

坑内弾性波反射法を用いた岩盤評価の試み

A STUDY ON ROCK CLASSIFICATION BY SEISMIC EXPLORATION METHOD IN TUNNEL

笠博義¹⁾, 前田信行²⁾, 齊藤篤³⁾, 越野洋一⁴⁾

Hiroyoshi KASA, Nobuyuki MAEDA, Atsushi SAITO and Yoichi KOSHINO

Elastic wave velocity is useful parameter for rock mass classification, and seismic exploration in tunnel have been applied for rock classification around the tunnel face or wall. TSP method is an exploration technique to predict fault or geological boundary at ahead of tunnel face, and it is able to measure elastic wave velocity around the tunnel.

It was compared elastic wave velocity(V_{pt}) which measured by TSP with that obtained conventional method, in this study. And it was investigated the relationship between V_{pt} and rock strength, fissure and thrust power of TBM.

The summary of the result is;

- 1) It was not clear relation V_{pt} and rock strength, RMR, but recognized some correlation V_{pt} and thrust power.
- 2) The ratio of V_{pt} to velocity measured tunnel wall is useful to evaluate the stability of tunnel support.

Key Words: seismic exploration, rock classification, tunnel, TSP method

1. まえがき

トンネルの施工に関する弾性波探査は、基本設計に先立って行われるものと、施工中に切羽前方および周辺岩盤の調査や評価のために行われるものの大きく2つがある。この中で、施工中に実施されるものとしては、切羽前方の断層破碎帯等を調査する技術として、坑内弾性波反射法が普及しつつある。同様に施工中に坑内で実施される探査としては、トンネル坑壁周辺岩盤の評価の目的で行われている坑内弾性波探査(屈折法)があげられる。

こうした探査手法のうち、筆者らは坑内弾性波反射法(TSP探査法)による切羽前方の地質探査手法について、主として実測データをもとにした検討を続けてきており、これまでに、この探査法の適用条件、精度、評価可能項目等についてのいくつかの実用上重要な知見を得てきた。

本研究は、TSP探査法を切羽前方の地質状況の予測という本来の適用目的に加えて、さらに効果的な活用する方法として、トンネル周辺の岩盤評価への応用について検討を行ったものである。すなわち、従来より行われてきた坑内弾性波探査より容易に実施できるTSP探査によって、どの程度の岩盤評価が可能であるかについて、基礎的な検討を行ったものである。

2. 探査手法の概要と検討内容

TSP探査法は、前述したように、切羽前方の断層等の探査を目的として実施されるもので、トンネル側壁に1点の受振点と多数(20点以上)の発振点を配置して弾性波探査を行うもので、切羽前方や周辺部からの反射波を解析することによって、これらの反射面とトンネルとが交差する位置を推測する技術である。このとき、受発振点は坑壁より1.5~2m程度削孔された孔内に設けられ、トンネル掘削による影響を比較的受けていない領域での弾性波の受発振が行われる。

1)正会員 博士(工学) ハザマ 土木本部トンネル統括部, 2)正会員 工学修士 ハザマ土木本部トンネル統括部
3)正会員 ハザマ 城端・袴腰トンネル作業所, 4)日本道路公団新潟支社富山工事事務所城端工事長

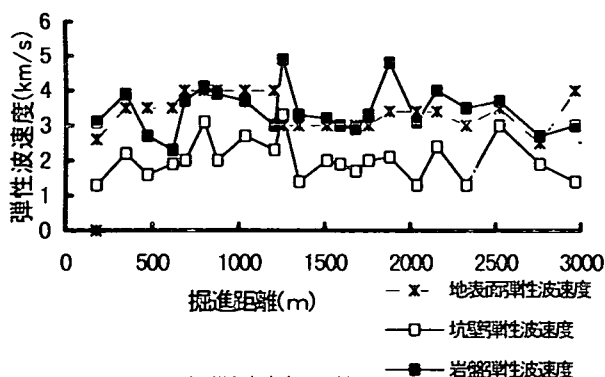


図-1各弾性波速度の比較

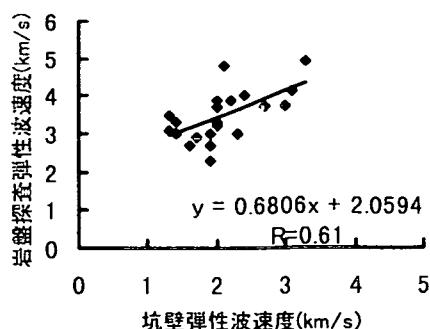


図-2 岩盤・坑壁弾性波速度の比較

これに対して、従来のトンネル坑内で実施される弾性波探査法は、緩み領域の評価などを目的として実施されることが多く、単一発振点で多点受振（通常 12, 24 点）の方式が用いられるか、より簡便な簡易式の 2～3ch 程度の測定装置が用いられることも多い。いずれも解析の基本は屈折法（はぎとり法）である。このように、両者は探査目的や解析の実施手順などに明瞭な違いが見られるが、坑壁近傍の受発振孔間の弾性波速度を測定するという基本的な意味においては、ほぼ同じ探査手法であると考えることができる。

本検討は、こうした TSP 探査法と坑内屈折法の類似性に着目し、東海北陸自動車道の城端避難坑トンネル建設時に測定されたいくつかのデータをもとにして弾性波速度と岩盤状況の関連性について検討したものである。

なお、今回の検討を行った城端トンネルは、凝灰角礫岩、安山岩および流紋岩質凝灰岩から構成される丘陵部（土被り 20～200m）に TBM 工法で掘削されたものである。この工事では、切羽前方の地質予測として、TSP 探査を 1 回/100～150m 行くと同時に、TBM 掘削におけるさまざまな岩盤データを収集・評価するために、1 回/5m 間隔で坑内簡易弾性波探査およびシュミットハンマー試験や亀裂観察などを実施している。ここでは、こうしたデータのうち、TSP 探査法で得られた弾性波速度（岩盤弾性波速度と呼ぶ）、坑壁で実施された 3ch 簡易弾性波速度試験装置で測定された弾性波速度（坑壁弾性波速度と呼ぶ）および事前調査における屈折法地震探査で得られた弾性波速度（地表面弾性波速度と呼ぶ）の 3 種類の弾性波速度と、前述した岩盤特性を示すデータとの関連性について比較検討を行うものとする。本検討の目的は以下のようにまとめられる。

- ① TSP 探査によって求められる弾性波速度と簡易式の坑内弾性波測定器による探査結果および地表面からの屈折法地震探査によって得られた結果とを比較検討し、それらの関連性とそれぞれの値が意味するものについて考察する。
- ② TSP 探査で得られた弾性波速度と岩盤特性（強度、亀裂の状態）および TBM の機械データ（スラスト推力）との関連性について検討する。
- ③ 上記の検討結果をもとに、実際の施工において坑内弾性波速度を有効に活用するための方策について検討する。

3. 測定方法の違いによる弾性波速度の比較

3 種類の方法で得られた弾性波速度を比較するに当たって、岩盤弾性波速度は TSP 探査の受発振測線中の平均的な値であるため、本検討ではこの測定値を測線の間中点におけるものと仮定し、この位置における坑壁弾性波速度および地表面弾性波速度とを比較することとした。

本検討で比較する 3 種類の弾性波速度について、トンネル路線上における変化を示したものが図-1 である。この図から、岩盤弾性波速度と坑壁弾性波探査の値はほぼ同様なパターンを示しているが、地表面弾性波速度の変化は、他の 2 つの値とは大局的な傾向程度しか一致していないことがわかる。このことは、比較的土被りが小さい区間で基本的には成層構造をなしていると考えられる今回の地質条件下においてでさえ、地表面における地震探査には限界があることを示している。また、弾性波の速度値自体に着目すると、トンネル坑壁から 1.5～2m の距離で

あっても、坑壁表面における弾性波速度とは大きく異なることがわかる。図-2はこの2つの弾性波速度の関係を示したものであり、この図から、両者は正の相関関係を有し、直線近似した場合、岩盤弾性波速度の方が坑壁弾性波の値より2 km/s 程度大きくなっていることがわかる。ここで、岩盤弾性波速度と坑壁弾性波速度との間に差が生じた理由としては掘削による緩みであることが考えられる。

以上のことから、比較的掘削の影響が少なく、岩盤の緩みも大きくないと考えられるTBM工法においてさえ、掘削後の坑壁周辺では応力開放等による緩みが生じていることがわかる。ただし、この緩み領域は別に行った孔間弾性波試験結果(図-3)からも坑壁周辺のごくわずかな部分に限定されているものと考えられる。

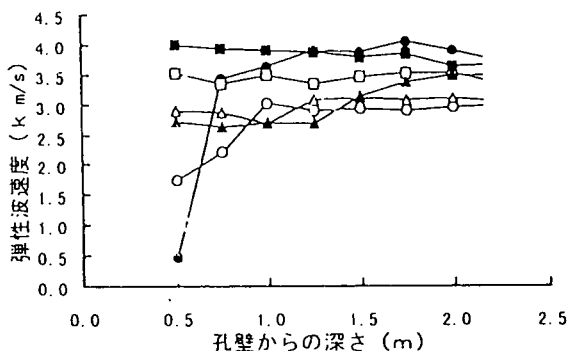


図-3 孔間弾性波探索結果

4. 弾性波速度と岩盤状況との関連性の検討

岩盤の強度や亀裂の状況は弾性波速度に大きく影響を与えるものと考えられる。このことは言い換えれば、弾性波速度には岩盤の強度や亀裂の情報が反映していることを示している。そこで、岩盤弾性波速度と岩盤特性との関連性について検討を行った。具体的には、岩盤強度を示す指標として、シュミットロックハンマー反発値(SH反発度)を、亀裂の状態を表す指標として、RMR¹⁾を用いることとした。これらの測定は前述した坑壁における簡易弾性波探索同様に、5m間隔で行ったもので、一定の測定法に基づいて極力調査地点の全体を代表する値を測定したものである。また、比較においては、TSP探索の受発振測線区間内の測定値を平均したものをを用いることとした。なお、直接的に岩盤特性を示すものではないが、TBM掘進時のスラスト推力についても関連性の検討を行った。

以上の各指標と岩盤弾性波速度との関連性を示したものが、図-4~6である。これらの図から、SH反発度、RMRとも明瞭な相関関係は認められず、スラスト推力のみに弱い正の相関が見られる程度である。このことから、坑壁の緩みの影響を受けていない岩盤特性を示す岩盤弾性波速度と、掘削後の坑壁において測定された強度や亀裂などとの関連性は単純ではないことが推測される。なお、スラスト推力については、TBMトンネル自体を一つのボーリングとみなした場合、掘削による緩みが生じる以前の岩盤の全体的な硬さがその測定値に反映しており、これがやはり緩みを受けておらず、かつある程度広がりを持った領域の代表値である弾性波速度のと間に関連性が生じたものと推定される。

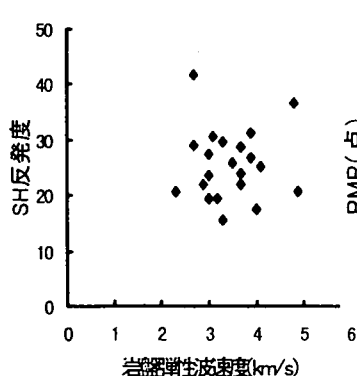


図-4 岩盤弾性波速度とSH反発度

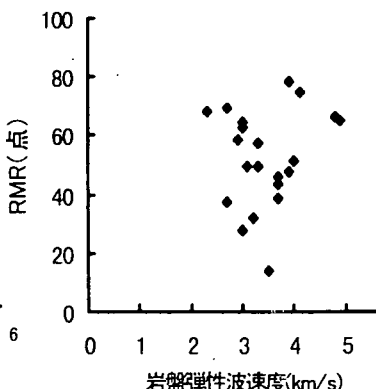


図-5 岩盤弾性波速度とRMR

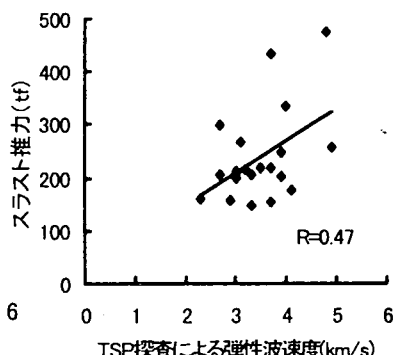


図-6 岩盤弾性波速度とスラスト推力

5. 支保設計へに対する弾性波速度の反映の可能性

これまでの検討結果から、岩盤弾性波速度は坑壁弾性波速度との関連性は高いものの、岩盤の強度や亀裂を示す指標との関連性は明確ではないことが明らかとなった。また、トンネル坑壁における弾性波の測定は、どうしても掘削後の探査とならざるを得ないことから、事前調査や切羽前方探査とは異なった位置付けとなるものと言える。すなわち、この探査で得られる情報は、掘削において必要な地山の安定性に関する情報ではなく、掘削後のトンネルの安定性や中長期に及ぶ支保工の妥当性に関するものになることが考えられる。

一方、岩盤弾性波速度がほぼ本来の岩盤の弾性波速度を示し、坑壁弾性波速度が掘削の影響を大きく受けた岩盤の弾性波速度であることから、両者を対比することによって、トンネル掘削の岩盤に与える影響を弾性波速度の面から評価できる可能性がある。すなわち、先に述べた掘削後の地山の安定性に関する評価が、この弾性波速度の対比からできる可能性があるものと思われる。こうした点に着目して、以下に示す速度低下率を用いて検討を行った。

$$\text{速度低下率 } Vd(\%) = \{ 1 - (Vps/Vpt) \} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 Vps : 坑壁弾性波速度(km/s)、 Vpt : 岩盤弾性波速度(km/s)とする。

この式によって求められた値と実施支保パターンとの関連性を示したものが図-7である。この図から、ばらつきは大きいものの、DパターンとCIIパターンの間に明らかに速度の変化率の違いがあることがわかる。一方、掘削後の支保の変状の度合いと弾性波の速度低下率の関連性について示したものが図-8である。この図においても、掘削後に支保の変状が生じている区間は全体として、弾性波速度の低下率が大きくなる傾向があることがわかる。

以上のことから、弾性波速度が掘削により大きく低下する岩盤は、主に節理や断層等の不連続面によって、掘削による応力解放の影響が顕著に生じ、速度の低下が大きくなったものと考えられる。また、速度低下率が50%を超えた区間はいずれも支保はDパターンであり、そのうち2箇所は膨潤性鉱物の影響で支保の補強が必要であった部分に相当していた。このように、掘削に伴って坑壁部の弾性波速度が大きく低下する部分は、何らかの地質的な要因によって掘削後にトンネルの安定性が大きく低下する可能性がある部分と深い関連性があることが推測される。

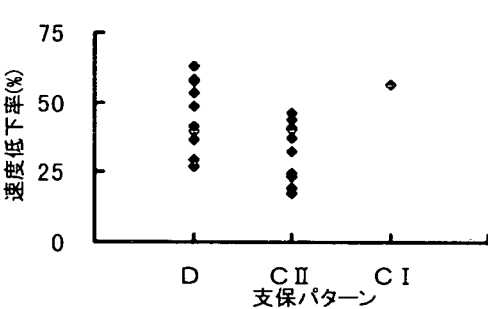


図-7 速度低下率と支保パターン

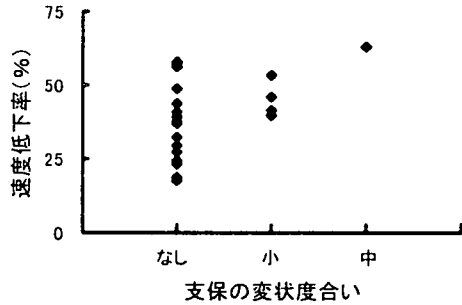


図-8 速度低下率と支保の変状の度合い

6. まとめと今後の課題

本研究は、TSP 探査法で得られる弾性波速度を活用して、トンネル周辺の岩盤の評価を行うことの可能性について検討を行ったものである。その結果、TSP 探査時に得られる弾性波速度のみからは、岩盤の強度や亀裂などの情報を直接的に求めることは困難であるが、坑壁で実施された簡易弾性波試験による速度との比から求められる速度低下率は、支保パターンや施工後における支保の変状の度合いと関連性があることが示された。すなわち、掘削後のトンネルの安定性を評価する上では、この指標が有意義であるものと考えられる。また、弾性波の測定自体が掘削後の実施となる TSP 探査の特徴からも、この手法は十分に実用的な探査技術であると考えられる。

今後は、さらにデータの蓄積を図ると同時に、それぞれの弾性波探査の特徴とそれによって得られる情報の意味について検討を行い、支保工の妥当性を評価する技術としての坑内弾性波探査法について検討を続ける予定である。

【参考文献】1) Bieniawski, Z.T : Geomechanics classification of rock masses and application in tunneling, Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mech. , vol. 2, PartA, pp. 27-32, 1974