

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建築物の応答評価 その1 風応答評価に及ぼすアンサンプル平均のばらつきの検討および高次モードの評価
Title(English)	
著者(和文)	佐藤大樹, 鈴木悠也, 吉江慶祐, 岡本有里子, 北村春幸
Authors(English)	daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典(和文)	日本風工学会誌, , No. 119, pp. 119-200
Citation(English)	, , No. 119, pp. 119-200
発行日 / Pub. date	2009, 5

多質点系モデルを用いた変動風力を受ける超高層建築物の応答評価

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を検討および高次モードの評価

Evaluation of Fluctuate Wind Induced Response of High Rise Buildings by Multi-degree of Freedom System  
Part1 Error of Ensemble Average and Effects of Higher-vibration Modes

○佐藤 大樹<sup>1)</sup> 鈴木 悠也<sup>2)</sup> 吉江 慶祐<sup>3)</sup> 岡本 有里子<sup>4)</sup> 北村 春幸<sup>5)</sup>  
Daiki SATO<sup>1)</sup> Yuya SUZUKI<sup>2)</sup> Keisuke YOSHIE<sup>3)</sup> Yuriko OKAMOTO<sup>4)</sup> Haruyuki KITAMURA<sup>5)</sup>

1. はじめに

現在、ほとんどの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、風荷重により免震層が塑性化しやすい超高層免震建物や、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を用いた超高層建物が普及してきた。このような建物は、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、風力に対する建物の応答は1次が卓越するとされており、既往の研究では1次のみで応答評価されてきた。弾塑性範囲における応答評価も、吉江ら<sup>1)</sup>の研究により、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。

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。

2. 解析モデルの作成

対象建物は、平面形  $B \times D = 50\text{m} \times 50\text{m}$ 、高さ  $H = 200\text{m}$ 、建物密度  $\rho = 175\text{kg/m}^3$ 、各層質量  $m_i = 8750\text{ton}$  とする。解析モデルは、1, 2次共に減衰定数  $h = 1, 2, 5\%$  の Rayleigh 減衰を持つ10質点せん断型モデルとし、1次固有周期  $T_1 = 5.0$  (s)で、かつ1次モードが直線の耐震建物モデルのE-modelを基本とし、1層と2層の剛性比を6倍とした基礎免震モデルのI-1-model、5層と6層の剛性比を6倍とした中間層免震モデルのI-5-modelを作成した。I-1-model, I-5-modelとも  $T_1 = 5.0$  (s)となるように調整している。図1に作成した解析モデルの  $s$ 次固有周期  $T_s$ 、剛性分布、振動モード形を示す。4章以降においては、E-model, I-1-model, I-5-modelを用いて解析を行う。

3. 風力の作成

風外力は任意風力の例として「建築物荷重指針・同解説」<sup>2)</sup>(以下「荷重指針」と表記)による風方向、風直交方向の2種類の模擬風力波形を作成した。模擬風力波形は変

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<sup>3)</sup>によりシミュレートした。また、平均成分を有する変動風力を、「荷重指針」による各層への建物外壁面に正対する風向からの平均風力と、先に記述した各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、模擬風力波形の和として作成する。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。模擬風力波形は1波形につき0.01秒刻み95,000ステップで作成した。図2に風外力のパワースペクトル密度、図3に1次のモーダル風力の時刻歴波形例を示す。以下、風方向(平均成分有り)入力時を「ALONG」、風直交方向入力時を「ACROSS」と表記する。

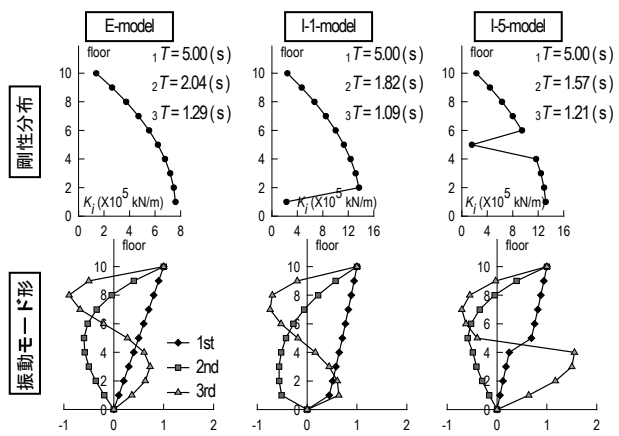


Figure 1 Analysis model

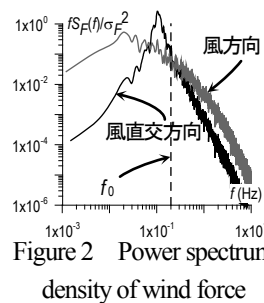


Figure 2 Power spectrum density of wind force

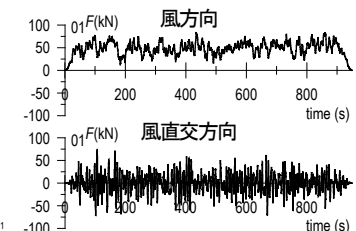


Figure 3 Waveform of simulated wind force

1) 東京理科大学理工学部建築学科 助教  
Assistant Professor, Tokyo University of Science  
3) (株)日建設計 構造設計部門 主管  
Senior Structural Engineer, Nikken Sekkei Ltd.  
5) 東京理科大学理工学部建築学科 教授  
Professor, Tokyo University of Science

2) 東京理科大学理工学部建築学科 大学院生  
Graduate Student, Tokyo University of Science  
4) 東京理科大学理工学部建築学科 学部生(研究当時)  
Undergraduate Student, Tokyo University of Science

#### 4. アンサンブル平均に用いる風力波形数の検討

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波形数を検討する必要がある。風力波形を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、40波のアンサンブル平均を基準として比較した。

図4に風方向入力時のE-model ( $h=2\%$ )の1次におけるエネルギー入力、応答加速度のアンサンブル数の評価を示す。エネルギー入力は式(1)より算出した値について、応答加速度は10層での標準偏差 (rms) について、アンサンブル数を評価した。

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

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、 $\phi_i$  :  $i$ 層  $s$ 次の振動モードを表す。20波では40波のアンサンブル平均との誤差が5%以上のケースもあり、40波の応答に収束していないことが分かる。モデル条件によるアンサンブル平均の収束の様子に、一定の傾向は見られなかったが、いずれにおいても最低30波が必要であることが確認された。応答速度、応答変位、層間変位、層せん断力の評価においても、同様の結果が得られた。以後の応答評価においては、30波のアンサンブル平均を用いる。

#### 5. 高次モードの影響の評価

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。固有振動モードを用いて多自由度系を1自由度系の振動方程式に分解すると、次式で表すことができる。

$${}_s M_s \ddot{q}(t) + {}_s C_s \dot{q}(t) + {}_s K_s q(t) = {}_s P(t) \quad (2)$$

ここで、 ${}_s M_s, {}_s C_s, {}_s K_s, {}_s P$  :  $s$ 次の広義質量、広義減衰、広義剛性、広義外力を表す(式(3a-d))。

$${}_s M = \{ {}_s \Phi \}^T [M] \{ {}_s \Phi \}, \quad {}_s C = \{ {}_s \Phi \}^T [C] \{ {}_s \Phi \} \quad (3a, b)$$

$${}_s K = \{ {}_s \Phi \}^T [K] \{ {}_s \Phi \}, \quad {}_s P = \{ {}_s \Phi \}^T [P] \quad (3c, d)$$

式(2)を用いて、各次数で時刻歴応答解析を行う。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質点時刻歴応答解析結果との誤差が $\pm 2\%$ 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。表1に10質点時刻歴応答解析結果との一致度で評価した、E-modelにおけるエネルギー入力の高次モードの影響を示す。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、1次のみならず、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。他のモデル条件においても、同様の傾向がみられた。図5に応答加速度、応答変位、層せん断力の高次モードの影響の評価を示す。X軸は10質点時刻歴応答解析結果との誤差が $\pm 2\%$ となる次数、Y軸は階層を示している。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表している。図5(a)はモデル別(風方向入力時のE-model,

I-1-model, I-5-model ( $h=2\%$ ))、図5(b)は風入力方向別(風方向、風直交方向入力時の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5(a)より、I-1-modelが最も高次モードの影響が小さいことが分かる。これは、I-1-modelの1次の振動モード形が、他のモデルより下層において支配的であるからだと考えられる(図2)。I-5-modelの振動モード形は、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5(b)より、風直交方向より風方向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大きいことが確認できる。風方向風力は風直交風力方向より高振動数側でパワーを持っていることより(図3)、高次モードの影響が大きいのだと考えられる。以上2点について、他のモデル条件の場合も同様の傾向が見られた。また、応答速度、層間変位の評価においては、応答変位と同様の結果が得られた。

#### 6. おわりに

アンサンブル平均に用いる風力波形数は、30波以上が適切であると確認できた。また、多質点系の風応答を2%程度以内の精度で評価するためには1次のみでは不十分であり、2次から3次応答までを考慮する必要があることが検証できた。

参考文献：その2にまとめて記す。

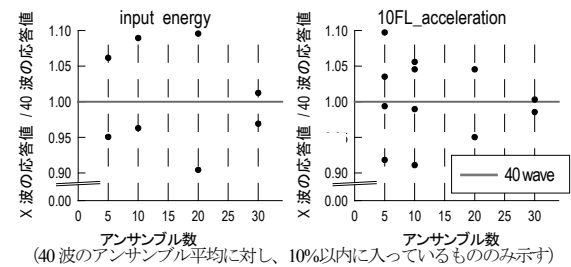
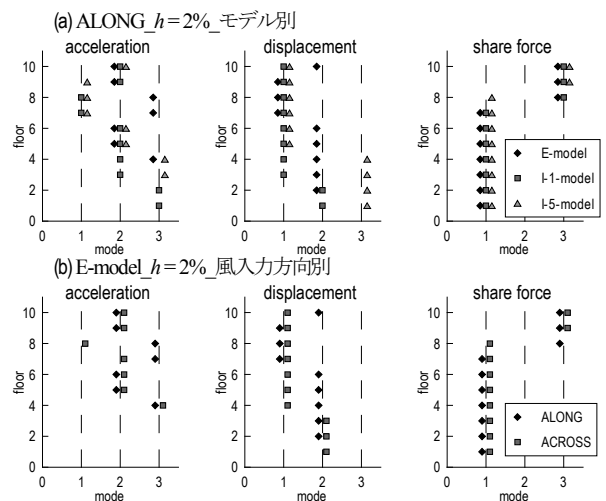


Figure 4 Dispersion of response

Table 1 Effects of higher-vibration modes on input Energy

mode	1st	2nd	3rd	4th	5th	...	10th
ALONG	$h = 1\%$	94	98	99	100	100	100
	$h = 2\%$	94	98	99	100	100	100
	$h = 3\%$	93	98	99	100	100	100
ACROSS	$h = 2\%$	96	99	99	100	100	100 (%)



(\* プロット：解を合成し、10質点時刻歴応答解析との誤差が $\pm 2\%$ 以内となる次数)

Figure 5 Effects of higher-vibration modes on model response