

ルビジウム刻時装置を用いた連続的な 切羽前方探査の開発と適用

村山 秀幸¹・丹羽 廣海²・大野 義範³・押村 嘉人³・渡辺 義孝⁴

¹正会員 工博 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1)

E-mail:murayama@fujita.co.jp

²正会員 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1)

³(株)フジタ 九州支店 土木部 (〒812-8568 福岡市博多区博多駅中央街 8-36 博多ビル)

⁴株式会社地球科学総合研究所 (〒112-0012 東京都文京区大塚 1 丁目 5-21 茗溪ビルディング)

筆者らは、施工中の切羽前方探査であるトンネル浅層反射法探査 (Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels) 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)を開発し現場適用を進めている。連続SSRTでは、探査精度の向上を目的として坑内と坑外で連続的に発破振動を記録することを特徴としており、坑内と坑外に配置する振動記録装置の内部時計を常時何らかの基準時計に同期させ探査精度を確保することが重要課題となる。

本稿では、坑内に常設する振動記録装置の時計校正装置として新たにルビジウム素子を用いた刻時装置と専用の振動記録装置を開発し、現場適用によってその実用性を確認した事例について報告する。

Key Words : *geological prediction ahead of tunnel face, Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels(SSRT), excavation blasting, Seismic While Excavating(SWE),rubidium clock*

1. はじめに

筆者らは、弾性波反射法のVSP処理に基づく切羽前方探査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)を開発し現場適用を進めてきた^{9)~11)}。SSRTは震源として発破、パイプレータ、油圧インパクトを使用でき、TBMを含む機械掘削のトンネルにおいても容易に適用⁷⁾することができる。SSRTはこの特徴を生かし、通常の坑内における探査に加え、機械震源を用いて坑外から掘削以前に切羽前方を探査することも可能とした⁹⁾¹⁰⁾。

一方、起爆力の大きな掘削発破の振動を切羽前方探査に活用できれば、特に探査工程を設定しなくても、日常的かつ連続的に切羽前方を探査でき非常に有益となる。そこで、トンネルの掘削サイクルで用いる段発発破を震源とする探査手法を連続SSRT (Seismic While Excavating using SSRT:SWE-SSRT) と称し開発を進めている⁵⁾¹¹⁾。

連続SSRTでは探査精度の向上を目的として坑内と坑外で連続的に発破振動を記録することを特徴としており、坑内と坑外に設置する振動記録装置の内部時計の時刻校正が課題となる。前報¹¹⁾では、汎用的に時刻校正に用いられているGPS信号を、GPS信号が受信できない坑内に

伝送する手法として、光ケーブルを用いた伝送装置を開発し、現場適用によってその有効性を確認した事例について報告した。しかしながら、GPS信号光伝送装置は、光ケーブルの断線リスクが高く断線すると現場で容易には接続できないこと、信号変調器や増幅器等の関連周辺機器が多いこと等が課題となった。

本稿では、坑内に常設する振動記録装置の時計校正装置として原子時計に相当するルビジウム素子を用いた刻時装置と専用の振動記録装置を開発し、現場適用によって本装置を実用化した事例について報告する。ルビジウム刻時装置による連続SSRTを適用した現場は、東九州道 (県境～北川間) 古江トンネル南新設工事 (宮崎県延岡市熊野江地先) および、国道327号野地トンネル工事 (宮崎県東臼杵郡椎葉村大字松尾) である。

2. SSRTの概要と連続SSRTの技術成立性

(1) SSRTの概要

SSRTとは弾性波反射法のVSP処理をトンネル切羽前方探査に応用した手法であり、その基本原理は従来技術のTSP、HSP¹²⁾と相違ない。しかしながら、SSRTは、TSPの

ように坑内において震源となる探査用発破や受振器等を定められた配置とする必要がなく、様々な施工条件、例えばトンネルの平面線形や掘削方式（発破・機械）を勘案して最適な震源、測線配置（受振点と発震点の位置関係）および解析手法（VSP処理、トモグラフィ等）を選定できることが特徴である。よって、SSRTは汎用性が高く、トンネル線形が曲線であっても測線配置の工夫によって探査することができ、坑内で発震し坑外で受振する等の特殊な測線配置で探査することも可能である³⁹⁾。すなわち、この汎用性の高さからSSRTでは、通常の坑内における前方探査以外に、坑外からの探査や掘削発破を震源とする探査の開発が可能となる。

図-1に、探査装置の配置の相違によるSSRTの分類を示す。図に示すように、SSRTは震源と受振器の配置から大きく3つに分類することができる。発震と受振点を同一箇所でも坑内に配置する手法を通常SSRT、坑外に配置する手法を坑外SSRT、震源に掘削発破を活用する手法を連続SSRTと称して区分している。通常SSRTは震源として発破、機械震源が選定可能であり、坑外SSRTは機械震源を基本とする。連続SSRTは掘削方式が発破（爆薬）である現場に適用が限定される。

SSRTにおいて測線上の多点振動記録からVSP処理によって得られる切羽前方の反射記録は、地山の弾性波速度を用いて位置同定を実施している。よって、図-1に示したように坑外に受振器を配置し常時振動を記録すれば、切羽前方の反射面位置の同定を実測値で換算することができ探査精度を向上させる効果が期待できる。そこで連続SSRTでは、坑外に受振器を配置し常時連続的に発破振動を記録することを標準としており、通常SSRTや坑外SSRTにおいても探査時に坑外に受振器を設置し震源振動を記録することが望ましいと考えている。

(2) 連続SSRTの技術成立性に関する概要

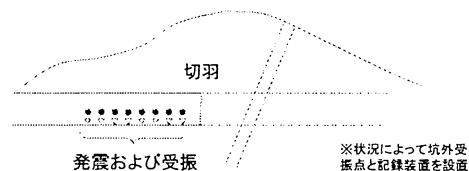
既報³¹⁾において、掘削発破を震源とする連続SSRTの技術成立性に関してその詳細を述べたが、以下にその概要を述べる。

①掘削発破は10段程度の段発発破であるがこの記録から前方探査が可能であること

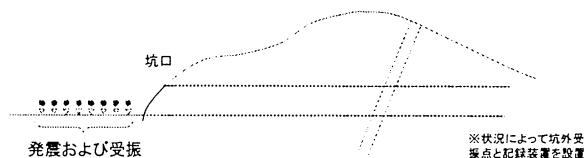
- ・連続SSRTでは、DS（デシセコンド）雷管における瞬発から2段目までの段間時間約250ms（ミリ秒：1/1,000秒）において切羽前方地山からの反射波を抽出する。

- ・段間時間250msは地山弾性波速度4.0km/sの地山で前方500mの距離に相当するが、受振器を切羽後方100～150m程度に配置すること、発破による切羽進行等を考慮すれば、有効探査深度は切羽前方300m程度となる。

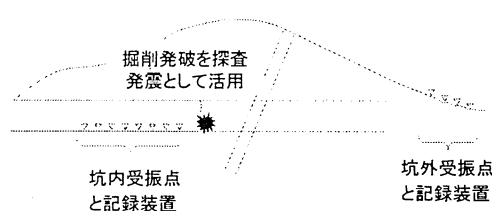
- ・瞬発雷管（通電から起爆まで3ms以内に加工）と探査用雷管（同0.1ms以内に加工）を用いた比較実験から



(a) 通常SSRT：発震と受振点を同一箇所でも坑内に配置



(b) 坑外SSRT：発震と受振点を同一箇所でも坑外に配置



(c) 連続SSRT：掘削発破を震源として受振点を坑内と坑外に配置

図-1 探査装置の配置の相違によるSSRTの分類

通常の瞬発雷管を用いて探査精度上問題ない。

②探査機器を常時坑内に配置できること

- ・切羽から100m～150m付近の側壁脚部に受振器12ch～24ch（固有周波数100Hzジオフォン）を常設して、発破振動を連続的に記録することが可能である。

③掘削発破の起爆時刻を正確に記録すること

- ・点火器に接続する発破母線に、非接触の電流計を接続して発破信号を検出する装置を開発した。

- ・発破信号検出器から起爆時に得られるパルス信号をGPS信号に同期した刻時装置に伝送し発破時刻を有効数値1μs（マイクロ秒：1/1,000,000秒）で記録する。なお、振動記録装置の測定間隔は0.5～1msである。

④通常のSSRTでは発震と受振位置がほぼ一致するが、発震となる掘削発破位置が発破毎に異なること

- ・複数の発破振動記録から初動時刻を読み取り、瞬発雷管が切羽センターで起爆したと仮定して受振点と震源との距離を算出し走時曲線を求める。

- ・この走時曲線から、統計的に初動時刻を補正してVPS処理を実施する。

3. 坑内振動記録装置の時刻校正装置の開発

(1) GPS信号光伝送装置

前報¹¹⁾で報告したGPS信号光伝送装置の概要を述べる。

GPS衛星から発信される時刻情報は1.5GHz帯(L1帯)で伝播されているが、この信号は透過性が低く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、屋内などで再放射する装置（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も異なるが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、坑口から坑内に向かってGPS信号を再放射する無線方式では到達距離が短すぎて実用性がない。

そこで、図-2に示すようなGPS信号を変調・復調し光ケーブルを用いて伝送する装置を開発した。本装置は、GPS信号を変調して光ケーブルで伝送することから信号減衰が少なく、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リピータで坑内で再放射する方式を採用した。

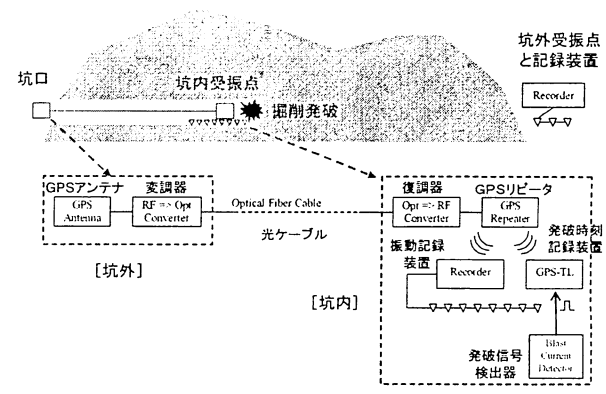
本装置における光ケーブルは、坑内作業で切断されるリスクが高く、光ケーブルが断線すると容易には現場で修復できず、ケーブルをドラム毎に交換するしか対処方法がないことが最大の欠点となる。

(2) ルビジウム時刻装置と専用振動記録装置

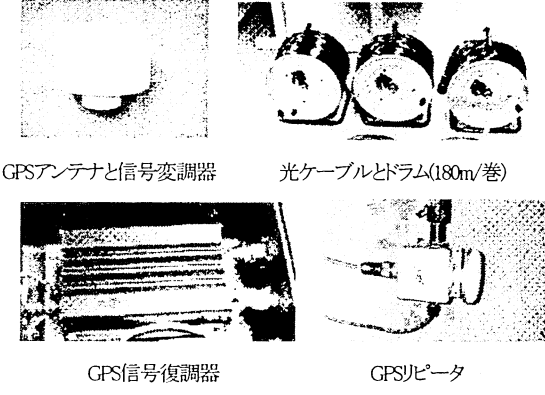
GPS 信号光伝送装置は有線式であり断線に対する課題がある。そこで、坑内に適時携行し常設可能な高精度時計として、原子時計に相当するルビジウム素子を用いた発破時刻の時刻装置と専用の振動記録装置を開発した。

図-3 に、開発したルビジウム時刻装置と専用振動記録装置の概要を示す。ルビジウム時刻装置は、坑外で数時間 GPS 信号と同期させルビジウム時計を校正する。その後、ルビジウム時刻装置をバッテリー駆動状態で坑内に携行し、切羽後方 150m 付近の側壁部に常設する。ルビジウム時刻装置は、専用振動記録装置（受振器 12ch）に常時時刻信号を送信し、振動記録装置は内部時計を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。さらに、掘削発破毎に発破信号検出器から起爆信号を受け取り、発破時刻を有効数値 1μs で記録する。

ルビジウム時刻装置の時刻誤差は坑内に数ヶ月間常設しても数μsも発生しない。しかしながら、現場での運用方法としては、週末に坑外へルビジウム時刻装置を搬出し、事務所でGPS信号を受信し時計校正を実施する。そして週明けに再度坑内へ携行・常設することとし、掘削サイクルにおける発破を連続的に記録することとした。

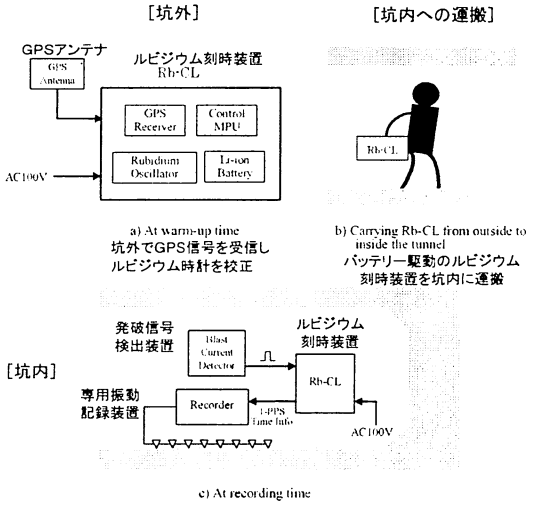


(a) GPS信号光伝送装置を用いた観測機器の配置

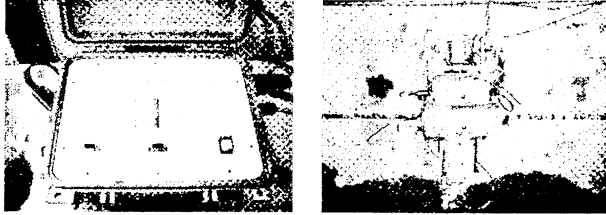


(b) GPS信号光伝送装置の主要機材

図-2 GPS信号光伝送装置の概要



(a) ルビジウム時刻装置のGPS校正と坑内への運搬・設置



(b) 校正中のルビジウム時刻装置 (c) 坑内への各装置の設置状況

図-3 ルビジウム時刻装置と専用振動記録装置の概要

表-1 振動記録装置の内部時計校正装置の比較

時計校正方式	GPS信号光伝送装置	ルビジウム刻時装置と専用振動記録装置
関連機器	GPSアンテナ, 変調器, 光ケーブルドラム, 復調器, GPSリピータ, GPS刻時装置, 汎用記録装置他	ルビジウム刻時装置, 専用振動記録装置他
利点	・GPS信号で時刻校正する汎用機器を記録装置として用いることができる。	・断線のリスクがない。 ・関連機器が少なく、軽量である。
欠点	・光ケーブルが断線するリスクが高く、断線すると現場で容易に修理できない（ケーブル交換が必要）。 ・関連機器が多い。	・精密機器であり、周辺の電磁波ノイズや電源ノイズに対する対策が必要となる。 ・専用の振動記録装置が必要となる。
摘要	延長が500m程度の比較的短いトンネルに有利である。	延長が1,000m以上の比較的長いトンネルに有利である。

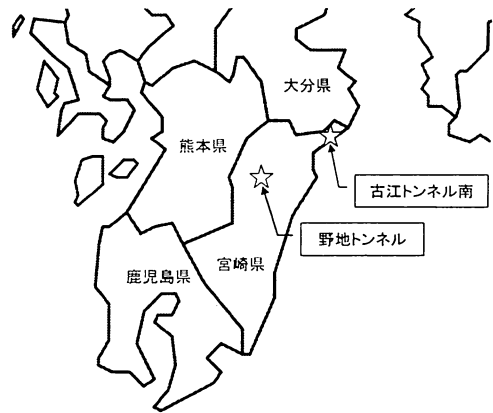


図-4 連続 SSRT 適用現場位置図

表-2 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
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(古第三紀)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)

なお、開発した専用振動記録装置は、GPS信号受信用のモジュールを取り付ければ、坑外でGPS信号を受信する汎用振動記録装置として使用することもできる。

(3) 時刻校正装置に対する考察

表-1 に、開発した振動記録装置の内部時計校正装置の利点・欠点をまとめて示す。

表より、GPS 信号光伝送装置は、関連機器が多く光ケーブルが断線するリスクが高いことが欠点となるが、汎用振動記録装置が使用できることが利点である。よって、延長が 500m 程度の比較的短いトンネルに適している。

ルビジウム刻時装置と専用振動記録装置を組み合わせる方式は、断線リスクがなく、関連機器が少ないことから軽量で取り扱いが容易な装置である。よって、延長が 1,000m 以上の比較的長いトンネルに適している。

通常、坑内には AC6,600V の高圧線が敷設されており電気容量の大きな様々な機械や設備が稼働している。よって、坑内は精密な探査機器を常設する環境としては過酷な条件であり、電磁波ノイズや電源ノイズに対してさらに改良を加える必要があると考えられる。

なお、連続 SSRT において坑外と坑内に設置する振動記録装置は、同じ基準時計と同期している必要性があり、開発した装置は共に GPS 信号を基準とした時計同期方法を採用している。当然ながら両装置共に、振動記録装

置の内部時計の精度に差違はなく、共に精度が高い刻時装置を備えていると言える。

一方、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外部の公衆 LAN 回線からリモート操作で回収することができる。なお、坑外に設置される振動記録装置の記録回収方法も同様である。

4. 現場適用

(1) 適用現場の概要

新たに開発したルビジウム刻時装置を用いた連続 SSRT を適用した現場は、古江トンネル南新設工事（以下、古江トンネル南と称す）および、国道327号野地トンネル工事（以下、野地トンネルと称す）である。

図-4に適用現場位置図を示し、表-2に現場概要を一覧で示す。両現場共に、宮崎県の北部に位置する道路トンネルであり、地質構造区分は四万十帯に属する。

古江トンネル南の地質は、北川層群に属する粘板岩砂岩互層を主体とし、断層を境として諸塚層群の黒色千枚岩に変化すると想定されていた。本トンネルの中間点付近には、中生代の諸塚層群が地質年代の若い古第三紀の北川層群に衝上し、年代が上下で逆転する特異な地質

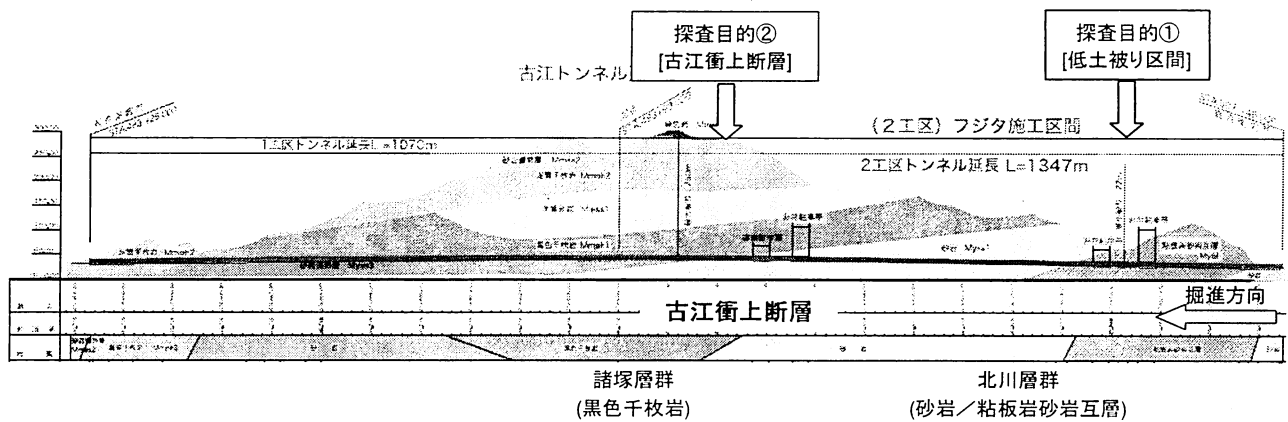


図-5 古江トンネル南における地質縦断面図と連続SSRT探査目的位置

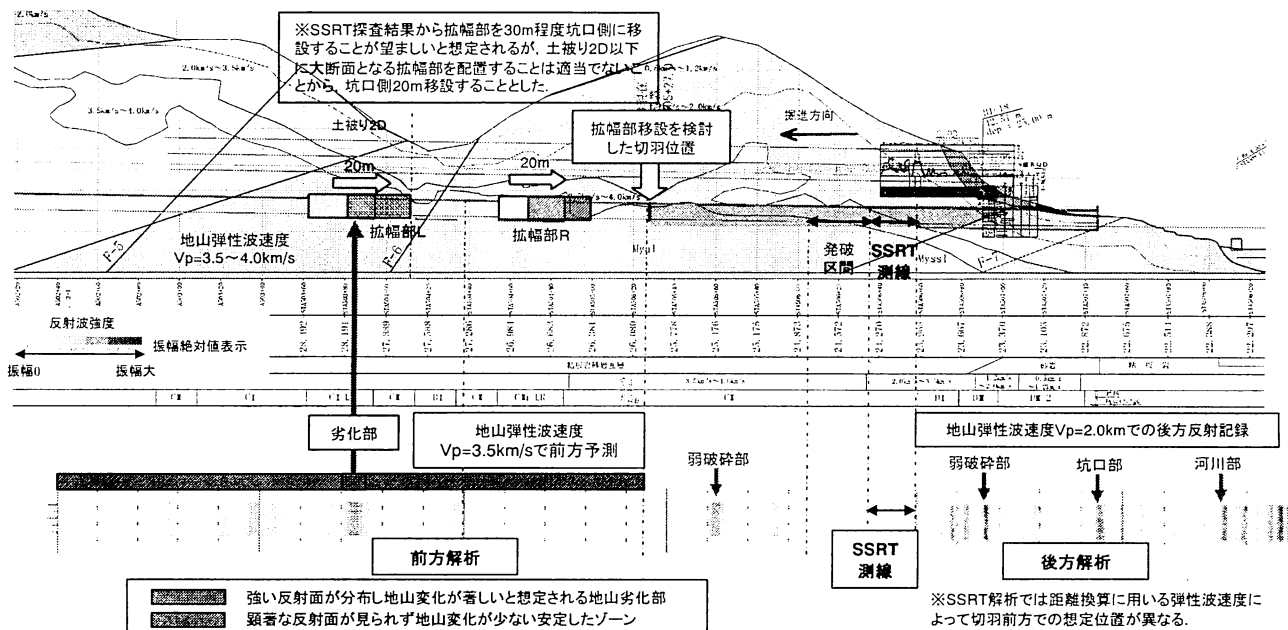


図-6 古江トンネル南における低土被り区間における前方探査結果〔GPS信号光伝送装置〕

構造（古江衝上断層）が分布し、この断層運動によって周辺地山の脆弱化が懸念され施工課題となった。一方、本トンネルは、最大土被り約250m、内空断面が94m²と土被りと内空断面共に大きいことが特徴である。

野地トンネルの地質は、古江トンネルに分布する諸塚層群に属するが、岩種が異なり頁岩と砂岩およびその互層が主体である。トンネル路線には数箇所断層の分布が想定されており断層位置とその性状を事前に把握することが施工課題となった。

(2) 古江トンネル南

図-5 に、古江トンネル南における地質縦断面図と連続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、前述のように断層周辺で地

山が脆弱化することが懸念されていた。

低土被り区間の探査には、坑口から近いこともありGPS 信号光伝送装置を用い、その後の古江衝上断層の連続探査においてルビジウム刻時装置と専用振動記録装置の実用性を検証しながら連続的に探査した。

坑内探査では、固有周波数 100Hz のジオフォン（12ch）を受振器として用い、振動記録装置の測定間隔は1msである

a)低土被り区間の探査結果

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）がやや不十分であったが、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波速度を3.5km/sとして前方を予測した。

図-6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

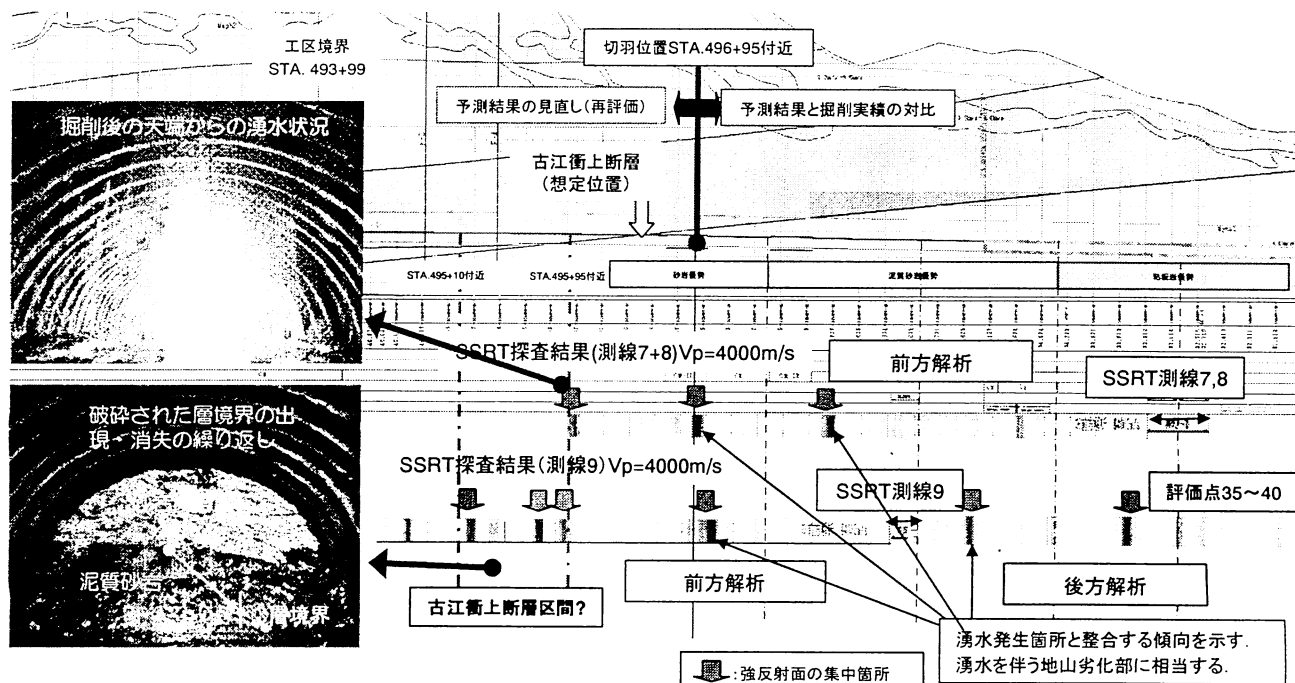


図-7 古江トンネル南における古江衝上断層の探索結果 [ルビジウム刻時装置と専用振動記録装置]

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。

b) 古江衝上断層付近の探索結果

想定されている古江衝上断層位置のかなり手前において、ルビジウム刻時装置と専用振動記録装置の実用性検証をした。その結果、本装置で得られた記録は、既存の発破記録と比較してS/N比（Signal to Noise ratio：信号とノイズの比であり波形記録の品質を表すパラメータとなる）に遜色なく、品質の高い記録であることを確認した。さらに、VSP処理によって得られた切羽後方の反射記録と低土被り区間の探索結果と比較し、反射記録の整合性が確認できた。

以上から、トンネル深部となる古江衝上断層の探索には、ルビジウム刻時装置と専用振動記録装置を用いて連続的に探索することとし、以下に探索結果の概要を述べる。

図-7 に、古江衝上断層の想定位置から手前 40m で既掘削実績と予測結果を対比し、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。この時点において切羽前方約 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、この反射面が連続的に集中する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したと考えられる。

c) まとめ

本トンネルでは、連続SSRTをほぼ全線で実施し地山変化を予測しながら掘進した。探索結果から、古江衝上断層の可能性が示唆されるいくつかの反射構造を捕らえたが、それらの反射構造は、主に湧水が多い区間や地層境界における地山変化に相当した。掘削結果から、地山の脆弱化が危惧された古江衝上断層は露出しなかったが、探索結果から切羽地質の変化に対して注意箇所を喚起しながら安全に掘進することができた。

一方、ルビジウム刻時装置は、現場での検証初期段階において、発破の起爆信号が時刻記録装置に連続的に入力するトラブルが発生した。この誤信号は電源ノイズか周辺の電磁波ノイズの影響と考えられ、発破信号検出装置からの信号入力ケーブルにフォトカプラ（電気信号を光信号を介して伝達する素子で入力と出力を電氣的に絶縁できる）を挿入し電氣的に絶縁することによって誤信号を除去した。室内実験から、このフォトカプラの挿入によって発破信号が数 μ s 遅れることを確認したが、全体の探索精度を低下させる時間遅れではなく、信号入力ケーブルへのフォトカプラ装着を標準仕様とした。

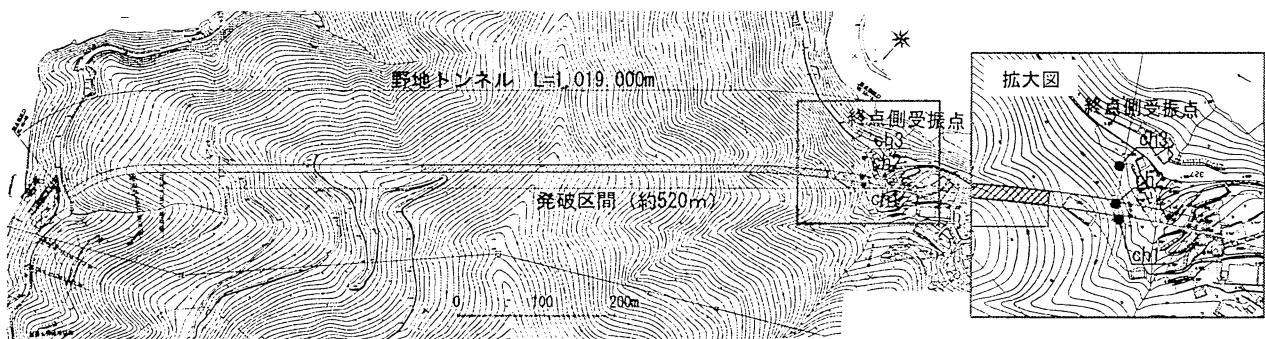


図-8 野地トンネルにおける終点側坑外受振点設置位置と掘削発破区間

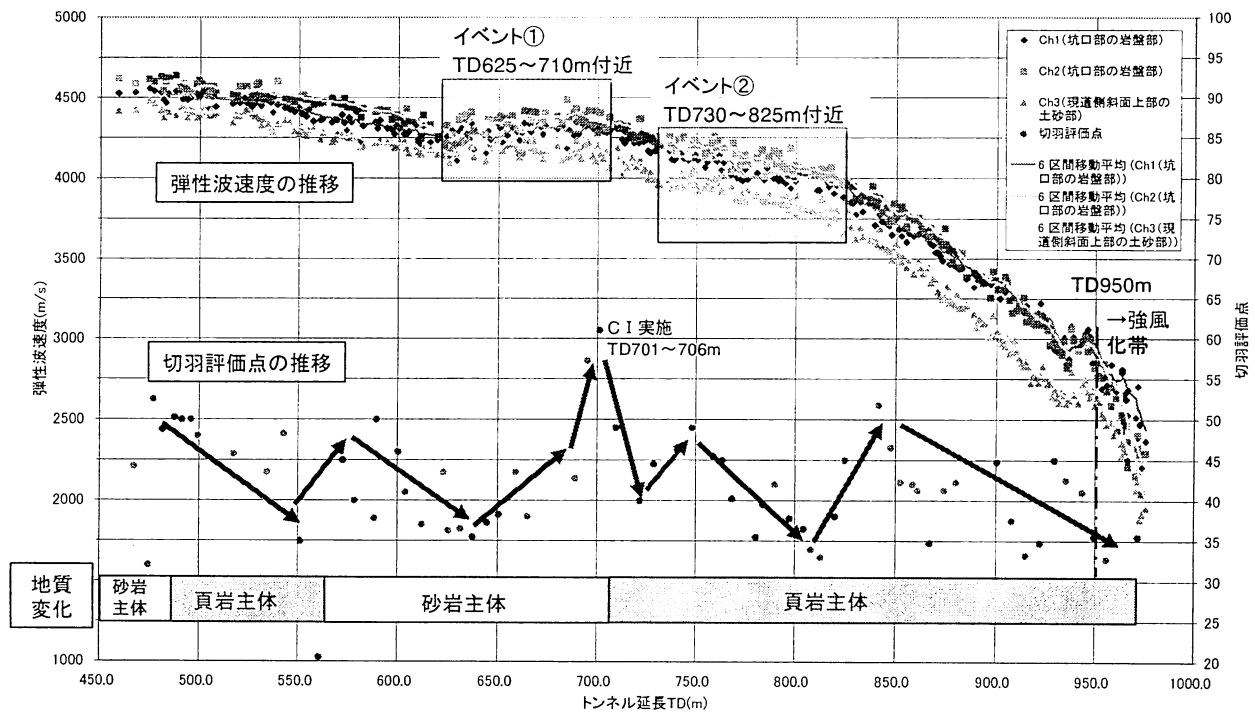


図-9 野地トンネルのトンネル延長と坑外受振記録における見掛け弾性波速度の推移

(3) 野地トンネル

野地トンネルでは坑外受振記録結果について述べる。

図-8 に坑外受振点と連続発破位置を示す。終点側坑口付近の坑外に受振器を 3 点設置し、振動記録装置は GPS 信号で時刻校正し発破振動を記録した。連続発破区間は約 520m であり約 310 発破の有効な振動記録を得た。

図-9 に、得られた振動記録から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見掛けの弾性波速度を求めた結果を示す。図より弾性波速度は、全体的として徐々に低下する傾向を示す。その理由は、連続発破区間における切羽が地山深部から徐々に表層に移行し、地山の風化の影響を受けるからであると考えられる。

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 (TD625~710m 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性がある。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、低下傾向に変化する。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、坑外受振記録による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はそれ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 付近から終点側坑口に向かって弾性波速度が急激に低下する位置は、地山の強風化帯の分布と

ほぼ一致する。

当然ながら、坑外で得られた見掛けの弾性波速度は、坑内発破振動記録で得られる切羽前方の反射記録の位置同定に活用し切羽前方予測の精度向上に寄与している。

5. おわりに

本報告は、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において坑内に常設する振動記録装置の時刻校正装置として、ルビジウム刻時装置と専用振動記録装置を新たに開発し2つの現場に適用することによって実用化した事例について述べた。

本装置は、前報¹⁾で述べたGPS信号光信号伝送装置の課題であったケーブル断線のリスクと関連装置の簡略化を、高精度のルビジウム刻時装置を適時坑内に携行・常設するという方式で克服し、特に延長の長いトンネルへの適用性に優れていることを確認することができた。

一方、坑内は高温多湿であり、さらに坑内電源および電磁波環境は精密機器にとって過酷な条件と言え、本装置の現場における検証初期段階においてルビジウム刻時装置に誤信号が連続的に入力されるというトラブルが発生した。このトラブルは信号入力ケーブルを電氣的に絶縁することによって回避することができたが、今後さらに、電源ノイズや電磁波ノイズに対する対策を本装置に実施し改良する必要があると考えられる。

参考文献

1) 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, 土木学会第31回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.22-28, 2001.

2) 加藤卓朗, 村山秀幸, 清水信之, 岡村浩孝, 望月齊也: 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, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第11巻, pp.171-176, 2001.11.
3) 加藤卓朗, 村山秀幸, 浦木重伸, 浅川一久, 柳内俊雄: 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, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第12巻, pp.263-268, 2002.11.
4) 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.
5) 大野義範, 渡辺正, 吉田泰士, 村山秀幸, 清水信之: トンネル掘削発破を起振源とした切羽前方弾性波探査の開発と現場適用, 土木学会トンネル工学研究報告集, 第15巻, pp.219-226, 2005.12.
6) Shimizu, N., Murayama, H., Asada, H., and Hagiwara, M., 2006, The Comparison of Different Seismic Sources in the new method for Seismic Reflection Survey ahead of a Tunnel Face, *Proceedings of The 2nd International Conference on Environmental and Engineering Geophysics*, Chinese Geophysical Society & CUG.
7) 村山秀幸, 上野博務, 福田秀樹, 黒田徹: TBM先進導坑内における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16巻, pp.99-106, 2006.11.
8) 村山秀幸, 丹羽廣海, 中島耕平, 川中卓, 黒田徹: トンネル坑口部における坑外からの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17巻, pp.67-73, 2007.11.
9) 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研究報告集, 第17巻, pp.75-80, 2007.11.
10) 丹羽廣海, 村山秀幸, 小笠原和久, 中島耕平, 黒田徹: 坑外からの切羽前方探査における到達側坑口受振記録の活用, 土木学会トンネル工学研究報告集, 第19巻, pp.165-172, 2009.11.
11) 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.
12) 例えば, 土木学会関西支部: トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム講演論文集, 2000.5.

DEVELOPMENT OF THE SHALLOW SEISMIC REFLECTION SURVEY AHEAD OF TUNNEL FACE USING RUBIDIUM CLOCK

Hideyuki MURAYAMA, Hiroumi NIWA, Yoshinori OHNO,
Yoshihito OSHIMURA and Yoshitaka WATANABE

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 source, it becomes possible not to continuously evaluate the geological features. We called this method Seismic While Excavating using SSRT (SWE-SSRT). This paper describes the development of SWE-SSRT survey on the several case of the tunnel under construction using the rubidium clock equipment of the data recorder.