

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

An experimental examination on conditions in regard to the method of seismic survey ahead of tunnel face

水上 雅裕* ・村上 晃生* ・明石 健** ・石山宏二** ・稲葉 力**

Masahiro MIZUKAMI, Akio MURAKAMI, Takeshi AKASHI, Koji ISHIYAMA and Tsutomu INABA

TSP survey is one of the geophysical explorations for estimating geology ahead of a tunnel face by using the seismic wave. This survey has the advantage of being able to carry out in short time, so that it has been in practical use under construction. However, the survey requirement of TSP is often restricted depending on the situation in the tunnel. So we examine the requirement in regard to a method of TSP survey by on-site testing with the aim of obtaining the fundamental data to decide the source-receiver configuration in that situation. The result of this examination is as follows. (1) A better result is obtained by using a higher speed explosive at sources. (2) In case of the more shot holes or the longer offset distance, the relatively better result is obtained.

keyword : TSP, tunnel, seismic wave, source-receiver configuration, prediction ahead of tunnel face

1. はじめに

弾性波を用いたトンネル切羽前方探査法のうち、TSP法¹⁾が最近良く利用されるようになってきている。TSP法とは、探査用発破によって起振された地震波の反射波をとらえ、トンネル坑内から切羽前方の地質状況を推定する物理探査手法の一つである。従来の方法に比べ、計測時間・解析時間が大幅に改善され、その結果、施工への影響を最小限におさえ、探査結果を即座に施工に反映させることが可能になった。これまでに多くの報告がなされており、現場適用事例の報告だけにとどまらず、種々の探査条件や結果の評価方法の検討などもなされている。

TSP探査を行う場合の探査測線配置や発振方法などの計測方法の仕様についてはその目安が示されており、計測作業に制約がない状況下ではそれに従って探査を行っている。しかし、施工優先の現場状況下では探査機器配置などの探査条件がある程度制限されるケースも起こりうる。そのような場合に際しては、探査精度をおとすことなく、準備と探査に要する作業量の低減を考慮しなければならない。そこで条件制約下での最適な探査仕様設定の基礎データとするため、TSP探査の計測方法に関する条件について実験的検討を行った。実際のトンネル現場において探査実験を行い、坑内の地質調査結果と比較照合することによって探査結果を評価した。

* 正会員 中部電力(株) 土木建築部

** 正会員 西松建設(株) 技術研究所

2. トンネルの概要

探査を行ったトンネルは、長野県下伊那郡平谷村の平谷水力発電所の導水路トンネルである³⁴⁾。トンネルはTBMにて掘削が行われ、掘削径は2.6mの小断面トンネルである。トンネル地山は主に花崗岩よりなり、中生代白亜紀に形成された天竜峡花崗岩類として定義・命名されている。トンネルの地質縦断面図を図-1に示す。探査はT.D.2300～2400m付近の谷部直下区間を探査することを目的に行われ、坑内の測線区間ならびに探査区間について地質調査を行った上で、TSP探査結果の評価を行った。なお測線区間のV_pの実測値は5.1km/sであった。

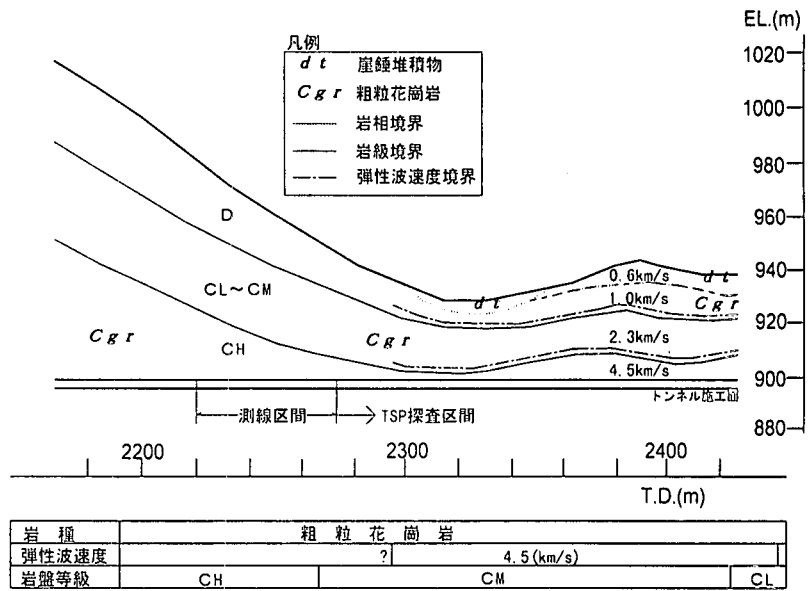


図-1 探査区間の地質縦断面図（事前調査による）

3. 実験内容

検討を行った項目は以下の2点である。

3.1 爆薬の爆速と探査精度

TSP計測の際、発振に使用する爆薬は爆速が大きいほどよい結果が得られるといわれている。この爆速効果を確認するために、爆速の異なる2種類の爆薬をそれぞれ同じ条件で使用し、探査結果を比較した。

3.2 発振孔配置と探査精度

現場状況によっては発振孔数や測線距離が十分に確保できないことも考えられる。そこで発振孔数を変化させた場合の解析、及び基準点となるレーシーバーの位置を固定させて測線距離を変化させた場合の解析を行い、発振孔配置と探査精度の関係について検討を行った。

4. 実験方法

TSPの探査原理や探査方法については既存の論文⁹⁾に譲る。

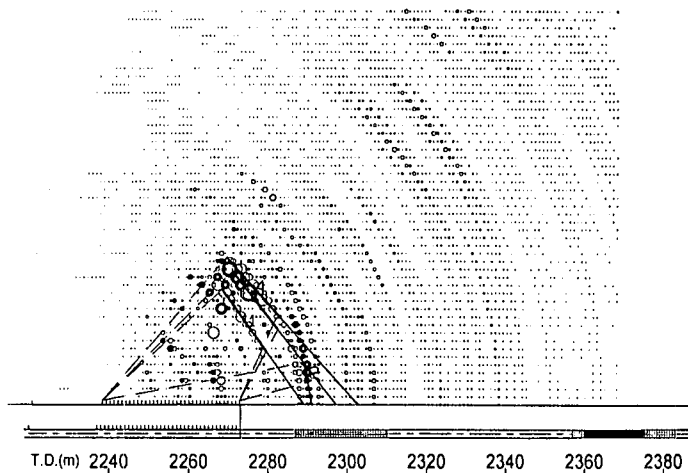
今回行った実験は図-2に示すような探査測線で行った。同一測線を上段と下段に分け、上段の発振孔にはペントライト(爆速7400m/s)、下段の発振孔にはスラリー爆薬(爆速5600m/s)を装填し、それぞれ同一薬量(30g)で起振させ探査を行った。ペントライトとは雷管の添装薬等に用いられるペンスリットとTNT爆薬との混合物であり、またスラリー爆薬とは含水爆薬の一種で坑内での発破掘削に普通に用いられている爆薬である。計測に際してはレーシーバーロッドを2本使用し、両者の記録波データをスタッキングさせている。解析は地震波記録トレース数や解析パラメーター等の条件を同一にして、ディフラクションスタック法を用いた。

発振孔配置と探査精度との関係を検討する際は、ペントライトの発振のデータ(36点発振)を用い、それぞれの比較条件に合うように地震波記録トレース数を調整した。比較条件が発振孔数の場合は、測線距離一定の条件と

6.2 発振孔配置と探査精度

探査結果を図-4と図-5に示す。図-4は発振孔数の差による探査結果の比較で、測線距離とそれぞれの孔間隔は一定としている。a)発振孔数36とb)発振孔数18の探査結果を比較した場合、b)にT.D.2320m付近に一つの反射面が抽出されている以外は類似した探査結果となり、T.D.2300m付近の反射面の集中から地山の脆弱部が明瞭にとらえられている。T.D.2360m以降の地山の脆弱部にも、単独ではあるがそれぞれ反射面が抽出されている。c)発振孔数12の探査結果に関しては、a)やb)と同様にT.D.2300m付近の地山の脆弱部に最大の反射強度の反射面が抽出されているが、デフラクションスタックイメージに若干の差異があることから反射面の出現パターンがa)やb)と異なっている。d)発振孔数6の探査結果に関しては、反射面の密集部が地山脆弱部と対応せず、探査結果は地質の状況を反映していない。

一方図-5では、発振孔数(18孔)と発振孔間隔(1m)を一定にして発振孔配置のパターンを変え、測線距離の差による探査結果の比較を行った。e)測線距離52mとf)測線距離34mの両者とも、図-4のa)、b)、c)と同様に、反射面の密集部がT.D.2300m付近の脆弱部に対応している。両者を比較すると、e)の結果は一部の反射面が異なるものの図-4のa)の結果と似ているのに対し、f)はデフラクションスタックイメージで地山脆弱部付近に対応する反射面列の分布が分散する傾向にあり、反射面の出現パターンが異なっている。またf)はT.D.2360m以降の地山脆弱部に対して対応する反射面が抽出されていない。

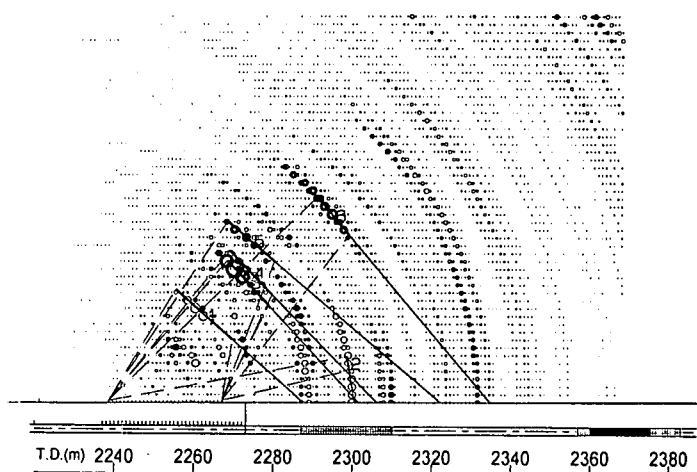


①ペンタライト発振 (爆速7400m/s)

7. 考察

7.1 爆速効果の要因

実験から爆速の速い爆薬を用いた方が比較的良好な結果が得られた。この結果の差の要因を探るため、それぞれの直接波の初動のパルス幅と伝播距離との関係に注目すると、その関係は図-6のように示される⁸⁾。図からパルス幅は距離に伴い増加しているが、両者の傾向に有意な差は見られない。従って、探査結果の違いは主に弾性波の振幅の大きさに依存すると考えられる。従来から爆速の大きい爆薬は振幅が大きいとされており⁹⁾、孔壁の損傷を考慮して薬量制限をしなければならない坑内探査の場合、高速爆薬の使用は探査に有効であるといえる。



②スラリー爆薬発振 (爆速5600m/s)

凡例 (岩区区分)

□ CH ▨ CM ■ CL(D)

図-3 爆速の差による探査結果の比較

(デフラクションスタックによるイメージング)

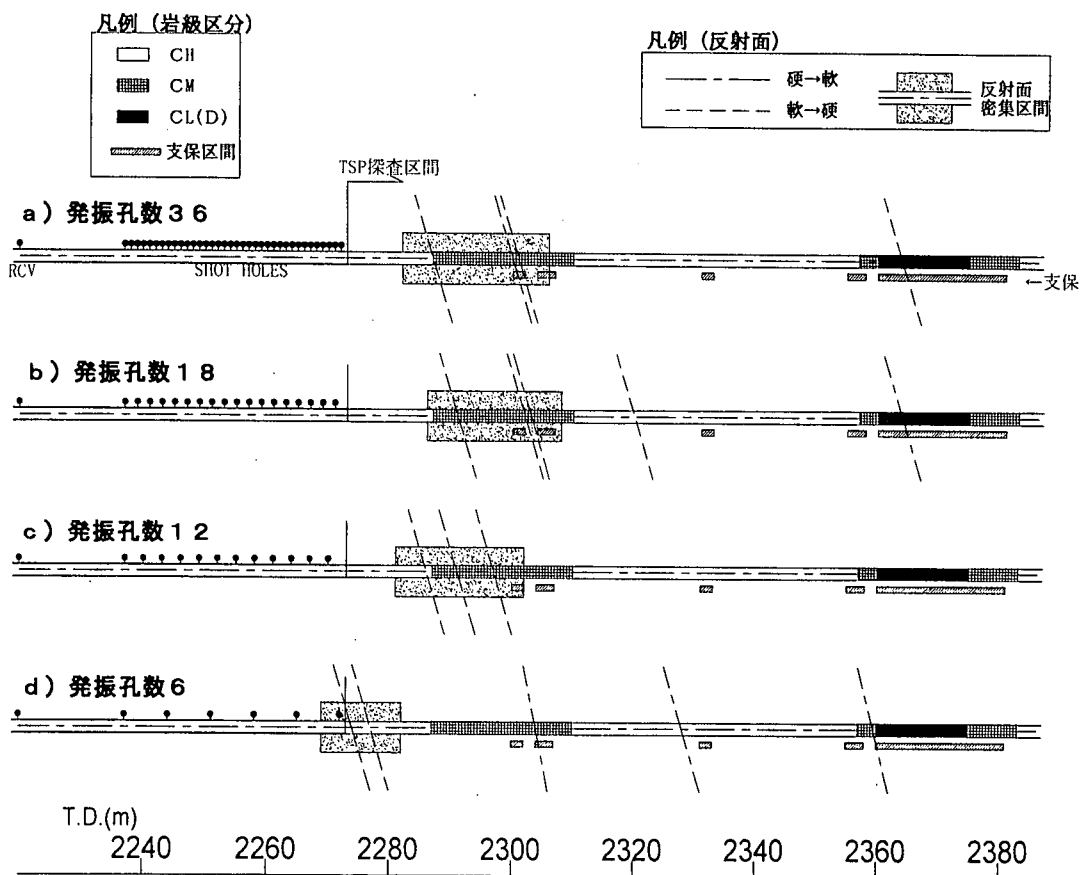


図-4 発振孔数の差による調査結果の比較

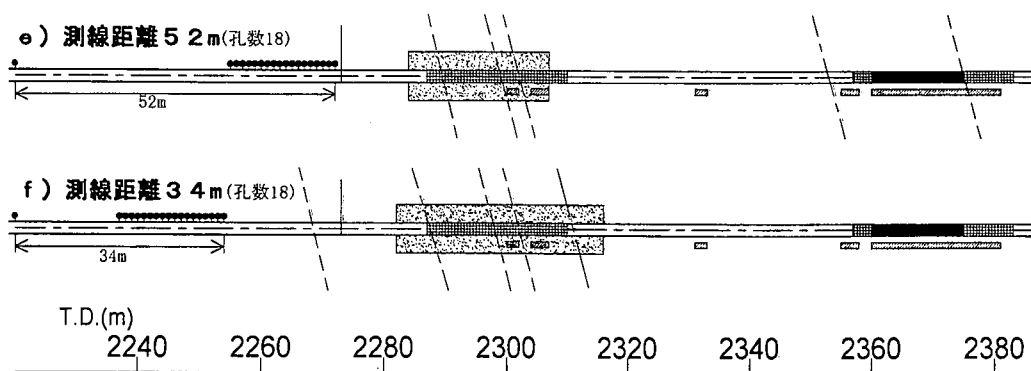


図-5 測線距離の差による調査結果の比較

7.2 発振孔配置

今回の比較実験では、反射面密集部と地山脆弱部の対応の観点だけからは、明瞭な差異が認められない事例が多い。しかし、デフラクションスタックイメージの反射点分布を考慮し、かつ堅岩部に対応不明な反射面が抽出されていないか、また遠方のT.D.2360m以降の地山脆弱部に対応する反射面が抽出されているかなどを考慮した場合、発振孔数が多いほど、また測線距離が長いほど、比較的良好な結果が得られたといえる。

T S P 探査は施工サイクルの合間をぬって行うことができる反面、計測作業が施工状況によって制約されるため、発振孔数を減らさなければならないケースが想定できる。発振孔数の低減を検討したときに、今回の事例では、発振孔数最大(36孔)の場合と類似した反射面の分布パターンを有する発振孔数18孔の場合(孔間隔2m)が、全体的な探査精度を考えたときの許容できる発振孔数ではないかと考えられる。

また一方で測線距離をどのように設定するかが問題になるが、今回のレーザ位置固定の条件では、測線距離を長くとした方が比較的良好な結果が得られた。これは往復の波線経路長を考えたときは当然の結果と言える。

今後の課題としては、発振孔位置固定でレーザの位置を変化させたケースについての検討が必要と考える。この場合は、測線距離が短い方が往復の波線距離が短くなり有利であるが、逆にトンネル軸に斜交する反射面上の反射点分布は狭くなるため、探査精度の向上に直接つながらないケースが出てくる可能性が考えられる。

8. おわりに

T S P 探査を行うときの諸計測条件について検討した。探査に際しては、地形・地質等も重要な条件であり、計測配置の決定に際してはこれらの条件も十分に考慮する必要がある。実施工に対する貢献度を高めるためにも、種々の探査条件を検討し探査精度の向上を図るとともに、探査適用限界についても明確にしていける必要があると考える。

9. 参考文献

- 1)G.Sattel,P.Frey & R.Amberg : Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods- pilot project in Centovalli Tunnel Locarno Switzerland, FIRST BREAK, Vol.10, pp.19~25, 1992.
- 2)G.Sattel,B.Sander,F.Amberg & T.Kashiwa : Predicting ahead of the face, TUNNELS&TUNNELLING, Vol.28, No.4, pp.24~30, 1996.4.
- 3)水上雅裕・名和芳久：平谷水力発電所の工事計画概要、電力土木、No.252、pp.71~75、1994.7.
- 4)近藤寛通・林堂信・水上雅裕・酒井照夫：TBMで硬・軟複合地盤に挑む 平谷発電所新設工事、トンネルと地下、Vol.26、No.7、pp.59~68、1995.7.
- 5)平野 享・明石 健・戸松征夫・中村康夫・芦田 譲：弾性波を用いた既設水路トンネルの位置推定、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.500~504、1995.
- 6)名和芳久・村上晃生・明石健・稲葉力：土被りの浅い谷部におけるトンネル切羽前方探査 — T S P 法による探査事例一、第31回地盤工学研究発表会発表講演集2分冊の2、地盤工学会、pp.2255~2256、1996.
- 7)明石健・山下雅之・石山宏二・稲葉力：T S P 法による切羽前方地質推定についての基礎的検討、第51回年次学術講演会講演概要集Ⅲ A、土木学会、pp.734~735、1996.
- 8)石山宏二・明石健・平野享・稲葉力：T S P 探査法における測定パターンについての実験的検討、第51回年次学術講演会講演概要集Ⅲ A、土木学会、pp.732~733、1996.
- 9)伊藤一郎・佐々宏一：構造物に近接した発破、日本鉱業会昭和45年度秋季大会資料、D4、pp.1-4、1970.

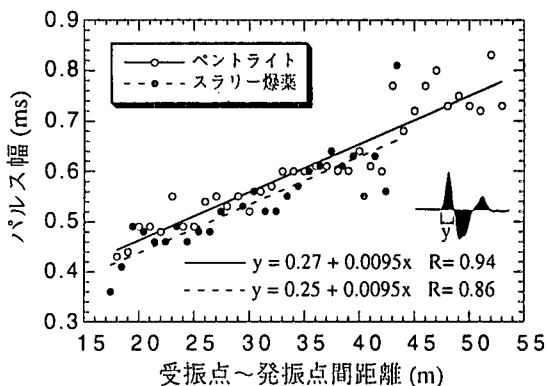


図-6 初動波パルス幅と伝播距離の関係