

# 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

宍戸 政仁<sup>1\*</sup>・伊東 佳彦<sup>1</sup>・日下部 祐基<sup>1</sup>・村山秀幸<sup>2</sup>・丹羽廣海<sup>2</sup>・長尾年恭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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丁目1-34）

<sup>2</sup>株式会社フジタ 技術センター 基礎技術研究部（〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1）

<sup>3</sup>東海大学海洋研究所 地震予知研究センター（〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1）

\*E-mail: m-shishido@ceri.go.jp

岩盤の破壊に先行して微小電位が発生することが知られている。本研究では、岩盤崩壊危険斜面や地すべり性変状斜面において地盤災害の監視・予測に適用する目的で微小電位観測をおこなってきた。現場観測では、降雨または地下水位変動の影響に起因する微小電位の変動量は非常に大きく、岩石の破壊に起因する微小電位変動を識別することが困難である。

本報告では、大型土槽を用いて現地地盤を模擬構築し、人為的に降雨や地下水位変動を再現した際の、微小電位の変動傾向について考察した。また、降雨および地下水位変動の影響を除去するための解析的手法による微小電位評価の適用性について考察した。

**Key Words** : *micro geo-electric signals, rock failure, rock mechanics, laboratory test*

## 1. はじめに

我が国では、地震や集中豪雨の増加に伴い、岩盤崩壊や地すべりなどの斜面災害が毎年多数発生しており、橋梁やトンネルなどの土木構造物や、家屋などの個人財産に多大な被害が生じている。また、時には尊い人命をも奪うといった重大災害の発生も少なくない。

このような斜面災害発生の前兆を捉えるための斜面観測技術の研究が様々な分野で行われているが、いまだ確立された手法がないのが実情である。

岩石や地盤は、破壊に先立って微小な電位変動を起こすことが知られており<sup>1)</sup>、筆者らはこれを微小電位と呼んでいる。この微小電位を計測することで岩盤崩壊の前兆を捉え、斜面災害の監視・警戒システムに適用できる可能性があると考えている。

これまでの研究では、岩石が破壊するときに発生する微小電位について室内試験や実際の変状斜面において各種調査・試験を実施しており<sup>2)</sup>、供試体破壊前に微小電位の発生傾向が変化することの確認<sup>3)</sup>や現地での電極設置方法等の検討<sup>4)</sup>、さらに測定電位の大きさに対する供試体含水比の関与等を調査し<sup>5,6)</sup>、実際の変状斜面において微小電位観測を行い、その適用性について検討を行ってきた<sup>7)</sup>。しかしながら、現地での微小電位計測では、降雨や地下水位変動などの外的要因による影響を受けや

すく、計測された微小電位データから斜面変動によって発生している微小電位変動を抽出することができるかが今後の課題となっている。

本報告では、現地微小電位観測で課題となっている外的要因によって、電位がどのような挙動を示すかを確認する目的で、大型土槽を用いた試験をおこない、電位分担率という指標を用いて検討した。また、その他の解析的手法による微小電位計測の評価手法を試みたので、その結果について報告する。

## 2. 室内土槽試験の概要

### (1) 降雨模擬試験

現地での降雨による微小電位への影響を排除する手法を検討するため、図-1に示すような土槽を用いた降雨模擬試験を行った。L1000×W600×H500mmのプラスチック製土槽に豊浦標準砂を5%に含水調整して高さ350mmまで敷き詰めて模擬地盤とした。電極はφ6mm×L50mmの銅棒を使用し、上段と下段にそれぞれ5箇所ずつ配置した。降雨は一般的に農薬散布等で用いられる携帯式噴霧器を使用し、吐出量についてはあらかじめ土槽の大きさに対して20mm/hとなる噴霧量に調整した。

微小な電位を計測するため、外部からの電氣的ノイズ

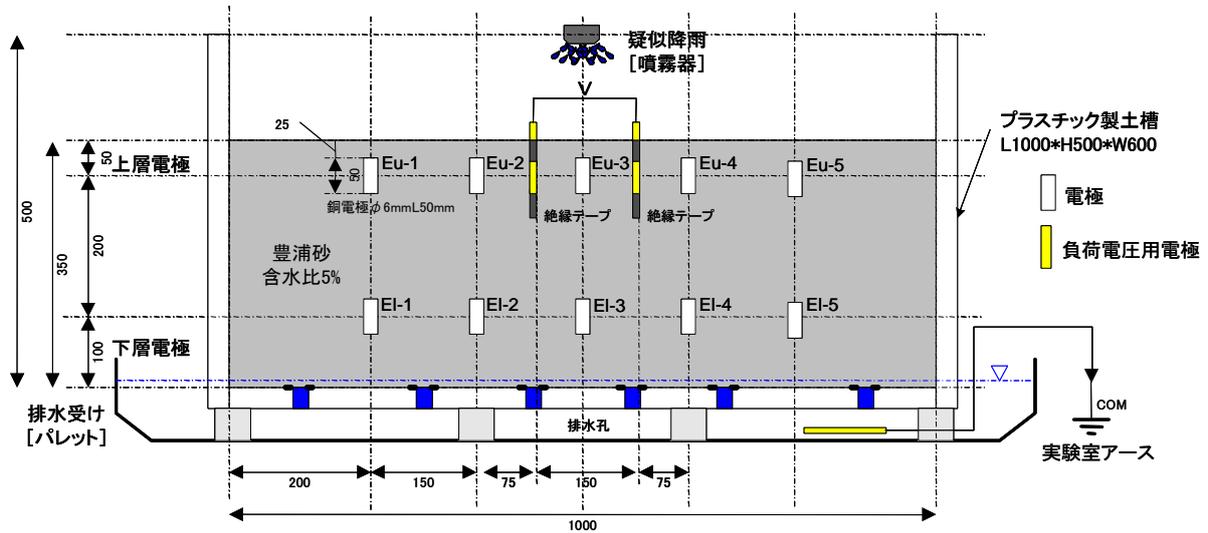


図-1 降雨模擬実験装置

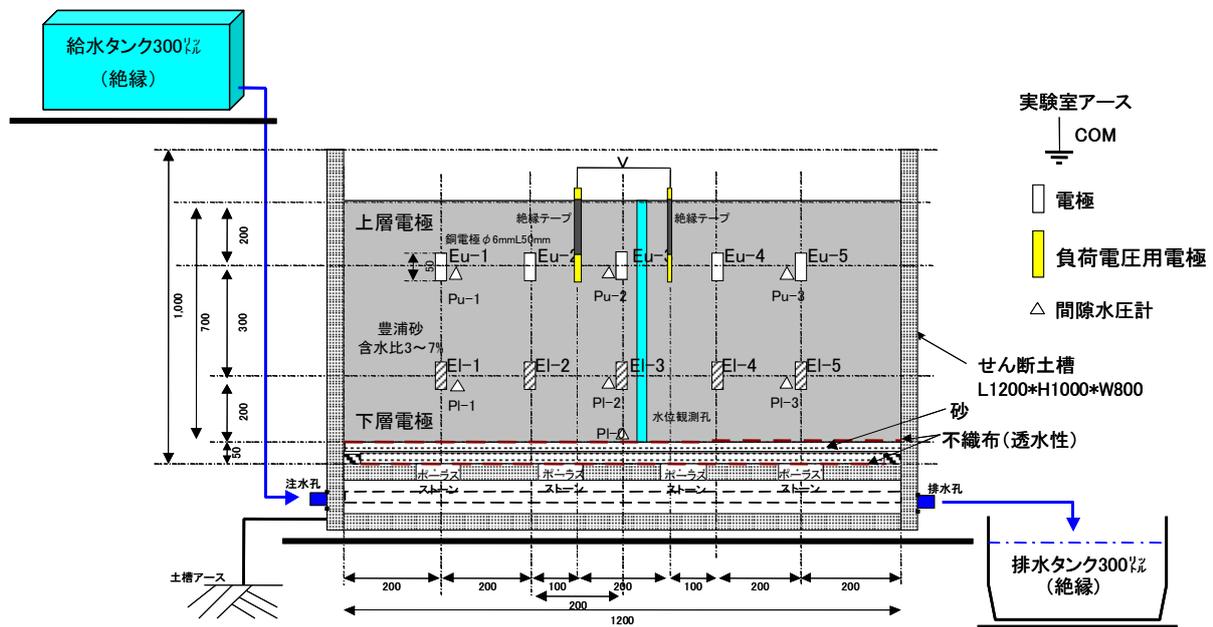


図-2 水位上昇模擬実験装置

を遮断する方策として、土槽をプラスチック製のパレット上に設置することで給排水システムを全て外界から絶縁した形態とし、共通電極COM(-)のみを実験施設のアースに接続した。

実験は2時間の連続降雨後に一晩放置したのち5回×30分間の断続降雨を行ったものである。また、観測電極とは別に負荷電圧用の電極を設け、それぞれの降雨中に起電装置による負荷電圧を与えて局所的な電位発生(斜面変動で発生する微小電位)を模擬した。

なお、計測される電位はマイナス極共通式のデータロガーに蓄積され、実験室のアースを共通電極COM(-)として計測している。すなわち、計測されるのは共通電極であるアースと各電極の電位差となる。なお、サンプリングタイムは10secとした。

## (2) 水位上昇模擬試験

現地における地下水位の上昇および下降による微小電位への影響を排除する手法を検討するため、水位上昇模擬試験を行った。L1200×W800×H1000mmの土槽に豊浦標準砂を5%に含水調整して高さ700mmまで敷き詰め模擬地盤とした。電極は降雨模擬実験と同様にφ6mm×L50mmの銅棒を使用し、上段と下段にそれぞれ5箇所ずつ配置した。

この土槽についても絶縁を目的として、給水は絶縁したポリタンクに溜め置きしてから重力で土槽に給水し、排水についても直接排水孔に流すことはせず、絶縁したポリタンクに排水することとした。水位の確認は、電極の高さに合わせた位置に設置した間隙水圧計を用いて行うとともに、土槽作成時に有孔の塩化ビニルパイプを土

槽中心部に埋め込み、接触式水位計にて随時行った。

実験は、中間層（土槽高さの半分）まで水位を上昇させた後、一定時間放置し、水位を下降させ、再び放置してから、今度は土槽上端まで上昇させる工程としている。水位上昇速度は2~2.5cm/hに調整した。また、降雨模擬実験と同様の方法で、水位上昇中または下降中に負荷電圧を与えた。

なお計測される電位は、マイナス極共通式のデータロガーに蓄積され、実験室のアースを共通電極：COM(-)として計測している。すなわち、計測されるのは共通電極であるアースと各電極の電位差となる。なお、サンプリングタイムは1minとした。

### 3. 実験結果

#### (1) 降雨模擬実験

降雨模擬実験の結果を図-3~4に示す。連続降雨の結果を見ると、当初から上段の電極(Eu)と下段の電極(EI)の持つ電位の絶対値に差がある。降雨の開始と同時に全ての電極について降雨前とは異なる電位変動が現れるのが分かる。また、降雨を止めたあとは、全ての電極での電位が、ある一定の電位レベルまで上昇し、収束する傾向があることが見てとれる。

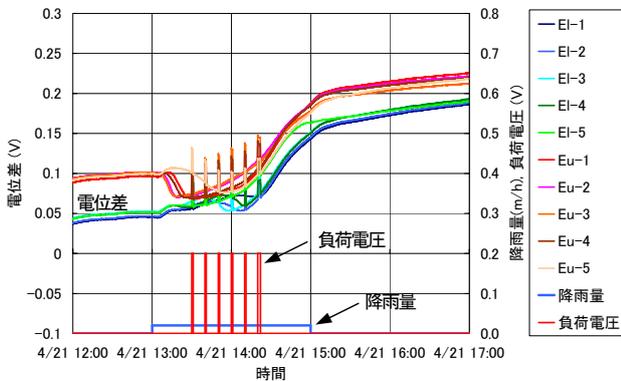


図-3 降雨模擬実験結果（連続降雨）

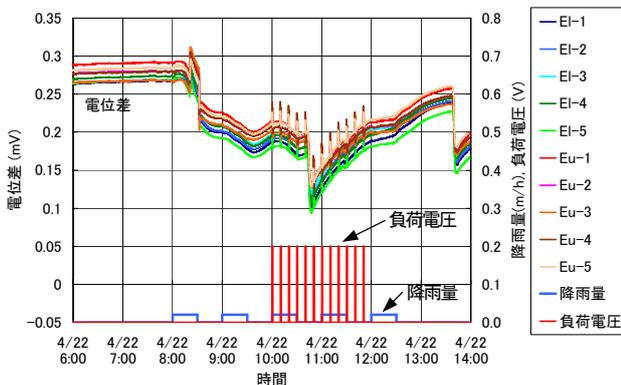


図-4 降雨模擬実験結果（断続降雨）

連続降雨後の断続降雨の結果では、二分されていた電位差が収束している。前半と同様に降雨開始と同時に電位差が変動し始めるが、前半よりは電位変動が大きくない。これは、前半の連続降雨により土槽内の試料はすでに飽和に近い状態となっていることや、電極と模擬地盤の設置状況が安定したために電位変動が小さくなっている可能性がある。現地微小電位計測での電極設置直後にも見られるこの現象は、地盤と電極の接地状況の変化に反応していると考えられる。降雨後についても、一般的な電位レベルの上昇が見られるが、上昇の途中で再び降雨が始まるため、再び電位レベルが落ちる傾向となる。

負荷電圧を与えた際の変動については、連続降雨、断続降雨ともに全ての電極で電位変動が検出されている。

#### (2) 水位上昇模擬試験

水位上昇模擬試験の結果を図-5に示す。水位の上昇および下降速度を2~2.5cm/hに設定した。水位の上昇と同時に電位差に変動が見られ、全体的に電位差が低くなっていく傾向がある。中間層で水位の上昇を止めると、各電位は一律に上昇傾向に転換する。水位の下降を始めると再び電位が乱れ、水位が下がりきると再び電位は一律に上昇傾向を見せる。上下層の電極で水位の上昇に対する反応のタイミングがずれることを期待していたが、全ての電極の電位がほぼ同時に変動した。

### 4. 電位分担率による評価

#### (1) 電位分担率の概要

これまでの微小電位の野外観測データは気象の影響を受けやすく、特に降雨時に電位差が大きく増加または減少することが多い。よって、現場で観測される電位変化は地盤内で破壊にともない発生すると考えられる電位変化だけではなく、気象変化による外的ノイズを含む電位差として観測されていると推定される<sup>8)</sup>。

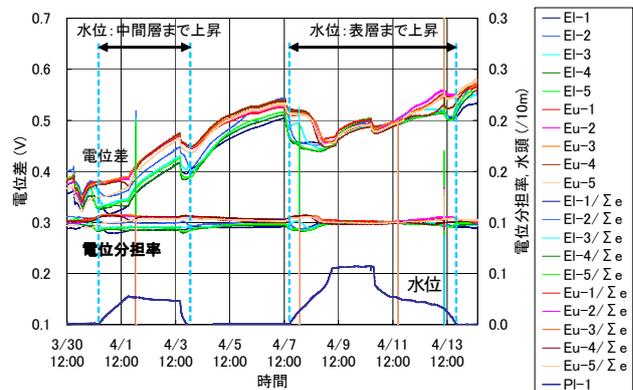


図-5 水位上昇模擬実験結果

これらの気象要因による外的ノイズは、観測現場において同じ条件で設置されているすべての観測点に対して齊一に作用すると考えられるため、複数の観測点で得られた電位を演算処理することによってノイズ成分を除去出来る可能性がある。

次式によって算出される値は、観測場全体が持つ電氣的ポテンシャルに対してある観測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、筆者らはこれを電位分担率 $R_n$ と称す。

$$R_n = P_{sn} / \Sigma P_s \quad (1)$$

$R_n$  : ある観測点の電位 $P_{sn}$ の電位分担率

$\Sigma P_s$  : 観測場の電位の総和

(例えば6電極の場合)

$$\Sigma P_s = P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + P_{s4} + P_{s5} + P_{s6}$$

## (2) 降雨模擬試験

降雨模擬試験の結果に、電位分担率を併記して図-6, 7に示した。図-6より連続降雨では、電位と同様に降雨の開始と同時に全ての電極について変動が見られるが、降雨を止めたあとには、電位分担率が落ち着き、今回の実験では0.1付近に収束していることが確認できる。図-7より連続降雨後の断続降雨では、全体的な電位の上下動が消え、平滑になっているのが分かる。ここで、その一

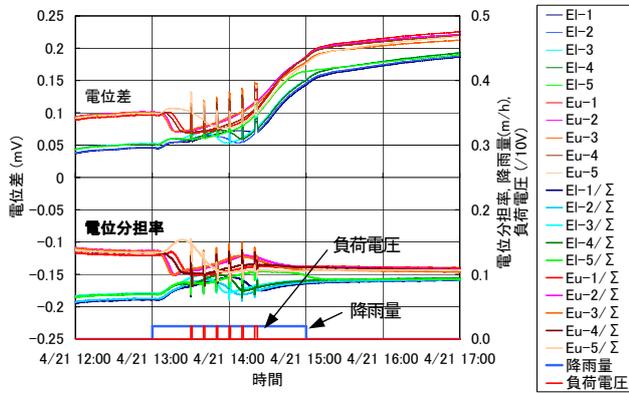


図-6 降雨模擬試験の電位分担率 (連続降雨)

部を拡大したもの (4/22 8:40~10:40) を図-8に示す。電位差は上下に変動しているが、電位分担率に着目すると平滑化されて降雨の影響も除去できていることがわかる。また、負荷電圧を与えた際の変動については除去されずに識別可能である。

## (3) 水位上昇模擬試験

図-9に水位上昇模擬試験の結果に電位分担率を併記する。水位の上下がある期間のみ、分担率が乱れる傾向が見てとれる。水の動きがなければ、分担率は平衡を保つ傾向があることが分かる。

## 5. 微小電位計測データへの解析的手法の適用

野外における微小電位観測では、降雨などの気象要因による影響が大きいため、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。そこで、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。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

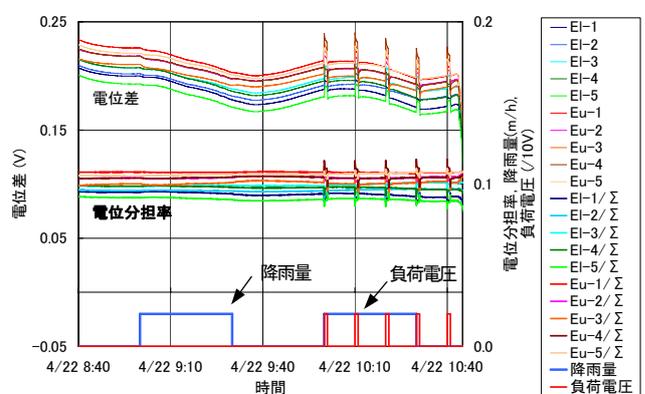


図-8 降雨模擬試験の電位分担率 (拡大)

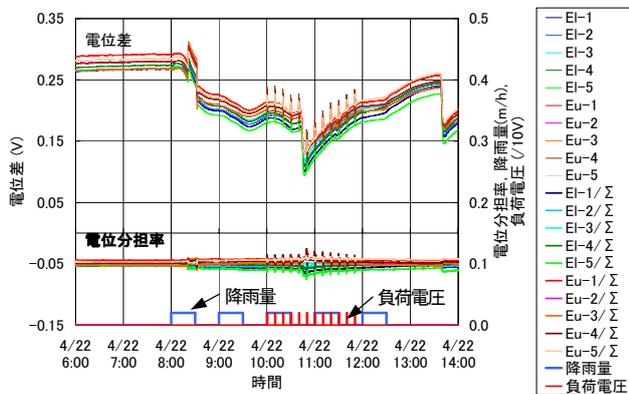


図-7 降雨模擬試験の電位分担率 (断続降雨)

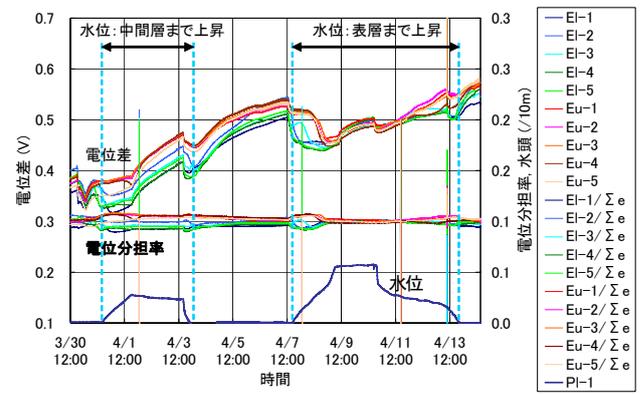


図-9 水位上昇模擬試験の電位分担率

第1主成分として現れることが期待される。

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。

降雨模擬試験における主成分分析によって得られた主成分得点を図-10に、一部の拡大図を図-11に、12分ごとに試算した寄与率を図-12にそれぞれ示す。この場合、変数である電極の数が10個のため第1から第10までの10個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

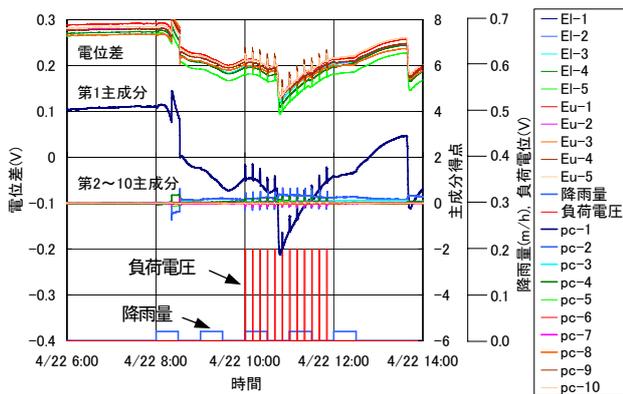


図-10 主成分得点の変動傾向

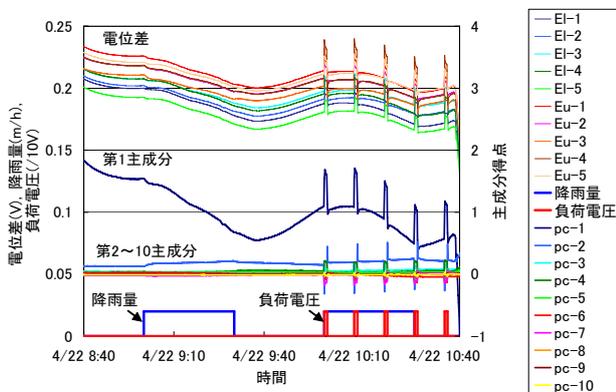


図-11 主成分得点の変動傾向 (拡大)

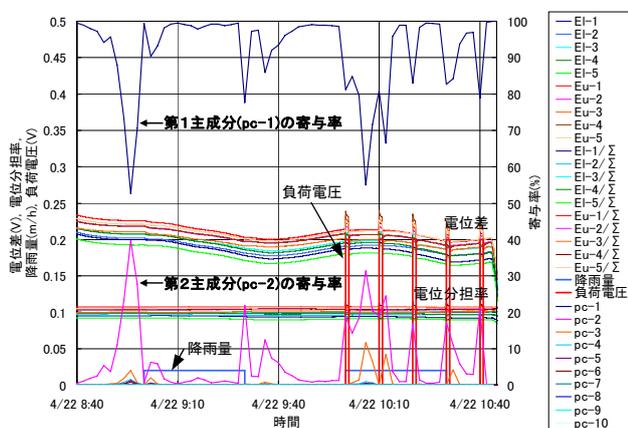


図-12 寄与率の変動傾向 (拡大)

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10分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12分間(12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、負荷電圧により、主成分得点の変動および、寄与率の変動が明確に確認できる。すなわち図-10より主成分得点に着目すると、第1主成分が全体の電位差の傾向を良く表しており、電位差の絶対値が大きくなる傾向に呼応して第1主成分が大きく変動している。第2主成分以下は第1主成分に比べて絶対値の変動は少なく、電位差に見られる絶対値の変動が平滑化されている。また、負荷電圧に伴う変動には明瞭に反応していることが分かる。

第2主成分は負荷電圧に対して敏感に反応するが、図-11のように拡大して見ると降雨時に若干上昇し降雨が終わると元に戻る傾向もある。このため図-12の寄与率に着目すると、第2主成分は降雨時と電圧負荷時に大きくなる。よって第2主成分は降雨の影響と負荷電圧の影響の両方を表しており、主成分解析のみでは必ずしも外的要因と考えられる降雨と内的要因と考えられる負荷電圧を分離できていないと考えられる。負荷電圧の影響を、より明瞭に識別するためにはデータの区切り方法や試算に用いる電極数の選定等について更なる検討が必要である。

## 6. おわりに

本報告では、大型土槽を用いた降雨模擬試験および水位上昇模擬試験における微小電位変動傾向について確認し、解析的手法を用いた計測データの評価方法について考察した。その結果より、以下の新たな知見を得た。

- (1) 初期の土槽で見られる降雨および水位変動に伴う大きな電位分担率の変動は、降雨や水位上昇を経験することにより、その変動幅は低下する。また、降雨による電位変動を除去できる可能性がある。
- (2) 主成分分析による主成分得点ならびに寄与率は、降雨などの観測範囲に齊一に影響を与える成分の除去に有効に機能する可能性がある。破壊等に起因する電位をより明瞭に識別するためにはデータの区切り方法や試算に用いる電極数の選定等について更なる検討が必要である。

今後は、室内試験結果と現地微小電位観測との双方向のフィードバックを行うことにより斜面不安定化予測の実用化に向けて、電極の設置位置についての検討や、

観測データの処理方法等についてさらなる試行をおこない、斜面崩壊や不安定化を予測するためのしきい値の設定方法についても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，近未来社，2001.
- 2) 加藤卓朗，村山秀幸，日下部祐基，橋本祥司，伊東佳彦：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講演論文集，pp.41-48，2004.
- 3) 榎本義一，小林諭，日下部祐基：一軸圧縮試験と圧電気，北海道土質試験協同組合レポート，No.166，pp.4-6，1998.
- 4) 日下部祐基，佐藤昌志，中井健司，佐田頼光，榎本義一，小林諭：岩盤破壊時の微電圧測定に関する研究，地盤工学会北海道支部技術報告集第39号，pp.61-66，1999.
- 5) 日下部祐基，鈴木哲也，疋田貞良，榎本義一：岩盤破壊時の微電圧測定に関する研究（その2），地盤工学会北海道支部技術報告集第40号，pp.187-192，2000.
- 6) 日下部祐基，伊東佳彦，榎本義一：岩盤破壊時の微電圧測定に関する研究（その3），地盤工学会北海道支部技術報告集第42号，pp.47-50，2002.
- 7) 丹羽廣海，村山秀幸，伊東佳彦，日下部祐基，宍戸政仁：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発表講演集，pp.1971-1972，2008.
- 8) 丹羽廣海，村山秀幸，伊東佳彦，日下部祐基，宍戸政仁：変状斜面における微小電位変動傾向の評価手法に関する研究，第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.51-56，2008.

## CONSIDERATION OF INFLUENCE OF RAINFALL AND WATER LEVEL RAISING ON MICRO GEO-ELECTRIC SIGNALS USING MODEL SOIL

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

In the field monitoring of Micro Geo-Electric Signals (MGES), it is difficult to identify the change of MGES generated by the slope failure and/or rock collapse due to the changes of MGES generated by rainfall and raising groundwater level. In this paper, we confirmed the variable trend of the MGES when the rainfall and raising groundwater level were reproduced artificially in the large-scale earth tank mock. Moreover, we investigated the applicability of the MGES evaluation by an analytical method to remove the influence of the rainfall and raising groundwater level.