

地すべり地における地下水流動調査のための 比抵抗モニタリング

井上敬資*・中里裕臣*・中西憲雄*・菊池茂史**・大塚文哉***

目 次			
緒 言	287	3 ボーリング孔における探査結果	290
試験研究方法	287	4 降雨後の比抵抗分布の変化	291
1 試験地の概要	287	考 察	292
2 比抵抗法 2 次元探査	288	1 湧水期と豊水期の探査	292
3 制約付き非線形差トモグラフィ解析	289	2 日別探査	292
探査結果	289	結 言	292
1 縦断測線における比抵抗変化率分布	289	参考文献	292
2 横断測線における比抵抗変化率分布	289	Summary	294

緒 言

すべり面における間隙水圧の増大は地すべりブロックの安定性を低下させる主要因の1つであり、地下水排除は地すべり対策において、重要な位置を占める。このような地すべり対策を効果的に実施するには、地下水流動部の詳細な把握が極めて重要となる。特に結晶片岩分布域における破碎帯地すべりにおいては移動土塊にあたる崩積土及び強風化岩付近を流れる地下水の流動経路の把握が課題になると考えられる。一方、地盤の比抵抗 s は地盤の間隙率 a 、水飽和度 S 、および間隙水の比抵抗 n をパラメータとして変化することが知られている。Archie(1942)によるとそれらの関係は次式で表される。

$$s = a^{-m} S^{-n} \quad a, m, n \text{ 定数} \quad (1)$$

これらのパラメータのうち地下水流動により変化し得るのは水飽和度 S および間隙水の比抵抗 n である。不飽和帯における比抵抗の変化は飽和度の影響を受け、飽和帯における変化は間隙水の電気伝導度の影響を受けることから、地盤の比抵抗 s の変化を測定することにより地下水流動部を推定できることが期待される。

地盤の比抵抗変化を水飽和度の変化に対応させた研究としては、井上(1988)、和田ら(1995)、中里ら(2000)による降雨や涵養水浸透モニタリング、高倉(1991)による地下水面変動モニタリング、高倉(1999)、吉田(1999)による土構造物の飽和度モニタリングなどがある。また、地盤の比抵抗変化を間隙水の比抵抗変化としてとらえた例としては、牛島(1997)による塩水侵入モニタリング、竹内・長江(1990)による塩水トレーサを利用した地下水流動モニタリング、中里ら(2005)による間隙水比抵抗の温度依存性に基づく地温変化可視化などがあげられる。

本論では中里・杉本(2002)の方法と同様に、湧水期と豊水期における地下水流動部の飽和度変化による比抵抗変化を期待し、破碎帯地すべり地を調査地として、豊水期と湧水期の2時期に比抵抗法2次元探査を行い、差トモグラフィ解析によって比抵抗変化率分布図を作成した。これらの比抵抗変化の結果とボーリング孔における地下水位、地温、電気伝導度を考慮することにより、地下水流動部の分布について検討を行った。また、その結果から地下水流動部が推定される箇所において、降雨による短期的な地下水流動部の飽和度変化に伴う比抵抗変化を期待し、1日毎に比抵抗法2次元探査を自動的に繰り返し行い、降雨前の比抵抗分布をバックグラウンドとした降雨後の比抵抗変化率分布図を差トモグラフィ解析より作成した。この日別探査の結果、湧水期と豊水期の探査において低比抵抗化した箇所において、降雨後も低比抵抗化している箇所があり、この箇所は地下水流動部の可能性が高いと考えられ、本論の方法により地下水流動部を把握することが有効であることが示された。

*造構部広域防災研究室

**「内閣府」

***「農林水産省関東農政局資源課」

受理年月日：平成18年1月18日受理

キーワード：比抵抗モニタリング、地下水、制約付き非線形差トモグラフィ解析、地すべり

今回、調査を行う上で静岡県北遠農林事務所、浜松市(旧天竜市)、明治コンサルタント(株)、住民の方々など、多くの方々にご協力頂きました。厚くお礼を申し上げます。

試験研究方法

1 試験地の概要

試験地は静岡県浜松市(旧天竜市)の地すべり防止区

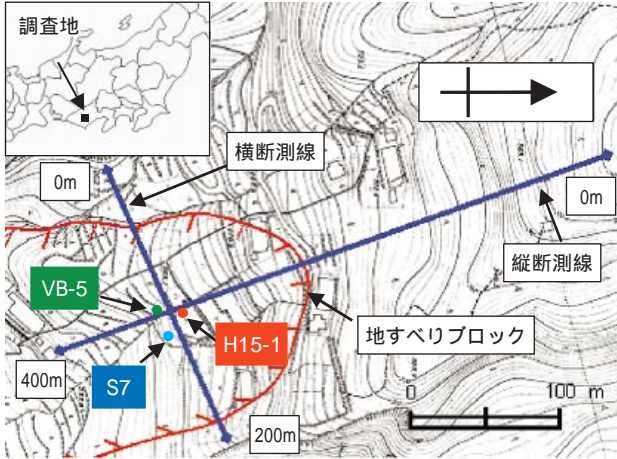


Fig. 1 試験地位置図(昭和51年度大沢地区地すべり防止工事実施計画書大沢地区平面図)

Index map of the survey site

域大沢地区の長さ700m、幅200m、平均地すべり層厚10mの地すべりブロックの上部である(Fig.1)。本地すべりブロックは天竜川流域の三波川帯結晶片岩分布域に位置する破砕帯地すべりである。基盤は斜面上方で緑色片岩が主体となり、下方に行くにしたがい黒色片岩主体に移行していく傾向が確認された(Fig.2)。また、地すべりブロックの主測線上のボーリング孔で実施された簡易揚水試験により主な地下水流動層は崩積土から風化岩の付近と推定された(Fig.2)。探査測線近くのボーリング孔(H15-1,VB-5)では地下水位、電気伝導度、深度毎の地温が観測された。

2 比抵抗法2次元探査

a. 期別探査

本試験地では湧水期と豊水期の水飽和度の変化に伴う比抵抗変化部の検出による地下水流動部の推定を目的として湧水期2004年2月と豊水期2004年9月の2時期において比抵抗法2次元探査を行った(以下期別探査とする)。探査測線は、地すべりブロックの上部を対象として、基本電極間隔を2mとし、縦方向に406m(電極数204点)、横方向に190m(電極数96)の2測線を設置した。電極はステンレス製(長さ50cm、径1cm)を用い、探査毎の位置誤差を除去するために調査期間中は存置し、電線は探査ごとに設置・撤去した。電極配置は効率よく精度の高い探査結果を得るため、地下の比抵抗

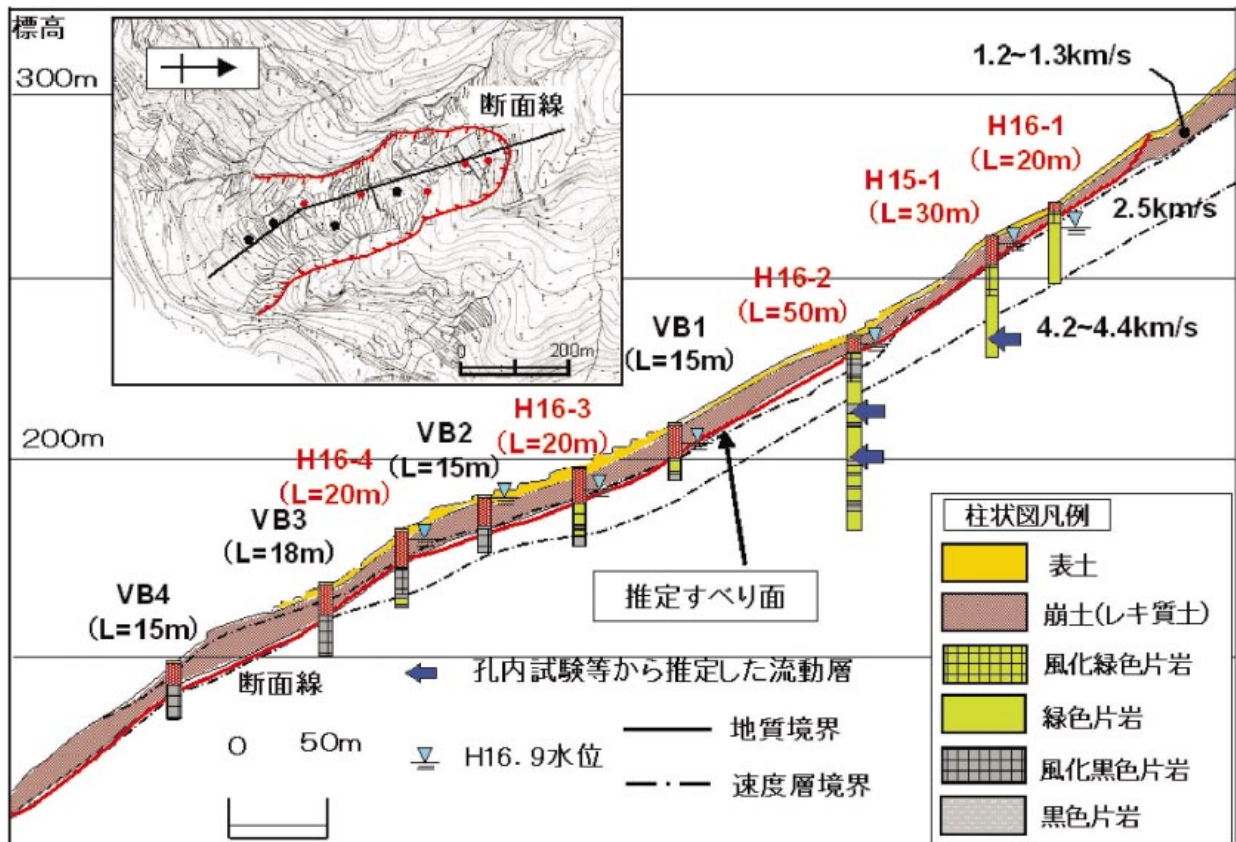


Fig. 2 試験地地すべり地質断面図
Geological section of the landslide in the survey site

変化に対する感度の異なるダイポール・ダイポール法およびウェンナー法を採用し、両者のデータを合わせて逆解析を行った。電極点は水平距離および標高が測量された。

b. 日別探査

渇水期と豊水期の2時期の探査結果から地下水流動部が推定される箇所においては、降雨の前後における地下水流動部の飽和度変化に伴う比抵抗変化を期待し、横測線の前半部分（西側）0m～100m区間において、2005年7月6日から2005年9月6日の間、1日毎の比抵抗法2次元探査を繰り返し行った。探査時間は0:20から6:50であり、2ヶ月間、毎日測定した。電極・電線・探査装置は探査期間中存置し、中里ら(2003)のシステムにより自動計測を行った。

3 制約付き非線形差トモグラフィ解析

比抵抗の変化を解析する一般的な手法は変化前後のデータを別々に逆解析し、それぞれの比抵抗断面の差をとることによって行われるが、測定毎に異なるノイズの影響や解析毎に異なる収束条件の影響によって真の比抵抗変化が捉えられない可能性がある。これらの影響を抑えるため佐々木（1985）は変化前後のデータの変化から比抵抗変化を求める解析手法を提案した。さらに杉本（1995）は比抵抗変化の非線形性を考慮した手法を提案し、適当なりファレンス断面から計算した理論データに測定された差データを加えて逆解析を行い、求めた比抵抗分布とリファレンス断面の比抵抗分布の差から比抵抗変化率を求めた。さらに、比抵抗の変化する方向を制約することによって解析精度を向上させる手法も提案した。

本研究では杉本(1995)の方法により比抵抗変化率をパラメータとする逆解析を行った。期別探査では2004年2月の探査結果を初期値とした2004年9月における比抵抗変化率分布図を作成した。2時期の比抵抗変化の

要因としては、水質変化がないとすると地下水位と地温の上昇が予想され、これらはいずれも比抵抗の低下の要因であることから、2004年9月の比抵抗は2004年2月の比抵抗より必ず低下するとした制約条件のもとに解析を行った。日別探査では期別探査の結果から地下水流動部が推定される箇所において2005年7月7日の比抵抗分布をバックグラウンドにした2005年7月9日～7月13日の1日毎の比抵抗変化率分布図を作成した。比抵抗変化の要因としては、降雨による飽和度増加が期待されるため、比抵抗は必ず低下するとした制約条件のもとに解析を行った。解析には（株）ダイヤコンサルタント製E-Tomo ver.4.1を使用した。

探査結果

1 縦断測線における比抵抗変化率分布

縦断測線の比抵抗分布および差トモグラフィ解析による比抵抗変化率分布をFig.3～4に示す。2004年2月と2004年9月の比抵抗分布はほぼ同様な分布を示すため、比抵抗分布は2004年2月の断面図のみを示す(Fig.3)。2004年2月の比抵抗分布をバックグラウンドとした2004年9月の比抵抗変化率分布(Fig.4)では全体的に地表から深度5mまでの範囲で低比抵抗化が認められた。また、測線距離120mおよび170m付近では低比抵抗化部A、Bが認められた。なお測点290m付近にはボーリング孔（H15-1）が位置し、この点が横断測線との交点である。差トモグラフィ解析の平均残差率は6%であった。

2 横断測線における比抵抗変化率分布

横断測線の比抵抗分布および差トモグラフィ解析による比抵抗変化率分布をFig.5～6に示す。比抵抗分布は縦断測線と同様に2004年2月の断面図のみを示す。2004年2月の比抵抗分布をバックグラウンドとした2004年

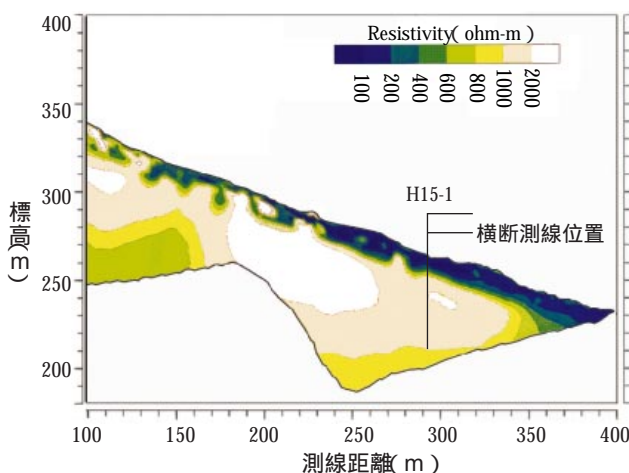


Fig. 3 縦断測線における比抵抗断面図(2004.2)

Inverted resistivity section along vertical line in 2004.2

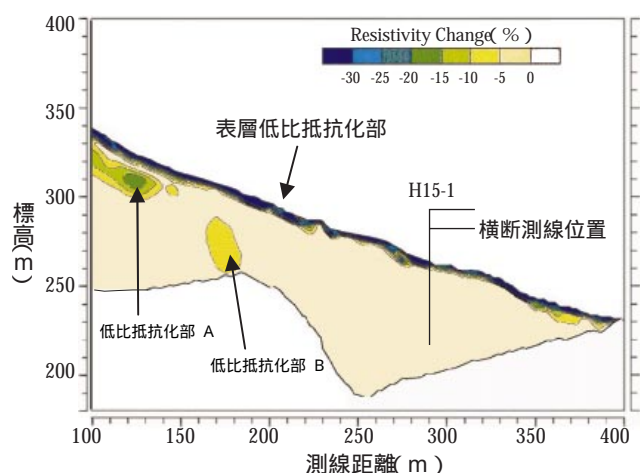


Fig. 4 縦断測線における比抵抗断面図(2004.2)

Inverted resistivity section along vertical line in 2004.2

9月の比抵抗変化率分布(Fig.6)では縦断測線同様、地表から深度5mまでは全体的に低比抵抗化部が分布している。測線中央部付近に広範囲に-5~-10%の低比抵抗化部Cが現れており、Fig.6において右側の地表付近に連続している。測線距離30mおよび65m付近においては低比抵抗化部D、Eが認められ、低比抵抗化部Dは比抵抗断面図 (Fig.5) における100 m以下の縦方向の低比抵抗部に対応している。差トモグラフィ解析の平均残差率は3%であった。

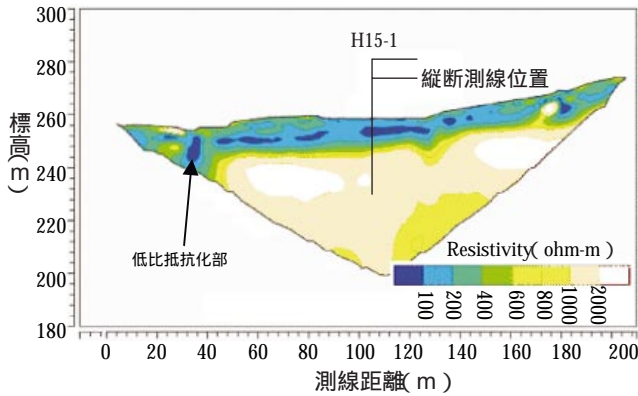


Fig. 5 横測線における比抵抗断面図(2004.2)
Inverted resistivity section along lateral line in 2004.2

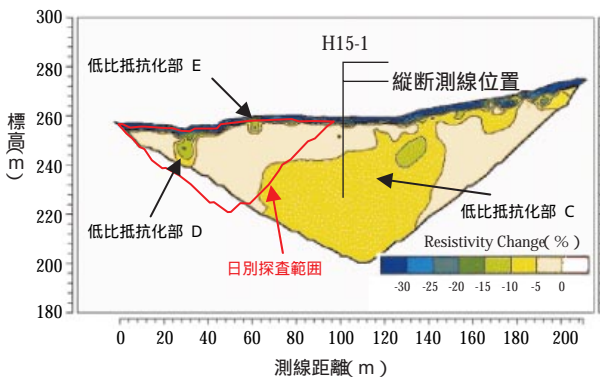


Fig. 6 2004.2をバックグラウンドとした2004.9の比抵抗変化率分布
Resistivity change ratio section by constrained non-linear differential tomography along lateral line

3 ボーリング孔における地温観測

H15-1孔(Fig.1)地点における深度別地温変化をFig.7に示す。2004年のデータの一部に欠損があったため同様な傾向がみられた2005年のデータを示している。地表付近の0.1m深地温は気温変化と調和的に変化しておりほぼ気温変化に相当し、日変化と年変化が認められ、8月中旬に最高気温がある。地中埋設の1m深地温は最高温度がやや遅れて9月上旬にあり、2月からの温度差は約10 である。5m以深のセンサーは孔内にあり、5m深地温の最高温度は11月下旬にあり、2月からの温度差は3 程度である。

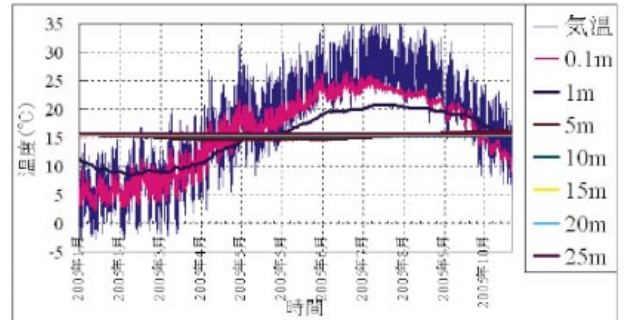


Fig. 7 調査孔H15-1における深度別地中温度変化
Fluctuation of ground temperature by depths at H15-1

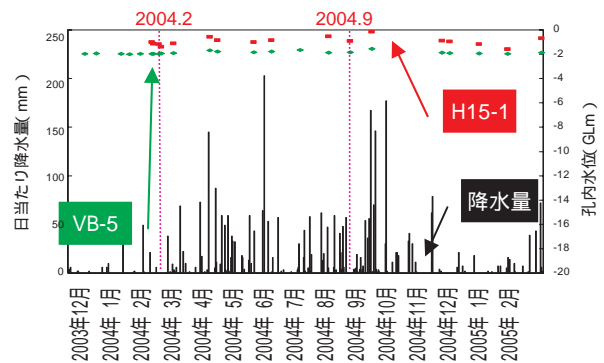


Fig. 8 調査孔(H15-1,VB-5)における地下水位の変化
Change of ground water level at holes

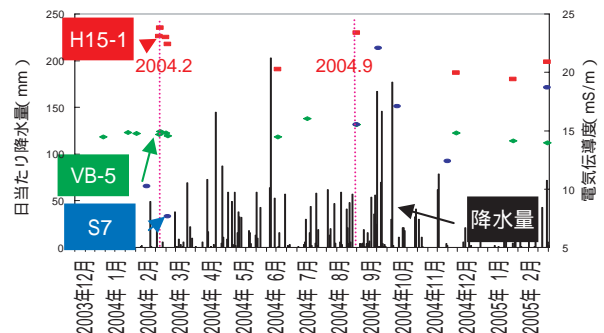


Fig. 9 調査孔(H15-1,VB-5,S7)における電気伝導度の変化
Change of EC at holes

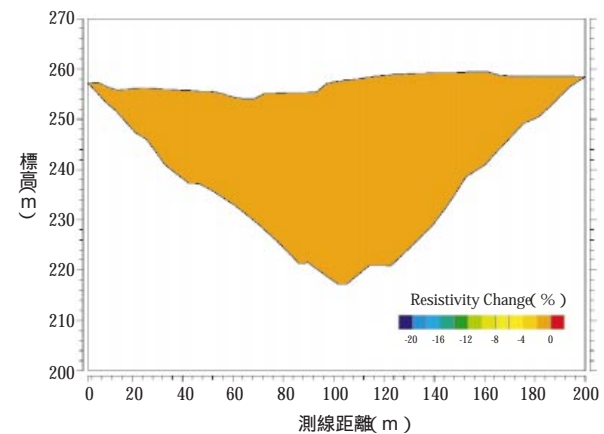


Fig. 10 横測線における差トモグラフィ解析結果 (7月9日)
Resistivity change ratio section by constrained non-linear differential tomography along lateral line in 2005.7.9

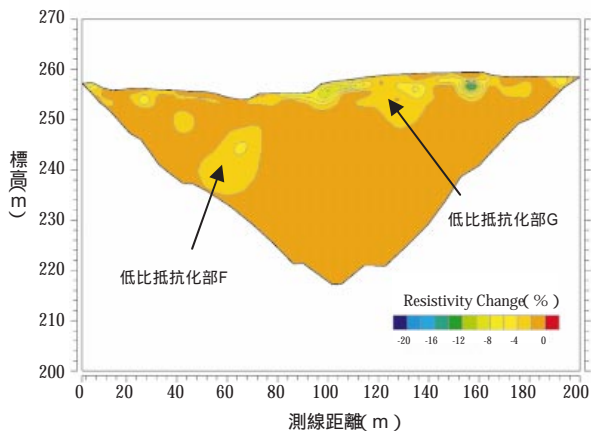


Fig. 11 横測線における差トモグラフィ解析結果 (7月10日)
Resistivity change ratio section by constrained non-linear differential tomography along lateral line in 2005.7.10

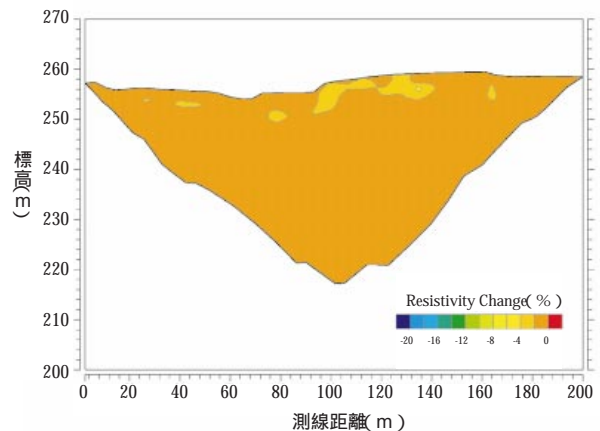


Fig. 14 横測線における差トモグラフィ解析結果 (7月13日)
Resistivity change ratio section by constrained non-linear differential tomography along lateral line in 2005.7.13

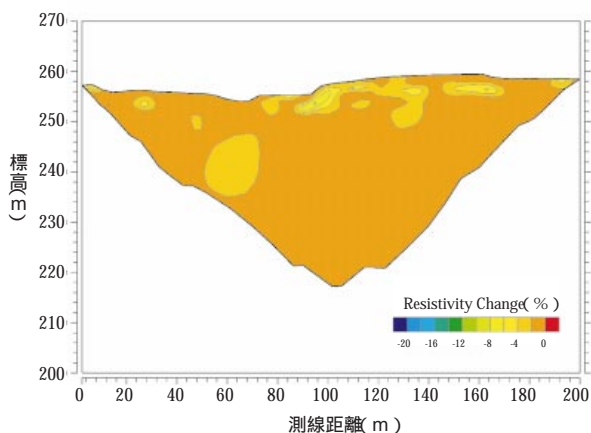


Fig. 12 横測線における差トモグラフィ解析結果 (7月11日)
Resistivity change ratio section by constrained non-linear differential tomography along lateral line in 2005.7.11

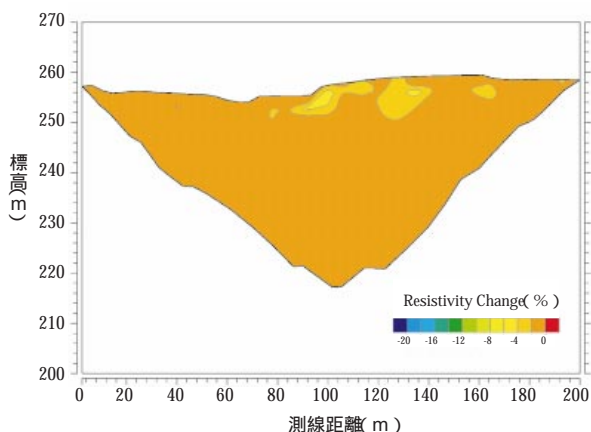


Fig. 13 横測線における差トモグラフィ解析結果 (7月12日)
Resistivity change ratio section by constrained non-linear differential tomography along lateral line in 2005.7.12

Fig.8, 9はFig.1に示される各調査孔 (H15-1, VB-5) , 湧水地点S7における地下水位および電気伝導度の変化である。H15-1およびVB-5孔の2004年2月と9月における地下水位はともにほとんど変化していない。これら以外のボーリング孔において地下水位の変化が観測され

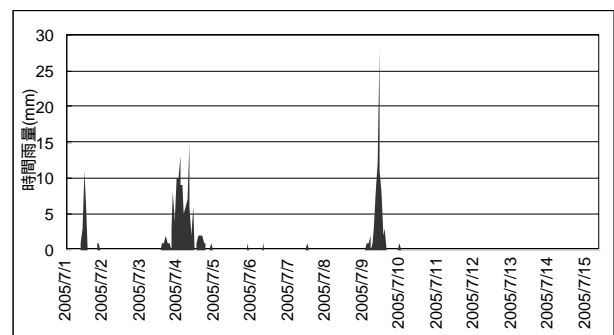


Fig. 15 試験地における解析期間前後の時間雨量

Amount of rainfall per hour on survey site during analytical period

ている箇所もあり地下水位は場所により異なるが、H15-1,VB-5においては2時期の探査時において地下水位は同じであったと考えられる。H15-1孔およびVB-5孔における電気伝導度は2時期においてほぼ一定であったが、湧水地点S7においては降雨が多く降ったのちに電気伝導度が上がる傾向が認められた (Fig.9)。

4 降雨後の比抵抗分布の変化

Fig.10~14は2005年7月7日の比抵抗分布をバックグラウンドにした2005年7月9日~7月13日の1日毎の比抵抗変化率断面図である。この期間においてはFig.15に示されるように7月9日に比較強い雨が降り、その後で比抵抗分布が大きく変化している (Fig.10, Fig.11)。降雨後、比抵抗は表層部を中心に低下し (Fig.11)、時間が経過するにつれて、比抵抗の低下率が減少している (Fig.12~14)。Fig.6に示す横断測線における期別探査の比抵抗変化部DはFig.11における測線距離30m、標高240mの低比抵抗化部Fに相当し、降雨後2日まで低比抵抗化を示し、Fig.6に示す横断測線における期別探査の比抵抗変化部EはFig.11における測

線距離65m, 標高255m付近の低比抵抗化部Gに相当すると思われ, 降雨後6日まで低比抵抗化が認められた。差トモグラフィ解析の平均残差率は7/10~7/13で1.64, 0.92, 0.96, 0.95%であった。

考 察

1 期別探査

地表部全体に分布する低比抵抗化の原因としては地下水位の上昇による飽和部の増大もしくは地温観測結果に見られる地温上昇が考えられる(中里ほか2005)。H15-1孔における水位の変化は小さいのに対し, 地表から深度5mまでにおいては地温変化が観測されており(Fig.7), 地表部の低比抵抗化部は地温上昇が支配的な要因と考えられる。

地下水の飽和帯内における比抵抗変化の要因としては, 間隙水の比抵抗の変化が考えられ, 水質変化と水温変化が考えられる。Fig.4における測点120m, 標高310m付近の比抵抗変化Aおよび測点170m, 標高260m付近の比抵抗変化Bは, 水質が変化していないとすると水温の上昇が要因としてあげられ, 夏季の浸透水の流下の影響が考えられる。

Fig.6における測線中央部付近に広がる比抵抗変化Cの要因は, H15-1孔の深度20, 25mで温度上昇は認められていない(Fig.7)こと, 湧水S7においては電気伝導度が増加していることより, 地下水の電気伝導度の変化が考えられる。S7は強い降雨の後は電気伝導度が上がる傾向にあり, ある程度強い降雨があると上方の茶畑付近と水みちがつながると考えられる。この低比抵抗化部は縦断測線では解析されておらず(Fig.5), 実際には3次元的に不規則な分布をしていると推定される。また, Fig.6の測線距離30m, 標高250mの低比抵抗化部Dは比抵抗断面図(Fig.5)において100 m以下の縦方向の低比抵抗化部に相当し, 地すべりブロックの側方端付近の亀裂帯もしくは断層を通じた温水の浸透を示す可能性がある。

2 日別探査

日別の比抵抗探査では降雨前には比抵抗は変化せず(Fig.10), 降雨後に比抵抗が低下し(Fig.11), 時間が経つにつれて低比抵抗化部の面積やその変化率が減少している(Fig.12~Fig.14)。これは降雨による飽和度の増加とその後の浸透による飽和度の減少に伴った比抵抗変化と考えられる。また, 期別探査において低比抵抗化した箇所(Fig.6のD, E)において, 降雨後の比抵抗の低下が観測され(Fig.11のF, G), これらの箇所は地下水流動部である可能性が高いと考えられる。しかし, これら2箇所の低比抵抗化部のうち, 低比抵抗化部Fは谷部の集水地形であるが, 低比抵抗化率が低く, 地表付近からの低比抵抗化が認められていない。これはもともと飽

和度の高い豊水期に飽和度の変化を捉えようとしたため, このような常時飽和度の高い場所では, 飽和度の変化がほとんど起こらなかったことが考えられる。また, 日別探査の探査間隔は24時間であり, この箇所の透水性が高かったと考えると, 降雨後, 探査の間隔の間に雨水が流下し, 降雨後最初の電気探査の測定時では飽和度が上昇していなかったことなどが考えられる。このような透水性が高い箇所での地下水流動の現象をとらえるためには, モニタリングの間隔を短くするなど, 探査システムの能力を上げる必要がある。

結 言

本研究では破碎帯すべり地において飽和度の変化による地下水流動部の推定を目的として, 豊水期, 渇水期の2時期の比抵抗法2次元探査および降雨前後の日別の探査を行った。これらの調査について検討した結果を以下にまとめる。

渇水期と豊水期の2時期における探査においては, 地表から5m深までの比抵抗変化はボーリング孔にて観測された地温の変化と調和的であり, 間隙水の温度変化による比抵抗変化と考えられる。

日別探査では降雨状況と比抵抗変化が調和的であり, 比抵抗の変化は飽和度の変化によるものと考えられる。

渇水期と豊水期の探査および日別探査の両方において低比抵抗化が認められた箇所においては地下水流動部を示している可能性がある。

水飽和度の高い時期において, 雨水の集水箇所では降雨による飽和度の変化が小さく, 地下水流動部の把握が難しい場合がある。

透水性の高い場所においては, 地下水の浸透が早く, 1日毎の探査では現象を捉えるのは難しい。このような現象を捉えるためには探査間隔を短くすること, 測定チャンネル数を増やすことなど, 探査システムの能力を上げる必要がある。

今後はボーリング孔で採取されたコアを用いて, 飽和度と比抵抗の関係を室内試験において求め, 今回の探査の結果を検討する。

参考文献

- 1) Archie, G.E.(1942):The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, 146, 54-62
- 2) 井上誠(1988): 地表面の降雨による比抵抗変化の測定方法, 物理探査学会第78回学術講演会講演論文集, 187-190
- 3) 中里裕臣・杉本芳博(2002): 地すべりモニタリングにおける繰り返し比抵抗トモグラフィ, 物理探査

- 学会第107回学術講演会講演論文集, 211-212,
- 4) 中里裕臣・黒田清一郎・奥山武彦・朴 美京・金喜俊・轟木良則(2003): 電気探査連続測定システムによる地盤環境モニタリング, 農工研技報, 201, 173-182
 - 5) 中里裕臣・奥山武彦・黒田清一郎・下川弘晃・竹内睦雄・古谷尊彦(2005): 長期比抵抗モニタリングにおける地温変化の影響, 日本地すべり学会誌, 42(4), 303-311
 - 6) 佐々木裕, N. E. Goldstein, M. Wilt(1885): 比抵抗の経年変化モニター, 物理探査学会第73回学術講演会講演予稿集, 73-74
 - 7) 杉本芳博(1995): 比抵抗トモグラフィによる電解質トレーサーのモニタリング-数値的検討-, 物理探査学会第92回学術講演会講演論文集, 57-62
 - 8) 高倉伸一(1991): 比抵抗方法による地下水位変化のモニタリングの試み, 物理探査, 44(4), 227-231
 - 9) 高倉伸一(1999): 電気探査法による盛土中の水飽和度モニタリング, 物理探査学会第100回学術講演会講演論文集, 246-250
 - 10) 竹内睦雄・長江亮二(1990): 電気探査による地下水流動モニター法の研究, 応用地質, 31(1), 12-18
 - 11) 牛島恵輔(1997): 電気探査法における地下水モニタリング, 物理探査, 50(6), 632-642
 - 12) 和田卓也・井上誠・横田修一郎・岩松暉(1995): 電気探査の自動連続観測によるシラス台地の降雨の浸透, 応用地質, 36(5), 29-38
 - 13) 吉田等・山口嘉一・今林豊(1999): 高密度電気探査によるアースダム堤体内浸透調査, 土木技術研究, 41(2), 32, -37

Resistivity Monitoring for groundwater flow survey in an landslide area

Keisuke Inoue, Hiroomi Nakazato, Norio Nakanishi, Fumiya Ootsuka, Shigefumi Kikuchi

Summary

To know groundwater flow part in farmland landslide area, two-dimensional resistivity surveys were done at the two seasons of dry and wet. The resistivity change was calculated by the difference tomography analysis. Considering the observation value in bore hole, the resistivity change was caused by temperature change of water in ground and the part of the resistivity change was estimated as groundwater flow part. To examine these groundwater flow parts, two-dimensional resistivity surveys were done before and after rainfall. The resistivity change was caused by saturation level of water. The resistivity changes were recognized at the same parts so these parts were estimated as the groundwater flow parts. From this research it was showed that this survey way is effective to understand the underground water flow part.

Keywords : resistivity monitoring, groundwater, difference tomography analysis, landslide