

中央大学大学院 学生員 ○吉田和人
 中央大学 正会員 檜山和男
 前田建設工業技術研究所 志村正幸
 前田建設工業技術研究所 関根章義

1. はじめに

これまで辺長比 2 の 2 次元角柱を対象として空力振動解析を行い、報告してきた^[1]。その際、実験結果と比較してきたが、レイノルズ数 Re は $1.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$ と比較的大きいため、乱流モデルの一つである LES を用いてきた。しかし、3 Step Taylor Galerkin 法では移流項においてレイノルズ数 Re に対応できていないため、数値振動が起こっていた。そのため何らかの安定化を施す必要がある。そこで本報告においては Streamline-Upwind/Petrov-Galerkin(SUPG) 法^[2]を導入し、まず静止している辺長比 2 の 2 次元角柱周りの流れについて岡島らによる風洞実験結果^[3]と比較し、本手法の有効性を検討する。その後、角柱が風向き垂直方向に空力により振動させた場合について、スクルートン数 S_c の違いによる数値解析結果を風洞実験結果^{[1][4]}と比較検討を行う。

2. 数値計算概要

2.1 基礎方程式 基礎方程式は通例の Smagorinsky モデルによる LES^[5] により解析を行った。また、自由振動解析を行うために ALE 法^[6]を用いている。その際メッシュ速度 u_m は物体を 1 質点と仮定し、(7) 式の運動方程式より求められる変位 x を微小時間増分量 dt で除すことにより得られる。ただし、本解析においては y 方向のみの 1 自由度であるため、変位は y 方向のみとし、静止角柱の解析においては $u_m = 0$ である。

$$\frac{d}{dt}(\bar{u}_i + (\bar{u}_j - \bar{u}_{m2})\bar{u}_{i,j}) = -\left(\bar{P} + \frac{2}{3}k_{SGS}\right)_{,i} + \left(\frac{1}{Re} + \nu_{SGS}\right)\bar{S}_{ij,j} \quad (1)$$

$$\bar{u}_{i,i} = 0 \quad (2)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s d)^2 \left(\frac{(\bar{S}_{ij})^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$k_{SGS} = \frac{\nu_{SGS}^2}{(C_k d)^2} \quad (4)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$d = \left(\frac{d_1 d_2}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2 x = \frac{F}{m} \quad (7)$$

ここに $\dot{}$ は時間微分、 i は i 方向の偏微分、 $\bar{}$ は変数の格子平均、 u_i は i 方向の流速、 u_{m2} は y 方向のメッシュ速度、 P は圧力、 Re はレイノルズ数、 k_{SGS} は SGS の乱流エネルギー、 ν_{SGS} は SGS 動粘性係数、 d は LES の格子スケール、 x は節点の変位、 m は物体の質量、 h は減衰定数、 ω は固有角振動数、 F は外力を表す。

2.2 解析対象 解析対象は、乱れのない一様流中におかれた辺長比 2 の角柱周りの 2 次元流れ場である。空力振動解析においては角柱は流れと直角方向に 1 自由度弾性支持され、空力により振動する。

2.3 解析条件 静止角柱周り流れ解析においては $Re = 5.0 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^4$ を用い、また空力振動解析においては $Re = 1.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$ (換算風速 $U_r = 10.8 \sim 24.2$) を用いる。また、スクルートン数 S_c を 39、72 の 2 ケースとする。時間増分量は $dt = 5.0 \times 10^{-3}$ とする。スマゴリンスキー定数 C_s は 0.15、 C_k は 0.094 を用いる。壁近傍では格子スケール d に wall damping function $(1 - \exp(y^+/25))$ を乗じる。全ケースとも無次元時間で 500 まで計算を行う。また 150 までを予備計算とし、それ以降からデータを採取し応答値を検出する。解析手法は有限要素法を用い、空間方向の離散化には SUPG 法を使用する。このとき用いる重み関数を ψ^* で表現すると

$$\psi^* = \phi^* + \tau u \nabla \phi^* = N_i + Q_i \quad (8)$$

で表される。ここで ϕ^* は Galerkin 法のとときの重み関数、 τ は非負関数、 N_i は Galerkin 法による重み関数、 Q_i は SUPG 法による重み関数である。計算アルゴリズムとしては分離型解法の 1 つである流速修正法を使用する。また、SUPG 法において用いる非負関数 τ は $\frac{1}{2} \frac{d}{||U||}$ を用いる^[2]。ここで d_c は要素長、 $||U||$ は $\sqrt{u^2 + v^2}$ である。

2.4 解析領域 11D×22D の解析領域 (図-1) を節点数 6805、要素数 13200 に分割する。閉塞率は 9.09% である。

2.5 境界条件 境界条件について、流入は $u_1 = 1.0, u_2 = 0.0$ 、流出は $u_1 = u_2 = free, p = p$ 、側面は $u_1 = slip, u_2 = 0.0$ である。また角柱壁面には non-slip の境界条件を用いる (図-1)。

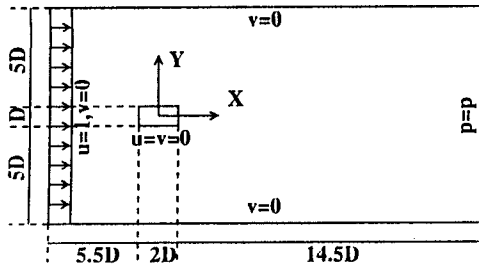


図-1 解析領域と境界条件

3. 静止角柱周りの流れの数値解析結果

3.1 圧力分布と揚力係数 C_l の時刻歴 図-2 に $Re = 1.0 \times 10^4$, $Time = 500$ の瞬時の圧力分布図を示す。3 step Taylor Galerkin 法の時における数値振動は見られず、安定した解が得られている。次に図-3 に $Re = 1.0 \times 10^4$ の時の揚力係数 C_l の時刻歴を示す。これも同様に、以前まで見られていた高周波数の波形は現れず、安定した解が得られている。

3.2 ストロハル数 St 図-4 に岡島らの風洞実験結果との比較を示す。全体的に本解析結果は実験結果との差異はあるものの $Re = 5.0 \times 10^3$ と 1.0×10^4 において図-3 からわかるように、2つのストロハル数 St のピークがあり、実験結果と良い対応を示している。

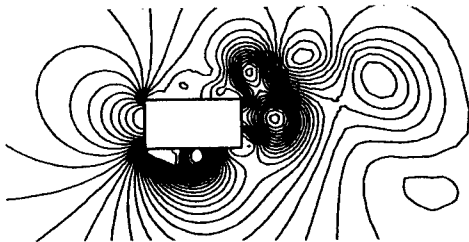


図-2 圧力分布図 ($Re = 1.0 \times 10^4$, $Time = 500$)

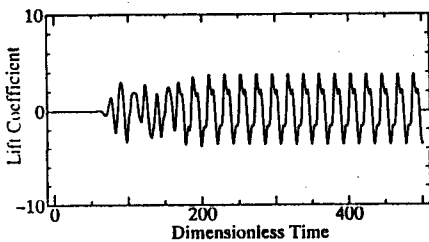


図-3 揚力係数 C_l の時刻歴

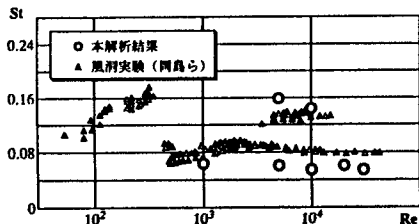


図-4 岡島らの風洞実験結果との比較

4. 空力振動角柱周りの流れの数値解析結果

図-5 にスクルートン数が $S_c = 39, 72$ の2ケースで行った換算風速による振幅応答について実験結果と本解析結果の比較を示す。横軸は無次元風速を示しており、 f は物体の固有振動数、 D は見付け幅である (図-1)。計算結果のプロットは平均振動振幅 (ピークの平均値) である。これは実験結果においても同様である。本報告においては2つのプロットのみでスクルートン数 S_c の違いによる振幅の差異を示すに至っていない。

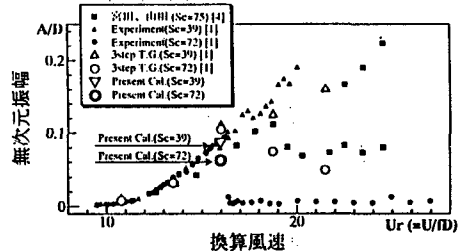


図-5 換算風速による振幅応答

5. おわりに

一様流中に置かれた辺長比2の角柱の静止と1自由度空力振動を LES により有限要素法を用い、さらに離散化に SUPG 法を用いて数値解析を行い、実験結果との比較により検討を行った。SUPG 法を用いたことにより静止角柱において、安定した解が得られ、実験結果とも良い対応を示し、本手法は有効だと考えられる。空力振動角柱においては、本報告で解析結果は十分にまとめることが出来ていないため既報^[1]に示したスクルートン数 S_c の違いによる振幅応答の差異を示すまで至っていない。今後、さらに他のケースにおいての計算を進めることにより、流れの性状を捉えることを検討し、換算振動数、風圧係数についても検討していきたい。

参考文献

- [1] 吉田、櫻山、志村、関根: "LES による構造流体の連成を考慮した数値解析", 第9回数値流体力学シンポジウム, pp.215-216, 1995.
- [2] A.N.Brooks and T.J.R.Hughes: "Streamline Upwind / Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 32, pp.199-259, 1982.
- [3] 岡島、杉谷: "長方形断面柱のストロハル数と背圧係数 (レイノルズ数の影響)", 日本機械学会論文集 (B 編), 1984.
- [4] 宮田: "構造物のフラッター", 日本風工学会誌, pp.45-64, 1990.
- [5] 持田、村上、坂本: "LES による2次元角柱に作用する変動風圧力と流れの3次元構造の解析", 日本建築学会構造系論文報告集, pp.47-55, 1993.
- [6] 野村、飯島: "ALE 法に基づく粘性流体と構造との相関問題の有限要素解析手法", 土木学会論文集, pp.285-294, 1990.