

67 斜面崩壊に至るスライドの加速モデル

三重大大学生物資源学部 林 拙郎, 川辺 洋

1. はじめに

地すべりや規模の大きい山崩れでは、外力が破壊強度を上まわった場合でも、必ずしもすぐ崩壊が始まるのではなく、クラックの拡大から実際の崩壊までには、移動に伴う時間を必要とする。コンクリートや土質実験等で扱う供試体のようなもの場合には、瞬間的であったり、ほんの数秒で破壊が終了する。しかし、これが数百メートルの斜面では、たとえ急傾斜であったとしても崩壊までには数日から数十日を要する場合が多い。実際の斜面崩壊では、せん断応力は通常破壊強度とほぼ同程度か、それよりわずかに上まわる程度であるから、当然移動速度も遅く、崩壊までに時間がかかることになる。

斉藤が崩壊発生時期の予知モデルを提案して以来、多くの研究がなされて来た。その前提条件は、概略上のようなものであった。最近では斜面等の下端の法面カットをする機会も多く、この場合には、供試体等の破壊実験と同様、外力は、ほぼ一定に保たれることになり、破壊強度を少し上まわる程度の外力によって崩壊が進行することになる。以下では、法面カットの場合のように、外力が土の強度をわずかに上まわっていて、かつ変化しないような比較的単純な条件の下で崩壊に伴うスライドの加速モデルを示す。

2. 土体の加速モデル

斜面上に発生する崩壊は、大規模なものでも小規模なものであっても、ほとんどはすべり面の形成とそこですべり現象と考えることができる。ここではピーク強度を少し超える一定外力が作用している状態を考え、移動に伴って摩擦抵抗力が低下し、同時に移動速度が増加する機構を考察する。

2. 1 駆動力 f と抵抗力 R

斜面上の土体にすべり面が形成された状態を考える。上の層は重力によって駆動力 f を受け、下の層との境界ではこれに抵抗する力 R が逆方向に作用する。このような駆動力 f が与えられるとし、その f は変化しないものとすと、最終段階を除いてすべりの移動速度は小さく加速度も小さいので、駆動力 f と抵抗力 R とは静的な釣合条件を満たし、次式のように考えることができる； $f - R = 0$ (1)

上式は、グライドの加速モデルにおいて導入された in der Gand and Zupanivicic や納口の仮定である。

2. 2 抵抗力 R

次に、すべり面について考える。図-1の斜線部はすべり面の破壊された物質を示し、斜線のないところは未破壊物質同士の摩擦を表している。しかし、後者の部分においても全く破壊されたものがない訳ではなく、移動している以上わずかな薄い破壊物が含まれていると考えるべきであろう。こう考えると図-1は、さらに図-2のような平均的に厚さ δ なるすべり層をはさんで上部の土塊が移動しているとみることができる。ここで、 δ なるすべり層の底面には摩擦抵抗力が作用し、その上部の剪断層内にも摩擦に伴う運動量の伝達が行われるものと考えることができる。したがって、この層内は速度勾配を持つことが考えられ、ここでは速度に比例する抵抗を考えることができる。このように考えると、抵抗力 R は、摩擦抵抗力 R_f と粘着力の抵抗力 R_c 、粘性抵抗力 R_v の和であり； $R = R_f + R_c + R_v$ (2)

と表すことができる。抵抗力 R の各成分は、摩擦係数 μ 、粘着力 c 、粘性係数 η を導入することによって、次式のようになる； $R = \mu W \cos \theta + c A + \eta A v / \delta$ (3)

ここに、 W ：すべり面上の重量、 A ：底面積、 v ：移動速度、 δ ：剪断層の厚さ、 θ ：傾斜角である。土

や軟岩の場合、破壊初期には最大摩擦強度と粘着力をもつが、すべりが始まると粘着力は低下する。取扱いを簡単にするために、 c は初期破壊時のみに値をもつが、すべりの開始時点で $c = 0$ になるものとする。

2. 3 加速機構

土塊が動き始めて、土のピーク強度をすぎると土の摩擦強度は低下を始めるのであるが、図-3のように駆動力 f が一定であり、それと抵抗力 R が釣り合っているので、(3)式は一定値とならなければならない。土塊が動き始めと(3)式右辺第1項は徐々に低下し、かわりに第3項が増加することになる。このメカニズムは次のように考える。

摩擦係数 μ の移動量 l に対する変化が剪断層の厚さ δ に逆比例して減少するとし、剪断層 δ の変化が移動量 l に関係するとして次式を仮定する。

$$d\mu/dl = -k/\delta \quad \dots\dots\dots (4), \quad d\delta/dl = b\delta \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 b 、 k は無次元定数である。粘性係数 η に関してはここでは変化しないものとする。ここで、駆動力 f は時間的に変化しないとしているので、抵抗力 R も一定であることを考慮すると次式のようなになる。

$$\frac{d\mu}{dt} W \cos \theta - \eta A v \frac{1}{\delta^2} \frac{d\delta}{dt} + \eta A \frac{1}{\delta} \frac{dv}{dt} = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{一方、仮定より;} \quad d\delta/dt = b\delta v \quad \dots\dots\dots (7), \quad \mu/dt = -k v / \delta \quad \dots\dots\dots (8)$$

を得る。(7)、(8)式を(6)式に代入すると次式のようなになる。

$$dv/dt = ((kW/\eta A) \cos \theta) v + b v^2 = a v + b v^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$a = (kW/\eta A) \cos \theta = (k/\eta) \sigma \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 σ : 垂直応力である。上式は、以前筆者らが提案したスライドの基本式と同形式である。このモデルからみれば、崩壊過程は摩擦抵抗型の抵抗形態から粘性抵抗型の抵抗形態への移行過程とみられる。

3. 摩擦係数等 (δ 、 μ 、 v_0) と $v \sim l$ との相互の関係

移動機構の中でも摩擦に関する事項を考察し、摩擦係数と移動速度、摩擦強度等の関係を示す。

初期条件を $l = l_0$ で $\delta = \delta_0$ とし、 $l = l_0$ で $\mu = \mu_0$ とすると次式を得る。

$$\delta = \delta_0 \exp(b(l - l_0)) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\mu = \mu_0 - (k/b\delta_0) \{1 - \exp(-b(l - l_0))\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

破壊の初期($t = t_0$)に生ずる速度を v_0 、摩擦係数を μ_0 とすると、(3)式より v_0 は

$$v_0 = (\delta_0/\eta A) \Delta f \quad \dots\dots\dots (13), \quad \Delta f = f - cA - \mu_0 W \cos \theta \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。 v_0 は係数 a 、 b に無関係となっている。ここに、 Δf は破壊の初期に土の強度を超えた力の大きさである。上の(11)式、(12)式を(3)式に代入すると次式のようなになる。

$$v = (\delta_0/\eta A) (\Delta f + (k/b\delta_0) W \cos \theta) \cdot \exp(b(l - l_0)) - (kW/b\eta A) \cos \theta \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{ここで(10)式(13)式の関係を用いると次式;} \quad v = ((a + b v_0)/b) e^{b(l - l_0)} - a/b \quad \dots\dots\dots (16)$$

を得る。上式は、既に筆者らがこれまでに示した $v \sim l$ 式と同様の式である。

さて、初期速度 v_0 については、(13)式より Δf に比例していることがわかる。破壊直前の状態を考えると $v = 0$ であり、土の最大強度 s_0 は(3)式より;

$$s_0 = (cA + \mu_0 W \cos \theta) / A$$

とおくことができ、(13)式、(14)式より v_0 は、次のように表すことができる。

$$v_0 = (\delta_0 s_0 / \eta) (f / s_0 A - 1) = (\delta_0 s_0 / \eta) (1 - Fs) / Fs \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 Fs は安全率であり; $Fs = s_0 A / f$ である。したがって、何等かの形で土の強度が低下するか、駆動力が増加して安全率が1を下まわると初期移動速度 v_0 が与えられ、もし駆動力 f がそのまま

あるならば、その後の加速機構はスライドの基本式によって規定されることになる。

次に、摩擦係数 μ について考察する。Dieterichは、岩石の摩擦実験より摩擦係数 μ が速度の増加に対して減少するとしている。ここでは、本モデルで μ と v の関係を調べるために(16)式と(12)式から l を消去し、また(10)式、(13)式、(17)式の間係を用いると、 μ は v の関数として次式で表される。

$$\mu = \mu_0 - \mu_k (1 - (a + b v_0) / (a + b v)) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\mu_k = k / (b \delta_0) = (a / b v_0) (s_0 / \sigma) (1 - Fs) / Fs \quad \dots\dots\dots (19)$$

上式では、 μ は v の増加と共に減少する。また、 μ_k は、上式のような重要な諸因子と結びついている。

4. 本モデルの帰結と適用例

さて、先に得られた(6)、(9)式より、移動のタイプと μ 、 δ の状態については次のことがわかる。

- ① μ = 一定、 δ = 一定の場合； v = 一定、となり、定常クリープを表す。
- ② $\mu \neq$ 一定、 δ = 一定の場合； $b = 0$ 、となり、第3次クリープ第Ⅰ段階を表す。
- ③ μ = 一定、 $\delta \neq$ 一定の場合； $a = 0$ 、となり、第3次クリープ第Ⅱ段階（斉藤タイプ）を表す。
- ④ $\mu \neq$ 一定、 $\delta \neq$ 一定の場合； 第3次クリープのすべてが成立する。

次に、求められた $v \sim l$ 関係、 $\mu \sim v$ 関係を安居山崩壊について適用する（崩壊まで30日）。条件は

$$s_0 = 19.8 \text{ tf/m}^2, \quad \sigma = 38.6 \text{ tf/m}^2, \quad a = 4.5 \times 10^{-2} (1/d), \quad b = 0.68 (1/m) \\ Fs = 0.99, \quad \mu_0 = 0.488, \quad c = 1 \text{ tf/m}^2, \quad \theta = 27.3^\circ, \quad v_0 = 1.1 \times 10^{-2} (m/d)$$

とすると、図-4が求められる。図-4は、実際の崩壊例であるが、 $\mu \sim v$ 関係は初期の部分を除くとDieterichの岩石に対する測定結果とよく似た結果となっている。

5. 静的釣合式の妥当性

ここまでは、すべり状態において加速度は小さいものとして(1)式が成立すると仮定した。しかし、たとえ小さくても加速がある限り、力が作用するのでその影響を調べる必要がある。加速度が作用するとき、

$$(1) \text{式は、厳密には次式のように表される；} \quad f - R = (W/g) dv/dt \quad \dots\dots\dots (20)$$

上式をこれまでと同様に整理すると、 $h = \delta_0 W / (\eta A g)$ として、 l 、 v に関する次式が得られる。

$$h e^{b(1-l_0)} \frac{dv}{dt} + v - \frac{a+bv_0}{b} e^{b(1-l_0)} + \frac{a}{b} = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

上式の第1項を無視した式が先の(16)式である。上式で v が小さいとき、左辺第1項が無視できることを示す。速度 v あるいは移動量 l が大きくなると、(21)式左辺第1項は無視できないのであるが、この項が意味をもつ値として； $h e^{b(1-l_0)} = 10^{-2} \quad (d-m \text{ 単位}) \quad \dots\dots\dots (22)$

を設定する。この値は、崩壊の前日～当日に対して $v \approx 1 (m/d)$ とし、 dv/dt を $\approx 1 (m/d^2)$ として、 v に影響を与える大きさを v に対して2桁程度下にとったものである。安居山の崩壊の場合、 $h = 3.3 \times 10^{-11} (d-m \text{ 単位})$ であるので、(22)式の解として $l - l_0 = 29m$ を得る。この値は安居山斜面のヒズミ量として約30%程度の値である。安居山では、崩壊の前日でも $l - l_0 = 7(m)$ 、 $v = 2(m/日)$ 程度であり、 $l - l_0 = 29(m)$ という値は、通常の斜面崩壊からいえばまさに崩壊の直前の値であり、この程度まで、先の(9)式が使用可能であることを示している。崩壊予測の分野において、崩壊当日のかなり直前まで斉藤式を用いて検討された例があり、このことは以上の解析の妥当性を裏付けている。以上より、崩壊の直前以外では、(21)式の係数 h が小さいので、(21)式第1項は無視できることになる。

参考文献

- 1) Dieterich, J. H. : Pure and Applied Geophysics, 116, 790-806, 1978 2) Fukuzono, T : Proc. 4th IFW

L Tokyo, 145-150, 1985 3) Hayashi, S., Yamamori, T. : JJLS 28(1), 17-22, 1991 4) in der Gand, H. R. and Zupanicic, M. : IAHS-AISH publication, 230-242, 1965 5) 納口恭明 : 防災センター研報, 30, 189-206, 1983 6) 納口恭明他 : 防災センター研報, 38, 169~180, 1986 7) 大村寛・土屋智 : 地すべり, 25(1), 1~6, 1988 8) 齊藤迪孝 : 鉄研報告626, 1-53, 1968 9) Varnes, D. J. : Proc. 7th SAGC 2, 107-130, 1982 10) Voight B. : Science, 243(13, Jan.), 200-203, 1989 11) Vyalov, s. s. : Proc. 8th ICMFE 301-302, 1973

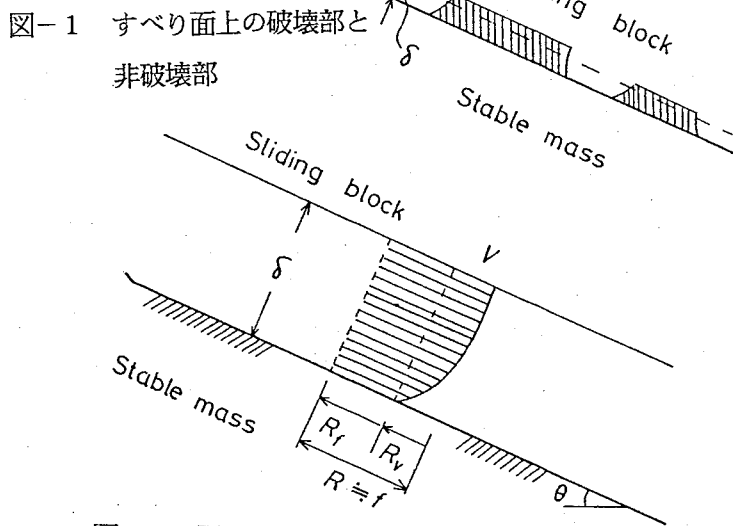


図-2 厚さδで平均化したすべり層

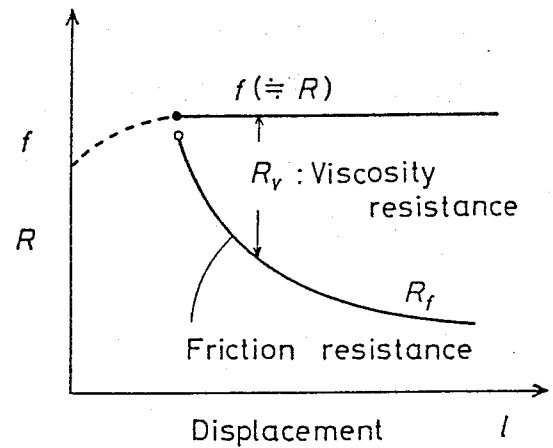


図-3 移動の開始にする駆動力 f 、抵抗 R の相互の関係

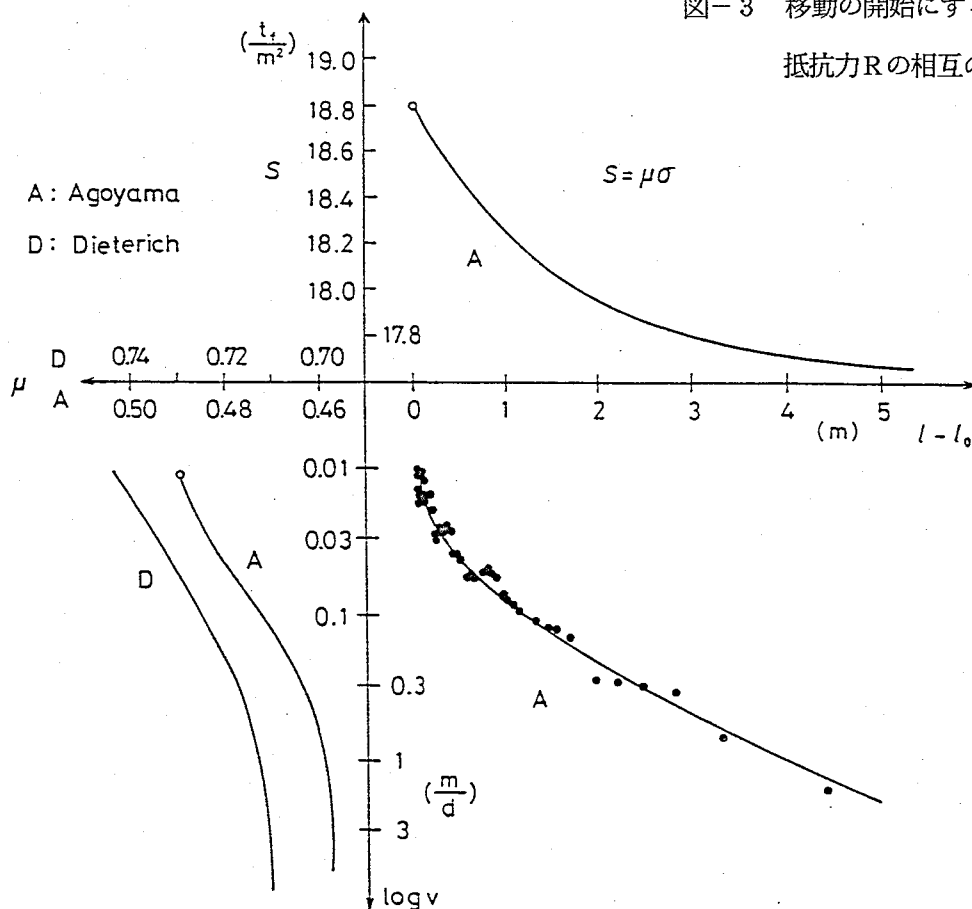


図-4 移動に伴う摩擦抵抗 s と移動量 l 、移動速度 v 、摩擦係数 μ 相互の関係