

II-190

開水路粗度急変部における流れの内部機構

京 都 大 学 学 生 員 ○ 神 田 佳 一
豊橋技術科学大学 正 員 四 倉 信 弘

1. 緒言：開水路粗度急変部における流れの内部機構の解明は、粗度が変化する水理構造物周辺部の水理、特に流砂の連続性を考慮する上で不可欠であると思われる。本研究では護床工等の河川構造物にみられる底面粗度急変流を取り上げ、その一例として棧型粗度を用いた実験により粗度変化にともなう流れの遷移機構を考察すると共に、 $k-\varepsilon$ モデルを用いた簡単な数値解析により現象予測を試みた。

2. 実験概要：実験水路は幅40cm、深さ20cm、および長さ14.4mの鋼製矩形断面水路であり、水路勾配は $i=1/500$ とした。河床粗度としては高さ $K=1$ cm、幅 $b=1$ cmの角材を流れに直角に設置した2種の棧型粗度（棧間隔 $s=2.5$ 、および5cm）を用い、水路のほぼ中央で棧間隔 s を変えて粗度を変化させた。ただし、粗度基面はいずれも棧頂面とした。実験は図-1に示す2ケースであり、それぞれ下流粗面上で等流状態にして粗度変化点近傍における鉛直流速分布、および乱れ強度分布を3mm径の超小型プロベラ流速計を用いて計測した。各測定点における測定時間は約120secであり、サンプリングタイム $t=0.04$ secでA-D変換した3840個のデータについて統計処理を行った。

3. $k-\varepsilon$ モデルの適用：ここでは、底面粗度が変化したときの流れの遷移機構の予測手法として、 $k-\varepsilon$ モデルの適用を考える。水深方向の流速成分を無視すれば、鉛直二次元定常流における流れの運動方程式、乱れエネルギー k 、および逸散率 ε の輸送方程式はそれぞれ次式で表される。

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left((\nu_t + \nu) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + g \left(i - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\bar{u} \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon \quad (2)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{u}$ ：時間平均流速、 ν ：動粘性係数、 ν_t ：渦動粘性係数、 $(=C_\mu k^2/\varepsilon)$ 、 g ：重力加速度、 i ：河床勾配、 h ：水深、および x 、 y はそれぞれ流れ方向、鉛直方向距離である。また、各モデル定数（ σ_k 、 σ_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、および C_μ ）はSpaldingによる標準値¹⁾を用いた。境界条件は、水面では $\partial \bar{u} / \partial y = 0$ 、 $\partial k / \partial y = 0$ 、および ε についてはCelik¹⁾の実験式 $\varepsilon = 5.54 k^{3/2} / h$ を用い、底面条件としては各棧粗面における相当粗度 k を用いて壁関数より与えた。計算には中心差分を用い、任意の初期条件に対して上流粗面における相当粗度を与えて解が安定するまで繰り返し計算を行った後、底面条件を変えて粗度変化点下流の任意断面における流れ特性を算定した。

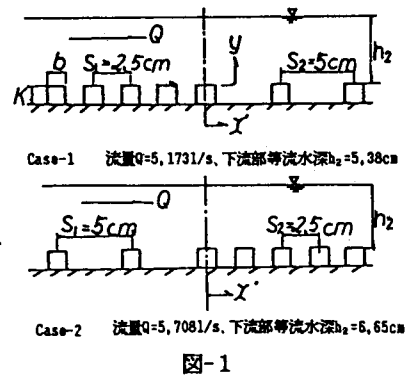


図-1

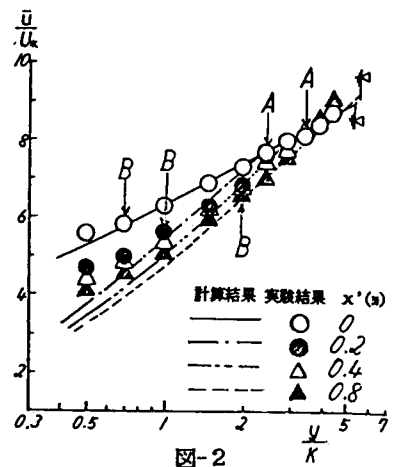


図-2

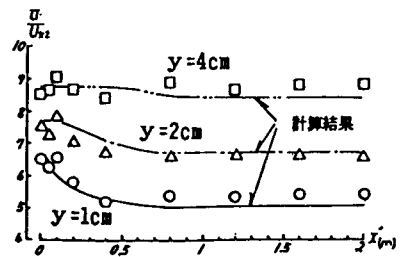
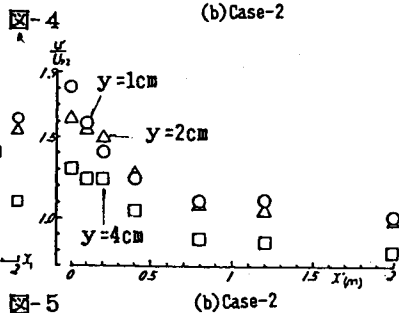
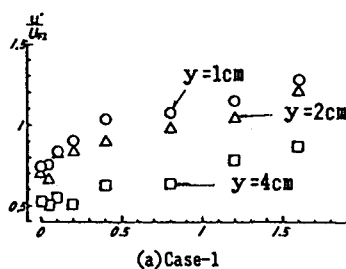
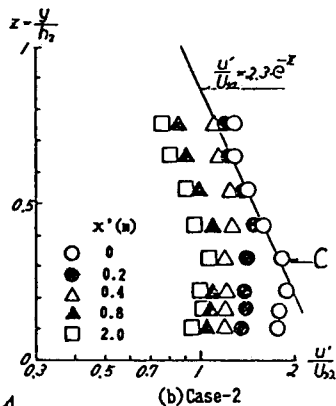
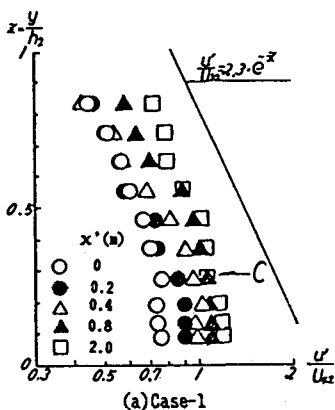


図-3

4. 結果および考察：実験および計算結果より、Case-1について時間平均流速 $\bar{u}$ の鉛直分布の流下方向への変化を示せば図-2のようである。図中、 x は粗度変化点からの流下距離、 y は棧頂部からの鉛直距離、 U_{*2} は下流等流部における摩擦速度である。また、図-3は $y=1, 2$ 、および4 cmでの流速を流下距離に対してプロットしたものである。



両図より、流速分布は粗度変化点より流下するに従い底面より変化しているのが読み取れる。図-2中の変曲点Aは、村重ら²⁾の研究にみられた底面粗度変化後に生じる内部境界層の上端と思われる。この内部境界層は粗度変化後約1 mで水面まで達しており、その後流速は流下方向にほとんど変化せず下流粗面上での等流状態が得られている。また、底面近傍にも変曲点Bがみられるが、これは個々の棧粗度要素背後に生じる渦によって粗度近傍で鉛直方向に強い混合が生じたためであろう。³⁾ 計算結果を見れば、各断面において、底面近傍を除いて実験値とよく対応している。一方、Case-2については粗度変化点近傍で水面の変動がみられCase-1の場合とは異なった流速の遷移特性を示しており、底面

近傍の流れ特性と共に今後の課題である。図-4(a), (b)は、乱れ強度分布の流下方向への遷移を下流部等流水深 h_2 、および摩擦速度で無次元表示したものである。図中の実線は祢津⁴⁾の普遍関数(4式)である。

$$u'/U_{*2} = 2.3 \cdot \exp(-y/h_2) \quad (4)$$

また、図-3と同様に $y=1, 2, 4$ cmでの乱れ強度に注目すれば図-5(a), (b)のようである。図-3と図-5(a)を比較すれば、乱れ強度においても時間平均流速同様、底面付近より変化しているが、その変化は流速の変化に比べて遅い。しかしながら、このことは理論的には証明されておらず、熱線流速計等の乱流計測器による精密な乱れの測定が必要であろう。図-4(a)中の変曲点Cは、上述の粗度近傍領域に対応するものであると思われる。Case-2においては、底面で生じる乱れの減少により、粗度変化点直下流において乱れ強度は底面から水面近傍までほぼ一様に分布しており興味深い。最後に図-2および図-4(a)より、変曲点B、Cの生じる鉛直距離 y_b, y_c の流下方向への変化を示せば図-6のようである。同図より、粗度変化点近傍を除けば両者はほぼ一致している。

5. 結言：以上、限られた実験条件のもとではあるが、底面粗度の変化による流れ特性について述べた。今後、実河川への適用をふまえ、粗度急変部における流砂機構の解明の手がかりとしたい。

参考文献：1) Celik: Mech. of Sedi. Trans. (1982)。2) 村重 他：土木学会論文報告集、第369号、(1986)。3) 山岡：北海道開発局土木試験所報告、(1962)。4) 祢津：土木学会論文報告集、第261号、(1977)。