4-25

空力振動する三次元正方形角柱の風圧変動場に関する複素 POD 解析

日大生産工(院)　○田中秀和　那須電機　西将志
日大生産工　神田亮

1. はじめに

近年，社会的需要により構造物の多様化がますます進んでいる。それらの例として，建築物や長大橋の更なる高層化，長大化やダンパーやアイソレータを有する構造物の出現などがあげられる。これらの構造物を設計するためにはその耐震性だけでなく耐風性を更に詳細に調べる必要がある。

著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，MHAT)を提案・開発した [1)]。この手法の特長の一つとして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を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があげられる。一方，角柱表面の風圧分布の特性を調べることを目的として，多変量解析における主成分分析である POD 解析による風圧変動場の分析が行われてきた [2),3),4)]。しかし，空力振動時の風圧変動場を POD 解析した例はほとんどない。

本論文では，MHAT で得られた空力振動時の風圧変動場に対し複素 POD 解析を適用することによって構造物の空力特性に関する詳細な分析を行う。

2. 実験諸元及び解析諸元

実験で用いたモデルを Fig.1 に風圧測定孔の位置を Fig.2 に示す。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。角柱は風直交方向に模型基部を回転中心とした回転 1 自由度で振動する。振動系の振動パラメータは下式で示す質量減衰パラメータ(以下：δ)を 0.6，構造物の密度を 175[kg/m^3]，減衰定数を 1.25%とした。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。

$$\delta = \frac{\rho_s}{3\rho} h_s \tag{1}$$

ここで，ρ_s：構造物の密度，ρ：空気密度，h_s：減衰定数である。

POD 解析は多変量解析の分野における主成分分析の一種であり，下式の固有値問題に帰着する。

$$[R]\{\phi\} = \lambda\{\phi\} \tag{2}$$

ここで，$\{\phi\}$及びλは固有ベクトル及び固有値であり，共分散行列$[R]$によって特徴付けられる。本解析では，共分散行列$[R]$をヒルベルト変換により複素数まで展開した時刻歴データから算出した。従って，得られる$\{\phi\}$及びλは複素数となり，実施する POD 解析は複素 POD 解析となる。

本解析では，文献 5 で使用したデータを用いる。また，共分散行列の作成は，風圧測定孔 60 点に応答変位を加えた 61 点のデータを用いた。

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

Hidekazu TANAKA, Masayuki NISHI and Makoto KANDA

3. 解析結果

3.1. 正方形断面の固有ベクトル

渦励振により応答が増大する無次元風速(以下：*Vr*)に対し複素 POD 解析を行った。なお，*Vr* は下式より算出する。

$$Vr = \frac{V}{f_s B} \qquad (3)$$

ここで，*V*：風速，f_s：固有振動数，*B*：見つけ幅である。Fig.3 に 1 次と 2 次の固有ベクトルを示す。なお，代表例として，上から 2 層目の 10 点を抜き出した。Fig.3 には 0°~360°まで 45°刻みで示した。

1 次モードは寄与率が 77.4%であり, 向かい合う面の圧力の符号が常に逆向きである。2 次モードは寄与率が 5.12%であり，向かい合う面の圧力が常にほぼ同じである。この場合の 1 次モードと同様な固有ベクトルを示すモードを逆位相モード，2 次モードと同様な固有ベクトルを示すモードを同位相モードと呼ぶことにする。

3.2. 寄与率

δ=0.6 の場合の各風速の寄与率を算出した。Fig.4 に，逆位相モードと同位相モードに分けて示す。なお，参考のために同図中には，応答曲線と変動転倒モーメント係数 (以下：C_{Lrms})も合わせて示す。

全体的な寄与率の傾向として渦励振前では，同位相モードが約 40%，逆位相モードが約 10%を示し，風速の上昇とともにやや増加する。応答が増大し始める Vr=9 を境に，同位相モードと逆位相モードの寄与率が入れ替わ

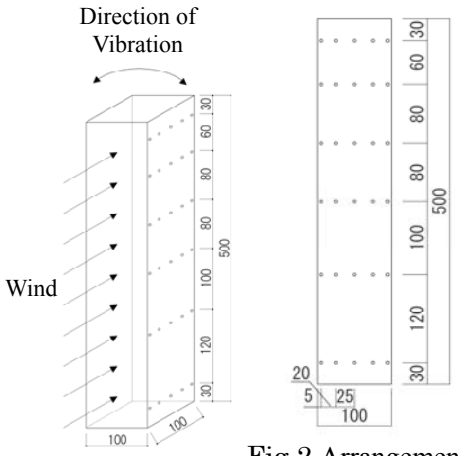

Fig.1 Model

Fig.2 Arrangement of Pressure Taps

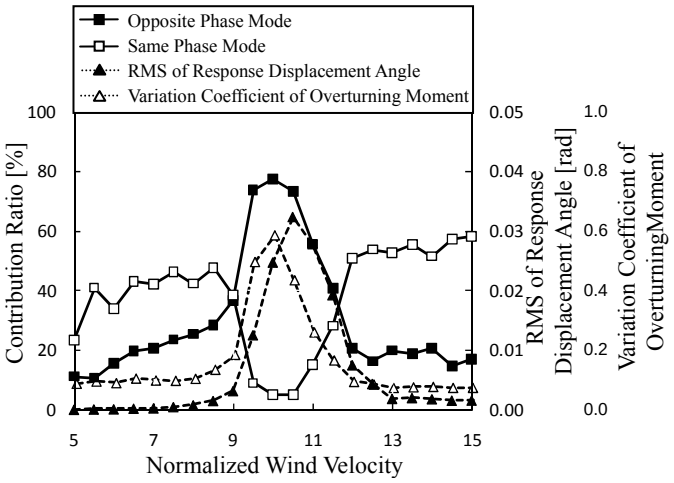

Fig.4 Contribution Ratio(δ=0.6)

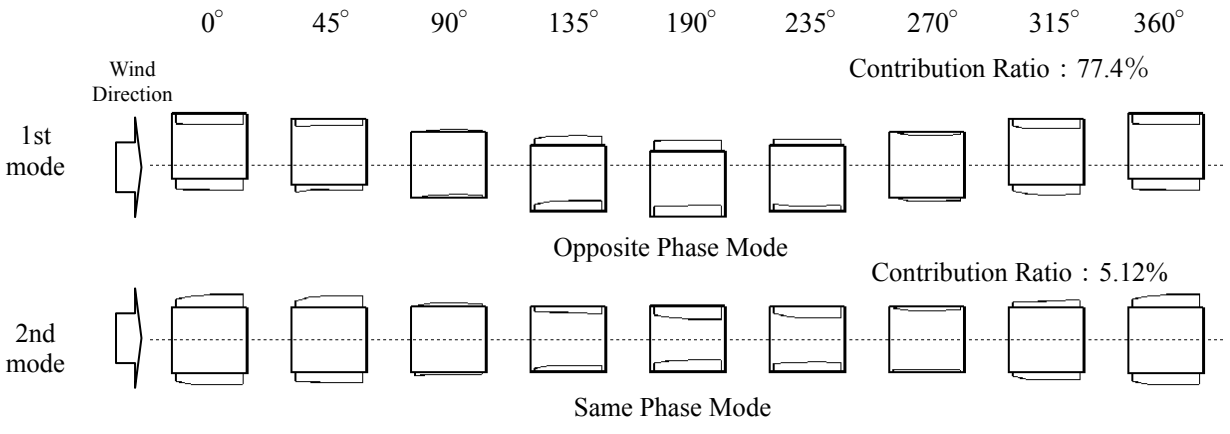

Fig.3 Eigenvector at Square Section

る。なお，このときの逆位相モードの寄与率は約 80%を示し，現象に対し支配的となる。以後の風速では，応答の収束とともに逆位相モードの寄与率も低下し，Vr=12 付近を境に再び同位相モードと逆位相モードの寄与率が入れ替わり，同位相モードが 60%，逆位相モードが 20%を示す。

ここで興味深いのは，逆位相モードの寄与率の傾向は，C_{Lrms} 曲線と同じ傾向を示している。

静止模型に作用する風圧力に対し，複素 POD 解析を行った場合，風速が変化しても常に同位相モードの寄与率が約 60%，逆位相モードの寄与率が約 20%付近を示した。また，このときの C_{Lrms} はほぼ一定値を示す。

静止時と振動時で異なることは，振動することで生じる非定常空気力が作用することである。この力により渦励振が発現している風速では C_{Lrms} が上昇する。よって，逆位相モードが C_{Lrms} と同様な傾向を示すことからも逆位相モードは非定常空気力の成分と考えられる。

3.3. 各モードの周波数特性

ここでは，各モードの周波数特性を示し，同位相モードと逆位相モードの物理的意味合いについて考察する。Fig.4 に各風速の基準座標の振幅スペクトルを逆位相モードと同位相モードに分けて示す。なお，基準座標の算出は下式の関係より行った。

$$\{a\} = [\phi]^T \{p\} \qquad (4)$$

ここで，$\{a\}$：基準座標，$[\phi]$：固有ベクトル，$\{p\}$：時刻歴の風圧データである。

逆位相モードは風速の上昇とともに卓越振動数が上昇している。この卓越振動数は C_{Lrms} の卓越振動数とほぼ同じ値を示した。このことからも，逆位相モードは物体に作用する非定常空気力の成分であると考えられる。

同位相モードは，低振動数域に卓越振動数が集まっており，逆位相モードのように明確な物理的意味合いは見出すことができないと考えられる。

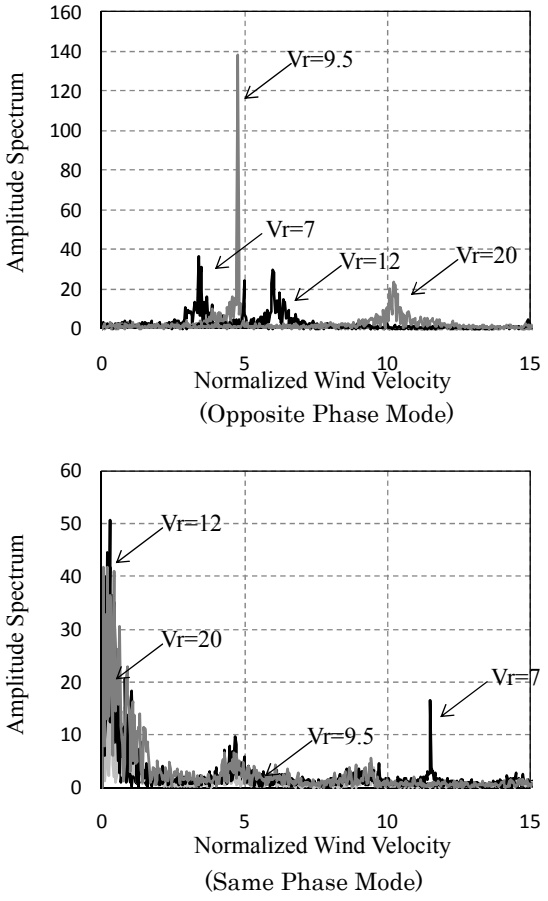

Fig.4 Frequency Characteristic

3.4. 各モードで再合成した変動転倒モーメント係数

ここでは，原波形より算出した C_{Lrms} と各モードで再合成した時刻歴波形より算出した C_{Lrms} を比較し逆位相モードと非定常空気力の関係について考察する。再合成した波形は，式(4)を用い再合成し，同位相モードと逆位相モードの 2 種類のみ再合成した。Fig.5 に同位相モードと逆位相モードの 2 つのモードを示す。なお，図中には，C_{Lrms} 曲線と C_{Lrms} 曲線から静止時の C_{Lrms} を引いたものを図中に示す。

逆位相モードのみで再合成した場合，渦励振の発現前後の風速では，C_{Lrms} の値と近い値

になり，渦励振の発現している風速では，静止時の C_{Lrms} を引いた曲線と近い値となる。このことからも，逆位相モードの成分は非定常空気力の成分と考えられる。

同位相モードのみで再合成した場合，C_{Lrms} はほぼ 0 に近い値を示し，C_{Lrms} とは関係のない成分と考えられる。

4. まとめ

MHAT により計測した正方形角柱周りの風圧変動場に対し, 複素 POD 解析を行うことで以下の知見を得た。

① 空力振動時の固有ベクトルに対し，向かい合う面の圧力の符号が常に逆向きのものを逆位相モード，向かい合う面の圧力が常にほぼ同じものを同位相モードと呼ぶこととした。

② 渦励振発現前後の風速では，静止させた角柱の風圧分布に対し行った結果と同様に同位相モードの寄与率が大きくなる。

③ 渦励振が発現する風速では，同位相モードの寄与率が低下し，逆位相モードが支配的となる。

④ 逆位相モードと C_{Lrms} は同様な傾向を示す。

⑤ 逆位相モードの振幅スペクトルは，各風速で C_{Lrms} と同じ卓越振動数となる。

⑥ C_{Lrms} と逆位相モードのみで再合成した C_{Lrms} はおおよそ近い値を示すことから，逆位相モードは非定常空気力の成分であると考えられる。

参考文献

1)神田亮 他:多点同時風圧計を組み込んだ 3 次元ニューハイブリッド空力振動実験システムの開発,日本建築学会技術報告集,第 22 号,2005.12,pp.139-144　2)田村幸雄:固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ,日本風工学会誌,第 65 号,1995,pp.33-41　3)浅見豊,寺崎浩:角柱型建物の変動風圧-複素 POD 解析による分析,大成建設技術研究所報,第 30 号,1997,pp.135-138　4)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　5)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

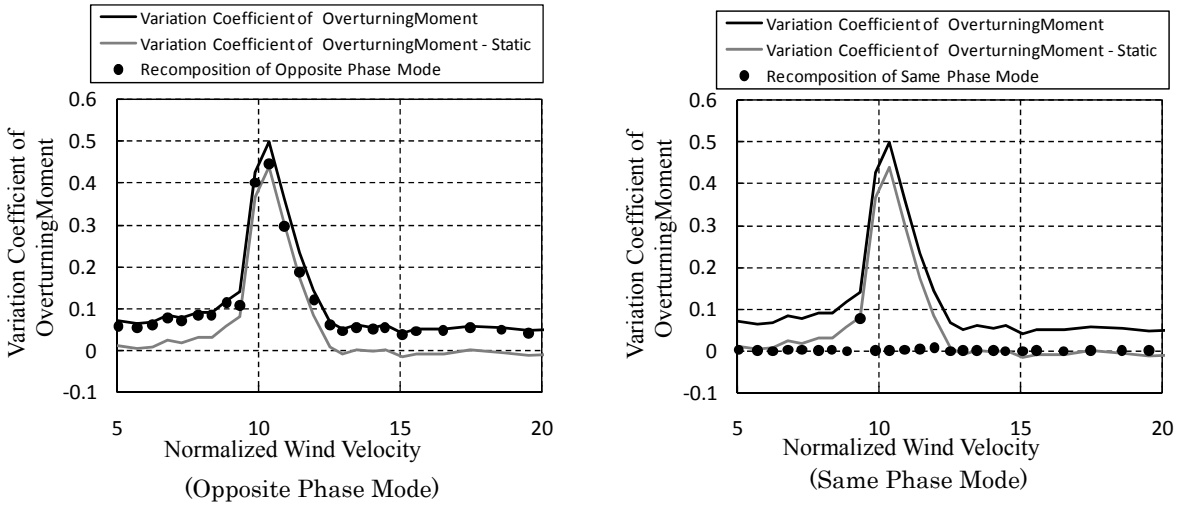

Fig.5 Recomposition Variation Coefficient of OverturningMoment