

山地流域における侵食と流路変動に関する研究（1）

—粘着性材料を含む砂礫の移動限界と流砂量—

芦田 和男・江頭 進治・加本 実

STUDY ON THE EROSION AND VARIATION OF MOUNTAIN STREAMS

—On the Erosion and Transportation of Sand-Clay Mixtures—

By Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA and Minoru KAMOTO

Synopsis

Erodibility and transport characteristics of soil mixtures composed of coarse uniform sand and clay are discussed theoretically and experimentally.

A formula, which is a function of the cohesive strength, clay composition rate and water content, is presented, concerning the nondimensional critical shear stress of sand particle within the soil mixtures. Then, the non-equilibrium sediment transport caused by the difference of critical shear stress between detached and undetached sand particles is discussed, and the distribution function of the transport rate is formulated. Some experiments as to the critical shear stress and the transport rate of sediment are carried out in order to examine the applicability of these formulas.

1. 緒 言

山地流域の土砂流出現象は、上流域の山腹裸地や河道の条件および降水に伴う流体力の分布などに支配されるが、芦田・高橋・沢田¹⁾の一連の研究にみられるように、河道部の現象に限ってみても、アーマ・コートの形成と破壊、流路の変動と分岐などがかなり頻繁に起こっており、土砂流出現象はかなり複雑であって、これを的確に評価するのはかなり困難な状況にある。

ところで、土砂流出現象を支配する一つの主要なパラメータである山腹裸地や河道側岸などの土砂生産場の材料条件についてみると、粒径 100 μm よりも小さな土砂がかなり含まれていることが知られている²⁾。このような微細土砂は、ウォッシュ・ロードの生産源になるばかりでなく、この中に含まれるさらに細かいシルト・粘土は、その粘着力のため土砂生産場の受食性をかなり変化させている。

粘土分を含有することによる土砂生産場の受食性の変化は、土砂の侵食（生産）→流送→堆積といったプロセスの中で、あるいは、流路変動過程の中でさまざまな影響を及ぼしている。もちろん、その影響の程度は、粘土の種類、その含有率、および含水比などによって異なることが推察される。たとえば、芦田・田中³⁾の研究にみられるように、粘土層の中へ砂礫粒子が浮いているような状態では、上述のプロセスにおいて粘土層の受食性が主要な役割を果たすであろうし、一方、粘土が砂礫粒子間の空隙を埋めている状態においては、粘着力による砂礫粒子の剝離抵抗の増加の程度が重要な役割を演ずることが推察される。

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究明するための第一段階として、場の材料特性の一つである粘着力に着目し、砂礫床が粘土を含有するために砂礫の剝離抵抗が増加するような状態を対象として、砂礫の移動限界に対する粘土の含有率や含水比の効果ならびに流砂特性について理論的・実験的考察を行う。以下、簡単のため、ここでは粘着力を有するような微細土砂を粘土と呼ぶことにする。

2. 砂礫の移動限界

簡単のため、単一粒径の砂粒子と粘土の混合物を考え、砂粒子間の摩擦は、粘土を含まない場合と同様であるような状態を対象とする。前述したように、この状態は、砂粒子の空隙を粘土が埋めており、たとえ粘土が取り除かれても砂粒子は静的に安定を保持できることを意味する。いま、このような混合物から構成される傾斜角 θ の河床を考え、二次元流れにおいて砂粒子に働く力を模式的に示すと Fig. 1 のようである。同図において、砂粒子を流れ方向に動かそうとする力とこれに抵抗しようとする力が釣り合った状態、すなわち、移動限界状態を考えると、次式が成り立つ。

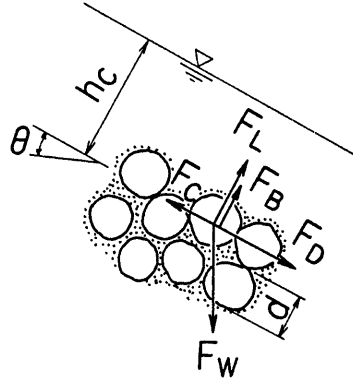


Fig. 1 The sketch of forces acting on a sand particle within sand-clay mixtures.

$$F_D + F_W \sin \theta = (F_W \cos \theta - F_L - F_B) \tan \varphi + F_C \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 F_W ：重力、 F_B ：浮力、 F_D ：抗力、 F_L ：揚力、 F_C ：粘着力、 φ ：砂粒子の安息角である。静水圧分布を仮定すると、これらの力はそれぞれ次式のように書ける。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D k_1 d^2 u_d^2 \dots \dots \dots (2)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L k_2 d^2 u_d^2 \dots \dots \dots (3)$$

$$F_W = \rho_s k_3 d^3 g \dots \dots \dots (4)$$

$$F_B = \rho k_3 d^3 g \cos \theta \dots \dots \dots (5)$$

$$F_c = k_1' d^2 f_c \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 C_D ：抗力係数、 C_L ：揚力係数、 d ：砂粒子径、 ρ_s ：砂粒子密度、 ρ ：水の密度、 u_d ：砂粒子に作用する代表流速、 k_1, k_2, k_3 ：形状係数で、球形の場合には、 $k_1 = k_2 = \pi/4, k_3 = \pi/6, f_c$ ：単位面積当たりの粘土の粘着抵抗力、 $k_1' d^2$ ：粘着抵抗に寄与する粘土の粘着面積である。いま、摩擦速度 u_* を用いて

$$u_d = \alpha u_* \dots \dots \dots (7)$$

のように表示し、(2)～(7)式を(1)式に代入すると、砂粒子の移動限界に関する無次元掃流力 τ_{*cc} が次式のように表される。

$$\tau_{*cc} = \underbrace{(\cos \theta \tan \varphi - \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \sin \theta)}_{\tau_{*c}} \frac{\phi_s}{\tan \varphi} + \underbrace{\frac{k_1' d^2 f_c}{(\rho_s - \rho) g k_3 d^3}}_{\Delta \tau_{*cc}} \frac{\phi_s}{\tan \varphi} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $\tau_{*cc} = u_{*cc}^2 / (\rho_s / \rho - 1) g d$ 、 $\phi_s = \text{Shields パラメータ} = 2k_3 \tan \varphi / C_D (k_2 + k_1 C_L / C_D \cdot \tan \varphi)$ である。(8) 式の右辺第二項が粘土を含むことによる限界掃流力の増分 $\Delta \tau_{*cc}$ であって、これは、砂粒径 d 、粘着力 f_c および粘着面積 $k_1' d^2$ によって変化する。なお、ここまでの議論は、すでに芦田・江頭・全屋敷⁴⁾ にならされている。

$\Delta \tau_{*cc}$ を推定するためには、 f_c および $k_1' d^2$ を知る必要がある。しかし、 f_c についての十分な情報を得るまでには至っていない。そこで、以下、粘土の含有率および含水比と $k_1' d^2$ との関連性について若干の検討を行い、それが $\Delta \tau_{*cc}$ に対してどのような影響を及ぼすか考察しよう。

まず、 $k_1'd^2$ を評価するため Fig. 2 のようなモデルを考える。すなわち、粒子間の接触部分以外の粒子表面には水で飽和した粘土が等厚に付着しているものとし、砂粒子の実質部分以外を全て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、一つの接点における粘着面積 s が近似的に次式のように求められる。

$$s = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \left[\left\{ 1 + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\rho_f(1+\sigma w)}{\rho_f \sigma w + 1} \right\}^{2/3} - 1 \right] \dots\dots\dots(9)$$

ここに ρ_f : 粘土の含有率, w : 粘土の含水比, $\sigma = \rho_s/\rho$ であって、砂, 粘土および粘土中の水の重量をそれぞれ w_s, w_c および w_w としたとき、 $\rho_f = w_c/(w_s + w_c)$, $w = w_w/(w_c + w_w)$ で定義されている。(9) 式よりわかるように、粘着面積 s は、 ρ_f および w によって変化する。

ここで、水流の作用を受け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。砂粒子の剝離に対して抵抗する粘着面積の総和は ns となる。そこで、 $k_1'd^2 = ns$ と置き、形状係数 $k_3 = \pi/6$ として、これらを (8) 式に適用し、 $\Delta\tau_{*cc}$ の項のみを書くと、次式を得る。

$$\Delta\tau_{*cc} = \frac{3}{2} n \frac{f_c}{(\rho_s - \rho)gd} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\rho_f(1+\sigma w)}{\rho_f \sigma w + 1} \right\}^{2/3} - 1 \right] \frac{\phi_s}{\tan \varphi} \dots\dots\dots(10)$$

上式において、大括弧[]は、 ρ_f および w の増加関数である。一方、粘着力 f_c は、粘土の種類や状態によって変化する。含水比 w との関係関係をみると、一般に、 w の減少関数になっている。したがって、粘土による砂粒子の無次元限界掃流力の増分 $\Delta\tau_{*cc}$ は、 $w = \text{const.}$ のとき ρ_f とともに増加し、 $\rho_f = \text{const.}$ のとき、ある含水比のときに極大値をとることが推察される。

つぎに、(10)式の適用条件、すなわち、Fig. 1 あるいは Fig. 2 のような砂、粘土、水の混合物において、水および粘土を取り除いても砂粒子が安定であるための条件について触れておく。いま、Fig. 2 の水だけの部分をかりに空隙とした場合の空隙率を λ' とし、 $\lambda', \lambda, \rho_f$ および w との関係をみると、幾何学的な条件より次式が導かれる。

$$\frac{\lambda - \lambda'}{\lambda} = \frac{1 - \lambda}{\lambda} \frac{\rho_f}{1 - \rho_f} (1 + \sigma w) \dots\dots\dots(11)$$

上式において、 $\lambda' = 0$ あるいは、 $(\lambda - \lambda')/\lambda = 1$ の条件は、空隙 λ が含水比 w の粘土で埋められた状態を意

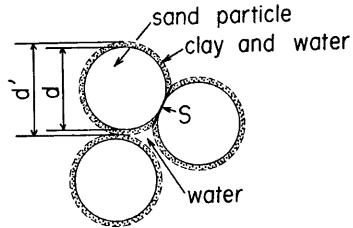


Fig. 2 The model of sand-clay mixtures.

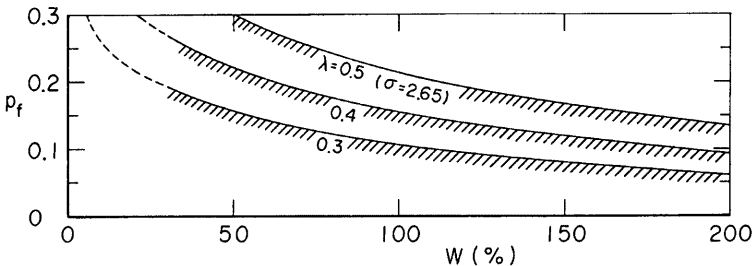


Fig. 3 The critical curves obtained by eq. (11) for the static stability of sand particles.

味し、 $\lambda' < 0$ あるいは $(\lambda - \lambda')/\lambda > 1$ は、含水比 w の粘土の中に砂粒子が浮いている状態を意味する。

Fig. 3 は、 $(\lambda - \lambda')/\lambda = 1$ となる p_f と w との関係を示したものであって、図中の各曲線の内側が本研究の対象になっている。

3. 流砂の非平衡性

前章において、砂と粘土の混合物から構成される河床においては、粘土による粘着力のために砂粒子の移動限界が増加することを示した。ところが、一旦剥離した砂粒子は、次の剥離過程において粘着抵抗力を受けないか、たとえ受けたとしても、わずかの抵抗力しか受けないことが推察される。そのため、ある有限区間の混合物河床においては、剥離経験のないものと剥離したものとが混在し、砂粒子の移動限界の違いに起因した流砂の非平衡性が顕著に現れることが予想される。ここでは、簡単のため、一旦剥離した砂粒子にはもはや粘着力が作用しないものとして、上述の非平衡性について検討する。

Fig. 4 に示すように、剥離経験のない砂粒子の単位時間単位面積当たりの侵食量 E_1 、剥離経験のある砂粒子のそれを E_2 、および堆積量を D とすると、流砂の連続式は次式のようになる。

$$dq_B(x)/dx = E_1(x) + E_2(x) - D(x) \tag{12}$$

ここに、 q_B ：粘土分を除外した単位幅流砂量である。いま、河床表面の単位面積当たりの露出個数 N 、 E_1 および E_2 に対応する砂粒子の pick up rate および露出(被覆)面積率をそれぞれ p_{s1} 、 p_{s2} および δ_1 、 δ_2 とすると、これらの間には次式が成立する。

$$N = 1/k_2 d^2 \tag{13}$$

$$E_1(x) = p_{s1} N \delta_1(x) k_3 d^3 \tag{14}$$

$$E_2(x) = p_{s2} N \delta_2(x) k_3 d^3 \tag{15}$$

$$\delta_1(x) + \delta_2(x) = 1 \tag{16}$$

さらに、堆積量 D は、その地点の流砂量 q_B に比例し、平衡状態の平均跳躍距離 Λ_e に反比例するものとして、これを次式のように置く。

$$D = q_B(x)/\Lambda_e \tag{17}$$

ここで、(13)~(17)式を用いて(12)式を変形すると次式のようになる。

$$dq_B(x)/dx = k_3/k_2 \cdot d \{ p_{s1} + (p_{s2} - p_{s1})\delta_2(x) \} - q_B(x)/\Lambda_e \tag{18}$$

(18)式の $\delta_2(x)$ 、すなわち、剥離した砂粒子による河床の被覆率を次式のように仮定する。

$$\delta_2(x) = q_B(x)/q_{Be} \tag{19}$$

ここに、 q_{Be} は、剥離した砂粒子によって河床が覆われているときの平衡流砂量で、次式のように書ける。

$$q_{Be} = k_3/k_2 \cdot p_{s2} \cdot d \cdot \Lambda_e \tag{20}$$

さて、(19)および(20)式を(18)式に適用し、 $x=0$ 地点の流砂量を q_{B0} とおくと、流砂量の縦断分布が次式

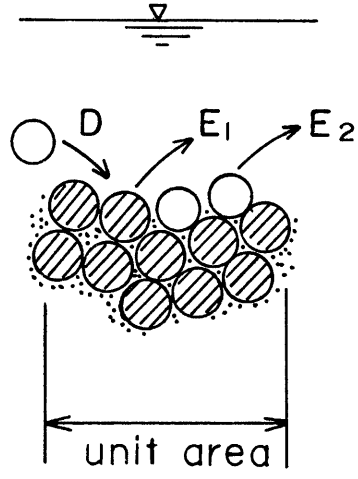


Fig. 4 Schematic feature for the erosion and deposition of sand particles.

のように求められる。

$$\frac{q_B(x)}{q_{Be}} = 1 - \left(1 - \frac{q_{B0}}{q_{Be}}\right) \exp\left[-\frac{p_{s1}}{p_{s2}} \frac{x}{\Lambda_e}\right] \quad \dots\dots\dots (21)$$

いま、 p_{s2} に関しては、中川・辻本⁵⁾の研究が適用できるものとする、これは次式のものである。

$$p_{s2} \sqrt{d/(\sigma-1)g} = \begin{cases} F_0 \tau_* (1 - \tau_{*cc}/\tau_*)^3, & (\tau_* > \tau_{*cc}) \\ 0, & (\tau_* \leq \tau_{*cc}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 F_0 ：実験定数で、0.03~0.035とされている。一方、 p_{s1} については、若干の検討の余地はあるが、上式の τ_{*c} の代わりに τ_{*cc} を用いて推定できるものとする。すなわち、

$$p_{s1} \sqrt{d/(\sigma-1)g} = \begin{cases} F_0 \tau_{*c} (1 - \tau_{*cc}/\tau_{*c})^3, & (\tau_{*c} > \tau_{*cc}) \\ 0, & (\tau_{*c} \leq \tau_{*cc}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (23)$$

また、 Λ_e については、多くの実験結果より、近似的に次式が成り立つことが知られている。

$$\Lambda_e = \lambda_e d \quad \dots\dots\dots (24)$$

(22)、(23)および(24)式を(21)式に代入すると、 $q_B(x)/q_{Be}$ は次式のようにになる。

$$\frac{q_B(x)}{q_{Be}} = 1 - \left(1 - \frac{q_{B0}}{q_{Be}}\right) \exp\left[-\frac{1}{\lambda_e} \left(\frac{\tau_* / \tau_{*c} - \tau_{*cc} / \tau_{*c}}{\tau_* / \tau_{*c} - 1}\right)^3 \frac{x}{d}\right] \quad \dots\dots\dots (25)$$

上式によると、粘性材料を含むことによる流砂の非平衡性は、主として、 τ_* / τ_{*c} および τ_{*cc} / τ_{*c} に支配される。

Fig. 5 は、(25)式において $\lambda_e = 100$, $q_{B0} = 0$ と置き、 τ_{*cc} / τ_{*c} および τ_* / τ_{*c} をパラメータとして $q_B(x)/q_{Be}$ と x/d の関係をみたものである。図中には、 $\tau_{*cc} = \tau_{*c}$ 、すなわち、粘土を含まない場合の縦断分布も示されている。(25)式およびこの図からもわかるように、 τ_{*cc} / τ_{*c} が大きくなると流砂の非平衡性が卓越する。一方、 τ_* / τ_{*c} が大きくなると、流砂特性は、非粘性材料のそれに近づく。

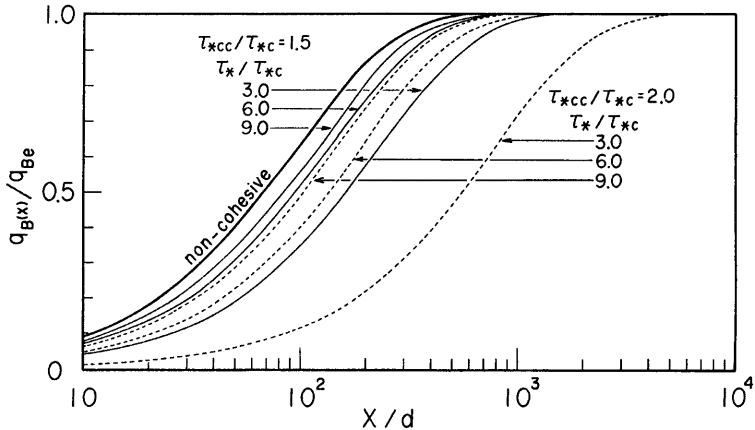


Fig. 5 The stream-wise distribution of bed load on the floor composed of sand-clay mixtures. The theoretical curves obtained by eq. (25).

4. 実験結果および理論の適用

4.1 実験方法とその条件

砂粒子の移動限界 (Series-A)、流砂の非平衡性 (Series-B) および粘土の物性や力学的特性 (Series-C) を検

討するため、三種類の実験が行れた。実験には、砂と2種類の粘土が用いられた。砂の中央粒径、均等係数および比重は、それぞれ、 $d_{50}=2.85\text{ mm}$ 、 $UC=1.20$ 、 $\sigma=2.63$ であって、ほぼ均一砂とみなせる。粘土材料として、パルクレイとカオリン（林化成製造）とが用いられた。これらの塑性限界 PL 、液性限界 LL および比重 σ は、パルクレイにおいて、 $PL=30.0\%$ 、 $LL=52.0$ 、 $\sigma=2.63$ 、カオリンで、 $PL=31.0\%$ 、 $LL=47.1\%$ 、 $\sigma=2.62$ である。粒度分布については、測定法によってかなり異なっているため、詳細はわからないが、ほとんど 2μ 以下の粒子からなっているようである。

Series-A および Series-B の実験においては、全長 8 m、幅 40 cm、深さ 20 cm のアクリル製の勾配可変循環式水路が用いられた。所定の流量を得るためのバルブ操作には、かなりの時間が費され、場合によっては、これが実験精度上の問題の一つになることがある。こうしたトラブルを避けるため、上流端の三角ぜき直下流には、通・排水操置が設置されている。以下、それぞれの実験ごとに、その方法を略述する。

Series-A：砂と粘土を適当な割合に配合し、これに所定量の水を加えながらミキサーで粘り混ぜて混合物を作成する。このときの混合攪拌時間は5分である。このようにして作られた混合物を水路床の0~4 m 区間に約5 cmの厚さで敷きならし、河床設定を行った後、砂粒子の移動限界よりも小流量の水を通過し、種々の測定が行れた。測定が終了すると、流量を少し増加させて同様の測定を行うというような方法がくり返された。測定項目は、水位、河床位および所定の領域における砂粒子の剝離個数である。水位および河床位はポイントゲージを用いて測定された。なお、河床位の測定は、通水停止時に行われている。砂粒子の剝離個数については、計数時間を5分間として、下流端より1.8 m 上流の $12\text{ cm} \times 12\text{ cm} = 144\text{ cm}^2$ の領域で計数された。計数のための基準は、つぎのようである。すなわち、対象領域に存在する砂粒子のうち、初めて剝離するものだけが計数され、剝離経験のある粒子が移動しても計数の対象にはならない。

なお、剝離個数に基づいて砂粒子の移動限界を定義するため、粘土を含まない場合の実験も行った。この場合の剝離個数については、剝離経験の有無にかかわらず、停止しているものが移動した場合には、剝離個数として数えられている。

Series-B：この実験は、流砂の非平衡性を調べるために行われたものである。用いられた材料は、Series-A のものと同じもので、移動床の長さに対する下流端流砂量の変化が調べられた。測定項目は、水位、河床位、流砂量などである。河床位は、停水時にポイントゲージを用いて測定され、水位は、自動水位計を用いて測られている。実験中の河床変動の影響をなるべく小さくするため、水位の測定を迅速に行う必要がある。そのため、水位計を取り付けた台車を上・下流に動かし、その位置をポテンシオメータによって自動的に検出できるようにされている。流砂量は、一般によく用いられている金網製の流砂捕獲容器を用い、水路下流端で計測された。

Series-C：実験中における粘土の含水比の時間変化の有無を間接的に知るための実験を行うとともに、砂粒子の剝離に対する粘着抵抗力と粘土自身の粘着力との関連性を調べるための圧密非排水一面せん断試験を行った。まず、前者については、表面積 $1.8 \times 1.8\text{ cm}^2$ を有する板ガラスに含水比55~60%の粘土を等厚に塗り付けて多数のサンプルを作り、これらを水に浸し、種々の浸水時間における含水比を調べた。このとき、比表面積による違いをみるため、比表面積 10 および 30 cm^{-1} の二種類が準備されている。一方、後者に関する実験は、土質試験法に準じて行われた。

実験条件を **Table 1** および **Table 2** に示す。**Table 1** は、Series-A に関するものであって、表中の記号は、 ρ_f ：粘土含有率、 w ：含水比、 i_b ：河床勾配、 λ ：空隙率、 T ：水温である。最右欄の τ_{acc} は、実験から得られた砂粒子の無次元限界掃流力である。本表に示すように、 ρ_f と w の組み合わせによって計32ケースの実験が行われている。**Table 2** は、Series-B に関する実験条件を示したものである。本表において、 q ：単位幅流量、 q_s ：単位幅流砂量、 L ：移動床の長さであって、同一の粘土含有率および含水比の条件下で、 L について三種類 (500, 250, 125 cm)、 ρ_f および w について三通り、計9ケースの実験が行われている。Series-C の条件については、後述の実験結果のとおりである。

Table 1 Experimental condition on the series-A.

Run No.	p_f	$w(\%)$	i_b	λ	$T(^{\circ}\text{C})$	τ_{*cc}	clay type
1	0		1/100		15.6	(0.0473)	
2	0.038	50.0	1/60	0.382	7.4	0.0605	pearl clay
3	0.047	90.0	//	0.413	8.2	0.0645	//
4	0.047	82.3	//		9.5	0.0704	//
5	0.046	113.3	//		9.2	0.0580	//
6	0.094	28.7	//	0.443	10.4	0.0493	//
7	0.087	46.3	//	0.427	10.8	0.0560	//
8	0.088	48.2	1/100	0.523	12.2	0.0665	//
9	0.088	57.4	1/60	0.501	11.2	0.0680	//
10	0.090	66.6	//	0.501	10.6	0.0680	//
11	0.090	85.3	//	0.459	9.2	0.0705	//
12	0.083	117.0	//	0.546	10.7	0.0538	//
13	0.087	58.3	//		9.9	0.0688	//
14	0.092	81.7	//		11.0	0.0723	//
15	0.090	100.3	//		10.3	0.0678	//
16	0.153	37.3	//	0.620	11.1	0.0585	//
17	0.168	50.9	//	0.590	10.8	0.0678	//
18	0.171	55.0	//	0.531	10.5	0.0730	//
19	0.167	64.4	//	0.594	10.3	0.0743	//
20	0.182	78.9	//	0.626	9.2	0.0690	//
21	0.173	89.7	//		10.6	0.0565	//
22	0.165	107.9	//		10.1	0.0530	//
23	0.225	38.7	//	0.693	9.6	0.0630	//
24	0.230	43.2	//	0.644	10.7	0.0600	//
25	0.234	45.6	//	0.582	12.2	0.0795	//
26	0.235	50.0	//	0.568	9.2	0.0768	//
27	0.230	65.8	//	0.502	8.2	0.0880	//
28	0.230	69.8	//	0.491	10.0	0.0743	//
29	0.102	43.8	//	0.538	9.3	0.0455	kaolin
30	0.095	52.6	//	0.531	8.4	0.0513	//
31	0.092	67.0	//	0.434	8.5	0.0588	//
32	0.092	85.5	//	0.386	9.1	0.0573	//

Table 2 Experimental condition on the series-B.

Run No.	q (cm^2/s)	i_b	p_f	w ($\%$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	$q_s(\text{cm}^2/\text{s})$		
						$L=500$ (cm)	250	125
1	185	1/60	0.0873	58.3	9.9	0.186	0.108	0.0322
2	183	//	0.0920	81.7	11.0	0.0463	0.0392	0.0144
3	186	//	0.0899	100.3	10.3	0.340	0.215	0.0825

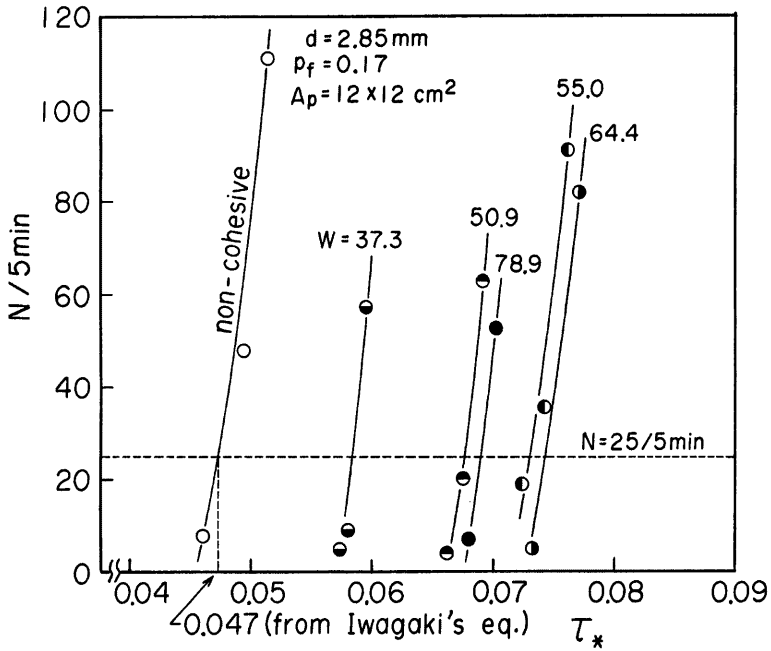


Fig. 6 The detached number of sand particles per 5 minutes and 144 square centimeters versus nondimensional shear stress.

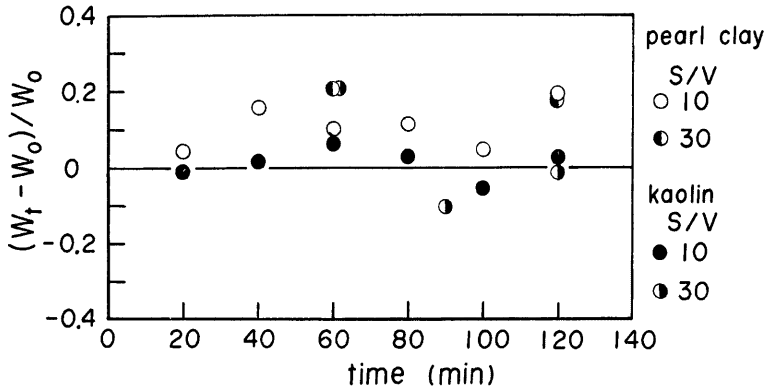


Fig. 7 The change of water content ratio with time. W_0 : initial water content ratio at $t=0$, and W_t : water content ratio at $t=t$.

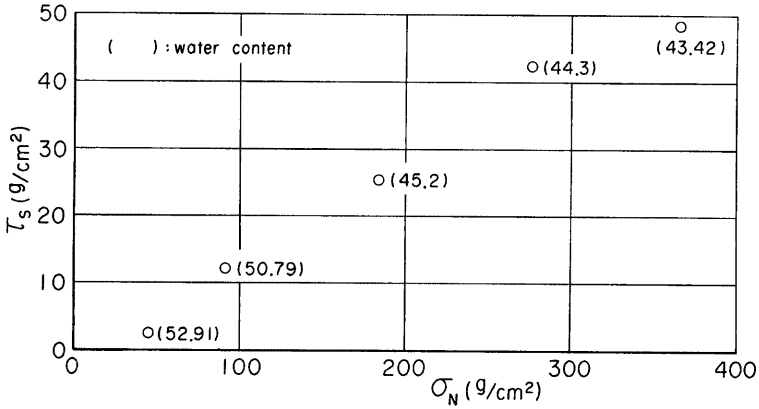


Fig. 8 The shear strength of the pearl clay obtained by the consolidated-undrained single-plane shear test.

4.2 実験結果の一例

Fig. 6 は、 $p_f \approx 0.17$ (Run 16~20), 含水比 w をパラメータとして、無次元掃流力の増加に伴う剥離個数の変化を調べた結果の一例である。図中には、粘土を含まない場合の結果も示されている。同図は、砂粒子の剥離個数に基づいて無次元限界掃流力を決定するために用いられる。すなわち、砂だけの場合の限界掃流力を岩垣式より算定すると、 $\tau_{*c} \approx 0.047$ となり、このときの5分間の剥離個数は、25個であった。そこで、剥離個数が25個/5分のときを限界状態であると定義し、Fig. 6 の破線で示すように、剥離個数と τ_* との関係より、 $N=25$ 個/5分となる τ_* を内挿して求め、これを無次元限界掃流力 τ_{*cc} とした。このようにして求められた τ_{*cc} については次節で述べる。

粘土の含水比の時間変化 (Series-C) に関する結果を Fig. 7 に示す。同図の縦軸は、初期含水比 w_0 に対する t 時間後の含水比の変化率 $(w - w_0)/w_0$ で表示されている。実験データは、少しばらついているが、含水比が時間的に増加するような傾向は、パールクレイにおいてもカオリンの結果にも見られず、比表面積による系統的な変化もないようである。したがって、Series-A および Series-B の実験において、粘土の含水比は、実験中殆んど変化しないものと思われる。

Fig. 8 および Fig. 9 は、パールクレイに関する圧密非排水せん断試験 (Series-C) の結果を示したもので、前者は、圧密荷重より算定される垂直応力とせん断強度 (粘着力) との関係のみたもので、図中の数値は、圧密終了時の含水比を示したものである。一方、後者は、圧密後の含水比とせん断強度との関係のみたものである。これらの図より、圧密荷重が大きくなるとともに、また、含水比が小さくなるに伴い、粘土のせん断強度はほぼ直線的に増加するのがわかる。

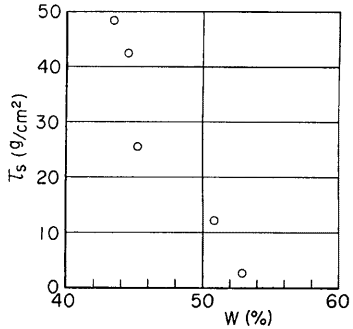


Fig. 9 The shear strength versus water content after the result of Fig. 8.

4.3 移動限界に対する粘土含有率・含水比の効果

粘土のような粘着性材料を含む砂礫床においては、砂粒子の移動限界が増加し、増加の程度は、粘土自身の粘着抵抗力と粘土の含有率・含水比によって変化することを2章において推論した。ここでは、実験結果に基づいてこれらのことを調べてみる。

Fig. 10 は4.1の方法で求められる無次元限界掃流力に関し、粘土の含有率 p_f をパラメータにして、 τ_{*cc} と含水比 w との関係を見たものである。いま、パールクレイを用いた結果に着目し、広い範囲の含水比に対してデータが得られている $p_f = 0.043, 0.089, 0.17$ のものについてみると、2章において推論したように、ある含水比のときに τ_{*cc} が極大値を示しているのがわかる。このときの含水比は、いずれにおいても液性限界よりも大きくなっている。これは、含水比の増加に伴う粘着力 f_c の減少効果に比較して、粘着抵抗力を発揮する粘着面積の増加による効果が卓越するためであることが推察される。

Fig. 10 において、 p_f と τ_{*cc} との関係についてみると、含水比がある値よりも小さい領域では、 p_f が大きいほど τ_{*cc} も大きい、 w がある値を越えると、 τ_{*cc} は、 p_f によってあまり変化しないか、あるいは、 $p_f = 0.17$ のデータのように小さくなる傾向すらみられる。一方、(10)式によると、空隙率 λ および砂粒子間の接点数 n が一定であれば、 p_f の増加に伴い τ_{*cc} は大きくなることが推察される。実験値と(10)式の傾向において、このような違いが現われる原因として、つぎのことが考えられる。すなわち、実験における河床の設定が十分でなかった点、つまり、**Table 1** に示すように、河床の空隙率 λ が、実験ごとにより異なっていることに起因するものと思われる。一例として、 w がほぼ等しく、 p_f が異なる Run-11 ($w=85.3, \lambda=0.459$) と Run-20 ($w=78.9, \lambda=0.626$) の結果を比較すると、前者において、 $\tau_{*cc}=0.0705$ であるのに対し、後者は $\tau_{*cc}=0.0690$ となっている。**Table 1** の結果や(10)式を総合すると、 p_f が大きいにもかかわらず τ_{*cc} が小さくなるのは、 λ が大きく、しかも、それに伴い砂粒子間の接点数 n が減少するためであると推察される。

粘土含有率がほぼ等しい $p_f = 0.089$ のデータについて、パールクレイとカオリンとの結果を比較すると、粘着抵抗力は、カオリンの場合が小さいようである。カオリンは、構造的に弱い粘土に属することから考え

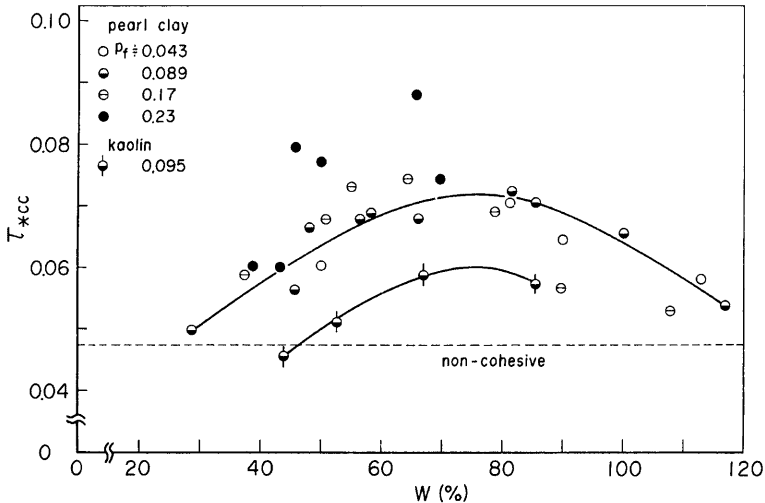


Fig. 10 The nondimensional critical shear stress obtained from experiments.

て、これは妥当な結果であろう。

つぎに、粘土の粘着力 f_c を適当に仮定し、(10)式による計算値と実験値とを比較してみよう。**Fig. 11** は、含水比一定の条件下において、 ρ_f に対する $\Delta\tau_{*cc}$ の変化に関する実験値と理論値を比較したものである。ここで実験値は、広範囲のデータが得られる $w=50\%$ のときの $\Delta\tau_{*cc}$ に着目し、**Fig. 10** の結果より内挿して求められている。一方、(10)式による計算曲線は、 $\rho_s=2.63$, $\rho=1.0 \text{ g/cm}^3$, $d=0.285 \text{ cm}$, $\lambda=0.468$, $w=0.5$, $\tan \varphi=0.765$ (実験値), $n=3$, $\phi_s=0.047$, および $f_c=0.32 \text{ g/cm}^2$ として算定されている。計算曲線と実験値との比較において、空隙率 λ や接点数 n に関して若干の問題点はあるが、両者の傾向はほぼ一致しており、2章のモデルの妥当性が伺える。

上述のことは、 f_c が与えられると(10)式によって τ_{*cc} が推定できることを意味するものである。そこで、**Fig. 9** に示すせん断強度 τ_s と f_c との関係についてみると、 $w=50\%$ のとき、 $\tau_s=12\sim13 \text{ g/cm}^2$ であるのに対し、上述の計算が示すように粘着抵抗力は、 $f_c=0.32 \text{ g/cm}^2$ 程度であって、 f_c が1オーダー以上小さくなっている。 τ_s と f_c との間には、何らかの関係があることが推察されるが、データも少く、現在、この点については言及できない。

4.4 流砂の非平衡性に関する粘着抵抗力の効果

剥離経験のある砂粒子と粘着力を受ける砂粒子が混在するような河床においては、砂粒子の限界掃流力の差に起因する流砂の非平衡性が現われる。ここでは、これを(25)式のように表示した。そこで、(25)式と実験値との比較を行い、その妥当性について検討する。

Fig. 12 は、**Table 2** の条件で行れた実験の結果と(25)式において $q_{B0}=0$ とした場合の計算値を比較したものである。ただし、平衡流砂量の測定が困難であったので、 $L=250 \text{ cm}$ ($x/d=877$) のときの計算値が実験値に一致するものとして平衡流砂量 q_{Be} を定め、この q_{Be} を用いて $L=500 \text{ cm}$ ($x/d=1754$) における実験値が図示されている。また、 $L=125 \text{ cm}$ ($x/d=439$) のデータは、河床低下のため実験精度上の問題があ

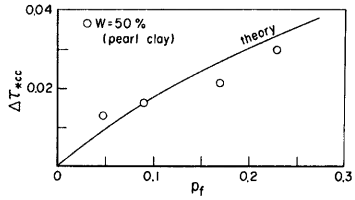


Fig. 11 The increment $\Delta\tau_{*cc}$ of the nondimensional critical shear stress due to the clay composition ratio. The theoretical curve is predicted by eq. (10).

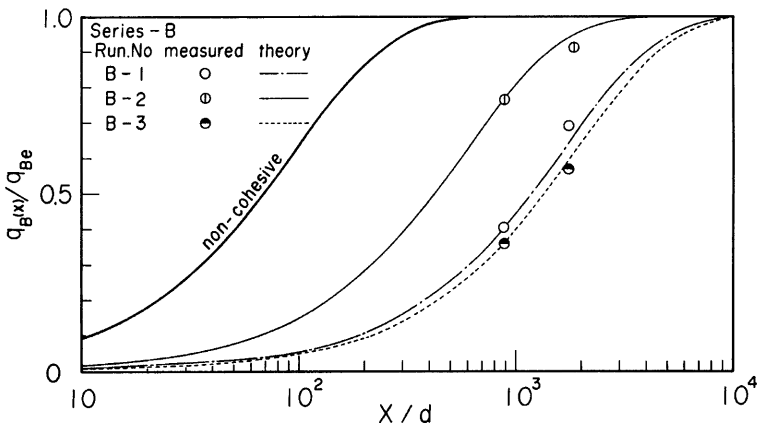


Fig. 12 The stream-wise distribution of bed load obtained from the experiments and eq. (25).

り、ここでは、除外されている。したがって、計算値と実験値の比較において有意なものは、 $x/d=1754$ の三つのデータに限られる。そこで、これらのデータと理論曲線とを比較すると、Run-1 およびRun-3 においては実験値の方が若干小さく、Run-2 においては、実験値が若干大きく現われている。しかし、図示の結果からもわかるように、両者の差違は有意なものではなく、流砂量の縦断分布は、(25)式によって十分推定できるものと思われる。

5. 結 語

本研究においては、主として、粘着性材料を含む砂礫床を対象として、砂粒子の移動限界と流砂特性について理論的および実験的考察を行った。得られた主要な結果を要約すると以下のようである。

(1) 粘土の粘着抵抗力および粘着面積の概念を導入し、砂と粘土から構成される河床を対象として、砂粒子の限界掃流力に関する表示式を提示した。同式によると、限界掃流力 τ_{kcc} は、粘土の含有率 p_f 、粘土の含水比 w および粘着抵抗力 f_c などの関数であって、 τ_{kcc} は $w=$ 一定の場合には p_f の増加関数となり、 $p_f=$ 一定のときにはある含水比で極大値をとることが示される。さらに、実験によってこのことが確かめられ、限界掃流力の表示式は、ほぼ妥当なものであることが明かにされた。

(2) 粘土を含む材料より構成される河床の流砂特性、すなわち、粘着力を受ける砂粒子と受けない砂粒子が混在するような河床における流砂量の縦断分布式を提示した。同式は、剥離経験のない砂粒子の侵食率、一旦剥離したものの侵食率および堆積率を、それぞれ別々に評価し、侵食率に関する中川・辻本の研究を適用して導かれたものである。この式によると、砂粒子の限界掃流力が大きいほど流砂の非平衡性が卓越し、掃流力が大きくなると、流砂量の分布は非粘着性材料の流砂分布に近づくことが示される。さらに、二～三の実験によって、流砂量の分布式の妥当性が確かめられた。

以上、種々の興味ある知見が得られたが、粘着力の評価法などを明らかにしていく必要がある。また、この方法を実際現象へ適用するには、現地における場の評価などについて多くの問題を究明する必要がある。

本研究は、文部省科学研究費(一般B)の補助を受けていることを記し、ここに感謝の意を表す。土質試験に際し、京大防災研究所せん断圧密実験室の試験装置を使用させていただき、地盤災害ならびに耐基基礎部門の諸氏より有意義なコメントをいただいた。また、実験や図面作成などで京都大学防災研究所吉田義則技官ならびに京都大学大学院生大槻英樹君に協力していただいた。ここに記して感謝する。

参 考 文 献

- 1) 沢田豊明・芦田和男・高橋 保：山地河道の変動と砂礫の流出に関する研究，第26回水理講演会論文集，1982，pp. 105-110.
- 2) 江頭進治・芦田和男：山地流域における微細土砂の生産場と流出過程に関する研究，京大防災年報，24号B-2，1981，pp.
- 3) 芦田和男・田中健二：粘土分を含有する砂礫床の侵食と流砂機構に関する研究，京大防災研究所年報，17号B，1974，pp.
- 4) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠儀：斜面侵食による濁度物質の生産・流出機構に関する研究，第24回水理講演会論文集，1980，pp. 135-141.
- 5) 中川博次・辻本哲郎：水流による砂礫の移動機構に関する基礎的研究，土木学会論文集，244号，1975，pp. 71-80.