

坑内弾性波反射法(TSP法)から想定される地質構造

Study on the Imaging Method for Geological Condition by Tunnel Seismic Prediction

○大沼和弘*、笠博義**、猪狩哲夫*、長尾和明***

Kazuhiro ONUMA, Hiroyoshi KASA, Tetsuo IGARI and Kazuaki NAGAO

Abstract

The imaging method for geological condition by tunnel seismic prediction was carried on as follows.

- a. Geological analysis using seismic prospecting by reflection method
- b. Reflection condition by tunnel seismic prediction
- c. Relation between geological province and geological structure
- d. Relation between geological province and reflection condition

We study each present problem, and consider the method imaging geological structure by tunnel seismic prediction in future.

Key words: Tunnel seismic prediction, Reflection method, Geological province, Geological structure

1. はじめに

トンネルを合理的かつ安全に施工するためには、その地山状況を的確に把握する事が必要となる。トンネル坑内から切羽前方の地質状況を把握する方法として、近年、トンネル坑内からの弾性波反射法探査 (Tunnel Seismic Prediction、以下 TSP 法と呼ぶ) が開発され、容易に長距離を探査する方法として徐々に普及しつつある。この手法は G.Sattel ら¹⁾が開発したもので、トンネル側壁を利用して弾性波探査反射法を行い、切羽前方の断層などの位置を予測するものである。筆者らは、この探査技術をトンネル施工現場においてより効果的に活用することを目指して、さまざまな地形・地質条件下での探査結果を通じて、TSP 法の適応性や探査精度および TSP 法を用いた岩盤評価について研究を行ってきた²⁾など。しかし、TSP 法の探査結果は弾性波反射面の位置を予測するに過ぎず、的確に地質構造を把握するためには十分とはいえない状況である。

これは、TSP 法などの弾性波反射面は、地中の音響インピーダンスの反射面を表すものであるため、地質構造との関連が明確になっていないことが一因と考えられる。本論は、現在までに得られている知見を整理し、現状の問題点および今後の検討事項を考察するものである。

2. 弾性波反射法

2.1 弾性波反射面

TSP 法を含む弾性波探査反射法における反射面は次のような性質を示すものとされる³⁾。異なる弾性波速度の境界面では図-1 に示すように、屈折波および反射波が発生する。このとき、反射波はスネルの法則に

より、 $\theta_1 = \theta'_1$ となる。弾性波速度は式(1)で示すように、媒体の密度(ρ)、ヤング率(E)およびポアソン比(σ)によって表される。また、境界面からの反射波の強さは反射係数(r)で表され、式(2)の媒体の音響インピーダンス(Z)に応じて変化する。

弾性波探査反射法からわかる反射面は、媒体の音響インピーダンスの境界面であり、反射係数は式(3)のように、密度と弾性波速度、すなわち、密度とヤング率、ポアソン比の関数となる。

反射面となる地質構造を考えるにあたり、次のような事項を考慮する必要がある。

- ① 岩相ごとの存在可能な弾性波速度範囲が広いこと、弾性波速度の変化から岩相を予想することは、一般には難しい。
- ② 岩石が様々な鉱物の組み合わせで構成されていることや孔隙が存在することから、岩石の密度は広い範囲に分布する。岩石の密度の違いは、孔隙率の変化、孔隙内流体による変化、地質時代・温度・圧力による変化により生ずるものと考えられる。このため、密度の変化の状態を予想するのは難しい。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[1 + \frac{2\sigma^2}{1 - \rho - 2\rho^2} \right]} \quad (1)$$

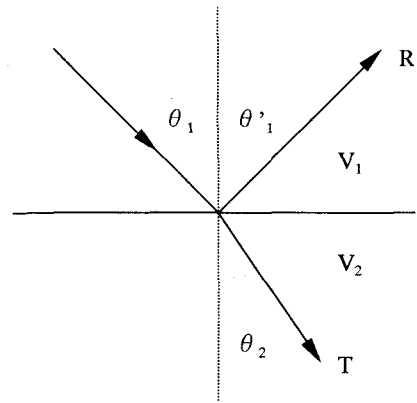
ρ : 密度
E: ヤング率
 σ : ポアソン比

$$z_i = \rho_i V_i \quad (2)$$

z_i : 音響インピーダンス

$$r_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{z_{i+1} + z_i} \quad (3)$$

r_i : 反射係数



2.2 探査の流れ

TSP 法を含む弾性波探査反射法は、データ取得技術、データ処理技術およびデータ解釈技術から構成される。つまり、このような探査技術は、物性の違いにより生ずる弾性波反射波を取得する技術、取得した反射波を解析・処理する技術、さらにその結果から想定される地質構造に解釈する技術からなる。

しかし、取得・解析が行われたデータだけで地質構造を解釈する技術は不十分で、既存の地質資料や地表調査やボーリング調査などのデータにより補完することで、より確からしい地質構造を想定することが必要とされている。

3. TSP 法

3.1 TSP 法の概要

TSP 法はトンネル側壁に受振点(1点)と発振点(通常 20 点以上)を設けて、弾性波反射法探査を行うものである。弾性波の反射面となる断層などの位置について、切羽前方 100m 程度までのトンネル内に出現する位置を推定するものである。発振孔内に設置された少量の火薬を震源として、これによって発生した弾性波のうち断層や地質境界などの反射面(以下、単に反射面と呼ぶ)からの反射波を測定するもので、その到達時間と弾性波の伝播速度から、反射面の位置を推定し、それをもとにトンネルと反射面とが交差する場所を推定するものである。

このように、TSP 法は基本的には反射面との遭遇位置を予測するものであるが、反射波の位相から、反射面の性状(硬軟の変化)も同時に予測される。また、探査結果の解析においては反射波の相対的なエネルギーを検出可能であり、反射波の到達方向の上下判定も可能となる。さらに、対象となる反射面の走向を仮定することによりその傾斜を想定することができる。

3.2 反射面となりうる地質構造

TSP 法では、反射波の位相から、その対象を境界として岩盤が硬質化するか、軟質化するかを判断している。

この点に着目して、反射パターンの組み合わせから、表-1⁴⁾のように探査対象の地質状況について想定することができる。

表-1 反射タイプによる地質的な意味の推定

反射タイプ	反射面の組み合わせ			推定される構造
	硬	軟	硬	
断層	硬	軟	硬	断層
貫入岩型	軟	硬	軟	貫入岩
岩種境界 A	硬	軟		硬岩 / 軟岩
岩種境界 B	軟	硬		軟岩 / 硬岩

3.3 探査実績

これまでの探査実績において検出された代表的な地質構造を模式的に表-2 に示す。なお、この表は探査実績に基づき作成したもので、探査可能なすべての地質構造を表したものではない。

表-2 探査可能な地質構造の例

タイプ	①断層型	②断層型	③断層型	④貫入岩型
模式断面				
地質区分	・全般	・火山岩類 ・火山砕屑岩類	・中～古生代の堆積岩類・変成岩類 ・深成岩類など	・火山岩類
地質状況	・比較的硬質な岩盤中に軟質な断層が存在する	・亀裂の周辺に熱水変質を受けた脆弱部が存在する	・硬質岩盤中に亀裂の多い部分が存在する	・岩脈が貫入 ・岩脈の亀裂の多い場合がある
探査傾向	・岩盤が均質であるほど明瞭となる	・境界面が不明瞭	・境界面が不明瞭 ・多数の反射面	・亀裂が少ない場合明瞭 ・亀裂が多い場合は断層型になる
タイプ	⑤貫入岩型	⑥貫入岩型	⑦地質境界型	⑧地質境界型
模式断面				
地質区分	・深成岩類 ・火山岩類	・火山砕屑岩類	・堆積岩類 ・変成岩類 ・火山砕屑岩類	・全般
地質状況	・貫入岩体の境界部が変質する	・溶結部分が硬質となる	・地層が互層状に分布 ・地層境界が走向断層となる場合がある	・地層・岩体の境界面
探査傾向	・大局的には貫入岩型となるが、境界付近は複雑な反射を示す	・高溶結であるほど明瞭	・多数の反射面が現れやすい	・地層・岩体の規模が大きいほど明瞭

ここで、探査結果は、概ね、断層型、貫入岩型および岩種境界型に大別されることが分かる。しかし、中～古生代の堆積岩類・変成岩類に見られる亀裂部が多い部分（③断層型）のように、多亀裂な部分の中に硬質な部分が残っていることが考えられる場合は、TSP法の反射面は複雑なものとなる傾向がある。

このように、地質区分とそこで存在する地質状況によって、TSP法による反射面の探査結果がそれぞれ特有の傾向を示すことが多いことがわかっている。

4. TSP法から想定される地質構造

4.1 TSP法の現状

現在、TSP法の探査結果から地質構造を想定するに当たっては、次のような手順を用いている。

- ① 探査地域の地質区分は何か。
- ② 探査地域の地質区分において、探査可能となる地質構造として何が考えられるか。
- ③ 探査結果の反射タイプはどうか。
- ④ ②、③の組み合わせより地質構造を想定。

ここで、探査地域の地質区分と推定される地質構造については、表-3に示すような関係が考えられる。例えば、堆積岩類・変成岩類（中～古生代）におけるTSP法の探査において、断層型の結果が得られた場合、断層、断層沿いの変質部、走向断層、軟質な地層、亀裂の多い地層など、複数の地質構造が考えられる。

表-3 TSP法で探査可能な地質構造

地質区分	地質時代	代表的な構成岩種	断層型	貫入岩型	地層境界型	備考
堆積岩類 変成岩類	中生代 古生代	砂岩 粘板岩 頁岩 結晶片岩	○断層 ・断層沿いの変質部 ○走向断層 ・軟質な地層 ○亀裂の多い地層	・硬質な地層	○地質境界	・割れ目が多く、反射面が多い。
堆積岩類	新生代	砂岩 泥岩	○断層 ・断層沿いの変質部 ○軟質な地層	・硬質な地層	○地質境界	
深成岩類		花崗岩 閃緑岩	○断層 ・断層沿いの変質部 ○層状の亀裂の多い部分 ・接触面の変質部	・接触面の熱変成部	・地質境界	
火山岩類		玄武岩 流紋岩	○断層 ○断層沿いの変質部 ○亀裂の多い岩脈	○岩脈	○地質境界	・岩脈などは亀裂の状態に支配される
火山砕屑岩類		凝灰岩 凝灰角礫岩	○断層 ○断層沿いの変質部 ○軟質な地層 ○亀裂の多い地層	○溶結した地層 ○溶岩	○地質境界	

凡例 ○：可能性大、・：可能性あり

4.2 現状の課題と今後の検討事項

TSP 探査結果から反射面となった地質構造をより詳細に想定する、つまり地質構造を特定するためには、次の事項を詳細に検討することが必要となる。

① 地質区分をより細分化する。

地層、岩体などの地質区分を、TSP 法の反射傾向を考慮して、より細分化することにより、そこで存在可能な地質構造を絞り込むことが可能となる。

② TSP 法反射タイプをより細分化する。

TSP 法の反射タイプは表-2 に示した 4 区分としているが、反射面の出現状況や反射エネルギーなども考慮したうえで細かく区分し、地質構造との関連を明確にする。

このように、きめ細かな地質区分とそれに対応する反射タイプの関係を明確にすることが必要と考えられる。

このため、次のような事項を、今後、検討・実施することが必要と考えられる。

① 地質構造と TSP 探査結果についての既存データの分析と集積

② TSP 法反射傾向を考慮した地質区分と、そこで存在可能な地質構造の把握

③ 反射パターンと地質構造の関係の解明

今後、これらの検討を行うことで、TSP 法から判明する地質構造についての詳細な把握が可能になるものと思われる。さらに、これらの検討を通じて、TSP 法による地質予測がトンネル施工により有効に活用できるものと考えている。

5. 参考文献

- 1) G.Sattel et.al: Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, FIRST BREAK, Vol.10, No.1, 1992
- 2) 大沼他: 亀裂の多い地山における TSP 探査について, 応用地質学会平成 7 年度研究発表会講演論文集, pp.167-170, 1995
- 3) 物理探査学会、物理探査ハンドブック 手法編 1-4 章、物理探査学会、1999
- 4) 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, Vol.6, pp.95-100, 1996.11.