

弾性波反射法とトモグラフィ解析を用いた

坑口周辺部の地山評価

Geological estimation at tunnel entrance using Shallow Seismic Reflection survey for Tunnel (SSRT)

加藤卓朗¹⁾・村山秀幸²⁾・浦木重伸³⁾・浅川一久⁴⁾・柳内俊雄⁵⁾

Takuro KATO, Hideyuki MURAYAMA, Shigenobu URAKI, Kazuhisa ASAKAWA and Toshio YANAI

We develop the Shallow Seismic Reflection survey for Tunnel (SSRT) to look ahead of the tunnel face, and verified the validity of this method through field experiments. We apply the SSRT to the shallow overburden at the Osachi tunnel using the several measurement conditions from the tunnel and the ground surface at the same time. We predict a geological weathering boundary zone from the SSRT seismic analyses. This boundary harmonizes with the observation while excavation. We suggest the SSRT can estimate the geological condition of the shallow overburden area, which was difficult to survey in general.

Key Word: Tunnel, Prediction ahead of tunnel face, Seismic reflection method, Non-explosive source
Hydraulic impactor, Seismic tomography

1. はじめに

トンネル工事においては、ボーリング調査や弾性波屈折法などによって、地山等級を区分し支保パターンの設計に反映している。しかしながら、地質の複雑さなどから事前調査のみでは適切な予測が困難で、トンネル施工時に思わぬ地質状況に遭遇することも稀ではない。このような背景から、最近、施工時に坑内から弾性波反射法を実施し切羽前方の地質を予測する手法が普及しつつある¹⁾²⁾。このように施工時に適時トンネル切羽前方の地質を予測することは、施工管理や安全性の確保、さらに品質の確保という観点から有効であると考えられる。しかしながら、従来の坑内弾性波反射法は通常発破を起振源とするため、自由断面掘削機やTBMなど発破使用許可申請を実施していないトンネルにおいては別途発破使用許可申請が必要となる。よって、発破を用いない弾性波反射法による探査の方が適用トンネルに制限が少なく汎用性が高いと考えられる。このような背景から、筆者らは非爆薬振源が利用可能で坑口や低土被り区間などにおいても精度よく探査が可能な手法として、トンネル浅層反射法探査（以下SSRT (Shallow Seismic Reflection survey for Tunnel) と称す）を開発し、現場での適用を進めている³⁾。

SSRTはトンネル坑内において弾性波反射法を実施し切羽前方地質を予測する手法であり、原理的にはVSP(Vertical Seismic Profiling)技術をトンネル坑内に応用したものである。SSRTの特徴としては、①起振源に

-
- 1) 正会員 修士(工学) 株式会社フジタ 技術センター土木研究部
 - 2) 正会員 博士(工学) 株式会社フジタ 技術センター土木研究部
 - 3) 株式会社地球科学総合研究所
 - 4) 国土交通省関東地方整備局
 - 5) 株式会社フジタ 首都圏土木支店 フジタ・アイサワ特定建設工事共同企業体

非爆薬の油圧インパクトやパイプロサイスを用いるので市街地や近接施工においても適用可能なこと（発破も利用可能）、②油圧インパクトなどの起振源は自走式で機動性に優れていることから精度の高い測定方法である多起振点・多受振点観測を採用できること（条件や探査目的に応じて測定配置を任意に変更可能）、③地山状況や地形条件に応じた解析手法を採用できること、④坑口周辺や低土被り区間に適用できることなどが挙げられる。

また、SSRTにおける測定機材やデータ取得方法などは通常の浅層反射法で使用されるものと同様であるため、本探査システムを用いて地表での探査も実施することができる。したがってSSRTは、トンネル坑内からの鉛直構造解析、地表面からの水平構造解析、トンネル坑内ー地表面間の弾性波トモグラフィ解析などを実施し、地山を総合的に評価することにより、確度の高い探査が可能であると考えられる。このような考えから、これまでに筆者らは、トンネル坑内と地表からの探査を併用する手法の有効性を検証してきた⁴⁾。

本稿では、一般国道20号下諏訪・岡谷バイパス長地トンネルにおいて実施した、トンネル坑内からの鉛直構造解析、トンネル坑内ー地表面間のトモグラフィ解析を用いた出口側坑口周辺の地山評価について報告する。

2. 適用トンネルと探査目的

探査は長野県岡谷市に位置する長地トンネルで実施した。長地トンネルの地質は、塩嶺累層に属する安山岩と凝灰角礫岩から構成され、風化境界が不連続であると想定されていた。トンネル路線は、土被り3D以下の区間が全長の約4分の1程度と低土被り区間が比較的長い。なお、近傍の旧国鉄中央線塩嶺トンネルでは、塩嶺累層に属する泥岩区間で高膨張性かつ多量湧水の難工事であったことが報告されている⁵⁾。

探査は出口側坑口手前約90m地点で実施した。事前調査によると探査実施切羽付近は弾性波速度 $V_p=2.4\text{km/s}$ であり、坑口に向かうにつれ、弾性波速度が低下すると推定されていた。一般に地山弾性波速度が $V_p=2.0\text{km/s}$ 程度と低い場合には弾性波コントラストが小さく探査が困難となる。さらに風化境界面のようにトンネル路線となす角が小さな構造の場合には、その位置同定の精度が低下する。しかしながらトンネル工事では地山状況が不良とされる弾性波速度の低い領域におけるトラブル発生頻度が高く、トンネル前方探査や地山評価に対するニーズが高い。よって今回は、坑口や低土被り区間などにおいても探査が可能なSSRTを実施し、地山の風化深度境界を事前に把握することを試みた。

3. 探査方法

図-1に本トンネルでの探査目的領域、探査配置、解析手法を示す。本探査は、出口側坑口付近の低土被り区間の地山評価が目的であり、より精度よく探査を実施するための組合せとして、①トンネル坑内からの鉛直構造解析、②トンネル坑内ー地表面間のトモグラフィ解析の2種類を実施した。SSRTはこのように探査目的に応じて各種測定配置や

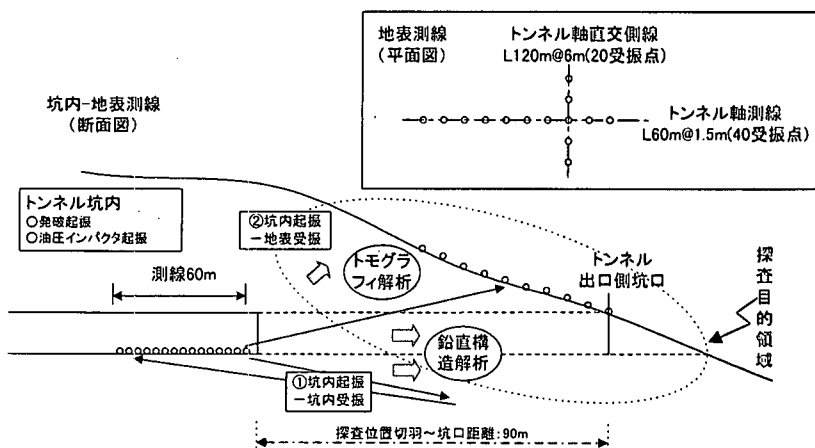


図-1 本トンネルでの探査目的領域、探査配置、解析手法の概要

解析方法を任意に計画できることが利点である。今回の探査の特徴は、坑口周辺の地表においてトンネル軸方向とトンネル軸直交方向の2測線を配置したことにある。以下にそれぞれの探査方法について述べる。

3.1 トンネル坑内測定による鉛直構造探査

図-2にトンネル坑内測定の起振点・受振点配置を示す。受振器は1成分受振器を切羽付近からトンネル軸方向に1.5m間隔で40点設置し、3成分受振器を切羽近傍においてトンネル横断方向に5点設置した。起振源には油圧インパクトと発破を使用した。油圧インパクトは図-3に示すように、重錘落下起振源であり、自走式で機動性が高い振源である。油圧インパクトは1成分受振測線に沿って3.0m間隔で20点起振した。なお、油圧インパクト起振は同一箇所でも数回打撃しそれらを重ね合わせることでノイズの低減や探査深度の向上を図った。発破は1.5m間隔で20箇所実施した。発破孔は穿孔径φ45mmで上半盤の底盤に鉛直下向き長さ1.5mで穿孔した。発破には含水爆薬50g/孔と瞬発電気雷管を使用し、装薬時のタンピングとして水を使用した。データ取得はトンネル坑内に配置した観測車内の探鉱機G・DAPS-4を使用し、サンプル間隔1.0ms、記録長1secとした。

解析方法は図-4に示すように、CMP重合法により探査測線直下の大局的な水平構造を、VSPを応用した処理により切羽前方の鉛直構造を把握し、両者を総合的に判断して切羽前方の地質構造を推定した。得られた解析結果は時間断面で表示され、探査測線区間の平均的弾性波速度を用いて切羽前方での反射面出現位置を算出した。

3.2 トンネル坑内・地表測定による弾性波トモグラフィ

前述の図-1に示すように、トンネル坑内において起振した弾性波を出口側坑口付近の地表部ににて受振し、得られたデータからトモグラフィ解析を実施した。受振器は、トンネル軸方向測線として1.5m間隔で40箇所（約60m）とトンネル軸直交測線として6.0m間隔で20箇所（約120m）設置した。トンネル軸方向測線の位置はトンネル路線位置に換算すると、切羽前方約40～100mに相当する。起振源には油圧インパクトと発破を使用し、ともにトンネル坑内の上半盤底盤を3.0m間隔で10点起振した。また、弾性波探査において起振源から波動が出た瞬間（ショットマーク）を正確に記録することが非常に重要であるが、今回のようにトンネル坑内と地表では距離が離れており、見通しも利かないため、通常的手法ではデータの取得が困難である。そこで今回は図-5に示すように坑口に起振制御装置を配置し、起振信号を起振地点に無線および有線にて送信すると同時に、ショットマークを記録装置

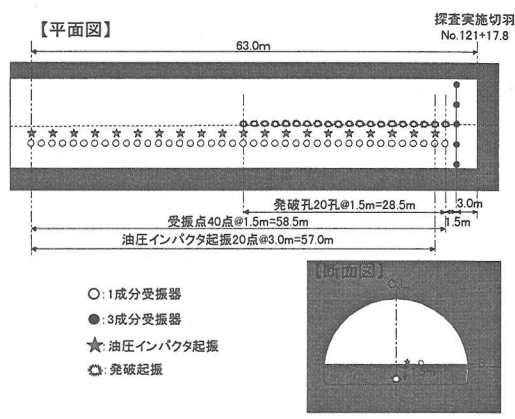


図-2 トンネル坑内測定起振点・受振点配置

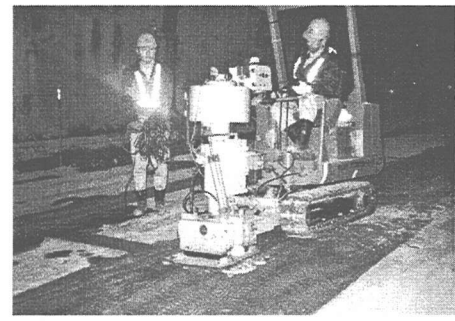


図-3 油圧インパクトによる起振状況

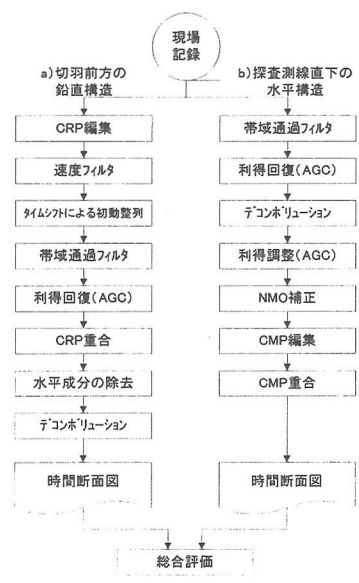
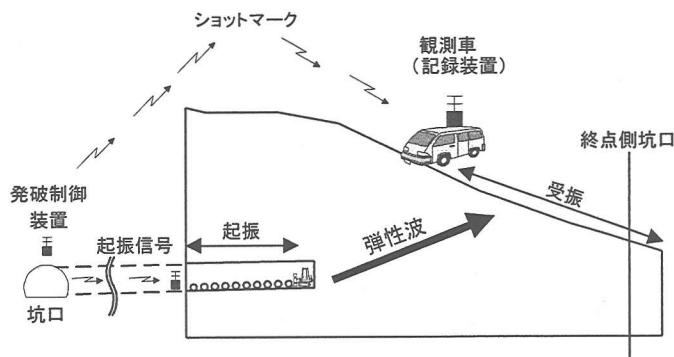


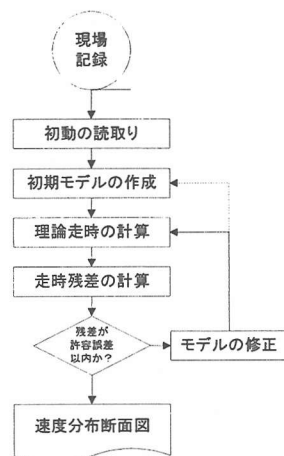
図-4 データ処理フロー



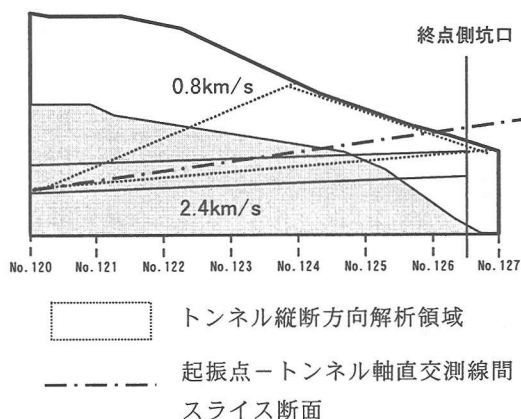
図－5 トモグラフィ測定模式図

へ無線にて送信する手法を採用した。このような手法により、ショットマークを正確に記録することができ、精度よく解析を実施できた。

解析手順は図－6に示すとおりであり、初期モデルを作成し、初期モデルにおける全ての起振点・受振点の組合せでの理論走時を計算し、観測走時との残差を求め、残差を最小化するようにモデルを修正した。この作業を繰り返えし、理論走時と観測走時との残差が許容値より十分に小さくなったところで収束したと判断し、反復計算を終了した。この最終モデルを解析結果として速度分布断面図を作成した。今回設定した初期モデルは図－7に示すような二層構造モデルである。このモデルは事前調査の弾性波屈折法から得られている弾性波速度を基に作成した。本探査では①トンネル縦断方向、②トンネル坑内起振点とトンネル軸直交測線受振器を結ぶスライス断面の2断面についてトモグラフィ解析を実施した。



図－6 トモグラフィ処理フロー

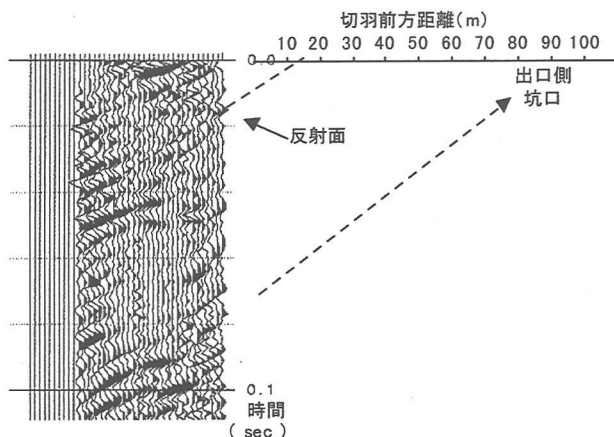


図－7 初期モデルと解析領域

4. 探査結果と掘削実績との比較

4.1 トンネル坑内での切羽前方探査結果

本探査では、油圧インパクトと発破という2種類の起振源を用いたが、取得したデータからは両者に顕著な違いはみられなかったため、以下は発破起振の結果について述べる。取得データより求めた受振器配置区間 (No.118+14.8～No.121+13.3) の弾性波速度は $V_p=2.0\text{km/s}$ であり、事前調査における弾性波速度 $V_p=2.4\text{km/s}$ より小さい値であった。この $V_p=2.0\text{km/s}$ という値は、安山岩としてかなり低い値であり、探査実施



図－8 切羽前方解析結果 (発破起振)

位置の切羽は、事前調査による風化区分では新鮮部に相当するものの、風化が進行していることが考えられる。図－８に切羽前方解析結果を示す。その結果、切羽前方約 12m (No.122+10m) 付近に反射面が 1 箇所確認でき、地山は全体的にコントラストの小さい弾性波構造を有しているといえる。また、切羽前方約 90m 前後にみられる反射面は出口側坑口付近の地表面の影響を受けているものと考えられる。地山前方予測として、切羽前方約 12m の反射面は事前調査で推定されていた風化部・強風化部境界に相当すると想定し、それ以降は強風化作用が一様に進行し脆弱化が進んでいると想定した。

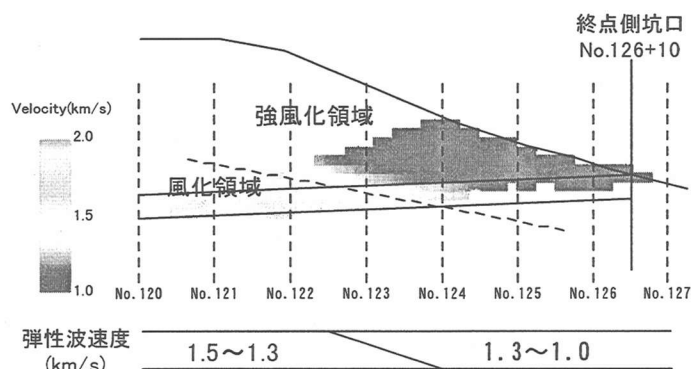
4.2 トモグラフィ解析結果

図－９にトンネル縦断方向の解析結果を示す。起振位置付近は実測値の $V_p=2.0\text{km/s}$ と比較してやや低い値となったが、全体的には、弾性波速度は地表面付近が低く、地山深部に向かって高くなる傾向を示し、地形状況と調和的で風化の進行状況をよく表現している。風化・強風化領域の境界はほぼ弾性波速度 $V_p=1.3\text{km/s}$ であり、本解析結果からも事前調査結果より風化が地山深部に進行していることが想定できる。

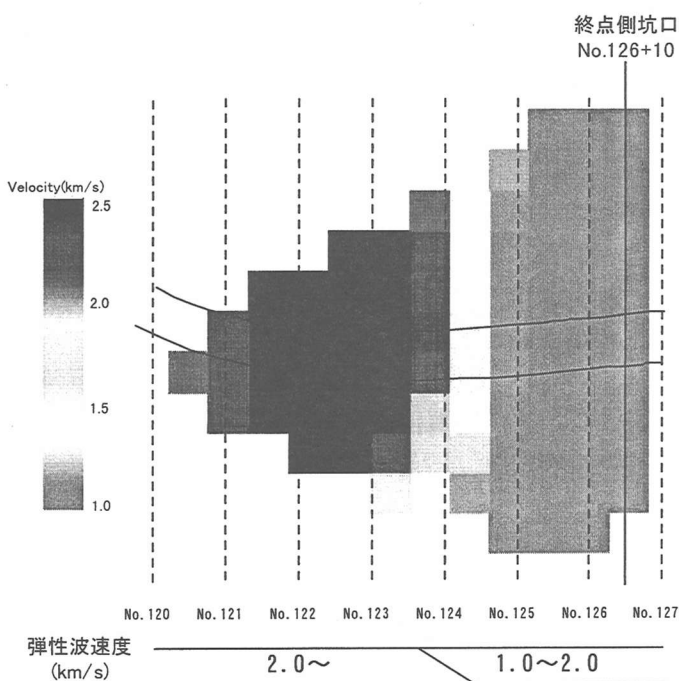
図－１０にスライス断面の解析結果を示す。トンネル縦断方向と同様の初期モデルを使用したところ、起振点側の弾性波速度が不自然に大きくなった。これは弾性波速度構造が弾性波の進行方向に対して直交しており、トモグラフィ解析が難しい起振点・受振点配置であったために偽像が発生したと考えられる⁶⁾。

4.3 総合評価

図－１１に鉛直構造解析結果、トモグラフィ解析結果、切羽観察結果、採用支保パターンなどを総括的に示す。なお、トモグラフィ解析の結果についてはトンネル縦断方向の結果を採用した。両探査手法の結果より、事前の推定よりも風化の進行がやや深いと考えられ、風化・強風化の境界は No.122+10m～No.123 付近と推定された。一方、切羽観察結果によると、探査実施時切羽位置付近は風化部に相当していた。その後、切羽の進行に伴って、No.123 付近から天端部に強風化凝灰岩が出現し、No.123+2.8m において小規模な天端崩落が発生した。このことから No.123 付近が風化・強風化領域の境界であったと考えられ、探



図－９ トモグラフィ解析結果（トンネル縦断方向）



図－１０ トモグラフィ解析結果（スライス断面）

査結果とおおむね一致したといえる。本トンネルは、弾性波速度が低く、弾性波コントラストが小さいため、弾性波速度の変化面をとらえる弾性波反射法では探査が難しい条件であったといえる。このような条件のなか、トンネル坑内と坑外で測定し、2種類の解析方法を用いることで風化・強風化境界をおおむね推定することができた。このことは地山条件によって解析方法や測定配置を自由に選択できる本手法の有効性を示しているといえる。

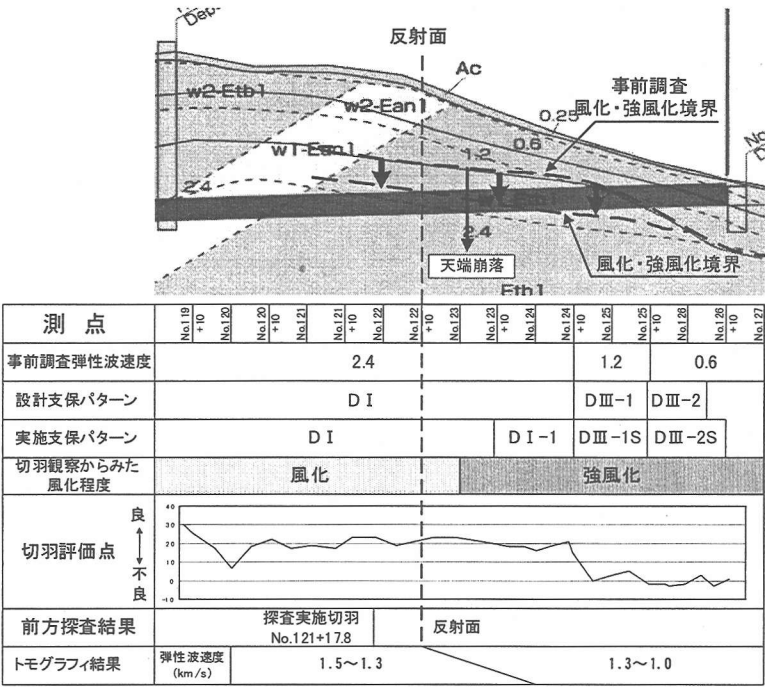


図-11 探査結果と掘削実績との比較

5. おわりに

本探査は、出口側坑口付近の地山評価を目的としてトンネル浅層反射法探査 SSRT を実施した。本トンネルでの探査の特徴は、トンネル坑内からの鉛直構造解析、トンネル坑内ー地表間のトモグラフィ解析の2種類を実施したことにある。その結果、両手法ともにほぼ一致する位置で風化・強風化領域の境界が想定され、掘削の結果ともおおむね一致した。本手法により、従来探査が困難とされる地山条件においてもある程度評価が可能であることが示された。

【参考文献】

- 1) ジェオフロンテ研究会新技術相互活用分科会前方探査WG：トンネル切羽前方探査技術技術資料，pp.18-46，1997.
- 2) 稲崎富士，倉橋稔幸，飯酒孟久夫，河村茂樹，林久夫：TBM施工トンネルにおけるHSPの連続的適用，トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会，土木学会関西支部，pp.69-74，2000.
- 3) 加藤卓朗，柳内俊雄，村山益一，清水信之：油圧インパクトを起振源とする切羽前方弾性波反射法探査の開発と適用，第31回岩盤力学に関するシンポジウム，土木学会，pp.22-28，2001.
- 4) 加藤卓朗，村山秀幸，清水信之，岡村浩孝，望月斎也：トンネル坑内および地表からの弾性波反射法を用いた切羽前方探査，トンネル工学研究論文・報告集第11巻，土木学会，pp.171-176，2001.
- 5) 山口進，佐々木敏夫，安藤順造：膨張性泥岩における地山挙動—中央東線塩嶺トンネル—，トンネルと地下，第13巻6号，pp.7-16，1982.6.
- 6) 例えば，物理探査学会：物理探査適用の手引き（とくに土木分野への利用），pp.211-217，2000.