

II-225

土石流の流下幅に関する研究

関西電力（株） 正員 中島 寿
 （株）ニュージェック 正員 大槻 英樹
 京都大学防災研究所 正員 江頭 進治

1. はじめに：一定勾配の斜面上を流下する土石流は、側岸による拘束を受けなければ、斜面条件及び流れの特性に応じたある一定の流下幅の流れになることが予想される。本報告では、傾斜平面上を流下する土石流の流下横断形状と流下幅について実験及び理論検討を行う。

2. 実験：水路は長さ4m、幅10cmの矩形断面の上流水路と、長さ2.7m、幅1.8mの平坦面下流水路（ベニヤ板製で、10cm間隔の格子目盛をうった。）からなり、水路勾配はいずれも20°である。底面には土石流材料と同一の実験砂が貼り付けられている。

水路上流端より給水しながら所定の濃度になるようほぼ一様な粒径の砂（比重 $\sigma/\rho=2.65$ ）を給砂し、定常な土石流を発生させ、ビデオカメラと35mmスチルカメラにより上流水路での流下形状を計測した。実験条件は表-1のとおりである。

表-1 実験条件

	平均粒径 $d_m(\text{mm})$	動摩擦係数 μ_k	濃度 C_d	流量 $Q_T(\text{cm}^3/\text{s})$
1	2.8	0.610	0.3	2130
2	"	"	"	3900
3	"	"	0.4	"
4	4.2	0.625	0.3	2130
5	"	"	"	3900
6	"	"	0.4	"

土石流は下流水路に出るとただちに広がり、ある距離を流下した後、流れの幅はほとんど変化しなくなる。ただし、条件によっては流下幅が逆に減少して不安定な流れとなる場合もある。これらのケースについては検討から除外した。

図-1は、水路下流端で採水することにより求めた単位幅流量と粒子濃度の横断分布の一例である。

3. 横断形状と幅水深比：流下方向（x方向）のみに傾斜（傾斜角 θ ）をもつ平面上における、土石流横断方向（y方向）の運動方程式は、次式で表される。

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \dots\dots (1)$$

ここに u, v ：流速の x, y 成分、 p ：圧力、 ρ_m ：土石流の密度、 τ_{yz} ： $y-z$ 面（ z は河床に垂直）に働くせん断応力である。等流状態の時、 $v=0$ であり、 p として静水圧を、 τ_{yz} としてクーロン型の粒子間摩擦を考慮して¹⁾ (1)

式を水深にわたって積分すると

$$0 = \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} \rho_m g h^2 \cos \theta \right) - \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) C_d g h \cos \theta \cdot \mu_k \dots\dots (2)$$

ここで、流れの領域を図-2に示すように応力

が降伏状態に達していない領域 $0 \leq y \leq y_c$ と、

応力が降伏状態で釣り合っている領域 $y_c \leq y \leq B$ に分ける。ここに図-2の $\partial p / \partial y$ 、 τ_{by} はそれぞれ(2)式の右辺第1項及び第2項である。

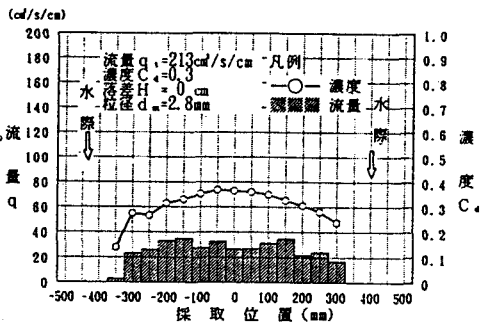


図-1 単位幅流量と濃度の横断分布

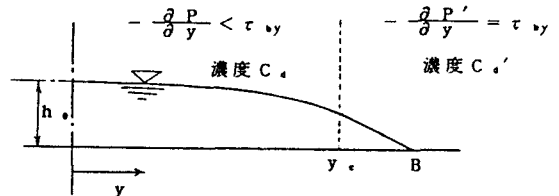


図-2 土石流横断模式図

$y_c \leq y$ における横断形状は、この領域の粒子濃度を C_d' として（2）式を解けば、次式のように求められる。

$$h(y) = \frac{\rho}{\rho_s} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) C_d' \cdot \mu_k (B-y) \dots\dots (3)$$

一方、 $0 \leq y \leq y_c$ における形状は、放物線を考え、 $y=0$ において $h=h_0$ （流れの中心軸上の流動深）及び $\partial h / \partial y = 0$ 、 $y=y_c$ において $\partial h / \partial y$ が（3）式から求まる $\partial h / \partial y$ に等しいとして係数を定めると、次のようになる。

$$h(y) = -\frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_s} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) C_d' \cdot \mu_k \cdot y^2 + h_0 \dots\dots (4)$$

$y=y_c$ として（3）、（4）式を等置すると h_0/B が次のように求められる。

$$\frac{h_0}{B} = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{y_c}{B} \right) \frac{\rho}{\rho_s} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \alpha C_d \cdot \mu_k \dots\dots (5)$$

ここに、 $C_d' = \alpha C_d$ である。

いま、上式の極限として $y_c/B \rightarrow 1$ とすれば、次式を得る。

$$\frac{h_0}{B} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_s} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \alpha C_d \cdot \mu_k \dots\dots (6)$$

このとき横断形状は放物線で表される。

図-3は、 α をパラメータとして（6）式による h_0/B と C_d の関係をみたものである。 α が一般的に定まるかは重要な問題であるが、実験結果や図-3から判断すれば、本研究の領域においては α は $1/3$ 程度の値をとりそうである。

4. 流下幅の推定式：平衡状態の土石流2次元流れの断面平均流速 u は、江頭・芦田によれば¹⁾次式で与えられる。

$$\frac{u}{\sqrt{gh}} = \frac{2}{5} K \dots\dots (7)$$

ここに $K = \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[\cos \theta \left(\tan \theta - \frac{C_d (\sigma/\rho - 1)}{C_d (\sigma/\rho - 1) + 1} \mu_k \right) \right]$

$$\left[(\sigma/\rho - 1) C_d + 1 \right]^{1/2} \cdot \left(\frac{C_d}{1 - C_d} \right)^{1/3} \cdot \frac{h}{d}$$

d ：代表粒径、 $(k_v/k_p)^{1/3}$ ：形状係数比で2程度の値をとる。いま、 $u = Q_T / (2B\bar{h})$ 、 $\bar{h}$ （横断平均流動深） $= 2/3 h_0$ 、とし（6）式および（7）式より、

$$\left(\frac{Q_T}{B\sqrt{gh_0^3}} \right)^2 = \frac{128}{675} K^2 \dots\dots (8)$$

を得る。（6）式と（8）式を連立させて、 Q_T を与えると土石流の流下幅（半幅） B が求まる。図-4はこうして算定される B を実験値と比較したものであり、良い適合性が得られている。

5. おわりに：幅水深比の推定式および流下幅の推定式を導いた。今後さらに広い範囲の実験に適用し、より汎用性の高い推定式の構築をめざすつもりである。

謝 辞：本検討を行うにあたり、多大なご指導を受けた京都大学名誉教授芦田和男先生に謝意を表します。

参考文献：1) 江頭、芦田、佐々木；土石流の流動機構、第32回水理講演会論文集、昭和63年3月

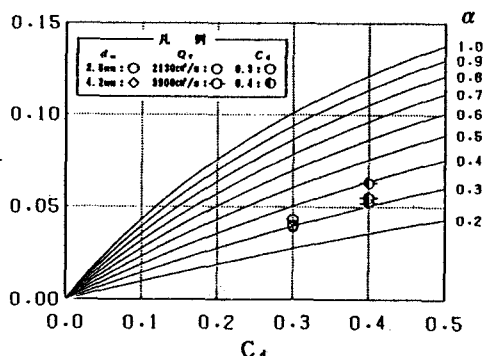


図-3 実験値による α の推定

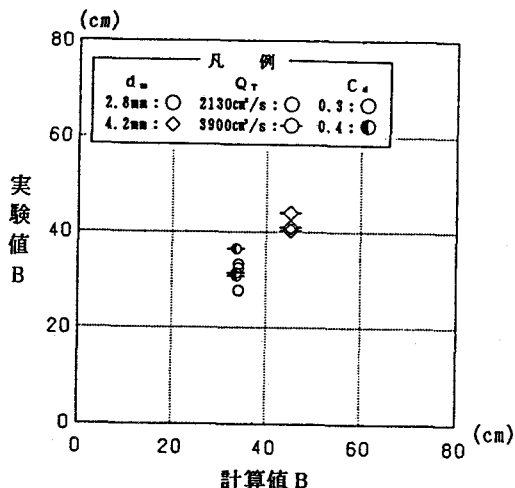


図-4 Bの実験値と計算値の比較