

(81) T D E M 電磁探査法によるトンネル調査

THE TUNNEL SURVEY BY TIME DOMAIN ELECTRO MAGNETIC METHOD

原 敏昭*・西牧 均*・和田 一成**・斎藤 章**・関根 一郎*

Toshiaki HARA, Hitoshi NISHIMAKI, Kazushige WADA, Akira SAITO, Ichirou SEKINE

Geological sounding method, such as seismic refraction, geo-electrical methods and others have been utilized to investigate faults, crush zones and others. But there is sometimes a lack of clear geological information obtained by these conventional methods. So we are applying TDEM (Time Domain Electro-Magnetic method) in site assessment for civil engineering projects, especially tunnel survey. In this report TDEM survey was conducted around the planned 'A' tunnel to estimate the geological structure. The exploration before construction indicated "Blind layer", which is difficult to investigate by seismic refraction in the tunnel line.

Key Words: TDEM, Tunnel survey, Electro-Magnetic method, Resistivity, Blind Layer

1. まえがき

トンネル調査における物理探査としては、一般的には弾性波探査が行われ、その結果に基づき地山評価・事前設計が行われている。しかし実際にトンネルを掘削すると事前設計とは大きく異なり、大幅な設計変更を余儀なくされることもある。そこで、筆者らは弾性波探査では調査が難しいとされているトンネル地山に、従来、鉱山・地熱等の地下数百mから数千mの深部資源探査・温泉調査等に用いられてきたTDEM法（時間領域電磁探査法）を適用し、得られた比抵抗値によりトンネルの地山評価を試みている。本シンポジウム数回にわたり、TDEM法を土木分野へ適用する時の測定法及び解析法について報告してきた。今回は、土被りが最大約220mと大きく、また上層が硬岩（高速度層）で下層が軟岩（低速度層）のブラインド・レイヤーとなっているため、弾性波探査では原理上探査が不可能であるトンネル地山においてTDEM探査を行った。この探査結果を比較・対照しながらトンネルの地質構造調査・地山評価を試みた。このTDEM法による探査結果を事前の先進ボーリング及びトンネル掘削結果等と対比したところ、良好な結果が得られたので報告する。

* 正会員 戸田建設㈱土木技術開発室

** 三井金属資源開発㈱物探部

2. トンネル調査

2. 1 地質概要

調査地域は標高800～850mの比較的起伏の少ない台地状の地形であり、基盤層である新第三紀中新世の砂岩・泥岩・凝灰岩層の互層を覆って分布する第四紀更新世の溶結凝灰岩が形成した火砕流台地である。この溶結凝灰岩が、基盤層である砂岩・泥岩・凝灰岩層の互層とこれを貫く貫入岩類及び未固結堆積物のキャップロックとなり、弾性波探査では原理上探査不可能な地質条件（ブラインド・レイヤー）となっている。トンネル設計段階で行った事前調査（弾性波探査及び地表からのボーリング結果）を図-1に示す。

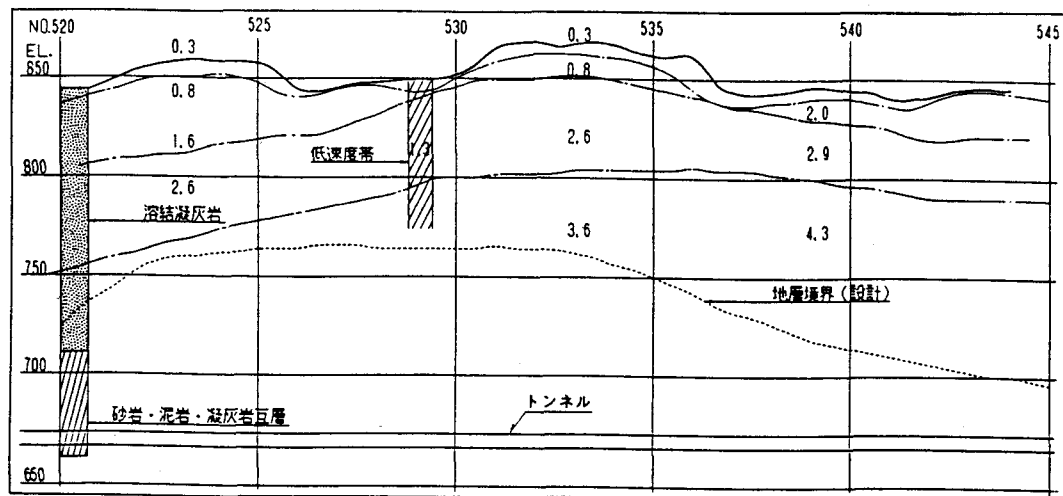


図-1 事前調査結果

2. 2 探査方法及び解析方法

トンネル測線に沿った断面の比抵抗構造を求めるため、1成分TDEM探査（Z成分：磁場の鉛直成分を測定、測定間隔:10m、測定点数:46点）を実施した。送信は、図-2に示す通り、1辺60mの正方形送信ループを、測定進行に伴って順次移動・設置し、約1.0～3.0(A)の断続電流にて行った。測定は基本的に送信ループの中にセンサを設置するイン・ループ測定にて行った。サンプリングは、u(送信電流遮断後、6.8～696 μ sec間を測定)、v(35～2792 μ sec間)、H(88～6978 μ sec間)の各測定モードを用い、60～120(S)のスタッピングを行った。使用機器はGEONICS社製のPROTEM-47である。なお、比抵抗構造は地下10m～150mを19層に分割し、各層毎の比抵抗値を拘束条件付きで解析するスムーズ・インバージョンおよび、この解析結果に基づき、水平多層インバージョンでの解析を行い、両者の結果を比較・検討した。また、室内比抵抗試験により溶結凝灰岩、貫入岩である流紋岩等の岩石の比抵抗値を求めた。

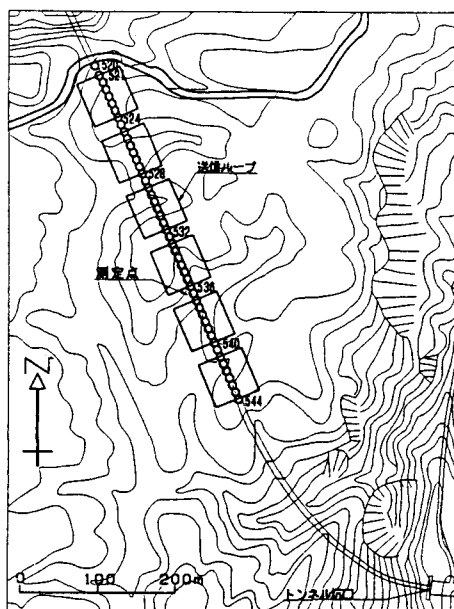


図-2 Aトンネル調査位置図

2. 3 探査結果

図-3にスムース・インバージョンによるイメージング結果を、図-4に水平多層インバージョンによる解析結果と掘削結果（先進ボーリングの結果を含む）の概要を示す。以下に測定・解析結果を記す。なお、切羽近傍の岩石を用いた室内比抵抗試験によれば、溶結凝灰岩は約500($\Omega \cdot m$)、流紋岩は約2,000($\Omega \cdot m$)となった。

1) 図-3より、全体的に調査地域は複雑な比抵抗構造であるが、上層部が高比抵抗、下層部が低比抵抗を示している。また、調査地域北側（図-4の左側）では単純な層構造を示しているが、南側では特に複雑な構造を示していることがわかる。すなわち、探査地域では同一層が水平に広がっているとは考えにくい。（図-3中のエラー・バーとは解析結果がとり得る値の範囲の最小値と最大値を示したものである。）

2) 図-4の水平多層インバージョン結果に示す通り、探査した全域では4層構造が得られた。この4層構造は、北側(N0.520~N0.532付近)で凸凹はあるが南下がりの比抵抗構造となっており、第1層が数百($\Omega \cdot m$)、第2層が数千($\Omega \cdot m$)、第3層が200~600($\Omega \cdot m$)、第4層が10~30($\Omega \cdot m$)となっている。

3) 探査地域南側(N0.532~N0.544)においては、比抵抗値により幾つかのブロックに分けられる。それらは、図-4よりトンネル掘削高での比抵抗値によって、以下の6ブロックに分けらる。またそれらは掘削結果によく対応している。

① 10~30($\Omega \cdot m$)のブロック（~N0.532+10；砂岩(Ss)・泥岩(Md)・凝灰岩(Tu)互層），

② 200~300($\Omega \cdot m$)のブロック（N0.532+10~N0.535+10付近；流紋岩(Ry)），

③ 100~200($\Omega \cdot m$)のブロック（N0.535+10~N0.538+10付近；溶結凝灰岩(Wtf)、湧水が多い），

④ 4~8($\Omega \cdot m$)のブロック（N0.539+10~N0.541+10付近；礫混り粘土層(GC)、落盤・湧水箇所を含む），

⑤ 150($\Omega \cdot m$)前後のブロック（N0.541+10~N0.542+10付近；流紋岩(Ry)），

⑥ 10~15($\Omega \cdot m$)のブロック（N0.542+10~N0.544+10付近；礫混り粘土層(GC)），

4) N0.529~N0.530にかけて、比抵抗構造に不連続性（段差）が見られる。これは、弾性波探査で捉えられた低速度帯に対応していると考えられる。

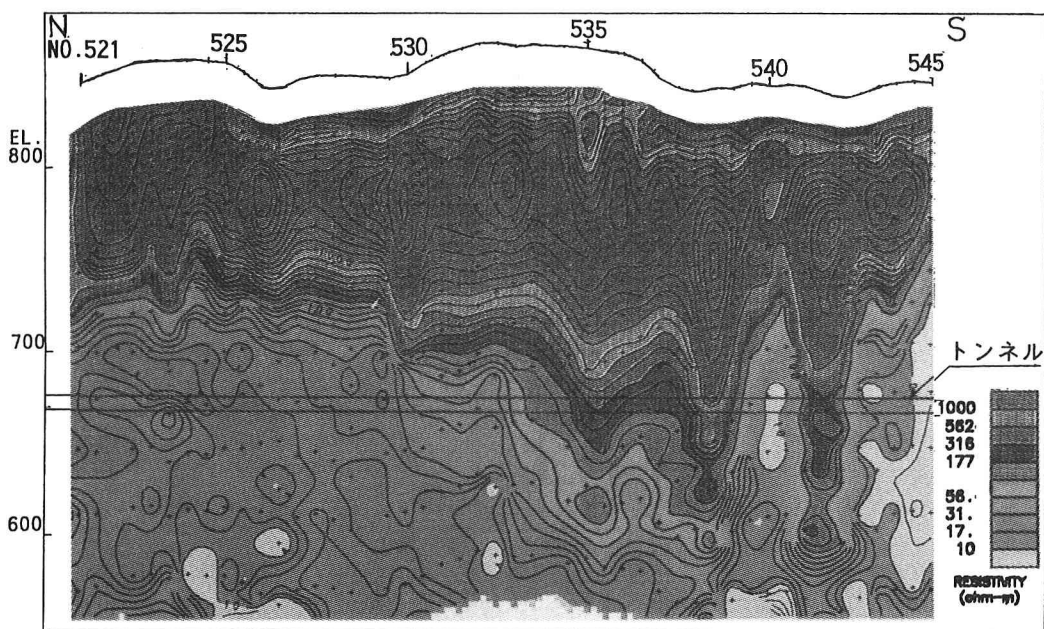
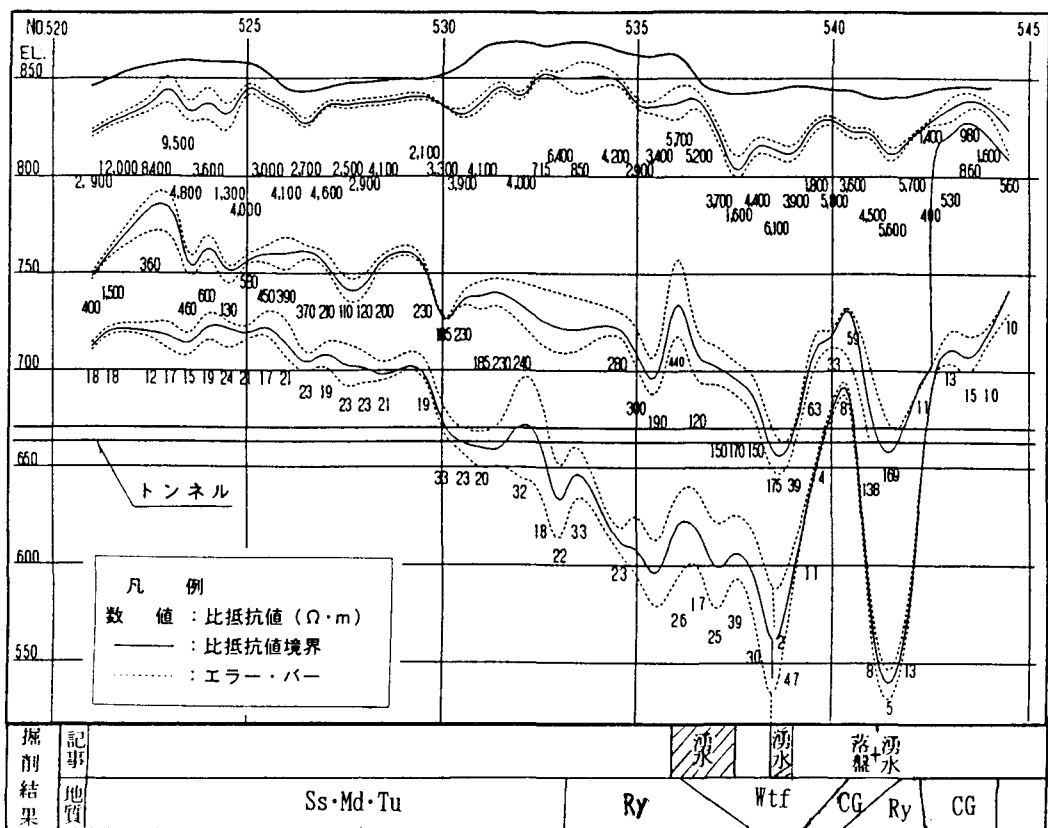


図-3 スムース・インバージョンによるイメージング結果



Wtf:溶結凝灰岩, Ry:流紋岩, Ss・Md・Tu:砂岩・泥岩・凝灰岩互層, CG:礫混り粘土層
図-4 水平多層インバージョン及び掘削結果

2. 4 多変量解析による比抵抗値と地山総合評価の検討

TDEM法によって得られた比抵抗値を設計・施工に反映させるため、トンネル掘削時の切羽観察結果による地山総合評価点と比抵抗値との対照を多変量解析によって検討した。トンネル施工中に行われる切羽観察は、地質状況の把握を行い、施工にフィード・バック

表-1 外的基準・アイテム・カテゴリ

外的基準	アイテム	カテゴリ
切羽の状態	1	安定
	2	露面から岩塊が抜落ちる
	3	自立
素堀面	1	時間がたつと緩み崩落する
	2	50cm以上
	3	10-5cm
割れ目(間隔)	1	全体に密着
	2	一部開口
	3	新鮮
割れ目(開口性)	1	新鮮
	2	酸化汚染で変色
	3	沈着物存在
割れ目(形状)	1	ランダム
	2	柱状
	3	層状、板状、片状
圧縮強度	1	500(kgf/cm ²)以上
	2	200 > δ ≥ 50(kgf/cm ²)
	3	50 > δ (kgf/cm ²)
風化変質	1	全体に未風化で新鮮
	2	部分的に風化
	3	全体(岩芯まで)に風化
湧水	1	なし
	2	滴水程度
	3	集中湧水
水による劣化	1	なし
	2	緩みを生ず
	3	軟弱化

表-2 解析結果

アイテム	カテゴリ	レンジ	偏相関係数
切羽の状態	1	0.4723	0.3131
	2		
	3		
素堀面	1	0.4549	0.4443
	2		
	3		
割れ目(間隔)	1	0.4292	0.5544
	2		
	3		
割れ目(開口性)	1	1.2835	0.6202
	2		
	3		
割れ目(形状)	1	0.8558	0.7505
	2		
	3		
圧縮強度	1	0.4201	0.3571
	2		
	3		
風化変質	1	0.2036	0.2150
	2		
	3		
湧水	1	0.2881	0.2458
	2		
	3		
水による劣化	1	0.4562	0.5694
	2		
	3		
水による劣化	1	0.9345	0.7425
	2		
	3		

定数項:0.3318 重相関係数:0.9514

クさせる目的で行われている。本検討では、切羽毎に行った切羽観察記録(10項目による地山評価)と、トンネル測線上でTDEM法により10m毎に測定した比抵抗値との関連を数量化理論Ⅰ類により解析した。数量化理論Ⅰ類を適用するに当たり切羽観察記録をもとに説明要因としては全項目を取り上げ、外的基準として比抵抗値を用いた。なお、解析の対象となった切羽断面はN0.339+10～N0.344+10の合計25断面である。表-1に外的基準・アイテム・カテゴリー分類を、表-2にその解析結果を示す。カテゴリー分類については、各アイテム中で切羽観察記録に出てこないランクは分類から除外した。なお、データに欠損値がある場合は、各アイテム相互の関係から補完を行った。この方法によると比抵抗値を説明するに効果のあるアイテムは、偏相関係数やレンジの大きな値として表され、関係式の精度は重相関係数で表される。表-2より重相関係数は0.9514とかなり高く、比抵抗値と切羽観察結果は良い相関性を示している。また、偏相関係数をみると割れ目の開口性、割れ目の状態(沈着物・充填物等の評価点)、水による劣化当が比較的高い値を示している。この結果は、比抵抗値が岩盤の粘土化や水の影響と密接な関係があることを示している。また図-5に計算比抵抗値と実測比抵抗値の関係を示す。

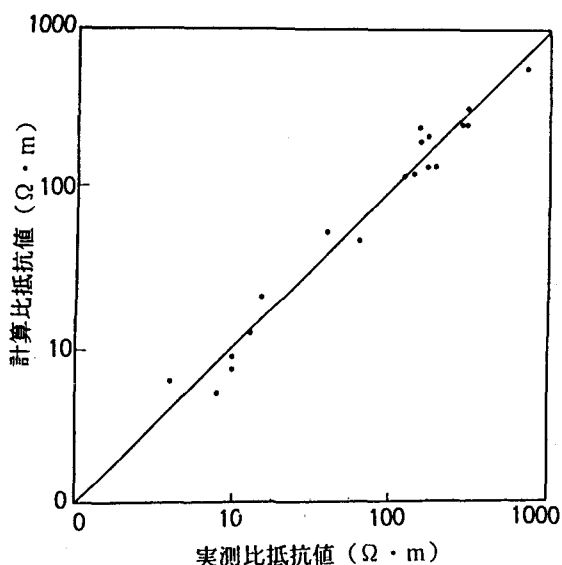


図-5 比抵抗値の実測値と計算値の比較

3. まとめと今後の課題

本報では、弾性波探査では探査困難な地質状況(ブラインド・レイヤー及び土被りが大きい場合)においてTDEM法を用いた探査を行い、その結果得られた比抵抗値と事前調査・掘削結果との対照により、地山評価の可能性について検討した。その結果、TDEM法による比抵抗調査で得られた低比抵抗地帯は地質の軟弱部・粘土層等に対応しており、また地山総合評価点との相関も確認された。今後は探査実績を積み重ねるとともに掘削結果との対照を行い、地山状況に応じた評価方法を検討する必要がある。また、現在開発中である原位置比抵抗測定装置(IN-SITU RESISTIVITY METER)を用いてトンネル掘削中の切羽の比抵抗を測定し、室内比抵抗試験の結果とともに活用していく予定である。

4. 参考文献

- 1)物理探査学会：1989.図解物理探査
- 2)斎藤 章：1990.電磁探査，物理探査学会基礎講座テキスト
- 3)和田一成他：1994.5.TDEM電磁探査法によるトンネル調査(その2)，物理探査学会第90回学術講演会講演論文集pp364-368
- 4)斎藤光義他：1994.10.TDEM電磁探査法によるトンネル調査(その3)，物理探査学会第91回学術講演会講演論文集pp157-161
- 5)原 敏昭他：1995.1.TDEM電磁探査法の土木分野への適用(その2)，土木学会第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集pp510-514
- 6)関根一郎他：1995.7.岩石の比抵抗と力学的性質の関係について.第30回土質工学研究発表会