

変状斜面における微小電位変動傾向と 評価手法に関する考察

丹羽 廣海^{1*}・村山 秀幸¹・伊東 佳彦²・日下部 祐基²・宍戸 政仁²

¹株式会社フジタ 技術センター（〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1）

²独立行政法人土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3-1-34）

*E-mail: hiroumi.niwa@fujita.co.jp

筆者らは、岩盤崩落、斜面崩壊等の地盤災害の監視・予測に適用する目的で微小電位観測をおこなってきた。積雪寒冷地にある変状斜面において観測された微小電位の変動傾向は、降雨、降雪、融雪の影響を大きく受けるため、斜面変状のシグナルとなる微小電位変動を識別することが困難であった。本稿で述べる変状斜面における観測では、融雪期の変状時期に電位分担率の変動が確認された。降雨などの外的要因は観測現場全体の微小電位変動に斉一な影響を与えていると考えられることから、複数地点で微小電位観測をおこない地点ごとの電位分担率を把握することによって、不安定領域で個別に起こっている微小電位変動を識別できる可能性が示唆される。

Key Words : micro geo-electric signals, potential ratio, failure prediction, field measurements

1. はじめに

わが国はその厳しい地形地質条件から、斜面崩壊や岩盤崩落による災害が多数発生しており、災害発生に先立ってその前兆を予見する技術の確立が求められている。

古くから、岩石や地盤の破壊に先行して微小な電位が発生することが知られており¹⁾、筆者らはこれを微小電位と称している。同様の研究としては、ギリシャにおいて Sismic Electric Signals (SES) を観測することにより近い将来起こる地震を予知しようとする Varotsos らによる VAN 法の取り組みなどが挙げられる²⁾。

筆者らは、微小電位観測を岩盤崩落や斜面崩壊の予測、斜面健全度評価に適用すべく研究を進めてきた^{3,4)}。これまでの室内実験等から、微小電位の発生メカニズムとしては岩石中の水が電荷移動の担い手と考える流動電位モデルが有力と考えている⁵⁾。

本報告では積雪寒冷地の変状斜面における微小電位観測の適用事例を示し、変状予測手法について考察する。

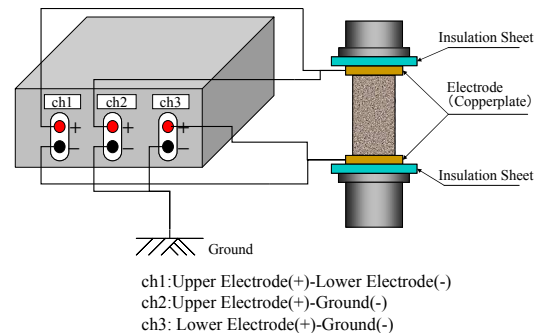


図-1 室内実験における微小電位測定

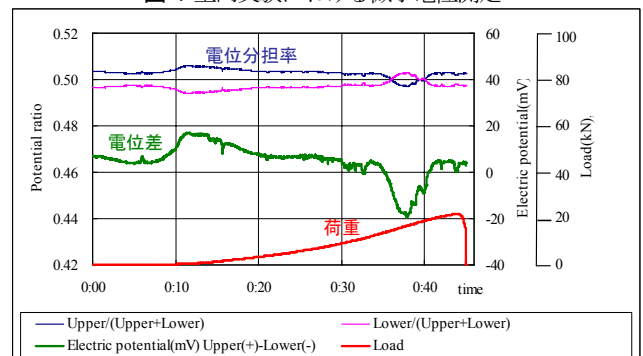


図-2 一軸圧縮試験载荷中の電位の推移

2. 室内実験における岩石破壊時の電位分担率

適用斜面で採取したボーリングコアを用いて室内一軸圧縮試験をおこない破壊時の微小電位計測をおこなった。

実験は図-1 に示すように試料上端、下端に設置した電極とアース間および上下電極間の電位差を測定した。

室内岩石試験時の微小電位変動傾向は別報⁵⁾で詳しく

述べるが、その一例として図-2 にボーリングコア供試体の一軸圧縮試験時の電位変動例を時系列で示す。図より、上下電極間の電位差は供試体の破壊前に負極側に変動していることがわかる。電位差は供試体上下に設置した電極間の電位の差を表しているため正負が逆転することがあるが、図に示した例ではある時点まで正極で推移していた電位差が、破壊に先行して負極に変化した。

この現象を詳しく見るために上下各電極で計測される電位の分担率に着目した。すなわち、上端電極および、下端電極で測定された電位の比率を式(1)、式(2)であらわし、電位分担率 (Potential ratio) と称す。すなわち電位分担率とは、ある微小電位観測場全体が持つ電氣的ポテンシャルのうち、その地点がどれだけのポテンシャルを分担しているかをあらわす指標である。

$$R_U = P_{UG} / (P_{UG} + P_{LG}) \quad (1)$$

$$R_L = P_{LG} / (P_{UG} + P_{LG}) \quad (2)$$

ここに、 R_U : 上端電極の電位分担率

R_L : 下端電極の電位分担率

P_{UG} : 上端電極の電位 (対アース)

P_{LG} : 下端電極の電位 (対アース)

一軸圧縮試験における上記の電位分担率の推移を図-2 に併記した。図のように 2 点間の電位分担率は 0.5 を軸として上下対称となる。図より本実験では、载荷開始から上端電極で測定される電位に対して下端電極で測定される電位の方が小さい状態で推移してきた傾向が、破壊前のある時点でバランスを崩すようにして急激に逆転し、その後もとに戻っていることがわかる。

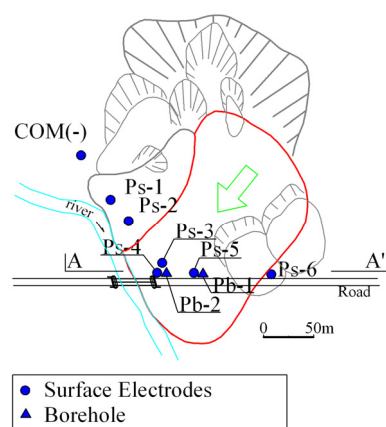
この現象を前述の流動電位モデルで考えると、供試体の破壊に先行して供試体上部に留まっていた正の電荷が水の移動によって流動電位として供試体下部の方向に運ばれた (あるいは負の電荷が下部から上部へ運ばれた) と解釈できる。電位分担率が変化することや、破壊後にもとに戻る物理的な意味には不明な点が残されているが、電位分担率の変動は岩石が破壊に至る臨界状態をあらわす指標となり得る可能性がある。

3. 適用斜面における微小電位および電位分担率の変動傾向

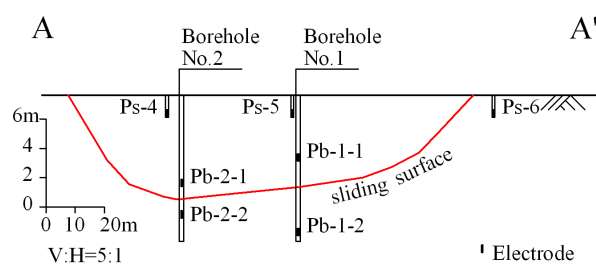
(1) 適用斜面と微小電位観測方法

微小電位観測を適用した積雪寒冷地にある変状斜面は、毎年融雪期の地下水位上昇に伴って地すべり性の緩慢な変動を繰り返している。本斜面では対策工が順次進められており変動量は小さくなってきているが、斜面末端部の一部では依然として変動が続いている。

本地域には白亜系蝦夷層群に相当する堆積岩が広く分



a) 平面図



b) 断面図

図-3 微小電位観測箇所

布している。変状を起こしている地質は泥岩を主体とし、一部で砂岩を挟在する。泥岩の状態は、目立った亀裂は見られないが掘削後時間が経過するにつれて碎片化が進行し、やがて土砂状にまで劣化するような岩質で、風化やスレーキングに対して弱い地質であると言える。

微小電位観測は、図-3 に示すとおり変状斜面末端部を網羅するようにして地表電極を計 6 箇所設置して 2006 年 10 月から開始した。一般に絶対電位を測定することは困難であるため、本斜面の微小電位観測では変状範囲外に設置した地表電極を負極の共通電極 (以下 COM(-) と称す) として、COM(-) と地表電極間の電位差を観測している。

観測開始から約 1 年後の 2007 年 11 月に変状斜面末端部にボーリング孔を 2 箇所設け、地中電極をすべり面以浅の変状土塊中に 1 箇所ずつ、すべり面以深の不動土塊中に 1 箇所ずつ設置した。

電極には長さ $L=500\text{mm}$ 、径 $\phi 20\text{mm}$ の銅製棒状電極を使用している。なお、積雪、凍上の影響を避けるため地表電極は地表から約 1.5m の深さに埋設した。微小電位観測のサンプリングレートは 10s とし、太陽光発電を利用して常時観測をおこなっている⁹⁾。

(2) 適用斜面における微小電位の変動傾向

これまでの微小電位観測フィールドで得られた傾向では、微小電位変動は降雨の影響を強く受け、降雨時に電位差が増加または減少することが多い³⁾。

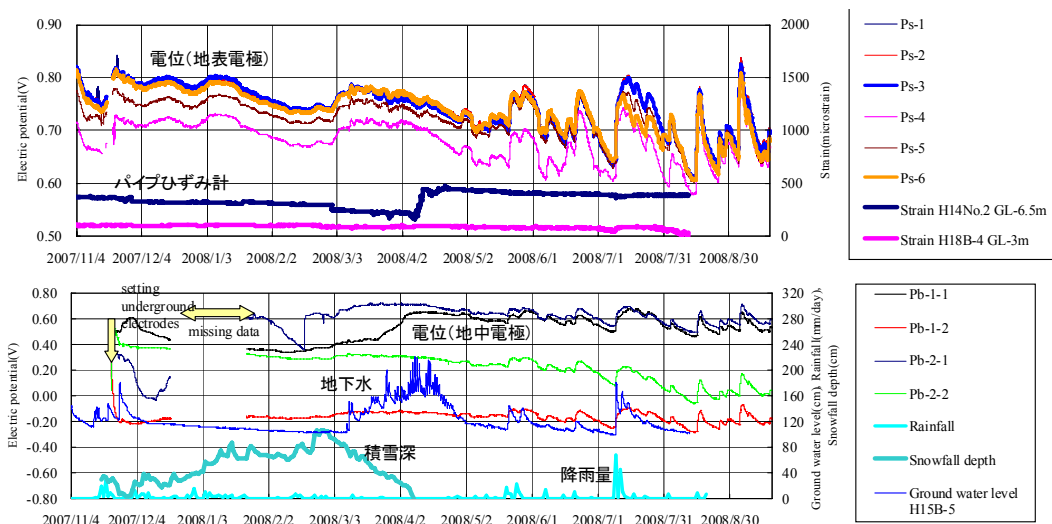


図-4 微小電位の年変動と地下水位（各電極と変状範囲外に設置した地表電極との電位差：com(-):変状範囲外地表電極）

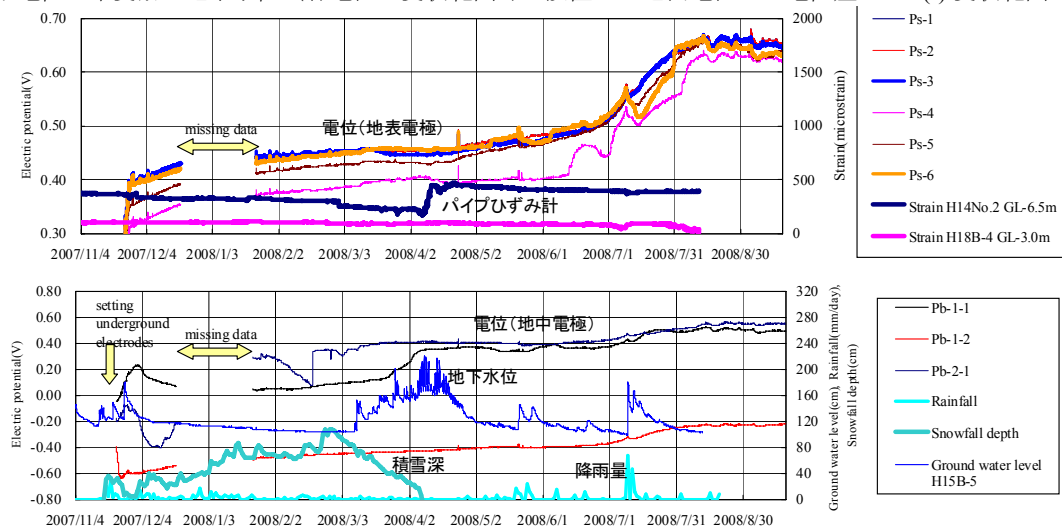


図-5 微小電位の年変動と地下水位（各電極と地中電極Pb-2-2との電位差：com(-):Pb-2-2）

図-4 に適用斜面における微小電位変動傾向を時系列で示す。図より本斜面では微小電位変動は夏季に大きく、冬季に小さい傾向が認められる。この原因は、冬季には降水量自体が少ないことに加えて積雪があり雨が地中に浸透しにくいいため、降雨の影響を受けにくいと考えられる。また、微小電位は降雨時にすべての電極で電位差が大きく上昇する傾向が見られる。これは地盤内で破壊にともない発生した電位変化とは異なり、外的な要因による影響と考えられる。

本斜面の微小電位観測では、すべての電極についてCOM(-)との電位差を観測しているため、各電極における観測値から別の電極の観測値を差し引くことにより、共通電極を他の電極に見立てることができる。図-5 にすべり面以深に埋設した地中電極（Pb-2-2）を共通電極に見立てた微小電位変動傾向を時系列で示す。地中電極の設置深度は、電極が降雨の影響を直接受けないようにする目的で地下水位以深として、電極が常時水浸するように設置した。図より、共通電極を地表電極として整理した結果に比べて、地中電極を共通電極として整理した

結果の方が、降雨時の大きな微小電位変動などが少ないことがわかる。

一方で、図-5 より各電極と地中電極間の電位差の絶対値は、夏季に大きく冬季に小さい傾向が認められる。この傾向から、地中のすべり面以深の不動土塊の電位に対して、本変状斜面が有する電位は夏季に相対的に大きくなり、冬季に相対的に小さくなっていると考えられる。

(3) 電位分担率の変動傾向

2章で述べた電位分担率について本斜面で観測された微小電位データに適用を試みた。式(3)、式(4)に地表電極の電位分担率を示す。

R_n 地表電極 Ps-n の電位分担率

$$R_n = Ps-n / \sum Ps \quad (3)$$

$$\sum Ps = Ps-1 + Ps-2 + Ps-3 + Ps-4 + Ps-5 + Ps-6 \quad (4)$$

図-6 に地表電極の電位分担率の年変動傾向を時系列にまとめて示す。図より本斜面における観測データでは、電位分担率は室内実験に比べて多くの変動が見られることがわかる。

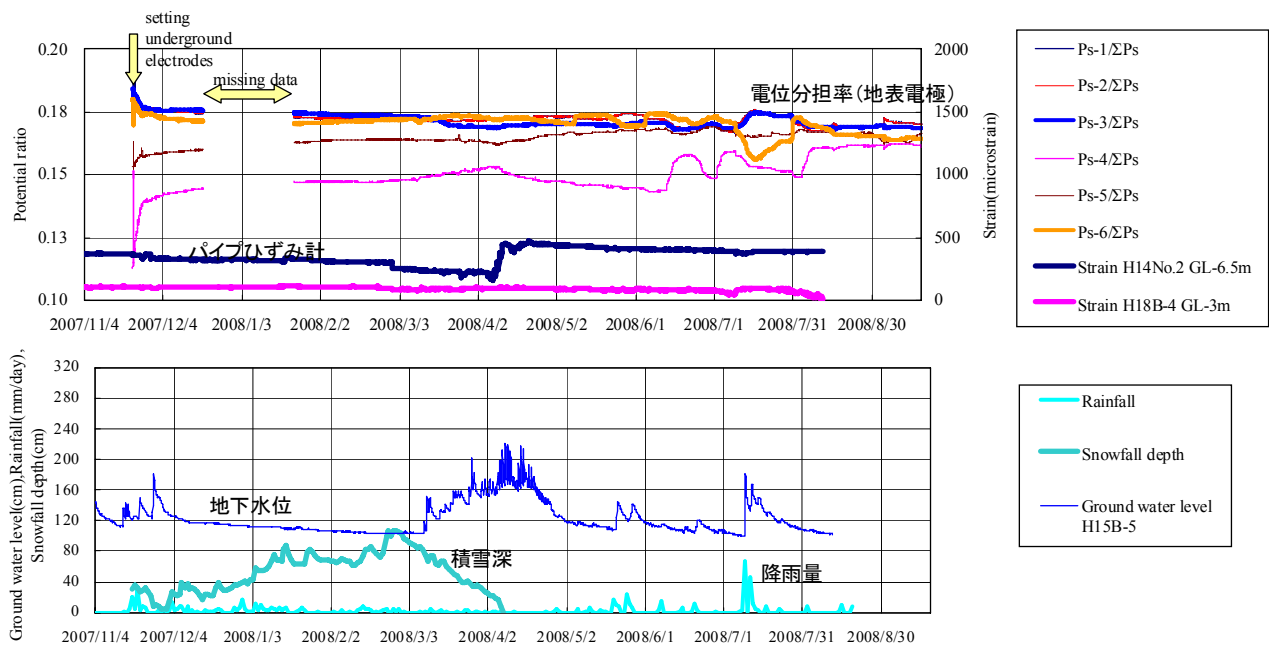


図-6 電位分担率の年変動 (com(-):Pb-2-2)

各地表電極の電位分担率は、12 月ごろから 3 月上旬にかけて変動が少なく、3 月上旬ごろから 7 月下旬にかけて変動が比較的大きい。特にまとまった降雨のあった 5 月中旬および、7 月上旬の変動が大きい結果となっている。電位分担率の変動があった時期に着目してパイプひずみ計の動きを見ると、5 月中旬にはほとんど斜面変状が起こっていないが、7 月上旬の豪雨時には若干の斜面変状が認められる。

一方で、融雪期の斜面変状時期の周辺にも電位分担率の変動が認められる。図-7 に融雪期の電位分担率の変動傾向を拡大して示す。電位分担率は融雪が始まる 3 月上旬までほとんど変動することなく推移し、斜面変状が始まる時期に Ps-3 と Ps-6 など電位分担率の逆転が認められる。その後、4 月上旬の融雪が終わり地下水位が上昇する時期に大きな斜面変状が起こっている。ただし、斜面変状が収束した後で電位分担率が収束する傾向は認められない。電位分担率の変動の原因、物理的な意味には不明な点が残るが、識別され得る変動が斜面変状に先行して確認されたことから、電位分担率が斜面不安定化に至る臨界状態を示す指標となる可能性が示唆される。

(4) 安定領域と変状領域における電位分担率の変動傾向

斜面変状の大きい領域とほとんど変状のない 2 つの領域において、電位分担率が異なる傾向を示すかを検証する目的で、地表電極 2 点間の電位分担率を図-8 に示すようにまとめた。

図-8 a) は斜面変状の大きい領域に設置した地表電極 Ps-3 と斜面変状がほとんど起こらず安定した領域に設置した地表電極 Ps-1 の電位分担率を対比したものである。斜面変状領域 Ps-3 と安定領域 Ps-1 の電位分担率は変状

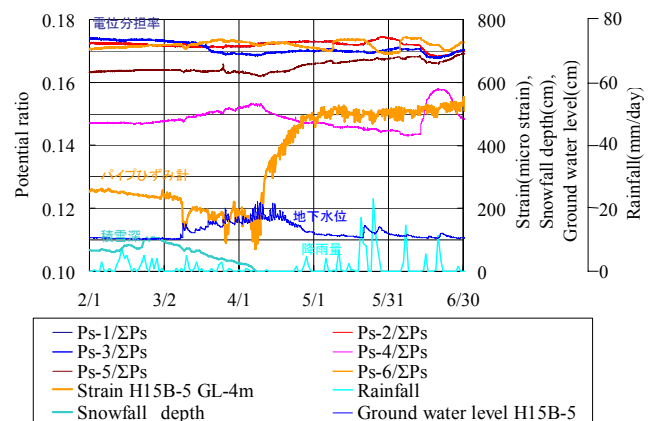
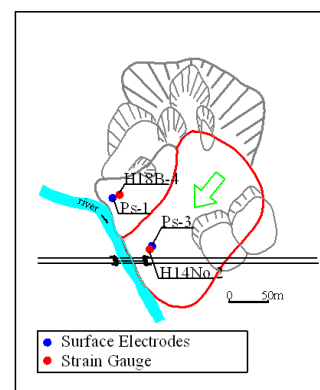
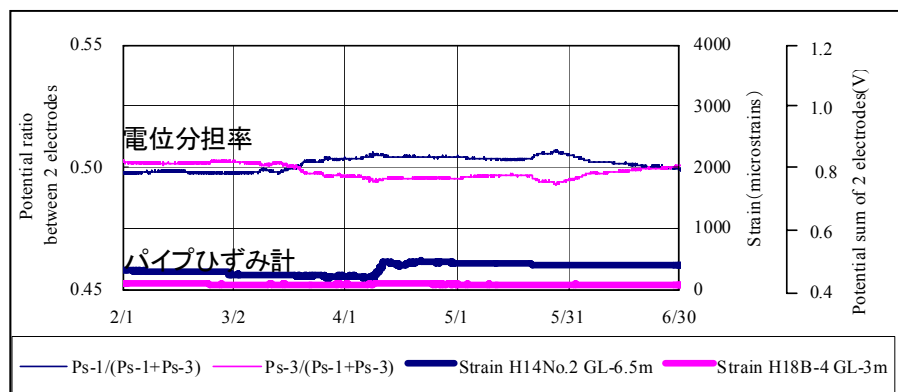


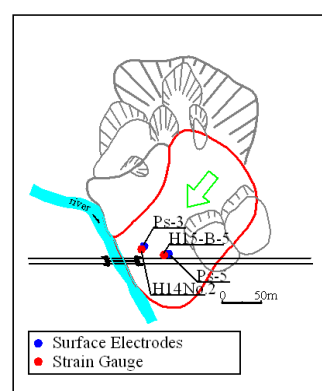
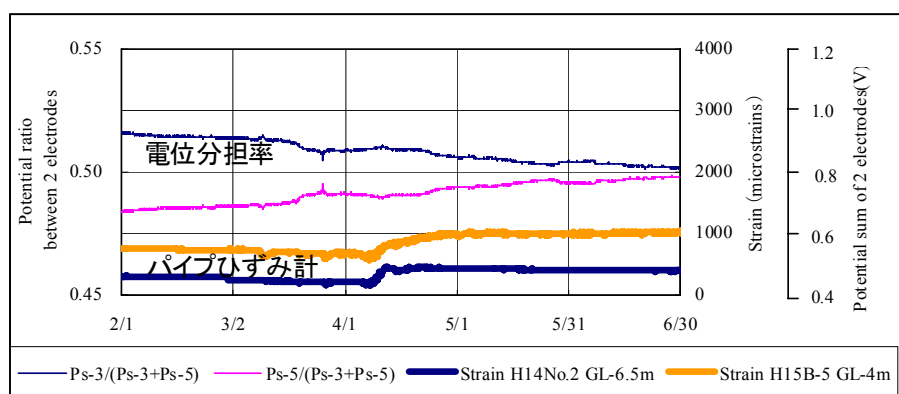
図-7 融雪期の電位分担率の推移

に先行して 3 月上旬から中旬ごろにかけて逆転している。図-8 b) は双方とも斜面変状の大きい領域に設置した地表電極 Ps-3 と Ps-5 の電位分担率を対比したものである。斜面変状領域の電極間では電位分担率の変動は認められるものの、斜面変状前後に着目すると電位分担率の逆転は起こっていない。図-8 c) は双方とも斜面変状がほとんどなく安定した領域に設置した地表電極 Ps-1 と Ps-2 の電位分担率を対比したものである。安定領域の電極間では電位分担率の変動がほとんどない。図-8 d) は c) と同様に双方とも斜面変状がほとんどなく安定した領域に設置した地表電極 Ps-1 と距離が離れた Ps-6 の電位分担率を対比したものである。Ps-1 と Ps-6 の電位分担率は c) の場合と異なり変動を繰り返し何度か電位分担率の逆転が認められるがそれほど大きな差がないまま推移している。

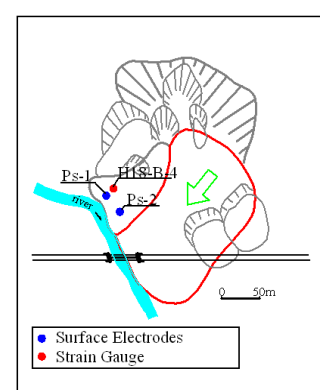
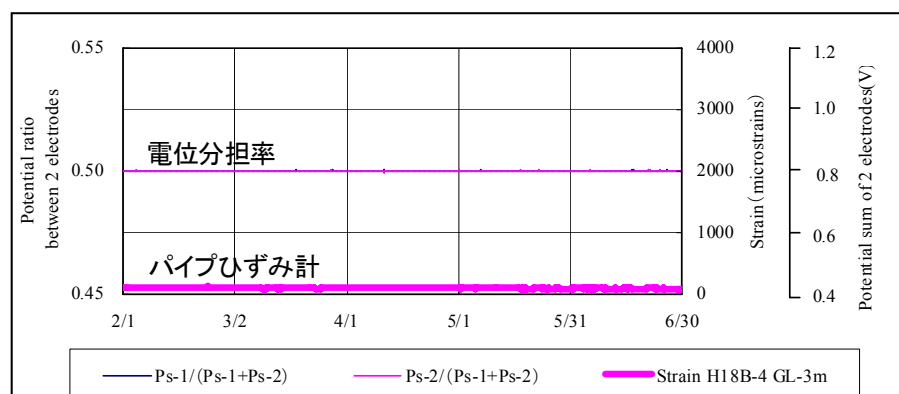
以上の観測結果より、斜面変状領域と安定領域の地盤では異なる微小電位が発生しており、その変動は変状に至る破壊に先行して起こっている可能性が示唆される。



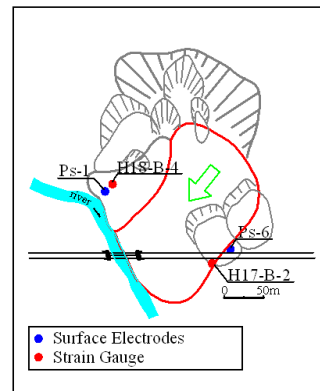
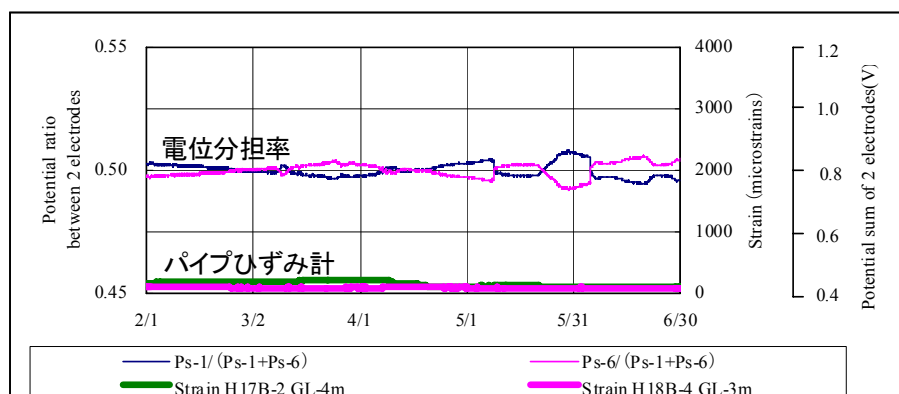
a) Ps-1:stable area, Ps-3:unstable area



b) Ps-3:unstable area, Ps-5:unstable area



c) Ps-1:stable area, Ps-2:stable area



d) Ps-1:stable area, Ps-6:stable area

図-8 2点間の電位分担率の変動傾向 (com(-):Pb-2-2)

(5) 電位分担率に関する考察

斜面崩壊や岩盤崩落などの監視すべき範囲が限られた場では、降雨などの外的要因に起因する微小電位変動は観測フィールド全体ではほぼ斉一に影響を受けると考えられるため、複数地点で微小電位観測をおこなうことにより、その影響を除去できる可能性がある。すなわち、複数地点で微小電位観測をおこない、すべての地点で起こっている変動を外的要因によるものとみなすことで、不安定領域で個別に起こっている変動を識別しやすくなると考えられる。

本斜面で適用した電位分担率は、ある微小電位観測場を考えたときに電氣的ポテンシャル（電位）が等しい（あるいは等しくない）いくつかの領域に区分可能だと仮定して、観測場全体が持つポテンシャルに対して、その領域がどれだけのポテンシャルを持っているかをあらわす指標となり得る。電位分担率の変動は、ある領域の電氣的ポテンシャルが観測場全体の傾向とは異なる変動を起こしていることを意味し、本斜面においては、不安定領域だけで起こる微小電位変動が電位分担率の変動としてあらわれた可能性があると考えられる。

また、共通電極を設け複数の観測点と共通電極との電位差を観測する方法によって、各地点個別の電位が相対的に明確となり、変動の大きい地点を識別しやすくなると考えられる。

4. おわりに

本報告では積雪寒冷地の変状斜面における微小電位観測の適用事例を示し、変状予測手法について考察した。

ここでは、室内実験で岩石の破壊時に2点間の電位分担率が変化する傾向に着目し、その考え方を変状斜面における微小電位観測に適用し、以下の知見を得た。

①電位分担率は複数地点間における電位の比率を相対的にあらわす値であるため、すべての電極が斉一に受ける降雨などの外的要因による影響を受けにくい。

②斜面変状領域と安定領域では、地盤破壊に先行して異なる傾向の微小電位変動が起こり、その変動は複数地点間の電位分担率の変化としてあらわれる可能性がある。

③斜面変状領域と安定領域で任意の地点を選定し、それぞれの地点間の電位分担率の変動傾向を監視することによって、斜面崩壊や岩盤崩落の前兆を検出しやすくなる可能性がある。

今後の展開としては、本斜面において微小電位観測を継続し、斜面不安定化予測のための微小電位データの評価方法について検討を重ねる計画である。

参考文献

- 1) 長尾年恭：地震予知研究の新展開，p.35，近未来社，2001.
- 2) 日本地震学会地震予知検討委員会編：地震予知の科学，東京大学出版会，pp.71-72，2007.
- 3) 村山秀幸，伊藤由明，伊東佳彦，日下部祐基，伊藤憲章，長尾年恭：低土被り区間のトンネル掘削における微小電位観測を用いた地表面モニタリング，第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.17-22，2007.
- 4) 村山秀幸，加藤卓朗，伊東佳彦，日下部祐基，橋本祥司，長尾年恭：微小電位計測による岩盤崩壊監視技術に関する基礎的研究-その2：地盤の凍結・融解に伴う微小電位の発生特性に関する検討，土木学会第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.141-146，2005.
- 5) 穴戸政仁，伊東佳彦，日下部祐基，村山秀幸，丹羽廣海，長尾年恭：室内岩石試験における微小電位発生のメカニズムと発生傾向の検討，第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2008.（投稿中）
- 6) 丹羽廣海，村山秀幸，伊東佳彦，日下部祐基，穴戸政仁：変状斜面における微小電位の観測，第43回地盤工学研究発表会，pp.1971-1972，2008.

STUDY ON A FAILURE PREDICTION METHOD FOR UNSTABLE SLOPES USING MICRO GEO-ELECTRIC SIGNALS

Hiroumi NIWA, Hideyuki MURAYAMA, Yoshihiko ITO, Yuki KUSAKABE
and Masahito SHISHIDO

Using Micro Geo-Electric Signals (MGES), we carried out a field measurements of a slope in a cold and snowy region, in order to predict rock rock collapses and slope failures for the past few years. The measurements showed that rainfall interfered with signals from "MGES". However, the transition of potential ratio in snow-melt conditions (which is usually when the slope becomes unstable) was clearly identified. From these results, it was suggested that measuring "MGES" from multiple locations may allow more accurate identification of slope failure by allowing elimination of uniform disturbances due to rainfall.