

群馬大学工学部 正員 富永 晃宏

同上 学生員 中村 悦由

同上 高橋 正良

1. まえがき

直線の開水路流の三次元構造を決定する重要な要素として二次流があり、これは側壁の存在、横断方向の粗度または河床高さの周期的な変化によって安定に存在する。この二次流は主流速や乱れの構造および壁面せん断応力分布等に大きな影響を及ぼすことがすでに知られている。ここでの縦筋河床とは底面粗度が横断方向に周期的に変化する河床のことで、村本らが混合砂礫河床においてこれが形成されることを見出した¹⁾。またこのような河床上の流れの詳細な計測が、Studerus²⁾、Müllerら³⁾および中川ら⁴⁾によって行われ、その構造がある程度明らかにされている。本研究は、二次流の乱流構造および輸送現象に果たす役割を把握するために、縦筋によって二次流を安定させた流れにおいて、その内部構造の定量的な解明をしようとするものである。

2. 実験装置および方法

実験水路は長さ12.5m、幅40cmで図1に示すようなビニール製の粗面と厚さ1mmの滑面を図2のように設置した。この配置は側壁近傍の二次流によって誘起される並列せん流の配列に適合させたものである⁵⁾。水深を4.8cm(L101)、9.6cm(L102)、2.4cm(L103)の3通り変え、平均流速を40~45 cm/sに合わせた。計測にはX型ホットフィルム流速計を用い、X-Y面とX-Z面に分けて同一測点で計測し合成した。また二次流速は質量保存則が成立するように補正を行った⁵⁾。

3. 粗度の特性

用いた粗度の特性を調べるために同一の粗度を全面に一樣に設置した実験(R111)を行った。その結果、y座標の原点の高さは粗度頂部より約6mm下方となり滑面の表面とほぼ一致する。壁面近くの流速の勾配のみから摩擦係数によって摩擦速度 U_* を求めたところ、その平均値は約3となり、水面勾配から $\sqrt{gRI\epsilon}$ によって求めた値2.5と比べてかなり大きくなった。またこの U_* で無次元化された y^+ の値も小さくなることから、カルマン定数 K が通常の0.4より減少したものと考えられる。ただし、著者らの行った球形の密集粗度においてはこのような K の減少がなかったことから⁵⁾、粗度の形状や配列や密度がこのことに関係していると思われるが、これは今後検討すべき問題であろう。 U_* を $\sqrt{gRI\epsilon}$ に一致させるように K を逆算すると $K=0.33$ となり、粗度高さ $K_s=0.2$ cmとなった。ここでは縦筋河床についても $K=0.33$ を用いることとした。

4. 実験結果とその考察

(1) 二次流構造 二次流ベクトル図を図3に示す。L101では側壁近傍で誤差が大きく不明確であるが、粗面上で下降し滑面上で上昇する水深規模の渦が支配的となっていることがわかる。L102では側壁による水面縦渦がまだ支配的で底面の縦筋による渦構造は半水深程度の規模に押しえられている。L103ではデータのばらつきが大きい粗面と滑面の境界付近で下降流が生じ、滑面および粗面中央で上昇流が生じる傾向にあり特に滑面上の渦構造の方が明確である。以後の解析は渦構造の明確なL101の $z/H \sim 2$ の領域で行うこととする。

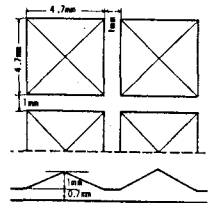


図1 粗度形状

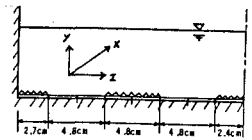


図2 河床条件

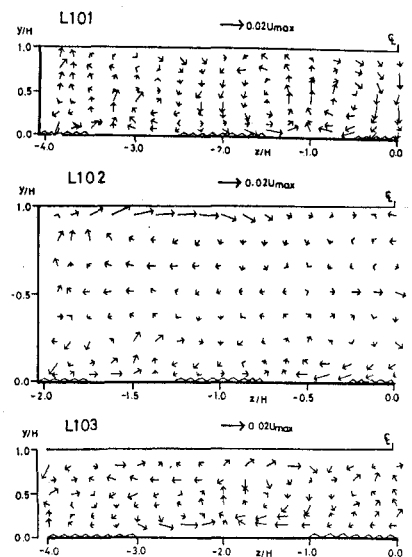


図3 二次流ベクトル図

(2) 主流速および乱流構造 図4~7に平均主流速 U 、乱れ強度 u' 、レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 、 $-\overline{uw}$ の等値線を示す。 U は粗面上で高速、滑面上で低速となり顕著な形状の分布を呈する。 u' は底面ごく近傍では粗面上の方が大きい。底面から離れると逆に粗面上で小さく滑面上で大きくなる。 $-\overline{uv}$ についてもほぼ u' と同様のことが言える。 $-\overline{uw}$ は粗面および滑面中央でほぼ0に近く、粗面中央より右側に負の領域、左側に正の領域が存在する。一般に粗度が大きくなれば水は流れにくく、乱れも大きくなるが、ここでは全く逆の現象が生じており二次流の果たす役割の重要性が認められる。

(3) 摩擦速度分布 主流速 U の $\log y$ に対するプロットから、底面側と水面側で傾きが変化することがわかり、両方から $U_\star$ を求めそれぞれ $U_{\star 1}$ 、 $U_{\star 2}$ とした。図8は $U_{\star 2}$ による速度欠損則を示したものであり、 $y/H \approx 0.4$ 付近で傾きが変化することからわかる(粗面と滑面の境界では変化しない)。図9に $U_{\star 1}$ 、 $U_{\star 2}$ の分布を示すが、両者は全く逆の位相を示す。このうち底面のせん断応力を表わすのは $U_{\star 1}$ である。

5. 横断方向の運動量輸送に関する考察

図10は単位幅の水柱に働く力と運動量の関係を示したものであり、 T_{zx} 、 I_{zx} はそれぞれ

$$T_{zx} = \rho \int_0^H (-\overline{uw}) dy \quad (1), \quad I_{zx} = \rho \int_0^H (UW) dy \quad (2)$$

と表わせる。 T_{zx} 、 $-I_{zx}$ およびその和の実験値を図11に示す。 $-I_{zx}$ を働く力と考えると両者の力の向きは逆で、 $-I_{zx}$ の方が大きくその差が粗面上の流体を加速し、滑面上の流体を減速する力となって働く。また、

$$\rho U_\star^2 = \rho g H I_e + \frac{\rho}{2} (T_{zx} - I_{zx}) \quad (3)$$

と表わすことができ、これより $U_\star^2$ を計算したものと対数則より求めた $U_{\star 1}$ との比較を図12に示す。左側の粗面上ではずれが大きい。他はおよそ一致し実験値の妥当性を示している。

6. あとがき

今後は実験結果をモデル化することにより、渦動粘性係数や二次流の役割について定量的評価を行いたい。
 <参考文献> 1) 村本ら; 京大防災研年報第20号 B2, 1977, 2) Studarus, X.; R19-82 Report ETH zürich, 1982, 3) Müller, A. et al.; Proc. XVIII IAHR Congress, Cagliari vol. 3, 1979, 4) 中川ら 京大防災研年報, 第24号 B2, 1981, 5) 畠永 江崎 第29回水理講演会論文集, 1985

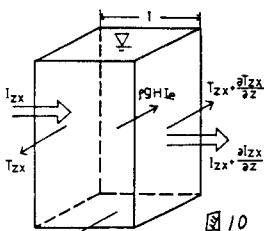


図10 カと運動量の関係

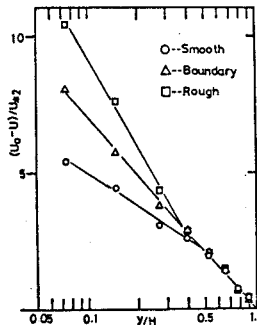


図8 速度欠損則

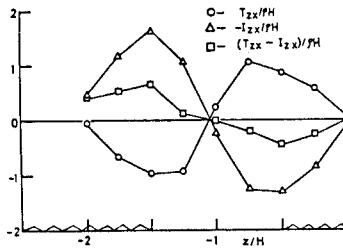


図11 T_{zx} 、 $-I_{zx}$ の分布

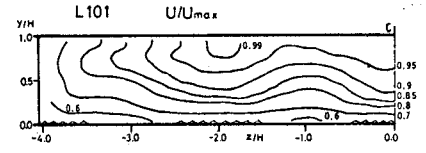


図4 平均主流速 U の等値線

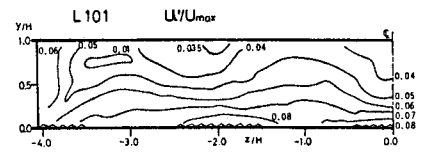


図5 乱れ強度 u' の等値線

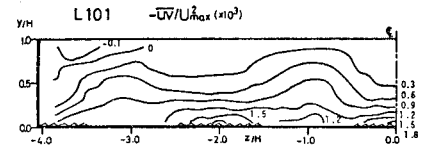


図6 レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の等値線

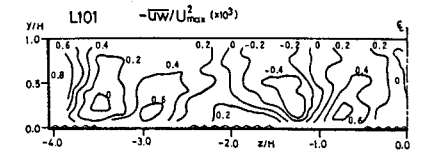


図7 レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の等値線

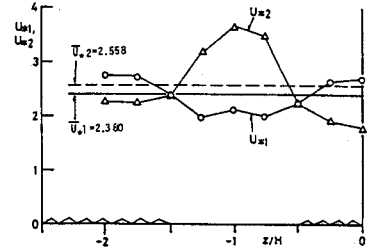


図9 摩擦速度 $U_{\star 1}$ 、 $U_{\star 2}$ の分布

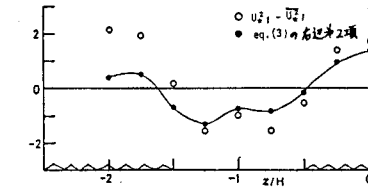


図12 $U_\star^2$ の実験値と計算値の比較