

掘削実績に基づく事前弾性波探査法の評価について

日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 正会員 ○大嶋健二

日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 正会員 伊藤哲男

1. はじめに

弾性波探査（屈折法地震探査）は、解析結果より地盤内の弾性波速度分布が求められ、得られた速度分布と既存地質資料などと対比して総合的に解釈することにより、断層破碎帯の有無や規模および岩石の種類、硬軟、風化・変質などが把握でき、簡便な物理探査手法として広く普及している。はぎとり法解析は実績も多く、地山分類を行うための基礎データとして利用されている。また、近年解析方法の進歩、高速な計算機の普及、新しい測定器の導入などにより、弾性波探査の高精度化を目指した開発が行われ、高密度弾性波探査、高精度屈折法地震探査などと呼ばれている新しい測定・解析手法が用いられるようになっている。（以下これらの新しい弾性波探査手法をトモグラフィ法と記す。理論走時と観測走時の比較が全ての走時に対して行われ、複数回の繰り返し計算によって走時残差が小さくされたことをもってトモグラフィ法と定義する。）

ここでは、弾性波探査におけるはぎとり法とトモグラフィ法について、探査結果とトンネル掘削実績（以下「掘削実績」という。）の地山分類等の比較結果から探査精度の評価を行ったので報告するものである。

2. 掘削実績との比較方法

表－1 評価点数表

		実績の地山分類				
		B	C I	C II	D I	D II
当初の地山分類	B	0	-1	-2	-3	-4
	C I	1	0	-1	-2	-3
	C II	2	1	0	-1	-2
	D I	3	2	1	0	-1
	D II	4	3	2	1	0

対象としたトンネルは、平成9年以降に掘削を開始したトンネルで、平均的な延長および平均的な土被りを考慮し、21 トンネルを選定した。そのうち4 トンネルについては、既往の弾性波探査記録をトモグラフィ法で再解析したものであり、はぎとり法による調査以後、確認調査として実施されたものである。各トンネルについて、既往地質調査報告書から調査段階の地質、弾性波速度、地山分類（支保パターン）および掘削後における地質、地山分類（支保パターン）を地質縦断面図とともに調査・実績修正図として取りまとめた。評価対象区間の抽出に当たっては、坑口部および沢部等の弾性波速度によらず DIIIとされる区間は除外し、同一区間で調査時の地山分類（B、C I、C II、D I、D II）と掘削実績を比較して、調査時の地山分類が掘削実績より低く評価されたもの（以下「良好化」という。）とその逆に評価されたもの（以下「不良化」という。）の相違程度を表－1のとおりとした。なお、評価点は、調査時よりも掘削実績の方が良好な場合に正となり、不良化する場合は負となる。

3. 掘削実績と弾性波探査法の評価

3.1 掘削実績との比較結果

トンネル全体の相違を把握するために、平均的な評価点（式1）を用いた。また、トンネル全体の相違程度を表す指標として、かい離度（式2）を考えた。かい離度は、数値が高いほど推定精度が悪く、不一致区間が多いことを示す。

・評価点（平均値）＝ $\Sigma \{ \text{各区間の評価点数} \times (\text{相違区間長 (m)} / \text{検討区間長 (m)}) \} \cdots$ (式1)

・かい離度＝ $\Sigma \{ \text{各区間の評価点数の大きさ} \times (\text{相違区間長 (m)} / \text{検討区間長 (m)}) \} \cdots$ (式2)

図－1から、全体の評価点は概ね0～－2に範囲にあり、調査時の地山分類は掘削実績より高く評価されている事例が多い。また、岩種ごとの評価点（平均値）の分布より、特に一致割合が低く評価点が小さいのはM層状の中古生代および四万十帯の堆積岩である。これらの岩種では一致割合が10%以下で、評価点も－1～－2となり、掘削実績での地山分類の不良化が顕著である。中古生代堆積岩、花崗岩等の塊状岩盤は一致割合

トンネル 掘削実績 弾性波 はぎとり法 トモグラフィ法

〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1 TEL 042-791-1621 FAX 042-791-2380

が 10～50%、評価点 0 ～ - 1 で、調査段階と掘削実績の地山分類が整合または不良化が少ないことを示している。

図-2に示すかい離度では、岩種によらず一致割合が小さいとかい離度が大きくなる傾向にある。特にかい離度が大きいのは、M層状の中古生代および四万十帯堆積岩で、調査時と掘削実績の地山分類はほとんど一致せず相違も大きいことを示している。以上のように、岩盤が塊状の場合は、一致割合に多少のばらつきがあるものの、実績での不良化や相違が少なく、層状の場合は実績での不良化や相違が顕著である。

同一トンネルにおける、はぎとり法とトモグラフィ法の関係を図-1、2の矢印で示すが、トモグラフィ法では、はぎとり法に比べ、概ね評価点が高くなり、一致割合も高くなる。また、かい離度は小さくなり、相違の程度は多くの場合1ランク以内とはぎとり法よりも小さくなる。このように、今回は解析のみの結果ではあるが、はぎとり法に比べて、トモグラフィ法による地山分類の探查精度は向上していると思われる。

3.2 切羽観察項目と弾性波速度の関係

JHにおける新切羽評価手法の切羽観察項目（圧縮強度、風化・変質、割れ目の間隔、割れ目の状態、湧水、水による劣化）のなかで、地山分類の目安となる切羽評価点に最も寄与する項目は、割れ目の状態と圧縮強度が挙げられる。また、掘削実績の地山分類を目的変数とし、各切羽観察項目の評価点を説明変数とした重回帰分析を行うと、割れ目の状態が最も相関が高い。同様に、弾性波速度と各切羽観察項目では、割れ目の状態が最も高い相関を示す。従って、割れ目の状態と圧縮強度により、支保が選択される傾向があり、弾性波速度と地山分類とは基本的には整合すると考えられる。しかし、調査段階の地山分類と掘削実績での一致割合は、多くが 50%以下であり、統計的な妥当性と掘削実績とは一致しない。これは、トンネル区間の割れ目の状態が悪くても、測定時の弾性波は周囲の岩塊同士の接触部を伝わり、割れ目の状態を完全には反映されず、早めの速度値が算出され、掘削実績の地山分類よりも高く評価されたと推察される。これらのことから、地質的に層状構造を示し硬・軟の岩種が混在している場合や、トンネル区間の局所的な劣化は、対象区間の正確な弾性波速度を検出することが困難であり、地山分類においては注意が必要である。

4. 弾性波探査の適用性検討

トンネル施工で問題となる断層破碎帯や風化・変質などの劣化部は、はざとり法では低速度帯として検出されるものの、その正確な幅や方向は検出することは難しい。一方、トモグラフィ法は、劣化部の存在、方向および広がり、等速度線の形状から推定することが可能である。また、層状岩盤において強度や性状の異なる岩種が混在する場合に有効であることが確認された。したがって、はざとり法では大局的な速度構造および地山分類の把握が可能であり、トモグラフィ法では劣化部の方向性や規模および複雑な速度構造も把握できるため、目的とする深度の弾性波速度や地山分類を推定することができる。トモグラフィ法では以上のように利点を有するものの、地質技術者が初期モデルを設定する際に、地質学的な解釈のちがいにより、解析結果が異なる場合があるので注意が必要である。

5. 今後の課題

今後は、異なる岩種や検討事例を増やし、岩種ごとの相違原因と解釈上の留意点を明らかにすることが必要である。また、実績との比較により、弾性波探査の推定限界を明らかにし、岩種によっては経済性も考慮しボーリング調査や他の有効な探査と併用することが調査精度の向上につながると考えられる。

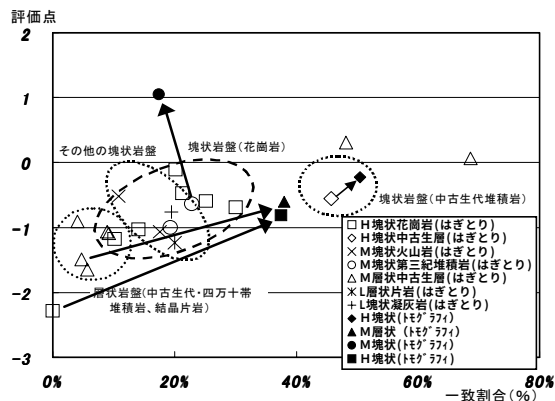


図-1 一致割合と評価点の関係

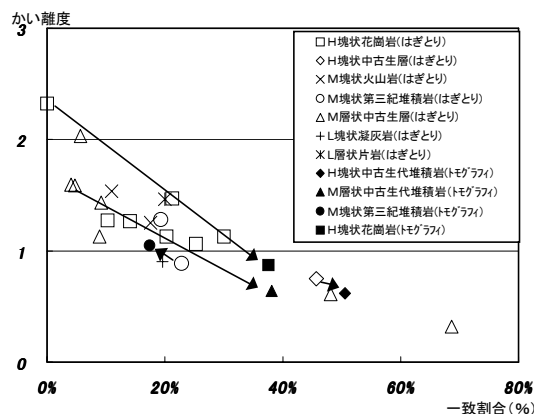


図-2 一致割合とかい離度の関係