空力振動する三次元正方形角柱の風圧変動場の分析

日大生産工(院) ○久保田 理人 日大生産工 神田 亮 (株)大林組技術研究所 小泉 達也

1. はじめに

近年,社会的需要により構造物の多様化が進 んでいる。建築物や長大橋の更なる高層化,長 大化もその一例であり,構造物の軽量化を施す ことにより,長周期化,低減衰化が設計上の問 題となる。軽量化,長周期化した構造物を設計 するためには地震より長周期側にパワーのピー クがあり,構造物の質量に対する慣性力ではな く空気の粒子が構造物に激突することで外力が 生じる風荷重に対する性能,すなわち耐風性を 更に詳細に調べる必要がある。

構造物に作用する風圧変動場を主成分分析の 一種であるPOD解析(ProperOrthogonal

Decomposition)を用い分析することが試みら れている^(例えば1), 2)。また、空力振動現象を構造 物に作用する外力や圧力分布から検討を行った 研究が報告されている^(例えば3)。これは、ランダム 振動状態の圧力分布を風洞実験により測定し分 析した研究であるが、実験技術的にかなり難易 度が高く、限られたパラメータ、とりわけ軽量 な(密度の小さい)ものについてのデータはほと んどない。

筆者らは、構造物の空力振動現象を調べる手 法として改良型ハイブリッド空力振動法(以下, IHAT)を提案・開発した⁴⁾。この手法の一つの 特長として空力不安定振動を含む空力振動時で あっても構造物に作用する風外力のみならず, 局所的な風圧分布まで正確な応答値との相関性 をもって測定することが可能なことである。さ らに、これらは軽量で低減衰なパラメータに対 しても実施可能である。

以上をふまえて本論文は、空力振動する3次 元正方形角柱に作用する風圧変動をIHATで測 定し、その結果に対しPOD解析を行うことで、 構造物の耐風設計に関する基礎資料を提供する ことを目的とする。

2. 実験諸元及び解析諸元

2.1 実験諸元 ほぼ一様流とみなせる気流中の風直交方向に 一自由度ロッキング振動する3次元正方形角柱 を設置し、空力振動実験を行った。Fig.1に示す 実験で用いたモデルは100×100×500(幅[mm]× 奥行き[mm]×高さ[mm])、アスペクト比5の正方 形角柱である。風圧測定孔は風直交方向の2面に それぞれ1層に5点が6層で計60点の風圧測定孔 を有する。設定した振動系の振動パラメータを Table1に示す。なお、振動系のパラメータは、 質量減衰パラメータ($\delta = (\rho_s / \rho) \cdot h_s$, ここで、 δ : 質 量減衰パラメータ, ρ_s :構造物の密度, ρ :空 気の密度, h_s :減衰定数)を用いた。実験気流は 風速勾配がなく乱れ強さ0.5%以下の一様流に 近いものとした。

2.2 解析諸元

POD解析は谷口らの方法を用いた²⁾。この方 法では、対象とする現象を複素平面に展開する ことで複素共分散行列を算出する。そのため、 POD解析の拡張版と位置付けられ、POD解析を 包括し、より適応性の広いことが特徴である。 本論文では、計測された現象をより低次のモー ドへ縮約すること、また、設定した振動モデル について幅広い無次元風速に対して分析を行う ため、この方法を用いる。解析に用いる時刻歴 データは風圧測定孔60点より得られた風圧力を 下式で基準化した風力係数を用いた。

$$C_{Fn(t)} = \frac{P_{(t)}A_n}{\frac{1}{2}\rho \overline{V}^2 BH}$$
(1)

ここで, $C_{Fn(t)}$: n点の風力係数, $P_{(t)}$: 風圧力, A_n : 面積,B: 模型幅,H: 模型高さである。

11aver		1	TableT	Sinuation	arameter
2 laver			Structure	Damping	Mass-Damping
,			Density	Factor	Parameter
3 layer			[kg/m ³]	$[\times 10^{-2}]$	
4 layer		500	ρ_s	h_s	δ
C 1			15	2	
5 layer			18.3	2.0	0.1
			36.6		0.2
6 layer			54.9		0.3
	100		73.2		0.4
Fig.1 Arrangement of			91.5		0.5
Pressure Taps			109.8		0.6

Table1 Simulation Parameter

Analysis of Fluctuating Wind Pressure Field Acting on the Surface of Oscillating 3D Square Prism

Rihito KUBOTA, Makoto KANDA and Tatsuya KOIZUMI

3. 実験結果の解析

実験で得られた空力振動モデルの応答曲線お よび変動風力(変動転倒モーメント)係数を無次 元風速Vrに対してFig.2,3に示す。8=0.1の応答 曲線はVr=5付近から上昇し始めVr=10付近を 過ぎてもその上昇は収まらず、最終的に応答は 装置の可動範囲を超え測定不能となった。また, 更にVrを20まで大きくして測定を行ったが応 答は常に発散し、収まらなかった。δ=0.2も測定 不能となるVrは異なるが、同様な傾向を示して いる。これらのことから、δ=0.1、0.2ではVr=10 を過ぎても振動は収まることなく渦励振からギ ャロッピング振動のような自励的振動へ現象が 移行していると考えられる。それに対し、δ=0.3 以上では応答曲線のピークは8が小さいほど高 いVrにあるが、Vrが高くなると応答が収まる。 これらのことからδ=0.3以上では、 渦励振が発生 していると考えられる。

次に変動転倒モーメント係数であるが、δが小 さいほどピークは低いVr付近で生じる。

4. POD解析の分析

まず,典型的な渦励振が発現しているδ=0.6の Vr=9.5のデータに対し,POD解析を行った。 Fig.1に示す上から2層目の正方形断面における 1次と2次の固有ベクトルより求めた風圧分布を Fig.4に示す。各測定孔の圧力Pは,式(2)より算出 した。

$$P_{i,i} = \left| \phi_{i,i} \right| \cos(\theta_{i,i} + \theta') \tag{2}$$

ここで, P: 測定孔の圧力, φ: 複素固有ベ クトル, θ: 複素固有ベクトルの実部と虚部よ り求められた位相差, θ' = 45°×n, n=0,1,2..., 添え字i,jはそれぞれ測定孔番号,モード次数を 表わす。なお,図中の寄与率は元の風圧変動の 分散に対するj次の基準座標の分散の比とした。 1次モードは風直交方向の両面にほぼ同じ大き さで正負逆の風圧分布が常に現れる。これは, モデルに応答との位相差や卓越振動数などの条 件が揃えば,著しい共振現象を生じさせること



が想像できる。解析を行ったVr=9.5では,著し い共振現象が観察されているが,共振現象を生 じさせるであろうモード,すなわち1次モードの 寄与率が80.7%ということからも分析結果が実 現象に合致していることがみてとれる。このモ ードは,風圧分布の形状から,以下,逆対称モ ードと称する。2次モードは風直交方向の両面に ほぼ同じ大きさでしかも,正負も一致した圧力 分布が常に現れ,直交方向には,ほぼ外力が0 となるのがわかる。容易に想像できるが,この 成分によって振動は励起されない。このモード は圧力分布の形状からみて,以下,正対称モー ドと称する。注目すべきは,この2つのモードが

物理的に正反対の特性を持ち、変動成分として



5. 逆対称モードの層風力変動係数 本節では逆対称モードの分析のために,逆対 称モードの層風力変動係数に着目し分析を行 う。Fig.5は,ぞれぞれ,静止時のVr=10, 8=0.6 のVr=7, 10, 20, 8=0.1のVr=15.6における固 有ベクトルより算出した層風力変動係数,模型 の最上層左端の測定孔を規準とした位相差,風 力係数の振幅スペクトルである。

Fig.5(i)より,静止時の逆対称モードのベクト ルは中央部付近ほど大きい。次に振動時の逆対 称モードのベクトルは応答が増大していない, すなわち,ほぼ静止していると思われる領域で は,模型中央部付近ほど大きい。これは静止時 と同様な傾向を示している。応答が増大してい る領域では,逆対称モードのベクトルは模型上 層部ほど大きい。振幅の大きい上層部で大きな 空気力が発生し,また,その空気力が建物基部 からより遠い位置であることから振動を励起さ せるモーメントが大きくなり著しい発散振動が 現れる。

位相差に着目すると、Fig.5(i)より静止時で は、上層部と下層部で約20°の位相差がある。応 答が増大していない領域では、上層と下層で約 20°あり,静止時と同様な傾向を示す。応答が増 大している領域では、位相差の分布は2つに大別 できる。一つは、Fig.5(iii)に見られるように、 側面に斜めに等角度の線があり、圧力の高い場 所が時刻の経過とともに斜めに側面を通過して いる。これは、Vrが10付近で発生しており、渦 励振が発生している場合の位相分布と考えられ る。もう一つは、Fig.5(v)にみられるように、等 角度の線が側面の上下方向にほぼ垂直に分布し ている。これは, すべてVrが10を上回るところ で励起振動が発生している、すなわちギャロッ ピング振動が発生している場合の位相分布と考 えられる。この渦励振に特徴的な位相分布、ま た層風力係数が上層部で大きいということか ら、奥田らが示した三次元静止角柱の側面に形 成される逆円錐渦1)が振動時でも発達している のではないかと推測される。Fig.6は、奥田らが この逆円錐渦をスケッチしたものであるが、円 錐状の渦が斜めに通過している。上述のように Fig.5(iii)で示した等角度分布からも同様な現象 が推測できる。また、渦励振時に特徴的な位相 分布が必ず現れることから, 逆円錐渦の形成は 振動時のほうが顕著なのかもしれない。これら の逆円錐渦に関する分析については、あくまで も推測であり今後可視化実験などで確かめる必 要がある。振幅スペクトルをみると、スペクト ルのピークの周波数は渦放出周波数と同じ卓越 振動数を持つ。また,振幅の大きさは,渦励振 の発現しているVrでは非常に定常性が強いこ とを表している。

6. まとめ

IHATを用い,三次元正方形角柱の空力振動 時における風圧変動を測定しPOD解析により 分析を行った。得られた知見を以下に示す。

- 実験結果より、δ=0.1、0.2 ではギャロッピング振動、δ=0.3 以上では渦励振が発生していると考えられる。
- 固有ベクトルは、各 Vr で寄与率が高く、現象に対し支配的なモードが2つある。それらは、逆対称モードと正対称モードである。
- 3) 層風力変動係数から,静止時と応答が増大 する風速域では傾向が異なることを示し た。
- 4) 共振領域では位相差の分布性状は2つに大別できた。1つは渦励振発生時にみられる側面に斜めに等角度の線がある分布性状,もう1つはギャロッピング振動が発生していると考えられる時にみられ等角度の線が側面の上下方向ほぼ垂直に分布する性状である。渦励振時の分布性状では、奥田らが示した逆円錐渦が振動時でも発生しているのではないかと想像される。

6. 参考文献

1)B. Bienkiewicz, Y. Tamura, H. J. Ham, H. Ueda, K. Hibi : Proper orthogonal decomposition and Reconstruction of Multi-Channel Roof Pressure, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 54/55, 1995, pp. 369-381 2)谷口徹郎,谷池義人 : 変動場の組織的な構造を 評価するための複素POD解析に関する研究,日 本風工学会論文集,第4号,2006,pp.123-130 3)白石成人,松本勝,白土博通,北川雅章,平出純 一:各種矩形断面のフラッター時の圧力分布特 性,風工学シンポジウム,第8回,1984,pp.297-304 4) 西将志,神田亮:空気流体中で応答振動する三 次元正方形角柱の付加質量効果と発振風速に関 する研究,日本建築学会構造系論文集,第651 号,2010,pp.895-903

5) Y. Okuda and Y. Taniike: Conical Vortices over Side Face of a Three-Dimensional Square Prism, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.50,1993, pp.163-172

