

初生地すべりの危険度判定手法に関する研究

久保田哲也*

平成4年6月30日受付

A Study on the Risk Assessment Method of Primary Landslides

Tetsuya KUBOTA*

The land development in mountainous areas here in Japan is geared to becoming wild driven by recent high demands for land use. In this context, a lot of hillsides and mountainsides have been developed these days as inhabited districts or mountain resorts which may end up with a ruin in sediment disaster.

Therefore, landslide susceptible areas are increasing, and landslide which occurs suddenly without any signs and can be found only by their unique topographies seems to be extremely important in order to predict susceptible areas. On this point of view, the standards to pick up the susceptible areas based on some topological or geological condition and detective method for this kind of landslide are considered here. And then, an estimative method using the Critical Slip Surface analysis by Dynamic Programming (CSSDP) combined with some standards factors of safety (Fc) gained from a probability density distribution of factors of safety is established. In Addition to it, the error which occurs due to the assumption of an unknown slope under ground condition (homogeneous slope) can be evaluated by the reliable analysis being made under estimation probability of susceptibility (P(F)).

Thus, the method gained in this study must be useful to estimate or evaluate the landslide susceptibility.

緒 言

日本列島は、激しい地殻変動にさらされており、その結果、脆い地質から成る急峻な山地が多い。その一方で、モンスーン気候に属し降雨量が多い上に、地震の多発する地域にもあたるので、このような誘因で発生する土砂

災害に極めて弱い体質を持っている。しかも、急激な経済発展の結果として、土地の高度利用に対する要求は、大変大きく、近年、丘陵や山地の開発が進み、土砂災害の危険性は増す傾向が見られる。とりわけ、一度発生すると、被害の範囲が大きく、被災する住民や資産の大きな地すべりあるいは大規模崩壊についての危険箇所や、

* 鳥取大学農学部生存環境科学講座

* *Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture, Tottori University.*

その危険度を知ることは、適正な土地利用を進めるために必要と考えられるので、その危険度判定手法の確立が望まれている。

一般に、土砂災害は、土砂の移動現象により引き起こされるものであるが、その発生機構や規模、移動のスピードなどから、土石流、地すべり(大規模崩壊を含む)、崖くずれなどに区別されている。この中で、移動する土砂の量や範囲が大きいことから、人命や資産に対する被害の大きいのは、地すべりと考えられる。

この被災の程度が大きい地すべりの中でも、特に、過去に移動したことの無い斜面で初めて発生する「初生地すべり」と呼ばれるものは、次のような特徴を持ち、危険箇所や危険度の判定が困難とされる。

a. 初生地すべりとは、過去に地すべりの発生していない斜面で発生するもので、渡りによれば、新鮮な岩盤や弱風化岩盤が断層・破碎帯の影響で脆弱な部分を持ち、地震や大雨に伴って急速に移動するものとされる。

b. 等高線の乱れや滑落崖、残土丘などの地形的特徴が見られず、発生前には、航空写真判読などによる発生危険箇所の判別が難しい。すなわち、地質構造や地形から、発生の危険性はある程度推定できるものの、どの斜面が危険なのか特定できない。

c. 発生履歴のない斜面に起きる初生地すべりは、後述するように発生する地すべり全体の40~60%の頻度を占めており⁹⁾、二次的に再移動する可能性のある危険箇所を判別しても、完全とは言えない。

d. これらは、一度発生すれば、その規模や運動量の大きいことから、緊急の対策工による制御が困難となるので、被害は大きいものとなる。

以上のように、初生地すべりは地すべり土塊の再移動や部分的二次移動による地すべりに比較しても発生の頻度が比較的高い上、その規模が大きく、発生場所の予測が難しいため、被害も大きくなる。つまり、社会的なインパクトが大きいので、これら初生地すべりに対する危険箇所を判別し、危険度を判定することは土砂災害を防止する上で極めて重要と考えられる。

ここでは、特に地すべり発生の多い、キャップロックなどの地質境界部の地形・地質要因による危険箇所判別と臨界すべり面解析法を使用した危険度判定を組み合わせ、これら初生地すべりの危険箇所判別及び危険度判定の手法を検討する。

臨界すべり面解析

臨界すべり面解析とは、与えられた地形地質、土質条件等を持つ斜面に対して最小の安全率を与える不動土塊

と移動土塊の境界面を種々の安全率計算法(例えばJANBU法や簡便分割法など)を用いて探索する手法の事である。初生地すべりのように前歴がなく、すべり面が明確でない現象の解析には有効である。変分法を用い、求積的に最小安全率を持つすべり面つまり「臨界すべり面」をもとめる手法もあるが、この手法では臨界すべり面は対数螺旋解としてのみ与えられ、任意形状の臨界すべり面すなわち真の意味での最小安全率を持つ境界面は得られない。

ここでは、最近発展の著しいDP(動的計画法)理論を用いて探索範囲内で任意形状の臨界すべり面が得られ、種々の地層構造に適し得る方法である臨界すべり面解析法CSSDP(Critical Slip Surface Analysis by DP)^{1),3)}を用いる。この手法による計算例を図1に示した。

臨界すべり面解析法(CSSDP)による危険箇所抽出法

CSSDPを用いて危険斜面を抽出する為には、すべり面の推定は不要であるが、土質条件や地下構造並びに地震力等誘因が判明していることが必要である。しかし、これらすべてを初生地すべりに対して既知とするには、多大な労力と時間が必要な為、できるだけ少ない情報量で

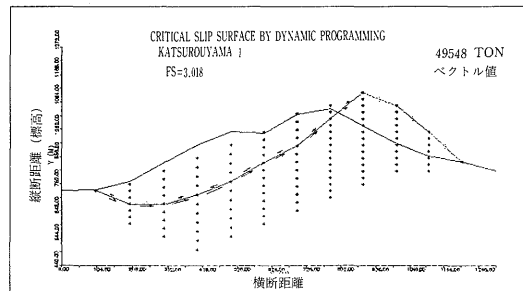


図-1 (a)栃木県葛老山

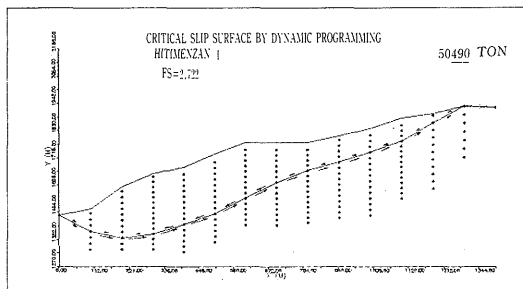


図-1 (b)山梨県七面山

図-1 CSSDPによる計算事例

得られた安全率を用い、危険度を判定することが必要となる。そのため、現状の地下水水位の上昇や地震力の付加など外力条件を与えない状態で、臨界すべり面解析を行って得た疑似安全率を用いて、ある種の基準安全率と比較することにより、危険度判定を行うことを検討した。

(1) 疑似安全率の頻度分布と基準安全率

本研究で対象とするのは初生地すべりであり、その発生外力条件やすべり面は不明である。そこで、地下構造を均質と仮定して臨界すべり面を計算し、しかも、外力の付加されない現状の安全率つまり、疑似安全率 F_{sp} を用いた危険度判定を行うのであるが、その為には基準安全率が必要であるから、疑似安全率の頻度分布よりそれを検討する。そこで、表1に掲げる土質調査の行き届いた全国の代表的地すべりの近傍斜面に対しCSSDPを実行し疑似安全率を求めたが、その頻度分布は図2のように、対数正規分布となる。その平均安全率の値は3.77、標準偏差 σ は1.65である。この分布のうち $F_{sp}=1.0\sim 2.5$ 近傍を取上げ、香港の例⁹⁾と比較したのが図3であるが、香港の例は本研究の計算結果とよく一致し、しかも、 $F_{sp}<1.5$ の斜面は存在しないことが分かる。

従って、以上から基準安全率は、 F_{sp} の σ を使用して平均値からの標準的なばらつきの下限値を表す基準安全率 F_{c1} と、地すべり未発生斜面の下限値に相当する $F_{sp}=1.5$ 使った基準 F_{c2} の2つを設定した。すなわち、

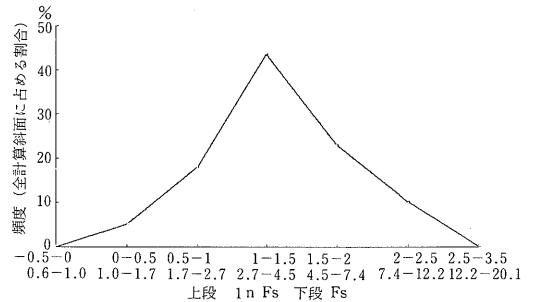


図2 疑似安全率の相対頻度分布 (対数グラフ)

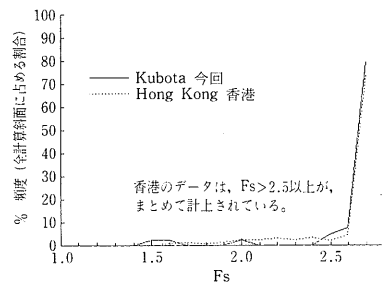


図3 今回の計算結果と香港の分布の比較

表1 事例斜面

名称	誘因	CSSDPによる計算Fs	対象斜面形
1. 栃木県葛老山	E	2.28	復元
2. 栃木県大薮	E	1.58	〃
3. 新潟県名立	E	1.74	〃
4. 長野県虚空蔵山	E	1.22	〃
5. 長野県御岳崩れ	E	1.21	発生前
6. 長野県松越	E	1.28	〃
7. 山梨県七面山	E	1.63	復元
8. 高知県怒田	P	1.29	地すべり中
9. 高知県八畝	P	1.31	〃
10. 長崎県眉山	E, V?	3.08	復元
11. 福島県いわき (久保田ら, 1986)	P	1.10	発生前, Morgenstern法

注) E:地震, P:降水, V:火山活動。

$$F_{c1} = F_{sp} - \sigma = 2.12 \div 2.0 \quad (1)$$

$$F_{c2} = 1.5 \quad (2)$$

また、ここでは均質地下構造の仮定の下にFspを計算しているから、斜面勾配がFspに影響している可能性があり、その場合はCSSDPの実行が無意味である。従って、これらの関係を見たのが図4である。これからは勾配の増加に伴いFspの減少傾向が見られるものの、両者に明確な関係は見られないことが分かる。

初生地すべり危険度の総合判定法

この節では、地質・地形要因からみた地すべり発生率による危険度⁴⁾と、CSSDPによる手法を組み合わせ、初生地すべりに対する危険度判定法を検討する。

(1) 危険度判定手順

まず、ここで述べる判定法では、図5のフローのように地形・地質因子別の地すべり発生率⁴⁾を用いて、危険箇所を抽出し、スクリーニングを行う。この図中でScは、スクリーニングに際しての初生地すべり基準発生率。地質地形要因としては、既往の研究⁴⁾より、地質(地層または岩種)と斜面勾配が重要であることが分かっており、それら要因別発生率をSとし、Scとしては、発生率が全斜面の半数以上となれば考慮すべき危険度と考え、50%とした。一方、当該地区で最高のSを有する地質のものはフロー図5に従い、Scにかかわらず、CSSDPを使用した精査の必要性を検討する。

次に、抽出した箇所(斜面)に対し、CSSDPを適用してFspを求める。

(2) 危険度ランク

危険度のランクは、当研究が地質境界周辺に対応することを考慮し、基準安全率の定義などより、次のようなランク分けをするのが良いと思われる。

$$S \leq Sc \quad \text{ランク C} \quad \text{危険度低}$$

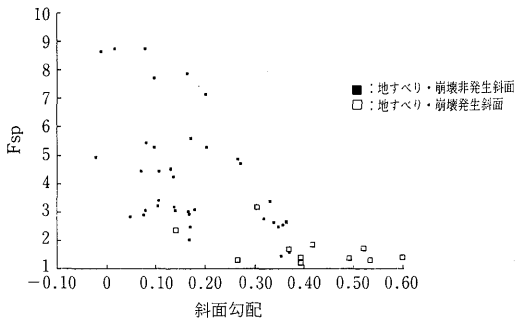


図4 斜面勾配とFsp(疑似安全率)の関係

当該地区のSの最高値を持つ地質のもの及び、
S > Scのもの及び、地質境界部で勾配別発生率が最大でないもの

- // B₃危険度中低
- Fs > F_{c1} // B₂危険度中
- F_{c1} ≥ Fs > F_{c2} // B₁危険度中高
- F_{c2} ≥ Fs // A 危険度高

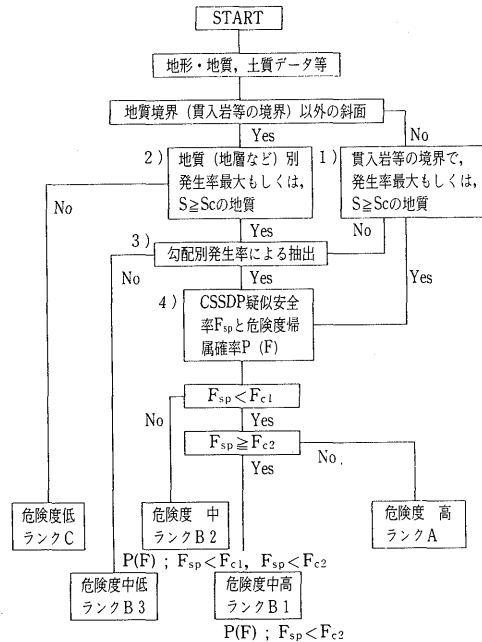
ランクCの斜面は、地形・地質的に見て危険度の低いもので、精査の必要はない。

ランクB₃の斜面は、地質的に見て多少危険のあるものの、精査の必要はない。

ランクB₂の斜面は、斜面の一般的な安全率のばらつきを考慮しても平均よりは大きな安全率を持ち、大きな危険度は持たない。

ランクB₁の斜面は、斜面の一般的な安全率のばらつきを考慮すると、平均よりは安全率は小さいものの、それは未発生斜面安全率の下限であるF_{c2}よりも大きいので、危険であるが 極めて危険ではない。

ランクAは未発生斜面安全率の下限を下回る安全率しか持たないので、極めて危険な斜面である。



ここで、S: 発生率, Sc: 基準発生率, F_{c1}, F_{c2}: 基準安全率 P(F); F_{sp} < F_{ci} (i=1,2): 基準安全率を下回る錯誤の確率。

図5 危険度判定フロー

疑似安全率の信頼性と危険度区分の信頼性

(1) 信頼性解析

一般に、安全率Fsを計算するに際しては、その時の地下水水位や地震力など外力ならびに土質強度の空間的、時間的ばらつきが存在することを念頭に置かねばならないが、外力については、各地点、各時間における値を計算や実測により求めて用いるので、実際上ばらつきのないものとして取り扱える場合が多い。しかし、土質強度については、場所毎に強度が異なる上に、土質試験をどの場所にも実行して確定することは困難である。このことから、地すべりに対する抵抗力を計算するのに必要な土質強度には、その代表値を用いるのが通常であり、この代表値もしくは平均値を用いる信頼性の評価が必要となる。この信頼性を評価する手法は、信頼性解析と呼ばれ、外力や土質強度のばらつき、つまり、滑動力や抵抗力のばらつきを分散や変動係数で表現することにより、計算されるFsの信頼性を評価して行くものである。

ここで、評価すべきものは、土質強度に平均値を用いた計算でFs ≥ 1と判断されたにもかかわらず、Fs < 1となる確率であり、滑動力をD、抵抗力をRとするとFs = R/Dとなるので、R/D < 1すなわちR < Dなる確率Prob(R/D < 1)を求めて評価を行う。この際、R < Dと同義のR - D < 0の確率Prob(R - D < 0)を求めるのが信頼性解析のような不等式の真偽を確認する場合の常套手段となっている。

今、R - D = t'とおくと、RとDがある値R_i、D_iを取り、あるt'の値t'_iを生じる確率Prob.(t' = t'_i)は、

$$\text{Prob.}(t' = t'_i) \propto \text{Prob.}(R = R_i \cap D = D_i) \quad (3)$$

RとDは、一般的に独立な事象と見なせるから⁸⁾、確率の法則より

$$\text{Prob.}(t' = t'_i) \propto \text{Prob.}(R = R_i) \cdot \text{Prob.}(D = D_i) \quad (4)$$

もし、RもDも自然現象に普遍的な正規分布をしているとすると、Γ()を正規確率密度関数(PDF)として、

$$\begin{aligned} \Gamma(t' = t'_i) &\propto \Gamma(R = R_i) \cdot \Gamma(D = D_i) \\ &= [\exp\{-(t - \bar{R})^2/2\sigma_R^2\}/(2\pi\sigma_R)^{1/2}] \\ &\quad \times [\exp\{-(t - \bar{D})^2/2\sigma_D^2\}/(2\pi\sigma_D)^{1/2}] \\ &= \exp\{-(t - \bar{R})^2/2\sigma_R^2 - (t - \bar{D})^2/2\sigma_D^2\}/2\pi\sigma_R\sigma_D \\ &= \text{正規分布型} \quad (5) \end{aligned}$$

σ_R、σ_Dはそれぞれ抵抗力、滑動力の標準偏差、 \bar{R} 、 \bar{D} 、R、Dの平均。tは確率変数。従って、Γ(t' = t'_i)も正規分布型に近い確率分布をすと思われる。

そこで、もし、R - D = t'が正規分布をするとすれば、図6(a)よりRがDより、小さいつまり、地すべりが発生する確率は、R - D < 0となる確率Prob(R - D < 0)で

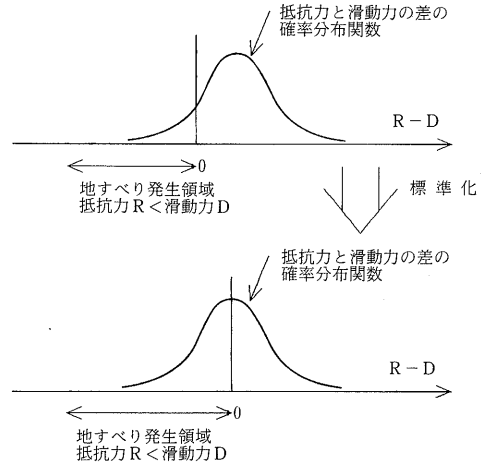


図6 (a)抵抗力と滑動力の差の確率分布説明図

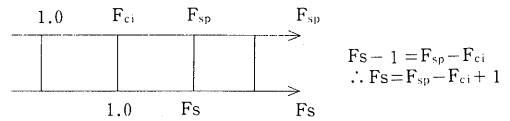


図6 (b)F_{sp}とFsの関係説明図

あり、次式で表わされる。

$$\text{Prob}(R - D < 0) = P(F) = \int_{-\infty}^0 \Gamma(t') dt', \quad t' = R - D \quad (6)$$

これを図6(a)のように標準化すれば、 $t = \{(R - D) - (\bar{R} - \bar{D})\} / \{\text{Var}(R - D)\}^{1/2}$ として、地すべりが生じる確率P(F)は、

$$P(F) = \int_{-\infty}^{t(R=D)} \Gamma(t) dt = \int_{-\infty}^{-\beta} \Gamma(t) dt \quad (7)$$

βは、信頼性解析において、信頼性指数と呼ばれているものであり、

$$-\beta = t(R = D) = -(\bar{R} - \bar{D}) / \{\text{Var}(R - D)\}^{1/2} \quad (8)$$

$$\beta = (\bar{R} - \bar{D}) / \{\text{Var}(R - D)\}^{1/2} \quad (9)$$

ここで、t'は標準化する前の正規確率変数、tは標準正規確率変数、Var()は分散。RとDは前述のように独立な事象とみなせるから、

$$\bar{R} - \bar{D} = \bar{R} - \bar{D} \quad \text{かつ}$$

Var(R - D) = Var(R) - Var(D) となり、(9)式は、次のようになる。

$$\beta = (\bar{R} - \bar{D}) / \{\text{Var}(R) - \text{Var}(D)\}^{1/2} \quad (10)$$

ここで、 D_g を重力による滑動力、 D_e を外力(地下水圧、地震力)によるものとする、 D_g 、 D_e は独立とみなせるから、ここでは

$$D = D_g + D_e, \\ \text{Var}(D) = \text{Var}(D_g) + \text{Var}(D_e) = \sigma_{D_g}^2 + \sigma_{D_e}^2 \quad (11)$$

だから(10)式は、

$$\beta = \{ \bar{R} - (\overline{D_g} + \overline{D_e}) \} / (\sigma_R^2 - \sigma_{D_g}^2 - \sigma_{D_e}^2)^{1/2} \\ = \{ \bar{R}/\overline{D_g} - 1 - (\overline{D_e}/\overline{D_g}) \} / \{ (\sigma_R^2/R^2) (\overline{R^2}/\overline{D_g^2}) \\ - (\sigma_{D_g}^2/\overline{D_g}^2) - (\sigma_{D_e}^2/\overline{D_e}^2) (\overline{D_e}/\overline{D_g})^2 \}^{1/2} \quad (12)$$

ここで、 σ_{D_g} 、 σ_{D_e} は、それぞれ重力、外力による滑動力の標準偏差、 $\overline{D_g}$ と $\overline{D_e}$ は D_g と D_e の平均値。

ところが、 F_s を通常の安全率として

$\overline{F_s} = \overline{R}/\overline{D} = \overline{R}/(\overline{D_g} + \overline{D_e})$ 、 $\overline{F_{sp}} = \overline{R}/\overline{D_g}$ であり両者の比より、

$$\overline{D_e}/\overline{D_g} = (\overline{F_{sp}}/\overline{F_s}) - 1 \quad (13)$$

結局

$$\beta = \{ \overline{F_{sp}} - (\overline{F_{sp}}/\overline{F_s}) \} \\ / \{ \overline{F_{sp}}^2 V(R) - V(D_g)^2 \\ - (\overline{F_{sp}}/\overline{F_s} - 1)^2 V(D_e)^2 \}^{1/2} \quad (14)$$

ここに、 $V(\quad)$ はそれぞれ変動係数を表す。

$$V(R) = \sigma_R/\overline{R}, \quad V(D_g) = \sigma_{D_g}/\overline{D_g},$$

$$V(D_e) = \sigma_{D_e}/\overline{D_e}.$$

今問題とする疑似安全率 F_{sp} を考える場合は、 F_{sp} は重力のみによる滑動力によって計算されるものであるから、 D の不確定さはほとんどないとして、

$$V(D_g)^2 = V(D_e)^2 = 0 \quad (15)$$

$$\beta = \{ \overline{F_{sp}} - (\overline{F_{sp}}/\overline{F_s}) \} / \{ \overline{F_{sp}}^2 V(R)^2 \}^{1/2} \quad (16)$$

さて、図6(b)のように $\overline{F_s} = 1.0$ に相当するのが、 $\overline{F_{sp}}$ に対する各基準安全率と考えられ、それ以下となれば、地すべり発生の可能性が高まる。故に、 F_{c_i} ($i = 1, 2$) を基準安全率として、

$$\overline{F_{sp}} - \overline{F_{c_i}} = \overline{F_s} - 1.0$$

両辺を $\overline{F_{sp}}$ で割って、

$$1 - \overline{F_{c_i}}/\overline{F_{sp}} = \overline{F_s}/\overline{F_{sp}} - 1/\overline{F_{sp}} \\ \therefore \overline{F_{sp}}/\overline{F_s} = 1 / (1 + \overline{F_{sp}} - \overline{F_{c_i}}/\overline{F_{sp}}) \quad (17)$$

(17)式を(16)式に代入し、

$$\beta = [\overline{F_{sp}} - 1 / (1 + \overline{F_{sp}} - \overline{F_{c_i}}/\overline{F_{sp}})] \\ / \{ \overline{F_{sp}}^2 V(R)^2 \}^{1/2} \\ \beta = \overline{F_{sp}} \{ 1 - 1 / (\overline{F_{sp}} - \overline{F_{c_i}} + 1) \} / \{ \overline{F_{sp}}^2 V(R)^2 \}^{1/2} \\ \therefore \beta = (\overline{F_{sp}} - \overline{F_{c_i}}) / \{ (\overline{F_{sp}} - \overline{F_{c_i}} + 1) \cdot V(R) \} \quad (18)$$

従って、抵抗力 R の変動係数が推定できれば、(7)式、(16)式、(18)式などを用いて、疑似安全率や危険度区分の信頼性が錯誤の確率として評価できる。

(2) 疑似安全率の信頼性

疑似安全率 F_{sp} の信頼性は、 F_{sp} の平均値 $\overline{F_{sp}}$ を用いて、 $\overline{F_{sp}} \geq 1$ と評価したにもかかわらず $\overline{F_{sp}} < 1$ となってしまう場合の錯誤の確率を用いて表わされる。この錯誤の確率は(7)式と(16)式より計算できる。しかし、現実の問題として重力のみの滑動力 D_g を使用した安全率である F_{sp} が1以下となる確率を求めて見ても、現存する地すべり非発生の斜面は、すべて $F_{sp} \geq 1$ のはずであり、土質強度のばらつきにより $F_{sp} < 1$ となる確率は、斜面疑似安全率母集団の性質として計算はできるが、信頼性の検討としては意味をなさない。

従って、図6(b)のように $F_{sp} < 1$ を評価の対象とするのではなく、当然1より大きな安全率である $F_{sp} < F_{c_i}$ ($i = 1, 2$)に対する評価を行い、 F_{sp} の信頼性とするのが妥当と考えられる。

(3) 危険度区分の信頼性

ここで取り扱っている危険度区分のうち、危険度ランク B_i ($i = 1, 2, 3$)以上は平均疑似安全率 $\overline{F_{sp}}$ による区分であるから、これまで述べて来たような F_{sp} のばらつきがある時には、その危険度区分に属する信頼性を把握しておくことが必要と考えられる。

その手段としては、上で述べた F_{sp} の信頼性の評価方法である $F_{sp} < F_{c_i}$ ($i = 1, 2$)に対する信頼性の評価が用いられる。この信頼性を評価する為には、前述の通り、 F_{c_i} ($i = 1, 2$)は基準安全率であるから、 $F_{sp} < F_{c_i}$ に関する錯誤の確率、つまり、 $F_{sp} \geq F_{c_i}$ となっているにもかかわらず $F_{sp} < F_{c_i}$ となる確率 $P(F)$ を(7)式と(18)式より計算すれば良い。これは平均値 $\overline{F_{sp}}$ が F_{c_i} より大きな、ある危険度区分に属すると判断できるにもかかわらず、それより危険なランクに属する確率という意味を持つ。

この $P(F)$ を危険度区分の信頼性の指標として危険度ランク B_2 以上に表示し、各危険度ランク内にある信頼性を示すことにより、土質強度のばらつきによる錯誤を配慮した危険度判定がなし得ると考えられる。 F_{sp} の大小そのもので危険度の順位は判断できるが、それは、土質強度すなわち抵抗力のばらつきを考慮しない場合であり、順位自体は示せても、その危険度ランクに属する信頼性は示さない。

ここでは、この $P(F)$ と危険度ランクの組み合わせにより、平均的な代表土質強度を用いてCSSDPによる危険度判定を行うことにより、「土質・地質条件が不明であるから、安定解析を自然斜面に適用して地すべりなどの予知をしてはならない」と言う従来の考え方を多少とも脱却し、より適確な危険度判定への道が開けたと考える。し

かし、当然、抵抗力の分散 $Var(R)$ を既知とせねばならないが、これは同一地質条件下における既存土質資料を用いて求めざるを得ない。

次に、この $Var(R)$ の推定方法を検討して行くことにする。まず本研究で対象としているのが初生地すべりであることから、自然斜面の地すべり未発生斜面における土質特性が分かり、抵抗力 R の分散や平均値が判明していなければならない。ところが、既往の土質試験データは、そのほとんどが地すべり発生斜面に対して求められていると考えて良い。この地すべり発生斜面の土質特性、この場合土質強度のばらつきから地すべり未発生斜面の $V(R)$ を推定する目的で次のような考え方をとる。

地すべり発生前の斜面と地すべり斜面(発生後の斜面)は、その平均的土塊強度には差があるのは当然であるが、その平均値に対するばらつきの割合、つまり相対化した散布度を表す変動係数 $V(R)$ は、ほぼ変化しないと考えられる。すなわち、発生前斜面の確率分布は図7のように風化したり、破碎されたりした、かなり強度の小さいものから、未風化の強度の大きなものを含み平均値の大きい分、分散も大きい一方、地すべり発生後のものは、強度の小さいものは乱されたすべり面の残留強度程度という下限を持ち、未破壊の大きな強度を持つものが減少してしまうことにより、強度の範囲は限られたものとなり、平均値の小さい分、ばらつきも小さくなると思われ

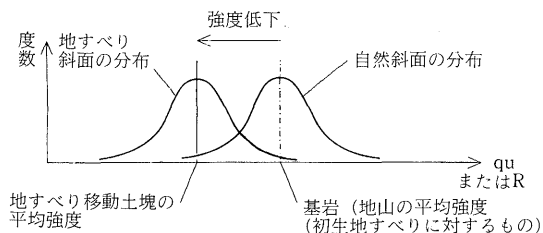


図7 地すべり斜面と自然斜面の強度の分布説明図

る。従って、 $V(R)$ がほぼ同一と仮定する。

この仮定から、既存の地すべり土塊強度データより、初生すべりに対する(発生前の土塊強度の) $V(R)$ を推定できる。

抵抗力の分散を表現するために用いる土質強度としては、臨界すべり面解析中で安定計算として用いられているJamb法の各分割スライスを念頭において考える必要がある。つまり、抵抗力はスライスの長さ分のせん断強度の和のことであるから、このせん断強度でのばらつきより $V(R)$ が求められる。

しかし、本研究において、危険度判定のサンプル地区として選ぶ、地すべり多発地帯に属する新潟県新井地区あるいは、寺泊・椎谷層地域で、統計を取るに足るデータがあるのは一軸圧縮強度のみなので、これを使用する。この一軸圧縮強度 qu の定義は、せん断強度とは異なるものではあるが、圧縮強度とせん断強度は密接な関連を持つものであるから、変動係数はこれから求められるものとする。

得られている一軸圧縮強度は、新井地区内の丈ヶ山貫入岩周辺に生じている猿供養寺地すべりに対するもの、および新潟県北部の吉川町北旭平地すべりに対するもので、どちらも寺泊・椎谷層の黒色泥岩に属する地質からなる。又、一軸圧縮試験は、複数の調査ボーリング孔の表層地層から基岩に至るまでの各種深度から得たサンプルについて実施されたものである²⁾。その結果を表2に示す。データの総度数(サンプル数)は58であり、平均値 $\bar{qu} \approx 4.293$ 、標本標準偏差 $\sigma_{qu} = 1.567$ 、変動係数 $V(qu) = \sigma_{qu}/\bar{qu} \approx 0.365$ となる。従って、次式を得る。

$$V(R) \approx V(qu) = 0.365 \tag{19}$$

表2 寺泊・椎谷層(黒色泥岩)の一軸圧縮強度

$qu(t/m^2)$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	計
度数	1	5	13	15	12	8	2	1	1	58

表3 基準安全率 F_{c1} に対する $P(F)$ 表

F_{sp}	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0		
β	0.0	0.249	0.457	0.632	0.783	0.913	1.37	1.64	1.83	1.96	2.13		
$P(F_{c2} > F_{sp})$	0.5	0.401	0.323	0.264	0.218	0.181	0.085	0.051	0.034	0.025	0.017		
F_{sp}	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
β	0.0	0.249	0.457	0.632	0.783	0.913	1.03	1.22	1.37	1.64	1.83	1.96	2.05
$P(F_{c1} > F_{sp})$	0.5	0.401	0.323	0.264	0.218	0.181	0.152	0.111	0.085	0.051	0.034	0.025	0.020

さて、 $P(F)$ は、上記の $V(R)$ を用いて、(7)式ならびに正規確率表より計算できる。 $P(F)$ は、前述のようにある危険度ランクに属する確率である。この $P(F)$ を各基準安全率 F_{sp} 毎に求めると、表3となる。

後述するサンプル地区の新井地区においては、次節で述べるように危険度区分 B_2 以上のメッシュは、すべて寺泊・椎谷層の黒色泥岩に属するものであるから、ここで計算した $P(F)$ によりその危険度区分に対する評価ができるものと思われる。故に、例えば、新井地区でCSSDPによる平均値 $F_{sp}=2.5$ が得られた時、ランク B_2 に属するが、 $F_{c1}=2.0$ 未満となる確率、つまり危険度ランク B_1 以上となる確率は、0.181、 $F_{c2}=1.5$ 未満、つまり危険度ランクAとなる確率は、0.0853となるので、この値を危険度ランクに併記して評価すればよい。

事例のあてはめ

ここまで検討してきた総合判定手法の実効性を確認する目的で、土質定数等必要なデータが整備されていて、かつ、極めて発生率の高い貫入岩周辺斜面を含む新潟県新井地区を対象に、総合判定法を当てはめて見る。

(1) 地形・地質因子による抽出

当地区は国土地理院発行1/25,000地形図1枚分に相当し、これを一辺250mの正方格子(メッシュ)に区分してメッシュ毎に発生率の算定や臨界すべり面解析を実行した。新井地区では当該地区地質別最高発生率 S を持つ⁴⁾寺泊・椎谷層($S=41\%$)が、図5の図中フロー番号2で表されるスクリーニング2で抽出されるとともに、貫入岩(丈ヶ山)周辺斜面も図中番号1のスクリーニング1により抽出され、これらを除いた斜面(メッシュ)は、すべて前節のランク分けでは、ランクCとなる(図5)。このことを、メッシュ数の比率で表せば、まず、スクリーニング1より全地区の約3.8%(64メッシュ)が抽出される。この斜面は寺泊・椎谷層に属するもの60メッシュと西山層4メッシュからなっている。

また、スクリーニング2により寺泊・椎谷層に属する全地区の40.7%(677メッシュ)が抽出されることになる。この両者(60メッシュと677メッシュ)には、抽出されたものに重複がある。しかし、この場合、スクリーニング1で抽出される貫入岩周辺斜面はほとんどすべて寺泊・椎谷層に属するので、ここまでの抽出メッシュ数は、重複分を除いて寺泊・椎谷層677メッシュならびに、西山層4メッシュとなる。従って、地区全体が1,665のメッシュから成ることを考えれば、上記677メッシュと西山層4メッシュ以外の984メッシュ(地区の約59.1%)がランク

C(危険度低)と判定される。

以下、同じく図5のフローに従って、危険度を判定して行く。上記寺泊・椎谷層677メッシュならびに、西山層4メッシュのうち、寺泊・椎谷層の勾配別発生率最大勾配⁴⁾13~14°のメッシュは76、西山層の勾配別発生率最大勾配⁴⁾17~18°のメッシュは0であった。故に、上記で抽出されたメッシュ(677+4=681)中、上の76と貫入岩周辺の寺泊・椎谷層60メッシュ以外のものが、ランク B_3 (危険度中低)となる。しかし、この貫入岩周辺60中には勾配別発生率最大勾配13~14°のメッシュと重複するものがあるので、この60メッシュから勾配別発生率最大勾配13~14°に属する14を除くと、ここで抽出されるのは、76+60-14=122メッシュとなり、これを以前に抽出された寺泊・椎谷層677メッシュ、ならびに、西山層4メッシュから差し引いた(677+4-122=559)メッシュが B_3 ランク(危険度中低)と判定される。これは、全地区1,665メッシュの約33.6%に当たる。

そこで、図5より寺泊・椎谷層勾配別発生率最大勾配13~14°のメッシュ76と貫入岩周辺の60より重複分14を引いた122が次のCSSDPによる危険度判定の対象となる。

CSSDPによる抽出法

ここでは、メッシュの辺長と同じ長さのモデル斜面を設定し、それにより、勾配別の安全率 F_{sp} を計算する。その時に使用する土質定数は、ここで対象斜面が4メッシュ以外すべて寺泊・椎谷層から成るので、この層に関するものとした。つまり、貫入岩ドームの丈ヶ山に発生している猿供養寺地すべりの試験地において、すべり面より下の基岩である風化泥岩の土質定数が土質試験により得られており、これが、この層に属する斜面における、すべり面を形成し易い風化基岩を代表するものと思われる。得られた定数は、単位体積重量 $\gamma=1.9\text{t/m}^3$ 、粘着力 $C=2.2\text{t/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=28^\circ$ ²⁾となっている。

ただし、メッシュ内に安定計算用の測線を考える際、最も F_{sp} の小さくなるものを採用して危険度を判定することが、危険度の信頼性から見て合理的なので、そのメッシュ内で最小安全率を持つ代表測線を選定する方法について、斜面形状を考慮して検討する。この為、斜面形状を代表的なパターンに分けモデル斜面を作成し、どの斜面形状が最も F_{sp} が小さいのかを計算し、比較検討する。

そして、斜面パターン毎の F_{sp} の大小を求めておく。

上記 γ 、 C 、 ϕ を基に、モデル斜面にCSSDPを適用して、斜面形ならびに勾配と現況安全率 F_{sp} の関係を求め

たものが、図8となる。このモデル斜面は、図8に示される代表的な4つの斜面形である複合1型(CX1)、凸型(CV)、凹型(CC)、平面型(F)、複合2型(CX2)を考え、それぞれ単純化し、以下の方程式で表現した。

複合1型(CX1),

$$x = 4(y - L \tan \theta / 2)^3 / (L^2 \tan^3 \theta) + L / 2$$

凸型(CV),

$$x = y^2 / (L \tan^2 \theta)$$

凹型(CC),

$$y = x^2 \tan \theta / L$$

平面型(F),

$$y = x \tan \theta$$

複合2型(CX2),

$$y = 4 \tan \theta (x - L / 2)^3 / L^2 + L \tan \theta / 2$$

ここで、xは縦断距離、yは標高、 $\tan \theta$ は平均斜面勾配、Lは斜面のx方向長さで、ここではメッシュの長さである250mとした。これを使って、本論文で取り扱う第三紀層地域の代表的な勾配の範囲について、CSSDPによりFspを求める。その結果、①もつともFspが低くなるの

は、どの勾配でも複合1型(CX1)である。②また、その他の斜面形については、Fspの小さな順に、凸型(CV)斜面、凹型(CC)斜面、平面型(F)斜面、複合2型(CX2)斜面となる。図8には、これらの斜面形状と等高線のパターンの関係も示されている。

従って、ここでは、斜面型別のFspの大小と等高線パターンを考慮し、各メッシュ内で最小安全率を持つと思われるCSSDP計算測線を決める。その際には、初生地すべりが多く発生するとされる峯状斜面などの地形条件も考慮する必要がある。

計算測線の選出法を整理すると、次のようとなる。

①図8を参考に、縮尺1/25,000地形図を用いて、メッシュ内の等高線パターンがFspのより小さい斜面型となるように選定する。

②同様な斜面型の場合には、峯状の場所を測線に選び、かつ勾配の大きい(等高線密度の大きい)ものを選ぶものとする。

③斜面型の判別がつきにくい場合、つまり、危険度の高い斜面型がメッシュの端部に部分的に見られるものな

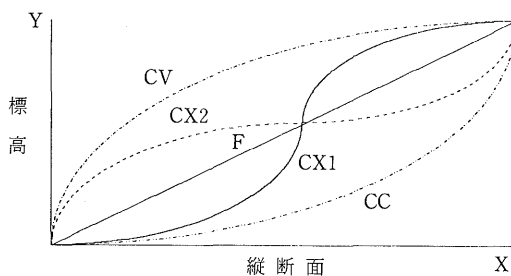


図8 (a)斜面形別のモデル斜面

F:平面型 CV:凸型 CC:凹型 CX1:複合1型 CX2:複合2型

斜面タイプ	CX1 複合型1	CV 凸型	CC 凹型	F 平面型	CX2 複合型2	備考
縦断型						CV, CCは2次, CX1, 2は3次曲線。
等高線のパターン	下部 上部 					
現状安全率						
勾配 θ						
14°	1.55	2.15	2.15	2.50	2.55	
22°	1.01	1.29	1.36	1.55	1.59	
28°	0.677	0.850	1.08	1.18	1.20	

図8 (b)勾配別、斜面タイプ別のモデル斜面安全率

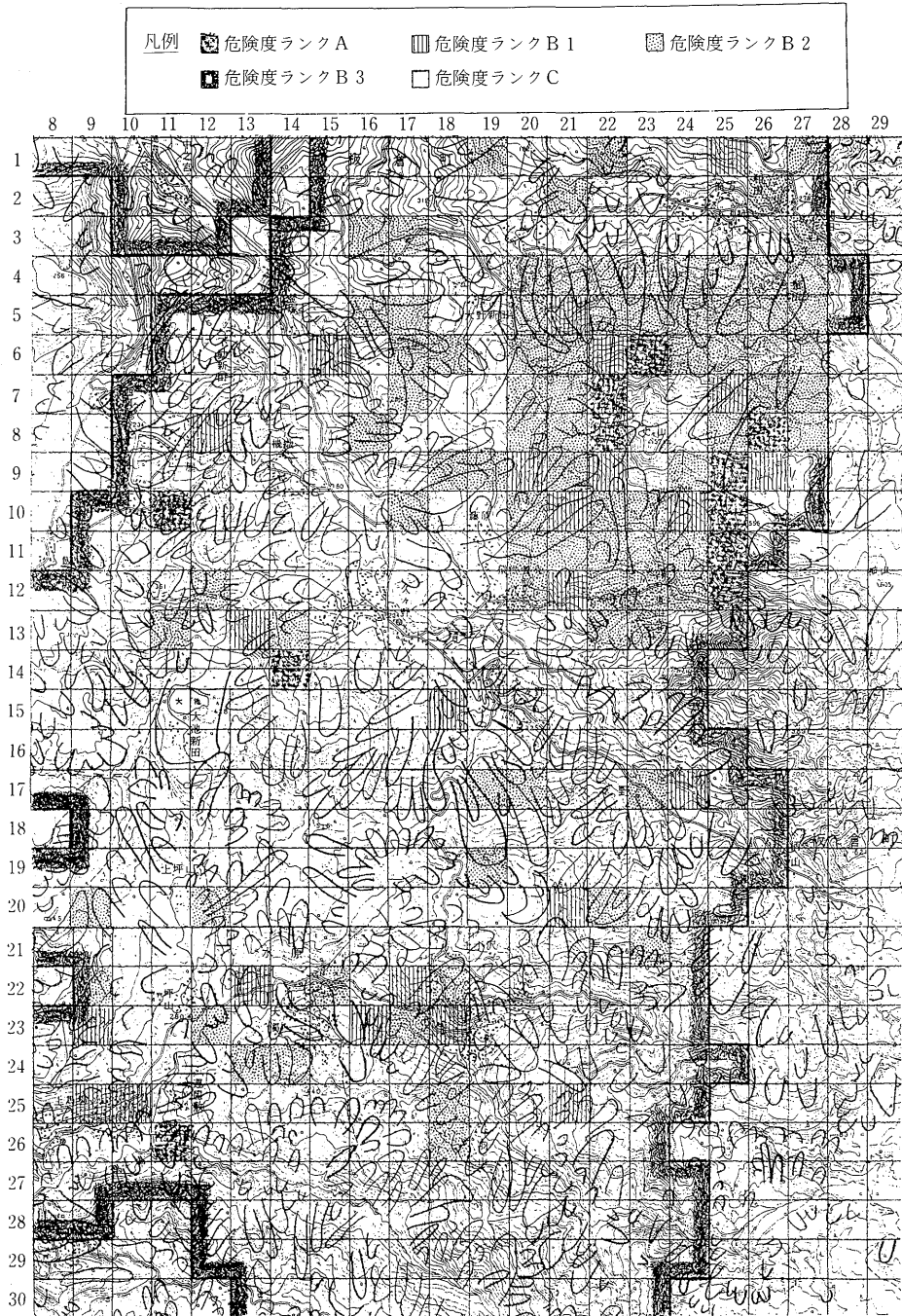


図9 サンプル地域中心部における危険度判定結果と地すべり分布図の比較

どについては、上記②の地形条件で選ぶ。

④上記③によっても判別のつかない時には、斜面の最急勾配方向で、かつ、メッシュの中央付近を通るように測線を選ぶ。

⑤この場合、斜面型や勾配などについては、原則として当該メッシュ内の範囲で考える。また、メッシュ斜面下部が河川の水衝部となっている場合や孤立丘の存在等の斜面不安定要因が明瞭な場合は、それを考慮して測線を選ぶ。

座標は、斜面下部を原点として、斜面上方へ向かって取ることとし、CSSDPの探索線は、計算する斜面縦断面と地形図の等高線の交点毎に設定する。

故に、最終的には、このCSSDPによる抽出法により、危険度B₂ランクとされたものが、84メッシュ、B₁ランクが24メッシュ、Aランクが14メッシュとなる。これは、それぞれ、図5中フロー番号3のスクリーニング3で抽出された122メッシュの約69%、20%、11%となり、当地区の総メッシュ数1,665に対する割合は、B₂ランク約5.1%、B₁ランク約1.4%、Aランク約0.8%となる。このスクリーニング3により抽出され、CSSDPに供された122メッシュは、当地区全体の約7.3%に当たり、残りの33.6%がB₃ランク、59.1%がCランクとなることになる。

ここまで述べたランク分けを平面図に示したものが、図9となる。

また、B₂ランク以上の危険度のメッシュには、土質強度のばらつきに起因し、該当する危険度ランクより危険度上位のランクに属する錯誤確率P(F)を計算している。これによれば、メッシュ番号16-8(危険度B₂ランク)は、B₁ランクに属する可能性が上記122メッシュ中最大で、0.488となっている。また、Aランクに属する確率の最も大きいのは、メッシュ番号18-15(B₁ランク)で0.464となる。さらに、メッシュ番号16-8は危険度B₂と判断されたものの中で、Aランクに属する確率も最大で0.176となっている。

このように危険度をCSSDPに基づき判断しても、当事例では、より危険度の高いランクに属する確率が4割以上ある場合もあり、留意する必要がある。従って、B₂ランク以上の斜面には、同一の危険度ランク内においても、錯誤確率P(F)が大きいものから順にプライオリティを付し、警戒・避難計画や防災対策を検討することが可能となる。

さらに、P(F)を極力正確に求めるためには、既存の土質資料を整理しておくとともに、新たな土質強度のばらつきに関する調査の推進が望まれる。

考 察

ここで行った危険度判定結果を考察する意味で、前節までのスクリーニングにより抽出されたメッシュについて判定された危険度を実際の地すべり分布と比較したものが図9である。図9の地すべり分布は航空写真より判読された地すべり跡地を示したものであり、そのすべてが初生地すべりではない。地すべり分布と危険度判定結果を比較した結果は次のようである。

①図9によれば、スクリーニング1により地すべり発生率の高い地質構造を抽出した、貫入岩周辺の危険度ランクB₂(図9の右上丈ヶ山周辺)では地すべりの分布は確かに多いものとなっている。これは、地すべりを生じやすい、従って初生地すべりも生じ易い地質条件の場所を選んだ結果である。

②また、同じ図によれば、発生率の高い地質(地層)に基づくスクリーニング2による抽出で判定する危険度CとB₃以上を比べると、明らかに地すべりの分布は危険度Cの方が少ない。

③図9中、危険度がB₃以上のランクのメッシュは、そのほとんどすべてに地すべりを有するが、CSSDPにより安定計算を行って危険度を判定したB₂ランク以上のメッシュには地すべりを含まないものもある。

これは、地すべりそのものは移動後安定な斜面となるものもあり、地すべりを含まない斜面の方が疑似安全率F_{sp}が低くなることがあるからである。つまり、本論文では、初生地すべりの危険度を判定しており、地すべり跡地でない所の危険度が高くなる可能性があると考えられる。

④調査に用いる地形図には、有史以前からの地すべり跡地が多数含まれるため、各地すべり発生前の地形図に、本論文の危険度判定手法を適用して危険度判定を行い、その結果と各地すべり発生後の地形図を比較することは不可能である。従って、初生地すべりに対する危険度判定が正確に行われているかどうかを、本節での比較において、危険度の高いメッシュが地すべりを有するかどうかにより判断するのは難しい。

⑤つまり、図9においては危険度AやB₁ランクのメッシュが地すべりを含まない場合があり、これら地すべりを含まず、かつ危険度の高いメッシュの斜面は地すべりの発生により安定な斜面となっておらず、今後、初生地すべりの発生する可能性が高いと解釈される。また、現在地すべりを含んでいて、危険度が高いと判断されたものは、現在までの地すべり発生によってのみでは斜面は

十分安定化しておらず、さらに新たな移動を生じる可能性が高いと考えられる。

総 括

本研究では、貫入岩等の地質境界周辺斜面であるかどうかの可否や地形・地質因子（勾配と地質）によって行われるスクリーニングと、臨界すべり面解析 (CSSDP) によるスクリーニングを組み合わせた総合的な危険度判定法について述べた。その中で、危険度区分としては、危険度低のランク C, 危険度中低のランク B₃, 危険度中のランク B₂, 危険度中高のランク B₁, そして危険度高のランク A, の計 5 ランクの危険度区分を提案した。

また、各メッシュ毎の F_{sp} を計算するに際して、CSSDP用に設定する各メッシュ内の測線の決定法を、斜面形別のモデル斜面による計算例を参考にマニュアル化し、極力そのメッシュ内における最小安全率を持つ断面、すなわち、最も危険な断面に対し CSSDP を適用できるように考えた。つまり、モデル斜面を用いて斜面形と F_{sp} の関係を検討し、その斜面形の等高線パターンより、該当するメッシュ中で最小の安全率を有すると思われる測線を選定できるように工夫した。

さらに、疑似安全率 F_{sp} を用いる B₂ 以上の危険度ランクについては、F_{sp} を計算する際に生じる、地盤条件や土質条件の不確定さに起因する錯誤の確率を信頼性解析の手法により評価した。それによると、土質定数の空間的変動の変動係数を知ることによって、あるメッシュが、該当する危険度ランクより危険なさらに上位のランクに属する確率が与えられる。従って、この確率を該当する危険度 (A, B₁, B₂) に併記すれば、より正確な危険度判定が可能となる。

この初生地すべりに対する危険度区分を、サンプル地域 (新潟県新井地区) に適用すると、危険度の高いランク A や B₁ に属すると判断されたメッシュに、地すべりが存在しないものも含まれる。このことから、本研究の危険度判定手法が、地すべり履歴のない初生地すべりの危険度を判定し得るものと考えられる。

このようなことから、地形・地質による抽出法並びに CSSDP による抽出法を組み合わせることにより、効率よく地すべり危険斜面が抽出され、さらに、より危険度の

高い斜面には臨界すべり面解析に基づく高速処理が可能となる上に、最小疑似安全率 F_{sp} と基準安全率 F_c を比較するという、合理的かつ精度の良い初生地すべり危険度判定法が確立できたものと考えられる。

謝 辞

最後に、本研究を進めるに当たって、数々のご助言・ご指導をいただいた京都大学農学部林学科砂防学研究室の小橋澄治教授に深く感謝いたします。また、借しめない励ましとご助言をいただいた京都大学農学部林学科砂防学研究室の水山高久助教授、東京農工大学農学部環境・資源学科の中村浩之助教授に深く感謝いたします。さらに、資料提供など多大なご協力をいただいた建設省土木研究所砂防部地すべり研究室の石濱茂技官に感謝いたします。

文 献

- 1) 久保田哲也, 中村浩之: 臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法. 地すべり, vol.27, no. 4, (1991)
- 2) 中村浩之: 黒色泥岩地帯における地すべりの土質工学的特性. 地すべり, vol. 9, no. 2, (1971)
- 3) 中村浩之, 久保田哲也: 動的計画法を用いた臨界すべり面解析法. 建設省土木研究所資料第2425号, (1987)
- 4) 中村浩之, 久保田哲也: 地すべり危険箇所について. 地すべり, vol.23, no. 4, (1987)
- 5) 中村浩之, 吉松弘行, 久保田哲也, 中島茂: 既往地すべり災害実態調査. 建設省土木研究所資料第2241号, (1985)
- 6) Styles, K.A.: Terrain classification methods for development planning and geotechnical appraisal, A Hong Kong case. Proc.4th ISL Toronto, vol.1, (1984)
- 7) 渡正亮: 斜面災害の機構と対策. 学位論文(山海堂), 東京, 1986
- 8) Whitman, R.V.: Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. Proc. ASCE, GT110, no. 2, (1984)