

発破を用いないトンネル切羽前方地質 探査法 (SSRT)

加藤卓朗・村山秀幸・清水信之

従来から、トンネル施工時に切羽前方の地質状況を予測する手法として弾性波反射法が適用されつつあるが、発破を起振源とするため、施工条件によって適用に制限があった。そこで、筆者らは発破を用いないトンネル切羽前方地質探査法を開発した。本手法は受振器を掘削底盤に設置し、受振器近傍を油圧インパクトなどの非爆薬振源で順次起振する。本報文では、開発したトンネル浅層反射法探査 (SSRT) の概要と、起振源として使用する油圧インパクトについて述べるとともに、発破と油圧インパクトの二つの起振源を利用して実施した探査結果について報告する。

キーワード：トンネル、弾性波反射法、切羽前方探査、非爆薬振源、油圧インパクト

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。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¹⁾。

本報文では、トンネル浅層反射法探査

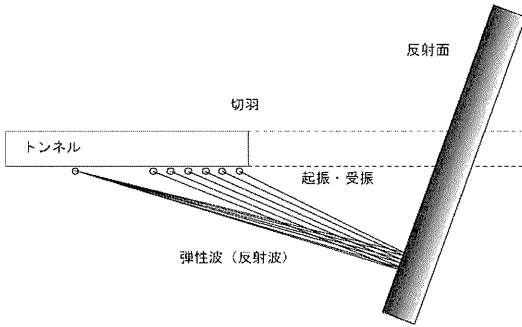
(SSRT) の概要と、起振源として使用する油圧インパクトについて述べるとともに、発破と油圧インパクトの二つの起振源を利用して実施した探査について報告する。

2. 弾性波反射法によるトンネル切羽前方探査

トンネル坑内において断層破碎帯や地質境界などを把握することを目的としたトンネル切羽前方探査のうち、比較的長距離の探査が可能な手法として、水平ボーリングや弾性波反射法探査などが挙げられる。

水平ボーリングは直接採取コアで評価できるため、確実性は高いが、切羽全体から見れば局所的な情報しか得られないことや、準備や削孔に時間を要し、費用も高額となるという欠点を有している。一方、弾性波反射法は、測定、解析ともに比較的迅速に実施でき、切羽前方の全体的な状況を把握することができるため、実施される機会が増えつつある。トンネル坑内弾性波反射法とは、ボーリング孔を利用した弾性波探査法であるVSP (Vertical Seismic Profiling) をトンネルに応用したものである。

本手法は図-1に示すようにトンネル坑内において、発破などにより弾性波を岩盤内に伝播させ、トンネル切羽前方およびトンネル周辺に存在する弾性波速度の境界面で反射した弾性波（反射波）を同じくトンネル坑内に設置した受振器により受



図一1 弾性波反射法の探査イメージ

振し、地質状況、特に断層破碎帯の位置や規模を把握する探査法である。

トンネル坑内弾性波反射法には主なものとしてTSP²⁾（スイス・アンベルグ社製）とトンネルHSP³⁾（旧建設省土木研究所と民間数社が共同開発）が挙げられる。SSRTも原理的にはTSPやHSPと同様にVSPを応用した手法であるが、TSP、HSPがともに起振源が発破に限定されるのに対し、SSRTは非爆薬振源が利用可能であることが特徴である。受振器、測定配置および解析手法などは各手法で多少異なり、その相違点が各手法の特徴となっている。

SSRTとTSP、HSPとの比較を表一に示す。

表一1 切羽前方探査法の比較

比較項目	SSRT	TSP	HSP
機材	起振 受振	重 多	軽 少
起振源	・油圧インパクト ・発破 ・バイブロサイス	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 受振	多起振点 (掘削底盤) 多受振点 (掘削底盤)	多起振点 (側壁) 2点 (側壁) 少起振点 (側壁) 多受振点 (側壁)
削孔の必要性	無 (発破では必要)	有	有
測定	1日	前日半日 当日半日	1日
解析	1~2日	半日~1日	1~2日
解析方法	・VSP ・水平構造 ・トモグラフィ	VSP	VSP
探査深度	インパクト起振： 100~200m 発破起振： 150~300m	100~ 150m	100~ 150m

3. トンネル浅層反射法探査 (SSRT) の概要

(1) 概要

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を応用したものである。SSRTの特徴としては、

- ① 起振源に非爆薬の油圧インパクトやバイブ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していること（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地表における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、図一2に示すように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—地表面間の弾性波トモグラフィ解析などを総合的に実施し、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、筆者らは、トンネル坑内に加えて地表からの探査を併用する手法を坑口付近や低土被り区間などに適用し、本手法の有効性を検証している⁴⁾。

(2) 測定方法

SSRTは図一3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など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、最も切羽側のトンネル横断方向に10Hz3成分受振器を設置する。3成分受振器はできるだけ広角度にデータを取得し反射面の到来

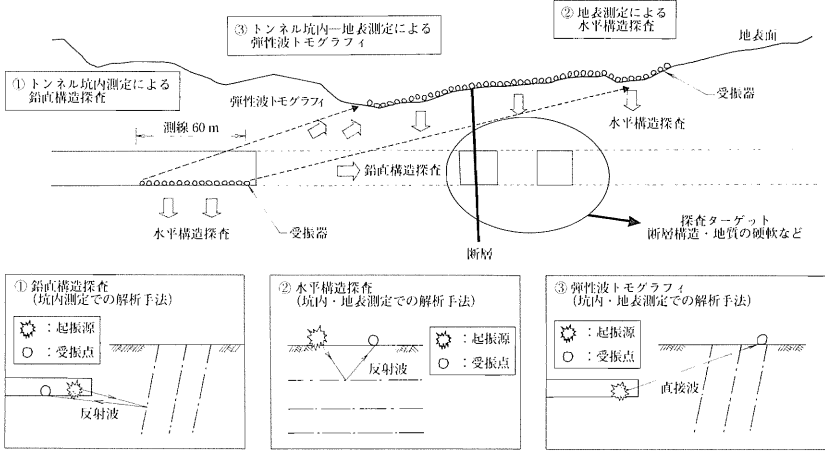


図-2 SSRTの実施手法概念図

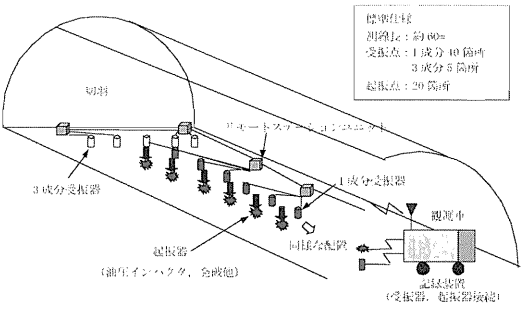


図-3 測定配置

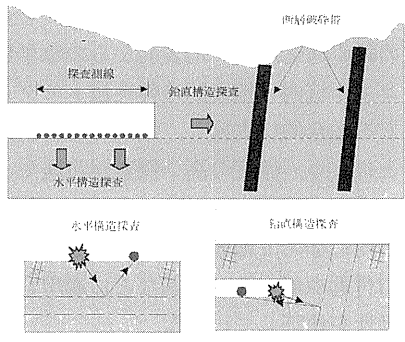


図-4 SSRTの解析イメージ

方向を特定するためにこのような配置としている。
 坑内における標準的な測定では、1成分受振器40点、3成分受振器5点、起振点20点を測線長約60m区間に配置する。受振器はA/D変換器を搭載したリモートステーションユニットを介し、有線にて記録装置に接続する。データ取得仕様は、サンプル間隔1.0ms、記録長1s(1,000ポイント)である。本手法は発破孔、受振孔を削孔する

必要がないため測定が簡便であり、作業時間は受振器設置、ケーブル配線、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ターやパイプサイズ³⁾のような非爆薬振源のほか、発破を用いることも可能である。

(3) 解析方法

解析方法は図-4に示すように、CMP (Common Mid-Point) 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する。データ処理フローを図-5に示す。

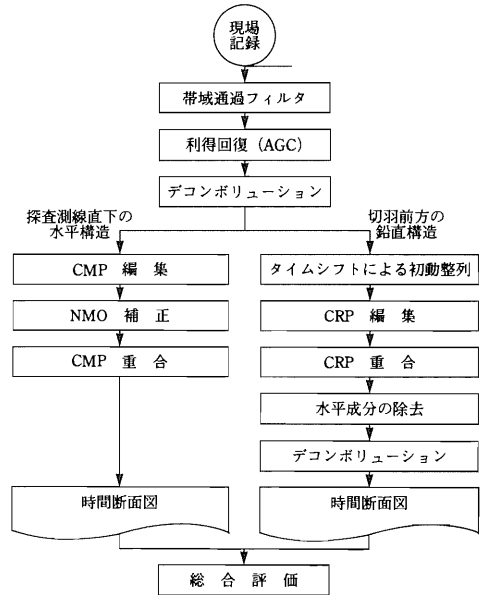


図-5 データ処理フロー

データ処理は前処理として、
 ・帯域通過フィルタ (低周波ノイズの除去),
 ・利得回復 (球面発散や非弾性効果に伴う振幅の減衰補正),

- ・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）、
- を実施する。このデータに
- ・CMP（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、
 - ・NMO 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值を与える）、
 - ・CMP 重合、
- などを施すと水平構造が強調され、一方、
- ・タイムシフトによる初動整列、
 - ・CRP（各受振点毎の記録の集まり）データの作成、
 - ・CRP 重合、
 - ・水平成分の除去（切羽前方以外からの反射波の除去）、
 - ・デコンボリューション、

などを施すと切羽前方の鉛直構造が強調される。

図-6 に切羽前方の鉛直構造の解析結果例を示す。反射面の評価方法は反射面の分布状況より、「反射面が多い区間」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、「反射面が少ない区間」は岩質が一様で安定した区間と想定する。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 V_p 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

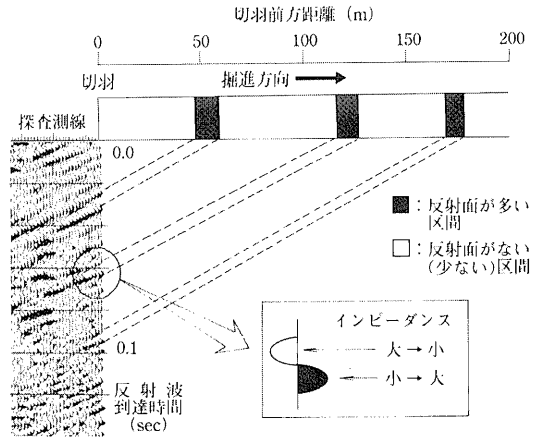


図-6 切羽前方の鉛直構造解析（解析結果と反射面の評価）

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。

4. 油圧インパクトの概要

SSRT では非爆薬振源として油圧インパクトを使用している。油圧インパクトとは、地下資源の調査などで実施される弾性波反射法に使用される非爆薬振源であり、特に比較的浅い探査深度（地下約 1 km 程度）を機動性よく経済的に探査するために開発された振源である⁶⁾。油圧インパクトの概念図を図-7 に示す。

油圧インパクトは、油圧制御器によりシリンダ内のピストンを押し下げ、これを電子制御器により電磁式バルブを介して落下させる。このとき圧縮されたシリンダ上部にあるボンベ内の窒素ガスがシリンダの落下を加速させる。加速され落下したシリンダは地面に設置されたプレートに衝突し弾性波を発生する。プレートにはセンサが取り付けられており衝突の際パルスが発生し、これは電子制御器により整形され記録器側に送られ記録器との同期に使われる。

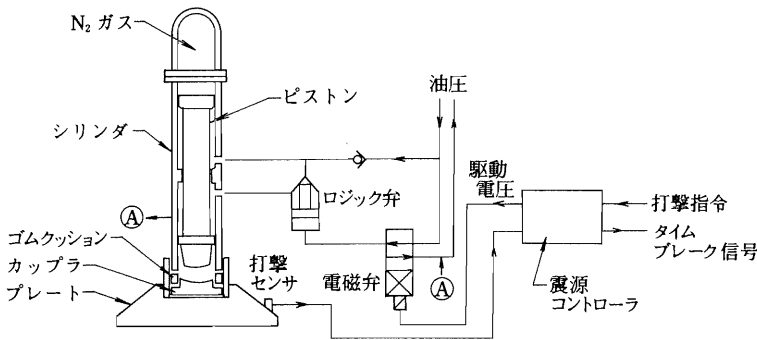


図-7 油圧インパクトの概念図

現在 SSRT で使用している油圧インパクトは、写真—1 に示す CJM-MINI 65（地球科学総合研究所と千葉大学理学部との共同開発）であり⁷⁾、インパクト本体、登載用クローラ車、インパクト制御器から構成される。この油圧インパクトの主な仕様を表—2 に示す。



写真—1 油圧インパクトによる起振状況

表—2 油圧インパクト主要仕様

仕様 Model	CJM-MINI 65
全長 (m)	2.48
全高 (m)	2.20
全幅 (m)	1.00
総重量 (kg)	1,200
インパクト本体ロッド重量 (kg)	64
打撃方向 P波	鉛直
打撃方向 S波	左右 30度
打撃エネルギー (J) (ピストン下死点室薬ガス圧力 6 kg/m ² 時)	2,000
能力 (1点当り打撃回数は標準 10回) 探查深度(m)地表地質条件により探查深度は異なる	
VSP P波	1,000
VSP S波	500
反射法 P波	500
反射法 S波	300
打撃・繰返し能力 (秒/回)	5

油圧インパクトの特徴として以下が挙げられる。

- 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く、狭い道路などでも使用可能。
- ④ P波とS波の両方を発生することができる。
- ⑤ 起振繰返し能力に優れている。

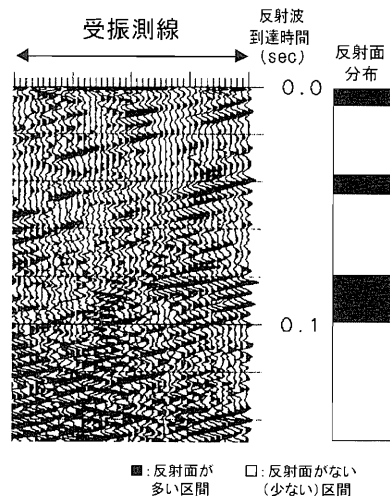
5. 現場実証実験

SSRTの有効性を実証するために、発破と油圧インパクトの二つの起振源を用いて探查を実施した。油圧インパクトによる起振は、掘削底盤を打撃し、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查深度の向上を図った。発破による起振は、掘削底盤から鉛直下向きに 1.5 m 穿孔し、含水爆薬 50 g/孔と瞬発電気雷管を使用した。なお、装薬時のタンピングとして水を使用した。

作業性について両起振源を比較すると、それぞれの起振源で 20 点起振するのに要した時間は、発破起振が削孔約 2 時間、発破約 1.5 時間であったのに対し、油圧インパクト起振は削孔の必要が無く、起振が約 1 時間であった。よって油圧インパクトの方が起振作業を短縮でき、削孔機を必要としないためより簡便な起振源であるといえる。

図—8 に油圧インパクト起振データ、図—9 に発破起振データの切羽前方探查結果を示す。図中に示すように両起振源とも明瞭な反射波を確認することができる。

油圧インパクト起振と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、それぞれの探查結果は掘削時の切羽観察や計測データから得られた断層破碎帯、小断層、褶曲軸の位置および岩種



図—8 油圧インパクト起振解析結果

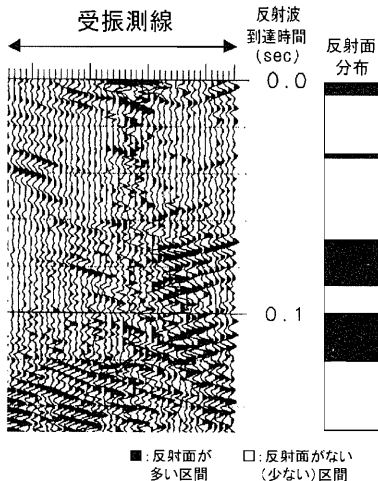


図-9 発破起振解析結果

区分とおおむね調和的であった。

起振源による違いとして、これまでの数箇所のトンネルでの探査実績から以下を確認している。

- ① 探査深度は油圧インパクト起振で 100～200m、発破起振で 150 m～300 m 程度である。
- ② 油圧インパクト起振は切羽前方約 100 m 程度まで、発破起振は 100 m 以深の探査精度が高い。

6. おわりに

本報文では非爆薬振源を用いたトンネル施工時の切羽前方探査手法として開発したトンネル浅層反射法探査 (SSRT) および起振源として使用している油圧インパクトについて概要を報告した。SSRT はこれまでの探査実績よりトンネル切羽前方探査手法として十分適用可能であることが示されている。SSRT は非爆薬振源を利用するため、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も容易に探査可能であり、軟弱な地山においても探査可能であると考えられ、様々な地山条件においての適用が期待される。

今後も本手法の特徴を活かし、測定方法・解析方法を検討し、探査精度の向上を目指していきたいと考えている。

J C M A

《参考文献》

- 1) 加藤卓朗, ほか: 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)
- 2) 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)
- 3) 稲崎富士, ほか: 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)
- 4) 加藤卓朗, ほか: 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) 例えば, 物理探査学会, 物理探査ハンドブック, pp. 28-33 (1998)
- 6) 井川 猛, ほか: 油圧インパクトによる地下探査, 建設の機械化, 477 号, pp. 53-57 (1989)
- 7) 井川 猛, ほか: 小型油圧インパクト震源 CJM-MINI 65 の研究試作について, 物理探査学会第 91 回学術講演会 (1994)

【筆者紹介】



加藤 卓朗 (かとう たくろう)
株式会社フジタ
技術センター
土木研究部
主任



村山 秀幸 (むらやま ひでゆき)
株式会社フジタ
技術センター
土木研究部
主任研究員



清水 信之 (しみず のぶゆき)
株式会社地球科学総合研究所
営業部
次長