

土石流の流動について

九州大学工学部 正員 橋 東一郎 中山比佐雄

学生員 〇羽田野袈裟義 田中 清

本文は昨年平野^〇が行なった人工降雨による土石流実験の続きとして、大型の水路を用い、勾配を大きく変化させて土石流の濃度、流速分布、液高並びに土石流流量と雨量との関係などについて、量的な関係を求めようとするものである。

実験装置と方法

長さ6mの人工降雨装置をもつ、長さ7m、高さ30cm、幅15cmの可変勾配水路に平均粒径0.8mm、密度 $\sigma=2.65\text{ g/cm}^3$ のほぼ一様な砂を10cmの厚さにし、降雨強度500, 1000, 1500 mm/hの雨を降らせて土石流を発生させた。勾配は10°, 15°, 20°, 25°の4種で、土石流の発生時刻・発生位置、土石流の表面流速・液高(下流端より約1m上流)及び土石流の流量、濃度(下流端)などを測定した。また側面から16mm撮影機を用いて土石流先端部を毎秒64コマで写し、土石流中の砂粒や投入したパンチくずを追跡して流速分布を測定した。

1. 土石流の平均濃度 $\bar{C}_d$: Bagnold が示した砂粒の衝突による無通太力と剪断太力との比例関係を河床面に適用すると、比例定数を $\tan\theta$ として

$$(\sigma - \rho)g \cos\theta \int_0^h y dy \cdot \tan\theta = \rho_m g h \sin\theta, \quad \rho_m = \rho(1 - \bar{C}_d) + \sigma \bar{C}_d$$

より 平均濃度 $\bar{C}_d$ は次式

$$\bar{C}_d = \frac{\rho}{\sigma - \rho} \frac{\tan\theta}{\tan\theta - \tan\theta_0} \quad (1)$$

で与えられ、砂粒の場合($\sigma=2.65$) $\tan\theta_0 = \tan\theta_{\text{consol}}$ とすると $\bar{C}_d$ は勾配 $\tan\theta$ と一義的な関係をもつことになる。図-1は雨水流による土石流実験結果とともに、流水によって発生させた土石流実験結果もプロットされている。 $\tan\theta = 0.8 \sim 1.0$ とした場合の式(1)がほぼ適合するが、Bagnold が与えた $\tan\theta_0 = 0.3 \sim 0.7$ とはかなり大きく異なること、及び $\bar{C}_d$ に頭打ちがみられる $\tan\theta \geq 0.4$ の領域に対しては今後の検討が必要である。

2. 土石流の流量と雨量との関係: 雨による表面流出量 q_s と土石流の流量 q_r との間には、堆積層における空隙の割合を λ として、次の関係

$$q_r/q_s = \frac{1}{1 - \lambda} \quad (2)$$

があり、 q_r/q_s は $\bar{C}_d$ を通じて、 $\tan\theta$ だけの関数となる。 q_r として土石流発生より末端までの降雨による表面流出量を用い、 $\lambda=0.43$ 、 $\bar{C}_d$ と $\tan\theta$ の関係として図中に示した平均的な値を用いた(2)式の計算結果と実験結果との比較を図-2に示す。土石流は浸透水が表層に達し、表面流出の生起とほぼ同時に発生するため、 q_r は若干過大に評価されているが、 θ が20°をこえると水と砂とは十分に混合して飽和濃度に近く、 q_r/q_s は5~10程度の値となる。 θ が15°以下では水と砂とはある程度分離した形で流送され、 θ が小さい程掃流形式に近づく。

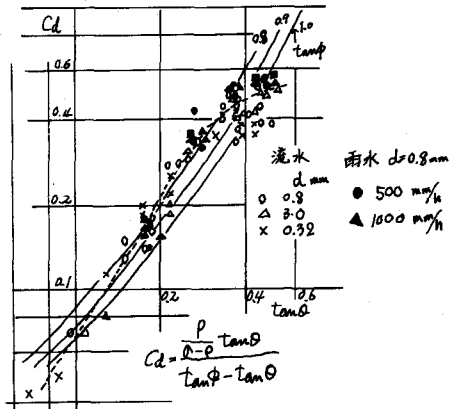


図-1 濃度と勾配の関係

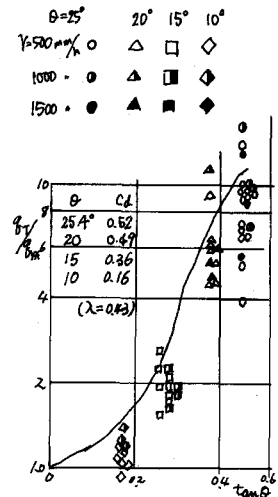


図-2 q_r/q_s と勾配の関係

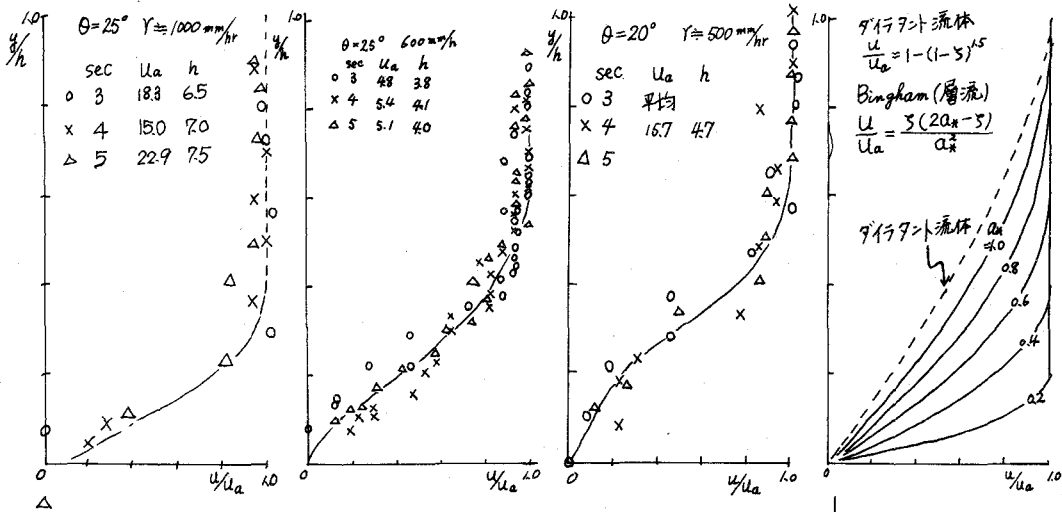


図-3 流速分布

3. 流速分布, 流速係数 β 及液高: 表面流速 u_a で無次元化した流速分布 u/u_a は図-3に示すように Bingham 流体的である。せん断降伏値 τ_y , 粘度 η の物理的意味は明らかでないが

$$\tau = \rho_m g h \sin \theta (1 - \alpha^*) = \tau_y + \eta \frac{du}{dy}, \quad \tau_y = \rho_m g h \sin \theta (1 - \alpha^*)$$

を $y=0$ で $u=0$ の条件のもとに積分して整理すると, 表面流速に関する流速係数 β_a は

$$\beta_a = \frac{u_a}{u_c} = \frac{h u_a}{\eta} \frac{g \sin \theta}{2} \quad \text{より} \quad \beta_a = \left(\frac{2}{3} \frac{g' \sin \theta}{\eta} \frac{h}{u_c} \frac{g \sin \theta}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここに η : 動粘度係数, u_c : 砂粒の衝突効果を含んだ粘度係数, g' : 流速測定点における土の流下流量

となる。また g' に対して次の関係

$$g' = u_m h = \varphi u_a h = \left[\frac{g' \sin \theta}{\eta} \frac{h}{u_c} \frac{g \sin \theta}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{g h \sin \theta} h \quad (4)$$

が成り立ち, β_a (g' は発生点より液高測定点までの降雨による表面流出量) は前述したように, $\bar{C}_d$ あるいは勾配 $\tan \theta$ の関数である。さらに, u_c , α^* は液度 ($\tan \theta$) の関数とみなされるから,

$$\beta_a / \left(\frac{g' \sin \theta}{\eta} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \text{液高の無次元量} \left(\frac{g \sin \theta}{\eta} \right)^{\frac{1}{2}} h$$

はいずれも $\bar{C}_d$ あるいは $\tan \theta$ の関数となる。これらの関係は, 図-4, 図-5 にプロットされ, 上の考え方がほぼ妥当であることが示されている。なお図-3に示すように, α^* , $\eta = \frac{u_a h g \sin \theta}{2 u_c}$ の値は $\alpha^* = 0.4 \sim 0.7$, $\eta = 90 \sim 200 \text{ cP}$ 程度の値となるが, 今後の実験によって α^* , η を検討する必要がある。

尚実験にあたって面倒な仕事を平反って頂いた藤田技官, 4年生の池本君らには感謝の意を表す。

(参考文献) 1) 平野, 岩元他: 人工降雨による土石流の実験 西部支那論文集 (昭 51. 2)

2) R.A. Bagnold: The flow of cohesionless grains in fluids

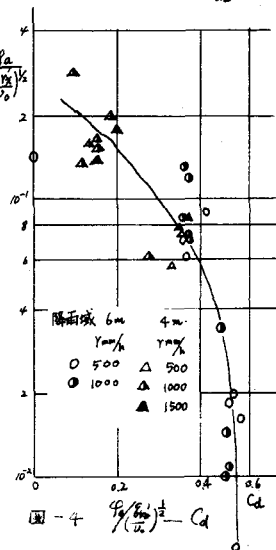


図-4 $\beta_a / \left(\frac{g' \sin \theta}{\eta} \right)^{\frac{1}{2}} - C_d$

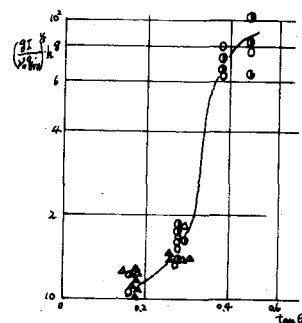


図-5 $\left(\frac{g \sin \theta}{\eta} \right)^{\frac{1}{2}} h - \tan \theta$