

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	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プル平均のばらつきを検討および高次モー ドの評価
Title	
著者(和文)	佐藤大樹, 鈴木悠也, 吉江慶祐, 北村春幸
Authors	Daiki Sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, , pp. 927-928
Citation(English)	, B-2, , pp. 927-928
発行日 / Pub. date	2009, 8
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: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110007978907">http://ci.nii.ac.jp/naid/110007978907</a>

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を検討および高次モードの評価

正会員 ○佐藤大樹\*<sup>1</sup> 同 鈴木悠也\*<sup>2</sup>  
同 吉江慶祐\*<sup>3</sup> 同 北村春幸\*<sup>4</sup>

風外力 高層免震建物 多質点  
高次モード アンサンブル平均

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、超高層免震建物を対象として、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  $T = 5.0$  (s) で、かつ1次モードが直線の耐震建物モデルの E-model (図1(a))を基本とする。基礎免震を想定して1層と2層の剛性比を6倍とした I-1-model (図1(b))、中間層免震を想定して5層と6層の剛性比を6倍とした I-5-model (図1(c))を作成した。I-1-model, I-5-model とも  $T = 5.0$  (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,  $T$ , 剛性分布, 振動モード形を示す。

3. 風力の作成

風外力は、「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 (E-model) の例を示す。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。風方向風力は周期が大きく緩やかな成分を含んでいるのに対し、風直交方向風力は周期が短く、鋭い波形である (図3)。

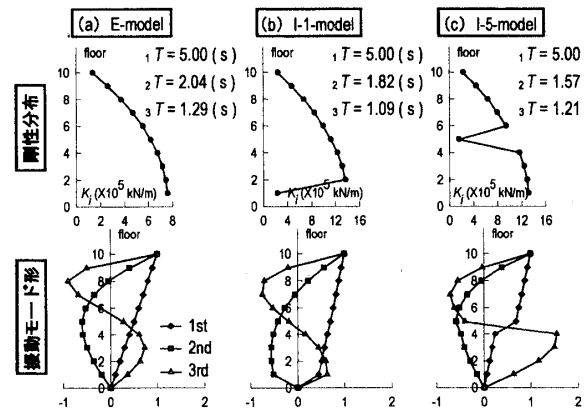


図1 解析モデルの概要

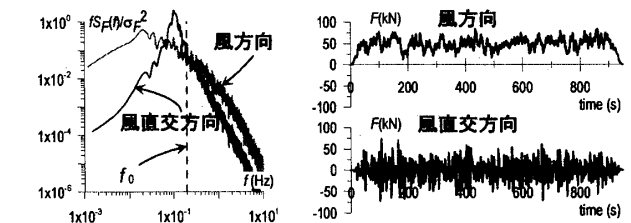


図2 パワースペクトル密度

図3 風外力の時刻歴波形例

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る。そのため、応答値は多数の統計量として扱う必要があり、応答値のアンサンブル平均に適切な風力波形数の検討が必要である。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用いて、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。

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

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、 ${}_s q$  :  $s$  次のモーダル応答変位、 ${}_s \phi_i$  :  $i$  層  $s$  次の振動モードを表す。図4より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、 ${}_s M_s$ ,  ${}_s C_s$ ,  ${}_s K_s$ ,  ${}_s P$  は  $s$  次の広義質量、広義減衰、広義剛性、広義外力であり、それぞれ次式で表される (式 (3 a-d))。

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

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

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、エネルギー入力の誤差を2%以内にするためには、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。他のモデルや解析条件においても、同様の傾向がみられた。

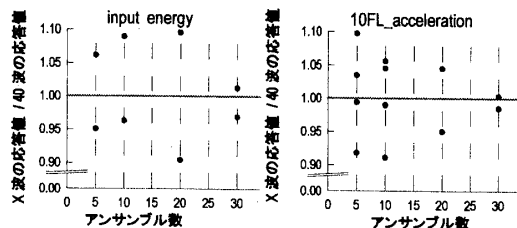
図5に応答加速度、応答変位、層せん断力の高次モードの影響の評価を示す。図のX軸は10質点時刻歴応答解析結果との誤差が $\pm 2\%$ となる次数、Y軸は階層を示している。図中にプロットのないものは、4次以上まで応答を足し合わせる必要があることを表している。図5(a)はモデル別 (風方向入力時の E-model, I-1-model, I-5-model ( $h = 2\%$ )), 図5(b)は風入力方向別 (風方向, 風直交方向入力時の E-model ( $h = 2\%$ )) について、各応答の標準偏差 (rms) で評価したものである。図5(a)より、I-1-modelが最も高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、モデルや解析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. まとめ

本報その1より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%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。

謝辞、参考文献：その2にまとめて記す。



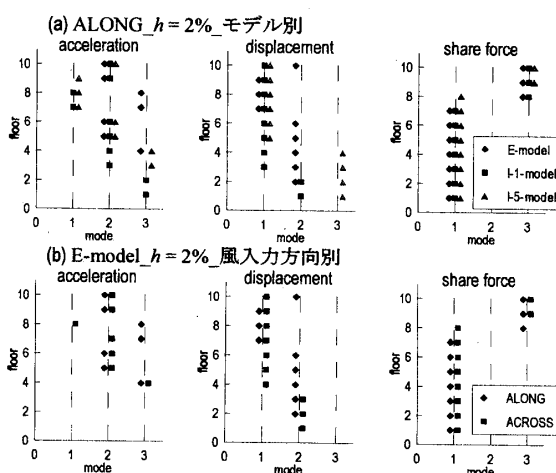
(40波のアンサンブル平均に対し、10%以内に入っているもののみ示す)

図4 風応答評価に用いるアンサンブル数の検討

表1 エネルギー入力の高次モードの評価

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 質点応答解析との誤差が $\pm 2\%$ 以内となる次数)

図5 各応答における高次モードの評価

\*1 東京理科大学 助教 博士 (工学)

\*2 東京理科大学 大学院生

\*3 (株) 日建設計 構造設計部門 主管 博士 (工学)

\*4 東京理科大学 教授 博士 (工学)

\*1 Graduate Student, Tokyo University of Science

\*2 Assistant Professor, Tokyo University of Science, Dr.Eng.

\*3 Senior Structural Engineer, Nikken Sekkei Ltd., Dr.Eng.

\*4 Professor, Tokyo University of Science, Dr.Eng.