなっていることがわかる。

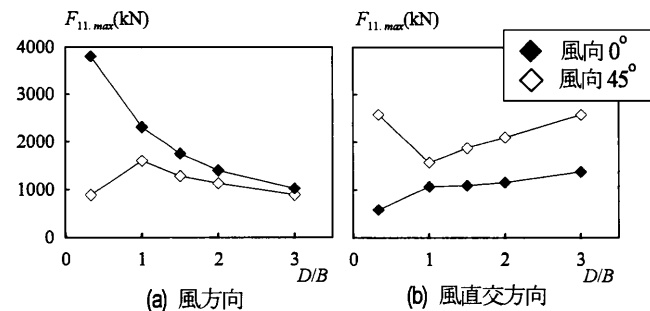


図 6 建物頂部の最大層風力

風向 45° では、 $D/B \geq 1.0$ の範囲で、辺長比が大きくなるほど層風力は小さくなっていることがわかる。図 6 (b) の風直交方向風力に着目すると、風向 0° では、 $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ が同程度であるが、風向 45° では $D/B \geq 1.0$ の範囲で、辺長比が大きくなるほど層風力も小さくなっていることが分かる。

3.2. 辺長比と風向の違いによる応答の変化

図 7 に、風方向および風直交方向風力入力時における風向 ($0^\circ, 45^\circ$)、辺長比の違いによる建物頂部の応答加速度 \ddot{X}_{11} 、変位 X_{11} 、免震層の応答変位 X_1 の最大値を示す。なお、風向 45° の場合、 $D/B=1/3$ と 3.0 の時刻歴応答解析結果は同値となっている。

図 7 より、風向 0° の風方向風力入力時の応答加速度に着目すると、辺長比が大きくなる、つまり見付け面積が小さくなるほど、応答値は小さくなることが分かる。風向 0° の風直交方向風力入力時の応答加速度に着目すると、 $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ の応答値が同程度になっていることが分かる。これは図 6 (b) より、 $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ の頂部層風力が同程度のためであると考えられる。風方向、風直交方向風力入力時ともに、以上の傾向は応答変位、免震層の応答変位でも確認できる。風向 45° の風方向風力入力時の応答加速度に着目すると、 $D/B \geq 1.0$ の範囲で、辺長比が大きくなる程、応答値は小さくなる ことがわかる。これは、図 6 (a) に示したように、風向 45° の風方向風力は $D/B \geq 1.0$ の範囲で、辺長比が大きくなるほど層風力が小さくな

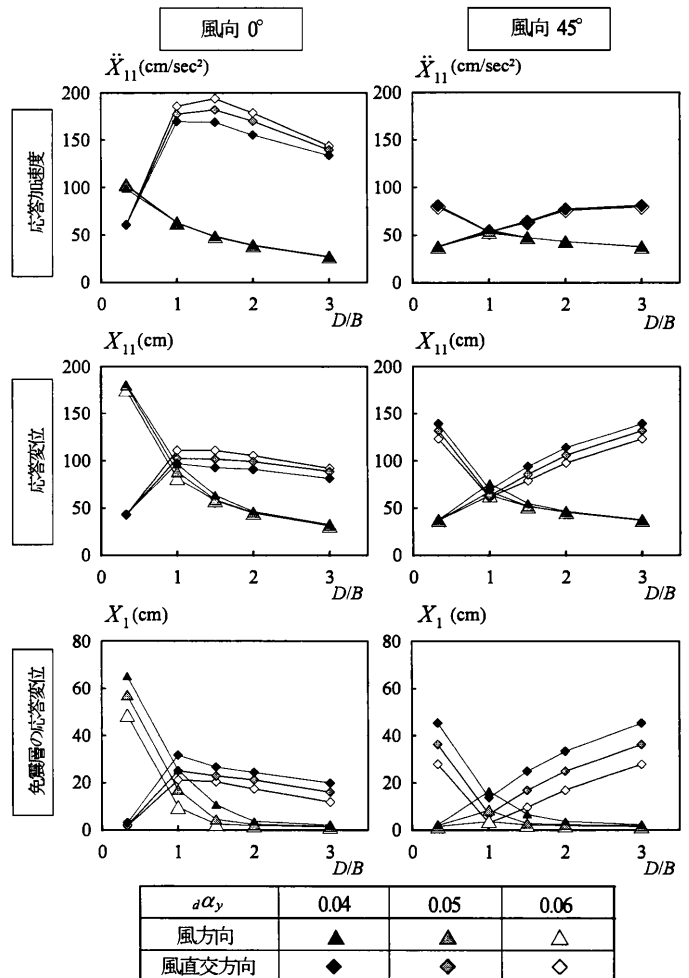


図 7 辺長比、風向およびダンパー量による建物頂部の応答変化

るためであると考えられる。風向45°の風直交方向風力入力時の応答加速度に着目すると、 $D/B \geq 1.0$ の範囲で、辺長比が大きくなるほど、応答値も大きくなることわかる。これは、図6(b)に示したように、風向45°では $D/B \geq 1.0$ の範囲で、辺長比が大きくなるほど、風力も大きくなるためであると考えられる。風方向、風直交方向風力入力時ともに、以上の傾向は応答変形、免震層の応答変形でも確認できる。図7より、ダンパーの降伏せん断力係数 $d\alpha_y$ を0.04~0.06に変更しても応答値に大きな差がないことから、 $d\alpha_y = 0.04$ に限定して高さ方向の応答分布の検討を行う。

図8(a),(b)に、 $d\alpha_y = 0.04$ での辺長比と風向の違いによる最大応答加速度、変位の高さ方向分布を風方向、風直交方向それぞれ示す。なお、風向45°における $D/B=1/3$ の応答値は $D/B=3.0$ の応答値と同値なので省略する。図8(a)より、風向0°の応答加速度に着目すると、風方向および風直交方向ともに建物上層部で応答が増大する傾向が確認できる。これは、高次振動モードによる応答増大の影響であると考えられ、その詳細については4章で述べる。応答変位に着目すると、免震層の塑性化が進んでも辺長比に関係なく上部構造は直線モードを保ちながら振動することから、鈴木ら¹²⁾が提案した2質点系で辺長比、風向が異なる場合においても超高層免震建物の風応答変形を予測することができると考えられる。風向45°においても、以上の傾向は同様に確認できる(図8(b))。

4. スペクトル分離に基づく応答評価

4.1. 応答成分の分離

図9に、建物頂部における応答加速度のパワースペクトル密度 $S_{\ddot{x}_i}(f)$ を示す。パワースペクトル密度は図9中に示す境界振動数 f_{Bound} を境に準静的成分(添字Bで表す)と共振成分(添字Rで表す)に分離することができる^{4),5)}。本論文では文献4)にならい、境界振動数 f_{Bound} を固有振動数の1/3の振動数(固有周期の3倍の周期)とし、以下の検討を進める。 i 層の応答加速度の標準偏差 $\sigma_{\ddot{x}_i}$ は、応答加速度の準静的成分 $\sigma_{B\ddot{x}_i}$ と共振成分の標準偏差 $\sigma_{R\ddot{x}_i}$ の2乗和平方根から、(4a-c)式によって算出できる。

$$\sigma_{\ddot{x}_i} = [\sigma_{B\ddot{x}_i}^2 + \sigma_{R\ddot{x}_i}^2]^{1/2} \quad (4a)$$

$$\sigma_{B\ddot{x}_i} = \left[\int_0^{f_{Bound}} S_{\ddot{x}_i}(f) df \right]^{1/2}, \sigma_{R\ddot{x}_i} = \left[\int_{f_{Bound}}^{\infty} S_{\ddot{x}_i}(f) df \right]^{1/2} \quad (4b, c)$$

ここで、 $S_{\ddot{x}_i}(f)$: i 層の応答加速度のパワースペクトル密度を表す。さらに、共振成分を1,2,3次共振成分に分解していく。各次数の境界振動数 f_{high} および f_{low} (f :各次共振成分での卓越振動数($s=1, 2, 3$))を決定し、応答加速度の各次共振成分の標準偏差 $\sigma_{s\ddot{x}_i}$ を(5)式より算出する。各次数の境界振動数 f_{high} および f_{low} は図9に示すように s 次の卓越振動数 f と $s+1$ 次の中間を採っている。なお、本報では4次共振成分以降の応答はまとめて3次共振成分としている。

$$\sigma_{s\ddot{x}_i} = \left[\int_{f_{high}}^{f_{low}} S_{\ddot{x}_i}(f) df \right]^{1/2} \quad (5)$$

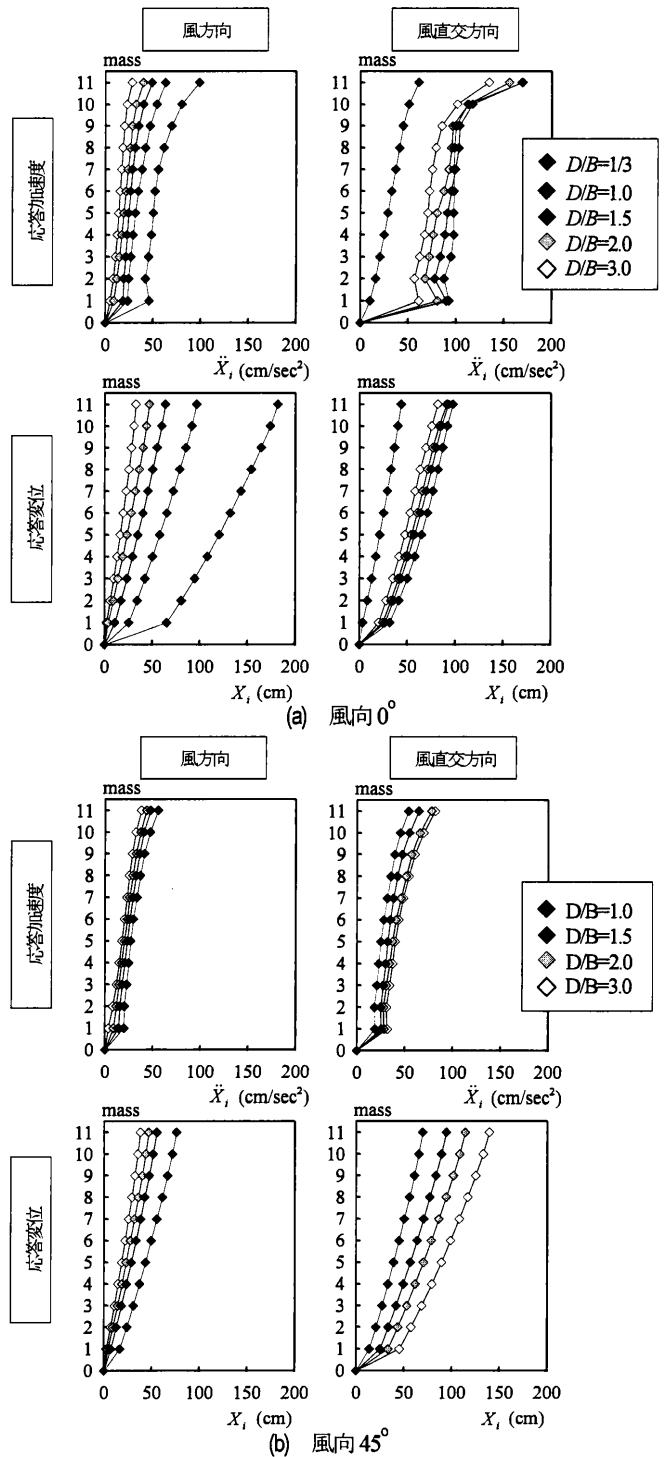


図8 辺長比、風向の違いによる最大応答値 ($d\alpha_y = 0.04$)

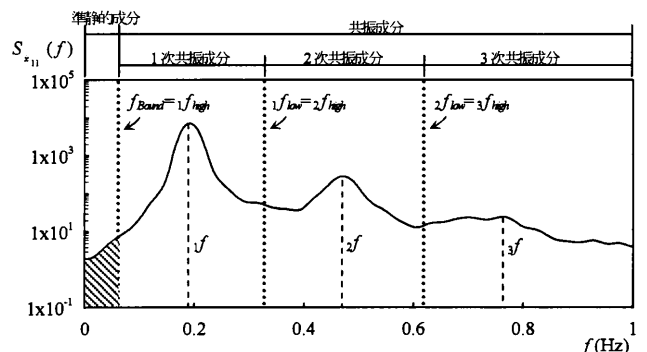


図9 建物頂部における応答加速度のパワースペクトル密度

4.2. 辺長比の違いが高次共振成分に与える影響

図10に風向(0°, 45°), ダンパー量 ($d\alpha_y=0.04, 0.06$), および辺長比の違いによる応答加速度(標準偏差)の1~3次共振成分の高さ方向分布を示す。本節での検討用風力は風方向を用いている。なお, 風向0°の横軸は風向45°の2倍となっている。

図10より, 風向0°での1次共振成分に着目すると, $D/B=1.0$ では $d\alpha_y=0.06$ (◇印) と $d\alpha_y=0.04$ (◆印) が全層で概ね一致していることがわかる。一方, $D/B=1/3$ では, 建物上層部ほどダンパー量ごとの応答加速度に差があり, 建物頂部では, $d\alpha_y=0.06$ (△印) と比べて $d\alpha_y=0.04$ (▲印) の値は15%程度小さくなることがわかる。2, 3次共振成分の応答に着目すると, $D/B=1.0$ では1次共振成分と同様にダンパー量による差はないことがわかる。 $D/B=1/3$ では, 建物頂部において1次共振成分とは反対に, $d\alpha_y=0.06$ (△印) よりも $d\alpha_y=0.04$ (▲印) の値の方が15%程度大きくなることがわかる。風向45°では, ダンパー量の違いによる1次および高次共振成分の応答値に大きな差がないことがわかる。

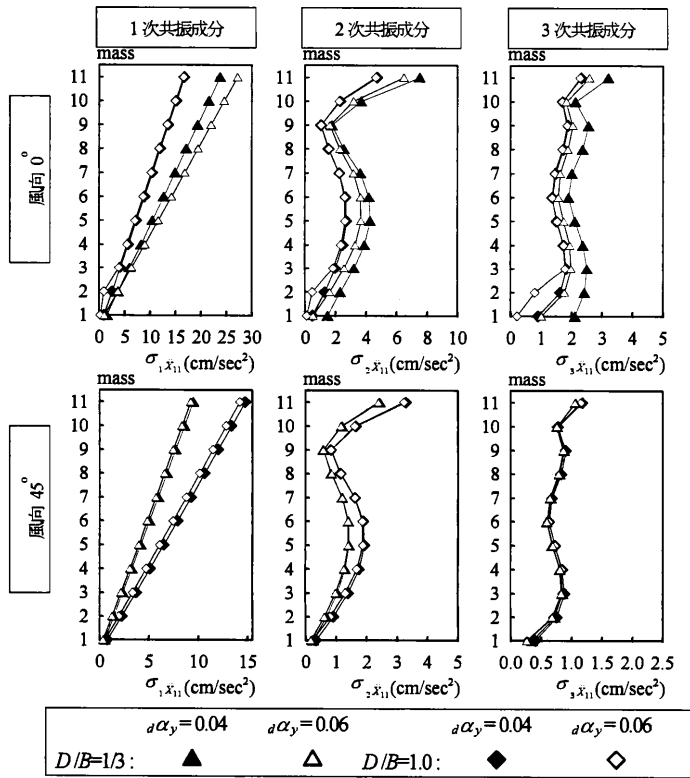


図10 応答加速度(標準偏差)の各次モード成分

次に, 図10で高次共振成分の影響が最も大きくなった建物頂部応答に注目し, 準静的成分応答および各次共振成分応答の分散を任意の次数まで足し合わせることで, 風向, ダンパー量, および辺長比の違いによる高次モード成分の影響を評価する。準静的成分応答および各次共振成分応答の分散を足し合わせて求めた建物頂部の標準偏差と, 11質点解析値との比率を α_1 と呼ぶ。図11(a), (b)に建物頂部の応答加速度の α_1 を風向0°および45°示す。図11(a)の風向0°に着目すると, ダンパー量, 辺長比に関わらず2~3次共振成分は11質点解析値の5%程度を占めている。この傾向は風向45°でも同様に確認できる(図11(b))。

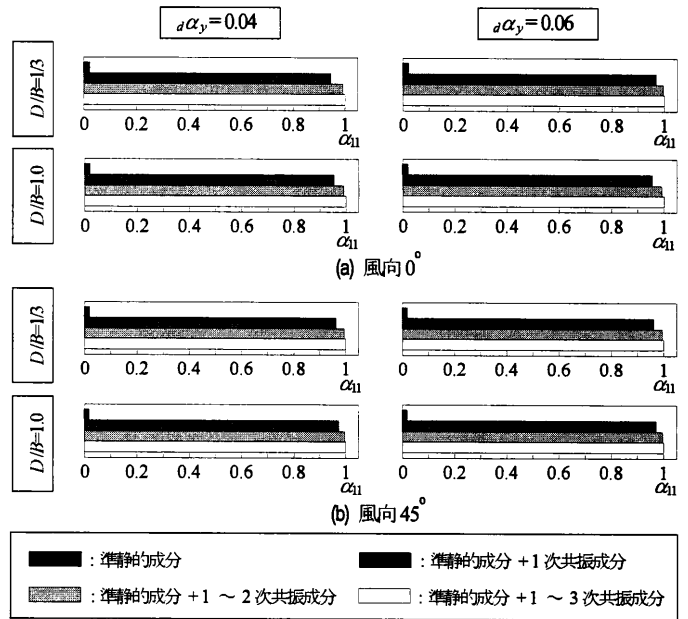


図11 建物頂部の応答加速度(標準偏差)

5. まとめ

変動風力を受ける超高層免震建物を想定した多質点系モデルを対象として, 建物の平面形状を変化させ, 建築物に作用する変動風力特性および超高層免震建物の弾塑性範囲での応答性状の変化を検証し, 以下の結論を得た。

- (1) 風方向風力入力時は, 応答加速度および変位は風向に関わらず辺長比が小さくなる見付け面積が大きくなるため, 応答値が大きくなることを確認した。
- (2) 風直交方向風力入力時は, 風向0°では $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ の応答値が同程度になるが, 風向45°では $D/B \geq 1.0$ の範囲で, 辺長比が大きくなる程応答値も大きくなることを確認した。
- (3) 応答変位では, 免震層の塑性化が進んでも風向および辺長比に関わらず, 上部構造は直線モードを保ちながら振動することから, 2質点系で超高層免震建物の弾塑性風応答変形を予測することができると思われる。
- (4) 応答加速度では, ダンパー量, 風向, 辺長比に関わらず, 高次共振成分は5%程度を占めていることを確認した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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, pp.283 - 284, 2010.7
- 3) 片桐純治, 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
- 4) 吉江慶祐, 大熊武司, 北村春幸, 和田章: 広帯域性の変動風力を受ける弾塑性構造物の応答変位振幅の確率分布, 日本建築学会構造系論文集第604号, pp.37-46, 2006.6
- 5) 辻田修, 早部安弘, 大熊武司, 和田章: 弾塑性構造物の風応答性状ならびにその予測手法に関する研究その2 風方向振動の場合, 日本建築学会構造系論文集, 第485号, pp.25-34, 1996.7

*1 東京理科大学

*2 株式会社日建設計