

(106) 反射法地震探査による切羽前方予測

佐藤工業(株) 正会員 ○稗田 肇 山本 松生
同上 正会員 西野 治彦
建設省土木研究所 トンネルHSP共同研究会 正会員 中村 康夫

Prediction ahead of the face by seismic reflection method

Hajime HIEDA, Matsuo YAMAMOTO and Haruhiko NISHINO,

Sato Kogyo Co., Ltd.

Yasuo NAKAMURA,

Public Works Research Institute, Ministry of Construction.

Abstract

For the rationalized excavation of tunnel and rock caverns, the prediction of geological conditions is of extreme importance. It has been done by the observation of geology of the face or by prove drilling from the face.

We made an experiment for predicting ahead of the tunnel face with TSP (Tunnel Seismic Prediction) system, which was produced by the Amberg Measuring Technique Ltd in Switzerland.

The results obtained were very much in agreement with the results of rock mass. We verified if the system could be adjusted to Japanese geological condition.

1. はじめに

近年ますます長大断面化しつづける山岳トンネルにおいて工事の安全性・経済性はもとより、急速施工化を求む声が高まってきている。このような現状を踏まえ、迅速かつ正確で、しかも探査距離の長い切羽前方予測技術の確立が必要となってきた。そのような中、建設省土木研究所では、平成5年度より官民共同研究として、トンネルHSP共同研究会を発足し、「弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する研究」を進めている。同研究会ではその研究の一環として、既存の反射法地震探査システムである、スイスのAmberg Measuring Technique社製の「TSPシステム」を用いた現場適用実験を実施した。実験結果によれば、切羽前方150m程度までの断層破砕帯や地層境界など、施工上重要な地質変化部を比較的正確かつ迅速に予測でき、同システムが精度および使用性の面でかなり有効かつ実用的なシステムであることを確認した。

本報告では、TSPシステムの概要と現地適用実験の結果について報告する。

2. システムの基本原理解

TSPシステムは、G. Sattelが提案する切羽前方予測手法¹⁾を、現場で適用しやすくシステム化したものである。その手法の概念図を図-1に示す。基本的には、トンネル坑内において反射法地震探査を実施し、トンネル切羽前方やトンネル周辺に存在する反射面(断層破砕帯、地層境界等)の状況を反射波から予測するものである。

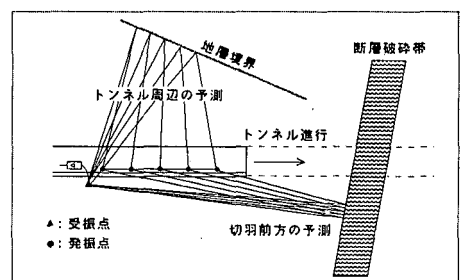


図-1 「TSPシステム」の測定概念図

2.1 測定概要および解析概要

TSPシステムによる切羽前方予測実験の概略手順を図-2に示す。実験は、測定と解析からなり、トンネル坑内での測定により弾性波の受振波形データを得た後、そのデータを現場事務所のパソコンに転送して解析を行う。具体的な作業内容は以下のとおりである。

(1) 測定概要

TSPシステムの測定配置を図-3に示す。発振孔20～30孔と受振孔1孔を側壁に一直線上に配置し、各発振孔で順次発破を行うことにより、受振点での受振波形を測定する。具体的な測定手順を以下に示す。

- ①準備作業：発振孔20～30孔（深度1.5m、φ45mm）と受振孔1孔（深度2.4m、φ45mm）を削孔する。受振孔に受振器用のケーシングを挿入し、モルタルで固着する。
- ②測定作業：受振器用ケーシング内に挿入式受振器（加速度センサー、水平・垂直2成分）を挿入する。発振孔に少量の火薬（20～40g）を挿入し、発破（発振）を行い、受振器で受振波形を測定・収録する。

(2) 解析概要

TSPシステムでは、発振点から受振点に直接到達する弾性波（直接波）と断層破砕帯等で反射した後、受振点に到達する弾性波（反射波）の波形データを記録し、これらを解析して、トンネル周辺および切羽前方の様々な地質情報を得ることができる。TSPシステムの解析作業は、図-4に示す解析フローの①～⑥の順序で行う。

- ①解析に必要な受振波形データや測定点の位置等のデータを、パソコンに転送および入力する。
- ②直接P波、直接S波の波形データから、初動走時を読み取り、最小自乗法を用いて、P波速度（ V_p ）、S波速度（ V_s ）を計算する。
- ③計算した V_p と V_s から、動ポアソン比（ ν_d ）および動弾性係数（ E_d ）を計算する。静弾性係数（ E_s ）は、動弾性係数と静弾性係数との関係式（回帰式＝岩石試験による実験式）を用いて計算する。
- ④直接P波、直接S波、反射P波およびノイズを波界分離する。
- ⑤波界分離した反射P波の波形データに対して、IPP法解析を行い、反射面を検出する。
- ⑥反射面の予測結果図を出力し、解析を終了する。

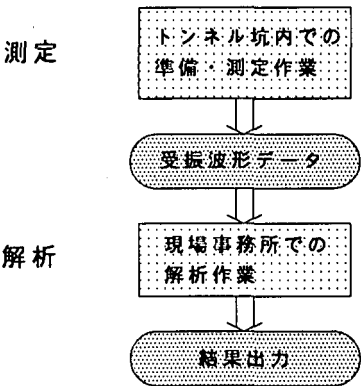


図-2 「TSPシステム」の実験手順

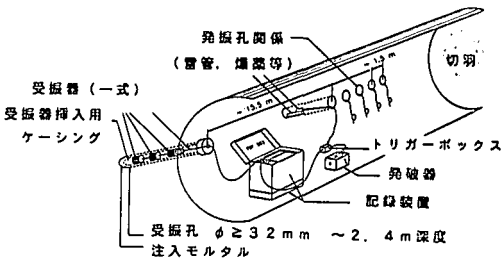


図-3 「TSPシステム」の測定配置図

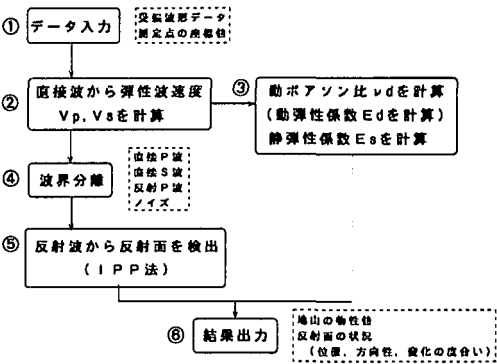


図-4 解析フロー図

3. 波形処理および解析方法

反射法地震探査によりトンネル切羽前方予測を行う場合には、測定された波形データを短時間で解析し、予測結果を迅速に施工へフィードバックしていくことが重要となる。一般に反射法地震探査では、反射面の位置を計算するために、マイグレーション処理などを行うが、解析に多大な時間を必要とする。そこで、TSPシステムでは、G.Sattelが考案した鏡像受振点法（IPP；Image-Point Processing）を導入することにより、解析時間を大幅に軽減し、予測結果を迅速に施工に反映できるようにしている。また、波形処理も現場事務所においてパソコンレベルで行えるようにしており、現場対応型の解析システムを構成している。以下では、IPP法を中心にTSPシステムの波形処理および解析方法について述べる。

3.1 波形処理

TSPシステムにおける波形処理フローは、図-5で示す①～⑦の順序で行う。

3.2 解析方法（IPP法）

IPP法は、反射面を平面と仮定して、弾性波の幾何学的反射法則を利用して、反射エネルギーを計算し、その値を評価することで、反射面の位置と方向性および地質の変化の状況を計算する方法である。マイグレーション処理に比べ、計算時間が短く、パソコンレベルでの解析が可能である。IPP法は、以下に示す①～④の順序で行う。

①図-6に示すように、受振点R、各発振点Sk(k=1～24)を配置し、トンネル切羽前方および周辺に格子点Pij(i=1～m, j=1～n)を設定する。設定した格子点を仮想的な受振点（イメージポイント）とし、各発振点Skと格子点Pij間の理論走時を計算する。なお、理論走時を計算する際には、直接波から求めたP波速度（Vp）を用いる。

②図-7に示すように、計算された各格子点Pijまでの理論走時を反射P波の波形データ上にプロットし、振幅値Akを読み取り、それらの値を加算して、各格子点Pijでの反射振幅エネルギーを計算する。反射振幅エネルギーの絶対値が大きいほど、強い反射現象があることを示す。また、反射振幅エネルギーが正の値の時は、[硬→軟]、負の値の時は、[軟→硬]への変化を示す。

③図-8に示すように、各格子点Pijについて、格子点を中心とし、反射振幅エネルギーを半径としたエネルギー強度円を表示し、半径の大きいものを、ピックアップし、鏡像受振点Pを決定する。

④図-9に示すように、幾何学的反射法則により、鏡像受振点Pと受振点Rを結ぶ線分の垂直二等分線として反射面が決定される。

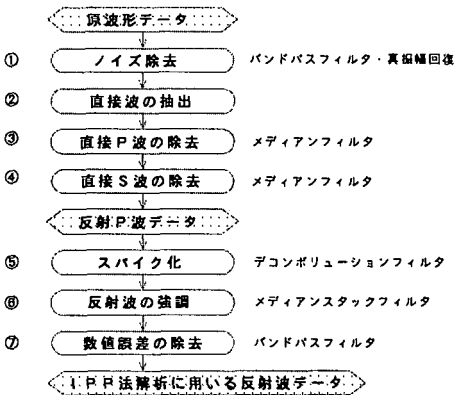


図-5 波形処理フロー図

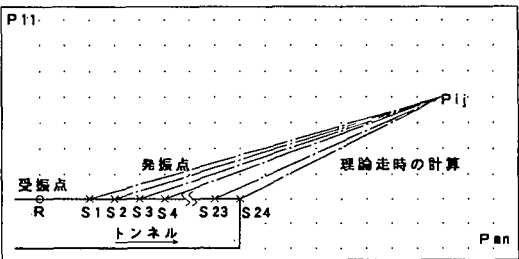


図-6 格子点の設定および理論走時の計算

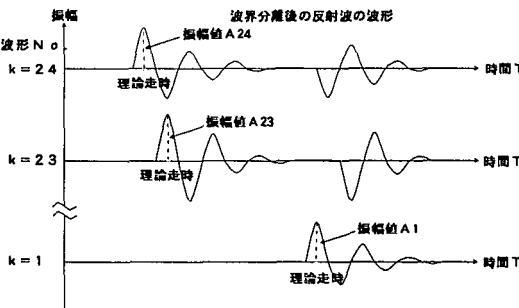
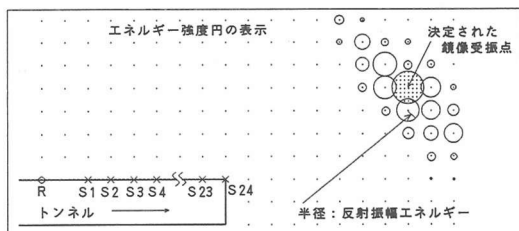
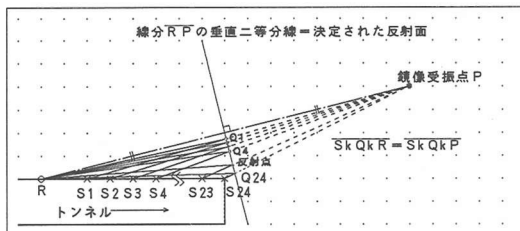


図-7 反射振幅エネルギーの計算



図－８ 反射強度円の表示および鏡像受振点の決定



図－９ 反射面の決定

4. 現場適用実験

これまで幾つかの実トンネルを対象に切羽前方予測における同システムの適用性を検討してきた²⁾。以下に実施した現場適用実験の一例について述べる。

4.1 対象トンネルの概要

対象トンネルは、延長約5 km、掘削径(φ)約3.5 mの導水路トンネルである。掘削方式はTBMフルシールドタイプである。当トンネルの地質は、新第3紀中新世に属する火山碎屑岩類、同溶岩類および貫入岩から構成され、複雑な地質状況となっている。また、トンネル全長において断層破砕帯がかなり多く確認され、集中湧水の発生が予測される箇所もいくつか認められる。

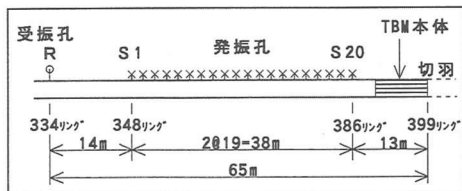
4.2 実験目的および実験方法

(1) 実験目的

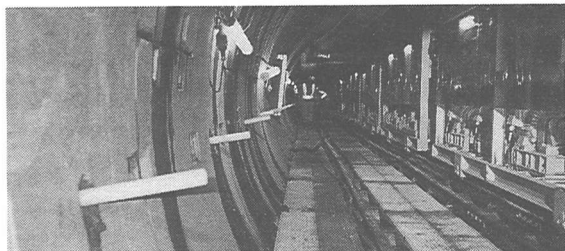
実験の主な目的は、事前調査よりNa.35+180付近(435リング±)に存在が予想されるK断層の位置と露出範囲を掘削前に確認し、TSPシステムによる切羽前方予測の適用性と施工への反映を検討することである。

(2) 実験方法

当該トンネルは、TBMフルシールドタイプであり、支保工としてセグメントを建て込んでいる。そのため、受振孔および発振孔はグラウトホールを利用しての実験となった。実験の測点配置を図－10および写真－1に示す。また、発振源は1孔につき瞬発電気雷管+2号梗ダイナマイト33gを用いて行った。



図－10 測定区間の測点配置状況



写真－1 測定区間の測点配置状況

4.3 実験結果

TSPシステムの現場適用実験結果を以下に示す。

(1) 直接波から求めた地山物性

発振孔－受振孔間において直接波から求めた地山物性値を表－1に示す。同区間は中粒～粗粒凝灰岩が主体であった。

表－1 直接波から求めた地山物性値

地山弾性波速度	V_p	4.167	(km/s)
地山弾性波速度	V_s	2.243	(km/s)
動ポアソン比	ν_d	0.30	
動弾性係数	E_d	3,326,730	(kgf/cm ²)

(2) 反射波による切羽前方予測

測定区間において、反射波による予測結果と実際の地山状況との比較結果を図-11に示す。これらの結果や実験状況から以下のことがわかった。

なお、当該トンネルはTBMフルシールドタイプであり、地山状況を直接（切羽・側壁観察）確認するのは困難であるため、反射波による予測結果と実際の地山状況との比較は、施工した地山等級を介して行った。

① TSPシステムによる予測結果は、全般的にC級であるとの予測であり、実際の地山状況と比較的良好に対応している。

② K断層の位置と露出範囲の確認については、予測結果と良好な対応を示した。

③ 問題点としては以下の点が認められる。

- ・ 直接波のVpを用いて反射面までの距離を算定するため、発振点-受振点間と切羽前方の地質とが顕著に異なる場合には反射面までの距離に誤差が生じやすい。
- ・ 地質変化が緩やかな場合は、その変化を検出しにくい。

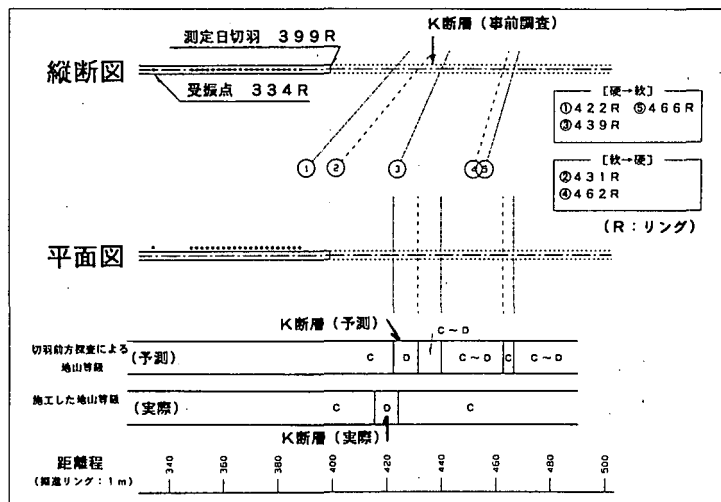


図-11 予測結果と実際の地山状況との比較

5. まとめ

反射法地震探査による切羽前方予測システムであるTSPシステムについて報告を行った。同システムは、現場対応型に、丈夫でシンプルにシステム化されており、測定作業および解析作業に要する時間もそれぞれ数時間であるという特徴を持っている。特に解析作業は、IPP法を用いることにより、現場事務所においてパソコンレベルでの解析が可能であり、迅速さが要求されるトンネル切羽前方探査に有効であると考えられる。

実トンネルを対象にTSPシステムの現場適用実験を実施し、同システムが精度および使用性の面でかなり有効かつ実用的なシステムであることを確認した。今後は、同システムの予測結果と切羽前方の地山物性（弾性波速度等）の関係、あるいは施工パターンとの関係等を総合評価し施工に反映させていく所存である。

- 参考文献 1) G.Sattel et al(1992): Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland. First Break 10, pp.19-25.
- 2) 西野治彦・山本松生・大前晋一・稗田隆・中村康夫：弾性波によるトンネル切羽前方調査法の現地適用実験 -TSPシステムの現地適用例- 第4回トンネル工学研究発表会 論文・報告集 第4巻1994年11月pp.445-448