

前縁隅角部に曲率を有する断面の応答特性と表面圧力特性

AEROELASTIC RESPONSES AND SURFACE PRESSURE OF SQUARE PRISMS WITH ROUNDED CORNERS

河村進一*, 久保喜延**, 山口栄輝***

Shin-ichi KAWAMURA, Yoshinobu KUBO and Eiki YAMAGUCHI

*工修 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (〒804 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

*** Ph.D 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

The aim of this paper is to investigate the influences of roundness of windward corners on the aeroelastic responses and the surface pressure of a square prism. Wind tunnel tests were carried out to measure the aeroelastic responses and surface pressure of a two-dimensional square prism with changing the radius of curvature, R , of windward corners. The main results obtained in this study are as follows: 1) The galloping is not observed for the prism with $R/B \geq 0.3$. 2) For the prism with $R/B \geq 0.3$, unsteady pressure of side surface acts as damping force. 3) Drastic change of the distribution of surface pressure was observed in the range of R/B between 0.2 and 0.3.

Key Words: rounded corner, square prism, galloping, aeroelastic response, surface pressure

1. はじめに

橋梁の主塔や高層建築物などの塔状構造物は、長大化あるいは高層化に伴い、剛性の低い柔構造となるため、渦励振やギャロッピングなどの空力弾性振動が問題となる。このような振動を抑制するためには、構造的な制振だけでなく振動の原因となる空気力を低減させることが重要となってくる。

矩形断面を有する構造物では、隅切りや隅欠きなどの隅角部の形状を変化させることが、空気力を低減させることに對して有効であることが、これまでの多くの研究によって明らかにされている^{1)~5)}。著者らも、正方形角柱の隅角部にローターを取り付け、これを回転させることにより境界層を制御する空力的アクティブ制振法に関する研究を行ってきたが、三次元弾性模型を使用した応答実験により、ローターを回転させない場合、すなわち、隅角部に曲率を持たせた場合でも制振効果が期待されることを報告した⁶⁾。また二次元模型を用いてその隅角部に丸みをつけ、曲率半径を変化させて応答測定を行い、前縁隅角部の曲率半径を大きくすることによって、ギャロッピング特性が変化することを確認した⁷⁾。しかし、そのメカニズムを解明

するところまでには至っていない。

そこで本研究では、二次元柱の前縁隅角部の曲率半径を変えてたわみ 1 自由度応答測定と、表面圧力測定を行い、前縁隅角部の曲率半径の違いがギャロッピング特性に与える影響について検討する。

2. 風洞実験概要

本研究で使用した風洞は、九州工業大学所有の空力弾性試験用風洞(ゲッチンゲン型、測定部断面 1070×1070mm)および境界層波浪風洞(吸い込み式エッフェル型、測定部断面 1800mm×1100mm)である。

応答測定および圧力測定で同一供試模型を用いた。その基本形状は、図-1 に示すような一辺の長さ $B=100\text{mm}$ 、長さ $l=782\text{mm}$ の正方形角柱である。その前縁隅角部の曲率半径は $R=0, 5, 10, 20, 30, 40, 50\text{mm}$ (無次元曲率半径 $R/B=0\sim0.5$) の 7 段階に変更できるようにしてあり、中央部断面には、図-2 に示すように圧力測定孔を配置している。

応答測定、圧力測定ともに一様流中で迎角 $\alpha=0^\circ$ について行った。バネ支持によるたわみ 1 自由度振動系の諸元は、模型重量 $W=3.04\sim3.41\text{kgf}$ 、固有振動数 $f=2.51$

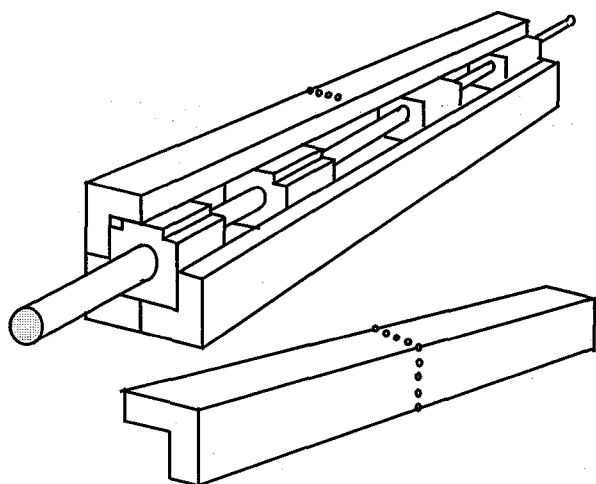


図-1 供試模型

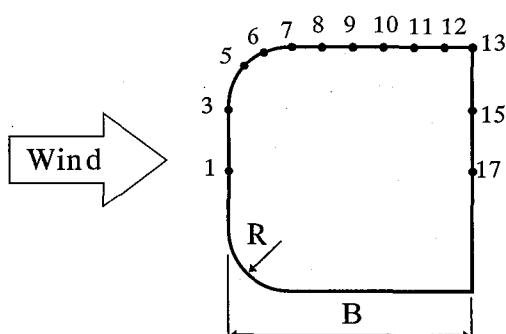
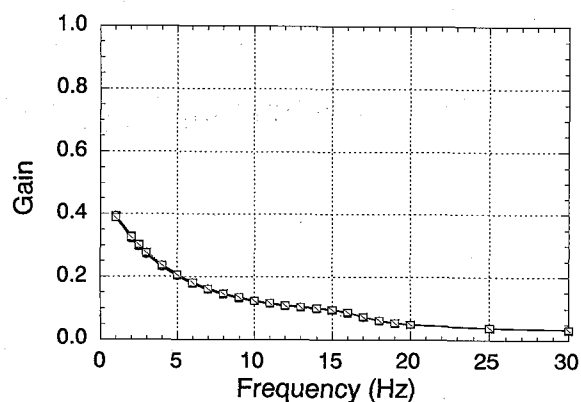


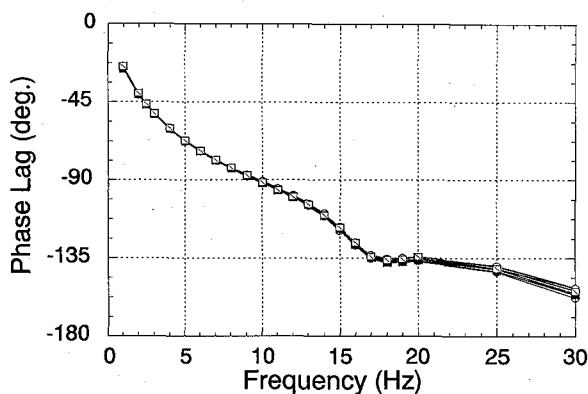
図-2 圧力測定孔配置図

～2.57Hz, 対数構造減衰率 $\delta=0.0028\sim0.0033$, スクルートン数 $Sc=2.0\sim2.3$ であった.

圧力測定は風速 $V=1.25\sim15.0\text{m/s}$ ($Re=8.5\times10^3\sim1.0\times10^5$) で模型静止状態および強制加振状態にて行った. なお強制加振状態では, 発振風速前後の特性を精度良く求めるために, 加振振動数を $f=5.0\text{Hz}$ とした. また, ギャロッピングのメカニズムを検討するにあたっては, 微小振幅に対する非定常圧力特性を知ることが重要であると考え, 無次元倍振幅を $2A/B=0.1$ とした. 圧力測定孔は, 導圧チューブおよび電磁弁によって制御される切替え装置を介して, リラクタンス型差圧センサ (司測研 P7D $\times$ 10 台) に接続されており, 最大 10 点の同時測定が可能である. 得られたアナログデータはパソコン上の A/D 変換ボードによってデジタル変換し, サンプル周波数 100Hz, サンプル時間 90 秒の時系列データとして保存した. また, 導圧チューブによって生じる圧力波形の伝達特性は, 入力波の振幅には依存せず, 周波数のみに依存することが確認されたので, あらかじめ測定された導圧チューブの圧力伝達特性(図-3)を用いて, 周波数に応じた補正を行なった.



(a)振幅比



(b)位相差

図-3 導圧チューブの圧力伝達特性

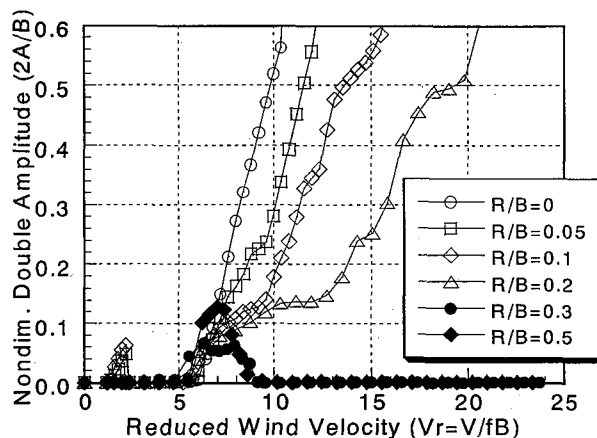
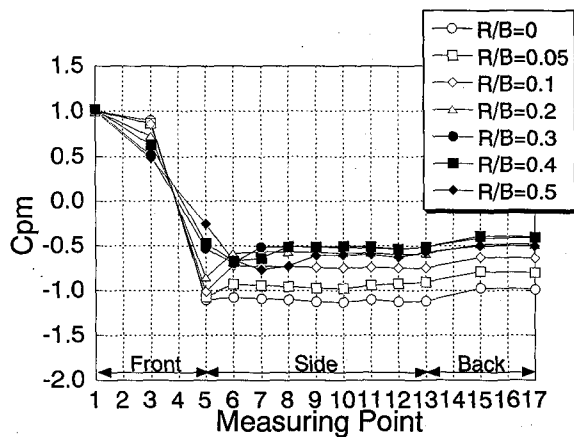


図-4 応答測定結果

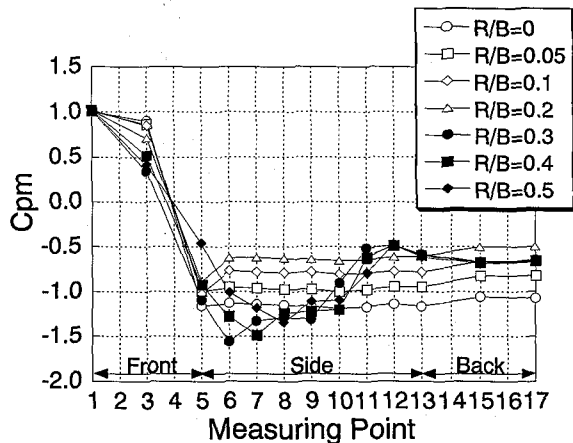
3. 実験結果および考察

3.1 たわみ1自由度応答特性

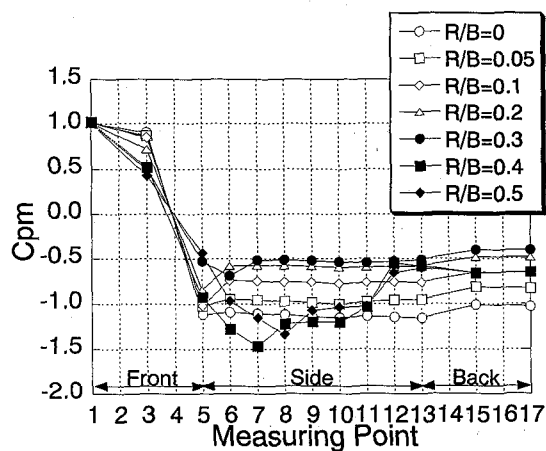
図-4 に応答測定結果を示す. 基本断面である $R/B=0$ では, 換算風速 $Vr=6$ 付近から応答振幅が急激に増加してギャロッピングが発生しているが, R/B が増加するに従って, 応答曲線の勾配が緩やかになっている.



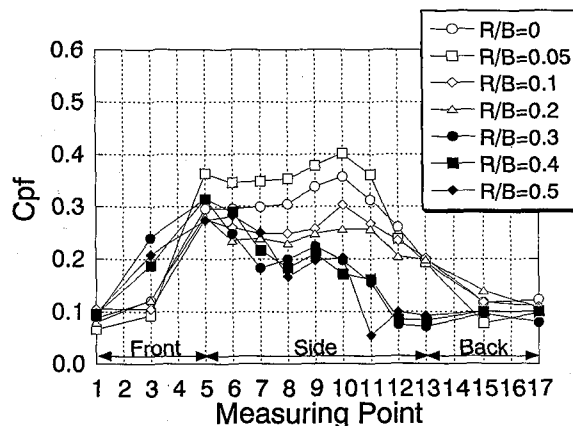
(a) $V=3.75\text{m/s}$



(a) 平均圧力係数



(b) $V=5.0\text{m/s}$



(b) 変動圧力係数

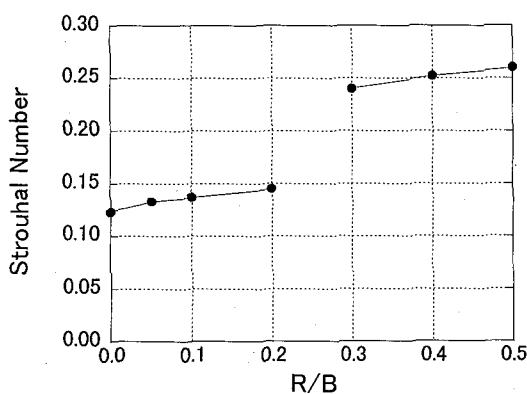
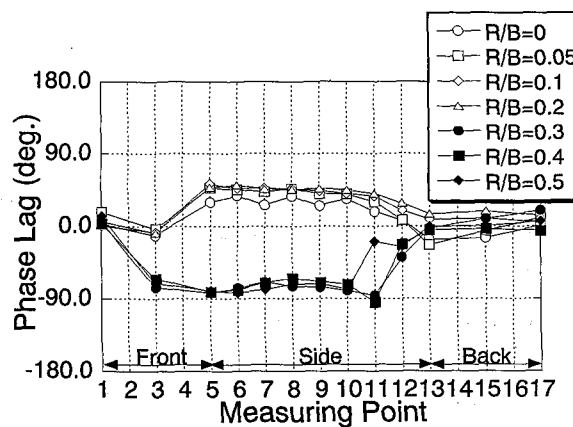


図-6 ストローハル数



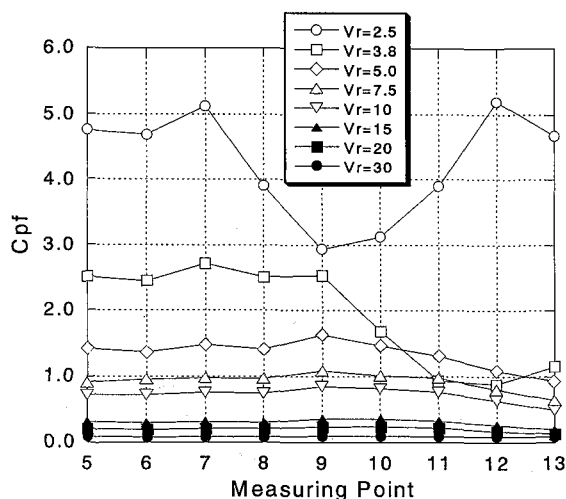
(c) 位相差

図-7 非定常圧力特性($V_r=15$)

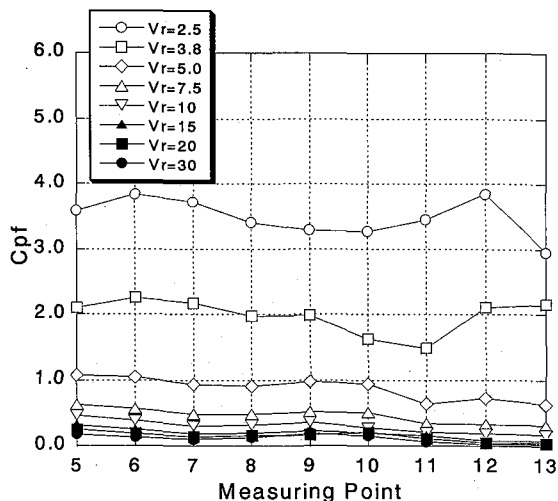
$R/B \geq 0.3$ では、測定された風速範囲内ではギャロップは発生せず、 $V_r=7$ 付近で最大振幅 $2A/B=0.1$ 程度となる比較的小さい振幅の渦励振のみが生じている。また、 $R/B=0.05$ と 0.1 では $V_r=2$ 付近で $2A/B=0.07$ 程度の小振幅の渦励振を生じている。

3.2 静止状態における表面圧力特性

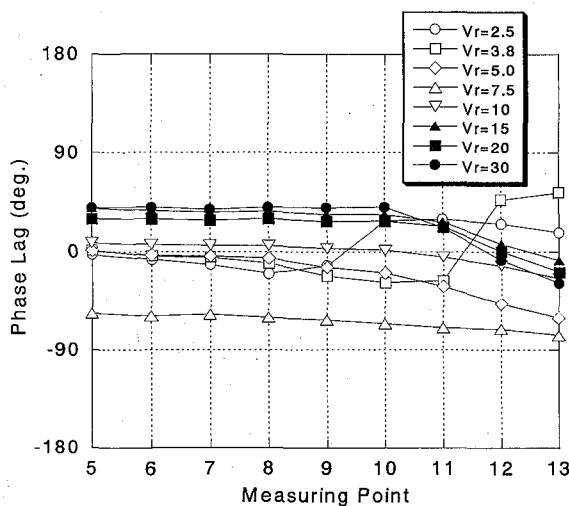
静止状態における平均圧力係数 C_{pm} の分布を図-5に示す。風速 $V \leq 3.75\text{m/s}$ では、 C_{pm} は、前縁隅角部で最も低圧になり、側面および背面(測点 5~17)にお



(a)変動圧力係数

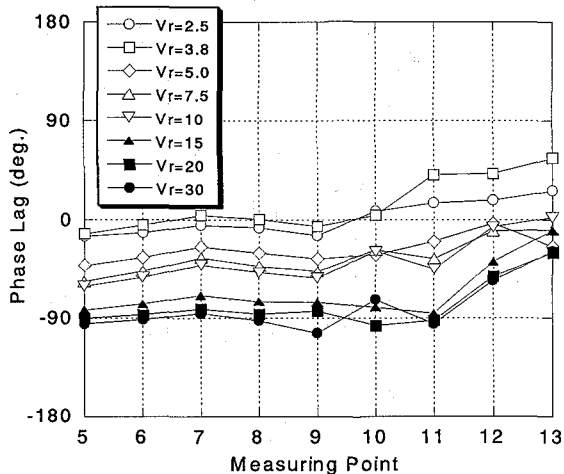


(a)変動圧力係数



(b)位相差

図-8 非常圧力特性(R/B=0)



(b)位相差

図-9 非常圧力特性(R/B=0.3)

いてほぼ一定になっている。また、側面および背面の負圧は、 R/B が増大するほど減少している。しかし、風速 $V \geq 5.0 \text{ m/s}$ では、 $R/B \leq 0.3$ は $V \leq 3.75 \text{ m/s}$ と同じ圧力係数分布となっているが、 $R/B \geq 0.4$ は側面上流側での負圧が増大し、後縁付近で圧力の回復がみられる分布となり、分布形状の違いが明確に現れる結果となった。これは隅角部の曲率半径が小さい断面では剥離点が前縁隅角部に固定されているため、供試体周りの流れに変化が起こりにくいに対して、隅角部の曲率半径が大きい断面ではレイノルズ数の変化により剥離点の移動が生ずるためであると考えられる。

また、表面圧力から得られた風速 $V = 5.0 \text{ m/s}$ ($Re = 3.5 \times 10^4$) においてストローハル数は図-6 のように、 $R/B = 0.2 \sim 0.3$ の間で急変しており、 $R/B \leq 0.2$ では正

方形角柱に近い特性を有しているが、 $R/B \geq 0.3$ では前縁隅角部の曲率半径の影響が顕著に現れているといえる。

3.3 強制加振状態における表面圧力特性

まず、ギャロッピング発現の有無が明確に現れる換算風速 $Vr = 15$ における平均圧力係数 C_{pm} 、圧力変動の強制加振振動数成分 C_{pf} 、圧力と変位との位相差の分布を図-7に示す。これらの特性は $R/B \leq 0.2$ と $R/B \geq 0.3$ で異なることが分かる。

図-7(a)より C_{pm} が、 $R/B \leq 0.2$ では側面全域で平坦な形状となるのに対して、 $R/B \geq 0.3$ では、側面下流側にあたる測点 12 付近で圧力の回復がみられる分布となり、強制加振状態と静止状態とでほぼ同じ分布を

示す。しかし、 $R/B=0.3$ は静止状態においては側面で平坦な圧力分布を示すのに対し、強制加振状態では、後縁付近で圧力が回復しており、前縁隅角部から剥離した流れが側面で再付着していることを示している。

また図-7(b)より、 C_{pf} は前面および背面では全ての R/B において小さい値をとるが、側面では $R/B \leq 0.2$ の場合、ほぼ全域において大きい値をとり $R/B \geq 0.3$ の場合、後縁付近の測点 10~12 において C_{pf} は小さくなっている。ここで R/B と C_{pf} の大きさに着目すると、 R/B が小さいほど側面の C_{pf} は増大する傾向にあることがわかる。

さらに図-7(c)を見ると側面の位相差は $R/B \leq 0.2$ では、位相差は正であり、 $R/B \geq 0.3$ では側面全域においてほぼ -90° となっている。ここで模型上下面の圧力差が変動揚力に相当することから、位相差が $0^\circ \sim +180^\circ$ の場合には、その測点において振動を励起するような力が働き、 $-180^\circ \sim 0^\circ$ の場合には模型に減衰力が作用することを示している。

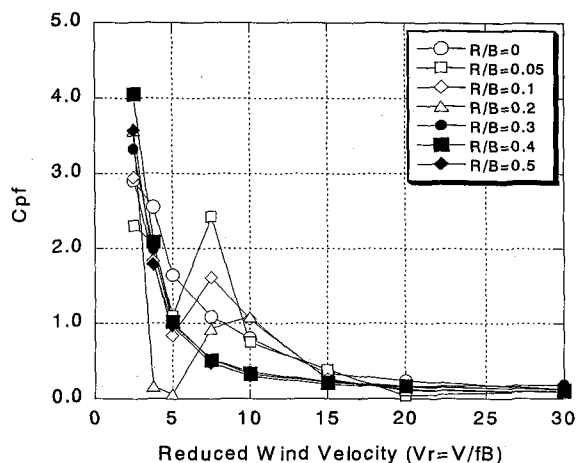
次に、換算風速による変化を見るために、 $R/B=0$ と $R/B=0.3$ の模型側面での C_{pf} および位相差の分布を図-8、図-9に示す。

基本断面である $R/B=0$ では、換算風速 $V_r=2.5$ で C_{pf} が測点 7 と 12 の 2 点で極大となり、測点 9 で極小値をとる。また、位相差についてみると、測点 9 より上流では平坦な分布を示すが、測点 9 と 10 の間で負から正に変わり、測点 9 付近で再付着していることを示している。 $V_r=3.8$ では測点 12 で C_{pf} が極小となり、位相差も測点 11 と 12 の間で急変し、 V_r の上昇とともに再付着点が下流側へ移動していることが分かる。さらに V_r を上げると、再付着の様相を示さなくなり、位相差の符号は側面全域において負となる。共振風速付近の $V_r=7.5$ で位相の遅れが最大になり、非定常圧力は強い制振力を持つことを示すが、 $V_r=10$ で位相差が側面全域でほぼ 0° になった後、 $V_r \geq 15$ では位相差が正に変わり、励振力が働くようになる。このように $R/B=0$ では、共振風速付近で位相差が換算風速によって複雑に変化している。このような C_{pf} や位相差の変化は、溝田・岡島の実験結果⁹⁾とよく一致している。

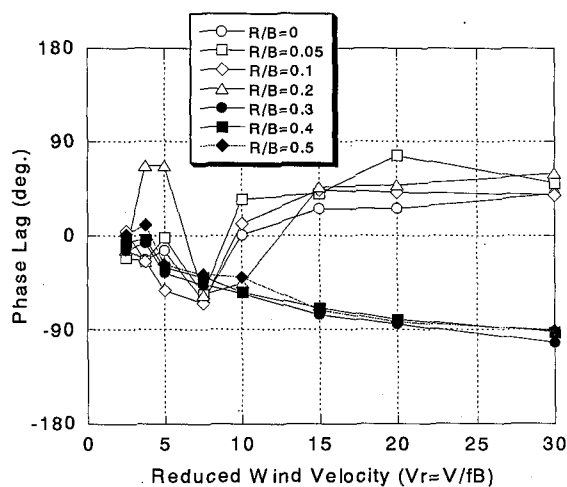
$R/B \geq 0.3$ では R/B による変化はほとんどなく、 C_{pf} 、位相差ともに、 V_r の上昇に伴って両者ともに単調に減少し C_{pf} は 0 に、また位相差は -90° に漸近していく。

3.4 応答特性と圧力特性との相関

ここでは、圧力測定結果から推定される応答と応答測定結果とを比較してみる。そこで全ての R/B において換算風速 V_r の変化による非定常圧力特性を知るために、図-10に角柱側面中央にあたる測点 9 の C_{pf} と



(a)変動圧力係数



(b)位相差

図-10 非定常圧力特性(測点 9)

位相差を示す。模型側面において位相差がほぼ平坦な分布を示していることから、測点 9 における圧力特性は側面全体の特性を表していると考えられる。

この図より、 $R/B \geq 0.3$ では C_{pf} 、位相差ともに換算風速の上昇にしたがって単調に減少し、位相差が -90° に漸近することにより常に減衰力が働いていることが分かる。図-4 の応答測定結果からも $R/B \geq 0.3$ では無次元倍振幅 $2A/B > 0.1$ となるような振幅は現れていない。

応答測定においてギャロッピングが発現した $R/B \leq 0.2$ について調べて見る。 C_{pf} は V_r の上昇に対して $R/B=0$ では単調に減少しているが、 $0.05 \leq R/B \leq 0.2$ では共振風速域付近である $V_r=7.5$ で極大値をとり、その後減少するような傾向にある。また、位相差は低換

算風速域で負であるが、 $V_r=7.5$ で極小値をとったあと、 $V_r \geq 10$ では位相差が正になることによって、励振力として作用するため、ギャロッピングが発生することを示し、応答測定結果と一致する。しかし、細かく見ると応答実験では $R/B=0$ は $V_r=7.5$ の場合に無次元倍振幅 $2A/B=0.15$ の応答があるにもかかわらず、図-8からは位相差が側面全域で負であり、強い減衰力として働くことを示しており、応答測定結果との差が生じている。

自励振動的特性を顕著に有するギャロッピング域に相当する高換算風速域では、非定常圧力の位相差と応答変位との関係は良く一致している。しかしながら、共振風速付近では、応答特性を非定常圧力の加振振動数成分の振幅と位相差から推定することは困難であることが分かる。その原因として、応答特性に対して加振振動数成分の寄与よりも、ストローハル成分等の寄与が大きいたことが考えられる。このことについては更なる検討を行う予定である。

4. まとめ

二次元正方形角柱を基本断面として、前縁隅角部に丸みを持たせその曲率半径を変化させて、たわみ1自由度応答実験および表面圧力測定を行い、次のような知見を得た。

- ① $R/B \geq 0.3$ では測定された風速範囲内ではギャロッピングは発生しない。これは非定常圧力の位相差が側面で負であることから確認できる。
- ② 模型静止状態の平均圧力分布において $R/B \geq 0.3$ ではレイノルズ数の影響が顕著に現れる。
- ③ $R/B=0.3$ 以外のケースでは模型静止状態の平均圧力分布と高換算風速における強制加振状態での平均圧力分布は一致する。
- ④ ストローハル数は R/B が 0.2 と 0.3 の間で急変

する。

- ⑤ 非定常圧力特性は $R/B \geq 0.3$ ではほとんど変化しない。
- ⑥ 非定常圧力測定結果からの応答推定は共振風速付近では困難である。

参考文献

- 1) 白石成人, 松本勝, 白土博通, 石崎浩, 長田信, 松井俊彦: 隅切による矩形断面の空力安定化効果, 第9回風工学シンポジウム論文集, pp.193-198, 1986.
- 2) 河井宏允: 高層建築物の渦励振, ギャロッピング, フラッター, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp.267-272, 1992.
- 3) 河井宏允, 高口真, 中村孝行: 超高層建築物の渦励振に及ぼす隅の形状の効果, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp.281-286, 1994.
- 4) 天野輝久: 一様流中における三次元正四角柱の渦励振およびギャロッピングに及ぼす隅欠き・隅切の効果, 日本建築学会構造系論文集, 第478号, pp.63-69, 1995.
- 5) 田村哲郎, 宮城哲矢: 超高層建築物に作用する空気の低減効果に関する基礎的研究, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp.365-370, 1996.
- 6) 久保喜延, V.J.モディ, 小坪千野, 加藤九州男, 山口栄輝: 動く表面を用いた境界層制御による塔状構造物の空力弾性振動に対する制振, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.823-828, 1995.
- 7) 久保喜延, 山口栄輝, 河村進一, 藤浩二郎, 林田宏二: 円形隅角部を有する正方形角柱の空力特性, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp.281-286, 1996.
- 8) 溝田武人, 岡島厚: 振動する角柱まわりの流線と非定常流体力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第327号, pp.49-60, 1982.

(1997年9月26日受付)