

立命館大学大学院 ○学生員 守田克成  
立命館大学理工学部 正会員 江頭進治  
立命館大学理工学部 正会員 金 海生  
(財)河川環境管理財団 正会員 大槻英樹  
京 都 府 正会員 青木章浩

1. はじめに 近年、人々の生態系を含めた自然環境への関心が強まり、周辺環境への配慮から自然石や人工材料を用いた緩傾斜護岸を有する多自然型川づくりが進められている。しかし、どのような河道条件の下でいかなる護岸工法が適用でき、どの程度安全であるのか必ずしも明らかではない。そこで、本稿においては護岸本来の目的である河岸保護や河道安定といった治水目的を損なわない多自然型護岸工の土砂水理学的な基礎資料づくりを行うために、一様弯曲台形断面移動床水路において、護岸の有無を考慮し、河床変動および河岸侵食に関する数値解析を行う。さらに、同様の水路実験から得られる結果とシミュレーション結果を比較し、数値シミュレーション法の有効性について検討する。

2. 支配方程式 計算においては、境界適合型直交曲線座標系の二次元平面流モデルを使用し、上下流直線区間にそれぞれ4mの助走区間を設け、流下方向( $\xi_1$ 方向)に184分割、横断方向( $\xi_2$ 方向)に71分割する。流速 $u_1$ および $u_2$ 、水位 $\zeta$ を互いにずらして配置したスタッガード格子を用いる。支配方程式を以下に示す。

・流れの連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_1} (g_{22}hu_1) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (g_{11}hu_2) \right] = 0 \quad (1)$$

・河床位方程式(流砂の連続式)

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_1} (g_{22}q_{b\xi_1}) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (g_{11}q_{b\xi_2}) \right] = 0 \quad (3)$$

・流砂量式(芦田・道上式)

$$q_b = 17 \sqrt{\left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d^3 \tau_{*c}^{1.5}} \left( 1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left( 1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (4)$$

ここに、 $h$ :水深、 $g_{ii}$ :座標変換係数、 $g$ :重力加速度、 $\tau$ :せん断力、

$\tau_b$ :河床せん断力、 $\rho$ :水の密度、 $\rho_s$ :砂粒子の密度、 $Z_b$ :河床位、 $d$ :河床材料の粒径、 $\lambda$ :砂粒子の空隙率、 $q_{b\xi_i}$ : $\xi_i$

方向の単位幅流砂量、 $\tau_{*c}$ :無次元限界掃流力、 $\tau_{*e}$ :無次元有効掃流力、 $K_c$ :流向と河床勾配を考慮する係数

3. 計算条件 実験水路は、直線と円曲線を組み合わせた一様弯曲水路である。水路幅250cm、低水路幅120cm、弯曲部中心角90°、低水路中心線上での曲率半径205cm、上流直線区間長500cm、下流直線区間長400cm、高水敷高10cm、法面勾配1:2である。河床材料は、平均粒径1.13mmの寒水石、法覆い工および根固め工にはそれぞれ5.34、9.75mmの珪砂を用いた。底面流速の算定には、主流方向に対数則分布が成立すると仮定して相当粗度高さの流速を用い、二次流は流線に直交する向きにとる。また、河岸部に護岸工を敷設していない場合には、法尻部分の侵食とともに河岸部の横断勾配が急となる。計算では法尻部分の横断勾配が水中安息角を越えたならば、河岸部の土砂が崩壊し、水中安息角で安定を保つとした。検証計算に用いる実験の条件は、表1に示すように、護岸工のないケース12NNと外岸部に護岸工のあるケース52LLである。

・運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_i}{\partial \xi_1} + u_2 \frac{\partial u_i}{\partial \xi_2} + \frac{u_1 u_2}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{ii}}{\partial \xi_j} - \frac{u_i^2}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{jj}}{\partial \xi_i} \\ = -\frac{g}{g_{ii}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi_i} + \frac{1}{g_{11}g_{22}h} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_1} (hg_{22}\tau_{1i}) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (hg_{11}\tau_{2i}) \right] \\ + \frac{\tau_{ij}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{ii}}{\partial \xi_j} - \frac{\tau_{jj}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{jj}}{\partial \xi_i} - \frac{\tau_{bi}}{\rho h} \quad \left( \begin{matrix} i=1,2 \\ j=2,1 \end{matrix} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

表1 実験条件

| ケース名 | 河床勾配   | 流量<br>l/s | 法覆い工<br>mm | 根固め工<br>mm |
|------|--------|-----------|------------|------------|
| 12NN | 1/1000 | 38.9      | なし         | なし         |
| 52LL | 1/500  | 40.4      | 5.34       | 9.75       |

4. 計算結果と考察 図1は、通水9.0hr後における鉛直平均流速の分布に関する実験値と計算値を表したものである。両者を比較すると、概ね一致しており、弯曲入口 NO.0 から NO.6 付近では内岸に、NO.9～NO.11では外岸に流れが集中していることがわかる。しかし、計算では、NO.10において内岸部の流速が極めて小さく算定されている。これは、計算において、弯曲部内岸に形成される砂州の発達が顕著で、その前縁が NO.10 直前に位置しているためである。

図2(a)、(b)は、それぞれケース12NNに対する弯曲出口90°断面における河床の横断形状を表したものである。実験では、弯曲角60°付近から下流部外岸にかけて河岸侵食を伴っていた。侵食が最も大きかったのはNO.9、NO.10付近である。計算結果でも同様の現象が再現されている。ただし、図2(a)、(b)を比較すると、計算結果では河岸部の侵食量が小さいために、河床部の侵食が大きくなっている。

図3(a)、(b)は、外岸部法面に法覆い工および法尻部分に根固め工を敷設したケース52LLに関する実験および計算結果である。両者とも、NO.3～NO.9にかけて内岸砂州が形成され、水路中央部から根固め工付近にかけて洗掘されている。NO.9の断面で見られるように、計算では侵食および堆積とも実験より

もやや大きくなっている。また、実験では最大洗掘を生ずる位置が水路中央部よりであるのに対して、計算では根固め工近傍で発生していることがわかる。この原因として、外岸部の法覆い工および根固め工による流砂の非平衡性に起因するものであると考えられる。すなわち、計算においては、平衡状態での流砂量式を用いているために、根固め工近傍の河床材料の侵食が顕著になり横断形状も鋭くなったものとする。

5. おわりに 今後、法覆い工や根固め工の存在に起因した非平衡流砂の問題を考慮した上で、実験の再現をはかり、様々な河道条件の下で、シミュレーションを展開し、多自然型川づくりの基礎資料を提供して行きたい。

参考文献 1) S.Egashira, H.S.Jin, and F.Nakanishi: Characteristics of Flow and Bed Deformation in Meandering Reach of Brantas River, Indonesia, Proc. WDFGM, Yogyakarta, Indonesia, Aug.21-23, 1996.

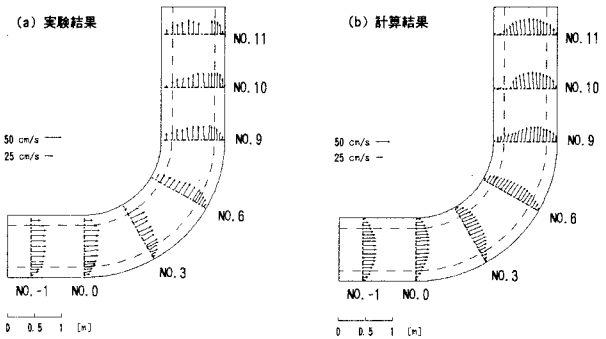


図1 鉛直平均流速分布 (ケース52LL)

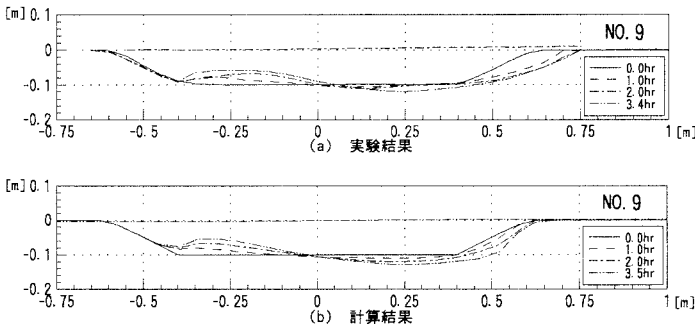


図2 河床位・水位横断形状 (ケース12NN)

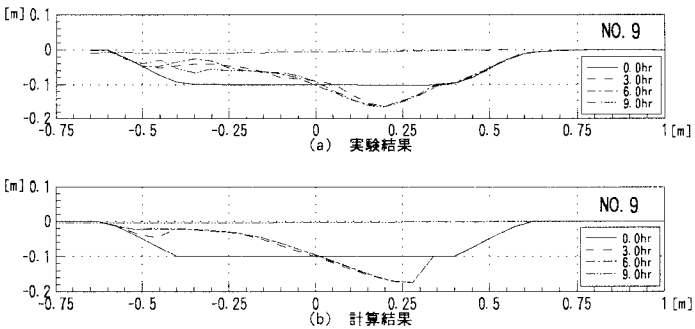


図3 河床位・水位横断形状 (ケース52LL)