

坑内弾性波反射法による前方探査結果と 地山状況との対比について

A STUDY ON COMPAISON WITH INVESTIGATION RESULTS OF SEISMIC EXPLORATION
FOR AHEAD OF TUNNEL FACE AND BED ROCK CONDITION

越野洋一^{*}，笠 博義^{**}，猪狩哲夫^{***}，前田信行^{**}

Youichi KOSHINO, Hiroyoshi KASA, Tetsuo IGARI, Nobuyuki MAEDA

TSP(Tunnel Seismic Prediction) method is a kind of seismic exploration method to predict geological discontinuity plane at ahead of tunnel working face. Some statistical examinations for influence of rock property around of the objects to exploration results were carried on using the data which were measured periodically in a tunnel construction sites. Seismic velocity in tunnel, schmitt rock hammer test data and RQD were discussed for the factors to exploration accuracy. The summary of the results is:

- 1) The objects which change the value of chmmit rock hammer test data or RQD were able to investigate exactly by TSP method .
- 2) It is not clear correlation between exploration results and seismic velocity in tunnel , it will be caused by decreasing of seismic velocity by loosened zone around tunnel wall.

keywords: mountain tunnel, seismic prospecting, fault, seismic velocity, rock strength, (TSP method)

1. はじめに

山岳トンネルの路線上の地質状況を非破壊で正確に把握する技術において、トンネル側壁を利用した弾性波反射法が、長距離探査の可能な手法として注目されている。こうした中で、スイスで開発された切羽前方探査技術であるTSP (Tunnel Seismic Prediction) 法は、比較的容易に探査が実施できる技術であり、現場において利用される機会も徐々に増加している。

この方法は、弾性波の反射を利用して、断層などの位置を探査する技術であることから、探査実施地点周辺の地形・地質条件や、探査対象となる断層などの弾性波の反射特性が、その探査性能に大きく影響することが考えられる。このようなことから、筆者らは、この技術の現場適用性を明確にするために、理論的な側面および実際の探査データの分析等を通じて、探査精度や誤差の発生要因等について検討してきた^{1), 2)}。本研究は、これまでの研究経緯を踏まえ、同一のトンネルにおいて、継続的に行われた探査の結果をもとに、探査対象となる断層などの反射面の前後の岩盤の状況の差異に着目し、この技術によって把握可能な地質情報の特徴について検討を行ったものである。

2. 本研究の目的

物理探査手法を用いた切羽前方探査技術を、実際のトンネル施工において有効に活用していくには、その探査技術の特性を十分に理解した上で、探査を行う必要がある。このような背景において、本研究もTSP法における現場適用性を明確にするための検討の一環として位置付けられる。

* 日本道路公団 新潟建設局富山工事事務所城端工事長

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

こうした全体的な研究の流れにおいて、本研究の目的は、前述したように、探査可能な地質的な不連続面の特徴を明らかにすることであり、これは具体的には以下のようにまとめられる。

①反射面の前後の岩盤の変化を示す指標として、坑内弾性波速度、シュミットロックハンマー反発度、坑壁におけるRQD³⁾を選定し、探査結果とこれらの値の変化状況について関連性を検討する。

②①の検討結果をもとに、TSP法によってその変化状況を正しく把握できる地質条件について検討する。

3. TSP法の概要

TSP方法は、前述したように、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。探査は、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することによって行われる。こうして得られたデータから、反射面の位置、その傾斜、反射面の前後の層の硬さに関する変化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・破砕帯や層理面などの地質的な不連続面であるとされている。

この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（D法）と呼ばれる解析手法によって行われる。この方法は、反射波の到達時間と弾性波速度から、反射面の位置を把握し、その延長方向としてのトンネルと反射面（探査対象）の交差位置を算出するものである。また、反射面における岩盤の硬さの変化は、反射波の位相から推測するものとしている。

4. 探査実施地点と地山データの概要

4.1 探査実施地点の概要

本研究は、日本道路公団が建設を進めている東海北陸自動車道の城端トンネル避難坑トンネル（全長3242m）において行った。このトンネルは、直径4.5mのオープンタイプのTBMで掘削されるもので、路線上の地質は、第三紀の安山岩、凝灰岩類および礫岩から構成され、全体として北へおよそ10°傾斜した単斜構造を呈する。また、路線上には数箇所では明瞭なリニアメント並びにドレライト等の岩脈が確認され、これらに伴う破砕帯や変質帯の存在が事前調査から予想された。こうした背景を受けて、このトンネル施工においては、TSP法による切羽前方探査を全区間において実施し、その結果を直ちに施工にフィードバックする方法が取られた。

なお、今回の検討において対象としたのは、このトンネルの中の約780m区間であり、この区間の地質は安山岩および凝灰角礫岩からなる。

4.2 地山データの概要

TSP法の探査結果と比較する地山データとして、坑壁における簡易弾性波速度、シュミットハンマー反発度（SH反発度）、簡易RQD³⁾の3項目を選定した。これは、TSP法が弾性波反射法であり、地山の持つ弾性波速度、岩盤の硬さ（強度）、亀裂の状況などに大きく影響を受けるものと考えられるためである。また、同時に、これらのデータは、本現場において、一定間隔で連続的に計測されていることから、探査結果の比較においては、探査実施位置によらず有効に活用することができる。以下に、それぞれのデータの取得方法についてまとめる。なお、いずれのデータも測定間隔は5mである。

(a)坑内弾性波速度

坑壁の弾性波速度をハンマーを振源として、簡易弾性波試験装置を用いて測定した。

(b)シュミットハンマー反発度

地山の強度（硬さ）の指標として、坑壁におけるSH反発度の測定を参考文献3)に示す方法で実施した。

すなわち、測定は1測定ごとに5点の打撃点を設けて行うこととした。測定値は、それぞれの打撃点で5回連打し、値の小さな2点の値を除いたもの15点の平均値とした。また、凝灰角礫岩部では、マトリックスの卓越する場所を打撃することとした。

(c)簡易RQD

坑壁の亀裂状況を定量的に評価するために、SH反発度と同様に参考文献3)の方法で、簡易なRQDの測定を行った。この方法は、坑壁に見られる長さ10cm以上の亀裂間隔を測定し、RQDを求めることによって、岩盤の状態を定量的に評価するものである。

5. 探査結果と地山データの比較

5・1 比較検討の方法

本研究においては、TSP法の探査結果のうち、掘削実績と対比可能なものについてのみ検討を行った(図-1)。すなわち、表-1に示したように、今回の検討対象とした合計7回の探査結果によって得られた反射面(以下、反射面と呼ぶ)61対象のうち、掘削実績から確認された実際の不連続面(以下、不連続面と呼ぶ)との明確な対比ができなかった15反射面を除いた、合計44対象について評価を行った。なお、掘削実績との明確な対比ができなかった反射面の多くは、図-1中に模式的に示したように、幅5mを超えるような断層破碎帯部において抽出された、多数の反射面群の中に属するもので、破碎帯部の複雑な地質の変化状況を反映している可能性がある。

探査結果と地山データを比較する上では、単純に反射面の位置の前後の地山データを比較するのではなく、反射面と対比される不連続面の前後の地山データを比較し、その変化の度合いと探査によって得られた岩盤の硬さの変化パターンを比較することとした。これは、TSP法で得られた反射面の位置は、全般的に5m程度の誤差を含んでいるため、こうした誤差の影響を除くためである。

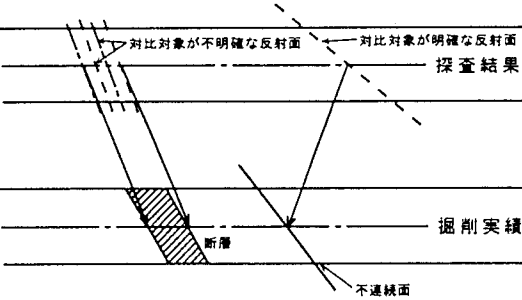


図-1 反射面と不連続面の対比

表-1 検討対象とした反射面の数

回数	反射面の数	
	対比可能	対比困難
1	6	1
2	6	0
3	6	2
4	6	4
5	7	0
6	6	3
7	7	5
合計	44	15

5・2 検討結果と考察

図-2に探査結果と掘削実績並びに地山データを比較した一例を示した。この区間では、断層や岩級の境界を示す13個の不連続面に対して、8個の反射面が探査によって抽出されている。これらの反射面について地質的な不連続面と対比すると、一部に傾斜や硬軟の変化が一致しないものもあるが、全体としては、地質の変化がよく捉えられていることがわかる。また、これらの不連続面と坑内弾性波速度、SH反発度、簡易RQDの値との関連性については、反射面に対比される不連続面の付近において、これらの測定値の全部または一部が大きく変化していることがわかる。

以上のような対比を、本研究における探査対象区間内において実施し、それぞれの地山に関する測定値の変化状況と、探査結果から判断される地山の硬軟の変化について検討した結果を以下に示す。

(a)坑内弾性波速度

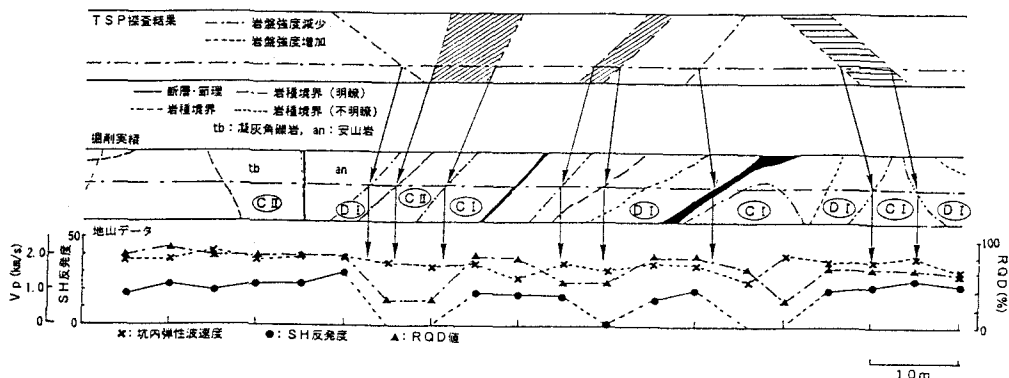


図-2 探査結果、掘削実績と地山データの比較検討例

不連続面前後における坑内弾性波速度の差に対する探査結果について図-3に示した。弾性波は、音響インピーダンス (ρv , ρ : 媒体の密度, v : 媒体の弾性波速度) が異なる境界面において反射または屈折する。このうち、反射面前後における岩盤の密度を正確に知ることは困難であるが、一般的に、安山岩と凝灰角礫岩の密度に大きな差はないものと考えられ、反射特性においては、むしろ弾性波速度の差の方が大きく影響するものと考えられる。しかし、本検討の結果からは、坑内弾性波速度と探査結果の明瞭な関連性は確認できなかった。

この点については、本研究の対象区間内で探査された不連続面のおよそ70%が速度差 0.5km/s以内であり、こうした不連続面の前後の坑壁における岩盤の弾性波速度の変化は大きくないことを考えると、次のようなことが推測される。すなわち、坑内弾性波速度は、掘削によるゆるみの生じた坑壁において測定されているため、全体として速度が大きく低下しているものと推測される。このため、健全部に比較して、速度差が生じにくかったものと考えられる。

(b) シュミットロックハンマー反発度

SH反発度は、岩盤の硬さを示す指標であり、不連続面の前後で岩盤の硬さ(強度)が変化する場合には、この値にもその変化の大きさが反映するものと考えられる。図-4は、その結果をまとめたものであり、この図から、この値の差が10以上となれば、探査結果との対比が極めてよいことがわかる。このことから、この弾性波反射法は、岩盤の硬さの変化を伴う不連続面の抽出には効果的であるということが出来る。

(c) 簡易RQD

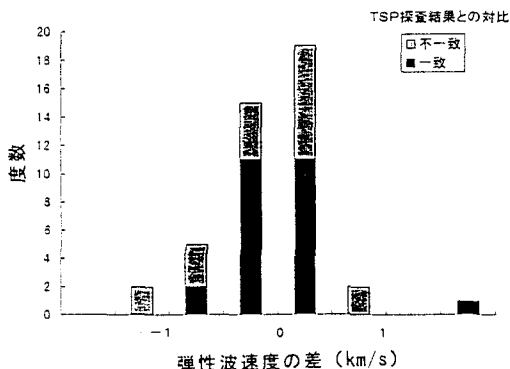


図-3 坑内弾性波速度差と探査結果の妥当性

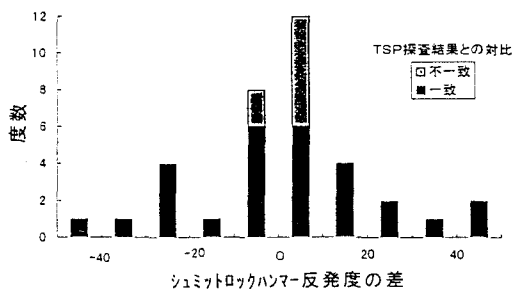


図-4 シュミットロックハンマー反発度差と探査結果の妥当性

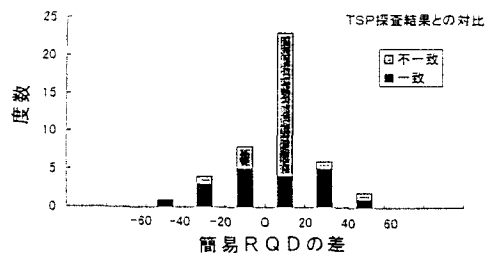


図-5 簡易RQD差と探査結果の妥当性

簡易RQDの差と探査結果とを比較したのが、図-5である。この図から、この差が大きい場合に、探査結果との一致度合いが高くなる傾向が見られるが、データ数が少ないことから、両者の間の明瞭な関係を見出すことは困難である。なお、この手法による計測値が、坑壁における値であり、TSPによる探査で実際の反射が発生している地点の亀裂の状況とは異なることや、RQDの差が極端に異なる場合を除いて、その差がそのまま岩盤の性状を反映していないことも両者の関連性を不明瞭にしていることも考えられる。

なお、上述した結果は、今回の限られたデータに対するものであり、今後、同様なデータが収集されるにしたがって、より明瞭な傾向が明らかになるものと考えられる。

5.3 探査対象となる反射面の特徴

以上のような検討結果から、TSP法で探査が可能な反射面とは、その前後で地山の特性を示す指標が変化するものと位置付けられ、特にシュミットロックハンマー反発度で示される岩盤の硬さや、亀裂の状況（亀裂密度、連続性など）が大きく変化する地質的な不連続面であるといえる。すなわち、これは岩盤の物性がその面（またはごく薄い層）を境界に、急激に大きく変わるものと位置付けられ、具体的には粘土や破砕帯を伴った断層や、貫入岩や岩脈に沿った変質帯などが想定される。一方、類似の岩種の境界、密着した節理や明瞭な境界面を持たない岩級の変化などは探査が困難もしくは、誤差が大きくなるものと考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、TSP探査結果のうち、特に硬軟の変化状況に対して検討を行い、探査可能な不連続面の特徴について統計的に考察を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

- ① TSP法によって抽出される不連続面においては、弾性波速度、SH反発度（硬さ）、簡易RQD（亀裂の状態）などが変化し、特に、SH反発度（硬さ）の変化の傾向は、探査結果とよく一致する。
- ② TSP法による探査対象は断層などのように、その層を境界に地質条件が大きく変化するものであり、岩盤物性の変化が小さい場合や徐々に物性が変わる場合は、正確な探査が困難となるものと考えられる。

なお、今後の課題としては、より多数のデータを蓄積し、統計的な評価の精度を向上すると同時に、反射面の地質的な性状との関連性を検討することによって、この手法によって探査できるものとそうでないものを明確にした上で、現場状況に応じた適用方法を確立していくことがあげられる。

7. おわりに

本研究において対象としたTSP法のような技術は、探査法自体の仮定や制約を的確に認識していないと、誤った評価を行う危険性がある。このため、探査に先立つ適用性の可否、探査結果の信頼性について考慮しておく必要がある。また、今回検討を実施した城端トンネル避難坑のように、同一トンネルにおいて、継続して適用する場合は、徐々に蓄積される探査結果と掘削実績とを参考にして、探査距離や、対象の出現パターンを予測することが重要であり、本研究の結果は、こうした探査結果のフィードバックにおいて、有効な情報を提供することができるものと考えられる。

最後に、本研究においては、袴腰・城端トンネル（作）の山田義教所長をはじめ、ハザマ・大日本土木JVの皆様にも多大なるご協力を頂いた。ここに深甚なる感謝の意を表します。

8. 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, 1995.9.
- 2) 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、土木学会トンネル工学研究論文・報告集vol.6, pp.95～100, 1996.11.
- 3) (社)日本トンネル技術協会：中硬岩地山における機械化施工に関する調査検討書（日本道路公団委託）、pp.123～126, 1993.2.