

橋梁断面の数値流体解析における DES の適用

八戸高専 正会員 ○丸岡 晃 八戸高専学生(研究当時) 清川 弘樹

1. はじめに

LES(Large Eddy Simulation) は数値流体解析による橋梁断面の耐風性の検討に精度面で有効な一手法として用いられる。しかし、LES で壁面に滑りなし条件を適用する場合、レイノルズ数が高くなると壁面近傍の分割に非常に多くの格子点を必要とする。そこで、本研究では、LES における壁面近傍での格子点を緩和するために、Spalart らが提案した DES(Detached Eddy Simulation)¹⁾ を適用する。DES は RANS(Reynolds Avaraged Navier Stokes equation) と LES のハイブリットモデルである。RANS は比較的小さい計算資源でも付着渦を再現でき、剥離のない壁面近くにおいて有効性を発揮するが、渦放出に関する再現性は不十分である。一方、LES は剥離・再付着や変動成分も精度よく再現できるが、壁面近くで計算負荷が大きくなってしまふ。従って、DES は、LES の問題点を RANS で補い、より再現性の高い解析が可能と考えられる。本研究では、流れ場の解析手法に有限要素法による IBTD/FS 法²⁾ を適用し、DES を組み込んだ。また、平行平板間流れおよびフェアリング付き矩形断面によって DES の検討を行った。

2. DES

DES は壁に付着した境界層内部は RANS で解き、外側の壁から剥離した流れは LES で解くという方法である。DES のベースとなる SA(Spalart-Allmaras) モデルは、渦粘性に関連した量である $\tilde{\nu}$ に対する以下の方程式で表される。

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = c_{b1}\tilde{S}\tilde{\nu} - c_{w1}f_w\left[\frac{\tilde{\nu}}{d}\right]^2 + \frac{1}{\sigma}\left[\nabla \cdot ((\nu + \tilde{\nu})\nabla\tilde{\nu}) + c_{b2}(\nabla\tilde{\nu})^2\right] \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{S}$ は渦度の大きさを表す量、 $\tilde{\nu}$ は粘性の次元をもつ変数、 d は壁からの距離、 f_w は減衰関数、 c_{b1} 、 c_{b2} 、 c_{w1} 、 σ はモデル定数であり $\tilde{\nu}$ にある減衰関数をかけると渦動粘性係数 ν_t となる。

DES ではこの SA モデルで使われている壁からの距離 d の代わりに以下のような $\tilde{d}$ を用いる。

$$\tilde{d} = \min(d, C_{DES}\Delta), \quad \Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (2)$$

ここで、 Δx 、 Δy 、 Δz は計算格子幅、モデル定数である C_{DES} は 0.65 である。壁近くの領域では $\tilde{d} = d$ となり RANS で、壁から離れた領域では $\tilde{d} = C_{DES}\Delta$ となり一種の 1 方程式型の SGS モデルで解析することになる。

3. 平行平板間流れ

(1) 解析条件

平行平板間を一定圧力勾配で駆動された乱れが十分に発達した流れを解析対象とする。 δ を流路半幅とし、解析領

域を $(6.4\delta \times 2\delta \times 3.2\delta)$ とする。計算ケースを表-1 に示す。 $\Delta_i^+ (= u_i \Delta_i / \nu)$ は壁指標で表した各方向分割幅である。 y 方向の最小分割幅を $\Delta y_{\min}^+ = 1$ と一定にしている。時間増分は $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ である。 $Re_\tau = 590$ は Moser ら³⁾ による DNS、 $Re_\tau = 2000$ は Nikitin ら⁴⁾ による DES (分割数 $(64 \times 64 \times 32)$) の結果がある。また、RANS(SA モデル) による 2 次元解析と同様のメッシュを用いた LES(Smagorinsky モデル($C_s = 0.1$)) による解析も行っている。

表-1 計算ケース

Re_τ	各方向分割数 ($x \times y \times z$)	各方向分割幅		
		Δx^+	Δy^+	Δz^+
590	$64 \times 128 \times 64$	59	1 ~ 20.9	29.5
1000	$64 \times 128 \times 64$	100	1 ~ 40.4	50
2000	$64 \times 128 \times 64$	200	1 ~ 93.7	100

(2) 解析結果

図-1 に平均流速分布を示す。図中の垂直な実線は、DES における RANS を用いる部分と LES を用いる部分との境界線である。LES は粘性底層まではよく一致しているが、対数領域では対数則よりかなり大きな値となっている。それに比べ、DES は LES 部分の対数領域で過大評価をしているが対数則により近い値となっている。DES の $Re_\tau = 2000$ の結果は、Nikitin⁴⁾ の結果と良く一致している。しかし、DES の結果には共通の問題点があり、半場⁵⁾ も指摘してるように RANS と LES の境界直後で平均流速の傾向が変化する。

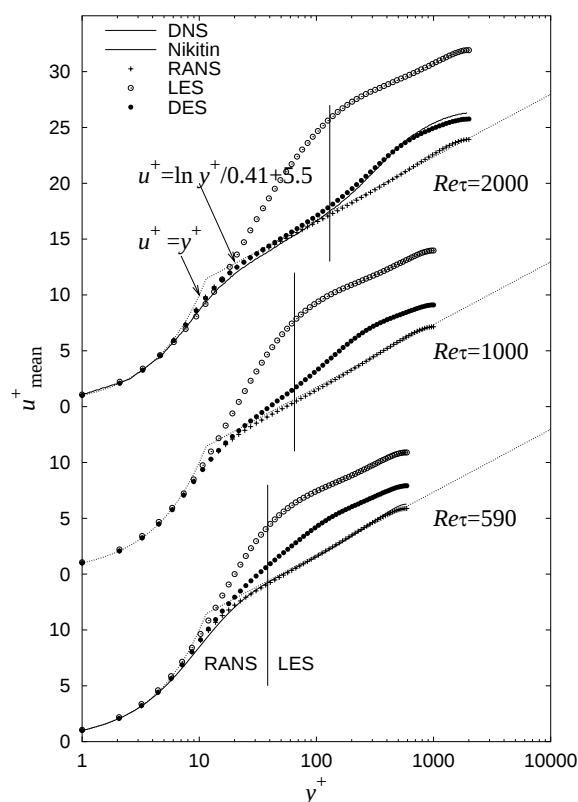


図-1 平均流速分布

Key Words: 耐風工学, 数値流体解析, DES, LES, RANS

〒 039-1192 青森県八戸市田面木字上野平 16-1, TEL:0178-27-7304, FAX:0178-27-7316

4. フェアリング付き矩形断面

(1) 解析条件

図-2に示すような断面辺長比12の矩形断面に正三角形のフェアリングを付加した基本橋梁断面を解析対象とする。解析条件を表-2に示す。LESはSmagorinskyモデル($C_s = 0.13$)，RANSはSAモデルである。解析領域と境界条件は文献⁶⁾と同様，軸方向分割幅は $\Delta z = 0.1D$ ，時間増分は $\Delta t = 0.02D/U$ である。DESのメッシュはLESのメッシュの壁面法線方向の分割だけを細分化したものである。

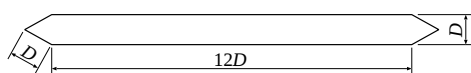


図-2 断面形状

表-2 解析条件

乱流モデル	LES	DES, RANS(2D)
レイノルズ数 Re	1.0×10^4	5.0×10^4
壁面法線方向要素幅 Δy	$0.0035D$	$0.0005D$
要素分割数	$35,536 \times 64$	$41,936 \times 64$

(2) 解析結果

図-3に壁面での平均摩擦応力 $\tau_w (= \rho u_\tau^2)$ を用いて表した壁指標による壁面の各方向要素幅 $\Delta_i^+ (= u_\tau \Delta_i / \nu)$ (y :壁面法線方向, x :壁面接線の流れ方向, z :壁面接線の軸方向)を示す。フェアリングを除いた部分($-6 \leq x/D \leq 6$)において，壁面法線方向である Δy^+ は，LESは2程度，DESは1程度の値となっている。壁面接線方向である Δx^+ ， Δz^+ は，LESは50前後，DESは50～250の値となっている。

高レイノルズ数の場合，平行平板間の流れの解析結果から判断すると，LESでは壁面接線方向の細分化も必要であると考えられるが，DESでは壁面近傍をRANSで解析するため，壁面接線方向の細分化を回避できると考えられる。

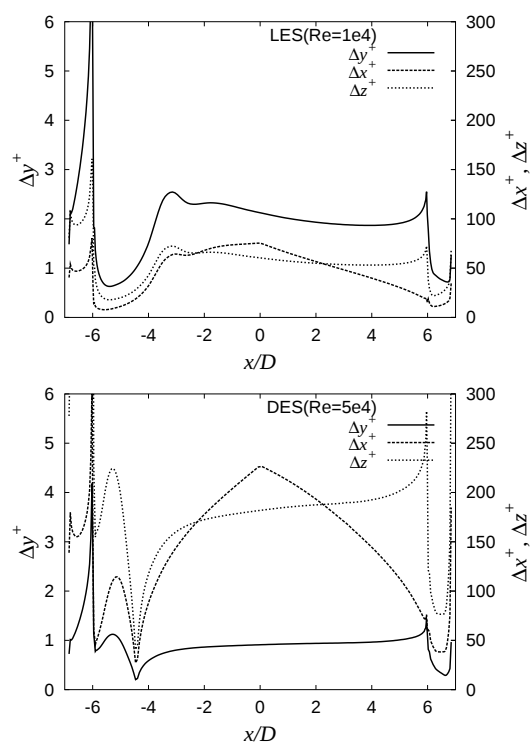


図-3 壁指標による壁面の各方向要素幅

図-4に表面圧力分布(時間平均)，図-5に軸方向流速 w のコンター(瞬間値)を示す。表面圧力分布を比較すると，下流側フェアリング部分以外は，DESはRANSとほぼ一致している。再付着位置はLESに比べかなり上流側になっている。このことは，下流側のフェアリング後流以外で，軸方向流速 w が発生しておらず，ほとんどの部分が2次元的な流れになっていることによる。また，下流側フェアリング部分でDESはLESとほぼ一致している。これは，RANSが定常解に収束したのに対し，LESとDESは周期的な揚力変動を伴う非定常解となったためである。

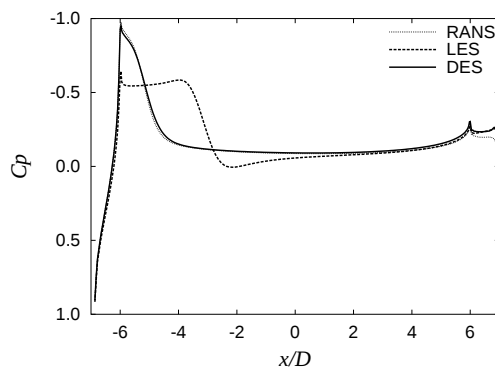


図-4 表面圧力分布(時間平均)

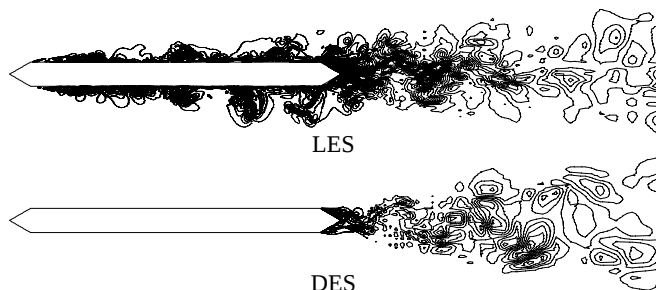


図-5 軸方向流速 w のコンター(瞬間値)

5. おわりに

本研究では，橋梁断面の数値流体解析にハイブリットモデルであるDESを適用した。DESの結果は，LESに比べ，3次元性が顕著に現れないことがわかった。発表時には，空気力係数の風洞実験結果との比較を示す予定である。

今後，DESは壁面接線方向の要素幅が大きくなることができ，高レイノルズ数の剥離・再付着を含む流れに対して小さい計算資源でも精度よく解析できることが期待される。謝辞: 本研究は平成15年度文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B) No.15760355)により行われたことを付記し，ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) P.R.Spalt, W.H.jou, M.Strelets and S.R.Allmaras: Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach, First AFOSR International Conference on DNS/LES, Ruston, LA, pp.4-8, 1997.
- 2) 丸岡, 太田, 平野, 川原: 同時補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.383-394, 1997.
- 3) R.D.Moser, J.Kim and N.N.Mansour: Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau = 590$, Phys. Fluids, 11, pp.943-945, 1999.
- 4) N.V.Nikitin, F.Nicoud, B.Wasistho, K.D.Squires and P.R.Spalt: An approach to wall modeling in large-eddy simulations, Phys. Fluids, 12, pp.1929-1932, 2000.
- 5) 半場: チャンネル乱流におけるLESと $k-\omega$ モデルの結合, 第15回数値流体力学シンポジウム, pp1-5, 2001.
- 6) 渡邊, 丸岡, 井上: フェアリングを有する箱桁断面に作用する静的空気力の数値流体解析による検討, 第17回風工学シンポジウム, pp.219-224, 2002.