

I-A 161 構造-流体の連成を考慮した LES による 1 自由度空力振動解析

石川島播磨重工業 正会員 ○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 正会員 志村正幸
前田建設工業技術研究所 正会員 関根章義

1. はじめに

近年、橋梁が長大化されていく中で風荷重の影響は無視できない物となっており、それぞれの橋梁断面はもちろんのこと、基本断面に対して空力弾性的不安定振動に関する実験的研究は数多く行われてきた^[1]。そこで本報告においては、辺長比 2 の基本断面角柱を対象とした 1 自由度の空力振動に着目し、風洞実験による振動発生機構を明らかにすると共に、数値解析による実験結果との比較検討を行い、本数値解析手法の有効性を示すものである。実験概要については既報^[4]を参照してほしい。数値解析手法においては、実験におけるレイノルズ数 Re が比較的大きいため乱流モデルの 1 つである LES (Large Eddy Simulation)^[2]、さらに ALE 有限要素法を用いることにより空力振動解析を行う。また、既報^[4]における離散化手法では高レイノルズ数域において、数値不安定振動が起きていたため、本報告では風上側に重みを置く SUPG (Streamline- Upwind/Petrov-Galerkin) 法^[3]を用いる。

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^[2] 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 方向のみとしている。

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

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

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

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

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

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

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

ここに $\cdot$ は時間微分、 $\bar{\cdot}$ 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_{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。また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 流れ場の対象としては $Re = 2.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$ (換算風速 $U_r = 10.8 \sim 24.2$) を使い、スクレーン数 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 600 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。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、離散化における SUPG 法で用いる非負関数 $\tau = \frac{1}{2} \frac{d_e}{||U||}$ を用いる^[3]。ここで d_e 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 $u = 1.0, v = 0.0$ 、流出は $u = v = free, p = \bar{p}$ 、側面は $u = slip, v = 0.0$ である。また角柱壁面には non-slip の境界条件を用いる (図-1)。

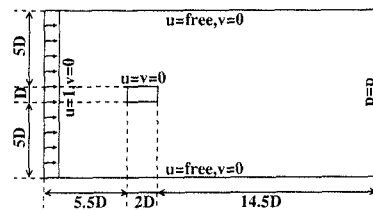


図-1 解析領域と境界条件

3. 空力振動角柱周り流れの数値解析結果

3.1 換算風速による振動振幅 図-2 に換算風速による振動振幅の図を示す。実験結果において $S_c = 39$ の場合は換算風速が大きくなると振幅も発散的に増大し、 $S_c = 72$ の場合

には $U_r = 16$ 付近で急激に振幅が減衰している。数値解析において 3STG(3 Step Taylor Galerkin) 法^[4]では $Sc = 39$ の場合には実験結果同様、発散的に振幅が増大し、 $Sc = 72$ の場合には徐々にではあるが振幅が減衰している。しかし本報告で提案した SUPG 法では $Sc = 72$ の場合の方は減衰することなく、双方とも振幅は大きくなっている。これに関しては振幅の減衰の 1 つの原因として流れの乱れにあり^[1]、3STG においては数値振動による乱れが振幅を減衰させたと考えられる。

3.2 換算風速による換算振動数 図-3 に換算風速による換算振動数の図を示す。実験結果における $Sc = 39$ の場合のロックイン状態、 $Sc = 72$ の場合の $U_r = 16$ 付近でロックイン状態からはずれる現象は、3STG 法においては実験結果同様の様相を示しているものの、SUPG 法においては、双方ともロックインの状態にあり、 $Sc = 72$ における振幅の減衰は捉えられていない。

3.3 振動振幅と揚力係数の時刻歴 換算風速 $U_r = 16$ 、スクルートン数 $Sc = 39$ において、図-4 に実験結果の振動振幅と揚力係数の時刻歴波形を示す。振動振幅波形のビート現象、またそれに伴う揚力係数波形の位相のずれの現象が表れており、実験結果と同様の様相を示している。つまり、振動振幅波形に対する揚力係数の位相差が 30° 程度の時、振動振幅は増大し、逆にマイナスになると振動振幅は減衰する現象が捉えられている。

3.4 圧力係数の分布 換算風速 $U_r = 16$ 、スクルートン数 $Sc = 72$ の時の圧力係数分布図を示しており、角柱の振動波形のある 1 周期間によるものである（図-5）。上面と背面では多少ずれがあるものの上下面での圧力分布の一樣性と共に、上昇時は上面、下降時は下面において圧力係数が負に大きくなっており、その差圧により振動している現象が実験結果と良い一致を示している。

4. おわりに

一様流中におかれた辺長比 2 の角柱に着目し、1 自由度の空力振動現象に対して風洞実験を行うと共に、数値解析において LES に ALE 法を導入し、離散化に SUPG 法を用いた有限要素法で解析を行い振動振幅、揚力係数、圧力係数の応答について比較検討を行った。空力振動角柱について、まず振動振幅に関して 3STG 法においては振幅の減衰が現れているが、SUPG 法においてはそれが現れていない。この原因として、風洞実験における流れの乱れは振動現象を減衰させる^[1]とされており、3STG 法においては不安定振動がその乱れと同様の働きをし、振動現象の減衰を生んだと考えられる。揚力係数の時刻歴に関してはビート現象に伴う位相差が現れ、また圧力係数分布に関しては圧力分布の上下面での一樣性とその差圧による振動現象が実験結果と良い一致を示し、本手法の有効性が示された。今後は、前述した乱れの付加や流れの 3 次元性に関する検討が必要であると考えられる。

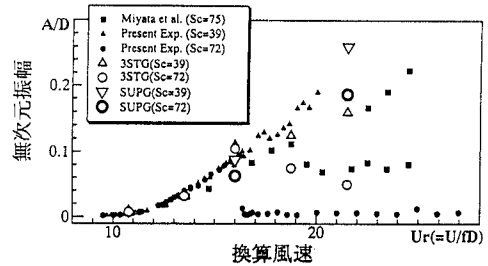


図-2 換算風速による振動振幅

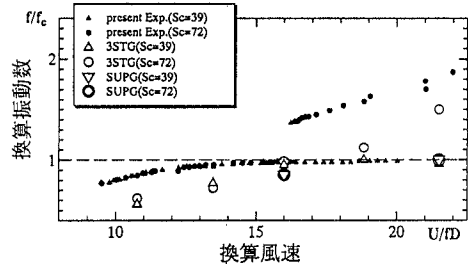


図-3 換算風速による換算振動数

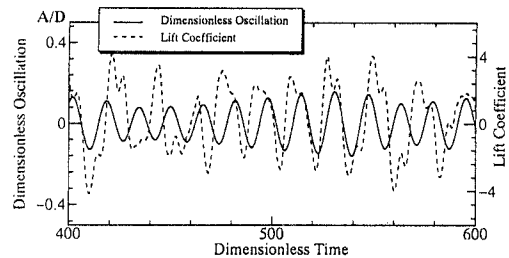


図-4 振動振幅と揚力係数の時刻歴

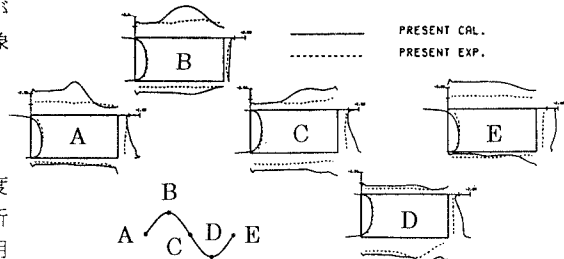


図-5 1 周期間における圧力係数分布

参考文献

- [1] 宮田: "構造物のフラッター", 日本風工学会誌, pp.45-64, 1990.
- [2] 坂本、持田、村上、Rodi: "2 次元角柱まわりの乱流渦放出流れに関する LES と DSM, $k-\epsilon$, 実験の比較", 日本建築学会構造系論文集, 1994.
- [3] T.E.Tezduyar, S.Mittal, S.E.Ray and R.Shih: "Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 95, pp.221-242, 1992.
- [4] 吉田、壺山、志村、関根: "矩形断面の自由振動実験と LES による数値解析", 第 50 回土木学会年次学術講演会講演概要集共通セッション, pp.100-101, 1995.