

円柱粗度を有する開水路湾曲部流れの2次元数値解析

名古屋工業大学 学生会員○中村尚子
名古屋工業大学 学生会員 中居 毅

名古屋工業大学 学生会員 青木健太郎
名古屋工業大学 正 会 員 富永晃宏

1. はじめに 河道に存在する樹木群は洪水時に流下の妨げになるが、環境を考える上ですべて伐採するのは適当ではない。洪水時に水没する樹木群や杭出し水制等が河道湾曲部における流れ構造や河床変動に与える影響を的確に把握し、制御することが重要である。筆者らは樹木群及び透過型水制の効果を円柱粗度に置き換えて実験を行った¹⁾。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。本研究では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. 実験装置および条件 実験水路は水路幅 B=90cm、深さ 30cm、全長 17.2m の長方形断面水路を用いた。湾曲部の中心曲率半径は r=270cm、r/b=3.0 である。樹木群模型は直径 5mm 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、湾曲入り口 $\theta=0^\circ$ から湾曲出口 $\theta=60^\circ$ までの外岸側に設置した。円柱群の高さは、水深の 1/4、1/2、3/4 および非水没型の4ケースを設定し実験を行った。実験条件は表-1に示す。

表-1 実験条件

ケース名	円柱高さ (cm)	水深h (mm)	流量Q (lit/s)
Vh-14	3.75	149.1	44.64
Vh-24	7.5	150.93	34.69
Vh-34	11.25	149.24	44.65
Vh-44	18	150.47	34.41

3. 湾曲部流れの2次元数値計算 円柱群高さの違いが流れ構造に及ぼす効果を数値シミュレーションによって検討した。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²⁾。

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

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

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

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad F_y = \frac{1}{2} C_D \lambda V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4)$$

$$F_x = \frac{C_D}{2h} \int_0^{h_R} u^2 \sqrt{1 + \left(\frac{v}{u}\right)^2} dz, \quad \frac{1}{h_R} \int_0^{h_R} u^2 \sqrt{1 + \left(\frac{v}{u}\right)^2} dz \approx \phi_3 U^2 \sqrt{1 + \left(\frac{V}{U}\right)^2}, \quad \phi_3 = \frac{1}{h_R} \int_0^{h_R} \left(\frac{u}{U}\right)^2 dz \quad (5)$$

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、 τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{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)式の右辺の最後の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 $\overline{U'U'}$ 、 $\overline{UV'}$ および $\overline{V'V'}$ を実験値から計算した。分散項のモデル化については、文献 3)に従って行なった。非水没型円柱群の形状抵抗は(4)式で与えられる。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の形状抵抗値を検討する必要がある。円柱群内の流速uと平均流速Uの比と円柱群高さの比を考慮に入れて水没型円柱群領域の形状抵抗は(5)式で与える。ここにh_Rは円柱高さである。φ₃は流速の鉛直分布の非一様性を表す運動量補正パラメータで、実験結果より求めた。

4. 計算結果と実験結果の考察 図-1は湾曲角 $\theta=60^\circ$ における2次流ベクトル図を示したものである。水深の 1/4 のケースでは2次流が円柱群中央の y=75cm 付近で下降流となり、外岸水面近くには逆回転の外岸渦が認められる。水深の 3/4 のケースでは2次流は円柱群上方を乗り越えて断面全体の2次流になっている。また円柱群の高さが低くなるほど2次流の中心が外岸方向に移動していることがわかる。

図-2は各ケース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。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が示されている。水深の 1/4 であるケース Vh-14 では、分散項の影響を考慮した場合ほぼ一致しており流れをよく再現しているといえる。分散項を考慮しないと下流域で内岸と外岸の流速が逆転しており、実験とかなり異なることがわかる。水深の 1/2 であるケース

Vh-24 では、湾曲角 $\theta=0^\circ$ と 30° 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。水深の 3/4 であるケース Vh-34 では、円柱群境界付近の流速が実験結果に比べ過小に評価されている。2次流分散項のモデル化が十分ではないと考えられる。下流 45cm の円柱群境界では加速されておらず円柱群抵抗の影響が強く残っている。非水没型のケース Vh-44 では、湾曲角 $\theta=0^\circ$ と 30° においてはほぼ一致しておりよく再現している。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円柱群境界付近で実験値より過小な評価になった。2次流の分散項を考慮した場合は円柱群境界付近で過大に評価されているものの、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。どのケースにおいても下流部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。

5. おわりに 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次元数値解析の適用可能性を検討した。水没型円柱群の場合流れの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、流れ構造を再現することができた。

<参考文献> 1) 富永, 青木, 木村: 水工学論文集 vol.45, pp.769-774, 2001 2) 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. 3) 富永, 青木: 応用力学論文集 vol.4, pp.557-564, 2001.

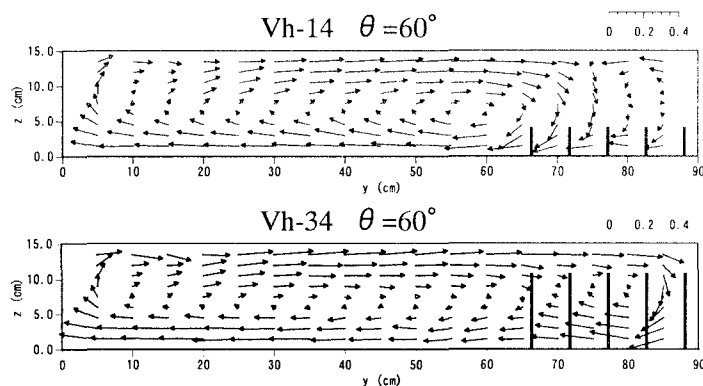


図-1 2次流ベクトル図

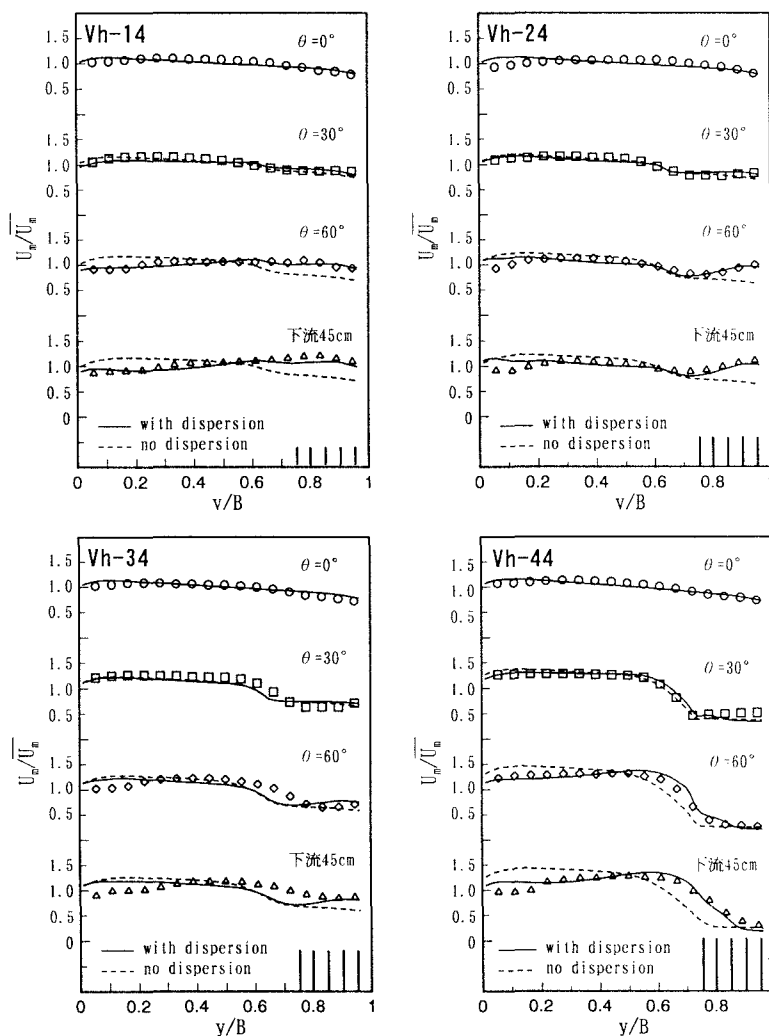


図-2 水深平均流速