

透過型水制を有する開水路湾曲部の流れと河床変動の2次元数値解析

名古屋工業大学 学生会員○松本大三
名古屋工業大学 学生会員 中村尚子

日本建設コンサルタント(株) 青木健太郎
名古屋工業大学 正 会 員 富永晃宏

1. はじめに 湾曲部に樹木群(円柱粗度群)が存在する場合の河床変動および流れの制御について、これまでの研究で明らかになっている。また、帯状ではなく間隔をあけた透過型水制についても樹木群とほぼ同様の効果があることが示されている。しかし透過構造物の効果は、湾曲部の平面形状に対する位置の条件設定を変化させる実験が困難であるため、数値計算による予測が有効な手段となる。本研究では透過型水制を湾曲部外岸に設置した実験データと比較することにより、2次元の数値計算法の妥当性について検討した。

2. 実験装置および条件 実験水路は水路幅 $B=90\text{cm}$ 、深さ 30cm 、全長 17.2m の長方形断面水路で、 60° の単一湾曲部を設置したものである。湾曲部の中心曲率半径は $r=270\text{cm}$ 、 $r/b=3.0$ である。透過型水制は、直径 5mm の木材の棒を流下方向、横断方向に 2.5cm 間隔で $10 \times 22.5\text{cm}$ の大きさに配置した円柱群模型を用い、 $\theta=0, 15, 30, 45, 60^\circ$ の5ヶ所に設置した。流量は $40\ell/\text{s}$

表-1 実験条件

ケース名	河床状態	円柱高さ (cm)	水深 h (cm)
Ds-10	固定床	7.5	14.6
D-10		18	15.7
Ss-10	移動床	7.5	14.9
S-10		18	15.0

に設定し、湾曲入口より 90cm 上流において水深 $h=15\text{cm}$ となるように調節した。実験条件は表-1に示す。

3. 湾曲部流れと河床変動の2次元数値計算 透過型水制の高さの違いが流れ構造と河床変動に及ぼす効果を数値シミュレーションにより検討した。基礎式として曲線座標系における水深平均平面流方程式を用いる¹⁾。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{R}{R+y} \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{2UV}{R+y} = -g \frac{R}{R+y} \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - F_x - \frac{R}{R+y} \frac{\partial \overline{U'U'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{V'V'}}{\partial y} - \frac{2\overline{U'V'}}{R+y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{R}{R+y} \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} + \frac{(U^2 - V^2)}{R+y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - F_y - \frac{R}{R+y} \frac{\partial \overline{U'V'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{V'V'}}{\partial y} - \frac{\overline{U'^2} - \overline{V'^2}}{R+y} \quad (2)$$

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} + \frac{hV}{R+y} = 0 \quad (3)$$

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda \phi_3 \frac{h_R}{h} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad F_y = \frac{1}{2} C_D \lambda \frac{h_R}{h} V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \phi_3 = \frac{1}{h_R} \int_0^{h_R} \left(\frac{u}{U} \right)^2 dz \quad (4)$$

ここに、 R は水路内岸の曲率半径であり、 U, V はそれぞれ流下方向 x 及び横断方向 y の水深平均流速、 $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ は水深平均レイノルズ応力でありゼロ方程式モデルで与えた。 U', V' は流速鉛直分布における水深平均流速からのずれを表し、(1), (2)式の右辺、最後の3項は水深平均に伴う分散項を示している。分散項については各実験ケースにおいて各横断面の $\overline{U'V'}$ および $\overline{V'V'}$ を実験値から計算した。これらは円柱群の帯状配置をした実験結果からモデル化して与える^{2), 3)}。透過型水制群においても帯状配置と同様の2次流が形成されていることから、本研究ではパラメータのみ変化させ、同様のモデル式を用いて計算し、2次元数値計算の普遍性について検討した。円柱群の形状抵抗は(4)式で与える。ここに h_R は円柱高さである。水没型円柱群の形状抵抗値については2次元計算で得られる結果が水深平均値であるため、円柱群内の流速 u と平均流速 U の比を考慮に入れ、形状抵抗に運動量補正パラメータ ϕ_3 を加えた。

4. 計算結果と実験結果の考察 図-1は固定床による主流速の水深平均値について計算結果と実験結果を比較したものである。計算結果は、分散項を考慮した場合としない場合を示している。非水没型のケース D-10 は、湾曲角 $\theta=0^\circ, 30^\circ$ で2次流分散項の影響がほとんど見られない。湾曲角 $\theta=60^\circ$ と下流 45cm ではせん断層がやや内岸寄りになり、内岸側では実験値よりも過大評価されているが、水路中央部から内岸にかけて減速する傾向が再現されている。湾曲出口から下流直線部においては、水制境界付近のせん断層が内岸寄りになり、水制の減速効果が過大評価される傾向にある。水没型のケース Ds-10 では、非水没型のケースと同様に $\theta=0^\circ$ において分散項の影響がみられないが、 $\theta=30^\circ$ では分散項を考慮することで内岸側の減速や水制内の外岸壁近傍にかけての加速傾向が良好に再現されている。 $\theta=60^\circ$ で

は内岸側の減速があまりみられないが、水制内では境界付近のせん断層の傾きや外岸壁近傍の流速変化を再現している。下流 45cm では内岸側の減速が再現されず、2次流分散項のモデル化が十分ではないと考えられる。また、計算値では水没型水制の背後に低速域が生じ、流速の回復が遅く円柱群抵抗の影響が強く残っている。全体的に下流にいくにつれて内岸側の計算値と実験値に差がみられ、2次流による輸送効果の再現性が大きく影響しているものと考えられる。

図-2(a)(b)は通水5時間後の河床高コンター図を示している。非水没型のケース S-10 は $\theta = 60^\circ$ 付近の洗掘が水制内に進入している点は実験値の再現性があるが、計算値では湾曲部上流側での進入もみられ、全体的に外岸寄りに洗掘域が現れている。水没型水制を設置した場合非水没型水制に比べて、洗掘が約3分の1程度、堆積は約2分の1程度に抑えられており実験、計算ともに同様な傾向がみられる。また計算値では下流直線部後方にかけて洗掘・堆積が生じているが、これは計算では下流直線部を 4.2m としているのに対し、実験では湾曲出口から 1.8m 後方で河床を固定していることにより、下流の洗掘堆積が抑えられたと考えられる。

5. おわりに 帯状配置の円柱群が存在する場合の分散項のモデル化を用いた2次元数値解析の普遍性を考える上で、透過型水制を有する湾曲部流れの適応性について、実験結果との比較により検討した。主流速構造は、下流域の内岸に流速差がみられるが、2次流の影響による減速・加速傾向を再現することができた。河床変動については、洗掘・堆積が過大評価されたものの、水制の高さ変化による影響を再現することができた。

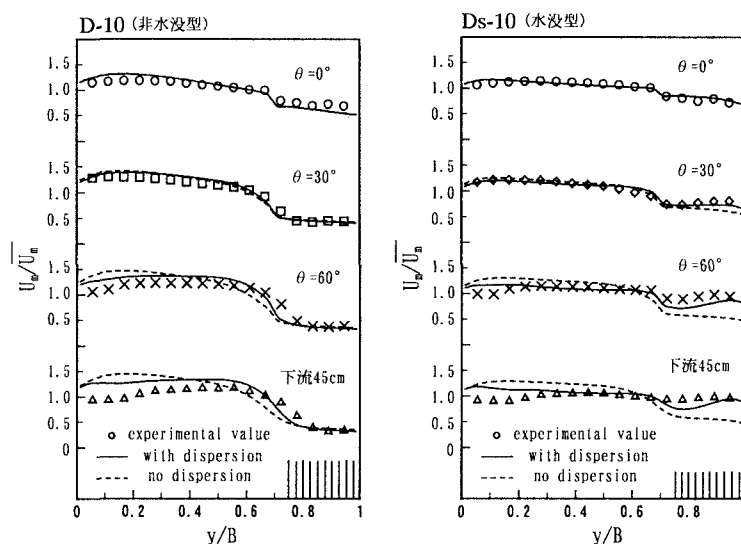
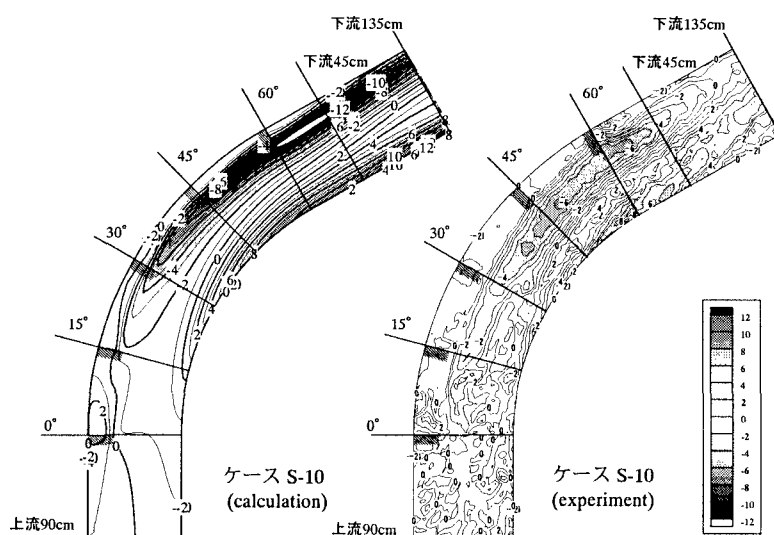
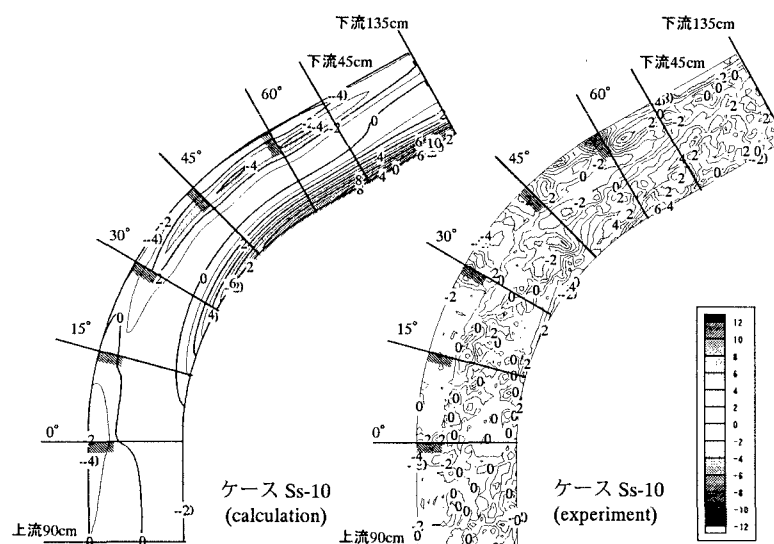


図-1 水深平均流速



(a) 非水没型 (S-10)



(b) 水没型 (Ss-10)

図-2 河床高コンター図

<参考文献> 1) Shimizu, Y., Yamaguchi, H. and Itakura, T.: Three-Dimensional Computation of Flow and Bed Deformation, J. Hydraulic Engineering, vol.116, No.9, pp.1090-1108, 1989. 2) 富永, 青木, 木村: 水工学論文集 vol.45, pp.769-774, 2001 3) 富永, 青木: 応用力学論文集 vol.4, pp.557-564, 2001.