

斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究

芦田 和男・江頭 進治・神矢 弘

THE MOTION OF A SOIL BLOCK RELEASED BY SLOPE FAILURES

By Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA and Hiroshi KAMIYA

Synopsis

This paper concerns the motion of a soil block released by a slope failure. The momentum equation of a soil block sliding on slopes of various gradients is discussed first. Both the dynamic solid friction and the fluid friction play an important role in the equation. The two parameters, therefore, are investigated; The dynamic friction coefficient μ_k depends solely on static friction μ_s , and their ratio μ_k/μ_s takes a constant value. The theoretical discussion and experimental results on the fluid friction coefficient show the possibility that it can be defined inherently from the surface properties of the slope and materials of a soil block.

The solution of the momentum equation are given to the sliding velocity and running distance of a soil block, and compared well with experiment and field data. The results of this study will be very useful for the delineation of hazardous area due to slope failures.

1. 緒 言

我国における最近十数年間の自然災害による死者数は年間約250人程度になっており、死因別では崩壊・土石流によるものが全体の60%以上になっている。とりわけ、昭和57年7月豪雨や58年7月豪雨においては、その大部分が崩壊や土石流の犠牲者であったことは周知のことであり、このような傾向は定着しつつある。

こうした土砂災害に対し、その防止・軽減策が各方面において強く望まれているところであって、実際種々の対策が企画され実施されるようになってきた。しかしながら、対策をよりの確に実施するためには、災害外力の発生条件、規模および直接的な影響範囲に関する予測法の確立が必須の条件となる。このような点から土砂災害外力の研究についてみれば、土石流については、基礎研究によってその発生条件と流動・堆積範囲の予測がかなりの確にできるようになっており、一部防災対策にこれらの成果が適用される段階になっている。一方、崩壊については、特定斜面の土質力学的安定・不安定現象に関する理解はかなり深められているものの、防災対策に必要な崩壊可能斜面、崩壊の規模と発生ならびに崩壊によって生産された土塊の到達範囲を予測するための方法は殆ど確立されてないと言っても過言ではない。

こうした状況にあって、崩壊可能斜面の抽出法、崩壊の規模と発生の予知法および土塊の到達範囲の推定法の確立が強く望まれているところである。著者らは、このような問題を明らかにするため、山腹崩壊に関連する諸現象の究明に努めているところであり、これまでに滑動土塊の流動化、すなわち土石流への遷移条件等についての知見を得ている¹⁾。本報においては、その次の段階として崩壊によって生産された土塊が塑性的な構造を保持したまま滑動する場合の運動量則について検討するとともに、滑動土塊の到達範囲の推定法についても議論する。

2. 運 動 量 則

斜面における土塊の挙動については、エネルギー保存則に基づく Sheidegger の議論²⁾ や運動量保存則を

用いた奥田の研究³⁾ などがある。彼らが用いた基礎式は、それぞれ次のようである。

$$d(1/2 mu_f^2) = mg(\sin \theta - \mu_k \cos \theta) ds \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$m \frac{du_f}{dt} = mg(\sin \theta - \mu_k \cos \theta) - ku_f^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 u_f : 土塊の滑動速度、 m : 土塊の見かけ質量、 μ_k : 動摩擦係数、 g : 重力加速度、 k : 抵抗係数、 θ : 斜面傾斜角、および $d(1/2 mu_f^2)$: 土塊が ds 滑動したときの運動エネルギーの変化量である。これらの式より明らかなように、土塊の挙動は前者において μ_k 、後者において μ_k と k によって規定される。しかしながら、これらの取り扱いにおいては、土塊の見かけ質量に応じて μ_k あるいは μ_k および k を変化させなければ実際の土塊の挙動を説明し得ないことが判明しており、これらのパラメータをいかに推定するかが重要な課題となっている。

著者らは¹⁾、以上の問題点を解消するため、次のような考察を行った。まず、斜面上における土塊の運動を Fig. 1 のように模式化し、土塊の駆動力として見かけの質量に働く重力の斜面方向の成分ならびに、土塊と表面流の相対速度に起因する力を考えた。一方、抵抗力として、固体摩擦と流体摩擦を考え、前者は摩擦係数と有効垂直反力との積として表示し、後者は土塊と斜面の境界における流体のせん断に起因するものと考えて、次式のような運動量保存則を提示している。

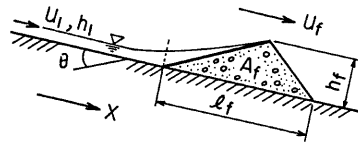


Fig. 1 Schematics and symbols of a soil block sliding on slope

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_f A_f u_f) = & \rho_f A_f g \sin \theta - \mu_k (1 - \lambda)(\rho_s - \rho) A_f g \cos \theta \\ & - \rho_f b l_f u_f^2 + \rho(u_1 - u_f)^2 h_1 + \frac{1}{2} \rho g h_1^2 \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここに、 ρ_f : 土塊全体の見かけ密度、 A_f : 土塊の断面積、 u_f : 土塊の滑動速度、 g : 重力加速度、 θ : 斜面傾斜角、 λ : 土塊の空隙率、 ρ_s : 土粒子密度、 ρ : 水の密度、 b : 流体抵抗係数、 l_f : 土塊の長さ、 u_1 : 表面流の流速、 h_1 : 表面流の水深である。なお土塊の空隙は水で飽和しているものと見なされており、土塊背面の表面流を無視すれば、見かけ密度は次式で近似される。

$$\rho_f = (1 - \lambda)\rho_s + \lambda\rho \quad \dots\dots\dots(4)$$

(3)式によれば、滑動限界傾斜角 θ_c は、 $d(\rho_f A_f u_f)/dt = 0$ とし、さらに μ_k のかわりに静摩擦係数 μ_s を用いれば次式ようになる。

$$\theta_c = \tan^{-1} \left\{ \mu_s (1 - \lambda) \frac{\rho_s - \rho}{\rho_f} - \frac{\rho}{\rho_f \cos \theta_c} \frac{h_1^2}{A_f} \left(F_1^2 + \frac{1}{2} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $F_1 = u_1 / \sqrt{g h_1}$ である。上式からもわかるように、土塊の規模が小さくて表面流の作用が顕著なときには、滑動限界傾斜角に及ぼす表面流の影響を無視し得ない場合もあるが、殆どの場合これを省略できることが明らかにされている。

土塊の滑動速度に対する表面流の影響も、滑動限界傾斜角の場合と同様、殆どの場合無視できることがわかっていて。そこで (3) 式において、右辺 4 項および 5 項を省略し、さらに、質量変化が無視できるような条件、すなわち、 $u_f d(\rho_f A_f)/dt \ll \rho_f A_f du_f/dt$ の場合を対象にすれば、(3)式は次のようになる。

$$\frac{du_f}{dt} = g \sin \theta - \mu_k (1 - \lambda) \frac{\rho_s - \rho}{\rho_f} \cos \theta - \frac{\rho l_f}{\rho_f A_f} f_b u_f^2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、簡単のため重力の加速度 g と土塊の厚さ h_f を用いて上式を無次元化すれば次式を得る。

$$du_f'/dt' = a u_f'^2 + b \quad \dots\dots\dots(7A)$$

あるいは,

$$u_f' du_f' / dx_f' = a u_f'^2 + b \quad \dots\dots\dots 7(B)$$

ここに,

$$u_f' = u_f / \sqrt{g h_f}$$

$$x_f' = x \sqrt{g / h_f}$$

$$a = -2(\rho / \rho_f) f_b$$

$$b = \cos \theta \{ \tan \theta - \mu_k (1 - \lambda) (\rho_s - \rho) / \rho_f \}$$

である。ここで、土塊の断面積は $A_f = 1/2 \cdot l_f h_f$ と見なされている。以上の議論から推察されるように、斜面における土塊の挙動は、斜面傾斜角 θ 、流体抵抗係数 f_b 、固体摩擦係数 μ_k のほかに、水、土粒子および土塊の密度、 ρ 、 ρ_s 、 ρ_f および λ に依存するが、 ρ 、 ρ_s 、 ρ_f および λ の変化幅は小さいため、実際には θ 、 f_b 、 μ_k に支配されると見なしてもよい。これらの三つのパラメータのうち θ は予め与えられるパラメータであり、 f_b および μ_k が与えられると土塊の運動が決定される。したがって、これら二つのパラメータをいかに推定するかが重要な課題となる。

3. 動摩擦係数と流体抵抗係数

3.1 動摩擦係数

動摩擦係数および流体抵抗係数を実験的に検討するためには、斜面上における土塊の運動からこれらのパラメータをいかに抽出するかが問題となる。ところが Fig. 2 (a) に示すように、流体抵抗は、土塊の空隙を埋めている水のうち、斜面に接している部分が滑動に伴ってせん断変形を受けるために発生するものと考えており、Fig. 2 (b) のように空隙に水が存在しないような条件下で土塊の挙動を調べれば、次の方法によって動摩擦係数のみを取り出せることになる。すなわち、このときの土塊の運動方程式は、

$$du_f' / dt' = \cos \theta (\tan \theta - \mu_k) \quad \dots\dots\dots (8)$$

のように書き改められる。したがって、種々の斜面および土塊の材料の条件に対して土塊の挙動を調べれば、滑動速度と時間の関係、あるいは滑動距離と時間の関係より μ_k を抽出することができる。

以上のような観点より μ_k に関する実験を行うとものに、 μ_k と静摩擦係数 μ_s との関係をみるための μ_s に関する実験を行った。土塊は殆どのケースにおいて、砂と粘土と水を約 1:0.33:0.17 の比率で練り混ぜ塑性的な構造を維持できるように留意しながら作成した。このようにして作られた土塊を $\theta > \tan^{-1} \mu_k$ の斜面上に Fig. 1 のような形に整形し、これを滑動させて側面よりビデオカメラで撮影してその挙動を調べた。実験条件は、 μ_k に対する土塊材料の粒径効果の有無および斜面粗度の影響が調べられるように、土塊材料中の砂粒径と斜面粗度径を種々組み合わせて設定されている。土塊材料中の砂はほぼ均一なもので、粒径 $d_{50} = 0.059, 0.154$ および 0.268 cm の三種類の砂が用いられ、斜面粗度として、土塊材料と同じ $d_r = 0.059, 0.154, 0.268$ cm の均一砂をアクリル板表面に一層程度はり付けたもの、および粗度なし

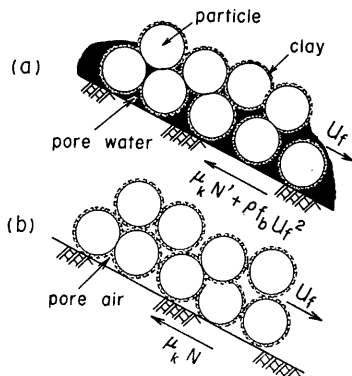


Fig. 2 Illustration for frictional forces acting on a soil block. Both a fluid friction and a rigid friction occur in the case of (a). On the other hand, only a rigid friction acts on a soil block in case of (b)

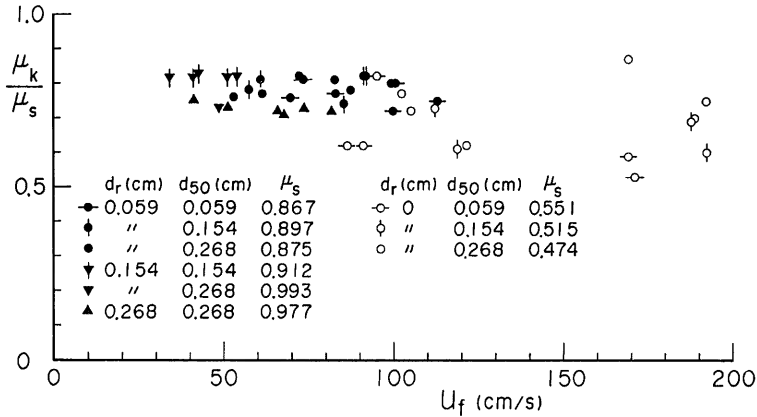


Fig. 3 Normalized dynamic friction coefficients vs. sliding velocities

のアクリル板の表面が採用されている。一方、静摩擦係数 μ_s についてはつぎの方法で求めた。土塊と斜面間の摩擦係数を種々の条件について測定し、これと斜面上に砂粒子を一層程度敷き、砂層が層状に移動開始するときの摩擦係数とを比較した結果、両者が一致することがわかった。そこで μ_s は後者の方法で測定した。このとき、信頼できる値が得られるよう一つの条件について多いもので10回程度、少ないもので5回程度の測定を行っている。砂および斜面の条件は μ_k に関するものと同じである。

Fig. 3 は、以上の方法によって測定された動摩擦係数と静摩擦係数との比、および滑動速度との関係を見たものである。図中には、土塊および斜面材料の条件ならびに静摩擦係数の測定値も示している。

まず、図中の μ_s の値についてみると、粗度の有無によって μ_s は大きく変化し、粗度がない場合の μ_s は粗度有のときの約1/2程度になっている。また、粗度無し斜面において d_{50} による μ_s の変化についてみれば、若干ではあるが粒径が大きいほど μ_s は小さくなっている。一方、粗度斜面については、 d_r が一定のときには d_{50} による μ_s の顕著な違いは見られないが、 d_r が大きくなれば μ_s は若干大きくなっている。

つぎに μ_k/μ_s と斜面材料の条件や滑動速度との関係についてみると、粗度や材料の違いによる μ_k/μ_s の系統的な変化はなく、しかも μ_k/μ_s は滑動速度に依存しないことがわかる。しかしながら、実験精度による変動があって、この実験領域においては、

$$\mu_k/\mu_s = 0.6 \sim 0.85$$

程度の範囲にある。中でも粗度を有する斜面についてみれば、

$$\mu_k/\mu_s = 0.7 \sim 0.85$$

のようになっている。このことは、動摩擦係数 μ_k がほぼ静摩擦係数のみによって決定されることを意味するものである。

3.2 流体抵抗係数

土塊の空隙が水で飽和している場合には、流体抵抗は、斜面に接触している間隙水が滑動に伴ってせん断されるために発生するものと推察した。そこで、まず、このように考えた場合、抵抗係数がどのような関数形になるか考察しておく。いま、せん断層厚が壁面せん断流の粘性底層厚に類似するものとすれば、これは次のように書ける。

$$\delta' = \delta_*' \nu / u_* \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 δ' : せん断層厚, ν : 間隙水の動粘性係数, u_* : 摩擦速度, δ_*' : 係数である。さらに、流体抵抗が層流抵抗で表示できるものとするれば、

$$\tau = \rho \nu \left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = \rho \nu \frac{u_f}{\delta'} \quad \dots\dots\dots(10)$$

のように近似できる。また、せん断力 τ は、 f_b を用いて次式のように書ける。

$$\tau = \rho f_b u_f^2 \quad \dots\dots\dots(11)$$

(9), (10), (11)式より抵抗係数は、

$$f_b = 1/\delta_*' \quad \dots\dots\dots(12)$$

のように表示される。ここで、 δ_*' は斜面の粗度の条件や土塊の材料の条件によって定まるべき定数であると考えておく。

斜面において、初速 0 で滑動を開始した土塊は、次第に加速し、ついには定常滑動速度をもつようになる。このときの流体抵抗係数 f_b と μ_k および定常滑動速度 $u_{f\infty}$ との関係は、式 (6) において $du_f/dt=0$ とすることにより次式のように求められる。

$$f_b = \frac{1}{u_{f\infty}^2} \frac{\rho_f A_f}{\rho_f} \left\{ g \sin \theta - \mu_k (1 - \lambda) \frac{\rho_s - \rho}{\rho_f} \cos \theta \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

したがって、3.1の方法で求められる μ_k を上式に適用し、さらに定常滑動速度がわかれば、実験的に f_b を求めることができる。このような観点より、流体抵抗係数に関する実験を行った。まず、前節と同様の条件で作成した土塊を水路上流端付近に置き、これを水中に浸した後、一定量の水を定常的に供給して土塊を滑動させた。このとき、土塊の挙動を側面よりビデオカメラで撮影し、滑動距離や滑動速度と時間の関係を調べた。実験ケースは、粗度なし斜面において土塊の砂粒子径を 0.059 および 0.268 cm とした場合の二種類と、粗度を有する斜面については粗度径と土塊の砂粒子径とを等しくした $d_r=0.059, 0.154, 0.268$ cm の三種類である。

このような実験によって得られた定常滑動速度および μ_k に関する前節の結果を (13) 式に代入して f_b を算定した。その結果を Fig. 4 に示している。データの数が多いうえにばらつきも大きい。しかし、(12)式の誘導過程において推察したように、 f_b は滑動速度には依存せず、斜面の条件に応じて一定値になるようである。すなわち、Fig. 4 のデータが示すように、粗度なし斜面においては、

$$f_b = 0.03 \sim 0.075$$

の範囲になっており、一方、粗度を有する斜面では

$$f_b = 0.15 \sim 0.6$$

の範囲にある。ただし、粗度を有する斜面のみのデータをみても、かなり広い範囲に点在しており、これが実験精度上の問題に起因するのか、土塊の材料の違いによるものかについては今後の検討課題である。

抵抗係数に関する理論的考察と実験結果とを総合すれば、斜面および土塊の条件、とくに斜面の条件に対応して f_b は一定値になることが期待されるが、粗度なしと粗度有の場合の抵抗係数の違いがなぜ生ずるのかについて少し考察してみる。上述の抵抗係数をせん断層厚の無次元量に変換すれば、粗度なしにおいては、

$$\delta_*' = 3.7 \sim 5.8$$

となり、粗度を有する斜面では、

$$\delta_*' = 1.3 \sim 2.6$$

程度の値になっている。これは、粗度を有する斜面においてせん断層厚が小さくなっていることを意味するものである。斜面と土塊の接触面近傍においては、土塊底面の砂粒子と斜面粗度粒子の相対運動によって間隙を埋めている水の流入・流出が起こる。そのため、滑面の場合よりもエネルギー逸散が大きくなり、見かけ上、流体抵抗を受けもつせん断層厚がうすくなる。その結果、抵抗係数が大きくなるものと思われる。

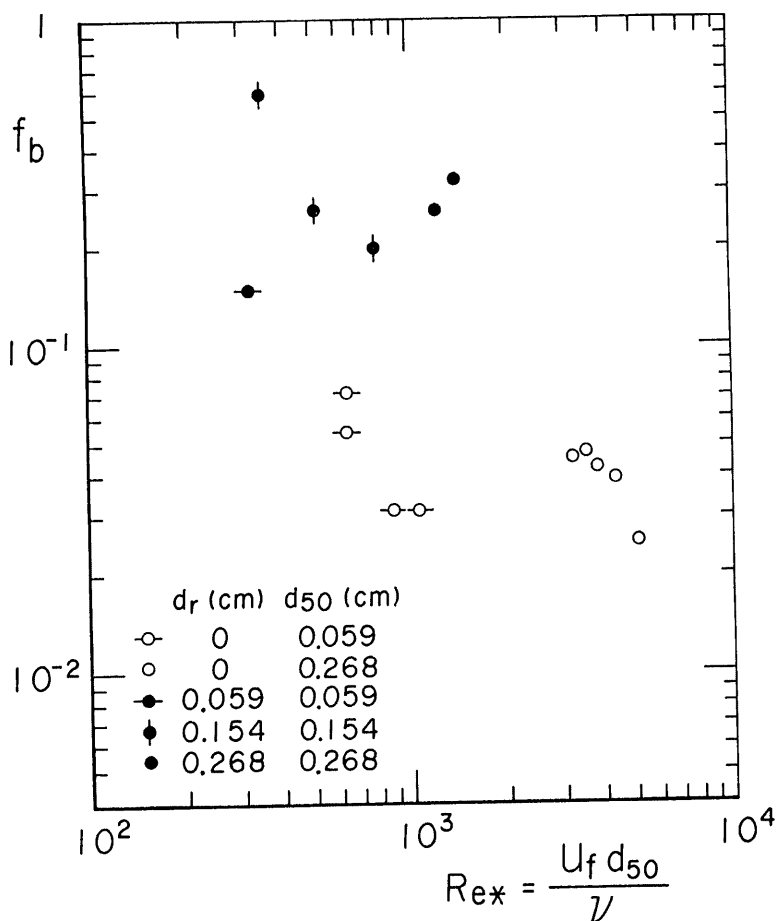


Fig. 4 Fluid friction coefficients

なお、Fig. 4 の横軸の Re_* は、粒子レイノルズ数である。これは、(12)式の誘導過程において、せん断層厚のかわりに粒子径を用いた場合に導かれる無次元量であるが、 f_b は Re_* には依存しないようである。したがって、この考え方は棄却される。

4. 滑動速度と停止距離

4.1 滑動速度と滑動距離

前章の議論において、 μ_k は定数であることが示されるとともに、 f_b も定数となる可能性の高いことが示された。そこで、これらのことを考慮して斜面傾斜角 θ が滑動限界傾斜角 θ_c よりも大きい領域において土塊がどのような挙動をするのか調べてみよう。

いま、 μ_k および f_b が一定とすれば、(7)式における a および b も定数となり、微分方程式の解は容易に求められる。 $t'=0$ で $u_f'=0$ のときの無次元滑動速度および無次元滑動距離と無次元時間の関係を示せばそれぞれ次のようになる。

$$u_f' = \frac{e^{2\sqrt{-ab}t'} - 1}{e^{2\sqrt{-ab}t'} + 1} \sqrt{\frac{-b}{a}} \quad (a < 0, b > 0) \quad (14)$$

$$x_f' = -\frac{1}{a} \left\{ \ln \left(\frac{e^{2\sqrt{-ab}t'} + 1}{2} \right) - \sqrt{-ab}t' \right\} \quad (15)$$

ここに、 $x_f' = x_f/h_f$ である。(14)式より定常滑動速度は、次式のようにになる。

$$u_{f\infty}' = \sqrt{-b/a} \quad (16)$$

これらのことよりわかるように、斜面傾斜角が変わらない限り初速 0 で滑動を開始する土塊は、次第に加速し、ついには定常滑動速度をもつようになる。

斜面における土塊の挙動を議論するうえでは、滑動速度と滑動距離との関係を把握しておく必要がある。そこで、 $x_f'=0$ で $u_f'=0$ のときの滑動速度と滑動距離との関係を示せば、次式のようなのである。

$$u_f' = \left\{ -\frac{b}{a}(1 - e^{2ax'}) \right\}^{1/2} \quad (17)$$

さらに、(16)および(17)式より $u_f'/u_{f\infty}'$ は、

$$u_f'/u_{f\infty}' = (1 - e^{2ax'})^{1/2} \quad (18)$$

のようになり、滑動速度と定常滑動速度との比は、抵抗係数と滑動距離のみに依存することがわかる。

ここで、流体抵抗係数によって土塊の挙動がどのように変わるのか調べてみる。**Fig. 5** は、(14)および(15)式を用いて推定される滑動速度および滑動距離をみたものである。ここで、計算条件は、 $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\lambda = 0.388$, $\rho_f = 2.01 \text{ g/cm}^3$, $\mu_k = 0.749$, $\theta = 35^\circ$ である。(16)式によれば、定常滑動速度は、 f_b の 1/2 乘に逆比例することが示されているが、同図の結果は、この

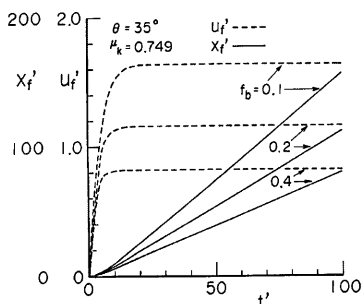


Fig. 5 The curves obtained from eqs. (14) and (15) for the sliding velocity and distance of a soil block

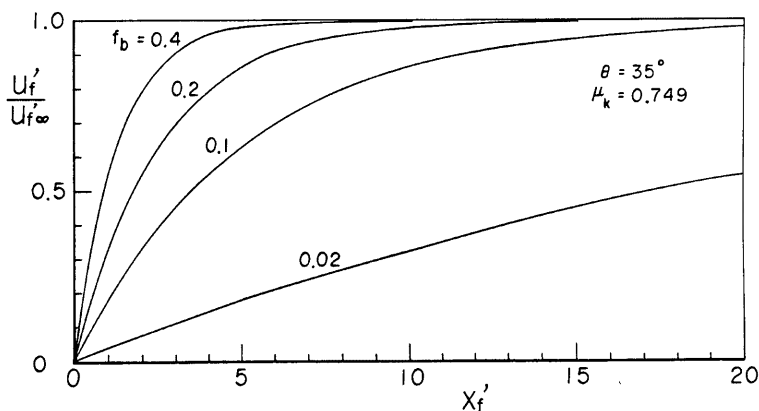


Fig. 6 Sliding velocities vs. sliding distance of a soil block obtained from eq. (18)

状況をよく示している。また、 f_b が大きいほど早い段階に定常滑動速度が達成されているのがわかる。この状況を詳しくみるため、 u_f'/u_{f0}' に関する計算値を Fig. 6 に示す。定常滑動速度が達成されるためには、抵抗係数が小さいほど長い斜面が必要になることがわかる。たとえば、定常状態の9割の滑動速度が達成されるための無次元斜面長についてみれば、 $f_b=0.4, 0.2, 0.1$ に対して、それぞれ $x_f' \approx 3, 6, 12$ 程度になる。土塊の厚さを $h_f = 3$ m とすれば、これらはそれぞれ 9, 18, 36 m の斜面に相当する。

滑動限界傾斜角よりも傾斜の大きい斜面における運動量方程式の解の特性は上述のようであるが、その妥当性を検討するための一例として、滑動速度および滑動距離に関する実験値(14)および(15)式による計算値を比較したのが Fig. 7 である。これによれば、定常状態への遷移は計算値の方が若干はやいようであるが、両者はかなりよく一致しているのがわかる。

4.2 停止距離

限界傾斜角よりも小さい斜面においては、初期の滑動速度がどんなに大きくとも、次第に減速してついには停止する。いま、Fig. 8 のように、 $\theta_c < \theta_u$ の斜面を滑動してきた土塊が θ_c よりも傾斜の緩い θ_d の斜面を運動する状態を考え、 θ_d の斜面の上流端より停止地点までの距離(停止距離)を x_{fs} とすれば、これは容易に求められる。すなわち、(7B)式の解において、 $u_f' = 0$ となる x_f' が無次元停止距離に相当し、これは次式のようになる。

$$x_{fs}' = -\frac{1}{2a} \ln \left(\frac{b_d}{a} u_{f0}'^2 + 1 \right) \quad (a > 0, b_d < 0) \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 $x_{fs}' = x_{fs}/h_f$ 、 u_{f0}' : θ_d 斜面の上流端における無次元滑動速度、 b_d : θ_d 斜面における b の値であって、

$$b_d = \cos \theta_d \{ \tan \theta_d - \mu_k (1 - \lambda) (\rho_s - \rho) / \rho_f \}$$

のようである。以下、 θ_u 斜面における b については b_u とする。

(19)式において、 θ_d 斜面上流端の滑動速度 u_{f0}' をいかに設定するかが問題となる。傾斜角が急変するところでは、エネルギー保存や運動量保存関係を厳密に議論するのはかなり困難である。しかし、工学あるいは防災科学の立場からは、急変部において θ_u 斜面下流端の滑動速度の θ_d 方向の成分が保存されると見なしでも差しつかえがないものと思われる。すると、 $u_{f0}' = u_f' \cos(\theta_u - \theta_d)$ のように置くことが可能であり、この条件を適用すれば、(19)式は次式のようになる。

$$x_{fs}' = -\frac{1}{2a} \ln \left\{ 1 - \frac{b_u}{b_d} (1 - e^{2ax'}) \cos^2(\theta_u - \theta_d) \right\} \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここに、 x' : 傾斜角の急変部より上流の滑動開始地点までの無次元距離である。なお θ_u 斜面において定常滑動速度が達成されているとき、(20)式は次のように表される。

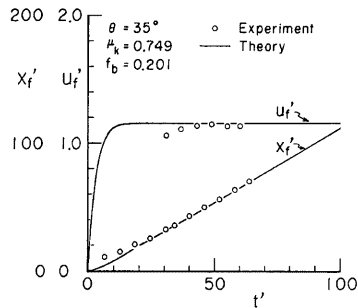


Fig. 7 Comparison between theory and experiment for the sliding velocity and distance of a soil block

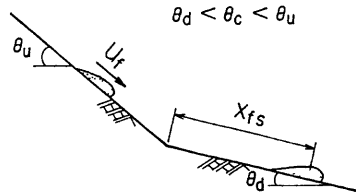


Fig. 8 Illustration for the running distance of a soil block

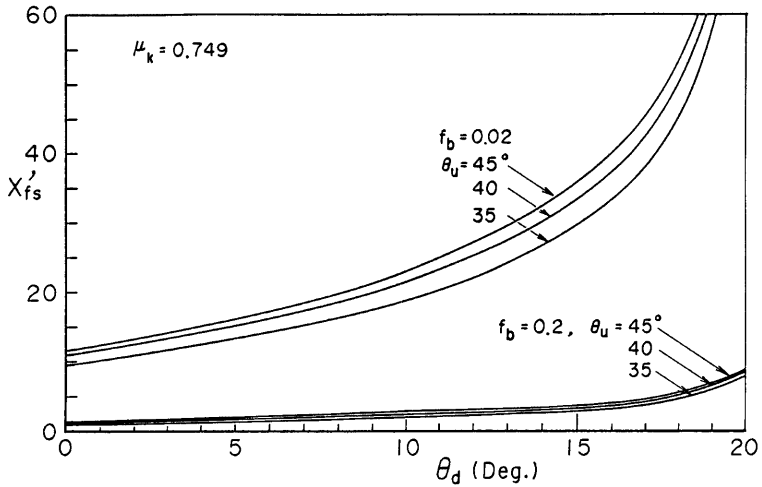


Fig. 9 Curves obtained from eq. (21) for running distances of a soil block

$$x'_{fs} = -\frac{1}{2a} \ln \left\{ 1 - \frac{b_u}{b_d} \cos^2(\theta_u - \theta_d) \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

(20)および(21)式によれば、無次元停止距離は抵抗係数 f_b に逆比例し、上、下流斜面の傾斜角や摩擦係数に依存する。さらに、上流側の斜面長が十分でない場合には、これにも依存することがわかる。いま、上流側の斜面長が十分長いものとし、 x'_{fs} と θ_d , θ_u および f_b との関係を見ると **Fig. 9** のようである。 $f_b = 0.02$ の計算曲線に着目すれば、 θ_u が一定のとき、下流側の斜面傾斜角が大きくなるに伴って停止距離も増加し、 $\theta_d = \tan^{-1}\{\mu_k(1-\lambda)(\rho_s-\rho)/\rho_s\}$ に近づくにつれて、停止距離は無限に増加し、ついには停止しなくなることがわかる。また、 θ_d を一定にして θ_u による x'_{fs} の変化をみれば、図示の範囲においては θ_u の増加につれて x'_{fs} は増加するが、(21)式からも理解されるように、停止距離は $dx'_{fs}/d\theta_u = 0$ となる θ_u で極値をもつことが推察される。つぎに、流体抵抗係数 f_b と x'_{fs} についてみれば、上述のように、 x'_{fs} に及ぼす流体抵抗係数の影響は極めて顕著であることがわかる。なお、計算条件として使用した $f_b = 0.2$ は、3章で示したように粗度を有する斜面の平均的な値であり、 $f_b = 0.02$ は、粗度のない斜面の抵抗係数のうち、最も小さいと思われる値である。

上述の理論がどの程度実際現象を説明し得るかを調べるため、先の昭和58年7月豪雨による山腹崩壊の2～3の例について、(21)式を用いて解析した結果を **Fig. 10** に示す。ただしこの際、抵抗係数をいかに推定するかが重要である。土塊の変形が無視できるような段階では **Fig. 4** に示す実験値が参考になるものと思われるが、変形がある程度進み、一部流動化したような段階では f_b

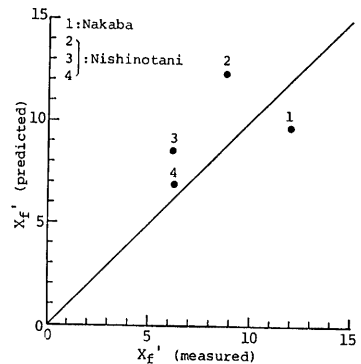


Fig. 10 Comparison between predicted and observed values for running distances of soil blocks

はかなり小さくなって、実験的には3章で得た値の約1/10程度の値が得られている¹⁾。したがって、ここでは、現地における土塊の変形状態から判断して、 $f_b=0.02$ を採用している。 f_b の推定法に関する問題を残すものの、図の結果が示すように、停止距離に関する計算値と実測値は比較的良好に一致しており、本稿で行ってきた議論は、妥当なものであることが示唆される。

5. 結 語

以上、土砂災害外力の一つである滑動土塊を対象とし、斜面における土塊の挙動を理論および実験の両面より検討した。本研究によって得られた主要な成果とその意義を要約すれば以下のようである。

(1) 斜面における滑動土塊の運動を記述するため、土塊と斜面の境界において固体摩擦と流体摩擦を考えて、土塊の運動量方程式を導いた。この式においては、固体摩擦を表す動摩擦係数、および流体摩擦に関する流体抵抗係数が重要な役割を果たす。

(2) 動摩擦係数に関する実験的検討を行い、動摩擦係数と静摩擦係数との比 μ_k/μ_s は、滑動速度、斜面および土塊の材料の条件には依存せず、ほぼ一定値をとることを示した。このことは、より測定の容易な静摩擦係数から動摩擦係数が推定されることを意味する。

(3) 土塊と斜面との接触面のごく近傍においては、滑動に伴ってせん断層が形成されることを推察し、せん断抵抗はせん断層の急激な変形と水の粘性に起因するものと考えることにより、流体抵抗係数が斜面の条件と土塊の材料の条件に応じて一定値になることを推察した。現在、これを検証するためのデータが十分得られていないものの、本論に示す実験データはこの考察結果にほぼ一致している。

(4) (2)および(3)の結果を適用して運動量方程式の解を提示し、滑動土塊の一般的な性質について検討を加えるとともに、実験的に解の妥当性を検討した。

(5) (4)の結果をもとに、土塊が滑動限界傾斜角よりも緩い斜面を運動するときの停止距離に関する理論解を示すとともに、これを用いて実際の現地データを解析し、ほぼ良好な結果を得た。この成果は、山腹崩壊によって生産される土塊の到達距離を直接的に推定するものであって、崩壊による危険範囲を設定するための有力な方法であるように思われる。

以上のように、興味あるいくつかの知見を得たが、今後検討すべき課題も多く残されている。とくに、本論文では滑動土塊の変形が無視できるような条件での議論を行ったが、このような条件でも流体抵抗係数については今後十分の考察が必要である。さらに、変形が進んで土塊が一部流動化する場合の抵抗係数については、本研究の最も重要な課題であると考えている。

本研究は一部文部省科学研究費、自然災害特別研究(1)(網干寿夫 広島大学教授)および一般研究Cの補助を受けて進めているものであり、ここに記して感謝の意を表す。また、京都大学防災研究所吉田義則技官には種々の面で御協力いただいた。ここに感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男・江頭進治・大槻英樹：山腹崩壊土の流動機構に関する研究，京大防災研年報，26号B-2，1983，pp. 315-327.
- 2) Sheidigger, A. E: On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides, Rock Mechanics, Vol. 5, 1973, pp. 231-236.
- 3) 奥田節夫：土石流の現地調査について，京大防災研年報，16号A，1973，pp. 53-69.