

4 大岳川土石流に対するレオロジーの適用

東京大学農学部 川邊 洋
 " 市川 尚
 " 浦 真
 " 山口伊佐夫

1. はじめに

大岳川は千曲川の支流大石川の支流で、総延長12 kmに及ぶ流路長と、35.4 km²の流域面積を有する小河川である。その源は八ヶ岳火山列の北部に位置する大岳(2382 m)と双子山(2223 m)の中腹に発し、八千穂村で大石川に合流する。

この大岳川の本流右岸から分岐する湯沢の上流部で、1982年、1983年と2度の大規模土石流が発生した。1回目は1982年9月11日から12日にかけての台風18号に伴う豪雨(連続雨量208.5 mm)により、2回目は1983年9月27日から28日にかけての豪雨(連続雨量209.0 mm)によるもので、崩壊土量はそれぞれ約20万m³、約40万m³と見積られている。

本報告では、源頭部崩壊地や河道部における土石流堆積物から採取した試料を用いた土質実験の結果をもとに、レオロジー的な観点から土石流の流動を考察したものである。

2. 採取試料の土質特性

3種類の試料を実験に用いた。試料1と2は、堆積後1年以上経過した土石流堆積物の表層から採取したもの、試料3は崩壊地の斜面から採取した新鮮な裸出土である。いずれの試料からも、パラミノフェノールによる呈色反応により、モンモリロナイト、カオリン鉱物が検出されている。

2.1 粒度試験

粒度試験の結果を表-1に示す。試料1、2はかなり粘土分の洗脱を起し、砂質の内容物に富んでいるが、試料3は粘土分を比較的多く含んでいる。これを三角座標上にプロットすると、いずれも砂質ロームに属していることがわかる。

2.2 コンシステンシー

各試料のコンシステンシーは、流動特性に及ぼす粒度の効果を推しはかれるようにするため、フルイ分けにより最大粒径がそれぞれ0.074、0.11、0.25、0.4、0.85、2.0 mmになるような試料に分けて測定した。その結果を表-2に示す。

いずれの試料もコンシステンシー限界は、最大粒径が大きくなるにつれて低下する傾向にある。

試料	1	2	3
比重	2.76	2.79	2.74
粘土 (%)	12.1	12.1	15.0
シルト (%)	33.9	35.9	30.6
砂 (%)	54.0	52.0	54.4
10% 粒径 (mm)	0.0058	0.0055	0.0040
30% 粒径 (mm)	0.056	0.045	0.047
60% 粒径 (mm)	0.98	0.66	0.55
均等係数	169	120	138
曲率係数	0.55	0.56	1.00

表-1. 粒度試験の結果

2.3 剪断特性

土石流の流下過程では、土砂は十分な水分の供給のもとに、激しい攪乱作用を受けている。したがって、この点を考慮して次の3通りの状態を試料1、3に与えて剪断試験を行った。

①風乾 ②湿潤 ③練り返し

結果は図-1、表-3の通りである。

粘着力は、風乾状態では試料1、3とも約 0.25 kg/cm^2 であり、試料3では、湿潤、練り返しとなるにしたがって、値が低下していく傾向にある。

この傾向は、内部摩擦角についても見られ、とくに試料3の練り返し試料では、 15.5° と極端に小さくなっており、剪断強度の低下のおもな原因になっている。

試料3は粘土分が多く未だ攪乱を受けていない試料であり、土石流として流下していく過程で練り返しが行われるので、この実験結果から土石流の剪断強度は流下とともに低下していくものと推察される。

ところで、試料1は一度土石流として練り返しを受けた土であり、その土の風乾状態での剪断特性は試料3の風乾状態での剪断特性に類似している。このことから、この練り返し効果は可逆性をもっているのではないかという判断が下せる。

3. レオロジーよりみた粘性特性

非ニュートン性流体のずり応力 τ とずり速度 $\dot{\epsilon}$ の関係は、

$$(\tau - \tau_0)^n = \eta \cdot \dot{\epsilon}$$

で表わされる。ここで、 τ_0 は降伏値、 η は非ニュートン粘性係数、 n は粘性指数である。

上式で、 $\tau_0 = 0$ 、 $n > 1$ の場合をチクソトロピー流動、 $\tau_0 = 0$ 、 $n < 1$ の場合をダイラタント流動、

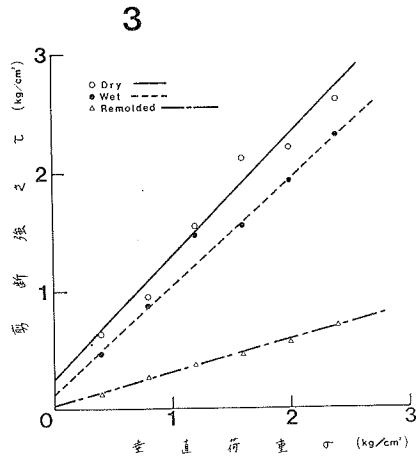
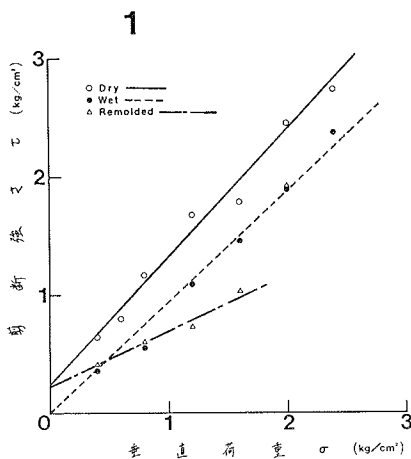


図-1. 直接一面剪断試験の結果

試料	相対透過率(%)	液性限界(%)	塑性限界(%)	塑性指数	流動指数
1	0.074	32.3	58.3	40.1	18.2
	0.11	35.2	53.6	40.3	13.3
	0.25	42.5	50.7	36.5	14.2
	0.4	48.0	45.0	34.2	10.8
	0.85	57.0	40.6	34.1	6.5
	2.0	70.2	35.9	31.6	4.3
2	0.074	35.7	53.2	40.4	12.8
	0.11	40.1	53.8	33.8	20.0
	0.25	48.8	46.0	35.6	10.4
	0.4	53.9	43.7	29.9	13.8
	0.85	63.4	41.1	27.9	13.2
	2.0	74.3	33.7	29.6	4.1
3	0.074	35.3	61.7	43.5	18.2
	0.11	40.2	63.7	44.8	18.9
	0.25	49.7	51.4	31.5	19.9
	0.4	55.3	50.0	38.0	12.0
	0.85	65.7	41.3	38.1	3.2
	2.0	77.5	39.5	33.6	5.9

表-2. コンシステンシー

試料 (含水比%)	内部摩擦角($^\circ$)	粘着力(kg/cm^2)
1	風乾 (7.3)	47.2
	湿潤 (33.5)	43.2
	練り返し(39.3)	25.2
3	風乾 (6.9)	45.8
	湿潤 (41.0)	42.2
	練り返し(49.1)	15.5

表-3. 剪断定数

$\tau_0 \neq 0$ 、 $n = 1$ の場合をビンガム流動という。さらに、 $\tau_0 \neq 0$ 、 $n \neq 1$ の場合を非ビンガム流動と呼ぶ。

粘度測定にはB型回転粘度計を用い、試料1~3について表-2に示されているような粒径区分でフルイ分けを施し、適宜4~7段階含水比を変えて実験を行った。得られた $\tau - \dot{\epsilon}$ 関係のいくつかの例を図-2に示す。また、この $\tau - \dot{\epsilon}$ 関係を(1)式に回帰させた結果が表-4である。

これらの図表を参照すると、大岳川より採取した試料では概して $n > 1$ であり、チクソトロピー流動を示すと判断される。全サンプルの n の単純な算術平均は、 $n \approx 1.32$ である。

降伏値 τ_0 は、低含水比から高含水比になるほど、また最大粒径が大きくなるほど、次第に小さくなる傾向がある。

次に、非ニュートン粘性係数 η' について検討する。 η' と最大粒径、含水比の関係を調べると、試料1、2では、 η' はほぼ1~10の間に集まっており、一定の関係は見当らない。一方、試料3では η' は $10 \sim 10^2$ に集中しているが、同一含水比では最大粒径が大きくなると η' の値が小さくなるような傾向にある。このように、十分な練り返しと混合を受けた下流部堆積体からの試料1、2と、崩壊地溪岸からの試料3との間には特徴的な差が見られる。

各サンプルのあるすり速度に対する $\eta' = \tau / \dot{\epsilon}$ の値を「見かけの粘性係数」といい、ひとつのサンプルの中で、すり速度によって変化する値である。これを、図-2の1-0.074と3-0.074を例にとって、図-3に示す。同図には、ニュートン流体である洗剤の η' (この場合は真の粘性係数に等しい)の変化も、対照として載せておいた。

同図より、両試料とも $\dot{\epsilon}$ の増加とともに η' が減少しているのがわかる。すなわち、大きな力が加わるほど流体は流れ易くなる傾向にあることを示している。また、その減少の程度は、試料1のほうが著しい。

4. 土石流の流速

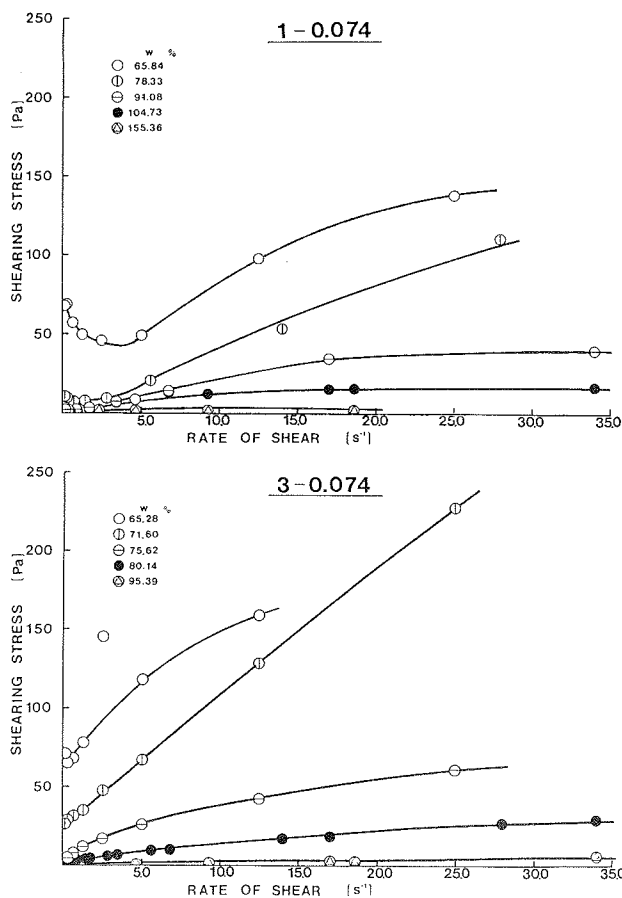


図-2 $\tau - \dot{\epsilon}$ 曲線

粘塑性体の表面
流の流速 u_f は、

(1) 式をもとにして (2) 式のように求められる。ここでは、前項までの実験結果を参考にして、 $n > 1$ 、 $\tau_0 = 0$ と仮定すると、 $c = 0$ 、 $\tan \phi = 0$ となるので、(2) 式は (3) 式のようになる。

$$u_f = \frac{1}{\tau} \left[\frac{1}{n+1} \gamma_s^n (\sin \theta - \cos \theta \tan \phi)^n H^{n+1} - \gamma_s^{n-1} (\sin \theta - \cos \theta \tan \phi)^{n-1} H^n c \right] + u_0 \quad \text{----- (2)}$$

$$u_f = \frac{1}{\tau} \frac{1}{n+1} \gamma_s^n (\sin \theta)^n H^{n+1} + u_0 \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 γ_s : 流体の単位重量、 θ : 溪床勾配
 c : 粘着力、 ϕ : 内部摩擦角
 H : 流体の高さ、 u_0 : 底面流速

(3) 式の τ 、 γ_s 、 H は、流動に伴って変化する値であるが、ここでは溪床勾配との関係を見るために、これらを定数とし、 $n = 1$ と $n = 1.5$ の場合の (3) 式を、1982年の土石流のビデオより計測された実際の流速に当てはめると図-4 のようになる。なお、 u_0 は仮定的に 1 m/s として計算してある。流下に伴う τ の減少や、溪床幅の変化による H の変動を考慮することによって、図-4 の適合度はさらに向上するものと思われる。

5. おわりに

粘度試験のデータは、現在微分法による整理を続行中であり、その結果をもとに (1) 式の再検討を進める予定である。また、流速式については、溪床幅を因子として導入する方法について検討中であり、より適合性の良い流速式へ改良していかつてもりである。

1					2					3				
測定値	各々比 (%)	τ	τ_0 (Pa)	τ_c	測定値	各々比 (%)	τ	τ_0 (Pa)	τ_c	測定値	各々比 (%)	τ	τ_0 (Pa)	τ_c
0.074	65.84	4.30×10^1	44.9	0.48	0.074	64.10	1.98×10^1	14.7	1.21	0.074	65.28	3.93×10^1	51.3	1.68
	78.33	5.80×10^1	7.61	0.56		78.15	2.06	2.46	0.90		77.60	1.24×10^1	25.1	1.10
	91.08	3.30	0.16	1.20		86.90	2.12	2.08	0.95		75.62	6.61×10^0	0.20	1.80
	104.73	1.88	0	1.30		108.91	2.31	1.51	1.27		80.14	4.87	0.69	1.53
	155.36	3.69×10^1	1.56	2.58		71.90	5.93	3.76	1.12		75.39	1.16×10^1	0	1.22
0.25	55.35	3.34	38.5	1.03	0.11	73.10	1.89	4.26	0.95	0.11	64.09	1.22	71.8	0.65
	68.23	1.09	3.26	0.86		68.48	4.27	10.0	1.37		69.10	2.76×10^1	21.2	1.28
	75.95	2.23	1.67	1.22		89.43	3.14	0	1.22		70.66	1.31×10^1	10.5	1.13
	88.27	1.44	0	1.54		101.06	4.09	0	1.38		71.12	8.99×10^0	5.30	1.47
	99.37	3.19	0	2.07		59.82	4.35×10^0	0	1.66		78.00	2.34×10^1	0.92	1.91
0.4	52.44	1.32×10^1	0	1.18	0.25	65.28	4.78	0	1.20	0.25	58.56	1.88×10^1	17.1	1.19
	61.41	2.94	2.35	1.00		74.80	4.27	0.82	1.34		60.09	2.68×10^1	17.4	1.22
	69.61	2.47	0	1.32		69.22	1.14	2.91	0.86		64.59	2.08×10^1	1.76	1.60
	70.28	6.52	0	1.41		52.99	3.08×10^0	0	1.44		66.00	9.77	1.49	1.52
	77.23	4.19	0	2.13		62.22	1.28	2.39	0.87		67.40	3.74×10^1	2.75	1.98
0.85	111.20	1.49×10^2	1.60	0.91	0.4	66.53	3.13	0	1.23	0.4	78.00	5.14×10^1	0.45	1.26
	50.12	8.12	0	1.18		45.93	1.42×10^1	0	2.15		56.95	7.00×10^1	13.6	1.37
	55.51	5.91	0	1.17		50.79	8.50	0	1.19		59.68	2.33×10^1	2.85	1.39
	61.36	3.58	1.54	1.55		56.83	4.23	0	1.20		62.42	8.53	1.70	1.48
	69.31	1.45×10^1	0	1.94		65.74	2.40	0.50	1.52		65.74	2.40	0.50	1.52
71.61	3.36	5.05	1.85	67.46	6.75	0	1.74	87.95	7.03×10^1	5.54	1.74			
111.82	3.94×10^1	0	5.46	0.85	49.21	5.62	61.8	0.83	0.85	62.50	8.68	3.08	1.18	
					64.73	7.67	3.98	1.42		64.73	7.67	3.98	1.42	
					58.20	4.27	4.20	1.64						

表-4. 粘度測定による (1) 式の各定数

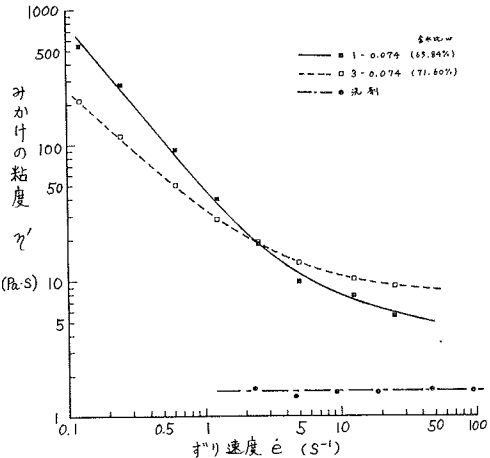


図-3. みかけの粘り度

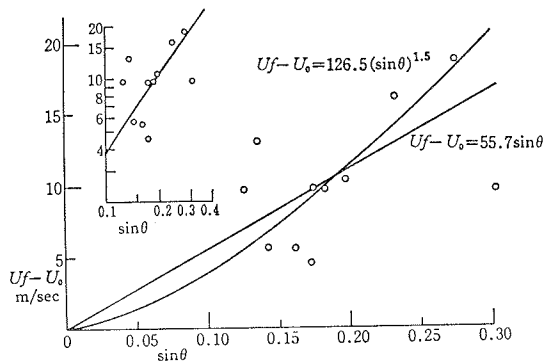


図-4. 大岳川土石流流速の計測結果