

## トンネル掘削発破を震源とする連続的な切羽前方探査の開発と適用

村山 秀幸 丹羽 廣海

### 概 要

筆者らは、山岳トンネルの施工時に切羽前方地質を予測する手法としてトンネル浅層反射法探査(Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels:以下 SSRT と称す)の開発を進めてきた。本手法では、発破以外の機械震源として油圧インパクトやパイプレータを使用できる。また通常の坑内における切羽前方探査に加え、トンネル掘削以前に坑外からトンネル縦断方向に地山を探査することができ、様々な施工条件におけるトンネル切羽前方探査ニーズに対応できる汎用性が高い手法である。

一方、発破掘削トンネルにおけるSSRTの応用技術として、掘削サイクルで用いる段発発破を震源に活用する連続SSRT(Seismic While Excavating using SSRT)の開発を進めてきた。連続SSRTでは、探査用に震源を準備する必要がなく掘削サイクルに影響を与えずに連続的に切羽前方を探査することができる。前報<sup>1)</sup>では、連続SSRTの基本課題を整理し現場での検証実験に関して報告した。連続SSRTでは坑内および坑外に振動記録装置を配置し、一日数回実施する掘削発破の振動を連続的に記録することを特徴としている。よって、坑外と坑内の振動記録装置における内部時計が正確に一致している必要があるが、坑内ではGPS信号を受信できないので時計の同期方法が課題となる。本稿では、坑内記録装置の内部時計を坑内でGPS信号光伝送装置を用いて同期させる手法と、坑外でGPS信号に同期させた高精度のルビジウム刻時装置を坑内に携行・常設し連続的に探査する手法を開発し、それぞれ現場において実用化実験を実施した結果について報告する。

### Development and application of the shallow seismic reflection survey ahead of tunnel face using tunnel excavation blasting as the seismic source

#### Abstract

The authors have developed a Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels (SSRT) to evaluate geological features ahead of a tunnel face under construction. In general, the seismic survey of a tunnel excavation requires careful arrangement of seismic sources and sensors, which causes interruption of tunnel excavation work. However by using the excavation blasting itself as the seismic survey source, it becomes possible not to continuously evaluate the geological features ahead of tunnel face. We called this method Seismic While Excavating using SSRT (SWE-SSRT).

This paper describes the development and application for SWE-SSRT survey on the several case of the tunnel under construction.

キーワード: 切羽前方探査 反射法弾性波  
探査 掘削発破 時計同期

## §1. はじめに

### 1.1 研究背景

トンネルは線状構造物であり、調査・設計段階で得られる地質情報は種々の制約から限定された情報とならざるを得ず、施工段階において設計や施工法を地山条件に合わせて合理的に修正することが工事の安全性と経済性を確保する上で求められている。山岳トンネルの事前地質調査としては、ボーリング調査でコアを採取し直接地質を確認する手法や地山の弾性波速度と速度構造を把握するための間接的な手法として屈折法弾性波探査などが実施されている。

ボーリング調査は、直接地質を確認できること、鉛直から水平方向まで穿孔できることなどから汎用的に利用され信頼性も高い。しかしながら、削孔延長が長くなると大きな設備が必要となりそれに伴い高額となること、現地の地形条件に左右されること、限定的な情報しか得られないこと等から、トンネル路線全体を網羅する調査としては課題がある。

屈折法弾性波探査は、地山分類の指標となる地山弾性波速度が得られるので多用されているが、適用に際してはいくつかの注意すべき課題も多い<sup>2)</sup>。例えば、探査深度は発破震源でも 100～200m 程度が限界となること、地盤深部ほど弾性波速度が速くなる層状の速度構造を仮定して解析することから、火山岩地域などで中間に低速度層が分布するとそれ以深が探査不能となること、断層などの鉛直方向の地質構造を捕らえられないことなどを挙げることができる。

最近、施工中に実施する切羽前方探査が各種示方書<sup>3)</sup>や技術指針<sup>4)</sup>に記載され、設計段階における限定的な地質情報を施工時に補完しようとする適用事例<sup>5)</sup>が増えてきた。一般に、施工時の探査では各種測定機器が坑内を占有するためにトンネル掘削サイクルに影響を与えることになる。

一方、発破掘削のトンネルでは、常時起爆力の大きな発破を用いており、この発破振動を活用できれば特別に探査震源を準備する必要がなく、連続的に切羽前方を探査することができるのでトンネル掘削サイクルに影響を与えることはない。ここで、石油やガスなどの坑井内で掘削中に探査する手法を SWD(Seismic While Drilling)と呼んでいることから、トンネルにおいて掘削発破を震源に活用する探査手法を連続 SSRT(Seismic While Excavation using SSRT : SWE-SSRT)と称することとした。

本稿では、従来から山岳トンネルの切羽前方探査として開発を進めてきた SSRT の応用技術として、まず、掘削発破を震源とする連続 SSRT の技術課題と対処方法について述べ、次に新たに開発した専用探査装置の概要を紹介する。最後に、開発した専用探査装置を用いた連続 SSRT を 3 箇所のトンネル現場に適用した事例について報告し、得られた成果を検証する。

### 1.2 既往研究

トンネル施工中に掘削発破を用いた探査事例としては、篠原ら<sup>6)~8)</sup>の報告があり、次のような提案である。トンネル延長上の地表面に複数の受振器と記録装置を配置し、坑内には発破点火器に発破時刻を記録する装置を設置する。これらの記録装置は、共に GPS 信号によって時刻同期することが可能で 1ms(ミリ秒)程度の精度を確保して発破時刻と地山を伝播した弾性波を記録する。この測定結果から、弾性波トモグラフィ手法を用いて切羽前方を予測する。

本提案は坑内に発破時刻の記録装置しかなく、探査装置が坑内を占有しないので掘削サイクルに影響を与えない。発破振動は切羽進行で数 10m～数 100m 毎に取得しているが、連続的な発破記録ではない。その理由は、地表では GPS 信号が受信できるが、坑内では GPS 信号を受信できないからと推測できる。すなわち、一般的な記録装置の内部時計精度を勘案すれば、GPS 信号が受信できない坑内に数 10 時間放置すると 1ms 程度の精度を確保できない。よって、篠原らは発破直前に坑外で GPS 信号に同期させた記録装置を坑内に持ち込み探査精度を確保したと推測できる。

上記の発破時刻取得作業は、煩雑で手間がかかり安全性にも課題があり実用性がない。よって、連続的に発破振動を取得して切羽前方探査を実施するためには、坑内と坑外に設置する振動記録装置の時刻校正が重要となる。

## §2. 連続 SSRT の開発

### 2.1 連続 SSRT 概要

図 1 に通常の SSRT における測定機器の配置と連続 SSRT における配置を比較して示す。図より、通常の SSRT では発震と受振点が同一箇所であり、探査用に受振器等を配置し探査用の震源(発破等)を準備する必要がある。連続 SSRT は発震と受振点が異なり、受振器と記録装置を坑内作業で支障とならない箇所に常設し、掘削発破毎に振動データを取得する。一方、通常の SSRT ではデータ取得後 1 日程度で解析結果が得られ即時性が高いが、連続 SSRT では、掘削発破を 1 日に数回しか使用しないので、20 発破程度(1 週間～10 日前後)の振動データを蓄積してから順次解析する。

一方、坑内で実施する VSP 処理に基づく切羽前方探査(TSP、HSP、SSRT)では、得られた反射面の位置(距離)同定を探査測線位置で得られた地山弾性波速度を参考として算出している。しかしながら、坑内の探査測線位置と切羽前方地山の弾性波速度は必ずしも一致しない。そこで、連続 SSRT において、坑外に受振器と記録装置を配置し常時掘削発破データ記録を取得すれば、坑内で実施する VSP 処理における位置同定を実測値によって換算でき探査精度を向上させる効果が期待できる。

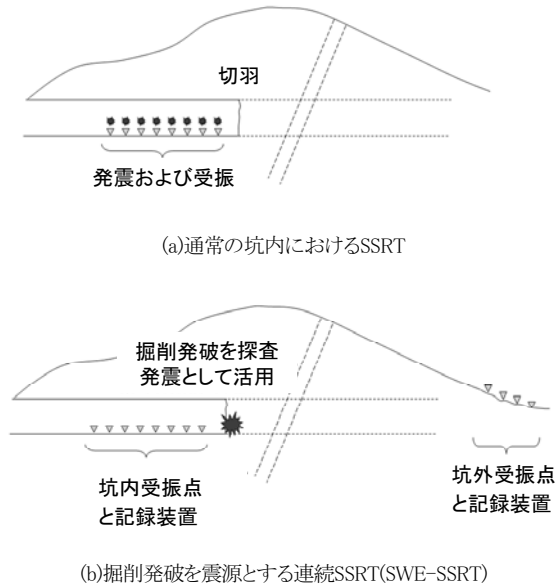


図1 通常のSSRTと連続SSRTにおける探査装置の配置

## 2.2 連続 SSRT の成立性における基本課題の検証

前報<sup>1)</sup>で報告した連続SSRTの成立性における基本課題とその検証に関する要約を以下に述べる。

### 1)10段程度の段発発破で前方探査が可能であること

DS(デシ秒)雷管の段間時間は、一般に1段目(瞬発)から9段目までが数10msの誤差で250msとなるよう加工されている。そこでこの段間時間と測線位置を検証するために切羽から150m程度離れた位置で段発発破を計測した。

図2に、通常の段発発破と2段目の雷管を使用しなかった段飛ばし発破における走時波形を示す。図より、瞬発雷管を1段目として使用すれば2段目以降の波が到達するまでには少なくとも200ms程度の時間差が発生することがわかる。この時間差200msは、弾性波速度4.0km/sの地山で往復走時を考慮した反射波が切羽前方400mから戻ってくる時間に相当し、切羽後方150m程度に測線を配置しても十分な探査距離を確保できることが明らかとなった。

一方、トンネルで使用する通常の瞬発雷管は通電から起爆まで3ms以下の誤差で加工されている。SSRTでは受振器からのアナログデータを1ms毎に記録しているので3msの誤差は致命的となる。探査用に市販されている雷管は0.1ms以下に加工されていることから、探査用雷管と通常の瞬発雷管での時間誤差に対する比較実験を実施した<sup>9)</sup>。その結果から、通常の瞬発雷管でも時間誤差は1ms以下であることがわかり、段発発破において瞬発雷管を用いた記録によって切羽前方予測が可能であることが検証された。

### 2)探査機器を常時坑内に配置できること

掘削発破作業では飛石等に対する安全確保から切羽から100m～150m付近に退避可能な点火小屋を配置し、発破器を用いて点火する。さらに発破後は、坑内からずりを搬出

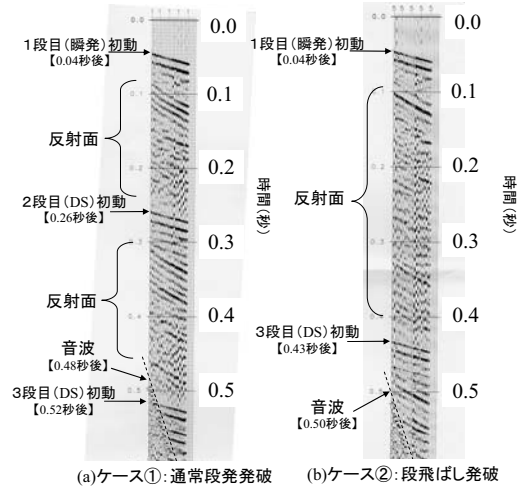


図2 通常の段発発破と段飛ばし発破の走時波形



図3 側壁脚部への受振器の設置状況

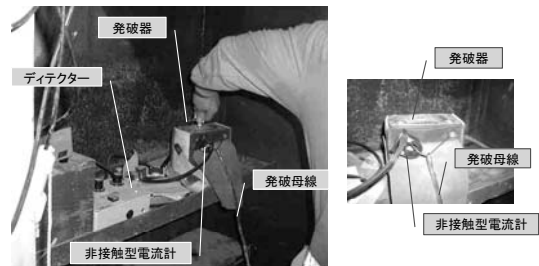


図4 発破信号検出装置

するため受振器の配置場所は限定される。そこで図3に示すように、切羽から150m付近の側壁脚部に3m間隔で20点の受振器(ジオフォン)を配置した。記録装置は坑外に設置しGPS信号で内部時計を常時校正した。この測線配置で連続的に切羽での発破記録を取得し解析を実施した。その結果を、あらかじめ坑内で実施していた通常のSSRTの反射記録と比較して十分な精度を確保できることを確認した。

### 3)掘削発破の起爆時刻を正確に記録すること

一般に、弾性波探査で発破震源を用いる場合、起爆信号を得るために専用の発破器(通電と同時にパルス信号を記録装置に伝播)を用いる。TSPでは発破母線に分歧ボックスを設置し、通常の発破器から起爆信号を記録装置に取

り込めるように工夫されている。

連続SSRTでは通常の掘削サイクルで発破振動を記録するので、発破母線や発破器に特殊な改良を施すことはできない。そこで、非接触電流計を発破毎に発破母線を通して、起爆信号を検出する装置を開発した。図4に、開発した発破信号検出装置を示す。この検出装置から送信されるパルス信号をGPS信号で時刻校正された記録装置に伝播し、発破時刻を1ms以下の精度で記録することを可能とした。

4)発震となる掘削発破位置が発破毎に異なること

段発発破において瞬発雷管を使用する発破孔の位置は、発破毎に異なりしかも複数孔で起爆する。よって、得られた発破振動記録から初動時刻を算定し瞬発雷管が切羽センターで起爆したと仮定して初動走時を求め、複数の発破記録を用いて統計処理を施し初動時刻の誤差を補正した。その結果を、あらかじめ坑内で実施していた通常のSSRTの反射記録と比較して十分な精度を確保できることを確認した。

2.3 坑内記録装置の時刻同期装置の開発

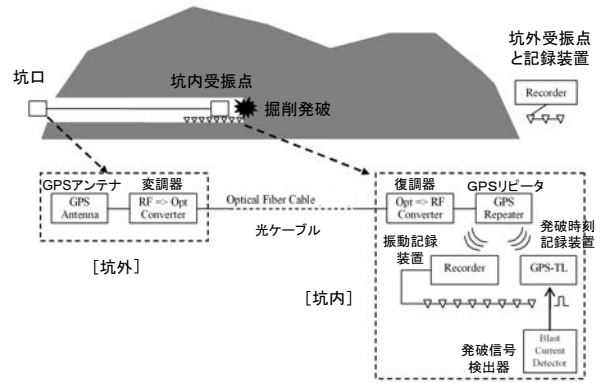
前述のように、坑内と坑外で同時に発破記録を取得する連続SSRTでは、各記録装置の内部時計精度を確保することが重要となる。そこで、比較的延長の短いトンネルでは有線方式として、坑外から光ケーブルでGPS信号を伝送する装置を開発し、延長が1,000mを超える比較的長いトンネルでは高精度のルビジウム時計を坑内に携行・常設する方式として、ルビジウム刻時装置と専用の振動記録装置を組み合わせたシステムを開発した。

両システム共に、坑内に併設されたLAN通信網を経由して事務所のパソコンに発破時刻が送信され、その時刻における発破振動記録をリモート操作で記録装置から回収する。坑外に設置される記録装置も同様である。

1)GPS 信号光伝送装置

GPS衛星から発信される刻時情報は1.5GHz帯(L1帯)で伝播されているが、この信号はトンネルなどの地下や屋内では受信できない。そこで、屋外にGPSアンテナを設置しGPS信号を有線で伝送し、屋内などに再放射する装置(以下GPSリピータと称す)が市販されている。しかしながら、GPS信号を再放射できる電界強度は電波法によって35μV/m以下に制限されており、信号の到達距離は環境条件によって異なるが20m程度が限界となる。よって、トンネル坑外にGPSアンテナを設置し、坑口から坑内にGPS信号を再放射する方式では到達距離が短すぎて実用性がない。

そこで、図5に示すようなGPS信号を変調・復調し光ケーブルを用いたGPS信号の伝送装置を開発した。本装置は、GPS信号を変調して光ケーブルで伝送するので信号減衰が少なく、外来電磁波ノイズに対する耐性も高いので数kmまでGPS信号の伝送が可能である。光ケーブルは同軸ケー



(a)GPS信号光伝送装置を用いた観測機器の配置



GPSアンテナと信号変調器

光ケーブルとドラム(180m/巻)

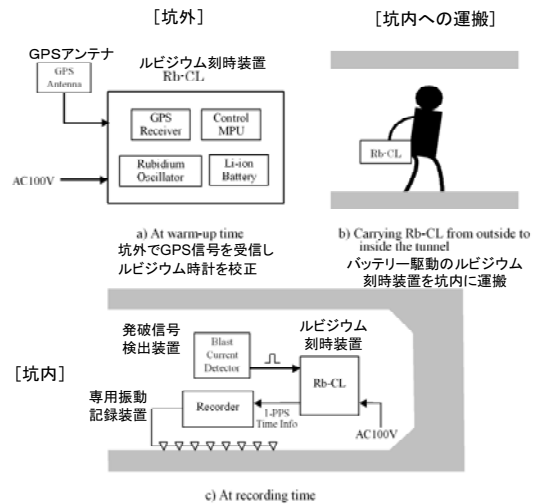


GPS信号復調器

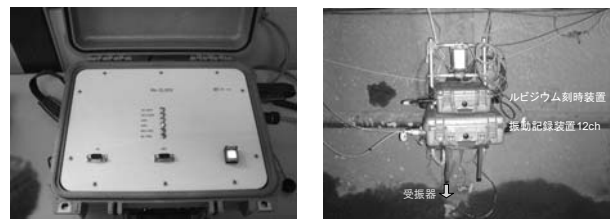
GPSリピータ

(b) GPS信号光伝送装置の主要機材

図5 GPS信号光伝送装置の概要



(a)ルビジウム刻時装置のGPS校正と坑内への運搬・設置



(b)校正中のルビジウム刻時装置

(c)坑内への各装置の設置状況

図6 ルビジウム刻時装置と専用振動記録装置の概要

表 1 連続 SSRT 適用現場の概要一覧

トンネル名称・延長 [路線名, 場所]	路線地質概要	探査目的	連続SSRT実施仕様
久礼坂トンネル, 延長927m [四国横断自動車道, 高知県中土佐町久礼]	四万十帯, 北側に下津井層(中世代白亜紀)の砂岩優勢互層や黒色頁岩優勢互層, 南側に久礼メランジェが分布し, 久礼メランジェは主に頁岩からなる.	下津井層と久礼メランジェの境界で想定されている断層位置とその性状の把握	GPS信号光伝送装置, 坑内記録装置(受振器6ch*2台), 坑外記録装置(受振器3ch)
古江トンネル南, 全長2,417mのうち南側1,347m [東九州道(県境～北川間), 宮崎県延岡市北浦町]	四万十帯, 北川層群(古代三紀)に属する粘板岩砂岩互層, 砂岩と諸塚層群(中生代白亜紀)に属する黒色千枚岩が分布し, 両層の境界を古江衝上断層と称する.	・低土被り区間の地質性状の把握 ・古江衝上断層の位置とその性状の把握	・GPS信号光伝送装置, 坑内記録装置(受振器6ch*2台) ・ルビジウム刻時装置と専用記録装置(受振器12ch), 坑外記録装置(受振器3ch)
野地トンネル, 延長1,019m [一般国道327号岩屋戸バイパス, 宮崎県東臼杵郡椎葉村]	四万十帯, 諸塚層群(中生代白亜紀)に属する頁岩, 砂岩およびその互層からなる.	路線数箇所想定される断層の位置とその性状の把握	ルビジウム刻時装置と専用記録装置(受振器12ch), 坑外記録装置(受振器3ch)

ブルより軽量で運搬・設置が容易であり、坑内での延長を考慮して180m巻きのドラムに収納した。なお、振動記録装置は、坑内と坑外において汎用器を使用するため復調したGPS信号をGPSリピータで坑内に再放射した。

本装置の光ケーブルは覆工コンクリートの打ち込みなどの坑内作業で切断されるリスクが高く、光ケーブルが断線すると容易には修復できず、ケーブル交換しか対処方法がないことが最大の欠点となる。よって、本装置は、延長が比較的短いトンネルに有効と考えている。

#### 2)ルビジウム刻時装置と専用振動記録装置

前述より、延長が長いトンネルでは有線式は課題が多い。そこで、原子時計に相当するルビジウム素子を用いた発破時刻の刻時装置と専用の振動記録装置を開発した。

図6に開発した装置の概要を示す。ルビジウム刻時装置は坑外でGPS信号とルビジウム時計を同期させ、バッテリー駆動の状態で坑内に搬入し精度を確保する。坑内に常設したルビジウム刻時装置は、掘削発破毎に発破信号検出器から起爆信号を受け取り、発破時刻を記録する。ルビジウム時計の誤差は1ヶ月で数 $\mu$ 秒(1/1,000,000秒)以下であるが、現場での運用としては、週末に坑外からルビジウム刻時装置を搬出し、事務所にてGPS信号で時計同期させ週明けに再度坑内へ運搬・常設することで、掘削発破を震源とする連続SSRTを可能とした。

振動記録装置は受振器12chの専用器として、ルビジウム刻時装置から時刻情報を受け取り、内部時計を常時坑内で校正しながら掘削発破の振動をトリガー機能で収録する。一方、本装置はGPSモジュールの入れ替えにより坑外でGPS信号を受信する汎用器としても使用できる。

開発したルビジウム刻時装置と振動記録装置は、高精度の時計を坑内に運搬・常設する方式であり断線する心配が少なく、延長が1,000mを超える長いトンネルに有利と考えている。また、本システムはGPS信号光伝送装置と比較して周辺機器が大幅に減少し簡素化が実現した。

### §3. 連続 SSRT の現場適用

#### 3.1 適用現場の概要

表1に、連続SSRTを適用した3つのトンネル現場の概要を示す。現場は全て道路トンネルであり、地質構造区分も四万十帯に属するが、地質年代と構成地質は異なる。

連続SSRTは、延長が927mと比較的短い久礼坂トンネルでGPS信号光伝送装置を用い、延長が1,000mを超える古江トンネル南では、GPS信号光伝送装置とルビジウム刻時装置と専用振動記録装置を併用した。野地トンネルではルビジウム刻時装置と専用振動記録装置を用いた。

久礼坂トンネルでの適用事例に関しては、既にその概要を報告<sup>10)</sup>したので、坑内発破記録に関しては古江トンネル南での適用事例、坑外発破記録に関しては野地トンネルでの適用事例を以下に述べる。

#### 3.2 坑内発破記録による切羽前方探査

図7に、古江トンネル南における地質縦断図と連続SSRTの探査目的とその位置を示す。低土被り区間では、大断面となる拡幅部が計画されており、この拡幅部を適切な地山に配置することを探査目的とした。古江衝上断層は、地質年代が若い地層が古い地層に衝上する断層であり、断層周辺で地山が脆弱化することが懸念されていた。

坑内探査では、100Hzジオフォン12chを受振器として用い、振動記録装置の測定間隔は1ms(1/1,000秒)とした。

##### 1)低土被り区間の探査結果と考察

本探査は、掘削初期段階の探査であったため掘削実績と探査結果の比較(後方反射面と掘削実績の対比)が不十分であったが、切羽前方で弱い反射面が分布する箇所が切羽で弱破砕部として出現したことから地山弾性波速度を3.5km/sとして前方を予測した。図8に予測結果を示す。

探査結果から、良好な地山に拡幅部を配置するためには約30m坑口側に移設することが適切と予測されたが、土被り2D以上を確保するために20m坑口側に移設した。そ

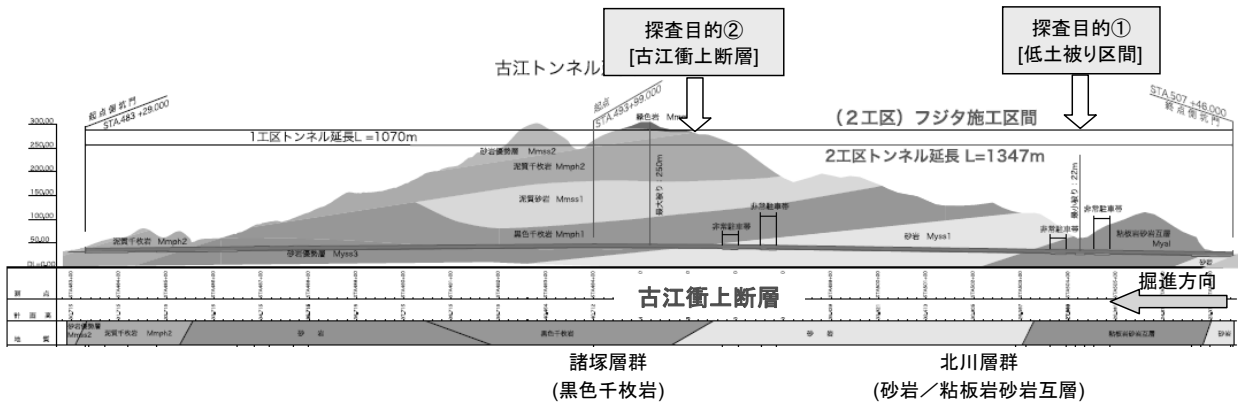


図7 古江トンネル南における地質縦断図と連続 SSRT 探査目的位置

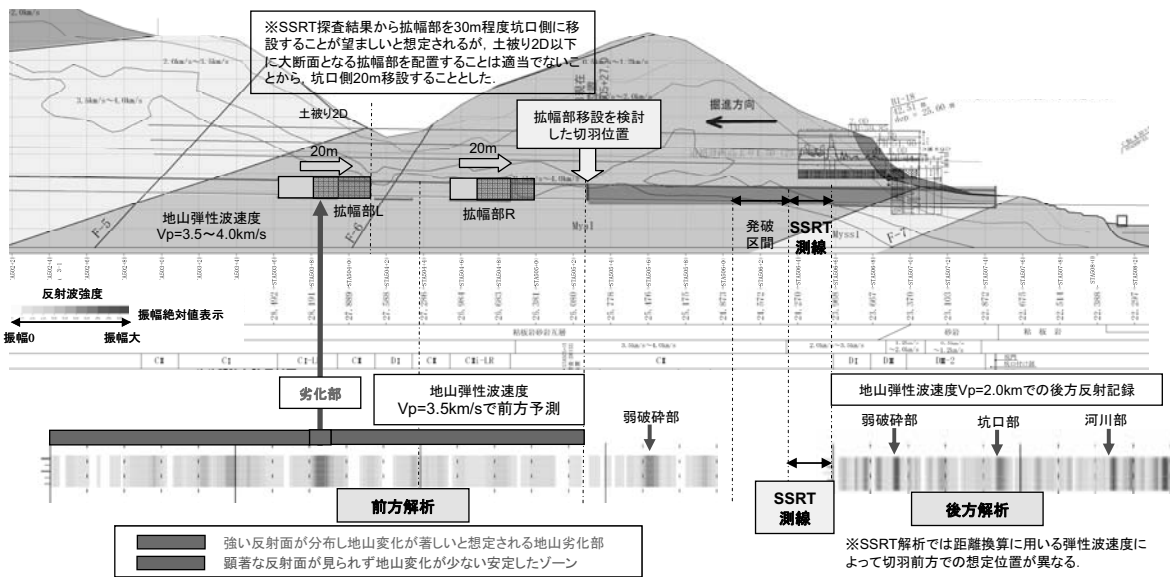


図8 古江トンネル南での低土被り区間における前方探査結果

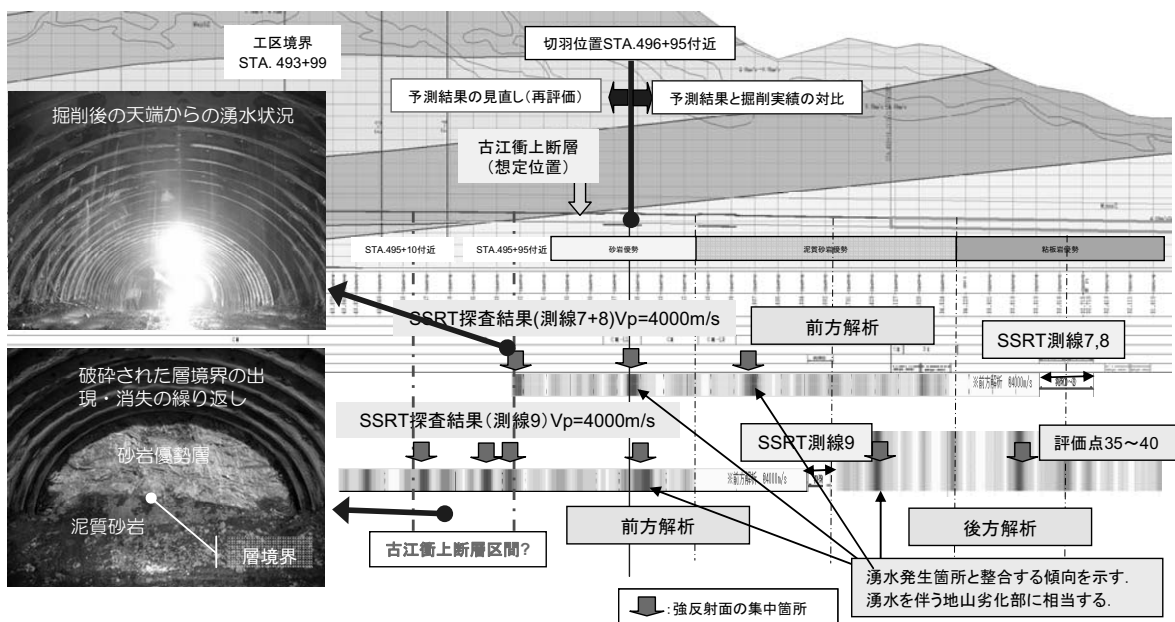


図9 古江トンネル南における古江衝上断層の探査結果

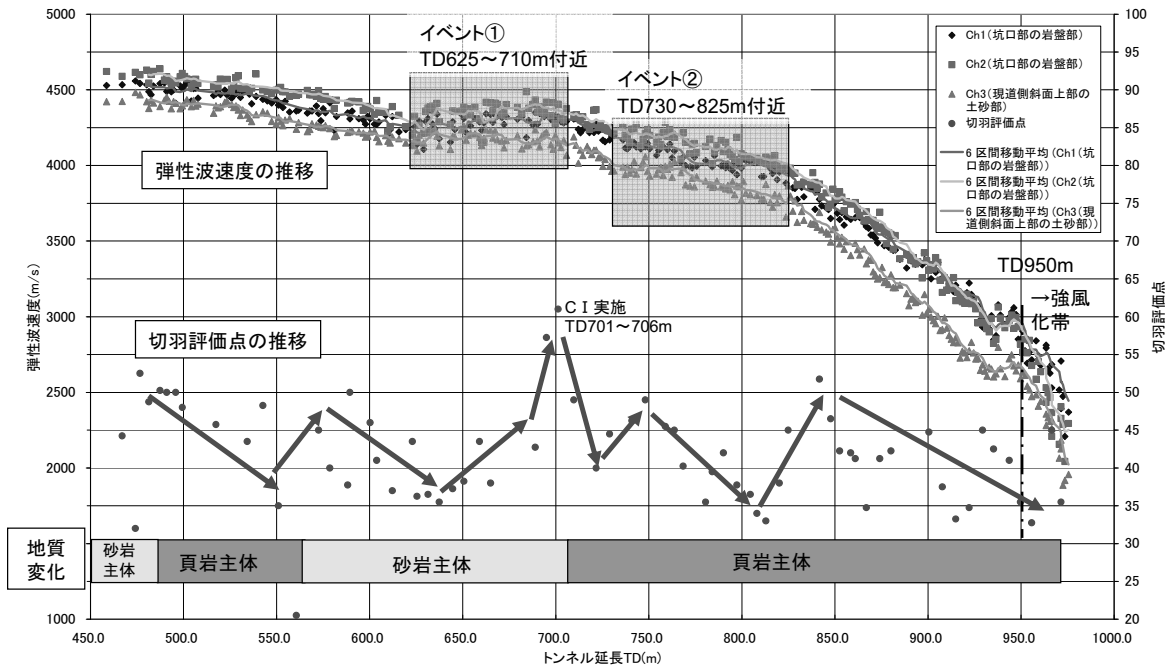


図 10 野地トンネルにおける出口側坑口付近での発破振動測定結果(初動読み取りによる弾性波速度の算出)

の結果、地山劣化部が拡幅部後半に一部出現したが支保パターンを変更せず施工できた。

以上から、連続 SSRT 探査結果を拡幅部の地山選定に活用しその有効性が示された。

#### 2)古江衝上断層付近の探査結果と考察

古江衝上断層に対しては、想定位置の手前から連続的に探査した。図9に、想定位置の手前 40m で既掘削実績予測結果を対比し、切羽前方予測の見直しを実施した結果を示す。それまでの既掘削区間は、全体的に反射面コントラストが低く、単発的に反射面が集中するためこれらの反射面集中位置を古江衝上断層と想定して掘進してきたが、この位置は概ね湧水を伴う地山劣化部に相当し断層に伴う地山脆弱部ではなかった。切羽前方約 100m には、既掘削区間とやや異なり連続的に反射面が集中する区間が分布し、この位置を古江衝上断層と想定し注意を喚起しながら掘進した。掘削結果から、この区間の切羽上段には砂岩優勢層、下段には泥質砂岩が分布し地層境界が破碎された状態で露出した。さらに、この地層境界は緩やかに傾斜し切羽から消失・出現を繰り返した。よって、SSRT で得られた連続的な反射面はこの地層境界の変化に相当すると考えられる。なお、結果的には古江衝上断層の本体に相当する地山脆弱部は工区境まで出現しなかった。

本工事では連続 SSRT により切羽前方を連続的に予測しながら掘進した。結果的には古江衝上断層に相当する地山脆弱部に遭遇しなかったが、探査結果から切羽地質の注意箇所を喚起しながら安全に掘進することができた。

#### 3.3 坑外受振記録

表 1 に示した全てのトンネルにおいて出口側坑口付近で発破振動を連続的に記録している。ここでは、最も多く連続発破の記録が得られた野地トンネルの事例を示す。

図 10 に、野地トンネルのほぼ中間地点となる延長 TD450m 付近から出口側坑口付近の 970m までの区間において、連続発破記録から得られた弾性波速度の変化を切羽評価点と地質変化と対比して示す。終点側坑口付近には 3 箇所を受振器を設置し、GPS 信号で常時時刻校正しながら記録装置に発破振動を連続的に記録した。連続発破数は約 310 発破であり、得られた記録の初動時刻を読み取り、坑内のルビジウム刻時装置で記録した発破時刻と照合し、弾性波が地山を伝播した時間差を算出し、発破切羽と受振点間距離から弾性波速度を求めた。

図 10 は、地山深部から地表に向かう弾性波速度の変化であり、この場合地山は徐々に風化の影響を受けるので弾性波速度は低下すると考えられる。図より弾性波速度の全体的傾向は右下がりの傾向を示し、切羽前方の平均的な地山弾性波速度を表していると考えてよいと言える。

図から、地山弾性波速度が上昇あるいは低下勾配が鈍化する区間として、イベント①(TD620~710m 付近)とイベント②(TD730~825m 付近)を抽出できる。イベント①は、頁岩と比較して弾性波速度が高いと考えられる砂岩区間での岩質変化を表しており、切羽評価点の推移と関連している。特に、TD701~706m 区間において本トンネルで最も硬質で亀裂の少ない砂岩が露出し、切羽評価点が 55 点

以上となった区間を境として弾性波速度は、低下傾向を示すようになる。この変化は、弾性波速度の高い地山を掘削し、切羽前方には全体としてそれより弾性波速度が低い地山しか残っていないことを示している。よって、弾性波速度の変化は切羽地質の硬軟変化と関連性があると言える。

イベント②はさほど顕著ではないが弾性波速度の低下傾向が鈍化する傾向があり、切羽評価点との対比から、この傾向は頁岩の硬軟変化を表していると考えられる。

一方、TD950m 付近から弾性波速度が急激に低下し、地山の強風化帯の分布とほぼ一致する。

さらに、この坑外で得られた弾性波速度を参照として、坑内で得られる発破振動記録における反射記録の位置同定に活用している。

#### §4. まとめ

本稿では、トンネル掘削サイクルで用いる段発発破を震源として活用する連続 SSRT について、本技術の成立性に関する基本的な要素実験の概要を述べると共に、坑内記録装置の時刻同期装置として、比較的トンネル延長の短いトンネル用に光ケーブルを用いて GPS 信号を坑内に伝播する装置と、延長が1,000mを超えるトンネル用に高精度のルビジウム刻時装置と専用の振動記録装置を組み合わせた装置を開発し、それぞれ現場に適用した事例について述べた。本稿より連続 SSRT は、記録装置に対する2種類の時刻方法を備えた手法として、様々なトンネルに適用可能であり実用化に至ったと考えている。

トンネル坑内は高温多湿であり、高精度の精密機器を常設する環境としては好ましくなく、電氣的トラブルが発生し易い。よって、連続 SSRT の今後の課題としては、更なる装置の簡素化や防水・防塵性能の向上、電磁波ノイズや電源ノイズに対する耐性の向上などを挙げることができる。

最後に、当然ながら SSRT は万能な調査手法でなく得手不得手がある。特に、地山の変化を絶対評価できないことが弱点であり、同原理の調査手法である TSP も同様である。よって、トンネル工事の合理化と経済性向上を目指すためには、事前調査段階から設計・施工に至る各段階において対費用効果を念頭に置き、各々の調査手法の利点を生かし欠点を補完することが有益となると考えられる。

**謝辞** 本研究は株式会社地球科学総合研究所との共同研究における成果であり、黒田徹氏、川部喜朗氏、渡辺義孝氏にご尽力を賜りました。新たな調査装置の開発に関しては、同社の保立正氏、塚原均氏に、解析処理に関しては、同社の野田克也氏、藤原明氏に多

大なるご協力を賜りました。また、連続 SSRT を適用した現場では、発注者ならびに現場職員の方々に格別のご配慮を頂きました。ここに関係各位に深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 村山秀幸, 渡辺正, 大野義範:トンネル掘削発破を用いた日常切羽前方探査システムの開発, フジタ技術研究報告, 第41号, pp.117-122, 2005.
- 2) 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.17~18, 2003.3.
- 3) 土木学会:2006年制定トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説, pp.23-25, 平成18年7月
- 4) 社団法人日本道路協会:道路トンネル観察・計測指針(平成21年改訂版), pp.69-80, 平成21年2月
- 5) 例えば, 丹羽廣海・村山秀幸・青山高明・黒田徹・東中基倫:トンネル全線における切羽前方探査の適用, 土木学会トンネル工学報告集, 第17巻, pp.75-82, 2007.11
- 6) 篠原茂, 小松敏宏, 森良弘:発破振動によるトンネル切羽前方の弾性波速度分布の予測, 土木学会第57回年次講演会概要集, pp.1332-1334, 2002.9.
- 7) 篠原茂:トンネルの事前調査および施工中における弾性波探査について, 土木学会第58回年次講演会概要集, pp.313-314, 2003.9.
- 8) 篠原茂, 塚本耕治, 浜田元:トモグラフィ的解析手法によるトンネル切羽前方の弾性波速度分布の予測, 土木学会トンネル工学報告集, 第14巻, pp.77-82, 2004.11
- 9) 村山秀幸, 末松幸人, 萩原正道, 間宮圭, 清水信之:異なる起振源を用いたトンネル切羽前方探査の比較実験について, 土木学会トンネル工学研究報告集, 第15巻, pp.227-234, 2005.12.
- 10) 村山秀幸, 丹羽廣海, 福田秀樹, 黒田徹, 東中基倫:トンネル掘削発破を震源とする連続的な切羽前方探査の適用, 土木学会トンネル工学研究報告集, 第19巻, pp.157-164, 2009.11.

#### ひとこと

SSRT は震源と測線配置を現場条件に合わせて様々に選択・設定できる VSP 反射法の総称であり、坑内探査から坑外へ、さらに掘削発破を震源とする探査へと進化してきた。トンネル現場技術者の関心事は地下水の有無とその量にあり、今後 S 波に注目した地下水探査にトライしたい。



村山 秀幸