

II-135 水を伴う砂れき流の流動特性

大阪府立工業高等学校 正員 大同淳之
同 上 正員 坂本吉一

1 はしがき

ある限界こう配以上のこう配をもつ堆積物上に水が流れたとき、集合流動が生ずることは、すでに指摘したところである。その限界こう配は、水流によるせん断力の深さ方向の変化率が、堆積物のせん断抵抗の深さ方向の変化率を上廻るときであるという考え方で求められた¹⁾。この限界こう配は、無限の深さにわたって流動することと保証するものであるが、実際には、それより緩いこう配で、流動深さは有限であるが、その深さが堆積物の粒径の数倍におよび、十分集合流動の範ちゆうに属する流れが生ずる。実際の現象を対象とするときは、無限の深さの流動より後者の流れのほうが発生頻度が高く、その流動深さおよび流動特性と知ることがより重要と考えられる。本文はこの流動深さに考察を加えて実験値との比較を試み、このときの流動特性および抵抗則について付け加えたものである。

2. 水を伴う砂れき流の流動深さ

比較的粗い一様な砂れきを用いた実験で観察される現象は、図1に示すように3層に分れる。I層は水流のみの部分で、こう配がゆるいときには比較的大きいが、こう配が急になると、粒径1/3分またはそれ以下になる。II層は砂れきの流動層で、砂れきの濃度は、目測では未流動層に等しいが、最充填濃度では流動が困難であるから、それよりごくわずかな空隙のある、せん断可能な最高濃度と考えられる。III層は未流動層である。この実験では全ての場合、堆積物の表面まで滲透流があつても流動は起らないので、長大斜面としての安定条件 $\tan \theta = (1/\gamma_c) \tan \phi$

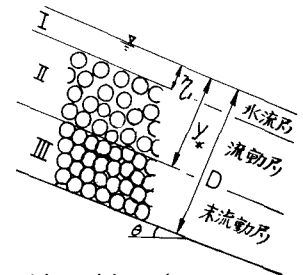


図1 流動の模式図

ここに γ' は砂れきの水中単位重量、 γ_c は砂れき体の飽和単位重量、 ϕ はまじつ角、よりもこう配 θ は小さい。したがって流動を生ずるためには、表面流のせん断力、水流から砂れきを受ける流体力および流動が流れ方向に一樣でないとき既流動部が未流動部を押す力などが釣り合っているものと考える。このうち最後のものは、定常とみなされるところでは考える必要がないので、ここでは表面流によるせん断力と砂れきの受ける流体力の釣り合いについて考えることにする。

水面より z_1 の位置における T_1 および Q_1 は、

$$T_1 = \rho g \sin \theta z_1, \quad Q_1 = \rho g \cos \theta z_1 \quad (1)$$

である。II層内では、個々の粒子は粗充填とはいへ、互に接触し、それらの力は流動層下面に伝えられているとすると、砂れきの応力の釣合いは、 x 方向の流体の速度と u 、 y 方向の速度と v (下向きと正) として、

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \{(1-\lambda)(\sigma - f \cos \theta)\} g \sin \theta + \rho g (1-\lambda) \frac{u}{K} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = \{(1-\lambda)(\sigma - f \cos \theta)\} g \cos \theta + \rho g (1-\lambda) \frac{v}{K} \quad (3)$$

である。ここに右辺の2項はそれぞれ砂れきに作用する流体力のうち静圧を除いた分を表わし、 K は速度の次元をもった抵抗係数とする。 x 方向に諸量の変化がないとき、

$$\tau_{xy} = (1-\lambda) \left\{ (\sigma - f \cos \theta) g \sin \theta + \rho g \frac{u}{K} \right\} (y - z_1) \quad (3) \quad \sigma_{yy} = (1-\lambda) \left\{ (\sigma - f \cos \theta) g \cos \theta + \rho g \frac{v}{K} \right\} (y - z_1) \quad (4)$$

表面に平行な面で流動の境界が生ずる条件は、有効応力と σ 、まじつ角と ϕ 、粘着力と C として、

$$\tau_{xy} > \sigma_{zy} \cdot \tan \phi + C = (\sigma_{zy} + H) \tan \phi, \quad H = C \cot \phi \quad (5)$$

であるから、(3)、(4)式を代入すると、 $Pq = \gamma_w \cdot (\sigma - P \cos \theta)q = \tau_c$, $\sigma q = \tau_s$ とし

$$\lambda \gamma_w \sin \theta (y - \tau_1) + \gamma_w \sin \theta \tau_1 + (1 - \lambda) \{ \tau_c \sin \theta + \tau_w (u/k) \} (y - \tau_1) > [(1 - \lambda) \{ \tau_c \cos \theta + \gamma_w (v/k) \} (y - \tau_1) + H] \tan \phi$$

そこで、(5)式の限界条件のなりにつ深さ y_* は、

$$\frac{y_*}{D} = \frac{\tau_1}{D} \left\{ 1 + \frac{\gamma_w \lambda \sin \theta + H_* \tan \phi}{\left\{ \frac{\tau_c}{\gamma_s} (1 - \lambda) + \frac{\gamma_w}{\gamma_s} k \frac{\cos \psi}{\cos \theta} \right\} \tan \phi - \frac{\tau_c}{\gamma_s} \tan \theta - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} k \frac{\sin \psi}{\cos \theta}} \right\} \quad (6)$$

となる。ここに D は全堆積の厚さ、 $H_* = H/D$, $k = \sqrt{u^2 + v^2}/k$, $\cos \psi = v/\sqrt{u^2 + v^2}$, $\sin \psi = u/\sqrt{u^2 + v^2}$ である。右辺第2項の分母がゼロに近づくとき、流動層の厚さが急に増すことを示す。(6)式で $H_* (= C) = 0$, $\cos \psi = 0$, $\sin \psi = 0$ ($v = 0$), k は u が浸透速度に近いとき、 u/k がこの配位となることから $k = \sin \theta$, すなわち最も流動しにくい条件で計算した結果を図2に示す。図にまつ角が $37^\circ \sim 38^\circ$ と測定された直径 14.3 mm の砂れきにおける I 層と II 層の深さの比を示すが、ほぼ一致する。またこの式は、図3に示されるように、集合流動と起こる限界この配位、表面流の大きさが増すと小さくなる事実をも説明しうる。比較的粗い粒子のまつ角の測定は必ずしも良い精度でないため、式の直否はより検討が必要があるが(6)式は流動層の厚さを表現するようである。なお(6)式は、 $C = \tau_1 = 0$ のとき限界条件は、

$$\tan \theta = \tan \phi \cdot \frac{\tau_c}{\gamma_s} \left\{ (1 - \lambda) + \frac{\gamma_w}{\gamma_s} k \frac{\cos \psi}{\cos \theta} \right\} - \frac{(1 - \lambda) k \sin \psi}{\frac{\tau_c}{\gamma_s} (1 - \lambda) + \lambda} \quad (7)$$

となって、深さに無関係になる。もちろんこの場合の限界この配位は、 τ_1 が0のときより大きいこの配位と与える。

3. 水と伴う砂れき流の流動特性

したがって、著者が従来報告してきた水と伴う砂れき流の流動速度は、このようにある境界から上の部分が流動する場合のものである。その結果は図4にまとめたように、

$$u/u_* = \alpha (h/d)^\beta \quad (8)$$

の形で表現され、粒径がほぼ同じときには、流動の条件が変わっても、 α , β は同じ値をとる。しかも図4の下に示したように混合粒径の場合でもほぼ同じ値を示す。またこの流れの平均流速は $u_m/u_* = (4/15) (K \sin \alpha)^{-1/2} P^{1/2} (h/d)$ (9)

$$P = \frac{\rho + \sigma - P(1 + \cos \theta)}{\sigma} \left\{ \left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\}^2$$

と流動層厚の1乗に比例する。したがって抵抗係数は、

$$1/f = (1/12) \frac{4}{15} \left(\frac{1}{K \sin \alpha} \right)^{1/2} P^{1/2} (h/d) \quad (10)$$

として表現される。今後諸係数とともに測定してより正確なものにする必要があるが、これについてはつぎの機会に報告する予定である。

参考文献、1) 大同洋之：急流面上の多量の砂れきと含流の流動特性、第18回水理講演会講演集 H449.2

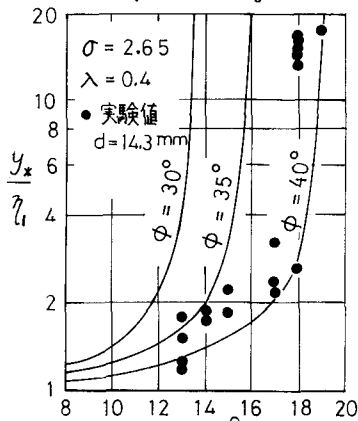


図2. 表面流の水深 h/d と流動層厚 y_*/τ_1 の関係

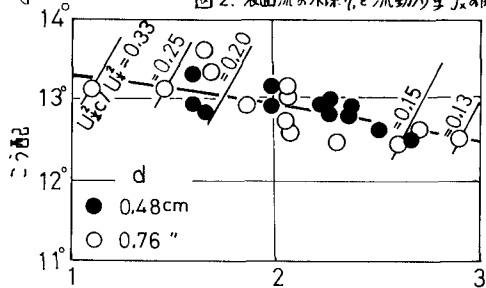


図3. 限界この配位の測定例

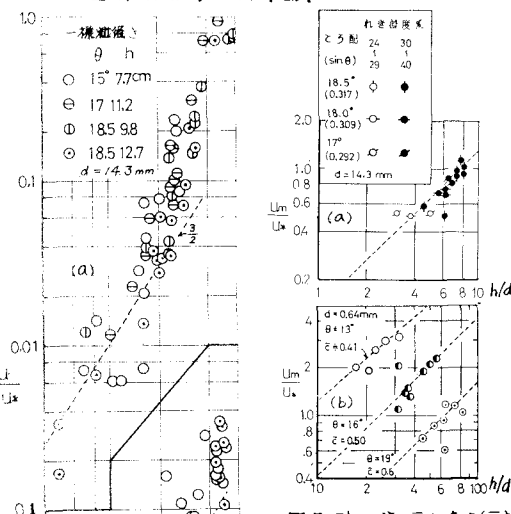


図5. 砂れき流の平均流速 (再試)

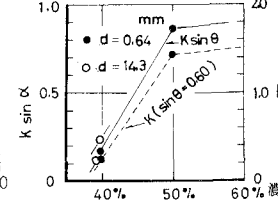


図6. $K \sin \alpha$ および K と濃度の関係 (再試)