

1 はしがき

土砂と多量に含む流れの発生機構に二つあると考えられる。一つは地すべりなどに引きつづいて生ずる流れのように、大量の水分を含む土塊が動き出して流動する場合と、他の一つは表面流の作用で土砂が流れの中に取り入れられ、高濃度の流れと生ずる場合である。前者の発生条件は、土質力学的な安定条件で済み、問題は自然地盤中のまきつ角、粘着力といかに正しく見積るかにある。これに対して後者の発生条件は必ずしも明らかでない。本文は、後者の、表面流の作用による高濃度の流れととりあつたつにものど、比較的粗いれきを用いて発生条件の妥当性を検討するとともに、このような高濃度流れにおけるれきの流動機構にふれたものである。

2. 水成こう配の形成規準

急こう配の砂屑上に水が流れたとき、ある高さに河床が維持されるのは、Bagnold がすでに指摘するように河床面より深いところまで作用するせん断力の深さ方向の増加率よりせん断抵抗の増加率のほうが大きいので、この条件から河床面ではつぎの式がなりたつ。²⁾

$$C_* \tan \phi = \tan \theta \{ \rho / (\sigma - \rho) \} + \bar{c} \cdot \tan \theta \quad (1)$$

ここに、 C_* は河床の砂れきの充填濃度、 $\tan \phi$ は砂れきのまきつ角、 θ は河床こう配、 σ および ρ はそれぞれれきおよび水の密度、 $\bar{c}$ は流体中に含まれるれきの濃度である、この結果、こう配は、

$$\tan \theta = \frac{C_* \cdot \tan \phi}{\{ \rho / (\sigma - \rho) \} + \bar{c}} \quad (2)$$

と表される。砂れきが移動する境界の堆積はいくらがルーズであるかと $C_* = 0.4$ 、 $\tan \phi = 0.4$ 、 $\sigma = 2.65$ とすると、 $\bar{c} = 0$ と $\theta = 15^\circ$ 、 $\bar{c} = 0.05$ と $\theta = 13^\circ 45'$ 、となり、これらの値はさきに著者が実験した値に近いことから、(2)式が堆積物の流水の作用を受けたときに保ちうる最大のこう配と考えてよい。

(2)式は、流れの中の濃度 $\bar{c}$ が増すまたは砂れきの密度 σ へるあるいは泥の混入等で流体の密度が増すと限界のこう配が小さくなり、それだけせん断されやすい砂屑が増えることになり、濃度が増加することと示す。(2)式で与えられるこう配と水成こう配とよぶことにする。

3. 水成こう配以上のこう配上の流れが含む砂れきの濃度

水成こう配以上のこう配で流れの中に含まれた砂れきの濃度と、実験結果から示すと図1のとおりである。この図の横軸は、砂れきが移動するときなす仕事 $(\sigma - \rho) g \bar{c} \sin \theta h u_s$ と砂れきと流れの中に維持する仕事 $(\sigma - \rho) g \bar{c} \cos \theta w_s \cdot h$ との差 $\tan \theta - (w_s / u_s)$ で表わしたもので、 w_s は砂れきの沈降速度、 u_s は砂れきの流動速度である。実験結果は $\tan \theta - (w_s / u_s)$ の値が負の領域でも濃度はきわめて高いことを示している。例えば $d_{50} = 14.3 \text{ mm}$ の砂れきの最充填濃度は0.54で、砂屑がせん断されるためにはいくらかの空けきが必要で、それと考慮すると流動しうる最大容積は0.44と考えられるので、実験値は限界の濃度に近いといえよう。また、これらの流動は、流動断面中、砂れきと含まない水のみの部分はきわめて少なく、殆んど全面的にれきによつて満たされた状態で行なわれる。

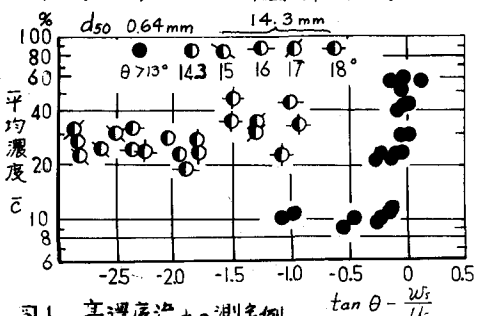


図1. 高濃度流れの濃度例

4. 砂れき流動層内の流速分布

さて、このような流れにおいて、砂れきはいかなる機構で流動するのであろうか。実験で見られる流れは、この面が主であることも手伝って、流れの表面にれきが十分発達することも事実である。しかし粒全の数倍または数十倍の深さまでれきが流動するときは、れきの移動と乱れの作用によるものとするのは正しくない。観察によると、れき同士のしやんとつによる作用が大きいと考えられる。

Bagnoldは、れきと混入した流れがせん断されるとき、れきの衝突により、運動量に変化が生じ、その結果、せん断面の法線方向に力が生じ、その力をつぎのように表わした。

$$P = a_i (\sigma - \rho) (\lambda d^3) (du/dy)^2 \cos \alpha_i, \quad \lambda = [(C_{max}/C) - 1]^{-1}, \quad C_{max}: \text{最高濃度} \quad (3)$$

ここに a_i は係数、 λ は砂れきの容積濃度の表現、 α_i はれきのしやんとつ条件からきまる角度で、この P とせん断力 T との間には、 $T = P \tan \alpha_i$ の関係がなりたつことと、円筒回転式の実験水路によし示した。

この考え方にしるがうと、こう配面上の小路に、濃度 C と含む流れが生じたとき、つぎの関係がなりたつ。

$$\begin{aligned} \rho g \sin \theta \int_y (1-C) dy + (\sigma - \rho) g \sin \theta \int_y C dy \\ = a_i (\sigma - \rho) (\lambda d^3) \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \sin \alpha_i \end{aligned} \quad (4)$$

濃度と断面の平均値 $\bar{C}$ で (4) 式をかき直すと、

$$\frac{du}{dy} = \left\{ \frac{g \cdot \sin \theta}{a_i \sin \alpha_i} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{(\sigma - \rho) C + \rho (1 - \bar{C})}{(\sigma - \rho)} \right\}^{1/2} \frac{y^{1/2}}{\lambda d} \quad (5)$$

$$u = \frac{2}{3} \left\{ \frac{g \cdot \sin \theta}{a_i \sin \alpha_i} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{(\sigma - \rho) \bar{C} + \rho (1 - \bar{C})}{(\sigma - \rho)} \right\}^{1/2} \frac{y^{3/2}}{\lambda d} \quad (6)$$

$$\frac{u_m}{u_*} = \frac{4}{15} \left\{ \frac{1}{a_i \sin \alpha_i} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{(\sigma - \rho) \bar{C} + \rho (1 - \bar{C})}{(\sigma - \rho)} \right\}^{1/2} \frac{1}{\lambda} \frac{h}{d} \quad (7)$$

そうする。この結果は、 u_m/u_* が h/d との間に両対数紙上において、この傾きのなりたつことを示すもので、実験の結果を表わすと図2のようにこの傾きのなりたつことが示される。図よりみとられる $a_i \cdot \sin \alpha_i$ の値は現在の実験資料では濃度によらず異なるが、濃度によって系統的に変わることから、上式の考え方が十分このような流れに適用されると考えることができる。この結果、この流れの抵抗係数は

$$\frac{1}{f} = \frac{4}{15} \left\{ \frac{1}{a_i \sin \alpha_i} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{(\sigma - \rho) \bar{C} + \rho (1 - \bar{C})}{(\sigma - \rho)} \right\}^{1/2} \frac{1}{\lambda} \frac{h}{d} \quad (8)$$

と表わされることになる。

この砂れきと多量に含む流れが、速度 u で流動をつづけていくためには、エネルギーの釣合いから、つぎの式がなりたつ必要がある。

$$(1 - \bar{C}) \rho g h \sin \theta \cdot u + (\sigma - \rho) g \bar{C} h \sin \theta \cdot u_s = (\sigma - \rho) g \bar{C} h \cos \theta \cdot w_s + \tau_0 u$$

$$\text{よ } u = (f/2) \cdot f \cdot u^3 \quad \text{とおくと、}$$

$$\frac{(\sigma - \rho) g \bar{C} h \left(\sin \theta \cdot \frac{u_s}{u} - \cos \theta \cdot \frac{w_s}{u} \right) + (1 - \bar{C}) \rho g h \sin \theta}{\rho u^2} = f$$

となり、 f に (2) 式の値を代入すると、 u と C の値がきまることになる。

1) 大同。堆積物の集合流動の発生原因 第17回水理講演会講演集、昭和48年2月。

2) Bagnold, R.A.: The Flow of Cohesionless Grain in Fluid, Phil. Tran. Royal Soc., Vol 244, 1957

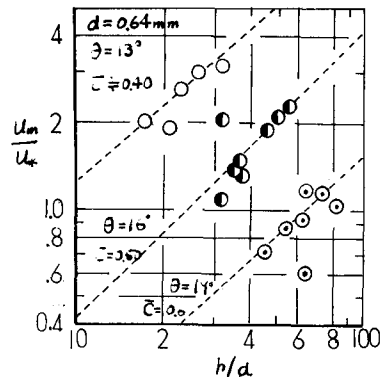
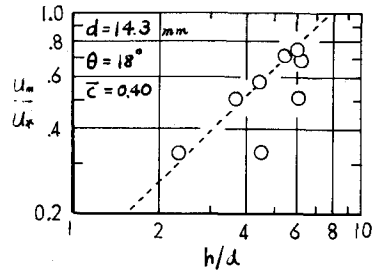


図2. 砂れき流動層の平均流速