

II-65

水制を含む流れの実験的研究

北海道開発局 正員 崇田徳彦
正員 清水康行
正員 橋本識秀

1 はじめに

本研究ではレーザー流速計により、水制を含む流れの構造及び Reynolds 応力の詳細な計測を行った。この結果、水制背後の土砂堆積現象に重要な影響を与えられと考えられる水制背後の乱れに関する新たな実験結果が得られた。本文は、その実験結果について報告を行うものである。

2 Reynolds 応力と渦動粘性係数

水制工は、水制前面まで流路に沿って流れる流れを強制的に抑制する事により、水制背後に水平方向の流速差を生じさせ、この流速差により、水制背後に土砂堆積を促進させる。この流速分布の不均衡によって生ずる乱れの強さは Reynolds 応力で表される。3次元の流れ場においては互いに独立な9成分の Reynolds 応力が存在するが、このうち、水制下流のように流下方向流速の横断方向変化が卓越する流れにおいては $\tau_{xy}(x, y)$ はそれぞれ流方向および横断方向) が非常に大きくなりこれが水平方向の乱れの拡散に重要な役割を果たす。数値計算においてこの τ_{xy} をどのようにモデル化するかが流れ全体の予測精度を決定する

一般に τ_{xy} は渦動粘性係数と平均流速で次式のように表される。

$$\frac{\tau_{xy}}{\rho} = -\overline{u'v'} = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここで、 U, V は x, y 方向の時間平均流速、 $-\overline{u'v'}$ は流下方向流速と横断方向流速の共分散、 ν_t は渦動粘性係数である。従来より渦動粘性係数 ν_t は河床せん断力による乱れ $\kappa u_* h/6$ ($u_* = \sqrt{ghi}$; g は重力加速度、 h は水深、 i は勾配) で表わしていたが今回流速分布の強制的な変化により生ずる乱れをも考慮してみた。通常後記の渦動粘性係数 ν_t は

$$\nu_t = \alpha \Delta U \ell \quad (2)$$

と表わされる。¹⁾ ΔU は $U_{max} - U_{min}$ との差であり、 ℓ は半値幅であり今回水制長を想定した。 α は流れに依存する係数である。今回 α が混合層流の場合どのような値になるかを実験結果を基に仮定した。このことから $-\overline{u'v'}$ は以下の式のようにになる。

$$-\overline{u'v'} = \left(\alpha \Delta U \ell + \frac{\kappa}{6} u_* h \right) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (3)$$

3 実験条件

実験条件は直線水路に単一水制を設置したものであり、実験は水制周辺、特に直下流部に着目したものである。実験条件を表-1に示す。

図-1は図-2、図-3に示す測定点の平面図を表わす。図-2は水制からの距離12, 44, 72cmで水制長より1cm長い速点のV方向流速であり、上流から下流を見ており負の方向が左岸側であり左岸側から水制が張り出している。特に2次流現象を詳細に測定するため1測点あたり66点計測(河床5mmより表面2mmまで3mm間隔)を行なった。これによると河床2cm付近まではどの測点においても水制側に流れる流速が現れており、流れの方向が表面付近と河床付近では全く逆向きの流れになっている。これは水制の背後に囲り込むことにより生ずる遠心力に起因する2次流と考えられ、これが水制背後の土砂堆積に重要な役割を果たす。

4 実験結果

4-1 2次流

図-3には水制からの距離4, 16, 24, 76cmのV方向流速を示す。水制の配置や方向等は図-2と全く同じである。測点24cmを上流から着目してみると(1)では河床から表面まではほぼ等速分布である。

表-1 実験条件

水路延長	700cm
水路幅	40cm
下流端水位	7cm
測定水路延長	100cm
河床勾配長	1/1000
水制 長	20cm
水制 幅	4cm
実験流量	1.80ℓ/s

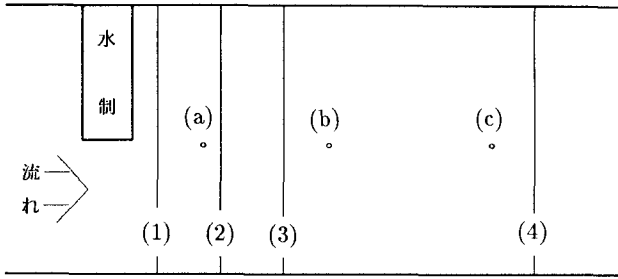
(2)ではすでに河床で逆向きの流れが出来始めている。さらに(4)式を見ると表面付近では流速はほぼ0であり死水域になっている。さらに特筆すべきことは(2), (3), (4)を見ると、測点25cmを境に河床付近の流れが両側に広がっている流れが存在する点である。これは実現象にも見られるような、水制先端から下流に向かって主流域と死水域を境界するような水脈筋の発生原因である。

4-2 Reynolds 応力の実験値との比較

今回 α の値に0.007を当てはめて見た計算値と実測値を図-4に示す。尚、黒丸が計算値で実線が実測値である。これによると水制直下流では計算値のほうが若干大きく、下流では実測値の法が若干ではあるが大きい。Reynolds 応力をほぼ予測しているモデルと成っている。

4-3 計算値と実験値との比較

上記に示した渦動粘性係数を用いて2次元モデルで再現計算を行なった。結果を図-5に示す。(計算値は実線、実測値は黒丸)



- (1) 水制下流 4(cm) (a) 水制下流 12cm
 (2) 水制下流 16(cm) (b) 水制下流 44cm
 (3) 水制下流 24(cm) (c) 水制下流 72cm
 (4) 水制下流 76(cm)

図-1 測定点平面図

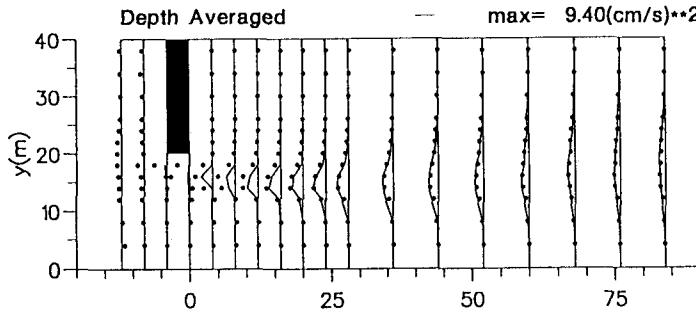


図-4 Reynolds 応力の実測値と計算値の比較

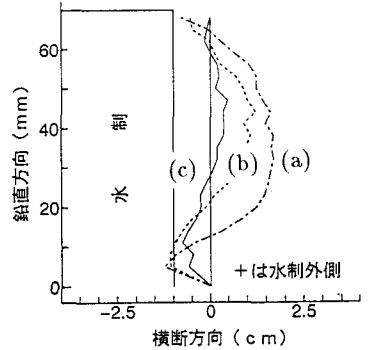
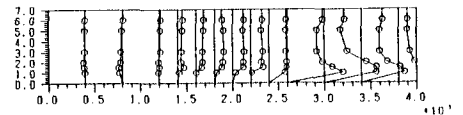
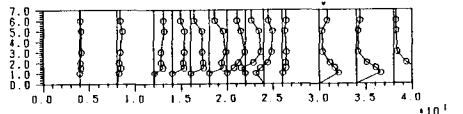


図-2 2次流

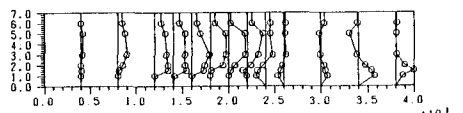
- (1) 水制下流 4(cm)



- (2) 水制下流 16(cm)



- (3) 水制下流 24(cm)



- (4) 水制下流 76(cm)

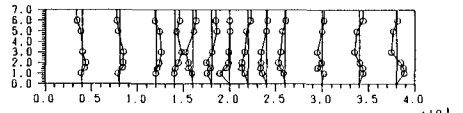


図-3 横断方向流速 V

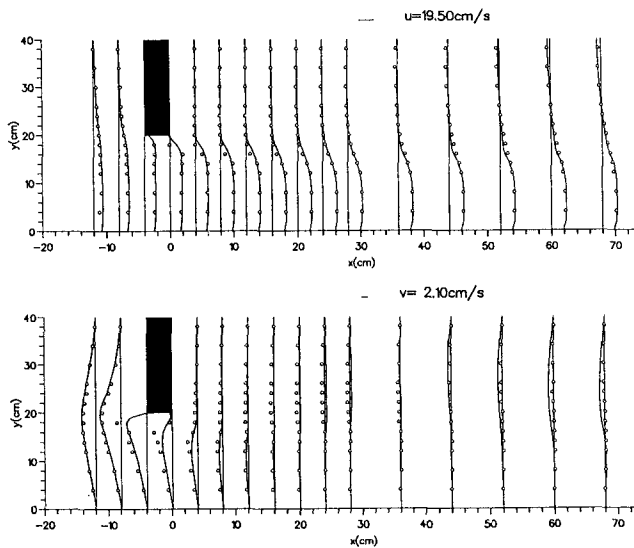


図-5 計算値と実測値の比較

(上: U方向流速、下: V方向流速)

5 まとめ

今回の実験により水制を含む流れの構造が明らかになった。特に、水制背後においては流線の曲がり起因する2次流の影響で河床付近で水制側に向い、表面付近では水制の外側に向う流れが観測され、水制による土砂堆積のメカニズムが明らかになった。また、水制による乱れの拡散状況は、Prandtlの輸送理論によりほぼ予測が可能であることが示された。以上の結果は今後水制を含む流れの計算モデル開発にとって非常に有益な情報となる。

最後に本研究で行なった実験は科学技術庁の招聘による米国 USGS の Dr.Jonathan Nelson と共同で行なわれたものである。また、北海道大学土木工学科防災研究室長谷川和義先生には Prandtl の輸送理論について貴重なアドバイスを頂き、ここに記し謝意を表す。

参考文献 1) 巽友正「乱流現象の科学」東京大学出版会