

地震による斜面崩壊の発生予測システムの開発 (1984年長野西部地震のケーススタディ)

国立防災科学技術センター 正会員 ○ 大倉 博
国立防災科学技術センター 田中 耕平

1. はじめに

昭和59年9月14日に発生した1984年長野西部地震は御岳山の南麓中心に多数の崩壊を引き起こした。これらの崩壊により合計29人の人命が奪われ、また被害額は425億円に達した。我国は山地が国土の76%を占めており、今後も地震による同種の災害の発生が考えられる。想定地震の被害地域に対し斜面崩壊の発生確率を示すハザードマップが得られると効果的な対策がなされ被害を軽減できる。このハザードマップを電子計算機を用いて作成するシステムの開発を行なった。

長野県西部地震による崩壊は、その発生域の地形、地質条件によって2つのグループに分けることができる。第1のグループは、崩壊の発生の原因が地質条件に求められるもので、規模は大きいが数は少ない。第2のグループは、地形条件が大きく影響しているもので、規模は小さいが数は多い。これら2つのグループの発生予測に関しては、それぞれ異なった手法が考えられる。

第1のグループには御岳くずれ(伝上川源頭部)、松越、御岳高原の崩壊が含まれる。これらの崩壊は粘土化した軽石層ないし火山灰層で発生し、粘土鉱物分析でいずれもハロイサイトが検出されている。これらの崩壊発生地の地質構造は地下水が集中する傾向がみられる。このタイプの崩壊の発生予測は、ハロイサイトの存在と地下水の集中機構等を検討する必要がある(田中他, 1985)。しかしながら、検討に十分な地質(構造)調査がなされておらず本報告ではこのタイプの崩壊の発生予測は取り扱わず、第2のタイプ、すなわち、地形条件に起因する崩壊の発生予測について報告する。

2. 地形条件に起因する崩壊

地形条件に起因する崩壊の発生予測としては、Wilson et al.(1979)、田中(1982)に述べられた方法を適用する。この方法は地震加速度を静的慣性力に換算して作用させる方法で、ある斜面が地震時に、崩壊を起こす臨界の加速度(a_c)は次式で示される

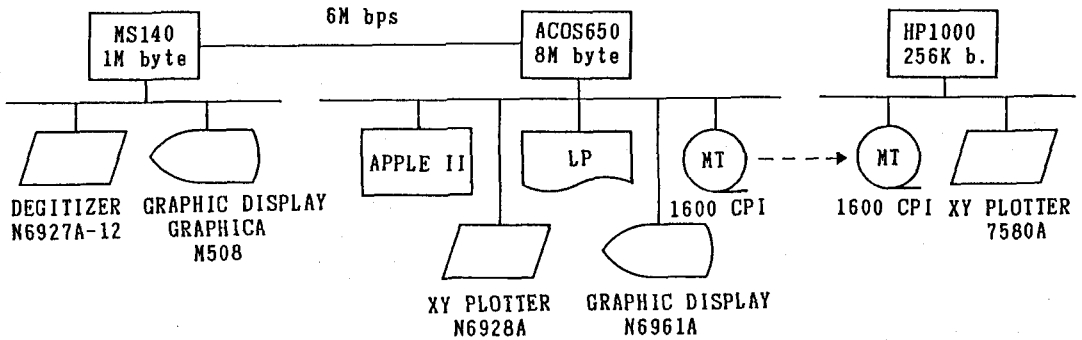
$$a_c = g [(c / \gamma h) + (\cos \theta \tan \phi - \sin \theta)] \quad (1)$$

この式のうち、 g は重力の加速度、 c は斜面を構成する物質の粘着力、 γ はその物質の単位重量、 h は土層深、 θ は斜面の角度、 ϕ は斜面を構成する物質の内部摩擦角である。これをある地域に適用するための方法がWieczorek et al.(1985)により考えられた。(1)式の変数のうち、斜面の角度(θ)は傾斜分布図を作成することにより知りうる。岩石の内部摩擦角(ϕ)、粘着力(c)、単位重力(γ)ならびに土層深(h)は同一の岩石ならば、どの地点のものも近い値を持つであろうという仮定から、地質図の利用を考える。すなわち、傾斜分布図と地質図に同一のメッシュをかけ、各格子毎に対応する θ と c 、 ϕ 、 γ 、 h から、上記の計算をし、発生予測を行う。

個々の岩石群の物理的定数が決定できれば、崩壊の発生予測図を作成することができる。しかし、実際に、岩石群の物理定数を野外で直接測定し、そのデータが利用出来ればよいが、現在の測定技術では、小さな試料の値は測定できても、亀裂を含む大きな岩体の物理定数を求めることは困難である。一般に岩石の物理定数のうちで、最も見積りが難しいのは c と ϕ である。このため、(1)式において γ 、 h と a_c を固定し、各岩石の θ と c と ϕ の関係を求める。この関係を拘束条件とし、地震被災地の傾斜分布図及び地質図と同一のメッシュをかけた、崩壊分布図の各メッシュ上の崩壊の有無から c と ϕ を推定した。

3. 電子計算機システム

崩壊発生予測図の作成に使用した電子計算機システムを第1図に示す。用いた計算機は ACOS650, MS140, HP1000である。これらは国立防災科学技術センターに設置されている既存の機器を用いたもので予測図作成のために最適化されたシステムではない。主要な計算及び線画出力はACOS650を用い、タブレット入力とイメージ画像出力はMS140, 地形図上へのハザードマップ作成はHP1000を用いた。



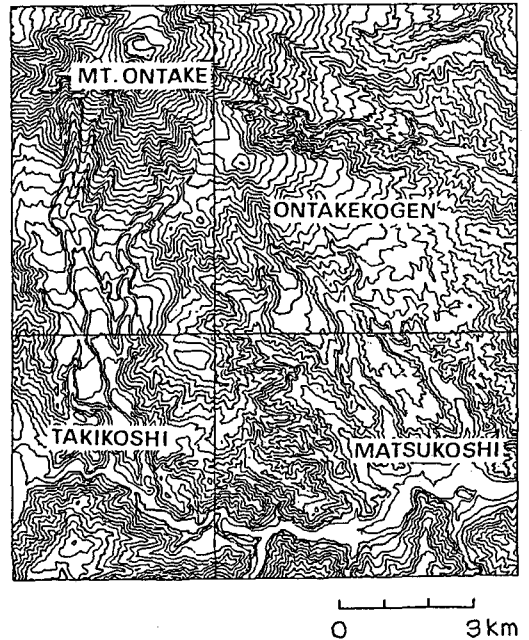
第1図 電子計算機システム

4. 傾斜分布図

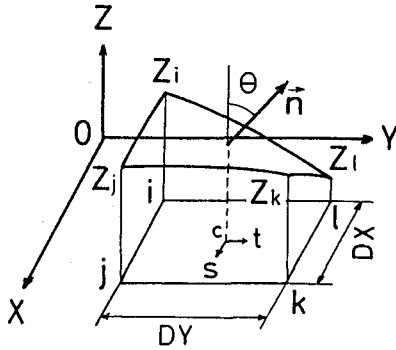
調査範囲は東経137° 27' から、137° 34' 30", 北緯35° 47' から35° 54' の範囲で、国土地理院発行の1/25,000地形図の「御岳山」, 「御岳高原」, 「滝越」, 「王滝」にわたる地域である。この地域は御岳山の南東麓にあたり、今回の地震で最も被害の大きかった場所である(第2図)。

この地域を、経度方向を400等分し、緯度方向を448等分したメッシュを作成した。このためメッシュ間隔は約28mとなり、1/25,000の地図上で約1.1mmの間隔である。このメッシュの格子点180,049点の各々に1/25,000の地形図からデジタイザーを用いて高度データを与えた。その後、メッシュ毎に隣接する格子点4点の標高データから、1つの曲面を想定し、中心点における斜面傾斜角(θ)を計算した。

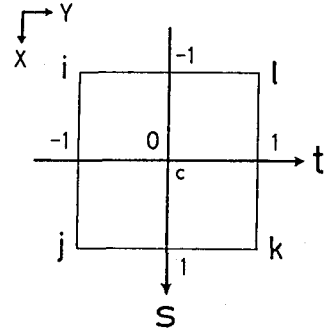
第3図に示すz軸を鉛方向とするx-y-z直交座標系を考える。メッシュの辺はx軸またはy軸に平行とし、メッシュのx軸方向間隔を D_x , y軸方向間隔を D_y とする。あるメッシュの隣接する格子点i, j, k, lの地表の座標値はx, y, zにそれぞれ下添え字i, j, k, lを添えてあらわすものとする。今、メッシュの中心($x_c, y_c, 0$)を通る局所座標系, s-t-z直交座標系を考える。s軸とt軸はx-y平面上にあり、それぞれx軸, y軸に平行にとる。s, tはx, yを用いて次式であらわされるものとする



第2図 調査地域の地形図



第3図 地表面の2次双曲放物面近似



第4図 局所座標系

$$s = \frac{2}{DX} (x - x_i) - 1 \quad (2),$$

$$t = \frac{2}{DY} (y - y_i) - 1 \quad (3)$$

このとき、各格子点の座標値(s, t)はそれぞれ、i(-1, -1), j(1, -1), k(1, 1), l(-1, 1)になる。

次式の陰関数であらわされる2次双曲放物面を用いてメッシュ内の標高zを近似する

$$f(s, t) = z - z_i(1/4)(1-s)(1-t) - z_j(1/4)(1+s)(1-t) - z_k(1/4)(1+s)(1+t) - z_l(1/4)(1-s)(1+t) = 0 \quad (4).$$

x-y-z座標系におけるメッシュ中心点の地表に対する外向き法線ベクトル $\vec{n}(l, m, n)$ は

$$l = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x_c, y=y_c} = \left(\frac{\partial f}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} \right)_{s=0, t=0} = \frac{1}{2DX} (z_i - z_j - z_k + z_l) \quad (5),$$

$$m = \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_{x=x_c, y=y_c} = \left(\frac{\partial f}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial y} \right)_{s=0, t=0} = \frac{1}{2DY} (z_i + z_j - z_k - z_l) \quad (6),$$

$$n = \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)_{x=x_c, y=y_c} = 1 \quad (7)$$

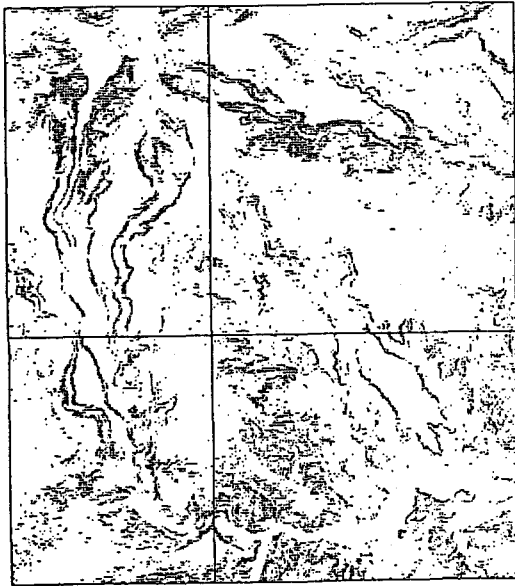
であらわされる。単位法線ベクトルのz成分が $\cos \theta$ に等しいから、地表の傾斜角 θ は次式から求められる

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{\left\{ \frac{1}{2DX} (z_i - z_j - z_k + z_l) \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{2DY} (z_i + z_j - z_k - z_l) \right\}^2 + 1}} \right] \quad (8).$$

θ の計算結果を第5図に示す。各中心点の傾斜角はどのような表現にでも出力することができるが、ここでは斜面傾斜が40°以上の点のみ打ち出した。傾斜40°以上の斜面は地獄谷から濁沢にかけての沢沿いの地域、伝上川沿いの地域、三笠山の北側の沢等等に分布している。その分布は溶岩層が沢に沿って侵食され、連続して露出する場所に集中する傾向がある。

5. 地質図

調査地域の地質は基盤の古生層が北東地域、中生代白亜紀後期の濃飛流紋岩、花崗岩類が南西部に分布し、この基盤を被って第四紀更新世の御岳火山の噴出物が、北西部から中央部に広く分布している。御岳火山噴出物の地質に関しては、富山大学・小林武彦助教授の未発表のデータを使用させていただ

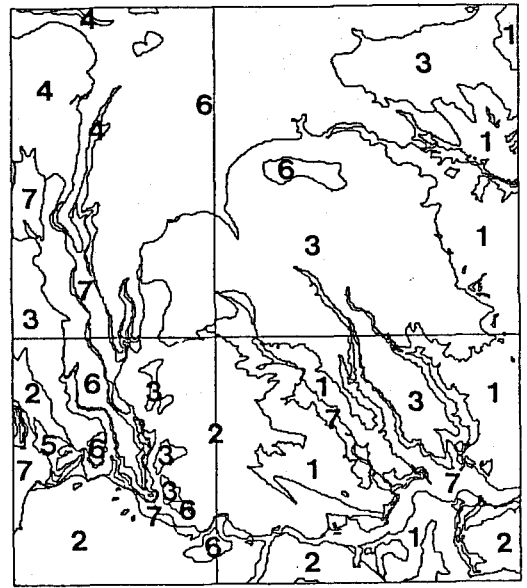


SLOPE ANGLE $\theta > 40^\circ$ 0 3km
第5図 傾斜分布図

いた。基盤岩の分も含め、地質区分は、全部で45種類となったが、これでは多すぎるため以下の7種類に大別した。1 古生層、2 濃飛流紋岩、3 古期安山岩、4 新期流紋岩、5 新期安山岩、6 滝越層、7 現世堆積物、このうち3から5までは御岳火山噴出物である(第6図)。

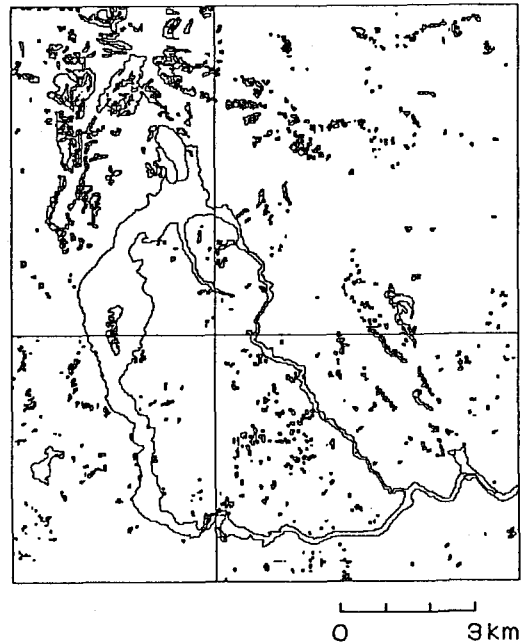
6. 崩壊の分布図

調査範囲内で今回の長野県西部地震によって、新たに発生した崩壊の数は591箇所、既存の崩壊が拡大ないしは再発したものは156箇所を数えた。既存の崩壊で拡大ないしは再発が認められないものは631箇所あるが、これも第7図の崩壊分布図に示してある。次に地質と傾斜別の崩壊発生頻度を第8図に示す。全体としての崩壊の発生頻度が最も高いのは、1 新期流紋岩で以下、2 新期安山岩、3 滝越層、4 古期安山岩、5 濃飛流紋岩、6 古生層、7 現世堆積物の順に発生頻度が低下して行く。ただし、滝越層の高角度側は母集団の数が少ないことを考慮しておく必要がある。滝越層は火山礫を多く含む河成堆積物と湖成堆積物からなり、一般に固結度が悪く、これが急斜面に存在すれば、崩壊を起こしやすいことは自明であろう。同様なことは現世堆積物にも言えるが、こちらの方は高角度側が存在しないので、このような現象は見られない。また、この図から、滝越層よ



1 古生層 2 濃飛流紋岩 3 古期安山岩
4 新期流紋岩 5 新期安山岩 6 滝越層
7 現世堆積物

第6図 地質図

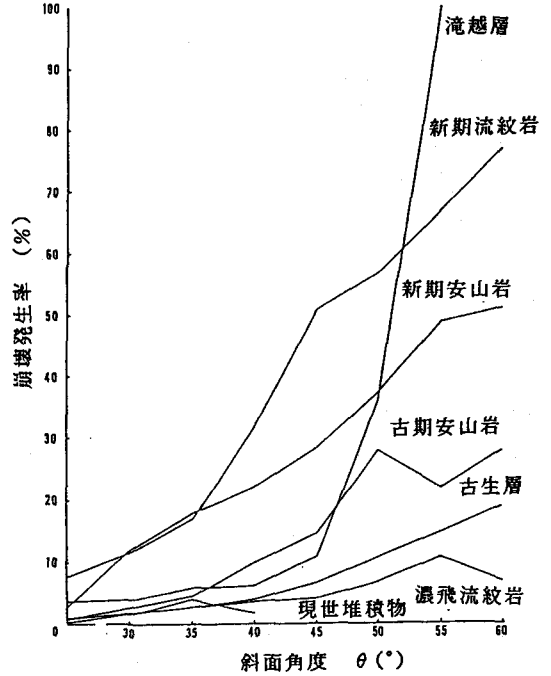


第7図 崩壊分布図

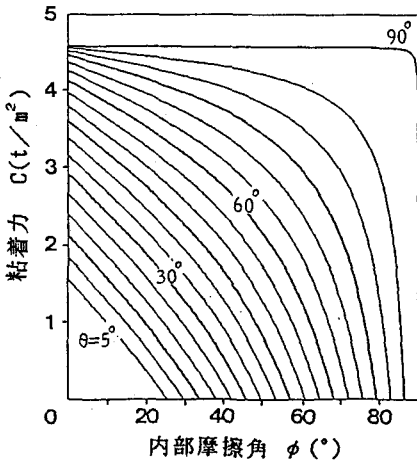
りむしろ、新期流紋岩や新期安山岩の方が、低角度側から崩壊が発生していることが解る。しかも、新期流紋岩の方が、高角度側で発生頻度が急激に上昇する。個々の岩石群のこれらの特徴は、その岩石群のもつ物理的性質の反映であろう。特にこの観点からすれば、発生頻度は異なるが、古期安山岩と新期安山岩が似たカーブを描いているのは興味あることである。

8. 発生予測図

亀裂を含む大きな岩体の物理常数を求めることは困難であり、中でも最も見積りが難しいのは c （粘着力）と ϕ （内部摩擦角）であることはすでに述べた。これを求めるため（1）式において、 γ （単位重量）、 h （土層深）と a_c （臨界加速度）を固定して、各岩石群の θ （斜面角度）と c と ϕ の関係を計算した。第9図はその1例であるが、このような図を用いて各岩石の崩壊発生率が20%以上になる点での c と ϕ を求めた。この値で作成した発生予測図が第10図である。この図と崩壊分布図を比較すれば、良く一致している。特に御岳山の山頂周辺は良く一致しているが、調査範囲南部の古生層の分布域では、発生予測的中率が低



第8図 崩壊発生頻度図



$\gamma = 2.2 \text{ gr/cm}^3$ $h = 3.0 \text{ m}$
 $a_c = 380 \text{ gal}$

第9図 斜面傾斜角(θ)と粘着力(c)と内部摩擦角(ϕ)との関係

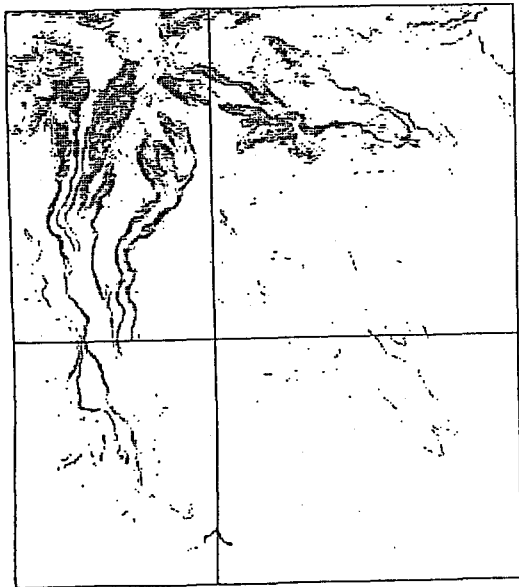
| | θ (°) | γ (gr/cm ³) | ϕ (°) | C (t/m ²) |
|-------|--------------|--------------------------------|------------|-------------------------|
| 古生層 | 61 | 2.6 | 40 | 3.3 |
| 濃飛流紋岩 | ? | 2.7 | 45 | >3.0 |
| 古期安山岩 | 49 | 2.6 | 40 | 2.4 |
| 新期流紋岩 | 38 | 2.2 | 35 | 1.6 |
| 滝越層 | 47 | 2.0 | 40 | 1.7 |
| 新期安山岩 | 36 | 2.6 | 35 | 1.6 |
| 現世堆積物 | ? | 2.0 | 30 | >1.8 |

$a_c = 380 \text{ gal}$ $h = 3.0 \text{ m}$

第1表 崩壊発生率20%以上になる粘着力(c)と内部摩擦角(ϕ)の値

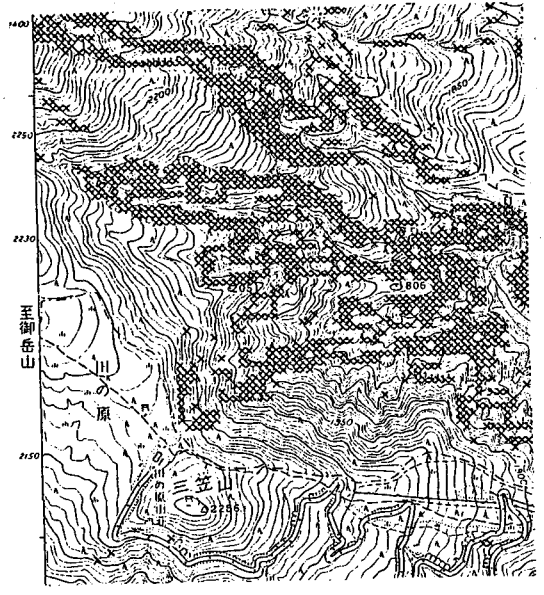
下する。これは、この地域に大きな林道が、通っているためと考えられる。

第11図に発生予測箇所を1/25,000地形図にプロットしたハザードマップの一部を示す。地形図との位置合わせは幾志(1984)の手法による。地形図上に発生予測箇所を表示することにより、地形図からの情報も同時



PROBABILITY > 20% 0 3km

第10図 崩壊発生予測図



> 20% 0 1km

第11図 地形図上のハザードマップ

に参照できるため発生予測図の有用性が増す。

この予測手法に関する今後の問題点のうち、もっとも重要な問題は c 、 ϕ の値の決定にある。今後、事例を積み重ねれば、各岩石群の c 、 ϕ の値は見積もり可能となるが、現場の測定により、 c 、 ϕ の値を決定できるような手法の開発も必要である。

参考文献

- 1) 幾志新吉(1984): ランドサット情報のマッピング手法の開発, 日本写真測量学昭和59年度会秋期学術講演会発表論文集, 59-60, 1984.
- 2) 田中耕平(1982): 地震によるランドスライド発生予測図, 地すべり, 第19巻, 第2号, 12-19, 1982.
- 3) 田中耕平・大八木規夫・井口隆・上原茂次・高橋博(1985): 長野県西部地震による岩屑流と崩壊, 天然資源の開発利用に関する日米会議 第17回, 1985.
- 4) Wiczorek, G., Wilson, R. and Harp, E. (1985): Map showing slope stability during earthquake in San Mateo County, California, U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigation Map I-1257 E, 1985.
- 5) Wilson, R., Wiczorek, G. and Harp, E. (1979): Development of Criteria for Regional Mapping of Seismic Slope Stability, 1979 Annual Meeting of the Geological Society of America.