

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

村山 秀幸^{1*}・伊藤 由明²・鈴木 信行³
伊東 佳彦⁴・日下部 祐基⁴・伊藤 憲章⁴

¹正会員 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

²(株)フジタ 横浜支店 土木部 (〒231-8580 神奈川県横浜市中区尾上町5-78 キリン横浜ビル)

³(株)フジタ 関東支店土木部 (〒330-8669 埼玉県さいたま市大宮区桜木町1-7-5 リニックスビル17階)

⁴正会員 (独)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

*E-mail:murayama@fujita.co.jp

トンネルの低土被り区間では掘削の影響が地表面に及ぶため、トンネルの安定性と周辺環境へ与える影響を随時把握し設計・施工に反映することが重要となる。筆者らは、地盤の微小な電位変動を経時的に観測する微小電位観測に注目してきた。本報告では、微小電位観測を2箇所ものトンネル掘削現場の低土被り区間に適用し、地表面モニタリング手法としての微小電位観測の特徴および適用性を検証した。その結果、トンネル掘削に伴い20～60mV程度の特徴的な電位差が発生することを明らかとし、微小電位観測によって従来の地表面変位観測とは異なる観点から、トンネル掘削が周辺地山に与える影響を評価できる可能性を示唆した。

Key Words: tunnel, shallow overburden, uncomposed deposit, micro geo-electric signal, field measurement

1. はじめに

一般に、トンネル坑口部や沢部横断箇所などの低土被り区間は土砂地山から構成されトンネルが不安定になりやすい。同様に、土砂地山で低土被りとなる都市部山岳工法のトンネルでは、掘削の影響が地表に及ぶことが懸念される場合が多い。よって、トンネルの低土被り区間ではトンネルの安定性を確保すると同時に、周辺環境への影響を適時把握し、設計・施工に反映することが重要となる。

通常、トンネル周辺地山の地表面変位計測や坑内変位計測では3次元光波測距儀を用いて手動で変位計測を実施することが多い。しかしながら、トンネル掘削による急激な地表面の沈下現象や周辺の既設構造物への影響等の緊急事態に対して適切に対応するためには、リアルタイムに地山や既設周辺構造物の挙動を把握できることが望まれている。すなわち、土砂地山からなる低土被り区間では、特に安価で簡易な観測手法によってリアルタイムに地山およびトンネルの安定性を評価できる観測手法の開発が望まれていると言える。

筆者らは、岩盤崩落や地すべり等の地盤災害を予測する観測手法として地盤の微小な電位変動に注目する微小電位観測について、各種室内実験での計測結果や切土のり面の施工現場等における観測結果に基づき検討を進めている^{1)~5)}。

前報⁹⁾では、土砂地山からなる低土被りトンネルの地表面モニタリングに微小電位観測を適用し、掘削に伴い発生する微小電位差は最大24mV程度とごく僅かであるが特徴的な電位変化パターンを示すこと、切羽から観測点(電極)に近い方が発生する微小電位差が大きくなり発生する電位差に距離依存性があること、降雨による電位差変化と掘削に伴う電位差変化は識別可能であること等について報告した。

本稿では、前報とは異なるトンネル現場の坑口部において微小電位観測を実施し、2つのトンネル現場における掘削に伴い発生する微小電位差の特性を地表面変位観測結果等と対比して検討し、本観測手法の特徴とトンネル地表面モニタリングとしての適用性をさらに検証した結果について報告する。

2. 適用トンネルと微小電位観測手法の概要

(1) 適用トンネルの概要

図-1に示す最初に微小電位観測を適用したMトンネル⁹⁾は、最大土被り約22m（トンネル掘削幅Dに対して約1.5D）で延長約190mの機械掘削による道路トンネルである。トンネル地質は、中生代白亜紀上部の泥岩であり、造構造運動に伴う変質・変成作用を強く受け土砂化しており現地では破碎泥岩と称している。なお、この破碎泥岩の分布する周辺の傾斜地や切土のり面では地すべり・崩落現象が多発している。室内試験による泥岩の自然含水比は6～7%であり、破碎泥岩では15～16%となっている。

Mトンネルは年平均気温が7.8℃（30年統計値）の積雪寒冷地に位置し、積雪量は数10cm程度で地表面から数10cm程度の表層地盤が凍結する。

図-2に示す微小電位観測を適用したUトンネルは、掘削幅約13mで延長約330mの道路トンネルである。トンネル地質は、終点側坑口の土被り1.5D以下の区間に粘土および砂を主体とする未固結堆積物が基盤のひん岩を被覆し、坑口から延長約40m区間に堆積している。トンネル掘削方法は土砂区間が機械掘削、岩盤区間が発破掘削である。室内試験による未固結堆積物である粘土の自然含水比は43～79%と高く、砂混じりになると10%程度に低下する。ひん岩の自然含水比は3%以下である。

Uトンネルは年平均気温11.8℃（22年統計値）の寒冷地に位置し、降雪量は数cm程度と少なく表層地盤はほとんど凍結しない。

(2) 微小電位観測機器の配置と観測手法

図-1にMトンネルにおける微小電位観測の電極配置を示し、図-2にUトンネルにおける電極配置を示した。Mトンネルでの微小電位観測は、トンネル出口側に相当する起点側坑口周辺の地表面で実施した。Uトンネルでの観測は、トンネル入口側に相当する終点側坑口の未固結堆積物が基盤を被覆する地表面で実施した。

地表面に埋設した電極は、共に直径φ20mm、長さ1500mmの棒状電極であるが、Mトンネルでは亜鉛メッキ処理した鉄筋棒を用い、Uトンネルでは銅製丸棒を用

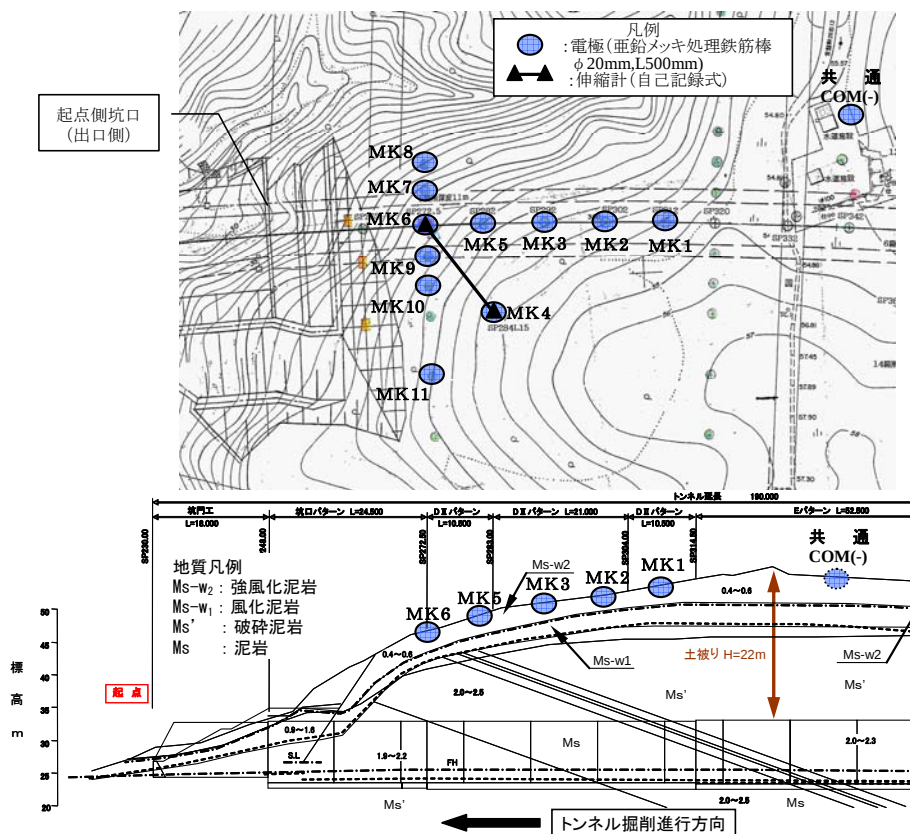


図-1 Mトンネルの電極配置図（平面，断面）

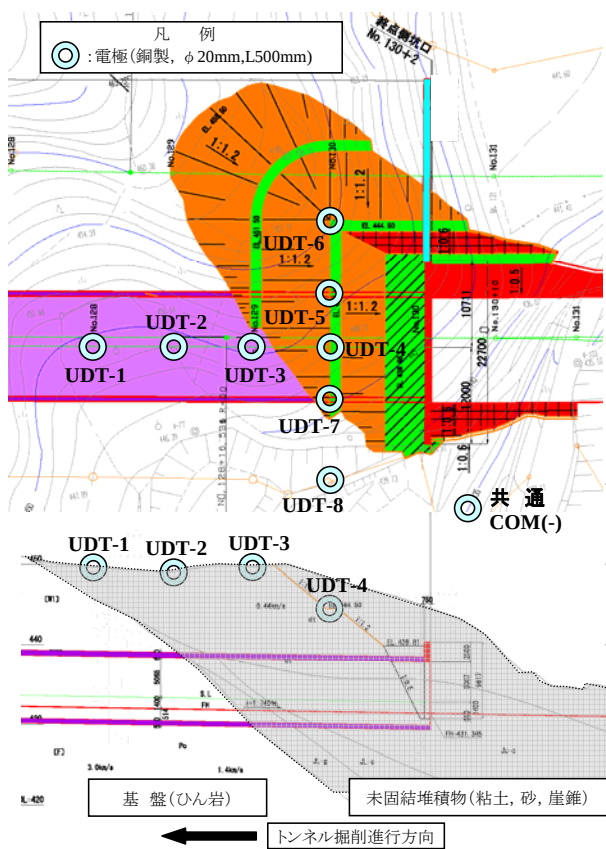


図-2 Uトンネルの電極配置図（平面，断面）

いた。電極の設置・埋設方法の詳細については既報⁹⁾を参照されたい。

微小電位観測には汎用電圧測定用データロガー（入力範囲： $\pm 2V$, A/D 変換分解能：20bit, メモリ容量：20MB）を用い、計測頻度は10秒とした。

図-1,2 に示したように掘削の影響を受けないと考えられる位置に共通電極を埋設し、この共通電極をデータロガーの負極に繋ぎ、各電極と共通電極間に発生する地盤の電位差変動を常時モニタリングした。

微小電位観測データは適時インターネットを経由して専用計測サーバーに転送され、観測データを遠隔地から常時にモニタリングすることが可能なシステムとしている。

地盤における微小電位に関する既往研究や発生メカニズムに関しては既報^{4)~6)}を参照されたい。

3. 微小電位観測結果と考察

(1) 微小電位観測結果の概要

図-3 に M トンネルにおける微小電位観測結果の一例として 5/1~6/6 期間の微小電位差変動をトンネル作業内容と比較して示す。同様に、図-4 に U トンネルにおける微小電位観測結果の一例として 2/21~3/28 期間の微小電位差変動をトンネル作業内容と比較して示す。図-3,4 は共に約1ヶ月間の観測データである。

図-3 において 5/1~5/6 の GW（ゴールドデンウイク）休暇中および、図-4 において上半掘削作業のない 3/3~3/16 期間中における微小電位差は明らかに変動が少ないことがわかり、上半掘削期間中には数 10mV の掘削に伴うパルス状の特徴的な微小電位差（正極側に凸）が発生していることが明確に把握できる。

一方、降雨時には M トンネルおよび U トンネル共に全電極で負極側に大きく電位差が変化し、降雨後に以前の電位レベルに戻ろうとする傾向が見られる。なお、必ずしも降雨量が多いほど電位差変動が大きいとは限らないので、従来⁹⁾と同様に、電位差の変化量と降雨量には

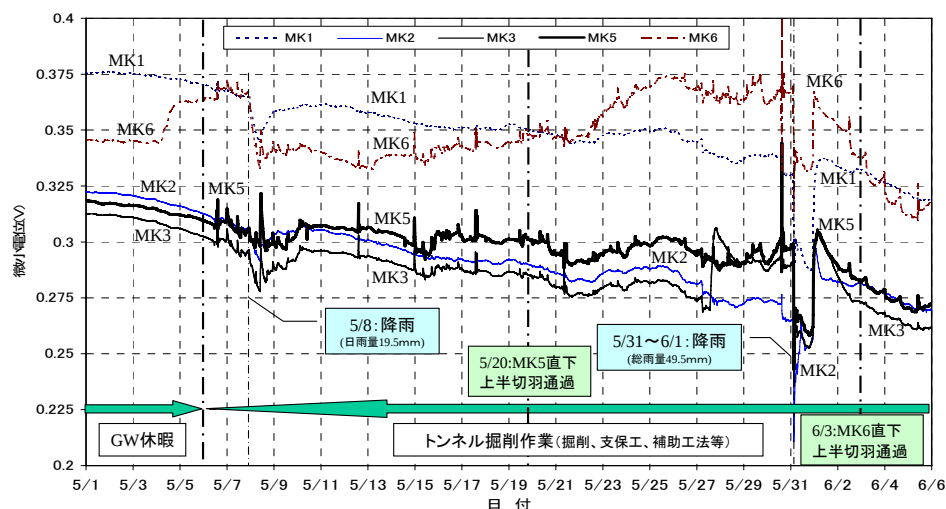


図-3 M トンネルにおける微小電位観測結果とトンネル作業(10分値)

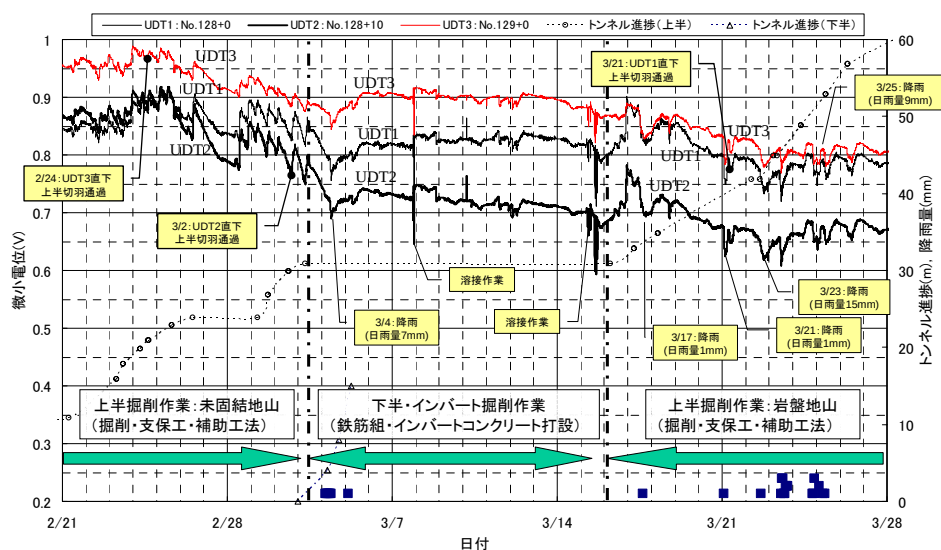


図-4 U トンネルにおける微小電位観測結果とトンネル作業(10分値)

相関性はないと言える。

図-4 の U トンネルにおける下半・インバート施工時には、坑内における溶接作業に伴う高周波数の大きな電位差が顕著に観測されている。M トンネルでも図-3 からは明瞭ではないが、同様に溶接作業時に高周波数の大きな電位差変動⁹⁾を捕らえており、微小電位観測は高電圧を用いる人為的な作業に敏感であることが分かる。

(2) 発生電位差の距離依存性に関する考察

掘削切羽に近い電極の方が電位差の変化が大きいという発生電位差の距離依存性に関しては、M トンネルで明瞭であることを既報⁹⁾で示した。U トンネルに関する電位差の距離依存性に関しては以下である。

図-4 より、電極 UDT2 の直下を 3/2 に切羽が通過するがこの切羽が通過する以前の 2/28~3/2 期間に発生している 40mV 前後のパルス状の電位差は、電極 UDT2 が電極 UDT1（切羽前方）や電極 UDT3（切羽後方）より大きくなる傾向を示しており、発生する電位差の距離依存性が確認できる。しかしながら、3/16 以降の岩盤地山掘

削区間（発破掘削）においては、切羽に近い電極 UDT1 より UDT2 の方が大きな電位差が発生しており、発生電位差に距離依存性がないことが分かる。

ここで、既報⁹⁾で述べたように掘削に伴い発生する電位差の発生メカニズムを考えるうえで、流動電位が果たす役割が大きいと考えれば、発生する電位差の大きさは地山の含水比に依存する可能性が示唆される。一方、筆者らは、室内で実施した一軸圧縮試験において岩石の破壊前に発生する電位差が含水比に依存し、含水比が高いほど発生する電位差が大きいことを報告している⁷⁾。

前述のように未固結堆積物の粘土における自然含水比は 43～79%であり、ひん岩の自然含水比が 3%以下である。よって、岩盤掘削時には未固結地山掘削時より掘削に伴い発生する電位差が小さい可能性が示唆される。

岩盤掘削時に電極 UDT2 の発生電位差が大きくなる要因としては、電極 UDT1 に近い切羽周辺では地山の含水比が低いことから発生する電位差が小さいが、掘削の影響が切羽後方の含水比が高い未固結地山に波及し、切羽近傍の岩盤で発生している電位差より大きい電位差が電極 UDT2 周辺で発生している可能性等が考えられる。

以上から、発生する電位差の要因を分析するためには、その発生メカニズムを解明することが重要となるが現状では発生メカニズムを断定するには至っていない。

一方、本検討から微小電位観測における電位差変化をモニタリングすることによって、従来からトンネルで行われてきた変位計測以外の新たな指標でトンネル掘削の周辺地盤に与える影響等を評価できる可能性を示唆したとも言える。

(3) 掘削に伴い発生するピーク電位差の対比

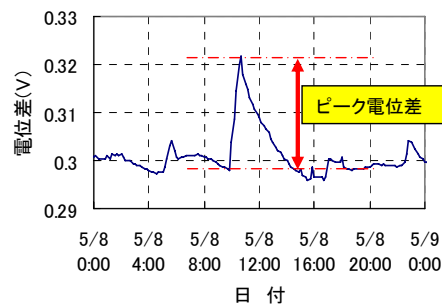
図-5 に M トンネルおよび U トンネルで発生したピーク電位差の時間経過に伴う変化形態の一例を示す。

図より、M トンネルにおけるピーク電位差の立ち上がりと消散は U トンネルと比較してシャープであり、約 1.5 時間で最大値に達し 3 時間程度で消散する。U トンネルの未固結地山掘削時では最大値に至るまで約 3 時間を要し、岩盤地山掘削時では約 2 時間となり、共にピーク値から電位差が掘削の影響を受ける前のレベルに低下するまでに 5 時間以上を要している。

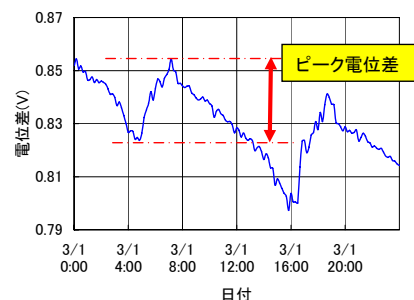
このような掘削に伴い発生するピーク電位差の発生および消散における時間依存性は、発生する地表面沈下等の地山変形あるいは、岩種や含水比等によって異なる可能性が示唆されるが、現状では明瞭な相関性は見いだせない。

(4) ピーク電位差と地表面変位計測の対比

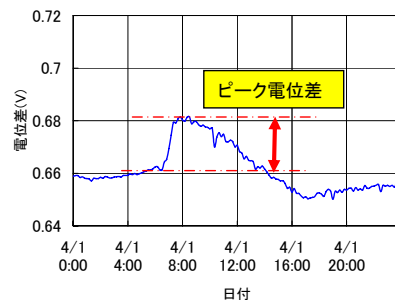
図-6 に M トンネルにおける電極 MK5 と MK6 におけるピーク電位差と地表面変位計測結果（伸縮計における相対



(a) M トンネルにおけるピーク電位差 [電極 MK5]



(b) U トンネルにおける未固結地山掘削時のピーク電位差 [電極 UDT2]



(c) U トンネルにおける岩盤地山掘削時のピーク電位差 [電極 UDT2]

図-5 ピーク電位差の経時変化の比較

変位と地表面沈下) を示す。

図より、電極 MK5 におけるピーク電位差は、上半切羽通過以前の 5/8 に最大値 24mV となり、地表面沈下速度が急激に変化する 5/10 の 2 日前に発生している。その後沈下速度のほぼ遷急点となる 5/27 以降はピーク電位差が発生していない。MK6 におけるピーク電位差は、上半切羽通過前で MK5 と同日の 5/8 に約 17mV と比較的大きな値を示し、上半切羽通過後の 6/20 に最大値 26mV を示す。MK6 でピーク電位差が比較的大きな期間は上半切羽貫通前の 6/11～25 であり、この期間に沈下速度の変化も激しい傾向を示す。

図より、伸縮計における相対変位量とピーク電位差を比較すると、伸縮計は 5/10 から変化し始め地形傾斜、計測位置、切羽進行との関係から、本来固定杭に相当する電極 MK4 側が当初圧縮側に変位したと考えられる。その後 5/10～6/11 期間は圧縮と伸長を繰り返し 6/11 以降は圧縮側の変位が大きくなる。この伸縮計の変位変化点とピーク電位差の発生状況を比較すると、概ね伸縮計が変化する 2 日前から当日にかけて比較的大きなピーク

電位差が電極 MK5, MK6 で発生していることが分かる。

以上から、微小電位観測によって得られるピーク電位差は、地表面沈下速度の変化点や地表面伸縮計における相対変位変化点と概ね一致あるいはそれより1日程度早く発生する傾向が確認できる。

図-7にUトンネルにおける電極 UDT2およびUDT3におけるピーク電位差と地表面沈下計測結果を示す。図より、両電極ともに主に上半掘削時にピーク電位差が発生し、下半・インバート掘削時にはほとんど発生していないことが分かる。

電極UDT2とUDT3を比較すると発生するピーク電位差は電極UDT2の方が2倍程度と大きく、上半切羽通過2日前の2/28に最大値66mVを示す。同様に、UDT3では上半切羽通過1日前の2/23日に最大値34mVを示す。よって、ピーク電位差が切羽通過前に最大値を示す傾向はMトンネルと一致する。

さらに、ピーク電位差の発生頻度は切羽通過前に高くなり地表面沈下速度が顕著に変化する以前から発生していることが分かる。よって、Mトンネルと同様にUトンネルでも地表面沈下速度の変化点の1～2日前にピーク電位差の発生頻度が高くなる傾向があることが分かる。

以上から、微小電位観測によるピーク電位差のモニタリングによって、地表面沈下計測より事前かつ敏感にトンネル掘削による地山変化を捕らえることが可能であることが示唆される。

一方、電極UDT2では切羽通過後の岩盤地山掘削開始直後に比較的大きなピーク電位差が発生しており、地表面沈下にも変化が発生する。しかしながら、電極UDT3ではほとんど地表面沈下が変化していない。よって、電極UDT2

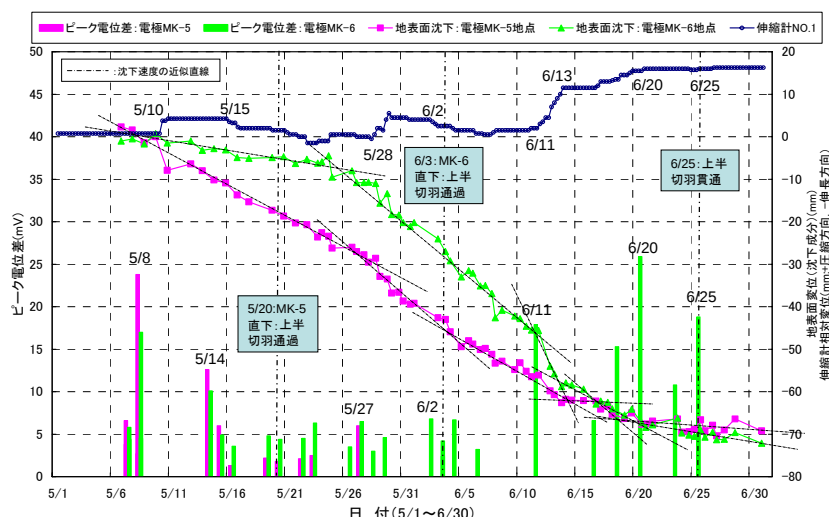
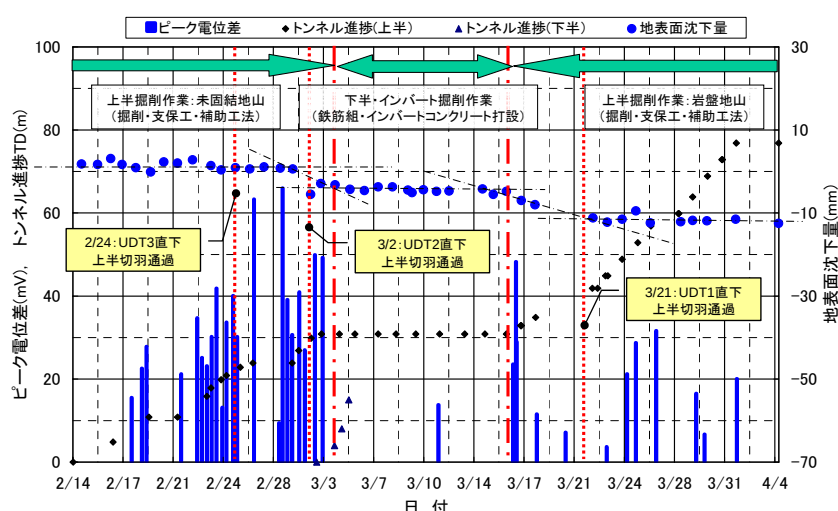
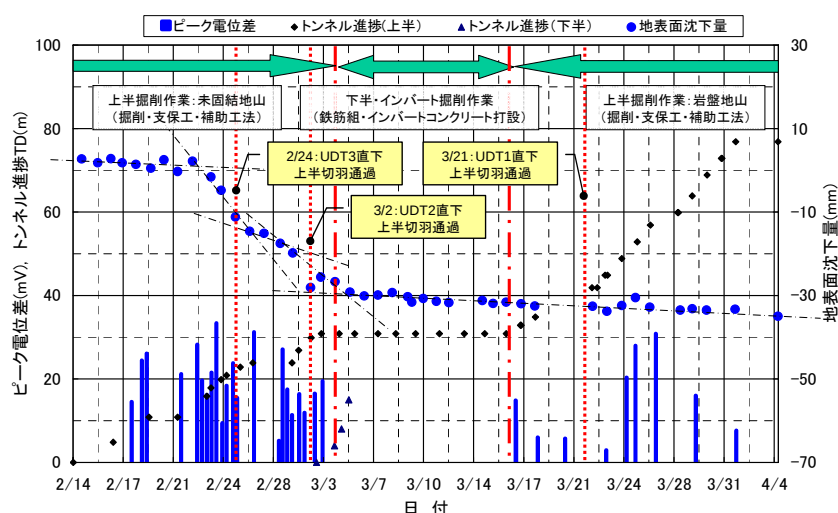


図-6 Mトンネルにおけるピーク電位差と変位・沈下計測との対比 [電極 MK5, MK6]



(a)電極 UDT2



(b)電極 UDT3

図-7 Mトンネルにおけるピーク電位差と沈下計測との対比 [電極 UDT2, UDT3]

位置では切羽が通過し岩盤掘削区間に至っても掘削の影響が及んでいないと考えられる。

Mトンネルの最終地表面沈下量は70mm程度であり、

沈下量が大きい。一方、Uトンネルの最終地表面沈下量は10～30mm程度でありMトンネルと比較すると沈下量が小さい。しかしながら、発生するピーク電位差は最終地表面沈下量が最も小さいUトンネルの電極UDT2で最大値を示し発生頻度も高い。よって、発生するピーク電位差の大きさと最終地表面沈下量には相関性がない、あるいは逆相関の関係があると考えられるが、その要因に関しては不明確である。

4. おわりに

本稿では、低土被り区間を有する2つのトンネル現場において微小電位観測を実施し、掘削に伴い発生する微小電位差を地表面変位計測等と対比して検討し、本手法の特徴と低土被りのトンネルにおける地表面モニタリングへの適用性を検討した。本稿で得られた知見を以下のようにまとめる。

- 1) 掘削に伴い発生する微小電位差のピーク値は、Mトンネルで最大 26mV、Uトンネルで最大 66mV となり特徴的な発生パターンを示すことが明瞭となった。
- 2) 発生するピーク電位差は切羽と電極の位置関係から距離依存性を有することを基本とするが、距離依存性を示さない場合もある。その場合には何らかの影響が距離依存性を示さない電極周辺の地山に及んでいる可能性があると考えられる。
- 3) 発生する電位差ピークと地表面変位計測との対比結果から、地表面に変位が発生し始めるあるいは、変位速度が変化する 1～2 日前の段階で電位差ピークの発生頻度が高くなりその差も大きくなることが示され、本手法が掘削に伴う地山変状の予測手法として有益であることが示された。
- 4) 最終地表面沈下量と電位差ピークの発生量には相関性がなく、むしろ逆相関となる可能性もある。

よって、微小電位観測が低土被りトンネルの地表面モニタリング手法として有効であることが示された。

本研究を進めるにあたり最も大きな課題は、地盤の破壊あるいは掘削に伴って発生する電位差の発生メカニズムを明らかとすることに集約されると言え、この電位差発生メカニズムが明らかとなれば、微小電位観測は地盤の破壊予測や変状予測に非常に有効な手段となることが期待できる。

参考文献

- 1) 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, 1999.7.
- 2) 河口賢治, 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 2 模擬斜面の崩壊実験), 第 36 回地盤工学研究発表会, 2001.6.
- 3) 加藤卓朗, 村山秀幸, 小野義之, 太田智之, 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.
- 4) 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, 2004.1.
- 5) 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, 2005.1.
- 6) 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: 微小電位観測を用いた低土被りトンネル掘削における地表面モニタリング, 土木学会第35回岩盤力学におけるシンポジウム講演論文集, pp.377-382, 2006.1.
- 7) Kusakabe, Y., Ito, Y., Hashimoto, S., Murayama, H., Kato, T. and Nagao, T.: Basic study on the monitoring method for the rock slope failure using the micro geo-electric signals, *ISRM, 3rd ARMS2004 (Asian Rock Mechanics Symposium)*, 2004.12.

SURFACE MONITORING UNDER THE SHALLOW OVERBURDEN TUNNEL USING THE MICRO GEO-ELECTRIC SIGNALS MEASUREMENT

Hideyuki MURAYAMA, Yoshiaki ITO, Nobuyuki SUZUKI,
Yoshihiko ITO, Yuki KUSAKABE and Noriaki ITO

It is very important for tunnel design and construction to confirm tunnel stability and influence given to environment in surrounding during excavating the shallow overburden tunnel consist of uncomposed deposit. Therefore, it is necessary to develop the cheap and simple real time field measurement that should be able to estimate the ground behavior of surrounding tunnel. This paper describes the application results of ground surface monitoring using the micro geo-electrical signals under shallow overburden tunnel on two sites. As a result, it was confirmed the feature micro geo-electrical potential about 20～60mV generated by excavation and shown the effective to the tunnel surface monitoring.