

基本箱桁断面の数値流体解析における DES 及び Delayed-DES の適用

八戸高専 学生会員 ○佐々木 浩志
八戸高専 正会員 丸岡 晃

1. はじめに

橋梁の長大化に伴い，その耐風安定性能の更なる向上が求められている．耐風性の検討には主に風洞試験が用いられ，数多くの研究成果が報告されている．一方で，近年のコンピュータ技術及び数値解析手法の発達により，数値流体解析による耐風性の検討に期待が寄せられている．

本研究の目的は，橋梁断面の数値流体解析における乱流モデルの適用性を検討することである．ここで，検討したモデルは Spalart らによって提案された DES(Detached Eddy Simulation)¹⁾と Delayed-DES(Delayed Detached Eddy Simulation)²⁾である．DES は RANS(Reynolds Avaraged Navier Stokes equation) と LES(Large-Eddy Simulation) の利点を組み合わせたハイブリットモデルであり，それぞれ得意な領域を解析しているため計算効率を高めることができる．また，Delayed-DES は RANS と LES が複合したことによる 2 つの領域間の接点問題が改良されたモデルである．

本研究では，流れ場の解析手法に丸岡らの開発した有限要素法による IBTD/FS(Improved Balancing Tensor Diffusivity / Fractional Step) 法³⁾を適用し，平行平板間流れ及び基本箱桁断面によって DES と DDES の検討を行った．

2. DES と Delayed-DES

DES は，壁に付着した境界層内部を RANS で解析し，その外側を LES で解析する方法である．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．

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

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．

DES の改良版である Delayed-DES では $\tilde{d}$ を以下のように定義する．

$$\tilde{d} = d - f_d \min(0, d - C_{DES}\Delta), \quad \Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (3)$$

$$f_d = 1 - \tanh([8r_d]^3), \quad r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\sqrt{u_{i,j}u_{i,j}}\kappa^2 d^2} \quad (4)$$

ここで， $u_{i,j}$ は流速勾配， κ はカルマン定数である．

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．乱流モデルは，RANS(SA モデル)，DES，DDES を用いた．

解析条件を表-1 に示す． $\Delta_i^+ (= u_\tau \Delta_i / \nu)$ は壁指標で表した各方向分割幅である． y 方向分割幅は不均等分割とし，壁近くの分割幅を小さくする．なお，最小分割幅を $\Delta y_{\min}^+ = 1$ とする．時間増分は $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ である．

表-1 解析パラメータ

Re_τ	各方向分割数 ($x \times y \times z$)	各方向分割幅		
		Δx^+	Δy^+	Δz^+
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，図-2 に $\tilde{d}^+$ 分布を示す．ここで，図-1 中の Nikitin(DES) は Nikitin らによる DES(分割数 $(64 \times 64 \times 32)$) の結果⁴⁾であり，垂直線は，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． $y^+ = 130$ で $\tilde{d} = C_{DES}\Delta$ となる．

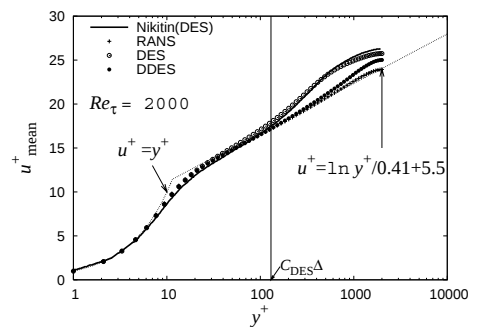


図-1 平均流速分布

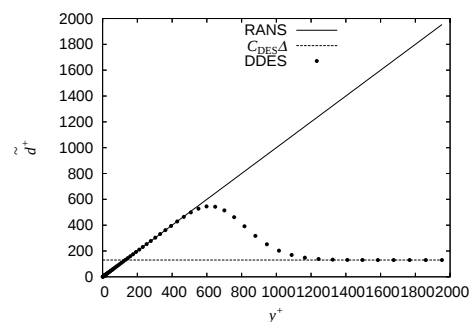


図-2 $\tilde{d}^+$ 分布

図-1 より，DES は RANS と LES の境界直後で平均流速の傾向が変化する．それに比べ，DDES はその傾向が緩和され，RANS を用いる部分と LES を用いる部分との境界線以降においても対数則により近い値となっている．

図-2 について，DES の $\tilde{d}^+ (= \frac{u_{\tau} \tilde{d}}{\nu})$ をみると，壁面近傍では RANS と同じ値となり， $y^+ = 130$ に達すると， $\tilde{d} = C_{DES}\Delta$ となるため一定となる．一方，DDES では， $y^+ = 130$ 以降もある程度 RANS と同じ値となり，徐々に $C_{DES}\Delta$ へ収束していく．従って，DDES は DES に比べ RANS の領域を広げることが可能となり，図-1 に示されたように，RANS と LES の境界直後で起きる平均流速の傾向の変化が緩和されたと考えられる．

4. 基本箱桁断面まわりの流れ

(1) 解析条件

対象断面の形状は，図-3 に示す断面辺長比 12 の矩形断面に正三角形のフェアリングを付加した 2 種類の基本箱桁断面である．

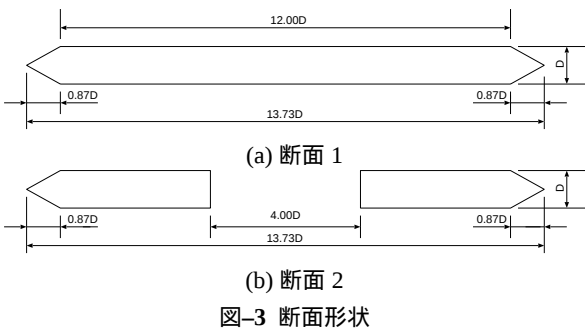


図-3 断面形状

解析条件を表-2 に示す．乱流モデルは，RANS(SA モデル)，DES，DDES を適用する．設定迎角は $\alpha = 0^\circ$ と $\alpha = 1^\circ$ ，時間増分は $\Delta t = 0.05D/U$ である．

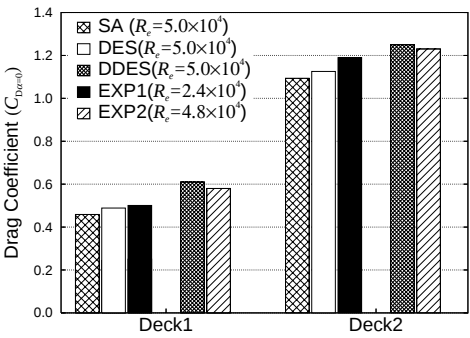
表-2 解析条件

乱流モデル	RANS	DES	DDES
レイノルズ数 Re	5.0×10^4	5.0×10^4	5.0×10^4
要素分割数 断面 1	41936	41936 × 64	41936 × 64
要素分割数 断面 2	48106	48106 × 64	48106 × 64
法線方向要素幅 Δy	0.0005D	0.0005D	0.0005D

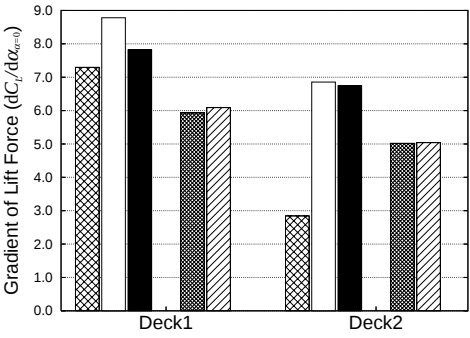
(2) 解析結果

図-4(a)，(b)，(c) に，迎角 $\alpha = 0^\circ$ の抗力係数 ($C_{D\alpha=0}$)，迎角 0° 周りの揚力傾斜 ($dC_L/d\alpha_{\alpha=0}$) 及びモーメント傾斜 ($dC_M/d\alpha_{\alpha=0}$) の解析結果と風洞試験結果⁵⁾の比較を示す．ここで，風洞風速が 9m/s の結果が EXP1，18m/s の結果が EXP2 である．

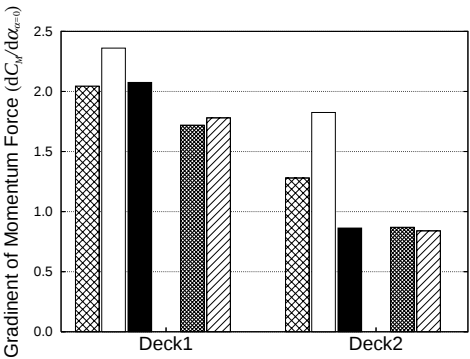
各乱流モデルの解析値と実験値を比較する．断面 1 について，RANS と DDES は DES に比べ実験値に近い値を示したが，両者に大差は見られない．一方，断面 2 について RANS と DDES を比較すると，DDES は実験値により近い値を示している．特に，図-4(a)，(c) の抗力係数，モーメント傾斜の結果は実験値と良く一致している．



(a) 迎角 0 °まわりにおける抗力係数の比較



(b) 迎角 0 °まわりにおける揚力傾斜の比較



(c) 迎角 0 °まわりにおけるモーメント傾斜の比較

図-4 空気力係数の比較

5. おわりに

本研究では，平行平板間流れと基本箱桁断面まわりの流れを解析対象として，DES と DDES の適用性を検討した．その結果，DDES では，DES に比べ RANS と LES の境界直後で起きる平均流速の傾向の変化が緩和されることが確認された．さらに，DDES は断面形状の違いによる空気力特性の変化をより正確に捉えられることが分かった．

参考文献

- 1) P.R.Spaltart, 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) P.R.Spaltart, S.Deck, M.L.Shur, K.D.Squires, M.Kh.Strelets and A.Travin : A New Version of Detached-Eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities, Theo.and Comp. Fluid Dyn, 2006.
- 3) 丸岡, 太田, 平野, 川原: 同次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.
- 4) N.V.Nikitin, F.Nicoud, B.Wasistho, K.D.Squires and P.R.Spaltart: An approach to wall modeling in large-eddy simulations, Phys, Fluids, 12, pp.1929–1632, 2000.
- 5) 渡邊, 井上: 橋梁断面の耐風設計における CFD の活用, 三井造船技報 No.179,pp.8–11,2003.
- 6) 佐々木, 丸岡:基本箱桁断面の数値流体解析における DES の適用, 東北支部技術研究発表会講演概要, pp.14–15, 2006.