

中間流水深分布を考慮した山腹崩壊の規模の推定

ESTIMATION OF SCALE OF SLOPE FAILURE TAKING ACCOUNT OF DISTRIBUTION OF SUB-SURFACE FLOW DEPTH

小葉竹重機*・林 賢司**・江崎一博***

By Shigeki KOBATAKE, Kenji HAYASHI and Kazuhiro EZAKI

Stability analysis of slope, based on the assumption of uniform field, cannot estimate two-dimensional scale of failure. On the other side, the depth of sub-surface flow which is highly related to slope failure is never considered uniform at natural slope. Particularly, at a V-shaped micro configuration of the ground, the rise of sub-surface flow depth must be rapid and the failure will occur first at there. This paper proposes a model which estimates two-dimensional scale of failure occurred at such a not uniform field. The model consists of two parts, one is configuration model as shown in Fig. 1- Fig. 3 and one is stability analysis model. The stability analysis model is based on circular arc method, which introduces cohesion on the side of circular arc in addition to the bottom of the arc.

1. ま え が き

従来の斜面安定解析は場の一様性を仮定した一次元の取扱いであるために、崩壊の二次元形状については不明である。ところで、山腹の表層崩壊に中間流が大きく関与していることは疑いがなく、特に1つの斜面中でもさらに微地形のV字形地形では水が集まりやすく、中間流の水深上昇は急激となり、このような場所がまず崩壊することが予想される。本報告は、このような中間流水深分布が一様でない場に、従来の安定解析法を拡張適用した、崩壊の二次元形状を推定する1つのモデルを提案し、若干の検討を加えたものである。

2. 地形のモデル化

1つの斜面中のさらに微地形のV字形地形を、図-1のようにモデル化する。斜面全体の勾配を主傾斜角 α 、微地形の勾配を副傾斜角 θ とする。斜面の不透水性の基岩の上に直接、中間流発生層である厚さ D の表層があるものとする。このような地形に発生する中間流の水

深分布は、一般には一点鎖線で示すように、水面と斜面との交線が二次曲線かまたは直線と二次曲線の組合せで表わされるが、ここでは簡単のために、これを点線で示すように三角錐の形で近似する。

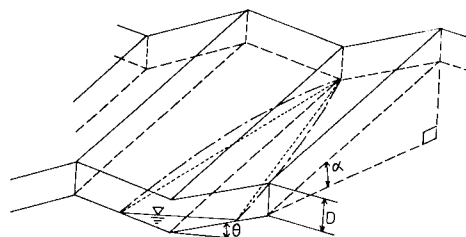


図-1 微地形とそこに発生する中間流のモデル化

3. 安定計算法

(1) 計算法の基本的構成

用いた安定計算の基本は、①副傾斜角方向(以下横方向という)を図-2に示すように単位幅に分割する。② $j=1\sim n$ の各単位幅斜面について円弧すべり面を仮定し、円弧の中心に関するせん断力、せん断抵抗力のモーメントを求める。このとき、せん断抵抗力として、円弧の側面にも粘着力を考える。ただし、すべり円弧は斜面の下端で基岩に接するものと仮定し、各 j について i

* 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科
(〒376 桐生市大神町1-5-1)

** 正会員 群馬県庁(〒371 前橋市大手町1-1-1)

*** 正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科

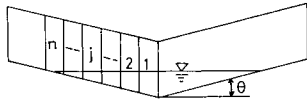


図-2 副傾斜角方向への分割

番目に仮定するすべり円弧の形状は、各 j に共通とする。また各 j の中間流の水深分布は図-1 に示す三角錐形状から求めたものを用いる。③次式によって安全率 F を計算する。

$$F_{i,k} = \frac{M_{c,i} + \sum_{j=1}^k (M_{b,i,j} + M_{w,i,j} - M_{h,i,j})}{\sum_{j=1}^k M_{t,i,j}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 F ：安全率、 M_c ：側面粘着力によるモーメント、 M_b ：円弧底面の粘着力によるモーメント、 M_w ：中間流がない場合の摩擦力のモーメント、 M_h ：間隙水圧による摩擦力の減少分のモーメント、 M_t ：せん断力のモーメント、であり、添字 i は i 番目のすべり円弧、 j は横方向分割片の番号を表わす。④中間流の水深が増加し、最初に $F_{i,k} < 1$ となる i を主方向の崩壊規模、 k を横方向の崩壊規模とする。

以上が計算の基本的手順であるが、安全率の計算は式(1)に示すように各 j について同じ i を用いたもののみで行っている。これは横方向の細片 k のすべり円弧 i を固定したうえで、 $j=1 \sim (k-1)$ の細片についてすべての円弧を組み合わせて安全率を求めてみると、各 j について同じすべり円弧 i を用いた場合が最も安全率が小さいという結果を得たことによる。これは与える側面粘着力は $j=1 \sim k$ の中の最大のすべり円弧に対して考えるものであるから、各 j について同じ大きさ i を考える場合が最も安全率は小さくなるものと解釈される。なお、式(1)の計算は、図-2に示すように左右対称であることから片側だけについて行い、横方向の崩壊規模は得られた k を2倍したものとす。

(2) 各モーメントの計算方法

式(1)中の各モーメントは分割された個々の細片 j について、順次すべり円弧を仮定して計算される。そのための座標系および記号の定義を示したものが図-3である。斜面に沿って x 軸をとり、これに垂直に y 軸をとる。斜面の下端は図示のように矩形ではなく、 x 軸に対して D/L_a の勾配をもつ三角形状とする。これは矩形の場合には、まずこののり先が崩壊するために、あらかじめ矩形に対して安定計算を行い崩壊しやすい部分を取り除いたことによる。中間流水面形は取扱いを容易にするために直線と仮定し、中間流水深 H は水面形の直線を延長して y 軸上での高さで表わすものとする。こうした仮定によっても、崩壊規模に関するモデルの基本的性質は変わらないと考えられる。ここで斜面下端の三

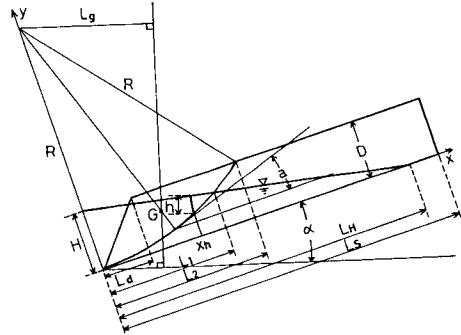


図-3 座標系および記号の定義

角形状の部分に発生する表面流および、 H が大きくなると表層表面に発生する表面流のいずれも、水深は小さいものとして重量および水圧の計算から除外することにする。また土の単位体積重量 γ は、中間流がすでに発生している場合を取り扱うために、中間流の水面より上でもほぼ飽和単位体積重量 γ_{sat} に近いものとして、全層にわたって γ_{sat} を用いることとする。また副傾斜角 θ による力の効果は考えない。

a) せん断力のモーメント M_t

$$M_t = A \cdot B \cdot \gamma_{sat} \cdot L_g \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 A はすべり円弧の側面積、 B は横方向分割片単位幅、 L_g はすべり円弧の重心 $G(x_g, y_g)$ を通る鉛直線にモーメントの中心 $(0, R)$ から降した垂線の長さ、である。 A, L_g は次のように表わされる。

$$A = D(L_2 - L_a/2) - R \cdot L_2 + L_2 \sqrt{R^2 - L_2^2} + R^2 \sin^{-1}(L_2/R) / 2$$

$$L_g = (R - y_g) \cos(\pi/2 - \alpha) + x_g \sin(\pi/2 - \alpha)$$

ただし、 L_2 はすべり円弧と表層表面との交点の x 座標である。

b) 中間流がない場合の摩擦力のモーメント M_w

$$M_w = R \cdot A \cdot B \cdot \gamma_{sat} \cdot \cos(\alpha + a) \cdot \tan \phi \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 a は $(0, R)$ と円弧の重心 G を通る直線が円弧と交わる点 (x_a, y_a) における円弧の接線が x 軸となす角、 ϕ は土の内部摩擦角、である。 a は

$$a = \tan^{-1}(x_a / \sqrt{R^2 - x_a^2})$$

で与えられ、 x_a は次式で与えられる。

$$x_a = R / \sqrt{1 + (y_g - R)^2 / x_g^2}$$

c) 間隙水圧による摩擦力の減少分のモーメント M_h

x 座標が x_h の点におけるすべり面上の間隙水圧は、図-3または図-4に示すように等ポテンシャル線が水面と交わる点との鉛直距離 h で表わされる。しかし、ここでは図-4に示すように、 x_h を通り y 軸に平行に引いた直線が水面と交わるまでの距離 h' を用い、

$$h \approx h' \cos \alpha \dots\dots\dots (4)$$

とした。この近似式は斜面下端での三角形状の部分では

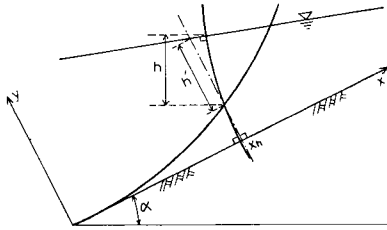


図-4 間隙水圧に関する記号の説明図

層厚 D が大きい場合数%程度過大の値を与えるが、考えている条件下での他の部分での近似度は誤差 0.1% の order である。

モーメントの計算は、表層表面に表面流が発生する場合としない場合で異なる。この条件は水深 H が

$$H \cong D \cdot L_H / (L_H - L_d)$$

で表わされる。ここで、 L_H は中間流の発生長である。

<表面流が発生しない場合>

$$M_A = R \cdot B (I_1 + I_2) \tan \phi \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 I_1 は $x=0$ から x_1 までの間の、 I_2 は x_1 から L_1 までの間の、すべり面に働く間隙水圧の積分値である。ここに x_1 は中間流水面と下端三角形状との交点の x 座標で、 $x_1 = H / (D/L_d + H/L_H)$ で与えられる。 L_1 はすべり円弧と中間流水面との交点の x 座標である。

$$I_1 = R \cos \alpha [D(R - \sqrt{R^2 - x_1^2}) / L_d - R \sin^{-1}(x_1/R) + x_1]$$

$$I_2 = R(H - R) \cos \alpha [\sin^{-1}(L_1/R) - \sin^{-1}(x_1/R) + H \cdot R \cos \alpha (\sqrt{R^2 - L_1^2} - \sqrt{R^2 - x_1^2}) / L_H + R \cos \alpha (L_1 - x_1)]$$

<表面流が発生する場合>

$$M_A = R \cdot B (I_3 + I_4 + I_5) \tan \phi \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 I_3 は $x=0$ から L_d までの間の、 I_4 は L_d から x_2 までの間の、 I_5 は x_2 から L_1 までの間の、すべり面に働く間隙水圧の積分値である。ここに、 x_2 は中間流が表層表面に現われる点の x 座標で、 $x_2 = L_H (H - D) / H$ で与えられる。

$$I_3 = R \cos \alpha [D(R - \sqrt{R^2 - L_d^2}) / L_d - R \sin^{-1}(L_d/R) + L_d]$$

$$I_4 = R(D - R) \cos \alpha [\sin^{-1}(x_2/R) - \sin^{-1}(L_d/R) + R \cos \alpha (x_2 - L_d)]$$

$$I_5 = R(H - R) \cos \alpha [\sin^{-1}(L_1/R) - \sin^{-1}(x_2/R) + H \cdot R \cos \alpha (\sqrt{R^2 - L_1^2} - \sqrt{R^2 - x_2^2}) / L_H + R \cos \alpha (L_1 - x_2)]$$

ただし、 $x_2 \geq L_2$ の場合には I_4 の項は x_2 を L_2 に置き換え、 $I_5 = 0$ とする。

d) 底面粘着力のモーメント M_b すべり円の弧の長さは $R \cos^{-1}(1 - D/R)$ であるから

$$M_b = C \cdot B \cdot R^2 \cos^{-1}(1 - D/R) \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 C : 単位面積当たりの粘着力、である。

e) 側面粘着力のモーメント M_c モーメントの中心から図心 G までの距離は $\sqrt{x_g^2 + (R - y_g)^2}$ であるから

$$M_c = C \cdot A \sqrt{x_g^2 + (R - y_g)^2} \dots \dots \dots (8)$$

4. モデルによる計算結果

以上のモデルに従って行った計算の概要と、計算結果に対する若干の検討を行った結果について述べる。

層厚 D は 0.5 m から 3 m までを 0.5 m 間隔で、 α は 20° から 45° まで 5° 間隔で、 θ は 5° と 10° について行った。粘着力 C の下限値は斜面長 L_s 、 D 、 α によって異なるが、側面粘着力を考慮しないで、中間流水深を 0 とした場合の、斜面が安定のための C の最小値である。

$L_s = 50$ m の場合についてこれを図示したものが図-5 (a) である。また計算対象となる C の上限値は、斜面全域にわたって表面流が発生した場合にでも安定な値の下限値で与えられる。こうしたことから、たとえば $L_s = 50$ m、 $\alpha = 35^\circ$ の場合の計算対象となる C の範囲を図示すると図-5 (b) のハッチの部分となる。二重のハッチの部分には表面流が発生するまでに崩壊する範囲である。ただし表面流の水深は無視するという仮定から、以下の実際の計算では表面流の発生域は下流端から 10 m 程度までしか考えていない。また、 $\gamma_{sat} = 1.92 \text{ t/m}^3$ 、 $\phi = 30^\circ$ という値を用い、 $B = 0.2$ m、 $\Delta L_2 = 1$ m、 $\Delta H = 0.01$ m として計算を進めていった。なお、一般に ϕ と C とは独立ではないとされているが、ここで考えている C は木の根などによるせん断抵抗の効果も含んでいるとして、 ϕ と C は独立に扱っている。

$L_s = 50$ m、 $\theta = 10^\circ$ の場合の崩壊長 L と崩壊幅 W を層厚 1.0 m と 3.0 m のものについて、横軸を α にとって示したものが図-6 である。ここで、 $L_{50}(10^\circ)$ とは $L_s = 50$ m、 $\theta = 10^\circ$ の場合の崩壊長 L を、 $W_{50}(10^\circ)$ はそのときの崩壊幅 W を表すものとし、以下同様の記述を用いる。また、以後の図中に用いられている記号は表-1 に示すものである。

図-6 より層厚が薄い場合には、 α の増加とともに L は増大するが W の変化は小さく、層厚が厚い場合には、 L の増加よりも W の増加の方が大きいことがわかる。

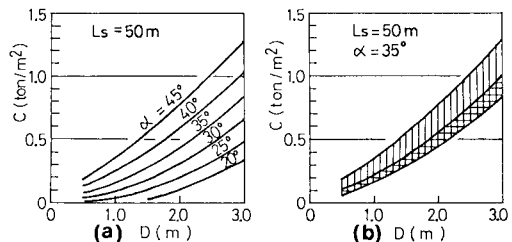
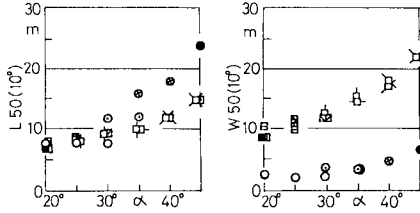


図-5 有意な粘着力 C の範囲

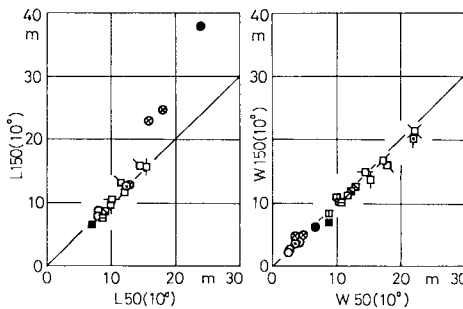
表一 記号表

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\frac{D}{C}$ | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 |
| 1.0 | ○ | ⊙ | ⊗ | ● | □ | ⊞ | ⊠ | ⊡ | ⊣ | ⊥ | ⊦ | ⊧ | ⊨ | ⊩ |
| 3.0 | | | | ■ | ▣ | ▤ | ▥ | ▦ | ▧ | ▨ | ▩ | ▪ | ▫ | ▬ |

c : tan/m^2 , D : m



図一六 崩壊長と崩壊幅の計算例 ($L_s=50 \text{ m}$)

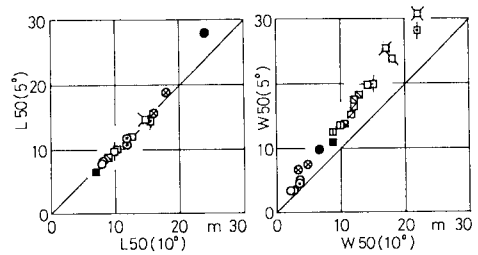


図一七 斜面長が長くなった場合の崩壊長と崩壊幅の変化

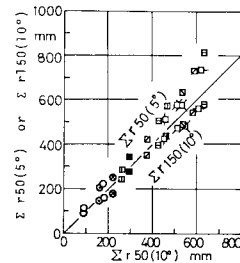
また層厚が薄い場合には $W/L < 1$, 厚い場合には $W/L > 1$ となっており, この傾向は従来の災害調査の結果から得られている知見と定性的に一致する。

図一七は $L_{150}(10^\circ)$ と $L_{50}(10^\circ)$ および $W_{150}(10^\circ)$ と $W_{50}(10^\circ)$ との比較, 図一八は $L_{50}(5^\circ)$ と $L_{50}(10^\circ)$ および $W_{50}(5^\circ)$ と $W_{50}(10^\circ)$ との比較, を示したものである。斜面長が長くなると, 層厚が薄い場合には崩壊長 L は顕著に増大するが, 崩壊幅 W は層厚によらず変化しないことがわかる。逆に, 副傾斜角 θ が緩くなると, L はほとんど変化しないが, W は層厚に関係なく一定の比率で増大することがわかる。

次に, 斜面長および副傾斜角 θ が崩壊までの積算雨量に及ぼす影響をみたものが図一九である。これは斜面横方向の長さを片側 50 m, 雨水の伝播速度は θ, α 両方向ともに 0.1 cm/s, 空隙率は 0.6, 降雨は 50 mm/h の定常降雨が降り続くものとして求めたものである。これらの値および仮定に特に根拠はないが, 伝播速度を θ, α 両方向に同じ値を用いることは, 実際の雨水は最急勾



図一八 副傾斜角が緩くなった場合の崩壊長と崩壊幅の変化



図一九 積算雨量に及ぼす斜面長, 副傾斜角の影響

配方向に流れることを考えると, 特に区別することの意味があまりないと考えたからでもある。積算雨量は, 表層が γ_{sat} の状態になった後に前述の 50 mm/h の降雨が降り続くとして, 中間流の下流端水深 H が, あらかじめ安定計算で求めておいた崩壊に必要な水深に等しくなるまでの降雨量として求めた。図は斜面長 50 m, 副傾斜角 10° の場合との比較で示してあるが, 斜面長, 副傾斜角の影響は当然予想される結果であり, また図示の値に γ_{sat} になるに必要な降雨量を加える必要はあるが, 積算雨量の値そのものもほぼ妥当な範囲にあると考えられる。

5. 結 論

水深が場所的に変わる場に従来の安定解析法を拡張適用して, 崩壊の二次元形状を推定するモデルを提案し, 数値実験を行ってみた。層厚の違いによる崩壊形状の変化や, 崩壊に必要な降雨量の値などについて, ほぼ従来の知見を満足する結果が得られたものとする。したがって, ここで提案したモデルは, 多くの不確かな仮定を含むものの, 非一様場の崩壊予測の第一次近似を与えるものとしてある程度有効であると考えられる。

(1985. 7. 19・受付)