

電気比抵抗と弾性波を用いた山岳トンネルの切羽前方探査

Prediction of rock formation ahead of tunnel face with the electric resistivity method and the seismic reflection method

明石 健*
Takeshi Akashi

稲葉 力**
Tsutomu Inaba

石山 宏二**
Koji Ishiyama

平野 享**
Toru Hirano

吉田 道彦***
Michihiko Yoshida

福山 新二***
Shinji Fukuyama

要 約

施工中の山岳トンネルの切羽前方地質調査を、地表からの電気比抵抗探査とトンネル坑内からの弾性波探査を併用して行った。適用したトンネルは熊本県南部の九州新幹線新津奈木トンネル北工区で、角礫凝灰岩よりなる軟岩トンネルである。電気比抵抗探査の結果から、切羽から240mまでの区間とそれ以降の210m区間の2つに分け、後者については地山の軟弱化と集中湧水の可能性を指摘した。一方、弾性波探査の結果からおおよそ100m前方に反射面群を抽出することができたが、反射強度が小さいことなどから大きな地質の変化はないものと推定した。実際の地質は探査の結果と調和的であり、探査の有効性が示された。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 探査の概要
- § 3. トンネルの地質
- § 4. 電気比抵抗二次元探査
- § 5. 弾性波による切羽前方探査 (TSP法)
- § 6. 切羽前方地質の予想
- § 7. 実際の地質との比較
- § 8. おわりに

§ 1. はじめに

山岳トンネルにおいて施工中に切羽前方の地質の状態が把握できれば、施工管理上、安全管理上または経済的にも大変有利である。切羽から直接、先進ボーリングを行う方法以外では、弾性波を用いる方法、表面波を用いる方法、電磁波による方法、電気比抵抗を使用する方法などのいくつかの物理探査手法を用いる方法があり¹⁾、適用事例がいくつか報告されている。

今回、地表からの電気比抵抗二次元探査による方法と、トンネル坑内から弾性波を用いる方法 (TSP法^{2) 3)}) を併用して、切羽の前方の地質状態の推定を行った。そして、掘削して明らかになった実際の地質状況との比較を行ったので、以下にその結果について報告する。

適用したトンネルは熊本県南部の九州新幹線新津奈木

* 技術研究所地質研究課

** 技術研究所土木技術課

*** 九州(支)新幹線新津奈木(出)

トンネルの北工区である。全長5120mのうち北工区長は2170mで、トンネル掘削径は約10mである。トンネルの掘削方式は上部半断面先進ショートベンチ方式によるNATM工法で、自由断面掘削機による機械掘削が行われている。

§ 2. 探査の概要

2-1 電気比抵抗二次元探査

電気比抵抗二次元探査は、測線直下における地盤の比抵抗分布を二次元的に求めるもので、その結果から地層の性状および地質構造を把握し、水文地質構造を解析するものである。この比抵抗探査がトンネルの地質調査に対して有効であることが最近特に指摘されており、いくつかの報告がなされている^{4) 5) 6)}。なお、この探査は地表で行うものであるのでトンネルの施工とは無関係に行うことができる。

2-2 弾性波を利用した切羽前方探査（TSP法）

探査に用いたTSP（Tunnel Seismic Prediction）システムとは、スイスのアンベルグ・メジャリング・テクニク社が開発した切羽前方探査システムであり、坑井を利用して行うVSP法をトンネルの前方探査に応用させたものである。トンネル坑内で規模の小さい探査用の発破を行い、切羽前方からの地震反射波情報から地質状態を推定するもので、およそ150mまでの範囲が探査可能である。計測は1～2時間程度で終了し、施工への影響を最小限に抑えてある。また解析に要する時間も比較的短いため、その結果を直ちに施工に反映させることも可能である。

§ 3. トンネルの地質

3-1 トンネルの地質

新津奈木トンネル北工区の地質は角礫凝灰岩よりなり、いわゆる軟岩の部類に属する地山である。トンネルの地質縦断面図を図-1に示す。これらの地層は肥薩火山碎屑岩と命名されており、新生代新第三紀鮮新世の火山噴出物である。地山弾性波速度はおおむね2.4～2.6km/sであり、岩石の一軸圧縮強度は32.4～109.4kgf/cm²（3.18～10.7MPa）で、JR式のNATM岩盤分類ではI_Nに分類されている。

実際の地質の傾向をより詳細につかむために、探査時切羽までの400m区間について、トンネルの地質と切羽の湧水量の変遷を図-2にまとめた。全域にわたり角礫凝灰岩よりなる地層が連続して出現しており、縦断面図からは層理面が坑口側に低角に傾斜しているのが読みとれる。一方、33k970m付近に幅5mの粘土化が進行した破碎部が認められた。切羽は自立するものの、レンズ状の黄褐色未固結粘土が密集し弱部となっている。この破碎部のトンネル軸に対する走向角は約30度で、傾斜はほぼ垂直に近い。その前後には同じ方向性を持ち粘土薄層を挟在させる亀裂が発達している。

3-2 湧水状況

本トンネルでは、北工区長2170mのうち約4/5の掘削を終了した時点で、1t/minを越えるような切羽からの集中湧水を数回経験している。このような集中湧水の場合に共通している地質状況としては、その前後に黄褐色の未固結粘土を挟在させる地盤の不連続面が存在していることをあげることができる。前述した破碎部はその典型

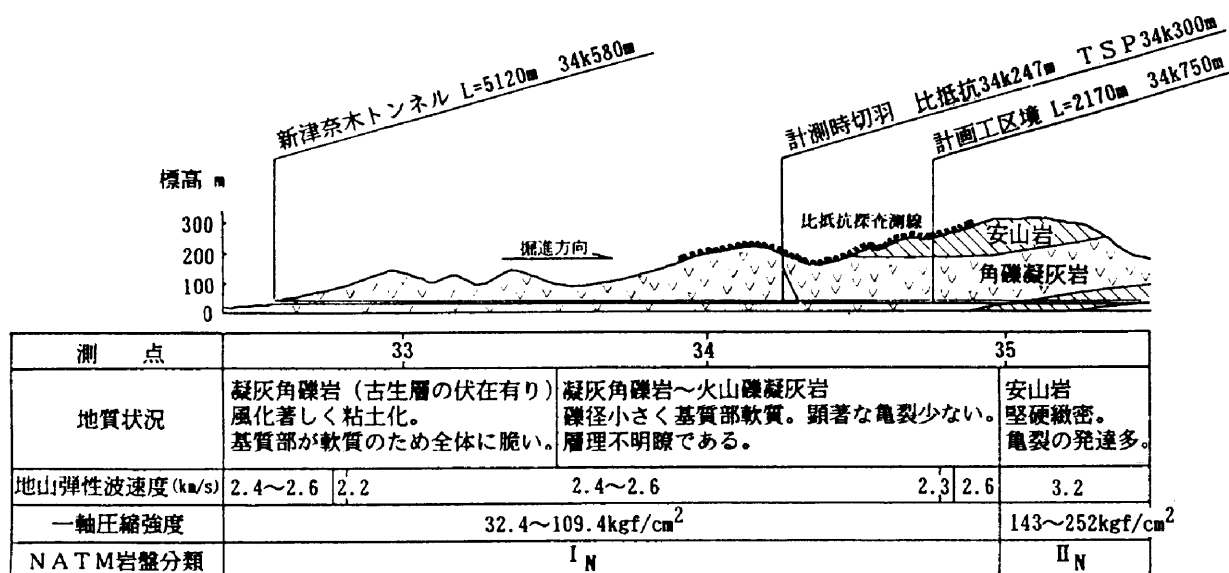


図-1 新津奈木トンネル北工区 地質縦断面図

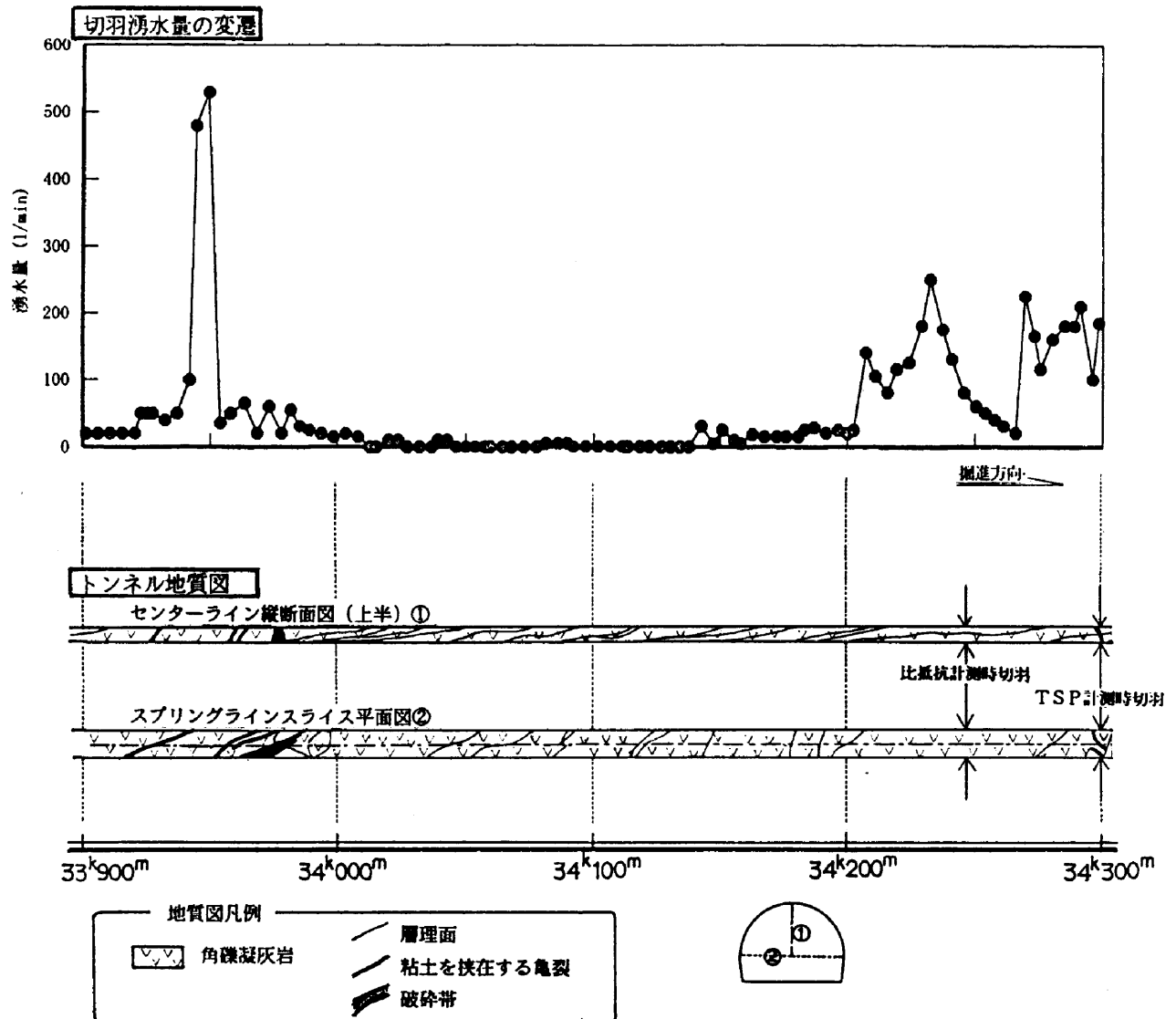


図-2 トンネルの地質と切羽湧水量の変遷

的な例で、切羽が破碎帯に到達する直前に0.5t/minの突発的な集中湧水を経験している。

集中湧水の可能性が想定されるこのような不連続面は、TSP計測におけるターゲットとなりうると考えられた。

§ 4. 電気比抵抗二次元探査

4-1 探査方法

比抵抗探査の電極配置は、図-3に示すように2極法で行った。探査深度は200mで、測線配置の諸元は表-1の通りである。計測時の切羽位置は34k247mであった。

計測に際しては、図-4に示したように、電極棒をテイクアウトケーブルを用いてコネクターボックスに結線し、電探器SYSCAL-R2（フランスBRGM社製）に接続する。電位差の測定に際しては、まず電流電極C1

を固定し、測定電位電極をP1₁、P1₂、P1₃の順で10mピッチで移動させ、間隔200mまでそれぞれ計測する。このようにして第1展開が終了すると電流電極C1を1電極間隔分ずらし、同様に第2展開についての操作を行う。以降、全測線にわたりその操作の繰り返しとなる。

4-2 解析方法

解析の流れを図-5に示す。測定された電位には地形の影響が含まれているので、測定データの地形補正を行う。地形補正は、FEMにより地形が平坦な場合との差を求め、これを個々のデータの補正量として行う。次に補正後の電位値、電流値、および電極間隔等のデータから見かけ比抵抗を計算し、見かけ比抵抗疑似断面図を作成する。これより解析のための地質モデルが構築され、このモデルから理論的に計算された比抵抗値が測定値に最も近くなるように、最小二乗法を用いて地下の比抵抗分

布が決定される。

4-3 探査結果

以上のようにして得られた比抵抗分布断面図から地質を解釈するためには、比抵抗値と地質との対応関係が明らかになっていなければならない。施工前の事前調査で電気検層が実施されており、それをもとにして地質状況と比抵抗値の対比を表-2のように行った。

解析された比抵抗値は40～400 $\Omega \cdot m$ の範囲にある。既存の地質情報を参考にすると比抵抗値200 $\Omega \cdot m$ を境にし

表-1 比抵抗測線配置諸元

電極配置：2極法	
測線長	1000m (33k880m～34k880m)
電極設置間隔	10m
電位測定最大間隔	200m
測線遠電極間距離	2000m

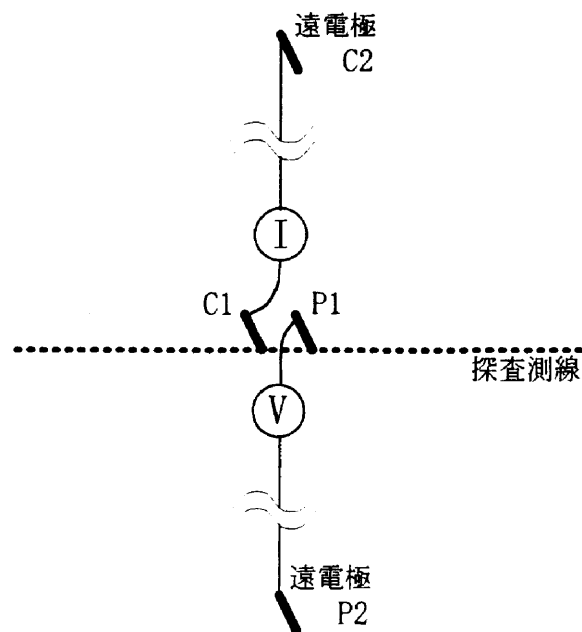


図-3 比抵抗測線配置概要図

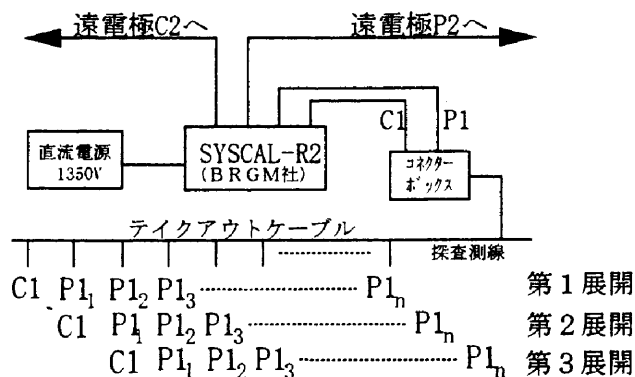


図-4 比抵抗計測概念図

て、それよりも小さい値を示すものは角礫凝灰岩、高いものは安山岩であると推定することができる。比抵抗値は岩石の固結度や角礫の含有量等の要因によっても影響を受けているので、比抵抗値から一義的に岩盤の透水性を判断することは危険であるが、データから透水性に関しても表の整理を行った。さらにこれらの情報と既存の屈折法弾性波探査の結果より、図-6に示す総合解析図が導かれる。

切羽前方の34k300m～600mにかけては、比抵抗値は125～200 $\Omega \cdot m$ で、既施工区間とほぼ同じである。従来と同じような角礫凝灰岩が出現し、大きな破碎帯等も出現しないものと考えられる。ただし34k540m付近以降はコンター間隔が密になってくる。また、34k600m以降については125 $\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯に入り地山が軟弱化する可能性がある。なお、切羽前方のトンネル施工面より上方に分布する安山岩は事前調査では標高200m以上に推定されているが、探査の結果から標高100m以下にまで及んでいることが考えられる。この安山岩の比抵抗値200～400 $\Omega \cdot m$ は一般的には低い部類に属するもので、破碎の進行もしくは亀裂の発達のため、良好な透水層を形成している可能性がある。

§ 5. 弾性波による切羽前方探査(TSP法)

5-1 探査方法

TSP計測の測線配置は多発振点、1受振点であり、これらを切羽の手前60m区間のトンネル側壁に直線状に配置する。受振器は長さ2.4mのロッドに2方向の加速度計を3組とりつけたもので、モルタルにて地山と一体化させた受振孔中のガイドケーシングに挿入して設置する。記録装置は一つのユニットにコンパクトにまとめられて

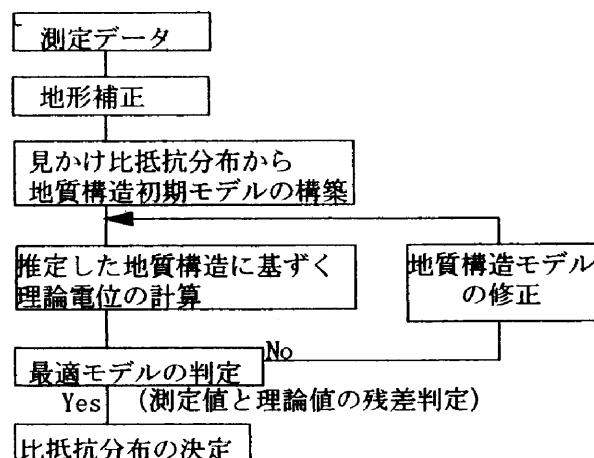


図-5 比抵抗解析の流れ

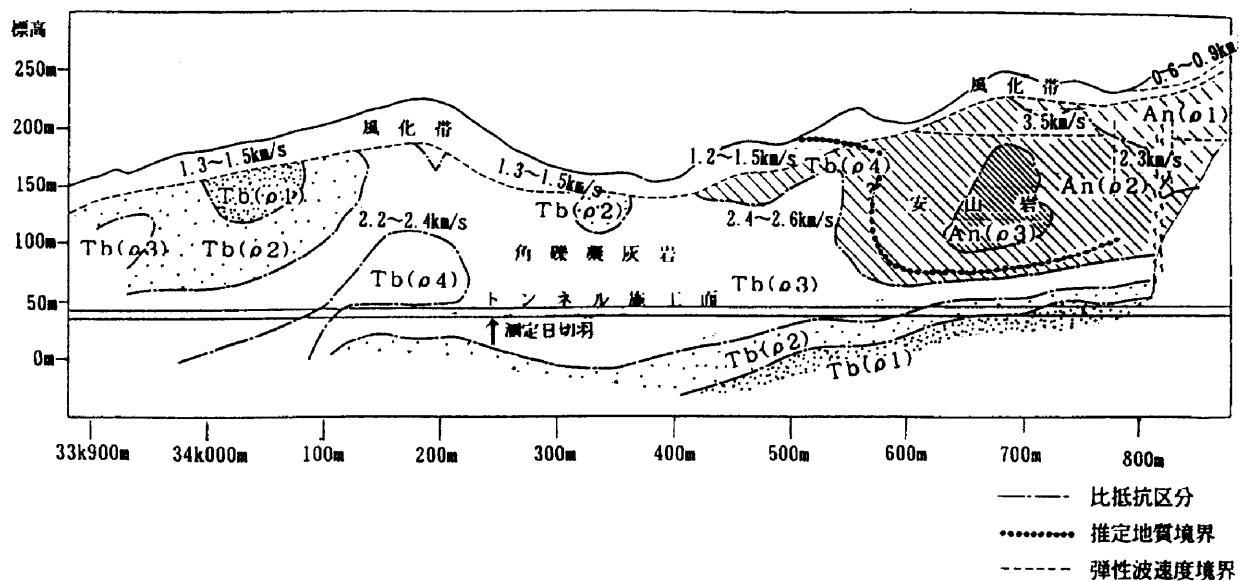


図-6 比抵抗探査総合解析図

表-2 比抵抗値と地質状況の対比

地質	比抵抗区分	比抵抗($\Omega \cdot m$)	地質状況	透水性
角礫凝灰岩	Tb($\rho 1$)	75以下	粘土化著しい	低い
	Tb($\rho 2$)	75~125	破碎質, 粘土化 全体に軟質	やや低い
	Tb($\rho 3$)	125~200	比較的硬質であるも 亀裂発達部や破碎部有り	中
	Tb($\rho 4$)	200以上	硬質 亀裂やや発達	中
安山岩	An($\rho 1$)	200以下	破碎質 軟質粘土化	高い
	An($\rho 2$)	200~300	破碎質、亀裂発達 一部粘土化	高い
	An($\rho 3$)	300以上	比較的硬質 亀裂少ない	中

おり、バッテリーと取り外し可能な制御コンピュータを内蔵する。計測データはその制御コンピュータのメモリーに保存される。計測の概念図を図-7に、受振・記録システムの諸元を表-3にまとめる。今回、計測は左右両壁で行った。計測時の切羽位置は34k300mである。

5-2 解析方法

解析の流れを図-8に示す。TSPの解析は、順に波界処理過程とイベント抽出過程の大きく2つに分けることができる。波界処理過程とは、観測波から直接P波、直接S波、ノイズ等をバンドパスフィルターやウェーブレット処理などを行い除去・低減させ、反射波を増幅・抽出する過程である。

一方、イベント抽出過程とはそれらのデータをもとに反射面の位置、方向性等を決定する過程であり、図-8ではデータスタッキングによるイメージング処理以降の過程である。ここでいうイベントとは、何らかの地質の変化に起因することが考えられる反射面のことを指す。抽出反射波のスタッキングによるイメージングを行い、スタックされた三次元的仮想点のうち振幅エネルギーが反射面の位置となる。

5-3 探査結果

大きい点列を結ぶ線分の外挿線と、トンネルとの交点がスタッキングの結果、右測線と左測線ではそれぞれ異なった結果が出た。右測線については、スタックイメージ

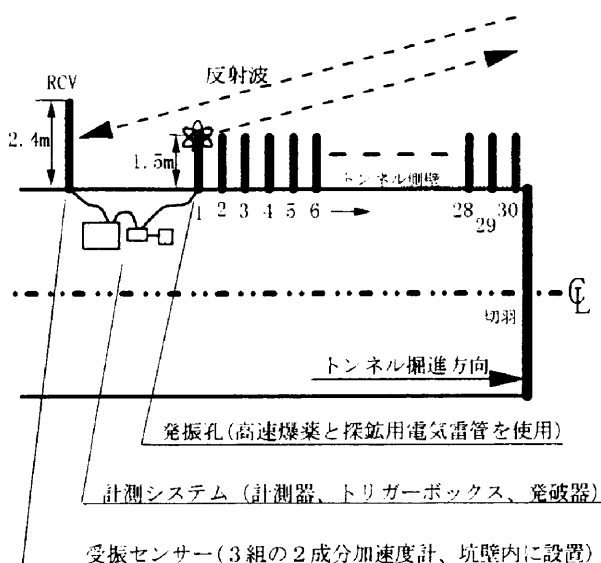


図-7 TSP計測概念図

表-3 TSP受振・記録システム諸元

□ 受振機	トンネル軸方向(X)、および鉛直方向(Z)の2軸感知型加速度計が3組で1チャンネルの受振機を構成
□ 記録装置	分解能(A/D変換)はデュアル18ビット(効率19ビット) 入力ダイナミックレンジは115db サンプル速度は40, 80, 160, 320 μ sから選択【本計測では80 μ s】 最大記録長は4096word 受振システムの総合周波数特性は10~8000Hzで平坦

ングで5つのイベントを抽出することができた。しかし、それぞれの振幅エネルギーは顕著に大きいとは言えず、またそれらに対応する実際の反射波データの連続性も乏しい。そのためこれらは急激で顕著な変化を表すイベントであるとは考えにくい。

一方、左測線については、全体的に振幅エネルギーが小さく、一部出現した強度の大きなスタックイメージにおける仮想点列は解析過程上のノイズと考えられたため、イベントの抽出を行わなかった。これにより右測線の結果をもってTSPの探索結果とし、これを図-9に示した。

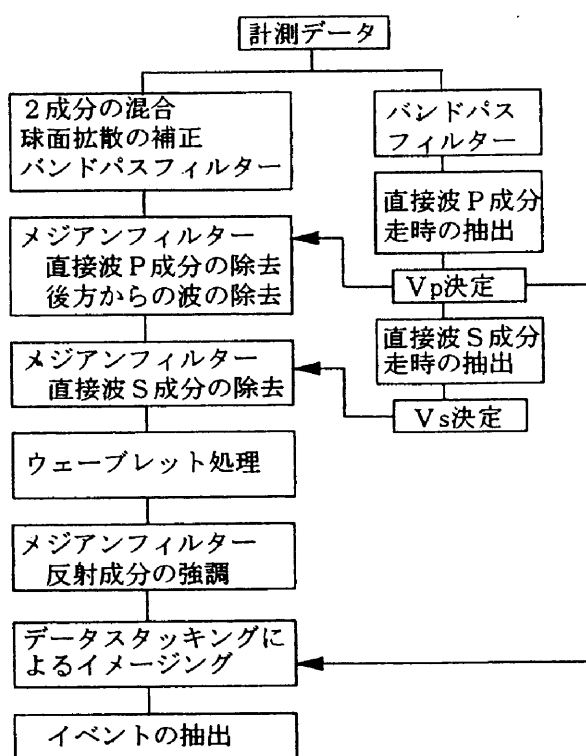


図-8 TSP解析のフロー

§ 6. 切羽前方地質の予想

ここでは比抵抗探索結果とTSP探索結果から、工区境の34k750mまでの区間を34k300m~540mと、540m~750mの2つの区間に分けて、それぞれについて地質状態の予測を行う。

1) 34k300m~540m区間

既掘削区間と同じような角礫凝灰岩が出現すると考えられる。トンネル掘削上は従来と同じような比較的安定した地山であることが予想され、異常湧水を伴うような大破碎帯は考えにくい。比抵抗値は125~200 $\Omega \cdot m$ の範囲にあり、コンターは全体的に粗である。

TSPでは、34k400m付近にイベントを抽出したが、前述したように大破碎帯や急激な地質の変化を表すものとは考えられず、比抵抗の推定と矛盾しない。

2) 34k540m~750m区間

岩種は同じ角礫凝灰岩であると予想されるが、トンネルの掘削の進行につれて地山の状態が悪くなることが予想される。比抵抗コンターは密に分布し、特に34k600m付近以降は比抵抗値が125 $\Omega \cdot m$ 以下となり、軟質化もしくは破碎質化していく可能性がある。

一方、湧水については集中湧水が発生する可能性を指摘することができる。角礫凝灰岩自体の透水性は低いと

考えられるものの、施工面上部に高透水性の安山岩が分布すると考えられることから、これが帯水層となる可能性がある。

なお工区境以遠になるが、34k800m付近に既往の屈折法弾性波探査で低速度帯が存在することが確認されている。比抵抗探査でもコンターの不連続状態が解析されているので、断層破砕帯の存在する可能性が高い。

§ 7. 実際の地質との比較

計測日切羽から150m前方の34k300m～450mの範囲について実際の地質をまとめ、TSPの結果と比較した(図-9)。TSPで変化を予測した34k400m付近については、黄褐色粘土薄層を挟む亀裂群が認められ、TSPではこの地質の変化をとらえていたものと考えられる。ただし湧水量は0.1t/min程度で、切羽も自立し、施工に影響を及ぼすようなものではなかった。TSPで抽出したイベントは大きな破砕帯等ではないと予想したが、これと実際の地質と矛盾しない結果が得られた。

一方比抵抗については、地質の大きな変化がないと予測した34k300m～34k540m区間については、強破砕帯等は認められず、実際の地質は探査結果と調和的であった。切羽湧水量も、最大で0.3t/min程度のところはあったものの、一般には0.1t/min程度もしくはそれ以下であった。

また地質が軟弱化し集中湧水があると予測した34k540m以降については、現時点では34k620mまでのデータであるが、探査結果を裏付けるデータが得られつつある。34k550m以降、これまでになかった切羽からの岩塊の崩落が目立ち始め、最大で5m³の崩落が34k559mで発生している。切羽湧水については34k590m～34k600mで切羽から3t/minを越える集中湧水が発生した。

§ 8. おわりに

軟岩地山において、電気比抵抗探査とTSP法を併用して、山岳トンネルの切羽前方探査を試みた。電気比抵抗探査がトンネルの地質調査に対して有効であることが、

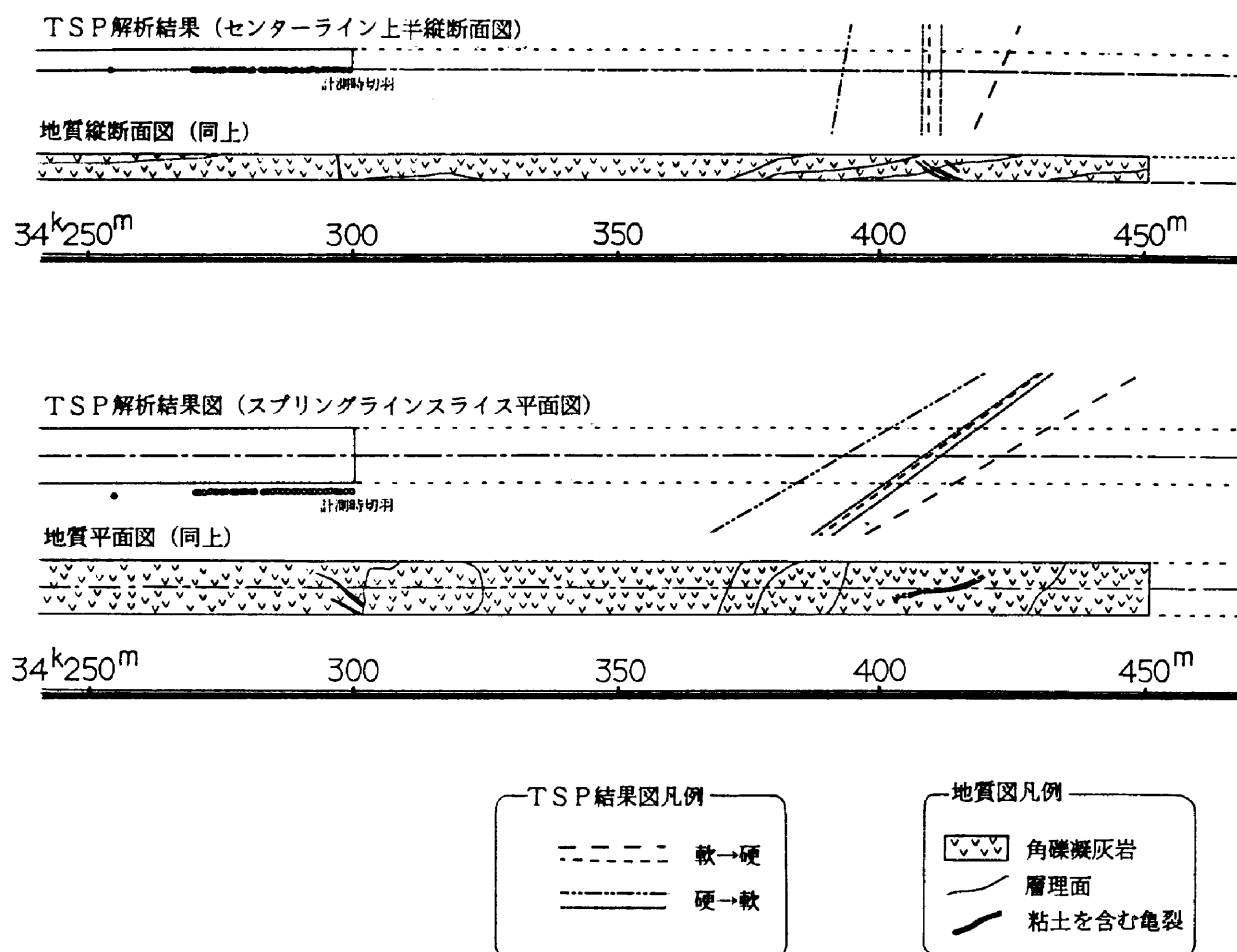


図-9 TSP探査結果と実際の地質

最近特に指摘されており、今回行った探査でも実際の地質と調和的であることを確認することができた。一方TSPに関しては、比較的簡便で計測解析が短時間で行えることがその特徴であり、今回の探査では切羽前方の粘土を挟在する亀裂群をとらえることができた。しかしTSP解析とその結果の解釈についてはまだ検討が必要な部分があり、様々なケーススタディーを重ねて現場適用性をより向上させていくことが必要であると考えられる。

最後に、計測に当たり多大なご協力をいただいた九州支店新幹線新津奈木出張所のみなさまにお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 林 宏一・斉藤 秀樹：地震探査によるトンネル切羽前方の反射面分布予測，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.319～324，1994.
- 2) G. Sattel, P. Frey and R. Amberg : Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods - pilotproject in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, First Break 10, pp.19～25, 1992.
- 3) 平野 享・明石 健・戸松征夫・中村康夫・芦田 讓：弾性波を用いた既設水路トンネルの位置推定，第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.500～504，1995.
- 4) 松井 保：高密度電気探査技術とトンネル地盤調査への適用性，地下空間利用シンポジウム1993，pp.37～48，土木学会，1993.
- 5) 植野修昌・水野佳純・田中達吉：比抵抗映像法によるトンネル事前調査と掘削結果について，土木学会第47回年次学術講演会第3部 pp.738～739，1992.
- 6) 山本和義・手塚茂樹・秋田哲志：トンネルの事前調査としての比抵抗映像法の評価，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部（A），pp.1162～1163，1994.