

II-181 勾配の急減と幅の急拡大による土石流の堆積過程

九州大学工学部 正 員 橋本 晴行
 九州大学工学部 正 員 藤田 和夫
 九州大学工学部 正 員 平野 宗夫
 長崎大学工学部 正 員 楢 東一郎

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^{1,2)}ところ³⁾で発生する。著者は、これまで勾配のみが急変する2次元の堆積問題について検討を重ねてきたが、本研究は、さらに実際的な場合として、土石流が勾配の急減と幅の急拡大を同時に受けて堆積する問題について検討を行ったものである。

2. 実験の方法

水路としては、図-1に示すように、長さ6.5mの移動床と3mの固定床からなる幅10cmの土石流発生・流下水路と、長さ175cm、幅90cmの固定床堆積水路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 $\rho=2.58\text{g/cm}^3$ の砂礫を厚さ10cmに敷き、上流端から急激に給水し、土石流を発生させて行った。堆積水路に到達した土石流は、勾配の急減と幅の急拡大を受けて堆積を開始するが、その様子も水路の側方及び真上から、VTRカメラと16mm高速カメラを用いて撮影した。さらに、給水停止後、砂面測定器を用いて堆積形状を測定した。実験条件を表-1に示す。なお、水路固定床面には、粗度として使用砂を貼りつけている。

θ_u	θ_d	$\rho_{\text{mix}}(\text{g/cm}^3)$
18°	4°	101
14°	4°	102

表-1

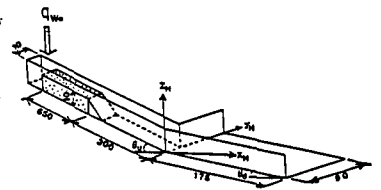


図-1

3. 実験の結果

水路の真上から撮影した16mmフィルムより、減速して堆積しつつある土砂の外縁の時間的変化を読み取り示したものが図-2である。これらの図と流況の観察から、上流側勾配 $\theta_u=18^\circ$ の実験では、流入後まず、土砂と水は一体となって流下すると同時に、横方向にも流況が存在し、流山の領域がほぼ一様に拡大していく。しかし、 $t=2$ 秒付近になると、土砂と水は分離し始め、 $t=4$ 秒では、土砂の先端が約1mで停止し、流下方向には進まなくなる。これと同時に流山は、横方向に向きを変え、外縁は横方向に発達して行く。さらに $t=7$ 秒付近になると、流山の向きは、まただいに流下方向となり、 $t=10$ 秒に至るとは、流山は堆積水路に達しなくなる。一方、 $\theta_u=14^\circ$ の実験では、 $t=1$ 秒付近で土砂と水が分離し始めるが、流山の方向は時間に依りなく、ほぼ流下方向を示す。その結果、外縁は横方向に進行せず、すなわち細長い形状となる。

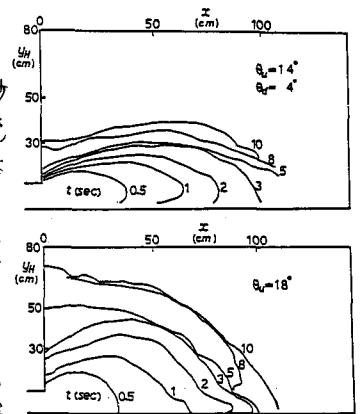


図-2

また、水路の側方から撮影した16mmフィルムとVTRから、堆積した土砂の先端 x_F と後端 x_B を読み取り示したものが図-3である。同図には、土石流が勾配の急減のみを受けて堆積する2次元堆積実験の結果も示している。読み取り精度に若干の誤差が伴うが、堆積の先端は約1mで停止し、2次元堆積の実験結果に比して進行距離がほぼ半減していることがわかる。

いずれの実験においても、堆積水路上には、ジャンプを伴った堆積の逆上³⁾は観察することができなかった。

図-4は、給水停止後の堆積土砂の等高線を示したものである。堆積形状は、 $\theta_u=18^\circ$ では丸味を帯びているの

に対して、 $\theta_u = 14^\circ$ では、下流側方向に細長く伸びているのが特徴的である。

4. 土石流中の粒子の平均的停止距離

土石流の堆積問題を考える上で、土石流中の粒子がどのような位置に停止するかを知ることは重要である。したがってここでは、これまでの2次元問題についての成果を応用して、粒子の停止過程について考察することにする。

まず、土石流が幅 B_u の上流側水路から堆積水路に流入した瞬間を考える。このとき、土石流は片側削壁の拘束を免れ、瞬間的に拡大して幅

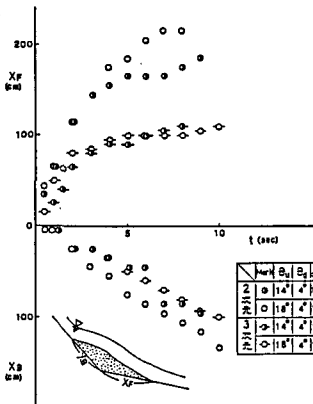


図-3

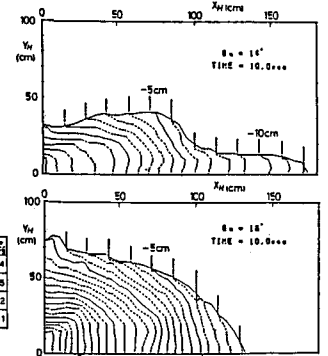


図-4

B_u をもつものとする。土石流中の粒子には、抵抗力として粒子間力 F_d^p が、推進力として流体力 F^f と重力が作用している。堆積水路における粒子の運動方程式は、 $m(1 + \frac{\rho_p}{\rho_f}) \frac{dx}{dt} = -F_d^p + F^f + mg \sin \theta_d \dots (1)$ 。一方、上流側水路での粒子のつり合い式は、 $0 = -F_u^p + F^f + mg \sin \theta_u \dots (2)$ 。ここに、添字 u, d はそれぞれ、上流側・下流側断面における物理量を表す。上流側の粒子の速度 u と、流入高さ y は堆積水路ではそれぞれ、 $u \rightarrow u_d = u \cdot \cos(\theta_u - \theta_d)$ 、 $y \rightarrow y_d = \frac{y}{(\xi_f \frac{B_d}{B_u} \cos(\theta_u - \theta_d))}$ に変換されるので、粒子間力の表示式を参照すると $F_d^p = F_u^p (\xi_f \frac{B_d}{B_u})^5 \cos^5(\theta_u - \theta_d) = (mg \sin \theta_u + F_u^p) (\xi_f \frac{B_d}{B_u})^5 \cos^5(\theta_u - \theta_d)$ と近似される。ここに ξ_f は流 u の断面形状に関する補正係数である。これを式(1)に代入し、流体力 F^f の役割はあまり大きくないことを考慮すると次式を得る。 $\frac{dx}{dt} = -\frac{g}{1 + \frac{\rho_p}{\rho_f}} (\xi_f \frac{B_d}{B_u})^5 \sin \theta_u \cdot \cos^5(\theta_u - \theta_d) - \sin \theta_d \dots (3)$ 。初期条件 $t = 0$ で $x = 0, v_x = u \cos(\theta_u - \theta_d)$ のもとで式(3)を解くと、粒子の停止時間は $t_{sp} = \frac{u \cos(\theta_u - \theta_d)}{G} \dots (4)$ 、停止距離は $x_{sp} = \frac{u^2 \cos^2(\theta_u - \theta_d)}{2G} \dots (5)$ となる。2次元堆積では、 $\frac{B_d}{B_u} = 1$ であるのに対して、3次元堆積では、 $\frac{B_d}{B_u} > 1$ となり、減速度 G は大きくなる。その結果、停止距離は短くなるのが特徴的である。

5. 土石流の堆積形状に関する考察

図-5に示すように、上流側水路の $y \sim y + dy, y_0 \sim y_0 + dy_0$ 区間を、濃度 C 、速度 u で通過した粒子群は、下流側水路において平均的な停止距離 \bar{x} のまわりに、2次元確率密度関数 $P_{y_0, \bar{x}}(x, y_0)$ に従って停止するものとする。砂の保存式は $C_x \frac{\partial}{\partial x} (\delta x) dx dy_H = u C dy dy_0 \cdot P_{y_0, \bar{x}}(x, y_0) \dots (6)$ 。平均停止距離として式(5)と、堆積開始時間として式(4)を用いると

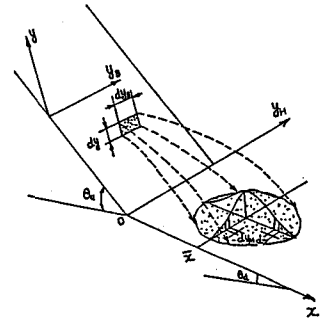


図-5

ここで、 $P_{y_0, \bar{x}}(x, y_0)$ として2次元正規分布を仮定し、削壁の影響を考慮して行った計算の結果が図-6である。原点付近を除いて実験結果と概ね一致しているが、 y_H 方向の標準偏差の評価や粒子の平均的挙動が3次元の場合などについては問題が残っている。

6. あとがき

以上、横方向には平均的な流 u がないものとして、堆積形状の予測式を導いたが、確率密度関数や粒子の3次元挙動については今後検討を重ねていく必要がある。最後に、本研究を推進するに当たり多大の助力を受けた溜池博文(福岡県)、畠永浩(東総建設)の両氏に感謝の意を表します。

参考文献 1)、橋、橋本、第28回水理講演会(1984)、2)、橋本、溜池、元野、橋、第29回水理講演会(1985)、3)、高橋、京大防災研究所年報、1980。

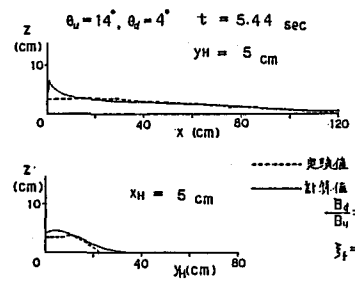


図-6