

(83) 弾性波反射法を用いた切羽前方探査のトンネル工事への適用例

APPLICATION OF SEISMIC REFLECTION DATA TO TUNNEL AHEAD PREDICTION

平野 享*・石崎正剛**・稲葉 力*・芦田 譲***

Toru HIRANO, Seigo ISHIZAKI, Tsutomu INABA, Yuzuru ASIDA

We have been collecting the reflection seismic data in several excavating tunnels for their ahead prediction. Usually, the zero-offset VSP or the in-line offset spread for in-situ measurement by considering the direction of reflection planes were used. However, both measurement methods didn't satisfy fully our request that is the least number of geophones and applicable to reflection planes with any direction. In the present paper, we developed the depth transform algorithm by use of equi-travel time planes. This algorithm is very simple and has possibility to be applicable to the multi-layer structure and fully three-dimensional structure with the short calculation time and the small requirement for core-memory in computer. This algorithm was ported to Macintosh system for on-site calculation in the field.

1. まえがき

トンネル工事では施工サイクルを滞りなく回転させ、設計どおりの進捗を出すことが利益につながる。しかし切羽に予想外の良くない地質が現れると、その進捗が大きく妨げられる。そして作業時間の大半が必要な段取り替えに費やされる。すなわち設計段階における地質調査に、掘削管理に供するほどの精度ときめ細かさが不足していることと考えられる。しかしながら中にはほとんど地質調査が行われない工事例もあり、ある程度予想外の地質の出現は許容しなければならないのが実状である。そこで掘削段階でも切羽前方の地質を調査し、足りない情報を少しでも補完しようとする試みが見られるようになった。最近では浅層反射法と呼ばれる技術をトンネル坑内で切羽前方予知に適用した、TSP¹⁾、HSP²⁾がさかんである。そこで本研究では、実際にどのように浅層反射法から切羽前方予知が行われているか手順を整理し、トンネルの掘削管理に役立てる上で望まれる点、問題点を考察した。さらに探査の評価のために必要なマイグレーション処理について、新たに等走時面を利用した手法を³⁾紹介する。

* 正会員 西松建設(株)技術研究所 土木技術課

** 正会員 西松建設(株)横浜支店

*** 工博 京都大学助教授 工学部資源工学教室

2. ゼロオフセットVSPによる計測

元々ゼロオフセットVSPとは、鉛直方向の坑井に測線を取り発破点とともにジオフォンを多数並べる測定のことを指す。これを切羽前方予知を目的にトンネル坑内向けにアレンジした代表的な例が図-1である。掘削作業の合間に計測を実施するために、比較的設置に手間のかかるジオフォンを減らし、そのかわり発破数が増やされている。このアイデアはTSPが最初のように、TSPの名称そのものは、スイスアンベルグ社の必要な機材と評価ソフトウェアパッケージの商品名である。

TSPのようにジオフォンを最小限しか配置していない場合、その設置状況が極めて重要となる。例えばTSPでは振動センサーと岩盤とのカップリングを良くするために、長さ2m以上の金属製ケーシングをモルタルを用いて岩盤と一体化した上、さらに3組の圧電型振動センサーを磁力によってこのケーシングに密着させるようにしている。その様子を図-2に示す。

ゼロオフセットVSPで得られた振動トレースは、評価のために測定ごとのジオフォンと発破点との距離の違いを補正し、すべてジオフォンのところで発破した場合に相当するトレースに書き換える。つまり岩盤内の反射面がトンネル前方でおおむね直交すると仮定して、図-3のような簡単な方法で補正する。本当に岩盤内の反射面がトンネル前方で直交するなら、補正後に反射波の振幅はトレース上でほぼ横一列に並び(図-4)、その時間位置を用いて反射が起こった地点までの距離が算定できる。しかし反射面が無視できないほど傾斜していると、これほど簡単にトレース上の反射波振幅を拾うことができない。また図-4のトレースの並びそのものがトンネル前方の平面図ではなく、平面図を得るには何らかのマイグレーション処理が必要となる。

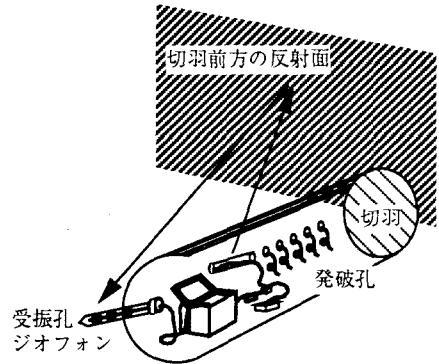


図-1 ゼロオフセットVSPの測定例

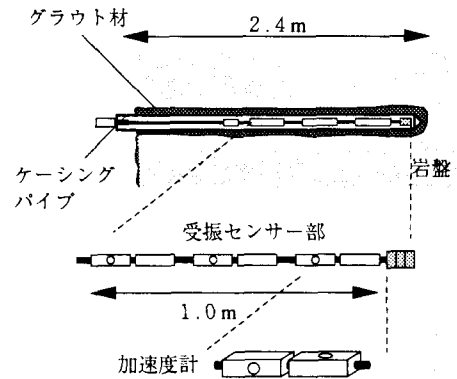


図-2 振動センサーの装着

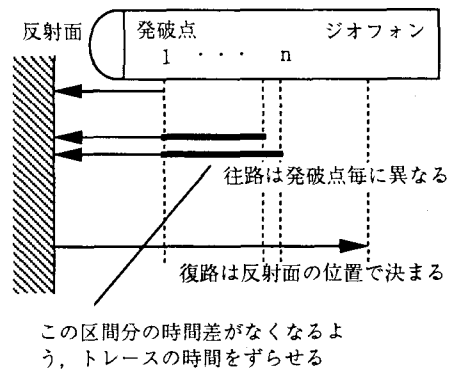


図-3 2-way time 補正

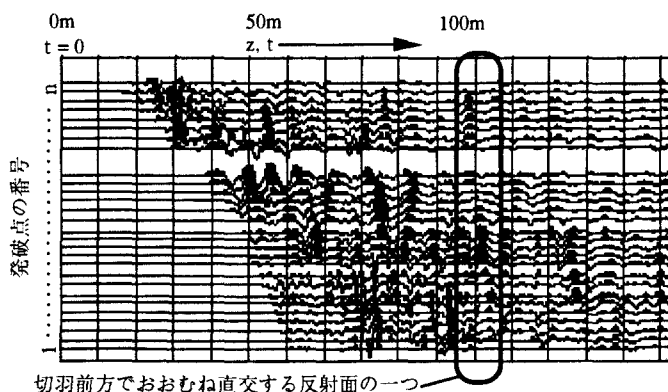


図-4 ゼロオフセットVSPにおける当社測定例（葛野1995.5）

3. インラインオフセットによる計測

インラインオフセットでは図-5に示すような配置をとる。ゼロオフセットVSPと異なり、測線に比較的平行な反射面を対象にしている。以前より浅層反射法として、地表で行われていたものを測線ごとトンネル坑内へ適用したものと言える。

一般に用いられるジオフォンはボイスコイル式マイクロフォンであることが多く、これは坑壁面に設置するようになっている。当社では岩盤とのカップリング向上を期待して、図-6に示すような金具を介して固定している。ただ、このようにセンサがむき出しであるので、孔内設置型のセンサに比べて騒音や電源などのノイズに弱いと考えられる。そのためこの種のジオフォンの場合、その数を減らし、かわりに発破を増やす方法は信頼性に問題があると思われる。結果的にジオフォンが増えて設置時間も長くなり掘削の合間に準備することは難しい。

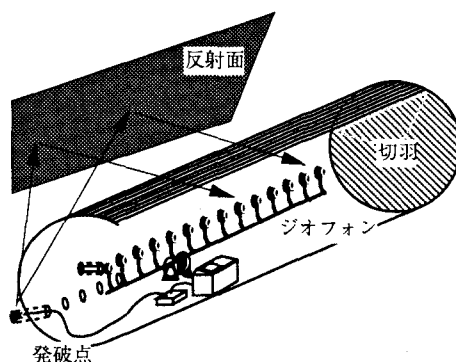


図-5 インラインオフセット測線の例

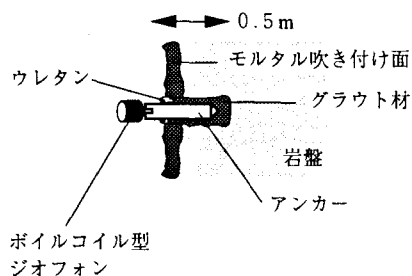


図-6 振動センサーの装着

トンネルに平行な反射面を対象とした場合、図-7に示すNMO補正を用いて発破点とジオフォンのオフセットを補正する。NMO補正後の振動トレースの並びはトンネル側方の平面図とみることができる。例えばトンネルに比較的平行な反射面は図-8のようにおおむね水平な反射波の列として表れる。ただし反射面が傾斜している場合は平面図の誤差が拡大する。より精度を求めるならやはりマイグレーション処理が必要となる。

4. 浅層反射法を適用した場合の問題点

当社では切羽前方予知を目的に浅層反射法を20例以上適用してきた。その結果、現状の方法について要望や問題点が浮かび上がっている。表-1は切羽前方予知を掘削管理に組み込む上で重要と思われる項目であり、大まかに計測、評価、運用の問題に分けて考えている。

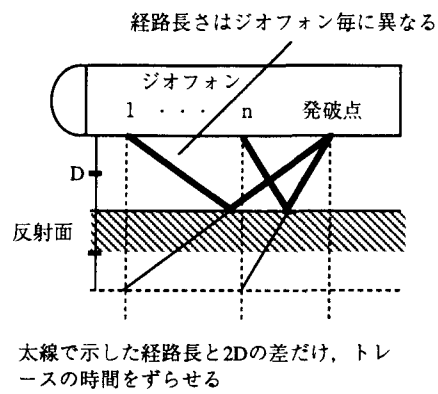


図-7 NMO 補正

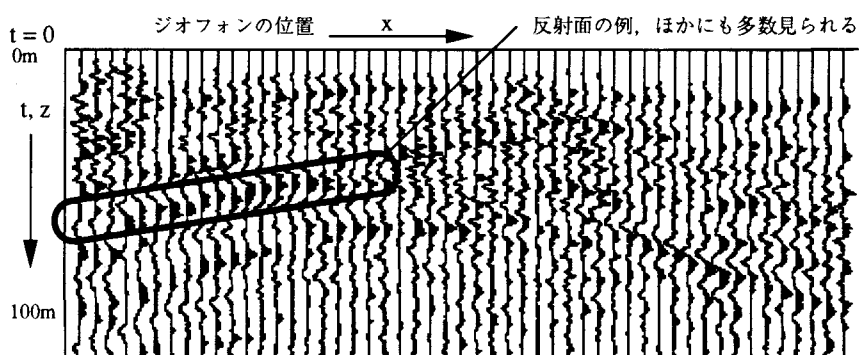


図-8 インラインオフセット測線における当社測定例 (葛野1995.8)

表-1 重要と考えている点

計測	・ジオフォンを減らし、測定数は発破数で補いたい
評価	・反射面に特定の走行/傾斜を前提としない評価方法
運用	・反射面に対応した対策工決定プロセスをつくる

計測の問題では、TSPで採用したようにジオフォンを減らし発破で補う方法を併用すれば、現状で満足いくものと思われる。しかしジオフォンを減らし発破で補うと、評価における自由度が犠牲になったり、限られたジオフォンを信頼するリスクをとまう新たな問題が発生する。それであってもジオフォンは数点程度に収まらないと掘削サイクルを大幅に中断せざるを得ないのが実状である。例えば孔内設置型で任意の指向性を持たせることができ、カップリング良く岩盤に固定できる振動センサが望まれる。

評価方法では、現在使っている2-way time補正やNMO補正のような効率的手法が、必ずしも任意の走行の反射面を対象とできない問題がある。もっともマイグレーション処理を併用すればこの仮定による誤差は緩和できるので、むしろ補正-マイグレーションという2ステップの処理を必要とすることが問題である。当社の経験では現場で要求されるターンアラウンドタイムはせいぜい3日(計測日を含む)であり、現状の手順だと余裕はほとんどない。そこで次の節で述べ

る新たな手法、等走時面マイグレーションに期待している。

最後に運用の問題がある。反射面が必ずしも対策工を必要とするものではないことも多く、また重大な地質の不良箇所でも反射面として表れにくい場合もあった。反射面の予測と実際の地質との対応は、適用例を増やして実績¹⁾にまとめている。ただ、経験則からはは探査のプロが総合的に判断する必要がある。現場技術者が担当できるものではないと思われる。例えば反射面の諸性質に点数を付けると支保パターンが示されるものが、掘削管理のためには是非とも欲しい。この方面を指向した研究^{4) 5)}はまだ少ないようである。

5. 等走時面マイグレーションによる深度変換

反射面に特定の走行/傾斜を前提としない評価方法について、現在開発中のものを紹介する。等走時面マイグレーションとは芦田³⁾らが提案している深度変換法である。その原理を図-9に示す。この方法では発破・ジオフォンの位置の差を補正することなく、1ステップでマイグレーションを適用することができ、様々な測線で柔軟に対応できる。マイグレーションの原理が直感的で簡単であり、既に2層以上の速度構造への適用法³⁾や3次元解析の試み⁶⁾がまとめられている。大型計算機用にFORTRANで書かれたプログラムの実行速度は2次元2層構造で5分程度である。今回、これをマッキントッシュで稼働するパソコンプログラムへ移植し、技術者が操作しやすいようインターフェースの部分を追加した。図-10はこのソフトウェアの実行画面である。マッキントッシュ版マイグレーションプログラムは現在テスト中であり、次の機会に成果を報告したいと考えている。

反射点はジオフォンと発破点と走時を与えると決まる楕円上にある。そこで楕円の円弧上に振動トレース振幅をスタックすれば反射面が浮かびあがる。

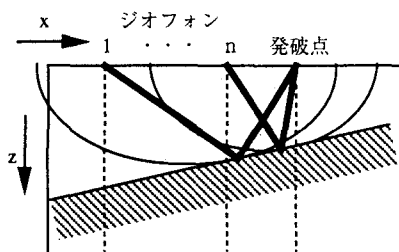


図-9 等走時面マイグレーション

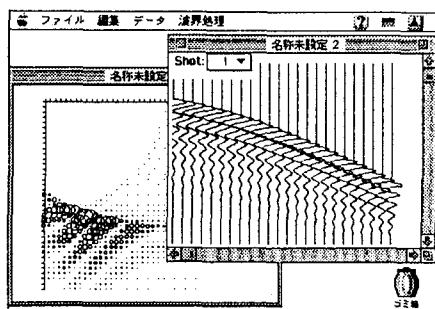


図-10 開発中のマイグレーションプログラム

6. 参考文献

- 1) 石山宏二・土屋彰義ほか：弾性波によるトンネル切羽前方探査の現地適用実験（その1）、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第4巻、PP.439～444、1994。
- 2) 稲崎富士・千田敬二：坑内HSP法によるトンネル切羽前方弱層評価、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、PP.271～275、1993。
- 3) 芦田譲・佐々宏一：坑井間反射法地震探査データの深度変換、物理探査、第46巻、第3号、PP.167～174、1993。
- 4) 川上純・今井博ほか：TSPによるトンネル切羽前方探査の調査例とその検証、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第5巻、pp.343～346、1995。
- 5) 山下雅之・平野享ほか：TSPシステムを用いた切羽前方探査の施工への反映、土木学会第50回年次学術講演会、PP.206～207、1995。
- 6) 中内啓雅・芦田譲：等走時面の利用による各種弾性波探査データの3次元深度変換、石油技術協会誌、第59巻、第4号、PP.296～303、1994。