

1. まえにきき：土石流の流動に関して、従来微細粒子を主体とするビンガム流体として取り扱われている例が多いが、わが国で発生する土石流には砂礫、転石が多量に含まれており、それらによる流動特性の究明が重要である。大粒子を多量に含む乱流では、粒子の衝突による運動量輸送が流れの特性を決定する重要な要素となり、そのような流体はダイラタント流体と呼ばれる。本研究は実験水路に発生させた土石流にダイラタント流体の流動式を適用して、先端部の移動速度、波高、抵抗則および土石流による堆積層の侵食などの説明を試みる。

2. 土石流先端部の移動速度、波高および抵抗則：M.A. Dement'jev は R.A. Bagnold の行った高濃度粒子流に関する実験結果を再整理して、

$$\tau = \frac{0.104}{(C_A - C_d)^{1/2}} C_d \sigma d^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

を得た。ここに、 τ ：せん断力、 du/dy ：速度勾配、 d ：粒径、 σ ：粒子密度、 C_A ：粒子流の平均濃度、 C_d ：粒子層が静止している場合の充填濃度、である。(1)式を開水路に適用することにより、流速分布形、平均流速、流動層厚さ、および抵抗則に関して、それぞれ、

$$\frac{u_0 - u}{u_0} = \left(1 - \frac{y}{h}\right)^{3/2} \dots\dots (2), \quad \frac{U}{\sqrt{gd}} \left/ \left(\frac{g^2}{gd^3} \right)^{1/2} \right. = \frac{1.085}{(1 - C_d)^{1/2}} (C_A - C_d)^{1/2} \left(1 + \frac{1 - C_d}{C_d} \frac{\rho}{\sigma}\right)^{1/2} \sin^2 \theta \dots\dots (3)$$

$$\left(\frac{h}{d} \right) \left/ \left(\frac{g^2}{gd^3} \right)^{1/2} \right. = \frac{0.921}{(C_A - C_d)^{1/2} \left(1 + \frac{1 - C_d}{C_d} \frac{\rho}{\sigma}\right)^{1/2} (1 - C_d)^{1/2} \sin^2 \theta} \dots\dots (4), \quad \left(\frac{U}{u_0} \right) \left/ \left(\frac{g^2}{gd^3} \right)^{1/2} \right. = \frac{1.131 (C_A - C_d)^{1/2} \left(1 + \frac{1 - C_d}{C_d} \frac{\rho}{\sigma}\right)^{1/2}}{(1 - C_d)^{1/2} \sin^2 \theta} \dots\dots (5)$$

を得る。ここに、 u_0 ：表面流速、 h ：流動層厚、 U ：平均流速、 g ：流動層内の水のみの流量、 ρ ：水あるいは微細粒子を含む流体の密度、 θ ：水路勾配、 u_0 ：摩擦速度、 g ：重力加速度、 y ：流動層下面からの高さ、 u ：高さ y での流速、である。(3)、(4)、(5)式は C_d が判明すれば流れが解析できることを示している。

浸透流が地表面に達する厚い堆積層においては、表面流の到達とともに、作用するせん断力が抵抗力を上回る深さにある層は流動化する。流動化層は粒子の衝突によって分散を起して、 C_A よりも小さい濃度 C_d になって、元河床上に乗り上げるものと考え、

$$C_d = \tan \theta / \{ (\rho/\sigma - 1)(\tan \phi - \tan \theta) \} \dots\dots (6)$$

が得られる。ここに、 ϕ は堆積層の内部摩擦角である。そして、このような濃度で元河床上に乗り上げた流動層の先端部では、元河床面上で、作用しているせん断力と抵抗力が均合い、先端部自身の波高や移動速度は変化しないことが判明する。すなわち、(6)式を用いると、(3)式および(4)式で先端部の速度および波高が求められる。

3. 土石流の発生に伴う堆積層の侵食：堆積層の上流端で流動化層が乗り上げ、土石流が形成されると、それに続く部分の通過によって堆積層は激しい侵食を受ける。いま、流動層中の砂礫分の流量 Q_0 と水分あるいは微細粒子を含んだ高濃度流体の流量 Q_1 との関係は、

$$Q_0 = Q_1 C_d / (1 - C_d) \dots\dots (7) \quad \text{であり、また、(6)式より、}$$

$$C_d \approx (\tan \theta_0 - \partial^2 \theta / \partial x^2) / \{ (\rho/\sigma - 1)(\tan \phi - \tan \theta_0 + \partial^2 \theta / \partial x^2) \} \dots\dots (8) \quad \text{である。ここに、}\theta_0\text{：堆積層の初期勾配、}\theta\text{：堆積層表面に沿った座標軸から測った河床高である。}(7)、(8)式より、微小項を省略して、}$$

$$\partial Q_0 / \partial x = -[g \tan \phi / \{ (1 - C_d)(\rho/\sigma - 1)(\tan \phi - \tan \theta_0)^2 \}] \partial^2 \theta / \partial x^2 \dots\dots (9) \quad \text{を得るから、これを流動の連続式}$$

$$C_A \partial^2 \theta / \partial t + \partial Q_0 / \partial x = 0 \dots\dots\dots (10) \quad \text{に代入することにより、}$$

$$\partial^2 \theta / \partial t = \{ g / C_A (1 - C_d) \} \{ \tan \phi / (\rho/\sigma - 1)(\tan \phi - \tan \theta_0)^2 \} \partial^2 \theta / \partial x^2 = K \partial^2 \theta / \partial x^2 \dots\dots (11) \quad \text{のような拡散方程式が得られる。}$$

(11)式の拡散係数は C_d が x および t の関数であるから厳密には定数ではないが、 C_d の初期値 θ_0 の変動は小さいとして、一定値 K であると仮定する。そうすれば、(11)式の条件[$x=0$ で $\partial^2 \theta / \partial x = M$ 、 $t=0$ で $\partial^2 \theta / \partial x = 0$]……(12)

を満足する解は、 $\xi / \sqrt{4Kt} = -M \cdot \text{ierfc}(\xi) \dots\dots (13)$ である。ただし、 $\xi = x / \sqrt{4Kt} \dots\dots (14)$ 、

$$\text{ierfc}(\xi) = \int_{\xi}^{\infty} \{1 - \text{erfc}(\xi)\} d\xi \dots\dots (15) \quad \text{である。上流端は水成勾配}\tan \alpha\text{に保持されるものとするれば、}$$

$M = \tan \theta_0 - \tan \alpha \dots (16)$ である。ただし、

$$\tan \alpha = (0/p - 1) C_k \tan \phi / \{ (0/p - 1) C_k + 2.5 \} \dots (17) \quad \text{で与えられる。}$$

4. 実験；幅20cm，長さ7m，1側面ガラス張りの鋼製水路に、あらかじめ、所定の厚さに実験用砂を敷きならしてあり、上流端から急に水あるいはシルトの高濃度液を流下させて土石流を発生させた。側面からの撮影によって、流動の状態を測定し、また下流端で濃度の測定を行った。使用河床材料は①： $d_m=5.9\text{mm}$ ， $d_{90}/d_{10}=5.52$ ， $C_k=0.756$ ， $\tan \phi=0.8$ ， $\sigma_g=2.65\text{g/cm}^3$ ，および②： $d_m=3.5\text{mm}$ ， $d_{90}/d_{10}=1.67$ ， $C_k=0.627$ ， $\tan \phi=1.0$ ， $\sigma_g=2.65\text{g/cm}^3$ の2種類である。

5. 実験結果と考察；図-1は材料①を用いた実験について、流速分布形を求めた例である。実験値は(1)式を示しているが、この種の流れがダイラタント流体として取り扱えることを示しているものと考える。

図-2は先端の移動速度と水路勾配の関係を示している。(2)式は右辺に C_k を含んでいるが、これに(1)式の関係を入れて求めた理論値と実験値の比較である。材料①に対するグループ(理論値が一本の点線で示されている)では、通水前に河床を飽和状態に近くしてあるので、給水量に対する浸透の影響が小さく、先端部の移動も連続的で、理論値に近くなっている。一方、材料②に対するグループでは、通水時に河床砂は乾いており、浸透の影響で先端部の移動が間断的となり、全体に理論値よりもかなり遅くなっている。したがって、通常の土石流発生時のように、河床が飽和状態に近い場合は(3)式が用いられるであろう。なお、(1)式が適用可能であることも実験的に確かめられている²⁾。図-2より、一定流量のもとでは、先端速度は河床勾配が変化してもあまり変化しないことがわかる。図-3は先端波高と勾配の関係を示しており、前述の理由により、材料①に対する実験ケースの、しかも給水量の多いもので理論の適用性がよいが、他のケースについてはばらつきが大きい。同一流量に対しては、勾配が大きいか波高が大きくなることがわかる。図-4は流速係数と勾配の関係であるが、浸透の影響の強いケースでは、先端の平均的な移動速度は遅くなるから、実験値は理論値の下側にプロットされる傾向が強い。なお、同一流量に対しては勾配が大きくなると抵抗が増加する。

図-5は材料①について、 $\tan \theta_0=0.405$ ，給水量 $q=50\text{cm}^3/\text{s}$ の場合の、 $x=3.5\text{m}$ での水面および河床の時間的変化をみたものである。材料中には最大粒径2cm程度の礫が含まれていて、それが障害となることで実験値は数波の段波となっているが、平均的には理論値と合っているものとみられる。なお、先端の到達時刻と波高は(3)式および(4)式から求めた。図より、先端到達後しばらくは、ほとんど侵食を生じないこと、その後の侵食速度および流動厚は一定値に近いこと、ことがわかる。

6. あとがき；実験条件を厳しく制御することが困難である上に測定が難しいため、得られた結果はばらつきが大きい。ここで導入した考え方は妥当であることが判明した。

参考文献；1) Dement'jev, M.A.: Internal friction and lateral particle interaction in high-density slurry flows, Fluid Mech.-Soviet Research, Vol. 4, No. 1, 1975.

2) 高橋・寺田・津田；土石流の発生に対する高濃度流の影響，土木学会論文集，451号，1975年。

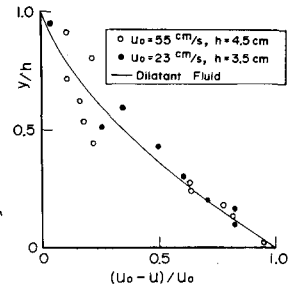


図-1 流速分布

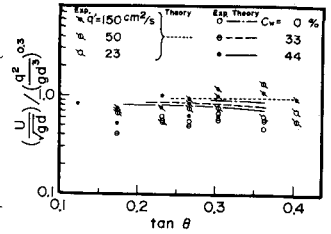


図-2 先端の移動速度

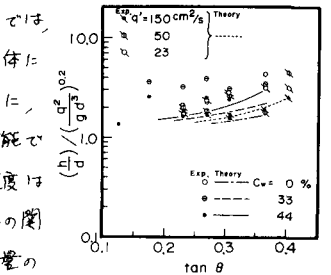


図-3 先端部の波高

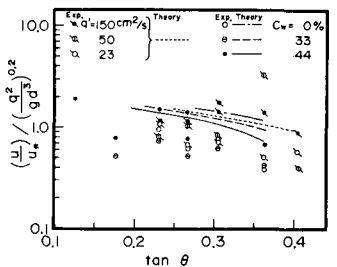


図-4 流速係数

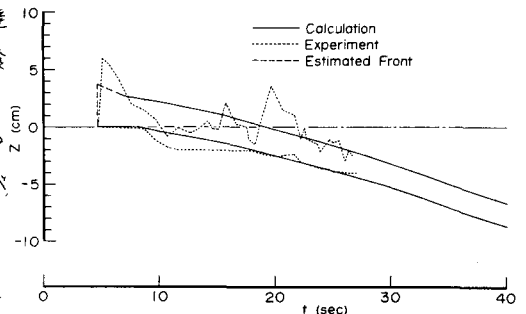


図-5 土石流による侵食の進行