

斜面監視を目的とした微小電位観測の研究開発

丹羽 廣海 村山 秀幸

概 要

筆者らは、岩盤崩壊や地すべりなどの地盤災害の発生に先立って不安定化予測が可能な監視技術として微小電位観測に着目し研究をおこなってきた。

微小電位発生メカニズムの検証を目的とした室内実験では、一軸圧縮試験時の供試体における微小電位を計測し、供試体の破壊に先行して微小電位変動が発生することを確認した。また、微小電位観測の現地適用性を検証する目的で、北海道内の積雪寒冷地における不安定岩盤斜面、地すべり地を対象とした長期現場観測をおこなった。現場観測では、微小電位は降雨をはじめとする気象・環境条件による影響を受けやすいため、斜面変状に起因する微小電位変動を識別することが困難となるが、主成分分析等の解析的手法を適用することにより気象・環境条件による影響を除去して斜面変状に起因する微小電位を識別することが出来る可能性を示した。

微小電位観測による斜面の不安定化予測技術は、現段階では実用化までには至っていないが、本稿ではこれまでにおこなった各種の実験と観測結果から得られた知見を整理した。

Study of slope monitoring using Micro geo-electric signals (MGES).

Abstract

An multi-year experiment was undertaken to assess the effectiveness of Micro Geo-Electric Signals (MGES) in predicting rock collapses and slope failures.

Laboratory test results have shown that the MGES are generated prior to failure during unconfined compression. The field measurements showed that it is difficult to recognize the changes of MGES generated by rock failure because of the large MGES signals caused by rainfall. However, it may be possible to recognize the irregular changes of MGES generated prior to failure by application of the analysis methods.

Although the failure prediction methods have not been put to practical application yet, this paper describes recent knowledge of MGES obtained from the laboratory tests and the field measurements.

キーワード： 微小電位観測 岩盤崩壊
地すべり 不安定化予測

§1. はじめに

1.1 背景

わが国の国土は、その地形、地質条件から地すべりや岩盤崩壊などの地盤災害が毎年多数発生している。ひとたび大規模な地盤災害が発生すると、道路や鉄道などの土木構造物が多大な被害を受けるとともに交通機関が遮断されて地域住民に甚大な被害が生じる。時には人命に関わる大事故に直結する場合も少なくないことから、災害発生に先立ってその前兆を予測する技術の確立が求められている。また、従来の社会資本整備の考え方は、人命に直結する斜面防災に関してはハード対策を前提として進められてきたが、近年のコスト縮減に対する社会的要請を背景として、警戒避難体制の充実などを主体としたソフト対策を併用して安全を確保する必要性が高くなってきているため、斜面の不安定化予測技術の開発に対する期待は大きい。

1.2 斜面の不安定化予測技術の概要

斜面崩壊の発生に先立ってその前兆を捉える崩壊予測技術の研究は様々な分野でおこなわれているが、いまだ確立された手法はないのが現状である。一方、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古くから知られている。微小電位観測は地盤の自然電位を継続的に観測することによって、岩石や地盤の破壊に起因する電氣的シグナルを捉え崩壊発生の前兆を検出しようとする手法である。

斜面崩壊の事前予測を目的とした計測方法としては、AE (Acoustic Emission) が挙げられ、これまでに研究および適用がなされてきた。しかし、AE は内部減衰(熱に変わって減衰する現象:ダンピング)による距離減衰が著しいため、崩壊箇所の近傍にセンサーを取り付けていないと観測できないなどの課題があった。

一方、電磁気学的手法である微小電位観測は、直流(DC)成分の電位差を観測する手法であるため、斜面崩壊の前兆となる電位変化(電氣的信号)が発生した場合、AE に比べて距離減衰ははるかに小さい。しかし電磁波が地盤を伝播する場合、距離減衰に相当する電位レベルの低下は小さいながらもあるため、遠方ほど観測される電位レベルは低くなり、電位発生点近傍で電位レベルは大きくなる。電磁波の距離減衰は周波数に依存する点では弾性波等の実体波と同様であるが、直流(DC)成分の周波数はごく低いいため減衰は小さい。

また、電磁波の伝播速度は誘電率で決まるが、地盤の誘電率は 10 万 km/s オーダーであるため距離が数 km のオーダーであれば電磁波はほぼ光速で瞬時に伝わり、直流(DC)成分なら時間遅れはないと考えて良い。

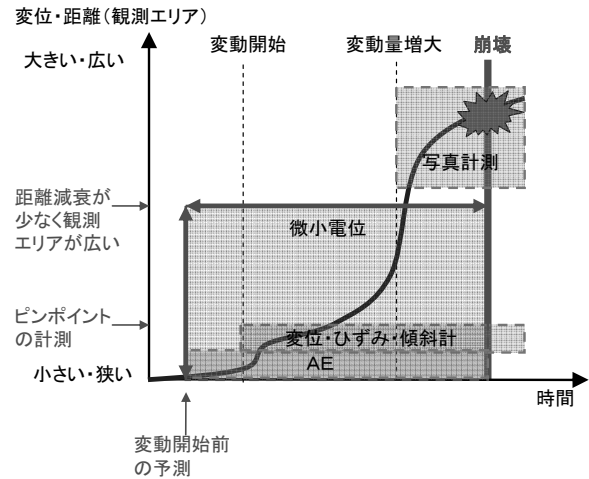


図 1 計測方法による斜面変状検出のタイミング

以上のように、微小電位観測は距離による減衰が小さい、時間遅れがほとんどないなどの特性を持つことから斜面の不安定化予測技術として期待できる(図 1 参照)。

§2. 微小電位観測の概要

地盤には常に微弱な電流が流れており、ある離れた2点間では電位差(difference of electric potential)が発生している。一般に、この電位差を地電位あるいは自然電位 (self potential / spontaneous : SP)と呼んでいる。微小電位観測は、地盤の自然電位を観測することによって崩壊発生の前兆を検出しようとする手法で、ギリシャの地震予知手法としていくつかの成功事例が報告されている VAN 法を応用したものである。VAN 法は、地盤の自然電位を継続的に観測し、自然電位に継続時間が数分から数時間の変化 (Seismic Electric Signals:SES) が観測されると、数日から数週間以内にどこで、どの程度の規模で地震が発生するか予測する地震予知方法である¹⁾。筆者らは、土木分野における様々な地盤破壊現象に先行して発生する微小な電気信号に注目するという観点から、地盤で測定される微小な電位を微小電位 (Micro Geo-Electric Signals) と定義した。

微小電位観測は、地盤内に設置した電極間の電位差を連続的に観測することによって、岩石の破壊に先行して発生すると考えられている電氣的信号を事前に捕らえることを目的としている。微小電位発生メカニズムとしては、固体力学的観点から表 1 に示すように様々なモデルが考えられている¹⁾。固体の応力変動に伴って電位差が発生するためには、電荷イオンが伝達あるいは遮蔽される必要性があり、これらの現象の担い手がどのような物理現象であるかを明らかにすることが、微小電位発生メカニズム解明の論点とな

る。筆者らはこれまでの室内実験結果から、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微小電位発生の主要なメカニズムと考えている²⁾。

本稿では、微小電位発生メカニズムの検証を目的とした室内実験および現場での不安定岩盤斜面や地すべり地を対象とした長期観測で得られた知見を示して報告する。

§3. 室内における基礎実験

室内実験は一軸圧縮試験、曲げ試験中の供試体の微小電位計測実験、土槽を用いて斜面のすべり破壊を模擬した実験、降雨および地下水上昇・下降を模擬した実験などを実施した。室内実験の目的と結果の概要を表2に示す。

以下、上記の室内実験の中でも特徴的な結果が得られた一軸圧縮試験の結果について述べる。

3.1 一軸圧縮試験時の微小電位発生

一軸圧縮試験では、現場観測をおこなった斜面において採取したボーリングコアや、掘削土を突き固めた攪乱試験料を用いて、載荷中の供試体に発生する微小電位を観測した。実験は図2に示すように試料上端、下端に設置した直径100mm、厚さ3mmの銅板製電極とアース間および上下電極間の電位差を測定した。電極と載荷板との間には絶縁シートを挟み電極と載荷試験器が絶縁されるようにした。微小電位の計測は、各チャンネル独立型の専用データロガー (SES-96) を用いておこない、サンプリングタイムは0.1secとした。試験結果の一例として、図3に現場観測をおこなった地すべり地 (§4 参照) で採取した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する。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)で表し、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表す指標である。

$$R_U = P_{U-G} / (P_{U-G} + P_{L-G}) \quad (1)$$

$$R_L = P_{L-G} / (P_{U-G} + P_{L-G}) \quad (2)$$

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

表1 微小電位発生のメカニズムに関する諸モデル

モデル名称	必要な仮定	機構
流動電位	応力勾配・間隙水	岩石表面との電氣的な相互作用のために、岩石中の空隙を圧力勾配によって流れる間隙水は電荷を運ぶ。
圧電分極の補償電荷 (Ikeya, 1997)	応力変化・圧電物質・導体	圧電物質に応力が加わると分極が生じ、この分極を遮蔽するために自由電荷が再配置される。応力がなくなると、この自由電荷の対消滅によって電磁波が放出される。
転位の移動による電気双極子 (Slifkin, 1996)	応力変化・刃状転位・不純物イオン	帯電したジョグは不純物イオンなどによって遮蔽されている。応力変化に刃状転位は素早く追従できるが、不純物イオンは出来ないために電気双極子が生成される。
圧力誘導電流 (Varotsos, 1998)	応力変化・格子欠陥	価数の異なる不純物イオンによって、結晶中に電気双極子が生成される。圧力が高くなるとこの双極子が回転し易くなり、ある圧力のとき外部電場の方向に向きが揃う。このとき、双極子の回転にともなって電流が流れる。

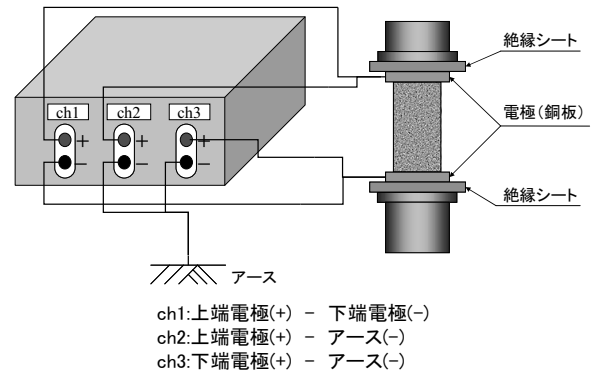


図2 室内実験における微小電位測定

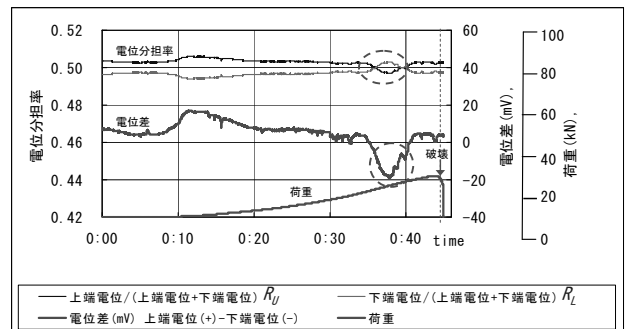


図3 一軸圧縮試験中の微小電位変動傾向と電位分担率

P_{U-G} : 上端電極の電位 (対アース)

P_{L-G} : 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3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、載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

表 2 室内実験の目的と結果概要

実験内容	実験概要	実験結果	得られた知見	文献
一軸圧縮試験	様々な岩石を用いた一軸圧縮試験時の微小電位発生傾向と物性値の比較	・様々な電位変動が確認されるが、その波形には再現性が見られない ・一軸圧縮強さやP波速度等の物性値との相関は無いが、含水比と正の相関がある	・微小電位発生は、岩石の強さ等ではなく、供試体の含水比に相関がある	3)
	アクリル製(絶縁)、銅製(導電)供試体を用いた一軸圧縮試験	・岩石ではなくアクリル製、銅製の供試体を載荷しても電位が発生しない	・計測される微小電位は、実験機材や外的なノイズや電極の変形、摩擦で発生する電位ではなく、供試体内部から発生している	2)
	接地抵抗低減材を用いた一軸圧縮試験(同一材料で含水比を変化させた場合の電位発生大きさ比較)	・同一の材料では、含水比が大きいくほど、大きな電位が発生する ・絶乾状態の供試体では、電位が発生しない	・水がなければ、電位が発生しない ・微小電位発生の主なメカニズムは流動電位モデル	2)
	攪乱試料を用いた一軸圧縮試験	・小さいながらも電位は発生する		2)
繰り返し載荷試験	岩石試料を破壊強度の50%まで繰り返し載荷した時の微小電位変動を計測	・電位差は、載荷当初に乱れるが、その後は応力、変位に追従して変動する	・地すべりのような再活動性のある斜面変動や盛土などの土構造物の変状監視にも適用できる可能性がある	2)
曲げ試験	モルタル・接地抵抗低減材による曲げ試験	・一軸圧縮試験に比べて電位発生が小さい	・応力勾配(≒間隙中の水の流動)が供試体左右で対称となり流動電位が相殺されるため電位が小さいと考えられる	
凍結融解土槽試験	砂に挿入した電極により、凍結融解時の電位変動を計測	・凍結、融解時には特徴的な電位変動 ・完全に凍結した砂では電位差が発生しない	・砂に外力を作用しない条件で電位変動が確認されたため、「ピエゾ(圧電)効果」以外の微小電位発生のメカニズムによる変動を捉えたと考えられる	4)
	岩石に挿入した電極により、凍結融解時の電位変動を計測	・砂での実験よりも、電位変動が小さい ・岩石が凍結または融解し始めてから、完全に凍結あるいは融解に至る過程(相変化する過程)で発生する	・水の移動や水圧の変化により電位が発生していると考えられる ・砂や岩石で発生する微小電位は含水比に左右されると考えられる	5)
土槽試験	砂による模擬斜面上部への載荷による斜面不安定化試験	・すべり土塊周辺と応力の影響を受けない不動領域で異なる傾向の電位変動が発生	・微小電位観測はすべり破壊型の斜面崩壊に対する監視技術として有効である	6)
	模擬降雨時の電位変動傾向の把握	・降雨時の特徴的な電位変動を確認	・電位分担率・主成分分析等を用いたデータ解析により、現場観測データから降雨、地下水上昇・下降に起因する電位変動を除去することができる可能性がある	7)
	模擬地下水上昇・下降時の電位変動傾向の把握	・地下水上昇・下降時の特徴的な電位変動を確認		
遠心模型実験	模擬岩盤に電極を埋設し、遠心力載荷装置において加速度を載荷し、破壊時の電位変動を確認する	・遠心加速度の増加による自重応力の変化で発生した微小電位変動を確認 ・破壊前の微小電位変動を計測した	・微小電位観測はすべり破壊型の斜面崩壊に対する監視技術として有効である	8)

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原因や、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表す指標となり得る可能性がある。

3.2 試料の含水状態と微小電位発生

図 4 にボーリングコアを用いた一軸圧縮試験で計測された最大電位差と含水比の関係を示す。最大電位差は、一軸圧縮試験における載荷から破壊に至るまでに計測された上端電極と下端電極間の電位差の変動幅の最大値で、図に示すようにばらつきがあるもののおおむね含水比と正の相関を示す結果となった。また、岩種や一軸圧縮強度、超音波伝播速度と最大電位差の間に明確な相関性は認められなかった²⁾。この結果より、微小電位の大きさや発生パターンは、その岩石の岩種や強度に依存するものではなく、供試体の含水状態に支配されるものであると考えられる。

また、均質材料で含水比と微小電位の相関を確認する目的で、接地抵抗低減材をモールドで固化させた後に炉乾燥して絶乾状態にした供試体を使用した一軸圧縮試験を実施した。実験結果は図 5 に示すとおり、絶乾状態の供試体では載荷開始から破壊にかけて電位変動は無いことが明らかとなった。これらの結果より、微小電位の発生には、

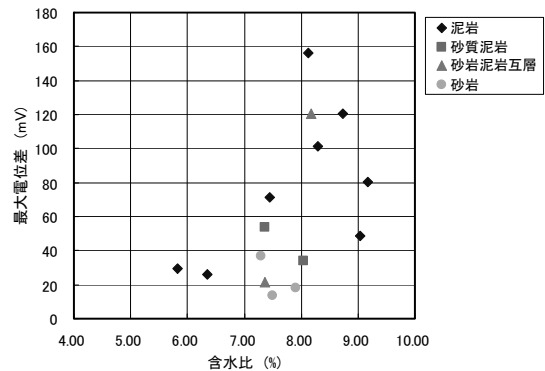


図 4 一軸圧縮試験中の最大電位差と含水比の相関

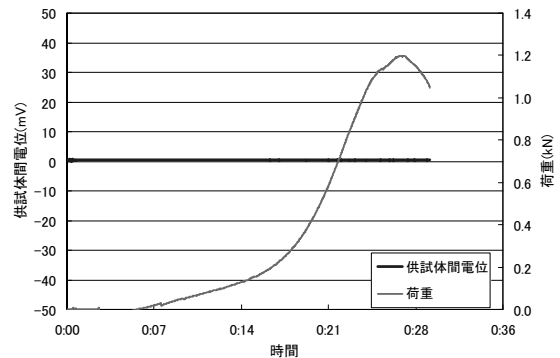


図 5 絶乾状態の供試体の一軸圧縮試験中の電位

供試体中に水が含まれることが必要条件と考えられ、前述の流動電位モデルが主要な微小電位発生メカニズムであると考えられる。

表 3 現場観測の目的と結果概要

実験内容	実験概要	実験結果	得られた知見	文献
電極の特性把握試験	電極の設置方法、電極材料、電極の防護方法の違いが電位変動に及ぼす影響把握	・接地抵抗低減剤を使用した電極のレスポンスが良好 ・銅、鉛電極のレスポンスが良好 ・銀メッキの有無はそれほど電極のレスポンスに寄与しない	・環境への影響、現場での取り扱いやすさ等を考慮し、銅電極が有利 ・電極と地盤の間には接地抵抗低減材を充填するのが良い	9)
冬期野外観測実験	野外フィールド(施設構内)において約1年間の継続計測を実施	・地表面に近い電極は降雨の影響を受ける ・観測データは季節変動の影響を受けて周期変化する	・気象・環境による影響を除去して破壊に起因する微小電位変動を識別するための方策が必要	10)
トンネル掘削現場での観測実験	低土被りのトンネル掘削現場において、切羽掘削に伴う地表面のモニタリングを実施	・微小電位の発生と、切羽との位置関係から特徴的な電位発生パターンが確認された ・地表面変位速度が変化する1~2日前に電位差ピークの発生頻度が高くなる	・発生する微小電位ピークを地表面沈下と対比し、地表面計測管理手法・変状予測手法として有用	11)
岩盤斜面での実験	水冷破碎岩の急崖斜面において、計12箇所の表面電極を設置して微小電位を観測し、人工的に不安定化させる実験	〈破壊までは至らず〉 ・観測データは気温・降雨などの気象による影響が大きい ・設置当初は微小電位が乱れる傾向がある	・気象・環境による影響を除去して破壊に起因する微小電位変動を識別するための方策が必要 ・設置した電極が落ち着くまでに、ある程度の期間(1週間~1ヶ月)が必要	12)
地すべり地での実験	泥岩基盤の地すべり地において、計10箇所の埋設電極を設置して微小電位を観測し、約3年間にわたる長期観測を実施	・観測データは降雨、地下水変動などの気象条件による影響が大きい	・気象・環境による影響を除去して破壊に起因する微小電位変動を識別するための方策が必要 ・上記の方策として解析的手法の有効性を確認	13) 14)

§4. 現場における観測

4.1 微小電位観測方法

現場における観測では積雪寒冷地における不安定岩盤斜面、地すべり地などを対象にして、3~5年程度の長期観測を実施した。表3にこれまでに実施した現場観測の目的と結果の概要を示す。微小電位観測では、複数箇所の観測点に各々電極を設置し、各電極と共通電極(COM(-))の電位差を観測する。斜面不安定化に起因する微小電位変動は局所的に発生し、気象・環境条件による観測領域内の斉一な電位変動とは異なると考えられる。よって、斜面不安定化に起因する微小電位変動を抽出するためには、観測領域内に網羅的に電極を配置し複数地点観測をおこなうことにより斉一な電位変動傾向を把握し、全体の傾向と異なる局所的な電位変動を識別することが必要となる。そのため各観測箇所および共通電極は降雨、積雪、地下水変動等の気象・環境条件を斉一に受ける箇所に配置することとした。特に共通電極(COM(-))は、各観測点における電位の基準となるため、斜面変状や表層の洗掘によって電氣的に不安定とならない箇所に設置することが重要である。

現場観測に使用する電極の材質や設置方法については、電極性能実験を実施して検討した。その結果¹⁰⁾から電極の長期耐久性、電位変化に対するレスポンス、周辺環境への影響および現場での取り扱いやすさなどを考慮して、図6に示すように銅製棒状電極を地中に埋設し、電極と地盤の間は接地抵抗低減材を充填する方法を採用した。

4.2 地すべり地における適用

これまでに実施した現場における微小電位観測の中から、地すべり地における適用事例を示して報告する。現場は北

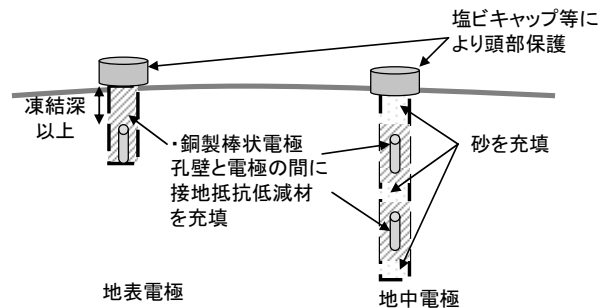


図 6 電極の設置方法

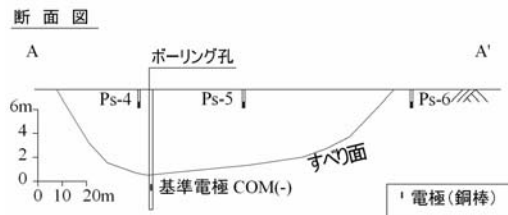
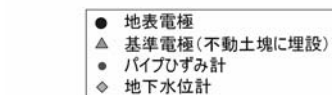
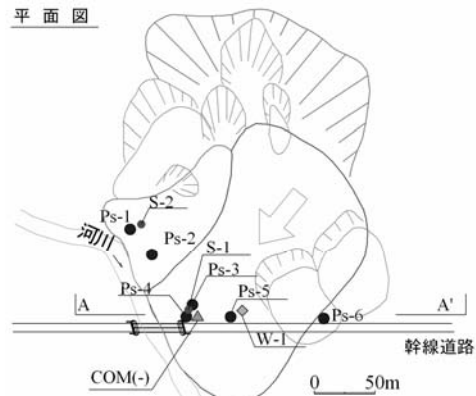
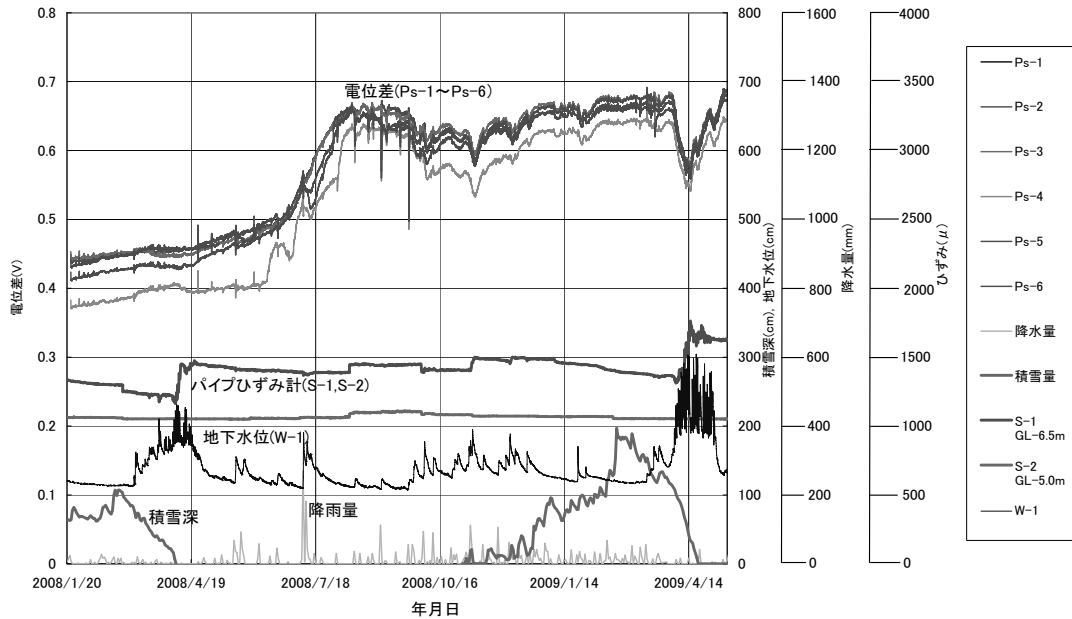


図 7 地すべり地における微小電位観測の適用



※電極位置およびパイプひずみ計、水位計の位置は図 7 に記載する。

図 8 微小電位の年変動(各地表電極と地中電極間の電位差)

海道にある地すべり地で、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。本地域には白亜系蝦夷層群に相当する堆積岩が広く分布している。変状を起こしている地質は泥岩を主体とし、風化やスレーキングに対して弱い地質である。

微小電位観測は、図 7 に示すとおり変状斜面末端部に地表電極を計 6 箇所設置して 2006 年 10 月から開始し 2009 年 11 月まで実施した。電極は斜面末端部の変状が活発な箇所を網羅するように配置し、各電極の間隔は 50m 程度とした。また、すべり面に深に設置した地中電極を負極の共通電極 (COM(-)) として、COM(-) と地表電極間の電位差を観測した。

図 8 に、2008 年 1 月下旬から 2009 年 9 月中旬までの約 1 年 8 ヶ月間の適用斜面における微小電位変動傾向を時系列で示す。また、降雨量、積雪深、代表的な地下水位および図 7 に示す位置のパイプひずみ計 S-1、S-2 のすべり面付近における観測結果を併記した。図より斜面変状は 4 月上旬の融雪期に最も活発で、特にパイプひずみ計 S-1 のひずみが大きいことが分かる。一方パイプひずみ計 S-2 を含むブロックの変状は各種対策工の効果により収束傾向にある。また、パイプひずみ計と地下水位の変動に着目すると、斜面変状の主な要因は降雨および融雪期の地下水位上昇が支配的であることが分かる。

微小電位の変動は降雨に連動して大きく変動する傾向が見られる。またその傾向は、冬季に比べて夏季の方が顕著で季節変動が認められる。以上の気象等の要因によって起こっていると考えられる微小電位変動は、地盤内で破壊

にともない発生すると考えられる微小電位変動とは異なり、外的な気象・環境による影響と考えられる。野外における微小電位観測ではこれらの影響が大きいため破壊に起因する微小電位変動を識別しにくいことが課題となる。

4.3 観測データの評価事例

微小電位の時系列データに対して、主成分分析 (principal component analysis : PCA) の適用を試みた。主成分分析とは、多変量データの持つ情報を少数個の総合特性値に要約する手法で、複数の要因が複雑に作用している複数のデータに対して、それらを合成し卓越する成分に分け、複数 (変数の数と同数) の主成分を抽出する分析方法である。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、降雨などの気象・環境の影響による微小電位変動は観測フィールド全体でほぼ齊一に影響を受けると考えられるため、これらの影響は第一主成分として現れることが期待される。

主成分分析によって得られた主成分得点を図 9 に、24 時間ごとに試算した寄与率を図 10 にそれぞれ示す。この場合、変数である電極の数が 6 個のため第一から第六までの 6 つの主成分が抽出される。主成分分析では、ある広がりを持ったデータに対し、分散が最大となるベクトルを軸とする主成分を抽出する。主成分得点とは各変数を、主成分を表す軸に投影した位置の原点からの距離で、主成分の方向に対しての平均値からの離れを表す指標である。また寄与率とは、各主成分が全体でどの程度の割合を占めているかを表した指標である。主成分得点の試算には 1 時間間隔に整理した各電極の電位差を使用し、寄与率の試算には 24 時

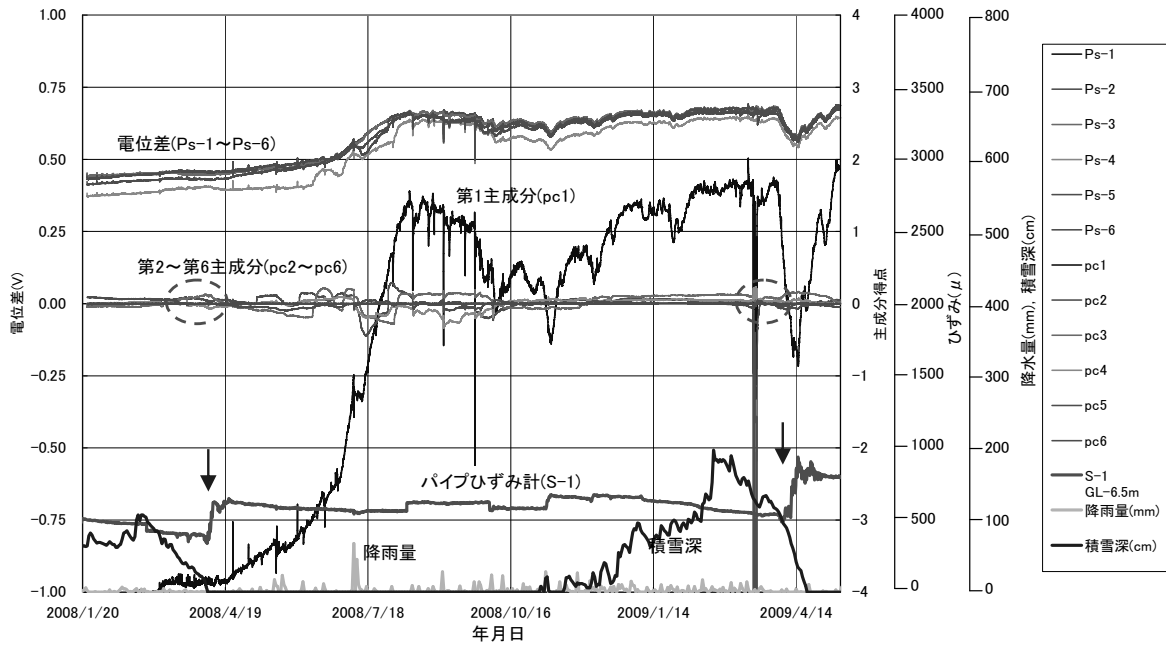


図9 主成分分析による主成分得点の変動傾向

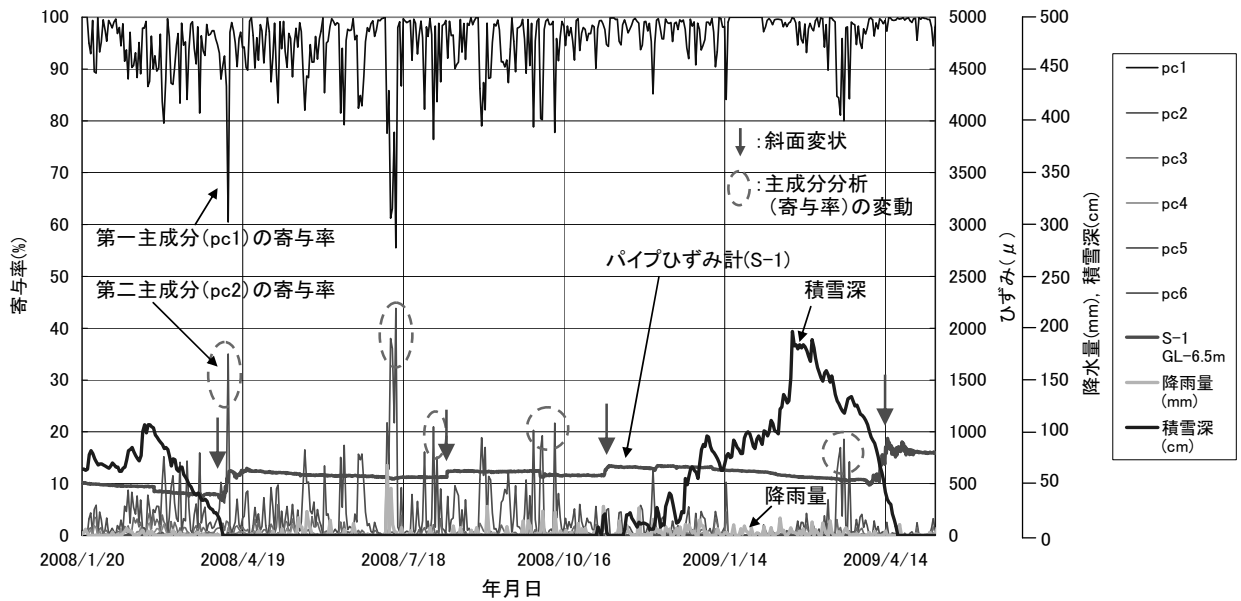


図10 主成分分析による寄与率の変動傾向

間(24 データ)ごとのデータセットに区切って寄与率の時系列変動を求めた。図より、パイプひずみ計の変動に先行して、主成分得点の変動および寄与率の変動がいくつか認められる。すなわち図9より主成分得点に着目すると、第一主成分が全体の電位差の傾向を良く表しており、春から夏にかけて電位差の絶対値が大きくなる傾向に呼応して第一主成分が大きく変動している。第二主成分以下は第一主成分に比べて絶対値の変動は少ないが、パイプひずみ計の大きな変動が見られる融雪期に先行して主成分得点の変動が認められる。また、図10より寄与率に着目すると、各電極の電位差は第一主成分が80%以上を占める期間がほと

んどであるが、パイプひずみ計が変動する期間において第二主成分以下の寄与率が20%~40%に大きくなる。上記の傾向から、第一主成分が降雨などの外的要因に起因する微小電位変動を表し、第二主成分以降の主成分が地盤の破壊に起因する微小電位変動を表していると仮定すると、第二主成分以下の寄与率の上昇に着目することが斜面不安定化の予測に有効な指標となる可能性がある。

§5. まとめ

これまでにおこなった室内実験および現場観測の結果から以下の知見が得られた。

1. 一軸圧縮試験中の微小電位観測実験から、載荷開始から破壊にかけて供試体内で微小電位の変動が起こる。
2. 含水の無い供試体の一軸圧縮試験で微小電位変動がないことから、流動電位モデルが微小電位発生の主なメカニズムである可能性が高い。
3. 微小電位の野外観測では降雨をはじめとする気象・環境の影響を強く受けるため、斜面不安定化に起因する微小電位変動を識別しにくい。
4. 主成分分析による第二主成分以下の寄与率は斜面不安定化の予測に有効な指標となる可能性がある。

微小電位観測による斜面の不安定化予測技術は、現段階では実用化までには至っていないが、これまでの室内実験および現場観測より実用可能性を示唆する結果が得られている。今後は微小電位観測による斜面監視の実績を重ね、より精度が高く実用的な斜面の不安定化予測技術へと発展してゆくことが望まれる。

謝 辞 本研究は独立行政法人土木研究所寒地土木研究所、東海大学との共同研究で実施した。研究開発にあたり多大なるご尽力をいただいた寒地土木研究所防災地質チーム伊東佳彦上席研究員、日下部祐基主任研究員、宍戸政仁研究員、東海大学長尾年恭教授、竹内昭洋研究員、ならびに関係各位に深く謝意を表します。

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) 宍戸政仁ほか: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集, 2009.1, pp.167-171
- 3) 日下部祐基ほか:岩石圧縮時に発生する微小電位計測の基礎実験, 日本応用地質学会平成 15 年度研究発表会講演論文集, 2003.10.pp.449-450
- 4) 村山秀幸ほか:微小電位計測による岩盤崩落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, 2005.1, pp.141-146
- 5) 村山秀幸ほか:岩石の凍結融解実験における微小電位発生特性の検討, 地盤工学会第 40 回地盤工学研究発表会, 2005.7.

- 6) 河口賢治ほか:地電位観測を利用した地盤災害の予測技術の開発(その 2, 模擬斜面の崩壊実験), 第 36 回地盤工学研究発表会, 2001.6
- 7) 宍戸政仁ほか:大型土槽を用いた降雨および水位上昇が微小電位に及ぼす影響の考察, 土木学会第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2010.1.
- 8) 日下部祐基ほか:斜面監視に用いる微小電位観測の遠心模型実験, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 2005.9, pp.329-330
- 9) 加藤卓朗ほか:微小電位計測による岩盤崩落監視技術に関する基礎的研究—その 1:電極材料と電極設置方法に関する検討—土木学会第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2004.1, pp.41-48
- 10) Hideyuki Murayama, et. al.:RESEARCH ON THE MICRO GEO-ELECTRIC SIGNALS TO MONITOR THE ROCK SLOPE FAILURE IN THE FALLEN SNOW OR SEVERE COLD REGIONS, ISCORD, The 7th International Symposium on Cold Region Development, 2004.9.
- 11) 村山秀幸ほか: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, 土木学会第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2007.1., pp.17-22
- 12) 日下部祐基ほか:微小電位観測による積雪寒冷地の岩盤崩落監視技術に関する現場実験, 日本応用地質学会平成 16 年度研究発表会講演論文集, 2004.10.
- 13) 丹羽廣海ほか: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, 土木学会第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2009.1, pp.51-55
- 14) 丹羽廣海ほか:野外観測における微小電位変動と斜面変状の予測事例, 土木学会第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2010.1.



丹羽 廣海

ひとこと

斜面の不安定化予測技術は未だ確立されたものが無いのが現状です。基盤技術の研究には地道な取り組みが必要ですが、今後ともたゆまず努力を続けます。