

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の発生特性に関する検討 —

Basic study on the monitoring method for the rock slope failure using the Micro Geo-Electric Signals(MGES) - part II : the development research of the micro geo-electric signals on the freezing and thawing ground -

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***
Hideyuki MURAYAMA, Takuro KATO, Yoshihiko ITO, Yuki KUSAKABE, Shoji HASHIMOTO, Toshiyasu NAGAO

We have examined the ground hazard prediction using the Micro Geo-Electric Signals(MGES), for the rock and sand during the uniaxial compression and tensile test, and the field measurement. The MGES method uses a number of electrode pairs installed in the rock mass or rock specimen, and measures the electric potential changes at high sampling rate. It is very important to estimate the characteristic of the MGES during the ground freezing and thawing under the fallen snow or severe cold region in Hokkaido.

This paper describes an outline of the MGES to monitor the rock slope failure and the characteristic of the MGES during the freezing and thawing model test using sand specimens.

The results are as follows.

- 1) As a result of the freezing and thawing model test using sand specimens, the characteristic MGES were observed at 0 centigrade, that is a freezing and thawing point.
- 2) And, the MGES were sensitive to a change of temperature.
- 3) The MGES in the fallen snow or severe cold field will be much influenced in a temperature and ground freezing and thawing.

Keyword : rock slope failure, micro geo-electric signals measurement(MGES), field measurement, freezing and thawing test, fallen snow or the severe cold region

1. はじめに

北海道では前報¹⁾のように岩盤崩落事故が多発している。北海道において岩盤崩落が多発する要因としては、脆弱かつ崩壊性要因を内在する地質が多く分布することや積雪寒冷地という厳しい気象条件下にあることなど、岩盤が不安定になり易い条件が複合的に作用していると考えられる。よって、北海道ではこれらの地質条件および気象条件などの特殊性を勘案した岩盤崩落監視技術に関する研究開発が急務となっている。

筆者らは、微小電位計測を岩盤斜面の崩落監視技術に適用するため、これまで室内における各種検証実験や現場における崩落危険斜面等の長期観測を実施してきた^{1)~8)}。微小電位計測とは、岩盤に複数の電極を設置し、電極間に発生する電位差を精密に連続観測することにより、岩盤の破壊過程で発生すると考えられている微小な電位信号を捕らえ、岩盤の破壊を予測しようとする技術である。

北海道のような積雪寒冷地における微小電位計測では、冬季に地盤の凍結・融解現象が発生することから、地盤の凍結・融解によってどのような電気的現象が発生しうのかを把握することが重要となる。

本稿では、微小電位計測を積雪寒冷地における岩盤崩落監視技術へ適用するための基礎的検討事項として、

* 株式会社フジタ技術センター 土木研究部

** 独立行政法人北海道開発土木研究所 地質研究室

*** 東海大学 地震予知研究センター

斜面における微小電位計測技術の概要と課題を述べると同時に、室内で実施した砂を用いた凍結・融解実験で発生する微小電位の発生特性について報告する。

2. 微小電位計測による岩盤斜面監視技術の概要と課題

最近、地震や火山活動に伴い様々な電磁気現象が発生することが、固体物理あるいは固体力学の研究分野で科学的に議論されつつある⁹⁾。地盤破壊に伴う微小電位の発生に関する研究としては、主に岩石材料の力学試験（一軸圧縮試験、せん断試験、引張試験など）において実証実験^{2)~8),10)~12)}がなされており、岩石の破壊過程で微小な電位が発生することは周知の事実となっている。土質材料を用いた室内実験に関しては、岩石と比較してその実施例が少ないが、筆者ら^{5),7)}の豊浦標準砂を用いた土槽実験では、模擬斜面のすべり・崩壊過程において顕著な微小電位の発生が確認されている。一方、地すべりや斜面崩落などの実現場への適用は、現在のところ非常に限られているが数例の報告がある^{6),8)}。

図-1に、微小電位計測を岩盤斜面の崩壊監視技術に適用するイメージを示し、図-2に現場における微小電位の観測イメージとして斜面における電極の配置例を示す。筆者らの主に室内実験における研究によれば、図-1に示すように岩石の破壊過程では、いくつかのパターンで微小電位が発生することが明らかとなりつつある。しかしながら、その発生メカニズムが不明確であり発生パターンの規則性や再現性に関する考察が不十分となっている。一方、現場における計測では、気象条件（気温、湿度、降雨他）やその他の外的要因（電磁場環境の変動など）によって地盤の微小電位が変化すると考えられる。また、地盤内の電氣的性状の変化として地下水の変動や含水比の変化なども微小電位の変化に影響を与えると考えられる。

積雪寒冷地において微小電位計測を実施する場合、冬季に気温が0℃以下となり地盤の凍結・融解現象が発生することから、微小電位計測データに何らかの影響を与えることが想定される。積雪寒冷地における既往研究¹³⁾としては、地盤の比抵抗と自然電位の変化に注目し、地盤の凍結深度を把握する研究がなされており、凍結・融解地盤における長期的な現場観測結果から、自然電位が気温や地中温度の変動に敏感であり相関性があることが示されている。微小電位計測は、自然電位の変動を複数の電極で精密に測定する手法に相当することから、地盤の凍結・融解時には地盤の破壊とは異なる微小電位が発生することが想定される。

微小電位計測を岩盤斜面の崩壊監視技術へ適用するためには、計測に用いる電極材料の選定や設置方法¹⁾、観測システムの構築、種々の外的要因（気象変動など）に伴う微小電位の変動傾向の把握、データの処理・評価手法など多くの課題がある。

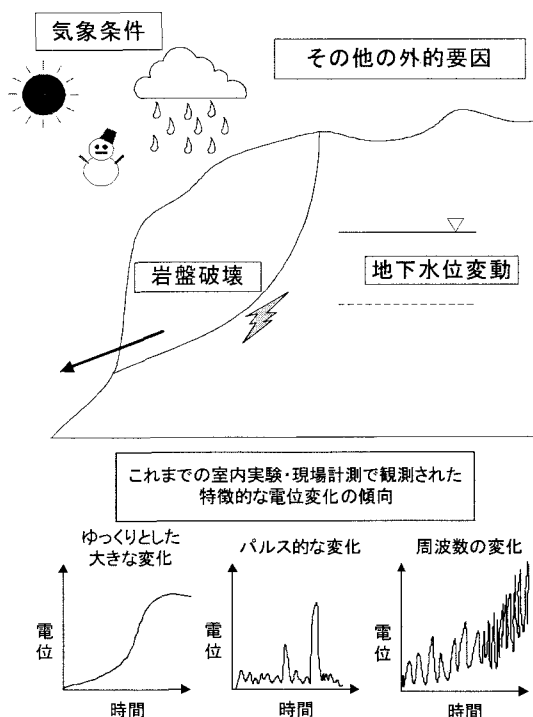


図-1 微小電位計測による岩盤斜面崩壊監視技術のイメージと発生する微小電位のパターン

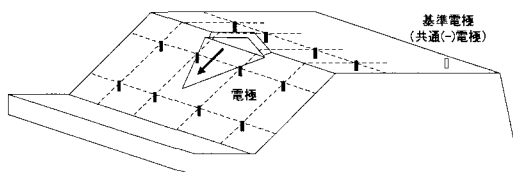


図-2 岩盤斜面における電極配置例

3. 砂を用いた室内凍結・融解実験

1) 実験方法

図-3 に砂を用いた供試体における計測機器の配置と実験状況を示す。土槽は保温効果が高く、電氣的に絶縁体である発泡スチロール容器を使用した。供試体は W1000mm, D600mm, H500mm の土槽内に含水比を 5% に調整した豊浦標準砂を湿潤密度約 15kN/m^3 になるように締め固めた。電極は銅製で $\phi 6\text{mm}$, $L=50\text{mm}$ の棒状電極を用い、供試体の深度方向に 3 断面（上層=深さ 100mm, 中層=深さ 250mm, 下層=深さ 400mm）で各断面 3 箇所ずつ（計 9 箇所）を配置した。また、電極と同一位置に熱電対を配置し地中温度を測定し、土槽周辺にも雰囲気温度を測定するために熱電対を配置した。恒温室は、設定温度 $-20^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ で温度制御して凍結・融解過程における微小電位を計測した。

微小電位の測定には、電位測定専用データロガー（入力範囲：約 $\pm \text{DC}10\text{V}$, A/D 変換分解能：20bit, メモリ容量：4MB, 最大測定チャンネル

数：16CH, 各測定チャンネルは電氣的に独立している）を使用し、サンプリングタイムは 10 秒とした。砂供試体内に配置した 9 本の各電極はデータロガーの(+)極に接続し、全ての(-)極は実験施設の建物用アース（接地抵抗 30Ω 以下の良好なアース）に接続した。すなわち、本計測では、データロガーの測定チャンネルに接続した各電極と建物アース間の電位差を測定していることになる。温度測定は熱電対用データロガーを使用しサンプリングタイムは 10 分とした。

恒温室内の温度制御は、 -20°C で一定時間冷却し、その後 20°C に切り替え同時間加温する単サイクルで実施し、冷却時間は 12, 24, 72, 300 時間の 4 ケースを実施した。

2) 実験結果

ここでは、冷却時間 24 時間と 300 時間の実験結果について述べる。

本実験で得られたデータは、建物アースを基準とした砂供試体内で発生した電位差である。そこで、凍結・融解過程で砂供試体に発生した微小電位変化を明瞭に示すために、外的要因を最も受けづらいと考えられる土槽下層中央部の電極 P2 を基準電極とし、各電極における計測値と基準電極 P2 における計測値との差分（各電極における電位差－電極 P2 の電位差）を実験によって得られた微小電位差として示すこととする。

冷却時間 24 時間における砂供試体中央部の実験結果を図-4 に示す。上層の電極 P8 における地中温度 T8 は、約 16 時間で 0°C に達しそれ以降に 0°C 以下まで低下していることから砂が完全に凍結していることが分かる。一方、中層の電極 P5 における地中温度 T5 は約 24 時間でほぼ 0°C に達するものの、この時点で恒温室を冷却から加温に切り換えたことから砂が完全には凍結していない。

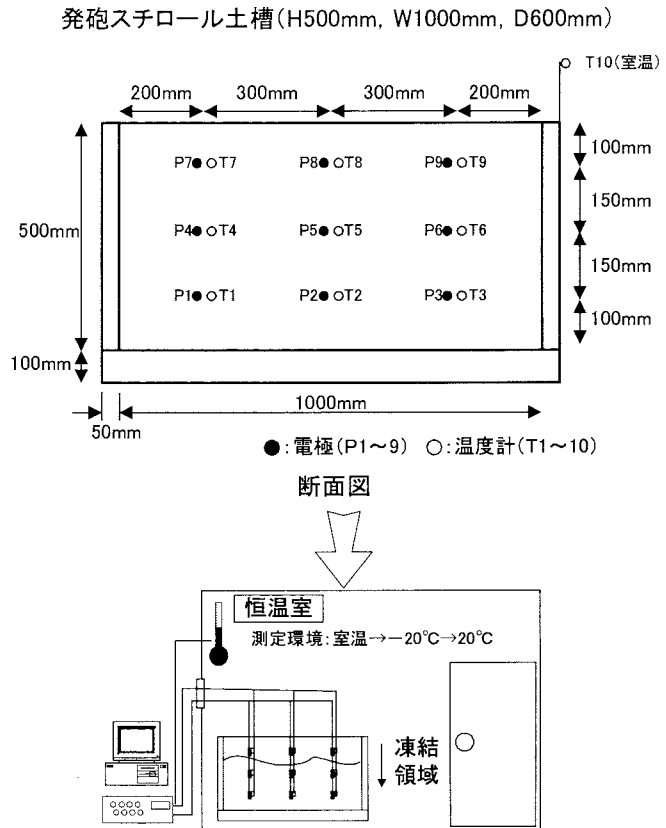


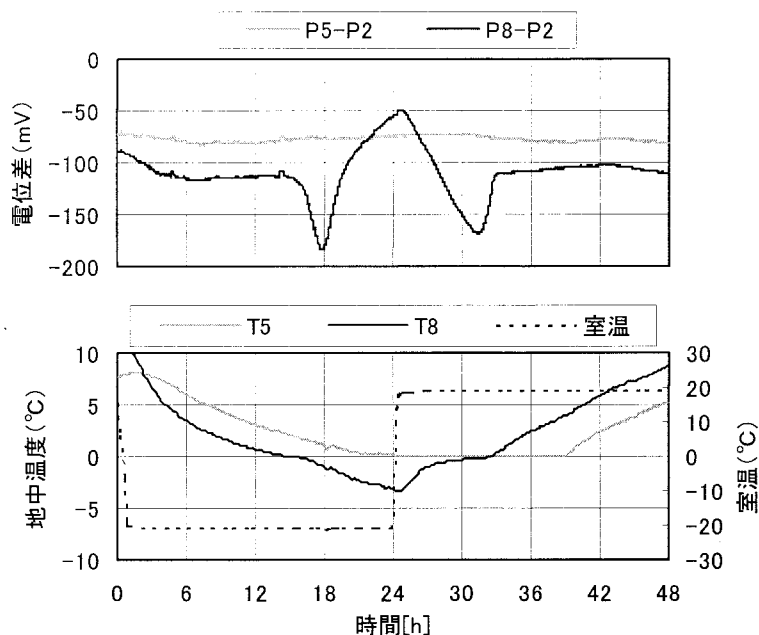
図-3 砂供試体における計測機器の配置と凍結・融解実験状況

図より、上層の電極 P8 (電位差 P8-P2) は、砂の凍結に伴い顕著な負の電位変動が発生し約 18 時間 (地中温度 T5:-1.2℃) で負の電位差ピークに達し、その後徐々に正の方向に変動する。さらに、恒温室を-20℃から+20℃に切り換えた約 24 時間を境として負の方向に変動し、約 32 時間 (地中温度 T5:-0.2℃) で負の電位差ピークに達する。その後徐々に正の方向に変動し約 33 時間 (地中温度 T5:0.5℃) で凍結以前の電位差レベルに戻る。図より、砂が完全に凍結した上層の電極 P8 (電位差 P8-P2) では凍結・融解時に特徴的な電位差変動がみられるが、完全に凍結しない中層の電極 P5 (電位差 P5-P2) では顕著な変化は見られない。

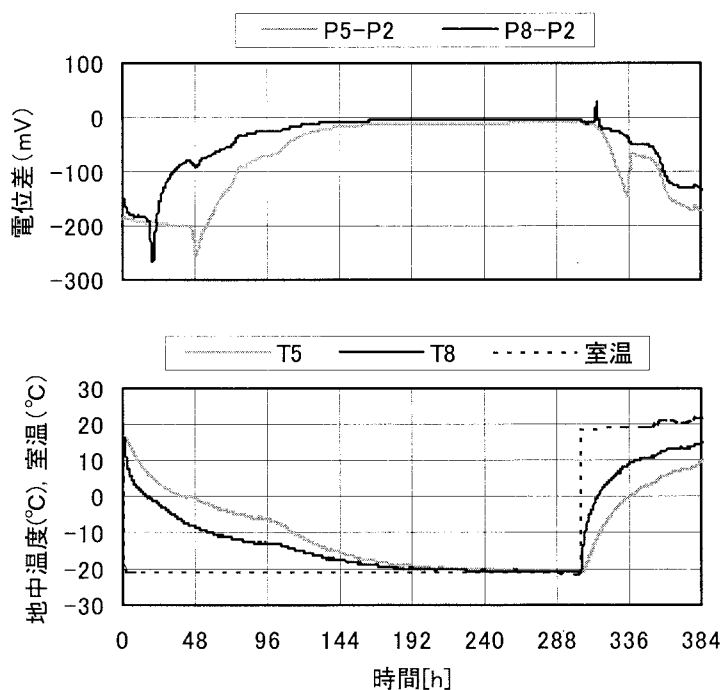
上層の凍結・融解時に発生する負の電位差ピークは、凍結以前の電位差レベルを基準として凍結時に約-70mV、融解時に約-50mV となり大きな電位差が発生している。

次に、図-5 に、冷却時間 300 時間における砂供試体中央部の実験結果を示す。図より、上層の電極 P8 (電位差 P8-P2) および中層の電極 P5 (電位差 P5-P2) で共に地中温度 T8, T5 が 0℃ 以下となり砂は完全に凍結している。

凍結時においては、上層の電極 P8 (電位差 P8-P2)



※P5-P2:電極 P5 の電位差, P8-P2:電極 P8 の電位差
図-4 砂供試体中央部における電位差と温度の経時変化 (24 時間冷却)



※P5-P2:電極 P5 の電位差, P8-P2:電極 P8 の電位差
図-5 砂供試体中央部における電位差と温度の経時変化 (300 時間冷却)

が約 19 時間で 0℃に達し、約 20 時間で負の電位差ピーク（凍結以前の電位レベルとの差で約・70mV）が発生する。中層の電極 P5（電位差 P5・P2）は上層から約 24 時間遅れて約 44 時間で 0℃に達し、約 48 時間で負の電位差ピーク（凍結以前の電位レベルとの差で約・50mV）を発生する。

砂供試体全体の凍結が進行すると上層、中層共に電位差が 0mV に漸近する傾向を示す。すなわち、凍結以前の状態では各深度別に設置した電極間ではある電位差を示していたが、砂の凍結が進行すると各深度間の電位差がほとんど発生しなくなる。

融解時においては、上層の電極 P8（電位差 P8・P2）が約 316 時間で 0℃に達するが顕著な負の電位差ピークは発生せず逆に正の電位差ピーク（約 20mV）が発生している。中層の電極 P5（電位差 P5・P2）では約 336 時間で 0℃に達し負の電位差ピーク（融解後の電位レベルとの差で約・70mV）が発生している。上層の電極 P8 において融解時に負の電位差ピークが発生しなかった要因としては、電極と砂の接地状態が微妙に変化するなど物理的な変化が電極と砂に発生した可能性が考えられる。なお、融解後に凍結以前の電位差レベルに戻る傾向は、電極 P8、P5 共に冷却時間 24 時間の実験ケースと同様であるが、融解後に凍結以前の電位差レベルに戻るまでに約 30 時間程度を要している。

3) 考 察

以上の冷却時間 24 時間と 300 時間の砂の凍結・融解実験における微小電位計測結果をまとめると以下のようである。

- ①砂の凍結および融解時には、特徴的な電位差変動が発生する。
- ②凍結時および融解時に発生する特徴的な電位差変動のピーク値は、絶対値で 50～70mV 程度となり大きな電位差となる。
- ③凍結時および融解時に発生する特徴的な電位差変動の極性は、凍結時と融解時で同一となる（今回の実験のように基準電極を電極 P2 とした差分処理では負の電位差変動となる）。
- ④完全に凍結した砂では電位差が発生しない。

以上から砂の微小電位差変動は温度変化に敏感であると言える。

今回実施した凍結・融解実験で発生した電位差の発生メカニズムを推定すると次のように考えることができる。一般に、固体と液体の界面に働く電場変化で発生する一連の現象において、液体の流動に伴って発生する電位を流動電位^{9),14)}と呼んでいる。流動電位が発生するためには圧力勾配が生じることが必須条件となり、圧力勾配によって流れる間隙水が電荷を運ぶと考えられている。砂の凍結・融解過程では、砂中の水分が固体から液体、液体から固体に相変化することによって砂粒子中に圧力勾配が発生し、砂粒子の間隙の水が流動し流動電位が発生し、凍結・融解過程で砂に電位差変動が発生する。砂が完全に凍結すると、水分が凍結し流動できなくなるので流動電位が発生しなくなり電位差がほぼ 0mV に収束する。

なお、本報告では詳細に述べないが含水比 0%の砂を用いた凍結・融解実験では、凍結・融解時に特徴的な電位差が発生していないことを確認している。よって、砂の凍結・融解時に発生する微小電位変動の発生メカニズムにおいて水が重要な役割を担っていることは疑いが無いと考えられる。

4. おわりに

本稿では、積雪寒冷地における微小電位計測による岩盤崩落監視技術の適用性を検証する目的で、室内において砂を用いた凍結・融解実験を実施し、砂が凍結・融解する過程で発生する微小電位特性を把握した。その結果、微小電位変動は温度変動に敏感であり、凍結・融解時には0℃を境界として、比較的大きな微小電位差変動が発生することが明らかとなった。この現象は、積雪寒冷地における地盤の微小電位特性として非常に興味深い結果であると考えられる。今後、積雪寒冷地の崩壊危険斜面において微小電位計測を実施する際には、地盤が凍結・融解する過程で発生する特徴的な微小電位差変動を考慮し、計測データを処理・解釈することが非常に重要となると考えられる。

【参考文献】

- 1)加藤卓朗, 村山秀幸, 日下部祐基, 橋本祥司, 伊東佳彦, 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ーその1: 電極材料と電極設置方法に関する検討ー, 土木学会第33回岩盤力学に関するシンポジウム, 2004.
- 2)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実験, 第34回地盤工学研究発表会, pp.2171-2172, 1999.
- 3)日下部祐基, 伊東佳彦, 榎本義一: 岩盤破壊時の微電圧測定実験(その2), 第37回地盤工学研究発表会, 2002.7.
- 4)加藤卓朗, 村山秀幸, 小野義之, 入野寛彦, 長尾年恭: 地電位観測を利用した地盤災害の予測技術の開発(その1, 岩石の簡易破壊試験), 第36回地盤工学研究発表会, 2001.
- 5)河口賢治, 福村公利, 加藤卓朗, 村山秀幸, 小野義之, 長尾年恭: 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)加藤卓朗, 村山秀幸, 小野義之, 太田智之, 入野寛彦, 長尾年恭: 切土のり面の表層崩壊現象に伴う地電位変動について, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.
- 7)加藤卓朗, 村山秀幸, 河口賢治, 小野義之, 長尾年恭: 室内降雨実験に伴う地盤の地電位変動特性について, 第58回土木学会年次講演会(Ⅲ), 2003.9.
- 8)加藤卓朗, 村山秀幸, 伊東佳彦, 日下部祐基, 橋本祥司: 積雪寒冷地における微小電位観測による岩盤崩落監視技術の現場適用実験, 第59回土木学会年次講演会(Ⅲ), 2004.9.
- 9)長尾年恭: 地震予知研究の新展開, 近未来社, 2001.
- 10)福井勝則, 大久保誠介, 寺嶋卓文: 一軸圧縮試験における岩石からの電磁波の発生, 資源と素材, Vol.117, No.9, p.703-710, 2001.
- 11)伊東孝, アダイン・オメル, 赤木知之, 川本朧万: 岩質材料の変形に伴う電位発生に関する実験的研究, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 2003.1.
- 12)榎本義一, 佐田頼光, 小林諭, 佐藤昌志, 中井健司, 日下部祐基: 岩盤破壊時の微電圧測定に関する基礎実験, 土木学会北海道支部論文報告集第55号, p.100-103, 1999.2.
- 13)高見雅三, 土谷富士夫: 季節凍土における電気探査ー凍結・融解過程における自然電位の変化についてー, 物理探査学会第105回学術講演会論文集, pp.117-120, 2001.
- 14)Ishido, T. and H. Mizutani,: Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, Jour. Geophys. Res., 86, 1763-1775.1981.