

(財) 砂防・地すべり技術センター	松村和樹
(財) 砂防・地すべり技術センター	○高宮享一郎
(財) 砂防・地すべり技術センター	嶋 大尚
鳥取大学工学部	道上正規
鳥取大学地域共同研究センター	宮本邦明
建設省九州地方建設局	北栄雅人

## 1.はじめに

火山活動や地震などに伴い大規模な土砂移動（土塊の滑動）が生じることがある。その際、滑動土塊がダムや湖、海などの水域へ突入すると段波を発生し、対岸や遠く離れた沿岸地方に広範囲にわたり大きな災害をもたらすことがある。特に寛政4年(1792)鳥原眉山の崩壊に伴い発生した大災害は、「鳥原大変肥後迷惑」と呼ばれるわが国最大の災害となった。このような災害に対する総合的な防災対策を検討するには災害を引き起こす現象の特性と規模を予測・評価することが必要不可欠である。そのためには、土砂崩壊による災害発生に至るプロセス（崩壊→崩壊土塊の変形・流動→崩壊土塊の水域への突入→水位の上昇（段波の形成）→段波の伝搬→段波の陸域への遡上）とメカニズムを把握することが中心的かつ基本的な課題である。

本研究は、これら一連の現象を解明するため、その基礎として、乾燥粒子流としての崩壊土塊の運動の特性を把握するために実験的検討を行ったものである。

## 2.土塊の滑動現象に関する実験

実験には、水路幅0.5m、水路長7mの可変式開水路の下流に $\alpha$ 配 $3^\circ$ の水路を接続したものをを用いた。実験では、水路上流部に三角形（底辺50cm、高さ15cmの二等辺三角形）の形状をした土塊を表1に示す条件で設置して滑動・堆積させた。実験値は粒径5mmの一樣砂である。

図1に滑動土塊の時間的形狀変化の一例を示す。図中の距離ゼロは $\alpha$ 配変化点である。図に示すように土塊が流下していくに従い斜面に沿うように縦断的に平滑化されていく。また、今回の実験条件では、堆積部は水路上流側に連続する部分の $\alpha$ 配は土塊の速度が速いほど、大きくなる。図2には同じ実験条件における滑動土塊の重心位置の時間的変化を示している。図中には、比較のため、土塊と同じ摩擦係数を有する質点が斜面上を移動する場合の時間的変化も示してある。質点の運動は外力からクーロン力を差し引いた力により、常に加速しているものの、滑動土塊の重心の運動は時間とともに次のように変化していく。まず、流下直後滑動土塊の形状は急激に平滑化し、重心は質点よりも速い速度で流下している。その後、滑動土塊が水路に沿うような形状に近づき、0.7秒を過ぎると、重心速度は遅くなり、定速へと近づいていく。そして土塊の重心速度は移動開始後0.7~0.8秒あたりで、質点よりも遅くなる。

崩壊土塊が質点のように加速せず、定速へと近づいていくことは、乾燥粒子流としての崩壊土塊の運動には流速に依存する抵抗力が存在することを示している。もし、このような抵抗力が無ければ、土塊は質点のように加速し続けることになる。そこで、等流状態における乾燥粒子流の基礎的な特性（流動深、流速分布、 $u_{cr}$ と $h/d$ との関係、濃度）を把握するために、次頁に示す連続体モデルによる抵抗力に関する実験を行った。

## 3.連続体モデルによる抵抗力に関する実験

実験は、水路幅0.5m、水路長7mの可変式開水路を用いて行った。実験値は前項と同じ粒径5mmの一樣砂である。実験条件を表2に示す。流動深の縦断形状の一例を図3に示す。図からわかるように下流にいくにしたがって、流動深が小さく、流動面 $\alpha$ 配は水路 $\alpha$ 配に対して平行になっていく。実験値を用いて、流れの慣性項と重力項を計算すると、水路下流端から2mまでは慣性項が重力項の約4~6割を占めており、流れが加速している領域がある。一方、2mより下流区間では慣性項がほぼ無視され、ほぼ等流状態であることが仮定される条件下にある。実験ではこのようにして、等流とみなせる領域で流速分布を測定した。

流速分布の計測結果から、流れは上層の粒子がサルテーションで移動する層、中層の粒子が密に層状をなして流動する層（層流移動層）、及び下層の粒子が停止・移動を間欠的に繰り返す層の3層に区分される。流れの大部分は中層の層流移動層であるので、流動深は中層の厚さで定義した。図4に流速分布の一例を示す。流速は中層の最大流速で無次元化し、縦軸は粒径で無次元化してある。図中には流速分布が $3/2$ 乗則に従う場合の分布形も示してある。図に示したように、各実験ケースの流速分布はほぼ $3/2$ 乗則にしたがうことが確認された。

図5には $u_{cr}$ と $h/d$ との関係を水路 $\alpha$ 配別に示してある。両者はほぼ線形の関係にあり、また、 $\alpha$ 配によってグルーピングされ、 $\alpha$ 配が大きいほど抵抗力が小さくなる。

図6には $\alpha$ 配と濃度との関係を示している。濃度は $\alpha$ 配が大きくなるほど小さくなる。すなわち粒子が分散する傾向にある。

## 4.考察

土塊の滑動に関する実験から、運動開始直後は、土塊の形状が急激に平滑化され、重心速度は質点よりも速く、その後、平滑化が進み水路に沿うように流下していくにつれ、重心速度は遅くなり、定速に近づいていく。つまり、乾燥粒子流としての崩壊土塊の運動は土塊の変形による影響を受けるとともに、速度に依存する抵抗力を有する流れであることがわかる。

また、連続体モデルによる抵抗力に関する実験から、等流状態における乾燥粒子流の特性は以下のようである。

①粒子は密な状態で層状に移動している。

②流速分布は3/2乗則に従う。

③  $u/u_*$  と  $h/d$  とはほぼ線形の関係にあり、勾配によってグルーピングされ、勾配が大きいほど抵抗が小さくなる。

既往の研究から土石流にも同様な特性があることがわかっている。つまり、乾燥粒子流の応力構造は土石流の構成則と同様の議論が可能なものと考えられる。また、乾燥粒子流の応力構造を議論・評価することで、本実験で取り扱ったような崩壊土塊の運動を予測・評価していけるものと考えられる。

表-1 実験条件(有限)

Case No.	粒径 (mm)	勾配 (°)	流下位置 (cm)
B 1-1①~③	5.0	38	500
B 1-2①~③	5.0	38	300
B 1-3①~③	5.0	38	100
B 2-1①~③	5.0	42	500
B 2-2①~③	5.0	42	300
B 2-3①~③	5.0	42	100
B 3-1①~③	5.0	45	500
B 3-2①~③	5.0	45	300
B 3-3①~③	5.0	45	100

表-2 実験条件(連続)

CASE No.	粒径 (mm)	勾配 (°)	ホッパーの口径 (cm)	平均流量 (kg/s)
A 1-1①~③	5.0	38	15.0	22.45
A 1-2①~③	5.0	38	12.5	15.64
A 1-3①~③	5.0	38	10.0	7.76
A 2-1①~③	5.0	42	15.0	22.45
A 2-2①~③	5.0	42	12.5	15.64
A 2-3①~③	5.0	42	10.0	7.76
A 3-1①~③	5.0	45	15.0	22.45
A 3-2①~③	5.0	45	12.5	15.64
A 3-3①~③	5.0	45	10.0	7.76

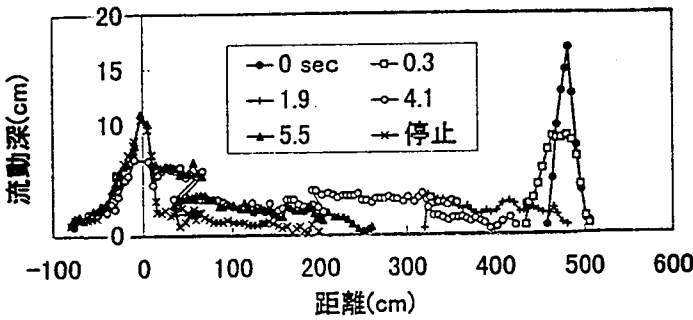


図-1 有限な土塊の時間的形狀変化 (Case B-3-1②)

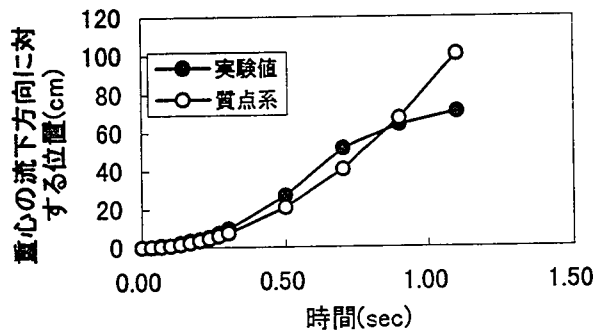


図-2 重心位置の時間的変化(B-3-1②)

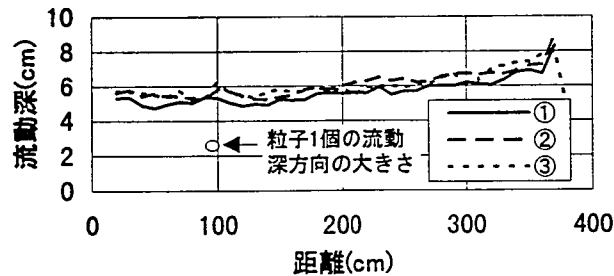


図-3 流動深の縦断面形状(CASE A 1-1)

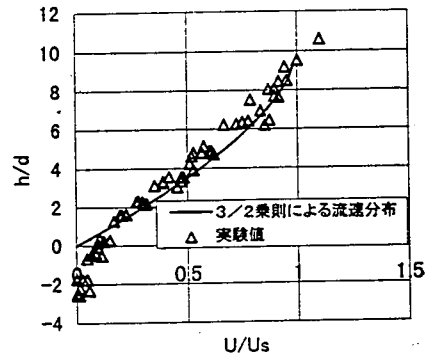


図-4 流速分布(A-1-1②)

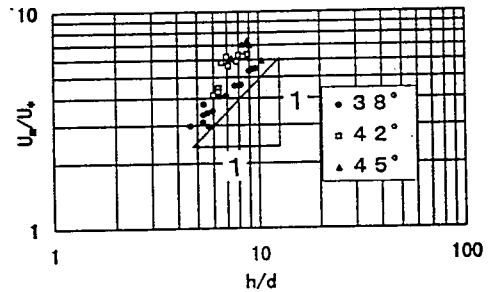


図-5  $U_v/U_v$  と  $h/d$  の関係

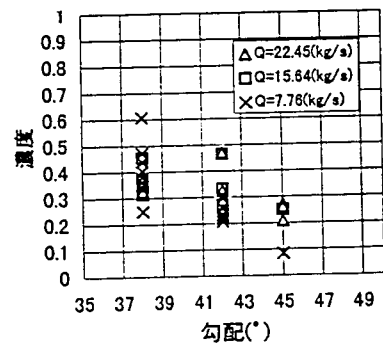


図-6 濃度と勾配の関係

### 5.まとめ

実験によって、乾燥粒子流としての崩壊土塊の運動は土塊の変形による影響を受けるとともに、流速に依存する抵抗力が存在することが示された。等流状態における乾燥粒子流に関する実験結果から、粒子は密な状態で層状に移動し、流速分布は3/2乗則に従い、 $u/u_*$  と  $h/d$  とはほぼ線形の関係にあり、それらは勾配によってグルーピングされ、勾配が大きくなると抵抗が小さくなることがわかった。既往の研究から土石流にも同様な特性があることがわかっている。このことから、乾燥粒子流の応力構造は土石流の構成則と同様の議論が可能なものと考えられる。