**T2R2** 東京工業大学リサーチリポジトリ Tokyo Tech Research Repository

# 論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	   2097 風洞実験に基づく多層層風力を用いた超高層建物の風応答性状 :   (その2)風力特性が応答およびエネルギー入力に与える影響(構造)			
Title				
著者(和文)				
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura			
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 81, No. 0, 2097			
Citation(English)	, Vol. 81, No. 0, 2097			
発行日 / Pub. date	2011, 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/110008730337			

2097

# 風洞実験に基づく多層層風力を用いた超高層建物の風応答性状

(その2) 風力特性が応答およびエネルギー入力に与える影響

		正会員C 正会員	)平井宏幸 <sup>*1</sup> 早田友彦 <sup>*2</sup>	同 同	吉江慶祐 <sup>*2</sup> 北村春幸 <sup>*1</sup>	同	佐藤大樹 <sup>*1</sup>	準会員	安田憲史*1
構造-荷重・信頼	生								
風洞実験	モーダル風力	נ	時刻歷風応答解	郓杅					
エネルギー入力	アンサンブル	ン数							

## 1. はじめに

本報その1では、風洞実験により得られた層風力から1次モーダ ル風力を算出し、その性状を調べた.引き続き、その2では、本報 その1で算出されたモーダル風力を用いて、時刻歴弾性応答解析を 行い、アンサンブル平均に用いる風力時刻歴波形数の違いによる応 答値のばらつきを調べる.

#### 2. 解析モデルと検討用風力

本検討は、その1の測定結果から風向0°, D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0の モーダル風力を用いて行う、検討対象建物は、その1と同様である。 解析には1次モードのみの風応答に注目し、水平1自由度の1質点 系モデルとする (図1). 解析モデルの質量と外力は、建物の1次モ ードを頂部を1とした振動モードであると仮定して、1次のモーダ ル質量とモーダル外力として与えた.本研究での解析パラメ--ター を表1に示す. 振動モードは、その1と同様に高層建物の代表とし て逆三角形分布(以下,β=1)と,免震構造のような一様分布(以 下, β = 0)の2種類とし、構造減衰は初期剛性に対して減衰定数 ζ=0.01, 0.10 の 2 ケースを用いる. 風外力は, 風洞実験結果の風方 向,風直交方向の風力時刻歴波形から振動モード形をB=1.0とし て,その1で作成したモーダル風力時刻歴波形を直接用いる. 応答 の評価時間  $t_e$ は、その1と同様に解析モデルの固有周期  $T_1 = 5.0 \, \text{sec}$ の120 倍の $t_e = 600 \sec(10 \text{ 分間}) \ge 240 \text{ 倍の} t_e = 1200 \sec(20 \text{ 分間})$ とし、解析開始時の過渡応答の影響を避ける為、応答は各風力波形 の先頭 50 sec にエンベロープを設けて評価した. 検討用風力波形の サンプリング間隔は 0.05 sec 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te= 600 sec では70 波, te= 1200 sec では 30 波を取り出した. 図 2,3 に評価時間 te = 600 sec, 1200 sec のモーダ ル風力の抽出方法を示す。



図1 解析モデル概要

表1 解析パラメーター						
D/B	1.0, 1.5, 2.0, 3.0					
β	0, 1					
ζ	0.01, 0.10					
t <sub>e</sub>	600 sec, 1200 sec					







## 3. 応答及びエネルギー入力の変動係数

応答の変動成分のばらつきを変動係数を用いて評価する.ここで, 変動係数  $Cv(\sigma_R)$ は (1) 式より算出され、本研究では、評価時間  $t_e$ = 600 sec では70波, te=1200 sec では30 波での応答およびエネルギー 入力のばらつきを評価している.

$$Cv(\sigma_R) = \frac{rms(\sigma_R)}{\mu(\sigma_R)}$$
(1)

ここで、 $rms(\sigma_R)$ : 応答の標準偏差のばらつき、 $\mu(\sigma_R)$ : 応答の標準 偏差の平均値を表す。

なお、風方向、風直交方向風力および振動モード形による変動係 数の変化は見られなかったので、以降、風方向風力入力時の振動モ



(B) 評価時間 t<sub>e</sub>= 1200 sec

図4 減衰定数, 評価時間の違いによる変動係数の変化(風方向風力入力時, 振動モードβ=1)

ード形 $\beta$  = 1 を代表として、減衰定数および評価時間による変動係数の変化を注目していく.図4に振動モード形 $\beta$  = 1,辺長比D/B = 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 時の減衰定数 ( $\zeta$ =0.01, 0.10)・評価時間 ( $t_e$ =600 sec, 1200 sec) 毎に応答加速度、速度、変位およびエネルギー入力の変動係数を比較したものを示す。図中のモーダル風力の変動係数はその1の結果である.なお、本研究でのエネルギー入力 $E_{inp}$ は(2) 式より算出する.

$$E_{inp} = \int_{0}^{t_0} \,_1 \dot{q}(t) \cdot_1 \phi \cdot_1 F(t) dt \tag{2}$$

ここで、<sub>1</sub> $\dot{q}$ :1次のモーダル応答速度、 $_1\phi$ :1次の振動モード形、 1F:1次のモーダル風力を表す.

図4より,評価時間,減衰定数が同条件下では,辺長比の違いによ る変動係数の変化は殆ど見られないことが分かる.図4(A)より,評 価時間  $t_e$ =600 sec,減衰定数  $\zeta$ =0.01 では,応答加速度,速度で15~ 20%,変位で10~15%,エネルギー入力では30~40% 程度の変動 を有することが分かる.モーダル風力の変動係数に比べて応答加速 度,速度は2.5~3.5倍,変位は1.5~2.5倍,エネルギー入力では5.0 ~6.5倍程度大きくなっている.これは評価時間  $t_e$ =1200 sec,減衰定 数  $\zeta$ =0.01 でも同様の結果となった.これより,評価時間が長いほ ど応答の変動係数は小さくなるが,モーダル風力の変動係数に対す る応答の変動係数の割合は評価時間に関係なく,殆ど同値に収束す ると考えられる.エネルギー入力の変動係数は応答速度と比較して, 2.0~2.5倍程度大きくなっていることが分かる.エネルギー入力は 応答速度の標準偏差の2乗に比例する<sup>9</sup>ので,この関係からエネル ギー入力の変動係数が応答速度の変動係数より大きくなったと考え られる.  $\zeta$ =0.10の変動係数は、 $\zeta$ =0.01 に比べ30~50% 程度小さ くなり、モーダル風力の変動係数に近づくことが分かる. この傾向 は評価時間  $t_e$  = 1200 sec でも確認できる (図 4 (B)).

図5 に風方向風力入力時の減衰定数ζ=0.01, 0.10 の応答変位およ びモーダル風力のパワースペクトル密度(以下, PSD)を示す.図 5 より,高減衰ほど固有振動数f<sub>1</sub>付近での共振効果によって応答が 増幅された部分(共振成分)が減少し,外乱の影響が支配的となる ので,応答の変動は外乱の変動に収束していくと考えられる.



4. アンサンブル平均に用いる風力波形数の検討

#### 4.1. 解析概要

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.そのため、現行の耐風設計では、時刻歴応答解析結果により風 応答を評価する場合、何らかの統計処理を用いていると言える.文 献<sup>11,21</sup>では、「建築物荷重指針」による変動風力のパワースペクトル 密度をもとに、三角級数モデルによりシミュレートして作成した模 擬風力波形を用いて、アンサンブル数が応答のばらつきに及ぼす影 響を評価している.しかし、風洞実験結果に基づいて、アンサンブ ル数の違いによる応答およびエネルギー入力のばらつきを詳細に検 討した例は少なく、不明な点も多い、そこで、風洞実験により得ら れた風力データを直接用いて、それが応答量に及ぼす影響を評価す る必要がある.

検討に用いる風力時刻歴波形のアンサンブル数nは、評価時間 $t_e$ = 600 sec でn=70,  $t_e$ =1200 sec ではn=30 とした. $t_e$ =600 sec の場合, n=5 は14case, n=10 は7case, n=20 は4case, n=30 は3case, n=40, 50 は2case, n=60 は1case のアンサンブル平均を取り、全体のn=70 の アンサンブル平均値を基準とし、 $t_e$ =1200 sec の場合, n=5 は6case, n=10 は3case, n=15, 20 は2case のアンサンブル平均を取り、全体 のn=30 のアンサンブル平均値を基準としてそれぞれ比較した.

#### 4.2. 解析結果

図6に風方向風力入力時の振動モード形 ( $\beta$ =1,0)・減衰定数 ( $\zeta$ =0.01,0.10)・評価時間 ( $t_e$ =600 sec,1200 sec) 別の風力波形の アンサンブル数 n の違いによる応答速度,変位の標準偏差およびエ ネルギー入力のばらつきを示す. X 軸はアンサンブル数 n, Y 軸は 基準となる応答値 (評価時間  $t_e$ =600 sec では n=70,  $t_e$ =1200 sec では n=30 でのアンサンブル平均値) とのばらつき ((4)式) を示す. なお、エネルギー入力の Y 軸は他の応答値の 2 倍となっている. 図 中の白いプロットは、(5) 式により求め、各アンサンブル数でのば らつきの平均値を示す.



図6 アンサンブル数の違いによるばらつきの変化 (風方向風力入力時)

-483-

$$R_{i} = \frac{|x_{i} - \widetilde{x}|}{\widetilde{x}} \qquad (i = 1 \sim n)$$

$$(4)$$

$$\widetilde{R}_i = \frac{\sum_{i=1}^{N} R_i}{n}$$
(5)

ここで、 $x_i$ : n波でのアンサンブル平均値、 $\tilde{x}$ :  $t_e = 600 \sec \sigma$  $t_n = 70$ ,  $t_e = 1200$  sec ではn = 30 でのアンサンブル平均値, n: Pンサンブル数を表す.

図6より評価時間、減衰定数が同条件下では、辺長比の違いはア ンサンブル平均値のばらつきに影響しないことが分かる.図6(a)よ り,評価時間 t<sub>e</sub>=600 sec, 減衰定数 ζ=0.01 の応答速度に関して, n =1 だけでは、最大で 50%、平均で 10~15% 程度のばらつきを含 む可能性があることが分かる.しかし, n=5 では最大で25%, 平 均で5~10% 程度となり, n=1の40~60% 程度のばらつきに収束 すしている. アンサンブル数 n=10 で評価すると, 最大で10~15%, 平均で5% 程度のばらつきとなることが分かる. エネルギー入力の 場合, n=1 だけでは最大で70~98%, 平均で30% 程度のばらつき を有するが、n=5では最大で60%、平均で15~20%程度となり、 応答速度と同様, n=1の半分程度のばらつきに収束している. アン サンブル数n=10では、最大で30~40%、平均で10%程度のばら つきとなることが分かる. 応答速度, 変位はアンサンブル数 n= 20 以上, エネルギー入力はn=30以上で, 基準となるn=70でのアン サンブル平均値とほぼ5%程度以内に収まることが分かる.図6(a), (b) より、振動モードの違いはアンサンブル平均値のばらつきに影 響しないことが分かる.図6(a),(c)より、減衰定数と=0.10の応答 速度,変位およびエネルギー入力の最大,平均でのばらつきは く=0.01 に比べて、半分程度に収束することが分かる. 図 6 (a), (d) より、アンサンブル平均に用いる風力波形数が同じ場合、評価時間  $t_{\mu} = 1200 \text{ sec}$ は  $t_{\mu} = 600 \text{ sec}$ と比べて、30%程度ばらつきが小さい ことが分かる. 評価時間 te=1200 sec では, 応答速度, 変位はアンサ ンブル数n=10以上、エネルギー入力はn=15以上で、基準となる n=30でのアンサンブル平均値とほぼ5%程度以内に収まることが 分かる.以上の傾向は、応答加速度でも確認できた.

図7に評価時間 $t_e = 600 \sec$ , 減衰定数 $\zeta = 0.01$ , 振動モード形 $\beta = 1$ , 風方向風力入力時の辺長比D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0時の応答変位のピ ークファクターg,を比較したものをそれぞれ示す. ピークファクタ ーは、応答の標準偏差に対する最大値の比を示す. X 軸はアンサン ブル数n, 図中の白いプロットは、(6) 式により求め、各アンサンブ ル数でのピークファクターの平均値を示す. 図7より, アンサンブ ル数n=20以上で、ファクターは辺長比に関係なく概ねg=3.0程

度であり、これまで設計などにおいて一般的に考えられてきた値<sup>3)</sup> と概ね同値に収束することを確認した. これは、振動モード形状お よび風力方向が変化しても同様の結果となった.アンサンブル数n= 1だけでは、 g=2.5~4.5程度となり、値にばらつきがあることが 分かった.





## 6. まとめ

1次モードのみの風応答に注目し、風洞実験により得られた層風 力から算出したモーダル風力を直接用いて, 時刻歴弾性応答解析を 行った. そして、アンサンブル平均に用いる風力時刻歴波形数の違 いによる応答値のばらつきを評価し、以下の結論を得た.

(1) 5 波のアンサンブル平均により応答評価することで、1 波の半 分程度のばらつきに収束することを確認した.

(2) 風力方向(風方向,風直交方向),辺長比および振動モード形 状の変化は応答のアンサンブル平均値のばらつきに殆ど影響せず、 高減衰かつ評価時間が長いほど、応答のアンサンブル平均値のばら つきが小さいことを確認した.

#### 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。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様、片桐純冶様、鶴見俊雄 様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

- 吉江慶祐、北村春幸、大熊武司、和田章 : 時刻歴風応答解析におけるアンサンブル 1) 平均のばらつき、日本建築学会学術講演梗概集 pp.233-234,2005.9
- 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 2) 応答評価に関する研究(その1),日本建築学会学術講演便概集 pp.927-928,2009.9
- 3) 日本建築学会:建物荷重指針・同解説2004)、2004
- 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 4) 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)日本建築学会学術講演 梗概集 pp.193-194,2010.9
- 岡田功,伊藤學,宮田利雄: 耐風構造,丸善株式会社,1977 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 6) 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

<sup>\*|</sup> 東京理科大学

<sup>\*2</sup> 株式会社日建設計