

徳島大学工学部 正 員 岡部 健士

徳島大学大学院 学生員 〇藤原 禎史

1. まえがき

山地河川の不安定土砂層に形成される浸食流路の発達過程には、土砂流送が選別的であることの影響が顕著に現れる。たとえば、振幅に伴って側岸付近の河床は急速に粗粒化するため、側方浸食よりも縦浸食が卓越し、洪水履歴によっては数段の段丘の形成をみることもある。このような浸食流路の挙動は流出土砂量の重要な支配因子であるが、その予測に関する知見は十分でない。そこで筆者らは、選別流送状態で発達する浸食流路の研究の第一歩として、細・粗二粒径混合砂礫層を用いた基礎的水理実験を行った。得られた資料をもとに、一次元的予測法の基礎となる流床断面形の相似性および斜面上流砂量式の問題について二、三の検討を加えた。

2. 実験方法および結果

(1) 実験方法： 実験には、長さ14.6 m、幅0.6 m、勾配1/300の長方形断面水路を用いた。本水路の中間部約5 mの区間を試験区間とし、ここに平均粒径が0.6 mmのほぼ均一な細砂と平均粒径が7.1 mmのほぼ均一な小礫からなる二粒径混合砂礫層モデルを作った。小礫の混入割合は表-1に示すように、0%、20%、10%、5%の4種に変化させた。

表-1 実験条件

実験番号	小1きの混入割合 (%)	計測時間 (sec)						
CASE-1	0	630	1230	2130	3330	5130	7530	18330
CASE-2	20	600	1200	2100	—	5100	—	20100
CASE-3	10	600	1200	2100	—	5100	—	19500
CASE-4	5	600	1200	2100	—	5100	—	19500

実験では、まず、砂礫層モデルの中心線に沿って幅20 cm、深さ5 cm程度の溝を掘って初期流路とした。ついで、モデル全体を一旦静水に浸潤させたのち、定常流量1.52 l/sを通水し、その後の流路変動の観察と適当な時間間隔での水面形や流路形状の計測を行った。なお、全実験ケースを通じて、流路の上下流端の流路幅は合板製の鉛直壁で20 cmに固定した。また、下流端では河床高もほぼ一定に保った。

(2) 流路の変動状況と砂礫の挙動： 本実験では、振幅の卓越する流路の変動過程が観測された。全ケース共通して、流路の振幅は下流側ほど速く進み、このために流路の平面形状は下流端付近の一部を除いて、いわゆる「末広がり」の様相を呈した。河床高さは実験開始直後に下流部でかなり上昇したが、通水時間の後半には元の高さ近くまで低下した。小礫の混入割合は、流路の振幅速度に著しい影響を及ぼした。小礫のほとんどは側岸直下に残留し、遮蔽効果を発揮するので、わずかの量の混入が振幅速度をかなり低下させた。

(3) 横断形状の相似性： 流路変動の一次元解析では、流れの横断形状の相似性を仮定する必要がある。この点について平野¹⁾は一様砂層の浸食流路では、(水深/水理水深)と、(横断方向座標値/水路幅)との関係の相似性を指摘している。しかし、本実験に関しては、図-1に示すように池田²⁾の式、(1)、(2)式の方が上述のものより妥当であった。一方、混合砂礫層の場合にも $E/\Delta \sim h/H$ 関係の相似性が認められるが、(1)式の適合性は少し悪くなる。

3. 斜面上流砂量式

(1) 理論的考察： 図-2は、横断方向に θ 傾いた斜面河床上を速度 u_b で移動する粒子群の力学的模式図である。ここに、 x, y 軸：それぞれ主流方向、横断方向の座標軸、 d ：粒径、 τ_{0q} ：砂粒運動に有効な流体剪断応力、 τ ：単位面積当りの流砂容積、 W ：容積 τ の粒子群の水中重量、 R ：移動粒子群に作用する摩擦抵抗応力、 γ ：粒子群の移動方向と

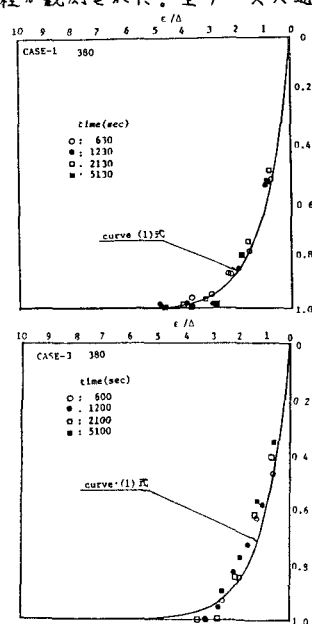


図-1 相似性の検討

α軸のなす角度である。

さて、芦田・道上³⁾の理論に従うと、 τ_{0q} は見かけの流体剪断力 τ_0 、粒子の移動限界応力 τ_{cs} および係数 K を用いて、(4)式のように表される。一方、 R は粒子群と河床の間の摩擦抵抗係数 μ_R および W 、 θ を用いて(4)式のように表される。さらに、粒子群には P 軸方向に $W \sin \theta$ の力が作用しているから、粒子群に関する力の釣り合い式は結局(5)式のように書かれ、これから V を求めると(6)式のような式となる。つぎに、移動速度 U_g について考える。粒子群中では個々の粒子が必ずしも定常速度に達していないが、簡単のためにこの点を無視すると、 U_g の表示として平野の式(7)式を利用することができる。ここに、 μ_s および μ_k ：各粒子の静止および動摩擦係数、 U_k ：各粒子に作用する流体力の代表速度で、 τ_0 より定まる摩擦速度 U_* と流速係数 q_d の積(= $q_d U_k$)、 τ_{cs} ：水平床の無次元限界掃流力。

x 方向の単位幅流砂量 q_B は、 V と U_g の積であって、(6)および(7)式に基づく、つぎのように表示される。すなわち、

$$\Phi_B \equiv \frac{q_B}{\sqrt{s g d^3}} = q_d \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{cs} \cos \theta}{\tau_*} \frac{\mu_k}{\mu_s}} \right) \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{cs} \cos \theta}{\tau_*} \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\mu_s} \right)^2} \right) \frac{1}{\cos \theta \sqrt{\frac{\mu_k}{\mu_s} - \left(\frac{\tan \theta}{\mu_s} \right)^2} \mu_s} \quad (8)$$

ただし、(4)式の誘導においては、斜面上の無次元限界掃流力 τ_{cs} に対する Lane-Carlson 式(9)式および $\mu_R = \sqrt{\mu_s \mu_k}$ の仮定を用いている。なお、(8)式において、 s ：砂の水中比重、 g ：重力の加速度である。

(2)実験結果に基づく検討： 図-3に(8)式を用いて計算された(Φ_B ~ τ_{*})関係曲線を示している。ただし、諸係数の値はそれぞれ $q_d = 8.5$ 、 $\mu_k = 0.5$ 、 $\mu_s = 1$ 、 $\tau_{cs} = 0.045$ としている。図-3には、平野の半経験式 $q_B / \mu_k d = (3.4 / \cos \theta) \sqrt{\tau_{cs} / \tau_*} (\tau_* - \tau_{cs}) \dots (10)$ 、の特性曲線を示すとともに、今回行った実験の計測資料から求められた(Φ_B ~ τ_{*})関係も点描している。さて、(8)式と(10)式を比較すると、Φ_Bの値に対する応答性が両者の間でかなり相違していることがわかる。無論、この時点ではいずれが妥当かを判断し難いが、水平床での流砂量特性への連続性を考えると、(8)式の方が妥当ではないかと思われる。つぎに、実験値との対応関係について述べる。両式と対比できる描点は CASE-1 のものであるが、○の描点群は計算曲線の少し右側に分布している。ただし、τ_{*}の実験値は流水断面形と水面勾配から求められた瀬上平均値であって、側岸近くではこれより小さい値になっていると考える必要があり、このような観点から見ると、(8)式はある程度の適合性を有するものと言える。一方、CASE 2~4の実験値は小礫の河床支配面積率をパラメータにして示されている。描点は、河床支配面積率の大きさの範囲ごとに1つのまとまった傾向を示し、面積率が大きいほど同一の無次元掃流力に対する流砂量は著しく減少している。流砂量の減少率は面積率と比例しておらず、小礫によって有効掃流力自体の低下が生じているようである。

- [参考文献] 1) 平野宗夫：振幅を伴う流路変動について、土木学会論文報告集，第210号，1973，pp.13~20
2) S. Ikeda: SELF-FORMED STRAIGHT CHANNELS IN SANDY BEDS, Jour. of ASCE, Vol. 107, No. HY4, pp.396~397.
3) 芦田和男・道上正規：移動床流の抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，1972，pp.59~70。

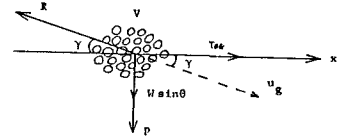


図-2 粒子群の模式図

$$h/H = 1 - \exp[-5/d] \quad (1)$$

$$d \equiv \frac{1}{H} \int_0^H (H-h) d\xi \quad (2)$$

$$\tau_{0q} = \tau_0 - K \tau_{cs} \quad (3)$$

$$R = \mu_R \cdot W \cos \theta \quad (4)$$

$$R^2 = (W \sin \theta)^2 + (\tau_0 - K \tau_{cs})^2 \quad (5)$$

$$V = d \frac{\tau_* - K \tau_{cs}}{\cos \theta \{ \mu_k^2 - \tan^2 \theta \}^{1/2}} \quad (6)$$

$$U_g/U_k = 1 - \sqrt{(\tau_{cs} \cos \theta / \tau_*) (\mu_k / \mu_s)} \quad (7)$$

$$\tau_{cs} = \tau_{cs} \cos \theta \sqrt{1 - \tan^2 \theta / \mu_s^2} \quad (9)$$

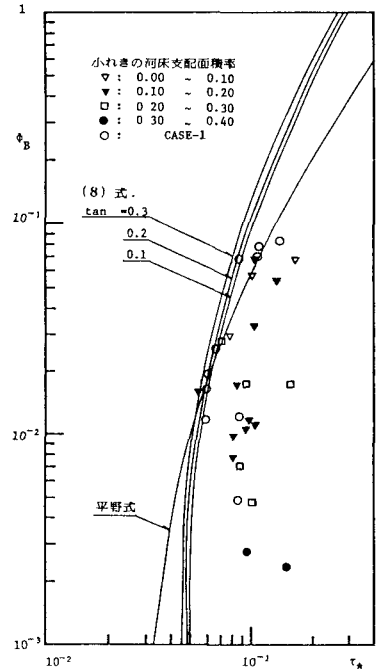


図-3 流砂量式の検討図