

土石流に関する基礎的研究 (第三報)

矢野 勝正・大同 淳之

FUNDAMENTAL STUDY ON MUD-FLOW (III)

by Dr. Eng. Katsumasa YANO and Atsuyuki DAIDO

Synopsis

In this paper, Non-Newtonian character of the mud-flow is discussed upon the base of the experimental data, and the mean velocity of the mud-flow is calculated as non-Newtonian liquid. The mud flow of the prototype in the mountainous region is concluded as the same character as the experimental flow. The boundary shearing stress in a trapezoid section of the mud flow, and the pseudoplastic viscosity of the mud is estimated in order to calculate the velocity of the mud flow.

1. は し が き

土石流は谷間に堆積した土石が、水分の滲透によつて飽和し、流動性を得て滑動する現象をいう。土砂の供給源は谷間の堆積物で、山腹の崩壊は必要としない。地這り、山腹の崩壊とこの点で異なるが、基本的には同じであると考えられる。

土石流の粗成は、停滞した土石流の観察によれば、巨大な石礫も少なくないが、石礫の間には可塑性と稠密性にとんだ泥土を伴なうのが常である。そこで我々は土石流は泥土からなり、その中に石礫が混入したものと考えることにする。

なお、泥土の粒度としては、多くの地這り地の粒度分析が、三角座標の分類によると粘土ではなくローム質に属することが報告されていることを参照して、我々の取扱う土石流もこの程度のものを想定して考えていくことにする。またこれらの泥土はすべて堆積したもので、ほぼ断面内では均質であると考えことにする。

土石流の被害を防止するためには種々の方策が考えられるが、これらの対策をたてるためには、土石流そのものの性質を明かにする必要がある。物質の力学的な性質を明らかにするためには、その物質の応力と変形の関係を明らかにすればよい。土石流を研究するには色々な方途があろうが、ここでは以上の理由によつて、土石流の流動について考察したものである。

2. 土砂と水の混合物の流動

(1) 土砂と水の混合体の流動

土石流は前述のように、土砂と水の混合物である。このような物質の応力と変形の関係は、非ニュートン流体としての特性を示すことは、前報²⁾においてのべたところである。これらの関係は、粘度がせん断時間の影響を受けない場合、それぞれ物質の性質によつて次式で表される。

$$\tau = \mu_p \left(-\frac{du}{dy} \right)^n \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\tau - \tau_y = \mu_B \frac{du}{dy} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

(2.1) 式は擬塑性流体，(2.2) 式はビンガム流体と呼ばれるもので， τ はせん断応力， τ_y はせん断降伏値， μ_p ， μ_B は擬塑性粘度あるいは塑性粘度， (du/dy) は変形速度， n は構造指数である。

前報においてのべたように，砂の濃度が比較的小さいときは (2.1) 式，粒子が細かく濃度が大きいとき (2.2) 式が適合した。

以上の関係が流れのスケールに対して粒子の粒径が大きく，濃度もそれほど高くない場合に成立するかどうか検討するために，円管における土砂輸送の実験結果⁹⁾を上記の考え方に従つて，壁面におけるせん断応力 τ_0 を示す $R\Delta p/2l$ と，同じく壁面における du/dy の値を示す $4Q/\pi R^3$ との関係を各流速毎にプロットすると Fig. 1 に示すように，測定の間においてはほぼ直線に実験結果が描点された。適用の範囲が問題

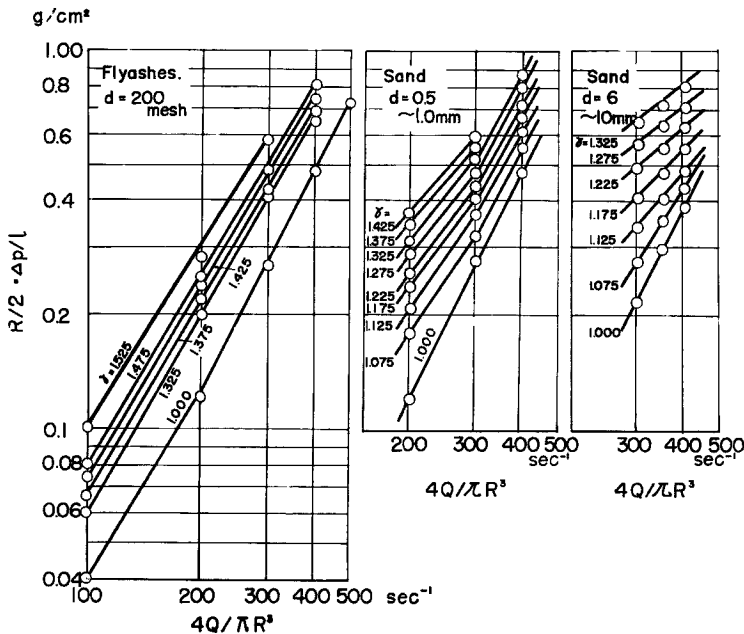


Fig. 1 Relations between $R\Delta p/2l$ and $4Q/\pi R^3$ ($D=3\text{in.}$)

になるであろうが，測定区間に限定するならば，(2.1) 式の関係が成立するとみなしてよいであろう。したがつて，Fig. 2 の記号にしたがつて， $r/R = \tau/\tau_0$ ， $\tau_0 = R\Delta p/2l$ ここに $\Delta p/l$ は単位長当りの圧力降下，の関係を (2.1) 式に代入して，このような土砂と水の混合物の円管流の流速分布，流量，平均流速をうる事ができる。

$$u = \left(\frac{\tau_0}{\mu} \right)^{1/n+1} R \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{1/n+1} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$Q = \left(\frac{\tau_0}{\mu} \right)^{1/n+1} R^3 \pi \left(1 - \frac{2R^{1/n}}{1/n+3} \right) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$u_m = \left(\frac{\tau_0}{\mu} \right)^{1/n+1} R \left(1 - \frac{2R^{1/n}}{1/n+3} \right) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

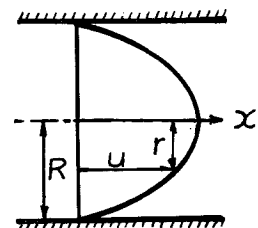


Fig. 2 Notation

さて (2.1) 式の関係は $n=1$ とするとニュートン流体の層流の式であるから，固体粒子を全然含まぬ流れから，土砂を多量に含む流れまで包括できるとしてよい。また Fig. 3 の流速分布からわかるように，流れ

の領域が乱流であつても、乱れによつて生じる流速分布の均一化は、見かけ上 n の値を減ずることによつて、層流の場合と同一にあつかえるであろう。

一方、濃度が次第に増してきた場合、(2.1)式がどこまで適用できるかという点については、まだ実験もなされていないので、不明である。単一の n の値が深さ全体に適用できない、あるいは粘弾性的な要素がでてくる可能性が考えられる。しかしながら非常に固体分濃度の大きい物質の流動実験は事実上困難である。

以上の理由から、水分が0すなわち乾燥砂のみを流してその流動状況を調べた。

(2) 乾燥砂の流動

(i) 実験の方法 実験は幅 0.2 m、高さ

0.15mの銅製水路の上端3mの部分に深さ0.15m、又は0.30mの高さに砂を充てんし、下端のゲートを取りはずして、砂を自重でもつて滑動せしめた。実験水路の勾配は $34^{\circ}30'$ である。実験に用いた砂は平均粒径 0.8 mm、内部摩擦角 $34^{\circ}02'$ である。流動状況の概略をのべると、砂は砂溜めより、ごくうすい層が滑り落ち、崩れ面が次第に後退して全量の滑動が終る (Fig. 4)。全量が滑動し終る時間は、30秒程度である。観測は水末端より 1.5m の所で側面より写真をとつて流れの流速分布を調べた。

実験によつて観察した砂の流れの模様を大別すると次のようにわけられる。

a) 粒子が単独で滑落する場合

b) 多量の粒子が一緒に滑落する場合

a) の状態はわずかな量の流下にみられる現象であつて、この場合においても滑り落ちる場合、転り落ちる場合、跳躍しながら流下する場合に分けられる。これらの現象は流下する砂の厚みによつてきまるのであつて、厚みがますほど跳躍は少なくなる。砂の流れが 1 cm 程度では、砂粒の上下運動はかなりはげしく砂の面は脈動する。

砂の層の厚みが 2 cm 以上になると、砂の上下動は水路底面の近傍に限られ、粒子の運動は水平とみなせるようになる。

この場合でも、全体がある厚さのまま一定の速度で滑落する場合と断面内で速度差をもつて流れる場合とが観察された。砂が湿度をふくんでいる時は1体となつて滑り落ち、完全に乾燥している時は速度差が観測された。この差は湿度による物質常数の変化であろう。Fig. 5は乾燥砂における流速分布の1例である。さてこれらの資料を整理するにあつて、砂は水のような連続体でないので、流体のときに用いた関係がそのまま適用できるかどうか不明であるので、次に検討を加えた。

(ii) 基礎式の検討 砂は肉眼でも判るように水のような連続体とは異なるが、対象とする微小要素中に数百個程度の砂の粒子を含むものとする、流体として取扱うことができるものとする。

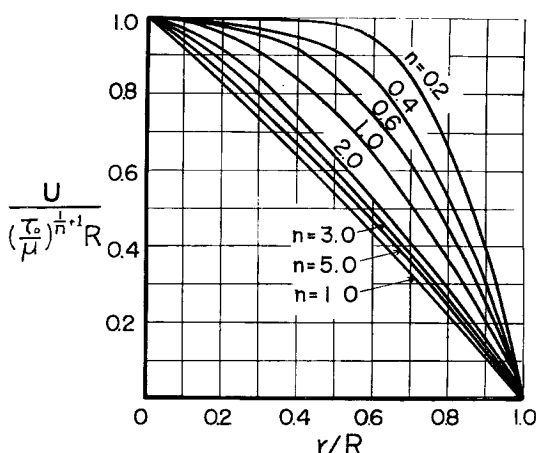


Fig. 3 Velocity distribution of pseudoplastic flow

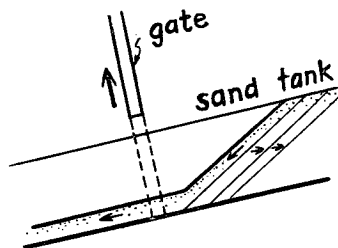


Fig. 4 Sketch of out flow (dry sand)

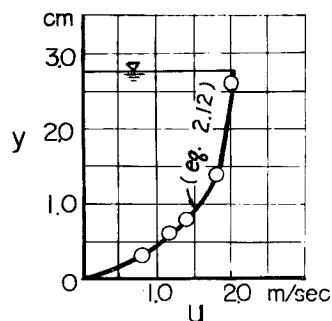


Fig. 5 Velocity distribution of dry sand (channel slope $34^{\circ}30'$)

運動方程式として二次元の場合

$$\frac{du}{dt} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

が成立する。ここに u は x 方向の速度, X は x 方向に働く質量力, p_x は x 軸に垂直な面に働く応力, τ_x は x 軸に平行な面に働く応力である。

仮定として

$$\left. \begin{aligned} \rho & \text{ は一定すなわち空隙率は一定, } y \text{ 軸方向の分速は } 0, p_x, p_y, \text{ は} \\ p_x &= p - 2\mu(\partial u/\partial x) \\ p_y &= p - 2\mu(\partial v/\partial y) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

ここに p は平均圧力で, この場合砂の深さがそれ程大きくないことを考慮して, 表面より深さ z の位置の圧力は $p = w_s \cdot z$ で表せるとする。ここに w_s は砂の単位体積重量である。

せん断応力については, 湿つた砂, あるいは濃厚泥流が擬塑性を示すことから, $\tau = \mu(\partial u/\partial y)$ に変つて, $\tau = \mu(\partial u/\partial y)^n$ とすると

$$\tau_x = \tau_y = \mu \left(\frac{\partial r}{\partial t} \right)^n = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^n \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

と書くことができる。 μ は物質常数である。

連続式は

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

(2.7) の仮定から

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ p_x &= p_y = p \\ \tau_x &= \tau_y = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

となる。したがつて (2.6) 式の運動方程式に代入して,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \right\} = -\sin \theta g \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

ここに, θ は流路の勾配である。

$y=h$ で $\partial u/\partial y=0$, $y=0$ で $u=0$ とすると,

$$u = \left(\frac{\rho g h \sin \theta}{\mu} \right)^{1/n} \frac{n}{n+1} h \times \left\{ 1 - \left(1 - \frac{y}{h} \right)^{1+1/n} \right\} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

$$u_m = \left(\frac{\rho g h \sin \theta}{\mu} \right)^{1/n} \frac{n}{n+1} h \times \left(1 - \frac{1}{2+1/h} \right) \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

をうる。(2.10) 式が成立するかどうか検討するために縦軸にせん断力 τ , 横軸に変形速度 du/dy をとつて両対

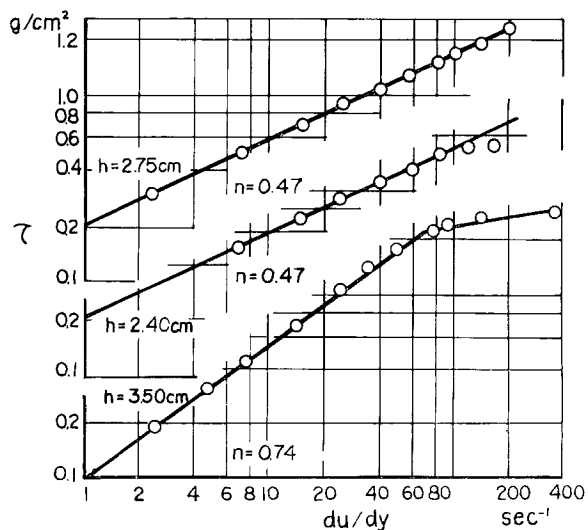


Fig. 6 Relation between τ and du/dy (dry sand)

数にプロットすると Fig. 6 のようになり十分 (2.10) 式が成立することを示した。(2.10) 式の関係を実際に利用するためには、物質および働いた力の大きさにおいて n および μ_p の値が一定値をとることが必要である。Fig. 6 の実験結果では $h=2.75$ cm および 2.40 cm では、 n および μ_p の値はほとんど等しいが $h=3.50$ cm では n の値は前者にくらべて大きい。この間の関係については更に追究しなければならないが、これは n あるいは μ_p の問題であつて、(2.10) 式が成立するとみなすことはできるであろう。

以上の結果、水を伴う土砂の流動は (2.1) あるいは (2.2) 式によつて関係づけられるとみなしてよく、その結果その流速は平均流速で表わすならば、流動体が擬塑性体とみなせるときは (2.13) 式、ビンガム流体とみなすときは (2.2) 式に $y/h=\tau/\tau_0$ の関係を用いて積分すると、

$$u = \frac{h\tau_y}{\mu_B} \left(\frac{1-2a+2ay'-y'^2}{2a} \right) \dots\dots\dots (2.14)$$

$$u_m = \frac{h\tau_y}{\mu_B} \frac{a^3-3a+2}{6a} \dots\dots\dots (2.15)$$

ここに $a=\tau_y/\tau_0$, $y'=\tau/\tau_0$ として求まることになる。

Fig. 5 の実験結果を Fig. 6 の最上段にプロットしてあるが、Fig. 6 で与えられる n , μ_p の値を用いて (2.12) 式を計算した結果では、Fig. 6 からよみとつた μ_p より少し小さい μ_p を用いたほうがよく一致した。

3. 実際の土石流への適用

前節においてのべた土砂の流動機構がそのまま実際の土石流の流動の状態と一致するかどうかは、現在のところ実際の土石流の観測資料がないのでわからない。ここでは一応一致するものとして考察する。

(2.13) 式あるいは (2.15) 式によつて、土石流の流速を予測するには、底面に働く圧力、擬塑性粘度 μ_p 、構造指数 n 、あるいは降伏値 τ_y の値を与える必要がある。

(1) 流動断面内の圧力分布

(2.13) 式の右辺の第1項 $\rho gh \sin \theta$ の ρgh は、 h の深さにおける圧力に相当する。流動物質が液状に

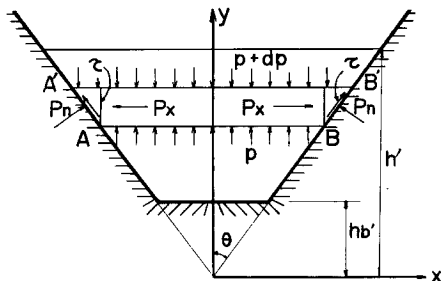


Fig. 7 Notation

近いところでは、圧力は深さに比例するが、流動物質が液状からはなれるにしたがつて、深さに比例しなくなる。ことに我々の対象とする土石流は、流路の形状が一般に台形であるからこの影響は大きいと考えられる。特に滑り始めた状態ではこの効果は大きいであろう。

いま Fig. 7 に示すような台形の流路において、底面および側面に働く力について考える。台形の頂点を原点にとり、水平に x 軸、垂直に y 軸、堆積の厚みを h_0 とする。図の $ABB'A'$ で示される高さ dy の部分に作用する力の平衡は、下面 AB に作用する圧力を p 、上面 $A'B'$ に作用する圧力を $P+dP$ 、上面 $A'B'$ の面積を $F+dF$ 、土砂の重量を w_s 、高さ dy の部分の体積を dV 、側壁に垂直に働く力を P_n 、側壁のマサツによるせん断応力を τ_n とすると dV の部分に働く y 方向の力の釣合は、

$$(P+dP)(F+dF) + w_s dV = PF + 2P_n S \sin \theta + 2\tau_n S \cos \theta \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに S は側面 BB' の面積、 θ は側壁の傾斜角である。これを整理し、微少量の積の項を省略し流れの方向に単位長を考えると、

$$P \cdot dF + F \cdot dP + w_s \cdot dV = 2P_n S \sin \theta + 2\tau_n S \cos \theta \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに $F=2y \tan \theta$ $S=dV/\cos \theta$

$$dF = 2dy \tan \theta \quad dV = 2y \tan \theta \cdot dy$$

であるから、これらの値を式 (3.3) に代入して

$$\frac{p}{y} + \frac{dp}{dy} + w_s = \frac{P_n}{y} + \frac{\tau_n}{y} \cot \theta \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

P_n は $E'B'$ 面に作用する圧力 p と BE' 面に作用する P_x からなるとすると

$$P_n = P \sin^2 \theta + P_x \cos^2 \theta \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$P_x = kp$ とすると

$$P_n = P(\sin^2 \theta + k \cos^2 \theta)$$

k はいま 1 に近いと考えると、 $P = P_n$ とおくことができ、式 (3.3) は

$$\frac{dp}{dy} + w_s = \frac{\tau_n}{y} \cot \theta \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$\tau_n = c'p$ とすると

$$\frac{dp}{dy} + w_s = c' \cot \theta \frac{p}{y} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

$c' \cot \theta = c$ とすると

$$\frac{dp}{dy} + w_s = c \frac{p}{y} \quad \dots\dots\dots (3.7)'$$

(3.7)' を y で微分し、(3.7) より p を dp/dy で表して代入すると

$$\frac{d^2 p}{dy^2} = c \left\{ \frac{1}{y} \frac{dp}{dy} - \frac{1}{cy} \left(\frac{dp}{dy} + w_s \right) \right\}$$

この式を積分して $y = h'$ で $p = 0$ とすると、

$$\left. \begin{array}{l} c \neq 1 \\ c = 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} p = \frac{w_s h'}{c-1} \left(\frac{y}{h'} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{y}{h'} \right)^{c-1} \right\} \\ p = w_s h' \left(\frac{y}{h'} \right) \log_e \left(\frac{h'}{y} \right) \end{array} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

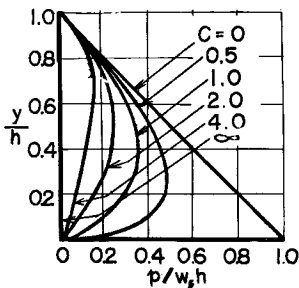


Fig. 8 Pressure distribution

c の値は $0 \sim \infty$ の範囲で変化すると考えられ、ほとんど液体に近いときは $c=0$ ($c'=0$) で、深さに比例し、粒子間の凝集が増すにしたがつて c の値が増し、圧力は原点において 0 となるような分布を示す (Fig. 8)。実際の土石流の c の値がどれ位であるか現在では不明であるが、流動の初期では c はかなり大きく、流下するにしたがつて、 c の値は 0 に近づいていくであろう。

深さ h_0 の点の底圧は

$$\left. \begin{array}{l} p_0 = \frac{w_s h'}{c-1} \left(\frac{h_0}{h'} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{h_0}{h'} \right)^{c-1} \right\} \\ p_0 = w_s h' \left(\frac{h_0}{h'} \right) \log_e \left(\frac{h_0}{h'} \right) \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

である。したがって底面に働く τ_0 は $\tau_0 = p_0 k' \sin \theta$ として与えられる。 k' は含水量に関係する係数である。

(2) 塑性粘度 μ_R 又は擬塑性粘度 μ_p

先の実験になされたような乾燥砂の流動と、砂が水を含んで流れる場合では、その粘性の機構は異なると思われる。別に考察する必要があると考える。実際の土石流では、粒子のみの場合は少なく、必ず水分を伴

なうと考えられるので水と粒子が混合している場合について扱うことにする。

粘度におよぼす要素として、固体分濃度、粒径、粒径の形状などが考えられ、特に濃度の及ぼす影響が大きい。濃度の増加とともに指数的に粘度は増加する。固体分濃度と粘度の関係については、種々の式が提案されているが、我々が対象としている土石流のような場合においては、森、乙升両氏の考え方が適用できる。

森、乙升氏は、せん断力を粒子間の液層の受けもち、粒子は変形しないとして次のような粘度式をみちびかれた。

粒子間の平均膜厚を近似的に $\bar{\delta} = 2V_f/S_0$, (3.10) ここに V_f は自由空隙容積（見掛けの容積から固体分および最高容積濃度に仮想的に充填したときの粒子層内の空隙を引いたもの） S_0 は系中に存在する粒子の総表面積、とする。 V を見掛けの全容積、 V_c を有効固体分容積（ $V_c = V - V_f$ ）、 w_s および ρ_s を固体の単位体積重量および密度、 x_v および x_{vc} を固体分容積濃度および最高容積濃度とすると次の関係がある。

$$V_f = V - V_c, \quad x_v = (w_s/\rho_s)/V, \quad x_{vc} = (w_s/\rho_s)/V_c$$

この関係を (3.10) 式に代入すると

$$\frac{\bar{\delta}}{2} = \frac{1}{S_0} \cdot \frac{w_s}{\rho_s} \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_{vc}} \right) \dots \dots \dots (3.11)$$

さきにのべたように、せん断をこの液膜が受けもつとすると Fig. 9 において

$$\tau = \mu_0 \frac{\Delta u}{\bar{\delta}} = \mu_s \frac{\Delta u}{d + \bar{\delta}} \dots \dots \dots (3.12)$$

ここには剪断応力、 d は平均粒径である。(3.11) 式と (3.12) 式より見かけの粘度は

$$\mu_r = 1 + \frac{d}{2} s_r \frac{1}{x_v - 1/x_{vc}}, \quad \mu_r = \frac{\mu_0}{\mu_s}, \quad s_r = \frac{S_0}{w_s/\rho_s} \dots \dots \dots (3.13)$$

となる。粒子の形状を球とすると、粒径にかかわらず $\frac{d}{2} s_r = 3$, が成立し、

$$\mu_r = 1 + \frac{3}{1/x_v - 1/x_{vc}} \dots \dots \dots (3.14)$$

となる。 x_{vc} は0.52としておられる。

x_{vc} の値は、粒子の形状を球形とすると、粒子の配列から定まるのであつて、正方形粗充てんで0.52⁹⁾、六方形粗充てんで0.60、最密充てんで0.74である。したがつて森、乙升両氏は最高濃度として、粒子の正方形配列を考えられたことになる。

x_{vc} の値としてどの値を採用するか問題のあるところで、以上のように粒子を球としても上のような配列の成立するのは粒子間に摩擦の働かないかなり大きい球の場合であらう。

土、砂の場合は形状、吸着層の吸引力あるいは粒子の結合にさからう液体の抵抗によつての値は x_{vc} 異なる。したがつて実際に資料を水中に沈降させて、沈澱を完了したとき容積から x_{vc} を求める必要がある。

また x_v と μ_r の二三の測定値があればこれからでも x_{vc} を求めることができる。(3.13) 式を変形すると次式のようになる。

$$\frac{1}{\mu_{sp}} = \frac{2}{d s_r} \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_{vc}} \right), \quad \mu_{sp} = \mu_r - 1 \dots \dots \dots (3.15)$$

(3.15) 式は μ_{sp} と x_{vc} とが直線関係にあり、直線の傾斜の逆数が $1/2 d \cdot s_r$ であることを示している。文献7に所載の珪目粘土の懸濁液の粘度を以上の方法で整理すると Fig. 10 のようになり $x_{vc} = 0.488$, $d s_r / 2 = 2.22$ をうる。故にこの懸濁液の粘度 μ_r は (3.13) 式にしたがつて

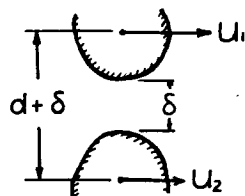
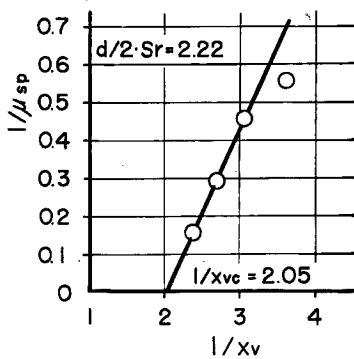
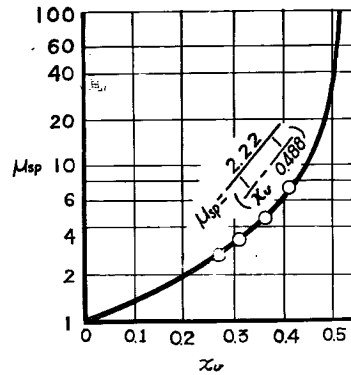


Fig. 9 Notation

Fig. 10 Relation between $1/\mu_{sp}$ and $1/x_v$ Fig. 11 Relation between μ_{sp} and x_v

$$\mu_r = 1 + \frac{2.22}{\left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{0.488}\right)} \quad (3.16)$$

として求まることになる。(3.16) 式の結果は、Fig. 11 に示すように、測定値を説明し得ている。以上の方法によつて、粘土に水が混合した場合の粘度 μ_s は求めることができる。

しかしながら、土石流では粘土の中に石礫が混入しているの、その影響を考える必要がある。例えば Fig. 12 は文献 7 に所載のデーターであるが、さきの蛙目粘土にロウ石を骨材として混入した場合の粘度の測定値である。これによると骨材の量が増す程、粘性は低下している。

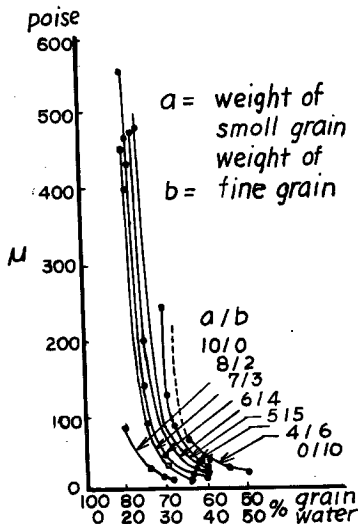
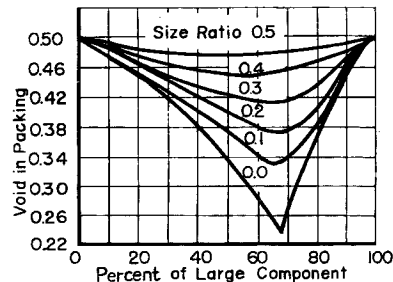
(3.13) 式の誘導過程は粒子に粒径分布があつたとしても成立する。ただ変化するのは x_{vc} の値である。一様粒径の空隙をちょうど満たすような粒径が存在したとすると、 x_{vc} の値は 1 に近い値をとりうることも考えられる。

土石流のように細粒と粗粒の粒径に非常に差があるときは、二種の粒径の混合とみなすことができる。

二種の粒径が混合した場合における空隙率については

Westman⁹⁾ 又は Furnas¹⁰⁾ の実験がある。例えば

Fig. 13 は Furnas の実験結果で、2 種の粉体の混合では粗粉体の容積混合率が 70% の近傍で最つとも充てんは密になり、又粒径比が 1 からはなれるほど密になるが、最大充てん率をあたえる混合率の値にはあまり変化がないことを示している。そこで、2 種の粒径が混合し

Fig. 12 Relation between μ and x_v for different values grain size componentFig. 13 Relation between void in packing and percent of large component for different size ratio⁹⁾

たときの粘性を求めるには、Fig. 13に粗粒と細粒の粒径比と混合率を与えて x_{ve} の値をよみとり、(3.13)式を用いて所要の濃度における μ_s の値を求めることができる。Fig. 12には骨材の粒径が記載されていないので、粘土は微細であることから粒径比を0.0として x_{ve} の値を求め、(3.16)式によつて μ_{sp} を求めて実測値と比較すると、Fig. 14に示すように、 x_v の小さい部分ではかなり良く一致し、骨材の混入するにしたがつて μ_s の低下する傾向を説明しうるが、 x_v の大きいところおよび粗粒率の大きいところではずれてくる。これは粗粒率100%で当然 x_{ve} の値が細粒100%と同じ値に戻るべきところ、Fig. 12の結果は戻っていないので (x_{ve} の値が同じならば粒径にかかわらず粘性は同じになる) その影響と考えることができる。これを修正するためには粗粒のみの $1/2 ds_r$ の値、および x_{ve} の値を求めて、粗粒率によつて、細粗両方の値を組合せればよいが、この実験値では粒径その他細目の資料が明確でないのでこれ以上のせんさくはさけ、今後の実験によつて実証したい。

土石流の粘度ではもう一つ問題がある。実際の土石流の状態は、セメントのモルタル程度の稠密さを有していると考えられる。粘土に水を混合した場合、水分が20~30%程度では粘度は揺変性を示すようになる。したがつて粘度はせん断力の大きさおよびせん断力の働いた時間に密接に関係するようになる。この揺変性は濃度に依存するようで、水分30%程度より顕著であるが、それよりも水分の大きいところでも存在するようである。粘性の水分依存性を明らかにするには揺変性の補正が必要である。また補正を必要とする水分の範囲を決めることが重要になる。しかし現在ではまだ十分の実験値がないので、今後このこされた問題である。

(3) せん断降伏値および構造指数 n

せん断降伏値 τ_y は、土のせん断強度に影響する要素は多種であるから実際に資料を採集して試験する以外にない。測定された降伏値と (3.8) 式で得られる圧力分布から、その点の粘土が流動するか否か判定できる。

構造指数 n の値について現在までに得られた我々の実験資料は、乱流の領域における見かけ上の n の値であつて、実際にその物質の構造指数を示すものではない。この点について、実験方法を検討して今後追求する予定である。

4. む す び

この論文においては、土砂に水を混合した物質の流動は、非ニュートン流体としての特性を示すことをのべ、その特性にもとづいた流速分式あるいは平均流速式を示した。

実際の山間に発生する土石流も恐らく同じように取扱うことができるであろうとの考えに立つて、台形の流路における底面および流体内部の圧力分布を求めた。また粘度として見掛けの粘性 μ_s の値を森、乙升式を利用して粘土の場合に適用し、さらに混合砂礫の影響をも論じた。粘度の揺変性、構造指数 n の値など問題は残されているが、実際の土石流の資料を得て、以上にのべた考え方のもとに整理していくならば、土石流の流動の全貌はかなり明らかになるであろう。

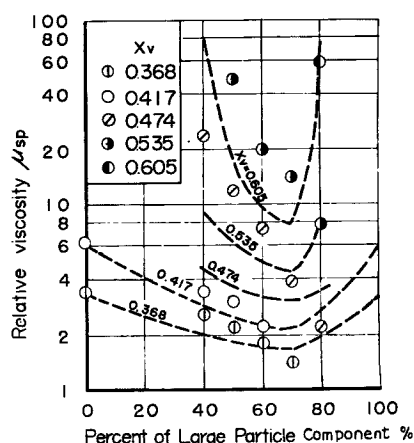


Fig. 14 Relation between relative viscosity μ_{sp} and percent of large particle component

参 考 文 献

- 1) 富山県土木部 国見地すべり地調査報告, 昭33.
- 2) 矢野勝正・大同淳之：土石流に関する基礎的研究（第二報），防災研究所年報，第4号，昭36，P. 173.
- 3) 長谷川源太郎・八木得次・徳永省三：サンドポンプの性能ならびに管抵抗の実験：運輸技術研究所報告，第7巻第6号，1957，P. 93.
- 4) 久保輝一郎他3氏編：粉体，理論とその応用1962，P. 532.
- 5) 森芳郎・乙升直：懸濁液の粘度について，化学工学，20巻第9号，1956.
- 6) 久保輝一郎他3氏編：粉体，理論とその応用，1962，P. 210，P. 488.
- 7) 日本材料試験協会レオロジー部門委員会編：化学技術者のためのレオロジー，1959，P. 179.
- 8) 久保輝一郎他3氏編：粉体，理論とその応用，1962，P. 210，P. 488.
- 9) C. Furnas : Ind. Eng. Chem. 22, 26 1930.