

2. 時刻歴応答解析による風荷重の組合せに関する検討

Examination about the Combination of the Wind Load in Time History Response Analysis

山内 豊英*

時岡 成人^{*2}

要 旨

超高層集合住宅について、風洞実験から得られた並進2方向および振れ方向の風力データを用いて、強軸方向と振れ方向の1次固有周期が同一の場合と、並進2方向と振れ方向の1次固有周期がそれぞれ異なる場合の2ケースの振動特性を想定して時刻歴応答解析を行なった。その結果、強軸方向と振れ方向の1次固有周期が同一である場合は、強軸方向が風直交方向となる場合に強軸方向と振れ方向応答変位の相関が非常に高くなることがわかった。それと比較して、並進2方向および振れ方向の1次固有周期がそれぞれ異なる場合においては3方向応答変位それぞれの相関が低くなることがわかった。

キーワード：組合せ風荷重／相互相関特性／時刻歴応答解析

1. はじめに

一般に、高層建築物に対する設計用風荷重とは、風外力による最大変位と等価な変位を生じさせる静的荷重を示す。風外力による最大変位は、風洞実験等により得られた平均風力と変動風力から、並進2方向および振れ方向それぞれについて、変位の平均値、標準偏差およびピークファクターを算定することにより得られる。しかし、実際には、建築物に対して並進2方向および振れ方向の3方向を組合せた風荷重が同時に作用するため、それぞれの方向について1軸ずつ検討したのでは不十分である。以上のようなことから、風荷重の組合せ方法がしばしば問題となる。

例えば、建築物荷重指針・同解説では、並進2方向および振れ方向風荷重の中の一つを最大値とし、他の2方向については平均値＋標準偏差とする組合せ方法を提唱しているが、風直交方向振動と振れ方向振動との相関性が指摘されており、1次固有周期が均衡している場合には、上記の組合せ方法が過小評価となる可能性がある。

本報告は、当社が計画する超高層建築物について、風洞実験から得られた並進2方向および振れ方向の風力データを用いて建築物の1次固有周期をパラメータとした2ケースについて時刻歴応答解析を行ない、その応答リサージュ等により組合せ風荷重の相関性を確認したものである。

2. 建築物概要

計画建築物は地下1階・地上51階・塔屋1階、最高部高さ170.0mの充てんコンクリート鋼管構造集合住宅である。計画建築物の1階平面図および配置図を図-1、基準階平面図を図-2、西側立面図を図-3に示す。

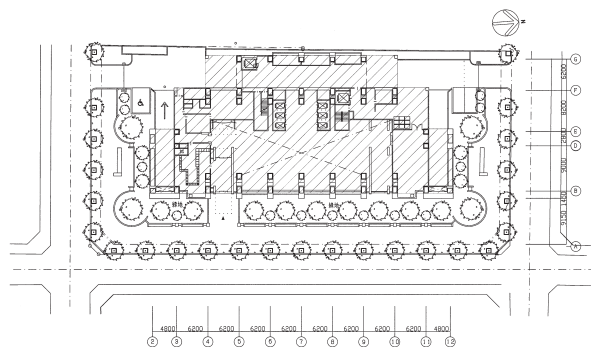


図-1 1階平面図および配置図

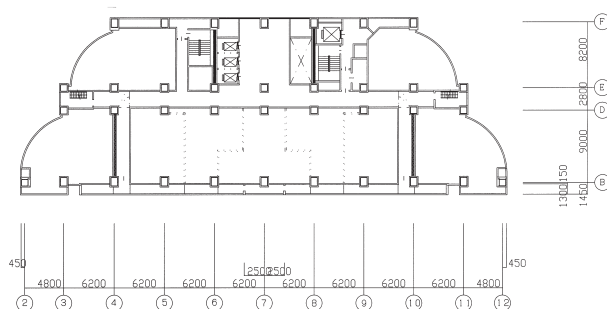
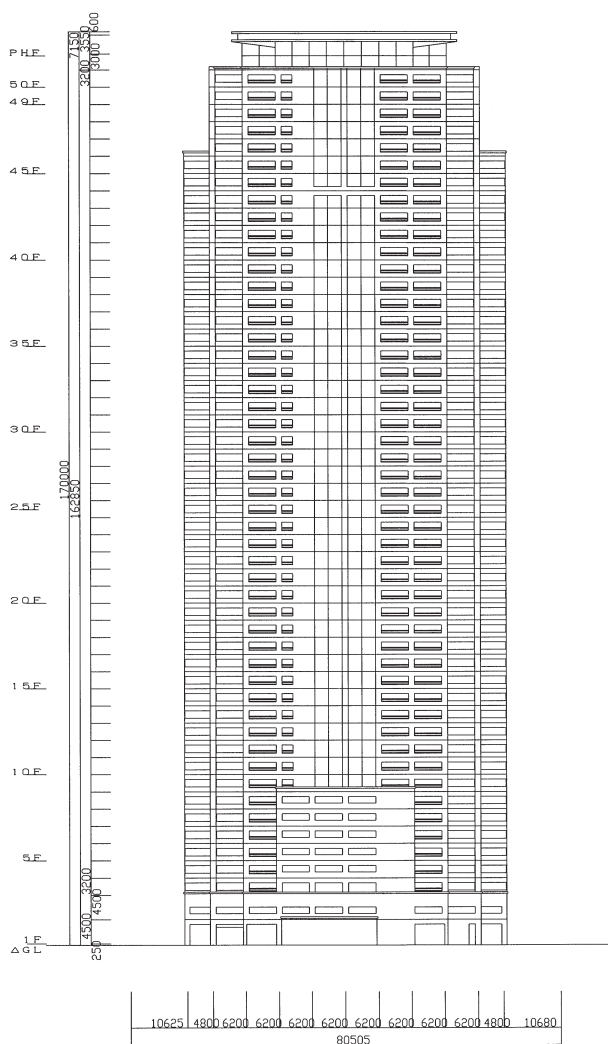


図-2 基準階平面図

*建築構造研究室 *²大阪本店設計部

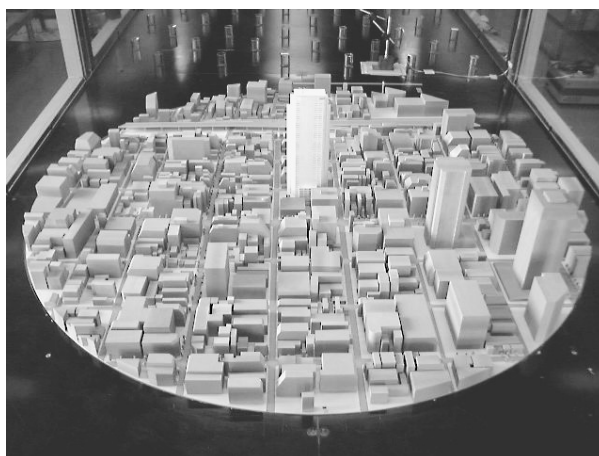


図－3 西側立面図

3. 風洞実験

風洞実験は（財）日本建築総合試験所のエッフェル型吹出式境界層風洞を用いて行なった。

時刻歴応答解析に用いる時刻歴風力は動的天秤による空気力実験により水平力 2 成分（ F_x 、 F_y ）、転倒モーメント 2 成分（ M_x 、 M_y ）および捩れモーメント（ M_z ）の 5 成分を計測することにより算定した。実験時の風洞気流は、計画地周辺への接近流を再現した境界層乱流とし、「建設省告示1454号」あるいは「建築物荷重指針・同解説」に示された粗度区分Ⅲに従い気流を再現した。模型の縮尺率は1/500、データのサンプリング周波数は200Hzである。また、測定風向は5° 毎とし0° ～355° の計72風向とした。実験模型を写真－1～写真－3、風向および空気力の定義を図－4に示す。



写真－1 実験模型（周辺模型）



写真－2 実験模型（空気力実験用模型）



写真－3 実験模型（空気力実験用模型）

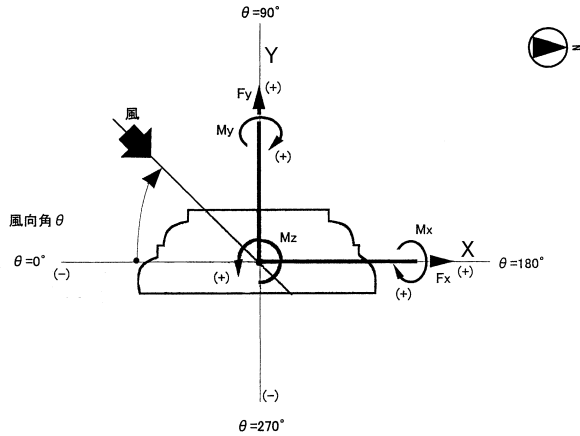


図-4 風向及び空気力の定義

4. 解析概要

4.1 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析はNewmark-β法により行い、βの値を0.25とした。なお、風洞実験により得られた風力データのサンプリング周波数が200Hzであるため、時刻歴応答解析に用いる時間間隔 Δt_{field} は無次元風速の式より約0.246秒となる。風力データのサンプリング数が20480個あるため、解析時間は約5041秒間となる。

$$\frac{U_{model}}{f_{model} \cdot D_{model}} = \frac{U_{field}}{\frac{1}{\Delta t_{field}} \cdot D_{field}}$$

U_{model} : 模型の頂部高さでの風速(m/sec)

f_{model} : 実験のサンプリング周波数(Hz)

D_{model} : 模型の代表幅(m)

U_{field} : 実構造物の頂部高さでの風速(m/sec)

Δt_{field} : 実構造物における解析の時間間隔(sec)

D_{field} : 実構造物の代表幅(m)

4.2 1質点系モデル

風外力による建築物の振動は1次モードが支配的であるため、建築物の1次モードのみを取り出した1質点系モデルにより時刻歴応答解析を行なった。1質点系モデルは、N質点系の振動方程式が(1)式のように表せるとした時に、モードの直交性により得られる(3)式のような解析モデルとした。

< 1質点系モデルへの置換 >

$$[M] \sum_{i=1}^N \ddot{q}_i(t) \{\phi_i\} + [C] \sum_{i=1}^N \dot{q}_i(t) \{\phi_i\} + [K] \sum_{i=1}^N q_i(t) \{\phi_i\} = \{f(t)\} \cdots (1)$$

(1)式の両辺の左から $\{\phi_i\}^T$ を乗じて

$$m_i \ddot{q}_i(t) + c_i \dot{q}_i(t) + k_i q_i(t) = \{\phi_i\}^T \{f(t)\} \cdots (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \because \{\phi_r\}^T [M] \{\phi_s\} = \begin{cases} 0 & (r \neq s) \\ m_s & (r = s) \end{cases} \\ \{\phi_r\}^T [C] \{\phi_s\} = \begin{cases} 0 & (r \neq s) \\ c_s & (r = s) \end{cases} \\ \{\phi_r\}^T [K] \{\phi_s\} = \begin{cases} 0 & (r \neq s) \\ k_s & (r = s) \end{cases} \end{array} \right. \text{モードの直交性}$$

$f_i = \{\phi_i\}^T \{f(t)\}$ とし (2) 式を m_i で除すと

$$\ddot{q}_i(t) + 2h_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{f_i}{m_i} \cdots (3)$$

$[M]$: 質量マトリックス

$[C]$: 減衰マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックス

$q_i(t)$: i 次一般化変位

$\{\phi_i\}$: i 次固有モード

$\{f(t)\}$: 外力ベクトル

m_s : s 次一般化質量

c_s : s 次一般化減衰

k_s : s 次一般化剛性

h_i : 1次減衰定数

ω_i : 1次固有角振動数

f_i : 1次一般化風力

4.3 設計風速と想定振動特性

設計風速は建設省告示1461号第三号ロに基づき、建築物頂部での風速を59.5m/secとした。また、解析を行なった風向は、スペクトル・モード解析による弱軸方向の最大応答変位が大きい15°と290°の2風向とした。

また、解析は強軸方向と揺れ方向の1時固有周期が同一のCase1と並進2方向および揺れ方向の1次固有周期がそれぞれ異なるCase2の2ケースについて行った(表-1参照)。なお、Case1とCase2の並進2方向および揺れ方向の1次固有モードは同一とし、表-1中に記すX方向、Y方向および揺れ方向は図-4の定義に基づく。

表-1 想定振動特性

Case1		
振動方向	1次固有周期(sec)	1次減衰定数(%)
X方向(強軸方向)	4.107	2.0
Y方向(弱軸方向)	4.913	1.5
揺れ方向	4.107	2.0
Case2		
振動方向	1次固有周期(sec)	1次減衰定数(%)
X方向(強軸方向)	3.950	2.0
Y方向(弱軸方向)	5.351	1.5
揺れ方向	4.597	2.0

5. 解析結果

5.1 応答の平均値・標準偏差・最大値

時刻歴応答解析による各ケース、風向毎の応答変位の平均値、標準偏差、最大値を表-2～表-5に示す。なお、Case2の表-4、表-5においてはスペクトル・モーダル解析による結果も併せて示す。表-4、表-5によると、時刻歴応答解析による応答値とスペクトル・モーダル解析による応答値が概ね一致していることがわかる。

時刻歴応答解析による応答変位の平均値、標準偏差、最大値は、解析時間の終わりから前へ600秒(10分間)毎に区切り、それぞれにおいて得られる平均値、標準偏差、最大値をアンサンブル平均したものである。なお、600秒毎に区切った場合に余りとして残る始めの600秒以下の応答データは評価の対象から除いている。

表-2 Case1 風向角15°での解析結果

Case1 $\theta=15^\circ$	平均変位	標準偏差	最大変位
X方向(cm)	5.71E+00	2.66E+00	1.40E+01
Y方向(cm)	-7.25E+00	2.30E+01	-7.14E+01
捩れ方向(rad)	2.22E-03	2.55E-03	1.01E-02

表-3 Case1 風向角290°での解析結果

Case1 $\theta=290^\circ$	平均変位	標準偏差	最大変位
X方向(cm)	-1.10E+00	4.03E+00	-1.52E+01
Y方向(cm)	3.23E+01	1.59E+01	8.14E+01
捩れ方向(rad)	-1.63E-03	1.63E-03	-7.31E-03

表-4 Case2 風向角15°での解析結果

Case2 $\theta=15^\circ$	平均変位	標準偏差	最大変位
X方向(cm)	5.29E+00	2.49E+00	1.33E+01
Y方向(cm)	-8.60E+00	2.42E+01	-8.34E+01
捩れ方向(rad)	2.79E-03	3.11E-03	1.27E-02
スペクトル・モーダル解析			
X方向(cm)	5.57E+00	2.44E+00	1.36E+01
Y方向(cm)	-8.54E+00	2.57E+01	-9.22E+01
捩れ方向(rad)	2.71E-03	3.40E-03	1.39E-02

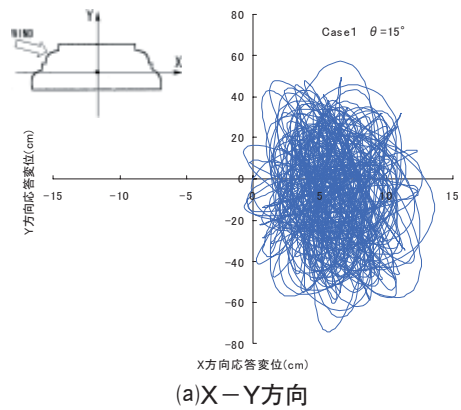
表-5 Case2 風向角290°での解析結果

Case2 $\theta=290^\circ$	平均変位	標準偏差	最大変位
X方向(cm)	-1.01E+00	3.55E+00	-1.29E+01
Y方向(cm)	3.84E+01	2.17E+01	1.04E+02
捩れ方向(rad)	-2.05E-03	2.07E-03	-9.64E-03
スペクトル・モーダル解析			
X方向(cm)	-1.11E+00	3.81E+00	-1.38E+01
Y方向(cm)	3.83E+01	2.31E+01	1.13E+02
捩れ方向(rad)	-1.99E-03	2.56E-03	-1.04E-02

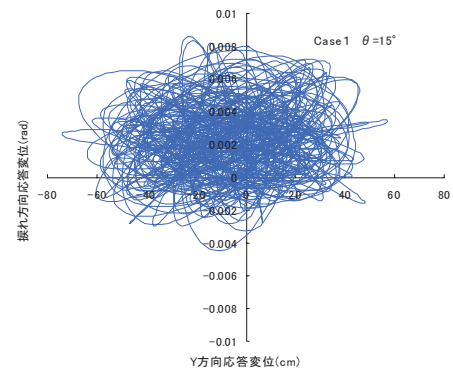
5.2 応答リサージュによる相関性の比較

時刻歴応答解析による各ケース、風向毎の変位の応答リサージュを図-5～図-8に示す。なお、応答リサージュには、解析時間終了前の600秒間の範囲を使用した。

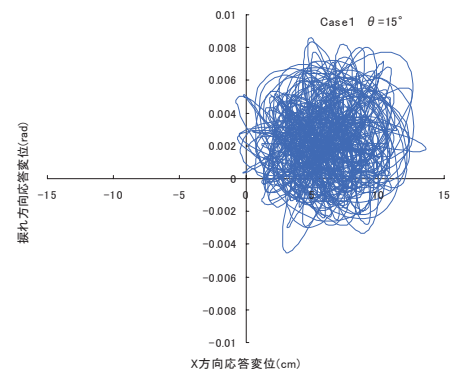
図-6(c)によると、X方向と捩れ方向の1次固有周期が同一であり(Case1)、かつ、X方向振動が概ね風直交方向振動とみなせる風向角290°の場合には、X方向応答変位と捩れ方向応答変位のリサージュに高い相関が見られる。



(a)X-Y方向



(b)捩れ-Y方向



(b)捩れ-X方向

図-5 Case1風向角15° 応答リサージュ

一方、図-6(c)以外の応答リサージュには、ほとんど相関が見られない。応答リサージュからも明らかに、風直交方向振動と揺れ方向振動の1次固有周期が均

衡している場合には、強い連成振動が発生する可能性が非常に高い。

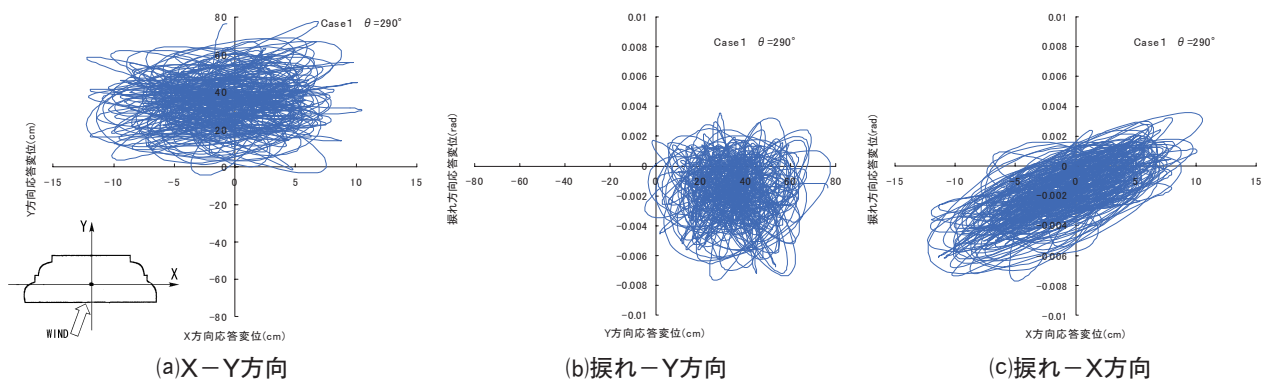


図-6 Case1風向角290° 応答リサージュ

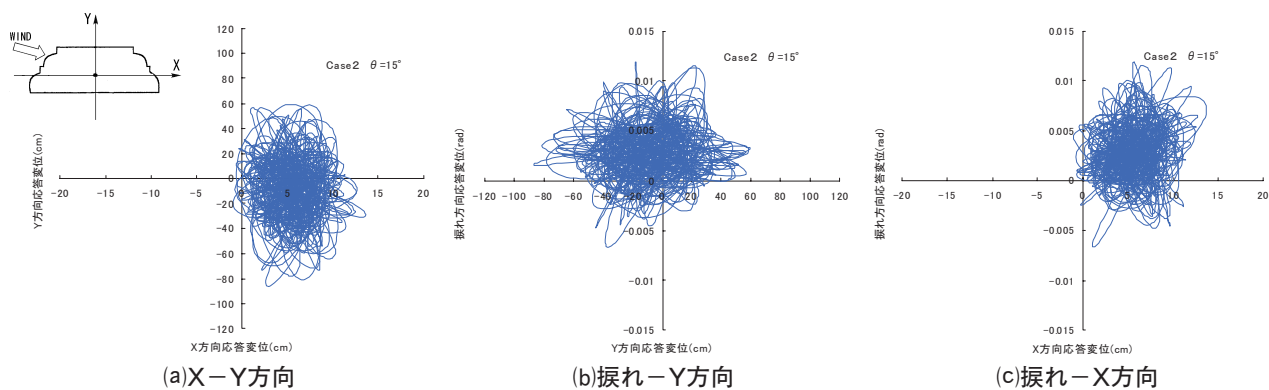


図-7 Case2風向角15° 応答リサージュ

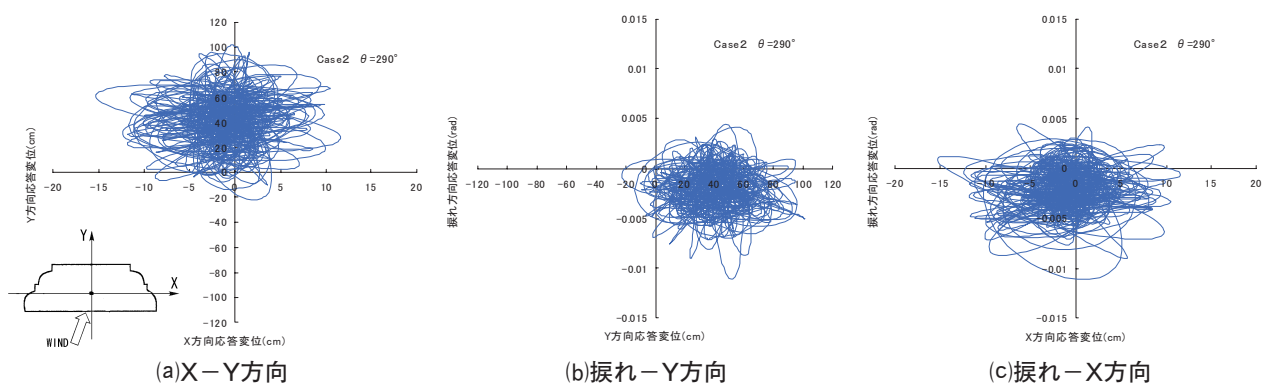


図-8 Case2風向角290° 応答リサージュ

5.3 相関係数による相関性の比較

時刻歴応答解析による各ケース、風向毎の、X方向応答とY方向応答、Y方向応答と振れ方向応答およびX方向応答と振れ方向応答それぞれにおける相関係数を表-6に示す。表-6によると、Case1・風向角 290° におけるX方向と振れ方向の相関係数が他の各2方向応答よりも非常に高い数値を示している。したがって、5.2で述べたように、Case1・風向角 290° におけるX方向と振れ方向の相関は、他と比較しても非常に高いことがわかる。

表-6 各2方向応答の相関係数

Case1 $\theta=15^\circ$		
X-Y方向	振れ-Y方向	振れ-X方向
-0.0780	0.0620	0.1978
Case1 $\theta=290^\circ$		
X-Y方向	振れ-Y方向	振れ-X方向
0.0411	-0.0402	0.5798
Case2 $\theta=15^\circ$		
X-Y方向	振れ-Y方向	振れ-X方向
-0.0660	0.0399	0.1077
Case2 $\theta=290^\circ$		
X-Y方向	振れ-Y方向	振れ-X方向
0.0465	-0.0275	0.1050

6. まとめ

超高層集合住宅において、強軸方向と振れ方向の1次固有周期が同一である場合（Case1）と並進2方向および振れ方向それぞれの1次固有周期が異なる場合（Case2）の2ケースの振動特性を想定し、風洞実験から得られた風力データを用いて時刻歴応答解析を行なった結果、その応答リサージュ等から以下のことがわかった。

- (1) 並進方向のいずれか1方向と振れ方向の1次固有周期が均衡している場合、振れ方向と均衡した1次固有周期を持つ並進方向が風直交方向となると、その2方向間の相関が非常に高くなる可能性がある。
- (2) 本報告の解析に用いた超高層建築物においては、強軸方向および振れ方向の1次固有周期の間に約0.6秒の差を与えることで、その2方向の連成振動の相関を大幅に低下させることが可能となる。

最後に、本実験の解析を行なうにあたり、助言を頂いた大阪市立大学建築防災研究室・谷池教授に深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 建築物荷重指針・同解説、日本建築学会編、技報堂出版、1993.6
- 2) 牧野章文他：相関を考慮した風荷重組み合わせ手法、日本建築学会大会梗概集、p 101～102、1992