

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男

大学院 学生員 ○ 田中 健二

まえがき 著者らは、裸地斜面からの流出土砂量を予測することを目的として、粘着性物質を含有する流路床の侵食機構について研究を進めているが、¹⁾実験や調査から、流路は様々な変動をしつつ、その水量に合ったある種の安定横断面を形成することが見出されてきた。²⁾これは、側方侵食性流路の基本量である流路幅を支配する機構として注目される。本報告は、流路横断面内の掃流力分布や、それと流路壁面の侵食速度との関係などにいくつかのモデル化を行なって、このような安定横断面の形成過程を理論的に論じようとするものである。

1. 粘着性河床の侵食特性³⁾ 粘着性河床における侵食現象の大きな特色は、土砂粒子が剥離しにくいために、たとえ侵食が進行していても、河床底がそれほど長くなければ、流水のもつ土砂輸送能力に達するだけの土砂が河床から供給されないことである。このため、土砂輸送能力(あるいは掃流力)の流下方向への増減にかかわらず、その地点の土砂剥離能力(あるいは掃流力)に応じた侵食が生じ、一旦流水にとりこまれた土砂は、堆積することなく流下する。壁面の侵食速度 E (壁面に直角方向の後退速度)と床底速度 u_b の間の定量的な関係は土質によって異なるが、定性的には正の相関をもっており、ある掃流力(限界掃流力)の近傍で侵食速度が急変する。また、粘土の種類によって侵食形態が異なるため、粘着性河床一般の特性であるか否かは検討を要するが、たとえばベントナイトを含有する砂河床では、掃流力が大きい範囲で、 E が u_b に比例する。

2. 流路横断面内の掃流力分布⁴⁾ 時間平均流向を含む面に作用するせん断力を $\tau = \rho E \, du/dn$ (ρ は流体の密度、 E は渦動粘性係数、 du/dn は流速の、その面に垂直方向への勾配)とすれば、 E が有限値をとる限り、そのような面のうち等流速面に直交するものでは $\tau = 0$ となる。砂れき床の河床変動は壁面その流向に沿った掃流力の変化率に支配され、二次流の存在や、不等流の効果が本質的となるが、粘着性河床の侵食は掃流力の値そのものに支配されるので、二次流を省略した等流近似が許され、等流速線の法線と水面と壁面とで囲まれた柱体(断面積 A 、断面 S)に作用する力のつり合いから、図-1を参照して、

$$\tau_0 = \rho g (dA/ds) I \quad (\tau_0: \text{掃流力}, I: \text{勾配}) \quad (1)$$

となる。等流速線を壁面からの等距離線と近似し、さらにその直截線を壁面にたてた法線と近似して、図-1の記号を用いれば、 $dY/dX \geq 0$ の範囲で、

$$\tau_0 / \rho g h I = \begin{cases} [1 + (dY/dX)^2 - \frac{1}{2} d^2Y/dX^2 (1-Y)] (1-Y) / \sqrt{1 + (dY/dX)^2} & \cdots \cdots (1-Y \leq X \frac{dY}{dX}) \\ [1 + (dY/dX)^2 - \frac{1}{2} d^2Y/dX^2 X dY/dX] X dY/dX / \sqrt{1 + (dY/dX)^2} & \cdots \cdots (0 \leq X \frac{dY}{dX}) \end{cases} \quad (2)$$

となる。 dY/dX 、 d^2Y/dX^2 がともに小さい場合には $\tau_0 / \rho g h I \approx 1-Y$ となり、従来よく用いられている掃流力の分布式に一致するから、式(1)はこれに壁面の傾きと曲率を導入して拡張したもののため、法線方向が断面内で変化する場合には若干の修正を要するが、たとえば B/h が約3の内訳断面では式(2)の精度はかなりよい。

3. 平衡横断面形状 流路壁面が法線方向に後退しながら、全体として同じ形状を維持する条件は、図-2より、

$$E / \cos \theta = \text{const.} \quad (\theta = 0 \text{ における侵食速度}) \quad (3)$$

である。 E が τ_0 の関数で、かつ τ_0 の分布が横断面形状により決まるものとすれば、式(3)は横断面形状に対する条件式にはかならず、たとえば E が u_b に比例し、 τ_0 が式(1)で表わされる場合にはつぎのようになる。

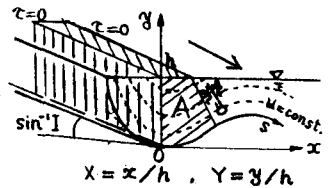


図-1 掃流力分布のモデル化

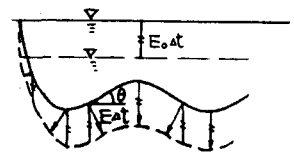


図-2 平衡条件

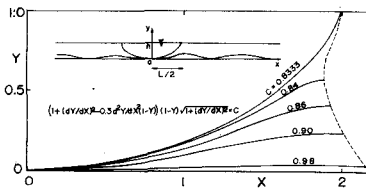


図-3 平衡横断面

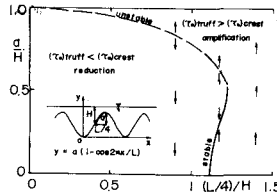


図-4 安定条件

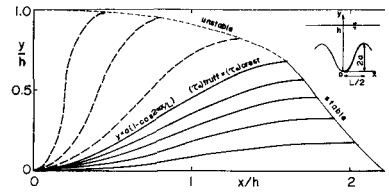


図-5 平衡断面の近似

$$C = \begin{cases} [1 + (dy/dx)^2 - \frac{1}{2} d^2y/dx^2 (1-Y)] (1-Y) \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \dots (1-Y \leq X \frac{L}{4}) \\ [1 + (dy/dx)^2 - \frac{1}{2} d^2y/dx^2 X dx/dY] X dx/dY \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \dots (X \geq \frac{L}{4}) \end{cases} \quad X=0 \text{ 時 } Y=0, \frac{dy}{dx}=0 \quad (4)$$

Cは最源部の掃洗力と $\rho g h I$ との比で、0から1の値をとり得るが、 $C < 0.8333$ の範囲では式(4)の解はなく、図-3に示すように $C \approx 0.8333$ のときにのみ閉じた平衡断面(水面幅・最大水深比 $B/L \approx 4$)を形成し、 $C > 0.8333$ では波状(リルと考えられる)となり、水際が現れなくなる。

4. シートフローからリルへの移行 平衡と安定とは別の概念であって、たとえばシートフローは明らかに平衡条件を満たしているが、ある種の擾乱を与えるとそれが変遷して流路の分裂が生じるという意味では不安定である。そこで、底面の横断方向の擾乱を正弦波で近似し、峰と谷の部分の掃洗力の大小関係を表式(4)により比較し、擾乱の盛衰を区別した(図-4)。定形後も正弦波で、平均水深 H と波長 L が変わらないものとするれば、 $L/H < 4.4$ の擾乱は波高がそれほど大きくない限り消滅し、逆に $L/H > 4.9$ の擾乱はいかなる波高においても発達して流路を分裂させる。 $4.4 < L/H < 4.9$ の擾乱は波高がそれほど大きければ成長するが、そうでない場合には、安定な波高に収束する。図-5は峰と谷の掃洗力が等しくなる正弦波の形状を示したもので、図-3の平衡断面と一致していないが、安定領域において比較的類似しており、このような安定条件の判定法が近似的には正しいものと考えられる。擾乱が単一の正弦波でない場合にどのような変形が生じるかは明確でないが、水面幅・波長比 B/L が整数かつ $L/H > 4.9$ を満たす最小波長の擾乱が卓越するものとするれば、流路の分裂条件は水面幅・平均水深比 B/H が9.8以上となる。

5. 流路横断面の変動と安定形状 断面形が平衡条件を満たしているければ、侵食によって変形が速く、その過程で安定な平衡断面に近づけば、やがてそれに収束していくはずである。図-6は様々な初期断面を与え、式(1)および $E/U_* = \text{const.}$ の仮定に基づいてその変形過程を模擬したもので、初期の水面幅・水深比が法範囲に変化しているにもかかわらず、いずれも図-3の $C = 0.8333$ の解に近づき、しかもその水面幅・最大水深比が実観値(約4)²¹⁾に近くなっていることから、動的安定断面がある程度現流域に得られたことになる。

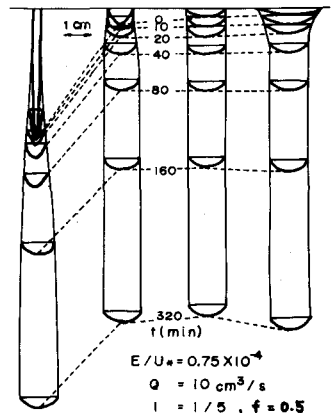


図-6 安定断面の形成

おわりに 以上、任意の断面形状における掃洗力分布のモデル化を基に、粘着性河床上のシートフローは不安定で水深の数倍程度の谷間隔をもつ流路に分裂することを示し、また侵食速度が摩擦速度に比例する場合には、水理量や土質にかかわらず、個々の流路の水面幅・水深比が約4になることを見出した。しかしながら以上の議論はいずれも等流状態が前提となっており、蛇行による流路の合流・分流¹²⁾²¹⁾や、それによる谷間隔の増大などは含まれていない。また、侵食速度と摩擦速度の両方が変化すれば平衡断面の式も変化するから、実際の平衡断面は水理量や土の侵食性依存する可能性もある。したがって今後、二次流や級断方向の河床波も含めた三次元的な流れの特性を検討するとともに、土の粒径による侵食特性の相違を把握していくことが重要である。

- 参考文献 1) 芦田・田中坪香: 裸地斜面における流路の形成過程に関する研究, 内田文部年報, 昭49.
2) 芦田・田中: 同(Ⅱ), 同, 昭50.
3) 芦田・田中: 粘土分を含有する砂ホキ床の侵食と流路形成に関する研究, 京大防災研年報, 昭49.