

# 空力振動する 3 次元正方形角柱の風圧変動に関する研究 (複素 POD 解析による分析)

## Study on Fluctuating Wind Pressure Acting 3-Dimensional Square Prism under Aerodynamic Oscillation (Analysis of Complex Proper Orthogonal Decomposition)

田中秀和\*<sup>1</sup>  
Hidekazu TANAKA

### SUMMARY

This paper describes an analysis of proper orthogonal decomposition, which is referred to as POD, for wind pressure field acting on a square prism in three-dimensional flow under the aerodynamic vibration. In the simulation of aerodynamic vibration, the Improved Hybrid Aerodynamic vibration Technique is applied. From the result of POD analysis, the positive symmetry mode and reverse-symmetry mode can be shown as a typical mode of POD. And reverse-symmetric mode and Variation Coefficient of Overturning Moment for the normalized wind velocity show a similar tendency, and this tendency vouches a physical effect to increase the response from the contribution rate. Wind force coefficient at each story is evaluated and the characteristics of wind pressure fluctuation are discussed. The two types of phase distribution are shown. The distributions can be distinguished from the case of vortex shedding and the case of galloping vibration. It can be imagined that conical vortex generates from the phase distribution of vortex shedding.

*key words: Proper Orthogonal Decomposition, Wind Pressure Fluctuation, Hybrid Aerodynamic Vibration Technique, Vortex Shedding, Galloping Vibration, Inverted Conical Vortex*

#### 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, また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。

構造物の耐風性能を詳しく調べるため, 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)を用いて分析することが試みられている<sup>1-3)</sup>。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<sup>4-6)</sup>。これらは, 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<sup>7)</sup>。この手法の一つの特長は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, これらは超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

\* 1 日本大学大学院生産工学研究科 大学院生

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。なお、POD 解析による結果の分析は、渦励振やギャロッピング振動など、構造物を激しく振動させる現象に着目し、その特性などを明らかにした。

## 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。実験で用いたモデルは 100×100×500(幅[mm]×奥行[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、質量減衰パラメータ  $\delta$  は下式より算出した。

$$\delta = \frac{\rho_s}{3\rho} h_s \quad (1)$$

ここで、 $\rho_s$  : 構造物の密度、 $\rho$  : 空気密度、 $h_s$  : 減衰定数である。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。

Table1 Simulation Parameter

Structure Density [kg/m <sup>3</sup> ] $\rho_s$	Damping Factor [ $\times 10^{-2}$ ] $h_s$	Mass-Damping Parameter $\delta$
18.3	2.0	0.1
73.2		0.4
109.8		0.6

### 2.2 解析諸元

POD 解析は谷口らの方法を用いた<sup>3)</sup>。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基準化した風力係数を用いた。

### 3. 実験結果の分析

実験で得られた空力振動モデルの応答曲線及び変動転倒モーメント係数を無次元風速(以下: Vr)に対して Fig.1,2 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 付近を過ぎてもその上昇は収まらず、最終的に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。このことより、 $\delta=0.1$  ではギャロッピング振動が発生していると考えられる。それに対し、 $\delta=0.4, 0.6$  では応答曲線のピークは  $\delta$  が小さいほど高い Vr にあり、各  $\delta$  とも Vr が高くなると応答が収まる。これらのことから  $\delta=0.4, 0.6$  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、 $\delta$  が小さいほどピークは低い Vr 付近で生じる。

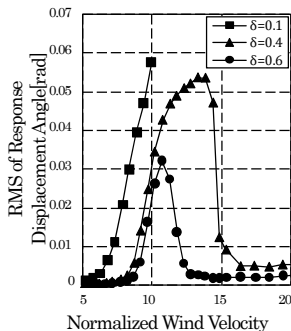


Fig.1 Respnse Curve

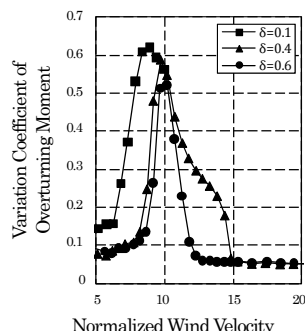


Fig.2 Variation Coefficient of Overturning Moment

## 4. POD 解析結果の分析

### 4.1 代表的なモードベクトルとその特徴

まず、典型的な渦励振が発現している  $\delta=0.4$  の Vr=9.5 のデータに対し、POD 解析を行った。模型の上から 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.3 に示す。各測定孔の圧力 P は、下式より算出した。

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

ここで、P: 測定孔の圧力、 $\phi$ : 複素固有ベクトル、 $\theta$ : 複素固有ベクトルの実部と虚部より求められた位相差、 $\theta' = \pi/4 \times n$ 、 $n=0,1,2,\dots$ 、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 82.0% ということから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、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称の特性を持ち、変動成分としては、互いに独立なところである。

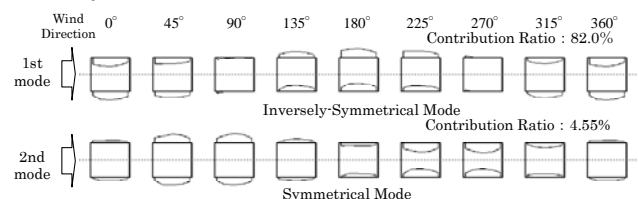


Fig.3 Wind Pressure Distribution

### 4.2 寄与率と変動転倒モーメント係数

次に、Table1 に示すパラメータ及び、模型を静止させた状態(以下: 静止時)の各 Vr について POD 解析を行った。なお、一例として Vr に対する静止時及び  $\delta=0.4$  の逆対称モードと正対称モードの寄与率を Fig.4 に示す。参考のため応答曲線と変動転倒モーメント係数を同図中にそれぞれ示す。

まず、静止時の寄与率であるが、Vr の上昇とともに徐々に増加し、Vr=10 付近から寄与率はほぼ一定値を示す。また、静止時を振動状態にある  $\delta=0.4$  と比較すると、両モードの寄与率とも応答が増大する領域では傾向が異なるが、応答が増大していない領域ではほぼ同様な傾向を示す。

次に  $\delta=0.4$  の寄与率であるが、2 つのモードともに Vr=5 付近において正対称モードが約 20%、逆対称モードが約 10% を示し、Vr の上昇に従って互いの寄与率はやや増加する。応答曲線が立ち上がった付近で逆対称モードと正対称モードの寄与率が同値を示し、大小関係が逆転する。以降、応答が増大する領域では逆対称モードの寄与率が 80% を超え、正対称モードの寄与率は 10% 以下となり逆対称モードが支配的となる。応答が収束する領域にて、寄与率の大小関係が元に戻る。さらに、以降の Vr では逆対称モードが約 10%、正対称モードが約 70% でかつ、一定値を示す。

次に変動転倒モーメント係数と逆対称モードの寄与率の比較であるが、曲線がピーク値を示す Vr の値のみならず、立ち上がるあるいはピーク値を超えて再びほぼ一定値となる Vr までも概ね同値である。これらの事実から変動風力と逆対称モードの寄与率には物理

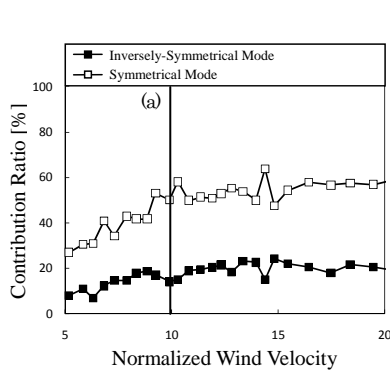


Fig.4(i) Contribution Ratio(Static)

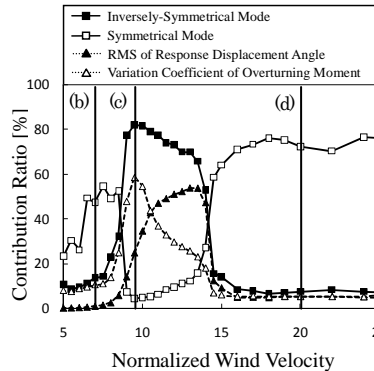


Fig.4(ii) Contribution Ratio(δ=0.4)

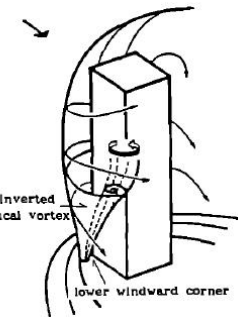


Fig.6 Sketch of Inverted Conical Vortex<sup>8)</sup>

的に何らかの関係があることが推測される。

これらの結果より応答や風力の増大と逆対称モードの寄与率の増大はほぼ同じ傾向を示し、4.1 節における逆対称モードの振動系に対する物理的効果の予測を裏付けている。

### 4.3 逆対称モードの層風力変動係数

本節では更に逆対称モードの分析を進めるため、逆対称モードの層風力変動係数に着目した分析を行う。Fig.4 の(a)~(d)における固有ベクトルより算出した層風力変動係数、模型最上層左端の測定孔を基準とした位相差、基準座標の振幅スペクトルを Fig.5 に示す。層風力変動係数の算出方法は固有ベクトルを各層で平均化した。また、基準座標のスペクトルの横軸は固有振動数で除した振動数比とした。なお、Fig.5(v)は  $\delta=0.1$ 、 $V_r=15.6$  の場合の層風力変動係数、および位相差である。振動振幅が時刻とともに常に増大するという定常的でない現象であるため振幅スペクトルは示していない。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、 $\delta$  によらず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、 $\delta$  によらず逆対称モードのベクトルは模型上層部ほど大きい。ベクトルの大きい上層部で大きな空気が発生し、また、その空気が回転中心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  $20^\circ$  の位相差がある。応答が増大していない領域では、 $\delta$  によらず上層と下層で約  $20^\circ$  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(c)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する分布である。これは、すべて  $V_r$  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(e)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する。これは、すべて  $V_r$  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、奥田が示した三次元静止角柱の側面に形成される逆円錐渦<sup>8)</sup>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、奥田がこの逆円錐渦をスケッチしたものであるが、側面上層部で流れの剥離がまず起こり、円錐状の渦が斜めに通過している。上述のように Fig.5(c)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  $V_r$  では非常に定常性が強いことを表している。

## 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。この測定データに対し POD 解析を行い、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、 $\delta=0.1$  ではギャロッピング振動、 $\delta=0.4, 0.6$  では渦励振が観測された。
- 2) 固有ベクトルは、ほとんどの  $V_r$  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) 各モードの寄与率から、逆対称モードは振動系に対して応答を増大させるという物理的効果を裏付けた。
- 4) 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。
- 5) 位相差から、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) 逆対称モードの周波数特性は、卓越振動数が渦放出周波数と同じ卓越振動数を持つこと、振幅の大きさは、共振領域では非常に定常性が強いことを示した。

本論文における一連の分析は、すべて POD 解析のモードに着目して行った。逆対称モードや正対称モードの存在や、渦励振時、ギャロッピング振動時における典型的な位相分布などを示すことができた。この結果は POD 解析の有用性を空力振動現象の分析に活かした一例であることを示すことができた。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 小林定夫, 小林絨士: 調和振動中の正方形断面角柱に作用する動的圧力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第278号(1978), 10, pp.15-23
- 5) 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
- 6) 須田健一, 鶴見俊雄: 高層建築物の振動時における風圧-風力性状について, 風工学シンポジウム, 第15回(1998), pp.323-328
- 7) 松山哲雄, 神田亮, 平田和也, 名波航, 丸田栄蔵: 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), pp.139-144
- 8) 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

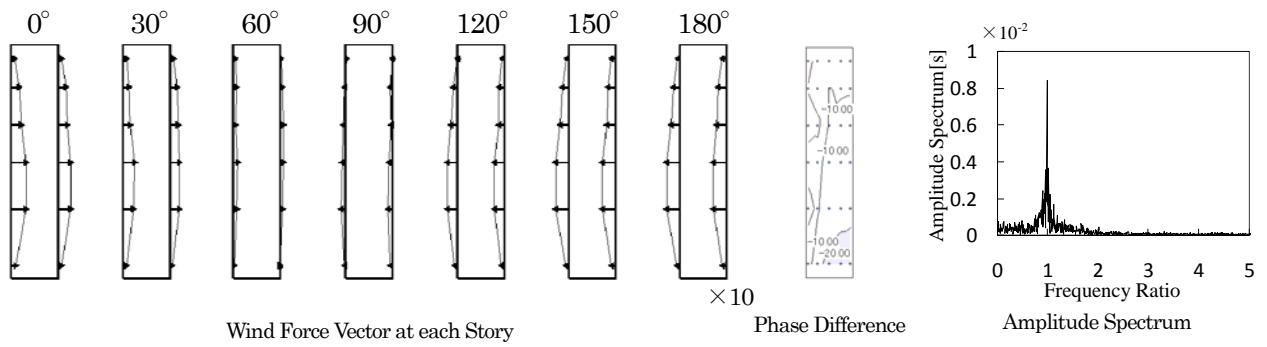


Fig.5(i) Wind Force Vector and Amplitude Spectrum at (a)point (Static Vr=10)

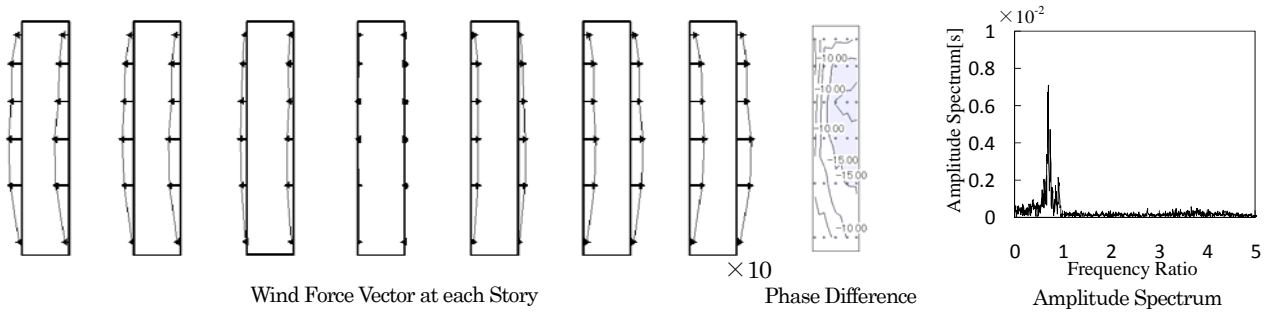


Fig.5(ii) Wind Force Vector and Amplitude Spectrum at (b)point ( $\delta=0.4$  Vr=7)

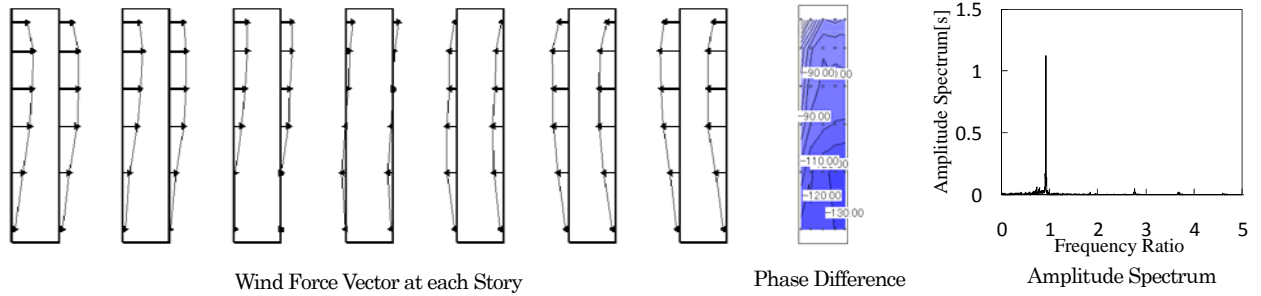


Fig.5(iii) Wind Force Vector and Amplitude Spectrum at (c)point ( $\delta=0.4$  Vr=9.5)

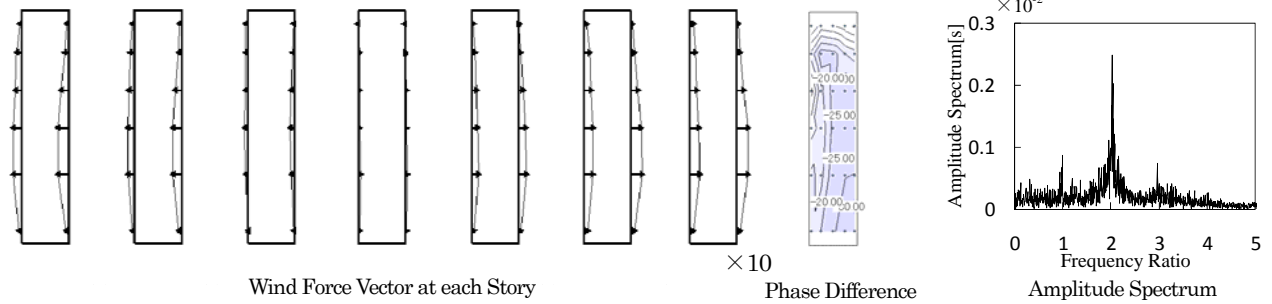


Fig.5(iv) Wind Force Vector and Amplitude Spectrum at (d)point ( $\delta=0.4$  Vr=20)

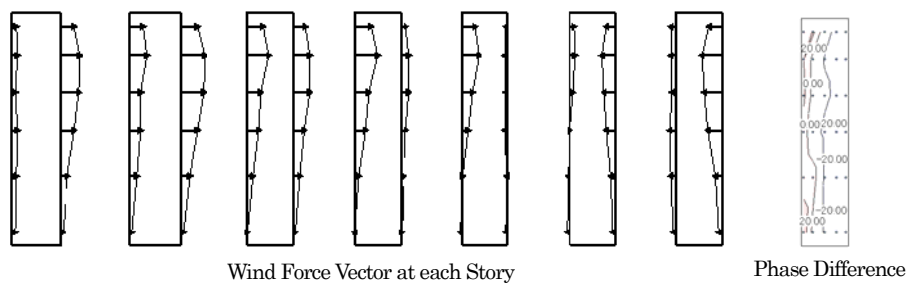


Fig.5(v) Wind Force Vector ( $\delta=0.1$  Vr=15.6)