

26 崩土流下時の抵抗則について

建設省土木研究所 ○藤沢 和範

吉松 弘行

工藤 賢二

1. はじめに

これまで斜面崩壊による災害の防除のため崩土がどこまで到達するかを研究された例は数多くあり、1つは崩土を有限の長さを持つ物体の運動として質点的な取り扱いをしているものである。第2は、災害資料を基に統計処理を行ない到達距離を議論しているものである。第3は固体摩擦に加えて速度の2乗に比例した摩擦を考慮して崩土の運動を議論しているものである。ここでは、第3の方法を用いて崩土の抵抗モデルを示し、実験を通してその評価を行なったものである。

2. 研究方法

災害をもたらす自然斜面から発生した崩土は推進力を重力より受け取り様々な抵抗を受け停止に到る。しかし、それを構成する材料は広範囲の粒度分布を持つものもあり、水及び有機物を介在したものである。従ってその抵抗則を実験レベルで議論できるよう崩土材料を砂とし実験斜面において定常的な流れをつくり、その速度分布を用いて崩土の抵抗則を調べた。

3. 崩土の抵抗モデル

一定勾配上を運動する崩土はある距離以上進むと一定速度に達することが予想され、この時点では推進力と抵抗力がつり合った状態になっている。この流れの状況を示したのが図-1である。いまA-B面での力のつり合いを考えると推進力は次のように表わされる。

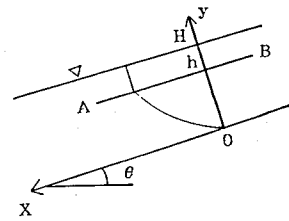


図-1 力のつり合いの説明図

$$R = \sigma \cdot c \cdot g (H - h) \sin \theta \quad \text{----- (1)}$$

σ は土粒子の密度、 c は土粒子の体積濃度、 g は重力加速度、 H は崩土の厚さ、 θ は斜面勾配である。次に抵抗モデルとして3つの抵抗を考える。1つは粒子の接触により生じる力であり τ_v と表現し、第2は流体相の粘性や乱れにより生じる力であり τ_r と表現する。第3は粒子の非弾性的な衝突により生じる力であり τ_o と表現する。すなわち抵抗は

$$\tau = \tau_v + \tau_r + \tau_o \quad \text{----- (2)}$$

と表現できる。 τ_v は粒子が粒子を乗り越えるに必要な力とし有効応力に比例するものとして次式のように表わす。

$$\tau_v = \sigma_n \cdot \mu_k \quad \text{ただし } \sigma_n = \sigma \cdot c \cdot g (H - h) \cos \theta \quad \text{----- (3)}$$

ここで μ_k は動摩擦係数である。 τ_r は間隙水の粘性応力とレイノルズ応力から成るものと考え次式のように表わす。

$$\tau_r = \eta \frac{du}{dy} + \rho \ell^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \frac{du}{dy} \quad \text{----- (4)}$$

ここで η は間隙水の粘性係数、 ρ は水の密度、 ℓ は乱れの混合距離である。 τ_o は粒子の衝突前後のエ

エネルギー散逸から導かれる応力であり簡単に説明する。図-2 のようにバグノルドと同様な粒子の配列モデルを考えると1回の衝突で粒子が失うエネルギーは次のように表わされる。(図-3 参照)

$$\Phi_i = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{6} \pi D^3 \right) \sigma \right\} (du \sin \alpha)^2 (1 - e^2) \quad \text{----- (5)}$$

ここで e は粒子の反発係数、 α は粒子の衝突角である。

また単位時間当りの衝突の回数は次のように表わされる。

$$N \doteq du / b \cdot D = du / dy \quad \text{----- (6)}$$

従って単位時間、単位体積当りのエネルギー散逸量 Φ は粒子1個当りの占有体積が $(bD)^3$ であることを考えると次のようになる。

$$\Phi = \frac{N \Phi_i}{(bD)^3} = \frac{\pi}{12} (1 - e^2) D^2 \frac{1}{b} \sigma \sin^2 \alpha \left(\frac{du}{dy} \right)^3 \quad \text{----- (7) 図-3 衝突の説明図}$$

定常的な流れを考えると流れは非圧縮でありみかけの体積散逸はないため $\Phi = \tau \frac{du}{dy}$ の関係より次式が導かれる。

$$\tau_0 = (\pi/12) \sin^2 \alpha (1 - e^2) \sigma (1/b) D^2 (du/dy)^2 \quad \text{----- (8)}$$

これらの式(1)(2)(3)、(8)を用いて速度分布、平均流速を求めると次のようになる。

$$U(h) = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{Cg(\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}}{\sqrt{(\pi/12) \sin^2 \alpha (1 - e^2) (1/b) D^2}} \{ H^{3/2} - (H-h)^{3/2} \} \quad \text{----- (9)}$$

$$\bar{U} = \frac{2}{5} \frac{\sqrt{Cg(\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}}{\sqrt{(\pi/12) \sin^2 \alpha (1 - e^2) (1/b) D^2}} H^{3/2} \quad \text{----- (10)}$$

4 実験

4. 1 実験方法

実験装置の概要は図-4 の通りであり上部につねに一定量を給砂できるようなホッパーを取り付けてあり、斜面は幅30cm、深さ30cm、長さ10mの一定勾配である。斜面には崩土材料と同じ砂をはりつけたロールのサンドペーパーを崩土材料に応じて取り付けることが可能であり崩土材料は運搬箱とクレーンを用いてホッパーに入れるようになっている。崩土は斜面の中央付近より下流ではでは等速運動を行なうようになったため、斜面の下流から1mの所で高速度ビデオにより観察し(200コマ/秒) 流下深や速度分布など定常な流れの確認ができるようにしている。斜面勾配は31' 33.2' 35.7' 38.7' の4ケースであり砂の粒度分布は図-5 に示すとおりであり中央粒径はそれぞれ0.93mm 1.78mm 2.86mmである。静止摩擦係数 μ_s の値は崩土の材料に対応した粗度板を作成し、その上に同じ材料を1層程度敷き、砂層が層状をなして移動を始めるときの角度として求めた。各々の粒径の砂について10回程度実験を繰り返している。江頭らは $\mu_k/\mu_s = 0.7 \sim 0.85$ を提案している。ここではその値を0.8と仮定して μ_k

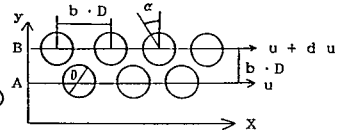


図-2 粒子の配列モデル

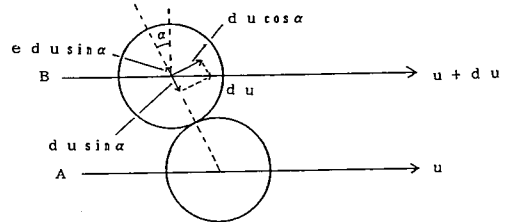


図-3 衝突の説明図

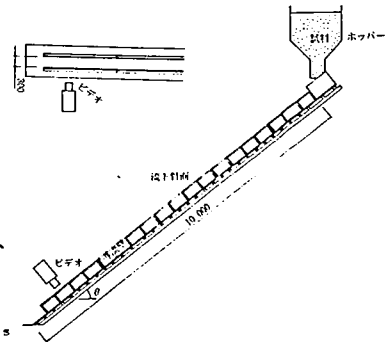


図-4 実験装置の概要

を求めた。実験の検討にあたって水の乱れによる抵抗と粒子の非弾性衝突に伴う抵抗は分離が困難なため水を含まない条件で実験を行うこととした。

4. 2 実験条件

観察によると崩土は次のような挙動を示すようである。ホッパーを一定角度開口すると砂の流動が始まり明瞭な前線を形成して斜面を流下し、しだいに一定の流下深を保つようになり、定常な流れが斜面中央付近から下方に形成される。流れの表面は整然とした流れであって大きな乱れはみられない。表-1 に実験条件を示す。定常的な流れのできた時間内において砂粒子をビデオ読みから速度を求め速度分布図を作った。その1例が図-6 である。全てのケースに共通してみられた現象は次の通りである。上に凸な速度分布と下に凸な速度分布を持つ流れあり、その変曲点は速度が1 m/s 付近に表れている。速度分布の変曲点の上下では流れを支配している要因の異なることが予想される。また各粒子は層状に流れており大きな乱れは観察できない。粒子は上下層の速度の違いにより回転しており、回転に伴って粒子は上下方向に多少、波打ちながら流れていることがわかった。粒子の間隔を支配する係数 b を粒子配置のモデル化により濃度 C で表現することを考える。崩土材料を密な状態に詰め込むと土砂濃度は最大でも60%程度におさまることが実験によりわかっている。実験に用いた砂を均一な球とみなしてその充填模型を考えると空隙率が40%程度となるものは、六方系粗充填である。このモデルを用いると係数 b は次のように表現できる。

$$b = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{3}\pi}{9C}} \quad \text{----- (11)}$$

流下中の土粒子の濃度 C の算出に当たっては直接測定が困難であるため、ここでは間接的な方法として平野らの手法を用いることとした。この手法を用いると C_0 を基準点における濃度とするとある層の濃度 C は次のように表わされる。

$$C/C_0 = (n/n_0)^2 \quad \text{----- (13)}$$

ここに n , n_0 は、水路側壁に接触している粒子の数である。これにより密に充填した場合の n_0 値と流れの各層の n 値を比較することにより C をもとめたものが図-7 である。 $d_{50}=1.78\text{mm}$ についても同様の結果が得られた。 $d_{50}=0.93\text{mm}$ については粒子の読み取りが困難なため求めることが出来なかった。この結果より水路底面には土砂濃度の大きな部分が存在し表面ほど小さいことが分かる。

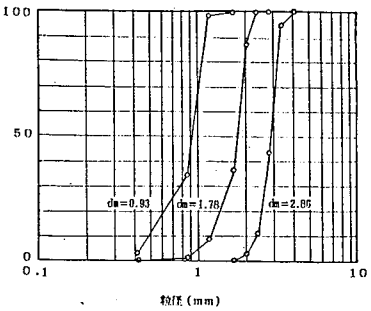


図-5 粒度分布曲線

表-1 実験条件

CASE No	θ (Deg)	d_{50} (cm)	μ	σ	H (cm)	M (Kg)
1	38.7	0.093	0.818	2.65	3.3	819.3
2	"	"	"	"	4.0	792.3
3	"	0.178	0.824	"	4.5	893.5
4	"	"	"	"	3.3	878.3
5	"	0.286	0.818	2.63	3.8	870.1
6	"	"	"	"	4.5	863.0
7	33.2	0.093	"	2.65	2.1	909.1
8	"	"	"	"	3.4	895.4
9	"	"	"	"	2.5	880.0
10	"	0.178	0.824	"	4.1	914.5
11	"	"	"	"	2.3	873.5
12	"	0.286	0.818	2.63	3.7	844.3
13	"	"	"	"	4.0	839.8
14	31.0	0.093	"	2.65	4.0以上	889.8
15	"	0.178	0.824	"	—	669.3
16	"	0.286	0.818	2.63	3.3-	730.1
17	35.7	0.093	"	2.65	3.3	678.3
18	"	"	"	"	1.5	662.3
19	"	0.178	0.824	"	4.2	513.6
20	"	"	"	"	2.2	504.4
21	"	0.286	0.818	2.63	3.5	664.3
22	"	"	"	"	2.3	654.8

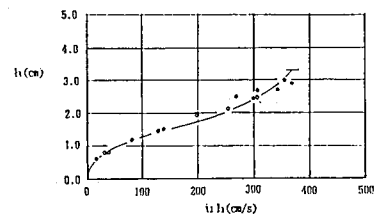


図-6 速度分布図(ケース1)

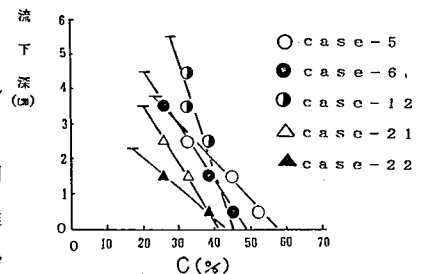


図-7 Cの分布($d_{50}=2.86\text{mm}$)

次に水路側面（アクリル板）を通して観察した流速分布は側面抵抗を受けているため表面流速の形状を調べた。その結果が図-8である。これは $\theta = 33.2^\circ$, $D = 0.0093\text{m}$, $H = 0.025\text{m}$ の条件で行なったものであるが、壁面から12cm程度離れたところから中央の部分では側面の影響が見られなくなっており、側面と中央の表面流速比は2.1である。中央の速度分布は観測出来ないため、その形状は側面の流速分布と相似と仮定して検討を行なった。下に凸な速度分布を持つ領域における平均流速を v とし、式(10)と(11)と粒子一個当りの占有体積を $\sqrt{3}/2 * (bD)^3$ とし、未知数 α と e について整理すると次のようになる。

$$\sin \alpha \sqrt{1-e^2} = \frac{2}{5Dv} \sqrt{\frac{6\sqrt{3}g(\sin \theta - \mu \times \cos \theta)}{\pi}} \sqrt{\frac{\sqrt{3}\pi}{9}} \frac{1}{C^2} \frac{3}{H^2} \quad (14)$$

この種の実験にはかなりの誤差が含まれることが予想されるが抵抗モデルの適否を判断する1つの目安は式(14)が0以上1以下の解を持つことである。 $\sin \alpha \sqrt{1-e^2}$ の値を求め図-9に衝突速度 du と $\sin \alpha \sqrt{1-e^2}$ の関係を示す。この値は0.1から0.4の幅にバラいているが du の増加に応じて小さくなっているようである。このことから一つは du が大きくなるにつれ α が小さくなることと、二つ目は du が大きくなると e が小さくなることが考えられる。粒子の衝突角 α は図-2のモデルを用いると速度に応じて α が変化することが予想されるため検討を加える。図-3の様に粒子の衝突角 α はA層とB層の速度差 du と重力による力 mg と粒子間隔を支配する b により解析的に求めることが出来る。その結果を図-9に併せて示してある。これによると実験より得られた速度 du はかなり大きな値であり粒子一個前方の粒子には衝突せず、それを飛ばして更に前方の粒子に衝突していることになり、これはビデオ観察の結果とは異なるものである。但し、右下がりの傾向は確認できた。次に反発係数 e はここで行なった実験条件内では衝突速度に依らず一定と考えられるため、 e を例えば0.5と仮定して α について検討した。その結果が図-10である。これを見ると衝突速度 du が大きくなるにつれて粒子の衝突角 α は小さくなる傾向が見られる。

5. おわりに

本年度は抵抗モデルの妥当性について検討したものである。結果は実験精度の問題もありかなりばらついたものとなっているが、このモデルは他の材質を用いた実験にも応用でき、そのような実験を通して更に説得力のあるものが得られるものと考えている。

参考文献 芦田和男, 江頭進治, 神矢弘, 斜面における土塊の滑動、停止機構に関する研究 京大防災研究所年報27号B-2 P331-340 平野宗夫, 岩元賢, 土石流先端部に関する実験的研究 新砂防121 P1-7 高橋保, 土石流の発生と流動に関する研究 京大防災研究所年報20号B-2 P405-435 山野邦明, 大同淳之, 三輪浩, 西本直史, Newton流体を含む粒子流の構成方程式のエネルギー的考察 第39回年次学講昭和59年

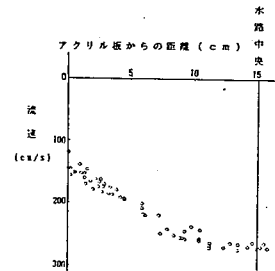


図-8 表面流速分布

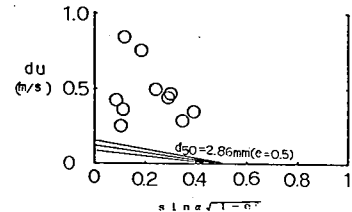


図-9 $du - \sin \alpha \sqrt{1-e^2}$ の関係

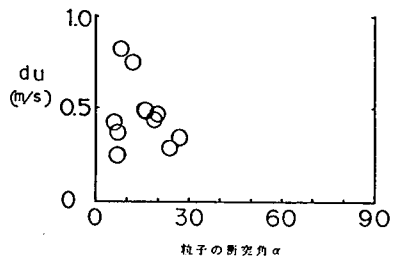


図-10 $du - \alpha$ の関係