

湾曲部外岸のり面の緩勾配化による流況改善

Improvement of Flow and Bed Topography by Making
the Outer Bank Slope Milder in a Curved Channel

福岡 捷二 * · 三宮 武 ** · 西村 達也 ***

By Shoji FUKUOKA, Takeshi SANNOMIYA and Tatsuya NISHIMURA

The flow in a curved reach causes the bed scour near the outer bank and resulting outer bank erosion. Making the outer bank slope milder is a useful means of bank protection. In a curved channel with milder sloping of outer bank, the theoretical and experimental works are conducted aiming at the improvement of flow and bed topography. The result of calculation coincides well with that of the experimental results with regard to the structure of three dimensional flow and the bed topography, and also making the outer bank slope milder in a curved channel enables us to reduce the bed scour near the outer bank without the rise of water level.

Keywords : improvement of flow and bed topography, mild bank slope, curved channel.

1. 序 論

河川堤防の表のり勾配は、従来2～2.5割を標準として施工されてきた。しかし、堤防のり面を緩勾配化することは、堤防の強化、河道の安定、堤防植生の維持管理の効率化、河川環境の改善等の理由から、安全で人と生きものにやさしい川づくりを行ううえで重要である。

しかしながら、河川堤防のり勾配を緩くすることは、河川堤防を前出しすることとなり、河積を阻害し、水位を上昇させる恐れがあること、河川堤防のり勾配を緩くすることによる河道の安定や堤防強化等の効果が定量的・具体的にないことなどから、現在ではほとんど施工されていない。しかし、河道湾曲部の流れは外岸に集中し、外岸河床の洗掘を引き起こすことから、外岸のり面の安定性には特別な注意が必要になる。堤防を前出しすることは、外岸近傍に発生する水衝部および洗掘位置を河道中央部に移動させ、洗掘深を軽減させる効果があるものと推定される。

本論文では、一様湾曲水路を対象に、外岸側のり面を緩勾配化した場合の三次元流れおよび河床形状を、運動方程式の各項のオーダーを比較することによって簡略化した基礎方程式から求めるとともに、実験結果との比較を行い、り面の緩勾配化による流況改善および河床変動に対する効果を検討している。

* 正会員 工博, Ph. D. 東京工業大学助教授 工学部土木工学科
(〒152 目黒区大岡山2-12-1)

** 学生会員 東京工業大学大学院 修士課程(同上)

*** 正会員 工修 (株)建設技術研究所 技術第3部
(〒103 中央区日本橋堀留町1-7-7)

2. 理論解析

(1) 基礎方程式

河道湾曲部の流れを取り扱うため、座標系は $s-n-z$ による直交曲線座標系を用いる。 z 方向は静水圧分布を仮定する。 従来、一様湾曲水路における流れの解析は、三次元運動方程式を簡略化した次の基礎方程式を用いて行われてきた¹⁾。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} (r v) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} -g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right\} &= 0 \\ -\frac{u^2}{r} &= -g \frac{\partial H}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 s は縦断方向、 n は横断方向、 z は水深方向、 u 、 v はそれぞれ s 、 n 方向の流速成分、 H は水位、 r は曲率半径、 ε は渦動粘性係数を示す。

しかし、(2)、(3)式は水路幅が広く、横断方向に河床形状が変化しない、一様湾曲水路を対象としたものであり、本研究のように外岸側に緩勾配の斜面を有する水路では、(2)、(3)式は十分であるとはいえない。そこで、3. で述べる外岸側に緩勾配の斜面を有する一様湾曲水路の実験結果をもとに三次元運動方程式の各項のオーダー比較を行うことにより運動方程式は次式に示す通り簡略化することができる。

$$\underline{v' \frac{\partial u_0}{\partial n} + \frac{u_0 v'}{r} + w \frac{\partial u'}{\partial z}} = -g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \varepsilon \frac{\partial u'}{\partial z} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$-\frac{u_0^2}{r} - 2 \frac{u_0 u'}{r} - \frac{u'^2}{r} = -g \frac{\partial H}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \varepsilon \frac{\partial v'}{\partial z} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 u_0 、 v_0 は s 、 n 方向の水深平均流速成分、 u' 、 v' は s 、 n 方向流速の水深方向の変動成分を示す。

(3)式は、従来一様湾曲水路の流れの解析に用いられてきた(2)式に「 」で示した項を加えたものであり、この項が緩勾配の斜面を有する流れの解析に必要となる。

次に、一様湾曲水路の河床変動計算は、次式に示す流砂の連続式を用いるものとする。

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial (r q_{bn})}{\partial n} \right\} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに z_0 は河床高、 λ は河床材料の空隙率、 q_{bs} 、 q_{bn} は s 、 n 方向の掃流砂量を示すものであり、それぞれ次式に示す Meyer-Peter & Muller の式及び長谷川の式²⁾を用いる。

$$\left. \begin{aligned} q_{bs} &= 8 \sqrt{(\rho_s / \rho - 1) g d^3 (\tau_{*c}' - \tau_{*c})^{1.5}} \\ q_{bn} &= q_{bs} \left\{ \frac{v_b}{u_b} - \frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_{*c}} \frac{\partial z_0}{\partial n} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 τ_{*c}' は無地現有効せん断力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力、 ρ_s は砂礫の密度、 d は河床材料の粒径、 u_b 、 v_b は s 、 n 方向の河床付近の流速、 μ_s 、 μ_k は静止及び動摩擦係数を示す。

(2) 計算手法

(1), (3)及び(4)式に示した一様湾曲水路における連続式及び三次元運動方程式をそのまま解くことは困難であることから、本研究では、s, n方向の流速u, vの解法については、次式に示すようにそれぞれ水深方向の分布形をフーリエ級数を用いて与え、その際のフーリエ係数(u₀, u₁, u₂, v₀, v₁, v₂)は、1, cos π z', cos 2 π z' (z' = (z - z₀) / h, z₀は河床高, hは水深)のを重みをかけ水深方向に積分することによって離散化した方程式から求めることにする³⁾。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 + u_1 \cos \pi z' + u_2 \cos 2 \pi z' \\ v &= v_0 + v_1 \cos \pi z' + v_2 \cos 2 \pi z' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

(7)式を(3), (4)式に代入し、ガラーキン法によって離散化すると次式の通り整理することができる。

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= -\frac{g h}{C_B} \frac{\partial H}{\partial s} \sqrt{u_b'^2 + v_b'^2} - u_1 - u_2 \\ u_1 &= \frac{2 h^2}{\varepsilon \pi^2} \left\{ g \frac{\partial H}{\partial s} - \frac{v_1}{2} \frac{\partial u_0}{\partial n} - \frac{u_0 v_1}{2 r} \right\} \\ u_2 &= \frac{h^2}{2 \varepsilon \pi^2} \left\{ g \frac{\partial H}{\partial s} - \frac{v_2}{2} \frac{\partial u_0}{\partial n} - \frac{u_0 v_2}{2 r} \right\} \\ v_0 &= \frac{h}{C_B \sqrt{u_b'^2 + v_b'^2}} \\ &\quad \times \left\{ \frac{u_0^2}{r} + \frac{u_1^2 + u_2^2}{2 r} - g \frac{\partial H}{\partial n} \right\} - v_1 - v_2 \\ v_1 &= \frac{2 h^2}{\varepsilon \pi^2} \left\{ -\frac{u_0^2 - u_0 u_1}{r} \right. \\ &\quad \left. - \frac{u_1^2 + u_2^2 - u_1 u_2}{2 r} + g \frac{\partial H}{\partial n} \right\} \\ v_2 &= \frac{h^2}{2 \varepsilon \pi^2} \left\{ -\frac{u_0^2 - u_0 u_2}{r} \right. \\ &\quad \left. - \frac{u_1^2 + u_2^2}{2 r} + \frac{u_1^2}{4 r} + g \frac{\partial H}{\partial n} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここにC_Bは、河床と流体との摩擦係数を示す。なお、(8)式において「——」で示した項が(2)式において考慮されていなかった項である。

また、(1)式を水深方向に積分すると、次式に示す通りとなり、v₀ = 0という条件が得られる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} (r h v_0) = 0 \dots\dots\dots (9)$$

(8)および(9)式から、流速(u₀, u₁, u₂, v₁, v₂)および水位Hを求めることになるが、これらを解くためにはu₀の横断方向の分布形、渦動粘性係数ε、横断方向の水位変動量を与える必要があり、これは非常に困難である。ここでは計算を簡単にするため、流速u₀, u₁, u₂, v₁, v₂に初期値を与え、解が安定するまで繰り返し計算を行うことにする。なお、繰り返し計算の過程において、∂H/∂n、渦動粘性係数ε、u₀の横断方向の分布形は、(1)式によって算出した流速から求めるものとし、∂H/∂nおよびε

はそれぞれ次の通りとする。

$\partial H / \partial n$ は(1)式において $v_o = 0$ とした次式を用いるものとする。

$$\frac{\partial H}{\partial n} = \frac{1}{g} \left\{ \frac{(v_1 + v_2) \sqrt{u_b^2 + v_b^2}}{h} + \frac{u_o^2}{r} + \frac{u_1^2 + u_2^2}{2r} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

渦動粘性係数 ϵ は次式を用いるものとする。

$$\epsilon = \frac{\kappa}{6} u_* h \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 u_* は摩擦速度であり、河床付近の流速とセン断力との関係から次式を用いる。

$$u_*^2 = \frac{\tau_b}{\rho} = C_B (u_b^2 + v_b^2), u_b = u_o + u_1 + u_2, v_b = v_1 + v_2 \dots\dots\dots (12)$$

また(8)および(9)式を解くためには、河床の摩擦係数 C_B が必要となる。河床の摩擦係数 C_B は、緩勾配区間とそれ以外の区間に分け、水深平均流速 u_o の実験結果をもとに作成した次式を用いる。

$$C_B = \begin{cases} C_{Bo} \dots\dots\dots \text{緩勾配以外の区間} \\ C_{Bo} \left(\frac{h}{h_{max}} \right) \left(\frac{r_{max}}{r} \right) \dots\dots\dots \text{緩勾配区間} \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

ここに C_{Bo} は断面平均摩擦係数(= $gn^2/h_o^{1/3}$, n は粗度係数, h_o は断面平均水深), h_{max} は最大水深, r_{max} は最大水深が生じる地点の曲率半径を示す。

次に河床変動の計算は、上記の方法によって算定された s , n 方向の流速 u , v から、河床付近のセン断力を算定し、(8)式の流砂の連続式, (9)式の流砂量式を用いることにより、河床高を算定する。そして算出された河床高を用いて、再び流れの計算を行うという繰り返しの計算を行うものとする。

緩勾配区間のセン断力は流れの計算から算出された斜面上の流速から算定するものとし、河床変動については、斜面上には堆積するが洗掘しないものとする。

3. 実験結果との比較

実験は、中心曲率半径 $r_c = 4.5m$, 水路幅 $1.0m$, 水路長 $24.0m$ の一樣湾曲水路に図-1に示すように、水路外岸側に3割勾配の斜面を設置しこれを初期河床とした。

実験条件を表-1に示す。上流端で給砂し、河床が平衡状態に至るまで通水を行い、平衡状態に達したことを確認後、水位、河床形状の測定を行った。次に河床形状を固定した後、再び通水し、主流と二次流の分布を測定した。

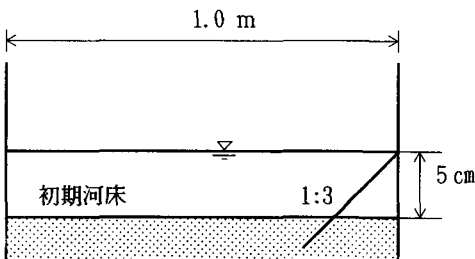


図-1 実験水路の横断図

表-1 一樣湾曲水路の実験条件

流量 (ℓ/sec)	18.0
初期水路床勾配	1/500
平均水深 (m)	0.047
河床材料(mm)	0.8
通水時間	8時間
給砂量 (ℓ/min)	0.1

最初に、のり面の緩勾配化に伴う流況と河床形状の変化の状況を図-2, 3に示す。

これらの図から次のことがいえる。河床の砂が連続的に移動している流路にあっては、外岸のり面を鉛直壁から3割に緩勾配化すると、河道中央寄りに深いみお筋が現れるために、流速の速い部分は堤体側から河道中央へ寄り、堤体の安定性は向上する。また河道の縦横断形状の変化が小さい安定した流れとなり、水位の変化も生じず流況が著しく改善される。これは外岸のり面の緩勾配化により、水流が連続的に中央にはねられ、これによって河床形状、流速分布形が好ましい形に変化したためである。

次に、実験によって得られた横断方向の水位変動、流速分布および横断河床形状と、2で述べた計算方法による計算結果との比較を行う。なお、この場合の粗度係数は $n=0.02$ 、静止及び動摩擦係数は $\mu_s=0.8$ 、 $\mu_k=0.5$ とした。

図-4は、河床の横断形状が縦断的にほぼ一様となった10m地点から18m地点までの水位変動量を平均化して示した実験値と計算値とを比較したものである。この図を見ると、特に内岸側において実験結果と計算結果に差が見られるが、計算結果は外岸側の水位上昇を概ね表していることがわかる。

図-5は、13m地点から15m地点までの流下方向流速 u および横断方向流速 v の断面内分布を平均化した実験結果と計算結果とを比較したものである。この図を見ると、実験結果は河床に発生した砂州の影響を受けているため、計算結果と若干の差が見られるが、計算結果は横断方向流速の実測分布形をよく表わしていることがわかる。

図-6は、河床がほぼ平衡状態に達した通水8時間後の10m地点から18m地点までの河床形状を平均化した実験結果と(1)式から算出した流速を用いた河床形状および(3)式に示した運動方程式を用いた流速による河床形状の計算結果とを比較したものである。この図を見ると、のり面の緩勾配化により、洗掘位置が水路中央部に移動した実験結果を計算結果は非常によく表わしていることがわかる。さらにのり面の緩勾配化により、横断方向に河床形状が変化するような水路においては、従来から用いられている運動方程式(2)式では不十分で

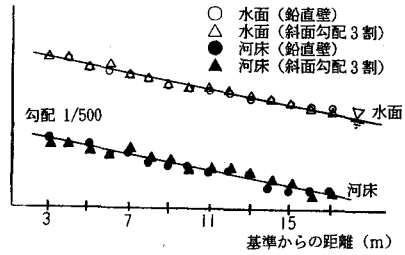


図-2 断面平均水位と平均河床高

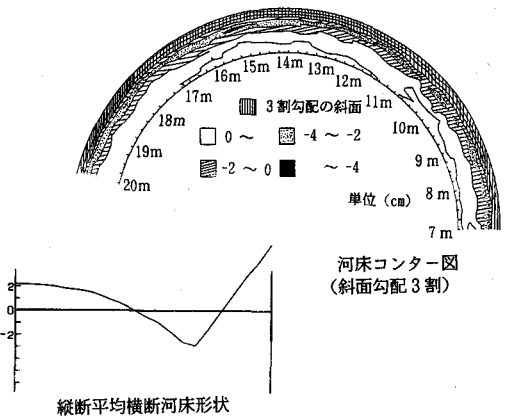
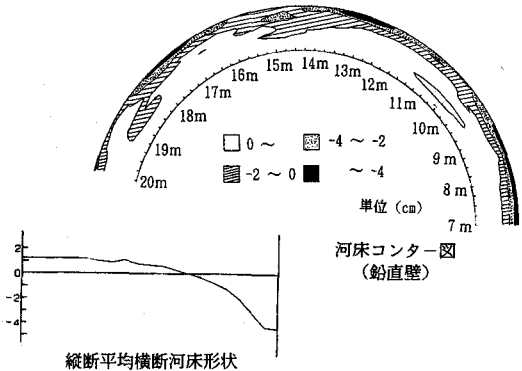


図-3 縦断平均横断河床形状と河床コンター図

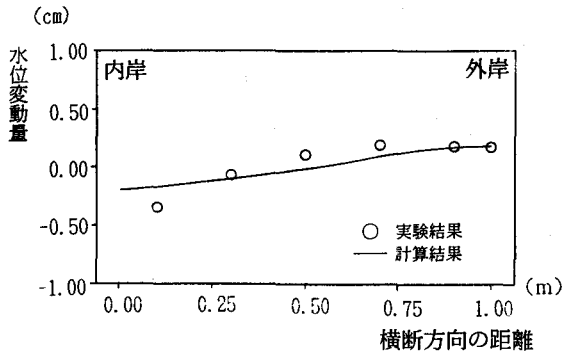


図-4 水位変動量の横断方向分布

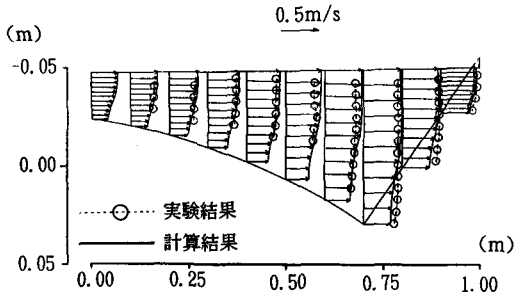


図-5(1) 縦断方向流速の断面内分布

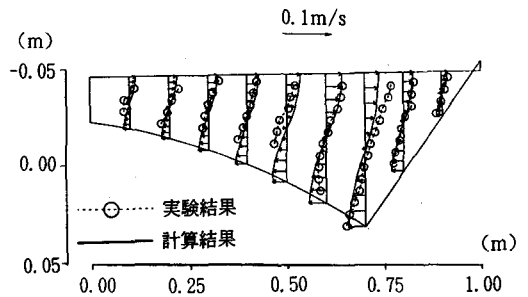


図-5(2) 横断方向流速の断面内分布

あり、(5)式に示したようにs方向の運動方程式において、「——」で示した横断方向流速による移流項が必要となることがわかる。

4. 結論

本研究の結論を示す。

- (1) 外岸のり面勾配を3割に緩勾配化しても、河床の砂が連続的に移動している場合には、側岸が鉛直の場合に比して水位上昇は認められず、また流況が著しく改善される。
- (2) 本研究のモデルの計算結果と一様湾曲水路の実験結果とを比較した結果、計算結果

は実験結果の水位変動量、主流および二次流分布を概ね表現しており、本研究モデルによって、緩勾配化による流況改善効果を評価することができ。

- (3) 河床変動状況の実験結果と計算結果を比較した結果、計算結果と実験結果はよく一致しており、本研究モデルは、のり面の緩勾配化による洗掘力に対する効果を十分に表現することができる。
- (4) 緩勾配のり面を有する水路においては、従来から用いられている運動方程式では不十分であり、(3)式の「——」で示した横断方向流速による移流項が必要となる。

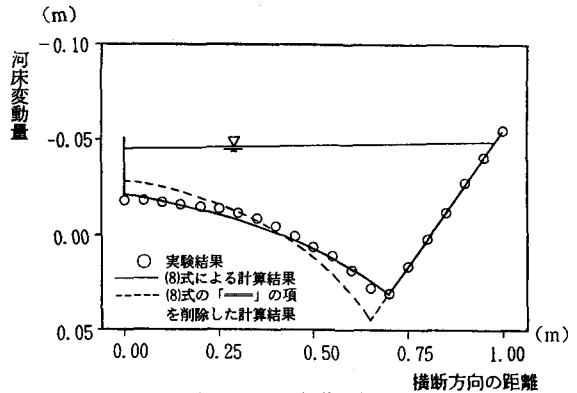


図-6 河床変動状況

参考文献

- 1) Engelund, F. : Flow and bed topography in channel bends, Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol.100, No. HY11, pp.1631 ~1648, 1974.
- 2) 長谷川和義 : 非平衡性を考慮した側岸浸食量式に関する研究, 土木学会論文報告集, 第316号, pp.37 ~50, 1981.
- 3) 福岡捷二, 渡辺明英, 西村達也 : 水制工の配置法, 土木学会論文集, II (投稿中)