

TDEM 法(電磁探査法)による大土被り及び、膨潤性地山のトンネル探査

APPLICATION OF TIME DOMAIN ELECTRO MAGNETIC METHODS TO TUNNEL SURVEYS
IN SWELLING GROUND AND LARGE OVERBURDEN TUNNELS原 敏 昭*¹, 斎 藤 章*²
Toshiaki HARA, Akira SAITO

In geophysical exploration of tunnel routes, the seismic refraction survey is usually used. However, even when dynamite is used as a seismic source, the maximum depth of investigation is approximately in a range of 100 to 200 m. The Time Domain Electro-Magnetic Method (TDEM), which is usually used in resource exploration, has a depth of exploration of several hundred meters or more. To investigate the applicability of the TDEM to surveying of tunnels beneath large overburden, the results of seismic refraction survey and TDEM obtained from two tunnels with overburden >200 m are compared with excavation results. In swelling rocks resistivity could decrease with increasing Cation Exchange Capacity (CEC), and thus one aim of this paper is to determine the presence or absence of swelling Neogene mudstone from the resistivity values analyzed by the TDEM. Furthermore, sensitivity of the TDEM to the low resistivity layer, and the reliability of TDEM analysis, are verified by numerical simulation. The results suggest that the TDEM is effective for determining the layer boundary for a given tunnel, which is typically difficult to verify using seismic refraction surveys when overburden exceeds 200 m. The TDEM can also detect swelling low resistivity layers.

Keywords : Significant overburden, Resistivity, Swelling ground, Numerical simulation
時間領域電磁探査法, トンネル, 比抵抗値, 膨潤性地山, 数値シミュレーション

1. はじめに

生活基盤の整備・効率化や安全性の確保などのために、日本各地でトンネルの建設が進められている。近年はリニア新幹線、高速道路など用途とするトンネルの建設も多く、土被りの大きな工事や岩石の吸水膨張による膨潤性地山などの地質的に施工が困難な工事も多くなっている。そうした工事のための事前調査として、各種の物理探査技術が用いられているが、中でも屈折法弾性波探査が最も標準的に使われる技術となっている。これは、弾性波速度が岩盤の力学的性状と密接な関係があり、トンネルの地山分類の重要な要素の一つとなっているからである。

しかしながら、屈折法弾性波探査では調査が難しい地質構造を有する場所も多い。大きな探査深度が期待できる火薬を震源に使用した調査においても、探査深度は 100m 程度といわれている¹⁾。100m を超えるような大土被りのトンネルや、弾性波速度に大きな差の認められない複雑な地質構造などでは、その解決策として従来行われてきたはぎとり法の解析に代わり、トモグラフィ的解析法が主流となりつつある²⁾。しかし、こうしたトモグラフィ的な技術を導入してもその探査深度は 200m 程度と考えられ、その調査には深さ 200m を超えるようなボーリングが必要となるので、山岳地では効率や経済性の面での問題は大きい。

このような背景から、電気・電磁探査法をトンネル調査に適用する場合も多くなってきている。電気・電磁探査法の目的の一つは、求められる比抵抗構造を他の調査データと併せて検討して、地質構造や地下水の分布状況等を把握することである。地下の比抵抗分布を測定する技術として、二次元比抵抗探査などの直流比抵抗法が広く使われている。測定装置、技術などは比較的単純であり、使いや

すい手法ではあるが、実際の構造の比抵抗値が大きく変化しても測定される見掛け比抵抗値は飽和してある狭い範囲しかとらない³⁾現象を示す。また、目的とする探査深度の数倍の長い測線を必要とし、さらに同じ測線を何度も行き来しながら測定を行うため、一般には測線に沿った伐開も必要となり、急峻な地形、国立公園などでの山岳トンネルでは適応しにくい場合もある。

筆者らは従来、主に鉱山・地熱開発等の地下数百～数千 m の地下深部資源探査技術として発達してきた TDEM 法(Time Domain Electro-Magnetic Methods, 以下 TDEM 法と記す)を、土木分野で主に対象となる地下数 m～300m 程度の断層破碎帯・熱水変質帯の位置と規模、地層境界、地下水の分布状況等の調査に適用する研究開発を行ってきた⁴⁾。

電磁探査の中では、特に本論文で対象としている深部ほど低比抵抗になる Q 型⁵⁾と呼ばれる構造に対しては、TDEM 法が有利とされている⁶⁾。そこで、本研究では日本のトンネル工事でよく遭遇する 200 m を超える土被り及び膨潤性地山を対象として、その有効性を調べる。具体的には、屈折法弾性波探査と TDEM 法の事前調査結果を 2 つのトンネルで実際の掘削結果と対照し、トンネル調査への適用性やその探査精度について検討する。さらに、現地での調査結果を踏まえ、数値シミュレーションにより極めて低い比抵抗値の地層に対する TDEM 法の適用性を検証する。

2. TDEM 法

2.1 TDEM 法の探査原理

TDEM 法は電磁場の地下への拡散現象を時間の関数として捉え、

*1 戸田建設土木技術部 博士 (工学)

*2 早稲田大学創造理工学部名誉教授 Ph. Dr.

Technology Division (Civil Engineering), TODA CORPORATION, Dr. Eng.

School of Creative Science and Engineering, Waseda University, Ph. Dr.

地下深部の比抵抗構造を調べる電磁探査法である。本研究では、地上に設置したループ送信源に電流を流し、磁場を発生させる(図1参照)。その電流を急激に遮断すると、それまでの磁場も急激に減少しようとするが、その変化を妨げるように地下に渦電流が誘導される。この渦電流は、その電流経路の比抵抗に応じて熱になって減衰し、高比抵抗の地層ほど速く、低比抵抗の地層ほど遅く減衰する。この渦電流が作る2次磁場の減衰過程を測定することにより、地下の比抵抗構造を調べることができる。こうした渦電流の減衰は磁場の変化を伴い、時間とともに新しい渦電流を地下深部へ誘導していくため、こうした渦電流のつくる磁場をより長時間地上の受信コイルで測定することによって、さらに深部の比抵抗分布が測定できる。送信電流を切ってから測定するため、測定中に一次磁場はない。これに対し、周波数領域電磁探査法の場合は、送信側からの磁場と地下からの磁場の両方を測っているため、ノイズの影響を消すのは極めて難しい。

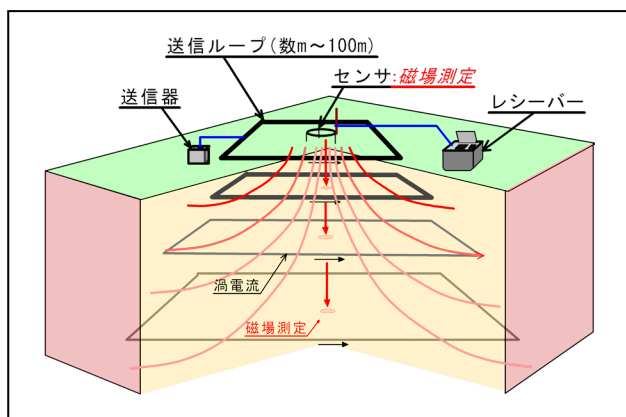


図1 TDEM法の探査原理

2.2 探査方法

TDEM法で用いる送信ケーブル形態としては、ループ状のものと、両側を接地した線電流(ダイポール)源がある(図2参照)。ループ状の送信源は探査目的に応じて一辺5mから数100m以上まで様々である。深さ100m程度までの調査には、一辺20~60m程度のループがよく使われる。深さ数100mまでの調査の場合、一辺が100m前後のループを敷設する。それ以上の探査深度が要求される場合は、一辺1km程度のループを敷設するか、あるいは長さ数kmの線電流を用いる。また、地下深部からの信号を測定するために送信信号はなるべく大きくする必要がある。通常、数10A以上の大電流を地中に流すことから、接地抵抗を十分下げる必要がある。そのため、ケーブルの両端でトタン板等を地下に埋設し、接地電極とする。また、電源としては交流の数10kVA以上の発電機を使用することが多い。ループソースの場合、ループとセンサの配置は様々な組合せで行うことができるが、トンネル調査に適した配置としては図3に示すものである。

測線上での比抵抗構造を調査する方法としては、インループまたはアウトループ測定配置が適している。断層構造等の3次元的な比抵抗異常部を捕捉するためには、大(固定)ループやスリング

ラムまたはチューラム測定配置が適している。磁気センサとしては、誘導コイル・フラックスゲート磁力計、MI磁力計、超電導磁力計(SQUID)などが使われている。通常、磁場センサは鉛直方向の磁場変化を測定するために地上に水平(コイル軸を鉛直方向)に設置する。断層調査の場合には、水平方向2成分も同時に測定することがある。なお、測定装置は小型であり、とくに測定のために伐開等整地する必要はない。

トンネル調査でのTDEM法は、主として低比抵抗地域に用いるインループ測定法と、高比抵抗地域に用いるアウトループ測定法の2方法が用いられ、探査を行う際には探査開始前にテストを行い、その結果に基づき、その地域及び各現場での要求品質に応じた探査法を選択する。

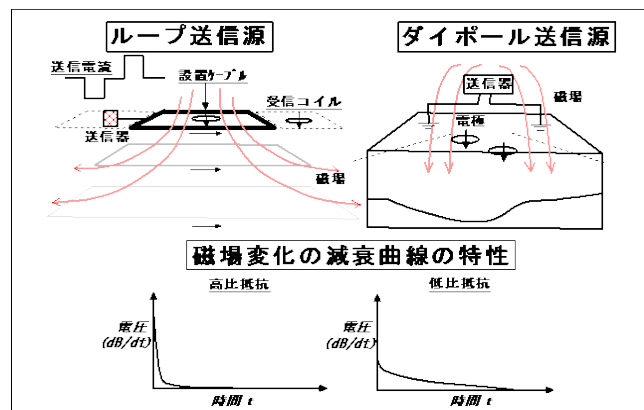


図2 TDEM法の概念

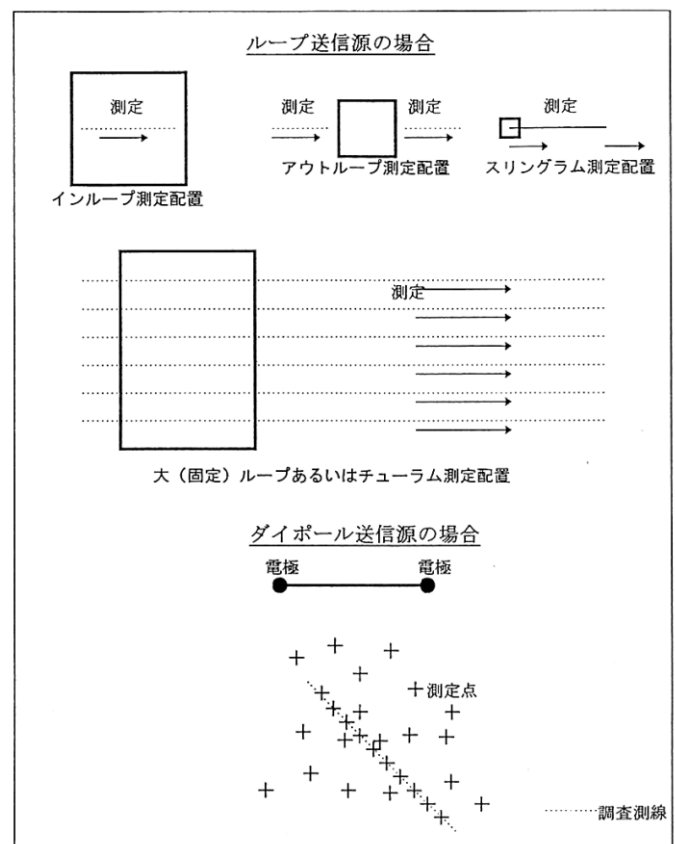


図3 TDEM法の測点配置

(1) インループ測定

TDEM 法の送信源は探査目的に応じて一辺 5m から数 100m 以上の矩形ループをトンネル測線上に設置する。深さ 150m 程度までの調査には、60m 程度の大きさが必要であり、また深さ数 100m までの調査の場合、1 辺 100m 前後のループを敷設する。インループ測定法の概要を図 4 に示す。送信ループは、60×60m の矩形送信ループをトンネル測線上及び周辺に設置し、一般にはセンサをループ内に配置する。

図 4 では、まず No.30+40～No.31+00 に送信ループを設置し、送信ループ内の No.30+50 から No.30+90 まで 10m ピッチで測定を行う。5 地点で測定した後送信ループを撤収し、今度は No.30+90～No.30+50 に同じく矩形送信ループを設置する。その後、同様に No.31+00 から No.31+40 まで 10m ピッチでセンサを設置し、各点において測定を行う。以下、このループ撤収・ループ設置・測定の作業を繰り返し、トンネル縦断方向の比抵抗測定を行う。

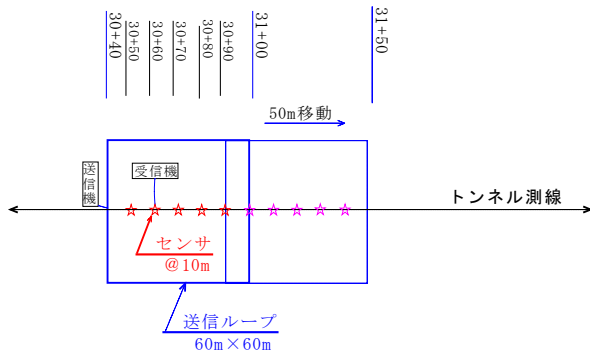


図 4 インループ測定概要

(2) アウトループ測定

地表にケーブルを一辺 60m の矩形に配置する（送信ループ）。センサはトンネル軸線上で、ループの外側 10m の位置に設置する（図 5）。測定に際しては、送信ループに電流を流し、これを OFF にした後、磁場の変化を記録する。一回の測定が終了したら送信ループとセンサをトンネル軸に沿って 10m 移動させ再び計測する。トンネル軸に沿ってこれを順次繰り返す。

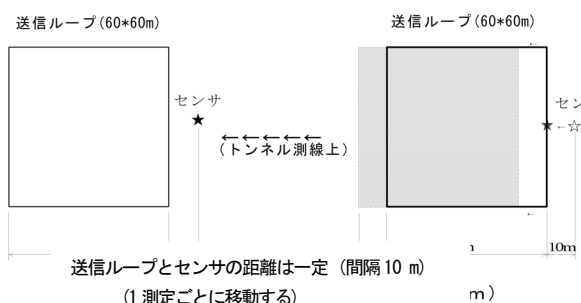


図 5 アウトループ測定概要

2.3 解析方法

解析は、一般に図 6 に示すフローに沿って行われる。測定電圧値は雑音処理のためのスタッキングおよび各種のフィルタリングを行った後、磁場変化率 ($\frac{dhz}{dt}$) に変換し、さらに式 (1) 式～式 (4) を用いて見掛け比抵抗値 ρ_a に変換する。時間領域の電磁法の場合、時間の早い Early time の領域と、電流遮断後、時間の経過した Late time の領域で見掛け比抵抗の漸近的な式を用いている。これらは、ループ送信源の場合とダイポール送信源の場合で異なる。

ループ送信源の場合:

$$\text{Early-time} \quad \rho_a = \frac{-\mu_0 a^3}{3I} \left\{ \frac{\partial hz}{\partial t} \right\}^{-2/3} \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{Late-time} \quad \rho_a = \frac{I^{2/3} \mu_0 a^{4/3}}{20^{2/3} \pi^{1/3} t^{5/3}} \left\{ -\frac{\partial hz}{\partial t} \right\}^{-2/3} \dots \dots \dots (2)$$

ダイポール送信源の場合:

$$\text{Early-time} \quad \rho_a = \frac{2\pi \mu_0 r^4}{3p} \left\{ \frac{\partial hz}{\partial t} \right\}^{-2/3} \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Late-time} \quad \rho_a = \frac{p^{2/3} \mu_0 a r^{2/3}}{40^{2/3} \pi t^{5/3}} \left\{ \frac{\partial hz}{\partial t} \right\}^{-2/3} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]、 t は送信遮断後の経過時間 [s]、 a は送信ループの半径 [m]、 I は送信電流値 [A]、 r は送受信点間距離 [m]、 p は電気ダイポールモーメントで送信電流値とダイポール長との積 [Am] である。

この見掛け比抵抗値を送信遮断後の経過時間ごとにプロットした見掛け比抵抗曲線を作成する。次にこの見掛け比抵抗データから比抵抗構造の初期モデルを決定する。見掛け比抵抗曲線から各測定点下の比抵抗構造を求める際には 1 次元のインバージョンが使

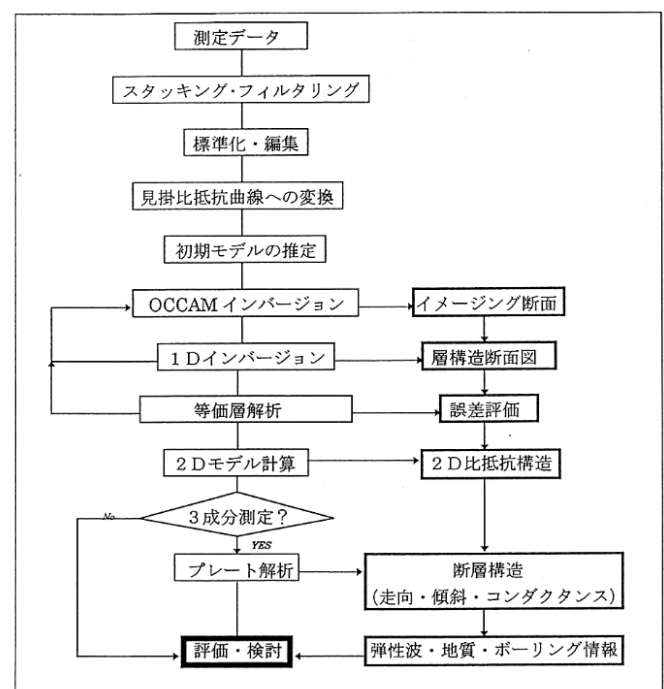


図 6 TDEM 法の解析処理フロー例

われる。これは水平多層構造を仮定した各層の比抵抗・層厚を測定データから非線形最小二乗法により求めるものである。インバージョンによって求められた層厚・比抵抗値等の解のもつ誤差や独立性を評価するために、等価層解析やリゾリューション・マトリックスを検討する。一方、地下の比抵抗構造をより視覚化するために最近ではスムーズインバージョンと呼ばれる処理が併用される。これは地下の比抵抗値が連続的に変化する多層水平成層構造を仮定し、その層厚を固定して各層の比抵抗値のみをインバージョンによって自動的に求めるものである。各層厚は地表から地下深部に向かって対数的に厚くなるように与える。この解析方法から得られた結果は、地下の比抵抗構造を深度方向および水平方向の比抵抗の連続的な変化として等値線で図化できる。このため、3次元的不均質物質の位置や比抵抗値を同定するのに適するという長所をもつ。TDEM法のデータ解析では一次元解析が使用されることが多い。本研究では次に示すように2種類の一次元インバージョンを各測定点で実施し、それらの結果を総合的に判断して解析結果としている。

(1) スムーズインバージョン

スムーズインバージョンは、地下の比抵抗値が連続的に変化する水平成層構造を仮定し、測定データよりその層厚を固定して各層の比抵抗値のみをインバージョンによって求めるものである。測定データからソフトが初期モデルを設定し、隣り合う地層での比抵抗値がなめらかになるような制約条件のもと、全体の比抵抗構造を求めるが、境界面の深さが曖昧になる場合がある。本解析法では各測定点の深度方向データを最大15層に分けて解析し、イメージングとして比抵抗構造図を作成する。

(2) 水平多層インバージョン

本解析では、水平成層構造を仮定して、測定で得られたデータを最もよく再現する地層の比抵抗値と層厚を、非線形最小二乗法により求める。ここでは地層を3層～5層とした。比抵抗コントラストの大きな地層境界に対しては、スムーズインバージョンよりも境界面を捉えるのに有利と考えられる。

なお、本研究で用いた一次元逆解析ソフトは、Interpex社製IX-IDである。このプログラムは、式(1)などの見掛け比抵抗の式を使って任意の電極・ループ配置のモデル計算やインバージョンを行うことができる。

また、水平方向の構造変化が激しく、1次元インバージョンでは地下構造を求められないと考えられる場合は、2・3次元モデル計算を行う。例えば有限差分方程式あるいは積分方程式により、与えられた2・3次元の比抵抗モデルからの電磁場応答を算出するものなどが開発されている。さらに、断層構造を調査する目的で3成分磁場測定を行う場合もある。プレート(板状)解析と呼ばれる手法で、断層の位置・深度・連続性・傾斜・導電率の抽出を行う。断層の幾何学的形状は矩形と仮定し、その電気的性質はコンダクタンス(矩形の導電体の厚さと電気伝導度の積)と呼ばれる量で与える。これら断層の幾何学的形状や電気的性質については、モデル計算を行って求める。

2.4 TDEM法探査の特徴

TDEM法によって調査した比抵抗構造は、従来の屈折法弾性波探

査、二次元比抵抗探査に比べて、以下に挙げるトンネル掘削上問題となる地質情報が精度よく取得できる特徴がある(以後、本論文で述べる電気探査は、二次元比抵抗探査と記す)。

- ①探査深度が、屈折法弾性波探査・二次元比抵抗探査において地下100m程度なのに対し、TDEM法のトンネル探査では探査深度が300mまでの探査実績がある。
 - ②地質急変箇所(断層破碎帯、熱水変質帯)の位置、規模が解明できる。
 - ③地層境界が明確になる。
 - ④地下水の状態を把握できる。
 - ⑤屈折法弾性波探査では探査不可能である、上層が硬岩、下層が軟岩といった地質構造(逆転層)が解明可能である。
- 以上の詳細な地質情報がトンネル掘削前に与えられることにより、合理的な掘削工法や的確な支保を選定でき、効率的、経済的かつ安全なトンネル施工を実施することができる。
- また、TDEM法の欠点としては以下の項目が挙げられる。
- ①探査の結果得られる物性値が比抵抗値であり、トンネルの地山評価に直接使われる力学値ではない。
 - ②地山の比抵抗値は、地下水、岩盤の間隙率、割れ目の状態等が複雑に影響しており、地山性状の推定が難しい場合もある。
 - ③地表の探査測線付近にある高圧線等のノイズ源により、データの品質が悪くなり、探査結果の信頼性が低下する。

3. 膨潤性地山での岩盤特性

トンネルで問題となる地山の膨潤性は、スメクタイトの含有量、陽イオン交換容量(Cation Exchange Capacity, 以下はCECと記す)等の岩石の膨潤性指標と、地山強度比(Competence Factor)を総合的に判断し、その可能性が評価される。この指標の中で、CEC値は $35 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上で膨潤性を示すとされている⁹⁾。また、地山強度比とは、岩石の一軸圧縮強度を単位体積重量と土被り厚の積で割った値で、2以下で問題になるとされている。そこで、トンネル施工管理の際にCECが大きく膨潤性の指標を超過するような地山を、TDEM法を用いた比抵抗探査により事前に捉えることができれば、非常に有意義と考える。スメクタイト等の膨潤性粘土鉱物を含有する泥岩は、それを含有しない泥岩よりも比抵抗値が低くなるとされる⁹⁾。粘土鉱物が比抵抗値に与える影響は、粘土鉱物がもつCEC値の大きさと深く関連する。物理検層の分野では、CECの値をパラメータとした式(5)、式(6)の実験式が提案され、岩石に含有される粘土鉱物の影響を定量的に評価することが行われている¹⁰⁾。

$$\sigma_R = \frac{1}{F} (\sigma_w + BQ_v) \quad \dots \dots (5)$$

$$Q_v = \text{CEC} \times \rho_d \frac{(1-\phi)}{\phi} \quad \dots \dots (6)$$

ここで、 F は δ_R (岩石の電気伝導度)と δ_w (水の電気伝導度)をグラフ上にプロットしたときの傾きで定義される実験的な地層係数、 Q_v は孔隙容積 1000 cm^3 あたりの交換性Naイオンのグラム当量数、 B は対イオン(粘土鉱物表面の電荷に対して異符号の電荷をもつイオン)による当量伝導率であり、岩石の乾燥密度を、 ρ_d 全孔隙率を ϕ とする。この実験式(5)、(6)より、 δ_R (比抵抗の逆数)は、CECの増加

に伴い増加する¹⁰⁾。しかし、現実の室内試験ではこれらのパラメータは一般には求められておらず、これらの式を使った定量的な評価は困難である。ここでは、岩石の比抵抗値と CEC の関係及び岩石の膨潤特性を用いて、TDEM 法をトンネル事前調査に用いることにより、膨潤性泥岩の分布を検討する。

4. 膨潤性泥岩分布域での TDEM 法

膨潤性泥岩が分布している可能性のある東北支店金田一トンネルで、トンネル経路に沿った鉛直断面の比抵抗構造を求めるため、TDEM 法を実施した。本トンネルは土被りが 300m を超えており、屈折法弾性波探査では捉えられていない新第三紀層の泥岩中に存在する、極めて低比抵抗の膨潤性泥岩の分布を求めた結果を示す。本探査は、送信ループに断続電流を流すことによって発生する二次磁場を、送信ループの内側にセンサを設置するインループ測定及び外側にセンサを設置するアウトループ測定により、10m 毎の測点で取得した。また、ボーリングコア及びトンネル切羽で採取した岩石を用いて、室内試験として一軸圧縮強度試験($\leq 4\text{MPa}$ が膨潤性の指標⁹⁾を行い、地山の膨潤性判定のため、X線定量試験、CEC 試験等を実施した。

4.1 地質概要

金田一トンネルは、延長約 8.7km、最大土被り約 320m で、南側工区と北側工区に分けられており、TDEM 法等により、南側工区を中心に調査を行った。地表踏査・屈折法弾性波探査から得られた事事前調査結果を図 7 に示す。トンネル掘削部は泥岩が分布しており、その上部を砂岩、凝灰角礫岩が覆っていた。また、屈折法弾性波探査によれば、工区境付近を中心とした区間のトンネル掘削高さ付近は、弾性波速度として 2.9km/s が確認され、破碎帯などに相当する低速度帯は認められなかった。南側工区に先行して掘削されていた北側工区では、南側工区より先に工区境(574.46 km)に到達したが、574.60 km 付近より工区境にかけて、内空変位が最大 300mm に及ぶ大変位が発生した。この原因は、地山を構成する泥岩が膨潤性を示すこと、さらに土被りが約 320m と大きく、かつ岩石の一軸圧縮強

度が 5.6~7.5 MPa と低く、地山強度比が 1.2~1.6 と基準である 2.0 を下回るなどによるものと考えられた。この北側工区の大変位区間に対し、大規模な対策工事(鋼製支保工上下半 H-200, H-200 インバートストラット、先受ボルト、鏡ボルト、下向きロックボルト 9m 打設等)が施工された。南側工区は北側工区が工区境に到達した時点で、工区境まで約 850 m 地点(573.60 km 付近)を掘削していた。北側工区での工区境付近の大変位に対し、南側工区においても、掘削工法および工事工程を精査する必要が生じ、追加調査により詳細な地質情報を収集することになった。

4.2 追加調査

(1) TDEM法

地表から、トンネル経路に沿って TDEM 法を実施した。図 8 の金田一トンネルでの測定点配置図に示すように、測定間隔は 10m、測点数は 88 点とした。金田一トンネルでは最大土被りが約 320m とかなり深いことから、探査深度を大きくするため、送信はトンネル経路を中心に 1 辺 100 m の矩形ループを設置し、送信機には

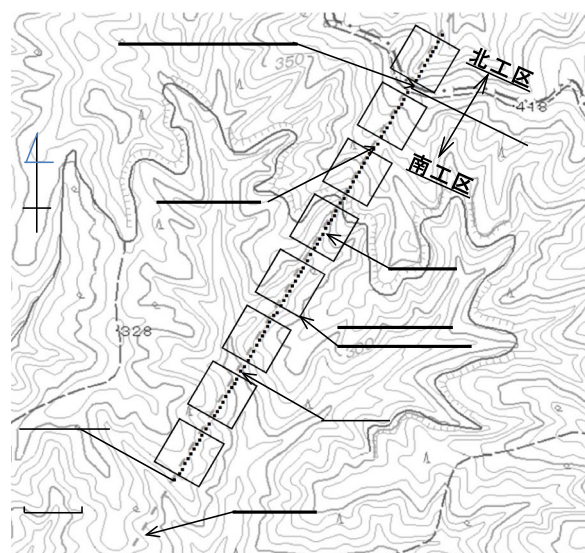


図 8 金田一トンネル測点配置図

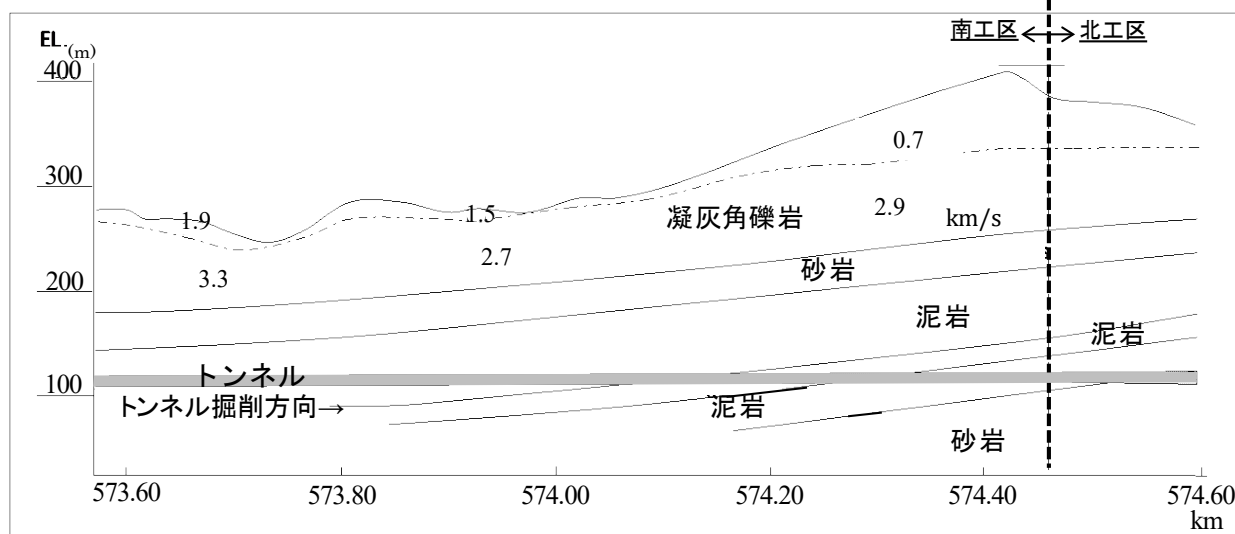


図 7 金田一トンネル事前調査結果

GEONICS社製EM-57を用いて12 Aの断続電流を流して送信モーメントを大きくし、有効コイル面積が200 m²のセンサを使用した。

図9.1に、測定結果をスムーズインバージョンにより解析し、その結果を色分けして比抵抗構造を示す。また、水平多層インバージョン結果を、図9.1に黒点線で示した。573.60～574.30km区間の測定データは2層構造、574.30～574.60km区間は3層構造と解析された。この3層構造部分の比抵抗と層厚の各測定点での平均値を表1に示す。第1層から第3層までの比抵抗がそれぞれ、24.5Ωm、5.6Ωm、0.5Ωm、層厚はそれぞれ、84.3 m、104.8 mであった。特に第3層は、0.5Ωmと極めて低比抵抗の層が検出され、このうち574.46～574.60km区間の北側工区は、実際の工事において地山が膨潤性を示した大変位区間に相当した。

(2) 室内試験

一軸圧縮強度試験、X線定量試験、CEC試験、塑性試験等の室内試験を、南側工区(573.60km)及び北側工区(574.46km)の掘削ズリに対して行った結果を、表1に示す。北側工区の泥岩はCECが34～115 cmol(+) $\cdot$ kg⁻¹と基準値35 cmol(+) $\cdot$ kg⁻¹を大きく超過し、またX線定量試験によるスメクタイトの含有量は基準値20%⁸⁾を超過する試料が多く、さらに地山強度比は1.2-1.6と膨潤性判断基準値の2を下回っていた。これに対して南側工区の膨潤性のない573.60 km付

表 1 金田ートンネル室内試験結果

試験項目		南工区(573.60 km) 砂岩泥岩互層	北工区(574.46 km) 泥岩	膨潤性 基準値
一軸圧縮強度	MPa	10.8～20.5	5.6～7.5	≤ 40
地山強度比		4.00～6.90	1.40	≤ 2.00
X線定量試験	%	24～34	10～34	≥ 20
CEC	cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	32.7～40.3	34～115	≥ 35
塑性指数	%	52.1～54.9	—	≥ 70

近では、CECが32.7～40.3 cmol(+) $\cdot$ kg⁻¹と基準値付近であり、X線定量試験でも基準値を超過していたが、地山強度比は4.0-6.9と膨潤性判断基準値の2を大きく上回っていた。

(3) 水平ボーリング

掘削終了後の北側工区境より、南側工区へ水平ボーリングを行い、膨潤性泥岩の分布域調査を試みた。膨潤性を示す地層のボーリングコアは、ディスク現象(通常の連続したコアが得られないで、コアが一定の厚さの円板に割れる現象¹⁾)が顕著とされるが、今回の150mの水平ボーリングコアにおいても、ディスク現象が多くみられた。

これらの追加調査結果から、南側工区の工区境付近の574.30～574.46km 区間でも膨潤性泥岩が出現する可能性が高いと推定された。

4.3 トンネル掘削結果と、TDEM法及び屈折法弾性波探査結果の対比

トンネル掘削時の切羽観察結果をまとめたものを図9.2に示す。南側工区の574.33～574.46km区間は膨潤性泥岩が出現し、160mmを超える内空変位が発生したことにより、対策工事を必要とした。膨潤性泥岩の出現範囲は、図9.2に示したTDEM法の水平多層インバージョン解析結果である0.5 Ωm層の範囲と、ほぼ一致していた。

一方、屈折法弾性波探査結果では、573.60～574.60km区間では2層構造であり、トンネル掘削高さの弾性波速度は、南から3.3、2.7、2.9km/sで膨潤性泥岩を捉えていない。地表踏査の結果からはトンネル掘削高で泥岩分布が予想されていたが、膨潤性地山の出現可能性は示されていないかった。

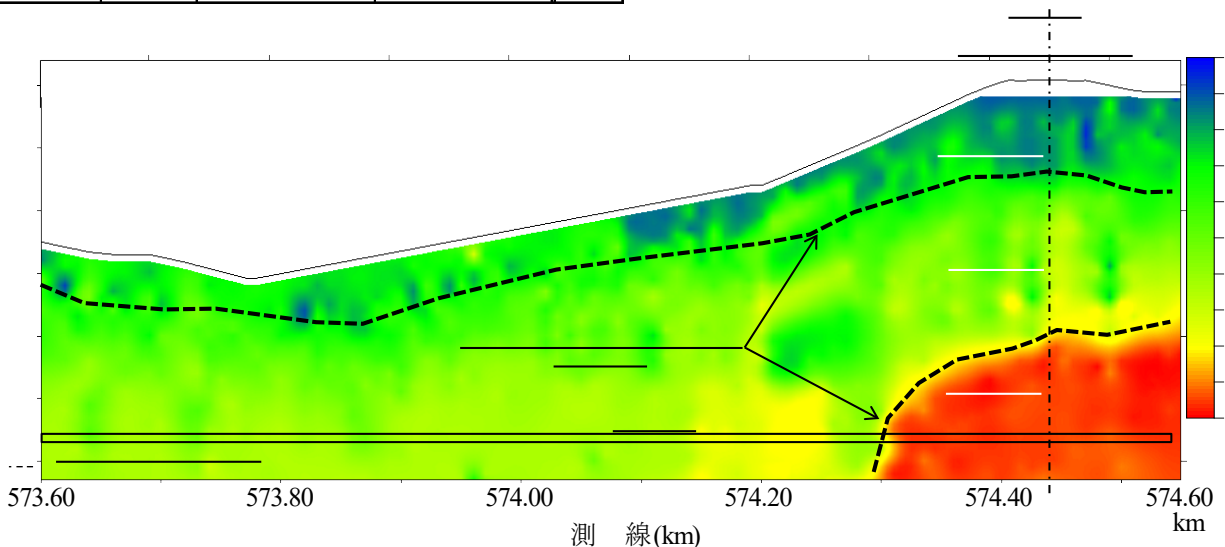


図 9.1 金田ートンネル比抵抗構造図

No	573.96				574.21		574.33		工区境 574.46km	
Geology	砂岩泥岩互層				泥岩		礫質泥岩		膨潤性泥岩	
	573.60	573.70	573.80	573.90	574.00	574.10	574.20	574.30	574.40	574.50km

図 9.2 金田ートンネル切羽観察結果

4.4 まとめ

土被りが300mを超える金田一トンネルでは、TDEM法による探査とトンネル掘削結果を比較した結果、膨潤性を示さない地層は比抵抗が $5.6\Omega\text{m}$ 、膨潤性を示した地層は $0.5\Omega\text{m}$ となったことからその分布を的確に捉えることができた。屈折法弾性波探査結果では、弾性波速度が 2.9km/s と同じ地層として捉えており、膨潤性の有無を判別できていなかった。

本章で示したように屈折法弾性波探査で膨潤性が判別できない地層でも、TDEM法によって膨潤性を示さない岩盤と示す岩盤とを判別できることが判明した。

5. 数値シミュレーション

4章で示した金田一トンネルでTDEM法によって明らかとなった低比抵抗層中に存在していた膨潤性を有する極低比抵抗層が、どの程度まで探査・解析が可能であるかを明らかにするために、数値シミュレーションを行った。

また、地下深部探査に有効とされるシュランベルジャー法においてもフォワード計算により、電極間隔(AB/2)と見掛け比抵抗の関係性を計算した。土木分野の探査では、電気探査として二次元比抵抗探査が用いられることが多い。これは、二次元的な比抵抗分布が簡易に得られるためであるが、遠電極が取りづらいことや、100mを超える土被りに対しては、二次元比抵抗探査は探査深度が大きく、適用が困難等の問題点があるため、本検討では、探査深度が大きい場合に用いられるシュランベルジャー法により検討することとした。また、シュランベルジャー法をはじめとして大深度に対する電気探査は、遠電極の設置、測定測線の不安定さから、急峻地形や伐開の困難さが条件となる山岳トンネル探査では、適用が難しい。これらのTDEM法のフォワード計算による電磁応答及び、シュランベルジャー法のフォワード計算による電極間隔(AB/2)と見掛け比抵抗の関係性を用いて、それぞれスムーズイン

バージョンを行い、低比抵抗層に対する探査精度を検証し、その結果を比較した。

5.1 フォワードモデル

水平多層構造モデルのフォワード計算を行い、低比抵抗層に対する探査精度を検証した。ここで、水平多層構造モデルは金田一トンネルでの水平多層インバージョンによる比抵抗構造解析結果(表2)の通りに3層構造とした。そして、1層目と2層目の比抵抗値と層厚を固定し、最下層である第3層の比抵抗値を様々に変化させ、それぞれの電磁応答を計算して比較した。

金田一トンネルで使用したEM-57の直流電流遮断後のサンプリング時間は表3の通りである¹²⁾。本装置では3つの測定時間帯H、M、Lについてそれぞれ20の時間帯(gate)で測定されており、測定時間範囲は全体で $0.008813\sim 69.780\text{ msec}$ である。図10に、表2の比抵抗モデルにおいて、3層目の比抵抗値を $0.1\sim 5.0\Omega\text{m}$ の範囲で変化させた場合の、測定時間帯Hでの受信コイルの起電力を示す。各起電力は、 $0.008813\sim 1.0\text{ ms}$ まではほぼ同じ値を示しているが、 1.0 ms を過ぎると、第3層の比抵抗値の変化に応じた起電力の変化が見られた。

表2 金田一トンネル層構造モデル

	比抵抗値(Ωm)	層厚(m)	地表からの深度(m)
第1層	24.5	84.3	地表～GL-84.3m
第2層	5.6	104.8	GL-84.3～GL-185.1m
第3層	0.5		GL-185.1m以深

5.2 インバージョン解析

5.1節で得られたTDEM法の数値モデル計算結果を、スムーズインバージョンで解析した結果を図11に示す。モデルは3層構造で、2層目と3層目の境界深度は約190mである。トンネルは3層目に計

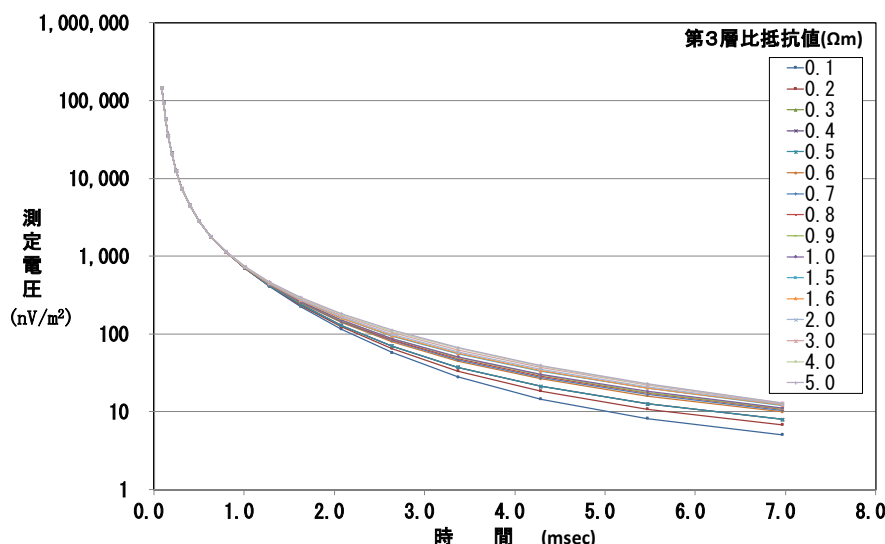


図10 第3層目を $0.1\sim 5.0\Omega\text{m}$ まで変化させたときの磁場強度

表3 測定時間(PROTEN-57)

gate	H (msec)	M (msec)	L (msec)
1	0.08813	0.352	0.881
2	0.1069	0.427	1.060
3	0.1313	0.525	1.310
4	0.1619	0.647	1.610
5	0.2006	0.802	2.000
6	0.2506	1.000	2.500
7	0.3144	1.250	3.140
8	0.3956	1.580	3.950
9	0.4994	1.990	4.990
10	0.6313	2.520	6.310
11	0.7994	3.190	7.990
12	1.014	4.050	10.140
13	1.287	5.140	12.870
14	1.636	6.540	16.360
15	2.081	8.320	20.810
16	2.648	10.590	26.480
17	3.373	13.490	33.730
18	4.297	17.190	42.970
19	5.475	21.900	54.750
20	6.878	27.920	69.780

画されており、土被りは300 mである。インバージョン結果では地表から深度100 mまでは、3層目の比抵抗の影響を受けず、殆んど違いがみられない。しかし、深度100 mから150 m間で3層目の比抵抗の影響を受け、解析した比抵抗に変化が見られる。さらに200 mではその変化が広がり、深度400 mで3層目の真の比抵抗とほぼ一致した。

図11に示す深さ300 m(トンネル断面での土被り高さ)での比抵抗値について、3層目の比抵抗が $0.5 \Omega\text{m}$ の時($r_{0.5}$)を100%として、その比抵抗を変えたときの計算結果($r_{0.3-2.0}$)との比率を図12に示す。3層目の比抵抗を0.3から $2 \Omega\text{m}$ まで変化させたとき、その比率は75%から260%まで変化し、深部の低比抵抗層の変化に対して測定値が大きく変化することがわかった。これらの結果から、TDEM法は低比抵抗層の下位に存在するさらに低い比抵抗層を探索することが可能で、膨潤性地山の探索・解析に適用可能であることが示された。

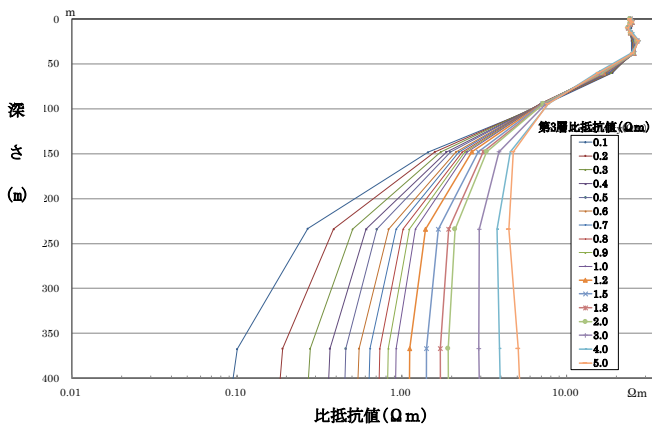


図11 第3層目を0.1～ $5.0 \Omega\text{m}$ まで変化させたときのスームスインバージョン結果

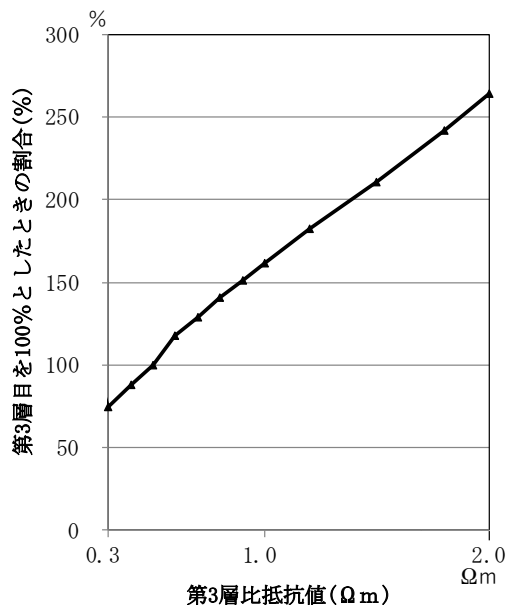


図12 第3層目の比抵抗を100%とし、第3層を0.3～ $2 \Omega\text{m}$ まで変化させた時の比率

(2) 二次元比抵抗探査法：シュランベルジャー配置

① フォワードモデル

二次元比抵抗探査法は、大深度探査に汎用されるシュランベルジャー配置を用いた場合のフォワード計算を行った。計算モデルは(1)と同じく、表2に示す金田一トンネルの3層構造を設定し、その3層目比抵抗値を $0.1 \sim 5.0 \Omega\text{m}$ まで各々変化させた場合の測定値を計算した。図13に3層目の比抵抗値を変化させた場合の電気探査法(シュランベルジャー配置)でのフォワード計算結果を示す。図13より、電流電極間隔が0～150 m間では測定電圧に変化は見られないが、150 mを超えると徐々に変化が見られた。

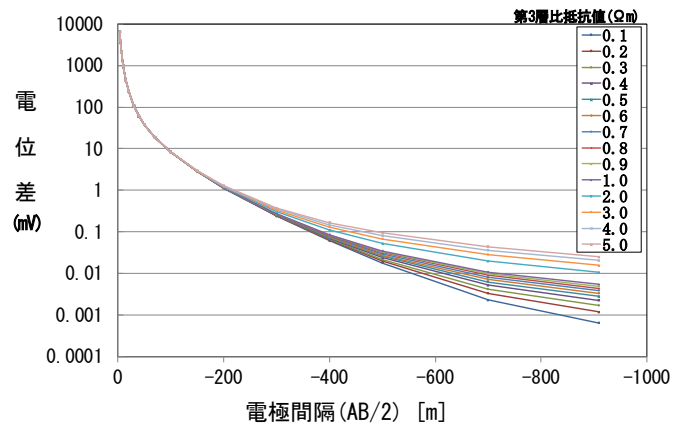


図13 第3層目を0.1～ $5.0 \Omega\text{m}$ まで変化させたときの電位差

② インバージョン解析

金田一トンネルの構造を模した比抵抗3層構造の最下層の比抵抗値を0.1から $5.0 \Omega\text{m}$ まで様々な二次元比抵抗探査法の数値モデル計算を行った結果をスームスインバージョンで解析できるかをTDEM法の際と同様に検証した。図14に、第3層目の比抵抗値を変化させた場合の二次元比抵抗探査法(シュランベルジャー配置)でのスームスインバージョン結果を示す。図14より、比抵抗値の変化は各測定値とも、地表～GL-50 mまで約 $25 \Omega\text{m}$ を示し、その後徐々に比抵抗値は低下し、GL-150 m以下で各計算時に設定した第3層の比抵抗値を示していることがわかる。すなわち、 $25 \Omega\text{m}$ 層の下位層が表2の3層目比抵抗層になってしまい、膨潤性を示さない層

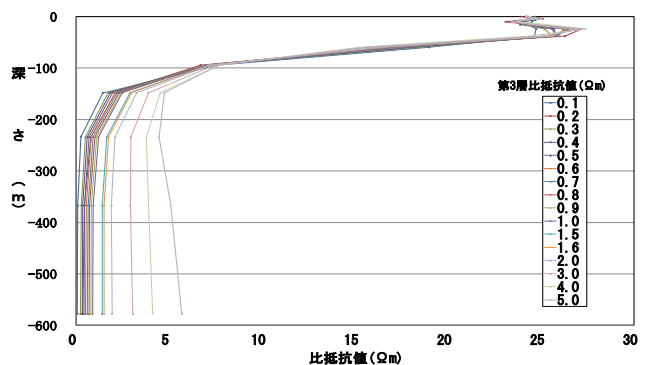


図14 第3層目を0.1～ $5.0 \Omega\text{m}$ まで変化させたときのスームスインバージョン結果

と、示す層の区別ができていない。この結果は、探査対象区間が2層構造であることを示しており、Aトンネルでの25 Ωm 層の下位に

膨潤性のない地層 (5.6 Ωm 層) と、膨潤性のある地層 (0.5 Ωm) の判別ができないことがわかる。この直流比抵抗法における低比抵抗構造に対する限界は、Saturation Effect⁶⁾として知られている。

(3) まとめ

数値シミュレーションによる検討により、極めて低い比抵抗値を示す地層に対するTDEM法の有効性を検証した結果、低比抵抗層に対する感度が高く、5.6 Ωm という低比抵抗値層の下位に存在するさらに低比抵抗の0.5 Ωm 層が精度良く探査できることがわかった。

6. 結論

土被り300m以上のトンネルで、低比抵抗層中で膨潤性の無い層と、膨潤性のある極めて低い比抵抗層を分離して探査することができた。さらに、数値シミュレーションによる検討により、極めて低い比抵抗値を示す地層に対するTDEM法の有効性を検証した結果、5.6 Ωm という低比抵抗値層の下位に存在するさらに低比抵抗の0.5 Ωm 層が探査できることがわかった。

本論文では、TDEM法を用いることにより、土被り200m以上のトンネル地山の比抵抗分布を探査できることがわかり、さらに膨潤性地山の特徴の一つである低比抵抗層を探査できることが示さ

れた。

今後、膨潤性地山の深度及び広がり、を、本手法の導入により積極的に調べていくことが、トンネル施工の事前調査にとって非常に有効であると考ええる。

参考文献

- 1) 土木学会：より良い山岳トンネルの事前調査・事前設計に向けて、土木学会 p186, 2007
- 2) 林宏一・斎藤秀樹 1998：高精度屈折法地震探査の開発と適用例，物理探査，51，p471-492，1998
- 3) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，1998
- 4) 原敏昭・西牧均・和田一成・斎藤章：TDEM法のトンネル調査への展開，応用地質，38，p337-348，1998
- 5) 狐崎長琅：応用地球物理学の基礎，古今書院，p114-116，2001
- 6) Fitterman, V. D. : Equivalence Behavior of Three Electrical Sounding Methods as applied Hydrogeological ,1988
- 7) 斎藤章：物理探査学会第10回基礎講座講習会テキスト,p47-52，1994
- 8) 土木学会:トンネル標準方書山岳工法・同解説，土木学会，土木学会，p45，201
- 9) Waxman, M.H., and Smith L.J. : Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands, SPE Transactions Volume 243, p 107-122,1963
- 10) 高倉伸一:高密度電気・電磁探査法による比抵抗構造の調査と解釈に関する研究，京都大学大学院工学研究科資源工学研究科博士論文，第5章～第6章,2004
- 11) 菅原勝彦・亀岡美友・斎藤敏明・岡行俊・平松良雄：コアディスキング現象に関する研究，日本鉱業会誌，1089，p797-803，1994
- 12) GEONICS LIMITED : PROTEM 57 D '(C)' OPERATING MANUAL, p36.1992.