

電気探査とボーリング孔を利用した弾性波探査の併用による 地山評価精度の向上

The improvement of the rock mass classification based on both seismic velocity profile
obtained by high resolution refraction method using a borehole and resistivity profile

長谷川信介*・木村正樹**・杉田理*・村岡直*

Nobusuke HASEGAWA, Masaki KIMURA, Satoshi SUGITA, Sunao MURAOKA

The Authors applied the rock mass classification based on resistivity and seismic velocity profile to several tunnels. As the result, the adaptability of seismic velocity and resistivity to the classification is different. The classification based on resistivity profile is effective in case that geology is composed mainly of intact rock and velocity shows high speed. And the classification based on seismic velocity profile obtained by high resolution refraction method using a borehole is effective in case that geology is composed mainly of mudstone, resistivity shows low and the velocity of upper layer is higher than that of lower layer.

Key Words: tunnel, rock mass classification, seismic refraction method, resistivity method.

1. はじめに

筆者らはこれまで、高精度弾性波探査(トモグラフィ的手法)や比抵抗映像法(2次元比抵抗電気探査)の探査結果、ボーリングコア、検層結果を対比することによりトンネルの地山評価精度を向上させる手法を複数のトンネルに適用してきた。この結果、地質により弾性波速度が地山状況に適合しやすい場合と、比抵抗が適合しやすい場合があることが判明した。本論文では、地質状況に対する弾性波探査および比抵抗探査の適用性について報告する。

2. 比抵抗が地山状況に適合しやすい事例

検討を行ったSトンネルは図-1に示すように奈良県中部に位置する全長約2.4kmの2車線道路トンネルである。地質的には領家帯に位置し、石英閃緑岩・花崗閃緑岩が分布する。1次調査の弾性波探査では8割以上の区間が4.7~5.0km/sであり、当初B地山と推定された。しかし、踏査の結果、幅50m程度の鈹化変質帯が挟在し、緑灰色の粘土化帯を挟む場合もあったため、支保の選定のためにも鈹

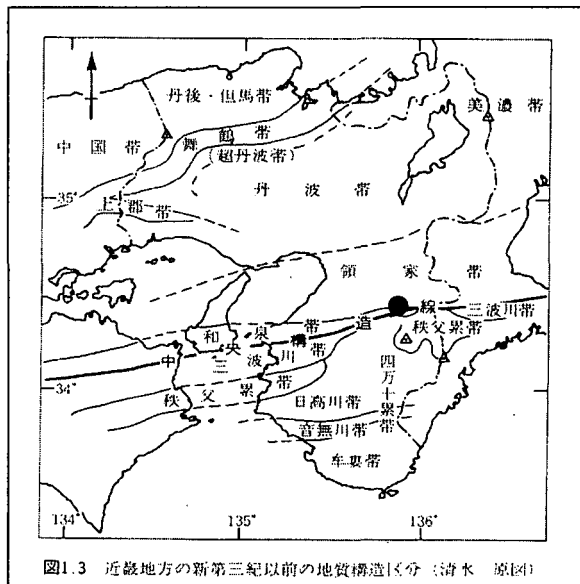


図1.3 近畿地方の新第三紀以前の地質構造区分(清水 原図)

図-1 Sトンネル案内図

* 応用地質株式会社 関西支社
** 正会員 応用地質株式会社 関西支社

化変質帯の位置を精度良く把握する必要があり、2次調査として比抵抗映像法と調査ボーリングを実施した。

地山評価は通常「地山区分表」により行われているが、切羽判定時の指標とは必ずしも一致していない。このため、ボーリングコアを用いて JH の新切羽判定手法に基づく評価点を算出し、設計と施工との乖離を削減することを目指した。この評価点と速度検層および電気検層により得られた弾性波速度および比抵抗との相関を図-2 に示す。評価点は弾性波速度より比抵抗との相関が良く、分解能が高い。そこで、比抵抗値による区分に重点をおいた地山区分を行った。図-3 に地山区分と施工支保パターンとの対比図を示す。湧水量の多かった距離程 600m 付近、天端沈下および内空変位の大きかった距離程 1200m 付近を除き、比抵抗値による新しい地山区分と施工支保パターンは概ね一致している。また、図-4 に示すように、当初の弾性波による地山区分に比べ、新しい地山区分は施工支保パターンとの乖離は大幅に減少しており、比抵抗値による地山区分が有効であると考えられる。

弾性波速度と評価点との相関があまり良くなかった原因として、拘束圧により岩盤の亀裂が密着することによる弾性波速度の向上が考えられる。図-5 に供試体に圧力をかけたときの弾性波速度の変化を示す。低い圧力で弾性波速度は大きな増加を示しているが、これは間隙率の減少、クラックおよび弱点の閉鎖、粒子間の機械的な接触における増加による²⁾。すなわち、ある程度圧力がかかれば亀裂が密着し、新鮮な岩に近い速度を示すようになる。したがって、亀裂が問題となる硬質の地山に対しては弾性波速度より比抵抗値による地山区分が有効と考えられる。

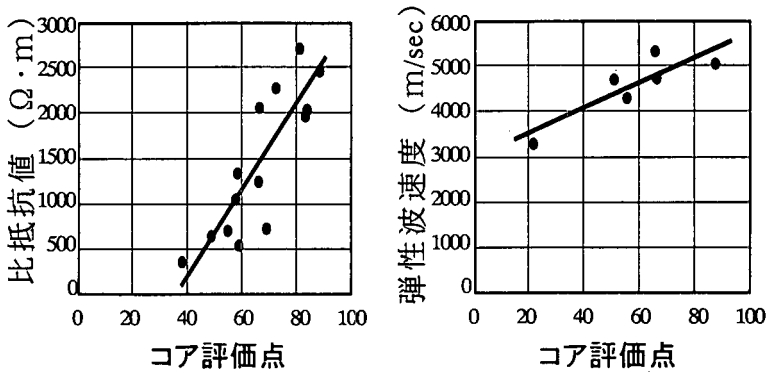


図-2 ボーリングコアの評価点と物理検層による物理量との関係¹⁾

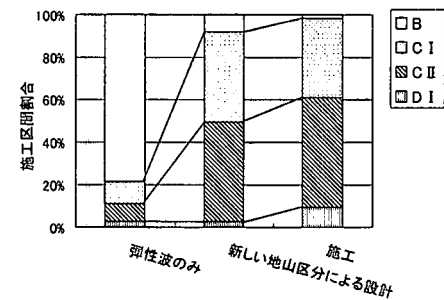


図-4 地山区分と施工支保パターン¹⁾

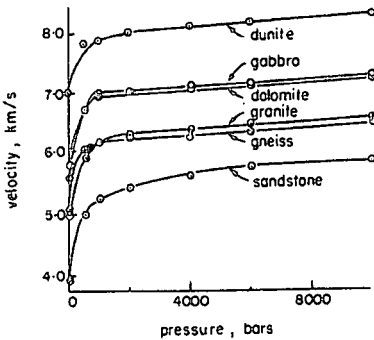


図-5 圧力をかけたときの弾性波速度の変化²⁾

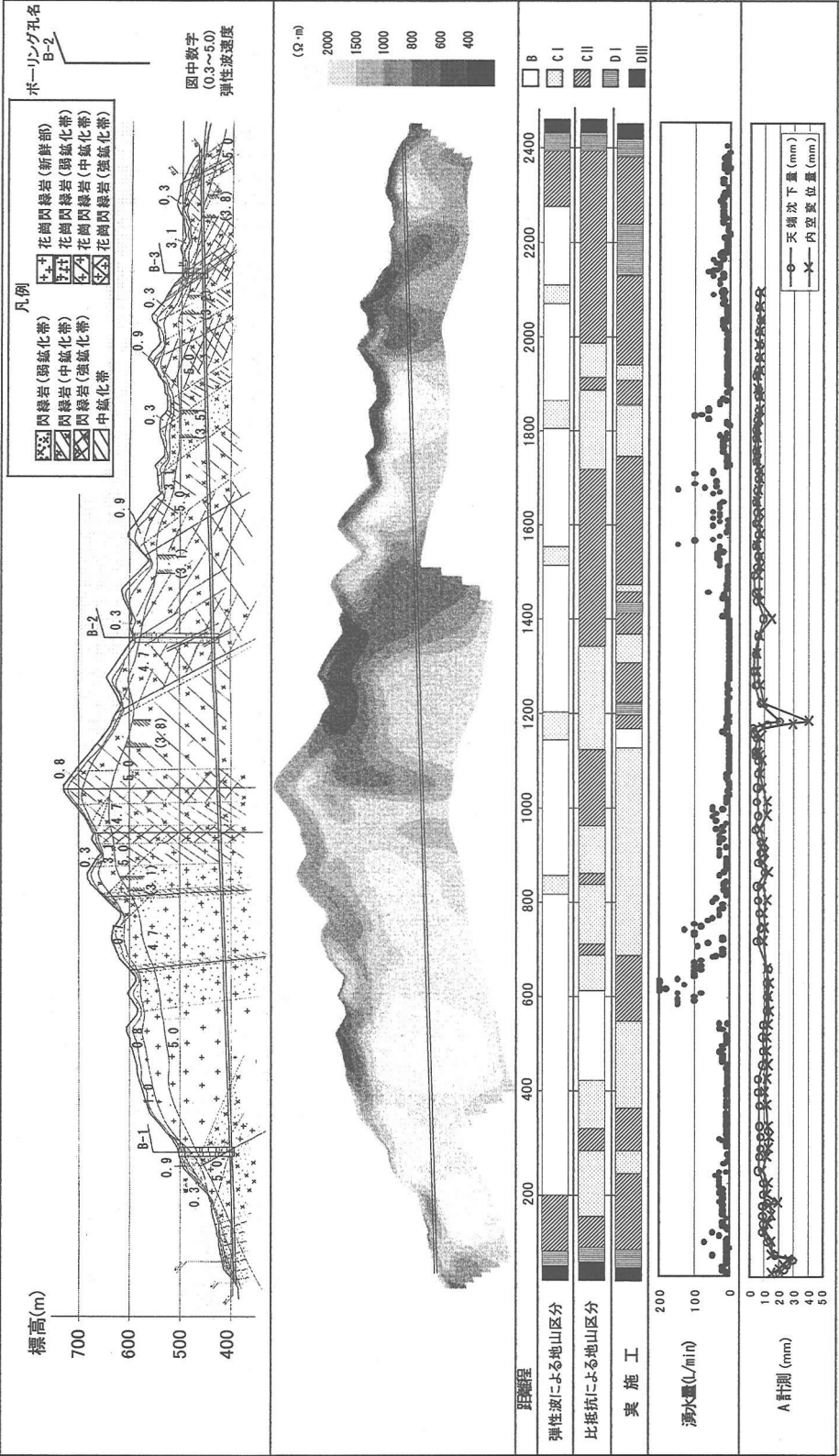


図-3 弾性波探査・比抵抗映像法探査結果断面図と地山区分・施工支保パターン

3. 弾性波速度が地山状況に適しやすい事例

T トンネルは、図-6 に示すように和歌山県紀伊半島の四万十帯に位置する全長約 1.7 km の高規格 2 車線道路トンネルである。地質は四万十帯の音無川帯に区分される「付加体」であり、亀裂の発達した頁岩からなる瓜谷累層と砂岩頁岩互層からなる羽六累層が北落ちの傾斜で分布する。このため、高速度層の下に低速度層が現れる速度の逆転層が存在することが予想され、弾性波探査の難しい地質状況にある。

当初、弾性波速度が 4.0 km/s 前後であることから地山は CⅠ～CⅡ 主体と評価されていたが、実際の地質は想定と大きく異なり、掘削による応力解放やわずかな湧水により容易に細片化しやすい地山であった。このため、追加の調査を実施した。

追加調査では比抵抗映像法に加え、トンネル施工基面まで達するボーリング孔 (TB1 孔) を受振孔とし、切羽および坑口で発破を行う高精度弾性波探査を実施した。図-7 に事前調査における波路 (初動波の伝播経路) と追加調査における波路を示す。事前調査では用地上の制約のためボーリング孔中発破といった大規模な起振を行うことができなかったこともあり、波路はトンネル施工基面まで達していない。一方、追加調査では、切羽およびボーリング孔を使うことによりトンネル施工基面まで波路が達していることがわかる。

図-8 にボーリングコアの評価点と物理検層による物理量との相関を示す。評価点は、比抵抗値より弾性波速度との相関が良い。そこで、地山評価は、弾性波速度による評価を主とし、低比抵抗部分については地山区分を落として評価を行った。図-9 に地山区分と施工支保パターンとの対比を示す。図中には切羽での評価点も記入した。STA NO.177～180 については施工実績は新しい地山区分 (施工予測) より、さらに重い支保であったが、その他の区間については概ね一致している。トンネル施工基面での弾性波速度分布は、STA NO.183～185 付近の低速度域では切羽評価点は低く、STA NO.187～189 付近の高速度域では切羽評価点は高い。一方、比抵抗値は切羽評価点との傾向と異なり、STA NO.183～185 付近と STA NO.187～189 付近は、ほぼ同程度の比抵抗値を示すのに対し STA NO.185～187 付近は低比抵抗を示し、地山状況の変化を捉えていない。

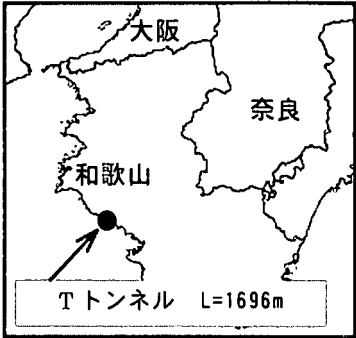


図-6 T トンネル案内図

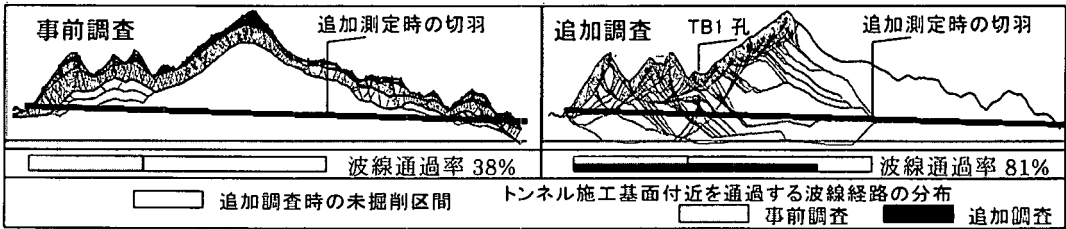


図-7 事前調査における弾性波の波路 (左) と追加調査における弾性波の波路 (右). 縦横比 2 : 1³⁾

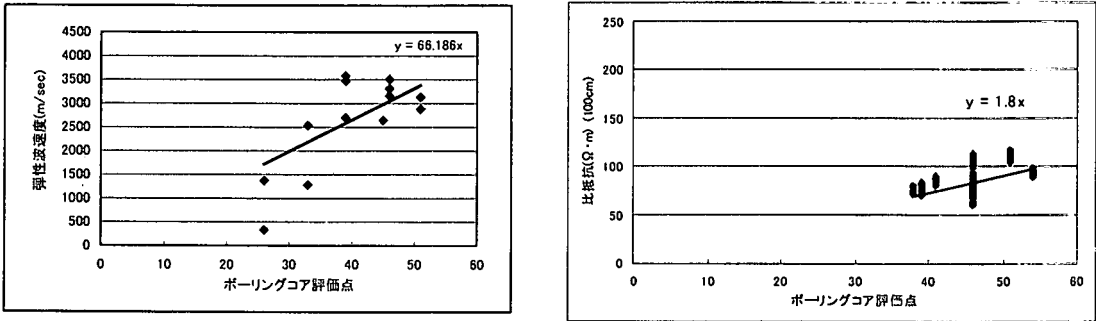


図-8 ボーリングコアの評価点と物理検層による物理量との関係

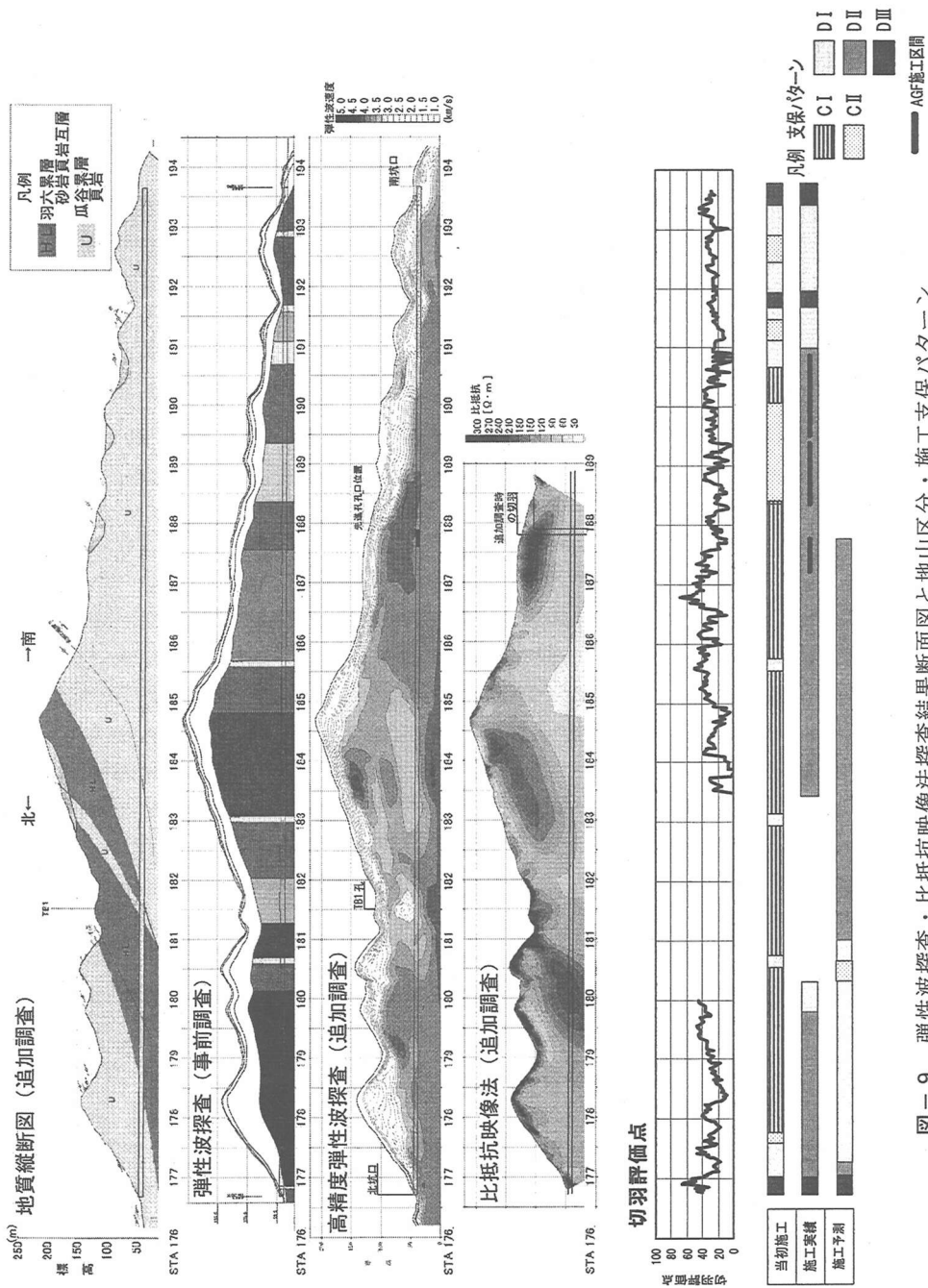


図-9 弾性波探査・比抵抗映像法探査結果断面図と地山区分・施工支保パターン

これは、比抵抗映像法を含め、一般的に電気探査では低比抵抗の中の高比抵抗より高比抵抗の中の低比抵抗を捉えやすいことが1つの原因と考えられる。図-10に数値実験の結果を示す。数値実験は $100\Omega\cdot\text{m}$ の媒質中に $10\Omega\cdot\text{m}$ の構造が存在する場合、 $100\Omega\cdot\text{m}$ の媒質中に $1000\Omega\cdot\text{m}$ の構造が存在する場合で計算を行った。なお、計算に用いた電極配置は2極法電極配置である。高比抵抗構造が存在する場合より低比抵抗構造が存在する場合のほうが明瞭に捉えている。また、高比抵抗構造が存在する場合には、実際の位置より浅い部分に構造を捉えている。このため、図-8のSTA NO.187~189については、高比抵抗部分が探査結果より深部まで分布している可能性がある。

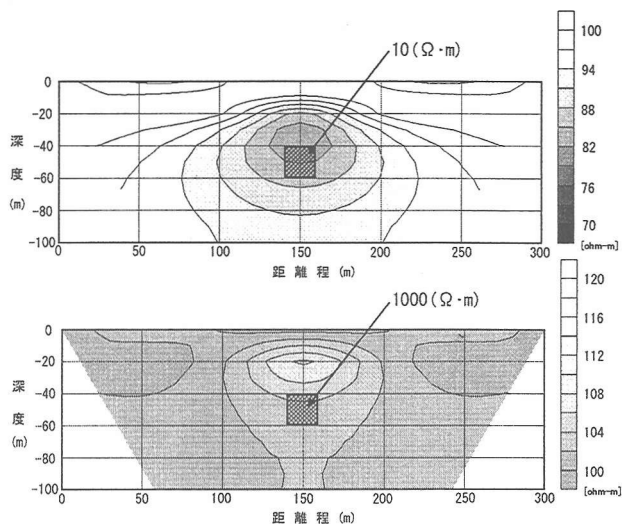


図-10 数値実験結果。(上) 低比抵抗構造が存在する場合、(下) 高比抵抗構造が存在する場合

4. 考察

花崗閃緑岩・石英閃緑岩を主体とするSトンネル、頁岩および砂岩頁岩互層を主体とするTトンネルについて、電気探査と弾性波探査の地山評価への適用性について検討を行った。その結果を以下にまとめる。

- ・ 亀裂性の硬質な岩盤を主体とし、高速度が予想される地山に対しては、比抵抗値による地山評価の適合性が高い。
- ・ 頁岩・泥岩を主体とし、低比抵抗が予想される地山に対しては、弾性波速度による地山評価の適合性が高い。ただし、このような地山では高速度層の下に低速度層が存在することが予想されるため、地表からの探査では限界があり、ボーリング孔を利用した探査が有効となる。
- ・ 地山評価精度を向上させる上で、物理量と評価点との対比が重要となる。このためにも孔内の物理検層を実施し、ボーリングコアとの対比を行うことが重要である。

今後は更に多くのトンネルにおいて地質状況と弾性波探査および電気探査の適用性について検討していきたい。また、弾性波探査と同様にボーリング孔を利用した電気探査の適用性についても検討していきたい。

参考文献

- 1) 木村・杉田・大塚：評価点法を用いた事前調査による地山評価と施工，土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集，第11巻，2001.11，p87-92.
- 2) 増田・田中訳：岩の力学的性質Ⅱ，古今書院，p245.
- 3) 高橋・村重・木村・田中・小川・足達(2002)：四万十帯におけるトンネル設計時の地山評価の留意点，応用地質学会関西支部 平成14年度研究発表会概要集.
- 4) 村瀬・田中・小川・足達(2002)：付加体中の先行緩み探査と対策 近畿自動車道紀勢線 高田山トンネル、トンネルと地下，vol.33，no.10.
- 5) 木村・高橋・古田・田中・足達(2002)：付加体におけるトンネル周辺の弾性波速度と地山評価，第12回トンネル工学研究発表会.