

中小河川の蛇行部の通砂能力に関する基礎的研究

広島大学 学生会員 ○石田 和樹  
 広島大学 正会員 内田 龍彦  
 広島大学 学生会員 Firky Purwa Lugina

1. 背景と目的

平成30年の西日本豪雨では、各地で土砂・洪水氾濫が発生した。これは土砂流入量が河道の通砂能力を大きく超えたことが原因として挙げられる。この被害は、砂防区間直下流の川幅に対して水深が小さい中小河川において多く見られた。河川の蛇行部に関する研究は河床形状の計算に着目した研究<sup>1)</sup>が多く、通砂能力に着目した研究は少ない。Lugina<sup>2)</sup>らは、川幅水深比の小さい中小河川では蛇行部の二次流によって引き起こされる鉛直方向の運動量輸送がせん断力を増加させ、通水能力を低下させること明らかにした。せん断力の増加は掃流力の増加を生じさせるため、河川の蛇行が結果として通砂能力にどのように影響するのかの検討には至っていない。そこで本研究では蛇行が通水能力と通砂能力に与える影響を明らかにするため、1.75波長分の蛇行水路を用いて通砂実験を行い、水理条件を合わせた直線部と比較することで、移動床における中小河川の通水能力および通砂能力を、水面勾配および河床勾配の大小から明らかにすることを目的とする。

2. 実験条件・方法

中小河川蛇行部における通水および通砂能力を評価するため、川幅水深比が小さく、幅や長さが同じ直線水路と蛇行水路を用いて水理条件を合わせたうえで実験を行った。それぞれの水理条件を表-1、蛇行の水路条件を表-2に示し、水路の概要を図-1、図-2に示す。実験水路の対象区間に堆積高さ0.15mになるように珪砂3号砂(粒径1.55mm)を平坦に敷き詰め、下流端に高さ0.15mの堰堤を設置した。また、実験時間短縮のため堰堤の堆積高さを基準にとり上流側に向けて直線では約1/250、蛇行では約1/500の河床勾配となるように土砂を敷き詰めた。上流から通水を始め堰堤部分の水位が限界水深に達した時点で給砂を開始し、給砂量と流砂量が等しくなった時点で実験を終了した。なお、両実験ともに給砂量と流砂量が等しくなったため平衡状態に達していた。給砂量については5minあたりの総給砂量が等しくなるよう調整した。実験では水面勾配、河床形状、そして流砂量を測定した。

表-1 実験条件

width(m)	length(m)	sediment supply(g/s)	flow rate(L/s)
0.39	14.11	20.2	12.4

表-2 蛇行水路条件

maximum deflection angle(°)	wavelength(m)	sinuosity
52.99	6.43	1.25



図-1 直線水路平面図

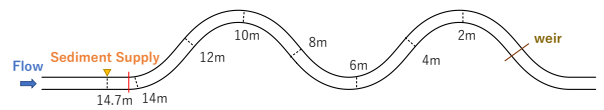


図-2 蛇行水路平面図

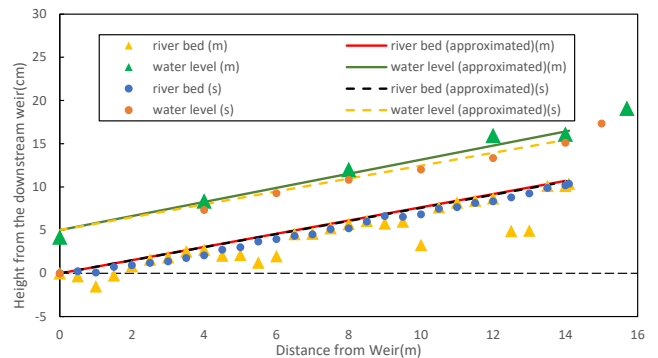


図-3 平衡状態における縦断水面形と河床形状

3. 実験結果

実験後のそれぞれの水路の最終河床、および水面形状を図-3に示す。勾配の比較が行いやすいように近似直線における堰堤地点での河床高および水位を同じ値に設定している。河床勾配はほぼ同じであるが、蛇行水路の方が直線水路に比べて水面勾配が大きくなることがわかる。このことから、平坦河床の場合<sup>2)</sup>と同様に、水路蛇行は河床抵抗を増加させており、蛇行部は直線部に比べて通水能力が小さいといえる。一方、河床勾配に大きな差は見受けられなかった。また、蛇行は直線に比べて二次流による内岸と外岸の河床高の差だけでなく、河床波が明瞭に発生していた。

4. 通水能力と通砂能力の考察

二次流による鉛直方向の運動量輸送と併せて移動床

の場合には、流砂が水流から受ける抵抗は、砂粒による表面抵抗と河床波による形状抵抗が存在するため、それぞれの影響が直線と蛇行で異なることが両水路の通水能力及び通砂能力に差を生じさせたと考えられる。本研究ではそれぞれを定量的に評価するため、以下のように、河床抵抗を評価するパラメーター $\alpha$ と、流砂量を評価するパラメーター $\beta$ を導入する。パラメーター $\alpha$ は、河床全抵抗を表す相当粗度 $k_s$ を $k_s=ad$  ( $d$ :粒径)と定義した。 $k_s$ は直線水路と蛇行水路の実験で測定したエネルギー勾配を用いて算出したマンニングの粗度係数 $n$ から求めた。したがって、パラメーター $\alpha$ は等流の流速分布を想定した場合の表面抵抗に対する河床全抵抗を表す。一方、パラメーター $\beta$ は、直線水路における掃流力に対応する流砂量に対する実際の流砂量を表すために、既往の平衡流砂量式<sup>3)</sup>を用い、式(1)のように定義した。

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 17 \cdot \beta \cdot \tau_{*e}^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (1)$$

ここで、 $q_B$ : 単位幅流砂量、 $s$ :粒子の比重、 $\tau_{*e}$ :有効無次元せん断力、 $\tau_*$ :無次元せん断力、 $\tau_{*c}$ :無次元限界せん断力である。

今回の計算では、河床波の影響を検討するため、以下の二つの方法でパラメーター $\beta$ を検討した。Method 1では、 $\tau_{*e}$ は $\tau_*$ と等しいとした。すなわち、 $\beta$ は河床全抵抗が土砂輸送に有効に働くとした場合に対する実際の流砂量の比を表す。Method 2では河床波がある場合の有効掃流力 $\tau_{*e}$ の式(2)を用いた。

$$\frac{U}{u_{*e}} = \frac{1}{\kappa} \log \frac{h}{d(1+2\tau_*)} - \frac{1}{\kappa} + A_r \quad (2)$$

ここで、 $U$ :平均流速、 $u_{*e}$ :有効無次元摩擦速度、 $\kappa$ :カルマン定数、 $h$ :水深、 $\tau_*$ :無次元せん断力、 $A_r$ :粗面の定数である。

Method 2の $\beta$ は砂粒表面抵抗に対する抵抗増分のすべてが河床波によるものと考えた場合の流砂量と実際の比を表すと考えることができる。表-3にMethod 1とMethod 2のパラメーター $\alpha$ 、 $\beta$ の計算結果を示す。 $\alpha$ は明らかに蛇行の方が大きいため、水路蛇行がせん断力を増加させており、蛇行は直線に比べて通水能力が小さいことを示している。Method 1では、せん断力が全て土砂輸送に使われていると仮定して $\beta$ を用いて流砂量であるため、蛇行は直線に比べて $\beta$ が小さいことは

全水路抵抗の流砂量に対する寄与が小さいことを表している。即ち、蛇行流路の抵抗増は二次流による鉛直方向の運動量輸送によるものより大きいと言える。実際、 $\alpha$ の直線と蛇行の比は平坦河床で検討された著者らの研究の場合<sup>2)</sup>に比べてはるかに大きい。

表-3 パラメーター $\alpha$ 、 $\beta$ の計算結果

	$\alpha$	$\beta$ (Method 1)	$\beta$ (Method 2)
直線	7.6	0.043	0.71
蛇行	61	0.027	1.11

一方、Method 2では蛇行は直線に比べて $\beta$ が大きくなった。これは蛇行によって増加した抵抗が全て河床波によるものであると仮定するよりも流砂量が多いことを示している。このことから、蛇行によって増加した抵抗の一部が土砂輸送に使われていると考えることができる。したがって、二次流による鉛直方向の運動量輸送は土砂輸送を増加させるが、河床波も発達させる結果、全体の水路抵抗が大きくなったと考えられる。即ち、二次流による運動量輸送の一部が河床波の形成そのものに使われた可能性が考えられる。

## 5. 結論

今回の実験結果では、移動床蛇行水路では二次流による鉛直方向の運動量輸送に加えて河床波を発達させるため、直線水路に比した時の流れの抵抗は、平坦河床の場合よりもかなり大きくなるが示された。一次的評価では抵抗増分の一部は土砂輸送そのものに寄与していることが考えられたが、通砂能力を明らかにするためには河床波によるせん断力や土砂移動経路への影響を詳細な流れ構造について数値解析を用いてさらに検討していく必要がある。

## 参考文献

- 1) Uchida, T. and Fukuoka, S.: Numerical calculation for bed variation in compound-meandering channel using depth integrated model without assumption of shallow water flow, *Advances in Water Resources*, Vol. 72, pp. 45-56, (2014).
- 2) Lugina, F.P., Uchida, T. and Hatono, M.: Effect of channel meander on flow resistance, *Proceedings of Hydraulic Engineering*, Vol.77, pp.865-870, (2021).
- 3) 水理公式集 2018年度版,土木学会,pp.289, (2019).