

II-200 一様湾曲流路の Sorting

埼玉大学 正員 山坂 昌成
 埼玉大学 正員 池田 駿介
 東京電力 正員 千代田将明

1. はじめに 河道湾曲部における河床表層粒度の横断的な分級現象 (Sorting) は古くより知られており、これを理論的に説明しようとする研究^{1), 2), 3)}がいくつかなされているが、その機構を力学的に十分な形で定式化しているとは言い難い。本研究では、一様湾曲流路における Sorting の機構を明らかにし、これにもとづいて、粒度の平衡横断分布および平衡横断河床形状を理論的に求め、外岸河床洗掘抑制に及ぼす混合粒度の効果を定量的に明らかにする。

2. 底面二次流の分布と Sorting の機構 一様湾曲流路における二次流の分布は、移流項および微小粘性項を無視した横断面内の渦度方程式を適当な境界条件のもとに解くことにより得られ、底面流向 $\tan \delta$ は以下のように表される⁴⁾。

$$\tan \delta = \frac{\bar{u}}{u_0} \frac{1}{A_r \sqrt{C_r}} \frac{h}{r} \left\{ -4.17 + 2.64 \frac{\sqrt{C_r}}{\alpha} \right\} \dots (1)$$

ここに、 \bar{u} は鉛直平均主流速、 u_0 はその流路中心での値、 A_r は対数分布式における定数(=8.5)、 C_r は摩擦係数、 α はカルマン定数(=0.4)、 h は水深、 r は流路の曲率半径である。 $\tan \delta$ は外岸向きを正に取っており、これが負となることから、外岸で洗掘された土砂が内岸に堆積することが定性的に説明される。これを定量化するためには、横断方向流砂量式が必要となる。

二次流が存在する横断斜面上の一様粒径砂の横断方向流砂量式は、以下のように表される^{4), 5)}。

$$\frac{q_r}{q_s} = \tan \delta + \frac{1 + \alpha \mu}{\lambda \mu} \sqrt{\frac{\tau_* \cdot c}{\tau_*}} \frac{dh}{dr} \dots (2)$$

両側岸で横断方向流砂量がゼロという境界条件を考慮すると平衡状態における流砂の連続式は $q_r = 0$ となり、一様砂の場合には、これと(1)、(2)式より平衡横断形状が求まる。

ここで、一様砂(粒径 D_0)で平衡状態にある河床上に異なる粒径 D の砂を薄く敷きつめた場合の砂の運動を考える。このとき、(2)式における $\tan \delta$ 、 τ_* はほとんど変化しないと考えられるため、粒径 D_0 の時の平衡形状を用いて、(2)式は

$$q_r/q_s = (1 - \sqrt{D/D_0}) \tan \delta \dots (3)$$

と変形され、 $\tan \delta$ が負であるため、粒径の大きな砂は外岸に、小さな砂は内岸に輸送されることになる。次に、平衡状態を考える。混合砂床における平衡状態は、河床高が時間的に変化しないばかりでなく、表層粒度の分布も時間的に変化しないことを意味する。このとき流砂の連続式は $q_{r,i} = 0$ となる。すなわち、どの粒径の砂も横断方向には輸送されない状態となる。(2)式において、 $\tan \delta$ 、 dh/dr はある地点で1つの値しかとれないため、もしその地点の表層粒度が混合状態であれば、各粒径ごとに砂の移動方向が異なることになり、平衡状態が満足されない。言い換えれば、ある地点の表層砂が混合状態ではなく、それぞれの地点で異なる粒径をもつ一様砂となるまで Sorting が継続し、最終的に平衡状態に至る。

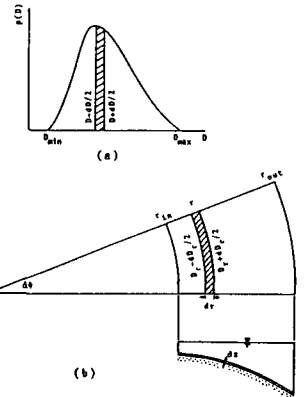


図-1 表面粒度の確率密度と粒度の横断分布の関係

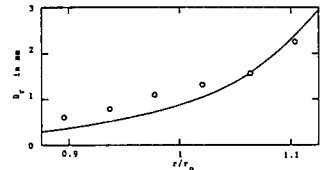


図-2 粒度の横断分布

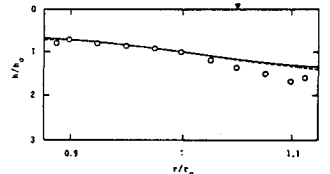


図-3 平衡横断形状

3. 表層粒度の横断分布と平衡河床形状 前節の考察により、平衡状態における粒度は、それぞれの地点では一様で、かつ外岸に向かって粗くなることが明らかとなった。このため、全表層粒度の分布が与えられれば、粒度の横断分布を求めることが可能となる。図-1(a)は全表層粒度の存在確率密度関数を示し、同図中の斜線部の面積が同図(b)の斜線部と白ぬき扇形部分の面積比に等しくならなければならないことより、曲率半径 r 地点の表層粒径 D_r は、

$$p(D_r) |dD_r| = \frac{r \sqrt{1+(dh/dr)^2} |dr|}{\int_{r_{in}}^{r_{out}} r \sqrt{1+(dh/dr)^2} dr} \dots\dots (4)$$

を満足しなければならない。 $dD_r/dr > 0$ より、上式の絶対値記号は削除でき、また微小の $(dh/dr)^2$ 項を無視すると、粒度の横断分布は近似的に

$$\int_{D_{min}}^{D_r} p(D) dD = (r^2 - r_{in}^2) / (r_{out}^2 - r_{in}^2) \dots\dots (5)$$

により算定される。

一様湾曲流路の動的Sortingはそれぞれの地点で粒度が一様となるまで継続することから、平衡横断形状の算定には(2)式を用いることができる。(1)式における主流速の横断分布を側岸補正(補正関数 f)した強制渦型で与えることにすると、流砂の連続式を考慮して、平衡横断形状は次式で与えられる。

$$\frac{dh}{dr} = f^2 \frac{h}{r_0} \frac{r}{r_0} \left\{ \frac{0.23}{\sqrt{C_r}} - 0.36 \right\} \sqrt{\frac{\tau_{*o} D_0}{\tau_{*cr} D_r}} \dots\dots (6)$$

ここに、 τ_{*cr} は粒径 D_r の砂の無次元限界掃流力であり、添え字の o は流路中心の諸量であることを示す。また、文献4)に従い、 $\lambda=0.59$, $\mu=0.43$, $\alpha=0.85$ を与えた。

4. 実験データおよび実河川データとの比較 図-2,3は、中心曲率半径 $r_0=120\text{cm}$ 、中央水深 $h_0=4.38\text{cm}$ の室内実験で得られた粒度の横断分布と横断河床形状を理論曲線と比較して示す。粒度の分布は実測値の方が全体的にやや大きい、理論では初期粒度分布を用いているのに対して、実験では全表層粒度の粗粒化(中央粒径が 0.95mm から 1.25mm に変化)が生じたことによる。図-3の破線は、中央粒径と同一の粒径をもつ一様砂と仮定して計算した結果であるが、実線と比較すると、混合砂では大粒径砂が外岸の表層を覆うSortingの機構により、外岸の洗掘が抑制されることが明らかである。ただし、本実験のような小規模実験では、粒度の分布幅をあまり広く取れないため、その効果はそれほど顕著ではない。横断河床形状の外岸域における理論曲線と実測値の不一致は、外岸に深掘れをもつ一方向性の砂州が形成された影響によると思われる。

次に、粒度の分布幅が広い実河川データと理論の比較を行う。図-4,5は Jackson⁶⁾により測定されたWabash川の粒度横断分布と横断河床形状を理論曲線と比較して示す。両者とも実測値と理論との対応が良い。図-5の点線は、一様砂として計算した結果であるが、これらより、外岸洗掘抑制に及ぼす混合の効果は大きく、平衡形状を精度良く算定するにあたっては、混合粒度の効果の考慮が不可欠であると言える。

5. まとめ 一様湾曲流路では横断方向のSortingにより、各地点では粒度が一様でかつ、粒度が順序良く外岸に向かって粗くなるように再配列される。この機構を考慮した本理論は、粒度の平衡横断分布、平衡横断形状の実測値を比較的精度良く説明できる。

(文献) 1) Allen, J. R. L., Geol. J., 1970. 2) Bridge, J. S., Sedimentology, 1976. 3) Odgaard, A. R., ASCE, HY11, 1982. 4) Ikeda, S. and T. Nishimura, ASCE, HY11, 1985. 5) Parker, G., ASCE, HY2, 1984. 6) Jackson, R. G., Proc. International Symposium on Unsteady Flow in Open Channels, 1976.

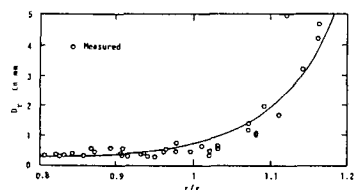


図-4 粒度の横断分布 (wabash II)

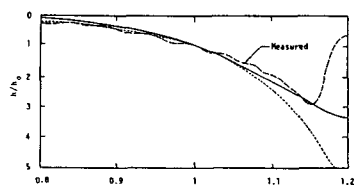


図-5 平衡横断形状 (wabash II)