

山地斜面の安定度評価とその保全対策

遠藤 泰造

まえがき

山地斜面の安定度を評価し、崩壊発生の危険の高い傾向のある斜面を判別し、その保全対策を施すことは、水保全や山地災害の予防上極めて重要なことである。

山地斜面の安定度を評価、あるいは危険斜面を判別する方法として、数種の方法が工夫されてきたが、それらの大部分は、傾斜、土壌型、地質、降水量、過去の崩壊発生の履歴などに関する情報を線型結合または重合法によって総合化したものである。主要因子の線型結合あるいは重合法に基づく相対的な斜面安定度の評価法は巨視的な評価には便利であるが、斜面安定に関与する諸因子の作用度はあいまいで、斜面安定のための対策はあいまいとなりがちである。

本文では主題に関する最近の研究成果を整理し、限界平衡の原理を用いた土質工学的モデルに基づく山地斜面の安定度評価を解説し、その保全対策を述べる。

ここに説明する土質工学的モデルに依ると、崩壊発生または山地斜面の安定に関与する主要因子、たとえば土の強さ、地下水の影響、樹木の効果および斜面の傾斜などの諸因子の作用度は明確となり、山地斜面に対する保全対策はかなり具体化されるという利点がある。同時に、本文に記述した土質力学的モデルは流域斜面上

の森林の保全的取り扱いに関しても明確な指針を与えるものと思われる。

1. 根の混生した土のせん断強さ

Coulombの法則に依ると、粘着力を有する土のせん断強さ(s)は(1)式で与えられる。

$$s = \sigma \tan \phi + c \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 σ はせん断破壊面の有効圧縮応力または直応力、 ϕ は土の内部摩擦角、 c は単位粘着力である。

遠藤・鶴田⁶⁾は根の混生する土のせん断実験を行い、根の混生する土の粘着力 c は土そのものの粘着力(c_s)と根に基づく粘着力の増加分(c_R)との和となることを示した。

$$c = c_s + c_R \quad \dots\dots\dots(2)$$

また、遠藤¹²⁾はせん断面の根の断面積合計値とせん断強さとの間に、次の実験式を得た。

$$s = a\sigma + bD + c \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 s と σ とはせん断面積 $1/4\text{m}^2$ あたりのせん断強さ(kg)、と圧縮応力(kg)、 D はせん断面の根断面積合計(cm^2)、同じく、 c は土の粘着力(kg)を表わす。せん断面を 1m^2 あたりに換算した時の実験定数値 a 、 b および c の各値は、 $a=0.765$ 、 $b=41.5(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、 $c=38(\text{kg}/\text{m}^2)$ である。

$\sigma_s = c_s \cot \phi$ および $\sigma_R = c_R \cot \phi$ と定義する

と、 c は(4)式のように表わされる。

$$c = (\sigma_S + \sigma_R) \tan \phi \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって、根の混生する土のせん断強さは(5)式のように表わされる。

$$s = (\sigma_S + \sigma_R + \sigma) \tan \phi \quad \dots\dots\dots (5)$$

記号の説明

Z = せん断層の厚さ

X = 根の水平方向の偏位

θ = せん断のねじれ角

t_R = 根の引張強さ

τ = 根の表面摩擦

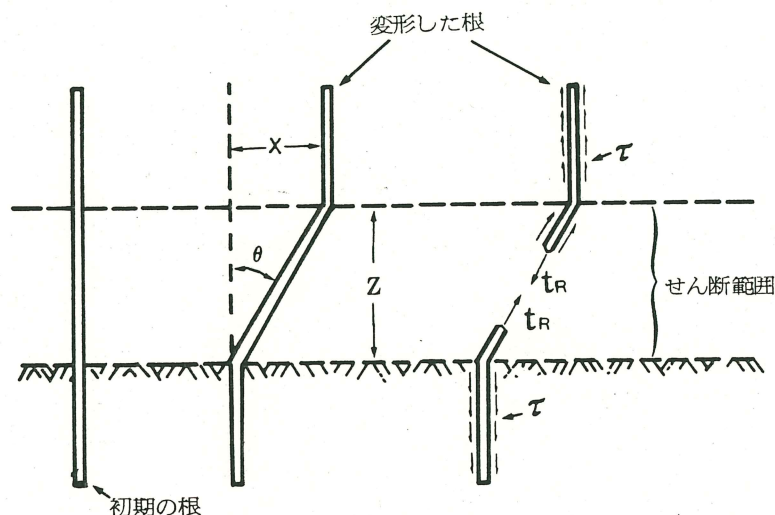


図-1 根の土質強化モデル (Wu) 原図)

着力 (c_R) の増加として表わされ、この場合の c_R は(6)式のように表わされる。

$$c_R = t_R (\cos \theta \tan \phi + \sin \theta) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 c_R は根に基づくせん断強さの増加分、 θ はせん断のねじれ角、 ϕ は土の内部摩擦角、 t_R は土の単位面積当りの根の平均引張強さである。

Wu に依ると、 $20^\circ \leq \phi \leq 40^\circ$ 、 $40^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ という条件に対して、(6)式の括弧の項は0.92～1.31の値となる。この変動範囲の中央値を括弧の項の最確値と仮定すると、根の混生によるせん断強さの近似的増加分は(7)式から推定される。

$$c_R = 1.12 t_R \quad \dots\dots\dots (7)$$

BarroughsとThomasに依ると、根の引張抵抗は根径の太さと伐採後の経過年数とによって変化する。BarroughsとThomas¹⁴⁾の報告中の資料を用いて根径と引張抵抗との関係を数式で表わすと、(8)式のようになる。

$$F = m D_0^n \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 F は皮部を除いた根径 D_0 (mm) に対する引張抵抗 (kg) である。 m と n とは実験定数で、これらの定数値は伐採後の経過年数によ

2. 根粘着力の略算式

図-1 は Wu の提示した根混生の土質力学的モデル¹³⁾を示す。このモデルに依ると、根に働く引張力は水平・垂直の2成分に分解される。そして、この引張力はせん断抵抗力または根粘

って変化する。ダグラスモミの場合、伐採直後の $m=121.08$ 、 $n=1.720$ 、伐採して12年経過した根の $m=81.30$ 、 $n=1.603$ である。

また、ダグラスモミの皮部を除いた生根径2mmの引張強さは 231 kg/cm^2 、同じく生根径10mmのそれは 151 kg/cm^2 、生根径0～10mmに対する平均の引張強さは 192 kg/cm^2 である。¹²⁾(3)式中の実験定数 b の値は 41.5 kg/cm^2 で、この値は皮付きの根断面積 1 cm^2 あたりの引張強さを示すが、この値はダグラスモミの引張強さのおよそ1/5である。せん断実験のときの観察によると、実際に切断する部位はせん断面の根ではなく、もっと先端の方の部位の細根であった。したがって、せん断面の根の引張強さを採用すると、(7)式は実際より過大となるように思われる。

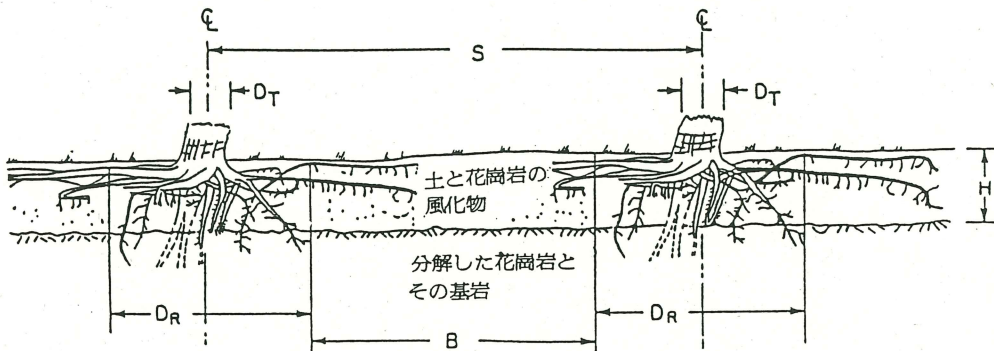
3. 根杭の太さ

GrayとMegahan¹³⁾は林地斜面上の樹幹および根部間の空間的關係を図-2のように記述した。

この図で、単木の根部を1本の円柱杭と見做し、この根円柱杭(以下は根杭と呼ぶ)の直径(D_R)は、その樹木の胸高直径(D_T)の5倍と

記号の説明
 S = 樹木間の中心距離
 D_T = 胸高直径

D_R = 根円柱杭（根杭）の直径
 B = 根円柱杭（根杭）間の間隔
 H = 風化土層の厚さ



図－2 樹幹および根杭間の空間的關係（Gray & Megahan 原図）

定義している。

$$D_R = 5 D_T \quad \dots\dots\dots (9)$$

遠藤・工藤は崩壊斜面上に残留している伐根調査を行い、単木根部の崩壊抑止面積と伐根径との関係を(10式)のように表わした。

$$A = 0.44 D_s - 4.1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 A は単木根部の抑止面積(m^2)、 D_s は地上高50cmにおける伐根直径(cm)である。

(10式から略算すると、20～100 cmの伐根径に対する D_T の係数は12～6となる。

4. 土アーチ作用理論

樹木の山崩れ防止作用には網および杭に類似した2つの作用があると言われてきた。樹木の網状作用は、露岩地に広く施工されている金網被覆工の金網の作用を思い出せばよい。

大小の岩塊の堆積斜面では、樹根が岩塊に縦横に巻きついていることが多い。このような斜面は本来、岩塊の崩落・堆積によって斜面が形成され、その後に樹木が定着・生育したものであるが、ひとたび森林が成立すると、強靱な根が網状に発達して岩塊表面を覆い、その下降移動を抑止するようになる。ここで言う樹木の杭状作用とは、斜面に深く打ちこまれた1本の杭が斜面下方に向う土圧力に抵抗して上部斜面の安定を保持している作用に喩えたものである。

WangとYenは、斜面上の等高線ぞいに打設された単列杭群の各杭には静止の土圧力とアー

チ圧力との2種類の荷重が加わるという、土アーチ作用の理論を発表した。この理論は、樹木の山崩れ防止作用に関する杭状作用に新たな理論を追加したもので、今後大いに検討・評価すべき理論であると思われる。以下に、その概要を述べる。

図－3(a)は斜面上の等高線ぞいに打設された単列の円柱杭群の平面図である。各杭は不動の基岩中に深く打ちこまれているものとする。この図で、 d は杭または根杭の直径、 B は杭と杭または根杭と根杭との間の空間距離を表わす。図－3(b)は図－3(a)に示した断面A-Aの側面図である。斜面の傾斜角は i 、滑動面は基岩と土層との境界面であると仮定する。

土アーチ作用の始点から傾斜面に沿って斜面上方に垂直に測った距離 x における土層の深さを H で表わす。図－3(c)は距離 x だけ離れた地点における dx という斜面長、単位幅の土柱体に作用する力とそれらの作用方向とを示す。この微小土柱体に働く力の平衡関係は(11式)で表わされる。

$$P + F - (P + dP) - R_1 - R_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 P は全圧力、 dP は dx 離れた断面の全圧力の増加分である。そして、(11式)の各項は次のように定義される。

$$P = pBH$$

$$F = W \sin i = \gamma BH \cos i \sin i \, dx$$

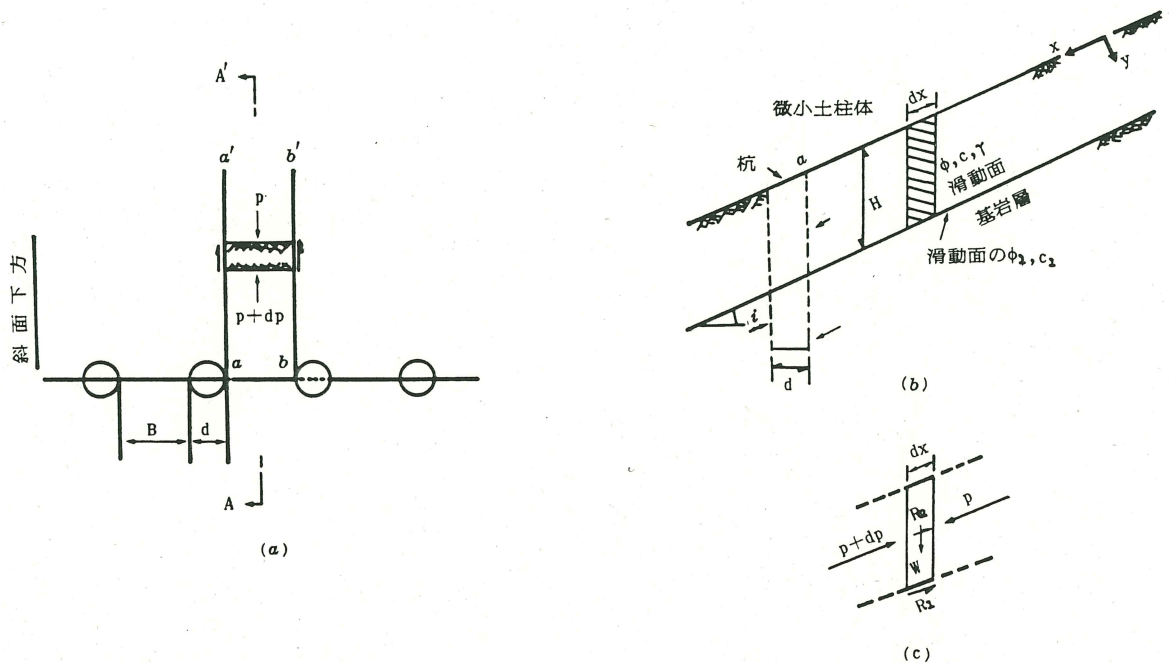


図-3 斜面に打設された単列杭群の説明図, (a) 平面図, (b) 縦断面図, (c) 力学的要素 (Wang & Yen原図)

$$dP = dp BH$$

$$R_1 = \gamma BH \cos^2 i \tan \phi_1 dx + c_1 B dx$$

$$R_2 = 2(\gamma H^2 / 2 \cos i dx + pH \cos i dx) K \tan \phi + 2cH \cos i dx$$

ここで, p は平均圧力, γ は湿潤土の単位容積重, ϕ と ϕ_1 とは土層および滑落面の内部摩擦角, c と c_1 とは土層および滑落面の粘着力で, 根系を混生するときには根系による粘着力の増加分を含むものとする。 K は静止土圧係数で, $1 - \sin \phi$ を採用する。

上述の各項を(11)式に代入して整理すると,

$$\frac{dp}{dx} + K_1 p = K_2 \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\text{ここで, } K_1 = 2K/B \cos i \tan \phi$$

$$K_2 = \gamma \cos i \sin i - (K \gamma H / B \cos i \tan \phi + 2c / B \cos i + \gamma \cos^2 i \tan \phi_1 + c_1 / H)$$

積分の境界条件は, $x = 0$ のとき, $p = K \gamma$

$H/2$ である。したがって, (12)式の解は次のようになる。

$$p = \frac{K_2}{K_1} (1 - e^{-K_1 x}) + \frac{K}{2} \gamma H e^{-K_1 x} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$B/H = m$, $x/B = n$ と置くと, (13)式は(14)式のような無次元化された式に書き改められる。

(14)式に依ると, 杭と杭との間に発生する平均アーチ圧力 p は斜面上方に向って静止の土圧力の大きさに等しくなるまで指数的に増大する。また, その他の条件が同じならば, このアーチ作用は ϕ , ϕ_1 , c および c_1 の値の増加に比例して顕著となる。

(14)式に依ると, 同一斜面での p の値は杭の空間距離 B およびアーチ作用端からの距離 x に依って変化する。空間距離が広すぎるとアーチ作用は発達しないので, この作用の現われる空間距離の限界が問題となる。アーチ作用がなければ, p は n と無関係となる。したがって, $\frac{\partial p}{\partial n} =$

$$\frac{p}{\gamma H} = \frac{\left(m \cos i \sin i - K \cos i \tan \phi - \frac{2c}{\gamma h} \cos i - m \cos^2 i \tan \phi_1 - \frac{c_1}{\gamma H} m \right)}{2K \cos i \tan \phi} \times (1 - e^{-2Kn \cos i \tan \phi}) + \frac{1}{2} K e^{-2Kn \cos i \tan \phi} \quad \dots\dots\dots(14)$$

0のときのmの値を求めると、このときの $m = m_{crt}$ はアーチ作用の発生に必要な空間距離の限界を表わす。(14式を n について偏微分し、限界間隔について解くと、 m_{crt} は(15式)で与えられる。

$$m_{crt} = \frac{HK(K+1)\tan\phi + \frac{2c}{\gamma}}{\cos i(\tan i - \tan\phi) - \frac{c_1}{\gamma H \cos i}} \quad \cdots(15)$$

崩落土の厚さまたは深さ H の斜面に打設された直径 d の一本の杭に作用する総圧力(P)は(16式)で与えられる。

$$P = \frac{K}{2} \gamma H^2 d + \left(\frac{K}{2} \gamma H - p \right) BH \quad \cdots(16)$$

各杭に加わる荷重は2つの荷重の合計となり、その一つは杭の上部の静止の土圧で、これは擁壁に加わる側圧と同様な力である。もう一つの力は、各杭がアーチダムのせり台のような役割をなし、隣接する杭に転移する土アーチ圧力である。平均アーチ圧力 $p = 0$ のとき、アーチ作用は最大となる。アーチ作用が十分に発達するために必要な n の値は、大体5～6である。 n が6より大きければ、指定された杭の間隔を有する斜面は長いと見做される。

以上は単列杭群に発生する土アーチ作用理論を説明したが、この理論を個々の斜面に生育する樹木群に適用すると、根杭の太さに応じた樹幹の限界空間距離が定まり、これに依って林地斜面の安定保全のための林木配置の原則が得られることになる。

5. 山地斜面の安定解析

5.1 安定係数の計算式

図-4は無限長斜面モデルを用いた樹木の生育する斜面の安定解析のための説明図である。斜面の傾斜方向およびこれと直角の2方向に x ・ y 軸をとる。斜面の傾斜角は i で、土層の下

$$s = (\sigma_s + \sigma_r + \sigma) \tan \theta$$

$$= \{ \sigma_s + \sigma_r + [q + \gamma H_u + (H_w - Z)(\gamma_s - \gamma_w)] \cos^2 i \} \tan \theta \quad \cdots(20)$$

したがって、 F は(21式)のように表わされる。

そして、 $Z \leq H_w$ の条件のもとで、最大のせん断応力は $Z = 0$ の面に作用し、この場合の F の

方には地表面と平行に基岩層が存在するものと仮定する。また、基岩面から上方鉛直に測った土層の深さと地下水の深さをそれぞれ H および H_w 、同じく土層内の任意の深さの位置を Z で表わすことにする。 q は地上に群生する樹木の単位斜面長あたりの重量で、斜面に鉛直に作用する立木荷重である。

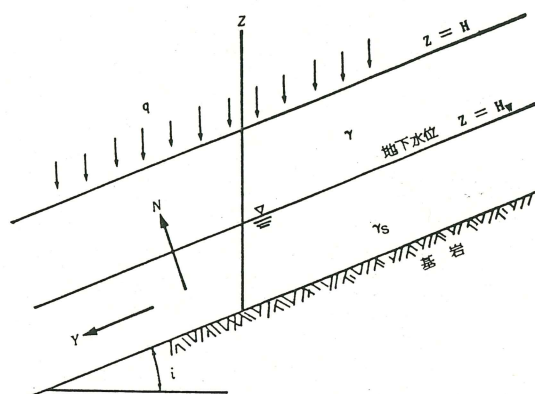


図-4 安定解析のための無限長斜面モデル
(Brown & Sheu原図)

$Z \leq H_w$ の深さの面に作用する単位斜面長あたりの土柱体重量と立木荷重とに基づくせん断応力を τ 、有効圧縮応力を σ で表わすと、

$$\tau = [q + \gamma H_u + (H_w - Z)\gamma_s] \sin i \cos i \quad \cdots(17)$$

$$\sigma = [q + \gamma H_u + (H_w - Z)(\gamma_s - \gamma_w)] \cos^2 i \quad \cdots(18)$$

ここで、 H_u は地面と地下水面との間の垂直距離で $(H - H_w)$ 、 γ は湿潤土の単位重量、 γ_s は飽水土の単位重量、 γ_w は水の単位重量である。

$Z \leq H_w$ の深さの面におけるせん断強さに対する安全係数を F で表わすと、 F は(19式)で与えられる。

$$F = \frac{s}{\tau} \quad \cdots(19)$$

(4式)の s は次のように表わされる。

値は、無次元表示をすると、(22式)で与えられる。

(22式)は(23式)のように書き改めることができる。

$$F = \frac{\left[\frac{\sigma_s + \sigma_R}{\cos^2 i} + q + \gamma H_u + (H_w - Z)(\gamma_s - \gamma_w) \right] \frac{\tan \phi}{\tan i}}{q + \gamma H_u + (H_w - Z) \gamma_s} \dots\dots\dots (21)$$

$$F = \frac{\left[\frac{(\sigma_s + \sigma_R)}{\gamma_w H \cos^2 i} + \frac{q}{\gamma_w H} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{H_w}{H}\right) + \frac{H_w}{H} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) \right] \frac{\tan \phi}{\tan i}}{\frac{q}{\gamma_w H} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{H_w}{H}\right) + \frac{\gamma_s H_w}{\gamma_w H}} \dots\dots\dots (22)$$

$$F = \frac{\frac{2(c_s + c_R)}{\gamma_w H \sin 2i} + \left\{ \frac{q}{\gamma_w H} + \frac{(\gamma_s - 1)}{\gamma_w} M + \frac{\gamma}{\gamma_w} (1 - M) \right\} \frac{\tan \phi}{\tan i}}{\frac{q}{\gamma_w H} + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} M + \frac{\gamma}{\gamma_w} (1 - M)} \dots\dots\dots (23)$$

ここで、Mは地下水比高で、 $\frac{H_w}{H}$ である。

(23)式はBrownとSheuの提示した根系を含む土層のせん断強度に対する安全係数の計算式である。GrayとMegahan¹³⁾は(22)式を(23)式のように書き改め、この式を用いてアイダホ州内の特定土壌からなる斜面の安定に関与する各因子の感度分析を行っている。

5.2 各変数の中央値と上・下限値

1981年8月5日、北海道南東部の日高地方に記録的な集中豪雨が降り、その中心と思われた門別町豊郷・清畠の両地区の丘陵北山地の斜面に大小多数の崩壊が発生した。これらの地区の林地崩壊に関しては現地調査の資料があり、また、過去において実施した崩壊調査の資料もあるので、本文での斜面安定に関与する諸因子の感度分析は上述の林地斜面を対象とする。

(22)式または(23)式を用いて、災害地斜面の安全係数の概数値を求めるためには各因子の量的数値を知る必要がある。(22)式または(23)式に含まれる因子の数は σ_s と σ_R または c_s と c_R 、 ϕ 、 i 、 γ 、 γ_s 、 γ_w 、 q 、 H 、 H_w の10であるが、 γ_w は既知定数であるので、変数的因子(X_i)の数は9となる。当該山地に関する各変数の上・下限値と中央値は現地調査の資料および既往の林地崩壊に関する調査資料^{3), 4), 7)}などを用い、以下のように推定する。

(1) c_s の値

正確な値は不明であるが、土の母材は新第3紀の礫岩、砂岩、泥岩および凝灰岩等で、これらの風化生成物に火山砂が混合したものである。したがって、土の単位重量は軽軟で砂質分に富

むので、 c_s の値の範囲は0～1,000kg/m²、中央値は350kg/m²を仮定する。

(2) c_R の値

根による粘着力の増加分 c_R の値は、明確な根拠はないが、遠藤・鶴田の実験値⁶⁾を採用して、その上・下限値の範囲は0～1,200kg/m²、中央値は400kg/m²を採用する。

(3) ϕ の値

崩壊斜面の現地調査、崖錐斜面の傾斜角および根系をふくむ土のせん断実験の結果、乾燥細砂の安息角などを考慮して、 ϕ の値は28～42°、その中央値は35°と仮定する。

(4) i の値

崩壊斜面の傾斜度に関しては既往の調査資料に基づき、25～55°、その中央値は40°とする。

(5) γ および γ_s の値

崩落土塊のなかには立木をのせたまま盤状体となって数十m、時には百m近く流下したものも見受けられた。’81年10月、崩壊斜面からおおよそ百mほど下流に流出した盤状土塊の現地調査を行った。調査土塊の数は2つで、面積は22(約4×6m)m²と65(約6×11m)m²である。土層の厚さは約51cmであった。一緒に流出した立木の胸高直径は2～6cm、樹高は3～6mで、このほかに胸高直径24cm、樹高が13.4mのカラマツもあった。

流出土塊の断面構造は以下のとおりである。

地表面から下方に向って、0～4cmはL.F層で崩積土を混入。3～13cmは弱い団粒構造で暗黄色、粗しょう。13～19cmは粒径1mmの火山灰

表－１ 崩壊土層の深さ別採取時重量

深 さ cm	有 効 深 cm	標本表面積 cm ²	採取時重量 kg	1 立米あたりの 採取時重量 kg : m ³	1 平米あたりの 採取時重量 kg : m ²
0～19	19	71×60	71.4	882	167.6
19～32	13	76×57	55.6	987	128.3
32～51	19	77×53	88.0	1135	215.6
					511.5

の風化物で暗褐色，無構造で太根が密生。19～35 cm は粒径 3 mm 以下の火山砂で無構造，淡褐色で少量の根系を含む。35～48 cm は新第 3 紀層堆積岩の風化生成物，砂まじりの粘土で黄褐色，僅かに太根を含み，細根は僅少。表－１に調査土塊の深さ別の採取重量を示す。1 m³ あたりの重量は比較的軽く，882～1,135kg/m³ である。

これとは別の崩壊斜面につづく林地で深さ 10～50 cm の範囲の土壤資料を採取し，採取時，飽水時およびその 48 時間後の重量を測定した。その結果，採取時重量は 1,197kg/m³，飽水時重量は 1,518kg/m³，48 時間後の重量として 1,392kg/m³ の測定値を得た。これらの実測値を参考として， γ の値は 1,000～1,400kg/m³，その中央値は 1,200kg/m³， γ_s の値は 1,400～1,700kg/m³，その中央値は 1,550kg/m³ を採用する。

(6) q の値

立木荷重は樹体重量であり，樹体重量は地上部と地下の根系部とに大別できる。地上部の樹体は，重量推定の便宜上，幹，枝および葉の 3 つの部分に区分する。

菊沢・浅井・福地¹⁰⁾の北海道日高地方の落葉広葉樹林の現存量調査資料および猪瀬のウダイカンバ¹¹⁾の幹・枝・葉の幹重現存量の調査資料を参考とし，幹・枝・葉の乾重現存量の比率は大略 80 : 18 : 2，幹と枝葉とのそれは大略 80 : 20 と仮定する。

樹皮付き幹材と地下部との乾重現存量の比率は 3 : 1 と仮定する。そして，上述の乾重現存量の比率または割合は生立木にもあてはまるものとする。

生立木樹幹の比重は各樹木の含水率によって異なるが，⁵⁾ 蕪木の資料を参考にして，広葉樹種

は 850kg/m³，トド，エゾマツは 750kg/m³ を採用する。

最後に，ha あたりの広葉樹立木材積に 1.34t/m³（立木材積 1 m³ の幹・枝葉・根を含む現存容積の推定値 1.58m³ × 広葉樹生容積比重 0.850t/m³）を掛けて ha あたりの立木荷重を求め，次に 1 m² あたりの q の値を算出した。

日高振内地方の ha あたりの立木材積は松井・篠原^{1), 2)}によると，胸高直径が 4～10 cm の小径木のナラ林分では 135.2 m³/ha と 161.8 m³/ha という例がある。災害地付近の林相は広葉樹二次林で，100～150m³/ha 程度の林地が多く，350 m³/ha 以上の優良林地は少ないように思われる。ただし，崩壊面積程度の小面積を考えると，q の値はもっと大きい場合もある。皆伐林地または幼令造林地の q の値は僅少で，無視できる程度のもとなる。したがって，立木材積は 0～500m³/ha と仮定し，q の値の範囲は 0～65kg/m² その中央値は 150m³/ha の 20kg/m² とする。

(7) H の値^{3), 4)}

既往の調査に依ると，崩壊土層の厚さはおおよそ 30～90 cm，平均すると 50 cm 程度であることが知られており，'81 年 10 月の調査でも大体同様であった。崩壊土層の深さは斜面に垂直に測定した値であるので，崩壊斜面の平均傾斜角を 40° と仮定し，H の値の範囲は 0.40～1.20 m，その中央値は 0.65 m とする。

(8) H_w の値

急斜面内の浅層地下水位の形成とその昇降については野外調査の資料が少なく，確かなことは不明である。浅層地下水位は斜面上の位置，斜面の形状と長さなどによって異なるが，最も危険な場合を想定し，H_w は 0～H まで変化し，

その中央値は0.1Hとする。したがって、Mの値は0～1，その中央値は0.1と定める。

以上に説明した各変数の範囲と中央値とを要約して表－2に示す。

表－2 各変数の範囲と中央値

入 力 変 数	範 囲	中央値
樹木に影響されない変数		
ϕ (°)	28～42	35
i (°)	25～55	40
H (m)	0.40～1.20	0.65
γ (kg/m ³)	1000～1400	1200
γ_s (kg/m ³)	1400～1700	1550
c_s (kg/m ²)	0～1000	350
樹木に強く影響される変数		
q (kg/m ²)	0～65	20
c_R (kg/m ²)	0～1200	400
M	0～1.0	0.1

5.3 各変数の感度分析とその結果

表－2に示した各変数の中央値と上・下限値の範囲内の任意の変数値を用い，これらの値を(23)式に代入して各変数のFの値におよぼす感度分析を行った。このための計算は5段階に分けて行う。

まず，(1)入力変数の上・下限値と中央値とを入力する。(2)各変数の中央値を代入して基本安全係数値(F_0)を求める。(3)試算しようとする変数にその範囲内の任意数値(X_i)を与え，残余の変数には各変数の中央値を代入し， X_i に対する安全係数値(F_{xi})を求める。(4) F_{xi} と F_0 との差分の F_0 に対する百分率値 $\pm\Delta F(\%)$ を求める。各変数の中央値と下限値または中央値と上限値との間を100等分し，中央値より X_i までのへだたりの百分率値 $\pm\Delta X_i(\%)$ を求め， $\pm\Delta F(\%)$ と $\pm\Delta X_i(\%)$ とを

ΔF ： 安全係数の変化百分率

H： 土壌の深さ

c_s ： 土壌の有効粘着力

c_R ： 根の粘着力

q： 立木載荷重量

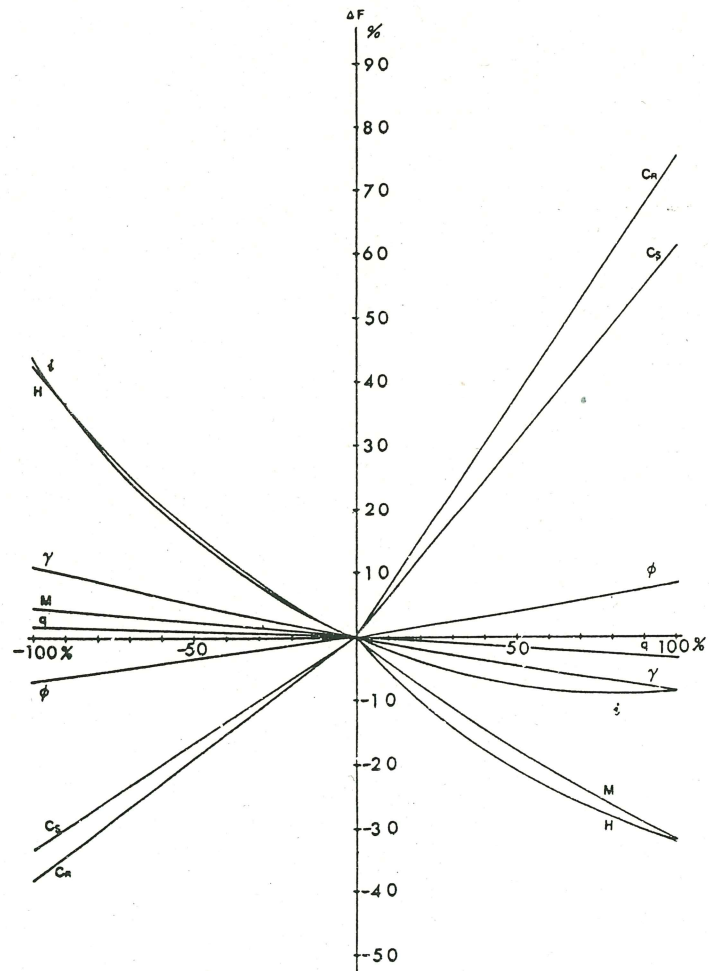
M： 地下水比高

γ ： 湿潤土壌の密度

γ_s ： 飽水土壌の密度

i ： 斜面の傾斜角

ϕ ： 土の有効内部摩擦角



図－5 各入力変数の変化率と安全係数の変化率との関係

ΔX_i (%)との関係を求める。表-2の推定中央値に対する基本安全係数値 F_0 は2.61である。以上の順序で分析した結果を図-5に示す。

図-5に依ると、傾斜度、土層の深さ、地下水位の増減に対して ΔF (%)は非直線的に変化し、他の因子は直線的に増減する。 X_i の減少によって ΔF の値がプラスとなるのは傾斜度、土層の深さ、地下水位、立木荷重および湿潤土壌の各因子である。土の粘着力、根系による粘着力の増加分および内部摩擦角が増減すると、各 ΔF の値は直線的に増減する。

9因子のなかで、 F の値に大きく影響するのは土の粘着力、根による粘着力の増加分、土層の深さ、地下水位および傾斜度である。

砂質土は一般に粘着力が小さく、時には無視できる程度のものである。遠藤・鶴田の実験結果によると、よく耕耘された土の粘着力は 35 kg/m^2 で、幼令林の根による粘着力の増加分は $200 \sim 1,200 \text{ kg/m}^2$ である。このように、粘着力の小さな土に対する樹根の効果は非常に大きく、樹木は急斜面の土層形成とその長期安定の主力となっているものと思われる。

立木荷重が減少すると、 F の値が高まり、反対に、増加すると F の値が減少する。しかし、この効果は僅少である。正常な樹木の根による粘着力の増加分の効果と比較すると、立木荷重の増加による F の値の減少は無視できる程度である。

6. 斜面安定のための施業指針

森林斜面の安定に関する2つの土質工学的理論を説明した。これらの理論によると、森林斜面の安定に関与する変数的因子は土層および滑動面の内部摩擦角(ϕ と ϕ_1)、土層および滑動面の土の粘着力(c_s と c_1)、根粘着力(c_R)、静止の土圧係数(K)、土壌の深さ(H)、立木荷重(q)、地下水比高(M)、湿潤土壌の密度(γ)、飽水土壌の密度(γ_s)、斜面の傾斜角(i)、樹幹距離、正確には根杭距離(B)および胸高直径(d)などである。

以上の変数的因子のうちで、明らかに森林の影響を受けているのは地下水比高 M 、 q 、 c_R 、

B および d である。

斜面安定のための施業指針は、以上の因子に着目して急斜面上の森林を取扱うことである。ここでいう急斜面とは、斜面の傾斜角が地山の土の内部摩擦角より大きな斜面のことである。

斜面に生育している林木の伐採は c_R の減少、 M の上昇、 q の減少となり、 B および d の消失となる。これらの変化による正味の効果は、斜面安定とは反対に作用することになる。ただし、皆伐による立木荷重の減少は安定を改善する方向に作用するが、その程度は無視できる程度のものである。その上、根粘着力が小さくて地下水位の高いところで立木荷重は斜面安定に有効に働く効果がある。

土アーチ作用理論によると、樹幹の間の土アーチ作用は土塊の下方移動の抑止に重要な役割を果たしている。皆伐で大径木を全部伐採することは、土アーチ作用を除去することになる。択伐作業でも、不注意な作業は皆伐作業と同じ結果となる。伐根株は一時的には抑止効果を維持するが、根株が腐朽すると、その部分は空隙となり、アーチせり台の役目を果たしてきた根株は斜面中の最も弱い場所となる。急斜面では土アーチ作用が有効に働くための立木本数とその配置が必要である。特に、斜面脚部には立木を積極的に維持し、造成することがのぞましい。

水源かん養保安林や崩壊防止林の斜面安定には排水工が効果的である。安価・簡易で持続する斜面排水工法の開発がのぞまれる。上記保安林の造成法を見ると、植栽・保育のしかたは一般造林と何ら変わるところがない。根を深く侵入させるための植栽とか深根性樹根の選択、土アーチ作用を発揮させるための工夫など、もっと改良すべきことが残されているように思われる。

文 献

- 1) 松井善喜・篠原久雄；日高地方のナラ林の経営．北方林業(4)，140—143，1952
- 2) 松井善喜；温帯北部火山灰地方の萌芽林の構成と生長．日林北支講(2)，75—79，1953
- 3) 遠藤泰造・鶴田武雄；火山噴出物をデーターとした過去350年間の山崩に関する研究．

- 林試北支場年報(1963), 262-280, 1964
- 4) 遠藤泰造・鶴田武雄; 植生および侵食からみた崩壊斜面の推移とその緑化に関する研究
(1) 林試北支場年報(1965), 197-209, 1966
- 5) 蕪水自輔; 木材材質の森林生物学的研究(12), 北海道野幌地方における造林木の生材含水量について. 林試研報(90), 77-108, 1966
- 6) 遠藤泰造・鶴田武雄; 樹木の根が土のせん断強さに与える作用. 林試北支場年報(1968), 167-182, 1969
- 7) 遠藤泰造・工藤哲也; 治山計画における危険度判定技術に関する研究. 国有林技開発報告(1973), 67-222, 1974
- 8) Wang, W.E., and Yen, B.C. ; Soil Arching in Slopes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE (100), 61-78, 1974
- 9) Brown, C.B., and Shou, M.S. ; Effects of Deforestation on Slopes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE (101), 147-165, 1975
- 10) 菊沢喜八郎・浅井達弘・北条貞夫; 広葉樹の現存量と生長量. 日林北支講(26), 55-57, 1977
- 11) 猪瀬光雄・小木和彦; ウダイカンバの生長モデル(2) - 樹冠表面積と材積生長量との関係一, 日林北支講(27), 28-30, 1978
- 12) Taizo Endo ; Effect of Tree Roots upon the Shear Strength of Soil. Trop. Agri. Resea. Center. JARJA9 14(2), 112-115, 1980
- 13) Gray, D.H., and Megahan, W.F. ; Forest Vegetation Removal and Slope Stability in the Idaho Batholith. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-271, 1981
- 14) 薄井五郎・成田俊司・清水 一・柳井清治; 日高地方における海岸段丘斜面の崩壊 - 根系の緊縛力一. 日林北支講(32), 294-296, 1984

研究レポート No.18

昭和63年 2月26日発行

編 集 林業試験場北海道支場
〒004 札幌市豊平区羊ヶ丘1
電 話 (011)851-4131