

土石流の発生限界に関する実験

矢野 勝正・大同 淳之・角野 稔

EXPERIMENTS ON THE CRITERION FOR OCCURRENCE OF MUD FLOW

By *Katsumasa YANO, Atsuyuki DAIDO*
and *Minoru SUMINO*

Synopsis

Recently, there are many disasters caused by abnormal heavy rains in Japan. Such rains occur mud flow in a steep river in a mountaneous region. But we cannot fully explain these complex phenomena at present.

In this paper, some experiments on the characteristics of movement of sand were conducted in the steep slope channel (15 m in length, 40 cm in width). It was concluded from the results of the experiments that seepage flow plays an important role for the movement of sand in the steep flume, and that the sediment begins to move as mud flow, when the slope of the bed sediment in the flume exceeds in angle of internal friction of sediment. And some analytical model of characteristics of sand movement as mud flow was proposed.

1. 緒 言

わが国における最近の河川災害、とくに山地河川においては、台風や局地的な集中豪雨によって、異常な土砂を流出させ、沿岸の畑地や人家に甚大な被害をもたらしているのが特長のようなのである。普通河川における流砂理論の解明には、今まで多くの研究者によって研究がなされ、洪水による氾濫の防止などにかなりの成果がえられてきた。しかし、溪流における土砂流出は、普通河川における流砂形式と異なり、瞬時のうちに河相を変化させたりする現象が見られる。このような土砂流出は砂防工学上、最も重要な課題になっているが、従来知り得た点は少なく、その解明は不可欠なものであると思われる。土石流に関する研究があまり行なわれていない原因は、実際の現象の観測が困難であるために、その実態が把握されておらず、水路での実験もむずかしかったことではないかと思われる。

一般に、土砂の輸送形式は、各個運搬と集合運搬の二つに大別され、土石流あるいは山津波という言葉で表わされている土砂流出の形態は、集合運搬によって土砂移動が行なわれると考えられている。したがって、普通河川における流砂理論では、巨石を数 km も輸送する現象¹⁾を説明できないようである。一方、その集合運搬についても、その理論的研究も実験的研究もあまり行なわれていないのが現状である。今までの土石流に関する研究として、柿²⁾は粘土交りの山砂に稠密性と可塑性をもたせるためにセメントを混入した材料を用い、河床には砂れきをしき、水路上部の攪拌槽から急激に流下させ、土石流を発生させている。そして、土石流の成立がまず泥流より発し、ついで流路構成材料を浸蝕して土砂流と化し、最後はれきを巻き添えにして土石流となり、それには微粒子を多量に含むことによって、稠密性と可塑性の増大が必要であることを結論としている。また、著者ら³⁾は土石流の主体は泥流と考え、その流動現象はニュートンの仮説

にしたがわず、非ニュートン流体として、粘土の濃厚溶液を用いて、その力と変形の関係を求めている。また、建設省土木研究所⁴⁾においては、大正15年に起こった十勝岳土石流に関する調査を行ない、土石流流量の推定をベントナイトを混入した材料を用いて、水位-時間曲線を作成している。しかし、これらの研究は、ほとんど泥流に関するものであって、実際現象を明確に表現されているとはいえないと思う。砂れきの移動において、微粒子による流動効果は無視できないが、土石流発生後の堆積状況を見ると、必ずしも泥流が支配的とはいえない。したがって、土砂流の集合運搬としての運動機構を解明する必要がある。

また、土石流の発生する原因には、山崩れによるものや、溪流に堆積した砂れきが流下してくるもの等いろいろあるが、最近の災害後の調査結果によると、溪床の堆積物によるものが大半をしめているようである。そこで実験水路において、砂れきを敷き通水したとき、堆積砂れきが波状にもり上りながら流下する現象を見出した。この砂れきの移動形態を、溪流において発生する砂れきの集合運搬の一形態と見なし、その発生限界および移動機構について、若干の実験を行なったので、その結果について述べる。しかし、実験上取り扱いにくいので粘性の効果は無視している。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験に用いた水路は、巾 40 cm、深さ 30 cm および長さ約 15 m の鋼製のもので、片面ガラス張りである。勾配は水平から約 1/2 まで変化できるようになっており、流量は上流端の水槽より流入した。また、水路底面には、実験に使用した砂れきと同一砂れきをニスづけし、境界面の摩擦が砂れき層内のセン断抵抗より小さくならないよう考慮した。水路の上流側は金網を挿入し、水槽から流入してきた流水が砂れき層内に一様浸透できるようにし、下流側は下流端からの浸蝕を防ぐために砂れき層厚と等しい高さまで土砂止めをもうけた。流下現象の撮影には、モータードライブカメラを使用した。また、この実験に使用した砂れきは粒径 0.75 cm、比重 2.55 のほぼ一様な山砂利である。

2.2 実験方法

砂れき層内のすべり面の発生限界に関する実験においては、きわめてゆっくり流量を増加させていき、砂れきが移動を開始するまで続け、その後その流量を持続させ、砂れきの移動状況を観察した。この操作を種々こう配を変化させて行なった。また、単一砂堆の発達過程に関する実験においては、砂れき層内に適当な滲透流を流しておいた後に、急激に流量を流して移動状況を側面から連続的に写真撮影し、解析した。

3. 実験結果とその考察

3.1 砂れき層内のすべり面の発生限界

水路河床上に敷厚約 5 cm、10 cm および 15 cm の 3 通り砂れきを敷き並べ、上流側からきわめてゆっくり流量を増加させていき、砂れきが移動開始するまで続けた。実験水路の機能上、最急こう配 0.413 まで適当に変化させた。Fig. 1 は砂れきが集合運搬として移動したときの流量とこう配との関係を敷厚ごとに整理し、プロットしたものである。その結果、この砂れき ($d_m=0.75$ cm, $\sigma/\rho=2.55$) が集合運搬形式で流下する限界こう配は、ほぼ 0.3 ぐらいで、こう配が 0.286 のときには、砂れき層内は、浸透流で飽和され、その後流量を増加させても、砂れき面上を掃流で砂れきは流下し、蛇行が生じ小山の発生は見られなかった。この図には、集合運搬形式で砂れきが流下したときの値のみ記した。この限界こう配付近での砂れきの移動状況は、ほぼ砂れき層内は浸透流で飽和され、その後流量の増加により、最初、掃流形式で砂れきが移動を開始し砂堆を形成する。この砂堆の上流側では水深は粒径の 2~3 倍程度であるが、下流側では表面流は生じない。この砂堆の高さは後述する実験の場合ほど高くならず、せいぜい敷厚の 1/2 程度であるが、この砂堆の長さはかなりの距離にわたって続く。こう配 0.413 の場合は表面流が生じないで、それ以前に砂れきが移動し、砂堆を形成しながら流下する。このことは次のことから容易に判明される。すなわち、粘着力のない砂からなる斜面に滲透流がある場合に、斜面が安定な限界こう配 i_c は、砂の水中単位重量を γ_b ,

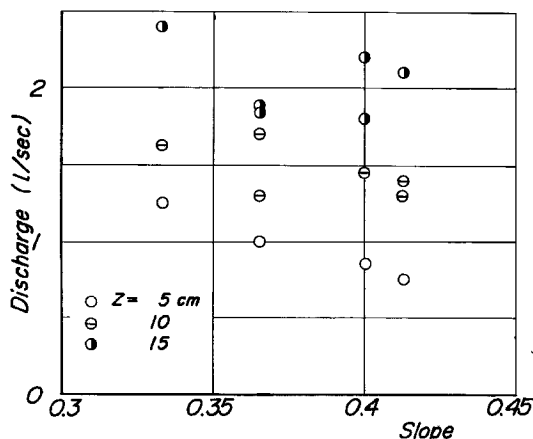


Fig. 1 Relation between discharge and slope at the movement of sediment.

飽和単位重量を γ_s 、砂の内部摩擦角を ϕ とすると、

$$\tan i_c = (\gamma_b / \gamma_s) \tan \phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。すなわち、透水がないとき安定であった領域が、滲透によってすでに不安定な状態になっており、流量の増加などによってすべりを起こしているものと思われる。従来この種の斜面の安定実験では、斜面の法先が開放の状態になっているため、下方から崩落する現象が数多く観察されているが、もし下流端が支えられている斜面であるならば、この実験で示されるように、上方から小さいすべりが斜面上をのりあげ、つぎのすべり面の荷重となり、崩落することになる。

このように考えると、砂層内に移動の生ずる限界は式(1)の限界こう配 i_c が1つの規準となる。この実験砂れきの水中内部摩擦角は、約 0.343 であるから、実験結果と一致する。したがって、こう配が急になると、すべての砂れきが飽和しなくても限界こう配以上となり、砂れきが流下することになる。しかし、土砂の移動量は、すべて同時に流下するのではなく、かなりの量が残され、むしろその砂れきが掃流によって、砂堆の通過後運ばれるものが多い。したがって、現在の資料では、移動土砂の集合運搬と掃流運搬との比は判明しない。

3.2 急こう配水路において生ずる単一砂堆の発達過程

前述したように、砂れきの移動は、滲透流の有無によってかなり影響されることがわかった。ここでは、その滲透流を変化させて、砂れきの移動現象を解析したものである。実験の行なった範囲を **Table 1** に示す。この実験における土砂の移動は表面流によって始まり、砂堆を形成する。砂堆の上流側では水深を増し、下流側では表面流が消失して、ますます砂堆の発達を助長し、一般の移動床にみられる砂堆の移動と同じように砂堆の背面の砂をはくりして、砂堆の前面に堆積し、砂堆を次第に下流に移動させる。ただ一般の砂堆と異なるところは、砂堆の背面にだけ流れが生じ、下流側では表面流が生じないことであろう。**Fig. 2** (a), (b) はこう配 0.400 および 0.333、敷厚 10 cm のときの砂堆の先端が移動する時間的変化を示したものであって、図中の記号は **Table 1** に示すように最初滲透流として、流量を出しておきその後急激に流量を増加させたときの実験結果である。この図から明らかなことは、滲透流の存在が砂れきの移動にかなり影響している。また、Run 1—1 の場合においては、その速度がかなり変化しているが、このことは最初掃流運搬が卓越して、その後集合運搬に移行していくものと思われる。次に、砂堆の頂点が流下するにつれて、どのように変化するかを示したものが **Fig. 3** (a) および (b) である。この図によれば、砂堆の頂点は流下とともに急激に増加していくが、ある程度流下すると増加率は減少する傾向にある。

Table 1 Experimental condition

	Slope	Sand depth (cm)	Initial seepage flow (l/sec)	Final discharge (l/sec)
Run 1-1	0.400	10	1.20	3.50
1-2	"	"	0.80	"
1-3	"	"	01.0	"
2-1	0.333	"	0	"
2-2	"	"	0.45	"
2-3	"	"	0	"
3-1	0.286	"	0.80	"
3-2	"	"	0	"

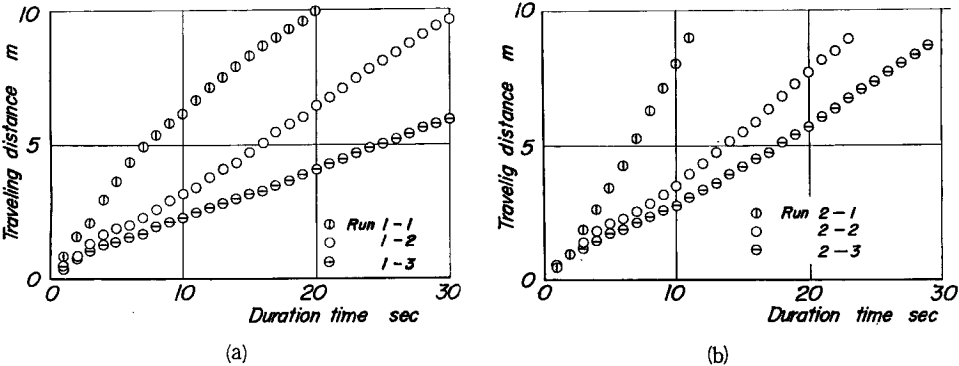


Fig. 2 (a), (b) Relation between traveling distance and duration time.

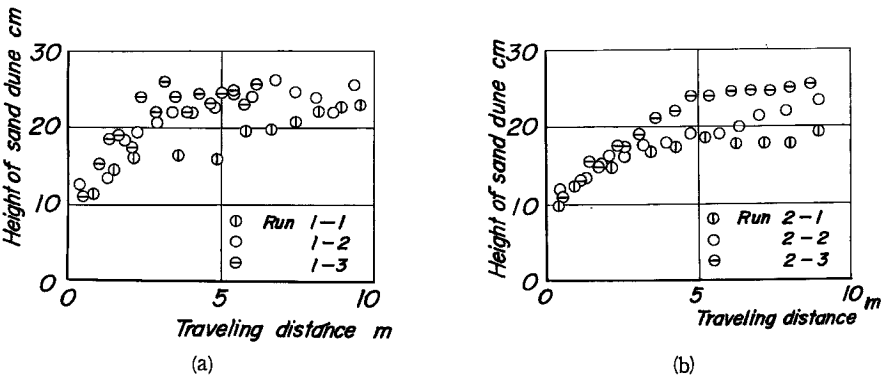


Fig. 3 (a), (b) Variation of height of sand dune at peak.

しかし、実験時の観察によると、その砂堆の長さは時間の経過とともに長くなっていく傾向が見られる。また、砂れき層内の砂れきの速度分布を示したものが、Fig. 4 である。この図は砂堆の法先における砂れきの速度分布の一例であるが、こう配が急になるほど、また滲透流が多いほど深層にわたって砂れきの移動が見られる。滲透流がない場合は、砂堆の法先において、砂れき層内の砂れきの移動はほとんど見られず、掃流形式ではこぼれてきた砂堆が、堆積砂れき上をすべりながら流下していくようである。また、限界こう配以下では、砂堆は掃流形式で進行する。したがって、砂れき層内にひずみが生ずるためには、限界こう配以上でなくてはならない。次に、砂れき層内にひずみが生じ、流下する移動機構について簡単な考察を行なったので、次節ではこのことについて述べる。

3.3 砂堆の移動機構に関する考察

砂の崩壊が進行する状態は、局所的な砂面の凸部の後方に水がおり、この水の荷重によって、土塊がすべるとみなされる。この土塊のすべり落ちる早さおよびその大きさをすることが重要である。この土塊の移動は流れの動的影響も当然受けていると考えられるが、斜面の状態によっては動的影響がそれほど大きくないとみられる場合もかなりある。そこでまず、動的影響を無視して、斜面に平行な滲透圧をうける場合についてすべりの大きさと深さを求めてみよう。すべりの大きさを求めるためには、何らかの方法で、すべり面の形をきめる必要がある。ここでは、折線状すべり面を考えることにする。折線状すべり面を考えたときの極限条件は斉藤⁹⁾によってとりあつかわれているが、滲透流のある場合についてはふれられていないので、これを求めることにする。

(i) 砂堆上のこう配 i が $i < \pi/4 - \phi/2$ のとき、初期こう配 θ の斜面上に、自然こう配 i をもった砂堆が発達し、砂堆上には、深さ Z_1 の水がある場合に生ずるすべりの深さを求めよう。すべり面下端は斜面こう配 θ である受働域、すべり面上端はこう配 i の主働域と考え、すべり面は Fig. 5 に示すように折線状とし、すべり面が上下端で交わる角度をそれぞれこう配 i の地表に対して $(\pi/4) + (\phi/2)$ 、こう配 θ の地表に対して $(\pi/4) - (\phi/2)$ とし、中間のすべり面は地表と平行とする。水による載荷は、砂堆の頂点から上流側にのみ存在するとし、その深さは平均して Z_1 であるとする。また、浸透圧 P_u はそれぞれの領域において、地表面と平行な方向に働くと仮定する。そこで、すべり領域の折点を通る鉛直線で土塊を三分し、各土塊の平衡条件から、斜面長とすべり深さの関係を求めよう。

上端の三角形について Fig. 5 に示すように力を取り、 W_1 を土の重量、 W_w を水の揚力とすると、つぎの関係がなりたつ。

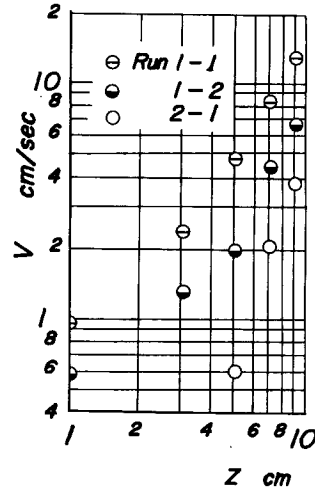


Fig. 4 Velocity profile in sediment.

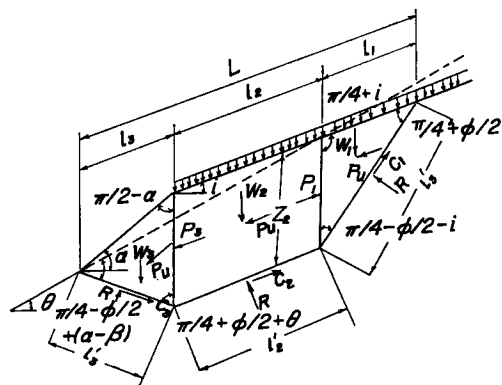


Fig. 5 Schematic diagram of sand dune.

$$\left. \begin{aligned} & -R_1 \cos (\pi/4 - \phi/2 - i) + P_1 \cos i + C_1 \sin (\pi/4 - \phi/2 - i) - P_u \cos i = 0 \\ & + R_1 \sin (\pi/4 - \phi/2 - i) + P_1 \cos i + C_1 \cos (\pi/4 - \phi/2 - i) - W_1 + U_1 \\ & - P_u \sin i - W_{w1} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

R_1 を消去して

$$P_1 = \frac{1}{\sin (\pi/4 - \phi/2)} \{W_1' \cos (\pi/4 - \phi/2 - i) + P_{u1} \sin (\pi/4 - \phi/2 - 2i) - C_1\} \dots\dots\dots (3)$$

正弦法測から

$$l_1 = \frac{\sin (\pi/4 - \phi/2 - \theta)}{\sin (\pi/4 + \phi/2)} Z_2 \dots\dots\dots (4)$$

$$l_1' = \frac{\cos i}{\sin (\pi/4 + \phi/2)} Z_2 \dots\dots\dots (5)$$

ここに,

$$W_1' = \frac{\gamma_b Z_2^2}{2} \frac{\sin (\pi/4 - \phi/2 - i) \cos i}{\sin (\pi/4 + \phi/2)} + \gamma_w Z_1 \frac{\sin (\pi/4 - \phi/2 - i) \cos i}{\sin (\pi/4 + \phi/2)} \dots\dots\dots (6)$$

$$C_1 = \frac{\gamma_b Z_2^2}{2} \frac{\sin (\pi/4 - \phi/2 - i) \cos i}{\sin (\pi/4 + \phi/2)} \cos (\pi/4 + \phi/2 + i) \tan \phi + \frac{C_0 \cos i}{\sin (\pi/4 + \phi/2)} Z_2 \dots\dots\dots (7)$$

$$P_{u1} = \frac{\gamma_w Z_2^2}{2} \frac{\sin (\pi/4 - \phi/2 - i) \cos i}{\sin (\pi/4 + \phi/2)} \sin i \dots\dots\dots (8)$$

であるから, これらを (3) 式に代入すると,

$$\begin{aligned} P_1 = & \frac{1}{\sin (\pi/4 - \phi/2)} \left[\frac{\gamma_b}{2} \frac{\sin (\pi/4 - \phi/2 - i) \cos i}{\sin (\pi/4 + \phi/2)} \left\{ Z_2^2 (\cos (\pi/4 - \phi/2 - i) \right. \right. \\ & + \frac{\gamma_w}{\gamma_b} \sin i \sin (\pi/4 - \phi/2 - 2i) - \cos (\pi/4 + \phi/2 + i) \cdot \tan \phi \\ & \left. \left. + \frac{2\gamma_w}{\gamma_b} Z_2 \cdot Z_1 \cos (\pi/4 - \phi/2 - i) \right\} - \frac{C_0 \cos i}{\sin (\pi/4 + \phi/2)} Z_2 \right] \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

同様に下端の三角形については,

$$\begin{aligned} P_3 = & \frac{l}{\cos (\pi/4 - \phi/2 + i - \theta)} \{W_{b3} \sin (\pi/4 - \phi/2 - \theta) \\ & + C_3 - P_u \cos (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)\} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$l_3' = \frac{\sin (\pi/4 + \phi/2 + \theta)}{\sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} Z_2 \dots\dots\dots (11)$$

$$l_3 = \frac{\sin (\pi/4 + \phi/2 + \theta)}{\sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos i} Z_2 \dots\dots\dots (12)$$

$$W_{b3} = \frac{\gamma_b Z_2^2}{2} \frac{\sin (\pi/4 + \phi/2 + \theta) \cos \alpha}{\sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{aligned} C_3 = & \frac{\gamma_b Z_2^2}{2} \frac{\sin (\pi/4 + \phi/2 + \theta) \cos \alpha}{\sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} \cdot \cos (\pi/4 - \phi/2 - \theta) \tan \phi \\ & + \frac{C_0 \cos \alpha}{\sin (\pi/4 + \phi/2 + \alpha - \theta)} Z_2 \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

$$P_{u3} = \frac{\gamma_w Z_2^2}{2} \frac{\sin (\pi/4 + \phi/2 + \theta) \cos \alpha}{\sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} \sin \alpha \dots\dots\dots (15)$$

であるから, これらを (10) 式に代入して,

$$\begin{aligned} P_3 = & \frac{1}{\cos (\pi/4 - \phi/2 + i - \theta)} \left[\frac{\gamma_b Z_2^2}{2} \frac{\sin (\pi/4 + \phi/2 + \theta) \cos \alpha}{\sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} \left\{ \sin (\pi/4 - \phi/2 - \theta) \right. \right. \\ & \left. \left. + \cos (\pi/4 - \phi/2 - \theta) \tan \phi - \frac{\gamma_w}{\gamma_b} \sin \alpha \cos (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta) \right\} \right] \end{aligned}$$

$$+ \frac{C_0 \cos \alpha}{\sin (\pi/4 + \phi/2 + \alpha - \theta)} Z_2 \Big] \dots\dots\dots (16)$$

一方、中央断面では

$$\begin{aligned} (P_3 - P_1) &= W_w \sin i + P_u - C_2 + W_b \sin i \\ W_w &= \gamma_w Z_1 l_2 \cos i \\ P_u &= \gamma_w l_2 Z_2 \cos i \sin i \\ W_b &= \gamma_b l_2 Z_2 \cos i \\ W_b' \sin i + P_u &= \gamma_t l_2 Z_2 \cos i \sin i \\ C_2 &= \gamma_b Z_2 l_2 \cos^2 i \tan \phi + C_0 l_2 \\ l_2 &= \frac{P_3 - P_1}{\gamma_t Z_2 \left\{ \left(1 + \frac{\gamma_w Z_1}{\gamma_t Z_2} \right) \cos i \sin i - \frac{\gamma_b}{\gamma_t} \cos^2 i \tan \phi \right\} C_0} \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

以上の結果、すべりの長さ $L = l_1 + l_2 + l_3$ は (4), (12) および (17) 式より

$$L = \left(\frac{A}{\Gamma} + \frac{I}{K} + \frac{M}{N} \right) Z_2 + \frac{\frac{A}{\Gamma} \left(\frac{A}{\Gamma} - B \right)}{\Gamma Z_2 + A} - \frac{1}{\Gamma} \left(\frac{A}{\Gamma} - B \right) \dots\dots\dots (18)$$

と表わされる。

ここで、

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \frac{\gamma_b}{\gamma_t} \left[\frac{1}{2} \frac{\cos \alpha}{\cos (\pi/4 - \phi/2 + i - \theta) \sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} \left\{ \cos (\phi + 2\theta) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + [1 + \sin (\phi + 2\theta)] \tan \phi - \frac{\gamma_w}{\gamma_b} \sin \alpha [\cos \alpha + \sin (\phi - \alpha + 2\theta)] \right\} \right] \\ &\quad - \frac{\cos i}{1/2 \cos \phi} \left[\cos (\phi + 2i) + \frac{\gamma_w}{\gamma_b} \sin i [\cos i - \sin (\phi + 3i)] - [1 - \sin (\phi + 2i)] \tan \phi \right] \\ \Gamma &= \tan i - (\gamma_b / \gamma_t) \tan \phi \\ \frac{I}{K} &= \frac{\sin (\pi/4 - \phi/2 - i)}{\sin (\pi/4 + \phi/2)}, \quad \frac{M}{N} = \frac{\sin (\pi/4 + \phi/2 + \theta)}{\sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos i} \\ A &= \cos^2 i \tan i - \frac{C_0}{\gamma_w Z_1} \\ B &= \frac{C_0}{\gamma_w Z_1} \left\{ \frac{\cos \alpha}{\cos (\pi/4 - \phi/2 + i - \theta) \sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} + \frac{\cos i}{(1/2) \cos \phi} \right\} \\ &\quad - \frac{\cos (\phi + 2i)}{\cos \phi} \end{aligned}$$

である。(18) 式で $(I/K)Z_2$ の項が l_1 , $(M/N)Z_2$ の項が l_3 , 残りが l_2 の長さである。受働領域の l_3 に対して、 l_1 および l_2 の値がこの式で示すよりも長くなると、 l_3 の受働圧に打勝ってすべり出すことを示す。逆に L が与えられたとき、生ずる最大の深さが Z_2 である。(18) 式において、 $i > \pi/4 - \phi/2$ のとき、領域 I のすべり面が鉛直になり、それ以上の角度では、 l_1 が存在しなくなる。そのときは l_3 に対して l_2 の区間のみが作用すると考えると (18) 式の I/K の項がなくなって、 A および B の値はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{\gamma_b}{2\gamma_t} \left[\frac{1}{2} \frac{\cos \alpha}{\cos (\pi/4 - \phi/2 + i - \theta) \sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} \left\{ \cos (\phi + 2\theta) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + [1 + \sin (\phi + 2\theta)] \tan \phi - \frac{\gamma_w}{\gamma_b} \sin \alpha [\cos \alpha + \sin (\phi + 2\theta)] \right\} \right] \\ B_2 &= \frac{C_0}{\gamma_w Z_1} \left[\frac{\cos \alpha}{\cos (\pi/4 - \phi/2 + i - \theta) \sin (\pi/4 - \phi/2 + \alpha - \theta)} \right] \end{aligned}$$

また、この実験で行なっているように l_2 が有限で、 l_2 の上流端に静水圧が作用しているときは、

$$L = \left(\frac{A}{\Gamma} + \frac{M}{N} \right) Z_2 + \frac{\frac{A}{\Gamma} \left(\frac{A}{\Gamma} - B \right) - E}{\Gamma Z_2 + D} - \frac{1}{\Gamma} \left(\frac{A}{\Gamma} - B \right) \dots \dots \dots (19)$$

である。(19) 式は直線と双曲線の和の形となっており、一例として $\phi=30^\circ$, $\alpha=\phi$, $\theta=i$ として、 $\theta=10^\circ$ ($< \frac{\gamma_b}{\gamma_t} \tan \phi$), $\theta=25^\circ$ ($> \frac{\gamma_b}{\gamma_t} \tan \phi$) の例について、表面流の水深が 1 cm で粘着力のない場合と粘着力のある場合について計算した結果は Fig. 6 に示すとおりである。

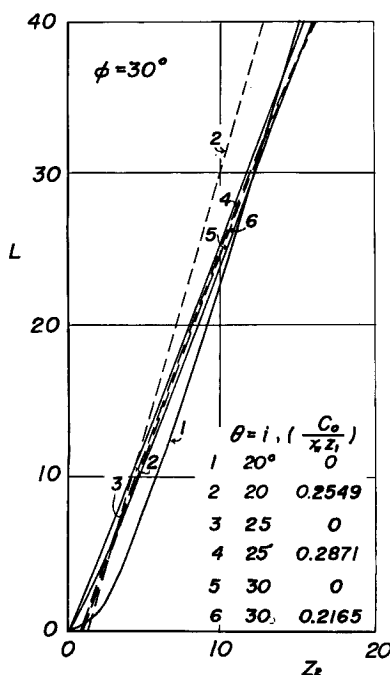


Fig. 6 Relation between L and Z_2 .

$\tan i < (\gamma_b/\gamma_t) \tan \phi$ の場合は、安定の領域で実際にはすべりはないと考えられるので、 $\tan i > (\gamma_b/\gamma_t) \tan \phi$ の場合について考察すると、 L と Z_2 の関係はほぼ直線を示す。この直線のこう配

$$\left(\frac{A}{\Gamma} + \frac{I}{K} + \frac{M}{N} \right) - \frac{\frac{A}{\Gamma} \left(\frac{A}{\Gamma} - B \right)}{(\Gamma Z_1 + D)^2}$$

は、 $\tan i > (\gamma_b/\gamma_t) \tan \phi$ の領域では、ほとんど第1項で支配されるようである。そうして、 i が大きくなるほどこのこう配はゆるくなり、逆に $\tan i = (\gamma_b/\gamma_t) \tan \phi$ でこの配は無限度となる。この実験で観察されたように上流から表面の砂堆の進行にともなってすべり面が動いていくという現象を説明するためには、すべり面の下端で受働状態になっているという条件が必要である。実験による観察はあきらかに、すべり面を示すので、おそらくその下流側では受働状態が成立しているとみることができるようである。この実験では上流側の表面流が掃流作用を行い、長さ L の測定ができないため、この計算に対する実験的な検討はなされていない。しかし L または Z_2 が与えられたとき、限界の Z または L がきまるから、すべり移動中の土塊に働らく力が予測でき、その結果、土塊のはやさ、移動後の砂面上へのもり上り量もある程度の推定は可能となった。

この解析ははじめにみれたように、流れの動的な作用を無視したため非常に移動のはげしい現象に対しては、必ずしも十分でない。またこの解析は、各領域とも表面まで滲透流があると考えての解析であって、急こう配では、表面に滲透流が達しなくても移動の生ずることが考えられる。これらの点について、さらに考察を進める予定である。

4. 結 語

以上、急斜面水路における土砂の挙動について実験を行ない、検討してきた。その結果つぎのことがわかった。すなわち、急斜面では全面的に表面流が出ないで、砂の移動が単一の砂堆の発達として行なわれること。そして、砂堆の発達にともなって、砂れき層の深いところにすべりが生じ、すべり面から上の部分が移動する。この現象は限界こう配以上のこう配にて発生し、それよりゆるいこう配では、ほとんどひずみは生ぜず、掃流形式で砂れきは運搬されるが、砂堆の形状はすべりを生じる場合とほぼ同じである。また、砂堆の移動機構について、若干の考察を加えた。

しかし、本研究の段階では、土石流の発生限界を明らかにする資料がまだ十分えられていない、定量的な検討はできなかった。今後、砂れきの移動機構の解明について、粒径、粘性等を考慮し、実際現象に結びつくよう、実験を進めていきたいと思っている。

最後に、この実験を行なうにあたって、有益な指針を与えて下さった土屋教授に感謝するとともに、実験の際に多大の労を煩らわした砂防研究室の皆様に謝意を表する。なお、本研究は、文部省科学研究費（特定研究）の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 岩崎敏夫：昭和42年8月羽越水害の総合的研究，昭和43年3月。
- 2) 柿 徳市：土石流の実験的研究，第一報，新砂防，Vol. 19，昭和30年11月。
- 3) K. Yano and A. Daido: Fundamental study on mud-flow, Bulletin of the D.P.R.I., Vol. 14, part 2, Feb. 1965.
- 4) 村野義郎，原田義博，泉 岩男：十勝岳の土石流に関する調査報告，建設省土木研究所報告，第127号，昭和41年3月。
- 5) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，第8章，昭和40年11月，pp. 216—217.