

京都大学防災研究所 正会員 芦田和男
京都大学 大学院 学生会員 O 田中健二

1. まえがき

表土に含まれる粘土分は、含有率がわずかであっても、その粘着力にともなう耐侵食性のために、流砂現象に重大な影響を及ぼしており、その機構を解明することは、土砂生産量を予測するにあたり、きわめて有用なものとなるであろう。前報¹⁾では、その基礎的な場合として、一様砂にベントナイトの混入した河床における流砂機構を考察し、流砂量を求める上での問題点を粘土自体の侵食速度に帰着させたが、本報は、その粘土の侵食について、さらに検討を加えたものである。

2. 流砂機構のモデル化

河床面を、混合物の領域Ⅰおよび一旦侵食されたのち堆積した砂粒の領域Ⅱに分けた場合、流砂の非平衡が、領域Ⅰにのみ起こるものとすれば、流砂の連続式はつぎのようになる。

$$(1-\chi) \partial z / \partial t = \partial g_b / \partial x = \bar{E}_1 (1-\phi) \quad (1)$$

ここに、 z は河床面の高さ、 g_b は掃流砂量、 $\bar{E}_1$ は領域Ⅰにおける単位面積・単位時間あたりの砂粒の侵食量、 ϕ は領域Ⅱの占める割合、 χ は河床における砂の空隙率である。等流状態での実験によると、上流端からある長さまでは、流砂量はほぼ直線的に増加し、それにとまって河床面における砂粒の割合も徐々に増加するが、それがある値 $\bar{\phi}$ ($\ll 1$) に達すると急激に遮蔽効果が現われて、流砂量は一定値 $\bar{g}_b$ となる。すなわち、

$$\phi < \bar{\phi} \text{ のとき } \bar{E}_1 \approx \text{const.}, \quad \phi \geq \bar{\phi} \text{ のとき } \bar{E}_1 = 0 \quad (2)$$

である。上流部での一定値 $\bar{E}_1$ については、混合物の侵食時間を、砂粒の周囲の粘土が侵食されて砂粒が移動し得る状態になる時間 $\bar{\tau}$ と、そのような状態になったのち実際に砂粒が移動するまでの時間 $\bar{\tau}'$ とに分解すれば、

$$(1-\chi) d / \bar{E}_1 = T = \bar{\tau}' + \bar{\tau} = k_1 T_c + \bar{\tau} \quad (3)$$

が成立立つ。ここに、 d は砂粒の直径、 T 、 T_c はそれぞれ混合物および粘土河床が d だけ低下するのに要する時間、 k_1 は係数である。 $\bar{\tau}$ は、砂河床における平衡条件より、次式で求められる。

$$\bar{\tau} = (1-\lambda) d l / \bar{g}_b \quad [\lambda: \text{砂河床の空隙率}, \quad l: \text{砂粒の平均移動距離}] \quad (4)$$

3. 粘土の侵食速度

粘土の侵食速度は、掃流力や含水比、練り返しの時間によつて変化する。また、砂と混在する場合には、周囲の砂粒との相対的な位置関係によつて局部的に流れが変化するため、時間的にも空間的にも変動するであろう。現に、粒径 5 mm の礫とベントナイトの混合河床に、両者の限界掃流力の中間の掃流力を作用させると、礫の間隙のベントナイトはわずかに侵食されるが、礫の頂面から 2.5 mm 程度低くなると、それも停止する。しかし、掃流力が砂礫の限界掃流力をうわまわる場合には、砂礫の移動直後にはその周囲の粘土の侵食が促進されるものと考えられ、それらの効果を平均化した係数 k_2 を若干の資料から式(3)で逆算したところ、ほぼ1であった。

そこで、上に述べたモデルに従つて流砂量を算出する場合に必要な T_c の値、すなわち粘土自体の侵食速度を求めるために、幅 20 cm の水路の、 1 m の区間にベントナイトをしき、定常流を流して河床低下速度を測定した。実験条件は、こう配 $\frac{1}{400} \sim \frac{1}{25}$ 、単位掃流量 $10 \sim 450 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、含水比 $60 \sim 300\%$ で、ベントナイトをしきならした約 30 分後に通水している。図-1は掃流力と河床低下速度の関係であるが、それぞれの含水比ごとにそれらが正の相関を示し、また、ある掃流力以下では侵食速度が急減する。これを限界掃流力ということにすれば、それは粘土の抵抗力を示すものであるから、粘土の強度と何らかの対応がつくであろう。そこで土質試験を行な

表-1 実験に用いたベントナイトの土質試験結果

$d_{65} = 1.55 \mu$	$d_{max} = 0.048 \text{ mm}$	$w_L = 302 \%$	$w_p = 40.3 \%$	$Activity = 3.85$
$\tau_s (w = 300 \%) = 0.006 \text{ g/cm}^2$		$\tau_s (w = 200 \%) = 0.036 \text{ g/cm}^2$		
$\tau_s (w = 100 \%) = 0.25 \text{ g/cm}^2$		$C_u (w = 60 \%) = 370 \text{ g/cm}^2$		

ここに、 τ_s : 円錐型粘度計における残留せん断強度, C_u : 一軸圧縮試験によるせん断強度

った結果が表-1である。このように、ベントナイトのせん断強度は含水比の減少とともに、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。これに対して図-1に見られる限界掃流力は、含水比の減少とともに、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。

4. 考察

まず粘土の限界掃流力であるが、図-2の関係を外挿すれば、液性限界を越える含水比の場合にはせん断強度とほぼ一致し、含水比の減少により、塑性が卓越してくるにつれてせん断強度との開きが大きく現われる。これは、せん断強度が粘土の土塊としての強度を反映するのに対し、限界掃流力は河床面近傍の個々の粘土粒子の粘着力を反映しているからであろう。すなわち、土塊としての含水比が低い場合でも、流れに接している河床面付近では膨潤作用により、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、膨潤作用は時間とともに進行するから、表面付近の含水比は時間とともに増大することになる。したがって、限界掃流力を知るには、河床面近傍の含水比の変化を解明する必要がある。

つぎに侵食速度であるが、Partheniadesのモデル²⁾を若干修正すれば、

$$E \propto \frac{d}{t(\tau)} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\tau_c/(k\tau\tau_0) - 1/\eta_0}^{\tau_c/(k\tau\tau_0) - 1/\eta_0} \exp\left[-\frac{\omega^2}{2}\right] d\omega \right] \quad (5)$$

となる。ここに、 E は低下速度、 d は粒径、 $t(\tau)$ は粒子の剥離に要する時間、 η_0 は無次元化した掃流力の標準偏差、 k は限界掃流力と粒子の抵抗カとを結びつける係数である。 $t(\tau)$ は形式的にはEinsteinの掃流砂モデルにおける交換時間に対応するが、つぎのようにして掃流力との関係をつけることができよう。すなわち、質量 m 、抵抗カ R の粒子が、外力 F のもとで等加速度運動を行ない、

S だけ動いたときに抵抗カを失い、剥離するものとすれば、抵抗カを限界掃流力、外力を掃流力であるとして、

$$t(\tau) = \{2mS/(F-R)\}^{1/2} \propto d / \{u_* \sqrt{1 - (\tau_c/\tau)}\} \quad [\because \frac{m \propto d^3}{F \propto \tau d^4} \frac{S \propto d}{R \propto \tau_c d}] \quad (6)$$

となる。これを式(5)に代入して無次元化し、さらに、外力が抵抗カをうわまわる確率 $[]$ を P とせば、

$$E/u_* \propto P \cdot \sqrt{1 - (\tau_c/\tau)} = f_n(\tau/\tau_c) \quad (7)$$

となって、 E/u_* は τ/τ_c の関数となり、しかも τ/τ_c の増加とともにある一定値に漸近する。そこで、図-1に得られた資料を τ/τ_c と E/u_* の関係として整理しなおしたのが図-3である。かなり大きなばらつきがあるが、各含水比ごとにみれば、 τ/τ_c が5を越えると E/u_* はほとんど増加しておらず、上記のことをうらうけている。図-3で E/u_* の収束値が含水比によらず異なるのは、掃流力によって粘土粒子の剥離が生ずる前提となる河床面近傍の弱体化の速度が含水比によって異なり、それが侵食速度を制御しているためではないかと考えられる。

5. あとがき

以上、粘土・砂混合河床における流砂機構についてモデル化を行ない、実験資料にもとづいて検討した。これをさらに発展させるには、河床面における粘土の膨潤作用をとり入れる必要があるように思われる。

参考文献 1) 芦田和男, 田中健二: 粘土砂混合河床における流砂機構に関する研究, 48年関西支部年講概要

2) E. Partheniades: Erosion and Deposition of Cohesive Soils, Proc. ASCE, HY1, Jan. 1965.

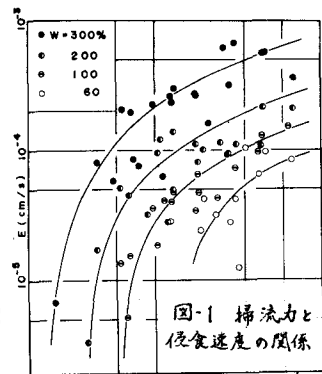


図-1 掃流力と侵食速度の関係

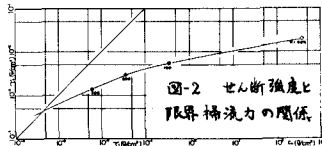


図-2 せん断強度と限界掃流力の関係

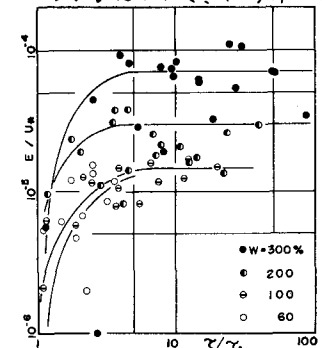


図-3 侵食速度の無次元表示