

II-349

縦断方向に粗度が変化する場における流れの構造

(レイノルズ応力分布の応答特性)について

群馬大学工学部 正 員 清水義彦
金沢大学大学院 学生員 北村忠紀金沢大学工学部 正 員 辻本哲郎
金沢大学大学院 学生員 宮垣圭吾

1. まえがき

本研究は縦断方向に粗度が変化する開水路流れ場において、底面条件の変化に対するレイノルズ応力の遷移過程を検討したものである。はじめに単一の粗滑及び滑粗変化部における流れ場に対し、粗度による形状抵抗を考慮した $k-\varepsilon$ モデルから現象の特徴を記述できることを示し、その数値計算結果とより簡便なモデルとしてすでに提案されている緩和モデル(底面せん断応力の変化に対するレイノルズ応力分布の応答をインパルス応答を用いた畳み込み積分モデル)¹⁾との対応を示す。次に粗滑面を縦断方向に繰り返す流れ場におけるレイノルズ応力の遷移過程を検討する。

2. 粗度による形状抵抗を考慮した $k-\varepsilon$ モデルによる数値計算

通常、粗面流れを計算するにあたっては、底面境界条件として粗面对数分布則を仮定する方法が採られる。しかしながら粗度長(roughness length)は平衡流場で求めたものを与えることや粗度急変部においても対数則が完全な形で成立するかは疑問である。ここでは、粗度の存在を形状抵抗の出現と捉え、形状抵抗による平均流エネルギーの減少と乱流エネルギーの増加を考慮して、開水路流れの基礎式の中に粗度による形状抵抗の効果を取り入れて粗面流れを計算する。このとき、乱流クロージャーモデルとして $k-\varepsilon$ モデルを用いると式(1)～(7)が定式化される²⁾。粗度が流れに対して有効に形状抵抗を及ぼす高さは粒径の2割程度とし($=0.2d$, d :粒径)、この範囲において形状抵抗の効果を導入し、それ以外の領域では形状抵抗をゼロとする。数値計算の詳細は参考文献(2)と同様である。

3. 粗滑・滑粗変化部の流れに対する検討

図1, 2に数値計算から求められた滑・粗面、粗・滑面の変化部(ともに $x=0$ を粗度変化点とする)におけるレイノルズ応力の遷移過程を示す。福津・中川ら³⁾による室内開水路実験による計測結果や辻本ら⁴⁾による野外流路での測定から指摘されるように、粗度変化前の摩擦速度(u_{*1})に規定されるレイノルズ応力の3角形分布から新し摩擦速度(u_{*2})に対応したそれへ、底面より順次対応していく様子が明確に再現されている。とくに形状抵抗から開放される底面近傍のレイノルズ応力値を底面せん断応力値($\tau_b = \rho u_{*2}^2$)と考えれば、下流側底面せん断応力値への遷移応答は早く、滑粗変化部ではいわゆる底面せん断応力のオーバーシュートも再現される(図3)。図4は滑・粗面変化における計算された底面せん断応力の流下方向変化(形状抵抗係数 C_d をパラメータ)を示したもので、 C_d が大きくなるとオーバーシュートも顕著に再現されている。このように提案された数値計算法からも粗度急変流の基本的な特徴として、底面せん断応力の変化に対するレイノルズ応力の応答は底面から離れるに従って遅れを有することが示されたが、その特性を取り入れた緩和モデルの有効性が推測される。そこで $k-\varepsilon$ モデルの計算とレイノルズ応力($\tau(\eta, \xi)$; $\eta = y/h$, $\xi = x/h$)の緩和モデル(式(8)～(9))との対応を図5に示してみた。 $\beta = u_{*1}/u_{*2}$ として実線は緩和モデル、白丸が $k-\varepsilon$ モデルによる計算結果で、粗滑・滑粗変化部ともに両者の対応は良好であり、粗度急変流の特徴をつかんだ緩和モデルの合理性が認められる。

4. 縦断方向に粗・滑面が繰り返す流れ場のレイノルズ応力の遷移過程について

縦断方向に粗・滑面が繰り返す流れ場は、たとえば、gravel sheet(縦断交互分級)や第1次近似としての河床波上の流れの理解に役立つものであるが、栈粗度の間隔によって流れ場が完全干渉域と不完全干渉域に分けられるように、粗度の配置間隔に応じて流れ場の空間的均質・不均質性が出現するといった現象の基本的な理解も重要である。すなわち粗・滑面繰り返しスケールとレイノルズ応力の緩和距離との比

によって流れ場の空間的均質性がどのくらい確保されるかという基礎的な問題を簡便な緩和モデルから考察する。摩擦速度が流下方向長さ L_* （水深 h で無次元化）ごとに急変する場合、任意の1つの粗度急変点から下流 ξ の断面でのレイノルズ応力分布は式(10)となり、計算結果を単一の急変流れでの計算結果（点線）と比較したものを図6に示す（ $\tau_{bm}, \tau_{br}, \tau_{bs}$ は1波長平均、粗面、滑面での底面せん断応力値）。これより L_* が小さくなると平均底面せん断応力に支配される乱流構造の領域が増加することがわかる。

5. あとがき

本研究は数値計算から粗度変化に伴うレイノルズ応力の遷移過程を検討した。今後は、とくに繰り返し粗・滑面場におけるレイノルズ応力の遷移過程を計測し、モデルの検証に努めたいと考えている。

参考文献 1) 辻本・Cardoso・斉藤：水工学論文集34, 1990. 2) 清水・辻本・北村：水工学論文集35, 1991. 3) 福津・中川・瀬谷・鈴木：水工学論文集34, 1990. 4) 辻本・北村・岡田・王子：水工学論文集35, 1991.

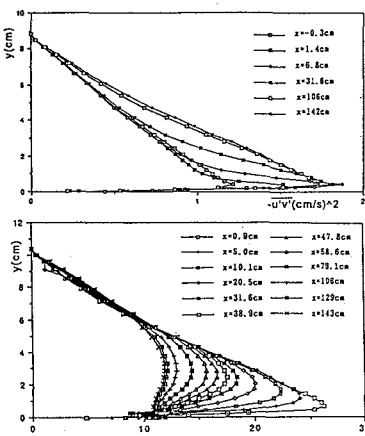


Fig. 1.2 k-εモデルによるReynolds応力の遷移過程

平均流の輸送方程式

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = gI_* - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x} - F_x + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2\Gamma \frac{\partial U}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \Gamma \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial y} - F_y + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \Gamma \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ 2\Gamma \frac{\partial V}{\partial y} \right\} \quad (2)$$

乱れエネルギー(k)の輸送方程式

$$U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_x}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_y}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + P_k - \epsilon + C_{r1}(F_x U + F_y V) \quad (3)$$

逸散率(ε)の輸送方程式

$$U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_x}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_y}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\epsilon}{k} (C_{1k} P_k - C_{2k} \epsilon + C_{r2} (F_x U + F_y V)) \quad (4)$$

$$P_k = \nu_* \left\{ 2 \left(\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right\}, \quad \Gamma = \nu + \nu_* \quad (5)$$

連続式

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

ここに、 U, V : 平均流の流下(x)・鉛直(y)方向速度成分、 I_* : エネルギー勾配、 P' : 静水圧からの偏差分、 F_x, F_y は粗度による x, y 方向の形状抵抗であり、 Λ を流体の単位体積あたりに占める粗度要素のしゃへい面積、 C_{Dx}, C_{Dy} をそれぞれの形状抵抗係数として次式で与える。

$$F_x = (1/2) C_{Dx} \Lambda U (U^2 + V^2), \quad F_y = (1/2) C_{Dy} \Lambda V (U^2 + V^2) \quad (7)$$

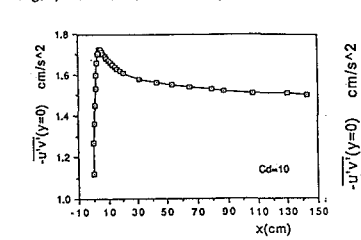


Fig. 3 底面Reynolds応力の流下方向変化(k-εモデル)

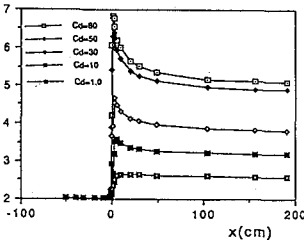


Fig. 4 底面Reynolds応力の流下方向変化(k-εモデル)

$$\tau(\eta | \xi) = (1-\eta) \int_0^\eta \tau_*(\xi-\delta) g_\eta(\delta | \eta) d\delta \quad (8)$$

$$g_\eta(\delta | \eta) = \frac{1}{\Lambda(\eta)} \exp \left\{ -\frac{\delta}{\Lambda(\eta)} \right\} \quad (9)$$

$$\Lambda(\eta) = 20\eta(1+1.5\eta^2)$$

$$\tau(\eta | \xi) = (1-\eta) \cdot \Omega'(\eta | \xi) \quad (10)$$

$$\Omega'(\eta | \xi) = (\beta^2 - 1) \phi'(\eta | \xi) + 1$$

$$\phi'(\eta | \xi) = 1 - \exp(-\xi/\eta) / [1 + \exp(-L/\Lambda)]$$

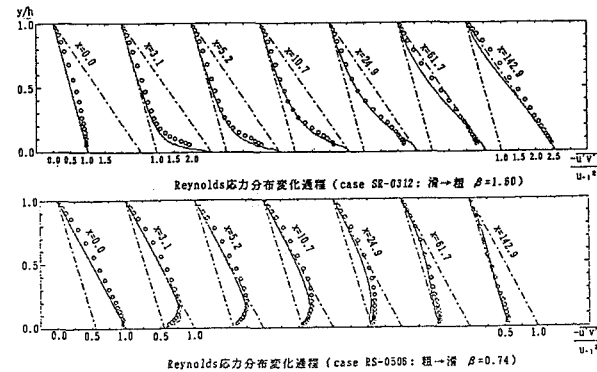


Fig. 5 k-εモデルと緩和モデルの比較

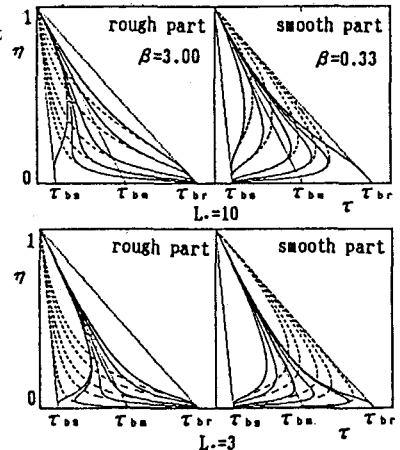


Fig. 6 粗滑の繰り返しによるReynolds応力の遷移過程