

反射法弾性波探査の適正評価に関する考察

Considerations for the appropriate evaluation to the seismic reflection survey

大窪 克己¹⁾・宮脇 工²⁾・芦田 譲³⁾・山本 和義⁴⁾

Ookubo Katumi, Miyawaki Takumi, Ashida Yuzuru, Yamamoto Kazuyoshi

Seismic reflection survey by development of TSP and the HSP was used as prediction ahead of the tunnel face in around 1995. Applicability of the survey is reported, and the improvement of data analysis etc. for the improvement of the exact results has been reported at the stage in the early 1995. The Survey result has been actually evaluated to the forecast by the comparison. However, the evaluation was not established, so we would propose a new evaluation of the survey result

Key Words : seismic reflection survey, rock classification, horizontal seismic profiling, tunnel seismic prediction, electric magnetic survey

1. はじめに

反射法の弾性波探査は、1995年頃から、TSP (Tunnel Seismic Prediction) やHSP (Horizontal Seismic Profiling) の開発により、トンネル切羽の前方探査手法として活用され、多くの論文・報告が作成されてきた。^{1)~14)}

1995年の初期段階では、前方探査手法としての適用性が報告され、以降は主として予測精度の向上のための取扱上の改善や測点配置の工夫などが報告されてきた。これらのすべてが予測と実際との比較で評価を行っている。具体的には断層の存在や地山等級の予測を評価基準としたため、実際に断層らしい断層が出現しない場合や地山等級に変化がなかった場合には、予測がはずれたと評価しているのが現状である。

しかしながら、探査原理は反射面があれば反射面として検出されることであり、地山の良否を相対的に評価するものである。この面から予測精度の評価方法を見直す必要がある。ここに注目し、電磁波探査も含め、複数の探査を通じ新しい評価の考え方を提案するものである。

2. 探査法の原理

2.1 反射法弾性波探査の原理

探査原理では、HSP (少起振点-多受信点方式) もTSP (多起振点-少受信点方式) も同一なものと判断できる。(図-1) いずれも起振時から反射波の到達時間を計測し、これに地山のP波速度をかけることで反射面までの距離を算出し反射面を予測する。当然のことながら受信波には直接波、屈折波、ノイズおよび最も重要な反射波が含まれている。HSPやTSPでは、いかにこの反射波を検出するかが重要であり、種々の波形処理を通じて反射波の検出に努めているが、基本原理は同じである。(図-2)

反射面が軟→硬なのか硬→軟かの判定は、スネルの法則から、反射係数は以下の式で得られる。

$$R = \frac{(\rho_1 * V_{P1} - \rho_2 * V_{P2})}{(\rho_1 * V_{P1} + \rho_2 * V_{P2})} \dots \dots \dots (1)$$

ここに R : 反射係数

¹正会員 日本道路公団 静岡建設局 静岡工事事務所

² 国土交通省 四国整備局 中村工事事務所

³正会員 工博 京都大学大学院工学研究科 資源工学専攻 教授

⁴正会員 清水建設(株) 土木事業本部 技術第2部

ρ_1, ρ_2
 V_{p1}, V_{p2}

: 反射面前の密度, 反射面後ろの密度
 : 反射面前の弾性波速度, 反射面後ろの弾性波速度

たとえば, $\rho_1 = 240 \text{ kN/m}^3$, $\rho_2 = 220 \text{ kN/m}^3$ とし, $V_{p1} = 4500 \text{ m/sec}$, $V_{p2} = 3000 \text{ m/sec}$ とすると, $R = 0.24$ 程度が得られ, 反射面では約75%が透過して行き, 残りの約25%程度が反射波として得られる. 逆に ρ_1 , V_{p1} と ρ_2 , V_{p2} を入れ替えた場合には $R = -0.24$ となり反射係数の符号が変化する. これは位相が変化していることでもある.

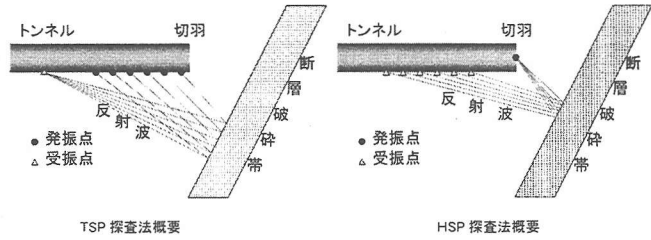
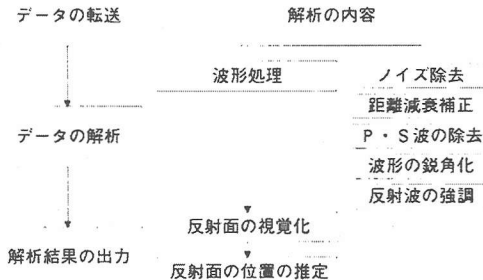
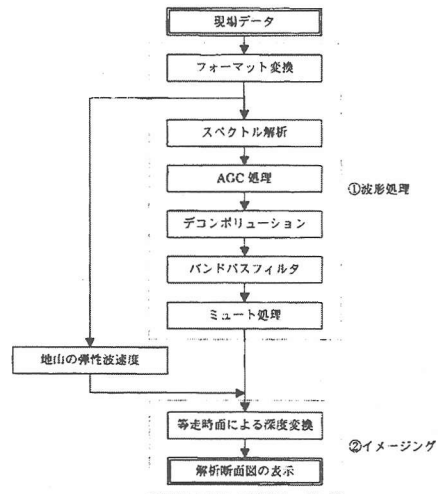


図-1 TSP探査とHSP探査の相違



TSP 解析の流れ



HSP 解析の流れ

図-2 TSP探査とHSP探査の波形処理の流れ

ここでは, 未知数として ρ_2 と V_{p2} の2つがあり, 反射係数が定まっても ρ_2 と V_{p2} は求まらない. また, 反射面までの距離 L は V_{p1} と反射波の到達時刻 Δt を掛け合わせることで得られ, 反射面の位置は受振点と起振点を2つを焦点とする楕円上に存在することになる. したがって, これらの楕円を多く推定することで共役する接線が得られ, 反射面を表すことになる.

反射面は, 地山の硬軟があれば反射面として出現するものであり, いずれにしても相対的な評価でしかない. また, 受振を3成分とすることによって, 回転楕円体として評価できるため, 反射面の3次元空間での走向傾斜が得られることになる.

2.2 EM探査 (Electric Magnetic Survey)

EM探査は, 電磁波探査であり, その探査原理は以下である.
 ①送信コイルに交流電流を流すことにより1次磁場が発生する.
 ②一次磁場の変化 (交流) による電磁誘導現象で地中に渦電流が誘起される.
 ③渦電流により発生する2次磁場強度を測定する.
 ④1次磁場強度と2次磁場強度の比より比抵抗を求める.
 ⑤送信の周波数を変え, 深度方向の比抵抗の変化を測定する. このようにして切羽前方の地山の比抵抗値を推定するものである.

(図-3)

その原理は以下の式である.

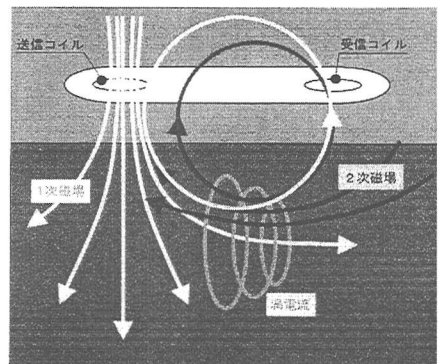


図-3 電磁波探査の概要¹⁶⁾

$$\mu_a = 1.974 \times 10^{-6} * s * f * \left(\frac{H_p}{H_s} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここに μ_a : 見かけの比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
 H_s : 二次磁場強度
 H_p : あらかじめ検定して求めた一次磁場
 s : コイル間隔 (一定)
 f : 送電電流の周波数

このとき、磁場の周波数を低周波～高周波 (2～364kHz まで 16 チャンネルに分割) とすることにより、測定面近傍から以奥の比抵抗値を精度良く推定しようとするものである。また、この探査深度は 50m 程度と比較的浅い。

屈折法・反射法を問わず、弾性波探査は地山の中の弾性波速度を推定するものであり、この探査では地山の硬軟は判定できても、地下水に関しては判定不可能である。一方、電磁波探査は前方地山の比抵抗は探査可能であるが、地山の硬軟については基本的には判定が困難である。たとえば比較的含水量の少ない粘土と亀裂の少ない堅硬な花崗岩での比抵抗は同様な範囲を示す。

したがって、反射法の弾性波探査と EM 探査を併用することで、地山の硬軟と地下水の両者の情報を得ることができる。

3. D 等級地山での探査結果

対象地山はジュラ紀の付加体であり、粘板岩を主体としているが、砂岩、凝灰岩、チャートなどが混入する、いわゆるメランジェの地山である。土盛り約 200m である。掘削時の地山状況は、切羽全面鏡肌の発達した粘板岩が出現し、岩石強度は 60～80MPa と中硬岩に分類されるものであるが、亀裂が発達し数 cm の碎石状に破碎され RQD は 0 である。したがって地山等級としては D 等級で破碎帯として評価できる。

ここではロックボルトの破断や吹付けコンクリートの剥脱が発生し、この破碎帯がどの程度切羽前方に出現するかを把握することを目的に、① 3 成分 HSP 探査、② 2 成分 TSP 探査、③ EM 探査および④ボーリング探査の 4 種類の探査を同じ切羽面で行った。

探査結果の平面図を図-4 に示す。ここで特徴的なのは切羽から約 50m 地点で、3 成分 HSP (図-4 b) および 2 成分 TSP (図-4 c) 共に複数の硬軟を繰り返す反射面を検出した。なお、HSP では反射面の集中する 53～56m を破碎帯と評価している。EM 探査 (図-4 d) でも切羽面から 30～50m 地点で低比抵抗値を検出した。さらに最も確実なボーリング探査 (図-4 a) でも 50m 地点で約 5m 程度の破碎帯を確認した。いわばすべての探査結果は 50m 地点に不良個所が存在することを予測した。

現実の掘削では 50m 地点に問題となる破碎帯は認められず、内空変位は 50～80mm で天端沈下も 20～30mm

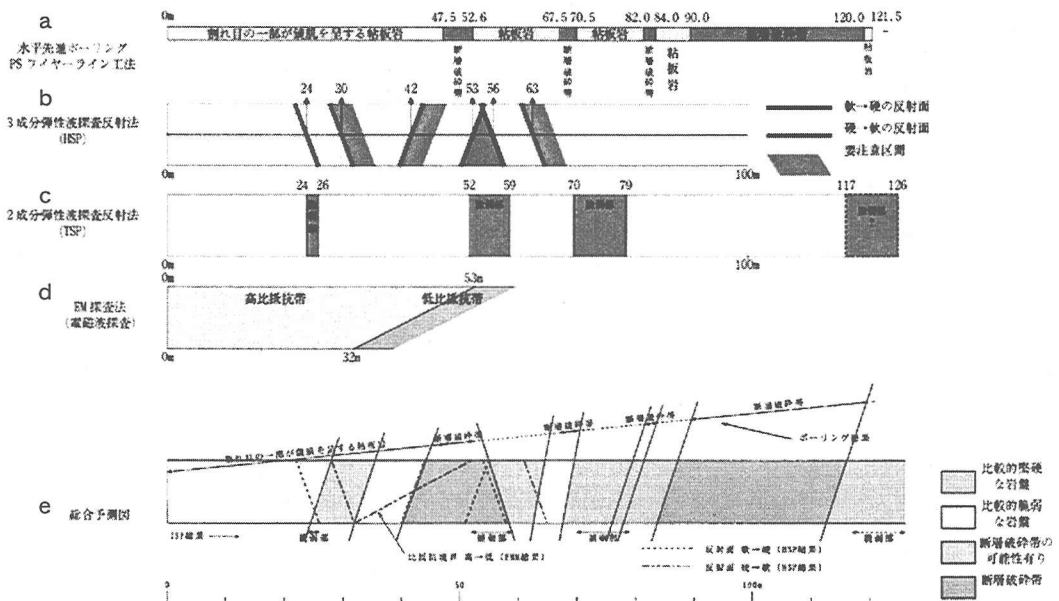


図-4 D 等級地山での探査結果

であり、切羽状況も破碎された粘板岩であり、当然のことながら支保構造や補助工法をこの地点で変えることなく、それまでと同じパターンで施工した。

この場合、予測が外れたと評価して良いもののが重要である。手法の異なる4つの探査で地山の変化を検出した。したがって、反射法では複数の反射面があり、EM探査では高比抵抗値→低比抵抗値の変化、ボーリング探査でも破碎部を確認している。結論を言えば、地山の変化はあったと判断することが妥当である。一方、それまでの支保パターンと変化がなかったということは、この地山の変化では地山等級を変える程度の変化でなかったと解釈できる。すなわち、やや良好なD等級とやや不良なD等級を検出したということであり、いずれにしても、両者はD等級であったと考えることが自然である。

したがって、探査は正確であったが、トンネル工学的には一つの地山等級に属する地山であったと言える。これらを考慮すると、探査結果は劇的な変化を期待するものではなく、施工時に注意が必要であるとのシグナルとしては十分有効である。

4. C等級地山での探査結果¹⁵⁾

対象地山は、新第三紀に付加された付加体であり、岩石は泥岩としているが、岩石強度は40～60Mpaと推定され、むしろ頁岩や粘板岩に分類しても良い状況であった。屈折法の弾性波速度も4～4.5km/secあり、地山等級としてはC等級と判断された。作業坑から本坑に分岐があり、この分岐部の地山を予測する目的で、3成分HSPと坑内屈折法弾性波探査を実施した。

解析結果を図-5に示す。

地質状況から考慮すると、探査区間では岩石自体の密度や弾性波速度の変化が少ないため、反射面は岩盤内に発達する亀裂状況の変化を示すと想定された。特に、亀裂が開口し集中湧水がみられる区間や、厚い粘土化した挟在物をもつ亀裂が多い区間などは、大きな反射エネルギーをもつ面として検出される可能性が高い。

実際の地山状況は、図-6に示した通りである。

多亀裂帯の出現位置はほぼ一致した。幅は予測された幅に比べ広い分布を示したものの、地山の性状は亀裂の多い区間であると予測したが、予測通りであった。

地山状況は、亀裂間に白色のシルトを多く挟在し、

亀裂が細かく脆弱化している状況であった。探査区間内では最も反射面を形成しやすい岩盤状況であったと考えられる。

この場合、地山等級としての変化は少ないが、切羽観察では明らかに多亀裂帯を認識し、適切に予測できた。

5. E等級地山での探査結果

対象地山は、先述のD等級地山と同じ現象であるが、探査箇所の切羽状況は砂岩や凝灰岩が30%以上出現し、DI等級の地山である。

ここではあらかじめ、地表からのボーリング探査により約80mの著しく破碎された断層が予測されていた。探査の目的は断層部手前50m地点で3成分HSPを実施し、断層の出現位置を予測し、ボーリング探査を断層部手前20mで実施し、ボーリング延長を短くし、経済性を図ることであった。

3成分探査結果(図-7)では、探査位置から50mで断層が出現し、断層幅は約55mと想定された。切

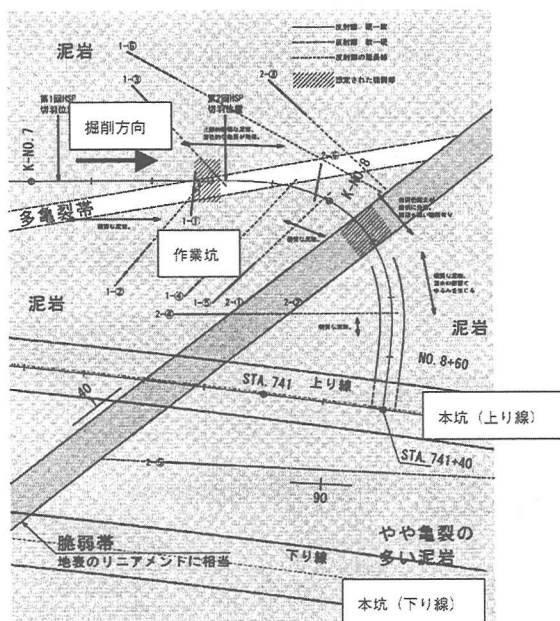


図-5 C等級地山での探査結果

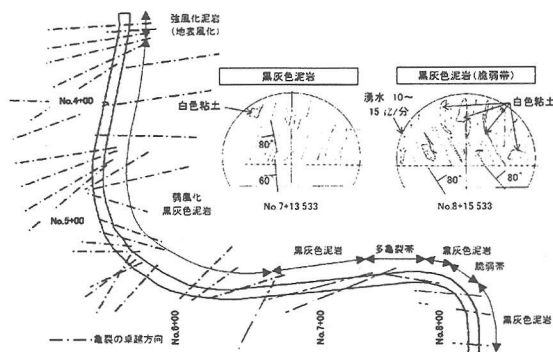
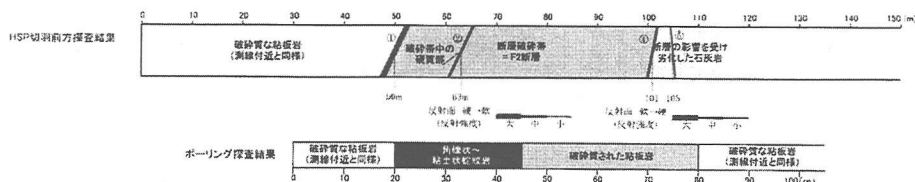


図-6 C等級地山での予測と実際(作業坑)

羽を 30m 進め、そこでボーリング探査を実施したところ、3 成分 H S P で予測した位置で断層を確認し、出現位置は 3 成分 H S P の予測と完全に一致した。なお、このボーリングでは 40.5m でジャミングにより探査不能になった。また、破碎帯は蛇紋化していることも確認できた。実際の切羽でも角礫状と粘土状蛇紋岩が出現した。再度ボーリング探査した結果、蛇紋岩の幅は 25m 程度と確認され、3 成分 H S P の探査より 10m 程度長くなった。また、全体の断層幅も H S P が 55m と予測したがボーリングでは 60m であり、ほぼ整合している。現実の掘削では 65mm/3m (切羽が 3m 進んだときの変位量) が生じ、完全なる膨張性地山となっている。

ここから言えることは、本当に不良な地山、言い換えると硬軟が著しく異なっている場合には、反射法の弾性波探査は有効であったとも言える。



図－7 E等級地山での探査結果

6. 得られた知見と今後の方向性

3つの異なる地山等級での反射法3成分H S P探査の結果についていえることは、

- ① 反射法探査は反射面を正確に捉える。
- ② 硬軟の差は、トンネル工学的に同じ地山等級でも発生する。この場合には地山等級の変化はない。
- ③ 良好地山での探査の方が、トンネル工学的な変化を捉えやすい。
- ④ 地山等級が2ランク以上の差がある場合には、より実用的である。

以上の知見から、単に地山等級の変化や断層の存在が、必ずしも反射面を反映していないということである。同じ地山等級でも反射面は存在し、探査ではこれを把握する。重要なのは、これらの結果をいかに技術的に判断するかということであって、探査をいたずらに疑ってはいけない。

また、反射法の弾性波探査は原理上から相対的な予測である。しかしながら、現実の物理量(弾性波速度、密度など)を定量的に表現することが今後の大きな課題である。より多くの現場でデータを収集し、地山毎の物理量を把握することで定量評価は可能になる。

さらに、EM探査では、切羽前方 100m程度まで探査深度を深めることおよび反射法の探査と併用することで、地下水の予測が可能となるため、今後も普及改良を望みたい。

最後に多くの探査の機会を与えて頂いた日本道路公団静岡工事事務所および清水・青木・徳倉建設共同企業体、四国整備局中村工事事務所、清水・熊谷共同企業体の皆様に感謝をいたします。

参考文献

- 1) 川上 他：TSPによるトンネル切羽前方探査の調査例とその検証 トンネル工学研究論文・報告集 第6巻 1996.11 土木学会
- 2) 西野 他：様々な地質条件下におけるTSP切羽前方探査の適用性 トンネル工学研究論文・報告集 第6巻 1996.11 土木学会
- 3) 笠博義他：TSP探査法による機器配置条件が探査結果に与える影響についての一考察 トンネル工学研究論文・報告集 第6巻 1996.11 土木学会
- 4) 飯酒 他：トンネルHSP法による切羽前方の地山状況予測(その1)－峠山トンネルにおける現地適用－ トンネル工学研究論文・報告集 第6巻 1996.11 土木学会
- 5) 桑原 他：トンネルHSP法による切羽前方の地山状況予測(その2)－軟岩地山における現地適用実験－ トンネル工学研究論文・報告集 第5巻 1995.11 土木学会
- 6) 水上 他：弾性波を用いたトンネル切羽前方探査の計測条件についての実験的検討 トンネル工学研究論文・報告集 第7巻 1997.11 土木学会
- 7) 笠 他：坑内弾性波反射法における探査精度に関する一考察 トンネル工学研究論文・報告集 第7巻 1997.11 土木学会
- 8) 折橋 他：切羽前方探査技術の現場への適用 トンネル工学研究論文・報告集 第6巻 1996.11 土木学会
- 9) 笠 他：坑内弾性波反射法によって探査可能な不連続面の特徴に関する検討 トンネル工学研究論文・報告集 第7巻 1997.11 土木学会
- 10) 山本 他：反射法地震探査結果と地質構造に関する一考察 トンネル工学研究論文・報告集 第7巻 1997.11 土木学会
- 11) 明石 他：切羽前方弾性波探査の探査精度についての基礎的検討 トンネル工学研究論文・報告集 第7巻 1997.11 土木学会
- 12) 港 他：坑内弾性波反射法における測定・解析手法の再検討 トンネル工学研究論文・報告集 第7巻 1997.11 土木学会
- 13) 笠 他：坑内弾性波反射法を用いた岩盤評価の試み トンネル工学研究論文・報告集 第7巻 1997.11 土木学会
- 14) 明石 他：切羽前方弾性波探査による地質推定の可能性 トンネル工学研究論文・報告集 第7巻 1997.11 土木学会
- 15) 3成分HSP切羽前方探査による作業坑・本坑交差部の地質予測 片寄 他 第56回土木学会年次学術講演会, 2002 (投稿中)
- 16) マルチ周波数EM探査パンフレット 関電興業株式会社