

# 前縁隅角部に曲率を有する断面の空力特性 に関する風洞実験および数値流体解析

河村進一<sup>1</sup>・久保喜延<sup>2</sup>・山口栄輝<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>3</sup>正会員 Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

本論文は、矩形断面柱の隅角部に曲率を与えた断面を対象として、渦励振・ギャロッピング等の空力不安定振動の安定化、空気力の低減効果について風洞実験および数値流体解析を行って検討するものである。問題を簡単にするために、空力特性の変化に対して効果の大きいと考えられる前縁のみに曲率を与えた二次元角柱を対象とし、その曲率半径による空力特性の変化に着目している。既報では二次元流体解析により、剥離せん断境界層内の流れが変化することを報告した。本報では三次元流体解析を行い、二次元・三次元解析と実験結果とを比較し、空力特性に対する検討を行った。また、タフト法によって角柱側面近傍の流れの可視化を行い、周辺流れの三次元性に関する検討も行った。

*Key Words: rounded corner, square prism, three dimensionality, flow simulation*

## 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剥離点が前縁に固定されるため、隅切りや隅欠きなどによって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対して有効であることが明らかにされ、多くの研究がなされている。隅角部に丸みを与えた形状に関して、河井らは三次元角柱に対して比較的小さいサイズの形状変更で、スクルートン数を変えて応答実験を行い、その曲率が大きいほど空力的に安定することを示している<sup>1)</sup>。また田村・宮城は一樣流中および乱流中で迎角を変えて、二次元・三次元角柱の静的空気力測定を行っている<sup>2)</sup>。

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、その中で

塔状構造物を模擬した三次元弾性模型による応答測定により、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においても制振効果が期待されることを報告した<sup>3)</sup>。その後、二次元模型を用いて曲率を与える位置および曲率半径を変化させて応答測定を行った結果、二次元模型と三次元模型との違い、曲率を与える位置やその大きさにより、かなりの差を生じることが明確になった<sup>4)</sup>。しかしながら、このような隅角部形状の変化による空力特性の変化のメカニズムについては明らかにされていない。

そこで、実際の橋梁主塔や高層建築物とは異なるが、メカニズムについての検討を行うために、空力的安定化効果が高いと考えられる前縁隅角部のみに曲率を与えた角柱を対象として、風洞実験を行った。その結果、無次元曲率半径  $R/B=0.2$  ( $R$ :曲率半径,  $B$ :代表長さ) で空力特性が大きく変化することが確認された<sup>5)</sup>。これに対して二次元数値流体解析を行い、 $R/B=0.2$  において剥離せん断境界層内の流れの挙動に変化が起ることを示したが、二次元解析結果において  $R/B=0.2$  では平均圧力分布が実験とは異なっていた<sup>6)</sup>。このような二次元解析と実験との差の原因として、二次元解析で取り入れること

ができない三次元的な流れの影響が考えられた。

本論文では、 $R/B=0$  (すなわち正方形) および  $R/B=0.2$  の断面について三次元解析を行うことにより、実験と数値解析から得られる空力特性の違いについて考察を加えた。さらにタフト法による流れの可視化実験を行って、前縁隅角部の曲率半径に対する模型表面近傍の流れの三次元性を明らかにした。

## 2. 風洞実験概要

### (1) 使用模型および風洞

実験に使用した模型の基本形状は、図-1 に示すような辺長  $B=100\text{mm}$ 、長さ  $l=782\text{mm}$  の正方形角柱であり、隅角部の部材を交換することによって、曲率半径を変更することができるようにしている。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  $1780 \times 910\text{mm}$ )である。実験は一樣流中で迎角  $0^\circ$  について、風速  $V=1.25 \sim 10\text{m/s}$  ( $Re=8.5 \times 10^3 \sim 6.5 \times 10^4$ ) で行った。また、模型端部からの流れの回り込みや風洞壁の境界層による影響をなくすため<sup>7)</sup>に模型端部に  $300\text{mm} \times 300\text{mm}$  の正方形の端板を、模型支持部より後方の風洞壁に二次隔壁を設置した。

### (2) 流れの可視化実験

周辺流れの三次元性を確認するために、タフト法による流れの可視化を行った。可視化に使用したタフトは長さ  $20\text{mm}$  の絹の刺繍糸で、模型中心線上 ( $X=0\text{mm}$ ) 側面より高さ ( $Y=3.5\text{mm}$ ) の位置に張られた直径  $0.3\text{mm}$  のステンレスワイヤーに  $20\text{mm}$  間隔で設置した。撮影はビデオカメラを使用して、シャッタースピード  $1/2000$  秒で行ったが、模型全体の撮影をすることが困難であったため、撮影範囲を模型表面中央部から片側のみ ( $Z=0 \sim 300\text{mm}$ ) とした。図-2 にタフトの設置位置と撮影範囲を示す。実験によって得られたビデオ画像は、画像処理装置によって二値化しながら  $1/30$  秒間隔で  $8$  秒間取り込み、各画素ごとに論理積演算による重ね合わせを行うことにより、タフトの振れが明瞭になるようにした。

### (3) 空気力・表面圧力測定

数値解析値との比較のために模型静止時の静的空気力および表面圧力の測定を行った。静的空気力は、模型両端を三分力天秤で支持して支持部のひずみを動ひずみ計によって検出している。また、表面圧力は、模型中央部断面に設置した圧力測定孔より模型内に埋め込まれた導圧チューブを介して、風洞外部に設置した差圧センサ (Scanivalve 社製 ZOC 17/8Px) によって測定した。圧

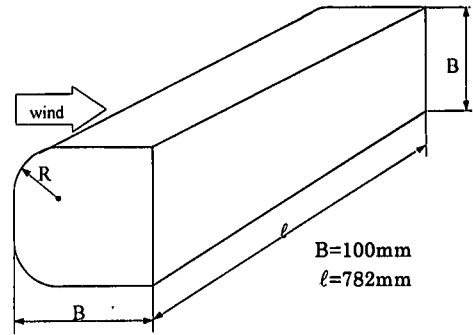


図-1 模型形状

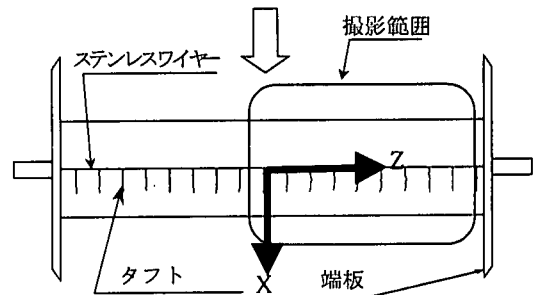


図-2 タフト設置方法と撮影範囲

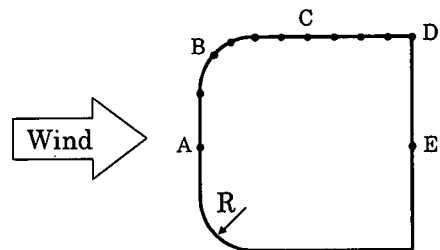


図-3 圧力測定点の配置

カタップは図-3 に示すように、 $12$  箇所配置している。実験によって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、サンプリング周波数  $500\text{Hz}$ 、サンプリング時間  $33$  秒の時系列データとして記録した。これまでの研究により隅角部に曲率を有する断面では、レイノルズ数依存性があることが確認されている<sup>8)</sup>ので、本論文では数値解析と同じレイノルズ数  $Re = 1.3 \times 10^4$  に相当する風洞風速  $V=1.88\text{m/s}$  の結果を用いている。なお、風洞の閉塞率は  $5.6\%$  であり、閉塞効果による測定値への影響も考えられるが、これに対する補正は行っていない。

### 3. 数値流体解析

#### (1) 数値流体解析手法

対象とする物体の周辺の流れ場を非圧縮粘性流体と仮定すると、支配方程式は連続の式と Navier-Stokes の式となる。これらの式を代表流速  $V$ 、代表長さ  $B$ 、密度  $\rho$  を用いて無次元化すると、以下の式になる。

$$D = \text{div } \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \mathbf{u} = -\text{grad } p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u} \quad (2)$$

ここで  $\mathbf{u}$ 、 $p$ 、 $Re$  はそれぞれ無次元化された流速ベクトル、圧力およびレイノルズ数を示す。

計算アルゴリズムには MAC 法<sup>9)</sup>を用い、式(1)を直接解く代わりに、式(2)の発散をとることによって得られる Poisson 方程式(3)と Navier-Stokes の式を交互に解くことによって時間進行を行う。

$$\Delta p = -\text{div}((\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \mathbf{u}) - \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{1}{Re} \Delta D \quad (3)$$

時間積分を Euler の陽解法で近似し、時間積分間隔を  $\delta t$  とすると、式(3)および(2)は次のようになる。

$$\Delta p^{n+1} = -\text{div}((\mathbf{u}^n \cdot \text{grad}) \mathbf{u}^n) + \frac{D^n}{\delta t} \quad (4)$$

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n}{\delta t} + (\mathbf{u}^n \cdot \text{grad}) \mathbf{u}^n = -\text{grad } p^{n+1} + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u}^n \quad (5)$$

ここで、変数の右上の添字は時間ステップを示す。数値解析では、式(4)を SOR 法で解いて圧力  $p^{n+1}$  を計算し、式(5)より流速を求める。ただし、式(3)に含まれる  $D$  は連続の式(1)が完全に満たされるならば 0 となるはずであるが、初期条件あるいは境界条件の不正確さや時間進行による誤差の累積を避けるために  $D^n \neq 0$ 、 $D^{n+1} = 0$  として扱っている。また、式(3)の右辺第三項は他の項とのオーダー評価から無視している。

空間の離散化は、支配方程式を一般曲線座標に変換し、すべての変数を同一点に配置するレギュラーメッシュ上で、対流項は式(6)に示す三次風上差分<sup>10)</sup>、その他の空間項は二次中心差分を使用した。

$$U \frac{\partial f}{\partial x_i} \equiv U_i \frac{-f_{i+2} + 8(f_{i+1} - f_{i-1}) + f_{i-2}}{12\delta x} + |U_i| \frac{f_{i+2} - 4f_{i+1} + 6f_i - 4f_{i-1} + f_{i-2}}{4\delta x} \quad (6)$$

ここで、 $U$  は移流速度であり、 $\delta x$  は計算空間上での格子間隔である。

#### (2) 数値解析モデル

本論文の二次元数値解析では、図-4 に示すように解析領域を半径  $30B$  の円形として、解析対象物体をその中心に配置し、周方向 128 点、径方向 64 点に分割した  $\circ$  型格子を使用した。物体表面近傍の最小格子間隔は

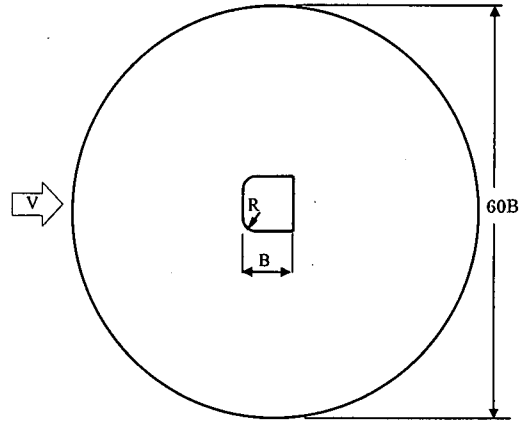


図-4 解析領域

0.0025B とし、角柱前面の境界層内に 3 点以上格子点が入るようにしている。角柱の空力特性を数値解析でシミュレートする場合に、角柱の近傍での流れの変動を捉えることが重要であり、遠方の流れに対する数値解の精度は重要ではないと考えられるため、角柱近傍には格子を密に、遠方では粗く配置している。また、角柱から遠ざかるにつれて格子が粗くなり、流速変動も減衰することを考慮して、遠方境界には一様流を仮定した。実際に与えた境界条件は、角柱表面の流速に対して滑りなしの条件 ( $u = v = w = 0$ )、表面の圧力に対しては勾配零の条件 ( $\partial p / \partial n = 0$ ,  $n$  は法線方向)、遠方境界には一様流 ( $u = V, v = 0, w = 0, p = 0$ ) を与えた。

三次元解析では、二次元解析で用いた格子を、スパン方向分割数 40、間隔  $0.05B$ 、長さ  $2B$  に拡張した格子を用い、スパン方向両端の境界には周期境界条件を課している。スパン方向の分割について、田村らは空気力の平均値、RMS 値、ストローホルム数を求めるためには、最低限スパン方向の長さ  $1B$  および格子幅  $0.1B$  が必要であるとしている<sup>10)</sup>が、本論文では、それよりも長さを 2 倍し、格子幅を半分にした格子を使用している。

風洞実験の風速  $V = 1.88\text{m/s}$  との比較のために、数値解析におけるレイノルズ数は  $Re = 1.3 \times 10^4$  とした。初期条件として解析領域全域に一様流を与えて、無次元時間  $tV/B = 200$  まで二次元解析を行い、 $tV/B = 200$  における二次元解析の結果を初期値として、 $tV/B = 200$  から 400 まで三次元解析を行った。二次元解析、三次元解析ともに時間積分間隔は  $\delta t = 1.0 \times 10^{-3}$  とした。なお、三次元解析では DEC Alpha21164A-433MHz CPU 搭載の WindowsNT Workstation を用いて、1000 時間ステップ (1 無次元時間) 当たり約 2 時間を要した。

#### 4. 結果および考察

##### (1) 風洞実験および数値流体解析による空力特性の比較

風洞実験および数値流体解析によって得られた抗力係数  $C_D$  を図-5 に示す。実験値についてみると、無次元曲率半径  $R/B$  を増すことによって、抗力係数は減少する。特に  $R/B \leq 0.1$  ではその低下量が顕著になっている。

二次元解析による抗力係数を実験値と比較すると、数値解析値は実験値を若干上回ってはいるものの、よく一致し、平均抗力については二次元解析でもよい結果が得られていると言える。また、三次元解析の結果を二次元解析結果および実験結果と比較すると、 $R/B=0$  では二次元解析よりも小さくなり、実験値により近い結果を与えているが、 $R/B=0.2$  については三次元解析結果が、二次元解析結果よりも大きくなり、実験結果からもやや遠ざかる結果を与えている。

このような抗力係数の結果の差について検討するために、表面の平均圧力分布を図-6 に、数値解析によって得られた揚力が最大になる瞬間の角柱周辺の等圧線図を図-7 に示す。図-6 の実験結果より、 $R/B=0.2$  では前縁の曲率部 (B 点) に大きい負圧を受けるが、側面の平均圧力はほぼ一定値をとり、正方形角柱である  $R/B=0$  と同様な完全剥離型断面の圧力分布となっている。しかし、 $R/B=0.3$  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、後縁付近で再附着していると考えられる。図-7 の等圧線図を角柱側面および背面近傍について見ると、 $R/B=0$  の三次元解析においては等圧線の間隔が二次元解析のものよりも広がっているが、二次元解析と三次元解析における周辺流れの差は小さい。 $R/B=0.2$  でも二次元解析よりも三次元解析の等圧線の間隔は広がっている。渦の配置に差が生じていることから、二次元解析と三次元解析における周辺流れが異なっている。

すでに報告している<sup>9)</sup>ように、 $R/B=0.2$  以外の断面では、二次元解析による圧力分布は前面および側面については実験とよく一致している。ここでは、二次元解析と風洞実験との差が現れた背面の圧力および  $R/B=0.2$  の圧力について考察する。 $R/B=0.2$  の二次元解析結果を見ると、側面後縁 (D 点) 付近で圧力が回復し、実験による  $R/B=0.3$  の圧力分布に近いことがわかる。一方、三次元解析では風洞実験とよく一致した圧力分布が得られていることから、三次元解析により実験と同様な流れ場がシミュレートできていると考えられる。平野ら<sup>12)</sup>は辺長比2の矩形断面において、二次元解析では再附着が生じ、三次元解析では完全剥離型の流れになり、実験値に近づくことを示しているが、本論文の  $R/B=0.2$  の断面でも同様に二次元解析では後縁付近で再附着するよう

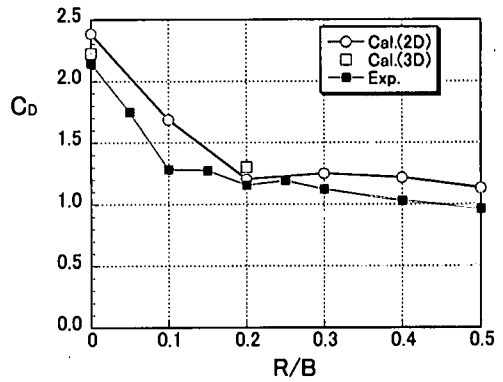
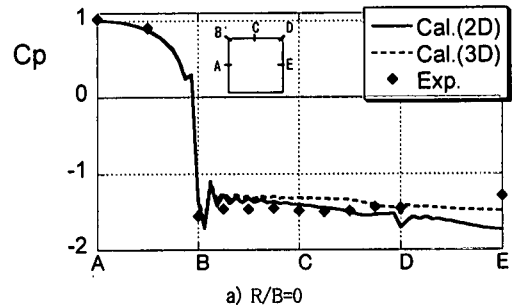
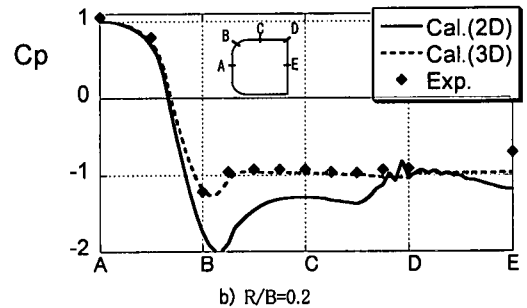


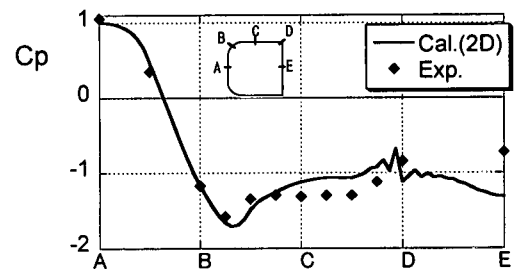
図-5 抗力係数



a)  $R/B=0$



b)  $R/B=0.2$



c)  $R/B=0.3$

図-6 平均圧力分布

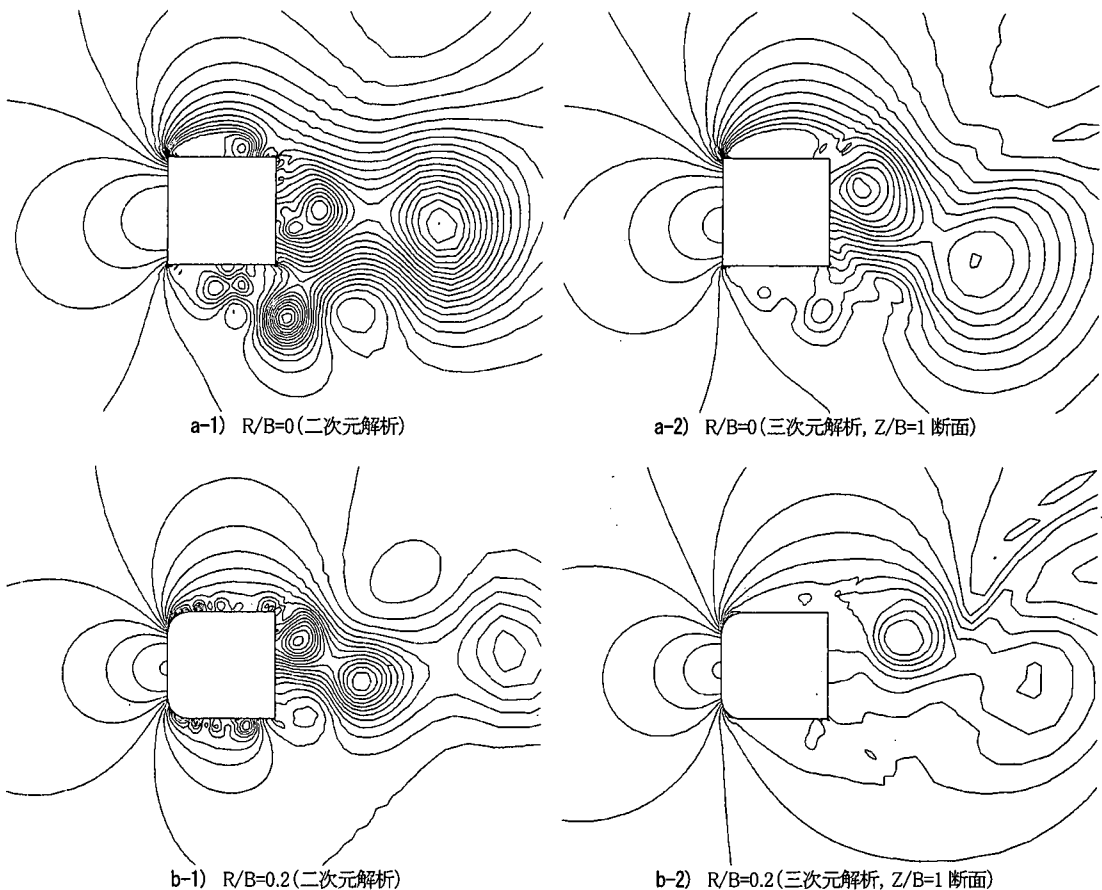


図-7 数値解析による角柱周辺の瞬間圧力分布 (揚力最大時)

な流れが得られ、三次元解析では実験結果と一致した完全剥離型の流れになっているといえる。

次に、二次元解析と風洞実験との抗力係数の差について、正方形角柱である  $R/B=0$  の圧力について比較する。 $R/B=0$  では前面および側面の圧力分布は二次元解析、三次元解析、実験でほぼ一致し、背面のみに差が表れる。二次元解析結果による圧力は、背面中央 (E 点) で極小値をとり、背面の負圧は実験値に比べて大きい値となっている。一方、三次元解析の結果を見ると、背面においてほぼ一定の圧力分布となり、背面中央の圧力は実験値に近づいている。これは、二次元解析においては流体運動の自由度を二次元平面内に限定しているために、スパン方向のエネルギー散逸が評価されず、角柱背後に強い渦が形成されることに起因していると考えられる。そのために、二次元解析では背面の負圧が大きくなり、抗力係数も実験値よりも大きくなると考えられる。このことは図-7a-1)、a-2)に示すように、三次元解析の結果は二次元解析のそれよりも、正方形角柱の背後の等圧線の数が少ないことから確認できる。

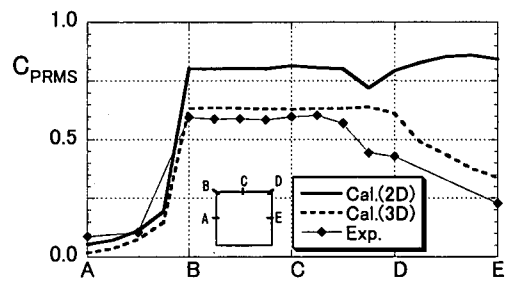
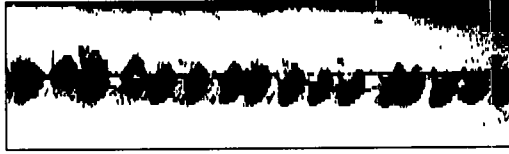


図-8 変動圧力分布 ( $R/B=0$ )

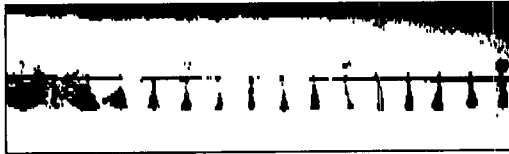
一方、 $R/B=0.2$  では二次元解析による圧力分布は、前面および側面においても実験値との差が大きい。抗力係数の大小に関係する前面および背面の圧力についてみると、背面の負圧は  $R/B=0$  と同様に実験値よりも大きく、抗力を大きく計算させる原因となる。しかし、前面の隅角部 (B 点) 付近でも、実験値よりも大きい負圧を生じているため、前面に作用する圧力は抗力を小さく計算させる。このように、 $R/B=0.2$  では他の  $R/B$  と同様に背



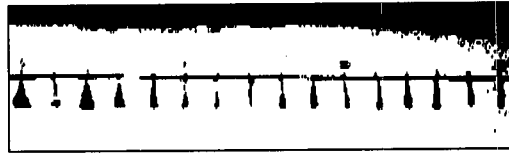
a)  $R/B=0$



b)  $R/B=0.1$

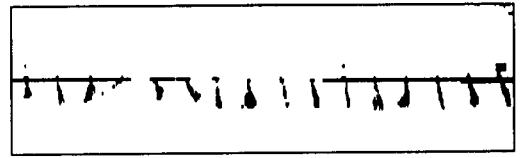


c)  $R/B=0.2$

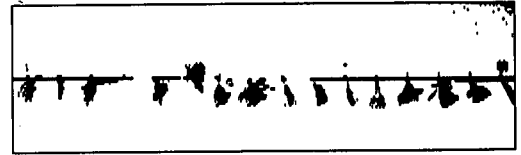


d)  $R/B=0.3$

図-9 曲率半径による流れの変化 ( $V=10\text{m/s}$ ,  $Re=6.8 \times 10^4$ )



a)  $V=2.5\text{m/s}$  ( $Re=1.7 \times 10^4$ )



b)  $V=3.75\text{m/s}$  ( $Re=2.6 \times 10^4$ )



c)  $V=5.0\text{m/s}$  ( $Re=3.4 \times 10^4$ )



d)  $V=7.5\text{m/s}$  ( $Re=5.1 \times 10^4$ )

図-10 風速による流れの変化 ( $R/B=0$ )

面の過大な負圧によって、二次元解析による抗力係数は実験値よりも大きく計算される傾向にあるものの、前縁隅角部付近に生じる負圧によって相殺されるため、実験値に近くなっていることがわかる。

図-8 に  $R/B=0$  の変動圧力係数分布を示しているが、三次元解析では実験値とほぼ一致する結果が得られているものの、二次元解析では側面で変動圧力係数が約30%大きくなっている。また、実験および三次元解析では変動圧力が低下する背面においても、二次元解析では側面と同程度の大きさのままであり、背面中央 (E点) では実験値の約三倍にもなっており、この結果からも剥離渦が強めに表現されるという二次元解析特有の現象が現れているといえる。

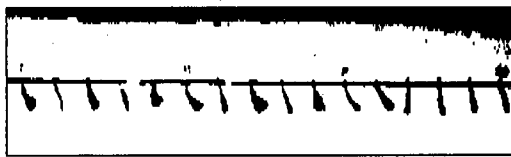
## (2)可視化実験による流れの三次元性の検討

$R/B$  による剥離せん断境界層内の流れの状態が変化することを、実験的に検討するためにタフト法による流れの可視化実験を行った。まず、曲率半径による流れの変化を見るために、風速  $V=10.0\text{m/s}$  ( $Re=6.8 \times 10^4$ ) の結果を図-9 に示す。図の上側が風上であり、左端のタフトが模型中央 ( $Z=0\text{mm}$ )、右端のタフトが端板付近

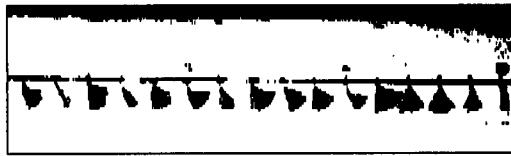
( $Z=300\text{mm}$ ) となっている。ある瞬間におけるタフトの向きはその位置における流速ベクトルの向きと一致すると考えられるから、この図におけるタフトの振れ幅の大きさは、 $Z$  方向の流速成分の変化量であり、三次元性の強さの指標となる。

正方形角柱である  $R/B=0$  では、図-9a) に示すようにタフトの軌跡が円を描くようになり、このタフトの位置における流速ベクトルの向きが時刻によって大きく変動し、流れの三次元性が強いことを示している。 $R/B$  が大きくなるにつれて、タフトの振れ幅は減少することから、 $R/B$  の増加によって流れの三次元性が弱くなることを示している。さらに  $R/B \geq 0.3$  ではすべての設置位置において、タフトはほとんど振れておらず、流れの三次元性は弱いと考えられる。タフトの振れ幅が  $R/B=0.2$  で急変することは、二次元数値流体解析によって示されているように  $R/B=0.2$  を境に剥離せん断境界層内の流れが変化することに対応していると考えられる。

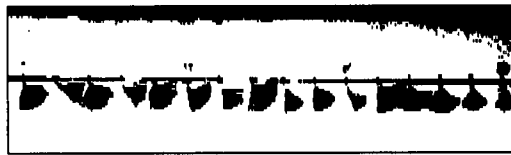
風速の違いによる流れの変化を見るために  $R/B=0$  および  $R/B=0.2$  の結果を図-10、図-11 に示す。 $R/B=0$  つまり正方形角柱では、風速  $V \leq 2.5\text{m/s}$  で、タフトは風下側に向いたままでほとんど動かないが、風速が高くな



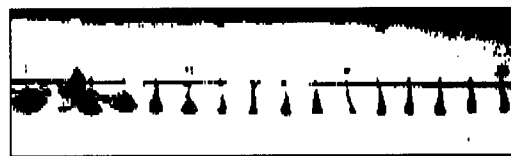
a)  $V=2.5\text{m/s}$  ( $Re=1.7 \times 10^4$ )



b)  $V=3.75\text{m/s}$  ( $Re=2.6 \times 10^4$ )



c)  $V=5.0\text{m/s}$  ( $Re=3.4 \times 10^4$ )

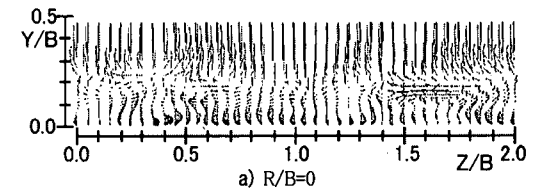


d)  $V=7.5\text{m/s}$  ( $Re=5.1 \times 10^4$ )

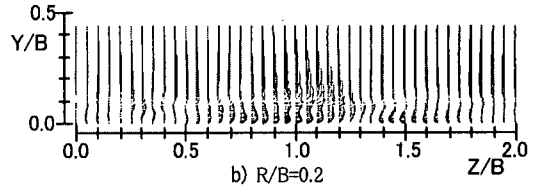
図-11 風速による流れの変化 ( $R/B=0.2$ )

るにつれてタフトの振れ幅は大きくなっていく。タフトの動きは流速ベクトルの向きと完全に一致していることが理想であるが、特に低風速では風速変動によってタフトに作用する力に比べてタフトの慣性力が卓越するために、タフトの向きと流速ベクトルの向きが完全には一致していないと考えられる。しかし、高風速になるほどタフトの振れ幅が増大することから、正方形角柱周辺の流れは三次元性が高いと考えられる。このような傾向は  $R/B \leq 0.1$  の曲率半径が小さい断面で共通して見られた。

$R/B=0.2$  においては、図-11 に示すように、 $V \leq 5.0\text{m/s}$  では  $R/B=0$  と同様に高風速になるほどタフトの振れが大きくなるが、 $V=7.5\text{m/s}$  ではタフトの振れは急小さくなり、 $V=10\text{m/s}$  (図-9c) においてもタフトの振れは小さいままである。このように  $R/B=0.2$  の断面では、風速  $V=5.0 \sim 7.5\text{m/s}$  ( $Re=3.4 \sim 5.1 \times 10^4$ ) の間で角柱周辺の流れ特性が変化し、 $V \leq 5.0\text{m/s}$  では  $R/B=0$  の場合と同様に流れの三次元性が強く、 $V \geq 7.5\text{m/s}$  では三次元性が弱くなるという、レイノルズ数による流れの変化が起こっていると考えられる。

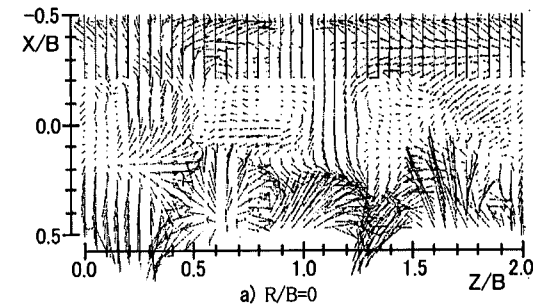


a)  $R/B=0$

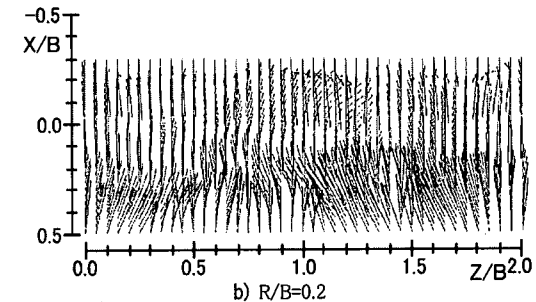


b)  $R/B=0.2$

図-12 角柱近傍の流速ベクトル (ZY 平面,  $X/B=0$ )



a)  $R/B=0$



b)  $R/B=0.2$

図-13 角柱近傍の流速ベクトル (ZX 平面,  $Y/B=0.035$ )

### (3)三次元解析による流れの三次元性

三次元流体解析結果から流れの三次元性を検討するために、角柱近傍の流速ベクトルを図-12、図-13 に示している。図-12 は側面の模型軸線上 ( $X/B=0$ ) の格子点 (YZ 平面)、図-13 は風洞実験のタフト設置高さ ( $Z/B=0.035$ ) 付近の格子点 (XZ 平面) における無次元時間  $tV/B=400$  の瞬間の流速ベクトルを示したものである。 $R/B=0$ 、 $R/B=0.2$  ともにスパン方向 (Z 方向) の流れが存在しているが、図-12 のスパン方向の流速変動の存在する高さが  $R/B=0$  では  $Y/B \leq 0.3$  であるのに対して、 $R/B=0.2$  では  $Y/B \leq 0.1$  となっている。また、その部分での流速変動も  $R/B$  の方が大きい。さらに、図-13a), b) の比較から、 $R/B=0$  の角柱近傍の流速ベクトルの向きは、場所によって大きく変化し、流れの三次元性が強いこと

が確認できる。風洞実験では、数値解析とレイノルズ数が一致する風速  $V=1.88\text{m/s}$  において、タフトの振れがほとんど見られなかったため、 $R/B$  に対する流れの三次元性について検討することはできなかったが、三次元解析結果からも風洞実験と同様に  $R/B$  の増大によって流れの三次元性が低下する傾向があることが確認できた。

## 5. まとめ

前縁隅角部に曲率を有する断面を対象として、その曲率半径を変化させて、風洞実験および二次元・三次元数値流体解析より得られた抗力および表面圧力を比較した。また、タフト法により模型側面近傍の流れを可視化し、流れの三次元性について検討し、二次元解析と三次元解析に現れる差について考察した。以下に本論文で得られた主な結果を列挙する。

- (1) 抗力係数は二次元解析においても実験結果とほぼ一致しているが、三次元解析をすることによって、より実験値に近い値を得ることができる。
- (2)  $R/B=0.2$  の平均圧力分布は二次元解析では再付着型、三次元解析および実験では完全剥離型の分布形状となる。
- (3) 背面における平均圧力および変動圧力は三次元解析を行うことで実験値に近づく。
- (4) タフト法による流れの可視化実験から、 $R/B$  の増加に伴って剥離せん断境界層が薄くなることにより、流れの三次元性は弱くなり、 $R/B=0.2$  においてその違いが顕著になることが確認された。
- (5)  $R/B=0.2$  において、風速  $V \leq 5\text{m/s}$  では風速の上昇に伴ってタフトの振れ幅が大きくなるが、 $V \geq 7.5\text{m/s}$  では振れ幅は小さくなり、この風速域 ( $Re=3.4 \sim 5.1 \times 10^4$ ) でレイノルズ数による流れの変化が起こっていると考えられる。

(6) (1)~(3)のような二次元解析と三次元解析との差は流れの三次元性との関連で説明することができる。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 田村哲郎, 宮城哲矢: 超高層建築物に作用する空気力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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 河村進一, 久保喜延, 高本博昭, 山口栄輝: 正方形角柱の表面圧力特性に及ぼす隅角部形状の影響, 日本風工学会誌, 第 71 号, pp.169-170, 1997.
- 6) 河村進一, 久保喜延, 山口栄輝: 隅角部に曲率を有する断面周辺流れの二次元数値流体解析, 応用力学論文集, Vol.1, 1998.
- 7) Kubo, Y. and Kato, K.: The Role of End Plates in Two Dimensional Wind Tunnel Tests, Proc. of JSCE, No.368/1-5, pp.167-174, 1986.
- 8) 河村進一, 久保喜延, 山口栄輝: 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, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.995-1000, 1998.
- 9) Harlow, F. H. and Welch, J. E.: Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface, The Physics of Fluids, Vol.8, pp.2182-2189, 1965.
- 10) Kawamura, T. and Kuwahara, K.: Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness, AIAA paper, 84-0340, 1984.
- 11) 田村哲郎, 伊藤嘉晃, 和田章: 扁平角柱まわりの流れと風圧力の三次元解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.41-48, 1995.
- 12) 平野廣和, 渡邊茂, 丸岡晃: 断面辺長比 2 の矩形断面の空力特性に関する三次元数値流体解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1009-1016, 1998.

(1998.9.14 受付)

## WIND TUNNEL TESTS AND NUMERICAL SIMULATIONS ON AERODYNAMIC BEHAVIOR OF SQUARE PRISMS WITH ROUNDED CORNERS AT WINDWARD PORTION

Shin-ichi KAWAMURA, Yoshinobu KUBO and Eiki YAMAGUCHI

The present study deals with the difference of the aeroelastic responses of a square prism with rounded corners. The previous studies showed that the aerodynamic behavior changed at non-dimensional curvature of  $R/B=0.2$  by wind tunnel tests and two dimensional simulations. In this paper, we conduct two and three dimensional flow simulations of the aerodynamic force of a square prism with rounded corners at windward portion to compare with wind tunnel tests. The behavior due to variation of flow condition was also investigated through flow visualization by tufts.