

九州大学 工学部 正員 ○橋本 晴行

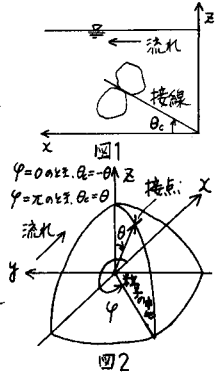
九州大学 工学部 正員 橋 東一郎

九州大学 大学院 学生員 末次 忠司

すなわち：粗粒子を高濃度に含む土石流の粒子間応力については、Bagnoldをはじめとして様々な応力式が提
案されている。然るも前報¹⁾において応力式を提示したが、いくつかの問題点を含んでいた。本研究は土石流にお
ける粒子の接触機構を実験的に観察し、前報¹⁾における問題点を修正して応力式を提案する
ものである。

粒子の接触機構：粒子間応力は粒子相互の接触によって発生するので、そのときの角度
(接点角)の分佈や、接触してから離れるまでの相対的移動形態などは粒子間応力の主
要な要素である。

以上の諸点を明らかにするため、平均粒径 $d = 1.74 \text{ cm}$ 、密度 $\rho = 1.25 \text{ g/cm}^3$ 、最密充填濃度
 $G_0 = 0.54$ の均一な人工軽量骨材を、幅 15 cm 、長さ 7 m の可変勾配水路に、厚さ $D \div 8 \text{ cm}$ で
敷き、あらかじめ河床を水で飽和させておいてから、上流端から急激に $q_{in} = 200 \text{ cm}^3/\text{s}$ の流
量で給水して土石流も発生させ、実験を行った。勾配は 5° 、 7° 、 9° の3種類であった。そ
して上流端から $x = 490 \sim 515 \text{ cm}$ の区間の側壁から 16 mm

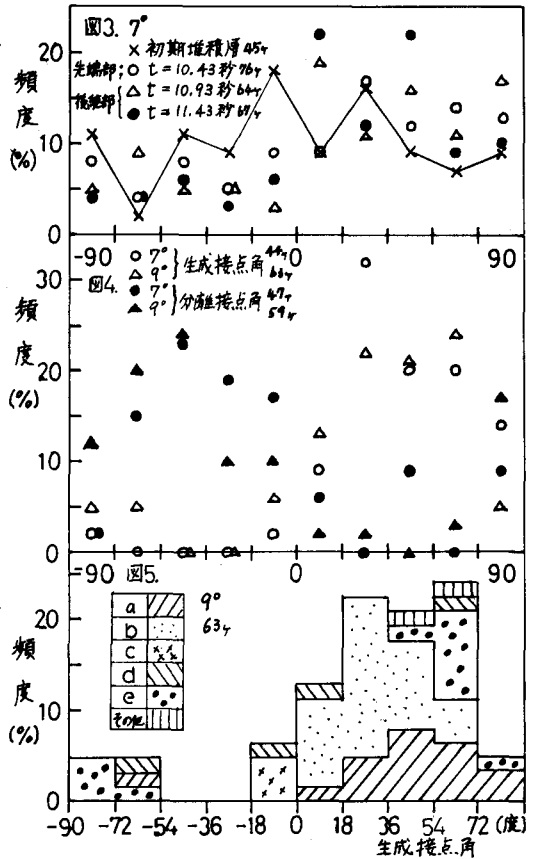


高速度カメラを使って 100 23/sec のコマ送りスピードで
土石流をカラー撮影した。各要素の解析はフィルムモーシ
ョンアナライザーによった。

1) 接点角の頻度分佈 粒子は不規則な形状もしている
ので、接点角 θ_c を図1のように定義する。ある瞬間の土
石流の流動層部分において、側壁から θ_c が正しく撮影さ
れる $\varphi = 0$ 、 π の近傍で群れている粒子の θ_c を読み取り
その頻度分佈を求めたのが図3である。初期堆積層の頻
度分佈に比較して土石流のそれは一般に $\theta_c > 0$ の領域に
偏っていることが分る。

2) 生成接点角と分離接点角 土石流の後続部において
、ある瞬間の接点も過去から未来に渡って追跡し、2粒
子が接触した瞬間(生成接点角)から分離する(分離接
点角)までの接点角の変化を求めた。図4はこのように
して求めた生成接点角と分離接点角の頻度分佈である。
明らかに粒子は $\theta_c > 0$ の領域で接触し、 $\theta_c \leq 0$ の領域で
分離する傾向が分った。

3) 接触から分離までの粒子相互の相対的移動形態 2
粒子の接触後の相対的移動は θ_c が 0.1 秒以上一定である
タイプA、正の θ_c が減少して上層粒子が相対的に乗り
上げるタイプB、負の θ_c が減少して上層粒子が相対的に落
ち込むタイプC、一定の θ_c の継続時間が 0.1 秒未満で、そ



の後分離していくタイプ、そして正の θ_c が増加し、 90° を越えて負になるか、その逆をたどるかして上層粒子が相対的に落ち込んだり、 90° を境にして正の θ_c と負の θ_c を交互に繰り返すタイプに分類できる。このような手法で接点を分類し、生成接点角別にその頻度を求めた図が図5である。図5より、移動形態として、a、b、cのタイプが大部分であることが分る。aタイプの接点の50%はその後bタイプに変化することも考慮する $\theta_c > 0$ の領域で生じた接点の大部分は接点の上層の方の粒子が相対的に乗り上げることに伴って $\theta_c \leq 0$ の領域に移行し、残りの比較的大きい角度で発生した接点は上層粒子の相対的落ち込みで $\theta_c \leq 0$ の領域に移行する。このような移動形態から判断すると粒子間の接触を衝突交換現象としてとらえることはできる。

粒子間応力：理論の展開において以下のような仮定を行った。① i 粒子は 0 粒子との接触の瞬間、速度が変化する(図6)。そのとき i 粒子に接している他の粒子も同様に速度変化も生じる可能性があり、この効果を単純に i 粒子の質量の増加として考慮し、それを $M \equiv m$ (1個の粒子の質量) とする。② 0 粒子は衝突前後で動かないものとする。③ i 粒子は 0 粒子に接触した瞬間に、接触角度にかかわらず平均的にすべりを伴うものとする。



図6.

1) 衝突理論 上記の仮定より質量 M の i 粒子が 0 粒子に接触した瞬間を考える。i 粒子はその後の 0 粒子から分離せずに a、b、c タイプの移動もしているが、衝突前後の i 粒子の 0 粒子に対する相対速度を $\vec{v}$ とすれば $\vec{v} \cdot \vec{n}_0 = 0 \dots \dots$ ① とする。ここに $\vec{n}_0$ は 0 粒子の中心から接点に向かう単位ベクトルである。これより i 粒子の運動量変化は $M(\vec{v}_i - \vec{v}_i') = -M(\vec{n}_0 \cdot \vec{v}_i)(\vec{n}_0 - \mu \vec{s}_0) \dots \dots$ ② とする。ここに μ はすべり係数、 $\vec{s}_0$ はすべりの方向を示す単位ベクトルである。

2) すべりの方向 衝突時に粒子の回転が与えられ、 $\vec{s}_0$ は衝突前の相対速度の P 点での接線成分が最大となる方向である。前報より $\vec{s}_0 = ((\sin^2 \varphi \sin^2 \theta + \cos^2 \theta)^{1/2}, -\cos \varphi \sin \varphi \sin^2 \theta / (\sin^2 \varphi \sin^2 \theta + \cos^2 \theta)^{1/2}, -\cos \varphi \cos \theta \sin \theta / (\sin^2 \varphi \sin^2 \theta + \cos^2 \theta)^{1/2}) \dots \dots$ ③ とする。

3) 単位時間当りの衝突回数 衝突が相対速度によるものと考えれば、0 粒子が単位時間当りに、 $\theta = \theta + d\theta$, $\varphi = \varphi + d\varphi$ の間の角度で衝突する回数は $dn = -(\vec{v}_i \cdot d^2 \sin \theta d\theta d\varphi \vec{n}_0) N \dots \dots$ ④ である。ここに N は単位体積当りの粒子数である。2次元等流では $dn \propto \sin \theta \cos \theta \cos \varphi d\theta d\varphi$ とし、 $\varphi = -\pi/2$ のとき dn は $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ で最小、 $\theta = 54.7^\circ$ で最大となる。図4の生成接点角の頻度分布は④式の妥当性を示唆している。

4) 衝突領域 実験より、注目する粒子に対して相対的に速い粒子(上層粒子)はその粒子の $0 \leq \theta \leq \pi/2$, $\pi/2 \leq \varphi \leq 3\pi/2$ の領域で衝突する。注目する粒子に対して相対的に遅い粒子(下層粒子)はその粒子の $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$, $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$ の領域で衝突する。

5) 0 粒子の上層粒子から受ける平均衝突力 $\vec{G}_0$ (1~4)より $\vec{G}_0 = -\int M(\vec{v}_i - \vec{v}_i') dn = -\int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=\pi/2}^{3\pi/2} MN(\vec{n}_0 - \mu \vec{s}_0)(\vec{v}_i \cdot \vec{n}_0) d^2 \sin \theta d\theta d\varphi \dots \dots$ ⑤ とし、2次元等流の場合 $\vec{v}_i = d \cos \theta \frac{d^4}{dz^2} \vec{r}$, $N = (C/C_0)^{1/2} d^3$ を考慮して $\vec{G}_0 = (G_x, G_y, G_z) = Md(C/C_0)(d^4/dz^2)^2 (\pi/24 + 0.154\mu, 0, -\pi/24 + 0.111\mu) \dots \dots$ ⑥ とする。

6) 粒子間応力 ある単位面積の面 S に、 $\vec{r}$ で切られる粒子の、 $\vec{r}$ の面の表裏どちらかの側の粒子に働く力の合力がこの面に働く応力である。従って図7のように、 $\beta \sim \beta + d\beta$ の間で、 S_2 によって切られる粒子数は $N d/2 \sin \beta d\beta$ であり、 β で切られる粒子の片側に働く力を $\vec{F}_2$ とすれば、 Z 軸に垂直な単位面積の面 S_2 に上側から働く応力は $\vec{T}_2 = (T_{2x}, T_{2y}, T_{2z}) = \int_0^{\pi/2} \vec{F}_2 N d/2 \sin \beta d\beta = (M/d)(C/C_0)^2 (d^4/dz^2)^2 (0.0762 + 0.102\mu, 0, -0.0898 + 0.0673\mu) \dots \dots$ ⑦ とする。同様に X 軸に垂直な単位面積の面 S_x に、 X の負側から働く応力は $\vec{T}_x = (T_{1x}, T_{1y}, T_{1z}) = (M/d)(C/C_0)^2 (d^4/dz^2)^2 (0.102 + 0.109\mu, 0, -0.0898 + 0.0843\mu) \dots \dots$ ⑧ とする。

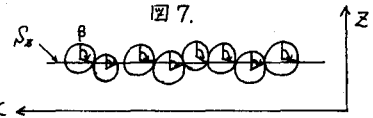


図7.

あとは主として、Mの評価を行い、⑦、⑧式について検証する予定である。参考文献：1) 橋本、椿、戸田：第24回年次学術講演会講演概要集、p54年。