

農林水産省森林総合研究所 ○落合博貴・松浦純生・梁瀬秀雄

1. はじめに

1984年の長野県西部地震により発生した地すべり・崩壊は、伝上川源頭部の大崩壊、松越地区、御岳高原にみられるように、比較的緩斜面で規模が大きく、すべり面が軽石層内において発生しており、谷地形、不透水層の存在等地下水の集中しやすい条件が特徴として挙げられる。

地震時の崩壊については、芥川ら¹⁾が、海外の事例から液状化あるいは地震動による土の強度低下を伴った可能性を指摘し、緩斜面においても大規模な崩壊発生が起こり得るとしている。しかし、長野県西部地震においては、小西ら¹¹⁾が大崩壊と松越地区の崩壊のすべり面付近から採取した軽石の地震時の間隙水圧の累積傾向を指摘し、崩壊の原因となった軽石層の液状化の可能性を示唆しているが液状化は確認されていない。

そこで、地震により発生した崩壊のメカニズムを推定するため、長野県西部地震により発生した御岳高原の崩壊を例に現地調査を行なうとともに、斜面安定解析を実施した。

2. 御岳高原の崩壊地の概況

長野県西部地震による崩壊のうち、御岳高原の南端の御岳霊場付近の標高1,300m~1,400mの御岳有料道路沿いに3カ所、その付近に2カ所計5カ所の崩壊が発生した(図-1)。それぞれの崩壊の厚さは、5~8mの厚さで¹²⁾、田中⁶⁾によれば、いずれの崩壊も“層すべり”を呈し、崩壊面積に比して崩壊深がほぼ一定で浅く、平板状すべりを呈しており、斜面に平行に形成された地層のうちある特定の層準で破断が生じ崩壊が発生したと説明している。御岳高原付近は、古期御岳の溶岩層を新期御岳テフラ層⁷⁾が厚くおって傾斜15°前後の緩斜面となっている。小林⁸⁾は風化・粘土化が進み透水性の著しく低い淡灰色の火山灰層とPm-I'軽石層の上に間隙が多く脆弱なPm-I軽石層が厚く重なりその基底面で破壊が生じたとしている。

そこで、地震時に崩壊した御岳高原の斜面の深さ方向の構造を推定するためスウェーデン式貫入試験を行なった。試験は、各々A、C、D崩壊の滑落崖の上部で実施した。その結果を、甚野ら⁴⁾の提案した換算式によりN値に変換し、図-2に示した。平均的には5程度の換算N値を示し非常に強度が低いことがわかる。また、滑落崖の観察結果から、深

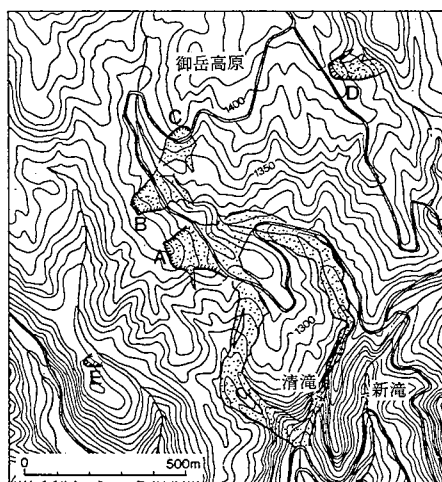


図-1 長野県西部地震による御岳高原の崩壊地の分布

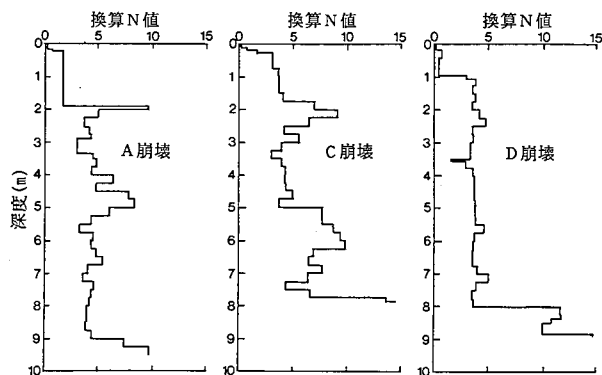


図-2 崩壊地頭部のスウェーデン貫入試験の結果

き2~2.5mの値の高いところは粒度の大きい軽石層に、深さ8~9m以上の値の高いところは火山性の粘土層に相当している。そして、粘土層相当の部分の上部に現われるややN値の低い部分がP_m-I層に当たると推定された。

3. Spencer法による地震時の斜面安定解析

御岳高原のA崩壊(図-1)について、地震動を考慮した安定解析を行なった。地震動を考慮した地すべりの安定解析は一般に、修正Fellenius法のような円弧すべり法が一般的であるが、一般に複雑なすべり面形を呈する自然斜面に適用するため、一般分割法であるSpencer法¹²⁾について地震力の導入を検討した。

各スライスに作用する力として、スライスの重量W、その反力P、スライス底面のせん断力S、摩擦角S/F(安全率F)、スライ

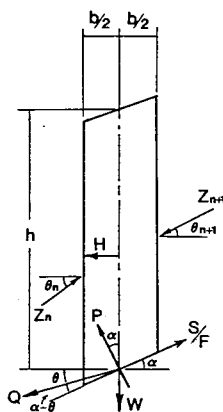


図-3 スライスに作用する力

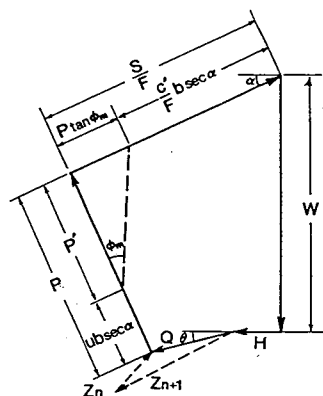


図-4 スライスにおける力の多角形

の角度 θ_n 、 θ_{n+1} ($=\theta_L$ 、 θ_R)、地震力 H ($=W \cdot a_{max}/g$)とすると(図-3)、図-4に示す力の多角形における、スライス底面に垂直な力の釣合から、

$$W \cos \alpha - P' - u b \sec \alpha + Z_n \cdot \sin(\alpha - \theta_n) - Z_{n+1} \cdot \sin(\alpha - \theta_{n+1}) - H \sin \alpha = 0 \quad \dots\dots(1)$$

また、スライス底面に平行な方向の釣合から、

$$\frac{P' \tan \phi}{F} + \frac{C' b \sec \alpha}{F} - W \sin \alpha - Z_n \cdot \cos(\alpha - \theta_n) - Z_{n+1} \cdot \cos(\alpha - \theta_{n+1}) - H \cos \alpha = 0 \quad \dots\dots(2)$$

ここで $\theta_n = \theta_{n+1}$ と仮定して 式と 式から P' を消去すると、

$$Z_{n+1} - Z_n = \frac{C' l + (W \cos \alpha - u l - H \sin \alpha) \tan \phi' - W \cdot F \sin \alpha - H \cdot F \cos \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \{F + \tan \phi' \tan(\alpha - \theta)\}} \quad \dots\dots(3)$$

すべり面全体での内力の釣合から、 $Z_0 = 0$ のとき $Z_n = 0$ であり、(3)式からこの条件は、

$$\Sigma (Z_{n+1} - Z_n) = 0 \quad \dots\dots(4)$$

また、スライス底面の中心のモーメントの平衡から、

$$Z_L \cos \theta_L \times L_L + Z_L \sin \theta_L \times \frac{b}{2} - Z_R \cos \theta_R (L_R + \frac{b}{2} \tan \alpha_i) + Z_R \sin \theta_R \times \frac{b}{2} = 0 \quad \dots\dots(5)$$

各スライスの作用線の位置 L_i は、

$$L_i = \frac{b_i}{2} (\tan \theta_i - \tan \alpha_i) + \frac{1}{Z_i \cos \theta_i} \sum_{j=1}^i [J] \quad \dots\dots(6)$$

ここで、

$$J = \frac{1}{2} Z_{i-1} [\sin \theta_{i-1} (b_i + b_{i-1}) - \cos \theta_{i-1} (b_i \tan \alpha_i + b_{i-1} \tan \alpha_{i-1})] \quad \dots\dots(7)$$

すべり面全体でのモーメントの平衡を考えると、すべり面終点を含むスライスでは、

$Z_n = 0$ でモーメントを満足しなければならない。これは、すべり面終点を含むスライスの左側の境界に作用する

スライス間力Zの延長線がスライス底面の中点を通ることに相当し

$$\sum_{i=1}^N [J] = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

以上、(4)式と(8)式を満足するとき、すべての力学的条件を満足することになり、そのときのFとθが求める解となる。ここでは、非線形連立方程式の解法であるNewton-Raphson法を用いてF、θを求めた。

また、地震動による間隙水圧の上昇を安定解析に考慮するため、由比試験地において観測された垂直成分のS波部分に相当する間隙水圧の応答特性⁹⁾から卓越周波数1 Hzと仮定した時の地震加速度に対する間隙水圧のゲインを0.015(kgf・sec²/cm³)として地震時の間隙水圧の増分、

$$\Delta u = 0.015 \cdot a_{max} \quad \dots\dots\dots (9)$$

を平常時の間隙水圧に加えた。

石原²⁾は震度法による安定解析においては、不規則波を用いて得られた土の動的反力強度を採用すべきであるとして、粘性土に関する静的載荷試験と動的載荷試験の結果から、両方の載荷方式による差は粘着力においてのみ現われる、として次の関係を示した。

$$C_D / C - 1 = (1 + \sigma_v / C \cot \phi) (\sigma_{Dr} / \sigma_r - 1) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、C_D、Cおよびσ_{Dr}、σ_rは、それぞれ、動的載荷試験と静的載荷試験による粘着力と破壊時の軸応力、σ_vは拘束圧、φは静的試験による内部摩擦角であり、火山性粘性土についての実験結果から、C_D/Cの値は1.59～2.4であることを示した。また、長野県西部地震の際の松越地区の2箇所から採取したの風化軽石の試験によれば、2.0～3.0であるとした³⁾。

4. 解析結果の概要

解析に用いた斜面の縦断面とスライスの分割状況を図-5に示した。崩壊の縦断方向の地質・地形構造の決定に当たっては、既存の御岳高原の崩壊に関する資料^{3,10,13)}を参考にした。すべり面となった軽石層P_m-Iとその上を被っている火山灰層の2層構造を想定し、また、地下水位を考慮する場合は、ほぼ軽石層全体に滞水層が形成されたと考えた。用いた材料特性を表-1に示す。

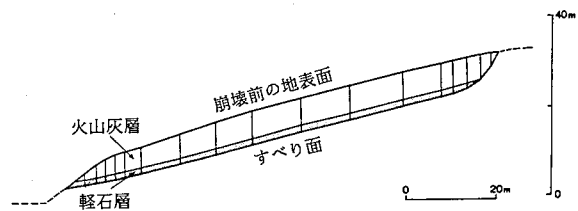


図-5 御岳高原A崩壊の安定解析モデル

表-1. 安定解析モデルの材料特性

構成材料	単位体積重量 γ _t (t/m ³)	粘着力(静的) (動的) C'(tf/m ²) C _D '	内部摩擦角 φ (degree)
火山灰層	1.5	3.0 6.0	25.0
軽石層	1.0	1.9 3.8	7.0

安定解析の条件として、動的粘着力C_D'の場合、①地下水位無し(case D)、②地下水位あり(W)、③地下水位+地震による過剰間隙水圧(WP)、最も危険側の解析として、静的粘着力の場合に④地下水位+地震による過剰間隙水圧を考慮した場合(WP')。また、地震動のエネルギーが地盤の間隙水圧を上昇させるために使われ、液化化あるいは強度の低下により支持力の低下した地盤が静的な重力や横方向の力によりすべる場合を想定し、⑤地震動による慣性力をゼロにして過剰間隙水圧のみを考慮した場合(P')。以上の5ケースについて水平方向の震度と安全率の関係を求め図-6に示した。

動的粘着力を用いた場合の①から③の場合、F=1.0となる最大加速度a_{max}の値は、それぞれ259gal、309gal、

335galであった。長野県西部地震の御岳高原における最大加速度 $a_{max} = 300 \sim 400 \text{ gal}$ と推定されており⁵⁾、地下水の条件に関わらず、地震動により崩壊が発生した可能性が考えられる。静的粘着力を用いた④の場合 $F = 1.0$ となる $a_{max} = 63 \text{ gal}$ で崩壊してしまうことになり、実際の現象を説明できない。また、過剰間隙水圧のみの⑤の場合 $F = 1.0$ となる $a_{max} = 408 \text{ gal}$ で、過剰間隙水圧のみでも崩壊が考えられるが、今回用いた過剰間隙水圧の応答特性では、地震力のみで崩壊してしまうため、実際には起こり難いことになる。しかし、動的粘着力の値、過剰間隙水圧の応答特性によってはケース⑤の安全率がケース①～③に比べ小さい場合も十分有り得る。すなわち、地震時には $F > 1.0$ で、地震終了後に $F < 1.0$ となって崩壊が発生することが想定される。

5. おわりに

軽石層が関与する地震時崩壊の発生メカニズムは、風化、粘土化が進み透水性の低い火山灰層⁴⁶⁾の上に堆積し、飽和状態にある軽石層の間隙水圧が地震動により上昇し有効応力が減少して液状化ないしそれに近い状態になり、軽石層自体が破壊、流動化して上部に乗せた土層ごと移動したと推定するものである。軽石層の地表面への湧き出しは、地震動により直接液状化した可能性も考えられるが、滑動を開始した土層が泥流化する過程で軽石層が液状化して起こった可能性も考えられる。

なお、今回解析に用いたプログラムは、川本⁴⁾によるものに筆者らが地震入力に伴う修正を加えたものである。

最後に、現地調査に当たりご協力頂いた徳島県川島農林事務所明石博之氏、富山県林業技術センター上林徳久氏、森林総合研究所地質研究室吉永修一郎氏に感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 芥川真知・吉中龍之進・安江朝光 (1980): 地震災害と地形・地質 4. 山地における事例を中心にして、土と基礎, 28 (6), 95-102.
- 2) 石原研而 (1985): 設計施工上の留意点をさぐる 6. 土の動的性質, 土と基礎, 33 (6).
- 3) Ishihara, K. and H.L. Hsu, (1986): Considerations for landslides in natural slopes triggered by earthquakes, Proc. of JSCE., No. 376/III-6, 1-16.
- 4) 甚野慶右・野田信也・城戸博彦 (1983): 住宅等小住宅の地盤調査について, 第18回土質工学研究発表会, 65-68.
- 5) 川本 治 (1981): スライズ間力を考慮した極限平衡法の検討と地すべり安定解析への適用, 農土試技報C22, 53-86.
- 6) 国立防災科学技術センター (1985): 昭和59年(1984年)長野県西部地震災害調査報告, 主要災害調査, 25号, 141pp.
- 7) 小林武彦・大森江い・大森貞子 (1975): 御岳火山噴出物の化学的性質, 地調月報, 26 (10), 497-512.
- 8) 小林武彦 (1985): 御岳火山の活動史と長野県西部地震による崩壊地の地質, 日本地形学連合シンポジウム資料集「火山体の解体及びそれに伴う土砂移動」, 48-58.
- 9) Ochiai, H., S. Matsuura, H. Yanase and Y. Shinagawa (1987): Pore pressure change in soil layer of a landslide area during earthquakes, Proc. Vth Int. Conf. and Field Workshop on Landslides, 205-210.
- 10) 大草重康・安間荘・毎熊弘・藤田至則・梶倉克幹 (1986): 1984年長野県西部地震による斜面崩壊とその特徴, 応用地質, 27 (3), 10-22.
- 11) 信州大学自然災害研究会 (1985): 昭和59年長野県西部地震による災害, 信州大学, 松本, pp148.
- 12) Spencer, E. (1973): Thrust line criterion in embankment stability analysis Géotechnique, 23 (1), 85-100.
- 13) 田中耕平・古長孟彦・安田 進・中道育夫・榊 裕介 (1985): 長野県西部地震で崩壊した御軽石層の物理・力学特性, 第20回土質工学研究発表会, 537-538.

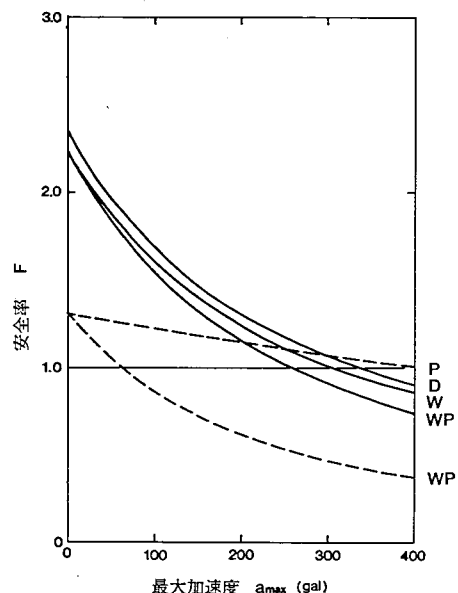


図-6 御岳高原A崩壊における最大地震加速度 a_{max} と安全率 F の関係

(実線: 動的粘着力 CD の場合
破線: 静的粘着力 C の場合
D: 地下水無し
W: 地下水有り
WP: 地下水+過剰間隙水圧
P: 地震後の過剰間隙水圧)