

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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 -
Title	
著者(和文)	小川諒, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 早田友彦, 佐藤利昭, 北村春幸
Authors	daiki sato, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2014, 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/110009858242

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 —

正会員○小川諒^{*1} 同 吉江慶祐^{*2} 同 佐藤大樹^{*3}
同 早田友彦^{*2} 同 佐藤利昭^{*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

弾塑性応答 残留変形

1. はじめに

現在、風荷重に対する建築物の設計は、弾性範囲で行われている。一般に、風外力のパワーは、建築物の固有振動数に比して低振動数側で卓越するため、近年増加する超高層免震建物のような固有振動数の低い建物では、それらの影響を強く受け、免震層が塑性化する場合も考えられる。したがって、風外力に対する弾塑性範囲の応答評価の必要性が高まっている。

超高層免震建物に対する風応答評価手法は、鈴木ら¹が、エネルギーの釣合に基づく構造物の弾塑性風応答予測手法を提案し、その有効性を示している。しかし、この応答予測手法は弾塑性風応答の共振成分のみを対象としており、準静的成分の影響の大きい範囲に対しては、十分な予測精度を示すことができていない。

これを踏まえ本報では、弾塑性風応答共振成分、準静的成分の関係性を明らかにし、既に応答予測手法が明らかになっている共振成分応答から、準静的成分応答を予測する手法を提案する。

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、1次モードが直線となる上部構造に、免震層を設定した11質点せん断型モデルを用いる。図1に振動モード分布を、図2に対象モデルの概要を示す。上部構造の構造減衰は $\eta=2\%$ の剛性比例型とし、免震層には内部粘性を考慮しない。ダンパー、アイソレータ、免震層の復元力特性を図3にまとめて示す。ここで、免震層の諸元は(1)～(3)式を用いて決定される。

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

$${}_a k_1 = {}_a k_0 \cdot {}_a Q_y \quad (2)$$

$${}_a k_0 = \frac{{}_a Q_y}{{}_a \delta_y} = \frac{1}{{}_a \delta_y} \quad (3)$$

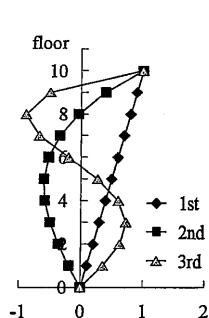


図1 振動モード分布

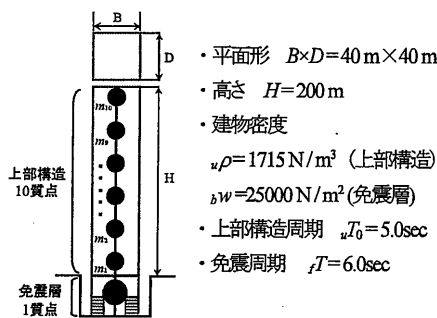


図2 弾塑性解析モデル概要

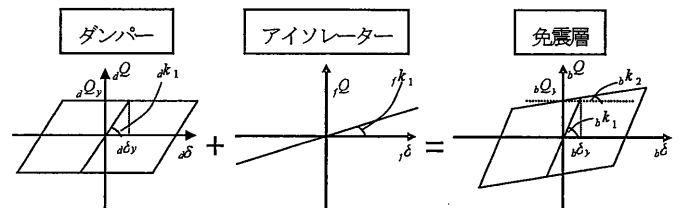


図3 免震層復元力特性の作成

上式で、 ${}_a Q_y$:免震層ダンパーの降伏耐力、 ${}_u W$:上部構造の重量、 ${}_b W$:免震層の重量、 ${}_a k_1$: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/ ${}_a k_0$ =2.78cm)を示す。以降では、(1)式のダンパーの降伏せん断力係数 ${}_a \alpha_y$ を解析パラメータとし、 ${}_a \alpha_y=0.02\sim0.1$ を0.02刻みで変動させて解析を行う。

2.2 風外力の概要

解析モデルに作用させる風外力は、風洞実験結果²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ものである。実験模型は高さ $H=50$ cm、辺長比 $D/B=1.0$ 、平面積 $A=100$ cm²の角柱模型とし、層風力は10層分測定した。風速は再現期間500年に相当するレベルで、頂部風速 $U_H=63.8$ m/sを想定したもので、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、検討用風力を風直交方向風力とする。

3. 免震層弾塑性応答変位性状

3.1. 成分分離方法

図4に、免震層入力せん断パワースペクトル密度 $S_\theta(f)$ を示す。パワースペクトル密度は図4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³⁾。本論文では文献3)にない、境界振動数 f_{Bound} を、免震層を含めた建物全体の1次固有振動数の1/3の振動数とし、さらに、共振成分を1次共振成分と高次共振成分に分解し、以下の検討を進める。それぞれの成分の分散は(4)～(7)式より算出する。免震層に入力するせん断力は各層層風力を足し合わせて算出する。本報

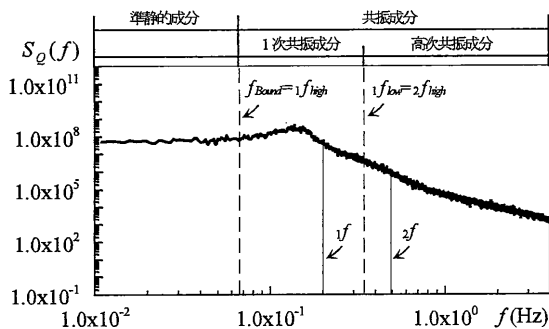


図4 免震層入力せん断力パワースペクトル密度

$$\sigma_Q = [\sigma_{Q_B}^2 + \sigma_{Q_R}^2]^{1/2}, \sigma_{Q_B} = \left[\int_0^{f_{Bound}} S_Q(f) df \right]^{1/2} \quad (4), (5)$$

$$\sigma_{Q_R} = \left[\int_{f_{Bound}}^{\infty} S_Q(f) df \right]^{1/2}, \sigma_{1Q_R} = \left[\int_{f_{high}}^{f_{low}} S_Q(f) df \right]^{1/2} \quad (6), (7)$$

では免震層応答に着目するため、以降、特に断りの無い限り入力せん断力および応答については免震層を対象とし、添え字も省略する。

3.2 応答変位性状

$a\alpha_y = 0.06$ における、成分分離をした弾性、弾塑性応答変位時刻歴波形例を図5、6に示す。図中の破線は免震層の降伏変位 (2.78cm) を示す。図5に着目すると、弾性解析時応答変位では準静的成分の応答が小さく、全成分の応答は1次共振成分の応答が支配的となっている。いっぽう、図6に着目すると、弾塑性解析時応答変位では、風直交方向風力入力時にもかかわらず、広帯域性の応答を示しており、全成分の応答は、準静的成分の振動を中心として、1次共振成分が足し合われさることで構成されていることが分かる。また、準静的成分の応答のみで降伏変形を超えており、そのような現象は共振成分の特に大きな振幅によって引き起こされることが分かる。よって、準静的成分の応答評価・予測をおこなう際は、見かけの残留変形を生じさせる共振成分の評価も同時におこなう必要がある。

風力のパワースペクトル密度と応答のパワースペクトル密度の関係 (図7) から、応答変位の準静的成分標準偏差は入力パワースペクトル密度の準静的成分標準偏差から求めることができる。応答変位準静的成分標準偏差は、(6) 式より入力せん断力の準静的成分 σ_{Q_B} を求め、1次剛性で除することにより求めることができる。図8に、時刻歴応答解析結果と入力せん断力より求めた応答変位準静的成分標準偏差を示す。図8より、入力せん断力より求めた応答変位準静的成分標準偏差 (▲印) は、弾性時応答変位準静的成分標準偏差 (○印) を良く表すことができていますが、弾塑性時応答変位標準偏差 (○印) は弾性時の10倍以上の値を示していることがわかる。表1に、全成分応答の塑性率を示す。本論文のパラメータでは、 $a\alpha_y = 0.04$ 以上で見かけの残留変形を確認しているため、以降ではそれらのパラメータについて検証をおこなう。また、見かけの残留変形を、便宜上残留変形と呼ぶこととする。

4. 弾塑性系応答変位1次共振成分確率密度関数の予測

前章において、応答変位準静的成分を評価するためには、応答変

— : 全成分 — : 1次共振成分 — : 準静的成分

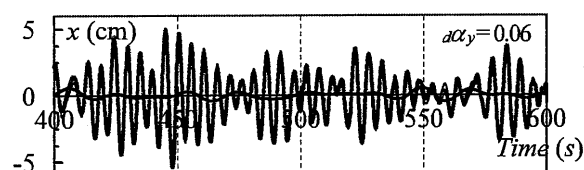


図5 応答変位時刻歴波形例 (弾性)

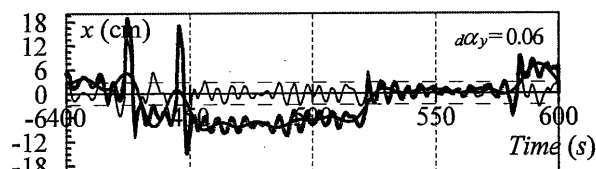


図6 応答変位時刻歴波形例 (弾塑性)

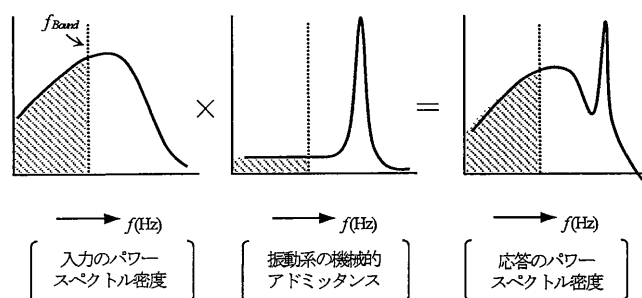


図7 風力のPSDと応答のPSDの関係

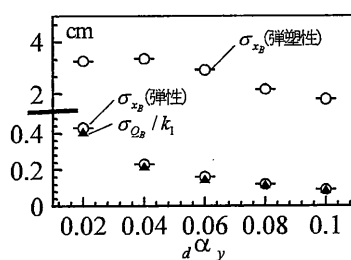


図8 応答変位準静的成分標準偏差

表1 塑性率 (全成分)

$a\alpha_y$		μ_{max}	μ_{rms}
0.02	0.02	25.3	5.9
	0.04	12.5	2.5
	0.06	8.4	1.6
	0.08	6.1	1.1
	0.10	3.6	0.8

位共振成分の評価が必要であることを示した。吉江ら⁴⁾は、1質点系において、弾塑性系と等価線形系のエネルギー釣合式が近似的に等値であることを示し、等価線形系を用いて応答変位ゼロクロスピーク値およびゼロクロスピーク・ピーク値確率密度分布を予測している。本節では、それらの手法を多質点系に適応し、応答変位1次共振成分確率密度関数の予測をおこなう。

4.1 予測手法

弾塑性系の1次共振成分ゼロクロスピーク変位 ${}_1x_{Ri,p}$ と対応する等価線形系のゼロクロスピーク変位 ${}_{eq1}x_{Ri,p}$ の関係は次式となる。

$$\frac{1}{2}k_{eq} \cdot {}_{eq1}x_{Ri,p}^2 = \begin{cases} \frac{1}{2}k_1 \cdot {}_1x_{Ri,p}^2 & ({}_1x_{Ri,p} \leq \delta_y) \\ \frac{1}{2}\alpha k_1 \cdot {}_1x_{Ri,p}^2 + (1-\alpha)k_1 \cdot \delta_y \cdot {}_1x_{Ri,p} - \frac{1}{2}(1-\alpha)k_1 \cdot \delta_y^2 & ({}_1x_{Ri,p} \geq \delta_y) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 α : 剛性比、 k_{eq} : 等価バネ係数であり、(9) 式により求める。

$$k_{eq} = k_1 = \left\{ 1 - (1 - \alpha) e^{-\frac{\delta_y^2}{2\sigma_{1xR}^2}} + (1 - \alpha) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\delta_y}{2\sigma_{1xR}} (1 - \operatorname{erf}(\frac{\delta_y}{\sqrt{2}\sigma_{1xR}})) \right\} \quad (9)$$

ここで、 σ_{1xR} は応答変位 1 次共振成分標準偏差であり、本報では予測式の適応可能性を検証するため時刻歴応答解析結果を用いる。弾塑性系の 1 次共振ゼロクロスピーク変位 ${}_1x_{Ri,p}$ の発生確率 $p({}_1x_{Ri,p})$ と対応する等価線形系の 1 次共振ゼロクロスピーク変位 ${}_{eq1}x_{Ri,p}$ の発生確率 $p'({}_{eq1}x_{Ri,p})$ が等しいと置いて、

$$p({}_1x_{Ri,p}) d_{{}_1x_{Ri,p}} = p'({}_{eq1}x_{Ri,p}) d_{{}_{eq1}x_{Ri,p}} \quad (10)$$

等価線形系の ${}_{eq1}x_{Ri,p}$ はレーリー分布に従うので、弾塑性系の x_i の確率分布は (8) 式を ${}_1x_{Ri}$ について解き、(10) 式に代入して求めることが出来る。

前節図 6 より、残留変形を引き起こす共振成分の大振幅は、ゼロクロスピーク変位ではなく、ゼロクロスピーク・ピーク変位であることから、本節ではゼロクロスピーク・ピーク変位確率密度関数を予測する。ゼロクロスピーク・ピーク変位確率密度関数の予測では、ゼロクロスピーク変位確率密度関数の予測式で用いる 1 次共振成分標準偏差 σ_{1xR} を $(1 + \beta)\sigma_{1xR}$ としたものをを用いる。

$$\beta = \exp(-\zeta \cdot \pi) \quad (11)$$

ζ は振動系の減衰定数であり、本報では過大評価となる可能性があるが、予測式への感度が低いいため $\zeta = 0.02$ を用いる。時刻歴応答解析結果の、ゼロクロスピーク・ピーク変位の抽出には、レインフロー法を適応した。ゼロクロスピーク・ピーク変位と、レインフロー法により抽出した振幅は、厳密には等しくないが、高次共振成分の影響を排除し、1 次共振成分を用いることで、レインフロー法によって、ゼロクロスピーク・ピーク変位と同様の振幅を抽出できることを確認している。

4.2. 予測結果

図 9 に、ダンパー量の違いによる、応答変位 1 次共振成分確率密度関数を示す。図には塑性率 μ_{Rms} を併せて示す。ここで、塑性率 μ_{Rms} とは免震層の応答変位 1 次共振成分標準偏差の免震層の降伏変位に対する比を意味する。図中のレーリー分布には、時刻歴応答解析結果より得られた応答変位 1 次共振成分標準偏差 σ_{1xR} を用いている。図 10 に予測式として示した曲線（破線）は、前節のようにして求めた弾塑性系の応答変位振幅の予測値である。図 10 に着目すると、塑性化の小さい $\alpha_y = 0.1$ において、確率密度分布は概ねレーリー分布に適合することが確認できる。塑性化が大きくなるに従って、予測式は弾塑性応答結果と若干の差異を生じているが、これは (10) 式による等価バネ定数の予測値が、実際の等価バネ定数よりも大きい値となることが影響しているためである。以上より、塑性化の大きい範囲では、予測式が実際の確率密度関数と完全には一致しないものの、今後この提案式を用いて免震層の塑性繰返しによる疲労を予測する際は、予測式の示す振幅が安全側に作用することから、1 質点系で示されている予測式を多質点系に用いることは有用であると考えられる。

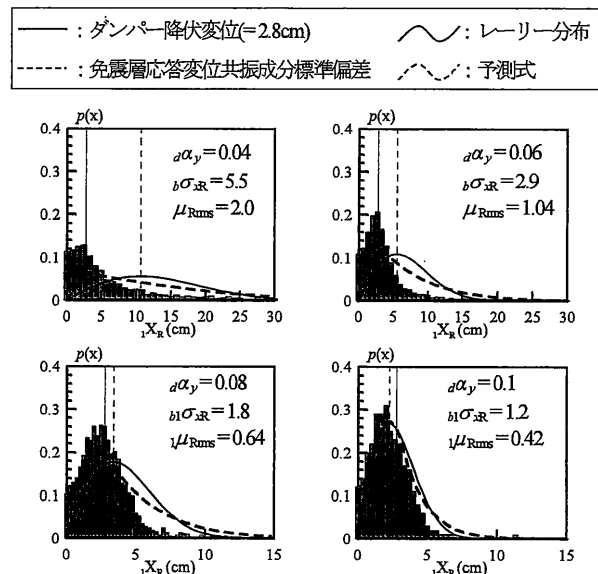


図9 応答変位 1 次共振成分確率密度分布

5. 残留変形の評価

前章より、残留変形に特に影響を及ぼす、応答変位 1 次共振成分のゼロクロスピーク・ピーク値確率密度関数の予測が可能であることが明らかになった。残留変形は正負の累積塑性変形量の差であるが、本報では入力外力に、平均値が零となる風直交方向風力を用いているため、十分に長い時間を考慮すると、正負の累積塑性変形量に差が現れない。そこで、本章では、時刻歴応答解析結果から、残留変形の生じている箇所をそれぞれ分析し、残留変形の生じる場合の、成分ごとの応答変位性状の関係性を明らかにすることで、共振成分より残留変形量を予測する方法を明らかにする。

5.1. 検証方法

残留変形に関わる諸量を図 12 に示す。応答変位全成分時刻歴波形から、残留変形の発生原因と見られるゼロクロスピーク・ピーク変位（●印）を抽出し、そのゼロクロスピーク・ピーク変位の前後の領域で、ゼロクロスピーク変位（○印）の平均値を算出することで、残留変形 δ_r とし、評価する。なお、本章では、パラメータの中で最も残留変形が明確に現れている $\alpha_y = 0.1$ についてのみ検証をおこなう。図 13 に、抽出した応答変位全成分ゼロクロスピーク・ピーク変位 x_{p-p} と残留変形 δ_r の関係を示す。図中の▲印は、アンサンブル平均結果である。図には、評価時間内における残留変形の発生回数 n_r と、累積変形 x_r のアンサンブル平均結果を併せて示す。累積変形 x_r は残留変形 δ_r を足し合わせて求める。

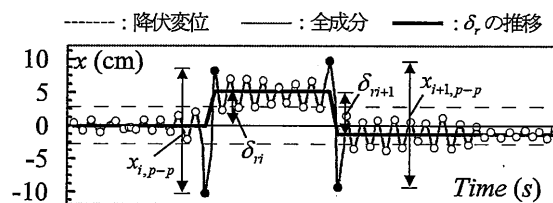


図10 残留変形に関わる諸量

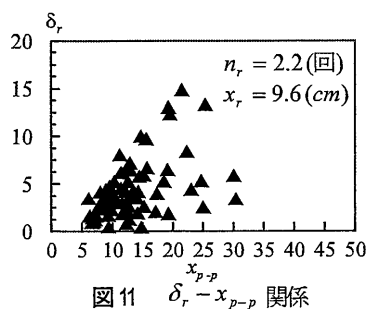
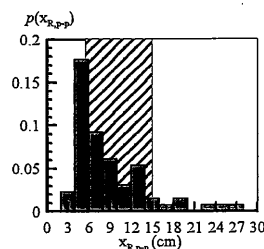
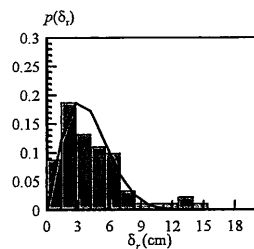
図 11 $\delta_r - x_{p-p}$ 関係図 12 共振成分ゼロクロス
ピーク・ピーク変位確率密度関数

図 13 残留変形確率密度関数

図 11 より、残留変形を引き起こすゼロクロスピーク・ピーク変位はおおよそ 5cm ～ 25cm に集中していることが分かる。ここで、応答変位の全成分は、共振成分と準静的成分の和であることから、図 11 で求めた全成分ゼロクロスピーク・ピーク変位 x_{p-p} より残留変形 δ_r を除いた値は、共振成分ゼロクロスピーク・ピーク変位 $x_{R,p-p}$ となる。そのようにして求めた共振成分ゼロクロスピーク・ピーク変位 $x_{R,p-p}$ と、残留変形 δ_r の確率密度関数を図 12、図 13 に示す。図 13 の曲線は、残留変形の標準偏差を用いて描いたレーリー分布である。図 12 に着目すると、残留変形を引き起こす共振成分ゼロクロスピーク・ピーク変位は、免震層降伏変位の 2 倍の値である 5.56cm ～ 15cm (斜線区間) の範囲内に集中していることが分かる。また、図 13 に着目すると、残留変形の確率密度関数は、残留変形の標準偏差を用いて描いたレーリー分布に従うことが分かる。よって、4.2 節、図 9 の $\alpha\alpha_y = 0.1$ において、5.56 cm 以上の範囲内で平均 2.2 回残留変形が起り、その分布は図 12 の形状となること、さらに、残留変形は図 13 のレーリー分布に従いながら、 $x_r = 9.6(\text{cm})$ となるような値をとることが分かった。

5.2. モデル化

残留変形の発生に関して、以下の 3 点を仮定する。1 つめに、残留変形は等間隔で現れる。2 つめに、残留変形は見かけの残留変形が正側と負側で交互に現れるように発生する。3 つめに、残留変形が生じている時間は、評価時間の 52% であるとする。以上のように仮定すると、5.1 節の検証内容は図 14 のようにモデル化することができ、累積変形 x_r とその分散 σ_r^2 の関係は、(12) 式～ (14) 式のように表すことができる。

ここで、 $n : n_r$ の整数解とする。(12) 式～ (14) 式について、 σ_r^2 が最小となるように x_r を求めると、 $n_r = 2.2$ のとき、 $x_r = \delta_{r1} + \delta_{r2} = 2.13 + 7.46$ 、 $\sigma_r^2 = 4.4$ となり、準静的成分の分散が

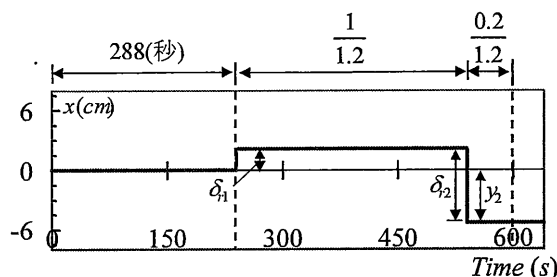


図 14 残留変形のモデル化例

$$x_r = \sum_{i=1}^n \delta_{ri} = 9.6 \quad (12)$$

$$y_i = |x_i - y_{i-1}| \quad (y_0 = 0) \quad (13)$$

$$\sigma_r^2 = 0.52 \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{1}{n_r - 1} \right\} y_i^2 + \frac{n_r - n}{n_r - 1} y_n^2 \right\} \quad (14)$$

時刻歴応答解析結果と等しくなる。 x_1, x_2 は、図 13 の残留変形確率密度関数と照らし合わせても妥当な値となっており、モデル化が妥当であることを示した。以上より、 $\alpha\alpha_y = 0.1$ について、共振成分の分散から、準静的成分の分散を予測する方法が明らかになった。しかし、残留変形の継続時間、発生頻度、累積値は当然のことながら塑性率に左右される。今後の課題として、本手法を他のパラメータについても検証し、より一般性のある予測手法を確立する必要がある。

6. 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、応答変位の成分ごとの応答性状を分析し、以下の結論を得た。

- (1) 1 質点系で提案されている応答変位共振成分ゼロクロスピーク・ピーク値確率密度関数の予測式が、多質点系においても適用可能であることを示した。
- (2) 残留変形を引き起こす 1 次共振成分応答と残留変形の関係を明らかにし、共振成分応答から準静的成分の応答が予測可能であることを示した。

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、東京理科大学による新耐風設計法研究会の成果の一部です。ここに記して、感謝の意を表します。

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, pp.281-282, 2010.7
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 吉江慶祐、北村春幸、大熊武司、和田章：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, pp.21-28, 2006.10

*1 東京理科大学 *2 株式会社日建設計 *3 東京工業大学