

## 縦断的に配置された緩傾斜河岸が流れに及ぼす影響

Effects of the Longitudinal Arrangement of the Gentler Bank Slope on the Flow

福岡 捷二\*・安田 実\*\*・西村 達也\*\*\*

By Shoji FUKUOKA, Minoru YASUDA 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 gentler is a useful means of bank protection. By numerical works, we studied the improvement of flow and bed topography in straight channels and meandering channels with gentler sloping of bank. The result of calculation shows that water level depends on the width to depth ratio in the single section channel with gentler slope, and that making the slope gentler does not induce the rise of water level in the composite channel. Making the outer bank slope gentler in the meandering channel enable us to reduce the bed scour near the outer bank without the rise of water level.

Keywords: flow and bed topography, gentler bank slope,  
straight and meandering channels, numerical calculation

### 1. 序論

河道湾曲部では流れが外岸に集中し、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。堤防の表のり面を緩勾配化することは、堤防の安定性の強化、河道の安定に役立ち、また堤防植生の維持管理の効率化、河川環境の改善等に対しても緩勾配化は効果があると考えられ、緑の丘陵堤防整備事業として施策に反映されている。

福岡ら<sup>1)</sup>は、一樣湾曲水路において外岸のり面の緩勾配化は水位上昇をほとんど招かないで、外岸側に発生する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ことを明らかにした。これは、外岸のり面の緩勾配化により洗掘位置と洗掘深が変化し、このため断面内の流速分布およびせん断力分布が変わったことによるものである。これは、また横断方向の河床変化が著しい湾曲部における特有の結果であると解釈されてきた。実河川は、湾曲部と直線部の両方を有しており、のり面の緩勾配化が水位上昇を招く心配がある。特に、直線水路での堤防の緩勾配化の実施箇所については、湾曲部のように流速分布が大きく変化しないため、その効果については十分に検討されなければならない。

本論文では、直線および蛇行水路において、のり面を緩勾配化したことによる流況改善および河床変動に

---

\* 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)

\*\* 正会員 建設省河川局治水課課長補佐  
(〒100 千代田区霞が関 2-1-3)

\*\*\* 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)

対する効果について、福岡ら<sup>2)</sup>が作成した三次元モデルを用いることにより検討を行うとともに、水位上昇を招くことなく、洗掘深を軽減する緩勾配河岸の縦断配置について検討を行っている。

## 2. 計算手法

### (1) 基礎方程式

蛇行水路内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。  $z$  方向の運動方程式については静水圧分布が成り立つものと仮定し、水底  $z_0$  から高さ  $z$  まで積分した連続式を  $s$  及び  $n$  方向の運動方程式に代入すると次式が得られる。

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} - \left\{ \frac{\partial}{\partial s} \int_{z_0}^z u \, dz + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} \int_{z_0}^z r v \, dz \right\} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{u v}{r} \\ = -g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left\{ \epsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right\} + \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \epsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \epsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \dots (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \left\{ \frac{\partial}{\partial s} \int_{z_0}^z u \, dz + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} \int_{z_0}^z r v \, dz \right\} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} \\ = -g \frac{\partial H}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial s} \left\{ \epsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right\} + \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \epsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \epsilon \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \dots (2)$$

ここに、 $u$ 、 $v$  は、 $s$ 、 $n$  方向の流速、 $H$  は水位、 $\rho$  は水の密度、 $r$  は曲率半径、 $g$  は重力加速度、 $\epsilon$  は渦動粘性係数である。

また、連続式を河床から水面まで積分し、水面と河床における運動学的条件を用いると、

$$\frac{\partial (u_0 \cdot h)}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r v_0 \cdot h)}{\partial n} = 0 \dots (3)$$

となる。ここに  $u_0$ 、 $v_0$  は  $u$ 、 $v$  の水深平均流速である。

次に河床変動計算は、次式に示す流砂の連続式を用いるものとする。

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial q_{Bs}}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r q_{Bn})}{\partial n} \right\} = 0 \dots (4)$$

ここに  $z_0$  は河床高、 $\lambda$  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 Meyer-Peter & Müller の式及び長谷川の式を用いる。

### (2) 数値計算手法

(1)、(2)式および(3)式の計算手法については、福岡ら<sup>2)</sup>の方法を用い、 $s$ 、 $n$  方向流速  $u$ 、 $v$  の水深方向の分布形は、次式に示す余弦関数を用いたフーリエ係数で与え、その際のフーリエ級数 ( $u_0$ 、 $u_1$ 、 $u_2$ 、 $v_0$ 、 $v_1$ 、 $v_2$ ) は、「1」、「 $\cos \pi (z - z_0) / h$ 」、「 $\cos 2\pi (z - z_0) / h$ 」を重み関数として、水深方向に積分することによって離散化した運動方程式を差分化することによって求める。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 + u_1 \cos \pi (z - z_0) / h + u_2 \cos 2\pi (z - z_0) / h \\ v &= v_0 + v_1 \cos \pi (z - z_0) / h + v_2 \cos 2\pi (z - z_0) / h \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

次に河床変動の計算については、算定された  $s$ 、 $n$  方向の流速  $u$ 、 $v$  から、河床附近のせん断力を算定し、(4)式の流砂の連続式、(5)式の流砂量式を用いることにより、河床高を算定する。なお、緩勾配区間における流れの計算は、緩勾配の斜面を河床とみなして行うものとし、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. 計算結果

前節で記した計算手法を用いることにより、直線水路および蛇行水路において側岸を緩勾配化したことに

よる水位および河床変動への影響について検討を行う。

(1) 単断面直線水路における計算結果

水路は、表-1に示すように、水路延長30mの鉛直壁を有する直線水路を想定し、図-1に示すように水路の上流端から15m地点附近の右岸側に2割勾配の斜面を設置している。計算条件は表-1に示す通りである。

図-2は、15地点を中心に2割勾配の斜面を5m設置した場合の通水8時間後の横断河床形状を鉛直壁の場合と比較したものである。この図を見ると、単断面直線水路においてのり面の緩勾配化を行っても河床形状はほとんど変化しないことがわかる。

図-3は、ケース 1-1の水路において、2割勾配斜面の設置範囲を15m地点を中心に1m, 3m, 5mと変化させた場合の水位の計算結果を鉛直壁の水位の計算結果と比較している。この図を見ると、2割勾配の斜面の設置範囲を狭くすると、鉛直壁の場合に比べて水位上昇量は少ないが、緩勾配区間を1mにしても、水位上昇はなくなる。これは、直線水路が湾曲水路と異なる点で、横断方向の河床変化が小さいため、のり面の緩勾配化を行ったとしても、流況改善や洗掘深を軽減する効果が小さく、むしろ水位の上昇となって表われることを示している。ただし、緩勾配化することによって、河床形態が変化する直線流路にあっては、この結果が正しいかを別途検討する必要がある。

図-4は、水深を固定し、川幅を変化させたケース 1-2およびケース 1-3の直線水路において、15m地点を中心に右岸側に5mの緩勾配斜面を設置した場合の水位の計算結果を鉛直壁の場合と比較したものである。この図を見ると、川幅・水深比がB/H。

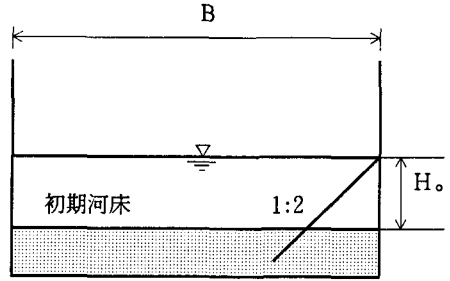


図-1 単断面直線水路の横断面

表-1 単断面直線水路の計算条件

	ケース1-1	ケース1-2	ケース1-3
流量 (ℓ/sec)	18.0	35.7	53.6
初期水路床勾配	1/500	1/500	1/500
水路幅 B (m)	1.0	2.0	3.0
水路延長 (m)	30.0	30.0	30.0
平均水深 H <sub>0</sub> (m)	0.047	0.047	0.047
河床材料 (mm)	0.8	0.8	0.8
通水時間	8時間	8時間	8時間

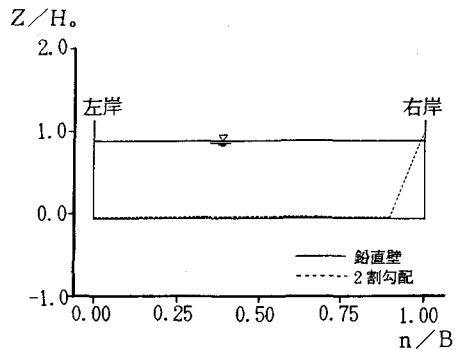


図-2 単断面直線水路における横断河床形状の比較

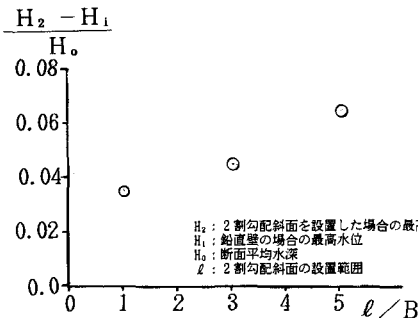


図-3 緩勾配斜面の設置範囲と水位上昇量との関係 (ケース 1-1)

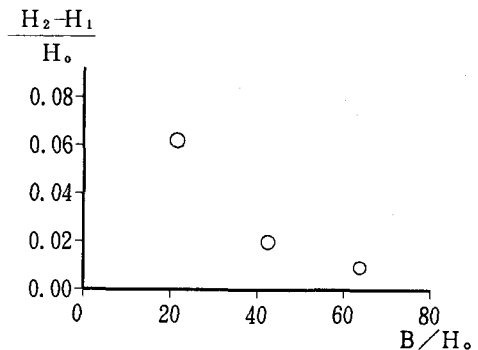


図-4 B/H<sub>0</sub>と水位上昇との関係

表-2 蛇行水路の計算条件

	ケ-2-1	ケ-2-2	ケ-2-3
最大偏角	45°	60°	45°
流量 (ℓ/sec)	18.0	18.0	35.7
平均水深 (m)	0.047	0.047	0.047
水路幅 (m)	1.0	1.0	2.0
初期水路床勾配	1/500	1/500	1/500
一波長の蛇行長 (m)	24.0	24.0	24.0
河床材料 (mm)	0.8	0.8	0.8
通水時間	8時間	8時間	8時間

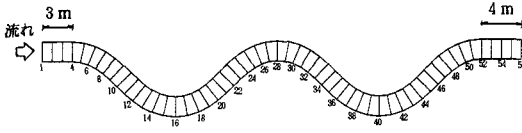


図-5 蛇行水路の形状

＝21の直線水路においては、緩勾配斜面を設置することによって平均水深に対して約6%程度の水位上昇が見られ、 $B/H$ が43になると、水位上昇量は2%程度と小さくなり、 $B/H$ が64では、もはや水位上昇はほとんど見られないことがわかる。これは、 $B/H$ が小さい直線水路においては、緩勾配化をすることによる河積の減少が水位に影響を及ぼすが、 $B/H$ が大きくなると、のり面を前出したことによる河積の減少分は、水位にほとんど影響を与えないことを示している。

(2) 単断面蛇行水路における計算結果

蛇行水路の計算では、図-5に示すように、水路の上流端と下流端に、各々3mと4mの直線部を設置した2波長の蛇行水路を想定した。蛇行水路の諸元および計算条件は表-2に示す通りであり、条件は一樣湾曲水路の条件を参考に決めている<sup>1)</sup>。ここで2割勾配斜面は、湾曲部のうち最大洗掘深が発生する地点を中心に湾曲部外岸側に設置した。

図-6は、その際の最大洗掘深と最高水位の縦断方向分布を、鉛直壁の場合と比較したものである。この図を見ると、のり面を緩勾配化したことにより、約2mm程度の水位上昇を起こしているが、鉛直壁の場合に比べて洗掘深が軽減していることがわかる。

図-7は、ケース 2-1の蛇行水路において、2割勾配の斜面の設置範囲を変化させた場合の水位および河床洗掘の変化を鉛直壁の場合と比較したもので

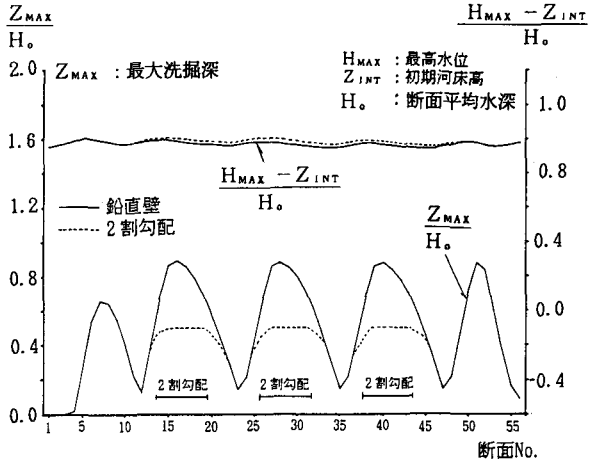


図-6 最高水位と最大洗掘深の変化 (ケース 2-1)

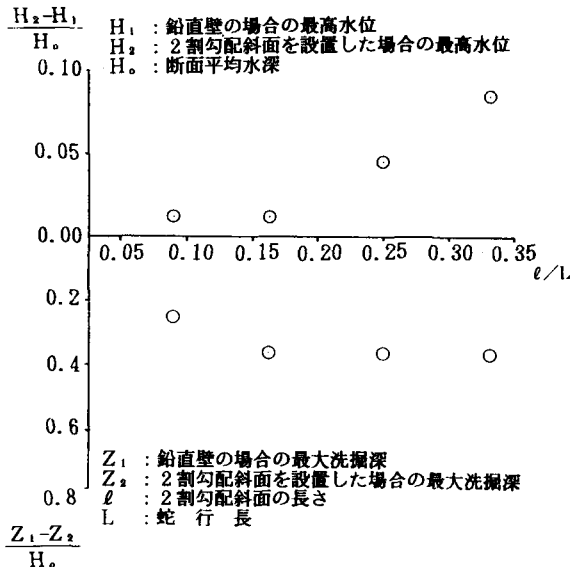


図-7 緩勾配斜面の設置範囲と水位上昇量および最大洗掘深との関係 (ケース 2-1)

ある。この図を見ると、ケース 2-1の蛇行水路形状では、2割勾配斜面の設置範囲を蛇行長の16%程度にすれば、ほとんど水位上昇を招くことなく、洗掘深を軽減することができるが、設置範囲を16%より大きくすれば水位上昇を引き起こし、設置範囲を狭くすれば水位上昇を引き起こさないが、洗掘深の軽減効果が少なくなることがわかる。

図-8は、ケース 2-1の蛇行水路において、2割勾配斜面の設置範囲を  $l/L=0.16$ にした場合と鉛直壁の場合の河床面のセン断力分布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最大セン断力の発生位置が水路中央部へ寄り<sup>3)</sup>、セン断力分布が大きく変化していることがわかる。このような緩勾配化によるセン断力分布の変化が、のり面を前出ししても水位上昇を引き起こさない要因になっていると思われる。

図-9は、水路幅が異なるが、単位幅流量が同一のケース 2-2およびケース 2-3の蛇行水路において、2割勾配の斜面の設置範囲を変化させた場合の水位および洗掘深の変化を鉛直壁の場合と比較したものである。この図と図-7に示したケース 2-1の計算結果と比較すると、次のことがいえる。最大偏角が大きい蛇行水路においては、湾曲部外岸側に発生する洗掘深が大きいため、のり面の緩勾配化による洗掘深の軽減効果は大きく、水位上昇を引き起こさない望ましい緩勾配化の範囲も広がる。また水路幅が広くなると、のり面の緩勾配化による洗掘深の軽減効果は顕著になるだけでなく、緩勾配化による水位上昇はほとんど見られない。

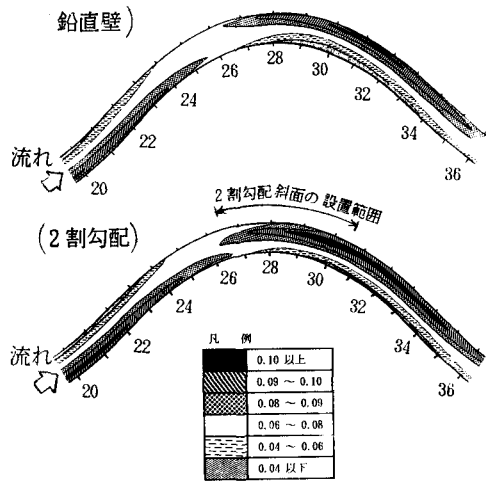


図-8 無次元セン断力のコンター図

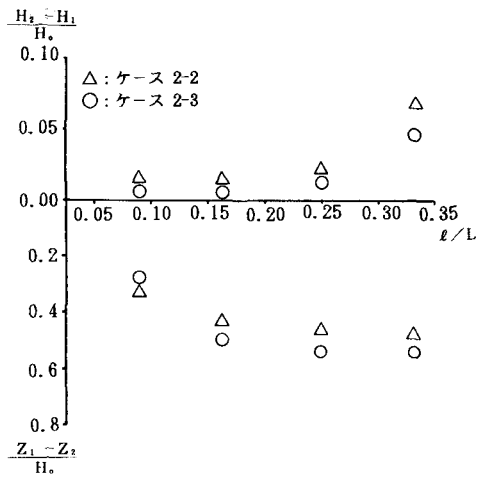


図-9 緩勾配斜面の設置範囲と水位上昇量および最大洗掘深との関係

表-3 複断面直線水路の計算条件

流量 (ℓ/sec)	59.7
初期水路床勾配	1/500
水面幅 (m)	2.0
低水路幅 (m)	1.0
平均低水路水深 (m)	0.097
河床材料 (mm)	0.8
通水時間	8時間

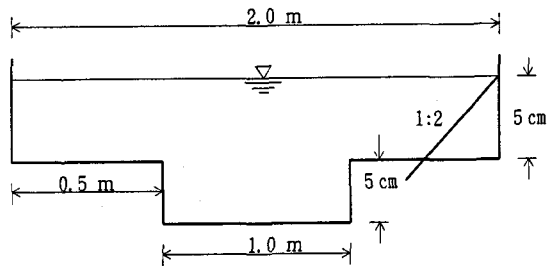


図-10 複断面直線水路の横断面図

(3) 複断面直線水路における計算結果

図-10 に示す水面幅 2.0m, 水路延長30mの複断面直線水路を想定し、水路中央部の15m地点を中心に右岸側堤防の5mの範囲に2割勾配の斜面を設置した。計算条件は、表-3に示す通りである。

図-11 は、通水8時間後の最高水位と最大洗掘深の計算結果を鉛直壁の場合と比較したものである。この図を見ると、複断面直線水路では、堤防を緩勾配化しても河床形状はほとんど変化せず、しかも、単断面直線水路の計算結果で見られたような、水位上昇はほとんど見られないことがわかる。これ

は、複断面水路では低水路内に流れが集中し、高水敷の流速が相対的に小さいため、堤防を前出し高水敷の河積を小さくしても水位にはほとんど影響を及ぼさないことによるものである。

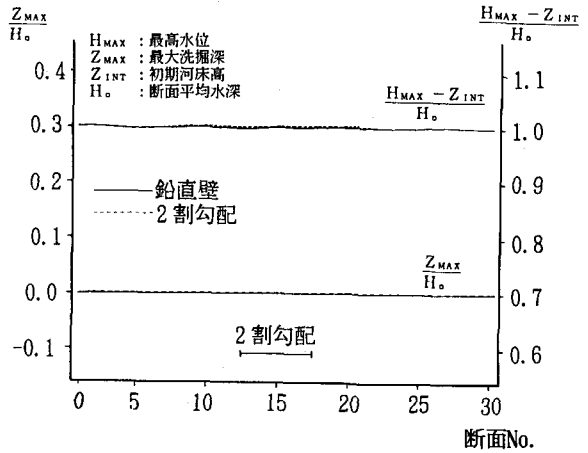


図-11 複断面水路における最高水位と最大洗掘深の変化

4. 結論

本研究では、緩勾配河岸の配置が、水位の上昇にどれだけ影響を及ぼすかを、鉛直壁と2割勾配斜面について検討し、比較を行った。今後実験を行い、得られた結果の検証をするつもりである。また、のり勾配が2割よりも小さい場合についても検討していく予定である。

主要な結論を以下に示す。

- (1) 川幅・水深比が大きい単断面直線水路においては、のり面を緩勾配化しても水位上昇はほとんど見られないが、川幅・水深比が20程度になると、のり面を前出することによる河積の減少が若干の水位上昇を発生させる。これに対し、単断面水路に比して高水敷の流速が小さい複断面直線水路においては、堤防の緩勾配化による高水敷の河積の減少はほとんど水位に影響を与えない。
- (2) 単断面蛇行水路においては、のり面の緩勾配化によって、水位上昇を招くことなく、外岸側の洗掘深を軽減することが可能である。
- (3) 最大偏角の大きい蛇行水路においては、外岸側河岸の緩勾配化により、外岸河床の洗掘深の軽減は大きくなり、水位上昇を引き起こさない緩勾配区間の設置範囲は広がる。また川幅・水深比の大きい蛇行水路においても、緩勾配区間の設置範囲を大きくとっても水位上昇はほとんど見られない。

参 考 文 献

- 1) 福岡捷二, 三宮 武, 西村達也: 湾曲部外岸のり面の緩勾配化による流況改善, 水工学論文集, 第36巻, pp.55 ~60, 1992.
- 2) 福岡捷二, 渡辺明英, 西村達也: 水制工の配置法の研究, 土木学会論文集, 第 443号, pp.27 ~36, 1992.
- 3) 三宮 武, 福岡捷二, 西村達也, 曾田英揮: 緩勾配河岸を有する湾曲流れの壁面に作用する剪断力, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, pp.204 ~205, 1992.