

固定床上における土石流の流動特性

九州大学工学部○正 員 橋本 晴行

九州大学工学部 正 員 平野 宗夫

長崎大学工学部 正 員 橋 東一郎

福岡県 正 員 溜池 博文

はしがき 桜島のような土石流頻発地では、土石流を安全に海へ導くため流路工が設置されている。この流路工を計画するに当っては、土石流が流路工上をどのような流速、水深、濃度で流下していくかを知る必要がある。しかしながら、移動床における土石流の特性については従来より活発な研究が行われ、かなりの部分が明らかになってきているのに対して、流路工のような固定床上の土石流についてはその特性はあまり明白ではない。本研究は、固定床と移動床の違いを境界条件の差異として捉えることで、移動床上の従来の研究成果を用いて固定床上的の土石流の特性を説明することを試みるものである。

実験の手法 幅10cm、長さ9.5mの水路を上流側6.5mの移動床部と下流側3mの固定床部とに分け、移動床部に粒径 $d = 4.4 \text{ mm}$ 、密度 $\sigma = 2.59 \text{ g/cm}^3$ 、最密状態濃度 $C_* = 0.6$ の砂れきを厚さ10cmで敷き詰める。そして上流端から所定の流量 q_{w0} を供給して土石流を発生・流下させ、固定床部に流入させる。実験は、固定床底面に粗度として移動床材料と同一の粒径のものをはりつけて粗面にした場合と滑面にした場合の2ケースについて行った。実験条件は表-1に示す通りである。表面流速 U_s は発泡スチロールをトレーサーとして流すことにより、全流量 q は下流端で流れを採取することにより、流速分布と水深は16mm 高速度カメラで撮影することによりそれぞれ求めた。

表-1

Run	q_{w0} (cm^3/s)	θ_0	C_0/C_*	U_0/U_s	記号
1	103	18°	粗	0.9	○
2	201	18°	粗	0.77	○
3	197	14°	粗	0.6	○
4	114	18°	滑	0.8	○
5	212	18°	滑	0.8	○

実験の結果 図-1は、単位幅供給水量 $q_{w0} = 200 \text{ cm}^2/\text{s}$ の実験において表面流速 U_s 、水深 h を勾配に対して示したものである。比較のため移動床の実験結果(●印)も同時に示している。これらは同一勾配においてはほぼ同じ流量 q 、輸送濃度 C_T であるにもかかわらず、固定床では移動床の場合にくらべて表面流速は速く、水深は減少していることが分る。また、固定床の中でも滑面の方が粗面の場合より表面流速は速く、水深は小さくなっている。

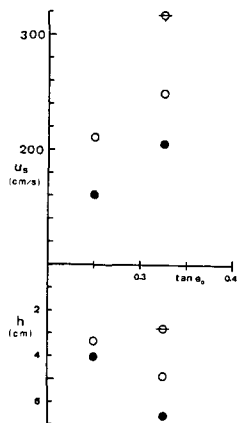


図-1

図-2, 3は、表面流速および平均流速の無次元表示を水路勾配に対して示したものである。固定床の方が、特に滑面上の流動性がきわめてよいことが分る。

解析 移動床では、底面で濃度 $C = C_*$ (堆積層濃度)、速度 $u = 0$ と置いて土石流の運動方程式を解いているが、固定床の場合はその境界条件が適当であるかどうか疑わしい。そこで一般

的な境界条件として底面で $C = C_0$ 、 $u = U_0$ と置き、土石流の運動方程式を解くことにする。

等流の土石流の基礎式としては、流水方向(X方向)については図・流両相の、流水に垂直な方向(Z方向)については図相のみの力のつり合い式を立てるとそれぞれ次式

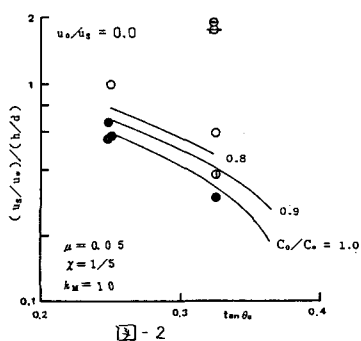


図-2

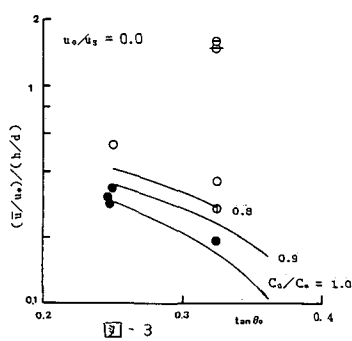


図-3

$$x \text{ 方向} : \int_z^h \{ \sigma C + p(1-C) \} g \sin \theta_0 dz = K_M \sigma d^2 \frac{(C/C_*)^2}{1 - C/C_*} \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (1)$$

$$z \text{ 方向} : \int_z^h (\sigma - p) C g \cos \theta_0 dz = \frac{1}{\alpha} K_M \sigma d^2 \frac{(C/C_*)^2}{1 - C/C_*} \left(\frac{du}{dz} \right)^2 + K_P \frac{C}{C_*} \frac{C - C_s}{C_s} \quad (2)$$

これらを上記の境界条件で解くと、濃度分布は

$$\eta = \frac{\chi}{\psi C_*} \left\{ 2(C_0 - C) - (2C_\alpha - C_s) \ln \frac{C - C_\alpha}{C_0 - C_\alpha} \right\} \quad (3)$$

ここに $C_\alpha = p \tan \theta_0 / \{ (\sigma - p)(\alpha - \tan \theta_0) \}$, $\chi = K_P / \{ C_s(\sigma - p) g h \cos \theta_0 \}$, $\psi = (\alpha - \tan \theta_0) / \alpha$ である。 $\eta = 1$ で $C = C_s$ (表面濃度) とおいて C_s を求めると

$$(C_s - C_\alpha) / (C_0 - C_\alpha) = \exp \left[\left\{ 2(C_0 - C_s) - \frac{\psi C_0}{\chi} \right\} / (2C_\alpha - C_s) \right] \quad (4)$$

(3)式を積分すると、断面平均濃度 $\bar{C}$ は

$$\bar{C} = C_\alpha + \{ \chi / (\psi C_*) \} C_0 (C_0 - C_s) \quad (5)$$

となる。速度分布は

$$\frac{u}{u_s} = \frac{\rho}{d} \left\{ K_M \frac{\sigma}{f} \left(\frac{\psi C_0}{\chi} \right)^{-\frac{1}{2}} \left\{ \int_C^{C_0} F(C) dC + \frac{u_0/u_s}{1 - u_0/u_s} \int_{C_s}^{C_0} F(C) dC \right\} \right. \quad (6)$$

これを積分すると、平均流速 $\bar{u}$ は

$$\frac{\bar{u}}{u_s} = \frac{\rho}{d} \left\{ K_M \frac{\sigma}{f} \left(\frac{\psi C_0}{\chi} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{u_0/u_s}{1 - u_0/u_s} \frac{\psi C_0}{\chi} \int_{C_s}^{C_0} F(C) dC + \int_{C_s}^{C_0} \frac{2C - C_s}{C - C_\alpha} \left(\int_C^{C_0} F(C) dC \right) dC \right] \right. \quad (7)$$

(6)式で $C = C_s$, $u = u_s$ とおいて整理すると

$$\frac{u_s}{u_s} \frac{\rho}{d} = (1 - \frac{u_0}{u_s})^{-1} \left\{ K_M \frac{\sigma}{f} \left(\frac{\psi C_0}{\chi} \right)^{-\frac{1}{2}} \int_{C_s}^{C_0} F(C) dC \right. \quad (8)$$

以上の諸式は、粒子比重 ρ , 水路勾配 θ_0 および境界条件 u_0/u_s , C_0/C_* の関数となっており、この境界条件が抵抗特性にどのような影響を及ぼすかについて検討してみることにする。図-2, 3 には、 $u_0/u_s = 0$ と固定し、 C_0/C_* を変えて計算した結果を実線で示している。 C_0/C_* が、移動床に対応する $C_0/C_* = 1$ から減少していくにつれて、無次元量の $\frac{u_s}{u_s} \frac{\rho}{d}$, $\frac{\bar{u}}{u_s} \frac{\rho}{d}$ は大きくなり、流動性がよくなることが分る。また、 $C_0/C_* = 1$ と固定し、 u_0/u_s を変えて計算を行うと、すべりの割合が大きくなるほど流動性がよくなる。したがって、固定床の流動は移動床とは異なった境界条件を用いることで説明できるものと考えられる。

次に、固定床における境界条件を調べるため、 $\frac{u_s}{u_s} \frac{\rho}{d}$ と $\frac{\bar{u}}{u_s} \frac{\rho}{d}$ の計算値が実験値に適合するように各実験毎に境界条件を決定してみると、表-1 のようである。また、これらの境界条件下の濃度・流速分布の計算は図-4 に移動床の計算値(破線)とともに示している。移動床にくらべて固定床では濃度・流速分布はともに一様化し、中には底面ですべりが生じているものもある。特に滑面工では著しいすべりのため流速分布はほぼ一様になっている。

以上の結果、固定床における土石流の流動特性はこのような濃度・流速分布の結果であることが理解される。

結 び 今後、底面での境界条件をどのように与えるかが問題となるが、そのためには、粗度条件や土石流の流入条件を種々変化させて系統的な実験を行う必要がある。

参考文献

1) 橋本、末次：土石流における粒子間抵抗力と流動特性、土木学会論文報告集、第317号、1982。

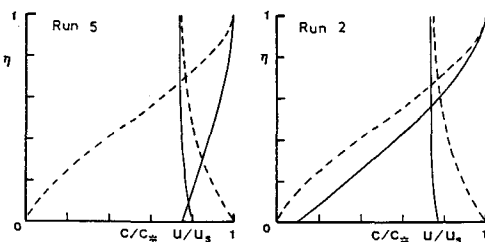


図-4