

九州大学 正員 椿 東一郎

〃 〃 平野 宗夫

〃 学生員 〇田中 耕一

〃 〃 北島 清仁

1 緒言

我国の土砂災害の原因として、山地の荒廃があげられる。地形の急峻なこと、雨量強度が強いこと、地質が脆弱なことがあいまって、侵食、地沈、土石流などが起りそれが原因で荒廃が起ると考えられる。本文では、土砂災害の一つである土石流に関する研究の第一歩として、一般に溪流に発生する堆積土砂の崩壊の機構を考察してみた。

2. 実験装置と方法

実験に用いた水路は中20cm、深さ15cm、長さ4mのアクリライト製で、メサライトを敷き、底面に同じ資料をはりつけた。上下流端には金網を設け、土砂止めと通水性を計った。流量は上流端からホースで流入させ、下流端のますで測った。

又、水深をとるために上流端より50cm、1m

1.5m、2m、2.5mの処にマノメータを設置。

メサライトの物理的性質は表1の通りである。

実験条件は表2に示している。

方法は、バルブを調節して流量を少しずつ増しその度に水深と流量をとり透水係数を計算した。

又、メサライトが崩壊する時の水深 h_c 、及び流量 Q_c を記録。水深は5点の平均をとった。

崩壊の状況は色つきのメサライトを側壁に位置させておき、16mmカメラで撮影した。

3. 実験結果

流量の増加に伴う水深の増加と透水係数の変化を図に示すと図1のようである。

図より、勾配が小さい時(No.1)には崩壊は起らない。しかし表面流があらわれそれがある水深に達すると、掃流状態でメサライトは移動する。一定勾配以上になると、表面流が現われる前に斜面は不安定となり崩壊は始める。

比重	1.447
空隙率	42.9%
粒度分布	D_{10} 0.58mm
	D_{50} 0.74
	D_{90} 0.94
状態	静止 40°
角度	動 35°

表1 メサライトの物理的性質

実験番号	勾配 (tan β)	メサライトの厚さ
No. 1	0.096	10 cm
2	0.210	〃
3	0.223	7.5
4	0.315	10
5	0.336	7.5
6	0.442	8
7	〃	5
8	0.451	8
9	〃	10
10	〃	〃
11	0.695	〃

表2 実験条件

実験番号	勾配	厚さ	限界水深	限界流量
No. 2	0.210	10 cm	10.6	1.06
3	223	7.5	7.0	0.93
4	315	10	10.16	1.02
5	336	7.5	5.5	0.73
6	442	8	5.7	0.71
7	〃	5	4.4	0.88
8	451	8	5.6	0.70
9	〃	10	6.2	0.62
10	〃	10	5.4	0.54
11	695	10	6.0	0.60

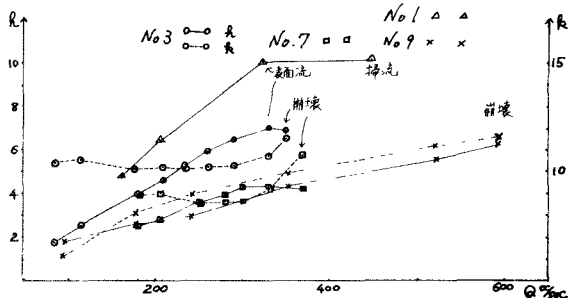
表3 限界水深/厚さ (h_c/D)

図1 水深と透水係数の変化

4 理論的考察

ここでは、定常浸透流がある場合の無限長斜面の安定と、スベリ面を仮定した場合の斜面長と深さの関係、掃流による移動が起る限界を理論的に考察してみる。

(a) 無限長斜面の安定について

地表面と平行に浸透流がありその流線網は図2の左方に示している。地下水水位面上の土の単位重量を γ

“ 以下の土の飽和単位重量を γ_t

“ 以下の土の水中単位重量を γ' とすれば”

単位長さ b 当りの土の重量は $W = \gamma(D-h) + \gamma_t h + \gamma \cos \beta$

間ゲキ水圧は流線網から $h \gamma_w \cos \beta$

底面に働く剪断応力では $\tau = \gamma(D-h) + \gamma_t h \cos \beta \sin \beta$

“ 垂直有効圧力 σ $\sigma = \gamma(D-h) + \gamma' h \cos \beta$

安定条件は $\tau \leq C + \sigma \tan \phi$ これより

$$\{\gamma(D-h) + \gamma_t h\} \sin \beta \cos \beta \leq C + \{\gamma(D-h) + \gamma' h\} \cos \beta \tan \phi$$

まとめ

$$\frac{h}{D} \leq \frac{C/\cos \beta + \gamma(\tan \phi - \tan \beta)}{(\gamma_t - \gamma)\tan \beta + (\gamma - \gamma')\tan \phi}$$

$$C=0 \text{ とすると } \frac{h}{D} \leq \frac{\gamma(\tan \phi - \tan \beta)}{(\gamma_t - \gamma)\tan \beta + (\gamma - \gamma')\tan \phi} \quad (1)$$

表面まで水がきたとき、又表面上に水位がある場合の

安定条件は $\tan \beta \leq \frac{\gamma'}{\gamma_t} \tan \phi$

となる。

故に $\beta \leq \tan^{-1}(\frac{\gamma'}{\gamma_t} \tan \phi)$ では掃流による移動は起つても、崩壊は起らない。

(1)式をグラフに描きその上に実験で求めた限界の水深をプロットすると図3の様になる。

(b) スベリ面を仮定した場合

スベリ面を図4のように折線状とし、スベリ面が上下流端で地表と交わる角度をそれぞれ $(\pi/4 + \phi/2)$, $(\pi/4 - \phi/2)$ とし中間のスベリ面は地表と平行でメサライト底面に生ずるものとする。

粘着力を無視してⅠⅡⅢの部分で力の釣合を考へる。

Ⅰの部分の釣合 (図5参照)

水平方向

$$P_1 \cos \beta - R_1 \cos(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} - \beta) - U_1 \cos(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} - \beta) + H_1 = 0 \quad (2)$$

鉛直方向

$$P_1 \sin \beta + R_1 \sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} - \beta) + U_1 \sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} - \beta) - W_1 = 0 \quad (3)$$

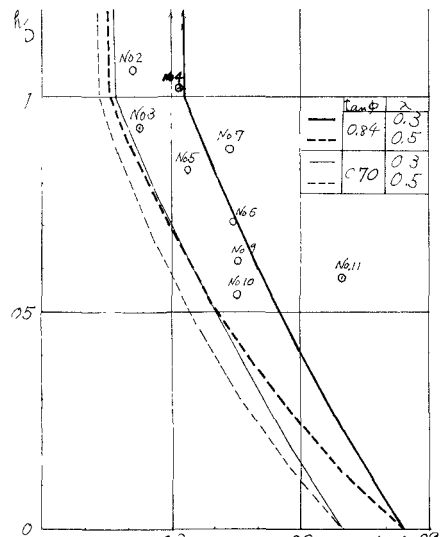


図3 限界水深(理論値と実験値)

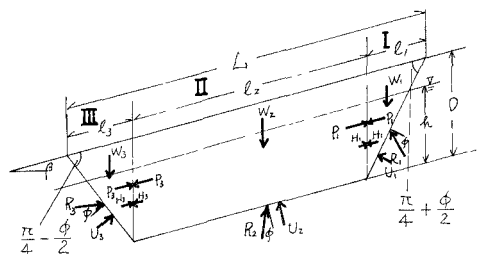
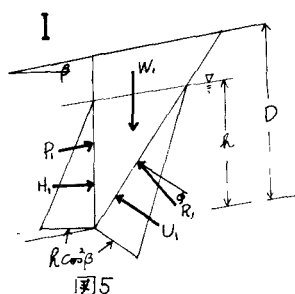


図4 折線状スベリ面



ここで

$$l_1 = \frac{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} - \beta)}{\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2})} D, \quad H_1 = \frac{1}{2} h^2 \cos^2 \beta$$

$$U_1 = \frac{h^3 \cos^3 \beta}{2 \sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2})}, \quad W_1 = \frac{l_1 \cos \beta}{2} \left\{ \gamma(D - \frac{h}{D}) + \gamma_t \frac{h^2}{D} \right\}$$

である。

(2)(3)式より

$$P_1 \sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}) - U_1 \sin \phi + H_1 \sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} - \beta) - W_1 \cos(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} - \beta) = 0 \quad (4)$$

同様にⅢの部分から

$$-P_3 \sin(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4}) + U_3 \sin \phi + H_3 \sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \beta) - W_3 \cos(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \beta) = 0 \quad (5)$$

ここで $l_3 = \frac{\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \beta)}{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2})} D, \quad H_3 = H_1, \quad U_3 = \frac{h^3 \cos^3 \beta}{2 \sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2})}, \quad W_3 = \frac{l_3 \cos \beta}{2} \left\{ \gamma(D - \frac{h}{D}) + \gamma_t \frac{h^2}{D} \right\}$ である。

Ⅱの部分より

$$(P_3 - P_1) \cos \phi - U_2 \sin \phi + W_2 \sin(\phi - \beta) = 0 \quad (6)$$

ここで $U_2 = h l_2 \cos^2 \beta, \quad W_2 = l_2 \cos \beta \left\{ \gamma(D - h) + \gamma_t h \right\}$ である。

(4)(5)(6)式より

$$l_2 = \frac{(P_3 - P_1) \cos \phi}{\cos \beta \left\{ h \cos \beta \sin \phi - \left\{ \gamma(D - h) + \gamma_t h \right\} \sin(\phi - \beta) \right\}}$$

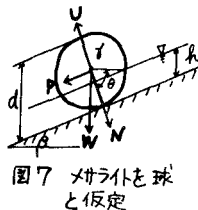
$$\therefore L = l_1 + l_2 + l_3 = \frac{[2 \left\{ \gamma(D^2 - h^2) + (\gamma_t - \gamma_w) h^2 \right\} \cos \beta \sin \phi - \gamma_t h^2 \sin \beta \cos \phi] \cos \beta}{[\gamma h \cos \beta \sin \phi - \left\{ \gamma(D - h) + \gamma_t h \right\} \sin(\phi - \beta)] \cos \beta} + \frac{2 \cos \beta}{\cos \phi} D \quad (7)$$

(7)式をグラフに示すと図6の如くなる。

実験で得られた h/D より, L/D が図6より理論的に求められるわけであるが, この実験は定常状態で行なわれたので, L は判定できなかったが, すべりは上流端から起るのが認められた。すべりの長さ L は今後, 非定常の実験をやって検討してみるつもりである。

(c) メサライトが掃流される限界

図7のようにメサライトの粒径を d , 水深を h , 単位重量を γ とする



$$\text{重量 } W = \gamma \alpha_1 d^3, \quad \alpha_1 = \frac{4}{3} \pi / 8 = \frac{\pi}{6}$$

$$\text{浮力 } U = \gamma_w \alpha_2 d^3, \quad \alpha_2 = \pi \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{h}{D} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{h}{D} \right)^3 \right\}$$

$$P = W \sin \beta, \quad N = W \cos \beta$$

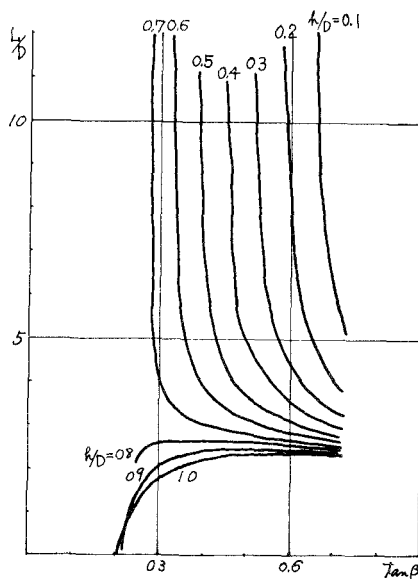


図6 崩壊の長さ

流体力をFとすると

$$F = C_x \alpha d^2 \frac{\rho U^2}{2} \quad \text{ここで } \alpha = \left(\frac{\theta}{4} - \frac{1}{8} \sin 2\theta \right), \quad \theta = \cos^{-1} \left\{ 1 - 2 \left(\frac{r}{d} \right) \right\}$$

浸透流を darcy 流と仮定し、間隙を流れる流速がメサライトに当たるとすると $u = \frac{k \tan \beta}{\lambda}$ とおける。又抵抗係数として次式を用いる。

$$C_x = \frac{24.0}{Re} + \frac{3.0}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad \text{ここでレイノルズ数 } Re = \frac{\rho k \tan \beta}{\lambda \nu} \quad \text{とする。}$$

釣合式は $P + F = (N - U) \tan \phi$

すなわち $\gamma \alpha_1 d^3 \sin \beta + C_x \alpha d^2 \frac{\rho U^2}{2} = (\gamma \alpha_1 d^3 \cos \beta - \gamma_w \alpha_2 d^3) \tan \phi$

整理すると $d = \frac{\alpha k^2 \tan^3 \beta / 2 \lambda^2}{-\alpha_1 \gamma \sin \beta + \tan \phi (\alpha_1 \gamma \cos \beta - \alpha_2 \gamma_w)} C_x$

勾配を一定として、d に対する r/d を計算(上式を用いて)すると図8のようになる。図8より掃流が起る時の r/d の値は d が増せば増すほど又水路勾配が緩やかになるほど大きくなることわかる。

実験では、掃流の起る時の r が測定出来なかったが、粒が水をかぶってしまう前に移動するのは認められた。

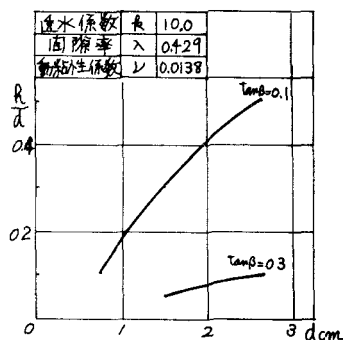


図8

5. おすび

今後の課題としては、資料に砂を用いた場合、また非定常とした場合等について検討する予定である。なほ非定常の場合には、予備実験で砂堆の形成が見られたので、その形成過程、及び移動機構を究明しようと思う。