

坑内弾性波反射法によって探査可能な 不連続面の特徴に関する検討

A STUDY ON CHARACTERISTICS OF GEOLOGICAL DISCONTINUITY WHICH IS OBJECT OF SEISMIC EXPLORATION AT AHEAD OF TUNNEL FACE

笠博義¹⁾，前田信行²⁾，山本浩之³⁾，工藤繁樹⁴⁾，越野洋一⁵⁾

Hiroyoshi KASA, Nobuyuki MAEDA, Hiroyuki YAMAMOTO, Shigeki KUDO, Yoichi KOSHINO

Seismic exploration in tunnel is effective to predict geological boundaries or fault fracture zone at ahead of tunnel working face. TSP(Tunnel Seismic Prediction) method is a kind of reflection method using seismic wave.

Some in-situ surveys and statistical examinations were carried on to investigate the characteristics of objects. It is not clear from the results of in-situ surveys for acoustic impedance of rock mass around the objects, but some significant correlation was found from statistical examinations using by actual exploration data TSP method was influenced by distance from the face to objects and number of fissures between receiver and seismic source.

Key Words: seismic prospecting, discontinuity plane, acoustic impedance, (TSP method)

1. はじめに

山岳トンネル施工において、切羽前方の断層などの地質状況を正確に把握する技術の一つとして、トンネル坑内において実施する弾性波反射法が注目されている。この坑内弾性波反射法には、受発振点の配置条件が異なるいくつかの手法が開発されているが、より簡便に探査することができるTSP (Tunnel Seismic Prediction) 法の施工現場での適用が進められている。この手法はG. Sattelら¹⁾が開発したもので、トンネル側壁を利用して弾性波反射法探査を行い、切羽前方の断層などの位置を予測するものである。筆者らは、この探査技術を施工現場において、より効果的に活用することを目指して、さまざまな地形・地質条件下での探査結果の分析を通じて、TSP法の適用性や探査精度などについての検討を続けてきた(参考文献2)，3)など)。

こうした検討結果から、探査に対する地形や地質条件の影響²⁾や、誤差要因などに関する事項³⁾について、いくつかの知見を得ることができたが、同時に、TSP探査では検知できない不連続面が存在する探査事例があることも確認してきた。こうした、いわゆる「見落とし」は、その逆に実際には存在しない虚像を捉えてしまう場合に対して、施工の安全性に及ぼす影響が大きく、探査法自体の信頼性にも大きく影響するものと位置付けられる。

本研究は、上述したようにTSP法の信頼性を議論する上で重要である、探査可能な不連続面とそうでないものの特徴について評価を行うもので、探査結果を統計的に分析すると同時に、現場に

1)正会員 博士(工学)， 2)正会員 修士(工学) ハザマ土木本部トンネル統括部

3)正会員 ハザマ土木本部技術設計部

4)ハザマ 城端・袴腰トンネル(作) 副所長

5)日本道路公団新潟建設局富山工事事務所城端工事区 工事長

において、いくつかの不連続面の音響インピーダンスを調査することによって検討を行ったものである。なお、検討に用いたデータは、東海北陸自動車道の城端トンネル避難抗の掘削において測定されたものである。

2. 研究目的

本研究の目的は、TSP法によって探査することができる地質的な不連続面の特徴を検討することであるが、これは、言い換えれば、探査によって把握することができなかった不連続面の特徴または、その探査条件を明らかにすることである。ここで、探査結果と実際の地質状況（掘削実績）を比較した場合、探査結果は、a. 両者が合致したもの、b. 実際存在するものを見逃したもの、c. 実際にはないものを誤判別したものに分類され、bおよびcの場合はそうした結果が生じた原因が問題となる。このうち、bの見逃しの原因には、見逃された不連続面自体の特徴に起因する場合と、探査法自体の特長によるものとが考えられる。そこで、本研究では、次に示す2点に着目して、検討を行うこととした。

- ①探査によって捉えられなかった不連続面の特徴を明らかにするために、弾性波の反射を決定付ける音響インピーダンスを岩盤物性値をもとに求め、探査できた不連続面と比較する。
- ②実際の探査結果を統計的に分析することによって、見逃しが生じた探査の実施条件についての検討を行う。

3. TSP法の概要

TSP法は、トンネル側壁に設けた多数の発振孔（通常20孔以上）の中で少量の火薬を爆発させることによって弾性波を発生させ、岩盤中を直接伝搬あるいは、反射面で反射してから伝搬してきた弾性波（直接波および反射波）を受振器によって測定するものである。この受振器は高感度の2成分地震計からなり、坑壁付近の緩みを避けるために、深さ2m程度の受振孔内に設置される。こうして測定された波形データは、反射波の抽出・強調処理を施すことによって反射波が抽出され、これと直接波から求められた伝搬速度を用いて、弾性波の反射面がトンネル軸と交差する位置が求められる。

4. 音響インピーダンスに関する検討⁴⁾

(1) 検討原理

TSP法が断層や地質境界などの音響的な不連続面における弾性波の反射を用いる方法であることは上述したとおりである。媒体（岩盤）中を伝搬する弾性波には、図-1に示すように、異なる2つの媒体の境界面に入射する場合、反射・屈折現象が生じる。こうした現象は、媒体間の固有の音響インピーダンスの違いによって決定される⁵⁾。ここで、音響インピーダンス（ Z ）は、次式のように媒体の密度（ ρ ）と媒体中の波の速度（ V ）の積で表される。

$$Z = \rho \cdot V \quad \dots (1)$$

この式から、理論的には不連続面の前後で音響インピーダンスが同じ場合は弾性波の反射が起こらず、異なる場合は弾性波の反射が起こることになる。つまり、岩盤においては、粘土化した断層破砕帯とその前後では、密度、伝搬速度とも大きく異なり、明瞭な反射波が発生し、完全に密着した節理等では反射が生じない可能性があるということが出来る。

こうしたことから、本研究では、前述のトンネル現場において、TSP探査を実施した区間のう

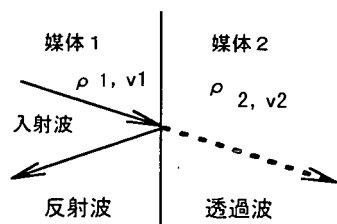


図-1 境界面における反射

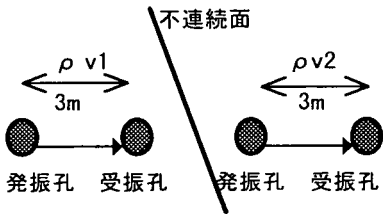
ち、探査結果が合致した不連続面（2地点：サイト1、2）と見逃した不連続面（1地点：サイト3）を選定し、それぞれの不連続面を挟む岩盤の音響インピーダンス比に注目した検討を行った。それぞれの検討場所の地質状況は表－1に示したとおりであるが、岩盤状況としては大きな違いは見られなかった。また、対象とした亀裂はいずれも肉眼で明瞭に追跡できるものとしたが、どの亀裂もほぼ密着しており、狭材物はほとんど見られないなど、外見上の差異は見られなかった。

表－1 計測サイトの地質状況

サイト	岩種	亀裂の状況
1	安山岩質凝灰角礫岩	貫入岩との境界
2	安山岩	節理(岩級境界)
3	安山岩質凝灰岩	貫入岩との境界

(2) 音響インピーダンスの検討方法

音響インピーダンスを求めるための岩盤物性を調査するために、図－2に示すように、対象とする不連続面の前後の岩盤に、それぞれ坑壁から深さ2.5mのボーリングを3m間隔で2本ずつ削孔した。すなわち、岩盤の密度はボーリングコアを用いて測定し、岩盤の弾性波速度は孔間弾性波法を用いて、直接計測した。

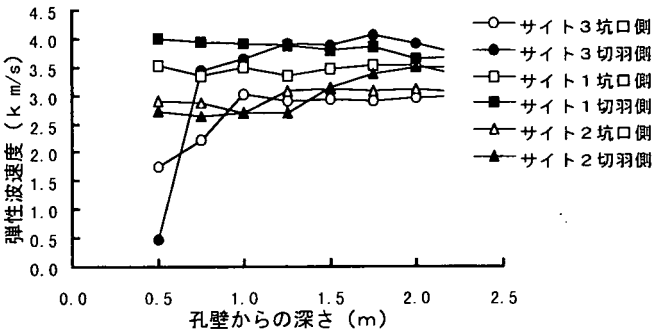


図－2 孔間弾性波による計測方法

測定に用いた孔間弾性波探査システムは、ロッドの先端に打撃式の弾性波の発振器または受振器が取り付けられたもので、弾性波速度の計測は、これを測定領域を挟むように2つのボーリング孔に同一深度となるように挿入してから行う。今回の計測では、坑壁から0.5～2.25mの区間を0.25mピッチで速度の測定を行った。こうして得られた密度（ ρ ）と弾性波速度（ V_p ）をもとに、各亀裂を挟む岩盤の音響インピーダンスを計算で求めることとした。

(3) 現場計測結果と音響インピーダンス

各サイトにおける弾性波速度をまとめたものが図－3である。この図からわかるように、各々の計測地点におけるTBM掘削による坑壁の緩み領域はわずかであり、一部を除いて、坑壁から0.5m以内である。すなわち、TSP探査で発振点ならびに受振点としている、坑壁から1.5～2m地点では、トンネル掘削の影響をほとんど受けておらず、本来の岩盤の弾性波速度を示しているものと言うことができる。なお、弾性波速度の検討には受振器の設置深度と同じである、坑壁からの深さ2mにおける速度値を用いることとした。



図－3 孔間弾性波による弾性波速度計測結果

表－2 岩盤物性値測定結果

サイト	調査位置	ρ (t/m^3)	V_p (m/s)	$\rho \cdot V_p$ ($t/m^2/s$)
1	坑口側	2.18	3529	7693
	切羽側	2.27	3646	8276
2	坑口側	1.90	3117	5922
	切羽側	2.18	3483	7593
3	坑口側	2.08	2956	6148
	切羽側	2.10	3896	8182

上記の弾性波速度と密度についてまとめたものを表－2に示す。この表から、今回対象としたいいずれのサイトにおいても、密度、弾性波速度ともに不連続面よりも切羽側の岩盤の方が高い値を示しており、結果的に、音響インピーダンスにおいても同様の傾向を示していることがわかる。

また、各サイトにおける不連続面を挟む岩盤の音響インピーダンスの差はサイト1、2では600($t/m^2/s$)程度、サイト3では2000($t/m^2/s$)程度の違いである。

表－ 3 音響インピーダンス比の比較

サイト	ρ の比	V_p の比	$\rho \cdot V_p$ の比	検出の有無
1	1.04	1.03	1.08	○
2	1.15	1.12	1.28	○
3	1.01	1.32	1.33	×

各サイトにおける岩盤物性値の比と、対応する
 探査結果を表－ 3 に示す。この表から、音響イン
 ピーダンス比は、サイト 1、サイト 2、サイト 3
 の順に大きな値を示していることがわかる。

これらの測定結果は、T S P 法で把握できた 2 つ
 の不連続面は、その前後の岩盤の音響インピーダンス比が小さく、これに対して、把握できなかった不連続面（サイト 3）音響インピーダンス比が大きいことを示している。すなわち、本検討結果は、通常推定される結果とは逆に、音響インピーダンス比と探査結果とは対応しておらず、T S P 法による見逃しの原因については、他の要因についても検討する必要があることを示している。

5. 探査条件に関する検討

前章で述べたように、音響インピーダンス比に関する実験結果が当初の予想と異なったことから、この原因について考察するために、①探査対象の走向傾斜、②切羽からの距離、③岩盤の状況を示す指標としての亀裂の数、に対する探査結果の関連性について検討を行った。

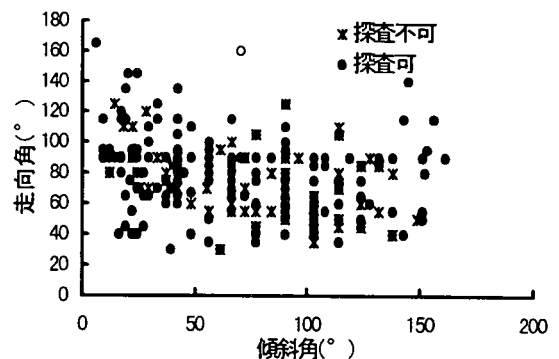
(1) 探査結果の整理方法

検討に先立って、今回の検討対象である城端トンネル避難杭で実施された合計 26 回の T S P 探査の結果を一定の基準に従って整理する必要がある。これは、T S P 法は、機器配置の条件や地形・地質条件によって探査可能な距離や精度が変化するためである。本検討では、探査機器の配置条件はどの探査においても同一であるが、土被り厚さが場所によって異なり、一部で 50 m 以下となっている。このため、これまでの検討結果⁶⁾をもとに、信頼できる探査範囲は切羽から土被り厚さ程度とした。また、合致や見逃しの判定は探査結果と掘削実績を比較し、不連続面のトンネル軸上における出現位置を基本とした上で、各回の探査範囲全体における不連続面の出現パターンを考慮して行った。ここで、探査結果における不連続面の走向・傾斜を特に重視しなかったのは、T S P 探査における不連続面の走向は予め仮定した値であり、傾斜はこの走向に基づいて計算されたものであるためである。

(2) 不連続面の走向・傾斜に関する検討

探査対象となる不連続面について、トンネル軸に対する走向・傾斜と探査結果の適合性の検討を行った。これは、T S P 探査のように、弾性波の反射を用いる探査においては、対象となる不連続面と探査測線（トンネル軸方向）とのなす角度によって、反射波の強度が大きく変化することが考えられるためである。一般的には、この手法ではトンネル軸とのなす角度が小さくなるに従い正確な探査が困難になるとされており、トンネル軸と完全に平行な不連続面は理論上探査が不可能となる。

図－ 4 は本研究で対象とした合計 26 回の探査結果において出現した不連続面すべてについて、走向・傾斜をまとめたものであり、探査によって把握できたものとそうでないものを分類している。この図からは、両者の間に特に差異は認められず、不連続面の走向・傾斜は探査結果に対して、ほとんど影響を与えていないことが示された。ただし、本検討を実施した城端トンネル避難杭では、トンネル軸とのなす走向角が 45° 以下（または 155° 以上）となるような不連続面がほとんどなく、



図－ 4 不連続面の走向・傾斜と探査結果

こうした低角度で交差する不連続面の探査特性については、別途検討が必要である。

(3) 切羽から不連続面までの距離に関する検討

媒体中を伝搬する弾性波は、球面拡散しながら、媒体の剛性率等によって減衰していく。このため、一般に、同一媒体中では、発振点より遠い探査対象からの反射波は微弱な信号となり、発振点近傍のものに比較して探査が困難となることが知られている。TSP法では、こうした点を補うために、到達時間に依存した信号強調フィルター処理も施されているが、十分な効果が常に得られるわけではない。

こうしたことから、探査測線からの距離によって、不連続面の検出特性が影響を受けるか否かを検討したものが図-5である。この図は、切羽から不連続面までのトンネル軸上での距離に応じて、探査結果のうち、合致および見逃した不連続面の数を示したもので、全般的に切羽からの距離が大きくなるに従って、見逃しの比率が高くなることがわかる。すなわち、TSP探査では、切羽より遠方の不連続面ほど見逃してしまう可能性が高くなる傾向があるということが出来る。

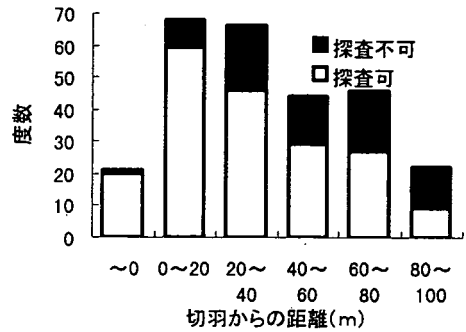


図-5 探査距離と探査結果

(4) 受発振区間の岩盤状態に関する検討

TSP探査において、探査結果に影響を与えるものとして、探査測線（受発振孔設置区間）内の岩盤の状態があげられる。これは弾性波の減衰の要因の一つに亀裂などの不連続面の影響があり、中でも、データを取得する受振点近傍の岩盤に亀裂が多ければ、すべての受振信号が、この影響を受けることとなる。このため、こうした条件下の探査では、亀裂の状況が測定データ全体に大きく影響することが予想される。

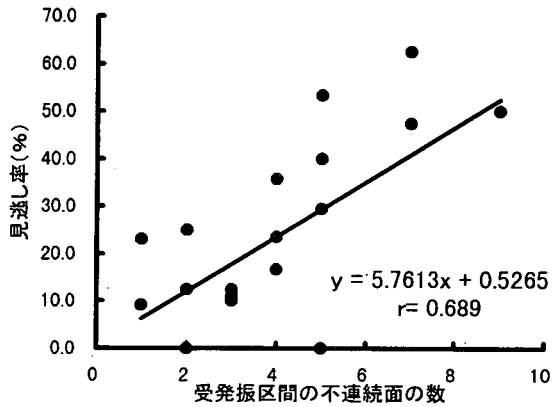


図-6 探査測線の亀裂数と探査結果の妥当性

こうした影響を検討するため、探査測線内の不連続面の数と探査結果の妥当性について検討を行った。ここで、各回の探査結果の妥当性を示す指標として、探査範囲内の全不連続面の数に対する見逃した不連続面の数の比を百分率で表した見逃し率を用いることとした。

この見逃し率と前述の探査測線内の亀裂の数との関係についてまとめたものが図-6であり、この図から、両者の間に正の相関関係を読み取ることができる。このことは、探査測線内に亀裂が多いほど見逃し率が高くなる傾向が示している。

6. 検討結果の考察

今回の検討からは、不連続面固有の特徴である音響インピーダンスおよび走向・傾斜の探査結果へ及ぼす影響については、明瞭な関係を示すことはできなかったが、各々の探査を実施した際の条件による不連続面の検出特性については、いくつかの知見を得ることができた。すなわち、対象となる不連続面までの距離ならびに探査測線を設置した区間の亀裂の数によって、探査結果の妥当性（見逃し率）が影響を受けることである。

この結果を用いて、改めて前述した音響インピーダンス比を検討した3地点の探査結果について検討を加えることとした。すなわち、それぞれの不連続面の切羽からの距離と、受発振孔設置区間の亀裂の状況（表-4）から、サイト3では不連続面までの距離が小さいにも関わらず、測線近傍の亀裂の影響で、弾性波の減衰が大きく、その結果この不連続面からの反射エネルギーが十分に受振器に伝搬しなかったことが推測される。これは、探査結果を改めて詳細に検討した結果、ほぼこの不連続面に相当する位置に、エネルギー的には小さいが、反射面が認められたこととも合致している。

表-4 実験サイトの探査条件

サイト	測線内の亀裂の数	切羽から反射面までの距離
1	5	62m
2	2	64m
3	10	42m

以上のことから、これらの検討地点においては、弾性波の反射条件や伝搬距離といった基本的条件以上に、探査実施地点の岩盤状況が探査結果に大きく影響したものと考えられる。すなわち、TSP探査は、一般論として、小規模な節理より地質的なコントラストが強い断層破碎帯等の不連続面の探査に適していることは明確であるが、むしろ、そうした不連続面と探査実施地点との距離または、個々の探査実施時における探査測線の設置地点の岩盤条件などによる探査結果への影響が大きいものと考えられる。

7. まとめと今後の課題

本研究は、ほぼ同一の地質条件下で実施されたTSP探査のデータをもとに、不連続面の個別の特徴を示す音響インピーダンスとトンネル軸に対する走向・傾斜ならびに、探査条件としての探査距離と測線上の亀裂に着目した検討を行った。この結果、TSP法によって探査可能な不連続面としての特徴付けは明確にはならなかったが、各探査実施時の条件として、弾性波の減衰に影響を与える反射面までの距離および受発振区間の岩盤状況が大きく影響するものと推察される。

なお、今回の検討では、音響インピーダンス比の測定は、測定自身に手間がかかることもあり、3地点の探査結果について検討を実施したのみである。こうしたことから、サンプルの絶対数が少なく、必ずしも、今回の対象地点の全領域についての傾向を示していない可能性がある。このため、今後は、さらにデータの蓄積を図るのに加えて、より簡易に入手できる（シュミットハンマー反発度等）データにも注目して、統計的な評価精度を向上することを目指していく必要がある。こうした検討を継続することによって、探査結果から地質的な性状を推定する確実性が向上し、探査結果の施工へのより適切なフィードバックが可能となるものと思われる。

【参考文献】

- 1) G. Sattel, P. Frey, and R. Amberg: Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods -pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, FRIST BREAK Vol. 10, No. 1, 1992
- 2) 大沼和弘, 笠博義, 猪狩哲夫, 武藤光: 亀裂の多い地山におけるTSP探査について, 応用地質学会平成7年度研究発表会講演論文集, pp. 167~170, 1995
- 3) 笠博義, 猪狩哲夫, 山本浩之, 前田信行: 坑内弾性波反射法における探査精度に関する一考察, トンネル工学研究論文・報告書第6巻, pp. 95~100, 1996
- 4) 緒方正, 前田信行, 笠博義, 斉藤篤: 坑内弾性波反射法における不連続面検出特性に関する一考察, 第32回地盤工学研究発表会講演集, pp. 2101~2102, 1997
- 5) 藤森聰雄: やさしい超音波の応用, 廣済堂産報出版, pp. 46~48, 1981
- 6) 山本浩之, 猪狩哲夫, 笠博義: 土被りが小さい区間におけるTSP法による切羽前方探査の適用性, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 2251~2252, 1996