

(独)防災科学技術研究所 ○森脇 寛 筑波大学・院 八反地 剛・鵜口宗人

## 1.はじめに

土塊の流下・堆積域の予測は土砂災害軽減策の中でも重要な課題となっている。その予測する手法のひとつとして数値シミュレーションによる方法がある。この場合には実際の現象に見合った運動モデルの構築とモデル計算に必要な土塊の動摩擦係数や抵抗係数の値を知らなければならない。特に動摩擦係数は重要であり、種々の方法で検討が試みられているが、その取り得るべき範囲や材料、境界条件による違いなどについてはあまり言及されていない。また、土塊に働く抵抗は摩擦抵抗だけでよいのか、摩擦抵抗は一定として妥当なのかどうかの検証もなされていない。

本論文ではこれらの問題点のうち、流走路の地表条件の違いが流下距離など土塊の運動に与える影響を明らかにするため、砂質土塊を斜面上で流下させ、水平地盤で減速・停止させる方式による流下実験を行った。実験では高速カメラを用いて土塊の速度解析を行い、運動特性を明らかにするとともに各々の動摩擦係数を求め、比較検討した。

## 2. 実験の概要

**2.1 実験装置と土塊の加速方法** 実験装置は斜面長 6 m (勾配 35°), 水平部長 4 m の鋼製水路である(図-1)。斜面部と水平部との接続部付近は衝突によるエネルギー損失を軽減するため、滑らかな曲線状に仕上げている。土塊に速度をつけるため、斜面上部の位置から土塊を載せた台車を自然に流下させるとともに、台車にストッパーをつけて所定の位置で停止する仕組みとなっている。これにより、土塊は台車の停止時に慣性力で台車から固定斜面へ乗り移った後、水平部に入り、減衰・停止する。土塊が水平部端から 30 cm を通過した時の平均速度は約 3.5 m/s である。

**2.2 土塊材料と作成方法** 実験用土塊には千葉県産のシルト質砂を用いた。比重 2.68, 中央粒径 0.65 mm, 試料の 80 % が粒径 0.84~0.42 mm の間に分布する。予備実験で土塊が一塊で流下/停止する含水比を調べている(26~30%)。上記含水比に調整した試料を半球状(底面直径 21 cm, 上部直径 12.5 cm, 高さ 10 cm, 総体積 2,000 cm<sup>3</sup>, 重量約 4 kg)に成形したあと、台車上に土塊を載せて流下実験の準備は完了する。

## 2.3 実験条件

<流走路の表面条件を変えた流下実験> 所定の含水比で作成した土塊を用いて、水平流走路の表面条件を変えた流下実験を行った。流走路の表面条件は、

- 滑らかな表面条件としてトタン板を使用した場合,
  - 粗度のある表面条件としてトタン板上に土塊と同じ試料の砂粒子を固定させた場合(砂粒子面と呼ぶ),
  - b)の条件でその上に土塊と同じ砂質土を敷いた場合,
- の 3 条件で、それぞれ水平部の湛水の有無・水位、砂層(乾

燥、飽和)の厚さを変化させて実験を行った。このほか、土塊の場合との比較のため、底面が合板からなる矩形の箱(土塊と同重量、木箱と呼ぶ)を流下させた実験も行った。木箱の底面にはシリコン剤を塗布して粗度をつけている。

<初速度を変えた流下実験> また、a)の条件で、無水の場合と湛水深 10 mm の場合の 2 ケースについて、土塊の斜面流下速度を種々に変えて、初速度の影響を見た。

## 3. 実験結果

### 3.1 流走路の表面条件と土塊の運動特性

全般的に見て、流下土塊はトタン板のケースがもっとも遠くまで流下している。次いで、砂粒子面、乾燥砂層、飽和砂層の順となっている。流走路の表面がトタン板、砂粒子面のいずれの場合でも、湛水の水位が 2~10 mm 程度の条件の流走路距離は、その他の条件に比較して 1.5 倍程度大きくなっている。また、もっとも短い距離で停止したのは、水平部表面が乾燥砂層(厚さ 100 mm)のケースであった。同一条件で移動砂が飽和している条件でも流走路距離は短かった。土塊がこの飽和砂層を押し出す形になっており、抵抗として作用していることがうかがえる。木箱の実験で、水平流走路がわずかに湛水している場合には高速で水路端まで流走するハイドロプレーニング現象が見られた。

図-2 は、いくつかの実験について流走路距離と速度の関係を示している。いずれも放物線上の減衰を示している。図-3 は、同じ実験例について速度と時間の関係を表したものである。図-3 中の直線は土塊停止するまでの速度と時間の関係の回帰直線を表している。いずれの場合でも、土塊の運動速度は時間とともに一定の割合で減少しており、土塊は一定の抵抗力を受けて減速・停止したと考えられる。これは、土塊が停止するまで摩擦抵抗に変化がないことを意味する。また、速度もしくは速度の自乗に比例した抵抗係数の存在を見出せなかった。したがって、この実験でみられる崩土の運動は運動中の土塊に働く抵抗力が摩擦抵抗のみとする「そりモデル」とみなしてもさしつかえないようである。

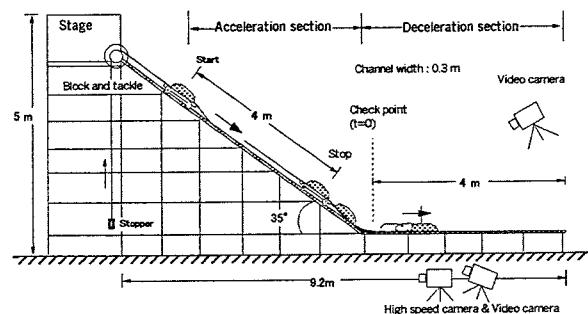


図-1 流下実験装置

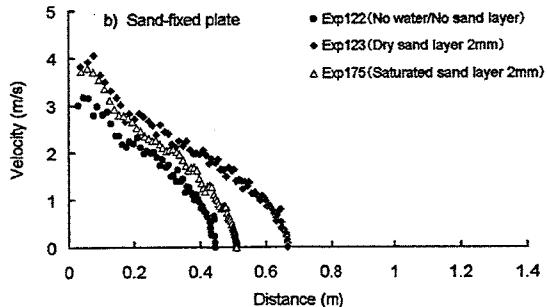


図-2 条件 b) における流走路距離と速度の関係

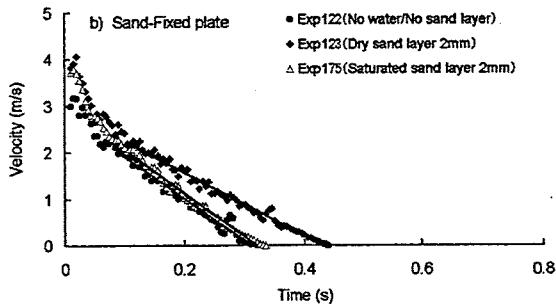


図-3 条件 b) における時間と速度の関係

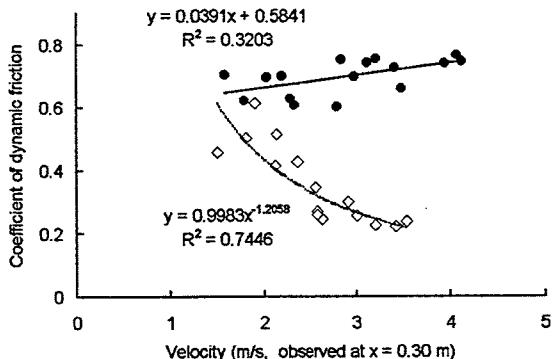


図-4 初速度と動摩擦係数の関係（土塊とトタン板）

●は無水状態、◇は湛水深 10 mm の条件を表す。

### 3.2 流下速度が土塊の摩擦抵抗に及ぼす影響

流走路の表面がトタン板で無水の場合には速度による影響はあまり見られないが、湛水している場合には、初速度の3乗に比例して流走路距離は増加した（図省略）

図-4 は、両者の場合について、摩擦抵抗が一定として、初速度と流走路距離から求めた動摩擦係数  $\mu_{di}$ （概算値）と初速度の関係を示している。無水状態ではばらつきが見られるもののやや右上がりの傾向、すなわち、わずかに初速度に比例した傾向が見られる。相関係数も低いので、ほぼ一定と考えてもよさそうである。Hung and Morgenstern (1984) による Ottawa 砂（乾燥）を使った流下実験でも、同じようにわずかに右上がりの傾向を見られている。

一方、湛水している場合は、土塊の初速度が大きくなると、摩擦係数は速度の逆数に比例して減少する傾向が明らかに見られた。図-4 から湛水時の動摩擦係数  $\mu_{di}$  は、回帰直線から判断すると動摩擦係数の最小値は 0.26、土塊の流走路距離による概算からは 0.23 となった。

表-1 土塊（シルト質砂）の動摩擦係数の値

\*印はカメラを水路直上に設置した時の計測値

流下 物体	流走路の表面	動摩擦係数	動摩擦係数
		（動態解析）	（概算値）
土塊	トタン板（乾燥）	0.59 ( $\tan 30.0^\circ$ )	0.51 ( $\tan 27.0^\circ$ )
	トタン板（湛水 2mm）	0.41 ( $\tan 22.3^\circ$ )	0.42 ( $\tan 22.8^\circ$ )
	トタン板（湛水 5mm）*	0.51 ( $\tan 27.0^\circ$ )	0.46 ( $\tan 24.7^\circ$ )
	トタン板（湛水 10mm）*	0.26 ( $\tan 14.6^\circ$ )	0.23 ( $\tan 13.0^\circ$ )
	砂粒子面（乾燥）	0.90 ( $\tan 42.0^\circ$ )	0.74 ( $\tan 36.5^\circ$ )
	砂粒子面（湛水 2mm）	0.93 ( $\tan 43.0^\circ$ )	0.88 ( $\tan 41.3^\circ$ )
	砂粒子面（湛水 5mm）*	0.29 ( $\tan 16.2^\circ$ )	0.39 ( $\tan 21.3^\circ$ )
	砂粒子面（湛水 10mm）*	0.23 ( $\tan 13.0^\circ$ )	0.27 ( $\tan 15.1^\circ$ )
	砂粒子面+2mm 乾燥砂層	0.70 ( $\tan 35.0^\circ$ )	0.75 ( $\tan 36.9^\circ$ )
	砂粒子面+5mm 乾燥砂層	0.68 ( $\tan 34.2^\circ$ )	0.54 ( $\tan 28.4^\circ$ )
木箱	砂粒子面+10mm 乾燥砂層	-	-
	砂粒子面+2mm 飽和砂層	0.96 ( $\tan 43.8^\circ$ )	0.89 ( $\tan 41.7^\circ$ )
	砂粒子面+5mm 飽和砂層	1.10 ( $\tan 47.7^\circ$ )	1.35 ( $\tan 53.5^\circ$ )
	砂粒子面+10mm 飽和砂層	0.98 ( $\tan 44.4^\circ$ )	0.97 ( $\tan 44.1^\circ$ )
トタン板	トタン板（乾燥）	0.73 ( $\tan 36.1^\circ$ )	0.66 ( $\tan 33.4^\circ$ )
	トタン板（湛水 2mm）	0.19 ( $\tan 10.9^\circ$ )	<0.32 ( $\tan 17.7^\circ$ )
	砂粒子面+10mm 乾燥砂層	0.71 ( $\tan 35.4^\circ$ )	0.70 ( $\tan 35.5^\circ$ )
	砂粒子面+10mm 飽和砂層	0.85 ( $\tan 40.4^\circ$ )	0.86 ( $\tan 40.7^\circ$ )

### 3.3 各実験条件における動摩擦係数の値

各実験条件における動摩擦係数値を表-1 にまとめた。表中、動摩擦係数（動態解析）は高速カメラによる記録から解析したものである。動摩擦係数（概算値）の数字は、土塊が水平部に入った時（水平部端から 30 cm）の初速度と停止した距離の値を用いて動摩擦係数を求めたものである。同じ材料でも流走路の条件によっては摩擦係数値は大きく異なり、取りうるべき数値の範囲は広い。

### 4. まとめ

今回の実験結果をまとめると以下のようになる。

- 運動土塊の時間一流走路距離は放物線状の減衰の様相を呈する。この間の速度勾配は一定、すなわち土塊に働く摩擦抵抗は速度変化にかかわらず一定である。この実験の速度の範囲では、土塊に働く抵抗は摩擦抵抗のみである。
- 適度な湛水深の時に流走路距離は大きくなる。流走路が水で被覆されていると、水がない場合に比較して、摩擦抵抗が半減し、流走路距離が大きくなる。ただし、湛水深が深すぎると、水の抵抗が働き、流走路距離は小さくなる。
- 流走路に砂層（飽和、乾燥とも）が存在すると抵抗力が大きくなって、他のケースに比べて流走路距離が減少する。
- 湿潤状態の土塊と固定された砂粒子面や砂層との境界面における動摩擦係数値の範囲は 0.70~1.10 である。また、流走路が湛水している場合には 0.23 程度まで低下する。
- 湛水している流走路をすべて場合、土塊の初速度の 3 乗に比例して流走路距離は増加する。動摩擦係数は速度の逆数比例して低下している。これは流走路の水の取り込みによって土塊の間隙水圧が上昇し、見かけの動摩擦係数が減少するものと考えられるが、さらに詳しい検証が必要である。

### <参考文献>

Hung O. and Morgenstern N.R. (1984) : Experiments on the flow behavior of granular materials at high velocity in an open channel. Geotechnique, Vol.34, No.3, pp.405-413.