

3-9 汽水湖沿岸に発生する地すべりについて

(株) 日本海開発 大坂 理

1. はじめに

島根県東部の宍道湖北岸において、複数の地すべりが発生し被害をもたらしている。地すべり規模は幅長さとも数十m、深さ数mの比較的規模は小さく、地すべり面形態はそのほとんどが末端開放型の椅子形すべり面である。

実施された地すべり調査及び第33回地すべり学会研究発表におけるX線分析、乾湿繰り返し試験から以下のことが判明している。

- ・地すべり母岩は新第三紀泥岩で、地すべり斜面に対し層理面が緩い流れ盤構造であること。
- ・X線分析より泥岩中には多量のモンモリロナイト鉱物を含有し、地すべり移動層中には特に多いこと。
- ・宍道湖が地すべり末端部に位置しており、地すべり発生主原因が末端抵抗土塊の減少であること。
- ・岩の乾湿繰り返し試験により湖岸に露頭する泥岩は強いスレーキング性を持っていること。

当地区の地すべり発生の主原因は地すべり末端部抵抗土塊の除荷減少である。末端部泥岩は宍道湖水による乾湿繰り返しの条件下で強度低下や波浪浸食等の物理的作用を受けている。

また、湖岸に露頭する泥岩を観察すれば、亀裂面に沈着している酸化鉄を容易に確認することができる。亀裂面に沈着している酸化鉄に対し、腐食等のマイナス的要素をもたらす塩分を宍道湖(汽水湖、海水の約1/10の塩分濃度)から求めれば、鉄と塩素による「塩害」環境を推測することができる。

今回、泥岩中の塩素及び鉄を定量し、当地区の塩害の可能性と泥岩の風化作用への影響を検討した。

2. 試料採取及び風化状況

試料採取地点は図-1に示すような位置関係において、地すべり末端部湖岸の露頭及びBP-1、2地点のボーリングコアから採取し、塩素(Cl^-)、遊離酸化鉄(Fe_2O_3)の定量を行った。鉄の定量については、泥岩中から比較的独立した形、ゆるく結合した形の鉄、鉱物の結晶格子に入り込んでいない鉄等を対象とし遊離酸化鉄を定量した。定量法は浅田・熊田法($Na_2S_2O_4$ -EDTA法)によった。

また、湖岸沿い露頭の試料採取時に詳細な露頭観察を行い、割れ目状況、亀裂面の状態、岩質等により風化状況をボーリングコアと対比させ次の3つの風化帯に分類した。

① A帯：最も風化が発達しているゾーン 褐色帯

亀裂発達しハンマー軽打で小角礫状～土砂化する

礫は指圧にて容易に潰すことができる

ボーリングコアでは粘土状コアで採取

② B帯：上部は小角礫状になるが、下部に従いブロック状割れ目に規制されたタマネギ状風化を呈する(亀裂間隔5~20cm程度)

亀裂面には褐色酸化鉄の沈着が認められる

表面色調は褐色であるが、ハンマーで内部まで掘れば暗灰色の塊状岩塊採取する
 ボーリングコアでは粘土状～短棒状コアで採取

③ C帯：暗灰色塊状泥岩 暗灰色帯

表面は一度乾燥するとポロポロとなり崩れる

ボーリングコアでは棒状コアで採取し岩質は軟岩Ⅰ程度

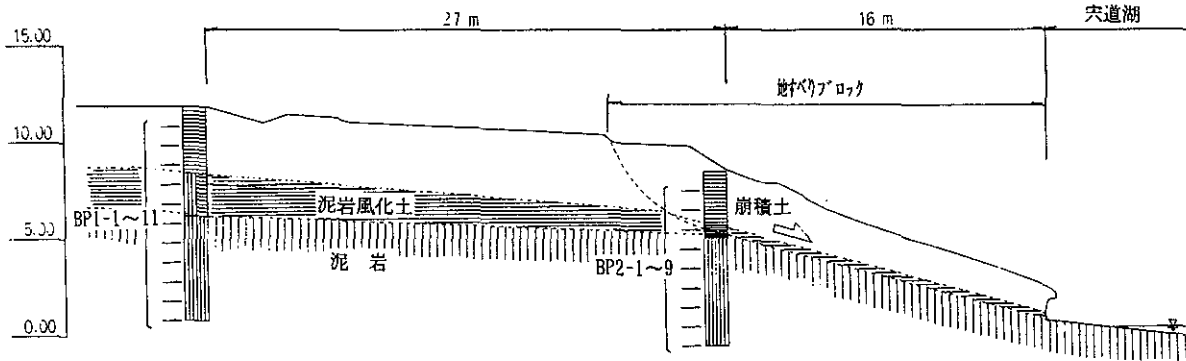




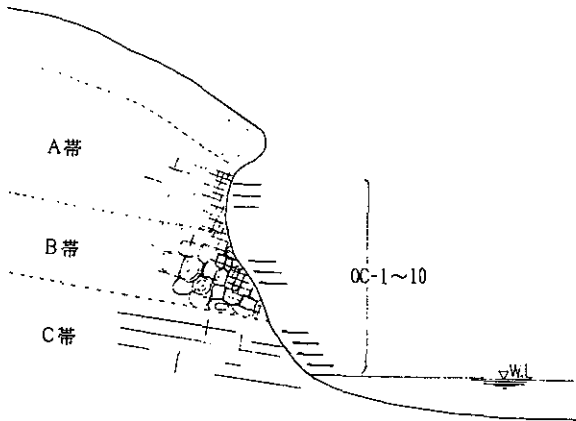


図-2 試料採取地点位置図

凡例

-  粘土 (A帯)・崩積土
-  泥岩風化土 (B帯)
-  泥岩 (C帯)
-  試料採取地点



3. 分析結果

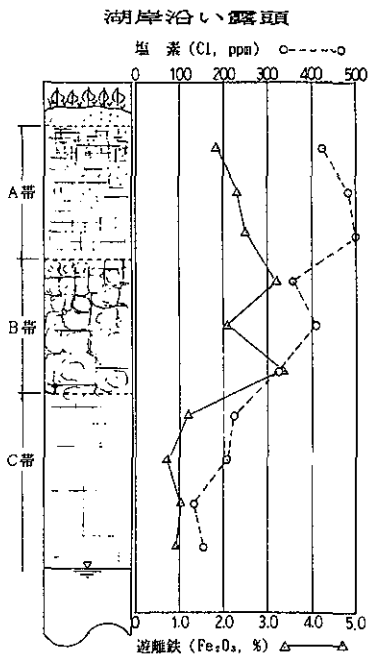
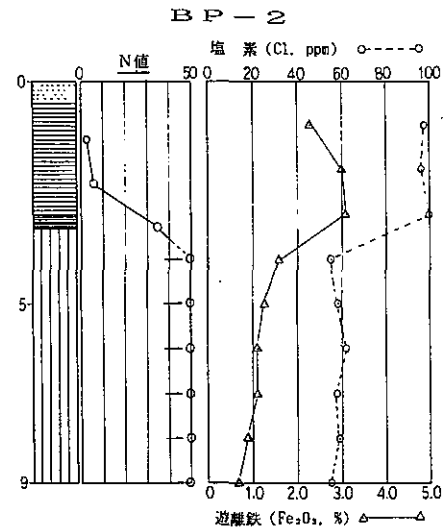
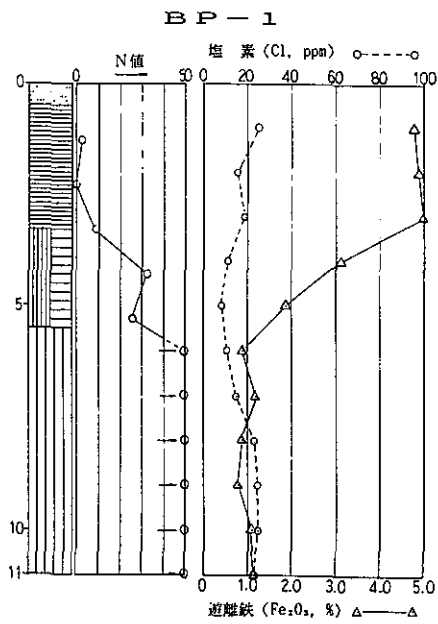
湖岸沿い露頭及び2ヶ所のボーリング地点において、試料を採取し塩素及び遊離酸化鉄の定量分析を行った。以下、各地点ごとの分析結果をまとめる。

BP-1地点

- ・ 地質構成は上層より粘性土 (A帯)～泥岩風化土 (B帯)～泥岩 (C帯)。
- ・ 塩素濃度は8.3～25.5ppmの値を示し、深度方向の変化はあまり認められず、若干泥岩風化土 (B帯)で減少の傾向を示す。
- ・ 遊離酸化鉄は粘性土 (A帯)で4.8～5.4%の値を示し、泥岩風化土 (B帯)で1.9～3.1%と減少の傾向を示し、泥岩 (C帯)では0.8～1.2%でほぼ同じ値を示している。

BP-2地点

- ・ 地質構成は上層より (A帯)～泥岩強風化土 (B帯, 非常に硬質)～ (C帯)。
- ・ 塩素濃度は (A帯)で96.3～200.9ppmの高い値を示し、(C帯)で55.2～62.0ppmの値を示す。
- ・ 遊離酸化鉄は (A帯)で4.8～5.4%の値を示し、(C帯)で0.7～1.6%の値を示す。



| 試料名 | Cl(ppm) | Fe ₂ O ₃ (%) | 試料名 | Cl(ppm) | Fe ₂ O ₃ (%) | 試料名 | Cl(ppm) | Fe ₂ O ₃ (%) |
|--------|---------|------------------------------------|--------|---------|------------------------------------|-------|---------|------------------------------------|
| BP1- 1 | 25.5 | 4.8 | BP2- 1 | 98.3 | 2.3 | DC- 1 | 425 | 1.9 |
| 1- 2 | 15.6 | 4.9 | 2- 2 | 96.3 | 3.0 | 2 | 483 | 2.4 |
| 1- 3 | 19.1 | 5.4 | 2- 3 | 200.9 | 3.1 | 3 | 560 | 2.5 |
| 1- 4 | 10.6 | 3.1 | 2- 4 | 55.6 | 1.6 | 4 | 360 | 3.2 |
| 1- 5 | 8.3 | 1.9 | 2- 5 | 58.2 | 1.3 | 5 | 410 | 2.1 |
| 1- 6 | 10.5 | 0.9 | 2- 6 | 62.0 | 1.1 | 6 | 328 | 3.4 |
| 1- 7 | 15.4 | 1.2 | 2- 7 | 58.1 | 1.1 | 7 | 228 | 1.2 |
| 1- 8 | 23.5 | 0.9 | 2- 8 | 59.4 | 0.9 | 8 | 210 | 0.8 |
| 1- 9 | 24.1 | 0.8 | 2- 9 | 55.2 | 0.7 | 9 | 135 | 1.0 |
| 1-10 | 24.4 | 1.1 | | | | 10 | 157 | 0.9 |
| 1-11 | 22.5 | 1.2 | | | | | | |

湖岸沿い露頭

- ・ 地質構成は上層より（A帯）～（B帯）～（C帯）で、（B帯）下部付近ではタマネギ状構造を呈し、その亀裂面には明瞭に酸化鉄を挟む。また、露頭面の乾燥時にはしばしばNaClが晶出している。
- ・ 塩素濃度は（A帯）で425～560ppm、（B帯）で328～410ppm、（C帯）で135～228ppmの値を示し深度方向に向かい減少傾向となる。
- ・ 遊離酸化鉄は（A帯）で1.9～2.5ppm、（B帯）で2.1～3.4ppm、（C帯）で0.8～1.0ppmの値を示し深度方向に向かい減少傾向にあるが、GL-6mでは値が大きくなっているが露頭で観察された明瞭な酸化鉄の狭在状況と一致する。

4. まとめ

泥岩中の割れ目に沈着している酸化鉄と汽水湖に含まれる塩分から「塩害」環境を推定し、泥岩中の遊離酸化鉄及び塩素濃度を定量した。以下、若干の考察を加え分析結果をまとめる。

塩害とは一般に、海水・海水滴・海塩粒子がコンクリート構造物に付着・侵入し、コンクリート中の鋼材を腐食に至らしめることを言う。

鋼材の腐食に関する一般式は、 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ （アノード反応）と $1/2 O_2 + H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2 OH^{-}$ （カソード反応）の2種類の反応が同時に生じる腐食反応であり、 $Fe + 1/2 O_2 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2$ （総括反応）の1つの反応式にまとめることができる。この反応では種々の電荷をもつイオンや電子が関与していることがわかる。

また、塩化物イオン（例えば Cl^{-} ）が直接鉄に働きかける腐食反応として、酸素原子あるいは水分子の化学吸着により安定している（不動態被膜）ところに Cl^{-} が割り込み、特異吸着を起こし、この部分での被膜の破壊が生じ鉄の溶解が生じる。塩化物溶液中では鉄は活性溶解し、腐食する可能性が高くなる。食塩濃度が約3%までは腐食速度が増加する。

以上のことから鉄イオン Fe^{2+} 及び塩素イオン Cl^{-} は、塩害の発生原因において重要な位置を占めている。

今回の分析結果から得られた、泥岩風化部分（A～B帯、地すべり移動層）での遊離酸化鉄及び塩素の存在は、十分塩害環境をもたらす因子であると判断する。

その量の距離的变化も、特に塩素に関しては穴道湖に近いBP-1地点では多くBP-2地点少ない。量的にも風化部分で1/3程度、泥岩基岩層部分で1/5程度の量である。このことは、過去における塩水侵入の地形的変化（穴道湖の古地理的変遷）や塩水の地下水への侵入深度の違いによるものと現段階では考える。

酸化鉄を挟んだ亀裂面の腐食反応や溶解反応は、面の持つ本来の強度に対しマイナス効果となり、地表にさらされた泥岩部分では、塩害環境をスレーキング現象に加えることにより、泥岩の風化浸食に対しマイナス要因であると考えられる。

当地区のように地すべり面形が末端開放型の場合、抵抗部分の斜面の不安定化は直接、後退形崩壊（地すべり）を発生させる誘因となる。

5. 今後の課題

泥岩風化土中に遊離酸化鉄及び塩素が含有されていることが判明した。

今後の課題として、これらの物質の供給起源と地すべりブロックへの流入形態の解明が必要である。遊離酸化鉄を生成する鉄イオン Fe^{2+} 及び酸素 O_2 は土壌中あるいは大気中に普遍的に存在するが、塩素イオン Cl^{-} は供給源を異にしていると考えられる。

現段階では穴道湖からの供給が考えられるが、流入形態解明のため穴道湖の古地理の変遷等の地形変化解析が必要である。

4-2 風化花崗岩類地帯の地すべりブロック設定と すべり面判定手法について

(株)日本海開発 ○中村直樹 大坂 理

1. はじめに

島根県西部のある地すべり防止区域において、花崗岩類の風化進行に伴う赤色風化層と上位の堆積層は、非常に類似した層相であり特に地層境界付近では上位堆積層が花崗岩起源を主とすることから境界決定が困難なことが多い。さらに地すべりブロック及びすべり面の決定が調査初期の段階では困難である。このため、踏査及びボーリング等の一般調査法に何らかの解析法を並行させ、その精度を高める必要がある。

今回この地区において電気探査(ウェンナー法)で得られる見掛け比抵抗断面図による解析法から、地すべり調査における地すべりブロック設定に対応させ地下地盤構造を把握し、続行してボーリング、pH測定、X線分析の結果との対比を行い、すべり面の判定とした。

2. 地形・地質概要

調査地域は、背後地をほぼ東西に延びる標高200~280mの山地と標高470mを頂上とする北東-南西に延びる山地に囲まれ、日本海に面し緩やかに傾斜する地形上に位置する。

分布する地質は、古第三紀花崗閃緑岩が広く分布しそれを新第三紀鮮新世~更新世の都野津層が覆っている。花崗閃緑岩の岩相は、非常に風化が厚く調査箇所の露頭ではそのほとんどがマサ土化しており、不規則な粘土脈が発達し風化変質作用が著しい状態である。上位に分布する都野津層は固結度の弱い砂層及び粘土層でありしばしば下位の花崗閃緑岩礫を玉石状に点在する。

図-1,2にリニアメント図及びS=1:25,000の地形図を250mメッシュの接峰面図を作成した。その結果NE-SW, NW-SE方向のリニアメントが卓越し調査地域にも集中している。接峰面図からは緩やかな谷に囲まれた位置に地すべり防止区域は位置している。

調査地域へのリニアメントの集中と露頭で観察される不規則な粘土脈が発達した風化変質を考えれば、地質構造によりコントロールされ形成されたリニアメントと判断する。

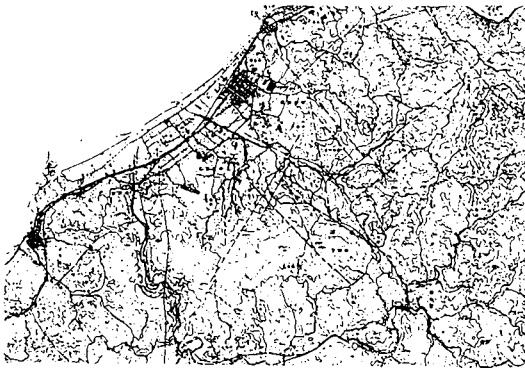


図-1. リニアメント図

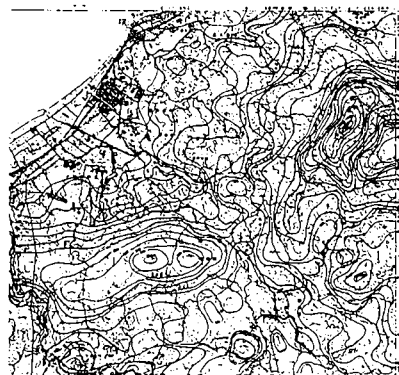


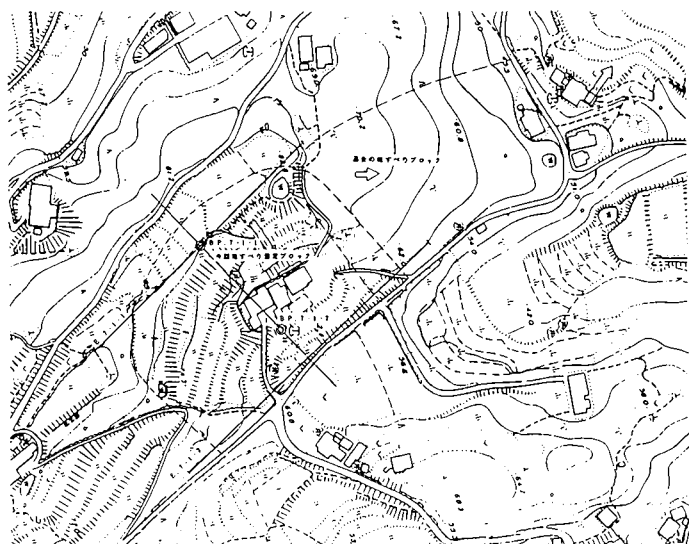
図-2. 接峰面図

2. 電気探査

踏査結果により確認される地層の露頭状況、地すべり被害状況及び地形から地すべりブロックを想定する。

地すべり運動による地層の乱れ、地質的脆弱部における岩相の乱れ部分が、地すべりブロック外の地層・岩相より空隙に富むものと想定すれば、大地の電気的性格も差異を生じるはずである。

この電気的性格の差異が表現されるように地すべりブロックを横断する方向に測線を配置し、地下構造を求めた。



電気探査結果より得られた見掛け比抵抗値図にそのコンターを描いたところ、不動域と思われる規律性のある見掛け比抵抗値ゾーンに比べ、電気的差異を生じるブロックを見ることができた。

見掛け等比抵抗値線図からの判読事項を表-1に示す。

図-3. 調査位置平面図

| | 電気的性格 | 判読事項 |
|---------|---|--|
| 不動域 | 下位より見掛け比抵抗値約30~400Ωmから上位に向かって徐々に低くなる傾向で分布 | 本来、比抵抗値が高い花崗岩閃緑岩に対してのこの低い数値から基盤が一様に風化されているものと判断する |
| 地すべり運動域 | 想定不動域との境界より見掛け比抵抗値が上昇し、高比抵抗値ゾーンとなり分布 | <ul style="list-style-type: none"> ・E.7-1-1測線 <ul style="list-style-type: none"> { 左サイド：測線15m付近より30'の傾斜 { 右サイド：測線140m付近より35'の傾斜 最大層厚15m程度の船底形で分布する ・E.7-1-2測線 <ul style="list-style-type: none"> { 左サイド：測線25m付近より20'の傾斜 { 右サイド：測線165m付近より30'の傾斜 最大層厚8m程度の船底形で分布する 過去の地すべりブロック左サイドと見られる高比抵抗値ゾーンの存在が測線145m付近より存在 |

表-1. 電気的性格とその判読事項

3. ボーリング結果

引き続き行ったボーリングのコア判定により都野津層及び花崗閃緑岩風化土の境界が、BP7-1-1地点ではGL-12.7m、BP7-1-2地点ではGL-5.5mで得られた。

この深度は、電気探査結果との対比を行ったところすべり面深度と見掛け比抵抗等値線図の300- Ω mラインにおいて境界を求めることができた。

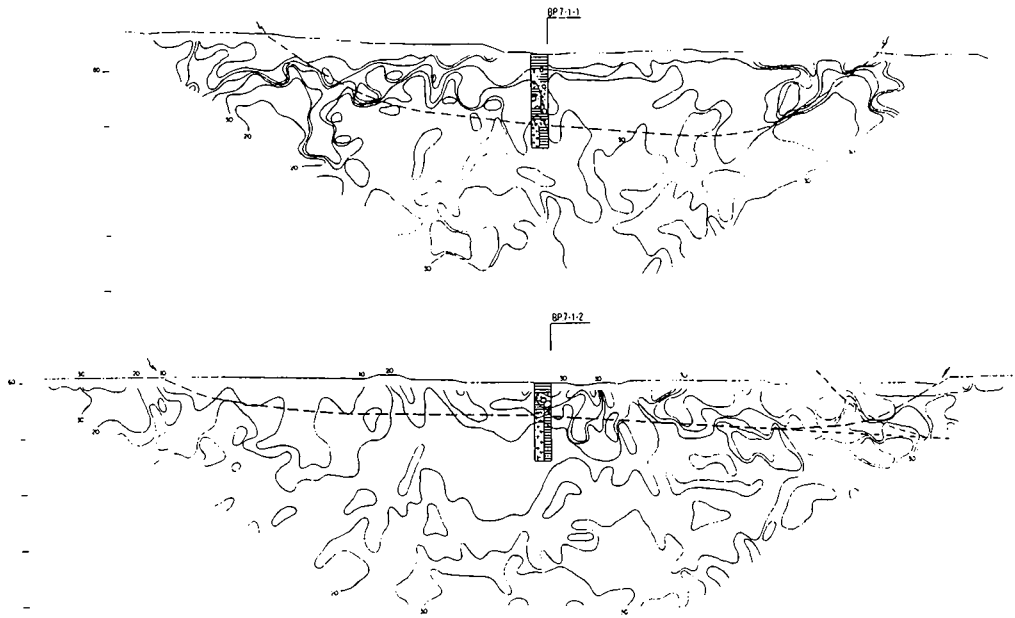
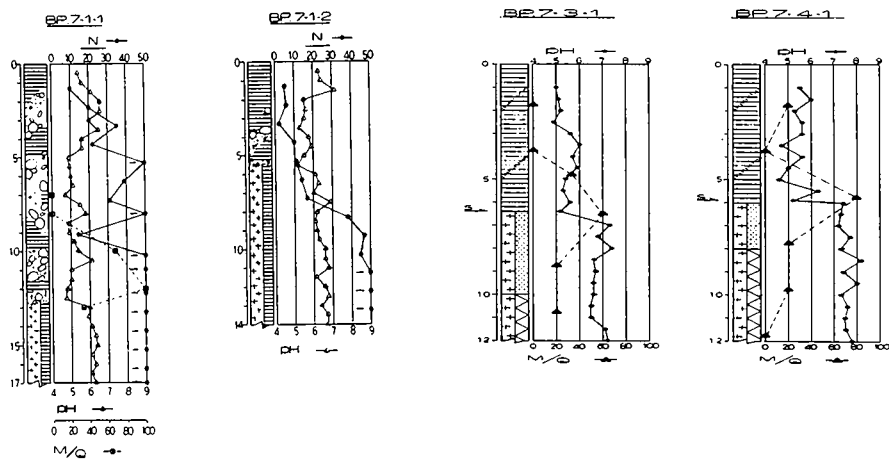


図 - 3. 見掛け等比抵抗値線とボーリング柱状図

4. pH測定及びX線分析

地すべり移動土塊が下位の不動層に対して空隙が多く、地下水流動及び酸素との接触によって風化が促進され pHは酸性へと変化していくという性質を利用したアブレーション pH測定によりすべり面判定の資料とした。更に並行してX線分析を行い、モンモリロナイト等の粘土鉱物のカウントを行った。



(他地区風化花崗岩地すべり地帯結果)

図 - 4. すべり面とアブレーション pH

| | 石英 | 長石 | モンモリロナイト | カオリン | 角閃石 | 備考 |
|------------|----|----|----------|------|-----|---------|
| K-1 GL-7m | 5 | | | 1 | | M/Q 0 |
| K-1 GL-8m | 5 | 1 | | 1 | | M/Q 0 |
| K-1 GL-10m | 2 | 1 | 2 | | 1 | M/Q 100 |
| K-1 GL-12m | 3 | 3 | 2 | | 1 | M/Q 67 |
| K-1 GL-13m | 3 | 3 | 1 | | 1 | M/Q 33 |

表 - 2. X線分析結果

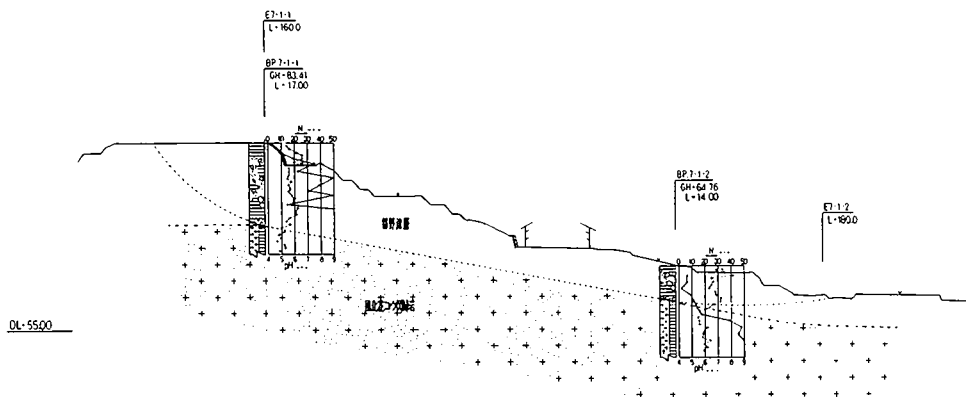


図 - 5. 地質断面図

5. まとめ

地すべり調査初期段階において明瞭な地すべり地形や地すべり運動による地表面変形構造がある場合を除き、地すべりブロックやすべり面位置を決定することは困難な場合が多い。

特に当地区の様に地すべり母岩が花崗閃緑岩であり深層まで風化変質により一様なマサ土化している場合、一般的地すべり調査に何らかの補助手段を行う必要がある。

今回その補助手段として、高密度電気探査、pH測定及びX線分析を行った。

高密度電気探査においては、ボーリング調査で求めた地層境界を見掛け比抵抗値300-mで境界を求めることができた。さらに、地すべりブロックについても等値線の分布形状から図-3に示すようなブロックを設定することができた。

pH測定では、BP7-1-1地点ではGL-12.5m付近、BP7-1-2地点ではGL-5.5m付近で測定値の変化点が確認されたことから、この深度がすべり面の可能性が高い。

X線分析では肉眼区分では判断しにくい上位堆積層の都野津層と花崗閃緑岩風化土（マサ土）との境界を求めることができ、さらにすべり面と考えられる部分においてモンモリロナイト鉱物が多量に含まれていることが判明した。

以上の結果より地すべり調査初期段階における高密度電気探査及びpH測定は地すべりブロック、すべり面判定において有効である。

4-5 すべり面判定におけるpH測定の有効性

(株) 日本海開発 浜崎 晃

1. はじめに

一般的にpHは地表近くで酸性、地下深部ではアルカリ性の傾向が強く、風化・変質の進行によって変化する。

地すべり地で見ると移動土塊は不動層に比較して空隙が多く、地下水流動によって風化が促進され、pHが酸性へと変化していくのに対し、すべり面以下の不動層においては風化は促進されないことからすべり面を境界としてpHに変化が出るはずである。

以上の考えを基にすべり面調査の一手法として調査ボーリングコアを用いたアブレーションpH測定を行ない、その結果について「pH測定によるすべり面判定の試み」(1992, 1993, 1994 地すべり学会)で述べてきた。

今回、新たに花崗閃緑岩を基盤とする真砂土地帯における地すべりについてアブレーションpH測定とX線分析を行なった。

ここで今一度アブレーションpH測定の測定方法を示すとともに今まで行なってきたアブレーションpH測定の結果を示し、その有効性について検討する。

2. アブレーションpHの測定方法



- ① ボーリングコアから試料を取り乳鉢に入れる。(0.5mピッチ程度)
- ② 蒸留水を加えながら試料をよくすり潰し、懸濁液を作る。
- ③ ハンディpHメーターで懸濁液のpHを測定する。

3. 測定結果

今まで約20箇所の地すべり地(調査ボーリング数50以上)において調査ボーリングコアを利用したアブレーションpH測定を行なってきた。その結果、アブレーションpHの相対的な変化(すべり面付近では相対的に低い値を示す)が見られる位置とすべり面とがほぼ一致していることがわかってきた。

ここで地すべり地の地質別に代表的な測定結果をまとめる。

・崩積土地すべり

調査時に滑動中であつた崩積土地すべりで行なつたアブレーションpH測定の結果をボーリング柱状図とともに示す。

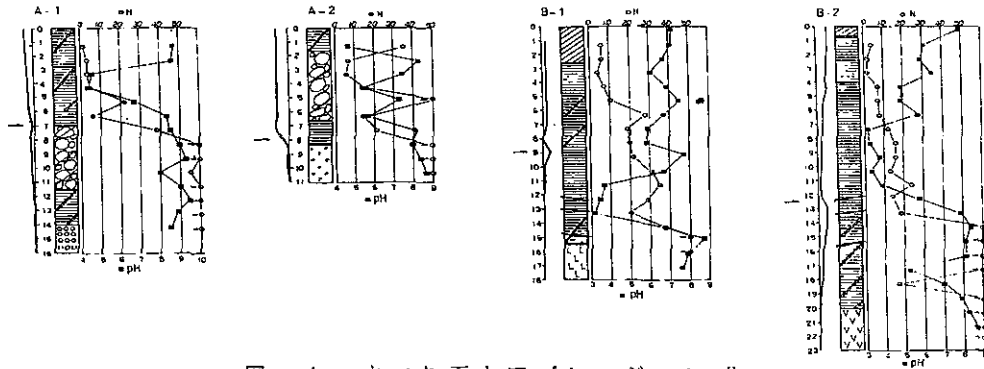


図-1 すべり面とアブレーションpH

| | A-1 | A-2 | B-1 | B-2 |
|---------------|------------|------------|----------------------------|------------------------------|
| コア観察によるすべり面 | -6.0~-7.0m | -6.6~-8.3m | -12.3~-14.9m | -12.3~-15.5m |
| 歪計・傾斜計によるすべり面 | -7.0m | -8.0m | -9.0m | -12.5m |
| pH測定によるすべり面 | -6.5~-7.0m | -6.0~-7.0m | -8.0~-9.0m -13.0~-14.0m | -11.0~-13.0m -17.0~-18.0m |
| 比較 | 一致 | ほぼ一致 | 一部一致 | 一部一致 |

以上のようにアブレーションpH測定で相対的な変化が見られる位置は試料採取の位置にもよるが概ねすべり面位置と一致している。

・泥岩地帯での地すべり

地すべり移動層が泥岩起源の崩積土及び泥岩強風化層にある地すべりについてアブレーションpH測定を行なった。その結果をボーリング柱状図とともに図-2に示す。

また、この地区においてはコアを利用してX線分析も併せて行なった。

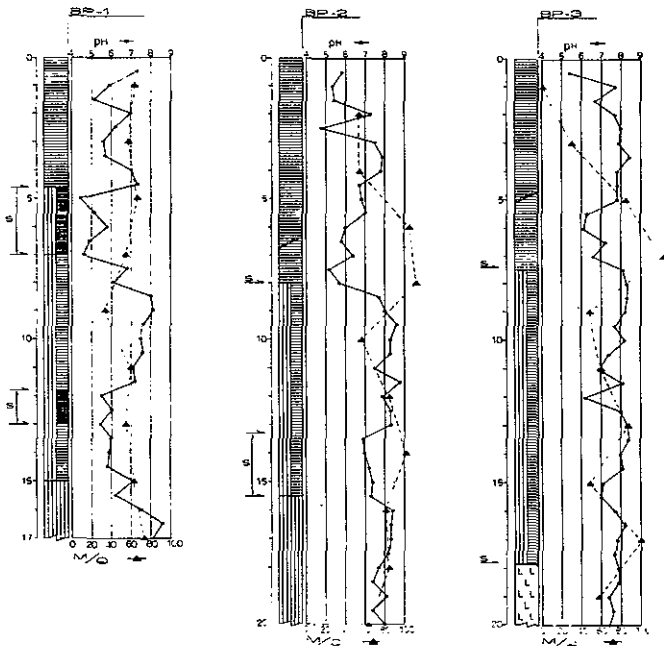


図-2 すべり面とアブレーションpH、モンモリロナイト

| | コア観察によるすべり面 |
|------|------------------------|
| BP-1 | -6.0~7.0m, -12.0~15.0m |
| BP-2 | -8.0m, -13.7~15.5m |
| BP-3 | -7.5m, -18.7m |

| | 歪計によるすべり面 |
|------|---------------|
| BP-1 | -7.0m |
| BP-3 | -7.0m, -18.0m |

| | pH測定によるすべり面 |
|------|-----------------------|
| BP-1 | -7.0m, -15.0~16.0m |
| BP-2 | -8.0m, -15.5~16.0m |
| BP-3 | -7.5m, -12.0m, -16.0m |

測定結果図及び結果表に示すようにアブレーションpH測定によるすべり面の位置は歪計によるすべり面位置とほぼ一致している。

また、X線分析の結果から当地区の泥岩及びその崩積土はモンモリロナイトが多く含まれているがその中でもBP-2のGL-8.0m, -14.0m、BP-3のGL-7.0m, -17.0mは特にモンモリロナイトの比率が高く、すべり面となり易い位置といえる。

・真砂土地帯の地すべり

一般的に地すべりが発生し難いと言われる真砂土地帯における地すべりについてアブレーションpH測定を行なった。また、X線分析も併せて行なった。

その結果についてボーリング柱状図とともに図-3にまとめる。

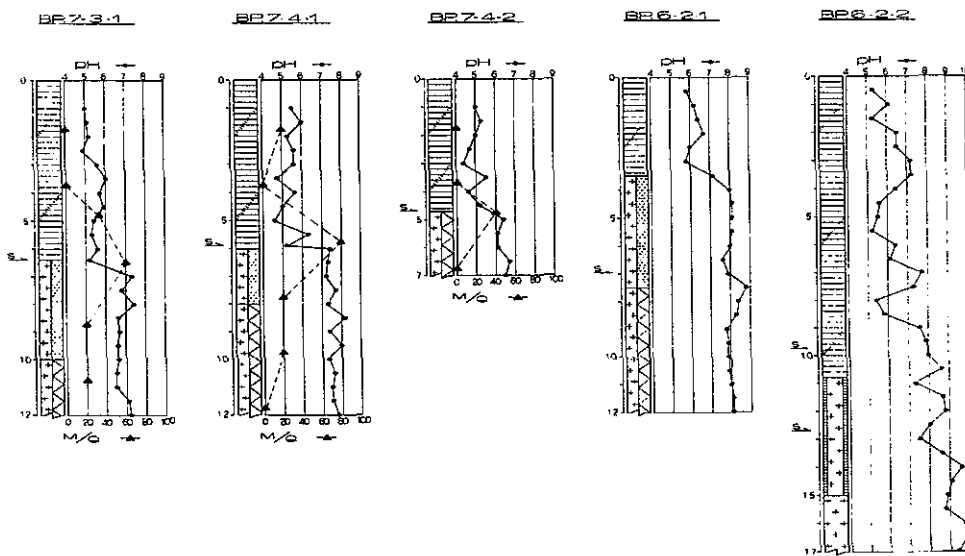


図-3 すべり面とアブレーションpH測定、モンモリロナイト

| | BP. 7-3-1 | BP. 7-4-1 | BP. 7-4-2 | BP. 6-2-1 | BP. 6-2-2 |
|---------------|-----------|-------------|------------|--------------------------|----------------------|
| コア観察によるすべり面 | -6.4m | -6.0, -7.7m | -4.7m | -7.0m | -9.75m |
| 歪計・傾斜計によるすべり面 | 変位なし | 変位なし | - | 変位なし | - |
| pH測定によるすべり面 | -6.4m | -6.0m | -4.5~-5.0m | -3.0~-4.0m -6.5~-7.5m | -8.5~-9.0m -13.0m |
| 比較 | 一致 | 一致 | 一致 | 一部一致 | 不一致 |

観測期間中に滑動による歪計・傾斜計の変位は無かったがコア観察によるすべり面位置とアブレーションpH測定によるすべり面位置は一致している。

中でもBP. 7-3-1, BP. 7-4-1, BP. 7-4-2についてはすべり面（真砂起源の崩積土と花崗閃緑岩強風化土の境界）において明瞭な変化を見せている。

すべり面以浅ではpHが6以下なのに対し、それ以深ではpHが6あるいは7以上となっている。更にボーリングコアが棒状となり、比較的新鮮なBP. 6-2-2のGL-15m付近においてはpHは9以上と非常に高くなっている。

このようにpHは風化の過程と密接に関係していると考えられ、地すべり地においてはすべり面を境にその上下で風化の進行度が違うため、そこを境に明瞭な変化が出ていると考えられる。

また、同時に行なったX線分析結果からモンモリロナイトの比率を見るとすべり面付近において高く、移動層である崩積土中にはほとんど含まれていないことがわかった。

これは移動層が真砂土起源の崩積土であるために地下水流動が活発であり、その地下水による溶脱でモンモリロナイトが失われていると考えられる。

(地下水検層結果ではBP.7-4-1, BP.7-4-2の崩積土中は何れも準確定流動)

以上のような結果から真砂土地帯の地すべりについてもすべり面判定の一手法としてアブレーションpH測定を行うことは有効であると評価できる。

4. まとめ

今日まで地すべり地においてアブレーションpH測定を行ってきた化学的にその原因について証明したわけではないが、多くのデータによって判ったことについてまとめる。

- ・すべり面付近あるいはそれ以深は概ねpHが相対的に低く、すべり面を境界として変化が見られる。
- ・今回新たに真砂土地帯での地すべりについてアブレーションpH測定をしたが地質的には何れの地質においても上記の傾向があると思われる。
- ・アブレーションpH測定をすることによって土層変化、地質変化についても把握できる。
- ・アブレーションpHは風化の過程と密接な関係があると考えられる。

以上のことからすべり面判定においてアブレーションpH測定は有効であり、一手法として利用できると思われる。

また、風化の過程もよく表しており、切土計画時の調査ボーリング等でアブレーションpH測定を行えば崩壊予防にも利用できる。

測定方法の項で述べているように非常に簡単な手法であるとともに計測器も安価であるため、一度試していただきたい。

- 以 上 -