

CS-50

矩形断面の自由振動実験と LES による数値解析

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

矩形柱周りの流れ及び空力特性はレイノルズ数 Re に依存し、また辺長比 (B/D) にも依存することはよく知られている。さらに矩形断面の角柱は渦励振やギャロッピング等の振動が発生し、これを解明するためこれまで空力弾性的不安定振動に関する実験的研究が行われている^[5]。本研究では1自由度の振動実験と数値解析結果について比較検討をすることを目的とし、2次元1対2角柱周辺の流れ場におけるスクルートン数 Sc による空力特性の変化を ALE 法^[3]を用いた LES による2次元解析を行う。

2. 実験概要

1) 使用風洞: 前田建設工業(株)技術研究所の多目的風洞実験施設を使用。2) 供試体: 流れ方向見付け幅を D とし、縦 5cm (D)、横 10cm ($2D$)、高さ 30cm ($6D$) とする辺長比2の供試体を用いる。また風路壁面境界層の影響を排除するため、上下端にエンドプレートを取り付ける。(図-1 参照) 3) 支持状態: 1自由度の振動実験を行うため支持台としてエアースライド用い、またコイルバネを用いて復元力を持たせる(図-2 参照)。オイルダンパーを用いてスクルートン数 Sc を 39、72 の2ケースに設定する。4) 風路: 一様な2次元の流れを作るため、風洞内にミニ風路(図-3)を設ける。また風路前面のノズル(曲率半径 $1500R$)により角柱付近の乱れの大きさは5%以下である。5) 風路内の風速測定方法: ピトー管を図-3の位置に設置し、総圧と静圧との圧力差により風路内風速を算出する。6) 測定値の検出方法: 1. 変位: レーザ変位計により測定。2. 圧力: 供試体の中心断面に32個の測定孔を設け、それぞれにビニル製チューブを供試体内部につなぎ、圧力値を測定する。3. ストロハル数 St : 供試体後方 $4D$ の位置に熱線風速計を設置(図-3)し、後流速度変動により算出する。

3. 基礎方程式

基礎方程式としては Navier-Stokes 運動方程式及び連続式を用いる。また、フィルタリング操作を行うことにより得られる通例の Smagorinsky モデル^[2]に ALE 法に基づいた手法を導入したものを LES の基礎方程式とする。この時の基礎式は次のように表される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + (\bar{u}_j - \bar{u}_{m,j}) \bar{u}_{i,j} = - \left(\bar{P} + \frac{2}{3} k_{SGS} \right)_{,i} + \left(\frac{1}{Re} + \nu_{SGS} \right) \bar{u}_{i,jj} \quad (1)$$

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

ここに $\bar{\cdot}$ は時間微分、 $_{,i}$ は i 方向の偏微分、 $\bar{\cdot}$ は変数の格子平均、 u_i は i 方向の流速、 u_m は節点移動速度、 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 動粘性係数を表す。

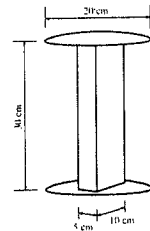


図-1 供試体図

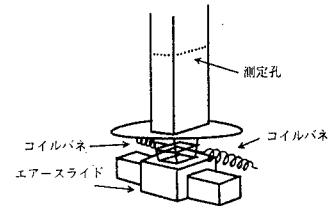


図-2 支持状態図

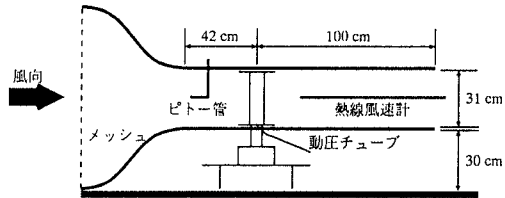


図-3 風洞内の風路

表-1 実験値と解析に用いるパラメータ

		実験値		解析値
質量	m_e	0.691 kg	質量	m_s 938.670
バネ定数	k_e	190 kg/m	固有角振動数	ω_s $2\pi f_s$

スクルートン数 $Sc = 39$

減衰定数	h_e	0.85%	減衰定数	h_s 0.0085
固有振動数	f_e	11.92 Hz	固有振動数	f_s $f_e D/U$

スクルートン数 $Sc = 72$

減衰定数	h_e	1.55%	減衰定数	h_s 0.0155
固有振動数	f_e	11.89 Hz	固有振動数	f_s $f_e D/U$

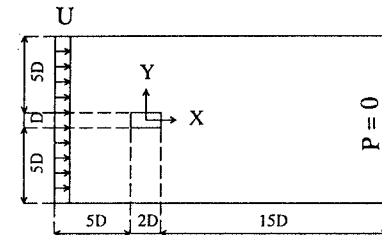


図-4 解析領域図 (節点数 6805、要素数 13200)

4. 数値計算法

基礎方程式 (1)、(2) 式に対して、それぞれ3段階テーラーガラーキン有限要素法^[1]によって離散化を行う。計算手法は分離型解法の1つである流速修正法を用いる。

5. 数値解析概要

1) 解析対象: 解析対象は、乱れのない一様流中におかれた2次元1対2角柱周りの2次元流れ場である。ALE手法を用いることにより角柱をy方向の1自由度で自由振動を可能にする。2) 解析条件: レイノルズ数は実験の特性を比較するために 1.77×10^4 ($U = 5.65 \text{ m/s}$) から 4.00×10^4 ($U = 12.8 \text{ m/s}$) を用いる。本報においては 4.00×10^4 のみである。またスクルートン数を $Sc=39, 72$ の2ケースとする。微小時間増分量は $\Delta t = 0.01$ とし、振動の定常性のため無次元時間50の間、固定解析を行う。パラメータとして Smagorinsky 定数 C_s は 0.15^[4]、 C_k は 0.094^[4] を用いる。また解析に用いる値は表-1に示す。3) 解析領域: $11D \times 22D$ の解析領域 (図-4) を節点数 6805、要素数 13200 に分割する。閉塞率は 9.09% である。4) 境界条件: 解析領域の境界条件について、流入は $u_1 = 1.0, u_2 = 0.0$ 、流出は $u_1 = u_2 = \text{free}, p = 0$ 、側面は $u_1 = \text{slip}, u_2 = 0.0$ である (表-2)。角柱壁面境界には Werner, Wengle により提案された liner-power law 型の wall function (表-3) を用いる。

表-2 境界条件			
流入	$u_1 = 1.0, u_2 = 0.0$	流出	$u_1 = u_2 = \text{free}, p = 0.0$
側面	$u_1 = \text{slip}, u_2 = 0.0$	壁面	Werner, Wengle

表-3 壁面境界条件	
$\frac{u}{u_*} = y^+$	$(y^+ \leq 11.81)$
$\frac{u}{u_*} = 8.3y^{+1/4}$	$(y^+ > 11.81)$

ここに y^+ は壁座標であり、 $y^+ = \frac{\tau_w}{\rho \nu} y$ で表され、 y は壁からの距離、 ν は動粘性係数、 μ は粘性係数、 ρ は密度、 τ_w は壁面摩擦応力である。

6. 解析結果

本報告においては、スクルートン数 $Sc = 39, 72$ (それぞれ減衰定数 h は 0.85、1.55 %) の2ケースを解析し、実験結果との比較を行った。図-5 (A: 振幅、D: 代表長さ、f: 固有振動数、U: 風速) において本報告の実験結果は $Sc=39$ では風速の増加とともに振幅が増大し、また $Sc=72$ においては換算風速 $U_r (U/f_0 D) = 16$ 付近で減少しているのが見られる。これは供試体の振動の周波数と揚力係数 Cl の周波数との不一致により減少しており、これは既報の実験結果^[5]と同様の様相を示している。解析結果において、図-5に示すように $Sc = 72$ では振幅が小さい値を示し、また $Sc = 39$ では大きな値を示している。これは実験結果と良い対応を示しており、振動の様相を再現することができている。また解析では平均 $|Cp|$ 分布において角柱上下前面部において大きな負圧が現れた。これは壁面近傍における要素幅の影響が考えられ、今後検討が必要である。

7. おわりに

一様流中におかれた1対2角柱の1自由度の振動を LES に ALE 法を導入し、有限要素法で解いて数値解析を行い、振動応答について本報告の実験結果および既報の結果^[5]との比較により検討を行った。振動応答については Sc の違いにより振幅に差異が現れ、また振動応答と揚力係数との周波数における不一致が振幅を減少させており、実験結果と同様の様相を再現することができた。今後、壁面近傍の要素幅を小さくすることにより解析結果の相違について検討し、また位相差や圧力係数 Cp との比較を行うため、他のレイノルズ数においても解析を行い、さらに本手法の有効性を検討していきたい。

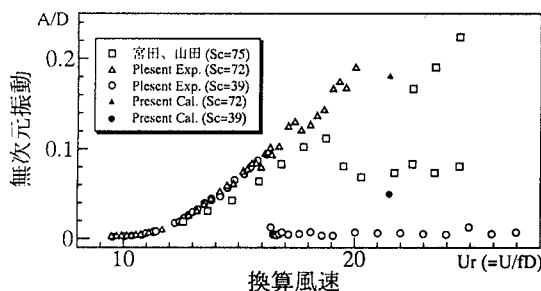


図-5 振幅の応答

参考文献

- [1] C.B.jiang, M.Kawahara, K.Hatanaka, K.Kasiyama: "A three-step finite element method for convection dominated incompressible flow", Comp Fluid Dyn., 1993. [2] 小林: "(1) LES の背景とその課題", 第 36 回生研講習会テキスト- LES 入門, 1993. [3] 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, 1990. [4] 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, 1993. [5] 宮田: "構造物のフラッター", 日本風工学会誌, 1986.