

山腹崩壊土の流動機構に関する研究

芦田 和男・江頭 進治・大槻 英樹

DYNAMIC BEHAVIOR OF A SOIL MASS PRODUCED BY SLOPE FAILURE

By Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA and Hideki OHTSUKI

Synopsis

The study concerns the slide motion and its transformation into debris flow for a soil mass produced by a slope failure. First, slide motions are investigated by flume experiments with parameters; inclination angle, supply discharge, soil characters and geometric shape. Simultaneously, mass and momentum equations are formulated for a soil mass sliding on a slope, and the theoretical solutions are obtained for the sliding velocity and location of a soil mass. Second, the mechanism is discussed for the transformation of a soil mass from slide motion into debris flow. A theoretical method is obtained to predict the critical slide distance which decide the location where the motion of soil mass is transformed into debris flow. Formulas are compared with flume experiments for a slide motion and its transformation into debris flow.

1. 緒 言

昭和57年7月の長崎災害にもみられるように、山腹崩壊および土石流は土砂災害の典型的な外力となる。これらの発生条件、規模および流動・停止条件を明らかにすることは、災害の防止軽減対策を考える上で極めて重要な課題である。この方面の研究についてみると、溪床堆積物が表面流によって不安定になり土石流を形成するような場合については、その発生条件、流動・停止機構がかなり明らかにされてきている。さらに、これらの成果を適用した危険渓流の設定法も開発されるようになってきた¹⁾。一方、山腹崩壊については、基礎実験の困難さもあって、現在、現地資料や降雨資料の解析を通してその実態の把握に努力が払われている段階にあり、防災上の最重要課題である崩壊が、いつ、どこで、どんな規模で発生し、斜面上において崩土がどんな挙動をするのかについては殆んど明らかにされていない状況である。

本研究は、山腹崩壊に関連する諸現象の解明およびそれを基礎とした防災・減災対策のための科学的な指針を得ることを目的とするものであり、まずその第一歩として、斜面上における崩壊土の挙動、すなわち、滑動・停止条件、運動機構ならびに土石流への遷移条件などについて理論および実験の両面より考察するものである。

2. 斜面上における崩壊土の挙動に関する実験

2.1 崩土の挙動に関する支配要因

山腹斜面の崩壊によって生産された土塊の運動を推察すれば、滑動を開始した土塊は、その過程において変形はするものの内部構造が完全に破壊されることなく停止するものと、滑動過程において内部構造が破壊され、土粒子が分散した状態で停止するものが考えられる。さらに、後者の場合には、十分の水が供給されると土石流を形成して流下する。これらのことを念頭に置くと、山腹斜面における土塊の挙動を支配するパラメータとして次のようなものが考えられる。

土塊の挙動の支配パラメータ	幾何学的条件——斜面傾斜角, 土塊の大きさ, 形状
	土質的条件——空隙率, 土粒子密度, 内部摩擦角, 粘着力, 土塊の飽和度
	水理的条件——表面層の流量, 流速
	境界の条件——斜面と土塊の摩擦係数, 障害物

幾何学的パラメータは, 主として外力を規定し, 土質条件は外力ばかりでなく, 土塊の変形を支配する。水理的なパラメータは, 流れのもつ運動量そのものが土塊の運動を支配するばかりでなく, 土塊の質量変化や土粒子の濃度を規定して流動化の機構を支配する。境界の条件は, 土塊の加速・減速・停止条件に対する直接的な影響因子となる。

2.2 実験装置・方法・条件

土石流に関する種々の知見によれば, 横断方向に平均化した垂直2次元的な扱いによって, さらには垂直方向にも平均化した一次元的な扱いによって現象を十分モデル化できることがわかっている。土塊の運動についても土石流同様の扱いができるものと思われる。ここでは, まず, 斜面上における土塊の運動を水路実験によって調べることにする。

実験水路は, Fig. 1 に示すようなもので, 幅 10 cm, 深さ 12.5 cm, 長さ 6 m である。水路底は鋼製, 片側側壁は塩化ビニール, 一方はガラスによって作られている。水路端より 2 m の位置にピンズが取り付けられており, 上・下流部の勾配が自由に変えられるようにされている。水路上流端は, チェーンブロックを用いて天井より釣り下げられており, その上下動によって勾配は設定される。給水装置は, Fig. 1 に示されるように, 貯水槽, ポンプおよび定水頭水槽になっており, バルブによって給水流量が調整される。下流端には, 水路を流下した土砂と水を貯留するための貯水槽も設置されている。

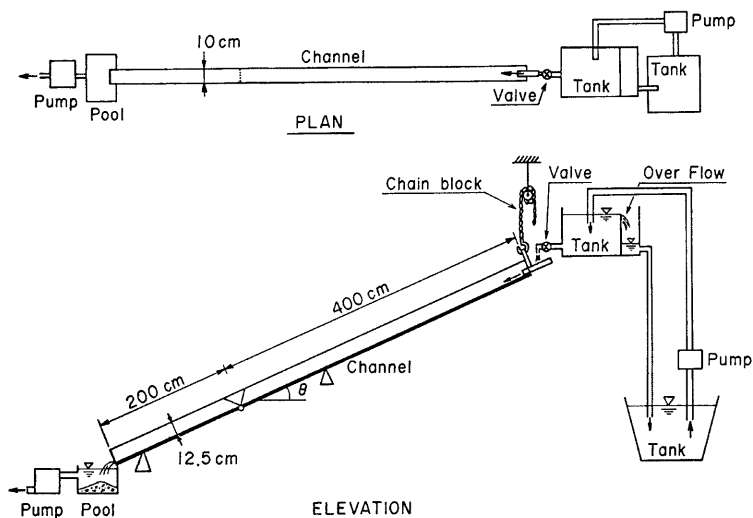


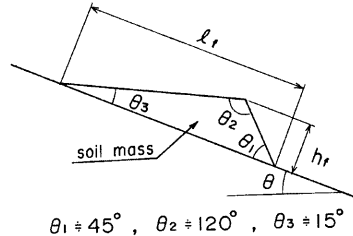
Fig. 1 Equipments for a flume experiment.

実験方法および測定項目はつぎのようである。まず, 砂と粘土の混合物を水路上流端付近に Fig. 2 に示すような形に整形する。ついで, 所定の流量を定常的に給水する。このとき滑動条件が満たされると土塊は運動を開始する。給水開始とともに水路側面よりビデオカメラによって土塊の挙動が撮影される。このとき,

土塊の位置と時間の関係（走時曲線），土塊の形状変化が得られるように留意されている。ケースによっては，予め土塊にトレーサを埋めておき，その変形状態を撮影し，土塊の変形が把握できるようにされている。また，土塊が変形して流動化する場合の濃度の条件を知るため，流動化する前後において採砂を行い，土砂濃度が調べられたケースもある。

実験条件の設定は，2.1で述べたパラメータを考慮して以下に行われた。幾何学的パラメータのうち，土塊の大きさと形状（Fig. 2）は全ての実験においてほぼ一定にし，傾斜角のみを変化させた。実験用土質材料は，

Fig. 3のような粒度分布を有する2種類の砂（A砂，B砂）を重量比14：9（A砂：B砂）に混合しておき，これに粘土（パルクレイ）および水を混合して作成した。この材料において，土質的条件を大幅に変化させるものは，土塊内部の粘着力を支配する粘土の含有率と混合物作成時の粘土の含水比である。本実験においては，主として粘土の含有率を変化させた。水理パラメータとして独立に変えやすい量は給水流量であって，ここではこれを種々与えた。境界の条件のうち，樹木等による障害物の影響は考慮しないこととして，水路床と土塊との摩擦の影響をみるため，水路床にはA砂およびB砂をそれぞれはりつけた。ただし，不飽和状態における境界の静摩擦係数は，土塊の材料条件および水路床の条件による顕著な変化を示さず，静摩擦係数は，ほぼ0.762程度であった。



$$\theta_1 \approx 45^\circ, \theta_2 \approx 120^\circ, \theta_3 \approx 15^\circ$$

Fig. 2 Initial shape of a soil mass set on the flume bed.

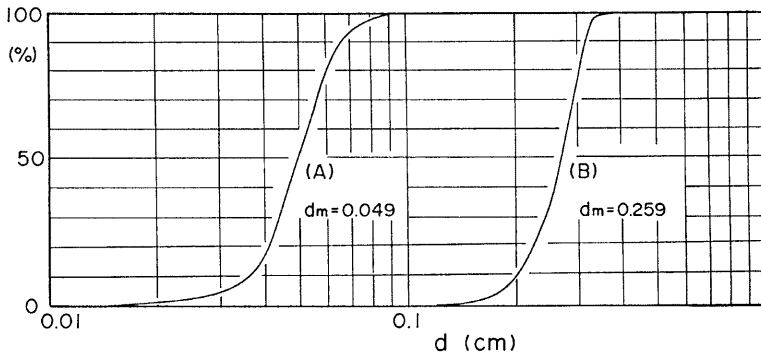


Fig. 3 Grain size accumulation curve of used sands.

実験条件をTable 1に示す。ここに， θ ：水路床の傾斜角， h_f, l_f ：土塊の厚さおよび長さ（Fig. 2参照）， p_f ：土塊材料中の粘土の含有率， w ：粘土の含水比， q ：単位幅供給流量， F_1 ：供給水のフルード数， T ：水温である。本表で，Run 1-1～Run 5-4は路床粗度にA砂を使用した実験で，Run 6-1～Run 10-4にはB砂が採用されている。Run 9-1～Run 10-4は，流動化地点の上下流区間において土砂濃度が調べられている。なお，実験は，水路ヒンデ部の上下流側で勾配を変えないで行われている。

2.3 実験結果の概要

観察によれば，土塊は次のような挙動をするようである。(A)初期の形状を保持したまま静止状態を続ける。(B)供給水によって表面の侵食が進んだ後，滑動を開始し，滑動過程において流動化して土石流を形成する。(C)表面の侵食は殆んど起こらず，滑動過程において土塊全体の変形が進み，土粒子構造が破壊さ

Table 1 Experimental conditions.

Run. No.	θ (deg.)	h_f (cm)	l_f (cm)	p_f	w	q (cm ² /s)	F_t	T (°C)
1-1	15	4.6~6.2	19~21	0	—	5.19~20.61	3.4~4.7	13.7
1-2	"	5.0~6.0	20~22	0.148	0.80~0.90	"	"	"
1-3	"	5.0~5.5	20~22	0.179	0.72~0.80	"	"	"
1-4	"	5.2~5.5	21~24	0.207	0.60~0.67	"	"	"
2-1	20	5.6~6.2	20	0	—	3.88~19.78	3.2~5.0	16.7
2-2	"	5.0~5.5	23~24	0.148	0.80~0.90	3.82~23.91	3.2~5.1	"
2-3	"	4.8~5.5	23~25	0.179	0.72~0.80	"	"	"
3-1	25	5.2~5.9	20~21	0	—	4.28~20.01	4.1~4.9	16.0
3-2	"	5.0~6.0	21~23	0.148	0.80~0.90	3.99~11.59	4.1~4.6	"
3-3	"	5.3~6.0	20~23	0.179	0.72~0.80	4.26~20.10	4.1~4.9	"
3-4	"	5.5~6.0	21~25	0.207	0.60~0.67	4.28~20.10	"	"
4-1	30	5.2~5.5	20~21	0	—	2.92~18.28	3.2~5.9	14.5
4-2	"	4.7~5.2	20~23	0.148	0.80~0.90	"	"	"
4-3	"	4.7~5.5	19~24	0.179	0.72~0.80	"	"	"
4-4	"	4.8~5.3	22~25	0.207	0.60~0.67	"	"	"
5-1	35	5.0~5.6	20~22	0	—	3.03~19.73	3.6~6.9	12.9
5-2	"	5.0~5.4	21~24	0.148	0.80~0.90	"	"	"
5-3	"	5.2~5.8	"	0.179	0.72~0.80	"	"	"
5-4	"	5.0~5.7	20~26	0.207	0.60~0.67	"	"	"
6-1	15	5.8~5.9	21~24	0	—	4.42~21.04	0.6~1.9	11.7
6-2	"	5.3~6.0	"	0.080	0.80	"	"	"
6-3	"	5.8~6.0	21~22	0.148	"	"	"	"
6-4	"	"	22~24	0.207	0.67	"	"	"
7-1	25	5.5~6.0	21~23	0	—	4.21~20.99	0.7~2.1	11.4
7-2	"	5.5~5.6	21~24	0.080	0.80	"	"	"
7-3	"	4.8~5.8	20~23	0.148	"	"	"	"
7-4	"	5.2~5.8	21~23	0.207	0.67~0.80	"	"	"
8-1	35	5.9~6.0	21	0	—	3.69~20.75	0.8~2.1	10.5
8-2	"	5.0~6.0	20~22	0.080	0.80	"	"	"
8-3	"	5.0~6.0	19~20	0.148	"	"	"	"
8-4	"	5.6~6.0	19~23	0.207	0.67~0.80	"	"	"
9-1	25			0	—	9.94	1.6	9.2
9-2	"			0	—	18.10	2.0	"
9-3	"			0.207	0.67	9.94	1.6	"
9-4	"			"	"	18.10	2.0	"
10-1	35			0	—	7.63	1.4	"
10-2	"			0	—	18.32	2.0	"
10-3	"			0.207	0.67	7.63	1.4	"
10-4	"			"	"	18.32	2.0	"

れて流動化する。(D) 土塊のある面に明瞭な破壊が発生して土塊が二つの部分に分離し、それぞれが滑動しながら流動化する。

供給水すなわち表面流の作用下において、土塊がどの運動形態をとるかは、土塊全体としての滑動条件を支配するところの重力、流体力および土塊と路床との摩擦力、土塊内部のせん断抵抗力、表面流による砂粒子の剝離抵抗力の大小関係に依存するものと思われる。路床傾斜角 θ の小さい 15° と 20° の実験のうち粘土含有率 p_f の小さいものは形態 (B) をとるものが多く、 p_f の大きいものは形態 (A) をとることが多かった。 θ が 20° 以上の実験では、 p_f の小さいものは、形態 (B) あるいは (D) に属する例がみられた。しかし、運動形態 (B) は、滑動開始時点の土塊の形状を初期状態と見なせば、本質的には形態 (C) として扱うこと

が可能である。また、運動形態(D)についても、土塊が分離した時点を初期状態とみなせば運動形態(C)に属すると考えても差しつかえない。したがって、基本的には土塊が滑動するのか、しないのかを明らかにし、さらに、滑動する場合の挙動を検討しておけば、土塊の挙動をかなり一般的に議論できるものと思われる。以下、土塊が滑動する場合の挙動についての一例を示す。

Fig. 4(a)~(c) は、土塊の滑動距離 x_f と時間 t の関係ならびに土塊の厚さ(高さ) h_f の時間変化を示したもので、それぞれ Run 3-4 ($\theta=25^\circ$)、4-4 ($\theta=30^\circ$)、5-4 ($\theta=35^\circ$) の結果である。これらの結

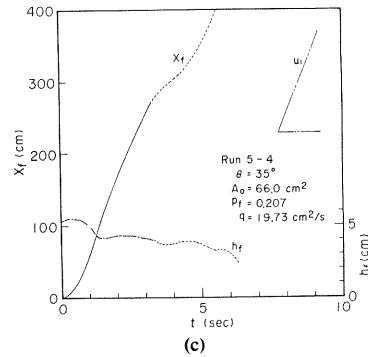
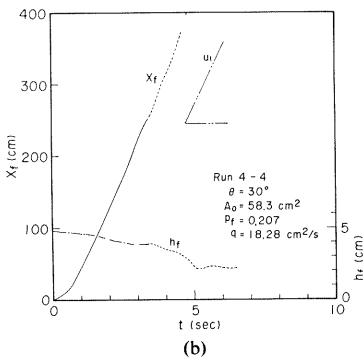
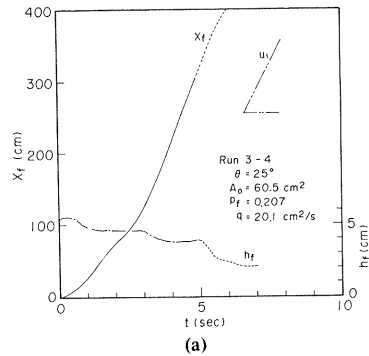


Fig. 4(a), (b), (c) Examples obtained by experiments for the location and maximum thickness of a soil mass in the process of motion on the flume bed.

果は、路床の傾斜角によって土塊の挙動がどのように変化するかをみるために例示されている。なお、これらの図において破線部は、土塊が流動化して土石流を形成している領域である。

まず、滑動領域における $x_f \sim t$ についてみると、土塊は徐々に加速して、定常と見なせる運動に遷移していく様子がわかる。(a), (b), (c) 図の結果を比較すると、やはり θ の大きな実験において滑動速度 (dx_f/dt) は大きくなっている。つぎに、土塊の最大厚 h_f についてみると、滑動領域においては、その変化が緩やかであって、土塊内部の変形・破壊が徐々に進行していく様子が伺える。なお、路床粗度の異なる Run 1-1~5-4 と Run 6-1~8-4 において、滑動速度や最大厚に関する顕著な違いは認められなかった。

Fig. 5(a), (b) は、滑動領域と土石流領域の土砂濃度、さらに流動化するための最高濃度を把握するため、土砂の体積濃度の変化を調べたものである。(a) は、粘土を含まない $p_f=0$ の実験で、(b) は $p_f=0.207$ の実験であって、給水流量と傾斜角による違いをみたものである。図中の矢印は流動化した地点を示している。 $p_f=0$ の実験では滑動開始直後に流動化するため、流動化以前の土砂濃度は計測されてない。まず、 $p_f=0$ の実験をみると、流動化した後の土石流濃度は、傾斜角 θ が大きいほど高くなっており、 $\theta=35^\circ$ の場合には、体積濃度が0.6~0.7程度にもなっていることがわかる。また、土砂濃度は供給流量の小さい実験においてわずかに大きくなっている。 $p_f=0.207$ の実験結果についても、傾斜角 θ および供給流量の違いによる土砂濃度の傾向は、 $p_f=0$ の場合とほぼ同様であることがわかる。滑動領域と土石流領域における土砂

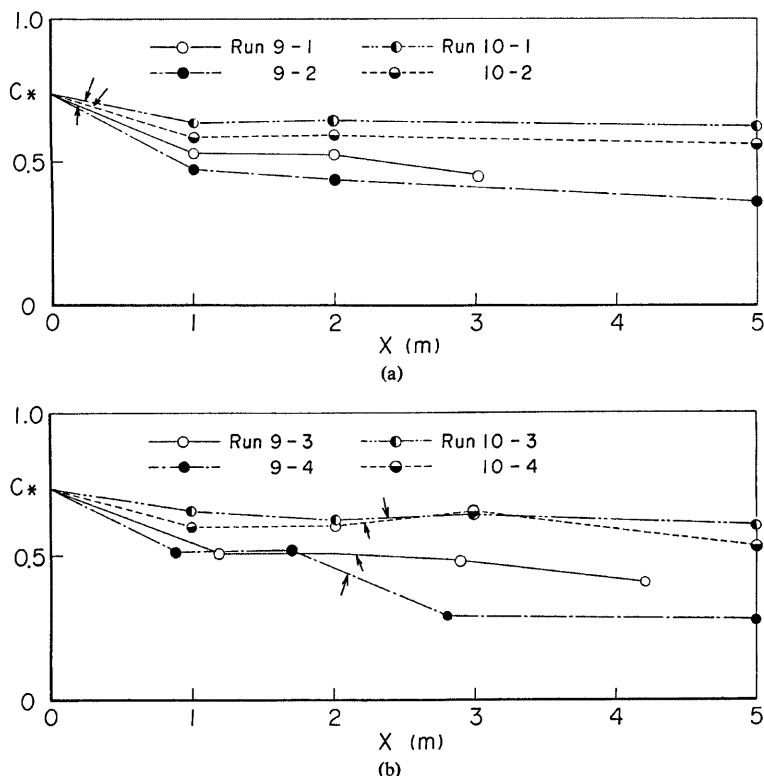


Fig. 5(a), (b) Changes of volume concentration of sand and clay particles in the direction of motion.

濃度についてみると、これには顕著な違いは見られず、土石流領域の土砂濃度は、滑動過程において取り込まれた水量によって規定されていることが推察される。

Fig. 5 の結果ならびに土石流の平衡濃度²⁾に関する知見を総合すると、土砂濃度が0.6~0.7であっても流動化は可能であって、こうした高濃度の流れが維持されるかどうかは、傾斜角などに依存するものと思われる。

3. 崩壊土の運動機構

3.1 基礎方程式

斜面上を滑動する土塊に関する質量および運動量保存則を導く。まず、滑動開始から流動化するまでの土塊の運動は、一次元的な扱いでも十分に評価されるものとする。Fig. 6 は斜面上における土塊の挙動の模式図である。いま、簡単のため、非侵食性斜面上の運動を考えることにし、滑動中においては土粒子の堆積はないものとする。実験の観察によれば、土塊が滑動を開始すると、土塊先端からの水の流出は、殆んど無視できるから、土塊の質量は、その後方における表面流と土塊の運動の相対量のみによって規定される。

したがって、土塊の質量保存則は次式のように表示できる。

$$u_f \leq u_1; \\ d(\rho_f A_f)/dt = \rho(u_1 - u_f)h_1 \dots\dots\dots(1A)$$

$$u_f > u_1; \\ d(\rho_f A_f)/dt = 0 \dots\dots\dots(1B)$$

ここに、 u_f ：土塊の滑動速度、 u_1 ：土塊後方の表面流の流速、 ρ ：表面流の密度、 A_f ：土塊背面における表面水も含めた土塊の断面積、 ρ_f ：断面 A_f の平均密度である。

表面流が存在しない場合の土塊の断面積を A_{f0} 、そのときの空隙率を λ_0 とし、表面流による断面の増分を ΔA_f とすれば、土粒子の空隙が水で飽和しているとき、 ρ_f は次のように定義される。

$$\rho_f = \rho_s(1 - \lambda_0) + \rho\lambda_0 - (\rho_s - \rho)(1 - \lambda_0) \frac{\Delta A_f}{A_f} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 ρ_s ：土粒子の密度である。なお、式 (1B) は、表面流の流速よりも土塊の滑動速度が大きくなっても水の流出は無視できること、すなわち、一旦取り込まれた水は流出しないことを意味している。

つぎに、運動量保存について考える。土塊に働く外力の斜面方向の成分は、重力と流体力の斜面成分ならびに斜面と土塊の界面における摩擦力である。なだれの運動⁹⁾においても検討されているように、摩擦力として速度に依存しない力と速度に依存する力が考えられる。ここでは速度に依存する力にはその 2 乗に比例するものを想定する。これらのこと、および質量保存と同様に一旦取り込まれた水は流出しないことを考慮すると、土塊の運動量保存則は、次式のように表示される。

$$u_f \leq u_1; \\ \frac{d}{dt}(\rho_f A_f u_f) = \rho_f A_f g \sin \theta - \mu(1 - \lambda)(\rho_s - \rho)A_f g \cos \theta \\ - \rho_f l_f u_f^2 + \rho(u_1 - u_f)^2 h_1 + \frac{1}{2} \rho g h_1^2 \dots\dots\dots(3A)$$

$$u_f > u_1; \\ \frac{d}{dt}(\rho_f A_f u_f) = \rho_f A_f g \sin \theta - \mu(1 - \lambda)(\rho_s - \rho)A_f g \cos \theta - \rho_f l_f u_f^2 \dots\dots\dots(3B)$$

ここに、 λ ：土塊全体の空隙率で、 ρ_f との間には $\rho_f = \rho_s(1 - \lambda) + \rho\lambda$ なる関係がある。 μ ：摩擦係数、 f_b ：抵抗係数、 l_f ：土塊の長さである。

3.2 滑動開始・停止条件

土塊の加速、定常および減速運動に関する条件、ならびに滑動開始と停止の条件は式 (3A) を用いて議論できる。すなわち、密度流の解析においてよく用いられるブシネスクの近似に対応して、ここでも質量変化に伴って発生する力と加速度に対応する力との間に、

$$u_f d(\rho_f A_f)/dt \ll \rho_f A_f du_f/dt \dots\dots\dots(4)$$

なる条件を設定する。この条件と式 (3A) の正負の条件より加速・定常・減速運動に関する傾斜角の条件が次のように求まる。

$$\tan \theta \geq \frac{\rho_s - \rho}{\rho_f} \mu(1 - \lambda) + \frac{\rho}{\rho_f A_f g \cos \theta} \left\{ f_b l_f u_f^2 - (u_1 - u_f)^2 h_1 - \frac{1}{2} g h_1^2 \right\} \dots\dots\dots(5)$$

さらに、土塊が減速して停止する条件および初速 0 のときの滑動開始の条件は、式 (5) において $u_f = 0$ とすれば次のように求められる。

$$\tan \theta_c \leq \frac{\rho_s - \rho}{\rho_f} \mu(1 - \lambda) - \frac{\rho}{\rho_f A_f g \cos \theta_c} \left\{ u_1^2 h + \frac{1}{2} g h_1^2 \right\} \dots\dots\dots(6A)$$

あるいは、

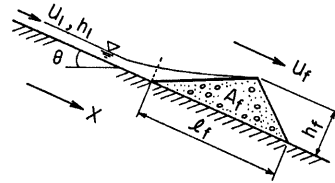


Fig. 6 Schematics and symbols of a soil mass sliding on a slope.

$$\tan \theta_c \leq \frac{\rho_s - \rho}{\rho_f} \mu (1 - \lambda) - \frac{1}{k_a} \frac{\rho}{\rho_f \cos \theta_c} \left\{ F_1^2 + \frac{1}{2} \right\} \quad \text{.....(6B)}$$

ここに, $k_a = A_f / h_1^2$, $F_1 = u_1 / \sqrt{g h_1}$ である。

Fig. 7 は, 表面流の作用によって滑動停止あるいは滑動開始の条件がどのように変わるかを示したもので, 図中の曲線は, 式 (6B) において, $\lambda = 0.25$, $\rho_s = 2.65$, $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 0.762$ として算定されたものである。曲線の内側が停止領域であって, 土塊の滑動に対して, 土塊の容積が小さくなると表面流の影響が顕著になるのがわかる。なお, 上述の計算に使用した摩擦係数は, 不飽和状態において多くの実験を行い, これより求めたものである。

3.3 滑動速度および滑動距離

式 (2A, B) は, 条件式 (4) のもとで次式のように整理される。

$$d^2 x_f / dt^2 = du_f / dt = a_1 u_f^2 + a_2 u_f + a_3 \quad \text{.....(7)}$$

上式は一般的に解けるが, $D \equiv a_2^2 - 4a_1a_3$ の正負に対応してその解の性質は異なる。 $D \geq 0$ の解が物理的にはより一般的であり, 滑動速度 $u_f(t)$ および滑動距離 $x_f(t)$ に関する解を示せばつきのようである。

$$u_f \leq u_1;$$

$$u_f(t) = A_1 \frac{e^{-\sqrt{D}t} - 1}{e^{-\sqrt{D}t} - A_1/A_2} \quad \text{.....(8)}$$

$$x_f(t) = \frac{A_2 - A_1}{\sqrt{D}} \ln \left\{ \frac{e^{-\sqrt{D}t} - A_1/A_2}{1 - A_1/A_2} \right\} + A_2 t \quad \text{.....(9)}$$

$$u_f > u_1;$$

$$u_f(t) = B_1 \frac{1 + \{(u_1 - B_1)/(u_1 + B_1)\} e^{-2B_1 B_2(t-t_1)}}{1 - \{(u_1 - B_1)/(u_1 + B_1)\} e^{-2B_1 B_2(t-t_1)}} \quad \text{.....(10)}$$

$$x_f(t) = \frac{1}{2B_2} \left[\ln \frac{1 - \{(u_1 - B_1)/(u_1 + B_1)\} e^{-2B_1 B_2 t}}{1 - \{(u_1 - B_1)/(u_1 + B_1)\} e^{-2B_1 B_2 t_1}} \right] + x_f(t_1) \quad \text{.....(11)}$$

ここに, $t_1: u_f = u_1$ となる時間 t で, 他は以下のものである。

$$A_1 = \frac{u_1}{1 - k_1 f_b} \left[1 + \frac{1}{F_1} \left\{ \frac{k_a}{k_{of}} (k_1 f_b - 1) \left(G + \frac{1}{2} \frac{k_{of}}{k_a} \right) + k_1 f_b F_1^2 \right\}^{1/2} \right]$$

$$A_2 = \frac{u_1}{1 - k_1 f_b} \left[1 - \frac{1}{F_1} \left\{ \frac{k_a}{k_{of}} (k_1 f_b - 1) \left(G + \frac{1}{2} \frac{k_{of}}{k_a} \right) + k_1 f_b F_1^2 \right\}^{1/2} \right]$$

$$D = 4 \left(\frac{k_{of}}{k_a} \right)^2 \frac{g}{h_1} \left\{ \frac{k_a}{k_{of}} (k_1 f_b - 1) \left(G + \frac{1}{2} \frac{k_{of}}{k_a} \right) + k_1 f_b F_1^2 \right\}$$

$$B_1 = \sqrt{\frac{k_a h_1 G}{k_{of} k_1 f_b}}, \quad B_2 = \frac{k_{of} k_1 f_b}{k_a h_1}$$

$$G = \cos \theta \{ \tan \theta - (1 - \lambda)(k_{sf} - k_{of}) \mu \}, \quad F_1 = u_1 / \sqrt{g h_1}$$

$$k_a = A_f / h_1^2, \quad k_1 = l_f / h_1, \quad k_{of} = \rho / \rho_f, \quad k_{sf} = \rho_s / \rho_f$$

上式の滑動速度と滑動距離の時間変化, すなわち土塊の運動に対する傾斜角, 摩擦係数, 抵抗係数, 表面流および土塊の幾何学的スケールの影響は, 係数 A_1 , A_2 , B_1 , B_2 の中で直接的にあるいは間接的に評価されている。これらのうち, 抵抗係数 f_b および傾斜角の関数である G が土塊の挙動に対してどんな影響を与えるかを調べるため, 式 (9) および (11) による計算結果を示したのが Fig. 8 である。 $x_f(t)$ の計算において, $\rho = 1.0$, $\rho_s = 2.65$, $\rho_f = 2.24 \text{ g/cm}^3$ ($dA_f = 0$), $\lambda = 0.25$, $k_a = 1320$, $k_1 = 108$, $F_1 = 5.9$ としている。同図には比較のため Run 4-4 の結果も示されている。図の結果より, G が大きい場合, すなわち θ が大きい場合には, 加速度が大きく早い段階に定常運動に近づき, 同一の θ のときには, 抵抗係数 f_b が大きいほど早く定

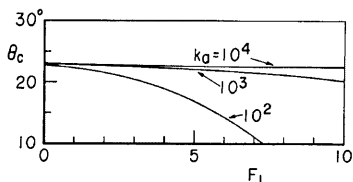


Fig. 7 The critical condition for the behavior of a soil mass on a slope. The slide motion occurs outside the critical lines and on the other hand ceases inside them.

常運動に移り、そのときの滑動速度は小さくなることがわかる。このことは、前章における実験事実とほぼ一致するものであって、式(3A, B)で示される運動量式、さらには式(8)～(11)の一般性を示唆するものである。

しかしながら、これらの式を適用するには、式に含まれるパラメータの決定が必要である。まず形状のパラメータである k_a, k_i については、前章で示したように滑動領域における形状変化は大きくないことから考えて、近似的に $\Delta A_f \ll A_f$ とすれば土塊の初期形状よりこれらを容易に決定できる。密度パラメータ k_{sf}, k_{if} についても $\Delta A_f / A_f \ll 1$ として式(2)を用いて容易に推定できる。フルード数 F_1 は表面流の抵抗則から推定できる。摩擦係数 μ については実験的に調べた静摩擦係数 μ_s を用い、 $\mu = \mu_s$ と考えても矛盾はないようである。これについては別の機会に議論するつもりである。なお、実験では $\mu_s \approx 0.762$ 程度の値が得られている。以上のように考えれば、抵抗係数 f_b が未知量として残されることになる。Fig. 9 は、土塊がほぼ定常運動の状態にあると見なされる領域の抵抗係数を式(10)を適用して求めた結果である。図には、得られたデータの範囲と平均値が示されている。 f_b の物理性については今後の検討課題であるが、 f_b は傾斜角の増加につれて大きくなるようである。

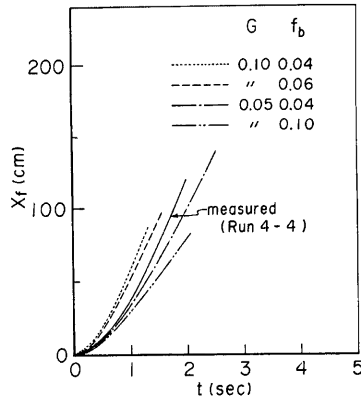


Fig. 8 The location of a soil mass obtained from eqs. (9) and (10). The motion of a soil mass is investigated in terms of inclination angles and friction coefficients.

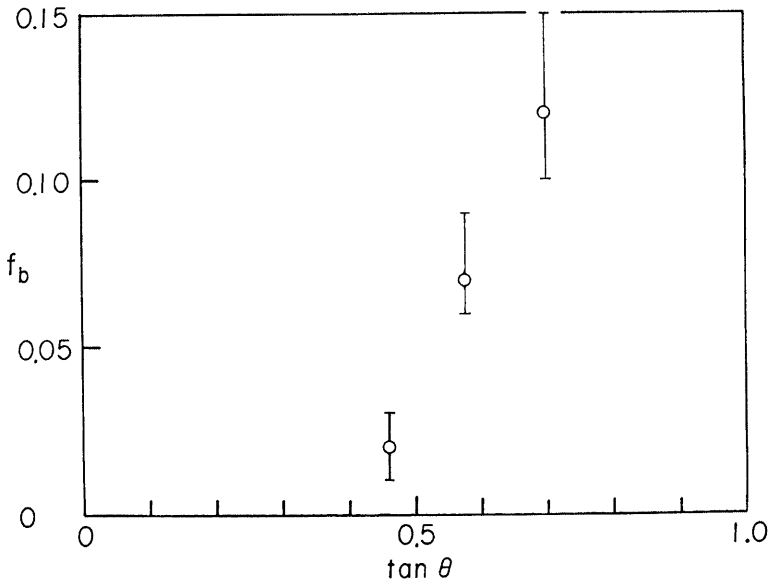


Fig. 9 Friction coefficients in a process of steady sliding motion.

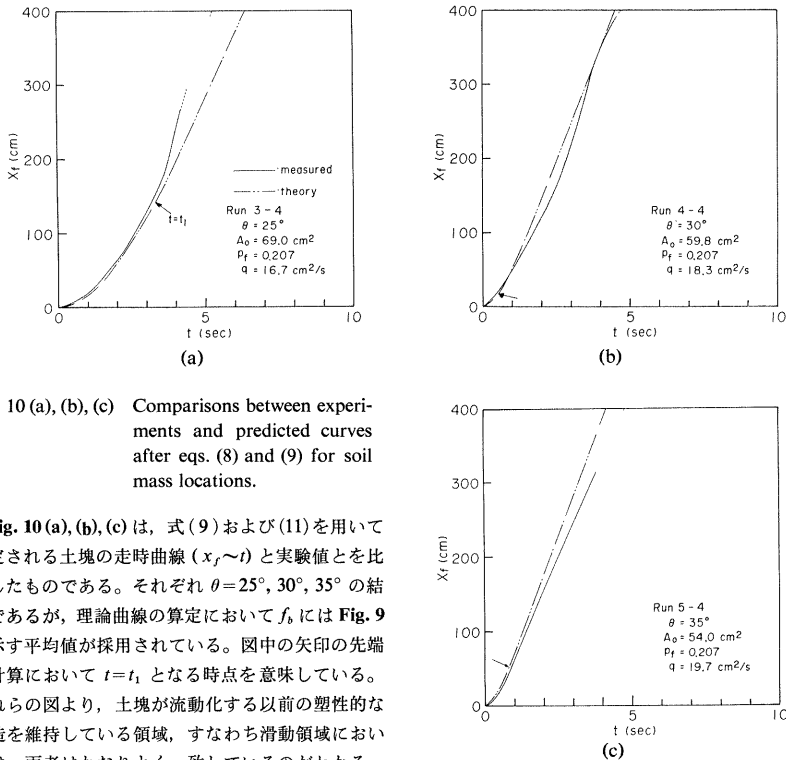


Fig. 10 (a), (b), (c) Comparisons between experiments and predicted curves after eqs. (8) and (9) for soil mass locations.

Fig. 10 (a), (b), (c) は、式 (9) および (11) を用いて算定される土塊の走時曲線 ($x_f \sim t$) と実験値とを比較したものである。それぞれ $\theta = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ の結果であるが、理論曲線の算定において f_b には Fig. 9 に示す平均値が採用されている。図中の矢印の先端は計算において $t = t_1$ となる時点を示している。これらの図より、土塊が流動化する以前の塑性的な構造を維持している領域、すなわち滑動領域においては、両者はかなりよく一致しているのがわかる。

4. 土塊の流動化機構

2章で述べたように、斜面上を滑動する土塊はある条件が満たされたときに流動化して土石流を形成する。ここで流動化とは、土塊の内部構造が破壊されて個々の土粒子(砂粒子)が水中に分散する状態を意味する。したがって、滑動する土塊が流動化して土石流を形成するためには、つぎの二つの条件が満たされたときであると推察される。

- ① 土粒子の分散に必要な水が供給される (供給水量の条件)。
- ② 土塊の内部構造が破壊される (内部構造の破壊条件)。

以下、現象は二次元的で、土粒子の侵食・堆積はなく、しかも一旦取り込まれた水は流出しないものとして議論する。

まず、供給水量の条件について考察する。土粒子が水中に分散するための土粒子最大容積濃度を C_{max} とすると、土塊を構成する土粒子の実質部分は $(1 - \lambda_0)A_{f0}$ であることより、この条件は次のように表示できる。

$$\Delta A_f(t) \geq \frac{A_{f0}(1 - \lambda_0 - c_{max})}{C_{max}} \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 $\Delta A_f(t) + A_{f0} = A_f(t)$ であって、 $\Delta A_f(t)$ は、 t 時間後における表面流による供給水の総量である。これについては次のように議論できる。すなわち、式 (1A) より次の連続式

$$\frac{dA_f}{dt} = \frac{d\Delta A_f(t)}{dt} = (u_l - u_f)h_1, \quad (u_l \geq u_f) \quad (13)$$

を得る。表面流の流速 u_l と水深 h_1 は一定としても一般性を失うことがないから、式(13)より $\Delta A_f(t)$ が次のように求まる。

$$\Delta A_f(t) = \Delta A_{f0} + \{u_l t - x_f(t)\}h_1 \quad (14)$$

ここに、 ΔA_{f0} : $t=0$ において土塊背面上に存在する水の量である。式(14)によれば、 $\Delta A_f(t)$ は、 $t=t_1$ すなわち $u_f = u_l$ となる時点において最大となる。したがって、供給水量の条件は、 $t=t_1$ のときの条件で判定すれば十分である。すると、式(12)は次のように変形される。

$$u_l t_1 \geq x_f(t_1) + \frac{1}{h_1} \left\{ \frac{A_{f0}(1 - \lambda_0 - c_{max})}{c_{max}} - \Delta A_{f0} \right\} \quad (15)$$

この条件が流動化のための供給水量の条件である。3章の結果を適用すれば、上式は、かなり一般的に表すことができるが、 c_{max} についてもう少し検討を要するので、議論はこの段階にとどめておく。

つぎに、内部構造の破壊条件について考察する。土塊の内部構造の完全な破壊は、土塊内部のせん断変形(せん断による塑性変形)によるものとする。せん断変形のエネルギーは、一般には土塊と斜面の境界摩擦を通して供給される。ここでは、摩擦による供給エネルギー E_a が、土塊全体の変形エネルギーの限界値 E_d を上まわったとき、すなわち、

$$E_a \leq E_d \quad (16)$$

となったとき、土塊の内部構造は完全に破壊されるものとする。

これを議論するため、限界値 E_d のときのせん断ひずみを α とし、さらにせん断応力を τ とすれば、 E_d は次式のように書ける。

$$E_d = \int_{A_f} \alpha \tau dA \quad (17)$$

せん断応力 τ はクーロン力で評価できるものとすれば、これは Fig. 11 を参考にして次のように書ける。

$$\tau = \sigma_1 \cos(\pi/4 + \phi_s/2) \tan \phi_s + c \quad (18)$$

ここに、 σ_1 : 主応力、 ϕ_s : 内部摩擦角、 c : 粘着力である。上式で $\pi/4 + \phi_s/2$ は、Fig. 11 に示す破壊面の傾斜角である。主応力 σ_1 は、平均的には次式で表示できるものとする。

$$\sigma_1 = (1 - \lambda)(\rho_s - \rho)g(z_s - z) \cos \theta \quad (19)$$

ここに、 z_s : 土塊表面の座標である。式(18)に(19)を代入し、その結果を式(17)に適用すれば、変形エネルギーの限界値 E_d が次のように求まる。

$$E_d = \alpha \left\{ \frac{1}{3} (1 - \lambda)(\rho_s - \rho)gh_f A_f \cos \theta \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_s}{2} \right) \tan \phi_s + c A_f \right\} \quad (20)$$

一方、摩擦による供給エネルギーについては、土塊へのエネルギー供給率を k_a とすれば、土塊が x_{f1} だけ滑動したときの E_a は次のように書ける。

$$E_a = k_a \mu \{ (1 - \lambda)(\rho_s - \rho)g A_f \cos \theta \} x_{f1} \quad (21)$$

ここで、式(20)、(21)を(16)に適用すれば、内部構造の破壊条件が次のように求められる。

$$\frac{x_{f1}}{h_f} \geq \frac{\alpha}{k_a} \left\{ \frac{\cos(\pi/4 + \phi_s/2) \tan \phi_s}{3\mu} + \frac{1}{\mu(1 - \lambda)(1 - \rho/\rho_s)} \cdot \frac{f_{c*}}{\cos \theta} \right\} \quad (22)$$

ここに、 f_{c*} は土塊内部の無次元粘着力であって、 $f_{c*} = c/\rho_s gh_f$ である。なお上式は、内部構造が破壊されるために必要な滑動距離の条件であると言い換えてもよい。

式(22)には未知係数 α/k_a が含まれている。これを理論的に求めるのは困難であるため、 $f_{c*} = 0$ すなわ

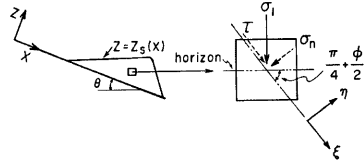


Fig. 11 A model for deformation and failure of a soil mass.

ち、粘土を含まない材料を用いた実験によって検討したところ、

$$\alpha/k_\mu = 23 \sim 37$$

程度の値を得ている。

以上のように土塊の流動化の条件が議論されたので、これと実験結果とを比較する。なお、実験値として $p_f=0.148$, $w=0.8$ および $p_f=0.207$, $w=0.67$ の実験 (Table 1) より得られたデータを採用する。ただし、これらのデータは供給水量の条件である式 (12) あるいは (15) を満たしているので、ここでは、式 (22) と実験値との関係をみれば十分である。Fig. 12 はこれらを示したものである。図中の曲線は、式 (22) において、 $\alpha/k_\mu=37$, $\mu=\tan \phi_s=0.762$, $\lambda=0.25$, $\rho=1$, $\rho_s=2.65 \text{ g/cm}^3$ として求めたものである。実験値をプロットするには、土塊の粘着力を知る必要があり、ここでは、図中に示す中黒のデータを曲線上にプロットし、そのときの f_{c*} を読みとって粘着力を推定した。これによると、 $p_f=0.148$, $w=0.8$ の土塊については $c=3.0 \text{ gf/cm}^2$ 、一方、 $p_f=0.207$, $w=0.67$ の土塊については $c=5.4 \text{ gf/cm}^2$ を得た。図示のデータの粘着力にはこれらの値が採用されている。さて、Fig. 12 をみると、データには少しばらつきがあるが、式 (22) によって土塊の流動化の条件がかなりの確に表現されているのがわかる。なお、この条件式は、長崎災害のデータにも適用され、良好な結果が得られている⁴⁾。

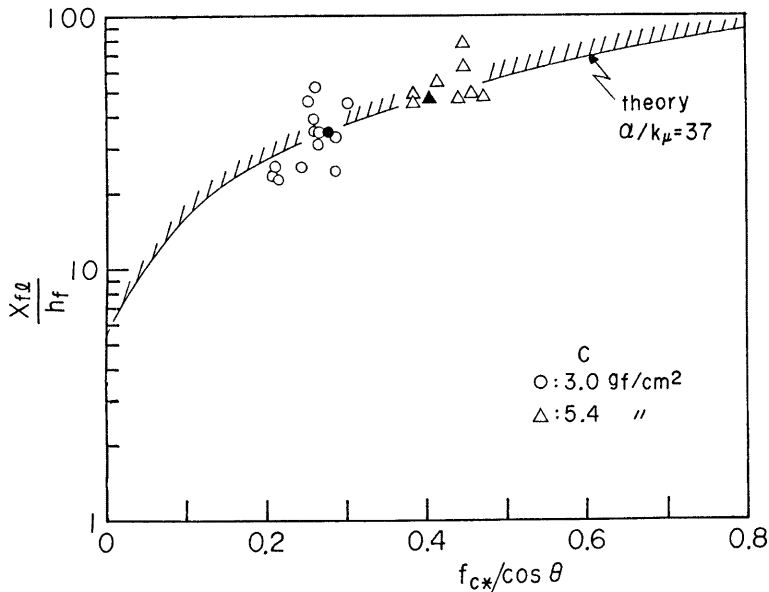


Fig. 12 Comparison between experiments and theory for the critical slide distance at which a slide motion is transformed into debris flow.

5. 結 語

本研究においては、防災科学上の重要課題である山腹崩壊土の挙動、すなわち斜面上における崩壊土の運動と流動化の機構について検討した。以下、得られた主要な結果、その意義および問題点を要約する。

- (1) 表面流の作用下における崩壊土の挙動を実験的に調べ、その運動形態を明らかにした。これによれば、

運動は4つの形態に分類されているが、本質的には、次の二つ、すなわち、土塊が静止状態を保つか、滑動するのかの分類で十分であることを述べた。

(2) 斜面上を運動する土塊の質量保存則と運動量保存則を導き、これに基づいて土塊の滑動開始および滑動停止の条件を明らかにした。これは、滑動開始・停止に関する斜面の傾斜角 θ の条件が、土塊の大きさ、表面流および界面の摩擦係数によって評価されるというものである。

(3) 上述の保存則に基づいて土塊の滑動速度および滑動距離の時間変化に関する理論式を導いた。この式は、実験的にその妥当性が検討された。結論(2)および(3)の結果を組み合わせると、種々の勾配から構成される実際の斜面において、崩壊土が流動化しない場合の流出範囲の予測が理論的には可能となる。

(4) 崩壊土が斜面上を滑動しながら流動化し、土石流を形成するためには、土塊に対する供給水量の条件および土塊の内部構造の破壊条件の二つが満たされる必要のあることを述べ、それぞれの条件を示した。供給水量の条件が満たされている場合には、流動化は後者の条件、すなわち内部構造の破壊条件によって規定される。この条件は、内部構造が破壊されるための滑動距離 x_{fl} を与えるものであって、実験データとの比較によって、その妥当性が示された。土塊が流動化する場合としない場合とでは、その流出範囲に大きな違いのあることが予想され、この結果は防災上の有用な情報を提供するものと思われる。

以上、本研究の結果を要約したが、その殆んどが理想的な場を対象にした理論的考察の成果であって、その中には今後十分に検討する必要があるパラメータも残されている。また、本稿は、非侵食性の斜面上における崩壊土の挙動を対象にしているため、本研究の成果を実際に適用する場合には、滑動する土塊と斜面との間の水および土砂の授受の影響について十分の検討が必要である。

本研究は一部文部省科学研究費自然災害特別研究(1)（代表者 網干寿夫 広島大学教授）の補助を受けている。また、実験や図面作成等において京大防災研究所技官 吉田義則氏に御協力いただいた。以上ここに記して深謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男・高橋 保・澤井健二：土石流危険度の評価法に関する研究，京大防災研究所年報，21号 B-2，1978，pp. 423-439.
- 2) Takahashi, T.: Debris Flow on Prismatic Open Channel, Proc. ASCE, Vol. 106, No. HY 3, 1980, pp. 381-396.
- 3) 清水 弘：なだれ，気象研究ノート，136号，1979，pp. 63-123.
- 4) 江頭進治：昭和57年7月豪雨による土砂災害について，京都大学防災研究所年報，27号 A，1983，pp. 1-17.