

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	2018 変動風力を受ける超高層建築物の多質点系モデルを用いた応答評価：その1 風応答評価に及ぼすアンサンブル数の検討および高次モードの評価(構造)
Title	
著者(和文)	岡本 有里子, 鈴木 悠也, 佐藤 大樹, 吉江慶祐, 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 I, , No. 79,
Citation(English)	, , No. 79,
発行日 / Pub. date	2009, 2
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/110007453871

変動風力を受ける超高層建築物の多質点系モデルを用いた応答評価 (その1 風応答評価に及ぼすアンサンブル数の検討および高次モードの評価)

準会員○岡本有里子^{*1} 正会員 鈴木悠也^{*2} 同 佐藤大樹^{*3}
同 吉江慶祐^{*4} 同 北村春幸^{*5}

構造－振動

風外力 多質点系 モーダルアナリシス

アンサンブル数 高次モード

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。しかし、近年は風荷重により免震層が塑性化しやすい超高層免震建物が普及している。また、制振効果を高めるためにはできるだけ小さな荷重レベルから制振部材を塑性化させエネルギー吸収を行うことが必要である履歴型制振部材の普及が進んでいる。したがって、今後は風荷重に対して弾塑性範囲における応答評価が必要となる。

また、既往の研究では、風力に対する建物の応答は1次が卓越するとされているため、1次のみで応答評価されてきた。そこで、吉江^らの研究により、弾塑性範囲における1質点系でのエネルギー入力評価法が提案されている。しかし、実際の建物は多質点系であるため、吉江らの研究結果を多質点系に拡張する必要がある。

そこで、本研究では、弾塑性範囲における多質点系の風応答評価を目的とする。本報その1では、その基礎研究として、弾性範囲における風力時刻歴波形のアンサンブル数の評価および、モーダルアナリシスを用いた高次モードの影響の評価を行う。本報その2では、弾塑性構造物のモーダルパラメータの同定手法の検討および、変動風力による構造物へのエネルギー入力を評価する。

2. 解析モデルの作成

対象建物は、減衰定数が1,2次ともに $\alpha=1, 2, 5\%$ のRayleigh減衰を持つ、10質点せん断型モデルとする。図1に対象建物の概要を示す。

耐震モデルを想定したE-modelを基本とし、弾性範囲だが免震層を想定し弱層を設けた基礎免震モデルのI-1-model、中間層免震モデルのI-5-modelを作成する。E-modelは1次固有周期 $T_1=5.0(\text{s})$ とし、1次モードが直線となるモデルとした。図2にE-modelの剛性分布、刺激関数 s 次固有周期 T_s を示す。

以下にI-1-model, I-5-modelの作成手順を示す。質量 m_i , E-modelの i 層剛性 k_i は既知である。I-1-model, I-5-modelの i 層剛性分布 K_i は、 k_i に α, β という変数を乗じて求める。図3左側のE-model剛性分布に、各モデルにおける α, β を乗じる層を示す。 β を乗じる層とその上層の剛性比 $\alpha k_i / (\beta k_i) = 6$ 、また、1次固有周期 $T_1=5.0(\text{s})$ となるように α, β を求めた。

T_1 は、 A_i 分布に基づく層せん断力および外力の分布より、外力をかけたときの弾性変形に基づき、以下の式より近似的に算出する²⁾。

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\sum_{j=1}^N m_j u_j^2 / \sum_{j=1}^N F_j u_j} \quad (1)$$

ここで、 m_j : j 層質量、 u_j : j 層変位、 F_j : j 層外力を表す。

作成した解析モデルの剛性分布、刺激関数 T_s を図3右側に示す。I-1-modelは1層と2層の剛性比を6倍とした基礎免震モデル、

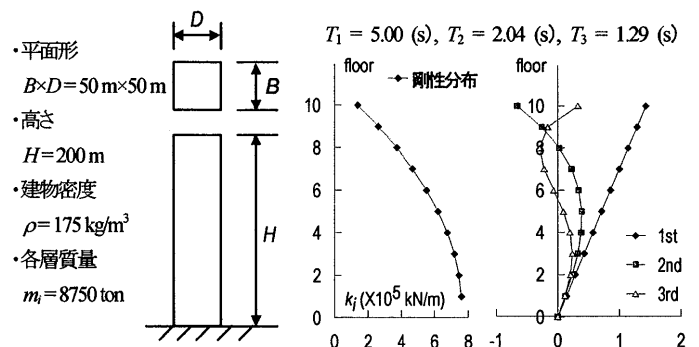


図1 対象建物の概要

図2 E-model 概要

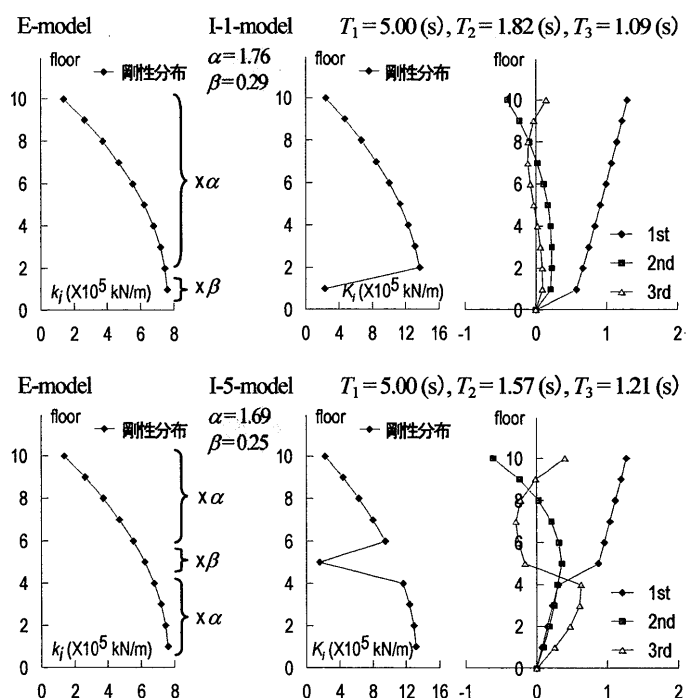


図3 解析モデルの α, β 条件および概要

I-5-model は 5 層と 6 層の剛性比を 6 倍とした中間層免震モデルとなっている。

3. 風外力の作成

風外力は、任意風力の例として「建築物荷重指針・同解説」³⁾(以下「荷重指針」と呼ぶ)による風方向、風直交方向の 2 種類の変動風力のパワースペクトル密度をもとに、三角級数モデル⁴⁾により模擬風力波形をシミュレートして用いた。また、平均成分を有する変動風力として、「荷重指針」による i 層への建物外壁面に正対する風向からの平均風力 F_{0i} と先に記述した i 層への風方向変動風力のパワースペクトル密度をもとにした模擬風力波形 $F'_i(t)$ の和として作成する(式(2a))。 i 層への風力の平均成分 F_{0i} は、式(2b)により評価する。風速は再現期間 500 年に相当するレベルとして「荷重指針」の再現期間換算係数を用いて、頂部風速 $U_H=60.8$ (m/s) を設定した。

$$F_i(t) = F_{0i} + F'_i(t), \quad F'_{0i} = C_f \cdot q_i \cdot A \quad (2a, b)$$

ここで、 C_f :風力係数、 q_i :建物各層での速度圧 ($q_i = 1/2 \rho U_i^2$, ρ :空気密度)、 A :建物受圧面積を表す。

変動風力による 10 質点せん断型モデルの応答を時刻歴応答解析により求める。模擬風力波形は 1 波形につき 0.01 秒刻み 95000 ステップで作成し、エンベロープを前後 50 (s) ずつ設けた。1 次のモーダル風力の時刻歴波形例を図 4 に示す。また、パワースペクトル密度を図 5 に示す。そして、応答のアンサンブルを求め、各応答を評価した。以下、風方向 (平均成分有り) を「ALONG」、風直交方向を「ACROSS」と表記する。ALONG は周期が大きく緩やかな成分を含んでいるのに対し、ACROSS は周期が短く、鋭い波形である。

4. アンサンブル平均に用いる風力時刻歴波形数の検討

時刻歴応答解析による風応答評価は、定常確率過程のモンテカルロ法による評価であり、応答値は多数の統計量として扱う必要があるため、適切な応答値のアンサンブル平均に必要な風力時刻歴波形数を検討する必要がある。

図 6 にアンサンブル数の検討に用いる風力時刻歴波形の選び方を示す。風力時刻歴波形を 40 波作成し、5, 10 波は 4 ケース、20, 30 波は 2 ケースのアンサンブル平均を取り、全体の 40 波のアンサンブル平均を基準として比較した。E-model, I-1-model, I-5-model のそれぞれのモデルについて、ALONG が入力された場合は 1, 2 次ともに $h=2, 5\%$ 、ACROSS が入力された場合は 1, 2 次ともに $h=2\%$ の Rayleigh 減衰を持つ解析モデルを使用し検討を行った。

図 7 に ALONG が入力された場合の E-model ($h=2\%$) の 1 次におけるアンサンブル数の評価を、40 波のアンサンブル平均に対し、10%以内に入っているもののみを示す。応答加速度、速度、絶対変位、層間変位は 10 層、層せん断力は 1 層での標準偏差(rms)について、また、エネルギー入力には以下の式より算出した値でアンサンブル数を評価した。

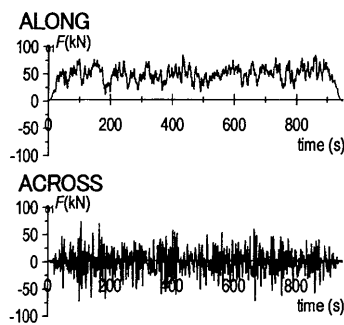


図 4 風外力の時刻歴波形例

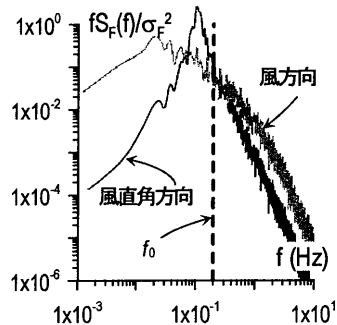


図 5 パワースペクトル密度

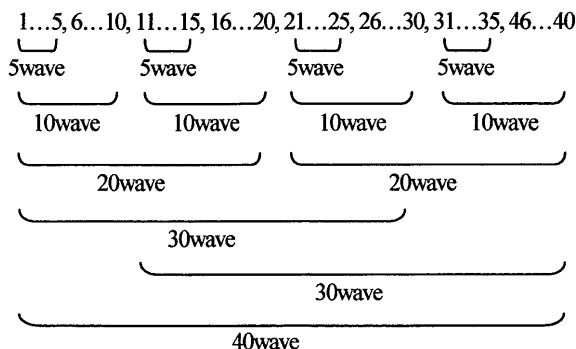


図 6 アンサンブル数の検討に用いる風力時刻歴波形の選び方

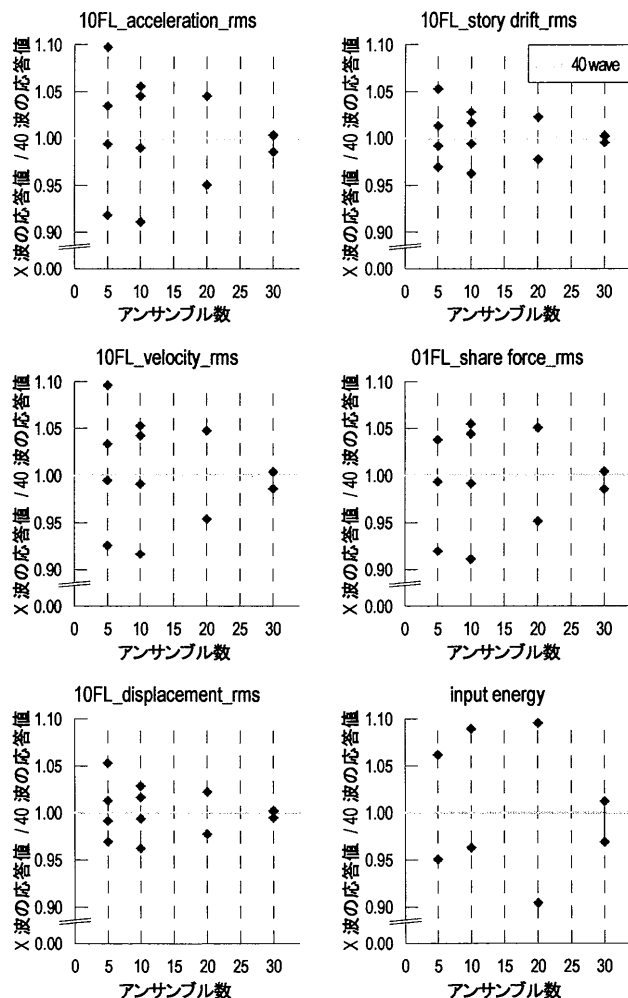


図 7 E-model, ALONG, Rayleigh 2%におけるアンサンブル数の検討

10 質点モデルのエネルギー入力は式(3)、各次数におけるエネルギー入力は式(4)より求める。

$$E = \int_0^{t_0} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i f_i dt \quad (3)$$

$$\begin{aligned} {}_s E &= \int_0^{t_0} \sum_{i=1}^n {}_s \dot{x}_i f_i dt \\ &= \int_0^{t_0} \sum_{i=1}^n ({}_s \dot{q}_s \phi_i) f_i dt \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\dot{x}_i$: i 層の応答速度、 ${}_s \dot{x}_i$: i 層 s 次の応答速度、 f_i : i 層の広義外力、 ${}_s q$: s 次のモーダル応答、 ${}_s \phi_i$: i 層 s 次の振動モードを表す。

各変位については20波ではほぼ40波のアンサンブル平均に収束しているが、その他の応答については20波では40波のアンサンブル平均との誤差が5%以上のものもあり、20波では収束していないことが分かる。また、モデル、減衰定数、風外力方向の違いによるアンサンブル数の収束の仕方に、決まった傾向はみられなかったが、

いずれにおいても最低30波必要であることが確認された。

5. 高次モードの影響の評価

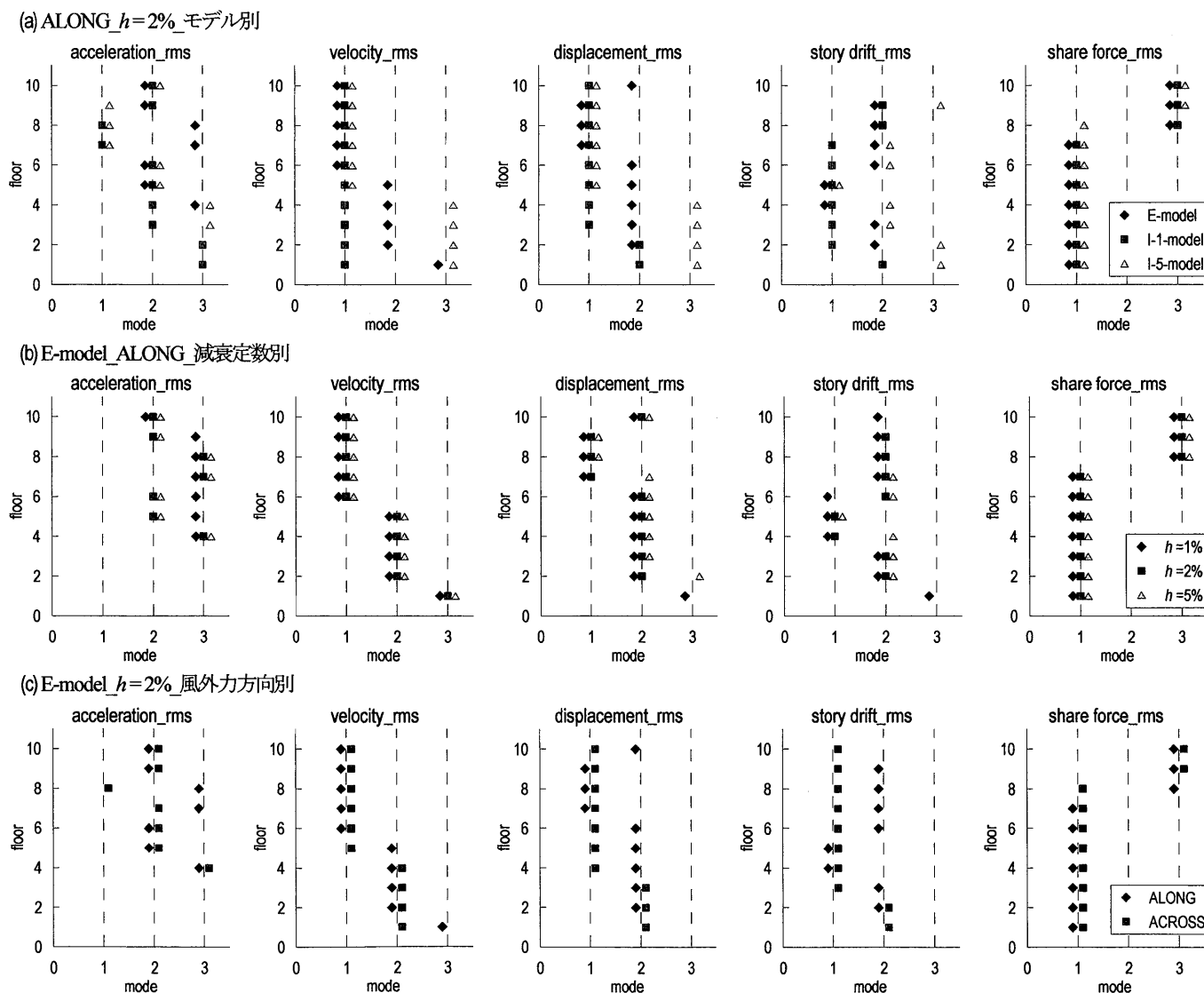
E-model, I-1-model, I-5-model を用いてモーダルアナリシスを行い、時刻歴応答解析から応答結果における高次モードの影響を評価する。それぞれのモデルについて、ALONG が入力された場合は1, 2次ともに $h=1, 2, 5\%$ 、ACROSS が入力された場合は1, 2次ともに $h=2\%$ の Rayleigh 減衰を持つ解析モデルを使用し検討を行った。また、ACROSS が入力された場合の E-model については、1, 2次ともに $h=1, 5\%$ の Rayleigh 減衰を持つ解析モデルも使用した。

多質点系の振動方程式は次式のように表せる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P\} \quad (5)$$

ここで、 $[M]$, $[C]$, $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクスとし、 $\{x\}$ は変位ベクトル、 $\{P\}$ は外力ベクトルを表す。

i 層の変位 x , 速度 $\dot{x}$, 加速度 $\ddot{x}$ をモード ϕ およびモーダル応答 q



(* プロット：解を合成し、10 質点応答解析との誤差が±2%以内となる次数)

図8 各応答における高次モードの評価

を用いて表すと、

$$\begin{aligned} x_i &= \sum_{s=1}^n s \phi_i \cdot s q, & \dot{x}_i &= \sum_{s=1}^n s \phi_i \cdot s \dot{q}, \\ \ddot{x}_i &= \sum_{s=1}^n s \phi_i \cdot s \ddot{q} \end{aligned} \quad (6 \text{ a-c})$$

ここで、 s : 次数, n : 層数を表す。

式(5)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、

$${}_s M \cdot {}_s \ddot{q}(t) + {}_s C \cdot {}_s \dot{q}(t) + {}_s K \cdot {}_s q(t) = {}_s P(t) \quad (7)$$

ここで、 ${}_s M, {}_s C, {}_s K, {}_s P$: s 次の広義質量, 広義減衰, 広義剛性, 広義外力を表す(式(8 a-d))。

$${}_s M = \{ {}_s \Phi \}^T [M] \{ {}_s \Phi \}, \quad {}_s C = \{ {}_s \Phi \}^T [C] \{ {}_s \Phi \} \quad (8 \text{ a, b})$$

$${}_s K = \{ {}_s \Phi \}^T [K] \{ {}_s \Phi \}, \quad {}_s P = \{ {}_s \Phi \}^T [P] \quad (8 \text{ c, d})$$

固有振動モードを用いて多自由度系の振動方程式を 1 自由度系の振動方程式に分解する(式(7))。それぞれについて解を求めた後、それらを任意の次数まで合成し、どの次数まで足し合わせれば 10 質点解析との誤差が $\pm 2\%$ 以内となるのかという観点から、高次モードの影響を評価する。

X 軸に 10 質点解析との誤差が $\pm 2\%$ となる次数を、Y 軸に階層を表したグラフを図 8 に示す。図中にプロットのないものは、4 次以上まで応答を足し合わせる必要があることを示している。図 8(a) は ALONG が入力された場合の E-model, I-1-model, I-5-model ($h = 2\%$)について、図 8(b)は ALONG が入力された場合の E-model ($h = 1, 2, 5\%$)について、図 8(c)は ALONG ACROSS が入力された場合の E-model ($h = 2\%$)について、各応答の標準偏差(rms)で評価したものである。

図 8(a)より、I-1-model が最も高次モードの影響が少ないことが分かる。これは I-1-model が他のモデルより 1 次での刺激関数の動きが支配的であるからだと考えられる(図 3)。I-5-model の刺激関数は 4 層以下は 3 次が、5 層以上は 1 次が支配的であるので、上層の方が高次モードの影響が小さくなっている。

図 8(b)より、応答加速度については高減衰の方が、変位については低減衰の方が高次モードの影響が小さいことがわかる。

図 8(c)より、ALONG より ACROSS が入力された場合の方が各応答において、高次モードの影響が小さいことが確認できる。風外力方向別のパワースペクトル密度(図 5)より、ALONG は ACROSS より高次でパワーを持っていることが分かる。これより、ALONG が入力された方が、ACROSS の場合と比べて高次モードの影響が大きいのだと考えられる。

表 1 にエネルギー入力の高次モードの影響を示す。表 1(a)は ALONG が入力された場合の E-model, I-1-model, I-5-model ($h = 2\%$)について、表 1(b)は ALONG が入力された場合の E-model ($h = 1, 2,$

表 1 エネルギー入力の高次モードの影響

(a) ALONG $h=2\%$ モデル別

mode	1st	2nd	3rd	4th	5th	...	10th
E-model	94	98	99	100	100	...	100
I-1-model	96	99	100	100	100	...	100
I-5-model	97	99	100	100	100	...	100

(%)

(b) E-model ALONG 減衰定数別

mode	1st	2nd	3rd	4th	5th	...	10th
$h = 1\%$	94	98	99	100	100	...	100
$h = 2\%$	94	98	99	100	100	...	100
$h = 5\%$	93	98	99	100	100	...	100

(%)

(c) E-model $h=2\%$ 風外力方向別

mode	1st	2nd	3rd	4th	5th	...	10th
ALONG	94	98	99	100	100	...	100
ACROSS	96	99	99	100	100	...	100

(%)

5%)について、表 1(c)は ALONG ACROSS が入力された場合の E-model ($h = 2\%$)について、10 質点解析のエネルギー入力との一致度で評価したものである。エネルギー入力の高次モードの影響は、既往の研究では 1 次のみで評価しているが、表 1 より 1 次のみではなく、2 次または 3 次まで考慮した方が良いことが確認できた。

他のモデル、減衰定数、風外力方向条件においても、同様の傾向がみられた。

6. まとめ

弾塑性範囲における多質点系の風応答評価を目的とし、その基礎研究として、弾性範囲におけるアンサンブル平均に用いる風力時刻歴波形数の検討および、モーダルアナリシスを用いた高次モードの影響の評価を行った。その中で風力時刻歴波形のアンサンブル数は 30 波が適切であると確認をし、以下の結論を得た。

- 1) 高次モードの影響は、モデルが持つ刺激関数の動きに関係している。
- 2) パワースペクトル密度の関係より、風方向の方が風直交方向より高次モードの影響が大きい。
- 3) 変動風力によるエネルギー入力の高次モードの影響は、1 次のみでなく 2 次または 3 次まで考慮した方が良い。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京工業大学笠井研究室の解析プログラム PC-ANSR を使用しました。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 : 変動風力による弾塑性構造物への総エネルギー入力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第 572 号, pp.31-38, 2003.10
- 2) 社会法人日本地震構造協会 : パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第 2 版, p.331, 2005
- 3) 日本建築学会 : 建物加重指針・同解説(2004), 2004
- 4) 星谷勝 : 確率論手法による構造解析, 鹿島出版会, 1973

- *1 東京理科大学理工学部建築学科
- *2 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻
- *3 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)
- *4 (株)日建設計 構造設計部門 主管・博士(工学)
- *5 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)