

円柱粗度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

2-Dimensional Numerical Analysis of Flow and Bed Evolution
in Open-Channel Bends with Cylindrical Roughness

冨永晃宏*・青木健太郎**

Akihiro TOMINAGA and Kentaro AOKI

*正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
**学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Vegetation in a river has a similar effect as permeable super dikes. Such an effect can be substituted by a group of cylindrical roughness. In this study, 3-dimensional flow structures and bed evolution were measured in a curved open channel with cylindrical roughness located along the outer bank. A series of cylinder decreased the scour at the outer bank. Especially submerged cylindrical roughness can reduce the bed evolution much more. Flow structures over the submerged cylindrical roughness have 3-dimensional characteristics. The lateral momentum transport due to the secondary flow was modeled from an examination of the experimental data. The mean flow distributions and bed evolution in curved channels with cylindrical roughness are well predicted by using the present 2-D numerical model.

Key Words: curved open channel, cylindrical roughness, secondary flow, 3-D flow structures, 2-D numerical analysis, bed evolution

1. 序論

実河川では直線部は少なく、湾曲・蛇行している場合がほとんどである。河道の湾曲部は洪水時において、直線部より流下能力が劣り、堤防の洗掘など治水にマイナスの働きをする。しかし、河道湾曲部には洗掘・堆積によって瀬や淵が形成され、生物に生活の場を提供している。河道湾曲部の流れ構造及び河床変動を的確に把握し、制御することが重要である。湾曲部流れの河道設計における重要性から、湾曲部の流れ特性に関しては数多くの研究がなされている。例えば、Rozovskiiの実験と野外計測¹⁾、Ippen & Drinkerの台形開水路湾曲流の計測²⁾、村本らの180°湾曲流の実験³⁾、筆者らの幅水深比の小さな開水路の湾曲流に関する実験⁴⁾等がある。遠心力と圧力勾配に起因する2次流は湾曲部の河床形状及び流れ構造を支配する要因として非常に重要な役割を果たしている。横断方向成分である2次流が河床砂を内岸へ移送し、外岸で洗掘、内岸で堆積という湾曲部特有の河床形状を形成する。例えば、池田⁵⁾、石川・金⁶⁾、山坂ら⁷⁾は湾曲部の2次流に着目した研究を行っている。2次流の制御による湾曲部外岸の洗掘軽減対策として、Odgaard and Kennedy⁸⁾による

アイオワバーン工や関根・吉川⁹⁾による外岸への棧粗度の設置等が検討されている。湾曲部に樹木群が存在する場合、それ自身が抵抗となり上流に水位上昇をもたらし、主流速分布や2次流構造にも大きな影響を与える¹⁰⁾。樹木群は一種の透過水制のような役割を果たし、堤防保護および湾曲部の河床変動の制御に利用されることも期待されている。福岡らは、湾曲部外岸側の洗掘を軽減する工法として、樹木群の水制的利用の研究を行っている¹¹⁾。清水・辻本は乱流モデルによって一様湾曲水路外岸樹木群の影響を検討している¹²⁾。筆者らは、外岸に樹木群が存在する場合、樹木群の減速効果によって外岸の洗掘が水路中央部へと移動することを示した¹³⁾。樹木群の存在位置や密生度などのパラメータが流れ構造や河床変動に与える影響については、ある程度データの蓄積が進んできた。本研究では、樹木群及び透過水制の効果を円柱粗度で置き換えて実験を行った。これら円柱群配置の効果は、配置や形状などの条件設定が複雑であるため、数値計算による予測が有効な手段となる。筆者らは2次元数値計算による予測手法を示したが¹⁴⁾、本研究では2次元数値計算を河床変動の予測に発展させたものである。また特に3次元性の強い水没型円柱群について検討し、2次元数

値計算への組み込み方を検討した。

2. 実験装置及び実験方法

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、その平面形は図-1に示すように上流端から 10.8m の位置に湾曲角 60° の単一湾曲部を設置し、その下流に 4.5m の直線部を接続させたものである。湾曲部の中心曲率半径は $R=2.7\text{m}$ で曲率半径・水路幅比 $R/B=3.0$ である。河床勾配は $1/2000$ である。

円柱粗度としては、直径 5mm 、長さ 18cm および 7.5cm の木材の棒を用い、流下方向、横断方向に 5cm 間隔で格子状に配置し、横断方向に 5 列、 22.5cm にわたって設置した。円柱群は湾曲部外岸側に湾曲角 $\theta=0^\circ$ から湾曲角 $\theta=60^\circ$ の範囲に設置した。流量は固定床では 34 l/s 、移動床では 40 l/s に設定し、湾曲入口より 90cm 上流において水深 $h=15\text{cm}$ となるように下流の堰を調整した。実験条件は表-1に示す。水深 h は各実験における上流 90cm の水深の平均値である。長さ 18cm の木棒を配した実験は非水没型実験、長さ 7.5cm (水深の半分) の木棒を配した実験は水没型実験であり、水没型円柱群のケースには添字の s が付けてある。流速計測には3成分電磁流速計(東京計測製)を用いた。計測断面は湾曲入口の $\theta=0^\circ$ 、湾曲部では湾曲角 $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 、湾曲出口の $\theta=60^\circ$ 、湾曲下流直線部では湾曲出口から下流 45cm において行った。また水深はポイントゲージを用いて計測した。

固定床実験は河床変動の初期状態を検討する目的で長方形断面水路の平坦床に直接円柱粗度を配置したものである。移動床実験は湾曲部の河床変動への円柱粗度配置の影響を調べるため、平均粒径 0.05cm

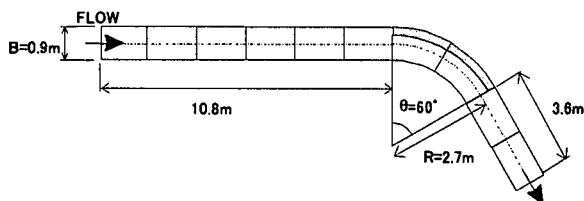


図-1 実験水路平面図

表-1 実験条件

ケース	河床状態	流量 Q (l/s)	円柱高さ (cm)	水深 h (mm)
V-10	固定床	34	18	150.47
K-10	移動床	40	18	150.88
Vs-10	固定床	34	7.5	150.93
Ks-10	移動床	40	7.5	150.77

の珪砂を湾曲上流 180cm から湾曲下流の 200cm まで厚さ 11.5cm で敷き詰めた。対象は静的洗掘のみであり、上流からの給砂は行っていない。通水 5 時間後の河床形状を計測した。流速は河床変動後の河床表面をセメントで固めた後、3成分電磁流速計で計測した。

3. 湾曲部の流れと河床変動の2次元数値計算

3.1 基礎方程式

湾曲部に配置された円柱群の結果としては、抵抗増大による水位上昇と、湾曲部の平均流構造変化に伴う河床変動への影響が重要である。湾曲部流れは2次流の発生に代表されるように本質的に3次元の流れであるが、円柱群の平面配置の影響を簡易に予測する手段として、水深平均の平面流解析による考察も有用である¹⁵⁾。この際、2次流の影響および水没型円柱群の3次元性の強い流速分布の影響は水深平均によって生じる分散項に現れる。これについては、富永ら¹⁴⁾と同様湾曲部の平均流構造の実験結果から概略値を見積もることとする。基礎式として次の曲線座標系における水深平均平面流方程式を用いる¹⁵⁾。

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{2UV}{R+y} = -g \frac{R}{R+y} \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - F_x - \frac{R}{R+y} \frac{\partial \overline{U'U'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{U'V'}}{\partial y} - \frac{2\overline{U'V'}}{R+y} \quad (1)$$

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} - \frac{(U^2 - V^2)}{R+y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - F_y - \frac{R}{R+y} \frac{\partial \overline{U'V'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{V'V'}}{\partial y} + \frac{\overline{U'^2 - V'^2}}{R+y} \quad (2)$$

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

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、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。 U', V' は流速鉛直分布における水深平均流速からの偏差を表し、式(1)、(2)の右辺の最後の3項は水深平均に伴う分散項を示している。 τ_{bx}, τ_{by} は x, y 方向の底面せん断応力であり、 Manning式を用いて次のように与えられる。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (5)$$

τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yy} は水深平均レイノルズ応力であり、次式のように表される。

$$\tau_{xx} = 2\rho\nu_t \left(\frac{R}{R+y} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{R+y} \right) \quad (6)$$

$$\tau_{yy} = 2\rho\nu_t \frac{\partial V}{\partial y} \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = \rho\nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{U}{R+y} + \frac{R}{R+y} \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (8)$$

ここに、 ν_t は渦動粘性係数であり、ゼロ方程式モデルによって次のように与える。

$$\nu_t = \varepsilon_0 U \cdot h \quad (9)$$

F_x , F_y は円柱群の形状抵抗であり、次式で与える。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda \frac{h_R}{h} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (10)$$

$$F_y = \frac{1}{2} C_D \lambda \frac{h_R}{h} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (11)$$

ここに、 C_D は抵抗係数、 λ は密度パラメータである。
 h_R は円柱の水中における高さである。

2次元流れの計算によって得られる流速は水深平均値であるが、河床変動を決定する要因は河床近傍の流速である。河床近傍の流速は次式で与える¹⁶⁾。

$$u_b = \phi_1 U \quad (12)$$

$$v_b = \phi_2 V \quad (13)$$

ここに、 u_b, v_b は河床における流速、 ϕ_1, ϕ_2 はパラメータである。

河床変動計算については、文献16)に従っておこなった。流砂量式として、流下方向では Meyer-Peter-Müller の式を用いる。

$$\frac{q_{Bx}}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau'_s - \tau_c)^{1.5} \quad (14)$$

ここに、 q_{Bx} は流下方向の単位幅当たりの流砂量、 s は河床材料の水中比重、 d は河床材料の粒径、 τ'_s は無次元有効掃流力、 τ_c は無次元限界掃流力である。 τ'_s は岸・黒木の式で求める。

$$\frac{U}{u_*} = 7.66 \left(\frac{h}{2d} \right)^{1/6} \left(\frac{\tau'_s}{\tau_c} \right)^{2/3} \quad (15)$$

τ_c は次式で与える。

$$\tau_c = \frac{u_*^2}{sgd} \quad (16)$$

横断方向の流砂量式は長谷川の式で与える

$$q_{By} = q_{Bx} \left(\frac{v_b + v'_b}{u_b} - \sqrt{\mu_s \mu_k \tau_c} \frac{\partial z}{\partial y} \right) \quad (17)$$

ここに、 q_{By} は横断方向の単位幅当たりの流砂量、 μ_s, μ_k は河床材料の静止および動摩擦係数、 v'_b は2次元流に起因する横断方向の河床における流速であり、

冨永ら⁴⁾に従い与えた。

2次元の流砂連続式は次式で与える。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-i)} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) = 0 \quad (18)$$

ここに、 z は河床高、 t は時間、 i は河床材料の空隙率である。

3. 2 水没型円柱群の検討

湾曲部外岸に配置した円柱群は、長さ 18cm の非水没型円柱群と水深の 1/2 である 7.5cm の水没型円柱群の 2 通りを考えた。2次元流れ計算によって得られる結果は水深平均値であるため、水没型円柱群の場合形状抵抗値を検討する必要がある。湾曲角 $\theta = 60^\circ$ の各点における流速 u と平均流速 U との比を示したのが図-2である。円柱群の存在しない内岸側では平均流速との差があまり見られないが、円柱群内である外岸側では u/U の値が 0.8 以下となっている。円柱群内の流速 u と平均流速 U の比と円柱群の高さと水深の比を考慮に入れて水没型円柱群領域の形状抵抗は次式で与えられる。

$$F_x = \frac{C_D}{2h} \int_0^{h_R} u^2 \sqrt{1 + \left(\frac{v}{u} \right)^2} dz \quad (19)$$

$$\frac{1}{h_R} \int_0^{h_R} u^2 \sqrt{1 + \left(\frac{v}{u} \right)^2} dz = \phi_3 U^2 \sqrt{1 + \left(\frac{V}{U} \right)^2} \quad (20)$$

ここに、 ϕ_3 はパラメータであり、実験結果より 0.4 ~ 0.6 の値であった。

3. 3 水深平均に伴う分散項の評価

式(2), (3)中の分散項について各実験ケースから検討する。流下方向の各横断面において $\overline{U'U'}$, $\overline{V'V'}$ および $\overline{V'V'}$ を計算し、これらの横断方向分布を図-3, 4にそれぞれ示す。値は湾曲入り口の $\theta = 0^\circ$ の断面平均流速 U で無次元化している。非水没型であるケース V-10 の $\overline{U'U'}$ 分布は、水路中央よりやや外岸側で最大値をとる凸型の分布を示している。円柱群内

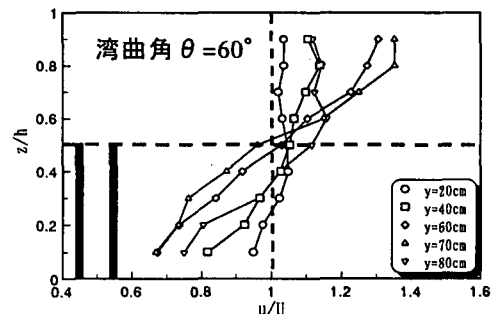


図-2 湾曲角 $\theta = 60^\circ$ における流速比

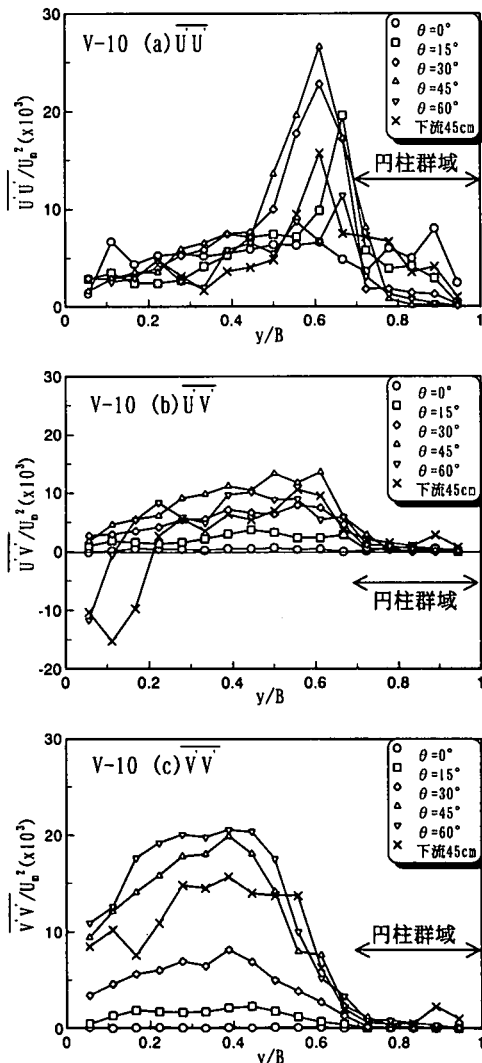


図-3 分散項の横断方向分布 (ケース V-10)

と水路中央より内岸側では小さな値を示している。湾曲角 $\theta=45^\circ$ で最大値となっている。次に、 $\overline{U'V'}$ 分布は水路中央で最大をとり、 $y/B=0.7$ より外岸でゼロに近い値をとる分布となっている。湾曲角 $\theta=45^\circ$ で最大値となり、湾曲角 $\theta=60^\circ$ より下流では、内岸で負の領域が現れている。これは内岸の主流速鉛直分布の逆転領域では、同じ時計回りの2次流であっても横断方向の正味の運動量輸送方向が水路中央から内岸に向かうことを示している。 $\overline{V'V'}$ の分布は水路中央部をピークとして $y/B=0.7$ でゼロとなる上に凸の分布を示している。 $y/B>0.7$ の円柱群領域では非常に小さな値になっている。このピークの大きさは2次流強度の発達減衰過程に対応しており、湾曲入り口から徐々に増大し湾曲角 $\theta=60^\circ$ で最大となり、下流で減少していく。非水没型円柱群のケースでは、各分散項の分布が円柱群を設置しなかったケースの分布とほぼ相似な形状を示すことより、非水没型円柱群では外岸円柱群領域を除く領域で滑面の

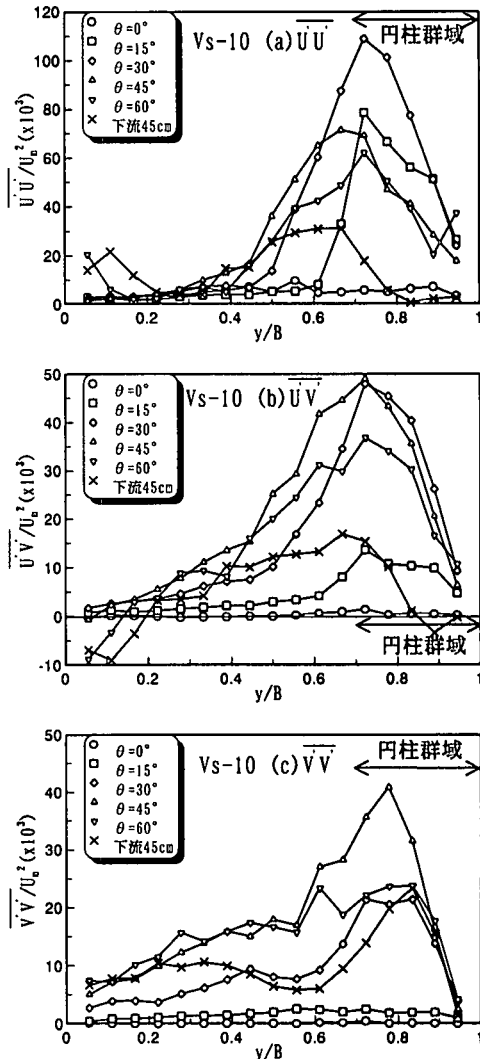


図-4 分散項の横断方向分布 (ケース Vs-10)

ケースと同様のモデル化を行った¹⁴⁾。

水没型円柱群のケース Vs-10 の場合、 $\overline{U'U'}$ の分布は円柱群境界付近で最大となる外岸方向に偏った上に凸の分布を示している。湾曲角 $\theta=30^\circ$ で最大となり流下するにつれ減少している。水路中央より内岸側で値が小さくなっている。非水没型のケースと比較すると約4倍近く大きくなっている。 $\overline{U'V'}$ の分布は $\overline{U'U'}$ と同様に外岸側に偏った分布形状を示している。水路中央部付近から急激に上昇していき、ピークをとってから急激に減少している。非水没型のケースと比較すると約3倍近く大きな値になっている。 $\overline{V'V'}$ の分布は $\overline{U'U'}$ と同様に外岸側に偏った分布形状を示している。内岸から水路中央部までは緩やかな増加を示し円柱群境界付近で大きく変化している。水没型円柱群の場合、非水没型円柱群と比較して、円柱群周辺の3次元流れ構造の影響が強く現れ大きな値をとることがわかる。したがって、水没型円柱群の場合、円柱群領域での鉛直分布の非一様

性の増大の影響を考慮して、次のようなモデル化を行った。

$(\overline{U'V'})$

1) $x < x_0$: $\overline{U'V'} = 0$

2) $x_0 \leq x \leq x_a$:

$$y \leq y_b : \overline{U'V'} = \alpha \sin\{\pi(y - y_a)/(y_b - y_a)\} \exp\{\delta_1(y - y_b)\} \alpha_1 \quad (21)$$

$y_b \leq y$: $\overline{U'V'} = 0$

3) $x_a \leq x$:

$$y \leq y_0 : \overline{U'V'} = \beta \sin\{\pi(y - y_a)/(y_0 - y_a)\} \quad (22)$$

$$y_0 \leq y \leq y_b : \overline{U'V'} = \alpha \sin\{\pi(y - y_0)/(y_b - y_0)\} \exp\{\delta_1(y - y_b)\} \alpha_1 \quad (23)$$

$y_b \leq y$: $\overline{U'V'} = 0$

$$\alpha = \alpha_0 \left(\frac{x - x_0}{x_a - x_0} \right)^2 \exp\left\{1 - \left(\frac{x - x_0}{x_a - x_0} \right)^2\right\} \quad (24)$$

$$\beta = \beta_0 \left(\frac{x - x_a}{x_b - x_a} \right)^2 \exp\left\{1 - \left(\frac{x - x_a}{x_b - x_a} \right)^2\right\} \quad (25)$$

$$y_0 = 0.6B(x - x_a)/(x_p - x_0) \quad (26)$$

$(\overline{V'V'})$

1) $x < x_0$: $\overline{V'V'} = 0$

2) $x_0 \leq x$:

$$y < y_b : \overline{V'V'} = \gamma \sin(\pi y / y_b) \exp\{\delta_2(y - y_b)\} \gamma_1 \quad (27)$$

$y > y_b$: $\overline{V'V'} = 0$

$$\gamma = \gamma_0 \left(\frac{x - x_0}{x_p - x_0} \right)^{1.5} \exp\left\{1 - \left(\frac{x - x_0}{x_p - x_0} \right)^{1.5}\right\} \quad (28)$$

ここに、 x_0 は湾曲入り口の x 座標、 x_p は2次流が最大となる x 座標、 x_a は $\overline{U'V'}$ の正のピーク位置 x 座標、 x_b は $\overline{U'V'}$ の負のピーク位置 x 座標とする。また、 y_a は湾曲渦の左岸境界の y 座標、 y_b は右岸境界の y 座標、 y_0 は $\overline{U'V'}$ の内岸での負の領域の幅、 δ_1, δ_2 は分布の偏位置パラメータ、 α_1, γ_1 は補正パラメータである。このケースでは $\partial \overline{U'V'} / \partial x$ もやや大きな値を持つが、ここではモデル化しなかった。ここで用いたパラメータの値は、実験結果の傾向を再現するように決めたものであり、普遍性についてはさらに検討を要する。

4. 計算結果と実験結果の比較検討

4.1 固定床実験との比較

図-5 (a),(b)は非水没型円柱群のケース V-10, Vs-10 における主流速の水深平均値の計算結果と実験結果を比較したものである。 $\epsilon_0 = 0.14$, $\lambda = 2(1/m)$, $C_D = 1.25$ とし、水没型円柱群のケースでは $\phi_3 = 0.49$ とした。湾曲入り口の $\theta = 0^\circ$ から下流45cmまでの各断面の水深平均流速の変化が示されている。図-5 (a)のケース V-10では、湾曲入り口の $\theta = 0^\circ$ と湾曲角 $\theta = 30^\circ$ においては、ほぼ一致しており流れをよく再現している。湾曲角 $\theta = 60^\circ$ では、2次流の分散項を考慮していない場合では内岸側と円柱群境界付近で実験値より過大な評価となった。2次

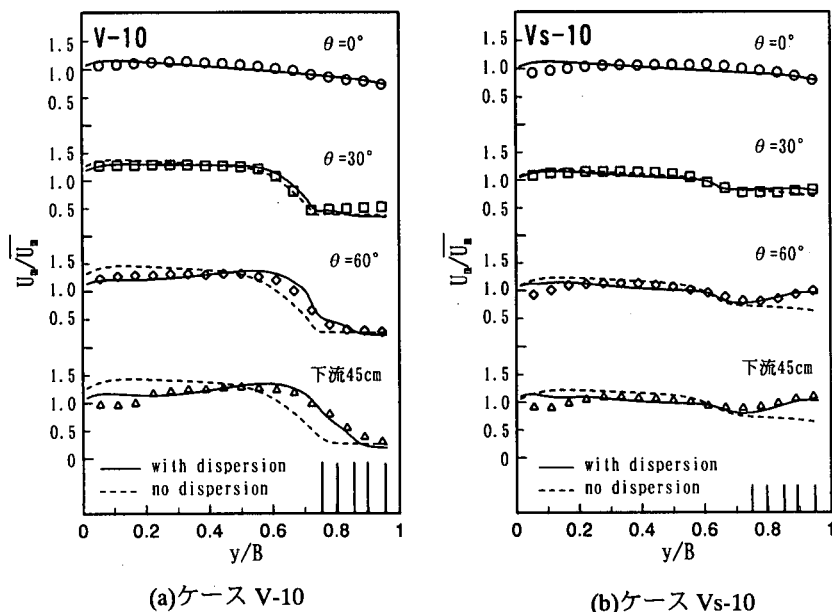


図-5 水深平均流速 (固定床)

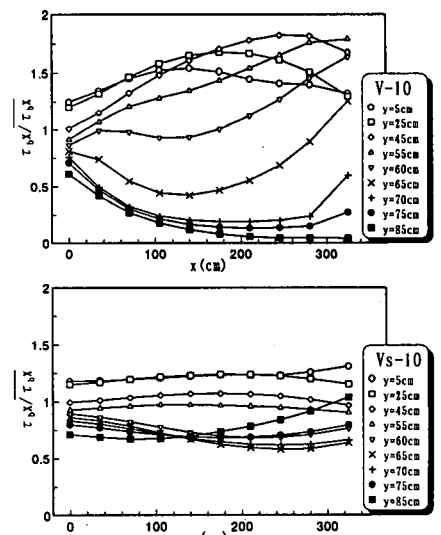


図-6 底面せん断応力 (固定床)

流の分散項を考慮した場合は円柱群境界付近で少し過大に評価されたものの、円柱群内へせん断層が侵入している実験値をよく再現している。下流 45cm では内岸側で計算値が過大に評価されている。これは内岸側における減速領域のモデル化が十分でないことによると考えられる。

図-5(b)のケース Vs-10 では、湾曲入り口の θ

$=0^\circ$ と湾曲角 $\theta=30^\circ$ では、2次流分散項の影響があまり見られないが、湾曲角 $\theta=60^\circ$ と下流 45cm では、円柱群内において外岸壁近傍が加速される実験結果をよく再現している。内岸側では過大に評価されている。このケースにおいても内岸側における減速領域のモデル化が十分でないことによると考えられる。

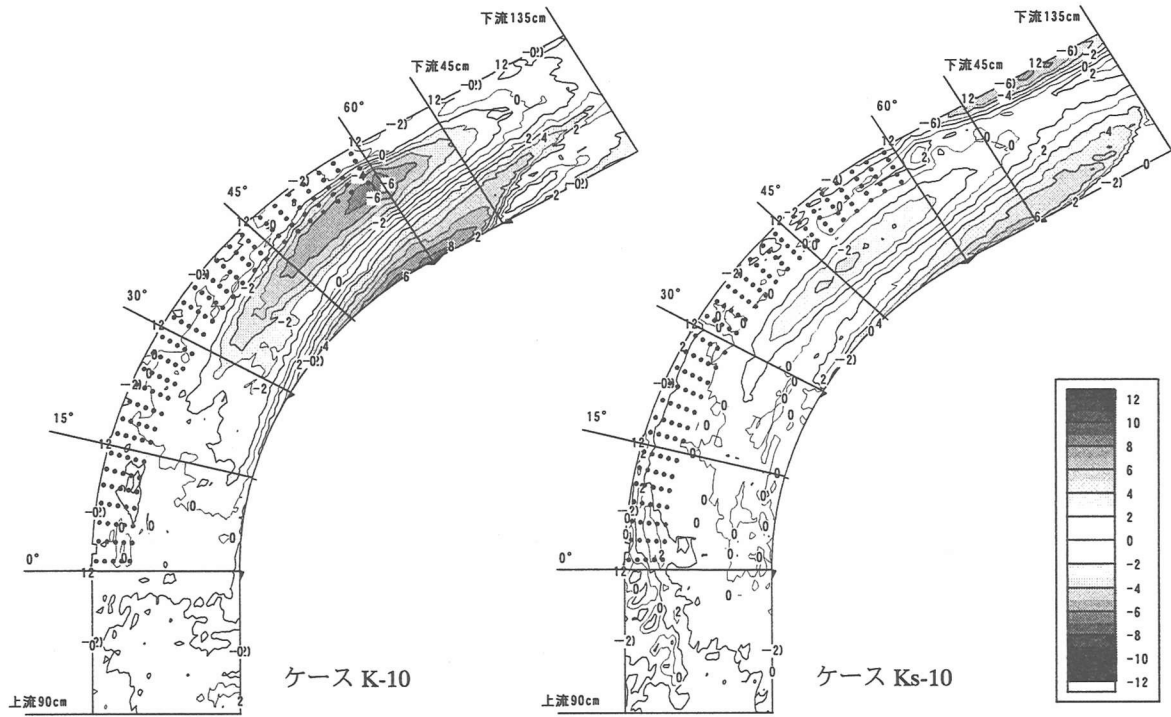


図-7 河床高コンター図 (実験結果)

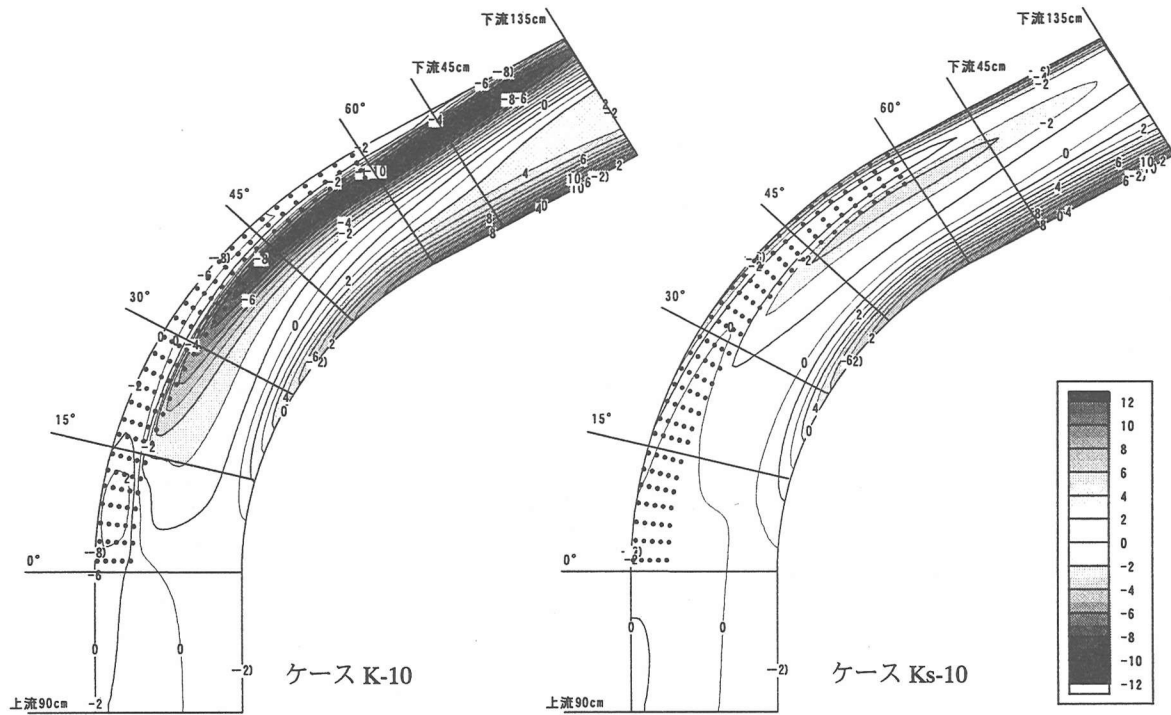
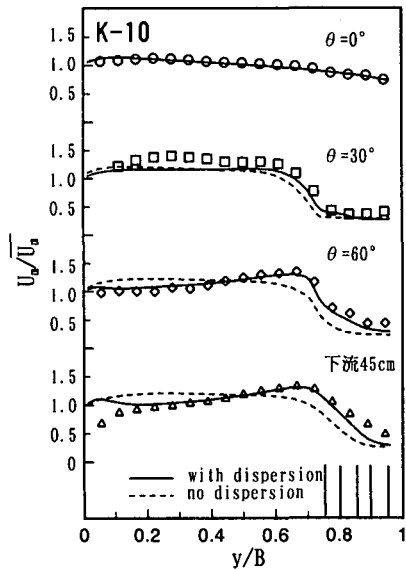
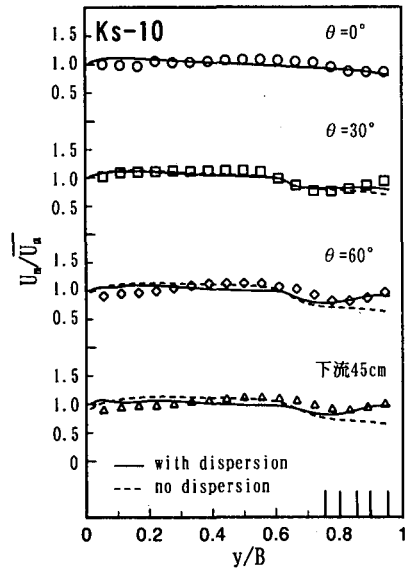


図-8 河床高コンター図 (計算結果)



(a) ケース K-10



(b) ケース Ks-10

図-9 水深平均流速 (移動床)

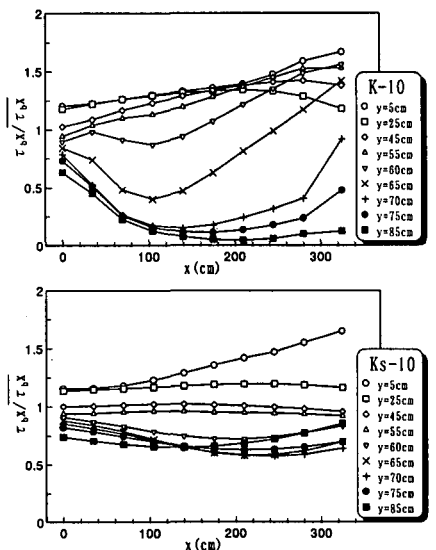


図-10 底面せん断応力 (移動床)

次に、底面せん断応力の流下方向分布を示す。実験結果では水没型のケース Vs-10 と非水没型のケース V-10 を比較すると、内岸側と外岸側のせん断応力の差がケース Vs-10 の方が小さくなっていることが示されている¹³⁾。図-6は固定床における底面せん断応力の流下方向分布の計算結果を示したものである。非水没型のケース V-10 では内岸側でせん断力が大きく、外岸側で小さいという実験値と同じ傾向を示している。計算値では湾曲出口より下流における水路中央部での減少を見ることができない。水没型円柱群のケース Vs-10 では、内岸側と外岸側のせん断力の差が小さく実験値と同じ傾向を示している。計算値では内岸壁近傍 $y=5\text{cm}$ の下流においてせん断力が減少していない。実験で見られた湾曲角 $\theta=15^\circ$ から 30° の水路中央部でのせん断力の減少を計算では見ることができない。

4.2 移動床実験との比較

図-7は通水5時間後の河床変動の実験結果を示している。非水没型円柱群のケース K-10 では、湾曲角 $\theta=35^\circ$ から下流 45cm の水路中央部に 6cm を越える洗掘が発生し、円柱群内に進行している。内岸側の堆積は湾曲角 $\theta=45^\circ$ から徐々に発達していき湾曲角 $\theta=60^\circ$ で最大 8cm になっている。水没型円柱群のケース Ks-10 では外岸側の円柱群内での河床変動はほぼ 0cm である。湾曲角 $\theta=30^\circ$ から $\theta=60^\circ$ の水路中央部付近に 4cm 程度の洗掘が発生している。水没型円柱群の場合、非水没型円柱群と比較すると

洗掘・堆積も約 3 分の 2 程度に抑えられている。

図-8は数値計算における通水5時間後の河床高コンター図を示している。非水没型円柱群のケースでは、湾曲角 $\theta=25^\circ$ から下流 135cm の円柱群境界から円柱群内にかけて 10cm を越える大きな洗掘が発生している。洗掘領域は円柱群内に進行しており実験値と同様の結果を得たが、洗掘深については実験値より過大に評価されている。湾曲角 $\theta=30^\circ$ から下流に 10cm を越える堆積が見られる。堆積の開始位置は実験値とほぼ一致しているが、堆積高のピーク位置が流下方向下流側に現れており、また堆積高も実験値より過大に評価されている。しかし、河床変動全体の傾向は実験値を再現できているといえる。水没型円柱群のケースでは湾曲角 $\theta=30^\circ$ から $\theta=60^\circ$ の水路中央部から円柱群境界にかけて 4cm 程度の洗掘が発生している。洗掘のピーク位置がより下流側に、また、より外岸側に現れる傾向にあるが、よく実験値を再現している。湾曲角 $\theta=30^\circ$ から下流の外岸壁近傍に洗掘が生じているが、実験では下流 45cm 以降でしか現れなかったものである。また、内岸に 10cm を越す堆積が発生しており、実験に比べ過大に評価されている。

河床変動予測においては、計算では直線部を 4.2m としているのに対し、実験では湾曲出口後方の移動床直線部が 2.0m であり、水位調節のための堰上げによって洗掘堆積位置のずれが生じた可能性がある。

図-9(a),(b)は水没型円柱群のケース Vs-10, Ks-10 における主流速の水深平均値の計算結果と実験結果

を比較したものである。図-9(a)のケースK-10では、湾曲入り口の $\theta=0^\circ$ においてよく実験値を再現している。湾曲角 $\theta=30^\circ$ において、内岸から円柱群境界にかけて計算値が過小に評価されている。実際には河床変動後では湾曲角 $\theta=30^\circ$ において2次流の影響が計算より大きくなっていることが分かる。湾曲角 $\theta=60^\circ$ と下流45cmでは2次流の分散項を考慮した場合の方が流速のせん断層が円柱群内に侵入している実験結果をよく実験値を再現している。下流45cmでは内岸壁近傍において過大に評価されている。

図-9(b)のケース Ks-10 では、湾曲角 $\theta=60^\circ$ と下流 45cm において円柱群境界から水路中央にかけて、計算値が過小に評価されている。与えた2次流の分散項の影響が少し異なっていたと考えられる。円柱群内では外岸壁近傍で高速化される実験値をよく再現している。

次に、底面せん断応力の流下方向分布を示す。非水没型のケース K-10 では流下するにつれてせん断応力が増加している。水没型のケース Ks-10 ではケース Vs-10 に比較的似ているが、湾曲角 $\theta=60^\circ$ 以降せん断力が増加している¹³⁾。図-10は移動床における底面せん断応力の流下方向分布の計算結果を示したものである。ケース Ks-10 の内岸壁近傍 $y=5\text{cm}$ における急激な上昇は実験結果では見ることができなかった。内岸側下流のせん断力の増加が計算値では見ることができない。外岸側上流のせん断力の減少も実験より小さなものになっている。固定床と移動床の結果を比較すると、非水没型円柱群では湾曲出口以降せん断応力が固定床よりも増加している。非水没型円柱群では下流外岸の増加が小さなものになっている。

5. 結論

湾曲部外岸に円柱群が存在する場合の2次元数値解析の結果と実験結果の比較から、湾曲部における2次流と円柱群の抵抗を検討し、2次元解析の適用可能性を検討した。

非水没型円柱群の場合、2次流の分散項を考慮することにより流れ構造をよく再現することができた。河床変動については洗掘・堆積が過大に評価されたものの、洗掘・堆積の傾向を再現することができた。洗掘・堆積の発生位置予測は可能であるといえる。

水没型円柱群の場合、円柱群が水深の半分であるため流れの3次元性が強く、2次元数値解析では高さの影響を考慮するのが困難であるが、鉛直方向流速分布を考慮した円柱群抵抗を検討することによって、流れ構造や河床変動を再現することができた。しかし、ここでモデル化した分散項の評価は一般性に乏しく、今後は3次元数値計算に拡張していく必要がある。

参考文献

- 1) Rozovskii, I.L.: Flow of water in bends of open channels, Academy of science of U.S.S.R., Kiev, U.S.S.R., 1957.
- 2) Ippen, A.T. & Drinker, P.A.: Boundary shear stresses in curved trapezoidal channels, J. Hydraulics Div., ASCE, vol.88, No.HY5, pp.143-179, 1962.
- 3) 村本嘉雄, 井上番之: 開水路湾曲流の内部機構, 京都大学防災研究所年報, 第8号, pp.415-427, 1965
- 4) 富永, 長尾, 千葉: 幅水深比の小さな長方形断面開水路の湾曲部流れ構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第607号/II-45, pp.19-28, 1998.
- 5) 池田駿介: 移動床河川の湾曲部における二次流と動的横断平衡河床について, 土木学会論文報告集, 第229号, pp.55-65, 1974.
- 6) 石川, 金: 湾曲部の2次流に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp.143-149, 1986.
- 7) 山坂, 池田, 酒寄: 一様湾曲流路の流れの3次元解析, 土木学会論文集, 第411号/II-12, pp.99-108, 1989.
- 8) Odgaard, A.J. and Kennedy, J.F.: River-bend bank protection by submerged vanes, J. Hydr. Eng., ASCE, 109(8), pp.1161-1173, 1983.
- 9) 関根, 吉川: 斜め棧粗度による河川湾曲部の二次流制御に関する研究, 土木学会論文集, No.558/II-38, pp.61-70, 1997.
- 10) 富永, 長尾, 木村: 湾曲部の流れ構造と河床形状に及ぼす樹木群配置の影響, 水工学論文集, 第43巻, pp.809-814, 1999.
- 11) 福岡捷二, 渡辺明英, 大橋正嗣, 姫野至彦: 樹木群の水制的利用可能性の研究, 水工学論文集, 第41巻, pp.1129-1132, 1997.
- 12) 清水・辻本: 樹木群による河道湾曲流れの制御に関する数値計算, 第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.31-36, 1997.
- 13) 富永, 青木, 木村: 円柱粗度による湾曲河床変動の制御に関する実験的研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.769-774, 2001.
- 14) 富永, 長尾, 木村: 開水路湾曲部における運動量輸送に及ぼす河道内樹木群の効果, 応用力学論文集, 第2巻, pp.637-644, 1999.
- 15) Shimizu, Y. et al.: Three-Dimensional Computation of Flow and Bed Deformation, J. Hydraulic Engineering, vol.116, No.9, pp.1090-1108, 1989.
- 16) 河道設計論(案), (財)北海道河川防災研究センター編集, pp.168, 1988.

(2001年4月20日受付)