

(I - 25) 構造流体の連成を考慮した 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 樫山和男
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

橋梁の構造断面は基本形状である矩形断面が主要部材として用いられる場合が多い。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することはよく知られているが、未だ明確にされていない部分もある。従って、矩形断面の空力特性を把握することは橋梁設計上、重要な問題となってくる。そこで、空力弾性的不安定振動発生が実験において多く行われていることにより、本研究では一様流中におかれた 2 次元 1 対 2 角柱周辺の流れ場を LES に ALE 法^[3]を導入し、1 自由度の空力振動解析を実験値と比較し、また低風速励振と共振風速後での渦形成の相違について検討する。

2. 基礎方程式

基礎方程式は非圧縮流体の運動を支配する 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。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i(\bar{u}_j - \bar{u}_{mj})}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{P} + \frac{2}{3} k_{SGS} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{Re} + \nu_{SGS} \right) \bar{S}_{ij} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここに $\bar{\cdot}$ 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。

3. 数値計算法

基礎方程式 (1)、(2) 式に対して、それぞれ 3 段階テララーキ有限要素法^[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。

4. 数値解析概要

1) 解析対象: 解析対象は、乱れの無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 手法に基づいて解析領域全てを y 方向の 1 自由度で自由振動させる。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 3.0×10^3 ($U = 0.96 \text{ m/s}$) から 4.0×10^4 ($U = 12.8 \text{ m/s}$) を用いる。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-1) 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 $u_1 = 1.0, u_2 = -u_m$ 、流出は $u_1 = u_2 = \text{free}, p = p$ 、側面は $u_1 = \text{slip}, u_2 = -u_m$ 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。5) 統計量の算出: 各レイノルズ数において、微小時間増分量 $\Delta t = 0.01$ で無次元時間 500 (50000 ステップ) を連続に計算する。得られた解を解析する際、解の定常性をとるために無次元時間 100 から 500 の間でデータを採取した。

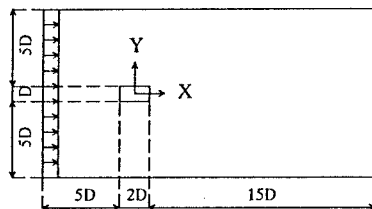


図-1 解析領域図 (nx=6805, mx=13200)

表-1 実験値と解析に用いる無次元パラメータ

	実験値		解析値
質量	m_s 0.691 kg	質量	m_s 938.670
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 $f_e D/U$
バネ定数	k_e 190 kg/m	固角振動数	ω_s $2\pi f_s$

ここでの実験値とは前田建設工業風洞実験施設において実験を行った時の値である。

表-2 境界条件

流入	$u_1 = 1.0, u_2 = -u_m$	流出	$u_1 = u_2 = \text{free}, p = p$
側面	$u_1 = \text{slip}, u_2 = -u_m$	壁面	Werner, Wengle

表-3 壁面境界条件

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = y^+ \quad (y^+ \leq 11.81)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 8.3y^{+1/4} \quad (y^+ > 11.81)$$

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。

5. 解析結果

1) 換算風速による振幅応答

本報告においては、スクルートン数 $Sc = 39$ (減衰定数 $h = 0.85\%$) の場合を解析し、従来の実験結果^[5]との比較を行った。図-2 より低風速励振 ($U_r = 5.5$ 付近) における立ち上がり前とピークの位置、また共振風速 ($U_r = 12$) 後の振動の増大が捉えられている。実験では $Sc = 39$ において低風速励振は起こっていないが、解析では起こっている。これについては、2次元計算のため縦渦が考慮されておらず滑らかに渦が形成され、振動周期と一致し励振が起こったと思われる。共振風速後において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出来ている。

2) 断面まわりの流れ場

$U_r = 5.3$: 断面まわりの渦の形成過程を流線により図-3 に示す。この場合の形成過程は大きく分けると i) 前縁剥離渦の形成、ii) 前縁剥離渦の流下、iii) 後縁二次渦との一体化および放出、と3種類から成る。つまり、低風速励振においては後縁二次渦との融合による渦の放出が重要な要素となり、これは物体の振動に完全に同期しており非常に安定した振動が見られている。それについて、図-4 に C_l との時刻歴及び周波数を示す。 $U_r = 21.5$: この場合の渦形成は図-5 に示す。前縁から形成された剥離せん断層は小さな剥離泡を形成するものの強い巻き込みは見られておらず、剥離流れは早々に後方へ流下している。これにより共振風速 $U_r = 12$ 付近において後縁からの渦の放出の周期が物体の固有振動数と一致し振動を始め、振動の増加を引き起こすと考えられる。このときの C_l との時刻歴及び周波数を図-6 に示す。

6. 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、有限要素法で解くことにより数値解析を行い、振動応答と渦の形成過程の相違について既報の結果^[5]との比較により検討を行った。振動応答については低風速励振が起きたものの既報の結果と同様の様相を再現することができた。また渦の形成過程においても前縁剥離渦の流下過程や後縁剥離渦の性状について同様の結果を示した。2次元計算において、流れ方向への移流が支配的であるため良好な結果が得られたが、今後2次元計算における限界を考え3次元計算による解析を検討することが必要である。

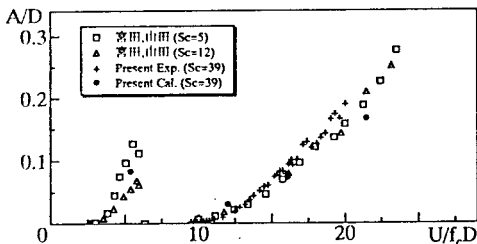


図-2 振幅の応答

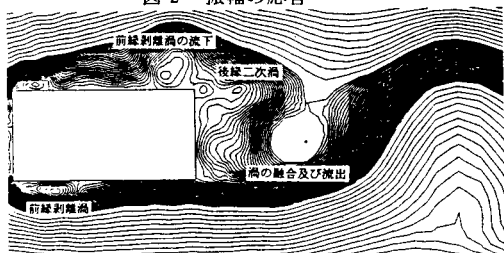


図-3 渦の形成 ($U_r = 5.3$)

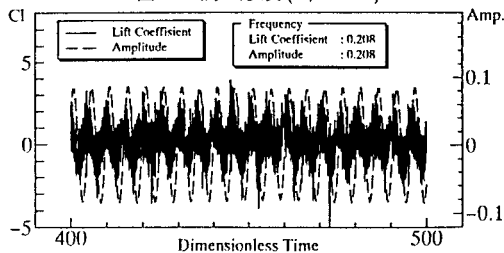


図-4 振幅と C_l の時刻歴

参考文献

- [1] C.B. Jiang, M. Kawahara, K. Hatanaka, K. Kashiwama: "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.



図-5 渦の形成 ($U_r = 21.5$)

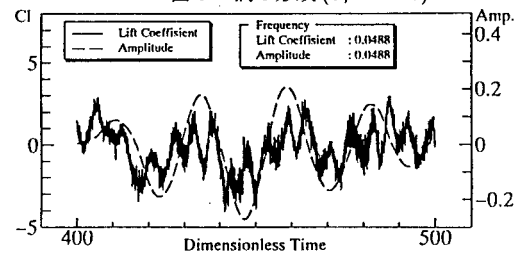


図-6 振幅と C_l の時刻歴