

低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルによる二箱桁断面の静的空気力予測

日立造船（株） 正会員 ○ 白井秀治 日立造船（株） フェロー 植田利夫

1. はじめに

筆者等の2次元レイノルズ平均モデル(RANS)による非定常空気力予測に関する近年の研究^{[1][2]}では、壁関数を用いた2次元 RANS の非定常空気力の予測精度に断面依存性が見られ解決策を検討している。また、少なくとも動的計算の際の加振範囲内で三分力係数を十分な精度で再現できれば非定常空気力も高い精度で予測できることも分かりつつある。図-1に示すフェアリング付対称二箱桁断面は、当社で開発した4車線の超長大橋桁断面の準基本断面であり、昨年度報告^[1]のCFDによる非定常空気力予測では十分な精度が得られていない。その要因の一つとして、特定の断面では壁関数による壁面の普遍速度分布の仮定が大きく破綻しているためと考える。そこで本研究は、低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルを用い、より厳密な壁面境界条件の下に二箱桁断面の静的空気力の予測を試みたのでここに報告する。

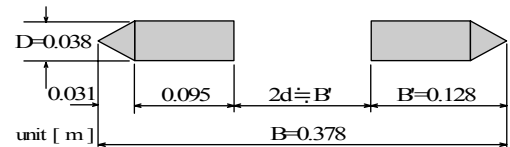


図-1 解析対象断面

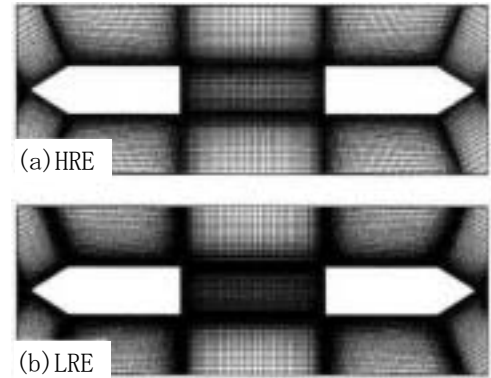


図-2 解析モデル

2. 解析概要

解析の基礎式は Shih-Lumley による非線形 $k-\varepsilon$ モデル^[3]を一般曲線座標系に展開したものとする。運動量と圧力のカップリングはSIMPLEC^[4]アルゴリズムを用い、基礎式の離散化には有限体積法を使用した。解析領域の最上流に一樣流速と1%の乱れ強度の流入境界条件を、最下流に自然流出条件を与え、上下境界を滑り条件とした。図-2(a)に示す高レイノルズ数モデルに対する表面境界条件には従来の壁関数を使用し、図-2(b)に示す低レイノルズ数型モデルに対しては、式(1)～(2)に示す Shih-Lumley による低レイノルズ数モデル^[5]を用いて壁面境界に厳密な滑り無し条件を与えた。HRE モデルでは、壁面要素高を $\Delta y=0.013D$ 、総要素数を 44,400 とし LRE モデルでは壁面要素高を $\Delta y=0.0013D$ 、総要素数を 104,800 とした。桁幅 B を代表長とするレイノルズ数 Re_B は、検証のための風洞実験の条件（風洞風速 10m/s、 $Re_B=2.5 \times 10^5$ ）に一致させた。計算は3種類の迎角（ $\alpha=0, 2, 4$ deg）に対して行い、その際の無次元時間隔（ $=\Delta t U/B$ ）は HRE モデルで 1.3×10^{-2} 、LRE モデルで 5.3×10^{-3} とした。

$$\rho k_{,i} + [U_i \rho k + (\mu + \mu_t / \sigma_k) k_{,j}]_{,j} = P_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\rho \varepsilon_{,i} + [U_i \rho \varepsilon + (\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon) \varepsilon_{,j}]_{,j} = C_{\varepsilon 1} f_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$P_k = -\rho \overline{u_i u_j} U_{i,j}, \quad \mu_t = \rho C_\mu f_\mu k^2 / \varepsilon, \quad f_\mu = [1 - \exp(a_1 R_k + a_3 R_k^3 + a_5 R_k^5)]^{1/2}$$

$$R_k = \rho k^{1/2} y / \mu, \quad f_1 = 1, \quad f_2 = 1 - 0.22 \exp(-R_k^2 / 36), \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$a_1 = -1.5 \times 10^{-4}, \quad a_3 = -1.0 \times 10^{-9}, \quad a_5 = -5.0 \times 10^{-10}, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

ここで、 U_i 、 k 、 ε 、 μ_t 、 ρ 、 μ 、 y はそれぞれ i 方向平均速度、乱れエネルギー、乱れエネルギー散逸率、時間微分、 i 方向微分、空気密度、粘性係数、壁面からの距離を表す。

3. 解析結果

HRE および LRE モデルの静的三分力係数の計算結果を風洞実験結果と併せて図-3に示す。迎角 0° では、桁断面の対称性により表面圧力分布によらず、揚力および空力モーメントは0となるため、HRE、LRE モデル共に実験値と良く一致する。迎角 2° では、抗力と空力モーメントは HRE、LRE モデル共に比較的实验値と一致するが、HRE モデルの揚力はほぼ0で実験値と大きく差があり、LRE モデルでは実験値の1/2程度に改善される。迎角 4° では、HRE、LRE モデル共に抗力は実験に近い値を示すが、揚力は実験値の1/3程度であった HRE モデルに対し LRE モデルでは

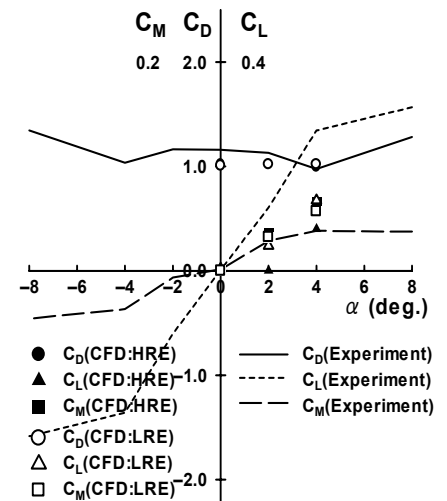


図-3 静的三分力係数の比較

キーワード：低レイノルズ数モデル、非線形 $k-\varepsilon$ モデル、静的空気力、二箱桁断面

〒551-0022 大阪市大田区船町2丁目2番11号 日立造船（株）技術研究所 Tel.06-6551-9239 Fax 06-6551-9841

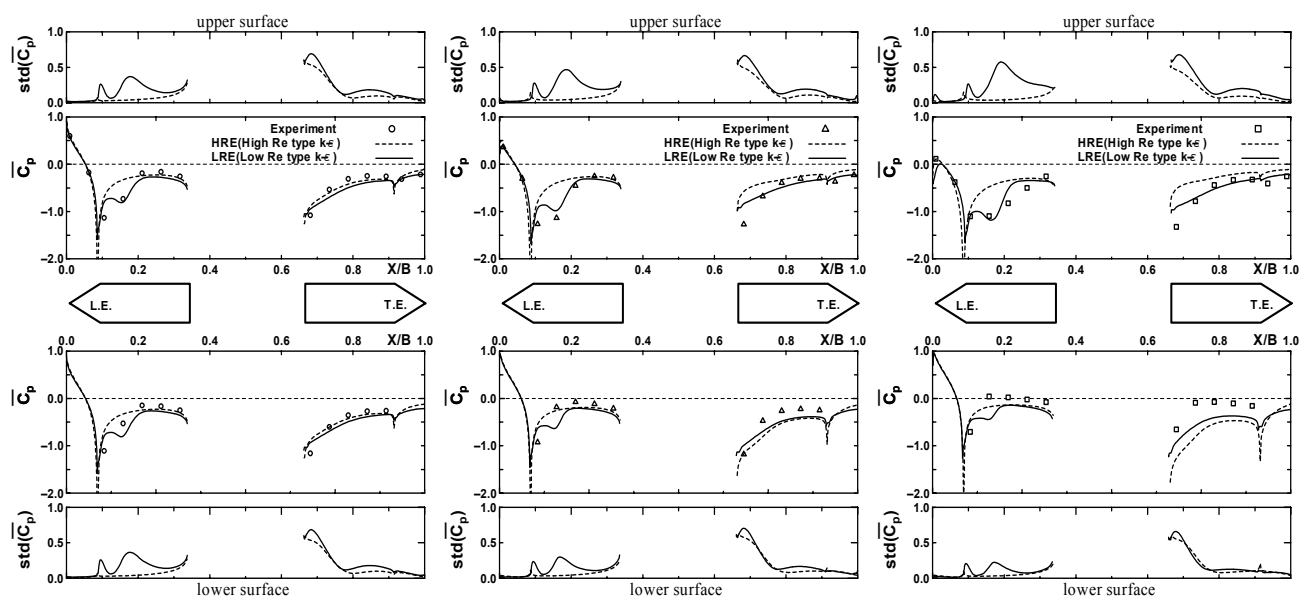
実験値の 1/2 程度と改善される。空力モーメントは実験値の約 1.7 倍であった HRE モデルに対し、LRE モデルでは実験値の約 1.5 倍とわずかに改善される。HRE および LRE モデルの桁表面圧力平均値および標準偏差の計算結果を風洞実験結果と併せて図-4 に示す。HRE モデルでは、全迎角において上流桁前縁の剥離が見られず実験値に比べ負圧領域が小さく評価されるが、LRE モデルでは剥離が再現され桁表面の圧力分布が実験値に近くなる。一方、下流桁下面では、LRE モデルの改善効果が十分に見られず、迎角 4° では実験値に比べて負圧がかなり大きく評価される。図-5 に迎角 0° における瞬間的な圧力分布を図-6 には瞬間的な流跡線の比較を示す。LRE モデルでは、上流前縁からの剥離渦（負圧域）が時々刻々下流へ放出しており、干渉によって上流桁下流縁からの剥離渦を弱める働きをする。これにより、LRE モデルでは下流桁前縁の剥離が小さく抑えられている。

4. まとめ

低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルは、上流桁前縁鈍角部の剥離を再現し、上流桁の表面圧力の推定精度を大幅に改善する。これは、単体断面に対して空気力予測精度の改善に大きく寄与するものである。一方、二箱桁断面に特有の下流桁まわりの強い非定常流れに対しては、表面圧力の推定精度を十分に改善できなかった。2次元の RANS による二箱桁断面の静的・動的空気力の予測精度をさらに改善するためには、レイノルズ応力の非線形表現や乱流拡散係数を複雑な 3次元渦構造の衝突問題に適用できるように改良を行う必要がある。

参考文献

[1] 白井秀治ほか：数値流体解析による安定化部材を有する箱桁断面の空力特性検討，土木学会第 57 回年次学術講演会論文集 I-(B)，2002. [2] 白井秀治ほか：CFD による橋梁断面の非定常空気力予測，第 14 回非定常空気力学懇談会・構造物の空気力研究会配布資料，2002. [3] Shih, T.H. and Lumley, J.L., "A Realizable Reynolds Stress Algebraic Equation Model", NASA TM 105993, 1992. [4] Shih, T.H. and Lumley, J.L., "Kolmogorov Behavior of Near-Wall Turbulence and Its Application in Turbulence Modeling", NASA TM 105663, 1992. [5] Van Doormaal, J.P. and Raithby, G.D., "Enhancement of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows", Numerical Heat Transfer, vol. 7, pp147-163, 1984.



(a) 迎角 $\alpha = 0^\circ$

(b) 迎角 $\alpha = 2^\circ$

(c) 迎角 $\alpha = 4^\circ$

図-4 桁表面圧力の平均値及び標準偏差の分布 ($\bar{C}_p$: 平均圧力係数、 $\text{std}(\bar{C}_p)$: 標準偏差)

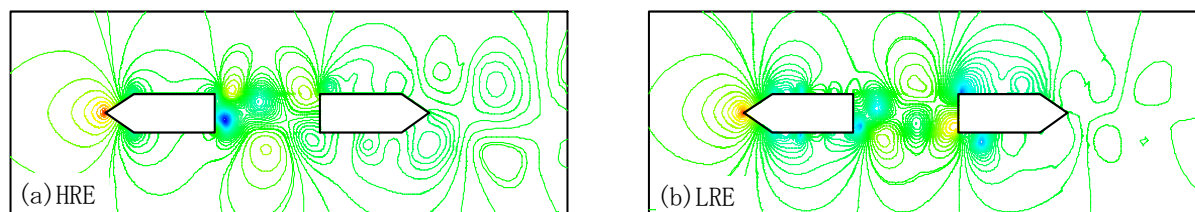


図-5 迎角 $\alpha = 0^\circ$ における瞬間的な圧力分布

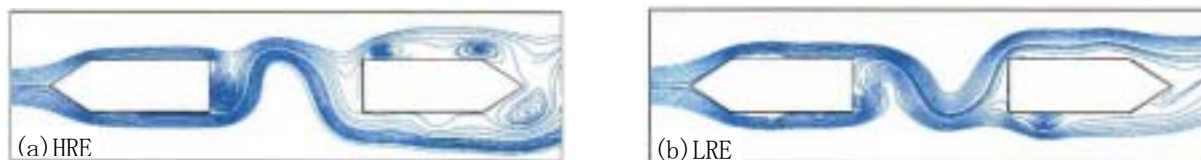


図-6 迎角 $\alpha = 0^\circ$ における瞬間的な流跡線