

京都大学防災研究所 正員 天野勝正
大阪府立工業高等専門学校 正員 大同淳之

1 はしがき

さきに、著者は豪雨にともなう発生する土砂の異常流出は、通常の降雨では表面流の生じない勾配が 20° 内外の堆積の深い河道に多いことを述べた¹⁾。この領域では、土砂は水による掃流以外に斜面からの崩落あるいは上流からのほふくによって供給され、その勾配は水の掃流作用という河床より急である。このような斜面に豪雨によって表面流が生じたとき、斜面は新しい環境に適じた平衡状態に移ると考えられる。この移行の過程について実験を行い、従来の流砂現象とは違った様相を得たので、これについて考察を加えた。

2. 急傾斜水路における土砂の移動に関する実験

表1 実験に用いた砂と実験勾配の範囲

(1) 実験の方法		実験に用いた水路は、幅 25				
cm、高さ 45cm、長さ 3.5m と幅 7cm、高さ 30cm	長さ 3m のもので、上流端は金網を挿入して砂房内に水が	粒 径	A	B	C	D
一様に滲透できるように、下流端はふたが砂房内のひず	みと妨げないようスポンジを挿入し、水路床には砂とは	比 重	1.29	1.40	2.56	2.56
りつけて境界面の摩擦が砂房内のせん断応力より小さく	ならないようにした。実験に用いた砂の性質および実験	空 隙 率	45.6%	23.0	43.0	39.3
の水路勾配の範囲を表1に示す。実験は砂が完全に水で		水中安息角	33°23	-	33°	33°
		実験勾配	0.239	0.239	0.326	0.421
		$\tan \theta$	0.056			
		$\tan \alpha$	0.089	-	0.343	0.343

飽和の状態に表面流が生じたときと、砂の表面は湿潤状態であるが空隙は飽和していない状態で表面流が生じた場合について、定常および非定常流を対象に行なった。表面流の発生にともなう生ずる砂房表面および砂房内のひずみと側面からカメラで記録した。砂房の厚みは 10cm ~ 24.5cm の範囲である。

(2) 実験の結果 (a) 実験の範囲ではいずれも、砂房内の飽和、不飽和にかかわらず、表面流が生ずるまでは砂の移動はない。粘着力のない砂からなる斜面に滲透流があるときに、斜面が安定な限界勾配 α_c は、砂の水中単位重量 γ_b 、飽和単位重量 γ_s 、砂の内部摩擦角 ϕ とすると、

$$\tan \alpha_c = (\gamma_b / \gamma_s) \tan \phi \quad (1)$$

で表される。 α_c 以上の勾配でも水路下流端を閉鎖して、滲透流を河床面と平行に排水するときは、飽和になっても表面流が生ずるまでは土砂の移動はない。各砂の $\tan \alpha_c$ を表1の最下欄に示す。

(b) 表面流が生ずると掃流作用で土砂の移動がおこる。粒径程度の水深で砂の移動が始まるが、水は与えられた流量と河床の粒径に応じて、水路勾配に無関係に固有の勾配も形成する。勾配形成後の余分の砂を初期河床にはき出しそこに砂堆を作る。これは必ず水路の上流端から始まる。この砂堆の上流側では水深を増し、下流側では表面流が消失して砂堆の発達と延長し、一般の移動床にみられる砂堆の移動と同じように、砂堆の背面の砂はくりして前面に堆積し、砂堆と次第に下流へ移動させる。ただし水深は砂堆の背面で粒径の2~3倍で、砂堆の頂上で表面流は消失し、砂堆の下流側では表面流はない。このような砂堆が、3 m の水路を5~7秒程度で流下する。図1に砂堆の移動する様相を

1秒間隔に示す。図2は砂堆の頂点の高さの流下方向の変化を示す。東京のういくらのはなれと一定の割合で増加し、頂点が、水路勾配よりゆるいある勾配線にそって移動することを示す。図3は砂堆の頂点の位置の時間的变化を示す。図2の結果から到達時間は次第におおくなると予想されるのに対し、最終附近でむしろ早くなるのは実験装置による流量のおくれから、流量が一定でないためであろう。

この砂堆の発達する現象は、砂Aについては全勾配についてみられた。これに対し、C、D砂では $\tan\theta=0.326$ 以上の勾配でないと発生せず、これよりゆるい勾配では砂堆はできず、仮に人工的に与えても流れは砂堆をのりこえ掃流してしまう。またA砂とは同じ比重のB砂でも $\tan\theta=0.239$ 以下では発生していない。

(c) 非定常流で流量の総量が少くないとき、ある程度砂堆が発達すると表面流が全て透過して砂堆は移動と停止し、下流で再び同じ現象とくり返す。

(d) もう一つ注意すべき事として、A砂で砂堆の発達がある程度進むと、砂筋の深部にひずみが生じ、砂堆の発達に寄与する。ひずみの発生する領域は図4に示すように砂堆の法線から上流へ深部方向に発生するすべり面より上である。このすべり面は砂堆の移動とともに下流に動く。

要約して次のことが得られた。

3 実験結果の考察

この結果から、従来の流砂現象と比較してつぎのことが問題となる

- (i) ひずみの生ずる領域の限界とひずみによる流砂量
- (ii) 表面流によって砂堆のできる原因とその移動機構

(1) 砂筋内にひずみの生ずる限界とそれによる流砂量

ひずみの発生を求めるため、実験結果からひずみの発生、不発生を(1)式の $\tan\theta$ を基準にとって分類すると、水路勾配 θ が $\theta > \theta_c$ のとき ひずみの発生をみる。A砂では殆どどのケースが $\theta > \theta_c$ であって、 $\tan\theta=0.056$ でも砂堆の通過とともにひずみがみられる。一方D砂では明瞭なすべり面を形成せず、流れると形容される現象が $\tan\theta$

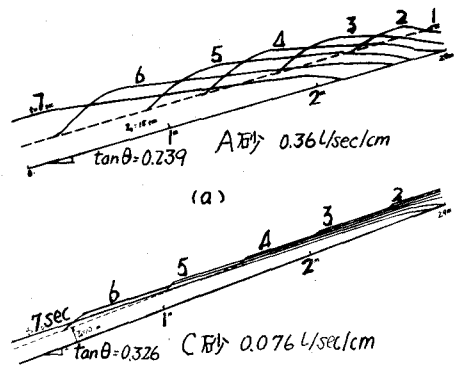


図1 砂堆の進行状況 (b)

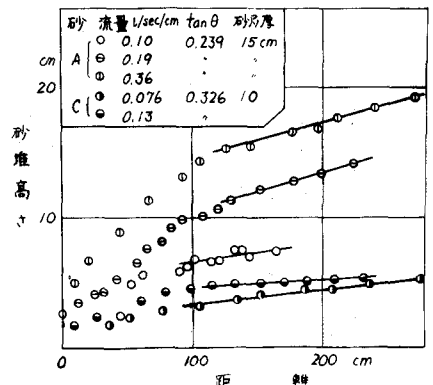


図2 砂堆の発達

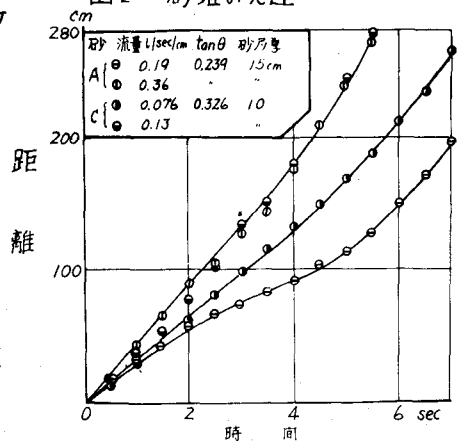


図3 砂堆の進行

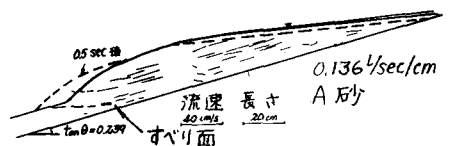


図4 砂筋内のひずみの1例

以上でみられる。D砂が不飽和のとき
 $\tan i_c = 0.65$ となるが、事実不飽和の
 場合は流動現象は生じない。したがっ
 てこの実験の範囲では、 i_c による判定
 と基準に用いることができる

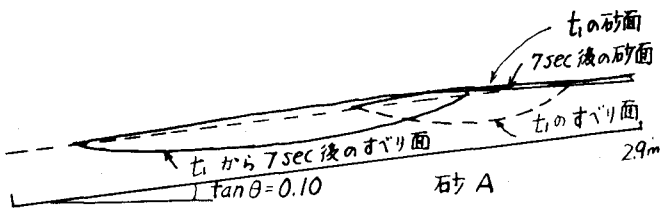


図5 すべり面の移動の一例

つぎにこのひずみによる流砂量であ

るが、図4に示すように急勾配では単位時間の移動量は砂堆の進行速度に匹敵し、実質的にも物質の移動が行われているので流砂量にかなり差があるとみることが出来る。ただ掃流による輸送量に対してどの位の割合かについてはまだ得ていない。ただ勾配がゆるいとき砂堆の移動にともなって明らかに屑内のひずみとみるが、砂堆通過後、砂の実質はそこに止まっている。ちょうど液の通過にともなって水分子が動くのと同じような現象を示す。このような場合ひずみの量がすぐ流砂量への差ちとなっていない。またこのすべり面から上の部分を細分法で安定計算を行うと、重力だけで十分不安定の領域にあり当然砂堆とともに移動するべきにもかかわらず、とどまっている。これについては、更に実験と重ねて検討したい。

(2) 砂屑表面に砂堆の発達する機構

屑屑内にひずみの発生の有無にかかわらず砂堆の発達が見られる。これはどのような機構によるのであろうか。急斜面上の移動床の上に水を流したとき、与えられた流量と粒径に応じて必ず特定の勾配をとると考えられる。これは流砂量の平衡の条件の他に、抵抗法則の制限によることが出来るものと考えられる。河床が必然的にこの勾配をとるため余分の砂が放出され、これが砂堆としてあらわれているとする。また顕著な砂堆は生じているが屑屑内のひずみの生じていない例とは図1(b)のケースについて砂の移動量と検討すると、 $i = 0.27$, $h = 0.8\text{cm}$ の砂堆の頂上の条件で、Brown型の流砂式で $m = 2$, $K = 8.4$ という値を得る。常数が従来の値に近いだけで流砂機構が等しいとはいえないとしても、このようなケースの流砂量と掃流式で表わしてもゆるされるであらう。そこでこの砂堆の発達と取組んでみよう。

堆積の深い急傾斜水路の流量 Q は表面流量 Q_s と滲透水量 Q_b の和である。不滲透屑(水路床)と平行な砂面と水が流れるときは Q_s は場所的に変らないが、不滲透面と平行でない、例えば河床が下流へ深くなるときは表面流は下流に向って減少する。砂堆の背面上の河床変動は、仮りに河床の勾配 i が与えられたとすると、河床面から

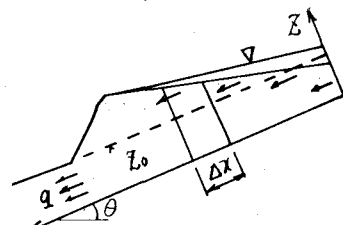


図6 座標

x 方向の単位長さあたりに $g \tan(\theta - i)$, づつ流量の減る流れのもとでの河床の変動として与えられる。横から流出のある流れの運動および連続方程式、流砂量式として定流の式が成立つとして Brown 型、摩擦速度として Manning 型を用いると、流砂の連続式から、 $\partial u/\partial t$ は省略して

$$\frac{\partial z}{\partial t} = A \left[B \left\{ -\frac{u_*}{gA} g \tan(\theta - i) + \frac{\tau_0}{\rho g R} - \sin \theta + \frac{\partial z}{\partial x} \right\} - C_2 g \tan(\theta - i) \right] \quad (2)$$

$$A = \frac{g^{1/2} n}{(1-\lambda) B h^{1/2}} \left\{ \frac{g n^2 Q^2}{h^{1/2} B^2} - u_*^2 \right\}^m \left[1 + \frac{2m}{1-C_1} \right] \quad B_1 = -\frac{7}{6} \frac{1}{h} \quad C_1 = \frac{u_*^2 h^{1/2} B^2}{g n^2 Q^2} \quad C_2 = \frac{1}{Q}, \quad u_* = \rho d^{\tau}$$

ここに θ は水路勾配、 i は砂面勾配、 m , β , τ は常数である。

実際に問題になるのは、砂堆の進行速度および高さの変化である。実験事実から、(i)砂堆の前面の傾斜角は湿潤砂の空中安息角である(ii)砂堆の頂上を通過した全流砂量は前面に堆積する。(iii)砂堆の頂上から上流は、上述の河床変動の考察が適用できる。とすることができる。

さて、このような現象は、貯水池の堆砂の肩の進行の解析の手法が適用²⁾できる。砂堆の頂上では渗透勾配が増すため表面流は急に消失するので、頂上からいくらか上流の突と通過する流砂量は、

$$q_{Tf} \cdot \Delta t \cdot B = (g^{1/2} n Q_{sf} / h_f^{7/6} B) \{ (g n^2 Q_{sf}^2 / h_f^{11/6} B^2) - u_{*c}^2 \}^m \Delta t \cdot B \quad (3)$$

ここに $Q_{sf} = Q - k \theta Z_f$ k は透水係数である。

砂堆の頂上の進行方向と図7に示すように、水路床と平行な進行速度 U 、それと直角な方向の上昇速度 V にわけ、砂堆の進行方向はその合成速度のなす方向とする。 Δt 時間内に砂堆の頂上が Δx だけ進んだとすると、流砂の連続式は図7より、近似的につぎようになる。

$$q_{Tf} \cdot \Delta t \cdot B(1-\lambda) = \left[(Z_f - Z_0) + (1/2)(dZ_f/dt) \Delta t \right] \Delta x + (dZ_f/dt) \Delta t (Z_f - Z_0) \cot(\alpha - \theta) \quad (5)$$

ここに、 Z_f は水路床から砂堆の頂上までの高さ、 α は湿潤砂の空中安息角、 Z_0 は初期の砂_肩の高さである。進行速度 U は(5)式より

$$U = \lim_{\Delta x \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = \left\{ \frac{q_{Tf}}{1-\lambda} - \frac{dZ_f}{dt} (Z_f - Z_0) \cot(\alpha - \theta) \right\} \frac{1}{Z_f - Z_0} \quad (6)$$

$$\text{一方 } V \text{ は } V = \lim_{\Delta x \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Z_f}{\Delta t} = \frac{dZ_f}{dt} = \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right)_f + \left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)_f \frac{dx}{dt}$$

砂堆頂上の水路床に対する運動方向は

$$I = V/U = (1/U) \cdot (\partial Z/\partial t)_f + (\partial Z/\partial x)_f \quad (8)$$

$(\partial Z/\partial t)_f$ に(2)式を代入して

$$I = \frac{1}{U} \left[A \cdot B \left\{ \frac{u_m}{gA} g \left(\frac{dz}{dx} \right)_f \Delta x + \frac{T_0}{\sqrt{gR}} - \theta + \left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)_f \right\} - C g \left(\frac{dz}{dx} \right)_f \Delta x \right] \quad (9)$$

となる。以上の方法で砂堆の頂上の進行を計算するにおいて、一番初期の値、とくに砂堆背面の勾配の設定が問題となる。現在では適当に仮定する以外にない。ある程度砂堆が発達したのちは、計算初期の Z_{f1} と勾配 i が得られると、(4)式より Q_f が、(3)式より q_{Tf} が決定し、(6)式の2項をより最初省略して U の近似値をうる。 $q_{Tf} \cdot \Delta t \cdot B / (1-\lambda) \cdot F = \Delta Z_{f1}$ 、ここに F は Z_{f1} より上流の河床面積で、この Z_{f1} の Δt 後の低下量を求める。そこから初期の i に平行に Δt に U 進む位置まで延長すれば Δt 後の Z_{f2} の近似値をうる。これを用いて U を再計算する。これは I の計算にも同様に適用できる。

4. むすび

急斜面水路で流砂実験を行ない、急勾配になると河床一面に流れが生ぜず砂堆が発達することを見出した。これは流れが自然に勾配を形成し、余分の砂を放出する結果とみなして、その発達を推定法をのべた。また砂堆の発達にともなって砂_肩内にひずみが生ずることを測定し、ひずみの発生する勾配は斜面の限界勾配以上であることとをのべた。実験に協力を頂いた京大防災研究所角野 裕助手、京大大学院白川 清氏に御礼申上げるとともに、昭和42年度特定研究の補助をうけたことに感謝の意を表する

参考文献 1) 矢野勝正; 土砂災害とその対策, 1967年度水工学に関する夏期研究会講義集, 土木学会水理委員会
2) 矢野勝正, 芦田和男, 足道成美; ダムの背砂に関する研究(1), 京大防災研年報6号 B638

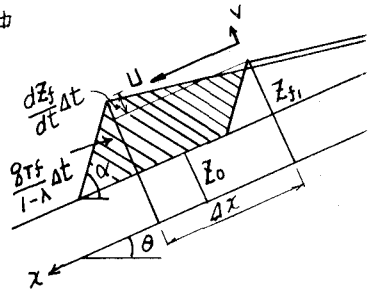


図7 記号