

粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究

芦 田 和 男・田 中 健 二

EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT MECHANISM ON THE SANDY BED WITH SOME CLAY CONTENT

By *Kazuo* ASHIDA and *Kenji* TANAKA

Synopsis

As a basis for sediment yield estimation from bare slopes, the mechanism of erosion and sediment transport on the sandy bed with some bentonite is studied. Through experiments, the following are found and partly explained by a simplified model:

Under a constant tractive force, the bed degrades uniformly and sediment discharge increases downstream, until it reaches the transport capacity of the flow.

Rate of erosion is proportional to shear velocity, when their values are large, but not so when small.

Critical shear stress for cohesive material varies not only with its composition but with its foregoing and existing conditions.

1. 緒 言

山腹斜面や人工法面など、流出土砂の生産源となるところの表土には、通常いくらかの粘土分が含まれており、たとえその含有量がわずかであっても、侵食現象に重大な影響を及ぼしている。たとえば土の分類でいうと砂質土に属するような表土であっても、そのわずかの粘着性のために、きりたった崖面を構成することが可能になり、深い溝が刻まれて表流水が著しく集中していることはまれでない。あるいは逆に、表面がきわめて平坦な場合には、粘土分があればかえって侵食の初期において比較的均一な薄層流を生じやすくなるのも事実である。

裸地斜面からの流出土砂量を予測しようとする場合、斜面上の水理量の分布を知ることが不可欠となるが、そのような面的な問題はさておき、流れに沿った問題だけをとりあげてみても、粘土分の影響は顕著にあらわれる。

侵食現象が剝離の過程と輸送の過程とから成り立っていることは、すでに古くから指摘されてきたところであり、粘性土の侵食においては剝離過程が現象を支配し、砂質土の侵食においては輸送過程が現象を支配することが知られているが、両者の関係はいまだ明らかにされておらず、その移行の問題も明確でない。また、粘性土の侵食において、流出土砂量が斜面長にともなって増加することも以前から指摘されているが¹⁾、実験や観測の規模が限られていることや、理論的アプローチの困難さのために一般的な定量化ができず、土質や斜面長などの条件を付記した経験式がいくつか提出されているにすぎない。

一方、非粘着性河床における流砂機構ならびに河床変動に関しては、水理学的見地から従来数多くの研究がなされており、また粘土自体の侵食機構についても、化学的性質まで考慮したいいくつかの研究がなされている²⁾。

そこで本研究は、その両者を結びつけて、実際問題として重要と考えられる、若干の粘土分を含んだ砂れき床の流砂ならびに侵食現象を、できるかぎり抽象化し、外力としての掃流力と、抵抗力としての限界掃流力とから、流出土砂量を算出する一般的な方法を見い出そうとするものである。

2. 現象のモデル化

流砂現象は微視的にみれば、侵食と堆積を絶えずくり返しながら進行しており、それらがつり合っていない場合に、巨視的現象としての河床変動を生ずる。そこでこれまで、平衡状態の流砂量式を導くには、侵食量と堆積量とを流砂量に関連させた上で、何らかの平衡条件により等置するという手法がしばしば用いられてきた。河床変動はこの2つの過程の不均衡によって生ずるのではあるが、それが比較的緩慢な場合には、局所的な擬平衡状態にあるものとして、平衡状態の流砂量式を用いた解析が多く行なわれている。しかしながら、時間的・空間的变化の大きい場合には、もはや平衡状態の流砂量式をそのまま適用することには問題があり、あらためて、侵食量と堆積量とを別個に求め直す必要がある。

2.1 流砂機構

粘土分を含んだ砂れき床が侵食されると、砂れき分は河床と流水との間を往復しながら徐々に流下するが、粘土分はほとんど水流と一体となってただちに流下してしまうであろう。したがって、流砂現象を侵食と堆積の過程に分けて考えた場合、それらの過程における土砂の構成成分は異なっており、その結果、河床面は、まだ剝離していないものとの混合物の露出部と、一旦侵食されたのち輸送の過程で堆積している砂れきの被覆部とで、異なった性質をもつようになる。

Fig. 1 は河床の流下方向の微小区間を模式的に表現したもので、河床面における、粘土分を含有した土砂の部分を領域Ⅰ、輸送過程にある剝離した砂れきの部分を領域Ⅱとし、後者の面積割合を p とおいている。(したがって、通常の非粘着性河床では $p=1$ である。)それぞれの領域についての単位面積・単位時間あたりの砂れきの侵食量を $\bar{E}_1$ および $\bar{E}_2$ とすれば、河床の単位面積から単位時間に侵食される砂れきのうち、領域ⅠおよびⅡからのものは、

$$E_1 = \bar{E}_1(1-p) \quad \dots\dots\dots(1)$$

および

$$E_2 = \bar{E}_2 p \quad \dots\dots\dots(2)$$

と表わされる。

$\bar{E}_1$ の算定法についてはあとで述べるが、粘性土が砂質土よりも剝離しにくいという周知の知識から、 $\bar{E}_1$ は $\bar{E}_2$ よりも小さいことが予想される。ただし、ここでいう剝離の難易は、時間の概念をも含めたいわば侵食速度の意味であって、侵食が生じるか否かという限界値の問題ではない。事実、砂れきを移動させることがとうていできないようなごくわずかの水流でも、長時間のうちには粘土を溶かし出すことが、種々の観察によって見い出されている。

一方、河床の単位面積・単位時間あたりの砂れきの堆積量を D とすれば、流砂の連続式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial q_b}{\partial x} = E_1 + E_2 - D \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 q_b は粘土分を除外した単位幅流砂量である。

非平衡状態においては、堆積物の被覆割合 p と堆積強度 D の間に正の相関があり、それを比例関係で表現すれば、

$$p = \frac{D}{D_0} \quad \dots\dots\dots(4)$$

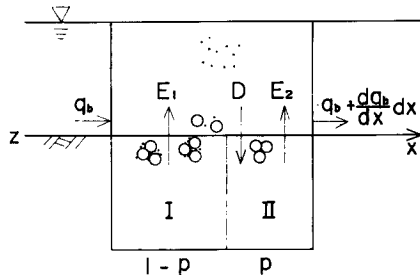


Fig. 1 Sediment balance near the bed surface.

となる。ここに $\bar{D}$ は平衡状態における堆積量である。これを(2)式に代入すれば

$$\frac{E_2}{D} = \frac{\bar{E}_2}{\bar{D}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

となり、平衡状態において $\bar{E}_2$ と $\bar{D}$ とがつり合うことを考慮すると、

$$E_2 = D \quad \dots\dots\dots(6)$$

を得る。ここで(1)式と(6)式とを(3)式に代入すれば、結局

$$\frac{\partial q_b}{\partial x} = \bar{E}_1(1-p) \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。

通常の砂れき床では E_1 が一定から、 E_2 と D を等置したのでは非平衡を論じることができないが、ここで対象とする非平衡は E_1 にもとづくものであって、それに比べて $(E_2 - D)$ が十分に小さいという意味でこの項を省略したのである。また、 q_b の時間的変化を論じようとするれば、 p の時間的変化を論じなければならず、厳密には E_2 と D を等置することはできないが、その変化速度が遅い場合にはこのような近似が許されよう。そして、(7)式は時間とは独立に解けるものと仮定する。

ところで堆積量 D は流砂量 q_b に比例し、砂れきの1ステップの平均移動距離 l に逆比例するから、平衡状態におけるそれらを $\bar{q}_b$ および $\bar{l}$ とし、さらに $\bar{q}_b \bar{l}$ を q_b' と書くことにすれば、(4)式は

$$p = \frac{D}{\bar{D}} = \frac{q_b}{\bar{q}_b} \cdot \frac{\bar{l}}{l} = \frac{q_b}{q_b'} \quad \dots\dots\dots(8)$$

となり、これを(7)式に代入すれば、

$$\frac{\partial q_b}{\partial x} = \bar{E}_1 \left(1 - \frac{q_b}{q_b'}\right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。 q_b' や $\bar{E}_1$ は河床状態によって変化する可能性があるが、主として掃流力によって決まるものとするれば、掃流力が流下方向に一定の場合にはそれらもほぼ一定となり、(9)式は容易に積分できて、

$$\frac{q_b' - q_b}{q_b' - q_{b0}} = \exp \left\{ -\frac{\bar{E}_1}{q_b'} (x - x_0) \right\} \quad \dots\dots\dots(10)$$

となる。ここに q_{b0} は、 $x = x_0$ における流砂量である。

一方、侵食にともなう河床低下は

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda'} \cdot \frac{\partial q_b}{\partial x} \quad \dots\dots\dots(11)$$

であるから、(9)式を用いれば、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\bar{E}_1}{1-\lambda'} \left(1 - \frac{q_b}{q_b'}\right) \quad \dots\dots\dots(12)$$

となり、また(10)式の条件に対しては、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\bar{E}_1}{1-\lambda'} \left(1 - \frac{q_{b0}}{q_b'}\right) \exp \left\{ -\frac{\bar{E}_1}{q_b'} (x - x_0) \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

となる。ここに z は河床面の高さ、 λ' は河床面における砂れきの空隙率で、粘土分は空隙の一部とみなしている。

(10)式および(13)式は、いずれも流下距離とともに現象がある状態へ指数関数的に漸近するという性質を表わしているが、その前提となる、 l や $\bar{E}_1$ が一定という条件の適用範囲については検討を要する。なぜなら、たとえば堆積砂れきがほとんどない場合と、逆にほぼ河床の全面を覆っている場合とでは、摩擦係数や遮蔽係数がかなり異なるものと考えられるからである。そこで、堆積砂れきの被覆割合 p がある値 $\bar{p}$ よりも大きくな

ると摩擦係数が急激に増加するものとすれば、移動を開始した砂れきが停止するまでの平均移動距離 l が急激に減少して堆積量が増加し、その結果、被覆割合の増加と平均移動距離の減少は、たがいに促進し合うことになる。したがって、このような変化がおこる p の値 $\bar{p}$ は、かなり小さいものと考えられる。また、これに付随して、遮蔽効果が急激に増大するものとすれば、侵食量 $\bar{E}_1$ は急減する。

通常の砂れき床すなわち $p=1$ における平衡流砂量 $\bar{q}_b$ への移行は、上に述べたような過程を経て達成されるものであり、逆に、 $\bar{q}_b$ を流水のもつ土砂輸送能力とみて、実際の流砂量 q_b に対する制約条件として与えれば、(10)式において $q_b = \bar{q}_b$ となる x の値

$$x = x_0 + \frac{q_b'}{\bar{E}_1} \ln \frac{q_b' - q_{b0}}{q_b' - \bar{q}_b} \quad \dots\dots\dots (14)$$

が、その適用範囲の上限となる。 $\bar{q}_b$ が実際に q_b の上限値であるかどうかはさらに検討を要するが、たとえ q_b が $\bar{q}_b$ をうわまわることがあるにしても、それは一時的もしくは局所的なものであると思われる。したがって、掃流力が一定の場合には、 $\bar{x}$ よりも下流ではどこでも平衡流砂量になっているものとすれば、

$$q_b = \bar{q}_b \quad (x > \bar{x}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

である。

一方、非平衡の領域 ($x < \bar{x}$) での l と p に関する上述のことは、

$$l \gg \bar{l} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$p = \frac{q_b}{q_b'} \ll 1 \quad \dots\dots\dots (17)$$

と表わされ、これを用いると、(9)式、(12)式、ならびに(14)式はそれぞれつぎのように近似される。

$$\frac{\partial q_b}{\partial x} = \bar{E}_1 \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\bar{E}_1}{1 - \lambda'} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$x - x_0 = \frac{q_b - q_{b0}}{\bar{E}_1} \quad \dots\dots\dots (20)$$

そして、水理条件が与えられれば、 $\bar{q}_b$ は従来の平衡状態の流砂量式によって得られるから、問題は侵食速度 $\bar{E}_1$ の決定に帰着する。

Fig. 2 は、掃流力が一定の場合の流砂量の距離的变化を、模式的に表わしたものである。

2.2 侵食機構

粘土分を含有する砂れき床の侵食速度は、従来それぞれの混合状態における固有のものとして取り扱われてきたが、ここではさらにその土砂を粘土分と砂れき分に分け、それらが交互に剝離されるものと考ええる。そして **Fig. 3** に示すように、ひとつの砂れき粒子の剝離の過程に要する時間 T を、周囲の粘土が侵食されて砂れきが移動しやすい状態になる過程 T' と、

そのような状態になったのち、実際に砂れきが移動するまでの過程 $\bar{T}$ とに分割する。ここで、「移動しやすい状態」とは、大きな外力さえ作用すれば、ほとんど瞬間的に粒子が移動するような状態のことである。厳密にはどんなに大きな外力が作用しても、粒子の剝離が完結するには、ある程度の時間が必要であるが、その時間

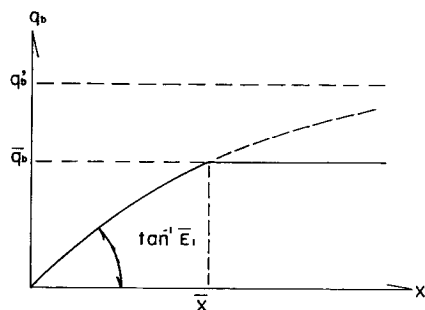


Fig. 2 Longitudinal variation of sediment discharge under a constant applied force (modeled).

は粒子の存在状態によって異なるから、それをある基準によって分けるのである。

このような分割は、粘土分を含有する砂れき床に限らず、概念的には通常の砂れき床においても可能であり、ことに混合粒径の場合に有用となるのではなかろうか。

これに対し、Paintal³⁾ は、一様粒径の流砂量式の誘導において、粒子の配列の不規則性に着目して露出度によって移動しやすさが変わるとし、それを確率的に表示したが、時間の概念は少なくとも表面には出ていない。また、Yalin⁴⁾ が uppermost layer と称しているものも、類似の概念である。そして、しばしば用いられる遮蔽係数というのは、これらの効果を含んだものと解され、その一部は河床面における uppermost layer の割合を示すことになる。しかしながら、露出度の分布や遮蔽係数は粒度分布によって異なり、ことに粘土分を含むような場合には全く未知の問題である。

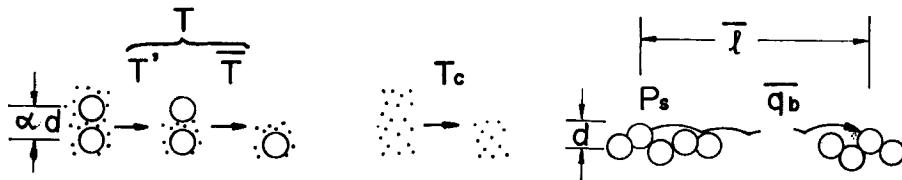


Fig. 3 Division of an erosion cycle.

そこで著者らは、個々の砂れきの剝離過程に着目して、時間分割の方法をとるのである。そして、「移動しやすい状態」というのを、周囲の粘土がほとんどとれた状態として、 T を T' と $\bar{T}$ とに分割するから、 $\bar{T}$ は通常の砂れき床において、同じ位置から砂れきがとび出す時間間隔にほぼ等しいものと考えられる。これははいかえれば、平衡状態の流砂機構における、単位時間内の砂れきの移動確率 P_s の逆数であって、

$$\bar{T} = \frac{1}{P_s} \quad \dots\dots\dots (21)$$

となるが、平衡流砂量 $\bar{q}_b$ は

$$\bar{q}_b = P_s(1-\lambda)d\bar{T} \quad \dots\dots\dots (22)$$

と表わされるから、

$$\bar{T} = \frac{(1-\lambda)d\bar{T}}{\bar{q}_b} \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。ここに、 λ は砂れき床の空隙率、 d は砂れきの直径である。砂れきの平均移動距離 $\bar{l}$ は、主として粒径によって決まり⁵⁾、

$$\bar{l} = A_L d \quad \dots\dots\dots (24)$$

と表わされる。

通常の砂れき床では、ひとつの砂れきが移動しても、そのすぐ下に別の砂れきが露出しており、また上流から流れてきた砂れきがそこに堆積することもあるが、常に「移動しやすい状態」が保たれるわけであるが、粘土分を含有する砂れき床では、つぎの粒子が露出するまでにはかなりの時間が費やされる。これが T' であり、粘土のみの河床が d だけ低下するのに要する時間を T_c とし、係数 k_1 を導入して

$$T' = k_1 T_c \quad \dots\dots\dots (25)$$

と表わすことにすれば、侵食の周期は

$$T = k_1 T_c + \bar{T} \quad \dots\dots\dots (26)$$

となる。 k_1 は、砂れきの存在が粘土の侵食に及ぼす効果ならびに、砂れきの存在距離間隔によって決まるもので、実験によって求めなければならない。また T_c は、粘土の侵食速度（河床低下速度）を E とすれば

$$T_0 = \frac{d}{E} \dots\dots\dots (27)$$

であるが、 E の値は掃流力や粘土粒子の大きさだけでなく、その鉱物組成や含水比、配向度などによっても変化し、現在のところ、実験的に求める以外に適当な方法がないようである。

最後に前節との関連であるが、ここでは侵食の過程だけを考えているから、 T の間に混合河床は、砂れき粒子の存在距離 ad だけ低下し、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{ad}{T} \dots\dots\dots (28)$$

となる。そこで(23)、(24)、(26)、(27)および(28)式を順次用いて、前節の(19)式に代入すれば、 $\bar{E}_1$ はつぎのようになる。

$$\bar{E}_1 = \frac{\frac{a(1-\lambda')}{k_1 + \frac{A_L(1-\lambda)d}{qb}}}{E} \dots\dots\dots (29)$$

3. 侵食ならびに流砂実験

これまでに述べたモデルの妥当性を検討するとともに、このモデルによって侵食量および流砂量を計算する際に必要となる粘土の侵食速度を求めるために、いくつかの実験を行なった。粘性土の受食性は、その種類や存在状態によって非常に異なるが、以下に述べる一連の実験では、市販のベントナイト粉末を実験前に練ったものを用いている。ベントナイトはきわめて活性度の大きな粘土で、ごく少量で粘着性の効果を発揮できると、また、透水現象をほぼ除外できることなどの利点がある。しかしながら、その性質の特異性や存在頻度の問題からいえば、決して代表的な粘土とはいえず、ここではあくまでも侵食ならびに流砂機構の解明のために用いるのであって、得られた数値をそのまま現実問題に適用しようとするものではない。

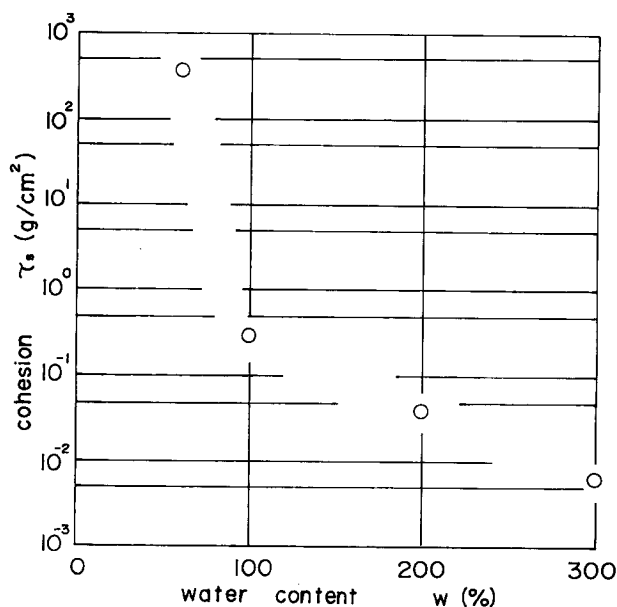


Fig. 4 Shear strength of bentonite.

3.1 ベントナイトの土質

Table 1 は、JIS に準じて求めた、ベントナイトの粒径およびコンシステンシー指数、Fig. 4 は、含水比とせん断強度の関係を示したものである。せん断強度は、含水比 60% に対しては一軸圧縮試験機、100%、200%、300% に対しては円錐型回転式粘度計を用いて、練り返し直後に測定し、粘着力として表現した。このように、ベントナイトはその膨潤性のために、きわめて高い含水比までかなりの粘着力を発揮する。

3.2 粘土の侵食速度

粘土の侵食速度は水理条件と土質条件によって決まるが、ここでは粘土の種類をベントナイトに固定して、含水比と練り返し後の時間を変化させ、種々の水理条件における侵食速度を求めた。実験に用いた水路は幅が 20 cm で、水路途中 1 m の長さにならって深さ 3 mm の凹部を設け、そこにベントナイトを敷きならしている。通水は断続的に行ない、通水中に水位を、停水時に河床位を測定した。流量が小さい場合には、剝離した粒子のうち比較的粗いものが、一部掃流形式で流れるが、ある程度以上の流量に対しては、剝離した粒子はすべて浮遊し、河床はほぼ一様に低下する。

実験範囲は、勾配 $1/400 \sim 1/25$ 、単位幅流量 $10 \sim 450 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 、含水比 60~300% であり、敷きならしの 30 分後に通水を開始したものについて、含水比ごとに掃流力 τ と河床低下速度 E の関係を整理したのが Fig. 5

Table 1 Characteristic parameters of bentonite

diameter (μ)		
d_{50}	d_{68}	d_{max}
0.6	2	48
consistency (%)		
LL	PL	PI
300	40	260
activity=3.8		

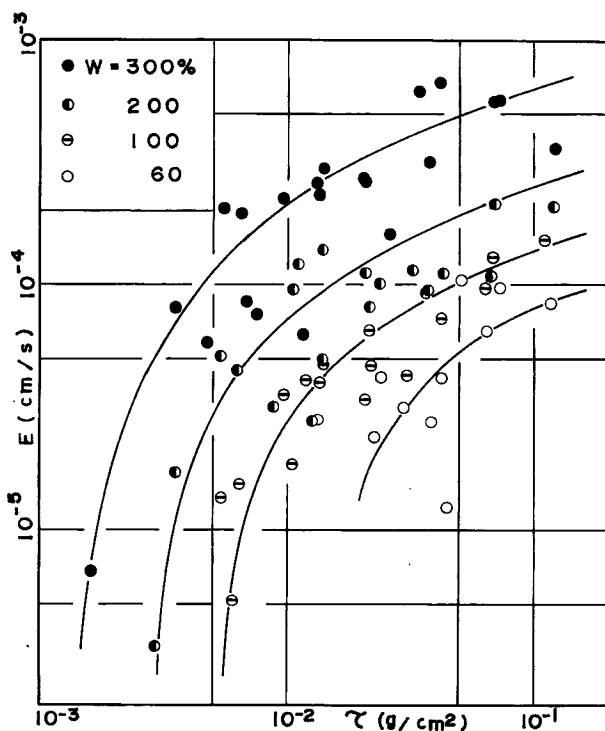


Fig. 5 Rate of erosion related to the tractive force.

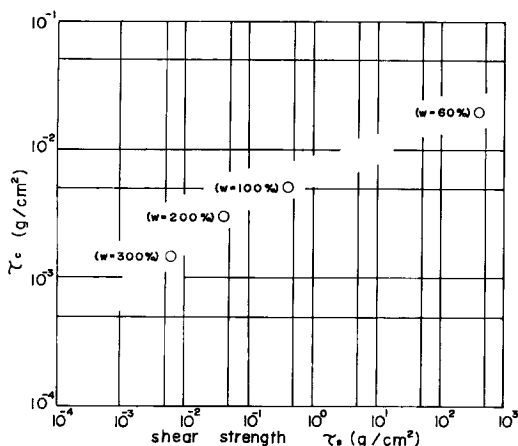


Fig. 6 Critical tractive force compared with the shear strength.

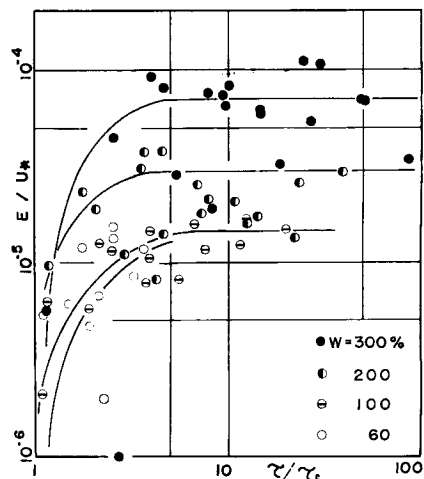


Fig. 7 Dimensionless representation for rate of erosion.

である。この図からわかるように、含水比 w によって侵食速度は大きく異なり、また各含水比については、掃流力と侵食速度の間に明確な相関があって、しかも、ある掃流力以下では侵食速度が急減する。そこでこの掃流力を限界掃流力 τ_c と定義するが、これは粘土の抵抗力を示すものであるから、前節で求めたせん断強度 τ_s と比較してみると、Fig. 6 のようになる。液性限界付近では両者の差はそれほど大きくないが、含水比の減少にともなってせん断強度が急激に増大し、とりわけ塑性限界の近傍においてそれが著しいのに対し、限界掃流力は、増加はするものの、せん断強度ほどにはそれが顕著でない。その結果、含水比60%では、両者の差は10000倍以上にもなる。

Fig. 7 は、侵食速度 E と掃流力 τ を、摩擦速度 u_* と限界掃流力 τ_c でそれぞれ無次元化して表わしたもので、 τ/τ_c が1に近いところでは、掃流力の増加にともなって侵食速度が急増するが、 τ/τ_c が5程度をこえると、 E/u_* は含水比ごとにほぼ一定値をとるようになる。すなわち、掃流力の大きい範囲では、侵食速度は摩擦速度に比例する。これは、非粘性河床の掃流砂量が掃流力の大きい範囲で摩擦速度の3乗に比例することや、浮遊砂量がさらに高次のべき乗に比例することと比較すると、きわめて特徴的なことがらである。またFig. 7 を Fig. 5 と比較すると、 $w=60\%$ のものを除けば、各含水比に対する E/u_* の収束値が、限界掃流 τ_c にほぼ反比例している。

粘土の練り返し後の時間による受食性の変化については、系統的な実験は行っていないが、30分後と17時間後に行なった若干の例の比較や、文献⁶⁾によれば、練り返し後数時間は、時間とともに強度が増加するようである。

なお、限界掃流力に関連した観察事項として、Fig. 5 から定義した限界掃流力よりもはるかに小さい掃流

Table 2 Combinations of experiment variables
(width: 20 cm; inclination: 1/100)

Series No.	discharge q (cm ² /s)	length L (m)
I	71	1.6, 3.6, 6.6, 13.8
II	9.5, 16.5, 27, 44, 71	3.6

Table 3 Compositions of bed materials

		definition	%		
clay content		$W_c/(W_s+W_c)$	0	5	10
porosity	λ	$1-(V_s+V_c)/V_t$	40	42	45
	λ'	$1-V_s/V_t$	40	45	52
water content	w	$W_w/(W_s+W_c)$	29	27	32
	w'	W_w/W_c	∞	540	320

W: weight V: volume s: sand c: clay w: water t: total

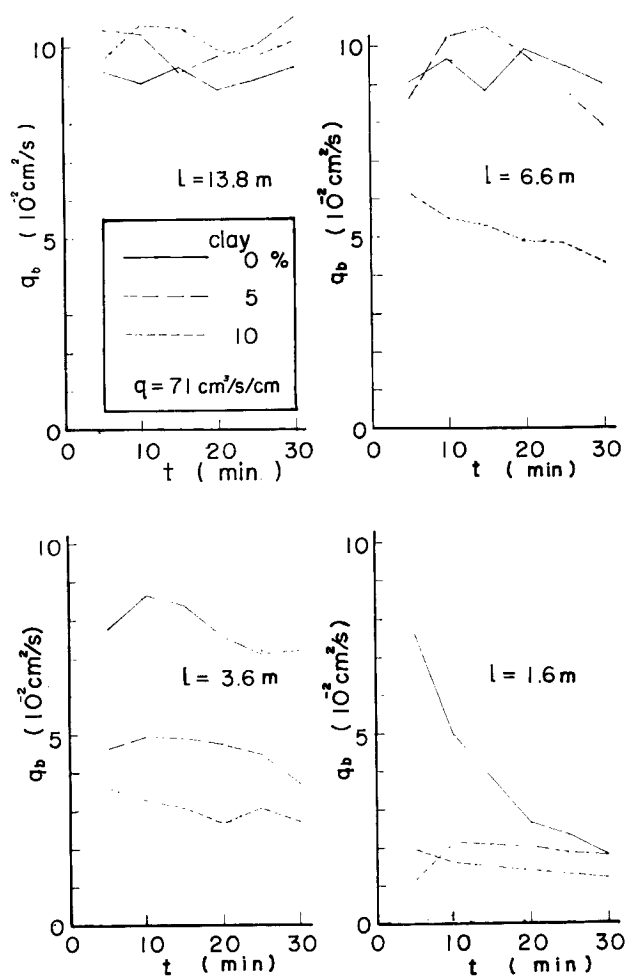


Fig. 8 Sediment discharge (Series I).

力しかもたず、通常の方法では測定すらできないような微弱な流れにおいても、長時間のうちに顕著な侵食が進行したことをつけ加えておく。

3.3 粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂

地面の耐食性にもとづく流砂の非平衡問題をできるだけ単純化した形で抽出するため、砂れき材料として平均粒径 1.0 mm , $\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.14$ の一様砂, 粘性材料としてベントナイトを用いた水路実験を行なった。水路は幅 20 cm , 長さ 16 m , 勾配 $1/100$ で, 砂とベントナイトの混合物を 3.1 cm の厚さで所定の長さにわたって敷き, その前後には, 同じ高さに砂をニスづけしている。**Table 2** に示すように, 実験は2つのシリーズからなっており, Series I は流量 q を一定にして河床長 L を変えたもの, Series II は河床長 L を一定にして流量 q を変えたものである。そしてどちらのシリーズも, 粘土含有率を 0% , 5% , 10% の3種類ずつ変化させている。**Table 3** は, それぞれの粘土含有率に対する, 練り混ぜ時の各成分の比率を表わしたもので, w は土砂全体としての含水比, w' は砂分を除外した粘土の部分だけの含水比であるが, 侵食現象において重要な因子となるのは後者である。通水時間はいずれも30分で, 下流端で5分おきに1分間ずつ, 砂分だけを採取した。**Fig. 8** および **Fig. 9** に示すように, clay 0% - $L = 1.6\text{ m}$ のものを除けば, 流砂量 q_b の時間的変化

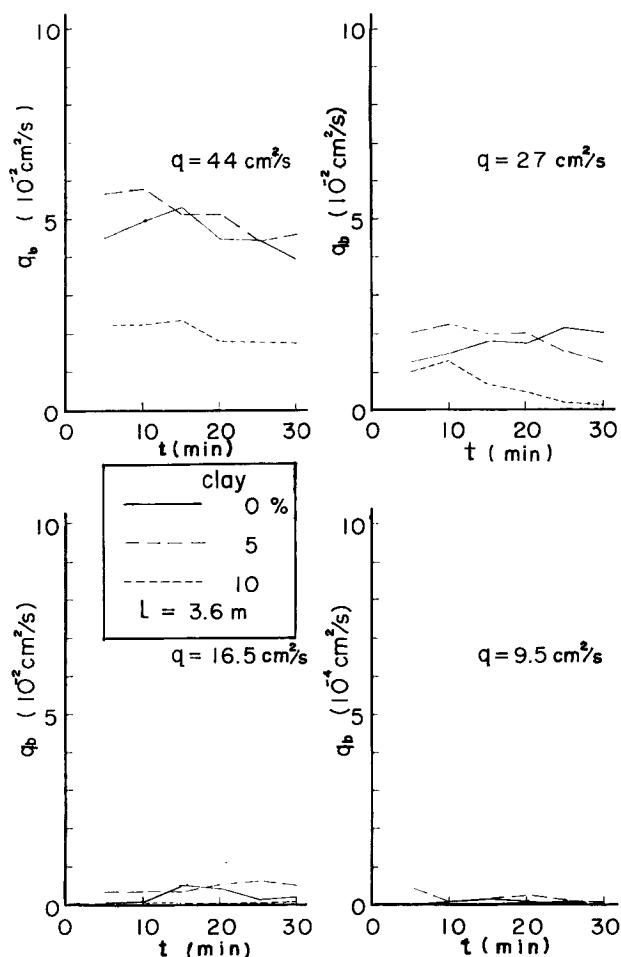


Fig. 9 Sediment discharge (Series II).

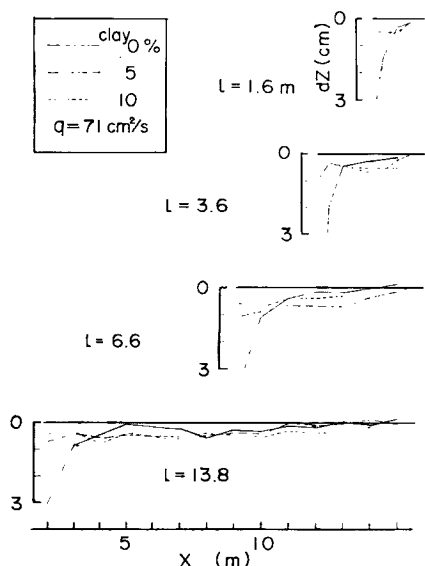


Fig. 10 Bed degradation (Series I).

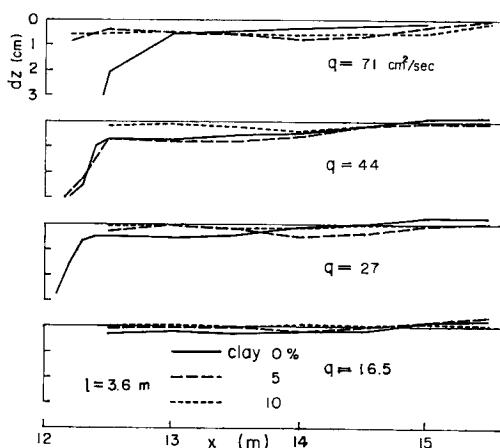


Fig. 11 Bed degradation (Series II).

は顕著でないで、30分間の平均値をもってそれぞれの通水に対する流砂量とする。clay 0%— $L=1.6$ mにおいて流砂量が時間とともに急減しているのは、Fig. 10 にみられるように河床勾配が減少したためであり、この条件に対する流砂量 q_b は、初期の値を採用する。

Fig. 10 および Fig. 11 は30分後の河床低下量を示したものであるが、clay 5%— $q=44$ cm²/S は、粘土分を含んでいて流量もそれほど大きくないにもかかわらず、上流で激しく洗掘が生じており、異常な現象であると考えられるので、以下の考察では除外することにする。これらの図からわかるように、砂河床では上流部だけが激しく洗掘されて、少し下流からはほとんど低下していないのに対し、混合河床では、緩慢にはあるがかなり長い区間にわたってほぼ平行に低下が生じ、ある距離 x においてそれが急にとまっている。

Fig. 12 は河床長 $x(=L)$ と流砂量 q_b の関係を示したもので、砂河床の場合は河床長による流砂量の差異

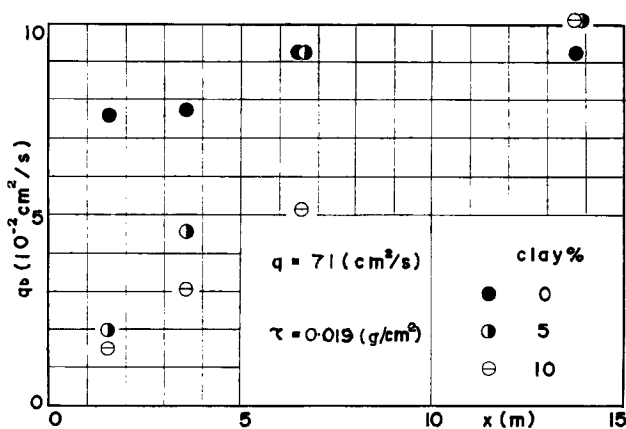


Fig. 12 Longitudinal variation of sediment discharge under a constant applied force (measured).

がほとんどないが、混合河床の場合は河床長が短い間は流砂量がほぼ直線的に増加し、それがある値に達するとほとんど増加しなくなっている。そして、その値は粘土含有率によらずほぼ一定である。また、当然のことであるが、それに対応する河床長は、上に述べた $\bar{x}$ と一致する。

なお観察によれば、混合河床においては、上流では剝離した土砂はほとんど存在せず、下流へ行くにしたがってその面積割合 ρ が増加するが、すでに河床低下のまわっている領域に至っても、それが河床の全面を覆うことはなく、あたかも固定床の上に砂をまき散らしたかのような状態を呈している。

Fig. 13 は流量 q と流砂量 q_b の関係を示したもので、同じ粘土含有率に対しては q と q_b に正の相関があるが、その変化のしかたは粘土含有率によってかなり異なり、流量の大きい場合には粘土含有率の増加とともに流砂量が減少するが、流量の小さい場合には、粘土含有率によらず流砂量はほぼ等しい。また、流砂が存在しなくなる限界流量は粘土含有率によらずほぼ一定で、その付近では流量の増加にともなって流砂量が急激に増加するが、砂河床の場合には大きな流量においても q_b が q にほぼ比例して増加するのに対し、混合河床の場合には、 q の増加にともなって q_b の増加率が減少する。

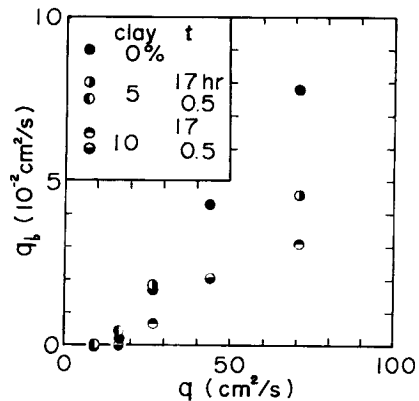


Fig. 13 Sediment discharge related to the applied force ($i=1/100$, $L=3.6$ m, t denotes the time after setting).

4. 考 察

4.1 実験結果とモデルの比較

前節の実験結果によれば、

$$q_b/\bar{q}_b = \begin{cases} x/\bar{x} & (x \leq \bar{x}) \\ 1 & (x \geq \bar{x}) \end{cases} \quad (30)$$

$$1 & (x \geq \bar{x}) \quad (31)$$

であるが、これは、流砂機構のモデル化の最後に導いた(18)式で、 $\bar{E}_1$ を一定とし、上流からの給砂がないという境界条件

$$q_{b0}=0 \quad (x_0=0) \quad (32)$$

を与えることによって得られる。また、(18)式的前提である、剝離した砂の被覆割合 ρ が小さいという条件は実験結果と一致し、 $x \geq \bar{x}$ において遮蔽効果が実際に存在していることがわかる。そして ρ が小さければ、河床面の空隙率 λ' は領域 I のものにほぼ等しいから、上のことから(19)式より、 $x \leq \bar{x}$ において河床がほぼ平行に低下することが説明できる。

混合河床では平衡流砂量に達するまでにかなりの河床長を要するのに対し、砂河床では河床長が短くてもすでに平衡流砂量に達しているということは、最初の予想どおり、 $\bar{E}_1$ にくらべて $\bar{E}_2$ ははるかに大きいことを表わしている。

ある河床長 x において、掃流力(流量)が大きいときに粘土含有率の増加とともに流砂量が減少することは、その掃流力に対する $\bar{x}$ が x よりも大きいということであり、掃流力が小さいときに粘土含有率によらず流砂量がほぼ等しいということは、その掃流力に対する $\bar{x}$ が x よりも小さいということである。これを(20)式と照らし合わせれば、掃流力の増加にともなって $q_b/\bar{E}_1$ が増加するということになり、前節の最後に述べたことがらと対応する。

q_b と $\bar{q}_b$ との大小関係をさらに細かく議論すれば、Fig. 12 や Fig. 13 において、 q_b の方がやや大きくなっ

ている測定値もあり、輸送能力と平衡流砂量との関連の問題として注目されるが、これについては、比較的なめらかな固定床における、砂れきの被覆割合と、流砂量あるいは砂れきの平均移動距離の関係を調べる実験を、別に行ないたいと考えている。また、それによって、流砂モデルで仮定した(16)式や(17)式の適否を検討することができるであろう。

つぎに侵食モデルの検討であるが、平衡流砂量、粘土の侵食速度、および混合河床の低下速度の実測値を用いて、(23)、(27)、(28)式から、 $\bar{T}$ 、 T_e 、 T を求めることにする。ただし、それらと比較するには、粘土の状態と掃流力をそろえなければならず、適当な実験資料は、粘土含有率10%の混合河床と含水比300%の粘土の組み合わせによる、つぎの2例となる。

例1. $q=71 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合

$$\bar{T}=6.5 \text{ 秒}, T_e=375 \text{ 秒}, T=383 \text{ 秒}$$

例2. $q=16.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合

$$\bar{T}=1600 \text{ 秒}, T_e=495 \text{ 秒}, T=2083 \text{ 秒}$$

ただし、 $A_L=100$, $\alpha=1$ とおいた。

このように、2例とも

$$T \approx \bar{T} + T_e \dots\dots\dots (33)$$

が成り立っており、これを(26)式と比較すると、

$$k_1 \approx 1 \dots\dots\dots (34)$$

となる。現在のところ検討例はこの2つしかないが、例1はかなり活発な流砂が存在する場合、例2は限界掃流力を少しうまわった場合であるから、(33)式あるいは(34)式は、かなり広範囲にわたって成立するのではないかと考えられる。このように、たとえ速度が遅くても河床のすべての構成要素が侵食される場合には、全体としては、粘土の侵食速度が砂れきの存在によってほとんど影響されていないことになるが、微視的にみれば、それは砂れきの露出度によって刻々変化しているであろう。これについては、流れの局所的な性質との関連でみていかねばならない。

4.2 粘土の侵食機構

粘土の侵食速度に関する実験のところで述べたように、粘土の各状態に対して、侵食速度が急激に変化する掃流力があり、それを限界掃流力と定義したが、含水比の小さい場合にはこの値が粘土の土塊としてのせん断強度よりもはるかに小さいことや、上のように定義した限界掃流力よりもずっと小さな掃流力において、速度は遅いがなお明確な侵食が進行することなどから、粘土の侵食には、表面付近における粘土の溶脱作用あるいは膨潤作用が重要な影響をもっていることがうかがわれる。これは、田中⁷⁾の指摘する「粒子結合分解作用」に対応するものであろう。この作用のために、河床面付近では含水比が高くなっており、局部的にせん断強度が低下しているものと考えられる。また、大きな掃流力に対する E/μ_* の収束値が含水比によって異なるのは、たとえ掃流作用が同じであっても、侵食の前提となる河床面近傍の弱体化に要する時間が異なるからであろう。

一方、このような性質がベントナイト以外の粘土にもあてはまるかどうかは今のところ不明であり、いずれにしても、粘土の侵食機構に関しては、電気化学的な面からの検討が必要であるように思われる。しかしながら、実用的見地からすれば、代表的とみなされるいくつかの粘土について、このような資料を蓄積していくのも有益なことであり、他方、実際の個々の斜面構成材料に対して、そのサンプルから受食性を直接に求めるような、簡易試験法を見い出していくことも意義があろう。

5. 結 論

以上、裸地斜面における流出土砂量を予測するための基礎として、粘土分を含有する砂れき床の侵食ならびに流砂機構について、モデル化と実験を行ない、つぎの結果を得た。

1) 流砂量が流水のもつ土砂輸送能力に満たない場合には、侵食が進行するが、その速度は掃流力と河床材料によって決まり、流砂量そのものにはあまり影響されない。その結果、掃流力が一定の場合には、平衡流砂量に達するまで河床はほぼ平行に低下し、流砂量は距離に比例して増加する。

2) 粘土分を含有する砂れき床の侵食速度は、個々の砂れきの侵食の過程を、周囲の粘土が剝離して砂れきが移動しやすい状態になる過程と、そのような状態になったのち実際に砂れきが移動するまでの過程とに分けて考えることによって、平衡流砂量と粘土の侵食速度から求めることができる。

3) 粘土の侵食速度は、水流の条件だけでなく粘土の性質や存在状態によって異なるが、ベントナイトに関するかぎり、含水比を一定にすれば、大きな掃流力の範囲では摩擦速度にほぼ比例し、その係数は 10^{-5} のオーダーをもつ。

しかしながら、粘土の侵食機構については未知の要素が多く、電気化学的な面からの検討が必要であるように思われる。また、本研究でとりあげた問題は比較的一様な場における擬似定常状態に対するものに限定されており、これをより普遍的な問題にまで発展させるには、混合粒径の問題や粒子の運動機構を含めたさらに詳細な検討、ならびに拡幅や蛇行など流路の横方向の変動についての研究を進めていかなければならないものと考えている。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・土屋義人：雨水流による土砂の剝離と輸送について，土木学会論文集，第51号，昭32. 3.
- 2) ASCE Committee on Sedimentation: Erosion of Cohesive Sediments, Proc. ASCE, Hy 4, July, 1968.
- 3) Paintal, A. S.: A Stochastic Model of Bed Load Transport, Journal of hydraulic research, Vol. 9, No. 4, 1971.
- 4) Yalin, M. S.: Mechanics of Sediment Transport, Pergamon, 1972, p. 77.
- 5) 矢野勝正・土屋義人・道上正規：砂れきの流送機構の確率過程としての特性について，京大防災研究所年報，第11号 B，昭43.
- 6) Partheniades, E.: Erosion and Deposition of Cohesive Materials, River mechanics, Vol. II, ed. by H.W. Shen, 1971.
- 7) 田中 茂：急斜面土壌浸蝕の機構に就て，土木学会誌，第33巻，4号，昭23. 4.