

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

Development and Application of Seismic Reflection Survey ahead of Tunnel Face by using Hydraulic Impactor

加藤卓朗^{*}・柳内俊雄^{**}・村山益一^{***}・清水信之^{****}

Takuro KATO, Toshio YANAI, Masuichi MURAYAMA, Nobuyuki SHIMIZU

Recently, Tunnel Seismic Prediction (TSP) and in-tunnel Horizontal Seismic Profiling (HSP) have been applied to the geological estimation ahead of the tunnel face at several tunnel construction sites. However, since these methods require the use of explosives, permission to use explosives is required during construction using a partial cutting machine or Tunnel Boring Machine (TBM), for which such permission is not required. Therefore, the seismic reflection survey method using a non-explosive source is more applicable than conventional methods.

We developed the seismic reflection survey method(S²R-T) to look ahead of the tunnel face using hydraulic impactor, and verified the validity of this method through field experiments.

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

1. はじめに

トンネル技術者にとって切羽前方の地質状況を適切に予測し、地山不良箇所に対する対応策を事前に検討・提案・実施することは、工程・施工・安全管理上の基本技術である。しかしながら、地質条件の複雑さなどから設計時の事前調査のみでは適切な予測が困難な場合が多く、トンネル工事を安全かつ経済的に進めるためにトンネル施工時における切羽前方探査としてTSP、HSPが開発され、現場適用が進められている^{1),2)}。これらの探査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。従来、発破を起振源としないTSPとして放電衝撃震源を用いる手法³⁾や蒸気圧破砕材を用いる手法⁴⁾などが研究されているが、放電衝撃震源は付帯設備が大きいこと、蒸気圧破砕材は起振力が小さいことなどからいずれの手法も現状では実用性に乏しいといえそうである。本研究は発破を用いない起振源として油圧インパクトに注目し、油圧インパクトを起振源とする切羽前方探査を埼玉県秩父郡の美の山トンネルにおいて計3回、TSPと併用して実施し、2つの異なる手法で得られた切羽前方探査結果と掘削実績の比較を行うことによって、本手法の有効性を検証した。

*正会員 修士(工学) (株)フジタ技術センター土木研究部

** (株)フジタ首都圏土木支店

***埼玉県皆野寄居バイパス建設事務所

****理学博士 (株)地球科学総合研究所

2. トンネル浅層反射法探査の概要

(1) 測定方法

トンネル浅層反射法探査（以下 S^2R -T（Shallow Seismic Reflection for Tunnel）と称す）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る。本手法は弾性波反射法であるため基本原理はTSP、HSPと同様であるが、大きな特徴として①起振源として油圧インパクトなどの非破壊起振源を利用する、②多起振点・多受振点で測定を実施する、③解析方法の自由度が高いなどが挙げられる。以下に S^2R -Tの測定方法の概要を述べる。

a) 油圧インパクト起振

油圧インパクトとは、ガス圧により加速されたピストンがシリンダー内を落下し地表面に車体重をかけて圧着されたベースプレートを押す一種の重錘落下起振源であり、打撃角度を変えることによりP波のほかS波の起振源としても使用が可能である。油圧インパクト起振の特徴としては、①非破壊起振であり地山を傷めない、②発破のような特別な使用許可申請を必要としない③自走式で機動性が高い、④P波とS波の両方を発生することができる、などが挙げられる。写真-1に油圧インパクトによる起振状況を示す。



写真-1 油圧インパクトによる起振状況

b) 測定配置

S^2R -Tは図-1に示すように、受振器を掘削底盤に一定間隔に配置し、受振器の近傍を油圧インパクトで順次起振していく多点起振・多点受振の測定配置を採用する。受振器はトンネル軸方向に100Hz上下動1成分受振器を、切羽側トンネル横断方向に10Hz3成分受振器をできるだけ広角度にデータを取得し反射面の到来方向を特定するために設置する。記録装置は観測車内に配置し、起振器と受振器に接続する。油圧インパクトへの起振信号は観測車より有線か無線で発信し、受振されたデータはA/D変換器を搭載するリモートステーションユニットに蓄積され、有線か無線で記録装置に送信される。本手法は起振・受振位置で削孔の必要がないため測定作業が簡便であり、作業時間は受振器設置、ケーブル配線、油圧インパクト起振、片付けを1日弱で可能である。なお、本手法は起振源として油圧インパクトのほか、油圧パイロサイス⁵⁾や発破を用いることも可能である。

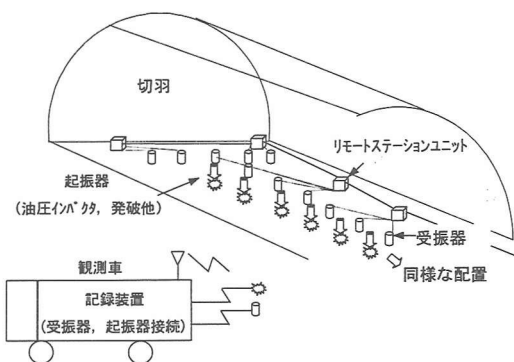


図-1 S^2R -Tの測定配置

(2) 解析方法

S^2R -Tの解析手順を以下のa)～c)に示す。a)は図-2に示す水平構造解析であり、b), c)は鉛直構造解析である。全体的な解析の流れとしては、図-3に示すようにa)により探査区間の直下の大局的な水平構造を把握し、b), c)双方の結果を総合的に判断して切羽前後の鉛直的な構造を推定する。

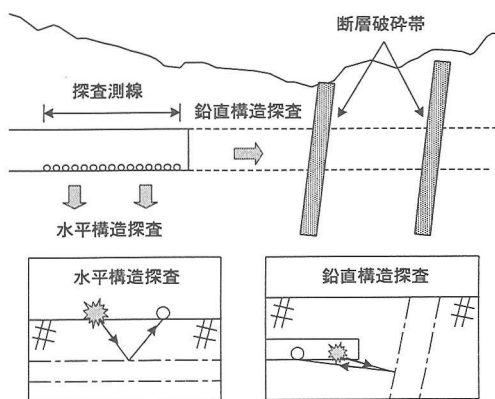


図-2 探査イメージ

a) 反射法通常処理によるトンネル直下の水平構造解析

本手法は通常地表で実施される地下構造解析と同様にCMP（共通反射点）重合法を用いている。図-3に示すようにデータ処理は①帯域通過フィルタ（低周波ノイズの除去）、②利得回復（球面発散や非弾性効果に伴う振幅の減衰補正）、③デコンボリューション（分解能向上と短周期多重反射ノイズの除去）、④CMP（起振点と受振点の midpoint を同一とする記録の集まり）データの作成、⑤NMO補正（共通反射点データを起振点で受振したと仮定して適切な時間補正値を与える）、⑥CMP重合、などの波動を強調させる処理を施し、トンネル直下の構造を反映した時間断面図を作成する。

b) 前方後方進行波強調処理による切羽前後の構造解析

探査測線の切羽前方および後方にトンネル軸方向と垂直な反射面を仮定した場合、図-4に示すようにCMPデータ内では反射波の走時は等しくなるため、これらの波形をそのまま重合することにより反射波が強調される。本解析がa)のデータ処理と異なる点はCMPデータの反射波の走時を等しくするためのNMO補正を行わないことである。そのため探査測線区間下方からの反射面は強調されず、切羽前方および後方からの反射波のみが強調されることになる。

c) VSP処理に準じた解析

処理手順は通常のVSP処理と同様で、直接波の走時分だけ時間をシフトさせることで直接波を水平に整列させ往復走時をあわせることで反射波を強調する。ただし、b)と同様に反射面はトンネル軸方向に直交すると仮定している。

a)~c)のいずれも解析結果は図-5に示すように時間断面図で表示される。図-5にVSP処理に準じた解析結果とそれより推定される切羽前方の反射面分布状況を示す。解析波形の黒塗り部はインピーダンスが小から大に、白塗り部は大から小に変化する反射面からの反射波である。同一反射面からの反射波を観測した場合、各受振点での到達時間は図中点線のような傾斜をもつ直線状となり、この傾斜は探査測線区間内の平均的弾性波速度と一致するはずである。よって、本手法では切羽側の受振点で傾斜を持つ直線状に並ぶ反射波を抽出する。これらの最も切羽側の受振点における反射波到達時間と初動から求められた探査測線区間内の平均的弾性波速度（図では $V_p=4\text{km/s}$ を使用）の積から切羽前方での反射面出現位置を推定する。なお、反射面の評価方法は第3章に後述するが反射面の分布状況より、「反射面が多い区間」と「反射面がない（少ない）区間」と評価する。

S^2R -Tの解析はb)の前方後方強調処理により切羽前方

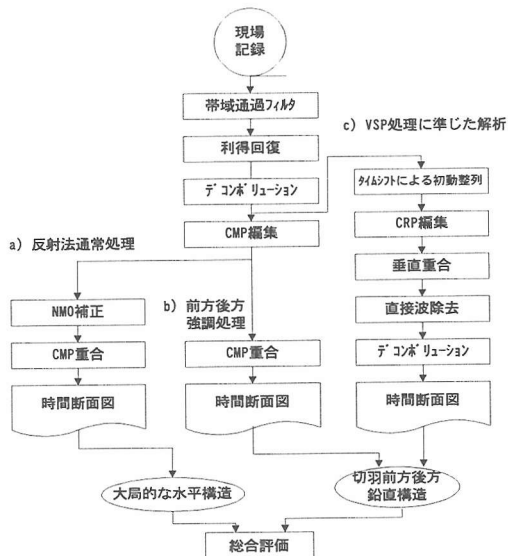


図-3 S^2R -Tにおける解析手順

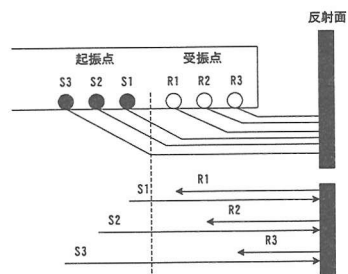


図-4 垂直な面からの反射波とCMPデータの概念図

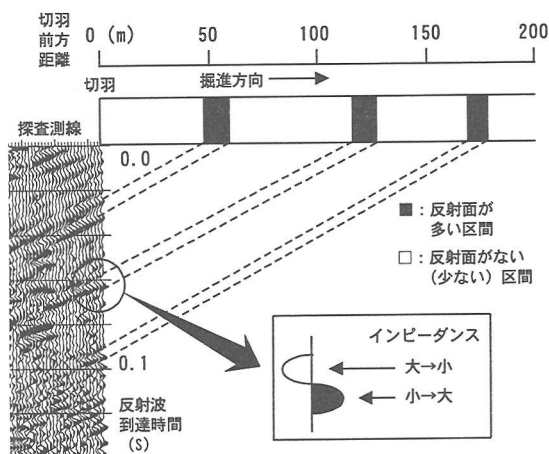


図-5 VSP処理に準じた解析
(解析結果と反射面の評価)

と既掘削区間とを対比することができ、既掘削区間の地山観察実績から切羽前方をより適切に予測することができる。また、TSPでは土被りが薄い場合、測定ハードとソフト上の制約から地表面からの反射波と切羽前方からの反射波を区別することが難しく、土被り以上の切羽前方における探査結果の解釈が難しくなる⁶⁾。しかしながら、本来そういった低土被り区間や坑口部などが施工上問題となることが多く前方探査の必要性が高いといえる。S²R-Tは解析自由度が高く、地表面からの反射と思われる波を除去して解析処理することができるため、探査深度・精度は土被りに左右され難い。

(3)他手法との比較

S²R-TとTSP、HSPとの比較を表-1に示す。なお、表-1には第3章で述べる現場実験で得られた結果についても併記する。以下にS²R-Tの利点を述べる。

- 起振源は発破に限定されない
- 多受振点・多起振点で測定を実施
- 穿孔の必要がないので測定作業が容易
- 前方と同時に後方の評価も可能
- 探査深度・精度は土被りに左右され難い
- 探査深度が深い（第3章後述）

3. 現場適用実験

(1)探査トンネルと実験目的

S²R-Tによる切羽前方探査実験は、埼玉県秩父郡皆野町に位置する美の山トンネル木毛工区（一般国道140号皆野寄居バイパス、トンネル全長L=1,614mのうち皆野側L=702m）で実施した。トンネル地質は、三波川変成岩類に属する黑色片岩（Bs）と緑色片岩（Gs）およびその互層を主体とし、トンネルほぼ中間付近に褶曲軸（向斜軸）が、地表からの弾性波屈折法により幅数10m（最大幅約200mで向斜軸周辺に想定）と規模の大きな弾性波低速度帯が数ヶ所に発達することが想定されていた。これらの褶曲構造と低速度帯（断層破碎帯相当）の発達は、三波川結晶片岩類が受けた造構造運動の履歴を反映していると考えられ、トンネル周辺の地盤が破碎され脆弱化していることが危惧され、事前に切羽前方地山を予測し設計・施工に迅速に反映することが望まれていた。そこで、本トンネルにおいて断層破碎帯の出現が予測される箇所において本手法を実施し、その適用性を検証した。本実験における主な目的を以下に示す。

- ①適用性の検証、②測定配置の検証、③データ処理方法の検証、④異なる起振（油圧インパクト起振と発破起振）を用いた探査結果の比較、⑤TSP（発破起振）との探査結果の比較

(2)探査実施方法

美の山トンネルにおいて実施した切羽前方探査は計3箇所で

表-1 切羽前方探査法の比較

比較項目		S ² R-T	TSP	HSP
機材	起振	重	軽	軽
	受振	多	少	多
起振源		油圧インパクト 発破 油圧パイプライズ	発破	発破
受振器		1成分 3成分	2成分	2成分 (3成分)
測定配置	起振	多起振点 (掘削底盤)	多起振点 (側壁)	少起振点 (側壁)
	受振	多受振点 (掘削底盤)	2点 (側壁)	多受振点 (側壁)
削孔の必要性		無 (発破の場合:有)	有	有
測定作業		1日	前日半日 当日半日	1日
解析作業		2～3日 (EWS)	半日～1日	2～3日
解析方法		VSP 前方後方強調 水平構造	VSP	VSP
探査深度		インパクト起振: 100～150m 発破起振: 150～300m	100～150m	100～150m

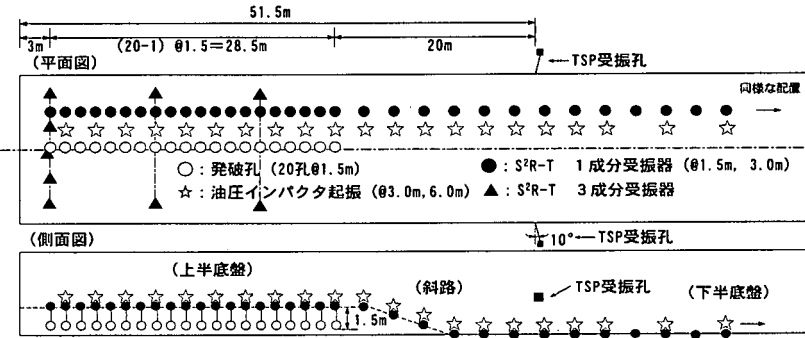


図-6 第3回探査測定配置

ある。いずれの探査もS²R-T とTSPを併用、起振源は発破と油圧インパクトを使用した。測定配置は最適な配置を模索するために第1回探査から第3回探査にかけて起振点間隔、起振点数、受振点間隔、受振点数の仕様に若干の変更を試みた。なお、図-6に示した第3回探査の測定配置がS²R-Tの標準的な測定配置と考えている。測定は掘削底盤中央部に受振器を約100個トンネル軸方向に1.5mあるいは3.0m間隔で設置し、油圧インパクトの起振点は受振測線に平行に約1m離れた位置に3.0mあるいは6.0m間隔で配置した。油圧インパクト起振は探査精度の向上と探査深度を深くする目的で同一箇所数回打撃するスタッキングを行う。

(3) 探査結果と掘削実績との比較

a) 探査結果

S²R-Tの探査結果例として図-7に第2回探査油圧インパクト起振の探査結果を示す。図より反射波到達時間0～0.01秒付近、0.03～0.05秒付近に明瞭な反射波を確認することができる。これらの反射波到達時間を第2回探査の探査測線区間内の平均的弾性波速度V_p=4.0km/sで切羽前方距離に換算すると、反射面が多い区間として、①切羽前方0～25m、②切羽前方65～100mという結果が得られる。このように各探査結果も同様の解析を実施し、反射面を良好に検出することができた。このことから本手法により切羽前方の反射面分布状況を充分把握できることが実証されたと思われる。探査深度は表-2に示すように、S²R-Tは発破起振の場合、TSPと比較して探査深度が深く、油圧インパクト起振でもTSPと同等の探査深度を得ることができた。S²R-Tにおいては第1回探査から第3回探査にかけて、受振間隔、測線長等を変更したが、探査深度・精度においては明確な違いはみられない。各手法で第1回探査での探査深度が極端に浅いのは後述するように反射波の伝播した区間のほとんどが断層破碎帯であり弾性波の減衰が著しかったためだと考えられる。

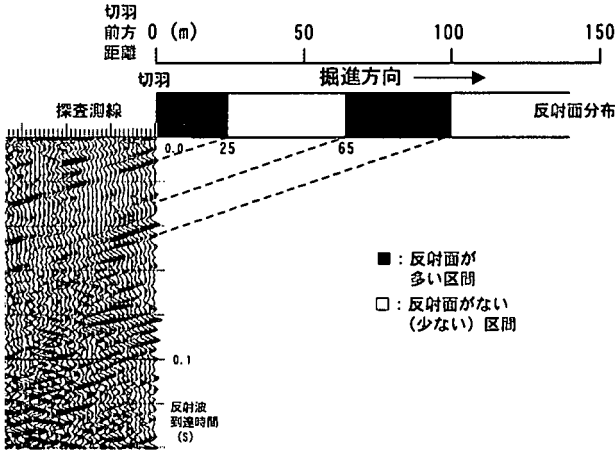


図-7 S²R-T 油圧インパクト起振
解析結果例（第2回探査）

表-2 探査深度

	S ² R-T 油圧インパクト	S ² R-T 発破	TSP
第1回	80m	140m	70m
第2回	140m	240m	160m
第3回	130m	300m	130m

b) 評価方法

通常、TSPでは個々の反射面を地質変化面として推定する場合と、「反射面が集中する区間」と「反射面がない（少ない）区間」という反射面の分布状況により評価を実施する場合がある⁷⁾。後者の場合、「反射面が集中する区間」を著しい地山変化、すなわち破碎帯と考え施工上課題となる区間と想定し、「反射面がない（少ない）区間」は岩質が一様で安定した区間と想定する場合が多い。S²R-Tでは後者の反射面の分布状況での評価方法を採用した。これは各々の地質変化点を面的にとらえることも重要であるが、断層破碎帯などの地山脆弱部の領域を事前に予測するほうがさらに施工的に重要であると考えたからである。一方、本トンネルでは第1回探査後に大規模な断層破碎帯に遭遇し、「反射面がない（少ない）区間」が大きな地山の変状を伴う施工上課題の多い区間であることが判明した⁸⁾。そこで「反射面が集中する区間」を結晶片岩の片理面が比較的良好に確認される（源岩の構造を残している）クラッキーゾーン、「反射面がない（少ない）区間」を結晶片岩が均一に破碎・粘土化された（源岩構造が著しく破碎）されたゾーンと考え、第1回探査による地山評価の見直しを実施した。第2回探査、第3回探査も同様の評価方法を採用した。

c) 探査結果と掘削実績との比較

図-8～10に第1回から第3回の探査区間における事前調査結果、探査結果、計測結果、切羽観察結果など

を総合的に示す。また、補助工法として実施したウレタン注入（天端、切羽等）の注入量も併記する。探査結果は「反射面が多い区間」と「反射面がない（少ない）区間」に区分して、手法の異なる探査結果をそれぞれ示す。

S²R-T（油圧インパクト起振）とS²R-T（発破起振）で部分的に評価が異なる箇所がみられるものの、それぞれの探査結果は断層破碎帯、小断層、褶曲軸の位置および岩種区分とおおむね調和的である。図-9より、起振源による探査精度の違いとして、S²R-T（油圧インパクト起振）は切羽前方約100m程度まで、S²R-T（発破起振）は切羽前方100m以深の精度が高いことがわかる。

S²R-TとTSPの探査結果を比較すると、図-8のNo.471+0～10m付近や図-10のNo.448付近のように各手法ともほぼ同一の評価が得られた区間では断層入口や岩種区分等とよく一致する。ただしこれらはいずれも比較的切羽側の区間であり、切羽から遠方になるとあまり一致していない。これは、反射面の出現位置を算出する際に用いる地山弾性波速度の違い、反射波の抽出方法による違い等が考えられ、S²R-T、TSPいずれの手法とも探査精度の向上をはかる上で解析方法、評価方法を検討していく必要があると思われる。本地山は小規模な褶曲断層が多数発生し、大規模な断層破碎帯が数箇所で見られ、トンネル掘削に伴い大きな地山変形や切羽の自立性が不良な箇所がみられた。切羽前方探査と掘削実績から図-11に示すように、本地山は「反射面のない（少ない）区間」が均一に破碎・粘土化され、変

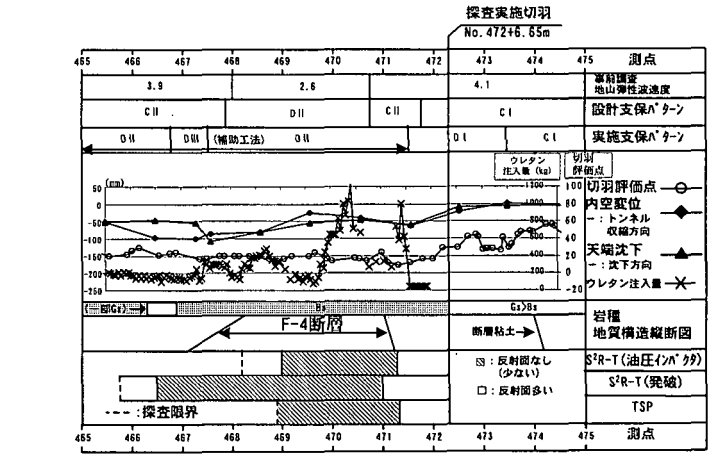


図-8 第1回探査結果と掘削実績との比較

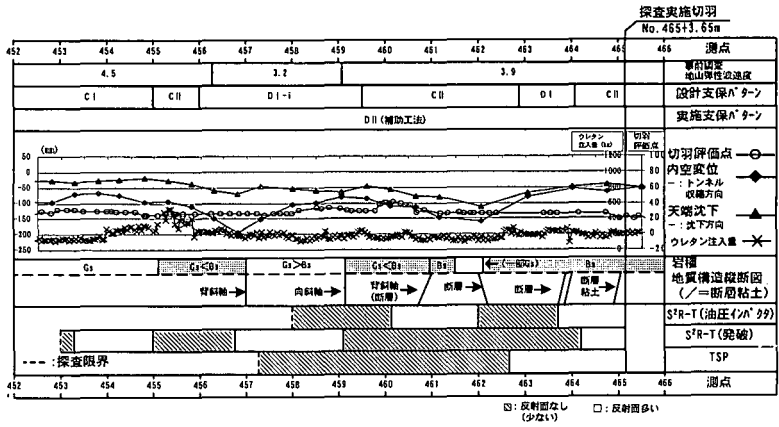


図-9 第2回探査結果と掘削実績との比較

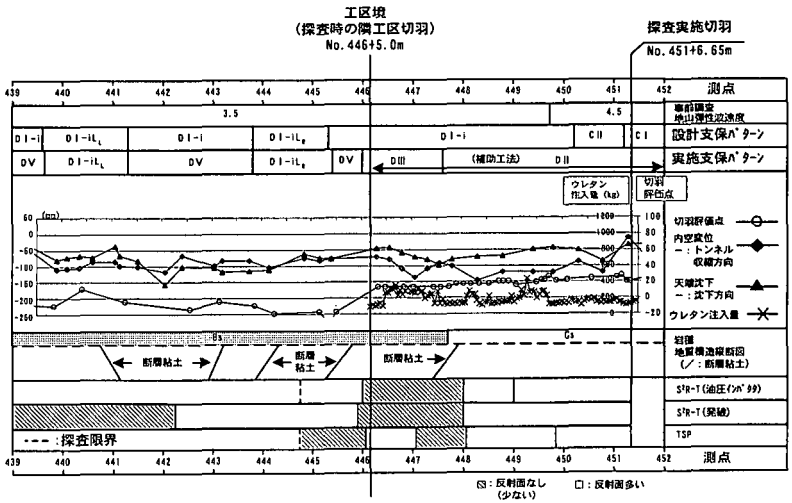


図-10 第3回探査結果と掘削実績との比較

形が大きく施工上最も重要な課題となった区間であり、「反射面が多い区間」は破碎されているが相対的に施工上の課題が少ない区間であることが明らかになり、第1回探査の結果を踏まえ、第2回、第3回探査ではこのような地山特性を本手法により事前に把握することが可能であったと考えられる。

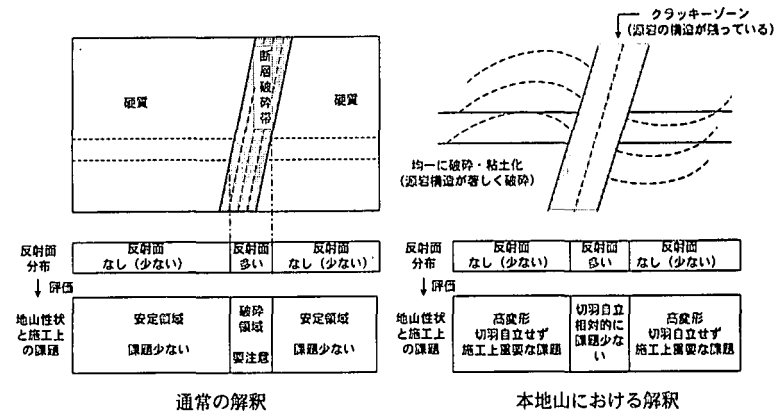


図-11 反射面分布状況と地山性状の対比

4. おわりに

本稿では、新しいトンネル切羽前方探査手法として、トンネル浅層反射法（S²R-T）を開発し、その適用性を検証した。本手法は起振源を発破に限定しないこと、低土被り区間や坑口部でも精度よく探査可能なことを開発目標としている。

現場適用によりS²R-TとTSPの各探査結果と掘削実績との比較を行った結果、数箇所において各手法で同様の位置に反射面を推定でき、S²R-Tの探査結果と断層や褶曲軸の位置、あるいは岩種区分などはおおむね調和的であったことからS²R-Tはトンネル切羽前方探査法として十分な適用性があることが実証された。

S²R-Tは現状では使用機材が多いため記録装置や測定方法の改良等で機材の簡素化を検討する必要がある、現状では手作業で実施している反射面の分布状況の評価を一連の解析作業の中で定量的に評価する解析システムを構築する必要がある。また、現状のS²R-T、TSPともにP波を用いた解析であり切羽前方の相対的弾性波反射面の相違（弾性波インピーダンスの相違）から地山の相対的変化を推定しているにすぎない。油圧インパクトはS波も起振可能なためS波とP波を使用することにより地山の性状をより詳細に評価することが今後期待できる。

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) 今井博，川上純，荒井浩成，井上鉄也，佐々木加津也：放電衝撃のトンネル前方反射法弾性波探査への適用実験（2），第53回土木学会年次講演会Ⅲ-A，pp.824-825，1998.
- 4) 加藤卓朗，村山秀幸，野間達也，土屋敏郎，坂田拓司：蒸気圧破碎材を起振源としたTSP法（坑内弾性波反射法）測定実験，第55回土木学会年次講演会Ⅲ-B048，2000.
- 5) 例えば，佐々宏一，芦田譲，菅野強：建設・防災技術者のための物理探査，森北出版株式会社，pp.66-68，1993.
- 6) 越野洋一，山本浩之，笠博義，宇津木慎司，工藤繁樹：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，pp.2251-2252，1996.
- 7) 明石健，山下雅之，石山宏二，稲葉力：TSP法による切羽前方地質推定についての基礎的検討，第51回土木学会年次講演会Ⅲ-A，734-735，1996.
- 8) 村山秀幸，加藤卓朗，中村繁明，柳内俊雄，他田文孝：結晶片岩トンネルにおける切羽前方弾性波反射法探査と地山特性について，第54回土木学会年次講演会Ⅲ-B，pp.88-89，1999.