

京都大学防災研究所 正 江頭達治

京都大学防災研究所 正 芦田和男

京都大学 大学院 学 加本 実

1. まえがき 山地流域の土砂生産場の材料には、粘土およびシルトなどの微細土砂がかなり含まれており、その粘着性は、生産場の侵食・輸送現象を支配する主要なパラメータの一つであることが知られている。本研究においては、山地流域における侵食や河道変動現象を解明するための第一段階として、砂礫の移動限界や流砂量に対する粘着力の効果について検討しようとするものであって、主として、移動限界に対する粘土含有率および含水比の効果、ならびに流砂量の非平衡性について考察する。

2. 砂礫の移動限界 二次元等流、かつ単一粒径の砂と粘土の混合物からなる傾斜角 θ の河床を対象として、粘着力を考慮した力のつり合い条件より、砂粒子の無次元限界掃清力 τ_{acc} の表示式が^{(1), (2)}つぎのように導かれている。

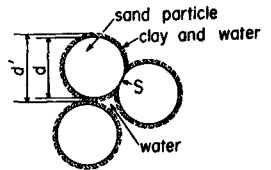


図-1. 混合物のモデル

$$\tau_{acc} = (\cos \theta \tan \varphi - \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \sin \theta) \frac{\rho_s}{\tan \varphi} + \frac{k'_1 d^2 f_c}{k_3 (\rho_s - \rho) g d^3 \tan \varphi} \rho_s \quad (1)$$

ここに、 ρ_s = Shields パラメータ $= 2k_3 \tan \varphi / C_0 (k_2 + k_1 C_0 / C_0 \tan \varphi)$ 、 d : 砂粒径、 k_1, k_2, k_3 : 形状係数で、球形の場合 $k_1 = k_2 = \pi/4$ 、 $k_3 = \pi/16$ 、 φ : 砂の水中安息角、 ρ_s : 砂および粘土粒子の密度、 ρ : 水の密度、 f_c : 単位面積当たりの粘土の粘着抵抗力である。(1)式の右辺第二項は、粘土を含まない場合の無次元限界掃清力 τ_{ac} で、第三項が粘着力による限界掃清力の増加分 $\Delta \tau_{acc} = \tau_{acc} - \tau_{ac}$ に相当する。ここで、 $k'_1 d^2$ は、砂粒子の剥離に対して粘着抵抗を発揮する面積であって、混合物の粘土含有率および粘土の含水比によって変化する。 $\Delta \tau_{acc}$ の増減を支配する重要なパラメータとなる。ここで、 $\Delta \tau_{acc}$ に対する $k'_1 d^2$ の効果を評価しよう。いま、砂粒間の摩擦は、粘土を含まない場合と同様であって、粒子間の接触部分以外の粒子表面には、図-1に示すように、水で飽和した粘土が厚膜に付着しているものとし、砂粒子の突露部分以外を空隙とみなしたときの空隙率を λ とする。すると、簡単な幾何学的関係より、砂粒子間の一つの接点における粘着面積 S は、近似的に次式のようになる。

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{1-\lambda} \frac{k_f (1+\sigma w)}{k_f \sigma w + 1} \right\}^{2/3} - 1 \right] \quad (2)$$

ここに、 k_f : 粘土の含有率、 w : 粘土の含水比、 $\sigma = \rho_s / \rho$ である。路床表面の一個の砂粒子は、 n 個の接点で支えられているものとする。粒子の剥離に対して抵抗する粘着面積の総和は nS となる。そこで、 $k'_1 d^2 = nS$ とおき、これを(1)式に代入して $k_3 = \pi/16$ とすると、 $\Delta \tau_{acc}$ は次式のようになる。

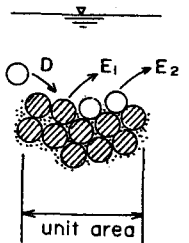


図-2. 砂粒子の剥離・堆積モデル

$$\Delta \tau_{acc} = \tau_{acc} - \tau_{ac} = \frac{3n}{2} \frac{f_c}{(\rho_s - \rho) g d} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{1-\lambda} \frac{k_f (1+\sigma w)}{k_f \sigma w + 1} \right\}^{2/3} - 1 \right] \frac{\rho_s}{\tan \varphi} \quad (3)$$

上式の大括弧は k_f および w の増加関数である。一方、粘着力 f_c は k_f が増加すると減少する。したがって、砂粒子の移動限界は、 k_f が大きくなると増大し、 k_f 一定のときにはある含水比で極大値を示すことが推察される。

3. 流砂の非平衡性 一旦剥離した砂粒子の次の剥離過程においては、粘着力が殆んど働かない。そのため、粘着性材料を含む砂礫床のある有限領域においては、流砂の非平衡性が卓越する。簡単のため、上述の議論と同様の場を対象として、図-2に示すように、剥離経験のない砂粒子の侵食率 E_1 、剥離堆積したもの⁽¹⁾の侵食率 E_2 、および堆積率 D とし、粘土分を考慮しないことにすると、流砂の連続式は次式のように書ける。

$$\partial \beta_0(x) / \partial x = E_1(x) + E_2(x) - D(x) \quad (4)$$

E_1 と E_2 に相当する砂粒子の pick up rate および露出面積率をそれぞれ、 β_1, β_2 および δ_1, δ_2 とする。さらに、中川・辻本および荻田・田中の研究を参考にして、 D は、その場所の流砂量 β_B に比例し、平衡状態における平均跳躍距離 $1/e$ に反比例するものとする、これは、それぞれ次式のよう示される。

$$E_1(x) = \beta_{s1} N \delta_1(x) k_3 d^3 \quad (5)$$

$$E_2(x) = \beta_{s2} N \delta_2(x) k_3 d^3 \quad (6)$$

$$D = \beta_B(x) / 1/e \quad (7)$$

$$\delta_1(x) + \delta_2(x) = 1 \quad (8)$$

$$N = 1/k_3 d^2 \quad (9)$$

$$\beta_{BE} = k_3/k_2 \cdot \beta_{s2} 1/e d \quad (10)$$

ここに、 N は単位面積当たりの露出個数、 β_{BE} は平衡流砂量である。(5)~(10) 式を (4) 式に適用し、 $x=0$ における流砂量を β_{B0} とすると、その解は次のように与えられる。

$$\beta_B(x)/\beta_{BE} = 1 - (1 - \beta_{B0}/\beta_{BE}) \exp[-(\beta_1/\beta_2)(x/1/e)] \quad (11)$$

上式の β_1, β_2 に、中川・辻本の成果を採用し、 $1/e = \lambda_e d$ 、 $\beta_{B0} = 0$ とすると、次式を得る。

$$\frac{\beta_B(x)}{\beta_{BE}} = 1 - \exp\left[-\frac{1}{\lambda_e} \left\{ \frac{\tau_* / \tau_{*c} - \tau_{*cl} / \tau_{*c}}{\tau_* / \tau_{*c} - 1} \right\}^3 \frac{x}{d}\right] \quad (12)$$

4. 移動限界・流砂量に関する実験的検討

実験は、幅 40 cm、深さ 20 cm、長さ 8 m のアクリル製水路を用いて行った。移動限界に関する実験では、 $d_{50} = 2.85 \text{ mm}$ の粒径一様な砂と粘土（パールクレイ、カオリン）および水の混合物を底床に敷き、水路中央部 12 cm x 12 cm の領域において、砂粒子の 5 分間の剥離個数も種々の条件のもとで計数した。剥離個数を τ_{*cl} と決定するため、砂だけの場合について調べた結果、岩盤式による条件 $\tau_{*c} = 0.047$ のとき、25 個/5 分であった。そこで、このときの無次元掃流力を τ_{*cl} とした。一方、流砂の非平衡性については、移動床の長さをもそれぞれ $l = 500, 250$ および $l = 125 \text{ cm}$ とし、これに対する下流域流砂量の変化に基づいて検討した。

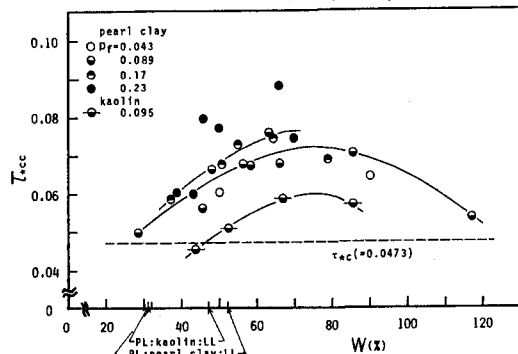


図-3. τ_{*cl} と W および w との関係。

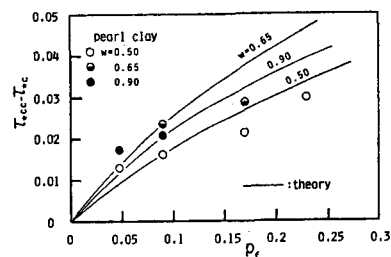


図-4. (3) 式と実験値との関係。

図-3 は、粘土の含有率 w もパラメータとして、 τ_{*cl} と含米比 w との関係を示したものである。先に推察したように、 $\beta_{s2} = \text{const}$ の条件では、 τ_{*cl} は極値をもつようである、 $\beta_{s2} = 0.089$ のものについてみると、粘土の流性限界 (LL) よりも少し大きい含米比のとき極大値になっている。図-4 は、粘着力 τ_{*c} を適当に仮定して算定される $\Delta \tau_{*cl}$ と実験値とを比較したものである。データが少いため十分な検討はできないが、広い範囲のデータがある $w = 50\%$ のものについてみると、両者の対応はよい。図-5 は、(12) 式 ($\lambda_e = 100$) と実験値とを比較したものである。同図より両者は、かなりよく一致しているのがわかる。回中には、粘土を含まない場合についての計算曲線も示されているが、これと他の理論曲線とを比較すると、粘着抵抗に起因する流砂の非平衡性が理解される。なお、 $l = 125 \text{ cm}$ の結果は、実験精度上の問題のため図示されていない。

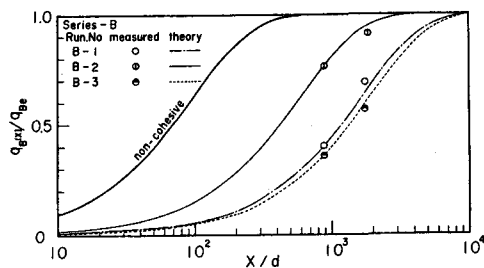


図-5. (12) 式と実験値との関係。

5. あとがき

山地流域における土砂水理的内部問題を解明するための基礎として、粘着性材料を含む砂礫の移動限界と流砂傾性について検討した。以上の結果から考えて、本研究の方法は、ほぼ妥当なものであると思われる。なお、本研究は、一部文部省科学研究費（一階層）の補助を受けたことを記し、感謝を表す。

参考文献 1) 荻田・江頭・金屋敷, 水理講演会, 1980. 2) 荻田・江頭・加本, 京大防災研年報, 25号B2, 1982. 3) 中川・辻本, 土木学会論文集, 246号, 1975. 4) 荻田・田中, 京大防災研年報, 17号B, 1974.