高層建物に作用する変動風圧力の POD 解析

PROPER ORTHOGONAL DECOMPOSITION STUDY OF FLUCTUATING WIND
PRESSURES ACTING ON A TALL BUILDING菊池 浩利*¹, 田村 幸雄*², 上田 宏*³, 日比 一喜*⁴*Hirotochi KIKUCHI, Yukio TAMURA, Hiroshi UEDA
and Kazuki HIBI*

Dynamic wind pressures acting on buildings show complicated functions in both time and space. Several investigations [1-15] have applied the Proper Orthogonal Decomposition (POD) technique to such random wind pressure fields to identify hidden deterministic structures. In this study, the POD technique was applied to fluctuating wind pressures acting on a tall building model, and the following facts were found: the along-wind and across-wind forces can be approximated by only a few dominant modes, while the torsional moment requires approximately 10 modes; and the wind-induced response of a tall building has a maximum evaluation error of less than 6% with the reconstruction of the dominant modes.

Keywords : *POD analysis, Fluctuating wind pressure, Response analysis*
POD 解析, 変動風圧力, 応答解析

1. はじめに

建物に作用する変動風圧は、時間的にも空間的にも複雑に変化している。この時空間的にランダムな現象に固有直交関数展開 (Proper Orthogonal Decomposition, 以下 POD 解析) を適用することにより、変動圧力場に含まれる組織的な構造を明らかにする試みがなされている。Lee (1975)^[1]は固有直交関数展開の一つである共分散法を2次元角柱に適用し、Best & Holmes (1983)^[2]は低層建物モデルへ、Kareem & Cermak (1984)^[3]は高層建物モデルへ適用している。Bienkiewicz et al. (1993)^[4,5]は、屋根の隅角部に設けた10個の測定点での時刻歴風圧データを基に POD 解析を行い、規準モードの特性や幾つかの規準モードによる再合成波形を検討している。また、筆者らのグループ(1993~1996)^[7~12]は、陸屋根モデル全表面で測定された変動風圧の POD 解析を行い、規準モードの特性や接近流の乱れとの相関の検討を行っている。

本報告は、POD 解析を高層建物の変動圧力場に適用し、各規準モードや規準座標、あるいは再合成された変動風圧の特性について考察したものである。また、再合成された変動風圧が高層建築物に作用した場合の応答性状についても考察を行った。

2. 風洞実験

実験は、回流式境界層風洞 (幅2.6m×高さ2.4m×長さ15m) により、図1に示す縮尺率1/400で、平均風速の鉛直分布のべき指数が $\alpha=1/6$ および $1/4$ の2種類の境界層流を用いて行った。用いた模型

は図2に示す一辺10cmの正方形平面を持つ高さ50cmの高層建物模型である。模型の壁面には、500点の風圧測定孔を負担面積が等しくなるように一様に配置し、多点同時変動風圧測定システム^[6]によって全点同時に計測した。変動風圧力のサンプリング間隔は1.28 msec とし、32,768個を連続してサンプリングした。導圧チューブの影響は予め求めたゲインおよびフェイズ特性を用いて補正を行った。図3、4に実験結果の一例として、べき指数 $\alpha=1/6$ の気流での平均および変動風圧係数分布を示す。図3の平均風圧係数分布は、風上面の高さ $3/4H$ 付近を中心として+0.8の高い値の領域がある。側面では-0.8の高い負圧がほぼ一様に生じている。図4の変動風圧係数は、風上面は全体的に小さく、側面および背面が高くなっている。特に側面の脚部風上付近、および高さ $1/2H$ 付近風下部に0.36以上の高い変動風圧が発生している。背面では側面の変動風圧の高い部分に隣接する高さ $1/2H$ 付近の隅部に0.22以上の値が発生している。

3. 固有モード分布と各風力成分の高さ方向分布

POD 解析には、平均成分を除いた風圧の変動成分のみによる共分散を要素とする 500×500 の共分散行列を用いた。図5にべき指数 $\alpha=1/6$ の場合の1~5次の固有モード、図6、7に建物の振動モードとしてロッキングタイプ (直線振動モード) を仮定した場合の一般化風力のパワースペクトル密度、および1~5次の規準座標のパワースペクトル密度を示す。各次の固有値、寄与率および累積寄与

本論文は文献[13~15]に加筆修正したものである。

*¹ 清水建設株式会社 研究所 研究員

*² 東京工芸大学工学部 教授・工博

*³ 千葉工業大学建築学科 助教授・工博

*⁴ 清水建設株式会社 研究所 主席研究員・工博

Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation

Prof., Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Chiba Institute of Technology, Dr. Eng.

Chief Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

率を表1に示す。表1から分かるように1次, 2次の寄与率は26%, 17%と大きく, 3次, 4次は5~6%程度に低下する。10次モードまでの累積寄与率は約70%, 50次で90%となる。各次の固有モードおよび規準座標を用いて求めた変動風力係数の高さ方向分布を図8に示す。以下にべき指数 $\alpha=1/6$ の場合の固有モード, 風力係数および風力のパワースペクトル密度の特徴を示す。

1次固有モード 図5(a)に示すとおり, 1次固有モードは左右逆対称である。図7の1次規準座標のパワースペクトル密度は図6の風直角方向の一般化風力に類似しており, 同一の無次元周波数で鋭いピークを持つ。このことは, 1次固有モードが周期的な渦放出現象を強く反映していることを示す。図8(b)に示す各次のモードのみによる風直角方向の変動風力係数の分布から分かるように, 1次モードの風直角方向変動風力係数は, 原波形による変動風力係数の高さ方向分布と類似しており, 大きさにおいてもその大部分を1次固有モードが占めている。なお, 1次モードは図8(a)の風方向風力へは殆ど寄与していない。図8(c-1)の変動ねじりモーメント係数では1次固有モードの寄与が大きい。

2次固有モード 2次固有モードは図5(b)に示すように左右対称で, 風上面中央を中心に値の高い領域が広がり, 左右の側面および背面ではほぼ様な分布である。この分布形状は平均風圧係数分布と類似しており, 風圧変動の準定常的な性状を反映しているものと言える。図7の2次規準座標のパワースペクトル密度は, 図6の風方向の一般化風力のパワースペクトル密度と類似している。図8(a)の2次モードの風方向変動風力係数は, 原波形の変動風力係数の高さ方向分布形状に類似し, 大きさにおいてもその大部分を2次固有モードが占めている。固有モードが左右対称であるため風直角方向変動風力, 変動ねじりモーメント係数には殆ど寄与しない。

3次固有モード 図5(c)の3次固有モードも左右対称で, 側面の風上頂部に値の高い領域がある。これは頂部風上付近に発生する3次元性の高い流れの影響と考えられる。3次モードの変動風力係数は, 図8(a)の風方向変動風力係数では高さ $0.6H$ 付近を節として上, 下に分布しているが, 図8(b)の風直角方向風力に対する寄与は殆どない。これは, 側面の固有モードが同符号であることから納得される。ちなみに, 図7の3次規準座標のパワースペクトル密度には渦

による影響は見られず, 2次規準座標と同様に, 図6の風方向一般化風力のパワースペクトル密度に類似している。

4次固有モード 図5(d)の4次固有モードも左右対称で, 風上面の高さ $0.8H$ と $0.2H$ 付近に逆符号で値の高い領域があり, 風方向風力が上層部と下層部で逆位相で変動していることを示す。つまり, 4次モードは風方向に建物全体をスウェイさせる効果は殆ど無く, 建物を風方向に回転させる効果を反映している。図8の変動風力係数を見ると, (a)の風方向変動風力への寄与が大きく, 高さ $0.5H$ 付近

図3 平均風圧係数分布, $\alpha=1/6$

図4 変動風圧係数分布, $\alpha=1/6$

図1 風速, 乱れ強さの鉛直分布

図2 風圧模型および解析モデル

表1 固有値 λ_m , 寄与率 c_m および累積寄与率 C_m , $\alpha=1/6$

Mode	λ_m	$c_m(\%)$	$C_m(\%)$	Mode	λ_m	$c_m(\%)$	$C_m(\%)$
1	132.00	26.30	26.30	10	7.19	1.44	71.43
2	83.70	16.70	43.00	50	0.74	0.15	89.24
3	32.60	6.51	49.51	100	0.26	0.05	93.47
4	25.80	5.16	54.67	300	0.06	0.01	98.50
5	25.20	5.04	59.71	500	0.01	0.00	100.00

図5 1次～5次の固有モード (点線は負), $\alpha=1/6$

図6 一般化風力のパワースペクトル密度, $\alpha=1/6$
(直線振動モードを仮定)

図7 1次～5次の規準座標のパワースペクトル密度, $\alpha=1/6$

に節を持ち、上下に分布している。(b)の風直角方向変動風力には殆ど寄与していない。

5次固有モード 図5(e)の5次固有モードは左右逆対称で、かつ上部と下部が逆符号である。図8(b)の5次固有モードの風直角方向の変動風力係数も、高さ $0.5H$ 付近を節として、 $0.8H$ 、 $0.2H$ 付近で値が大きくなっている。固有モードと考え合わせると、この上下の領域も風直角方向風力が逆位相で変動しており、建物を風直角方向に回転させる効果を反映しているものと考えられる。また、図7に示すように、5次規準座標のパワースペクトル密度も風直角方向の一般化風力のパワースペクトル密度と同じ無次元周波数にピークを持ち、渦放出現象と関連していることが分かる。図8(c-1)の5次の変動ねじりモーメント係数も、 $0.8H$ 、 $0.2H$ 付近で値が大きくなっている。

図8(c-2)は高次固有モードの中から、変動ねじりモーメント係数への寄与の大きい10、13、16、18次固有モードの変動ねじりモーメント係数の高さ方向分布を示したものである。風方向および風直角方向の風力は異なり、変動ねじりモーメント係数の場合は、比較的高次のモードまで寄与していることが分かる。

なお、べき指数 $\alpha=1/4$ の気流においても同様の結果が得られるが、乱れの増加によって、渦放出によるストローハル成分が変動風力のエネルギー分布に占める割合が相対的に小さくなるため、それぞれの風力成分に対する各モードの寄与の仕方や、モードの順番が異なる。

4. 風力の再合成と誤差率

各風力成分毎にいくつかの固有モードのみを組み合わせ、風力の再合成を行った。図9(a)はべき指数 $\alpha=1/6$ の場合について、各風力成分毎に再合成した波形による変動風力係数の高さ方向分布である。風方向の変動風力係数は、2、3、4次の3つの固有モードのみ、風直角方向は1、5次の2つの固有モードのみ、ねじりに関しては1、5、10、11、13、14、16、18、21、30次の10個の固有モードを選んで再合成した。比較のため原波形による変動風力係数分布も示している。風方向は2、3、4次の3個の固有モードのみを考慮するだけで、風直角方向は、1次と5次の2個の固有モードのみで原波形によるものと概ね一致している。10個の固有モードを考慮した変動ねじりモーメント係数も、原波形によるものと全体的にはほぼ一致している。図9(b)のべき指数 $\alpha=1/4$ の場合も、固有モードの組み合わせは異なるが、ほぼ同様の結果となった。卓越する2、3の固有モードのみを考慮して再合成した変動風圧の誤差分布のべき指数 $\alpha=1/6$ の例を図10(a)(b)に示した。また、図10(c)~(d)には低次の5次、10次、50次モードまでを考慮した再合成変動風圧の誤差率を示した。図11(a)~(c)には同様の条件で求めた各層毎の風方向変動風力、風直角方向変動風力およびねじりモーメントの誤差率の分布を示す。ここで示す誤差

図8 再合成された変動風力係数の高さ方向分布, $\alpha=1/6$

(a) $\alpha=1/6$ *1 1,5,10,11,13,14,16,18,21 and 31st modes *2 2,3,8,9,10,12,14,15,17 and 22nd modes
(b) $\alpha=1/4$

図9 寄与の大きい固有モードのみで再合成された変動風力係数の高さ方向分布

図10 低次の固有モードで再合成した風圧係数の誤差率分布, $\alpha=1/6$

図11 低次モードおよび寄与の大きい固有モードで再合成した変動風力係数の誤差率の高さ方向分布, $\alpha=1/6$

率とは、原波形と再合成波形の標準偏差の差の絶対値を原波形の標準偏差で除したものである。図10(a)の1, 5次固有モードのみ考慮による側面の再合成変動風圧の誤差率は、風上、風下面では大きい側面では小さい。変動風圧の誤差率が低くなる領域は図5(a)(e)の1, 5次固有モードの絶対値の大きい領域と概ね一致する。図11(b)には、1, 5次固有モードのみ考慮による風直角方向変動風力の誤差率を示されているが、上部で誤差率が低く、0.5H付近で誤差率が高くなっている。図11(b)の風直角方向風力の誤差は平均的に10%程度であり、図10(a)の側面での再合成風圧力の誤差に較べるとかなり値が小さく、空間平均の効果が表われている。図10(b)の2, 3, 4次固有モードのみによって再合成された風上、風下面の変動風圧の誤差率は、側面では大きい風上および風下面で小さい。図11(a)の2, 3, 4次固有モードのみによる風方向変動風力の誤差率は平均的に7~8%であり、図10(b)の変動風圧の誤差よりかなり小さい。図10(c)(d)(e)から分かるように考慮するモード数を増やすことにより誤差は減少し、1~50次まで考慮すると変動風圧の誤差率は、壁面端部でも10%程度となる。図11(c)の変動ねじりモーメント係数の誤差率は、図11(a)(b)の風方向風力、風直角方向風力に較べて大きく、50次までを再合成しても10%以上である。

次に再合成された風圧から直線の振動モードを仮定して算定した一般化風力波形の誤差率を表2, 3に示す。表2のべき指数 $\alpha=1/6$ の場合の一般化風力の誤差率は、空間平均の効果により層別の変動風力の誤差率により更に小さくなる。一般化風力の誤差率は風方向の2, 3, 4次固有モード考慮で9.7%, 風直角方向の1, 5次固有モード考慮で4.4%, ねじれでは10個のモードを考慮すると3.9%と小さい。表3のべき指数 $\alpha=1/4$ の結果もほぼ同様である。図12にべき指数 $\alpha=1/6$ の場合の一般化風力の再合成波形を示す。再合成は、図9の場合と同じ卓越した規準モード、つまり風方向は2, 3, 4次の3個、風直角方向は1, 5次の2個、ねじりは10個の固有モードを用いて行った。一般化風力の各成分とも原波形と殆ど一致している。図13(a)(b)は、再合成された一般化風力のパワースペクトル密度をべき指数 $\alpha=1/6$ および $1/4$ の場合について示したものである。図13(a)のべき指数 $\alpha=1/6$ の場合、風方向では前述した特定の3個の固有モード、風直角方向では2個の固有モード、ねじりは10個の固有モードを考慮することで原波形の風力の周波数特性をほぼ近似することができており、図13(b)のべき指数 $\alpha=1/4$ の場合でも同様の結果が得られている。

5. 応答解析結果

図2に示す25質点モデルに風方向・風直角方向およびねじれの3成分を外力とし、解析時間10分の時刻歴応答解析を行った。風力としては、前述の卓越した規準モードのみで再合成した風力と原波形による風力を用い、両者の結果を比較した。建物の1次固有周期は並進2方向とも5sec、ねじれ3.8secであり、減衰定数は剛性比例とし、1次を2%とした。頂部の風速は55m/sとした。図14(a)~(d)は、べき指数 $\alpha=1/6$ の場合の応答解析結果であり、変位、層せん断力、層曲げモーメント、およびねじりモーメントの高さ方向分布である。各応答結果とも原波形による応答結果と概ね一致している。表4には、べき指数 $\alpha=1/6$ の場合の頂部の風方向変動変位、風直角方向変動変位、およびねじれ角変位の最大値およびrms値と、それぞれの

表2 一般化風力の誤差率, $\alpha=1/6$

	F_x	F_y	M_z	(%)
2nd,3rd and 4th modes	9.7	—	—	
1st and 5th modes	—	4.4	—	
10 selected modes *	—	—	3.9	
lowest 5 modes	9.7	4.3	25.3	
lowest 10 modes	0.6	5.7	28.7	
lowest 50 modes	0.2	0.2	0.2	

* 1,5,10,11,13,14,16,18,21 and 31st modes

表3 一般化風力の誤差率, $\alpha=1/4$

	F_x	F_y	M_z	(%)
1st,4th and 5th modes	15.7	—	—	
2nd and 3rd modes	—	4.5	—	
10 selected modes *	—	—	1.4	
lowest 5 modes	15.8	4.0	27.0	
lowest 10 modes	10.4	5.4	6.2	
lowest 50 modes	0.8	0.2	0.1	

* 2,3,8,9,10,12,14,15,17 and 22nd modes

(a) 風方向の一般化風力係数 (2,3,4次のみで再合成)

(b) 風直角方向の一般化風力係数 (1,5次のみで再合成)

(c) ねじれの一般化モーメント係数 (選ばれた10個のモードで再合成)

図12 寄与の大きい固有モードを用いて再合成した一般化風力の波形, $\alpha=1/6$

図13 寄与の大きい固有モードを用いて再合成した一般化風力のパワースペクトル密度

表4 応答結果 (頂部), $\alpha=1/6$

	Along-Wind Displacement (cm)		Across-Wind Displacement (cm)		Torsional Angle ($\times 10^{-3}$ rad)	
	max	rms	max	rms	max	rms
original	21.3	6.67	56.6	16.82	1.07	0.25
Selected dominant modes*	22.5	6.46	53.7	15.86	1.12	0.26
Error(%)	5.6	3.1	5.1	5.7	4.8	3.4

* Along-Wind : 2nd, 3rd and 4th modes (Total 3 modes)

Across-Wind : 1st and 5th modes (Total 2 modes)

Torsional Angle : 1,5,10,11,13,14,16,18,21 and 31st modes (Total 10 modes)

(a) 変位

(b) 層剪断力

(c) 層曲げモーメント

(d) ねじりモーメント

図14 応答の高さ方向分布, $\alpha=1/6$

原波形との誤差率を示す。卓越したわずかの規準モードのみによる応答でも、原波形の応答値とはほぼ一致し、最大値の誤差はほぼ6%以下となっている。

6. むすび

高層建物に作用する変動風圧のPOD解析および応答解析によって以下に示す知見が得られた。

- 1) 風方向の変動風力には左右対称モード(例えば、ベキ指数 $\alpha=1/6$ の気流の場合、2, 3, 4次固有モード)の寄与が大きく、風直角方向の変動風力係数には、左右逆対称モード(例えば、ベキ指数 $\alpha=1/6$ の気流の場合、1および5次固有モード)の寄与が大きい。変動ねじりモーメント係数に対しても、左右逆対称モードの寄与が大きい。
- 2) 風方向および風直角方向の変動風力は、卓越した2~3個の規準モードで原波形の変動風力をほぼ近似することができるが、変動ねじりモーメントは、比較的高次の10個程度のモードまでを用いる必要がある。
- 3) 風による動的応答は、上記2)の卓越した規準モードのみによる再合成風力により、最大値の誤差を6%以下で予測することができる。

参考文献

- [1] B.E. Lee, 1975, The effects of turbulence on the surface pressure field of a square prism, *Journal of Fluid Mechanics*, 69, pp.263-282
- [2] R.J. Best and J.D. Holmes, 1983, Use of eigenvalues in the covariance integration method for determination of wind load effects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 13, pp.359-370
- [3] A. Kareem and J.E. Cermak, 1984, Pressure fluctuations on a square building model in boundary-layer flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16, pp.17-41
- [4] B. Bienkiewicz, H. Hee-Jung and Y. Sun, 1993, Proper orthogonal decomposition of roof pressure, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 50, pp.193-202
- [5] B. Bienkiewicz, Y. Tamura, H.J. Ham, H. Ueda and K. Hibi, 1993, Proper orthogonal decomposition and reconstruction of multi-channel roof pressure, *Proceedings of the Third Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering*, Hong Kong, pp.711-716
- [6] H. Ueda, K. Hibi, Y. Tamura, and K. Fujii, 1994, Multi-channel Simultaneous Fluctuating Pressure Measurement System and Its Applications, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51, pp.93-104, Elsevier
- [7] Y. Tamura, H. Ueda, H. Kikuchi, K. Hibi, S. Suganuma and B. Bienkiewicz, 1995, Proper orthogonal decomposition study of approach wind-building pressure correlation, *Proceedings of the 9th International Conference on Wind Engineering*, Vol. IV, India, pp. 2115-2126
- [8] 田村幸雄, 上田 宏, B. Bienkiewicz, 建物に作用する変動風圧力および接近流の主成分解析, *日本風工学会誌*, p37-38, 1993
- [9] 田村幸雄, B. Bienkiewicz, H.-J. Ham, 上田 宏, 日比一喜, 建物表面の変動圧力場の固有直交展開と合成, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, p1137-1138, 1993
- [10] 上田 宏, 田村幸雄, B. Bienkiewicz, 建物に作用する変動風圧力および気流の乱れの主成分解析, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, p1135-1136, 1993
- [11] 菊池浩利, 田村幸雄, 上田 宏, 日比一喜, B.ビエンキエウィッチ, 固有直交関数展開(POD解析)を用いた変動圧力場と接近流の相関の研究, *風工学シンポジウム*, p167-172, 1994
- [12] 菅沼信也, 菊池浩利, 田村幸雄, 日比一喜, 特異な条件を持つ変動風圧場のPOD解析, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, p186-186, 1996
- [13] H. Kikuchi, Y. Tamura, H. Ueda, and K. Hibi, 1996, Dynamic Wind Pressures Acting on a Tall Building Model, *Bluff Body Aerodynamics & Applications*, pp.AX13-16
- [14] 菊池浩利, 田村幸雄, 上田 宏, 日比一喜, 高層建物に作用する変動風圧の特性(POD解析), *日本建築学会大会梗概集*, p249-250, 1995年
- [15] 菊池浩利, 田村幸雄, 上田 宏, 日比一喜, 高層建物に作用する変動風圧のPOD解析, *風工学シンポジウム*, p329-334, 1996年

(1997年8月11日原稿受理, 1998年2月3日採用決定)