

(62) 地震探査法によるトンネル切羽前方岩盤調査 —基礎実験結果—

応用地質(株) ○ 今 吉 隆
齋 藤 秀 樹
長 田 正 樹

In-Tunnel Seismic Survey for Prediction ahead of the Tunnel Face
-Experimental Approaches for the Real Application-

Takashi IMAYOSHI, OYO Corporation
Hideki SAITO, OYO Corporation
Masaki OSADA, OYO Corporation

Abstract

During the excavation phase a geological prognosis which contains detailed and quantitative information about abrupt changes in rock quality and formation boundaries lying ahead of the tunnel face is required by the tunnel engineer. We took notice of a geophysical exploration technique (Sattel et al., 1992) for prediction method and carried out a fundamental experiment aiming at the real application of this technique. This experiment had two major aims from practical standpoints, that is - (1) confirmation of the reflections of the formation boundaries ahead of the face, (2) determination of the appropriate number and positions of sources and the appropriate number of receiver components.

Through this experiment, we could detect some reflections of the formation boundaries ahead of the face and recognized the possibility of this technique for prediction method. On the other hand, we noticed that this technique had some subjects to settle - e.g. the method of reducing interface waves traveling along tunnel surface which masked the objective reflections. Finally, we are going to optimize this technique and continue to research for real application.

1. はじめに

トンネル掘削施工中定期的に、切羽前方100m区間程度の岩盤状況を予測する手法が、工法の選定および資材調達的面から強く求められている。この予測手法が満たすべき条件として、①測定作業が1作業時間帯程度の短時間であること、②解析結果が2~3日程度の短時間で得られること、③先進ボーリング等の既往の切羽前方予測手法に代わるあるいは補完するようなものであること一等が挙げられる。

そこで筆者らは、トンネル切羽前方の岩盤状況をトンネル内での地震探査(VSP)データから予測する手法(Sattel et al., 1992; 以下、この手法をトンネルVSPと仮称)に着目し、この手法の適用性の確認のため、施工中のトンネルにて基礎的な現場実験を行った。実験の結果、岩盤中の反射面の位置を推定することが基本的に可能であるとの見通しを得たので報告する。

2. トンネルVSPの原理と適用上の課題

切羽前方の岩盤状況を、地震探査 (VSP) により予測しようという試みは、Sattel et al. (1992) に端を発する。この試みは、トンネルをボーリング孔に見立てたもので、①切羽前方にトンネル軸と直交する地質構造 (断層、地質境界など) があれば、地震波を反射する、②この反射波をとらえれば反射体である構造の性質 (位置、性状) が予測できる—という非常に簡単なアイデアに基づく。なお、反射点を切羽前方のトンネル軸上に制限するため、測線位置での岩盤のP波速度を有する反射波を扱うことになる。原理の概要を図-1に示し、切羽前方の反射面までの距離を求める方法をステップ毎に以下に示す。

(1) 複数の受振器が並ぶ測線より坑口側で起振を行い、受振器群で観測される初動より測線位置での岩盤のP波速度 (V_p) を得る。

(2) 得られた波形記録から反射波を抽出する。明瞭な反射波が認められない場合は、切羽前方の岩盤は均質であると予測する。

(3) 反射波が認められた場合、測線位置での岩盤のP波速度 (V_p) を有し、伝播方向が直接波と反対である反射波を選定する。選びだした反射波の起振点位置での往復走時 (T_{2WAY}) を求める。

(4) 起振点から反射面までの距離 (D) を、 $D = (T_{2WAY} \times V_p) \div 2$ で求める。

このようなトンネルVSPを日本国内で適用する際、手法が提案されて未だ日が浅いことから、⑦地質構造が一般的に複雑な日本で有益なデータが得られるか、⑧各種の掘削工法のもとで適用可能な手法であるか、⑨実用可能な観測パターンはどのようなものか—の大きく3点が手法開発上の課題として考えられた。

このような点に加え、いくつかの技術的な問題点を明らかにして実用化を進めるためには、現場実験と施工結果の対比といった作業を継続的に続けていく必要があると考え、次節に示す実験を行った。

3. 現場実験概要

3-1. 実験の目的

当実験は、切羽前方の岩盤状況の予測手法として、トンネルVSPが適用可能であるかどうかを探る基礎的な段階の実験として行った。実験の主要な目的は、①本当に切羽前方に反射点を持つと考えられる反射波を検出することができるか、

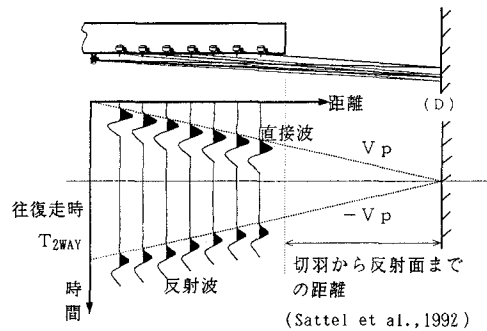
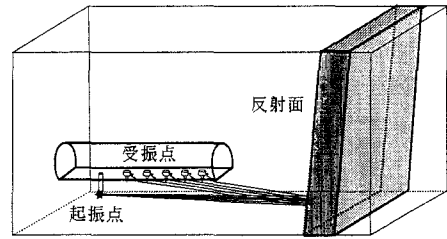
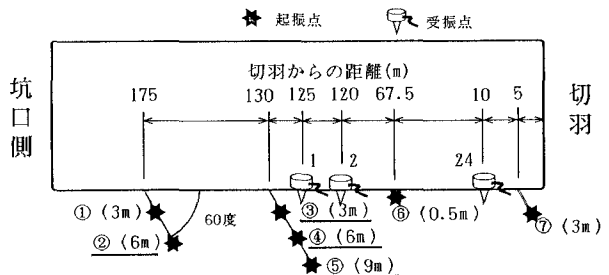


図-1 測定法の原理。



③丸番号は起振点番号を、括弧内は起振深度を示す。アンダーラインの付いた起振点は本文中に波形記録を掲載

図-2 起振点および受振点の配置

②反射波を検出することができるならば、最適な測定系（具体的には起振点のトンネル軸方向の位置、深度、点数、起振に用いる薬量、受振点の位置、間隔、点数、受振器の成分数等）および測定に要する時間および人数はどういったものであるか—の2点であった。

3-2. 起振点・受振点配置

測定系そのものも前項で示したように検討課題のひとつであったが、既往地表弾性波屈折法で得られた施工基面でのP波速度3.7km/secを参考に、当実験では図-2に示す起振点・受振点配置を採用した。作業能率の良さおよび機器の固定の良さ等から測線は踏前部中央に設けた。

起振は、爆薬（薬量約30g）を用いた。ドリルジャンボにより切羽から175m、130m、67.5mおよび5mの位置に計4孔起振孔（60度傾斜、 $\phi 66\text{mm}$ ）を削孔した。なお、切羽寄り2孔は測線位置の速度測定を目的としたものである。

受振器は、水平2成分上下1成分のものを踏前部を露岩させた上で石膏を用いて固定した。受振点は、切羽から125m地点より切羽側へ5m間隔で24点設け、測線長は115mとなった。

以上述べた起振点・受振点配置は、ゆるみ領域および新鮮な岩盤のP波速度の把握を目的として行われる坑内弾性波速度測定に配置に比べると、①受振点間隔が大きく、従って測線長が長くなっている、②起振が起振孔中で爆薬を用いて行われる—といった違いが認められる。なお、データ収録にはダイナミックレンジが20ビット相当である弊社McSeis170fシステムを使用した。

4. 現場実験結果

得られた波形記録の例を図-3および図-4に示す。

●起振深度：図-3は起振孔が同じで、爆薬の装てん深度のみが異なる記録である。図-3(a)は深度3m、(b)は深度9mである。ともに初動部は見かけ300Hz程度の周波数が見られる。その一方で、図-3(a)には卓越周波数100Hz程度の優勢な波が見かけ1.8km/secの速度で伝わっている。これはトンネル内に自由表面が存在することによる境界波と考えられる。この境界波は、起振点深度が大きくなると発生しに

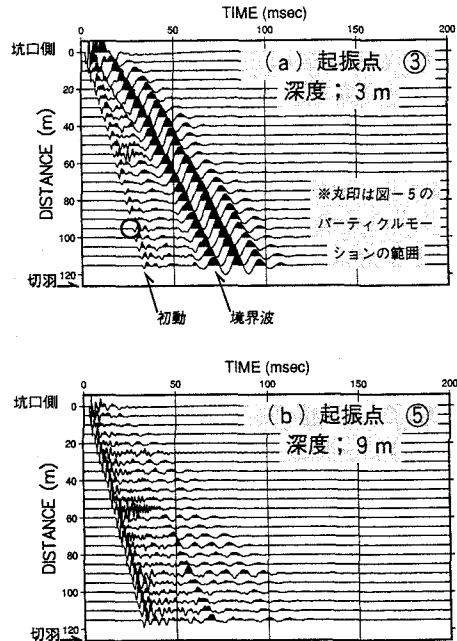


図-3 起振深度の異なる波形記録例

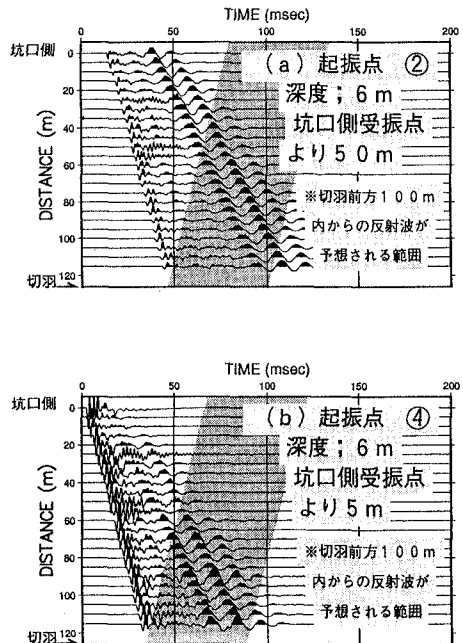


図-4 起振位置の異なる波形記録例

くくなることが記録より明かである。従って、起振深度はできるだけ深い方が反射波の検出、同定のためには有利であるといえるが、作業性が低下することから深度6mぐらいが妥当であると思われる。

• **起振位置**：図-4はトンネル軸方向に起振位置が異なる記録である。図-4(a)は測線の坑口側端の受振器から50m、(b)は5mに位置する起振孔で起振した記録である。どちらも起振深度は6mである。図には、切羽前方100m区間に反射面があるとした場合に、その反射波が現れるであろう時間範囲を示した。いずれの場合も境界波は見かけ1.8km/sec程度の速度であり、45m程度の起振位置の差は目的の反射波が出現する時間領域を避けるのに充分とはいえない。従って、データ取得後の処理過程でも境界波を抑制し、除去する必要がある。なお、現場作業の面からは、ドリルジャンボによる削孔位置としては、

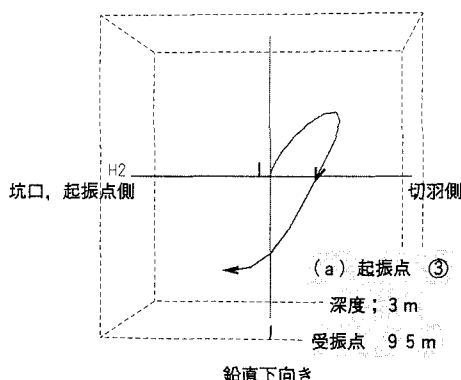


図-5 初動付近のパーティクルモーション

今回削孔した切羽から175mの起振孔がほぼ限界といえる。

• **波動の性質**：図-5は、起振点③(深度3m)から約100m離れた受振点の3成分受振器の記録(図-3(a)の95m地点)から初動付近のパーティクルモーションを示したものである。入射角度は水平面と約45度となっている。起振点-受振点の幾何学的な位置関係からみると、初動の揺れは切羽側に水平的な運動をするものと考えられたが、実際は踏前部の斜め下方向から波が入射している。このことは初動がトンネル周辺のゆるみ層と新鮮な岩盤部との境界で屈折し、ヘッドウェーブとして到来していると説明できる。従って、切羽側から到来する反射波も初動と同様にゆるみ層と新鮮な岩盤との境界で屈折するものと考えられ、1成分(上下成分)の受振器でも充分切羽前方からの反射波をとらえられるものと考えられる。

• **薬量**：今回30g程度で起振を行ったが、予測距離を100m程度に限れば、より少ない薬量でもよいと思われる。トンネルの保守の面からもより少ないことが望まれよう。

• **処理結果**：通常のVSPデータで用いられるBPF、AGC等の反射波を強調する波形処理(大石他, 1983)を施し、速度(F-K)フィルター処理により反射波を抽出した例を図-6に示す。初動を用いた速度解析で得られた測線位置での岩盤のP波速度($V_p=3.8\text{km/sec}$)と同等な速度を持つ顕著な反射波(図中の矢印)が認められる。

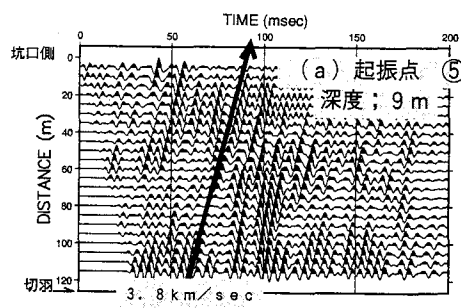


図-6 反射波抽出例

また、図-7は境界波の発生小さい2起振点のデータについて、各受振点で得られた反射波を、切羽から約125mの起振点⑤の位置から反射面までの往復時間(速度は測線位置での岩盤のP波速度; $V_p=3.8\text{km/sec}$)に変換する2waytime変換処理を行ったものである。トンネル軸に直交する反射面からの反射波は、同図では縦に直線上に並ぶようになる。図-7中の四角で囲んだ、①往復走時80msec、②同90msec程度の2箇所にトンネル軸に直交するような反射面の存在が予測された。なお、実際のトンネル掘削時に採用した支保パターンを、ドリルジャンボによるノンコアの先進ボーリングによる予測とともに示した。予測した2カ所の反射面の間は、支保パターンを変更せざるを得なかった区間にほぼ対応する。

5. まとめおよび今後の課題

今回の現場実験の結果をまとめると、①反射点が切羽前方にあると考えられる反射波が認められた。この反射波の発生位置は実際の掘削時の支保パターンの変更点にほぼ対応するものであった。②今回の現場実験は、起振孔削孔から撤収まで約8時間であった。作業時間的には掘削施工のサイクルに取り入れることが可能と考えられる。③トンネル内の自由表面を伝わる境界波の存在が実験的に確かめられたが、この境界波のハード的、ソフト的な低減方法および除去方法が第1に解決すべき課題となる。④今回踏前部を露岩させ3成分受振器を固定したが、初動の到来方向をみるとゆるみ層の分布の影響が認められ、上下動1成分の受振器でも測定が可能と考えられる。

今回の現場実験で、境界波の低減の必要性など解決すべき技術的な問題点はあるが、切羽前方に反射点を持つと考えられる反射波が認められ、トンネルVSPにより岩盤中の境界面(反射面)の位置を予測することが基本的に可能であるという見通しを得た。今後は、実験を重ね、測定法と同時に解析法の最適化を進めたい。また、反射波の性状から岩盤の性状もある程度予測できるような手法に発展できる可能性もあるので、その研究も引き続き行っていきたい。

オールコアの先進ボーリングの方法は、岩盤状況を正確に把握できるという特徴がある。それに対し、当手法は、必要とされる掘削作業停止時間、測定・解析に要する時間・経費といった面でボーリングにない特徴があり、ノンコアの先進ボーリング(モニタリング)以上の情報をもたらす可能性があると考えられる。また、当手法で危険区間が予測された場合にオールコアの先進ボーリングを行うといった両手法を組み合わせた利用法も考えられる。

<参考文献>

Sattel, G., Frey, P. and Amberg, R. (1992): Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods - pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland. First Break 10, 19-25.

大石善雄、大友秀夫、太田賢治(1983): P S検層データを利用したVSPの試み 昭和58年春季講演会講演予稿集 物理探査学会

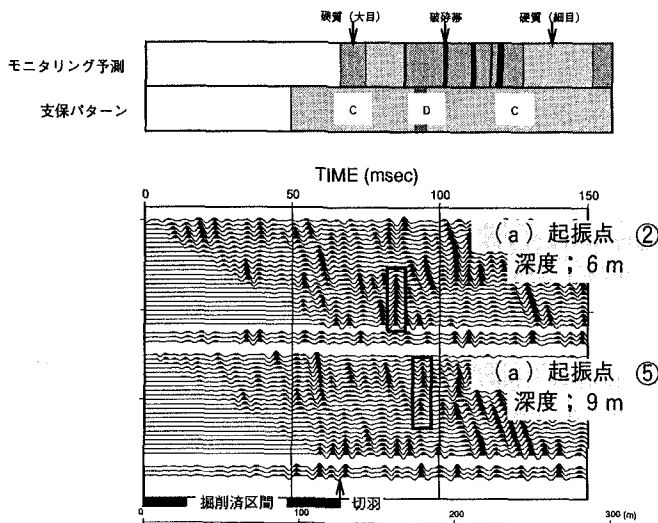


図-7 2waytime変換後の波形と実績施工パターン