

坑内弾性波反射法における探査精度に関する一考察

A STUDY ON EXPLORATION ACCURACY OF TUNNEL SEISMIC PREDICTION METHOD

笠 博義*、猪狩哲夫**、山本浩之**、前田信行*

Hiroyoshi KASA, Tetsuo IGARI, Hiroyuki YAMAMOTO, Nobuyuki MAEDA

TSP(Tunnel Seismic Prediction) method is a kind of geophysical exploration method in tunnel, and it employs seismic wave refractions to explore fault fracture zones and geological boundaries ahead of tunnel working face. Some statistical examinations for accuracy of investigation were carried on using data which were measured in some tunnel construction sites. The distance between face and objects(ex. fault, intrusive rock or geological boundaries), the angle between objects and tunnel axis and condition of objects were discussed for cause of error on the method. The summary of the results is:

- 1) In the ordinary geological condition, the error range is $\pm 5\text{m}$.
- 2) Error range were influenced by the angle between objects and tunnel axis or condition of objects.
- 3) It will be able to estimate the geological structure from patterns of wave reflection.

keywords: tunnel seismic prediction method, fault, elastic wave, accuracy

1. はじめに

トンネルの合理的で、安全な施工においては、事前に、トンネルルート上の地質状況をできるだけ正確に把握しておくことが重要である。このため、従来は、地表踏査や地震探査などの地表面からの物理探査によって、路線上の地質断面を想定し、必要に応じてボーリングを行うことによって、調査精度の向上を図ってきた。しかし、こうした調査や探査では、土被りが大きい場合や、断層や褶曲によって、当該地域の地質構造が複雑な場合は、その誤差が大きくなる可能性が大きくなるという問題点がある。このため、事前調査では把握しきれない、より正確な地質情報をトンネル坑内より探査する技術が必要とされている。こうしたトンネルの切羽前方探査技術としては、先進ボーリングが一般的であるが、この方法は、準備やボーリングに時間がかかり、掘削サイクルにも影響を与えることから、現場での適用性が高いとはいえない。このため、より簡便な切羽前方探査手法が必要とされている。

こうした背景において、弾性波や電磁波を用いた物理探査をトンネル坑内で行うことによって、切羽前方の地質状況を把握する方法が提案され、現場での適用が進められている。近年、これらの手法の中で、スイスで開発された、トンネル坑内における弾性波反射法（以下TSP法と呼ぶ）が、より容易に長距離を探査する手法として徐々に普及しつつある。この手法については、その概要を後述するが、切羽前方100m程度を短時間で探査できるという大きな特長がある反面、地質条件に対する探査精度など不明確な点もあり、ユーザー自身が現場適用を通して、手法自体の適用性を評価しているのが現状である。

本研究は、こうした状況において、これまでに筆者らが実施した探査結果をもとに、主に断層などの探査対象（以下、探査対象と呼ぶ）の出現位置や、その傾斜や岩盤の硬さの変化に関する探査精度と、その要因について検討したものである。

*正会員 ハザマ土木本部トンネル統括部、**正会員 ハザマ土木本部技術・設計部

2. これまでの研究経緯と本研究の目的

筆者らが継続して行っている研究の最終的な目的は、TSP探査法における適用限界を明確にして、この手法の合理的な活用を目指すことにある。すなわち、この手法において把握可能な探査対象とはどのようなものであるか、その探査精度はどの程度であり、また、そうした精度は地質条件や探査条件に対してどのように変化するのかなどを評価・検討することによって、この探査手法の適用限界を明確にすることである。

以上のような目的に対して、筆者らはこれまでに、探査原理に内在する誤差要因¹⁾や、探査実施地点の地質または探査機器の配置条件等の影響²⁾などについて検討を行い、測線設置区間に存在する低速度帯が探査対象までの距離の推定における誤差要因となることや、探査機器の配置と探査対象との空間的な位置関係によって、探査が困難となる探査対象が存在することなどを確認してきた。

本研究は、上述のような研究経緯を受けて、表-1に示した事例の探査結果を整理、検討することによって、探査誤差について評価を行ったものである。本研究の検討項目は以下のようにまとめられる。

- ①探査結果と掘削実績の対比から、断層などの探査対象の位置に関する誤差を検討する。
- ②探査誤差の出現要因として、探査対象までの距離、その性状および交差角度について検討する。
- ③探査結果の地質学的な判定に関する妥当性について検討する。

3. TSP探査法の概要

TSP(Tunnel Seismic Prediction)探査法は、前述のように、スイスで開発されたトンネル坑内における弾性波反射法の一つであり、切羽前方の地質の不連続面とトンネル軸との交差位置を予測するものである。すなわち、トンネル坑壁に設置された少量の火薬を振源(通常20点以上設置)とし、これによって発生したP波の直接波および反射波を高感度の加速度計によって受振し、その到達時間から弾性波の伝搬速度並びに反射面の位置を推定するものである。すなわち、この手法で探査可能な対象は、その前後で音響インピーダンスが異なる面であり、実際の地質的な対象としては、断層・破碎帯、貫入岩帯や層理面などの地質的な不連続面である。

TSP法におけるデータ処理過程は、上記の手法で得られた計測波形に対して、フィルタリングによる反射波の抽出ならびにデコンボリューションなどの波形処理を施すことによって、反射波を抽出・強調した後、ディフラクションスタック法(DS法)と呼ばれる解析手法によって反射面の位置を把握し、トンネルと反射面(探査対象)の交差位置を算出するものである。

このDS法とは、まず探査領域をトンネル軸を中心とした4つの空間に分割した上で、この領域内にトンネル延長方向と各反射面までの距離を軸とした仮想のグリッドを設定し、各グリッドにおける反射波のエネルギーの大きさを円の大きさで表示するものである(図-1)。こうしたエネルギー円は測定された各受振波の反射エネルギーの総和を示すもので、この円が大きいくほどその座標における反射強度が大きいことを示している。ここで、反射波は、理論上、最短経路で受振器に伝搬することから、反射面が連続した平面である限り、図-1に示すように、各発振点からの反射波はトンネル軸(正確には探査測線)を含むある平面内で一直線上に並ぶこととなる。さらに、この直線の延長がトンネル軸と交差する位置で反射面(断層などの探査対象)とトンネルが遭遇することとなる。

表-1 検討対象としたデータ

地 質	実施回数	探査対象
花崗閃緑岩	2	6
凝灰角礫岩	6	15
砂岩・頁岩互層	1	2
石英斑岩・泥質片岩	1	1
凝灰角礫岩・安山岩	1	3
泥質千枚岩・砂質千枚岩	1	2
安山岩質凝灰角礫岩	1	5

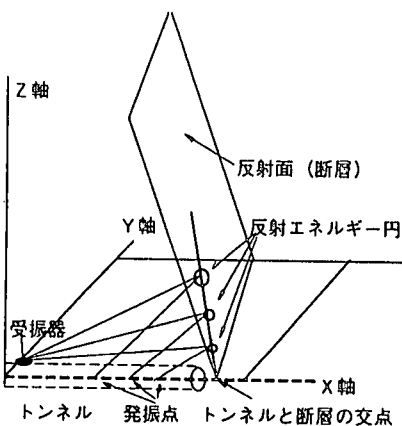


図-1 DS法の概要

- ①反射面が基本的に連続した平面であり、探査領域内において、その走向傾斜が変化しない
- ②探査領域内において、弾性波伝搬速度は変化しない
- ③トンネル軸と完全に平行な反射面は探査対象としない（探査ができない）

表-2 探査結果の評価ケース

掘削実績	TSP 探査結果	
不連続面あり	あり(ケース1)	なし(ケース3)
不連続面なし	あり(ケース2)	なし(ケース4)

④ケース4：両者とも反射面（探査対象）なしで一致したケースであり、このケースについては特に問題はない。

5. 検討結果と考察

探査距離に関する誤差を発生させる要因のうち、探査結果から類推できるものとしては、探査対象までの

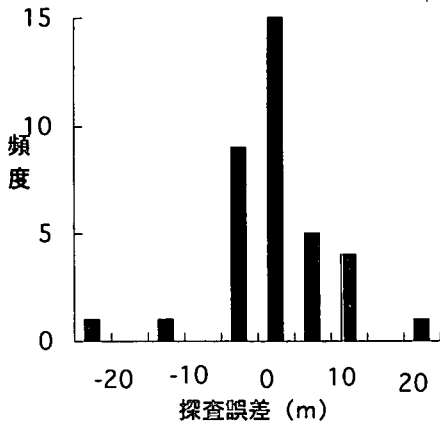


図-3 探査誤差の頻度分布

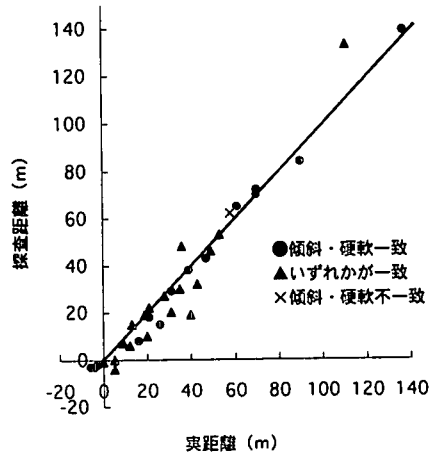


図-4 探査距離と実距離の比較

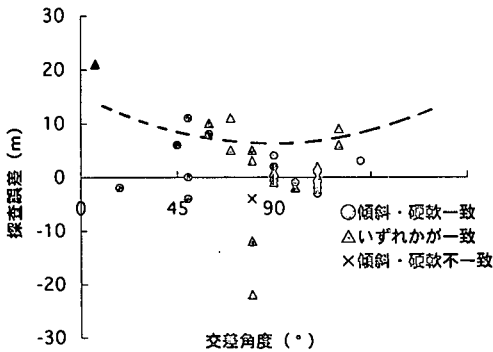


図-5 交差角と探査誤差の関係

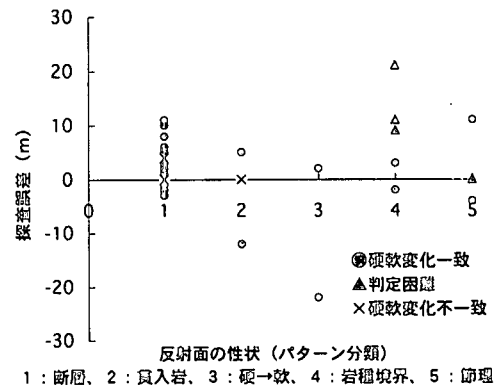


図-6 反射面の性状と探査誤差の関係

距離および交差角、探査対象の性状などがあげられる。以下、これらの事項について検討を行う。

1) 探査対象までの距離

探査によって得られた、切羽から反射面まで探査距離と、掘削後明確になった実距離とを比較したものが図-4である。この図から、ばらつきはあるものの、探査結果が探査対象までの距離に関係なく、実際の探査対象までの距離とほぼ一致していることがわかる。ただし、図中に合わせて示したように、探査結果のうち、探査対象の傾斜および硬軟の変化状況まで含めて、正しい結果が得られているのは、全体の半数程度であり、残りの約半数の探査結果については、これらのいずれかが正しく評価されていないケースが多い。特に、探査対象までの距離が小さいにも関わらず、探査誤差が大きいケースも少なくないことから、単に反射波の距離減衰の影響以外の要因が考えられる。以下、こうした要因について考察を行うものとする。

2) 探査対象との交差角

探査対象がトンネル軸（トンネル軸を含む水平面）と交差する角度と、探査誤差の関係を示したものが図-5である。ここで、角度の決定においては、TSP探査実施側の側壁を基準にした。両者の間に明瞭な関係は見られないが、全体的に、両者が直交に近い場合（交差角90°）には誤差が小さく、低角度で交差する場合には誤差が拡大する傾向がある。具体的には、図中で+20mを超える探査誤差を示す例では、トンネル軸と探査対象のなす角度は10°以下と極めて低角度であり、実質的にはTSP探査の適用限界を超えているケースであると考えられる。なお、図中に記号で示した反射面の傾斜および硬軟の変化状況に関する適合性については、交差角の影響は明確ではない。

3) 探査対象の性状

探査対象が断層であるか、または岩種の境界であるかなどの性状の違いによる探査精度について、図-6

に示した。この図によれば、探査事例の多い断層については、比較的誤差が小さいのに対して、地質境界において、誤差が大きくなる傾向にある。また、合わせて示した岩盤の硬軟の変化状況との対応においては、概ね良好な対応を示している。ただし、ここでは、節理など規模の小さな対象のように、実際の岩盤の硬軟の変化状況評価ができないもの（図中の△）については、検討から除いている。

5. 3 反射パターンからの探査対象の推定

TSP探査では、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、対象の状況を推定することが可能である。すなわち、表-3に示したように、岩盤の硬さの変化が硬→軟と軟→硬の組み合わせが隣接してある場合は、これを断層型とし、この逆を貫入岩型として、掘削実績との対比による検討を行った。その結果は、図-6に示したように、実際の断層のおよそ70%が正しく評価されていることがわかる。また、正しく判定できなかったもののうち、硬→軟または軟→硬への変化と評価されたケースについては、断層とその前後の地層との境界面のうち、いずれか一方のみが抽出されたものと考えられる。これに対して、実際には断層であるにも関わらず、貫入岩型と判定されたケースについては、DS法における反射面の抽出過程を含めた検討が必要である。

なお、他の3種類の地質状況については、探査事例自体が少なく、今後のデータの蓄積が必要であるものと考えられる。

5. 4 探査誤差の要因に対する考察

TSP探査法の探査誤差の要因については、これまで述べてきたようなさまざまな要因が考えられるが、これまでの検討では、特に実距離が小さい場合における探査誤差について考察するために、図-7の探査距離と誤差のグラフに示したように、探査測線を設置した区間（受発振孔を設けた区間）において明瞭な速度の変化層（断層破碎帯や低速度帯）が確認されたもの（図中のF）を抽出したところ、これらの探査データにおいては、対象までの距離が小さいにも関わらず、探査距離や傾斜や硬軟の変化状況に誤差が生じているものが多いことがわかった。すなわち、このことから、探査距離自体よりも、探査区間における弾性波速度の変化が探査結果に与える影響が大きいものと考えられる。

表-3 反射タイプによる地質的な意味の推定

反射タイプ	反射面の組合せ	推定される構造
断層型	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

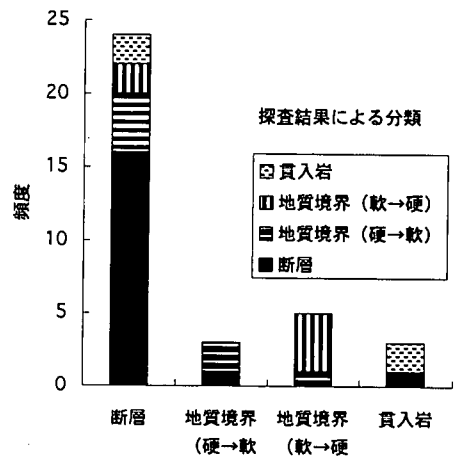


図-7 反射パターンによる地質構造推定結果

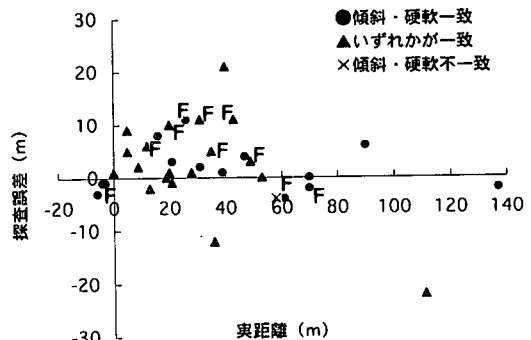


図-7 実距離と探査誤差の関係

（探査測線中の断層の探査誤差への影響の検討）

一方、こうしたデータ以外で誤差が大きくなっているものは、前述したように、対象とトンネル軸のなす角度が大きいものや探査距離自体が100mを超えるような場合であると言える。

6. まとめと今後の課題

本研究では、TSP探査結果について、実際の掘削結果と比較することによって、統計的に探査誤差を検討し、いくつかの要因についての考察を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

- ① TSP探査の探査距離の誤差は、概ね±5m以内であるが、探査対象や周辺の岩盤状況によっては最大で20m程度の誤差が生じることがある。なお、探査対象までの距離が小さい場合でも、探査測線設置区間において低速度帯などが存在する場合は、探査誤差が大きくなる傾向がある。
- ② 探査距離の誤差要因としては、探査対象までの距離、トンネル軸との交差角の大きさ、または、探査対象の性状などが考えられる。各要因に対する検討結果は以下のとおりである。
 - ・ 探査対象までの距離：探査距離50mを超えると傾斜、岩盤変化状況等を含めて誤差が増大する傾向にある。
 - ・ 探査対象との交差角が小さくなると探査誤差は増大する傾向がある。
 - ・ 探査対象の前後の層の硬さなどの変化が乏しい場合は正しい評価ができないことがある。
- ③ 反射パターンからの探査対象の地質的な意味を推定した場合、少なくとも、断層については正しく評価できる可能性が高い。

なお、実際には、ここに示したような誤差要因が相互に関連して、探査結果に影響を及ぼしているものと考えられる。また、誤差要因としては、今回特に検討を加えていないが、以下に示すような要因に関して、今後検討する必要があるものと思われる。

- ① 探査実施区間の地形や土被りの大きさが探査結果に影響を及ぼすことが考えられる。特に、土被りが探査距離よりも小さい場合や、極端なやせ尾根下などにおける探査では、地表面近傍での反射が発生する可能性があり、こうした場所での適用には探査結果の信頼性を考慮する必要がある。
- ② 坑口付近での探査や既設トンネルに近い部分での探査においては、外来のノイズの回り込みなどについても検討していく必要がある。

7. おわりに

TSP探査法は、短時間での探査が可能、取り扱いが比較的容易、探査結果が極めてわかりやすい形で提供されるなどの特長から、現場での展開が進んでいる。しかし、この反面、探査法自体が内在する仮定や制約条件を十分に認識していないと、探査結果に対する誤った評価を行う危険性がある。そのため、この方法を適用する際には、探査を実施しようとする地点の地質の状況や、事前調査や掘削実績から予想される前方の地質状況から、ある程度探査実施前に探査結果の信頼性について考慮しておく必要があるものと思われる。特に、同一トンネルにおいて、継続して適用する場合は、過去の探査結果を参考にして有効な探査距離や、対象の出現パターンを予測することは重要であると考えられる。

今後は、さらに探査結果データを蓄積しつつ、統計的な分析の確度を向上するとともに、本研究においては検討できなかった、探査結果が掘削実績と対応していない事例（表-2のケース2、3）についても検討を進めていく予定である。

【参考文献】

- 1) 大沼和弘、笠博義、猪狩哲夫：TSP法による断層探査適用上の留意点、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集VI、pp. 208～209、1995
- 2) 笠博義、大沼和弘、猪狩哲夫、武藤光：TSP探査法による機器配置条件が探査結果に与える影響についての一考察、土木学会トンネル工学研究論文・報告集vol. 5、pp. 353～356、1995