

II-131 勾配の急減と幅の急拡大による土石流の堆積過程 - 粒子の停止距離について -

九州大学工学部 正 員 平野 宗夫
九州大学工学部 正 員 橋本 晴行
洋 林 建 設 株式会社 正 員 田崎 武詞

1. まえがき

土石流災害の多くは勾配が急減し、幅が急拡大する渓流出口付近など、土石流が流出して堆積するところに発生する。その堆積危険地帯を予測するためには土石流中の粒子がどのような位置に停止するかを明らかにする必要がある。そのため、本研究は、勾配の急減と幅の急拡大を受けた土石流の3次元堆積において粒子の停止距離に着目した実験を行い、理論的考察を加えたものである。

2. 実験方法

水路は移動床部と固定床部からなる長さ9.5m、幅10cmの土石流発生・流下水路と、長さ195cm、幅123cmの固定床堆積水路とをヒンジで接続させたものを用いた。実験は、移動床部に平均粒径 $d=1.9\text{mm}$ 、密度 $\sigma=2.58\text{g/cm}^3$ の砂礫を厚さ10cmに敷き、上流端から流量 $Q_w=100\text{cm}^3/\text{s}$ の水を急激に給水し、土石流を発生させて行った。粒子の停止距離を調べるため、着色砂礫の投入装置を勾配変化点上に設置し、土石流先端部の表面に着色砂礫を投入した。その投入装置の中を仕切り板で5等分し、センサーで土石流を検知すると同時に底が開くように工夫した。それぞれの仕切り板内（底面積 $1.52\text{cm}\times 1.52\text{cm}$ ）には5種類に色分けされた着色砂礫を40個ずつ入れた。土石流が堆積水路上に流入してから $T_D=10$ 秒間実験を継続させ、その後、土石流の流入を停止して埋没した着色砂礫を注意深く捜し出し、その停止位置（ x, y ）を測定した。なお、実験は、上流側勾配 $\theta_u=14^\circ, 16^\circ, 18^\circ$ と下流側勾配 $\theta_d=2^\circ, 4^\circ, 5.85^\circ, 8^\circ$ との組合せを種々変えて行った。

3. 実験結果

図-1は着色粒砂の停止状況を示している。U字型をなして分布している砂粒群とそれから下流方向に離れて分布している砂粒群とが存在し、後者は堆積土砂から絞り出された水流によって2次的に動かされたものと考え、考察から除外した。また、いずれの粒子もほぼ河床底面上に分布している。停止位置は粒子の投入位置によって異なり、水路中央で投下された粒子の停止距離は長いものに対して、側壁付近で投下された粒子の停止距離は短く、横方向（ y_d 方向）に偏向している。

図-2, 3は、停止距離（ x_d 成分）の変動係数 α_x と相関係数 R_{xy} を示している。 $\theta_u=14^\circ, 18^\circ$ の場合の図は省略しているが、 $\theta_u=14^\circ, 16^\circ$ では停止距離（ x_d 成分）のバラツキが大きく、その結果 α_x が大きくなっている。また、 R_{xy} は、 $\theta_u=14^\circ, 16^\circ$ では正であるのに対して、 $\theta_u=18^\circ$ では負の傾向がある。

4. 粒子の停止距離についての理論的考察

図-4に示すように、土石流が幅 B_u の急勾配水路から、幅の急拡大した緩勾配の堆積水路に突入した瞬間を考える。このとき土石流は両側壁の拘束を免れ、その幅を瞬間的に拡大するものとする。一方、流れの中の微小部分に着目すると、急勾配水路における微小幅 dB_u は堆積域では拡大して幅 dB_d となると考える。土石流中の粒子には抵抗力として F^g が、推進力として流体力 F^f と重力がそれぞれ作用している。従って、急

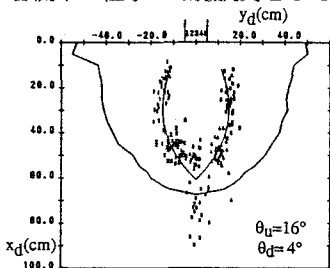


図-1

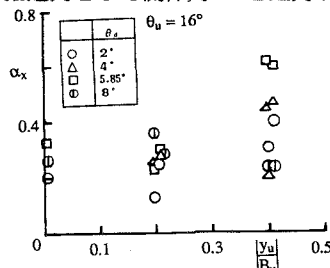


図-2

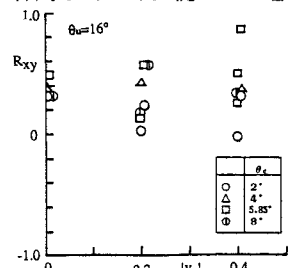


図-3

勾配水路の微小幅 dB_u において単一粒子に対する流れ方向の力のつり合い式は、

$$0 = -F_{ux}^g + F_{ux}^f + mgsin \theta_u \quad (1) \quad \text{一方、堆積域上の微小幅 } dB_d \text{ における粒子の運動方程式は、}$$

$$x_d: m(1 + \rho/(2\sigma))d^2x/dt^2 = -F_{dx}^g + F_{dx}^f + mgsin \theta_d \quad (2) \quad y_d: m(1 + \rho/(2\sigma))d^2y/dt^2 = -F_{dy}^g + F_{dy}^f \quad (3)$$

ここに、添字 u, d はそれぞれ上流側、下流側斜面における物理量を表わす。勾配変化点直前 (急勾配水路) における粒子位置 $(0, y_u, z_u)$ および、粒子速度 $(u, 0, 0)$ は堆積域突入直後ではそれぞれ

$$(0, y_{d0}, z_{d0}) = \{0, y_{d0}, z_u/[a_0 \cos(\theta_u - \theta_d) dB_d/dB_u]\} \quad (u_{d0}, v_{d0}, 0) = \{u \cos(\theta_u - \theta_d), v_{d0}, 0\}$$

に変換されると考えられる。従って粒子間力はその表示式¹⁾を参照して

$$F_{dx}^g = a_0 F_{ux}^g (dy_d/dy_u)^3 \cos^5(\theta_u - \theta_d) \quad (4), \quad F_{dy}^g = (v_{d0}/u_{d0}) F_{dx}^g \quad (5)$$

と近似される。ここに、 $a_0 = \sqrt{1 + (v_{d0}/u_{d0})^2}$ 、幅の拡大率 $dy_d/dy_u = a_0 (dB_d/dB_u)$ である。また、粒子間力は、堆積域突入直後から停止に至るまで時間的に一定と仮定している。式(4)、(5)を式(2)、(3)に代入すると、流体力の役割は粒子間力に比べ小さく、流体力を含む項は相殺し合うので次式を得る。

$$d^2x/dt^2 = -g/(1 + \rho/2\sigma) \{a_0 (dy_d/dy_u)^3 \sin \theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) - \sin \theta_d\} \equiv -G_x \quad (6)$$

$$d^2y/dt^2 = -g/(1 + \rho/2\sigma) \{a_0 (dy_d/dy_u)^3 \sin \theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) (v_{d0}/u_{d0})\} \equiv -G_y \quad (7)$$

初期条件 $t=0$ で $x=0, dx/dt=u_{d0}, y=y_{d0}, dy/dt=v_{d0}$ のもとで(6)、(7)式を解くと、粒子の x_d, y_d 方向の速度がそれぞれ0となる時間 t_x, t_y および、その移動距離 x_{sp}, y_{sp} はそれぞれ

$$t_x = u(z_u) \cos(\theta_u - \theta_d)/G_x \quad (8) \quad t_y = v_{d0}/G_y \quad (8')$$

$$x_{sp} = u^2(z_u) \cos^2(\theta_u - \theta_d)/2G_x \quad (9) \quad y_{sp} = v_{d0}^2/2G_y + y_{d0} \quad (9')$$

さて、問題は、上式に含まれる dy_d/dy_u や v_{d0}/u_{d0} の評価である。ここでは、停止距離の実験値から逆算する方法が取られる。まず、前者は、横断方向の水面形を $H/H_0 = (1 - 2y_d/B_d)^\kappa$ (10)

$$\text{と仮定し、連続条件を用いて求めると } dy_d/dy_u = \beta(1 - 2y_u/B_u)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (11)$$

となる。一方、 x_d 方向の平均停止距離の実験値を式(9)に代入すると $a_0^3(dy_d/dy_u)$ を逆算することができその結果が図-5に示される。 a_0 を1と近似して式(11)と比較し、最適な β, κ を評価することができる。

次に、 v_{d0}/u_{d0} については、 y_d 方向の平均停止距離の実験値を式(9')に代入して求めることができる。その結果が図-6である。いずれの勾配においてもほぼ、 $v_{d0}/u_{d0} = \gamma |y_u/B_u|$ の関係を満たしている。

図-1の曲線は、上で評価された諸係数値を用いて(9)、(9')より求めた計算結果である。水路中央でとった曲線を示すが、これは水面形の評価などに問題があると考えられる。

5. あとがき

粒子の停止距離について、上で誘導された理論式にはいくつかの問題が存在するが、概ね妥当な結果を与えることができると考えられる。今後、これらの成果をもとに土石流の3次元堆積形状の計算法について検討を進めていく予定である。

参考文献 1) 橋本・椿, 土木学会論文報告集, 第336号 1983.

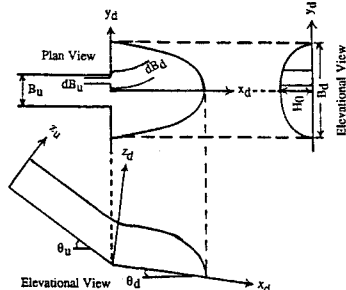


図-4

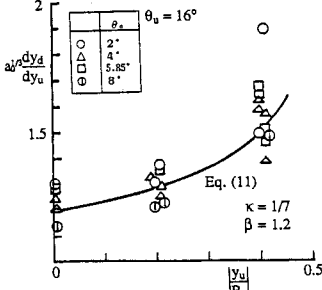


図-5

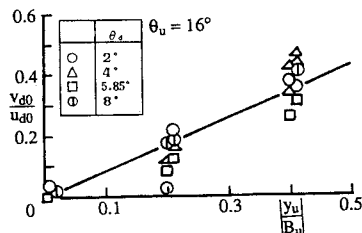


図-6