

京都大学防災研究所 正会員 芦田 和 男

〇澤井健二

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、侵食による流路の形成過程を研究しているが、粘着性材料からなる急勾配の流路には、階段状の縦断形状の現れることが多く、流出特性に大きな影響を及ぼしている。本研究は、野外調査ならびに水路実験にもとづいて、その形状特性を抽出するとともに、その発生原因を、擾乱に対する流路の不安定性に求めて、砂れき床と対比しながら線形安定解析を行ない、粘着性流路の特徴について考察するものである。

1. 宅造地法面における侵食流路形態¹⁾ 写真-1は、勾配1割5分(約34°)の宅造地法面に発生したリルの一例で、縦・横断ならびに平面形状ともかなり複雑であるが、ことに縦断形状が階段状になっているのは、急勾配移動床の特質として興味深い。このような段差が生じる原因のひとつとして、巨れきの存在や土質の不均一が考えられ、実測資料の中には、確かに硬層の部分が侵食されずに残ったり、浸透性の大きい土砂が介在していて、流路が途中で消滅したりしている例もあるが、そのような顕著な材質の不均一性がない場合でも、縦断形状が階段状になっていることが少なくない。凹凸の規模は侵食の進行程度によって異なるが、京都市洛西ニュータウンにおける測定例(50年6月10日施工、同年7月29日測定)では、波高・波長比が約0.2、波長・流路幅比が約8となっている。なお、水深は数mm以下であり、波高や波長にくらべてはるかに小さい。

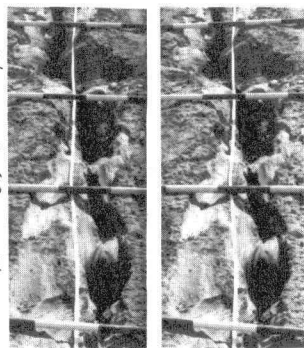


写真-1 侵食流路形態。
(立体写真)

2. 粘着性材料を用いた斜面侵食実験 図-1は、上に述べたような材質の不均一性の影響を除去するため、人工的に充分混合した材料を用いた水路実験における、流路縦断形状である。初期状態は、水路中央に幅1 cmの長方形断面をもつ平坦直線流路を刻んだもので、時間の経過とともに、横断面は放物線状、平面形状は弱い蛇行を示すようになり、縦断方向の凹凸にともなって流路幅も変動している。しかしその変形速度は、ある段階を過ぎるとかなり遅くなり、近似的には一種の平衡状態（流路形状を変えずに侵食が進行する状態）を形成するようである。このようにして得られる平衡状態は、長期的にはその構造が変化する可能性があるが、短期的には実際斜面にも見られるように、ある範囲に分布する統計的な構造をもっており、安定な平衡状態にあるものと思われる。

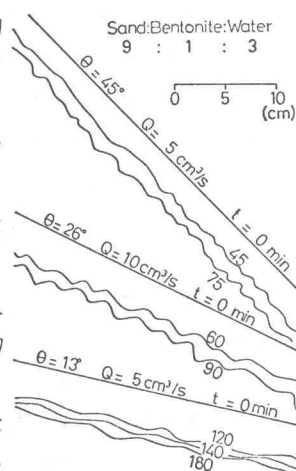


図-1 縦断形状の時間変化

ところで、侵食が進行している以上、水平と鉛直の座標軸から見れば、凹凸が上流側へ後退しながら低下するのは当然であるが、図-1によれば、流路に沿った座標軸から見ても、凹凸は上流方向に移動している。

写真-2は、この実験における流路の平面形状の影響を除去し、また、侵食時における流れの状況を観察するために、アクリル製の側壁をもつ1cm幅の水路(全長1m)全幅に通水したものである。通水初期の底面は平坦で、水深4.5mm、フルード数3.2の射流であるが、凹凸が発達すると湛水部が生じ、跳水によるエネルギー減殺効果が現れる。このように、侵食流路形態を強制的に2次元的なものに制約しても、その縦断形状特性は、実際の斜面や、先の実験にみられるような、流路幅の拡大・縮小ならびに穿入蛇行をともなう場合のものとはよく類似しており、斜面侵食にかかわる水理条件のもとでは、階段状の縦断形が現れて、形状損失による流水抵抗が著

しく増大し、全掃流力のうち侵食に寄与する部分の割合は小さくなる。

図-2はこれと対照的に、常流状態で行った侵食実験の結果であり、少なくとも半時間以内には、目立った凹凸が生じていない。このような場合には、侵食速度は全掃流力（すなわち全摩擦速度）に対応し、両者は正の相関をもつ。

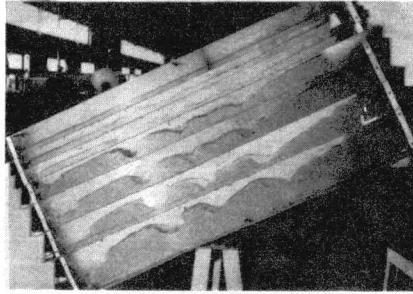


写真-2 $\theta=26^\circ$, $g=30\text{ cm}^2/\text{s}$, $t=0\sim 90\text{ 分}$
(上から15分毎)

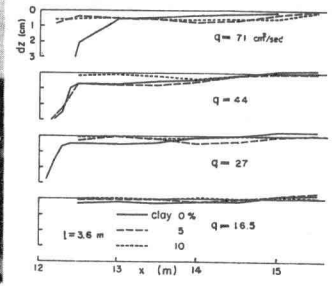
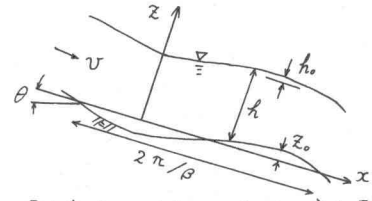


図-2 勾配 $1/100$ (上流左側固定床)

3. 流路縦断形状の線形安定解析

流砂の連続式を、 $\partial z/\partial t = -E + D = -(\partial g_T/\partial x)/(1-\lambda)$ (1) と書くとき、侵食量 E はその場所の水理量に対応するが、堆積量 D はそれよりも若干上流の水理量に対応し、かつ、堆積量 D と流砂量 g_T の間に良い対応があるものと考えられる。そして、砂れき床においては、流下方向の水理量の変化に対応して河床の上昇または低下が生じ、等流状態では変動が生じないが、粘着性流路においては、粗粒による被覆がなければ、等流・不等流にかかわらず、その場所の水理量に対応して侵食が進行する。そこで、砂れき床では平衡状態からのずれが少ないことから、 g_T を水理量に対応させて解析するのが通例であるが、粘着性流路ではそれは不合理で、むしろ、 D を E にくらべて小さいものとして、河床変動 $\partial z/\partial t$ を直接に水理量と結びつけるのが妥当である。したがって、粘着性流路上の2次元漸変流を表わす方程式系は、

$$\begin{aligned} \partial z/\partial t &= -E, & E &= f_n(u_*) \\ \partial h/\partial x &= i - \partial/\partial x (v^2/2g) - u_*^2/gR, & R &= h \\ i &= \sin\theta - \partial z/\partial x \cos\theta \\ v h &= g(\text{const.}) & \text{i.e.} & v = g/h = f_n(h) \\ u_* &= (1 - \alpha \partial h/\partial x) v/\varphi = f_n(h, h_x), & h_x &\equiv \partial h/\partial x \end{aligned}$$



となる。各量を平均量と変動量に分け、変動量が微小であるとして高次の項を省略し、さらにそれらの変動量が $a' = \text{Real} [a_0 \exp\{(\gamma_1 + i\gamma_2)t + i\beta(x - \delta_a)\}]$ と表わされるものとすれば、増幅率および伝播速度は、

$$\gamma_1 = dE/du_* \{ \partial u_*/\partial h (1 - Fr^2) + \partial u_*/\partial h_x Fr^2/\varphi h \} \beta^2/\Delta \quad (2)$$

$$C = -\gamma_2/\beta = dE/du_* \{ \partial u_*/\partial h (u_* - 2h \partial u_*/\partial h) - \partial u_*/\partial h_x (1 - Fr^2 + 2u_*/gh \partial u_*/\partial h_x) \} \beta/\Delta \quad (3)$$

となる。ここに、 $Fr = v/\sqrt{gh}$ 、 $\Delta = \{u_*/gh \cdot (u_* - 2h \partial u_*/\partial h)\}^2 + \{(1 - Fr^2 + 2u_*/gh \partial u_*/\partial h_x) \beta\}^2$ である。

擾乱が発達する条件は $\gamma_1 > 0$ であるが、粘着性流路では一般に E と u_* が正の相関をもつから、式(2)よりその条件は波長によらず、 $Fr > 1/\sqrt{1 - 1/\varphi h (\partial u_*/\partial h_x)/(\partial u_*/\partial h)}$ (4) となり、根号の中の第2項が1に比べて充分小さいので、結局、常流は安定、射流は不安定ということになる。また、式(4)が成り立つとき、式(3)は負となるから、擾乱は上流方向へ伝播する。これは、式(1)において g_T を u_* の増加関数としたとき、流れの状態によらず擾乱が減衰すること、すなわち、砂れき床では、流下方向スケールの大きな2次元凹凸は減衰することにくらべて、きわめて特徴的なことからである。

4. あとがき 以上、野外調査ならびに水路実験にもとづいて、粘着性流路の縦断面形状について考察し、凹凸の発生原因のひとつが、射流状態における底面の不安定性にあることを理論的に導いた。しかし、理論は2次元微小擾乱に対する線形解析にとどまっておき、凹凸の発達過程ならびに、平衡状態の存在やその形状については、さらに詳細な研究が必要である。

参考文献 芦田和男・澤井健二・藤田孝：宅造地法面における侵食流路形態，昭和51年度関西支部年議概要