

河道湾曲部における河床変動解析の再現性に関する研究

A Study on Validity of Numerical Simulation with Bed Fluctuations in a Meander

(株)アルファ水工コンサルタンツ ○正員 佐川拓也(Takuya Sakawa)
 北見工業大学工学部 正員 早川 博(Hiroshi Hayakawa)
 (株)アルファ水工コンサルタンツ 正員 林 克恭(Katsuyasu Hayashi)

1. はじめに

河道湾曲部において、流れの流線が曲げられた場合、遠心力に起因する2次流が発生し、外岸側においては局所的な洗掘が発生して瀬が形成され、一方、内岸側には固定砂州が形成される。この局所洗掘の位置と洗掘深を予想することは、河道を維持・管理していく上で重要であり、数多くの研究がなされてきた。内島は湾曲部に異なった曲線形状を挿入した水理模型実験により、河道外岸側における局所的な洗掘の位置は、2次流強度が最大となる場所と一致し、湾曲部の曲率変化を滑らかにすることにより、洗掘深が小さくなることを明らかにしている¹⁾。本研究では、曲率変化による2次流の発達過程を考慮した2次元河床変動モデルによって、模型実験結果を再現し、曲率変化が洗掘深に及ぼす効果について確認し、モデルの妥当性の検証を行った。また湾曲部における交互砂州の挙動についても解析を行い、その適用性についても考察を行った。

2. 基礎式

本研究で用いた2次元浅水流モデルの基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{pq}{h} \right) - 2 \frac{pq}{hR_s} + \frac{p^2 - q^2}{hR_s} + gh \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{g}{C^2} \frac{p\sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} = \text{RHS} \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{q^2}{h} \right) + 2 \frac{pq}{hR_s} - \frac{q^2 - p^2}{hR_s} + gh \frac{\partial H}{\partial n} + \frac{g}{C^2} \frac{q\sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} = \text{RHS} \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial q}{\partial n} - \frac{q}{R_s} + \frac{p}{R_n} = 0 \quad (3)$$

ここで s, n は流下方向および横断方向軸, p, q はそれぞれ s 方向および n 方向の流量フラックス, H は水位, h は水深, g は重力加速度, C は Chezy 数, R_s, R_n は s 軸および n 軸の曲率半径であり, RHS はレイノルズ応力, コリオリ力, 大気圧の項である。方程式はスタッガード格子上で定義される p, q, h について ADI 法によって解かれる。

河川の湾曲部では図-2.1 に示すように、3 次元的ならせん流が発生し、底面せん断応力が偏向される。したがって湾曲部における河床変動を再現するためには、この偏向角の評価が重要である。本モデルでは底面せん断応力の偏向角 δ_s の評価に Rozovskii らによる対数モデルを用い、次式で与える²⁾。

$$\tan \delta_s = -\beta \cdot \frac{h}{R_{sl}} \quad (4)$$

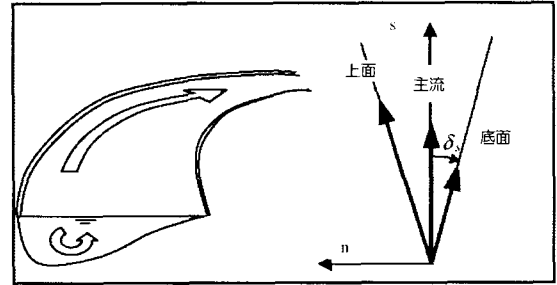


図-2.1 底面における流れの偏向

ここで、

$$\beta = \alpha \cdot \frac{2}{\kappa^2} \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right) \quad (5)$$

R_{sl} は流線の曲率変形, κ はカルマン定数(=0.4)であり, α はキャリブレーションパラメータである。一方、流線の曲率が変化する箇所では、2次流強さも変動するが、その応答は曲率の変化に対して遅れるものと考えられる。そこで本モデルでは流線の曲率変化に対する2次流の応答性(遅れ)を考慮するため、定常流を仮定し、次式により、底面せん断応力の偏向角 δ_s を求める³⁾。

$$\lambda_{sf} \frac{\partial(\tan \delta_s)}{\partial s_{sl}} + \tan \delta_s = -\beta \cdot \frac{h}{R_{sl}} \quad (6)$$

ここで、 s_{sl} は流線に沿った軸, λ_{sf} は2次流応答の長さスケールであり、次式で与えられる。

$$\lambda_{sf} = \frac{1.2hC}{\sqrt{g}} \quad (7)$$

流砂量の評価には、以下に示す Engelund & Hansen の式を用いる。

$$S_{bl} = 0.05 \frac{C^2}{g} \theta^{\frac{5}{2}} \sqrt{(\sigma_s - 1)gd_{50}^3} \quad (8)$$

ここで S_{bl} は流砂量, θ は Shields 数, σ_s は砂の比重, d_{50} は中央粒径である。本来、Engelund & Hansen の式は全流砂量を与えるものであるが、本ケースでは、粒径が大きく ($d_{50}=0.75\text{mm}$)、浮遊砂量は小さいと考えられるため、全流砂量を掃流砂量として評価する。また流下方向ならびに、横断方向の流砂量の評価には、河床勾配の影響を考慮した次式を用いた⁴⁾。

$$S_s = \left(1 - \xi \cdot \frac{\partial z}{\partial s} \right) S_{bl} \quad (9)$$

$$S_n = \left(\tan \delta_s - G \cdot \theta^{-a} \cdot \frac{\partial z}{\partial n} \right) S_{bl} \quad (10)$$

ここで S_s , S_n は流下, 横断方向流砂量, z は河床高, ξ , G および a はキャリブレーションパラメータである. なお, 河床高の算出には以下に示す流砂の連続式を用いる.

$$(1-\lambda) \cdot \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial S_s}{\partial s} + \frac{\partial S_n}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

ここで, λ は空隙率である.

3. 計算条件

表-3.1 は, 内島による湾曲部に, 異なる曲線形状を挿入した場合の模型実験条件を示す. 本研究では, 表-3.1 に示した湾曲部に, 単曲線を用いた場合と対称クロノイド曲線を用いた場合の 2 ケースについて, 再現計算を実施した. 解析に用いた計算格子を図-3.1 に示す.

表-3.1 実験条件

	単曲線	対称クロノイド
水路幅 B (cm)	30	
交角 (deg.)	60	
湾曲部全長 L (cm)	94.3	169.3
粒径 d (mm)	0.75	
河床勾配	水平床	
流量 Q (l/s)	5.39	
通水時間 T (min.)	60	

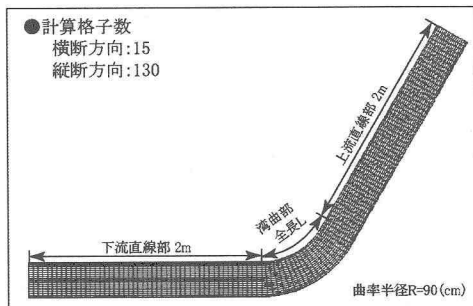


図-3.1 水路形状および計算格子

4. 計算結果

図-4.1 に最大洗掘箇所における横断方向の河床変動計算結果を, 図-4.2 に湾曲部縦断方向の計算結果を示す. 図より, 単曲線水路については, 横断方向の河床勾配ならびに, 最大洗掘箇所の位置とその洗掘深が, よく再現されていることがわかる. また対称クロノイド水路についても, 洗掘深が若干小さくなっているものの, 最大洗掘箇所の位置については, 実験結果とほぼ同じとなっている. 単曲線とクロノイドの計算結果を比較すると, 実験結果と同様に, クロノイドの方が, 上流に最大洗掘箇所が形成され, その洗掘深も小さくなっている. このことから 2 次元河床変動モデルを用いることにより, 河床変動に対する河道の曲率変化の影響を予測することが可能であると言える.

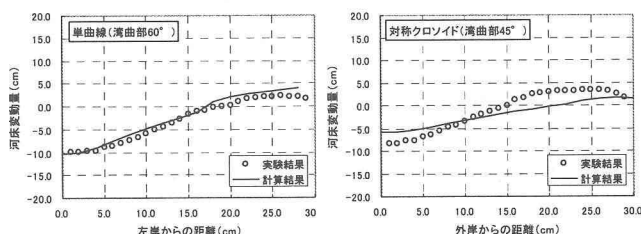


図-4.1 最大洗掘箇所における横断面形状

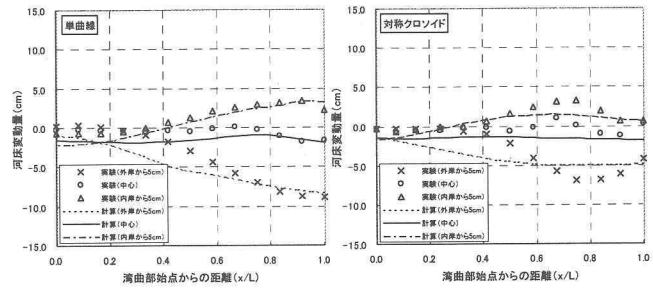


図-4.2 湾曲部縦断方向の河床変動量

5. 湾曲部における交互砂州の挙動について

図-3.1 に示した単曲線水路に対して, 水理条件を単列交互砂州が形成される条件(流量 0.8 l/s, 勾配 1/100)に設定し, 河床解析を行った結果を, 図-5.1 に示す. また比較のため, 直線水路の計算結果も合わせて示す. 単曲線水路では, 砂州の移動が, 湾曲部始点で停止しており, 木下・三輪らによる砂州の停止限界角度を求めた実験結果⁵⁾とも合致している. 砂州高さ, 波長および移動速度については, 模型実験を実施し, 検証しなければならないが, 湾曲部における砂州移動を定性的に再現することができたと言える.

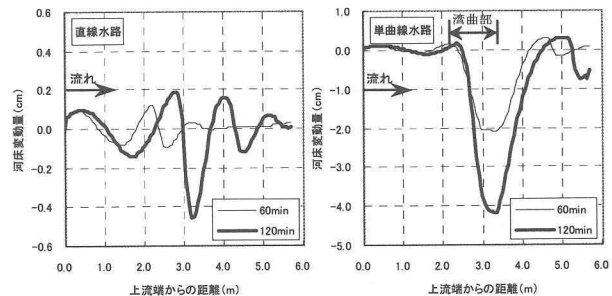


図-5.1 縦断方向の河床変動量(外岸から 2cm の位置)

6. おわりに

本研究では, 湾曲部に異なる曲線形状を挿入した場合の模型実験結果を, 2 次流の影響を考慮した河床変動モデルにより再現した. その結果, 本モデルを用いることにより, 河道形状の変化による洗掘現象を予測することが可能であることが確認された. また交互砂州の数値解析を実施し, 湾曲部における交互砂州の定性的な挙動を再現することができた.

今後は, 本モデルを実河川に適用し, その有効性および問題点を検討していく予定である.

参考文献

- 1) 内島邦秀:緩和曲線を挿入した河道湾曲部の流れと河床形状に関する研究(その 3), (財)北海道河川防災研究センター 研究所紀要(XIV), pp. 23-32, 2003.
- 2) Rozovskii, I.L.: Flow of water in bends of open channels, English Translation, Israel Progr. For Scientific Transl., Jerusalem, 1957.
- 3) Struiksmann, N., Olsen, K. W., Fiolstra, C. and de Vriend, H.J.: Bed deformation in curved alluvial channels, Journal of Hydraulic Research, Vol.23, No.1, 1985.
- 4) Olsen, K.W.: Bed topography in shallow river bends, Faculty of Civil Eng., Delft Univ. of Tech., Report 87-1, 1987.
- 5) 木下良作・三輪式:砂れき堆の位置が安定化する流路形状, 新砂防, No.94, pp.12-17, 1974.