

## II-11 第三紀層地すべりにおける地すべり地塊の強度低下機構に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：雪崩・地すべり研究センター

研究担当者：花岡正明、丸山清輝、小嶋伸一

### 【要旨】

近年、防災事業におけるソフト対策の重要性にともない地すべり斜面の危険度把握手法の確立が重要な課題となっている。また、多くの地すべりは、地すべり土塊の風化による強度低下により発生する。

そこで、本研究では、第三紀層泥岩地帯における地すべり土塊の化学分析、X線回折などを実施し、地すべり土塊の風化による強度低下について検討した。その結果、以下のことが分かった。①地すべり土塊の風化機構を示すことができた。②スメクタイトの量は、推定すべり面付近でその周辺より多くなっており、すべり面深度の判定のための有力な情報になる。③地すべり斜面中間部における地すべり土塊中のNa<sub>2</sub>O成分変化率及び斜面勾配を求めることにより、地すべり斜面の地すべり危険度を評価できる可能性がある。

キーワード：地すべり、泥岩、化学的風化、強度低下機構

### 1. はじめに

近年、防災事業におけるソフト対策の重要性にともない地すべり斜面の危険度把握手法の確立が重要な課題となっている。また、多くの地すべりは、地すべり土塊の風化による強度低下により発生する。このことから、地すべり発生危険度判定手法を確立するためには、地すべり土塊の風化による強度低下機構を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、第三紀層泥岩地帯で発生した再滑動型地すべりにおける地すべり土塊の化学分析、X線回折などを実施し、地すべり土塊の化学的風化の状態、スメクタイトの深度方向における含有状態を調査するとともに、それらを基に地すべり土塊の風化による強度低下機構について検討した。

### 2. 調査目的

本研究は、第三紀層泥岩地帯の再滑動型地すべりにおける地すべり土塊の化学的風化状態、スメクタイトの含有状態、地すべり土塊の風化による強度低下機構を明らかにすることを目的とする。

### 3. 地すべり地の概要

#### 3.1 地すべり地の地形及び地質

研究対象とした地すべりは、新潟県上越地方妙高市の地すべり多発地帯に位置する中栗地すべり、花立地すべり、馬場地すべり、細野沢地すべりである。図-1には、各地すべりの位置を示した。

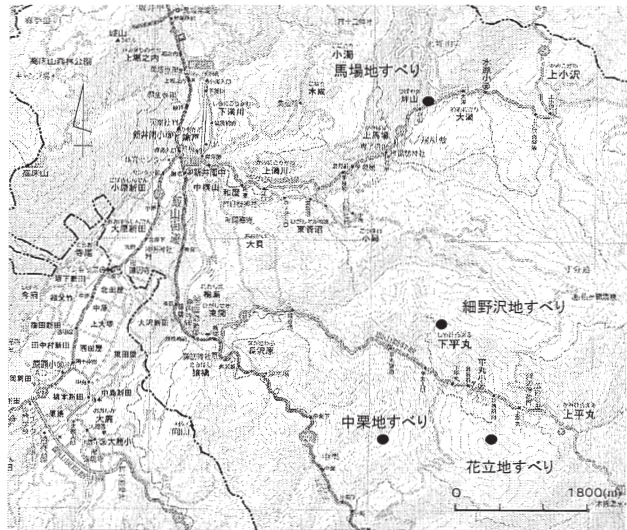


図-1 地すべりの位置図

図-2～5は、各地すべりの平面図を示した。中栗地すべりの規模は、長さ約120m、幅約100mであり、基岩は新第三紀の椎谷層（泥岩）である。この地すべりは、平成14年3月の融雪期に斜面中間部で約1.5mの移動が生じた。花立地すべりの

規模は、長さ約 250 m、幅約 70 m であり、基岩は新第三紀寺泊層（砂質泥岩）である。馬場地すべりの規模は、長さ約 180 m、幅約 80 m であり、基岩は新第三紀富倉層（泥岩）である。細野沢地すべりの規模は、長さ約 90 m、幅約 55 m であり、基岩は新第三紀富倉層（泥岩）である。この地すべりは、平成 17 年 4 月の融雪期に 1 m 前後の移動が生じている。

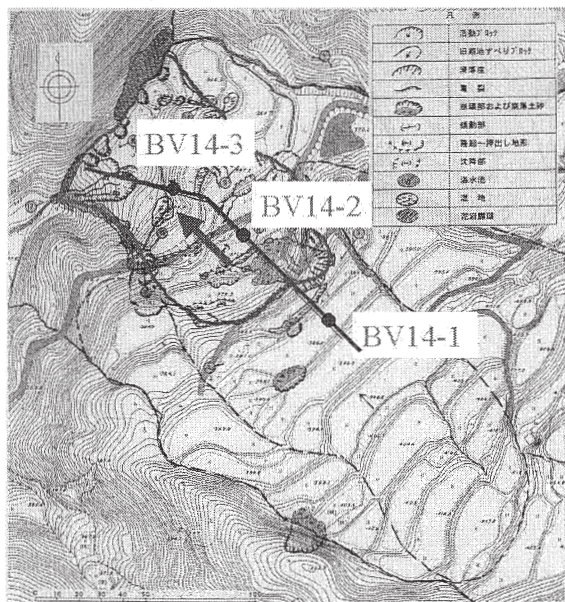


図-2 中栗地すべり平面図

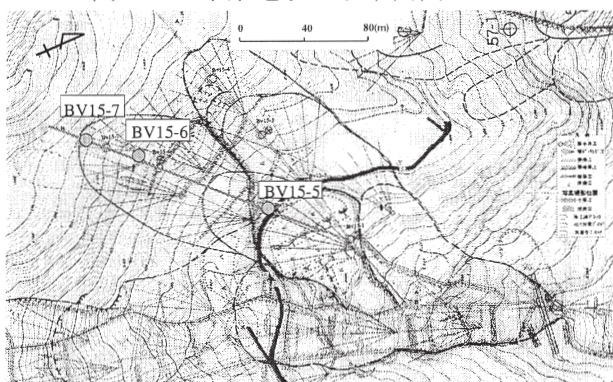


図-3 花立地すべり平面図

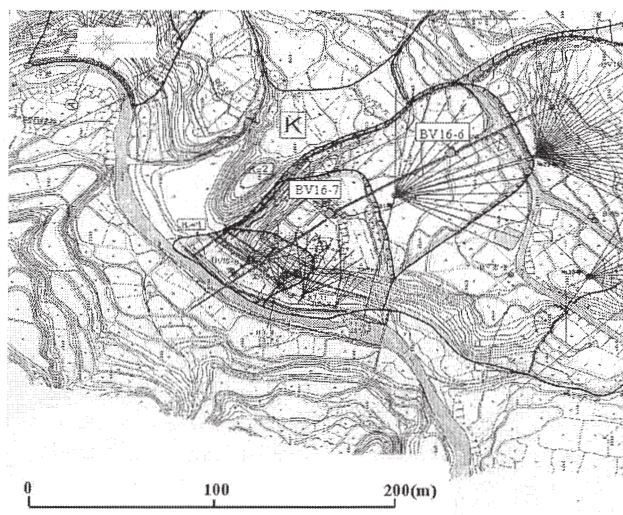


図-4 馬場地すべり平面図

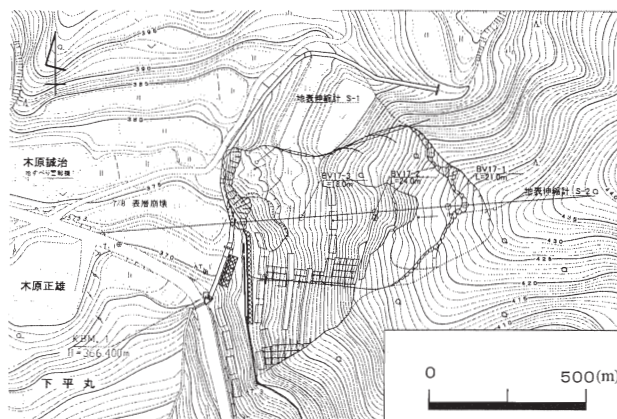


図-5 細野沢地すべり平面図

表-1 化学分析項目と分析方法

分析項目	分析方法
FeO	O-フェナントリン法
H <sub>2</sub> O(+)	ベンフィールド法
S, SO <sub>3</sub>	イオンクロマトグラフ
C	高周波誘導加熱炉燃焼赤外線吸収法
CO <sub>2</sub>	赤外線吸収法
Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	原子吸光法
SiO <sub>2</sub>	アルカリ溶融重量法
TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO	ICP発光分光法
CaO, MgO	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	モリブデン青吸光光度法

#### 4. 研究方法

##### 4.1 地すべり移動層及び基岩の化学分析及び

###### X線回折

化学分析及びX線回折に用いた試料は、ボーリングコアである。なお、分析した試料はボーリングコアの状態から判断して決めた。

##### 4.1.1 化学分析の方法

表-1は、化学分析の分析項目（16成分）及び

方法を示したものである。この他、pHは、蒸留水 50cc にときほぐした自然含水比の試料 30 g を加え、ピーカーに入れて攪拌した後に、pHメータを用いて懸濁水の pH を測定して求めた。

##### 4.1.2 X線回折の方法

本研究では、スメクタイトに着目して研究を進めている。なお、スメクタイトはその量の増大による土の内部摩擦角の低下（江頭ほか、1983；中

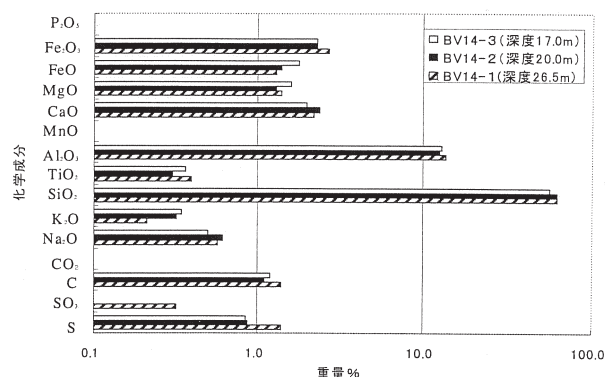
村、1984；玉田、1984、1987；濱崎ほか、1987；矢田部ほか、1990 など）、が指摘されている。

X線回折では、スメクタイトの深度別含有量は定方位試料により求めた。スメクタイトの深度別含有無は、無処理とエチレングリコール処理をした各X線回折結果の対比により判断し、スメクタイトの相対的含有量は無処理のX線回折結果における $2\theta = 6^\circ$ 付近のピーク強度を読み取って求めた。ここで、 $2\theta = 6^\circ$ 付近の反射ピークについては以下のことが懸念された。すなわち、緑泥石がその組成によっては $2\theta = 7.5^\circ$ 付近に反射ピークを持つ場合がある（実際には、 $2\theta = 6^\circ$ の反射ピークと重なっていると思われる）ことや、定方位試料では異なる試料の反射ピーク強度の違いが必ずしも鉱物の含有量の違いを反映していない場合があることである。後者については、ガラスに塗布される試料の量が異なる場合には、その違いが反射ピーク強度に反映されてしまう可能性がある。そこで、緑泥石の反射ピーク $2\theta = 13^\circ$ スメクタイトの反射ピーク $2\theta = 6^\circ$ の各反射ピークをセットにして考え、 $2\theta = 13^\circ$ のピーク強度が変化しないか減少しているのに $2\theta = 6^\circ$ の反射ピーク強度が増加した場合に、スメクタイトの相対的含有量が増加したものと判断することにした。その結果、全試料の $2\theta = 13^\circ$ 反射ピーク強度変動幅が0.06kcps以下であったことから、 $2\theta = 6^\circ$ の反射ピークには緑泥石反射ピークの影響は小さいこと及び、ガラスに塗布した試料の量はほぼ一定であったことが確認された。これらのことから、スメクタイトの相対的含有量は、無処理のX線回折結果における $2\theta = 6^\circ$ のピーク強度から求められると判断した。なお、X線回折はCuK $\alpha$ を使用し、管電圧/管電流 30kV/10mAで実施した。

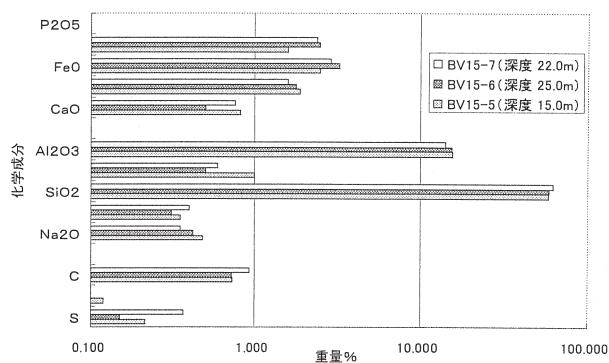
## 5. 研究結果

### 5.1 地すべり移動層及び基岩の化学分析結果

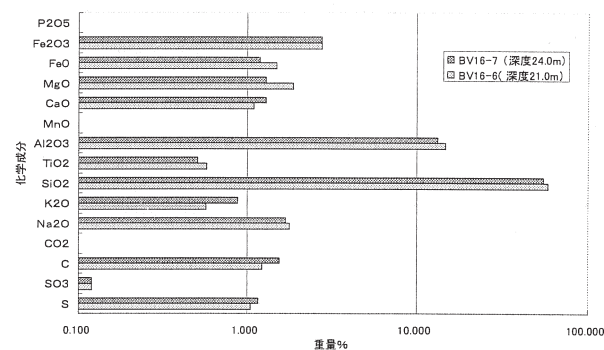
図-6には各地すべりにおける基岩である泥岩の化学成分をそれぞれ示した。泥岩の化学成分は、含有量の多いものとしてSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>があり、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MnO及びCO<sub>2</sub>の含有量は非常に少ない。また、各地すべりにおける基岩の化学成分含有量は多少の



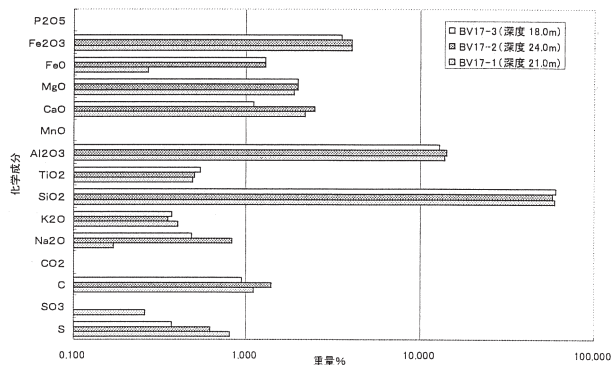
(a) 中栗地すべり



(b) 花立地すべり



(c) 馬場地すべり



(d) 細野沢地すべり

図-6 各地すべりの基岩における泥岩の化学成分

差はあるが、全体的には各成分の含有比がほぼ同じ値であると考えられるため、各地すべりの基岩はほぼ同質のものと考えた。

### 5. 1. 1 地すべり移動層内におけるpHの変化と

#### 化学成分溶出・集積状況

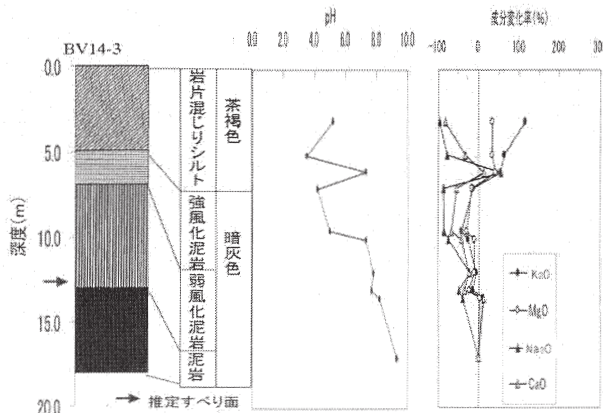
図-7は、各地すべり土塊の地質、pH、化学成分であるアルカリ成分 (Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、CaO、MgO) の基岩に対する成分変化率について示したものである。岩石の化学成分含有量は試料全体の重量に対する重量%として表され、これらの比較では風化による各成分の増減を知ることにはできない。そこで、①風化前の各深度における岩石はすべて同質のものであることと、②化学成分 TiO<sub>2</sub> は化学的風化により移動しないことを各々仮定し、TiO<sub>2</sub> に対する各成分の増減を調べた。なお、①については、図-6に示した各ボーリング位置における基岩の化学成分含有量がほぼ同じであると考えられることから、各深度における土塊は同質の基岩が風化したものと判断して仮定した。また、②については、TiO<sub>2</sub> は一般的な風化作用が生じるpH 4～9の水との接触では溶解しないと考えられている(木村ほか、1999) ことをもとに仮定した。

ある化学成分の新鮮岩(基岩)に対する相対的変化率CC (%)は、(1)式により表される。

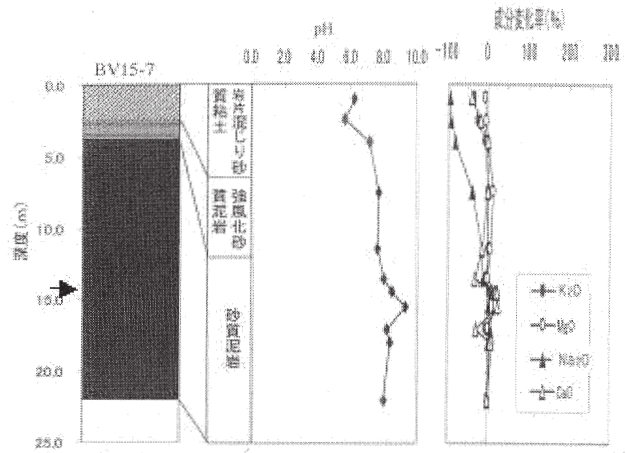
$$CC = (T_f / T_w \cdot E_w - E_f) / E_f \times 100 \quad (1)$$

- ここで、 T<sub>f</sub> : 新鮮岩 TiO<sub>2</sub> 重量%
- T<sub>w</sub> : 風化岩 TiO<sub>2</sub> 重量%
- E<sub>w</sub> : 風化岩のある化学成分重量%
- E<sub>f</sub> : 新鮮岩のある化学成分重量%

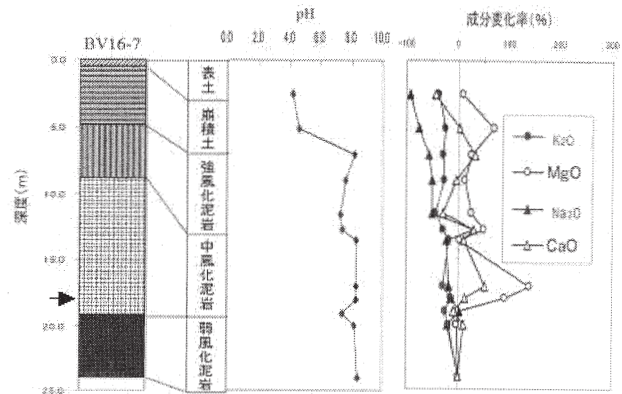
である。なお、新鮮な岩石の化学成分には、各地



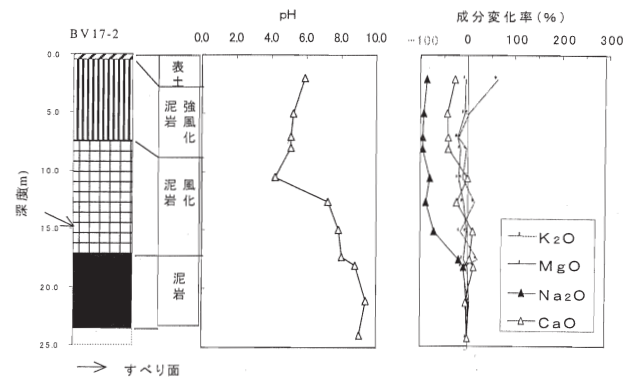
(a) 中栗地すべり



(b) 花立地すべり



(c) 馬場地すべり



(d) 細野沢地すべり

図-7 各地すべりににおける地質、pH、

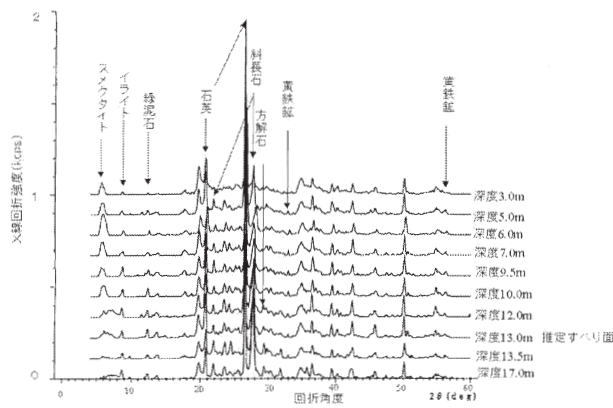
アルカリ成分の成分変化率すべりににおけるボーリングコアの最深部基岩の値を用いた。

アルカリ成分の深度方向成分変化率は、地表面近くが大きく深度が増すにしたがい小さくなっている。また、pHの深度方向の変化は、地表面近くでは酸性であり、深度が増すにしたがいアルカリ

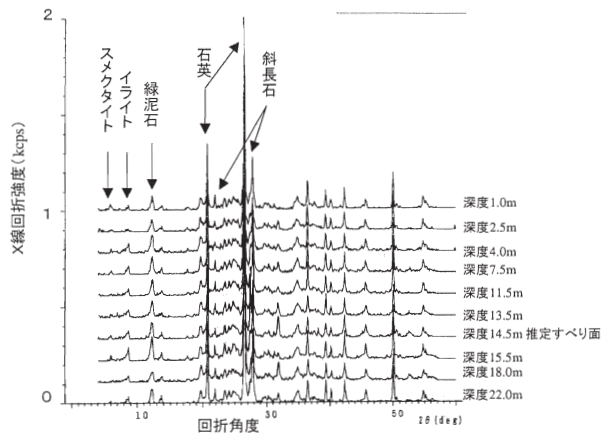
性化している。アルカリ成分の変化率は概ね pH の変化に対応し、アルカリ成分が土塊の酸性化により溶出していることが分かる。アルカリ成分の中で最も成分変化率が大きいものは、Na<sub>2</sub>O である。

## 5.2 地すべり移動層及び基岩の X 線回折結果

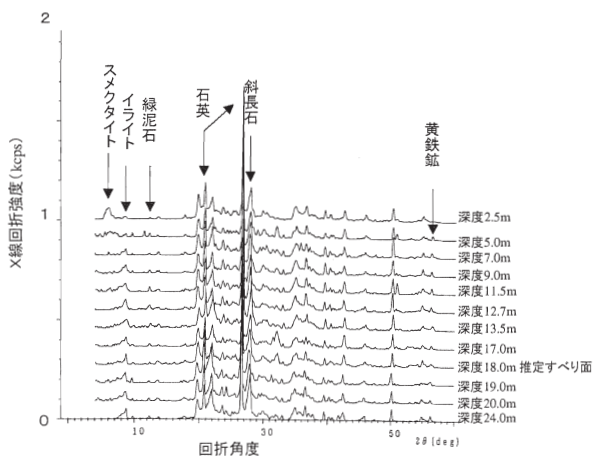
図-8には、各地すべりにおけるボーリングコアの不定方位試料 X 線回折結果を示した。黄鉄鉱の  $2\theta = 56^\circ$  付近の反射ピークは、中栗、馬場、



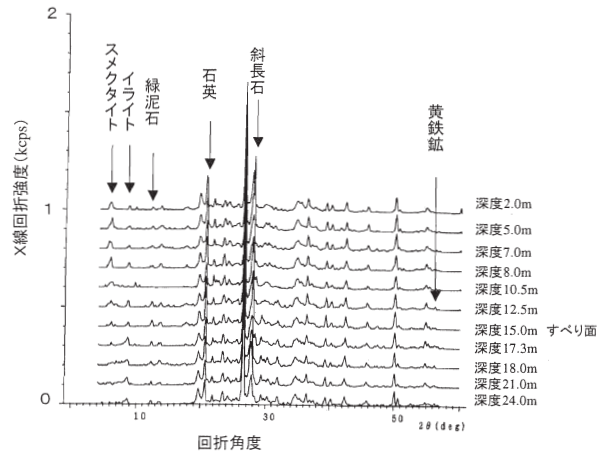
(a) 中栗地すべり (BV14-3)



(b) 花立地すべり (BV15-7)



(c) 馬場地すべり (BV16-7)



(d) 細野沢地すべり (BV17-2)

図-8 各地すべりにおけるボーリングコアの

X 線解析結果

細野沢の各地すべりの基岩に認められるが、移動層には認められる部分と検出限界未満の部分がある。緑泥石については、各地すべりの  $2\theta = 12^\circ$  に反射ピークが認められ、移動層及び基岩に含まれていることが分かる。スメクタイトについては、全ての無処理不定方位試料 X 線回折結果に  $2\theta = 6^\circ$  の反射ピークが認められ、その反射ピークがエチレングリコール処理により  $2\theta = 5^\circ$  付近に移動したことが確認され、その含有が認められた。

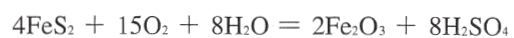
## 5.3 中栗地すべりにおける分析結果の検討

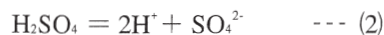
### 5.3.1 pH と 鉱物組成の変化

図-9は、地質柱状図、簡易揚水試験揚水量、pH、黄鉄鉱の有無 ( $2\theta = 56^\circ$  付近の黄鉄鉱反射ピークの有無)、スメクタイトの相対的含有量を示すバックグラウンドを除去した  $2\theta = 6^\circ$  付近の反射ピーク強度 (スメクタイト強度とする) 及び方解石の有無 ( $2\theta = 29^\circ$  付近の方解石反射ピークの有無) の各関係について示したものである。

BV14-1 については、黄鉄鉱は深度 3.0 m と 5.0 m では無しであり、深度 15.0 m 以深では有りとなっている。BV14-2 については、黄鉄鉱は深度 5.0 m では有りであるが、深度 8.5 m 及び 9.5 m では無しであり、深度 13.5 m 以深では有りとなっている。BV14-3 については、黄鉄鉱は深度 3.0 m では無しであり、深度 5.0 m 以深では有りとなっている。

なお、黄鉄鉱は、反応式 (2) に示されるように、地下水を酸性化させる (千木良、1988)。





すなわち、黄鉄鉱は酸素及び水と反応して、酸化鉄と硫酸になる。

各ボーリングコア中の泥岩における pH と黄鉄鉱の有無との関係を以下に示す。BV14-1 の酸性となっている深度 3.0 ~ 15.0 m では、黄鉄鉱は 3.0 m と 5.0 m において検出限界未満であるが、15.0 m においては含まれている。一方、アルカリ性となっている深度 22.0 ~ 26.5 m では、全ての深度で黄鉄鉱が含まれている。BV14-2 の酸性となっている深度 8.5 ~ 14.5 m では、黄鉄鉱は 8.5 m と 9.5 m において検出限界未満であるが、13.5 m と 14.5 m においては含まれている。一方、アルカリ性となっている深度 5.0 m 及び 15.5 ~ 20.0 m では、全ての深度で黄鉄鉱が含まれている。BV14-3 の酸性となっている深度 3.0 ~ 5.0 m 及び 7.0 ~ 9.5 m では、黄鉄鉱は深度 3.0 m において検出限界未満であるが、それ以外においては含まれている。一方、アルカリ性となっている深度 6.0 m と 10.0 ~ 17.0 m では、全ての深度で黄鉄鉱が含まれている。

これらのことから、黄鉄鉱が含まれていない深度区域の下面及びその下方では泥岩が酸性化しており、黄鉄鉱が酸化鉄に変化する際に生じる硫酸が泥岩内を浸透し、泥岩を地表面から徐々に酸性化させて行くことが分かる。また、BV14-3 では、黄鉄鉱が含まれていない深度と下方で隣接する黄鉄鉱が含まれている深度でも酸性を示しているが、これは他から硫酸が浸透してきて酸性化していると考えられる。

スメクタイト強度は、BV14-1 については基岩上面がその周辺より大きくなっており、BV14-2 及び BV14-3 については推定すべり面付近がその周辺より大きくなっている。その他、各ボーリング位置のすべり面付近におけるスメクタイト強度は、BV14-3 が BV14-1 及び BV14-2 より大きくなっている。このスメクタイト強度（量）は土の内部摩擦角の大きさに影響し、その量が多い場合は内部摩擦角が小さくなることが、数多くの研究者により指摘されている（江頭・宣保、1983；中村、1984；玉田、1984、1987；濱崎ほか、1987；矢田部ほか、1990 など）。これらのことから、今回滑動した地すべりブロックでは、ブロック中間部すべり

面の内部摩擦角がブロック上部より小さく、斜面の不安定化はブロック中間部から始まった可能性がある。

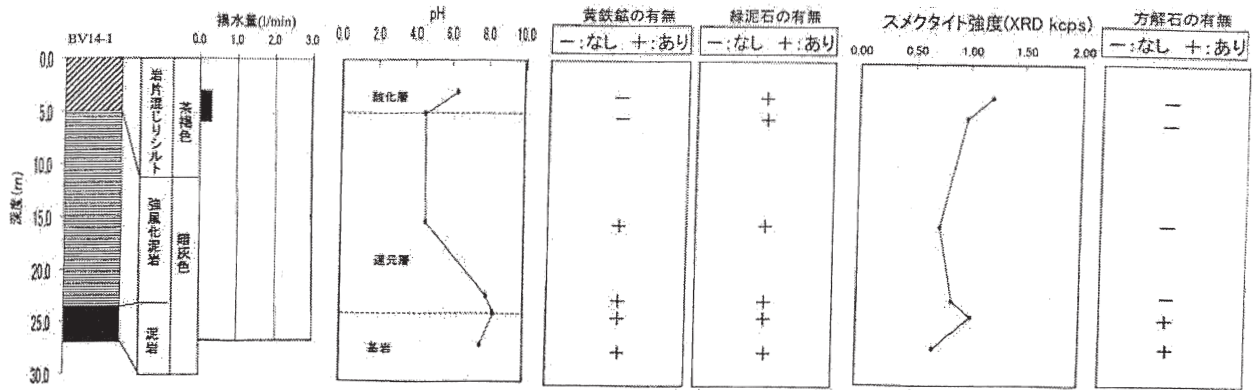
方解石は、BV14-1 及び BV14-2 の移動層及び BV14-3 の深度 12.0 m 以浅の移動層では消失しており（ $2\theta = 29^\circ$  付近のピークが認められない）、BV14-1 及び BV14-2 の基岩及び BV14-3 の深度 12.0 m 以深のすべり面付近と基岩では含まれている。また、方解石の消失している深度区域の下面は、スメクタイト強度の増加している深度と大略一致している。

### 5.3.2 地すべり移動層の風化機構

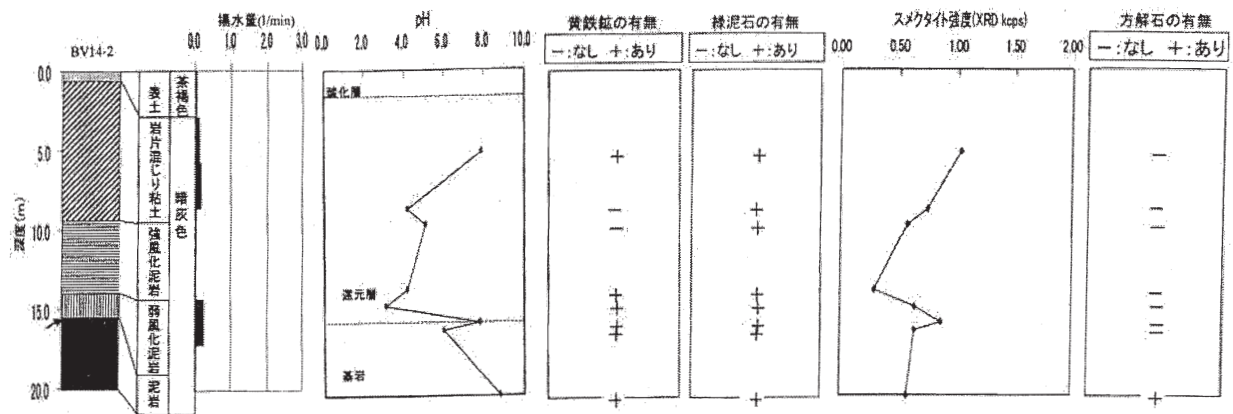
地すべり斜面は移動層と基岩に分けられ、移動層は更に酸化層と還元層に分けられる。酸化層は、千木良（1988）の表層酸化帯と酸化帯に対応し、還元層は千木良（1988）の溶解帯に対応している。

図-6 及び図-9 に示した化学分析及び X 線回折の各結果（BV14-2 では酸化層の分析等は実施していない）では、以下のことが示される。酸化層では、CaO、Na<sub>2</sub>O、FeO、CO<sub>2</sub> 及び S の溶出がめられ、千木良ほか（1992）が示した二酸化炭素が水に溶けてできた炭酸及び酸素の酸化作用によりできた酸による化学成分の溶出が起きている。酸化層基底部分においては、pH が計測した深度中で最も低く、黄鉄鉱の消滅（BV14-1 及び BV14-3）、スメクタイトの増加（BV14-3）及び Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の増加（BV14-1 及び BV14-3）が起きている。還元層の浅部～中部では、pH が酸性を示し、硫酸の還元層内への浸透により還元層が溶解帯になっているが、FeO、S、C、SiO<sub>2</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及び H<sub>2</sub>O (+) については明確な変化が読み取れない。なお、移動層の酸化層及び還元層では、方解石の溶出が起きているが、基岩では起っていない。また、移動層では、方解石の溶出により空隙率の増大と強度低下が生じていることが推定される。還元層基底部分では、pH が 6.0 ~ 8.4 であり、硫酸の影響がわずかに認められ、CO<sub>2</sub>（BV14-1、BV14-2 及び BV14-3）、CaO（BV14-2 及び BV14-3）及び Na<sub>2</sub>O（BV14-1、BV14-2 及び BV14-3）の溶出化率は小さい。

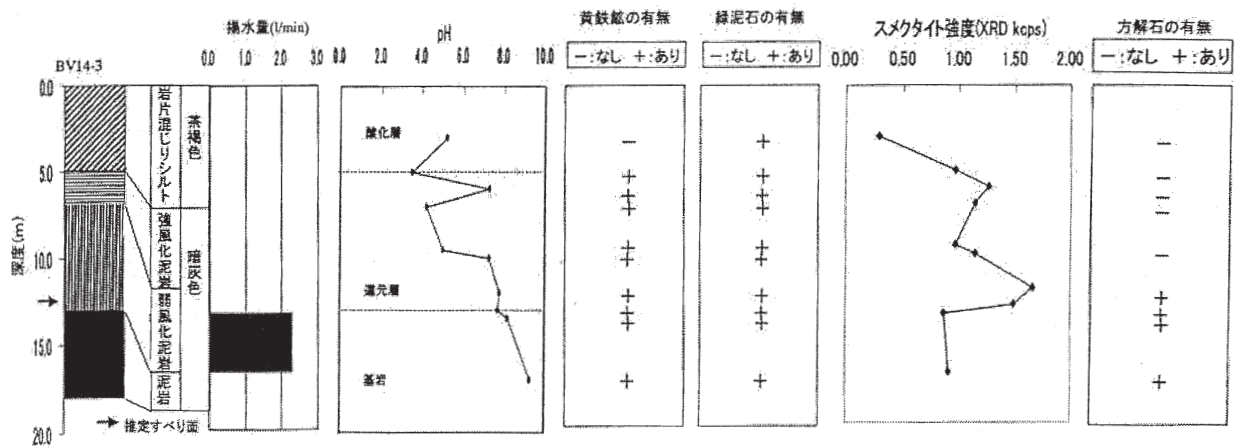
千木良（1988）によると、最も激しい化学的風化は、酸化帯基底部分（酸化フロント）と溶解帯基



(a) BV14-1



(b) BV14-2



(c) BV14-3

図-9 地質柱状図, 簡易揚水試験揚水量, pH, 黄鉄鉱の有無 ( $2\theta = 56^\circ$  付近のピークの有無), 緑泥石の有無 ( $2\theta = 13^\circ$  付近のピークの有無), スメクタイト強度 ( $2\theta = 6^\circ$  付近のピーク強度), 方解石の有無 ( $2\theta = 56^\circ$  付近のピークの有無) との各関係

底部（溶解フロント）で起こるようである。しかしながら、本地すべりでは、最も激しい化学的風化は酸化層基底で起きているが、還元層基底は最も激しい化学的風化が起こるとされる溶解フロントになっていない。

図-10には、以上のことをもとに地すべり移動層の風化機構について示した。地すべり斜面は移動層と基岩から成り、移動層は酸化層と還元層に分けられる。酸化層では、降雨や融雪水の地下浸透にともなう地中水への二酸化炭素や酸素の吸収及び地下水面の変化が生じる。その結果、酸素及び炭酸による化学成分の溶出や、黄鉄鉱の酸化による消失と硫酸及び鉄酸化物の生成、酸による鉱物のスメクタイト化及び方解石の溶出が起こる。なお、硫酸は酸化層から還元層まで達し、地すべり移動層の化学成分の溶出や鉱物のスメクタイト化、方解石の溶出などを生じさせる。また、鉱物のスメクタイト化は、帯水層内では地下水により、すべり面では化学的風化に地すべり移動による土の細粒化が加わり、その効率が高められると考える。このような風化機構により、地すべり移動層の強度低下が生じると考える。

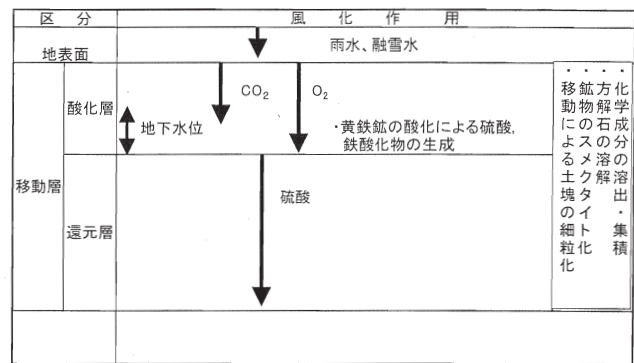


図-10 地すべり移動層の風化機構

#### 5.4 各地すべりにおける深度方向の

#### スメクタイト強度とすべり面

スメクタイトは、その量の増大による土の内部摩擦角の低下が指摘されている粘土鉱物であり、すべり面の形成や地すべりの再滑動に深く関係すると考えられる。

図-11は、中栗地すべりにおける地質及び深度方向のスメクタイト強度変化を示したものである。地質は、概ね地表面から岩片混じりシルト→風化泥岩→泥岩（新第三紀鮮新世椎谷層の硬質泥岩）となっている。また、深度方向全体のスメクタイト強度変化は、各ボーリング毎で異なったものと

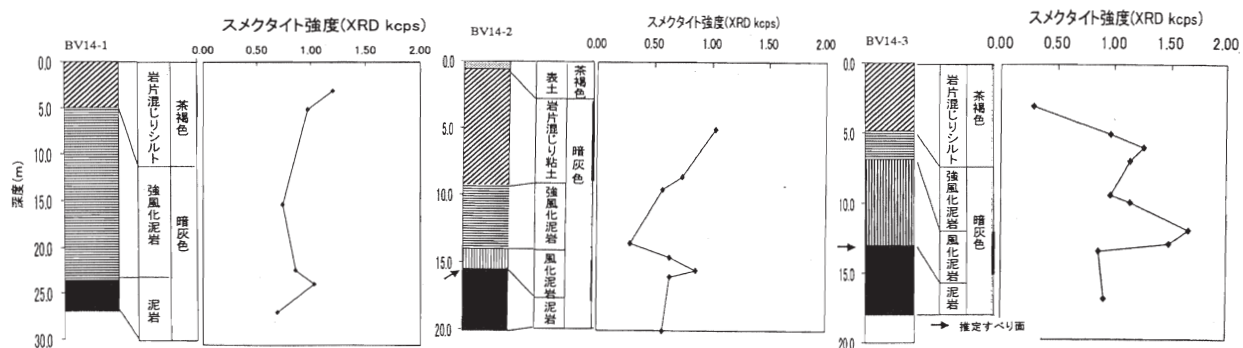


図-11 地質及び深度方向スメクタイト強度変化（中栗地すべり）

以上のことから、地すべりの発生原因には、短期的原因と長期的原因が考えられる。前者は豪雨や融雪水の斜面浸透にともなう間隙水圧の上昇による土塊の強度低下であり、後者は地すべり移動層の強度低下を生じさせる風化、特に化学成分の溶出やその量が土の内部摩擦角 $\phi'$ の大きさと反比例に近い関係にあるスメクタイト量の増大である。地すべりは、長期的原因に短期的原因が加わり、斜面安全率が 1.0 未満になった時点で発生する。

なっており、深度方向には特定な傾向は認められない。図中にコア判読による推定すべり面→を示した。推定すべり面におけるスメクタイト強度は、推定すべり面上下方向の土塊のものより強くなっている。

図-12には、中栗地すべりの主測線縦断面図を示した。図中の推定すべり面は、推定すべり面付近でスメクタイト強度がピーク値を示す深度を結んで描いたものである。描かれたすべり面形状は、



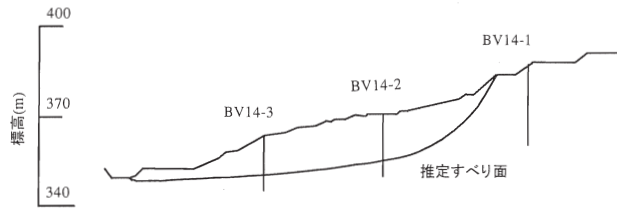


図-12 中栗地すべりの主測線縦断面図  
凹凸がなく工学的にも矛盾のないものである。

図-13は、花立地すべりにおける地質及び深度方向のス멕タイト強度変化を示したものである。

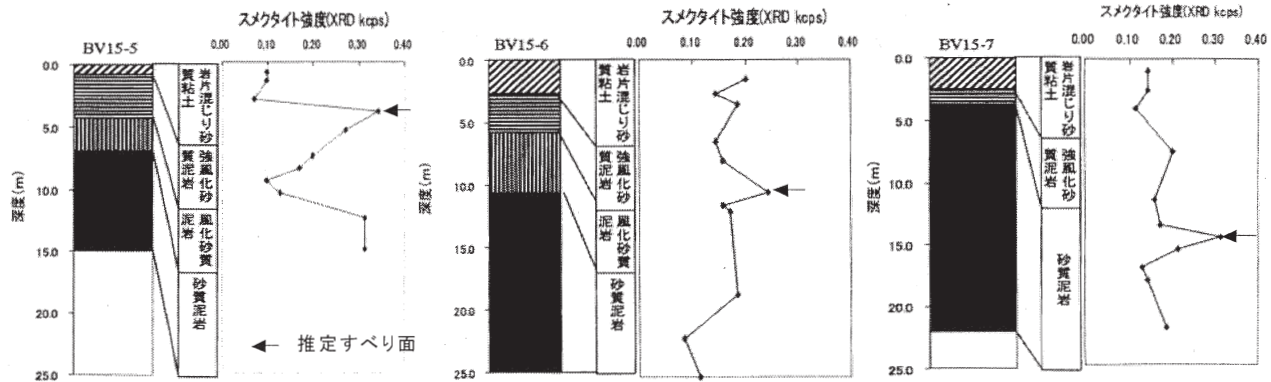


図-13 地質及び深度方向のス멕タイト強度変化（花立地すべり）

地質は概ね地表面から岩片混じり粘土→風化砂岩→砂質泥岩（新第三紀中新世寺泊層砂質泥岩）となっている。深度方向全体のス멕タイト強度変化は各ボーリング毎に異なったものとなっており、深度方向には特定の傾向は認められないが、ス멕タイト強度にピーク値を示す深度が認められる。

図-14には、花立地すべりの主測線縦断面図を示した。図中の推定すべり面は、コア判読に図-13で認められたス멕タイト強度のピーク値を示した深度の情報を加えて判断し描いたものである。推定すべり面形状は、凹凸がなく工

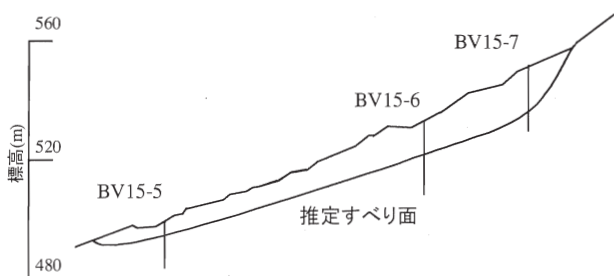


図-14 花立地すべり主測線縦断面

学的に矛盾のないものとなっている。

図-15は、馬場地すべりにおける地質及び深度方向のス멕タイト強度変化を示したものである。地質は概ね地表面から表土→崩積土→強風化泥岩→中風化泥岩→弱風化泥岩（新第三紀鮮新世富倉層泥岩）となっている。深度方向のス멕タイト強度変化については、ピーク値を示す深度が認められる。

図-16には、馬場地すべりの主測線縦断面図を

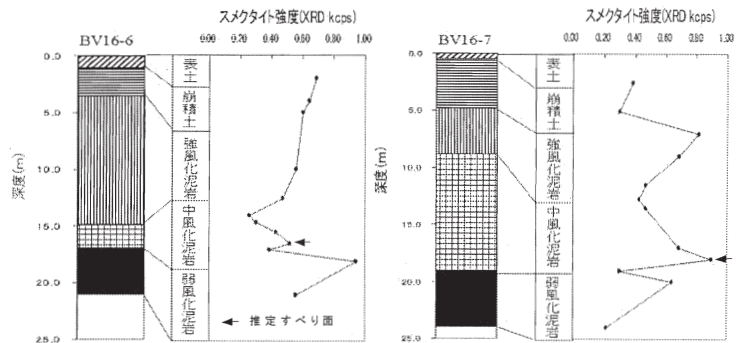


図-15 地質及び深度方向のス멕タイト強度変化（馬場地すべり）

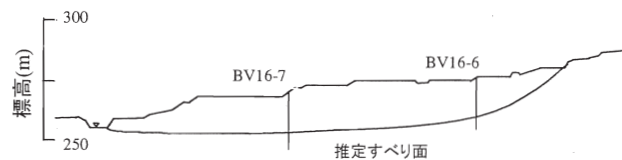


図-16 馬場地すべり主測線縦断面図

を示した。図中の推定すべり面は、図-14に示した花立地すべりと同様にコア判読に図-15に示したス멕タイト強度のピーク値を示した深度の情報を加えて判断し描いたものである。推定すべり面形状は、前述した2つの地すべりと同様に凹凸

がなく工学的に矛盾のないものとなっている。

図-16は、細野沢地すべりにおける地質及び深度方向のス멕タイト強度変化を示したものである。地質は概ね地表面から表土→岩片混じり砂質シルト→強風化泥岩→風化泥岩→泥岩（新第三紀鮮新世富倉層泥岩）となっている。深度方向のス멕タイト強度変化については、前述した3箇所の地すべり地と同様にピーク値を示す深度が認められる。

図-17には、細野沢地すべりの主測線縦断面図を示した。図中のすべり面は、パイプひずみ計（1m間隔で計測）で検知された深度にコア判読を加

また、すべり面については、BV17-1が深度3.85m、BV17-2が深度15.00m、BV17-3が深度10.65mである。

すべり面と推定すべり面は、BV17-1、2については概ね一致しているが、BV17-3についてはすべり面が推定すべり面に比べて深度が深いものとなっている。これらのことから、前回の地すべりの尖端は今回の地すべりより斜面上方に位置し、前回の地すべりの規模が今回より小さかったことが考えられる。なお、地すべりが再滑動した場合のすべり面は、斜面状況の変化により前回の地すべりにおけるすべり面と異なる場合もある。

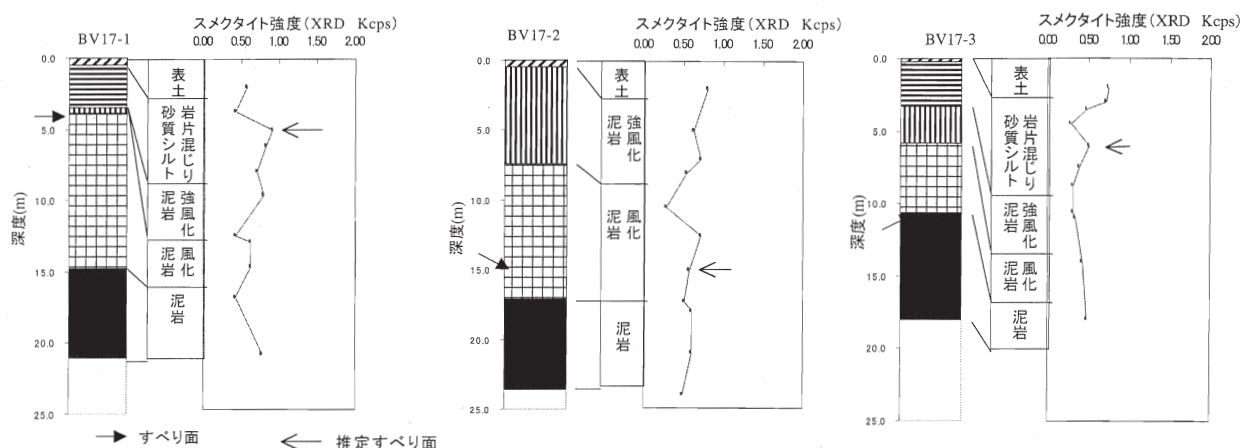


図-16 地質及び深度方向のス멕タイト強度変化（細野沢地すべり）

えたものであり、推定すべり面はコア判読に図-16に示したス멕タイト強度のピーク値を示した深度の情報を加えて判断し描いたものである。推定すべり面は、BV17-1については深度5m、BV17-2については深度15m、BV17-3については深度6mとした。なお、BV17-2の推定すべり面は、

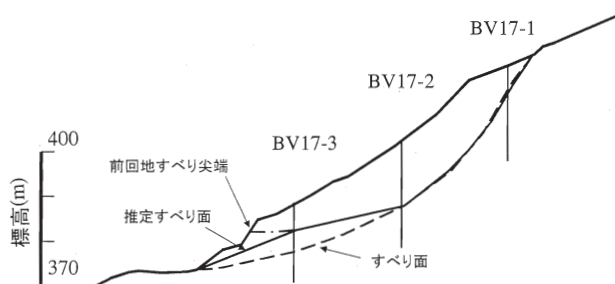


図-17 細野沢地すべり主測線縦断面図  
深度12.5mと15mにそれらの周辺よりス멕タイト強度の高い所があること及び、深度13.65mから15.00m間のコアが岩片混じりの粘土状であることから安全側を考え深度15.00mとしている。

以上のことから、すべり面では、ス멕タイト強度がすべり面近辺の土塊よりも強く出ることが分かった。これは、すべり面では地すべりの移動による土塊の破碎などにより、土の強度を低下させる粘土鉱物のス멕タイト化が他の部分より進んでいるためと考えられる。また、このことは、すべり面判定のための判断材料になると考える。

### 5.5 地すべり土塊のコンシステンシー限界

ス멕タイトは、その量の増大による土の内部摩擦角の低下が指摘されている粘土鉱物であり、すべり面では、ス멕タイト強度がすべり面近辺の土塊よりも強く出ることが分かった。このことについて、猿供養寺地すべりでの調査結果をもとに地すべり土塊のコンシステンシー限界の面から検討した。

図-18には、猿供養寺地すべりの平面図を示した。地すべり土塊のコンシステンシー限界は、テストピットS48-9-13及びS48-12-15において試料

を採取し、液性限界及び塑性限界試験を実施して求められている。

図-19は、地すべり土塊の地質、液性限界、塑性限界、塑性指数、 $\phi_i'$ について示したものである。なお、 $\phi_i'$ は(3)式(丸山ほか1994)により求めた。

$$\phi_i' = 15.3 - 0.15 W_L + 0.82 W_p \quad (3)$$

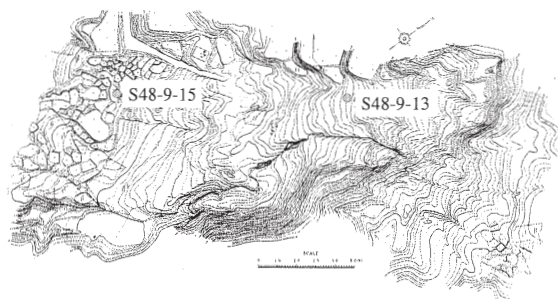


図-18 猿供養寺地すべり平面図

ここで、 $\phi_i'$ ：内部摩擦角(度)、 $W_L$ ：液性限界(%)、塑性限界(% )である。

基岩は、新第三紀中新世寺泊層の泥岩であり、移動層は地表面から赤褐色粘性土、青灰色粘性土からなる。また、すべり面は泥岩の上端である。塑性限界については深度方向に大きな変化は認められないが、液性限界及び塑性指数についてはす

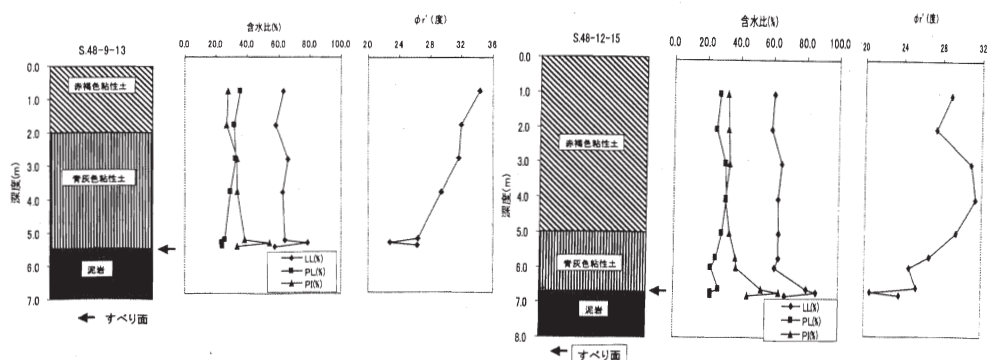


図-19 地すべり土塊の地質、液性・塑性限界、 $\phi_i'$ (猿供養寺地すべり)

べり面で突出して大きくなっていることが分かる。また、 $\phi_i'$ についてはすべり面で突出して小さくなっており、すべり面が地すべり土塊の中で最も強度が小さくなっている。これらのことは、すべり面では、前述したスメクタイト強度がすべり面近辺の土塊よりも強く出ること及び、スメクタイトがその量の増大により土の内部摩擦角を低下させる(土塊の強度を低下させる)ことと一致する。

したがって、地すべり土塊のコンシステンシー限界の測定からも、スメクタイト強度の測定と同じく有力なすべり面判定根拠が得られることが分かった。

### 5.6 地すべり斜面中間部における地すべり土塊の $Na_2O$ 成分変化率と斜面勾配との関係

$Na_2O$ 成分はアルカリ成分の中の一つであり、アルカリ成分の溶出は土塊の強度低下を引き起こすと考えられており、今回の分析ではアルカリ成分の中では最も成分変化率が大きい(図-7)。

図-20は、各地すべり斜面中間部のボーリングコア中の $Na_2O$ 成分変化率と斜面勾配(地すべり斜面の上端と下端を結んだ直線の勾配)との関係を示したものである。図中に実線で示したすべり面の $Na_2O$ 成分変化率は、斜面勾配が大きい場合には小さく、斜面勾配が小さい場合に大きくなる傾向がある。これは、斜面勾配が大きい場合はすべり面の $Na_2O$ 成分の溶出が少なくすべり面強度は大きい、斜面勾配が小さい場合は $Na_2O$ 成分の溶出が多くすべり面強度は小さいことを示していると考えられる。このことから、すべり面の $Na_2O$ 成分の溶出が進み、成分変化率が図中の移動層の区域内に入った場合、現状の斜面勾配では斜面安全率が

1.0以上を保てなくなり、地すべりが発生する可能性が高くなることが考えられる。

したがって、地すべり斜面中間部における地すべり土塊中の $Na_2O$ 成分変化率及び斜面勾配を求める

ことにより、地すべり斜面の地すべり危険度を評価できる可能性があると考えられる。

### 6. まとめ

本研究では、第三紀層泥岩地帯における地すべり土塊の化学分析、X線回折などを実施し、地すべり土塊の風化による強度低下について検討した。以下に、その結果を示す。

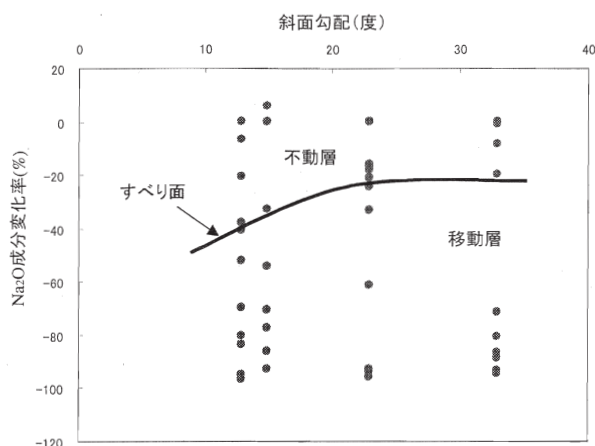


図-20 地すべり斜面中間部における地すべり土塊のNa<sub>2</sub>O成分変化率と斜面勾配との関係

- (1) アルカリ成分の深度方向成分変化率は、地表面近くが大きく深度が増すにしたがい小さくなっており、概ね pH の変化に対応し、アルカリ成分が土塊の酸性化により溶出している。
- (2) 地すべり斜面における移動層の酸化層では、酸素及び炭酸による化学成分の溶出や、黄鉄鉱の酸化による消失と硫酸及び鉄酸化物の生成、酸による鉱物のスメクタイト化及び方解石の溶出が起きている。
- (3) すべり面では、スメクタイト強度がすべり面近辺の土塊よりも強く出ることが分かった。これは、すべり面では地すべりの移動による土塊の破碎などにより、土の強度を低下させる粘土鉱物のスメクタイト化が他の部分より進んでいるためと考えられる。また、このことは、すべり面判定のための判断材料になると考えた。
- (4) 地すべり土塊のコンシステンシー限界を測定することにより、液性限界が周辺より大きい部分が求められ、有力なすべり面判定根拠が得られることが分かった。
- (5) 地すべり斜面中間部における地すべり土塊中の Na<sub>2</sub>O成分変化率及び斜面勾配を求めることにより、地すべり斜面の地すべり危険度を評価できる可能性があると考えた。

本研究を進めるに際しては、新潟県妙高砂防事務所から御支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 石田良二・西川総明 (1992) : スメクタイトを含む軟岩の諸性質 (1) - 交換性陽イオンと吸水特性 - 粘土科学, Vol. 32, No. 2, pp. 97-107.
- 江頭和彦・宜保清一 (1983) : 沖縄, 島尻層群地帯の地すべりに及ぼす粘土の寄与, 地すべり, Vol. 19, No. 4, pp. 1-7.
- 木村進一・鹿園直建・野原昌人・岩井修平 (1999) : 化学的風化に伴う微量・希土類元素の挙動 - 男鹿半島, 女川層堆積岩の例 -, 応用地質, Vol. 40, No. 5, pp. 281-294.
- 田中芳則 (1985) : 方解石の溶出に伴う泥岩の組織と物性の変化, 応用地質, Vol. 26, No. 3, pp. 19-25.
- 玉田文吾 (1984) : 地すべり面のせん断強度定数と粘土鉱物との関係, 地すべり, Vol. 20, No. 4, pp. 7-13.
- 千木良雅弘 (1988) : 泥岩の化学的風化 - 新潟県更新統灰爪層 -, 地質学雑誌, Vol. 94, No. 6, pp. 419-431.
- 千木良雅弘 (1992) : 建設工事における風化・変質作用の取り扱い方 4. 軟岩の風化作用, 土と基礎, Vol. 40, No. 8, pp. 71-79.
- 千木良雅弘・大山隆弘 (1992) : 堆積性軟岩の風化過程の工学的的重要性, 電力土木, No. 241, pp. 1-6.
- 中村浩之 (1984) : 地すべり粘土のはなし, 地質と調査, Vol. 3, pp. 56-60.
- 長沢敬之助編 (1987) : 日本粘土学会編, 粘土ハンドブック第二版, 技報堂出版, pp. 60-61.
- 白水晴雄 (1988) : 粘土鉱物学 - 粘土科学の基礎 -, 朝倉書店, pp. 50-52.
- 濱崎英作・守随治雄・白石一夫 (1987) : 地すべり粘土の残留強度と X線分析結果 (スメクタイト含有量) の比較, 第26回地すべり学会研究発表講演集, pp. 54-57.
- 前田寛之 (2003) : 地すべりと変質帯 (その3) - 地すべりと風化帯との関係 -, 地すべり技術, Vol. 29, No. 3, pp. 15-21.
- 丸山清輝・吉田克美 (1994) : 再滑動型地すべりの移動機構, 地すべり, Vol. 30, No. 4, pp. 12-19.
- 矢田部龍一・八木則男・榎明潔 (1990) : 乱さない地すべり粘土のせん断特性, 地すべり, Vol. 26, No. 4, pp. 3-9.