

斜面監視を目的とした微小電位観測手法

(独) 土木研究所寒地土木研究所 防災地質チーム ○宍戸 政仁
〃 日下部祐基
(株) フジタ 技術センター 村山 秀幸

岩盤崩壊や地すべりなどの地盤災害の発生を監視する技術として微小電位観測に着目し、これまでに、室内試験による微小電位発生メカニズムの検証や長期現場観測による現地適用性の検証を行ってきた。その結果、微小電位は降雨などの気象・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用いることによりこれらの影響を除去することが出来る可能性が示唆された。これらを踏まえて「斜面監視に用いる微小電位観測マニュアル（暫定版）」としてとりまとめたので、その概要について紹介する。

キーワード：微小電位、斜面災害、現地観測、不安定化予測

1. 微小電位観測概説

(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が、いまだ確立された手法はないのが現状である。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。しかし、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まっている。このことから、斜面の不安定化予測技術の開発に対する期待は大きい。

(2) 微小電位観測の概要

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。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と呼んでいる。微小電位観測は、この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¹⁾。

筆者らは、土木分野における様々な地盤破壊現象に先

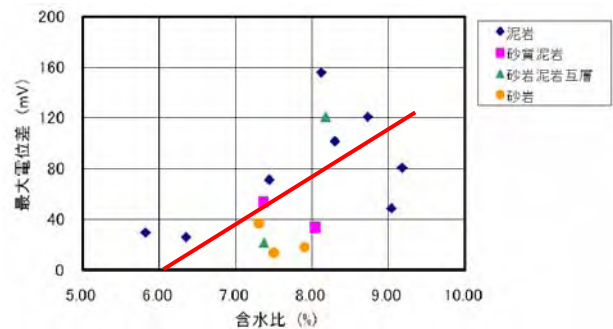


図-1 一軸圧縮試験中の最大電位差と含水比の相関

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:MGES）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様々なモデルが考えられている¹⁾。筆者らは、これまでの室内実験結果^{2), 3)}から、一軸圧縮試験時の微小電位と供試体の含水比に相関があることなどから（図-1）、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。

(3) 微小電位観測の着目点

斜面崩壊の事前予測を目的とした観測方法としては、AE（Acoustic Emission）が挙げられ、これまでに研究および現地観測されてきた。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

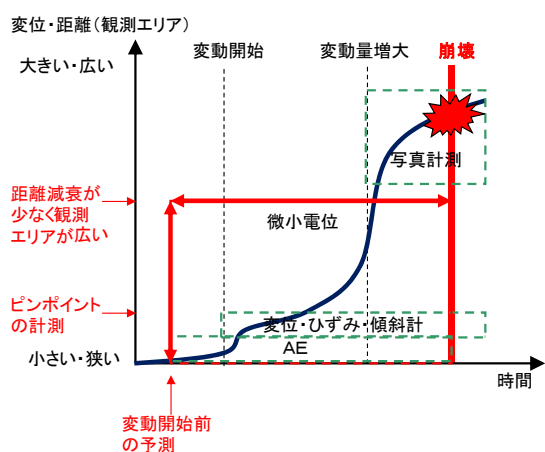


図-2 計測方法による斜面変状検出のタイミング

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ため減衰は小さい (図-2 参照)。

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。

このように、微小電位観測は従来の計測手法と比較して、広い範囲 (領域) の観測あるいは地盤変動の初期段階から最終段階まで計測でき、斜面の不安定化の新しい予測技術として期待できる (図-2参照)

2. 観測計画と機器の設置

(1) 観測計画

微小電位観測は受動的な電位観測手法であり、観測地点周辺に変電所、高圧電線、工場のアースなどが近隣にある場合、観測データはこれらの施設が発生する電氣的なノイズの影響を受けることが考えられる。よって、観測領域内に配置する電極はできるだけこれらの影響を受けない箇所に設定、配置することが望ましい。ただし、これらの電氣的なノイズは、一般に50Hzまたは60Hzおよびその高調波が圧倒的に大きく、微小電位観測で対象としているのは上記よりはるかに低い周波数である。このため、観測データのなかに含まれる電氣的な人工ノイ

ズを識別し、その影響を除去することが比較的容易と考えられる。

(2) 観測領域の設定と電極配置計画

斜面監視において対象としている斜面の不安定化に起因する微小電位変動を識別するためには、気象・環境条件による電位変動を観測領域内においては、斉一なものとしてそれらを除去するような統計処理をおこなう必要がある。したがって、微小電位観測計画にあたっては、気象・環境条件が斉一であると考えられる範囲内で観測領域を明確にしたうえで、電極配置計画を立案する必要がある。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って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。そのために、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 (図-3)。

(3) 電極の選定と設置

地表および地中に埋設する電極の材質は銅製で、形状は径φ20mm、長さ L=500mm の棒状を標準とする (図-4)。一般に、物理探査における自然電位法 (SP) では分極現象を避けるため、銅-硫酸銅電極、鉛-塩化鉛電極、銀-塩化銀電極などの非分極性電極 (平衡電極) が採用されている。しかし、微小電位観測では複数箇所に電極を配置し長期連続観測を実施するので、電極の基本性能として、地盤 (大地) との接地抵抗が小さいこと、化学的に安定していること、長期的に劣化しないこと、電氣的シグナルに対する反応がよいこと、地盤汚染等の環境に与える負荷が少ないこと、コストおよび取り扱いが容易なこと等を観点として電極の材質を選定している。

地表電極は、地盤をコアドリルやボーリングによりφ50mm程度削孔し電極を孔内に固定しながら接地抵抗低減剤を充填して埋設する。ただし、積雪寒冷地では地盤の凍結融解によって電位が発生すること⁴⁾から、その地域の地盤凍結深以上削孔することとする。埋設孔の削孔にあたっては削孔径および深さを統一し、すべての電極が同様の設置条件となるよう留意する。電極頭部の防護方法としては、塩化ビニール製の保護キャップやウレタンを充填して電極頭部に直接降雨が当たらないように配慮する。また、銅電極の周囲を



図-3 電極の配置計画の一例

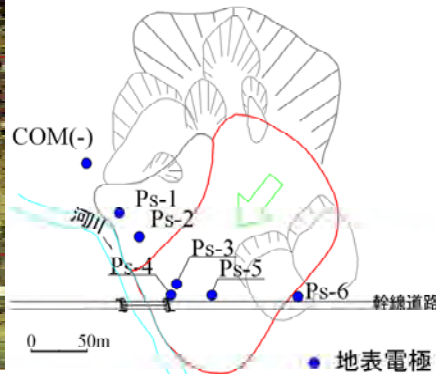


図-4 銅製埋設電極

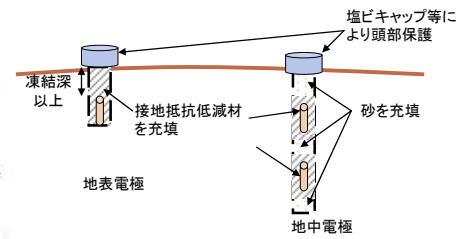


図-5 電極の設置方法

被覆し腐食・劣化を防止するとともに、見かけ上の電極表面積を大きくするための接地抵抗低減材を電極と孔壁の間に充填する（図-5）。

(4) データロガーの選定と設置

微小電位計測では、得られる地盤の電位変化が微小であることから A/D 分解能(20 ビット以上)が高く、内部抵抗（入力インピーダンス 1MΩ以上）の大きなデータロガーを選定する。さらに、長期観測となることからメモリ機能付きのデータロガーを選定し、電池駆動可能なデータロガーを推奨する。なお、観測点数が多くなる場合、十分な測定チャンネル数を有するものを選定する。汎用データロガーの内部時計は精度が低いことから、1回/日程度の頻度で内部時計の時計合わせを実施し、全ての観測記録データの時刻情報（タイムスタンプ）の精度を確保する。

(5) ケーブル配線の選定と設置

実際の微小電位現場観測では、耐候性の被覆（ポリエチレン絶縁ビニル）を施した計装ケーブルを使用して長期観測を行っており、ケーブルに由来するトラブルは発生していない。野外の斜面上における観測では落石や積雪、動物等の影響によって配線が断線することがあるため、耐候性の保護管を使用し十分に固定する必要がある。

(6) 接地抵抗の測定

電極の設置が完了した時点で接地抵抗を測定し電極性能を確認する。長期間の観測で電極の劣化、不安定化、不完全な断線等が危惧される場合には、適時接地抵抗を測定し、初期値と比較することによって電極の状態を判断する目安とする。

(7) 気象観測機器の選定と設置

野外における微小電位計測では降雨、積雪等の気象変化による影響を受けやすい。よって、電位変動と気象との相関を把握するため、観測現場における気象観測を併

用することが必要である。気象観測では、降雨量、積雪深、気温、地中温度、湿度などを観測する。また、降雨、積雪等の状況を常時監視できるようにWebカメラを設置することも有効である。

(8) ネットワーク環境の整備

変状斜面の監視・予測システムを構築する上では、長期間の常時観測を行うことが前提となる。微小電位観測は観測データを自動回収および自動解析を行うシステムを構築することで、斜面変状の兆候があった場合の迅速な対応が可能となる。実際の現場の計測事例では、データロガーやモデム等の電源の確保には、風力発電および太陽光発電を使用した。

3. 微小電位観測

(1) 観測初期段階における処置

電極を設置した直後は、接地低減材の硬化や、地表水および削孔水等の流入による影響が現れやすく、接地抵抗が落ち着くまでに時間を要する。このため、電位変動が安定するまでの期間は計測準備期間と考え、電位変動が安定した時点から電位データの評価を開始する。これまでの実績によると、計測準備期間はおおむね2週間～2ヶ月程度の時間を要すると考えられる。この観測初期段階の電位変動の不安定さは、接地抵抗低減材の固化過程を含む地盤と電極の接触状態の不安定さに起因すると考えられ、時間が経過して接地抵抗低減材が固化し、地盤と電極のなじみが良くなるとともに安定すると考えられる。

(2) 観測頻度（サンプリングレート）

本来、微小電位観測における観測頻度は、地盤破壊によって発生する電位シグナル（MGES）の周波数特性に合わせて設定すべきである。しかしながら、地盤破壊時

の電位発生メカニズムが未解明であり観測頻度を特定できない。一方、観測頻度は、データロガーの仕様や観測システムおよびデータの処理システムに依存する。微小電位観測は多点観測で長期に及ぶため、観測データは膨大な量になる。以上のことから、現状の技術で対応可能な観測頻度として 10 秒間隔を標準とした。4 章で後述するが、観測データを主成分分析などの解析的手法によって評価する場合、微小電位観測データを数データ毎のデータセットに切り出して解析に用いるため、ある程度以上のデータ数が必要である⁵⁾。よって、道路近傍の斜面など斜面変状が直接的な被害に及ぶ環境においては、より迅速な通行規制等の措置を講ずる必要がある。以上のデータ処理・評価の観点からは、1 時間あたり 360 データ程度のデータ数が必要となるため、観測頻度は 10 秒間隔を標準とした。一方で、地すべりなどで変動速度が緩慢であることがあらかじめ分かっている斜面を対象とする場合は、適宜観測頻度を疎にすることができる。

4. 微小電位データの評価と運用

現状では微小電位観測データの評価方法についてはいまだ研究途上であり、現地での適用例が非常に少ない。よってここでは、これまでの試験フィールドにおける微小電位観測事例に基づいた知見で評価・運用する場合について、実用化できるような形にとりまとめた。

(1) 観測データの評価方法

a) 電位分担率

電位分担率は、ある微小電位観測領域全体が持つ電気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次式によって表される。

$$R_n = P_{s-n} / \sum P_s$$

R_n : 観測点 P_{s-n} の電位分担率

P_{s-n} : 観測点 P_{s-n} における電位

$\sum P_s$: 観測領域内の総電位

$$\sum P_s = P_{s-1} + P_{s-2} + \dots + P_{s-n}$$

この指標を用いることによって、観測領域全体に共通する電位変動傾向は相殺されるため、個別の観測点の局所的な電位変化を識別しやすくなる。すなわち、電位分担率の変動は、ある領域の電気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すると考えられる。

地盤の破壊や斜面不安定化に起因して発生する電位変動は、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り、破壊箇所やすべり面近傍で局所的に発生すると考えられることから、電位分担率をモニタリング

することによって斜面不安定化の前兆を検出しやすくなることが期待できる。

b) 主成分分析

主成分分析 (principal component analysis : PCA) 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・環境要因に起因する微小電位変動は観測領域全体では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。

以下、主成分分析による斜面不安定化評価の一例を示す。主成分分析によって得られた主成分得点を図-6 に、24 時間ごとに試算した寄与率を図-7 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。図より、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起こる融雪期に先行して主成分得点の変動が認められる。一方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% に大きくなる期間が認められる。

一般に、主成分分析で得られる寄与率の評価では、第一主成分から累積して 80% 程度までの主成分が有意な主成分であると考えられている。この事例では、第一主成分の寄与率はほとんどの期間で 80% 以上を占めることから、第一主成分は気象・環境要因を含む電位の全体的な変動傾向を表し、第二主成分以降の主成分がその他の要因による電位変動を表すと考えられる。よって、第二主成分以降の主成分が 20% を上回るとは、気象・環境要因以外に起因する何らかの電位変動が発生していることをあらわすと考えられる。

(2) 観測データの運用方法

斜面監視を目的とした微小電位観測データの運用方法として、主成分分析の寄与率を指標とした定量的な評価が期待される。観測データの運用方法の一例を示すと、寄与率を指標とした斜面不安定化警報システムの実用化

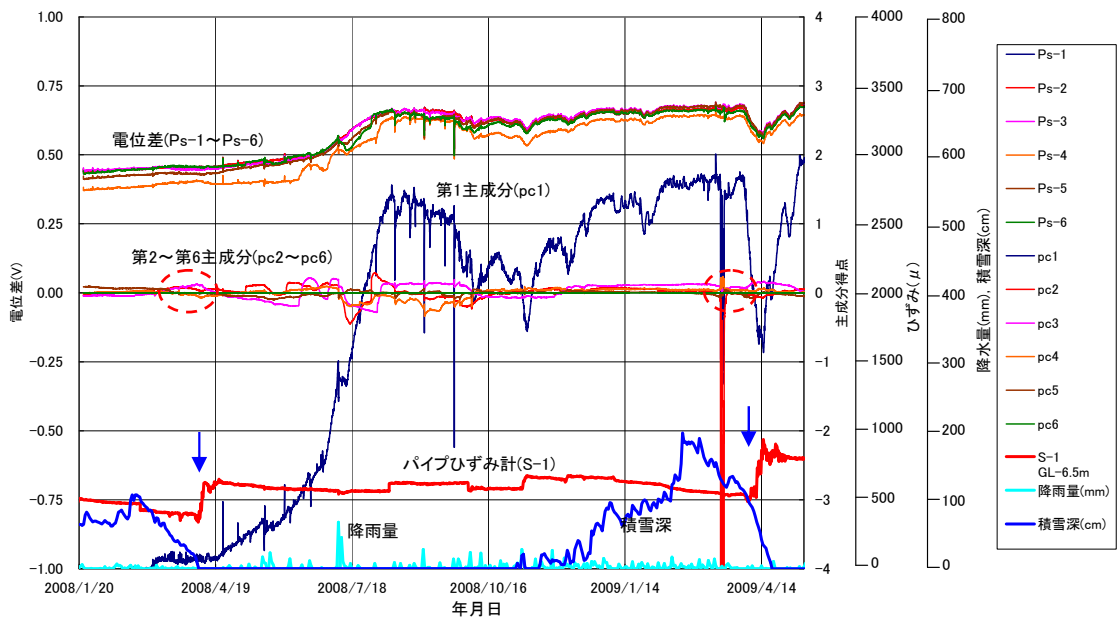


図-6 主成分分析による主成分得点の変動傾向

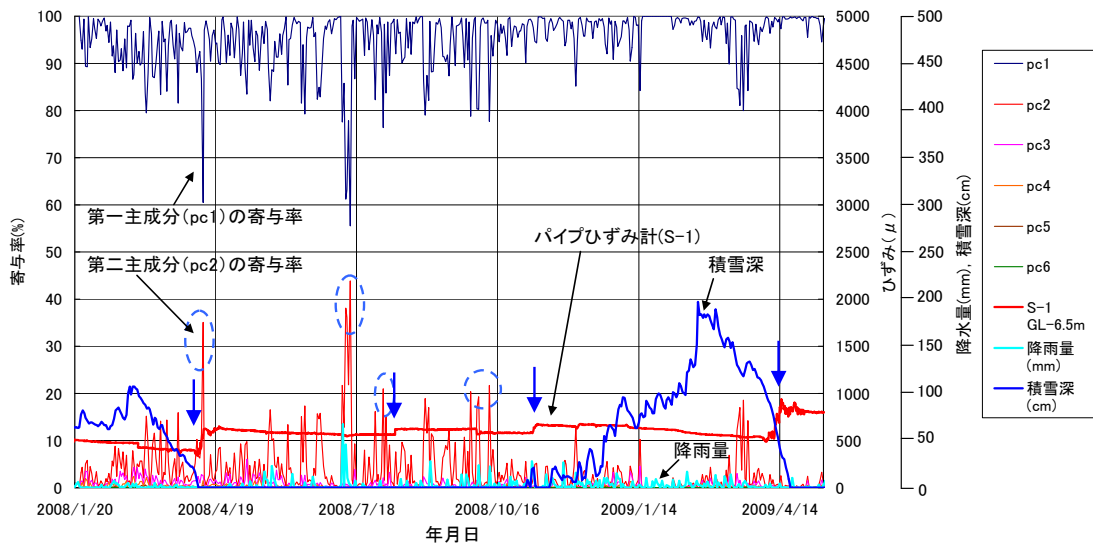


図-7 主成分分析による寄与率の変動傾向

に際しては、微小電位計測データが蓄積されるごとに寄与率を求め、随時更新してゆくシステムが有効と考えられる。サンプリング間隔やデータセットの抽出間隔は、監視の対象とする斜面や保安対象物における管理上の必要に応じて定めれば良いと考えられる。例えば、1日前に斜面不安定化の警報を出す必要がある場合は、サンプリング間隔1時間で24データ(24時間)ごとに自動解析で寄与率が更新されるシステムを構築すれば良い。一方、1時間ごとに寄与率が更新される必要がある場合には、サンプリング間隔1分で60データ(1時間)ごとに自動解析されるシステムを構築すれば良いことになる。

(3) 緊急時の対応

微小電位計測による斜面崩壊予測技術は、いまだ確立されたしきい値がないのが現状である。このため、現状では微小電位計測により危険と評価された場合(評価手

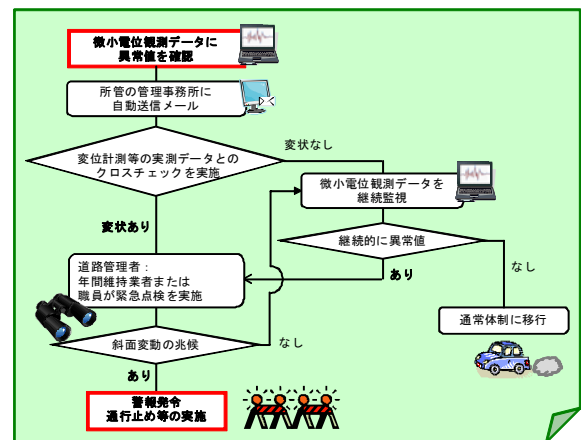


図-8 緊急時の体制フローの例

法等に基づき警報が発せられた場合に、直ちに立入りを制限するなどの措置を取ることは現実的ではない。したがって、このような情報が得られたときには、①道路

管理者へ周知し警戒を促す、②変位計測等の実測データとのクロスチェックをおこなう、③現場状況を確認する、などの対応が現実的である。これらの対応方針については微小電位計測計画の時点から、他の変位計測等の状況に合わせて現場ごとに立案しておく必要がある（図-8）。

5. 今後の展望とまとめ

ここで示した微小電位データの評価法や解析法などは、研究途上の過程で試行錯誤を繰り返していくうちに発案された方法である。これまでに微小電位観測について室内試験、フィールド試験を数多く実施する中で、当時の評価方法によってある一定の傾向が確認されたものがあるが、傾向が出なかったものもある。したがって、これらのデータに対しても、現在考えられる評価法・解析法を用いて再検討することによって、何らかの新しい傾向がみられる可能性がある。また、今後微小電位観測の適用例を積み重ねることによって、さらなる精度向上が期待できる。

(1) 微小電位観測適用の留意点

これまでの研究における室内試験等の結果から、微小電位の発生は岩石や地盤の含水比と相関があることが確認されている。観測現場の地盤の特性によって微小電位の発生傾向は異なると考えられ、微小電位が観測しやすい地盤とそうでない地盤があると考えられる。このため、微小電位観測の適用にあたっては、事前に観測現場の岩石や地盤を用いて室内試験をおこない、破壊時に微小電位が十分に発生することを確認したうえで本観測に着手することが望ましい。

(2) 予測精度向上への取り組み

現状においては微小電位評価方法として電位分担率、主成分分析などが有力であると考えられるが、適用実績が少ないこともあり、斜面不安定化を事前に予測した事例はない。上記の評価方法以外にも、微小電位観測において有効となる可能性を有する評価方法としてフラクタル解析などが考えられる。主成分分析、電位分担率と併用してフラクタル解析などについても適用事例を増やすとともに検証を重ねることによって、微小電位観測による斜面不安定化予測の精度向上につながると考えられる。

(3) まとめ

微小電位観測による斜面監視について、観測計画から機器の選定・設置、観測方法と微小電位データの評価・運用までを、これまでの研究成果をもとに示した。このうち、観測計画や観測機器の選定・設置については、多くの基礎的実験を行うことで一定程度確立したと考える。

観測方法についても、フィールド実験により実用的な範囲で実施可能な方法を示した。微小電位データの評価法については、電位分担率や主成分分析などの方法を示したが、いずれも確立するまでには至っておらず、今後の課題として残っている。評価法については、さらにデータを蓄積して、解析的手法なども含めた検討が必要であると考えられる。

一方、微小電位観測における最大の課題は、地盤の破壊にともなう電位発生メカニズムが未解明であり、地盤材料の含水比（水）の有無に左右されることから流動電位に起因すると想定されるが、判然としない点である。地盤の破壊過程においては、複数の要因によって電位が発生していると考えるのが自然であり、今後のアプローチとして電位発生メカニズムを考慮した数値解析技術によるシミュレーションも有効な手段となると考えられる。

(4) 観測マニュアルの公開

これまでに得られた現地計測に関するノウハウを網羅した「斜面監視に用いる微小電位観測マニュアル（暫定版）」を（独）土木研究所寒地土木研究所防災地質チームホームページ上で公開予定である。適用可能性のある岩盤斜面、地すべり等については、公開出来しだい活用されたい。また、その際には当研究チームにご一報頂けると幸いである。公開予定URL(<http://chishitsu.ceri.go.jp>)

謝辞

本研究は株式会社フジタとの共同研究で実施した。また、研究開発にあたり多大なるご尽力をいただいた東海大学長尾年恭教授、竹内昭洋研究員、ならびに試験フィールドおよび資料等を提供頂いた北海道開発局稚内開発建設部の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，近未来社，2001。
- 2) 日下部祐基，伊東佳彦，榎本義一，村山秀幸：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
- 3) 宍戸政仁，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，土木学会第38回岩盤力学に関するシンポジウム，2009.1.，pp-167-171.
- 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) 丹羽廣海，村山秀幸，伊東佳彦，日下部祐基，宍戸政仁：斜面監視に用いる微小電位計測の野外実験—解析的手法を用いた評価—，地盤工学会第45回地盤工学研究発表会発表講演集，2010.8.，pp.1807-1808.