

B-54

POD 解析を適用した空力振動する三次元正方形角柱の風圧変動場の分析

その 1 POD 解析のモードとその特徴

Analysis of Fluctuating Wind Pressure Field Acting on the Surface of Oscillating 3D Square Prism
by Means of Complex Proper Orthogonal Decomposition

Part1 Mode of POD Analysis and those Properties

○久保田理人¹, 小泉達也², 神田亮³○Rihito Kubota¹, Tatsuya Koizumi², Makoto Kanda³

This paper describes characteristics of air pressure variation field on the surface of the 3-dimensional square prism under aerodynamic vibration. The analysis is conducted by means of Proper Orthogonal Decomposition. The improved hybrid aerodynamic vibration technique is used to measure the air pressure. As a result, two typical modes, which are symmetrical mode and inversely symmetrical mode, are included in the POD mode. It is found out that the inversely symmetrical mode is a governing mode to generate the aerodynamic vibration, and in the case of generating Vortex Induced Vibration or Galloping Vibration, we can distinguish these phenomena from the information of phase angle distribution of inversely symmetrical mode.

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(Proper Orthogonal Decomposition)を用い分析することが試みられている^(例えは[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^(例えは[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.その 1 では,IHAT を用いた空力振動実験の諸元及び結果を示す.また,得られた結果に対し PO

D 解析を行い,代表的なモードとその特徴について述べる.

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.

Table1 Simulation Parameter

Structure Density [kg/m ³] ρ_s	Damping Factor [× 10 ⁻²] h_s	Mass-Damping Parameter δ
18.3	2.0	0.1
36.6		0.2
54.9		0.3
73.2		0.4
91.5		0.5
109.8		0.6

Fig.1 Arrangement of Pressure Taps

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。

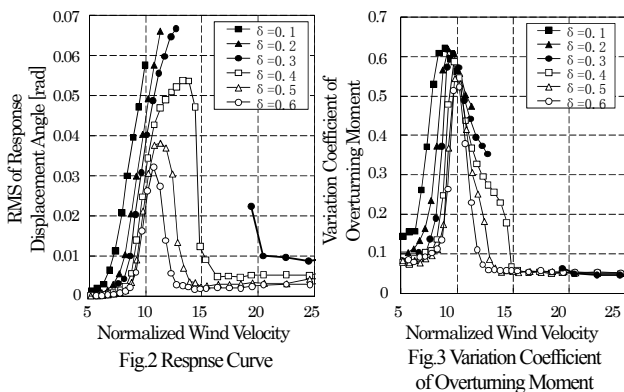
$$C_{Fn(t)} = \frac{P_{(t)} A_n}{\frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 B H} \quad (1)$$

ここで、 $C_{Fn(t)}$: n 点の風力係数、 $P_{(t)}$: 風圧力、 ρ : 空気密度、 \bar{V} : 平均風速、 A_n : n 点の負担面積、 B : 模型幅、 H : 模型高さ、 l : 模型回転中心から模型高さの中心までの距離である。

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。 $\delta=0.1$ 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。 $\delta=0.2$ 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、 $\delta=0.1, 0.2$ では $Vr=10$ を過ぎてても振動は収まることなくギャロッピング振動のような自励的振動が生じていると想像される。それに対し、 $\delta=0.3$ 以上では応答曲線のピークは δ 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 $\delta=0.3$ 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 $\delta=0.6$ 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。

$$P_{i,j} = |\phi_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} + \theta') \quad (2)$$

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、 $\theta' = 45^\circ \times n$ 、 $n=0, 1, 2, \dots$ 、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は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は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、変動成分としては、互いに独立なところである。

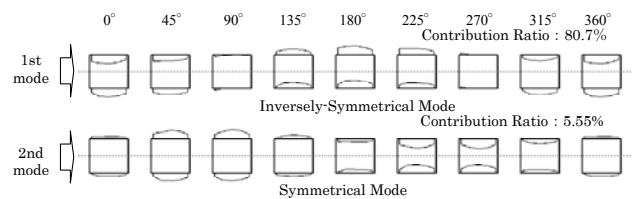


Fig.4 Wind Pressure Distribution ($Vr=9.5$)

5. 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た。POD 解析を行った。POD 解析のモードに着目した分析を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 実験結果より、 $\delta=0.1, 0.2$ ではギャロッピング振動、 $\delta=0.3$ 以上では渦励振が観測された。
- 2) 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。

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