

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	変動風力を受ける超高層建築物の高次モード応答特性
Title(English)	CHARACTERISTIC OF HIGHER MODE RESPONSE OF HIGH-RISE BUILDING UNDER FLUCTUATING WIND FORCE
著者(和文)	平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 鈴木悠也, 北村春幸
Authors(English)	Hiroyuki Hirai, Keisuke Yoshie, daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 18, No. 38, pp. 79-84
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 18, No. 38, pp. 79-84
発行日 / Pub. date	2012, 2
権利情報	日本建築学会
Relation	<a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/18/38/18_38_79/_article/-char/ja/">https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/18/38/18_38_79/_article/-char/ja/</a>
Note	本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである

# 変動風力を受ける超高層建築物 の高次モード応答特性

# CHARACTERISTIC OF HIGHER MODE RESPONSE OF HIGH-RISE BUILDING UNDER FLUCTUATING WIND FORCE

平井宏幸 —— \* 1      吉江慶祐 —— \* 2  
佐藤大樹 —— \* 3      鈴木悠也 —— \* 4  
北村春幸 —— \* 5

Hiroyuki HIRAI —— \* 1      Keisuke YOSHIE —— \* 2  
Daiki SATO —— \* 3      Yuya SUZUKI —— \* 4  
Haruyuki KITAMURA — \* 5

キーワード：  
超高層建築物, 風応答, 多質点, 高次モード

Keywords:  
High-rise building, Wind response, Multi-mass system, Higher mode

As buildings have become higher, it is likely to find the wind loads that is equal to or even greater than the design seismic loads. Therefore, it is important to estimate responses of high-rise buildings under fluctuating wind force. This paper presents contribution rate of higher mode wind response of multi-mass system for high-rise buildings by using a modal analysis in elasto range. Then, it shows that the wind responses are usually separated into the low and high frequency components, and the wind responses can be expressed as sum of them. The agreement between the predicted value based on coupling of two components and results of time-history analysis was finally confirmed.

## 1. 序論

近年, 中低層建築物に広く用いられてきた免震構造が, 超高層建築物にも適用される事例が増加している<sup>1)</sup>。主として免震構造は地震時における入力エネルギーを低減させるために, アイソレータやダンパーなどの免震装置を建築物の基礎または中間階に設けることで建築物の長周期化を図っている。しかしながら, 免震構造による建築物の長周期化は耐震性能を向上させるものの, 風荷重の増大を招く可能性がある。

一般に風外力のパワーは長周期側で卓越していることから, 固有周期の長い超高層建築物では風外力の影響が大きくなり, 塑性化によって固有周期が長周期化した場合, さらなる風外力の増加を招く。また, 台風や季節風のように長時間継続して強風が吹く場合は, 累積疲労の問題等が予想されるが, それらに対する詳細な検討や設計法が確立されていないのが現状である。そのため, 現行の耐風設計<sup>2)</sup>では, 建築物の規模に関わらず風荷重に対しては主要な構造骨組みを弾性挙動の範囲内に留めることが一般的である。しかし, 近年の超高層免震建物では極めて稀に発生する暴風時の風荷重に対して, 免震層の鋼材ダンパーの塑性化を許容するが, 疲労性能上問題のない変形量に留める設計も行われてきている<sup>例えば 3)</sup>。今後も建築物の高層化が進めば, 免震構造だけでなく制振構造においても風応答に対してダンパーの塑性化を許容する建物が増えることが予想され, 弾塑性風応答時の応答特性について十分な検討を進める必要がある。

構造物の弾塑性域での設計については, 耐震設計の分野ではエネルギーの釣合に基づく設計手法<sup>4)</sup>が既に実用化されている。この方

法は, 変形や塑性化の度合いと履歴吸収エネルギーを直接関係づけることで, 時刻歴応答解析を用いない応答予測を可能にし, 構造設計の信頼性を高めていると考えられる。一方, エネルギーの釣合を利用した弾塑性風応答予測に関して, 吉江ら<sup>5)</sup>は, 風応答は1次モードが支配的として, 1質点系を用いた風応答予測手法を研究しており, その有効性を示している。しかし, 上記の仮定は, 塑性化後の固有モードが弾性時のものと概ね同じであるような建築物に対しては問題ないが, ある層が局部的に塑性化するような建築物に対しては, 塑性化後にモード形が変化し, そのモードに応じて等価質量および固有周期が変動するため妥当ではない。後者のような建築物に対しては, 1次モードのみでは不十分であり, 高次モードまで考慮した応答予測手法が必要になると考える。そこで, 多質点系の風応答を各次モード成分に分解し, それぞれのモード成分のエネルギー入力や応答を評価することは, 多質点系での風応答予測手法の開発のために重要であると考えられる。

本論文では, 広帯域性の風方向変動風力を受ける多質点系での弾塑性応答予測手法を構築するための基礎研究として, 弾性モデルを用いた検討を行う。はじめに, 時刻歴解析によるモーダルアナリシスを行い, 高次モードが応答特性に与える影響を検討し, 多質点系での基本的な風応答特性を調べる。検討に当たっては, 近年, 変形に依存する履歴減衰型や速度に依存する粘性減衰型制振部材が高層建築物に数多く設置されている現状を踏まえ, 層間速度および層間変形に注目する。次に, 吉江ら<sup>6)</sup>, 辻田ら<sup>7)</sup>の研究を参考にして, 風方向応答のような広帯域なランダム応答を, 固有振動数より低振

<sup>1)</sup> 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 大学院生  
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>2)</sup> ㈱日建設計構造設計部 主管・博士(工学)

<sup>3)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

<sup>4)</sup> 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 大学院生(研究当時)

<sup>5)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

<sup>1)</sup> Graduate Student, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

<sup>2)</sup> Associate, Structural Engineering Dept., Nikken Sekkei Ltd., Dr. Eng.

<sup>3)</sup> Assistant Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

<sup>4)</sup> Graduate Student, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

<sup>5)</sup> Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

動数成分（準静的成分に相当<sup>6),7)</sup>）と高振動数成分（共振成分に相当）に分離し、各々ならびに両成分の組み合わせとして応答性状の分析を行う。続いて、スペクトル応答解析による準静的成分の評価式を提案し、時刻歴応答解析結果と比較することで、その有効性を検証する。

## 2. 解析対象モデルと風外力の概要

検討に用いる解析対象建物の諸元と想定立地条件を図1に示す。解析対象建物は、高さ  $H=200$  m、幅  $B=50$  m、奥行き  $D=50$  m で、1次固有周期  ${}_1T=5.0$  秒、地上部総質量は87500 ton とし、質量は高さ方向に一様であると想定した。解析モデルは図1に示すような、10質点せん断型モデルとする。減衰は1次固有周期  ${}_1T$  に対して  $\zeta_1=1.0\%$ 、 $10.0\%$  の2種類の剛性比例型とした。各層の剛性  $k_i$  は、建物の1次固有モードが直線となるように(1)式より決定した<sup>8)</sup>。

$$k_i = \frac{s\omega^2 \cdot m_i \cdot \phi_i + k_{i+1} (s\phi_{i+1} - s\phi_i)}{s\phi_i - s\phi_{i-1}} \quad (i = n \sim 1) \quad (1)$$

ここで、 $s\omega$ :  $s$ 次固有円振動数 ( $=2\pi/sT$ )、 $s\phi_i$ :  $i$ 層  $s$ 次のモードベクトル、 $n$ : 層数を表す。ただし、 $k_{n+1}=0$ 、 $s\phi_0=0$  とする。

図2に剛性分布、振動モード形および刺激関数を、表1に各次モードでの固有周期と減衰定数をそれぞれ示す。

構造物に作用する風方向風力は風洞実験結果<sup>9)</sup>を用いた。実験気流は「建築物荷重指針・同解説」<sup>2)</sup>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  $H=50$  cm、辺長比  $D/B=1.0$ 、平面積  $A=100$  cm<sup>2</sup>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9)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<sup>2)</sup>、頂部風速  $U_H=63.8$  (m/s) を想定した。本検討モデルを用いて、時刻歴応答解析により風応答を評価する場合、文献10)において、30波以上の風力時刻歴波形数を用いることで、変動風力による応答値のばらつきが小さくなることが確認されている。これより、本研究では30波のアンサンブル平均により応答値を評価した。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秒刻み14000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、固有周期  ${}_1T=5.0$  秒の120倍の600秒で各応答を評価する。図3,4に風方向の頂部層風力のパワースペクトル密度および時刻歴波形の例を示す。図3の横軸は振動数  $f$  を建築物の幅  $B$  と頂部風速  $U_H$  で無次元化した無次元振動数 ( $=fB/U_H$ ) として示し、縦軸は振動数と風力の分散  $\sigma^2$  で無次元化している。なお、本論文では、平均成分を含まない風方向風力の変動成分のみを用いる。

## 3. 時刻歴モーダルアナリシスに基づく応答評価

本章では、多質点系モデルを各次モードごとに独立した1自由度系に分解して時刻歴解析を行い、各次モード成分の応答値を求め、その結果と10質点系の直接積分による時刻歴応答解析結果を比較することで、高次モードの影響を確認する。

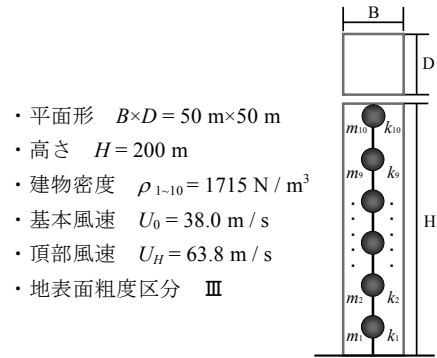


図1 解析対象建物概要

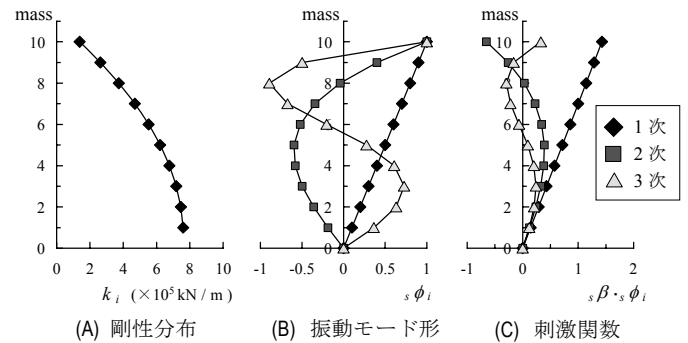


図2 解析対象モデル概要

表1 各次での固有周期と減衰定数

振動モード	固有周期 (秒)	減衰定数 (%)	
	$sT$	$\zeta_1=1.0$	$\zeta_1=10.0$
1次モード	5.00	1.00	10.0
2次モード	1.84	2.75	27.5
3次モード	1.10	4.59	45.9

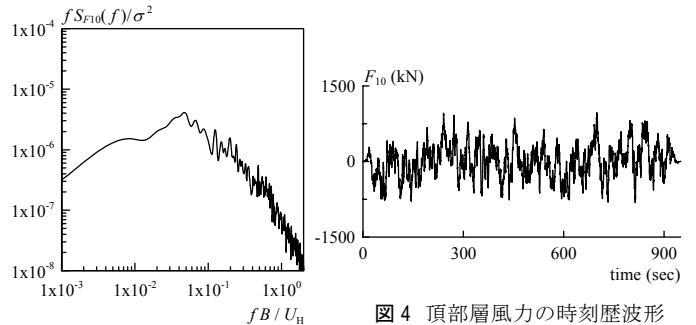


図3 頂部層風力のパワースペクトル密度

図4 頂部層風力の時刻歴波形

### 3. 1. 時刻歴モーダルアナリシスの概要

各質点にランダム外力を受ける多質点系の運動方程式は(2)式のように表せる。なお、本論文では(2)式に示す10質点系の直接積分による時刻歴応答解析を10質点解析と呼ぶ。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P\} \quad (2)$$

ここで  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ : 質量, 減衰, 剛性マトリクス,  $\{x\}$ : 変位ベクトル,  $\{P\}$ : 外力ベクトルを表す。

(2)式の運動方程式を各次のモード座標に対する独立な1自由度系の運動方程式に変換すると、(3)式で表すことができる。

$${}_s M \cdot \ddot{q}(t) + {}_s C \cdot \dot{q}(t) + {}_s K \cdot q(t) = {}_s P(t) \quad (3)$$

ここで、 ${}_s M, {}_s C, {}_s K, {}_s P$ :  $s$  次の一般化質量, 一般化減衰, 一般化剛性, 一般化外力であり, (4 a-d)式でそれぞれ表わされる。

$${}_s M = \{ {}_s \phi \}^T [M] \{ {}_s \phi \}, \quad {}_s C = \{ {}_s \phi \}^T [C] \{ {}_s \phi \} \quad (4 a, b)$$

$${}_s K = \{ {}_s \phi \}^T [K] \{ {}_s \phi \}, \quad {}_s P = \{ {}_s \phi \}^T [P] \quad (4 c, d)$$

次節では, (3)式を用いて各次モードでの時刻歴応答解析を行い, 各次モード成分の最大値および標準偏差を評価する。なお,  $i$  層の変位  $x_i$ , 速度  $\dot{x}_i$ , 加速度  $\ddot{x}_i$  は  $s$  次の振動モード形  ${}_s \phi_i$  および一般化変位  ${}_s q$  を用いて, モード重ね合わせにより次式のようにそれぞれ表わされる。

$$x_i = \sum_{s=1}^n {}_s \phi_i \cdot {}_s q, \quad \dot{x}_i = \sum_{s=1}^n {}_s \phi_i \cdot \dot{{}_s q}, \quad \ddot{x}_i = \sum_{s=1}^n {}_s \phi_i \cdot \ddot{{}_s q} \quad (5 a-c)$$

### 3. 2. 高次モード振動成分の分析

図 5 (a), (b) に 10 質点解析より得られた第 1, 5, 10 層における層間速度, 層間変形のパワースペクトル密度 (以下, PSD と略記) をそれぞれ示す。図 6 に時刻歴モーダルアナリシスによる 1 ~ 3 次モード成分と 10 質点解析による応答値の比較を示す。図 6 (a) は層間速度, (b) は層間変形であり, それぞれの図において最大値と標準偏差を示している。図中の白抜きのプロットは 10 質点解析結果を示す。

図 5 (a) より, 減衰定数  $\zeta_1 = 1.0\%$  の層間速度の PSD は, 建物頂部 (第 10 層) > 建物最下層 (第 1 層) > 中間層 (第 5 層) の順に高次モードの振動成分が大きくなっていることが確認できる。特に, 建物頂部では 2, 3 次モード成分におけるパワーが他の層に比べて顕著である。また, 図 6 (a) 上段の  $\zeta_1 = 1.0\%$  の最大層間速度応答値からも, 第 4, 5 層に比べて第 7 ~ 10 層および第 1, 2 層において, 高次モード

成分の影響で 10 質点解析 (◇印) が 1 次モード成分 (◆印) を上回っていることが確認できる。標準偏差についても建物上層部で, 高次モード成分の影響により 10 質点解析 (△印) が 1 次モード成分 (▲印) を上回り, 10 質点解析と 1 次モード成分の比率は最大値と同程度であることを確認した。この傾向は,  $\zeta_1 = 10.0\%$  の層間速度の最大値・標準偏差でも見られた (図 6 (a) 下段)。

図 5 (b) の層間変形の PSD より, 減衰定数  $\zeta_1 = 1.0\%$  では, 建物頂部 (第 10 層) で他の層と比べて 2, 3 次モード成分のパワーが大きく, 中間層 (第 5 層) には高次モード成分は殆ど見られない。しかし, 図 6 (b) 上段の  $\zeta_1 = 1.0\%$  の最大層間変形応答値では, 下層部で高次モード成分の影響が多少見られるものの, 10 質点解析 (◇印) は 1 次モード成分 (◆印) と概ね一致していることから, 高次モード成分の寄与は小さいことが分かる。この傾向は, 標準偏差に関しても同様である。一方, 図 5 (b) より,  $\zeta_1 = 10.0\%$  の層間変形の PSD に関して, 1 次モード成分のパワーは  $\zeta_1 = 1.0\%$  に比べて小さくなり, かつ高次モード成分は殆ど見られない。それに対して 1 次固有振動数より低振動数域では, 減衰定数  $\zeta_1 = 1.0\%$  と  $10.0\%$  で変化はない。風力の PSD  $S_F(f)$  と応答の PSD  $S_R(f)$  の間には, 機械的アドミッタンス  $|H(f)|^2$  を介して

$$S_R(f) = |H(f)|^2 \cdot S_F(f) \quad (6)$$

となる関係があり, 図 7 のように模式的に示される。高減衰ほど固有振動数付近での機械的アドミッタンスの値は小さくなり, 相対的に低振動数領域の応答の影響が顕著になる。そのため,  $\zeta_1 = 10.0\%$  の層間変形の応答分布 (図 6 (b) 下段) は低振動数成分の影響を強く受け, 応答の変動は外乱の変動に収束していくものと考えられ, その影響については 4 章で詳細に検討する。

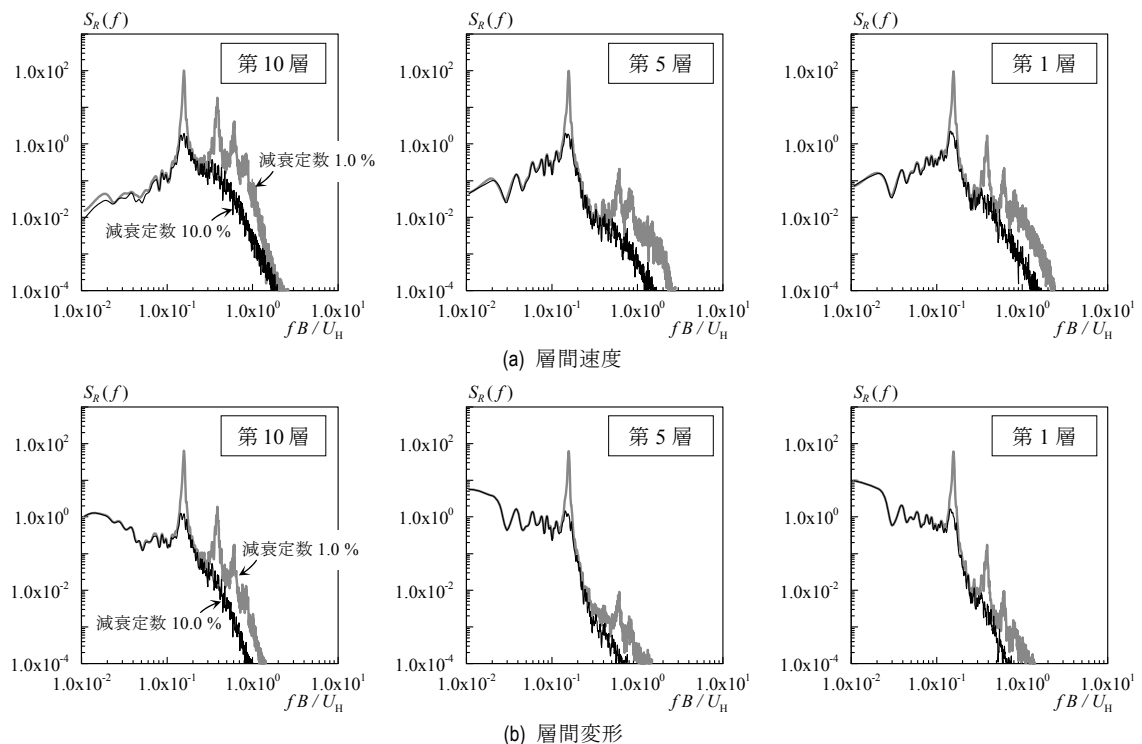


図 5 風方向風力入力時の応答のパワースペクトル密度 ——— 減衰定数 1.0% ——— 減衰定数 10.0%

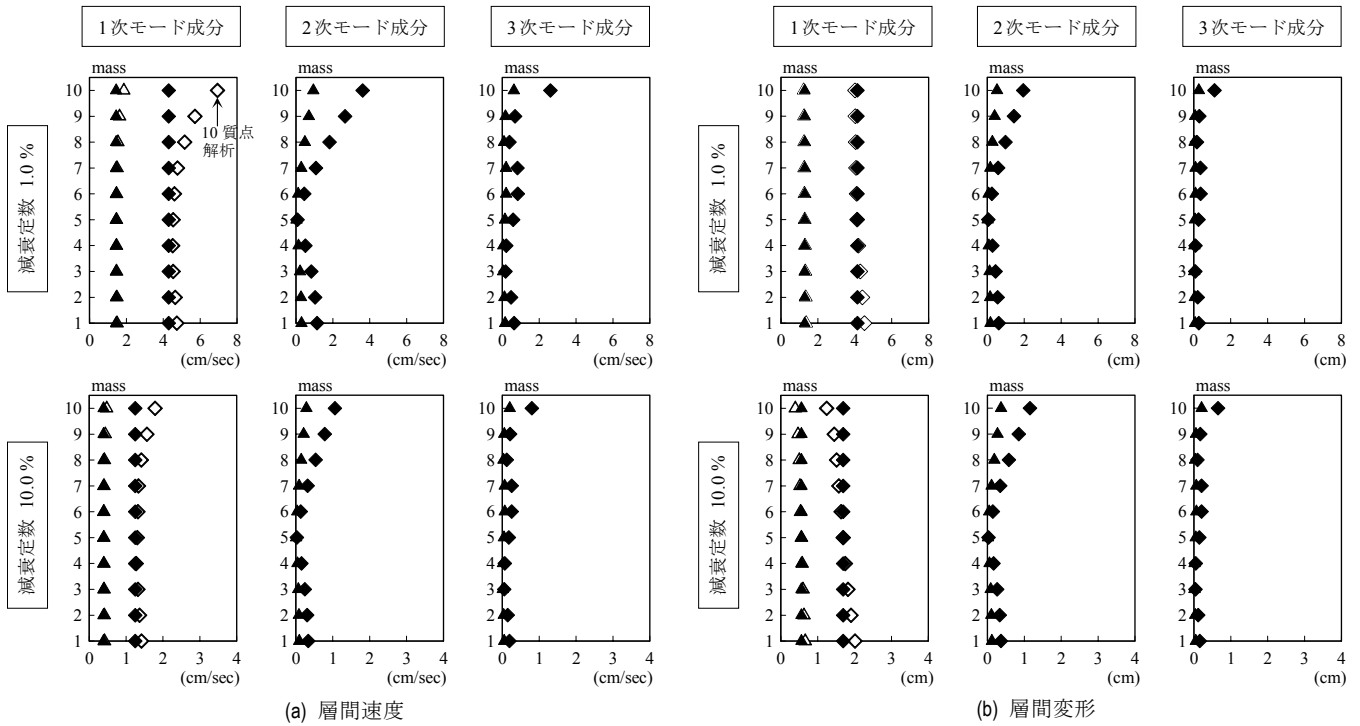


図6 10質点解析と各次モード成分の応答値比較  
(10質点解析は1次モード成分の図中に表記)

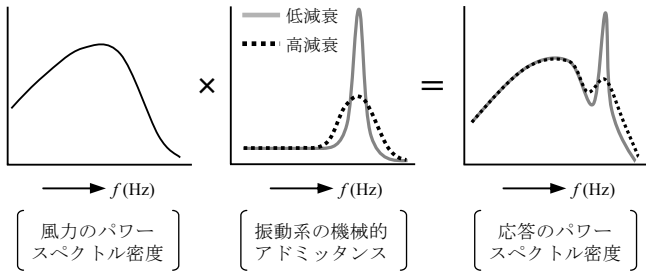
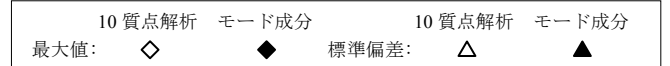


図7 風力のパワースペクトル密度と応答のパワースペクトル密度の関係

### 3. 3. モード重ね合わせ時刻歴解析による応答評価

本節では、各次モード応答を任意の次数まで重ね合わせ ((5a-c)式)、10質点解析との誤差に着目することで、高次モード振動成分の影響を評価する。

1~j次モードまで重ね合わせて求めたある層の最大値および標準

偏差と、10質点解析との誤差(モード重ね合わせ/10質点解析)をそれぞれ  $j\alpha_{max}$ ,  $j\alpha_{rms}$  と呼ぶ。図8,9に高次モード成分の影響が最も大きい第10層の層間速度および層間変形の  $j\alpha_{max}$ ,  $j\alpha_{rms}$  をそれぞれ示す。

図8より、減衰定数  $\zeta_1 = 1.0\%$  の層間速度に関して、1次モード成分は10質点解析結果に比べて最大値では40%、標準偏差では30%程度小さく、2次または3次モードまで考慮しないと10質点解析結果を精度良く再現できない。減衰定数  $\zeta_1 = 10.0\%$  の層間速度では、最大値・標準偏差ともに1次モード成分は10質点解析結果に比べて20%程度小さく、 $\zeta_1 = 1.0\%$  に比べ  $\zeta_1 = 10.0\%$  の場合は高次モード成分の影響が減少している(図8)。図9より、 $\zeta_1 = 1.0\%$  の層間変形では、最大値、標準偏差ともに1次モード成分が10質点解析結果に比べて+3~5%程度の差であり、高次モードの影響は小さいことが分かる。 $\zeta_1 = 10.0\%$  の層間変形は、10質点解析結果

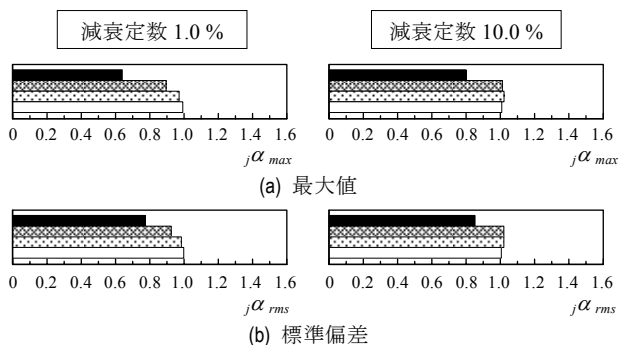
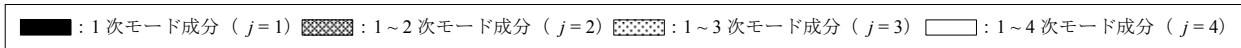


図8 層間速度(第10層)

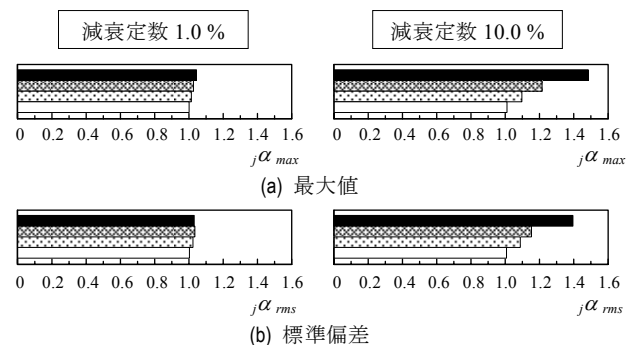


図9 層間変形(第10層)

に比べて1次モード成分は最大値では40%、標準偏差では50%程度大きく、高次モード成分までを考慮して評価する必要があることを確認した(図9)。

#### 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10に、減衰定数 $\zeta_1 = 1.0\%$ の第10層における層間変形のPSDを示す。PSDは図10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<sup>6),7)</sup>。本論文では文献6)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。 $i$ 層の層間変形の標準偏差 $\sigma_{\delta_i}$ は、層間変形の準静的成分 $\sigma_{B\delta_i}$ と共振成分の標準偏差 $\sigma_{R\delta_i}$ の2乗和平方根から、(7 a-c)式によって算出できる。

$$\sigma_{\delta_i} = [\sigma_{B\delta_i}^2 + \sigma_{R\delta_i}^2]^{1/2} \quad (7 a)$$

$$\sigma_{B\delta_i} = \left[ \int_0^{f_{Bound}} S_{\delta_i}(f) df \right]^{1/2}, \quad \sigma_{R\delta_i} = \left[ \int_{f_{Bound}}^{\infty} S_{\delta_i}(f) df \right]^{1/2} \quad (7 b, c)$$

ここで、 $S_{\delta_i}(f)$ :  $i$ 層の層間変形のPSD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。図10より、それぞれの固有振動数に相当するピーク( $s f$ : 10質点固有値解析より求めた $s$ 次の固有振動数( $s = 1, 2, 3$ ))が見られる。以下、(8)式に基づき各次数の境界振動数 $s f_{high}$ および $s f_{low}$ を決定し、層間変形の各次共振成分の標準偏差 $\sigma_{s\delta_i}$ を(9)式より算出する。なお、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((8c)式)。

$$1 f_{high} = f_{Bound} \quad (8 a)$$

$$s f_{high} = s f - \frac{s f - s - 1 f}{2} \quad (s = 2, 3) \quad (8 b)$$

$$s f_{low} = s f + \frac{s + 1 f - s f}{2} \quad (s = 1, 2) \quad \text{ただし、} 3 f_{low} = \infty \quad (8 c)$$

$$\sigma_{s\delta_i} = \left[ \int_{s f_{low}}^{s f_{high}} S_{\delta_i}(f) df \right]^{1/2} \quad (9)$$

なお、(9)式より求めた各次共振成分の標準偏差 $\sigma_{s\delta_i}$ は、3章で述べた時刻歴モーダルアナリシスによる各次モードの標準偏差とは異なる点に注意されたい。

図11に層間変形の準静的成分の標準偏差 $\sigma_{B\delta_i}$ を示す。準静的成

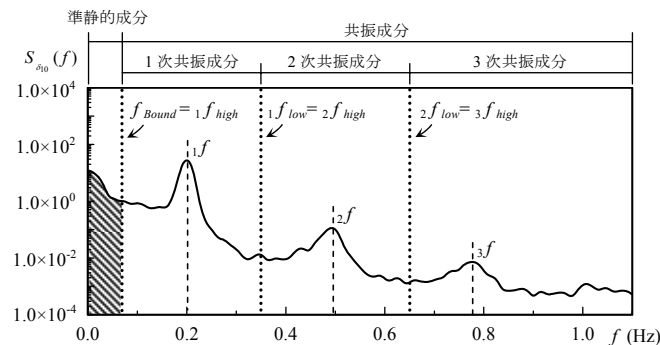


図10 第10層における層間変形のパワースペクトル密度

分の高さ方向の応答分布形は減衰定数の値により変化していないことが分かる(図11)。これは、図7からも分かるように、準静的成分の応答は外乱に支配されているためと考えられる。図11より、第1層における層間変形の準静的成分 $\sigma_{B\delta_1}$ は減衰による差はなく0.6 cmとなっている。10質点解析による第1層の層間変形の標準偏差(△印)は、減衰定数 $\zeta_1 = 1.0\%$ で1.7 cm、 $\zeta_1 = 10.0\%$ では0.8 cmとなり(図6(b))、10質点解析結果に占める準静的成分の割合は、減衰が高いほど大きくなることが分かる。なお、この傾向は、第1層に限らず全層で見られた。

図12に層間変形の共振成分と1次共振成分の標準偏差 $\sigma_{R\delta_i}, \sigma_{1\delta_i}$ をそれぞれ示す。図12より、共振成分は減衰定数の変化とともに変化する。共振成分(◇, △印)は1次共振成分(◆, ▲印)と概ね一致していることが分かる。これより、層間変形の共振成分は1次共振成分のみで近似可能と考えられる。

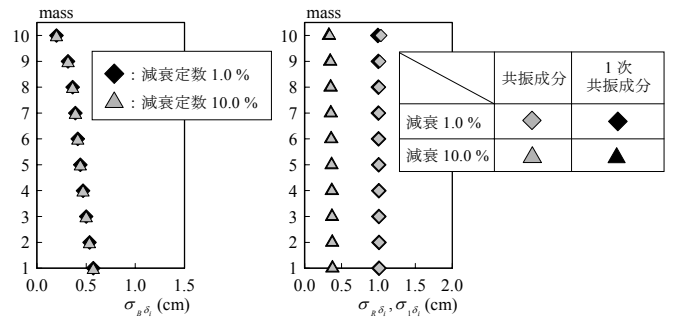


図11 層間変形の準静的成分

図12 層間変形の共振成分と1次共振成分

##### 4.2. 準静的成分の予測

前節において、層間変形に占める準静的成分の割合が大きいために、準静的成分を、簡便かつ適切に評価することが重要となる。そこで、本節では、時刻歴応答解析を用いずに、層間変形の準静的成分を予測する方法を示す。4.1節より、層間変形の準静的成分は、減衰定数による影響が小さいので、外乱との静的な力の釣合から応答値を直接評価できると考えられる。(10)式より、層せん断力の準静的成分 $\bar{\sigma}_{BQ_i}$ を求め、(11)式から層間変形の準静的成分の標準偏差 $\bar{\sigma}_{B\delta_i}$ を評価する。

$$\bar{\sigma}_{BQ_i} = \sum_{j=1}^n \sigma_{BF_j} = \sum_{j=1}^n \left[ \int_0^{f_{Bound}} S_{F,j}(f) df \right]^{1/2} \quad (i = 1 \sim 10) \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_{B\delta_i} = \bar{\sigma}_{BQ_i} / k_i \quad (n = 1 \sim 10) \quad (11)$$

図13に時刻歴解析結果((7b)式)と予測式((11)式)により求めた層間変形の準静的成分の比較を示す。ここでは減衰定数1.0%のみの結果を示す。図13より、建物下層部で(11)式(◆印)が(7b)式(△印)を若干上回っているが、概ね一致していることが確認できる。これより、層間変形の準静的成分は時刻歴応答解析を用いずに(11)式より応答値を推定することが可能であることが確認された。これは減衰定数10.0%でも同様の結果となった。

広帯域性の変動風力を受ける構造物の応答は準静的成分による周

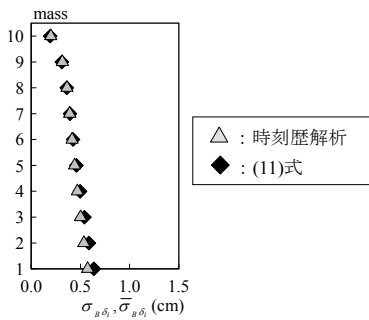


図 13 層間変形の準静的成分(標準偏差)の時刻歴解析結果と予測値 (11式) の比較

期の長い変動と共振成分による周期の短い変動の和として表現できる<sup>6), 7)</sup>。準静的成分は (11)式より算出し、さらに図 12 より共振成分の層間変形は 1 次共振成分で近似できることから (4.1 節), 最大層間変形応答値  $\delta_{i,max}$  は (12)式のように求めることができる。

$$\delta_{i,max} = g \left[ \sigma_{B\delta_i}^2 + \sigma_{R\delta_i}^2 \right]^{1/2} \approx g \left[ \bar{\sigma}_{B\delta_i}^2 + \sigma_{1\delta_i}^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

ここで、ピークファクター  $g$  は定常ガウス過程を仮定し、3 とした<sup>2)</sup>。

図 14 に 10 質点解析結果と (12)式より求めた最大層間変形応答値の比較を示す。図 14 より、減衰定数  $\zeta_1 = 1.0\%$  の最大層間変形応答値を見ると、建物上層部で (12)式 (◆印) は 10 質点解析結果 (◇印) を若干上回っているものの、全体的には (12)式によって最大値を良く評価できている。減衰定数  $\zeta_1 = 10.0\%$  では、10 質点解析結果 (▲印) と (12)式 (▲印) が全層で精度良く一致していることが分かる。4.1 節で述べたように、減衰が高い時の風方向振動は、ほぼ準静的成分のみに支配され、各次共振成分が非常に小さくなると考えられるため、(12)式が成り立つと考えられる。以上より、最大層間変形応答値は準静的成分と共振成分をそれぞれ評価した上で、(12)式により評価することが可能であることを確認した。

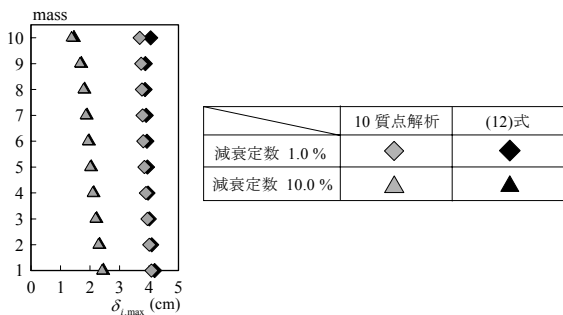


図 14 最大層間変形の 10 質点解析結果と計算値 (12)式) の比較

## 5. 結論

本論文では、広帯域性の変動風力を受ける超高層建築物を対象とした多質点系での基本的な風応答特性を知るために、弾性範囲でのモーダルアナリシスによる風応答解析を行い、高次モードの寄与分を評価した。併せて、風方向応答のような広帯域なランダム応答に対して、スペクトル応答分離による準静的成分の応答予測手法を導き、時刻歴応答解析結果と比較することで、その有効性を検証し、以下の結論を得た。

(1) 層間速度の最大値・標準偏差を評価する場合、高次モード成分

の影響で 1 質点系の応答値が多質点系のものに比べて過小評価となる可能性があり、2, 3 次モード成分まで考慮することで、多質点系の応答値をより正確に評価できることを示した。

- (2) 減衰が低い場合における層間変形の最大値は、下層部で高次モード成分の影響が多少見られたが、ほぼ 1 次モードの振動形のみで近似可能であることを示した。
- (3) 層間変形の準静的成分は、減衰定数の値により変化しない。つまり、減衰が高いほど、全層で準静的成分の影響を強く受ける。
- (4) 層間変形の準静的成分は、時刻歴応答解析を用いずに風力のパワースペクトル密度から、静的な力の釣合より評価することが可能であることを示した。
- (5) スペクトル分離に基づく準静的成分と 1 次共振成分の和による最大応答推定値は、多質点系での直接積分による時刻歴応答解析結果と良く一致することを示した。

今後は、本研究で得られた知見を基に、弾塑性風応答時の高次モードの影響に関して検討していく予定である。

## 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、片桐純治博士、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) 大宮幸, 寺本隆幸: 免震建物の調査研究 -公開されたデータに基づく免震建物の傾向把握-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.513-514, 2006.9
- 2) 日本建築学会: 建物荷重指針・同解説, 2004
- 3) 菊池岳史, 藤森智, 竹内徹, 和田章: メガブレースを用いた超高層免震構造建築物の設計, 日本建築学会技術報告集, 第 22 号, pp.217-222, 2005.12
- 4) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1997
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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, pp.75-82, 2009.1
- 9) 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 (北陸) B-1, pp.193 - 194, 2010.9
- 10) 佐藤大樹, 鈴木悠也, 吉江慶祐, 北村春幸: 変動風力を受ける超高層免震建築物の応答評価に関する研究 (その 1) 風応答評価に及ぼすアンサンブル平均のばらつきの検討および高次モードの評価, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北) B-2, pp.927 - 928, 2009.9

[2011 年 6 月 19 日原稿受理 2011 年 8 月 17 日採用決定]