

70 軽量材料を用いた土石流の流動特性

砂防・地すべり技術センター ○松村 和樹
 建設省土木研究所砂防研究室 水山 高久

1. はじめに

一般に大規模土石流は等価摩擦が小さくその到達距離は中小規模の土石流に比較して長く、その流動機構は同一で扱うことは無理があると認められている。このような大規模土石流の流動機構の検討は1983年9月の御岳山で発生した土石流を契機として様々な観点から行われている。¹⁾²⁾³⁾本研究は大規模土石流の流動機構解明の緒として軽量材料(メサライト)を用いて実験及び解析を行ったので、ここに報告する。

2. 流れの基礎的表現

土石流のような液体と固体が一体となった流れは、固・液混相流と呼ばれその流動モデルの一般式は次のように表される。

$$\tau = \tau_y + \mu \frac{du}{dy} + \sigma f(c) d^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 - \rho u' v' \quad (1)$$

ここに、 τ ; せん断応力, τ_y ; せん断降伏応力, μ ; 粘性係数, u ; 流速, σ ; 粒子の密度, $f(c)$; 粒子濃度の関数, d ; 代表粒径, ρ ; 液体の密度, u' , v' ; 速度成分の変動である。(1)式の右辺の各項の卓越度合により流動特性が変化する。第2項は掃流せん断応力, 第3項はダイラタント応力, 第4項は乱流せん断応力(レイノルズ応力)である。

これまで、土石流はダイラタント流体モデルを標準モデルとして解析され、高橋⁴⁾によればバグノルド⁵⁾の研究成果を用い、粒子同志の衝突による慣性力が卓越する場合の土石流の流速分布は次のように示している。

$$u = \frac{2}{3d} \left\{ \frac{g \sin \theta}{a_i \sin \alpha} \left[Cd + (1 - Cd) \frac{\rho}{\sigma} \right] \right\}^{1/2} \left[\left(\frac{C_*}{Cd} \right)^{1/3} - 1 \right] [h^{3/2} - (h - y)^{3/2}] \quad (2)$$

ここに、 a_i ; 定数でバグノルドによれば $a_i = 0.042$ であり、大同によればせん断力の大きい領域で 0.026 となる。 C_* ; 堆積層の土砂濃度, Cd ; 流動中の土砂濃度, α ; 粒子の衝突に関する角度, h ; 流動深, θ ; 河床勾配である。

3 流動機構の検討

3.1 粒子の衝突に関する角度

粒子の衝突に関する角度(α)はバグノルドが実験的に求めており、 $\tan \alpha \approx 0.32$ (18°) であるが、高橋はほぼ静止摩擦角(ϕ)に等しいとしている。内部摩擦角は固体の摩擦抵抗に関与し、大規模土石流に見られるように、土石流の規模が大きくなれば固体摩擦抵抗が小さくなる。このことについて、芦田・江頭は細粒成分の浮遊によるみかけの空隙の増加および、それに伴う間隙水の密度の増加に起因するみかけの ϕ の減少とし、佐々は急激な上載荷重による堆積層に過剰間隙水圧が発生することによるみかけの ϕ の減少としている。空隙が大きくなれば内部摩擦角が減少することは土質力学的にも明らかで、一般には次式で示される。

$$\tan \phi = \frac{k C d}{(1 - k^2 C d^2)^{1/2}} \quad (3)$$

松村²⁾によれば砂質土の実験で飽和度をパラメータとし $C d \sim \phi$ の関係は図 1 のようになり、(3) 式の関係が認められる。さらに、定数 $k=1.0$ としての取扱が可能と考えられる。

3. 2 流 れ の 応 力

ダイラタント流体は速度勾配が (du/dy) が大きくなれば、ダイラタント流動からはずれる。これは、流動規模の大きい流れに相当し、その原因として他の応力（ここではレイノルズ応力を考える）が無視されない状態となることが考えられる。このイメージとして図 2 のようになる。このように土石流の流動を支配するものとして、ダイラタント応力 (τ_d) とレイノルズ応力 (τ_r) を考え、平衡状態のつあい式を示せば次のようになる。

$$a_i \sigma \left[\left(\frac{C}{C_d} \right) - 1 \right]^{-2} d \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \sin \alpha + \tau_r = [C d (\sigma - \rho) + \rho] g (h - y) \sin \theta \quad (4)$$

レイノルズ応力はプラントルの混合距離理論を用いて次のように示される。

$$\tau_r = -\rho u' v' = \rho \ell^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (5)$$

この混合距離に関して芦田・江頭の検討を用いれば (5) 式は、

$$\tau_r = \rho \left(\frac{k p}{k v} \right)^{2/3} \left(\frac{1 - C d}{C d} \right)^{2/3} d^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (6)$$

となる。ここでダイラタント応力とレイノルズ応力の比をとり、 $\alpha \equiv \phi$ として (3) 式の関係を用い図示すれば図 3 のようになり、土砂濃度が 0.35~0.40 付近で $\tau_r / \tau_d > 1.0$ となり、それより濃度の小さな流れはレイノルズ応力の卓越することになり、土石流の流動機構の検討の上でレイノルズ応力は無視されない。

(4) 式に (6) 式を代入し、 $y = 0$ 、 $u = 0$ の境界条件で積分すれば、(7) 式の流速分布が得られる。

$$u = \frac{2}{3 d} \left\{ \frac{C d (\sigma - \rho) g \sin \theta}{a_i \left[\left(\frac{C}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-2} \sin \alpha + \rho \left(\frac{1 - C d}{C d} \right)^{2/3}} \right\}^{1/2} [h^{3/2} - (h - y)^{3/2}] \quad (7)$$

4 土 石 流 の 流 動 機 構 に 関 する 実 験

水理実験は幅 7 cm、高さ 30 cm、長さ 500 cm の片面アクリル板をはった固定床水路を用いて行った。実験に使用した材料はメサライトと砂礫で表 1 のような特性を有するものである。水路勾配は 7° 、 15° の 3 段階に設定し、土石流は水路上部に長さ 200 cm、厚さ 15 cm に材料を敷ならし、給水 (1.5 l/sec) を行なって発生させた。水路下部で土石流をビデオカメラで撮影し、 $1/60 \text{ sec}$ のこま送りで個々の粒子速度を測定した。実験ケースは表 2 の通りである。

図 4 に各ケースの土石流流速分布を示す。図中実線は (7) 式、破線は高橋の (2) 式の流速分布を示している。Case-1 の砂礫を用いた実験では両者の差異は小さいが、(2) 式が実験データより大きな流速を与える傾向を示している。これは $C d = 0.348$ と土石流としては土砂濃度が比較的小さく、図 3 に示されるようにレイノルズ応力の大きい領域であることに起因するものと考えられる。さらに、メサライトを用い勾配を 9° 、 7° とした Case-2、3 の実験においてはデータのバラつきが大きくなるが (2) 式

は実験データと掛け離れた傾向を示し、(7)式の流速分布が実験との整合が良い。その傾向は勾配が緩くなるほど、すなわち、土砂濃度が小さくなるに従い顕著になる。これは粒子間の空隙が大きくなるに加え、粒子密度が小さいことでレイノルズ応力が大きく卓越することによるものと考えられる。このように、土石流のせん断力はダイラタント応力のみで受け持たれるのではなく、粒子間の空隙に存在する流体の乱れに伴うレイノルズ応力も付加する必要がある。メサライトを用いた勾配15°のCase-4はCase-2, 3の流速分布と傾向が異なっており、水路底面で流速がゼロとならず、粒子の滑りが見られる。また、 y/h が0.0~0.4付近までは速度勾配が大きく、それより上部では速度勾配が急に小さくなり一様速度に近い。このような流速分布は静水の乱流流速分布に類似し、レイノルズ応力みの流速分布を一点鎖線で表示した。⁸⁾このときのカルマン定数は0.5としたものの適合が良い。

5 ま と め

(1) 土石流流体にかかるせん断応力はダイラタント応力と粒子間隙の乱流によるレイノルズ応力に受け持たれるとして、芦田・江頭の混合距離を用いて流速分布を修正した。

(2) メサライトを用い水路勾配15°の流速分布はレイノルズ応力みの流速分布で近似できるようであるが、底面近傍の分布形の差異や、カルマン定数の検討が今後の課題として残される。

参考文献

- 1) 芦田和男、江頭進治、神矢弘；斜面における土塊の抵抗則と移動速度、京大防災研年報第28B-2、1985
- 2) 佐々恭二；御岳土石流など不飽和工石流の運動機構について、京大防災研年報第29号B-1、1986
- 3) 芦田和男、江頭進治；長野県西部地震による御岳くずれの挙動、京大防災研年報第28号B-2、1985
- 4) 高橋保；土石流の発生と流動に関する研究、京大防災研年報第20号B-2、1977
- 5) Bagnold, R.A. ; Experiments on a gravity free dispersion of large solid spheres in a newton fluid under shear, Royal Soc. London Proc. Ser. A. Vol225, 1954
- 6) 大同淳之、加藤一平；流体を含む粒子流の流動機構に関する研究、第33回土木学会年次学術講演概要集、1978
- 7) 松村和樹；砂質斜面の崩壊に関する実験的研究、京都府立大学修士論文、1976
- 8) 高橋保；火砕流の流動式およびauto-suspensionの意義に関する実験的検討、文部省科学研究費自然災害特別研究、「火山噴火に伴う乾燥粉体流（火砕流等）の特質と災害」1986

表1. 材料特性

	砂 礫	メサライト
密度 (g/cm ³)	2.65	1.60
内部摩擦角 (度)	38°	38°
60%粒径 (cm)	0.30	0.42

表2. 実験ケース

Case	材 料	勾 配	波高 (cm)	平均濃度	u^* (cm/s)
1-1	砂 礫	15°	3.5	0.348	21.4
1-2	"	"	3.4	0.343	21.3
2-1	メサライト	9°	4.6	0.361	17.6
2-2	"	"	5.7	0.347	18.3
3-1	"	7°	5.2	0.259	15.9
3-2	"	"	5.4	0.227	16.0
4-1	"	15°	4.8	0.417	23.1
4-2	"	"	4.8	0.385	23.1

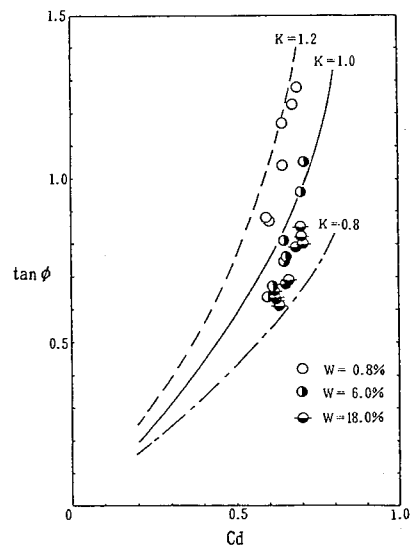


図 / 土砂濃度と(Cd)と $\tan \phi$ の関係

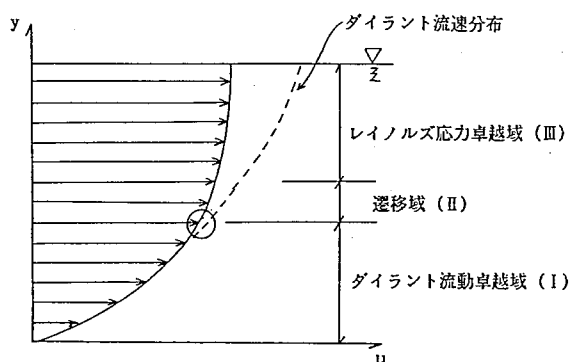


図 2 大規模土石流のイメージ図

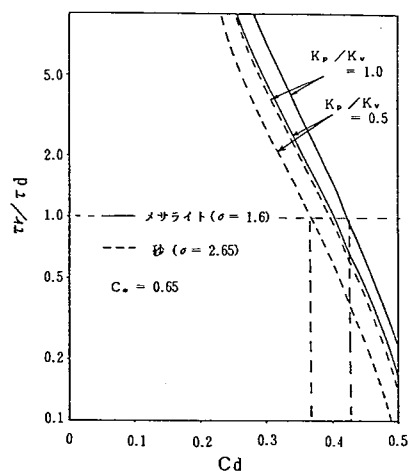


図 3 $\tau_r/\tau_d \sim C_d$ の関係

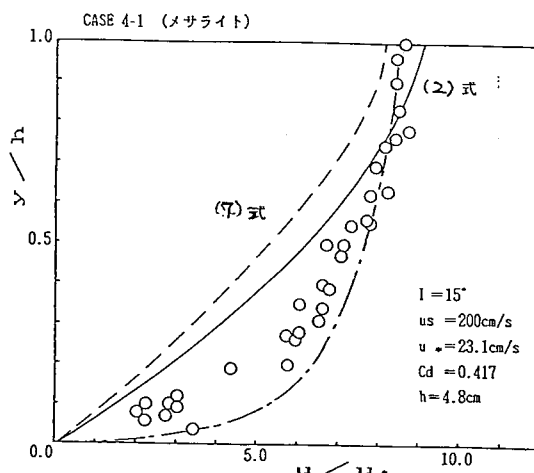
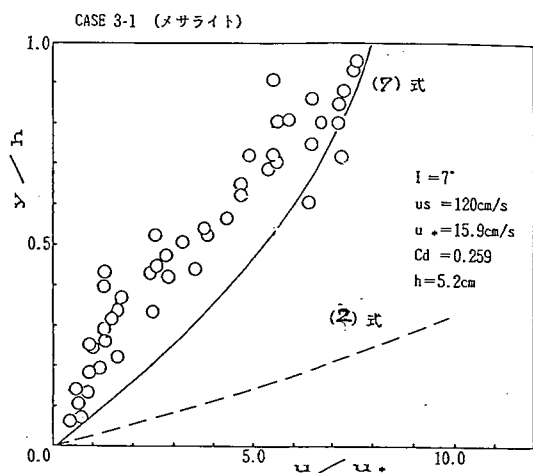
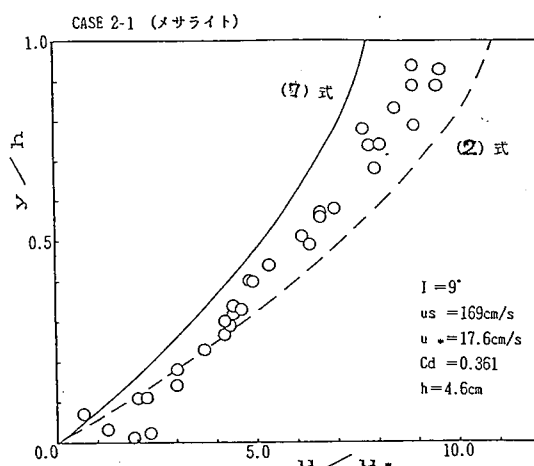
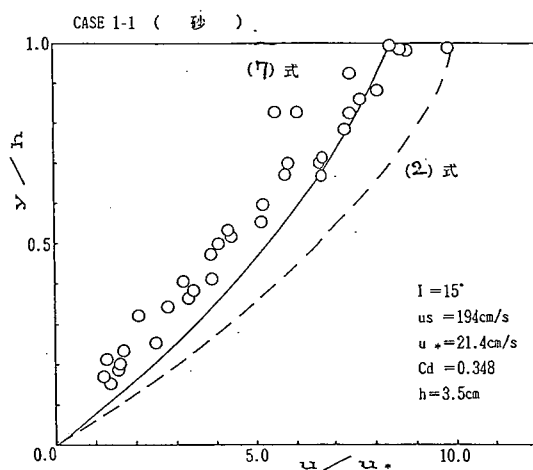


図 4 土石流の流速分布