

地震時における山地災害危険度評価法 に関する検討

杉井俊夫, 山田公夫, 浅野憲雄*

Risk Assessment of Slope Failure due to Earthquake for Wide Area

Toshio SUGII, Kimio YAMADA and Norio ASANO*

The simple stability-analysis technique for extraction of the dangerous slope for a wide area was proposed, and the danger in case of an earthquake was examined. As a result, the following knowledge was acquired. (1) The collapse depth turns into the almost fixed depth. Moreover, it is dependent on strength of soils. Especially the influence of cohesion is more remarkable than an internal frictional angle. (2) The safety factor of proposed method becomes a smaller than Fellenius Method, and it becomes the evaluation by the safety side. (3) The proposed method can be evaluated in consideration of seismic force. Extraction of a dangerous slope is possible from the amount of slide displacement using the Newmark method in case of an earthquake.

Keywords : Slope Analysis, Earthquake, Newmark-Method, GIS

1. はじめに

岩手・宮城内陸地震でダム湖が埋まるなど、河川に土石流が流れ込み河道閉塞を生じ交通が遮断され、人命を奪う大きな災害となった。また山口県防府の豪雨災害では、土石流により施設が崩壊し多くの犠牲者をだしたように斜面災害は、山岳地内だけの災害でなくなっている。自然災害の減災対策や防災対策を合理的に行うには、危険箇所の特定化が必要となる。無数にある自然斜面の中から危険斜面の抽出を行うには、統計的手法や力学的手法が考えられるが、これまで力学的手法よりもその合理性から統計的手法によって行われてきた。しかし、発生する降雨や地震の外力の大きさにより、過去の事例からの予測においては限界がある。個々の斜面の安定性評価は、極限平衡法である円弧すべり解析や有限要素法による方法が用いられるが、無数にある斜面について繰り返し計算や断面の要素分割などが必要であり、GIS上での一次判定には不向きである。本研究では、多くの自然斜面の中から危険性を含む斜面を絞る一次判定評価のために、簡便な力学的アプローチによるEXECELで簡便に多くの斜面の安定計算が可能であり、GISを用いた危険斜面の抽出に適した手法の提案を行っている。本報告では、水平震度を用いた地震時の安定性の評価とニューマーク法による変位量の推定による評価を紹介する。

* 浅野事務所

2. 安全率による危険斜面抽出モデル

2.1. 提案する斜面安定解析計算のつり合い式

本研究では、危険斜面抽出法として半無限斜面の滑り計算を改良した力学的アプローチによる考え方を用いている¹⁾。本モデルは、地下水位や降雨による斜面表面からの浸透時の安定計算も可能であるが、本報告では地震力を対象とした解析手法について説明する。

無限斜面のすべり面計算法をベースとしているが、ある崩壊長さで図1のように破線で示す水平面で斜面からすべり飛び出すモデルを考える。崩壊長さ L 、崩壊深さ z とする。地震力として今回は水平震度 k_h に重量を乗じた力を考慮している。傾斜している底面でのせん断強度 T_1 よりも大きな力が作用し、左下への力(FF_1)が発生した場合、法尻の水平面(破線部)でのせん断強度(T_2)と外へすべり出す力(FF_2)との力のつり合いから安全率を計算する。この関係より安全率 F_s は次式となる。

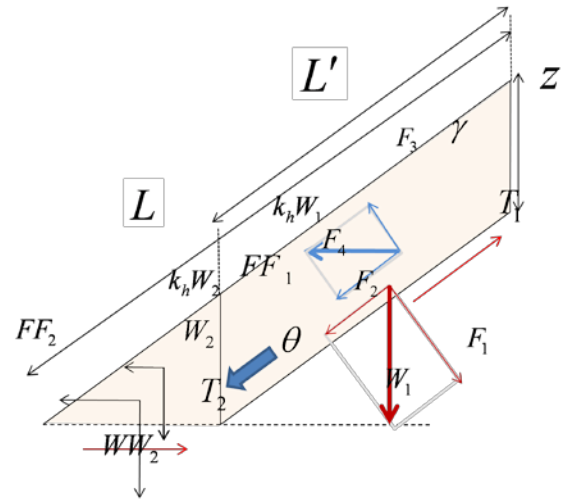


図1 地震時の斜面における土塊のつり合い

$$F_s = \frac{\left(\frac{\gamma \tan \phi}{2 \tan \theta} - \gamma D \tan \phi \right) z^2 + \left(\frac{c}{\tan \theta} + \gamma L D \sin \theta \tan \phi + c \tan \phi \right) z - c L \cos \theta \tan \phi}{\left(\frac{k_h \gamma}{2 \tan \theta} - \frac{\gamma D}{\tan \theta} \right) z^2 + \left(\gamma L D \cos \theta - \frac{c}{\tan \theta} \right) z - c L \cos \theta} \quad (1)$$

$$D = \cos \theta \sin \theta + k_h \cos^2 \theta - \cos^2 \theta \tan \phi + k_h \cos \theta \sin \theta \tan \phi \quad (2)$$

ここに、崩壊斜面長: L (m) 崩壊斜面深さ: z (m) 斜面傾斜角: θ° 土の単位体積重量: γ (kN/m³) 粘着力: c (kN/m²) 内部摩擦角 ϕ である。

式(1)の崩壊斜面長 L と崩壊斜面深さ z は破壊前には未知数であり、これらの値が入力されなければ安全率を求めることができない。そこで、本研究では崩壊斜面長 L と崩壊斜面深さ z と安全率 F_s の関係を調べることを試みた。

2.2. 斜面崩壊長さ、崩壊深さと安全率の関係

式(1)で示す安全率は、斜面崩壊長さ L と斜面崩壊深さ z によって決まるが、両者は未知数で安全率が求まらないため、内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c の安全率への L 、 z の感度を調べてみた。 z はある深さで固定したとき、 L の増加に伴い単調に安全率が減少していくことは、斜面長が長くなるほど自重が大きくなり、すべり外力が大きくなり安全率は減少することは当然である。次に、崩壊長さ $L=20$ mで固定したときの z の F_s への影響を内部摩擦角 ϕ を変えて示したグラフが図2である。 L が一定で z を変化させると最小となる安全率が表れることがわかる。この2つの結果より、斜面崩壊

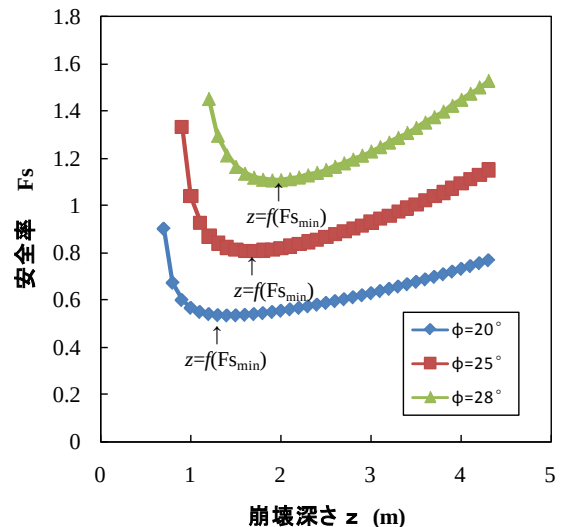


図2 崩壊深さ z と安全率の関係

長さ L がわかれば最小安全率を示す斜面崩壊深さ z が決まることから、いま斜面崩壊長さを斜面長と等しいと仮定する。実際には崩壊長さが斜面長となることは過大に評価することになり、先に述べたように安全率も当然小さくなるのが容易に推測できる。しかし、崩壊長さを斜面長とした斜面の最小安全率 $F_{s_{\min}}$ が1以上であれば、その斜面は崩壊長さが減少しても最小安全率をしまわることなく安全と判断でき、安全な斜面を見極めることができる。裏を返せば、それ以外の斜面は危険性を含む斜面であることが言え、それらの危険斜面の抽出が可能といえよう。広域を対象とした場合には、危険斜面を絞り込むことが第一の目的であり、安定斜面と不安定要素を含む斜面との判別という評価が可能になる。

2.3. 評価の手順

本解析法では、崩壊長さは斜面長とおくことを前節で述べた。次に、最小安全率となる崩壊深さは図2に示したように最小となる極値を持つことから式(1)を z で微分することで求める。 z を求めることが複雑なように見えるが、式(1)の分母、分子は z について2次関数となっているため、式(3)を満たす z は同じく2次関数となり、それぞれの係数を用いて2次方程式の解の公式から汎用の表計算ソフト EXCEL を使って容易に求めることが可能である。

$$\frac{\partial F_s}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

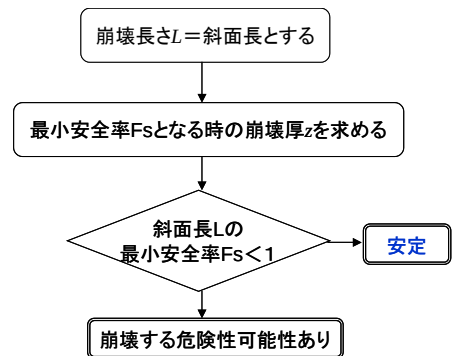


図3 抽出法のフロー

図3には本評価手法のフローチャートを示した。安定斜面と崩壊危険性を含む斜面を区別し、2次評価として詳細な解析をや試験を実施することを想定している。なお、土質定数の粘着力 c 、内部摩擦角、透水性などは本研究室で別途分析している植生情報や地形地質情報の相関から推定することが可能である。

2.4. 強度による崩壊深さ関係

一般に、がけ崩れといわれる表層崩壊は深さ約1~2mと浅い表面で観測されており、1mと仮定され安定性を評価される場合があるが、今回、最小安全率となる時の崩壊深さ z を c 、 ϕ を変えて調べてみた。結果を図4.1と図4.2に示す。両方の図から崩壊長や強度定数(c 、 ϕ)が変化しても崩壊深さは、崩壊長が長くなるほど、ほぼ一定になることがわかる。これは、実際の崩壊現象をよく説明しているものと

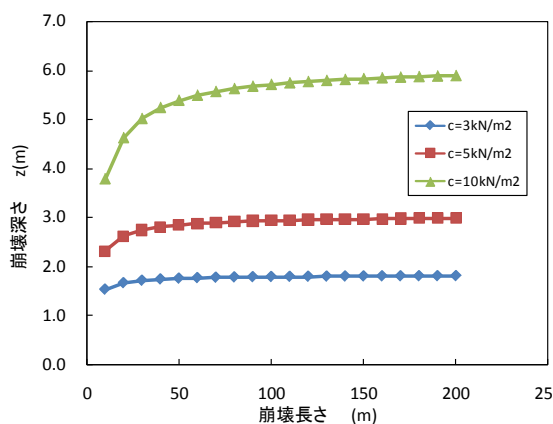


図4.1 粘着力による崩壊深さへの影響

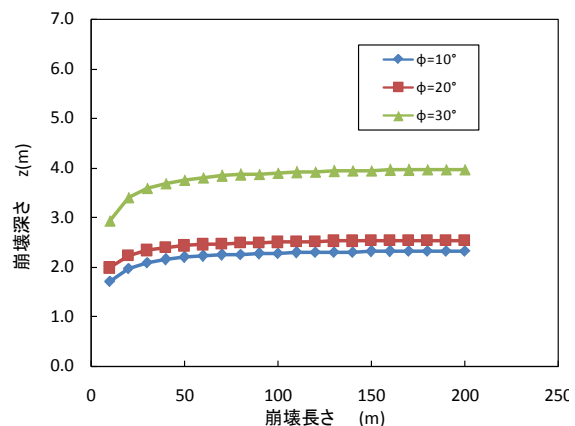


図4.2 内部摩擦角による崩壊深さへの影響

判断できる。

2.5. 従来の円弧すべり計算との比較

斜面の安定計算は、円弧すべり法や FEM によるせん断帯の発生から計算されてきているが、今回のような広域を対象とした斜面について解析するには円弧すべり面では、中心座標や円弧の半径などの決定に繰り返し計算が必要になること、FEM ではメッシュ生成や詳細な土の物性が必要となる。提案法はこうした点を解決するための方法であるが、ここでは従来法のフェレニウス法との比較を試みた。

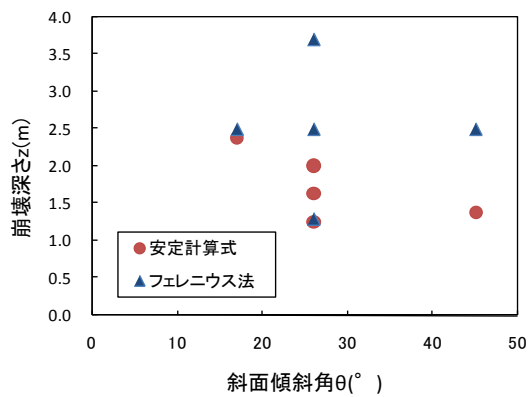


図 5.1 2つの計算法による崩壊深さの比較

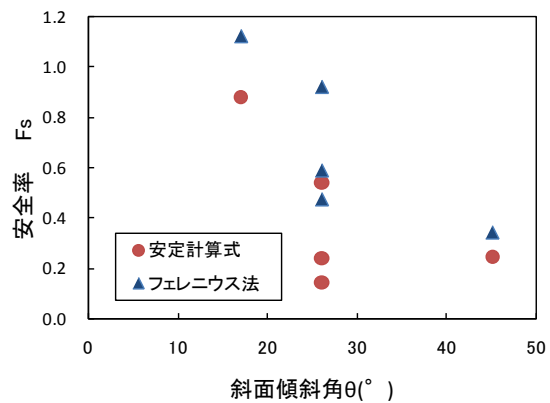


図 5.2 2つの計算法による安全率の比較

崩壊長を同じとした場合の崩壊深さと安全率の関係を傾斜角の異なる斜面で比較し、それぞれ図 5.1、5.2 に示す。フェレニウス法では円弧となるため最も深い厚さを崩壊深さとした。図 5.1 から、提案法の方が崩壊深さは小さくバラつきも小さい傾向にあるといえる。また、図 5.2 の安全率についてはフェレニウス法と比べて安全率が小さく評価されている。フェレニウス法は、ビショップ法や対数螺旋法に比べて安全率が小さく算出される傾向にあるが、提案法はそれよりも小さく安全側の評価になっていると判断できる。

3. GISを用いた広域斜面マップへの適用

3.1. 単位斜面によるメッシュ

次に、GIS を用いた斜面安定評価日本提案法を適用する。通常、地盤評価などは矩形メッシュが主であるが、斜面の起伏、斜面長、傾斜角などの特性が相殺され精度の高い予測は困難である。そこで本研究では、斜面の形状毎に分割された単位斜面によるメッシュ分割を行っている（図 6）。10mDEM のデータを使った TIN データから作成された岐阜県林政部治山課のデータを利用させていただいた。今回はこれにより、斜面の勾配や斜面長がデータとして取得でき、提案手法が適用しやすくなる。

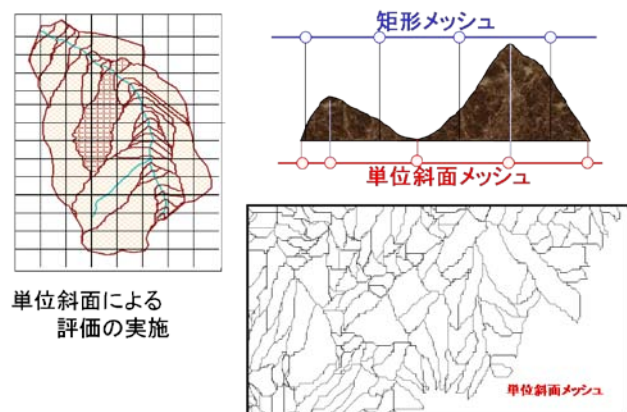


図 6 矩形メッシュと単位斜面メッシュ

3.2. 地震時の斜面の安定性評価

今回、岐阜県中津川市北部を対象に、湿潤単位体積重量 $\gamma=18\text{kN/m}^3$ 、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ 、粘着力 $c=5\text{kN/m}^2$ と一律と仮定した。

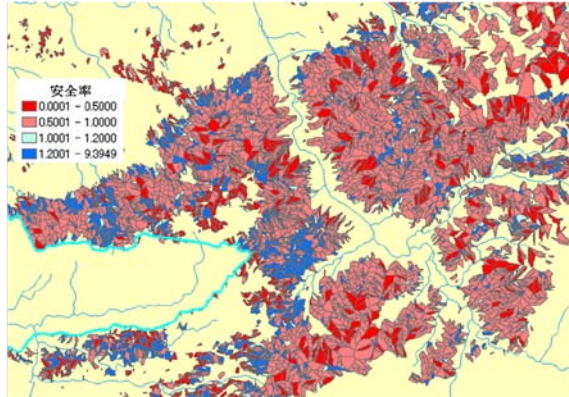


図 7.1 水平震度 $k_h=0.05$ 時の安全率

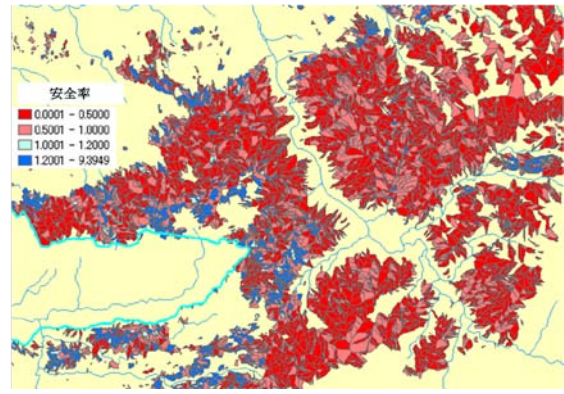


図 7.2 水平震度 $k_h=0.20$ 時の安全率

図 7.1 と図 7.2 より、地震力が大きくなると安全率が小さくなることがよくわかるが、麓においても安全率が低く、崩壊する可能性があるところが高いことがわかる。特に、水平震度 $k_h=0.20$ になると河川付近の斜面の危険性が高くなっており、土石流の発生や河道閉塞の危険性が推察される。今回は、強度定数が一定であるため、斜面形状による違いのみが影響していると考えられるが、実際には土質強度、地震の卓越した震動方向などを考慮することにより大きく異なることが考えられる。

3.3. ニューマーク法を用いた地震時変形量の評価

岩手宮城内陸地震（2007 年 6 月 14 日 $M=7.2$ ）において宮城県築館で観測された地震波形（図 8）の NS 波形最大加速度 733.9Gal を想定し、ニューマーク法による地震時変形量から評価を試みることにした。ニューマーク法は安全率 1 となる時の限界水平震度 k_{hc} を逆算して求めておく。時々刻々と変化する水平震度 $k_h(t)$ が k_{hc} を越えた瞬間に土塊はすべり運動を行うので超過した震度成分 $k_h(t)-k_{hc}$ に重力加速度を乗じて得たすべり加速度を時間領域で二階積分してすべり変位を求める方法である。

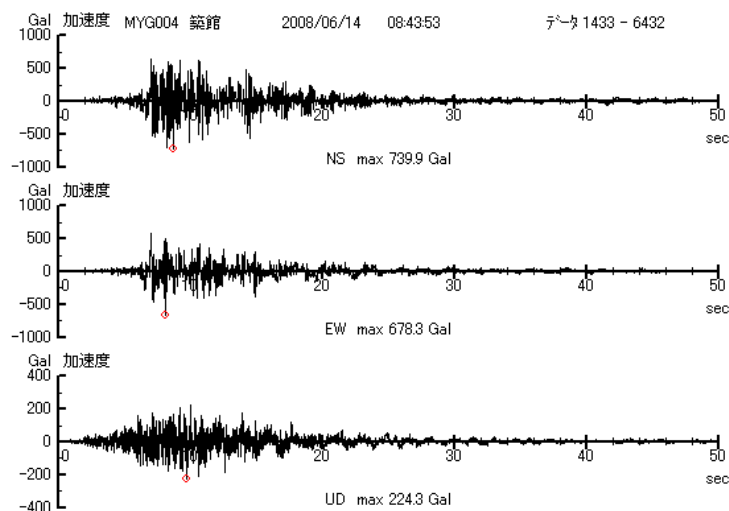


図 8 岩手・宮城内陸地震（観測点築館地区）³⁾

図 9 には、超過加速度を積分して得られた速度と変位量を示す。2000 秒まで大きな揺れがあり、変位量が大きく進むが、その後も小さな速度が得られ変位量が増加していることがわかる。ニューマーク法の現実問題への適用性については議論される点ではあるが、想定される地震波形による変位量の違いで危険斜面の優先順位を評価することも考えられ、今回、変位量の違いから評価を行った。なお、今回の水平震度はすべて NS 波形を用いている。結果を図 10 に示す。

高い斜面部分での変位量が多い傾向にあることがわかる。さらに、強度定数などを植生・地質から推定することでさらに精度が向上すること期待できる。

4. おわりに

GIS による広域を対象とした危険斜面の抽出のために新たな簡便な安定解析手法を提案し、地震時

の危険度についての検討の結果、以下の知見を得ることができた。(1)崩壊深さは、崩壊長が長くなってもほぼ一定の深さになること、また強度に依存し、特に粘着力の影響が内部摩擦角より顕著である。(2)提案法は、フェレニウス法より安全率は小さい傾向になり、安全側の評価になることがわかった。(3)提案法は地震力を考慮した評価が可能で、ニューマーク法を使って地震時すべり変位量から危険斜面の抽出（優先順位）をつけることが可能であることが得られた。

謝辞

本研究は、平成 19-21 年度科学研究費（基盤(C) No.19560498 代表 杉井俊夫）の成果の浸透マップの一部を利用したもので、中部大学総合工学研究所 平成 20 年度～21 年度の第 6 部門の援助を受け遂行した。また、本学科 4 年生の三尾康太君、松原祥平君には安定解析及び GIS 作業の補助を受けるとともに、地震波形は防災科学技術研究所の強震ネットワーク K-NET を利用した。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉井俊夫・伊藤智幸則：自然斜面における危険斜面抽出法の開発の試み，H21 年度土木学会年次学術講演会,2009.
- 2) 杉井俊夫：ロジットモデルによる地域特性を考慮した山地危険度評価，降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム発表論文集、pp.379-384,2009.
- 3) (独)防災科学技術研究所：強震ネットワーク K-NET，地震観測データセンター

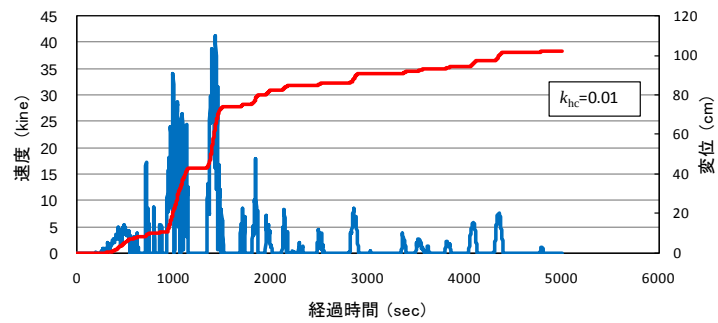


図 9 ニューマーク法による速度と変位量の時刻歴

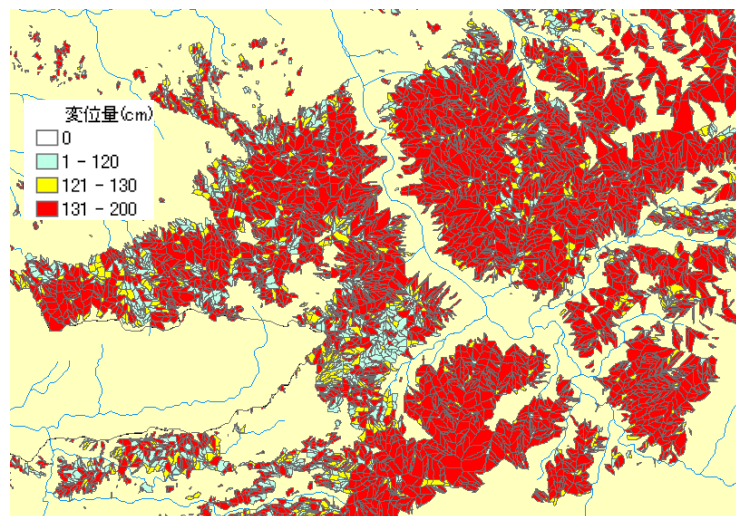


図 10 岩手・宮城内陸地震（築館）波形を用いた変位量の分布