

長野県西部地震による斜面崩壊の考察

○台湾国立交通大学	許海龍
不動建設株式会社	中角功
東京大学 工学部	石原研而
東京大学 工学部	吉田喜忠
佐藤工業株式会社	吉田望

1. はじめに

昭和59年9月14日に発生した長野県西部地震(M=6.9)は、内陸・直下型地震で、長野県木曾郡王滝村を中心に局部的に大きな被害をもたらしたが、その多くは大規模な土石流と斜面崩壊に起因している。

今回発生した斜面崩壊のうち大規模なものは、御岳山頂付近、松越、滝越、清滝地区等でみられるが、本研究では御岳山頂付近と松越地区について、地震後の現地調査・サンプリング・室内試験・安定解析により斜面崩壊の原因を考察してみた。また斜面崩壊の原因となった軽石層については、振動三軸試験を実施して、動的強度を求め、静的強度と比較検討を行った。

2. 斜面崩壊の概要

2-1 御岳山頂付近

御岳山頂付近の斜面崩壊は、図-1に示すように御岳山(標高3036m)山頂から南東に向いた尾根で発生した。図-3にすべり面の状況を示すが、硬い基盤の上に長年堆積した火山性の土砂が、千本松軽石層と呼ばれる弱い軽石層に沿って、深さ約150m、長さ約1200mにわたって崩壊し、土石流として各所に被害をもたらした。

2-2 松越地区

松越地区の斜面崩壊は、図-2に示すように大又川右岸の南斜面で発生した。当地区は震源地の直上にあたり、かなり大きな地震動をうけたと思われるが、高い地下水位と相まってこのような大崩壊にいたったと考えられる。図-4にすべり面の状況を示すが、ここでも頁岩の上に堆積した軽石層ですべりが発生しており、御岳山頂付近同様、軽石層が斜面崩壊の原因と判断される。

御岳山頂付近の軽石層と松越地区の軽石層とは、地質学

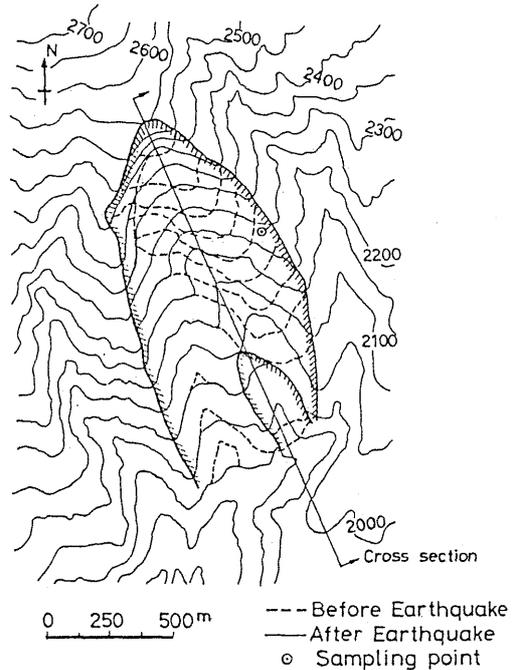


図-1 御岳山頂付近の斜面崩壊

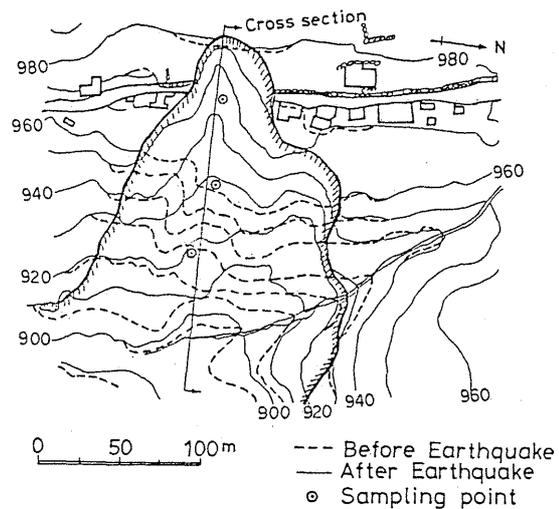


図-2 松越地区の斜面崩壊

"Study on the slope failures caused by Naganoken-seibu Earthquake" H.L.Hsu(National Chiao-Tung Univ.R.O. China), I.Nakasumi(Fudo construction Co.,Ltd.), K.Ishihara, Y.Yoshida(Univ. of Tokyo) and N.Yoshida(Sato Kogyo Co.,Ltd.).

的には、上部テフラ層と下部テフラ層に区別される生成時期の異なる軽石層であるが¹⁾、両者ともその力学的特性は知られていなかった。そこで御岳山頂付近で1ヶ所、松越地区で3ヶ所、不攪乱試料のサンプリングを実施し、実験室に持ち帰り、その物理特性・力学的特性を調べた。

3. 室内試験と試験結果

持ち帰った不攪乱試料で、静的三軸試験 (C U - T E S T) と動的三軸試験 (振動三軸試験) を実施した。動的試験は次のような手順で行われた。

- ① 試料を有効拘束圧 σ'_0 で等方圧密した後、初期せん断応力 σ_s を軸力として加え、排水状態で放置する。(今回は、同一拘束圧での静的強度 σ_f の0.5倍、すなわち $\sigma_s = 0.5 \sigma_f$ なる初期せん断応力を加えた。)
- ② 動的荷重は、不規則波 (今回は十勝沖地震 (1968年) の室蘭加速度記録EW成分) を使用し非排水条件で軸力として加える。
- ③ 動的荷重後、排水条件にし、発生した軸ヒズミを測定する。
- ④ 不規則波の最大応力 σ_d を順次上げていき、繰り返し同一試料に載荷し、各々に発生したヒズミの合計を残留ヒズミとする。

3-1 御岳山頂付近の試料の試験結果

当地区の試料は数が少ないので静的三軸試験 (C U - T E S T) のみ実施した。試験結果を図-5, 6に示す。破壊包絡線より静的強度定数

$$C = 150 \text{ kN/m}^2, \phi = 15^\circ$$

が得られた。

3-2 松越地区の試料の試験結果

図-7には試験結果の一例として、有効拘束圧 200 kN/m^2 での静的試験結果と動的試験結果を示している。図にみられるように動的強度は静的強度の約2倍になっている。

ところで、松越地区は3ヶ所でサンプリングを実施したが、物理特性・力学特性からみて、上部の2ヶ所と下部の2つに分類し試験結果を整理した。

図-8に松越上部の試験結果を示す。図のモールの応力円の内、実線のものは静的強度 σ_f を、破線のものは

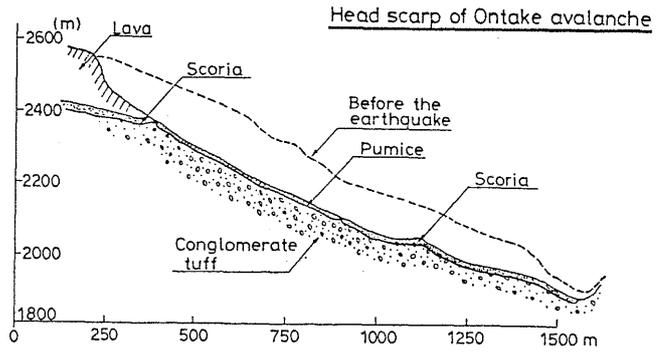


図-3 すべり面の状況 (御岳山頂付近)

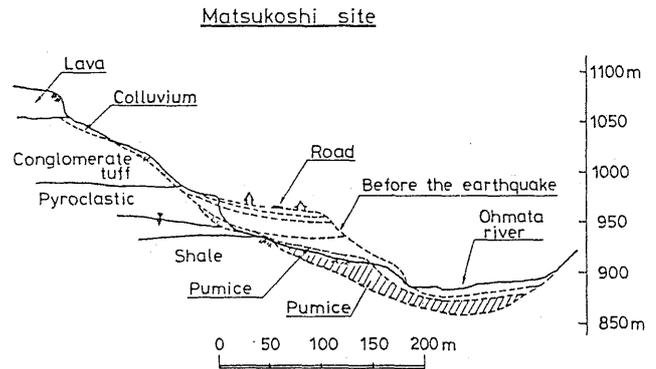


図-4 すべり面の状況 (松越地区)

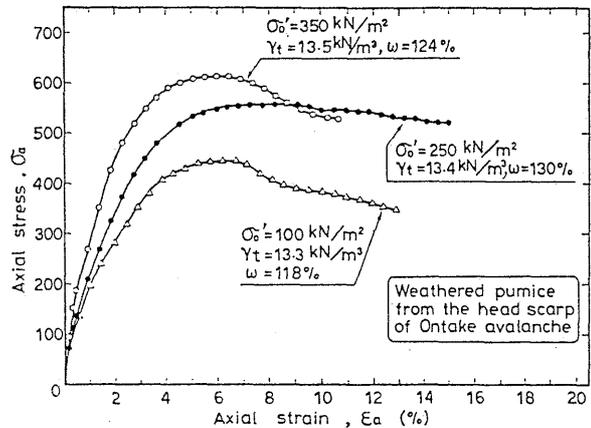


図-5 応力とヒズミの関係 (御岳山頂付近)

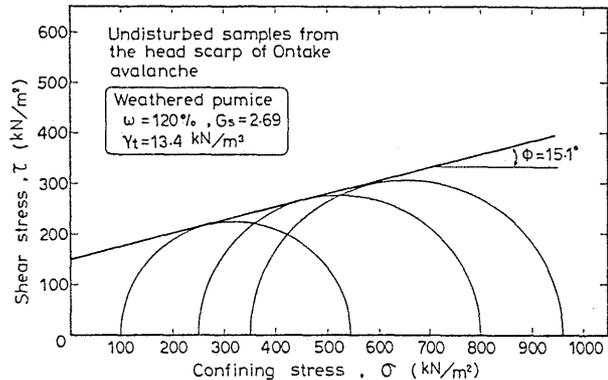


図-6 モールの応力円 (御岳山頂付近)

ものは動的強度 $\sigma_{df} = (\sigma_f + \sigma_s)_{max}$ を示している。また図-8の静的強度に対する破壊包絡線(実線)は、試料間のバラツキ(例えば含水比の相異など)を考慮すればほぼ妥当なものと評価でき、静的強度定数

$$C = 20 \text{ kN/m}^2, \phi = 15^\circ$$

を得る。

粘性土については、不攪乱・攪乱試料を問わず、動的強度に対する破壊包絡線(破線)は静的強度に対する破壊包絡線と平行($\phi_d = \phi$)となるのが、石原らにより報告されている2)3)ことを参照すると

動的強度定数

$$C_d = 60 \text{ kN/m}^2, \phi_d = 15^\circ$$

を得る。

図-9に松越下部の試験結果を示す。松越上部と同様の方法で、静的・動的強度定数

$$C = 60 \text{ kN/m}^2, \phi = 15^\circ$$

$$C_d = 120 \text{ kN/m}^2, \phi_d = 15^\circ$$

を得る。

3-4 動的強度と静的強度の比較

図-10に今回実施した動的試験結果をすべて示す。縦軸は静的強度 σ_f で割って無次元化してある。これらを見ると動的強度 σ_{df} は、 σ_f の1.6倍から2倍程度の値であることがわかるが、石原・長尾ら2)が報告しているような「有効拘束圧 σ'_c が小さくなれば、 $(\sigma_d + \sigma_s)/\sigma_f$ は大きくなる。」というような関係は見出せなかった。動的粘着力 C_d と静的粘着力 C の比は、

$$C_d / C = 3.0 \quad (\text{松越上部})$$

$$C_d / C = 2.0 \quad (\text{松越下部})$$

と石原・長尾ら2)の2.4、石原・小屋町ら3)の1.9とはほぼ等しくなっている。

4. 安定解析

前項で求めた強度定数を使って簡単な安定解析を実施した。御岳山頂付近については、動的試験を実施していないが、松越下部の $C_d / C = 2.0$ をもとに、

$$C_d = 300 \text{ kN/m}^2 \quad (C = 150 \text{ kN/m}^2)$$

$$\phi_d = 15^\circ \quad (\phi = 15^\circ)$$

を動的強度定数とした。

4-1 解析に用いた式

今回の解析に用いた式は、Janbu 4)による安定解析

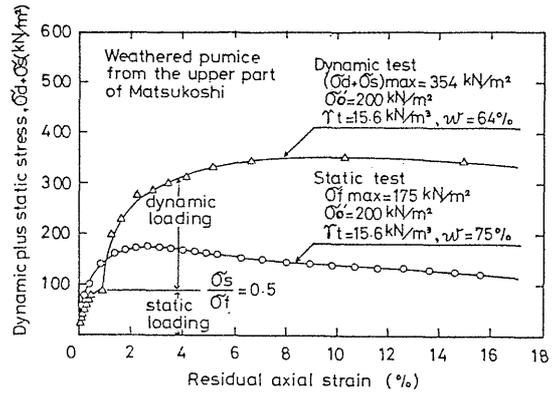


図-7 松越地区の試験結果

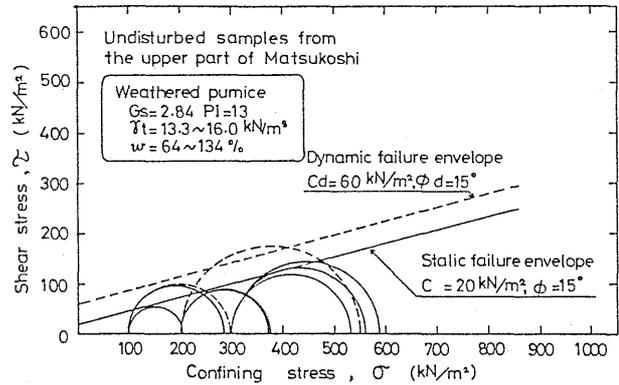


図-8 モールの応力円(松越地区上部)

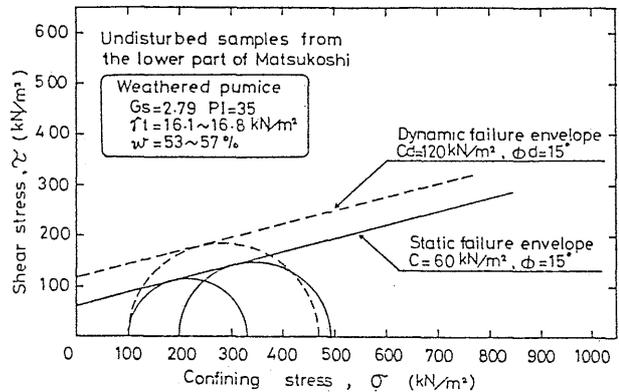


図-9 モールの応力円(松越地区下部)

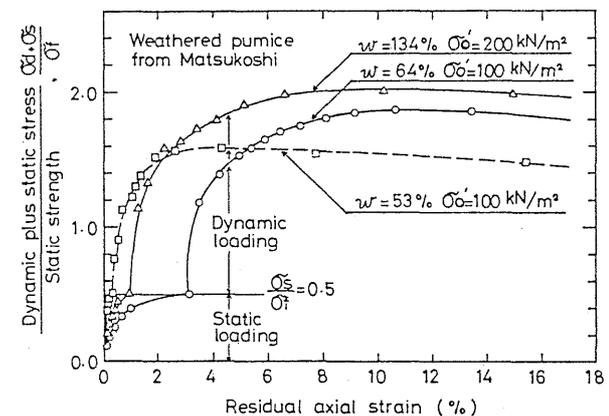


図-10 応力と残留ヒズミの関係(松越地区)

の式に、地震力を水平力として加えたもので、安全率 F_d は次式で表される。

$$F_d = \frac{\Sigma (W \tan \phi + C_d \cdot L \cos \alpha) / M_\alpha}{\Sigma (W \tan \alpha + (a_{max} / g) W)}$$

$$M_\alpha = \cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi / F_d)$$

ここに、 W : 土塊の重量、 L : 土塊の長さ

α : 斜面の傾き、 a_{max} : 最大加速度

この式は、両辺に F_d が入っているため、繰返し計算によって F_d を算出する。

4-2 解析結果

図-11, 12に御岳山頂付近と松越地区の斜面についての安定計算結果をそれぞれ示す。

両地区とも動的強度を用いると、200gal から300gal の間で $F_d = 1.0$ を切っており、今回の地震で生じたと考えられる加速度の値と比較すると妥当な計算結果と言えよう。一方、従来から解析に用いられている静的強度を使って安全率を計算すると安全率はかなり過小評価されることになり、これは地震時の土の強度を評価することのむずかしさを改めて示していると言えよう。

5. まとめ

長野県西部地震による斜面崩壊について、現地調査・サンプリング・室内試験・安定解析により検討を加えた結果、以下のことがわかった。

- ① 御岳山頂付近、松越地区のいずれの地区で採取した軽石も含水比が高く、強度（特に ϕ の項）が低いので、すべり層となりやすい。
- ② 軽石について静的強度 σ_f と動的強度 σ_{df} を求めてみたが、両者の比 σ_{df} / σ_f は1.6～2.0となった。
- ③ 軽石について静的粘着力 C と動的粘着力 C_d を求めてみたが、両者の比 C_d / C は2.0～3.0となった。
- ④ 動的強度を用いて安定解析をしたが、最大加速度200～300galで安全率 F_d が1.0をきった。

<参考文献>

- (1) 小林武彦「御岳テフラ層の層序とその年代」, 1982年文部省科学研究費研究報告, No.1, 「下末吉段丘」
- (2) Ishihara, K., Nagao, A. and Mano, R. (1983), "Residual Strain and Strength of Clay under Seismic Loading", Proc. 4th Canadian Conference on Earthquake Engineering
- (3) Ishihara, K., Koyamachi, N. and Kasuda, K. (1984), "Strength of a Cohesive Soil in Irregular Loading", Proc. 8th World Conference on Earthquake Engineering
- (4) Janbu, N. (1955), "Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis," Proc. ECSES, Stockholm

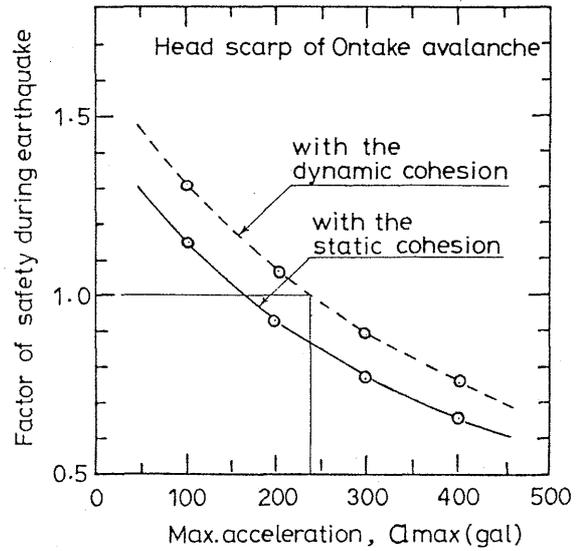


図-11 安全率と最大加速度の関係（御岳山頂付近）

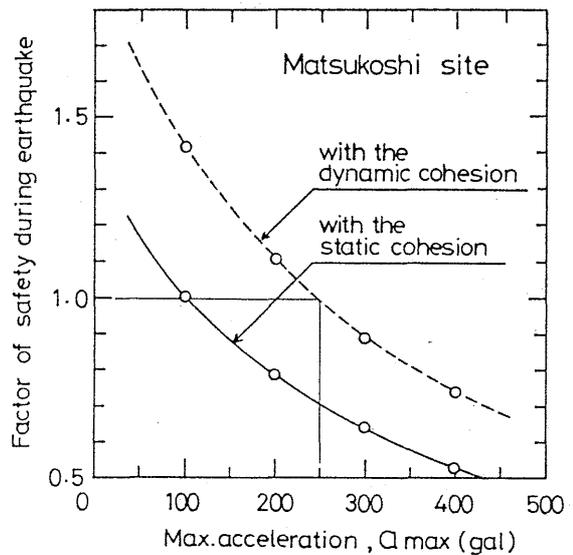


図-12 安全率と最大加速度の関係（松越地区）