

流入変動風を用いたLESによる地形風有限要素解析

東電ソフトウェア 正会員 ○ 本郷 拓人
中央大学 正会員 檜山 和男
鹿島建設 近藤 宏二

1. はじめに

LESを地形風の計算に適用する場合，流入境界において接近流である乱流境界層の特性をいかに再現するかが問題となる．この流入境界に与える風速変動（流入変動風）の生成法に関しては，様々な研究が行われているが，本研究では，周波数領域のクロススペクトル密度マトリックスを目標として，乱数発生によって模擬的に風速波形を生成する方法¹⁾に着目した．この方法は，有限差分法による平板乱流境界層や建物周りの流れ場の計算に用いられ，その適用性が検証されているが，複雑な局所地形周りの流れ場の計算に適用した有限要素法による例はまだない．

そこで本研究では，安定化有限要素法²⁾による平板乱流境界層および30度の勾配を有する谷周りの流れ場の解析に流入変動風を適用し，風洞実験との比較検討によりその適用性を検証した．

2. 流入変動風

(1) 周波数領域における方法

所定のパワースペクトル密度，クロススペクトル密度を有する風速変動 $u_i^d(l, t)$ は，有限フーリエ級数を用いて (1) 式～(5) 式のように表される³⁾．

$$u_i^d(l, t) = \sum_{p=1}^i \sum_{n=1}^N [a_{ip}(\omega_n) \cos \{\omega_n t - \phi_{ip}(\omega_n)\} + b_{ip}(\omega_n) \sin \{\omega_n t - \phi_{ip}(\omega_n)\}] \quad (1)$$

$$a_{ip}(\omega_n) = \sqrt{2\Delta\omega_n} |H_{ip}(\omega_n)| \zeta_{pk} \quad (2)$$

$$b_{ip}(\omega_n) = \sqrt{2\Delta\omega_n} |H_{ip}(\omega_n)| \eta_{pk} \quad (3)$$

$$S(\omega_n) = H(\omega_n) H^{*T}(\omega_n) \quad (4)$$

$$\phi_{ip}(k) = \tan^{-1} \left\{ \frac{I_m H_{ip}(\omega_k)}{R_e H_{ip}(\omega_k)} \right\} \quad (5)$$

ここで $u_i^d(t)$: 時刻 t での速度ベクトルの i 成分, N : 周波数刻み幅, a_{ip} , b_{ip} : フーリエ係数 (平均値0のガウス確率変数), $\Delta\omega$: 角周波数刻み幅, ω_k : 角周波数, m : 同時に波形を生成する数, $\phi_{ip}(k)$: 位相遅れ角, $|\zeta_{pk}|$, $|\eta_{pk}|$: 互いに独立で平均値0, 標準偏差1の正規乱数, I_m , R_e : 虚数部, 実数部である．また, $H(\omega)$ は要素を $S_{ij}(\omega)$ とするクロススペクトル密度マトリックス⁴⁾を分解して得られた下方三角マトリックスである．

KeyWords: 流入変動風, LES, 安定化FEM
〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27
TEL. 03-3817-1815, FAX. 03-3817-1803

3. 基礎方程式と解析手法

非圧縮粘性乱流に対するLESの基礎方程式には，以下に示すフィルタリングされたNavier – Stokesの運動方程式とEulerの連続式を用いる．なおレイノルズ項には，標準Smagorinskyモデルを用いた．

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \bar{u}_{i,j} + P_{,i} = \left(\frac{1}{Re} + \nu_{SGS} \right) \bar{u}_{i,jj} \quad (6)$$

$$\bar{u}_{i,j} = 0 \quad (7)$$

$$\nu_{SGS} = (C_S \Delta)^2 \bar{u}_{i,j} (\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i}) \quad (8)$$

式(6), 式(7)を空間方向にSUPG法に基づく有限要素法を，時間方向に修正準陰解法²⁾を用いて離散化する．

4. 局所地形周り流れ解析

(1) 解析条件

本研究では数値解析例として平板乱流境界層と30度の勾配を有する谷の流れ解析を行い，風洞実験結果との比較・検討を行う．なお，座標，時間軸に関しては，代表長さ L (実験模型の地形高さ)，代表風速 U (地形高さでの平均流入風速) で無次元化している．平板の計算領域と境界条件を図-1に示す．流入条件は生成された流入変動風 (図-2) を与える．谷の解析については流入面からの距離 $x_1 = 10.0$ の位置にモデルを設置した．計算条件は，時間増分 $\Delta t = 0.002$ ，レイノルズ数 $Re = 27, 300$ ，Smagorinsky定数 $C_S = 0.1$ とした．

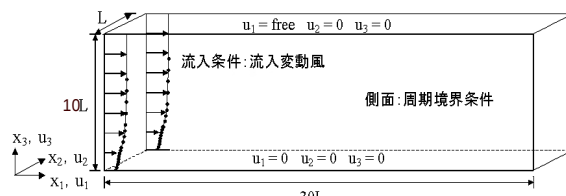


図-1 計算領域と境界条件

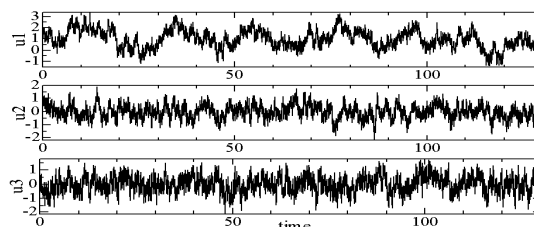


図-2 流入変動風 ($x_3 = 1.0$)

(2) 解析結果

a) 平板乱流境界層

図-3に計算領域流出口における平均速度分布の実験結果との比較を示す．図より計算結果は実験結果と良い一致を示しているのがわかる．また，図-4に示した

とおり、流入境界に層流境界層を与えた場合、地表面付近の速度が低下し、平均速度分布が大きく変化してしまっている。これに対して、流入変動風を与えた場合は、平均速度分布をよく再現できている。このように変動風速の統計的性質が再現できていない場合、地表面付近平均速度分布が再現できないことは近藤ら¹⁾も報告しており、風速変動の空間相関が平均速度分布の維持に大きく寄与していることが分かる。一方、図-5に示した標準偏差を見ると流入面からの距離が離れるにつれ、風速変動が小さくなる傾向が見られる。これは、LESのグリッドフィルタにより流入変動風の高周波成分がカットされたためと考えられる。このグリッドフィルタの効果は、主流方向のメッシュ幅の影響が大きいと考えられるので、主流方向の格子精度を上げることで、ある程度の改善が期待できる。

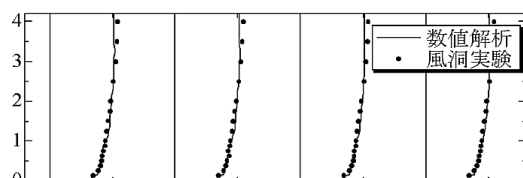


図-3 平均速度分布の比較

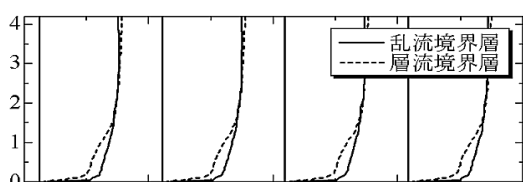


図-4 平均速度勾配の比較

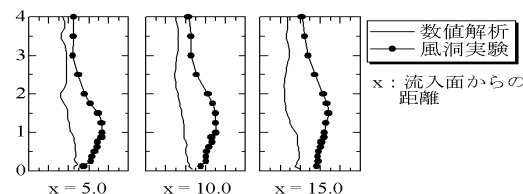


図-5 標準偏差の比較

b) 30度の勾配を有する谷

図-6, 7に平均風速分布図と流線図の比較を示す。流入境界に層流境界層を与えた場合、風洞実験に比べて谷間における循環が弱いのに対して、乱流境界層を与えた場合循環の傾向が大幅に改善されている。しかし、谷の風下側の登り勾配における剥離せん断層の再付着点は、風洞実験に比べて若干風下側に移動している。これは、接近流の乱れが十分再現できていないため、乱れによる剥離せん断層の再付着の促進(連行効果)が若干弱いと推定される。

5. 結論

本研究では周波数領域における流入変動風の生成を行い、生成された波形をLESによる平板乱流境界層と局所地形周りの流れ解析に適用し、風洞実験結果と比較・検討し以下の結論を得た。

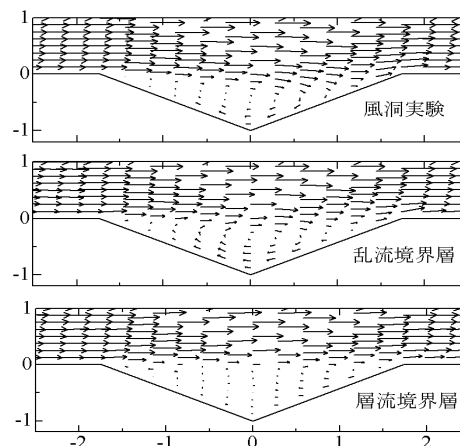


図-6 平均速度分布図(谷)

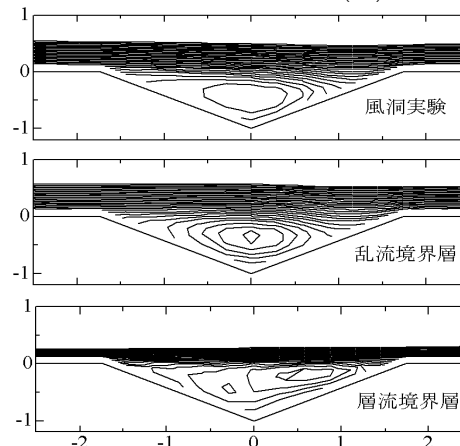


図-7 流線図(谷)

● 平板乱流境界層

流入条件に層流境界層を与えた解析は地表面付近で大幅に平均速度分布が減少するのに対し、流入変動風を与えた解析では流出口まで平均速度分布を維持し、風洞実験結果と良い一致を示した。標準偏差については、LESのグリッドフィルタの影響で風洞実験に比べ変動が弱いものになった。

● 局所地形周り

谷の解析では流入変動風を用いた解析で定量・定性的に実験結果と良い一致を示した。しかし、谷の風下側の登り勾配における剥離せん断層の再付着点は、風洞実験に比べて若干風下側に移動した。

今後の課題としては主流方向メッシュ解像度、スパン方向領域の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 近藤宏二, 持田灯, 村上周三, "生成された流入変動風を用いたLES-流入変動風生成時のクロススペクトルマトリクスの再現精度が計算結果に及ぼす影響について", 日本建築学会構造系論文集, 47-54, (1999)
- 2) 櫻山和男, 猪股渉, "混合補間要素を用いた非圧縮粘性流れ解析のための高精度安定化有限要素法", 土木学会論文集 No.591/I-43, 125-137, (1998).
- 3) 星谷勝, "確率論手法による振動解析", 鹿島出版会
- 4) 近藤宏二, 持田灯, 村上周三, 土谷学, "乱流境界層を対象とするLESのための流入変動風の生成-風洞実験に基づくクロススペクトルマトリクスのモデル化-", 日本建築学会構造系論文集, 33-40, (1998)