

自然風下の正方形断面角柱の風力

および風応答特性に与える接近流の影響

EFFECTS OF INCIDENT FLOWS ON CHARACTERISTICS OF WIND FORCES AND RESPONSES OF A SQUARE PRISM IN NATURAL WIND

建築防災分野 野村徹平
Building Disaster Prevention Teppei NOMURA

設計用風荷重は風洞実験あるいは CFD(数値流体計算)の結果にもとづいて定められる。しかし、風向や風速の変化など、風洞実験では再現が困難な部分があり、自然風の特徴を考慮に入れることが重要である。本論文では、正方形断面をもつ角柱を対象に風洞実験を行い、野外実測結果との比較を通して、正方形断面角柱に作用する風力および応答特性に与える接近流の影響を示した。さらに、接近流の気流性状を示す一つのパラメータと風力との関係を示した。

The design wind loads are based on results of wind tunnel tests or computational fluid dynamics. There are some difficulties to replicate the phenomenon in wind tunnel test such as the variations of wind direction and speed. Therefore, it is important to consider the characteristics of natural wind. Therefore, in this paper, the wind tunnel tests of a square prism are carried out to compare with the result of field measurements about acting on the prism in natural wind and the effects of incident flows characteristics on wind forces and response displacements are examined. In addition, this paper shows the relationship between the wind force acting on a square prism and a parameter representing the characteristics of incident flows.

1. 研究目的

高層建築物の構造骨組設計において、地震荷重と風荷重を考慮することは重要である。近年、建築物の高層化や軽量化が進み、建築物の持つ減衰性能が低下し、風による影響はますます大きくなっている。

設計用風荷重の算定法は、その多くが風洞実験の結果から定められている。風洞実験では対象物に作用する風向あるいは風速を自由に設定することで、まんべんなく評価することが可能であり、設計荷重を考慮するには有用な手段であるが、自然風の非定常性など風洞実験では再現が困難な点もあるため、自然風下の現象との比較、検証が必要となる。

本研究では、弾性角柱模型を用いて風洞実験を行い、過去に行われた野外実測結果と比較する。そして接近流の気流性状が、風力および応答の特性に与える影響について考察し、接近流の気流性状を示す一つのパラメータを提案する。

2. 野外実測と風洞実験の相似則

2.1 実験模型の概要

野外実測は大阪市此花区北港緑地2丁目1-35地内にあった大阪市立大学工学部所属の舞洲耐風構造実験所

で行われた。実測に用いた模型は、鋼材からなる骨組みを8mm厚ポリカーボネイトの外壁で覆った5層構造、アスペクト比5の正方形断面角柱(1000mm×1000mm×5000mm)であった。模型の内部には模型と独立した内部柱を設置し、内部柱の頂部に設置した3台のレーザー変位計により、模型頂部のX、Y方向の振動変位およびZ軸まわりの回転変位を計測した。図1に実測模型の概要図を示す。

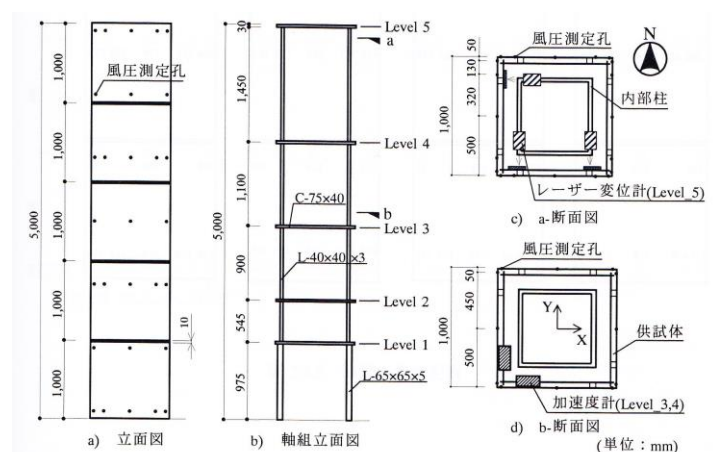


図1 実測模型概要

風洞実験は日本建築総合試験所所属のエッフェル型噴出式境界層風洞を用いて行った。風洞実験に用いた模型は、アスペクト比5の正方形断面角柱である。模型高さは500mmとした。横材として厚さ2mmのバルサ材を5枚、厚さ2mmの亚克力材を1枚、縦材として厚さ2mmのバルサ材を骨組みとし、模型側面は厚さ2mmのバルサ材を用いた。また、模型下部は振動実験用の心棒を挿入するために厚さ5mmの亚克力材を用いた。模型はロッキング振動の直線モードを仮定した。風圧測定孔は実測模型にならって、風上となる正面と側面、および風下となる背面に各29点の合計116点設けた。実験装置は上部模型、支持部材、ジンバル、バネおよび模型全体をターンテーブルと一体化するように構成されている。ジンバルは大小2つのリングからできており、XおよびY軸周りに自由に回転することができる。水平4方向にコイルバネを取り付けており、模型の剛性を設定するとともに、模型を弾性支持している。風洞模型の概要図を図2に示す。

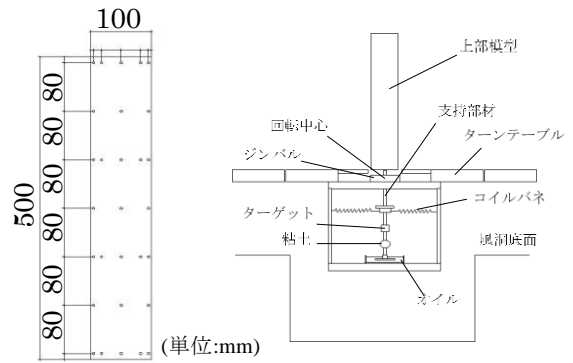


図2 風洞模型および実験概要

表1 実測模型の固有振動数および減衰定数

	振動数(Hz)	減衰定数(%)
X方向	2.002	0.515
Y方向	1.953	0.539

表2 風洞模型の固有振動数および減衰定数

	パターン1		パターン2	
	振動数(Hz)	減衰定数(%)	振動数(Hz)	減衰定数(%)
X方向	10.25	1.10	10.25	0.52
Y方向	10.38	1.11	10.38	0.54

自由振動実験により、各模型の固有振動性状を調べた。風洞実験では、減衰定数1.0%および0.5%の2パターンで実験を行っている。実験により求めた固有振動数および減衰定数を表1、表2に示す。

2.2 気流性状の相似性

野外実測と風洞実験の結果の比較のため、野外実測における観測風の特徴を把握することは重要である。

鉛直方向の風速分布は式(1)に示す、べき乗則が広く用いられ、左辺を風速比と呼ぶ。

$$\frac{v(z)}{v_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha \quad (1)$$

$v(z)$: 高さ z (m)における平均風速(m/sec)、

v_0 : 基準高さ z_0 (m)における平均風速(m/sec)

また、高さ z (m)における乱れの強さ I_z は式(2)より求められ、鉛直方向の分布は式(3)で表される。

$$I_z = \frac{\sigma_v(z)}{v(z)} \quad (2)$$

$\sigma_v(z)$: 高さ z (m)における風速の標準偏差(m/sec)

$$I_z = 0.1 \times \left(\frac{z}{Z_G}\right)^{-\alpha-0.05} \quad (3)$$

なお、べき指数 α および高さ Z_G (m)は、地表面粗度区分に応じて、表3により与えられる。図3に野外実測において観測された自然風の気流性状の一例と各粗度区分の指針値を示す。実測地周辺の状況を考えると、粗度区分IまたはIIに近いと予想されたが、図3からは粗度区分III~Vに近いことがわかる。これを踏まえて、風洞実験では図4に示すような粗度区分IIIを模擬した勾配流、さらに、ほぼ一樣な流れ(一樣流)の場合を加えた2通りの気流を用いた。

表3 風速の鉛直分布を定めるパラメータ

粗度区分	I	II	III	IV	V
α	0.10	0.15	0.20	0.27	0.35
Z_G (m)	250	350	450	550	650

(出典 建築物荷重指針・同解説: 日本建築学会、2015)

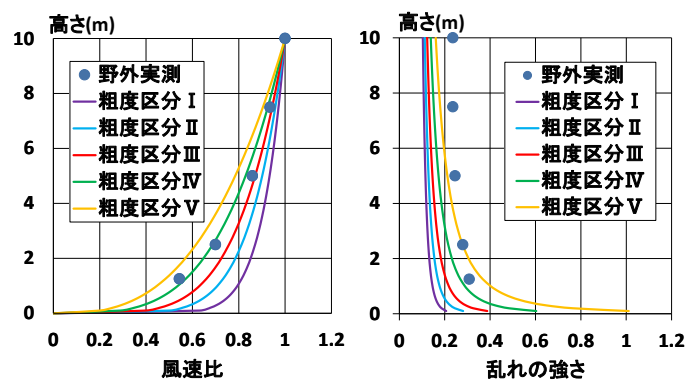


図3 観測風の気流性状の例

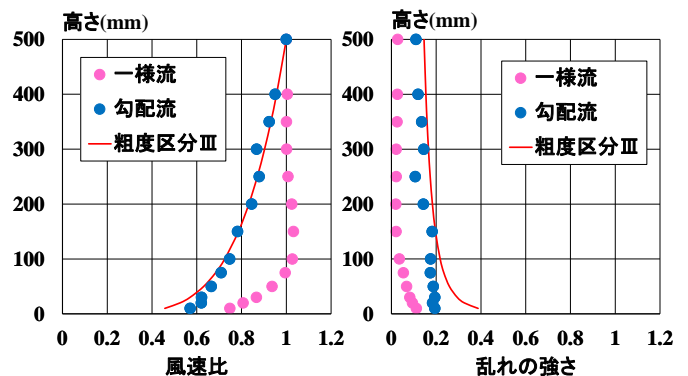


図4 風洞気流の気流性状

2.3 相似則にもとづく評価時間の検討

式(4)に示す相似則の考え方にもとづいて、実現象の600秒に相当する評価時間を検討した。

$$\left(\frac{VT}{H}\right)_{\text{target}} = \left(\frac{VT}{H}\right)_{\text{field}} = \left(\frac{VT}{H}\right)_{\text{model}} \quad (4)$$

V :風速(m/sec)、 T :時間(sec)、 H :高さ(m)

target:実現象、field:野外実測、model:風洞実験

今回は、模型の固有振動数 f_0 (Hz)から求めた固有周期 T_0 (sec)を用いて風速を求めたうえで、評価時間 T_s (sec)を算出した。表4に相似則の各項を示す。これより、野外実測は100秒、風洞実験は19.2秒が実現象の600秒に相当することがわかる。野外実測と風洞実験のサンプリング周波数がそれぞれ50Hz、800Hzであるから、解析時の記録の平均化個数は5000個および15360個とした。

3. 風力特性の比較

3.1 風力係数

風力係数 C_F の定義を式(5)に示す。

$$C_F = \frac{F}{qBH} \quad (5)$$

F :風力(N)、 q :速度圧(Pa)、 B :幅(m)、 H :高さ(m)

なお、風力 F に風力の平均値、標準偏差、および絶対値が最大のときの絶対値の値を代入したものを、それぞれ平均風力係数、変動風力係数、ピーク風力係数とした。

3.2 風向分布との関係

図5に示すように風向角と座標軸を定義した。座標軸は模型軸を基準としたもの(X、Y方向)と風軸を基準としたもの(D、L方向)の2通りを考える。本研究のように、アスペクト比が大きい建築物では、風直角方向(L方向)の風力の影響も無視できない。図6にL方向の平均風力係数と風向角の関係を示す。野外実測と風洞実験で概ねよく似た傾向を示しているが、壁面に正対する風向より約 12° ずれた風向で実測の風力係数の絶対値が大きくなるのがわかる。この傾向は勾配流では、はっきりと見られないのに対し、一樣流の場合では顕著に表れている。これは、風上側隅角部で剥離した気流によって発生する側面の負圧によるものであると考えられる。乱れの小さい一樣流では剥離流が角柱の風下側まで流れるのに対して、乱れの大きい勾配流は剥離後に壁面で再付着したために負圧が小さくなると考えられる。前節では、実測地の観測気流は粗度区分Ⅲと判断しているため、風洞実験の勾配流に近い傾向を示すと予想される。しかし、野外実測結果は、一樣流を上限值、勾配流を下限值とするように分布することがわかった。

表4 相似則の各項

	H (m)	f_0 (Hz)	T_0 (sec)	V (m/sec)	T_s (sec)
target	100	—	3.0	50	600
field	5.0	2.0	0.5	V_{field} →15	T_{field} →100
model	0.5	10.38	0.096	V_{model} →7.81	T_{model} →19.2

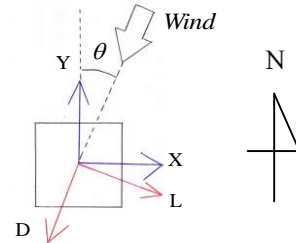


図5 風向角および座標軸の定義

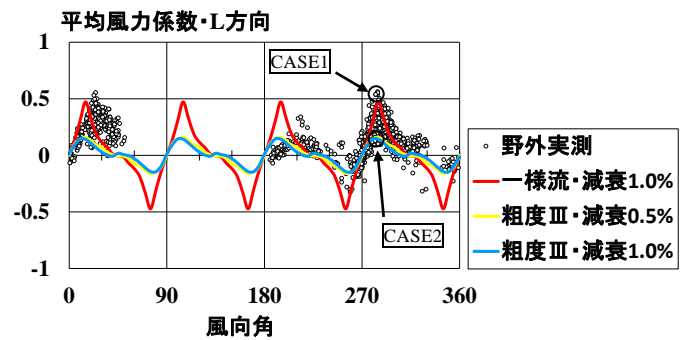
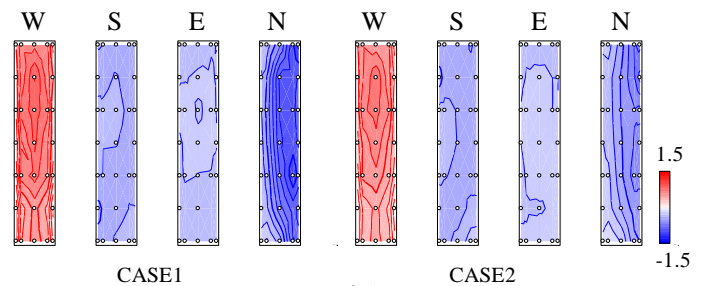
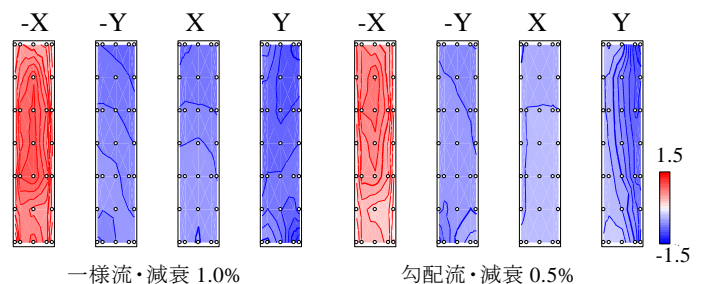


図6 平均風力係数(L方向)



(a) 野外実測



(b) 風洞実験

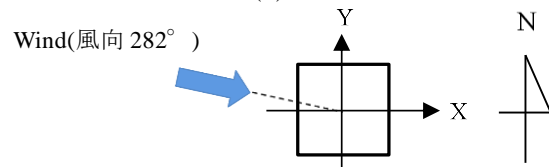


図7 平均風圧分布

風向角 282° 付近における L 方向平均風力係数のうち大きい記録 (CASE1) と小さい記録 (CASE2) に着目する。CASE1、CASE2 および、風向角 285° における一様流、勾配流の風洞実験結果の平均風圧分布を図 7 に示す。図 7(a) の CASE1 の北側壁面に着目すると、風上側における負圧の絶対値が壁面中心付近においても維持されていることがわかる。またこの傾向は図 7(b) の一様流の Y 側壁面でも見られることから、L 方向平均風力係数が大きい野外実測の記録は、平均風圧分布においても一様流に近い傾向を示すことがわかった。

同様に図 7(a) の CASE2 と図 7(b) の勾配流に着目すると、共に風上側の負圧の絶対値が壁面中心付近では大きく減少していることが分かる。ここから、L 方向平均風力係数が小さい野外実測の記録は、平均風圧分布においても勾配流に近い傾向を示すことがわかった。

図 8 に Y 側壁面の平均風圧係数の一例を示す。

次に、風力係数と無次元風速の関係を考える。野外実測での主風向と記録数の多さから、270° ~ 315° の範囲で 5° ピッチごとに比較し、実測の平均風向は ± 2.5° までの範囲を含めた。無次元風速 V_r は平均風速 \bar{V} (m/sec) を固有振動数 f_0 (Hz) および代表長さ D (m) で無次元化して求めた。図 9 に風向角 285° における L 方向風力係数と無次元風速との関係を示す。この風向で L 方向平均風力係数が最大となる。風洞実験結果は風速に依存しない一定の値を示している。また図 9(a) から分かる通り、野外実測結果は風力係数が一様流に近い傾向と、勾配流に近い傾向と混在して分布している。また図 9(b) に着目すると、変動成分は野外実測結果のほうが風洞実験結果よりも大きな値をとるが、実測結果のうち係数値の小さいものは勾配流の結果の近くに分布していることが分かる。これは、一般的に自然風の非定常性により、変動成分が大きくなることが原因であると考えられる。

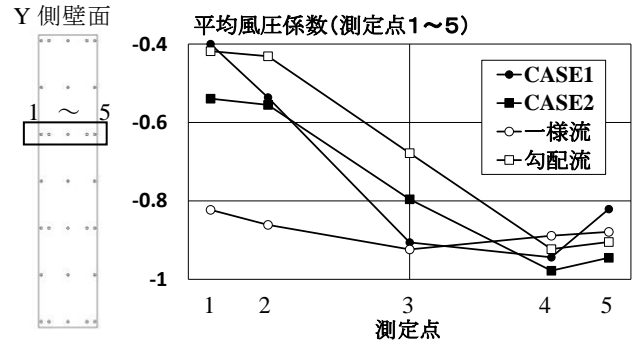
4. 応答特性の比較

変位比 δ の定義を式(6)に示す。変位比は模型の頂部変位を模型の高さで除した無次元量であり、応答特性の比較に用いられる。ただし、風洞模型の高さは回転中心から模型頂部までの高さを用いた。

$$\delta = \frac{x}{H} \quad (6)$$

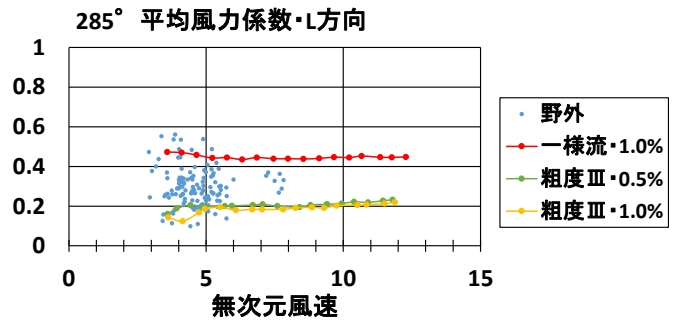
x : 模型の頂部変位(m)、 H : 模型高さ(m)

図 10 に風向角 300° の XY 方向平均変位比と無次元風速との関係を示す。図 10(a) に着目すると、X 方向平均変位比については風洞実験結果と野外実測結果は非常に近い傾向を示していることがわかる。また図 10(b) に着目すると、Y 方向平均変位比については野外実測結果が風洞実験結果を大きく上回る結果となった。

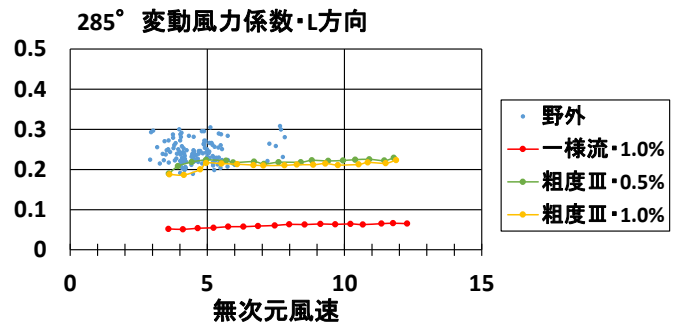


(a) 測定点 (b) 各測定点の平均風圧係数

図 8 測定点位置と平均風圧係数

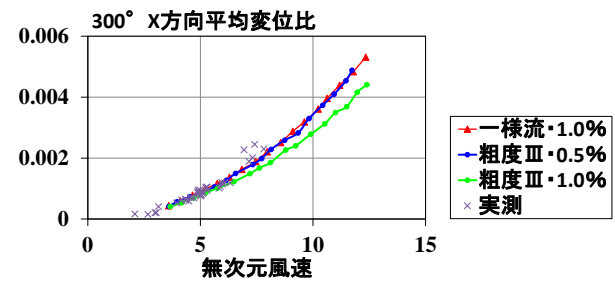


(a) 平均成分

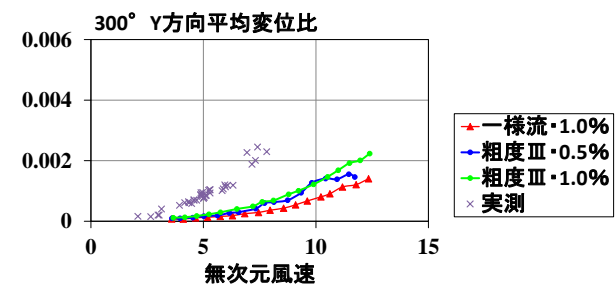


(b) 変動成分

図 9 風力係数と無次元風速の関係 (風向角 285° ・ L 方向)



(a) 平均成分



(b) 変動成分

図 10 平均変位比と無次元風速の関係 (風向角 300°)

5. 接近流の気流性状が風力特性に及ぼす影響

野外実測の記録に主成分分析をかけることで、接近流の気流性状が風力特性に及ぼす影響を考察する。

主成分分析とは、与えられた多次元データから低次元成分を抽出する分解法である。式のように、元の解析対象{ p }は式(8)の直交性を満たす座標変換マトリクス[Φ]と規準座標{ a }によって分解することができる。

$$\{p\} = [\Phi]\{a\} \quad (7)$$

$$[\Phi]^T [A] [\Phi] = [I] \quad (8)$$

[A]: { p } の分散の逆数の対角行列 [I]: 単位行列

これらの条件を満たしながら、{ a }の分散を最大にするように[Φ]を設定することが目的であり、これは式(9)の固有値問題に帰着する。

$$[A^{1/2}] [R] [A^{1/2}] [\Phi] = [\Phi] [\Lambda] \quad (9)$$

$$[A] = [A^{1/2}] [A^{1/2}] \quad (10)$$

[R]: 解析対象の共分散行列 [Λ]: 固有値の対角行列

今回の解析対象は、風向角および風速の平均、変動、乱れの強さ、X方向、Y方向の平均、変動、ピーク風力係数の計11項目とした。ここでの乱れの強さとは風速の標準偏差を平均風速で除した値とした。風向角270°~295°の記録の解析結果を表5、表6に示す。主成分については、寄与率が第4次までで85%を超えているため、表には第4次までを示している。

ここで、各項目が各主成分に与える影響を調べるために、因子負荷量を求める。因子負荷量とは、各解析対象と各主成分との相関係数を表しており、式(11)で計算できる。

$$r_{ij} = \frac{\phi_{ij} \sqrt{\lambda_j}}{\sigma_i} \quad (11)$$

- r_{ij} : 解析対象 p_i と第 j 主成分の因子負荷量
- ϕ_{ij} : [Φ] の i 行 j 列の値
- λ_j : 第 j 次の固有値
- σ_i : 解析対象 p_i の標準偏差

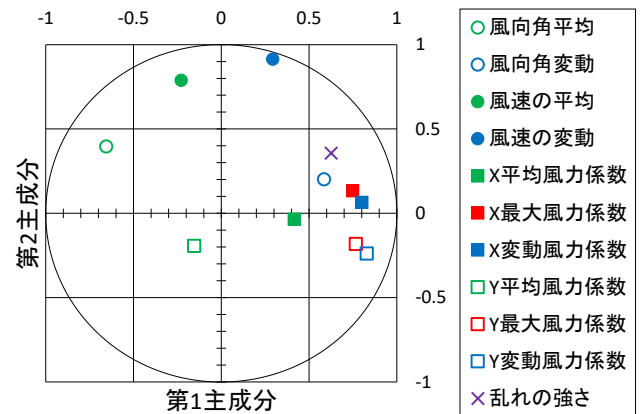
因子負荷量の計算結果を元に作成した因子負荷プロットを図11に示す。因子負荷プロットとは、各主成分から2種類選択し、それらの因子負荷量を横軸、縦軸にとり、各解析対象の因子負荷量を座標平面上にプロットした図である。図6で示された接近流の気流性状によるY方向平均風力係数の分布の傾向を明らかにするため、以降はY方向平均風力係数に着目する。図11より、Y方向平均風力係数は、第1主成分、第2主成分にはほとんど影響を与えていない。一方、第3主成

表5 固有値、寄与率、累積寄与率

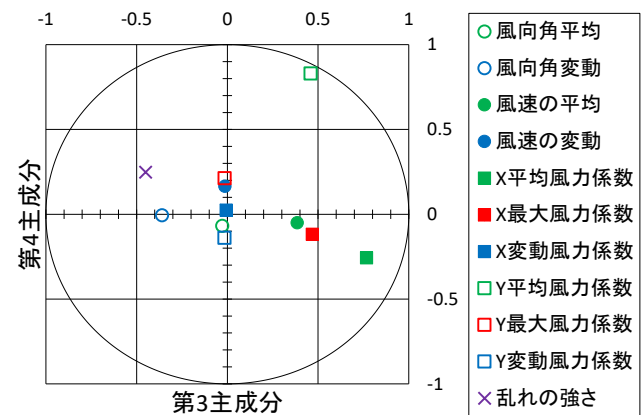
次数	固有値	寄与率	累積寄与率
1	3.91	39.1	39.1
2	2.87	28.7	67.8
3	1.37	13.7	81.5
4	0.70	6.98	88.5

表6 固有ベクトル

固有ベクトル	1次	2次	3次	4次
風向角平均	-0.33	0.29	-0.02	-0.08
風向角変動	0.29	0.15	-0.29	-0.01
風速平均	-0.11	0.57	0.31	-0.05
風速変動	0.15	0.66	-0.01	0.17
乱れの強さ	0.31	0.26	-0.37	0.26
X平均風力	0.21	-0.03	0.63	-0.27
Xピーク風力	0.38	0.10	0.39	-0.12
X変動風力	0.40	0.05	-0.01	0.03
Y平均風力	-0.08	-0.14	0.38	0.86
Yピーク風力	0.38	-0.13	-0.01	0.22
Y変動風力	0.42	-0.17	-0.01	-0.15



(a) 第1主成分と第2主成分



(b) 第3主成分と第4主成分

図11 因子負荷プロット

分および第 4 主成分には、共に大きく影響を与えていることを示している。ここで第 3 主成分および第 4 主成分の物理的意味を表 6 から検討する。

表 6 より第 3 主成分は、平均風速が正の値で、乱れの強さ、風向角変動が負の値を示している。そのため、第 3 主成分の値が大きいほど、高風速で安定した気流であることを示している。一方、Y 方向平均風力係数は、正の値を示している。以上より、Y 方向平均風力係数は、高風速で安定した気流のときに大きくなる傾向があることが読み取れる。つまり、Y 方向平均風力係数に関しては、風速依存性の可能性が示唆されている。

次に、第 4 主成分は、乱れの強さは正の値を示しているが、平均風速、風向角変動はほとんど 0 に近い値を示している。そのため、第 4 主成分については気流性状にほとんど影響しない主成分であると判断できるため、今回は考慮しない

よって、第 3 主成分に着目すると、Y 方向平均風力係数は、平均風速が大きくなり、乱れの強さ、風向角変動が小さくなると、値が大きくなるようなパラメータと関係があると考えられる。

そこで、平均風速が大きくなり、乱れの強さ、風向角変動が小さくなると、値が大きくなるようなパラメータを考える。まず、平均風速、乱れの強さ、風向角変動はそれぞれの取りうる値の範囲が違うため、ある程度均一化するために、以下の操作を行う。

今回得られた実現象で 10 分間相当の記録の中で、風向角 $270^\circ \sim 295^\circ$ の記録は 540 個ある。その各記録の平均風速、乱れの強さ、風向角変動を、それぞれの 540 個の記録の平均値で除して、平均風速、乱れの強さ、風向角変動の値それぞれの取りうる値の範囲をある程度均一化する。

$$\frac{\overline{V'}(i)}{\overline{V}} = \frac{\overline{V}(i)}{\overline{V}} \quad \sigma'_D(i) = \frac{\sigma_D(i)}{\sigma_D} \quad I'(i) = \frac{I(i)}{\overline{I}} \quad (12)$$

$\overline{V}(i)$: i 番目の記録の平均風速 (m/sec)

\overline{V} : 全記録の平均風速の平均値 (m/sec)

$\sigma_D(i)$: i 番目の記録の風速の標準偏差 (m/sec)

σ_D : 全記録の風速の標準偏差の平均値 (m/sec)

$I(i)$: i 番目の記録の乱れの強さ

\overline{I} : 全記録の乱れの強さの平均値

今回の実測結果から $\overline{V} = 8.95 \text{ m/sec}$ $\sigma_D = 1.33 \text{ m/sec}$ $\overline{I} = 0.15$ となったが、実際には、それぞれの建築物周辺の気流性状によって変わるため、その時々で観測し、検討する必要がある。

これらを踏まえて、新しい気流性状を示すパラメータを提案する。

$$h(i) = \frac{(\overline{V'}(i))^2}{\sigma'_D(i) \times I'(i)} \quad (13)$$

式(13)は平均風速が大きく、風向角変動および乱れの強さが小さくなると、値が大きくなる。つまり $h(i)$ が大きくなるほど、高風速で一様流に近い気流性状を表していることになる。逆に $h(i)$ の値が小さいと、低風速で勾配流に近い気流性状を表していることになる。

$h(i)$ と Y 方向平均風力係数の関係を図 12 に示す。 $h(i)$ の 0~2 の範囲に着目すると、多少のばらつきはあるものの正の相関関係が見られることがわかった。よって図 12 は、接近流の気流性状が平均風力係数に影響を与えていることを示している。

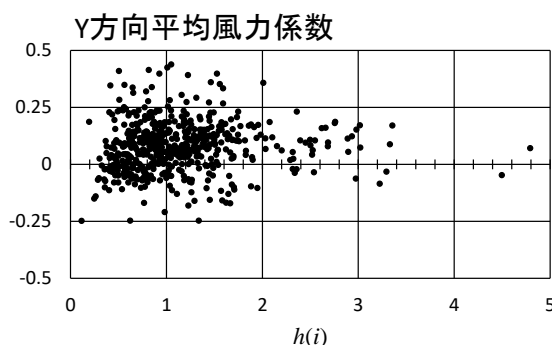


図 12 $h(i)$ と Y 方向平均風力係数の関係

6. 結論

本研究では、正方形断面角柱模型を用いて、野外実測と風洞実験を行い、風力および応答特性について比較した。その結果、実測の風力特性について平均成分は一様流のような傾向を示す記録と、勾配流のような傾向を示す記録が混在していることがわかった。本研究では、実測値の気流性状より粗度区分Ⅲの勾配流として研究を進めてきた。しかし、結果として、勾配流に近い傾向のみならず、一様流に近い傾向も示したことから、同じ敷地であっても、接近流の気流性状の変化に伴い、風直交方向の風力係数が大きくなる可能性があるということがわかった。模型壁面の平均風圧分布においても、気流性状による分布の違いが明らかになった。また野外実測の記録に主成分分析を行うことで、風直交方向の風力係数は接近流が高風速かつ安定した気流に近づくに伴い増加する主成分が得られた。

参考文献

- 1) 奥田拓也、正方形断面角柱に作用する風力および応答特性に関する野外実測と風洞実験の比較研究、大阪市立大学大学院工学研究科修士論文、2000
- 2) 谷口徹郎、谷池義人、角柱に作用する非定常風力に関する実測および風洞実験、第 16 回風工学シンポジウム論文集 2000 年 12 月、
- 3) 建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、2015
- 4) 大熊武司、神田順、田村幸雄、建築物の耐風設計、鹿島出版会、1996
- 5) 内田治、主成分分析の基本と活用、日科技連出版社、2013