

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

村山 秀幸 渡辺 正^{*1}
大野 義範^{*1}

概 要

筆者らの一人は、山岳トンネル施工時に切羽前方の地質性状を予測する探査手法としてトンネル浅層反射法探査(Shallow Seismic Reflection survey for Tunnel: SSRT)を開発し現場での適用を進めてきた。通常、SSRT等の弾性波反射法のVSP処理(Vertical Seismic Profiling)に基づく切羽前方探査作業では、受振器の設置や発破等を起振源として用いるために切羽から100m程度後方の坑内を1日(8時間)程度占有することとなり、作業の安全性確保とトンネル掘削サイクルに影響を与えないためには、掘削作業を実施しない休日等に切羽前方探査を実施する機会が多い。一方、発破掘削工法のトンネルでは、掘削のために1日に数回発破作業を実施するので非常に大きな起爆力による振動が発破ごとに切羽からトンネル周辺地山に伝達されている。よって、この掘削発破の振動を活用すれば、特別な探査作業工程を伴わずに日常的かつ効率的に切羽前方の地山性状を把握することが可能となると考えられる。

本稿では、トンネル掘削発破を起振源とする切羽前方探査(SSRT-D)の開発に伴い、和歌山県新宮市内のトンネル(仮称高田1号トンネル)で検証実験を実施した結果について報告する。

Development of Shallow Seismic Reflection Survey for Tunnel (SSRT) using Daily Excavation Blast as a Seismic Source

Abstract

One of the authors has developed the Shallow Seismic Reflection Survey for Tunnels (SSRT) to determine geological conditions ahead of tunnel face. In general, tunnel survey work requires multiple pick-ups and seismic sources in the tunnel, and it takes 8 hours and occupies about 100m behind the tunnel face. Therefore, for safety reasons tunnel surveys were often limited to holidays (or other times when the tunnel excavation work was not executed). On the other hand, drill and blast tunneling blast work is executed several times a day, producing significant vibrations in the rock around the tunnel face. Therefore, it is thought that using daily excavation blasts as a seismic source would be an efficient method for predicting and estimating geological conditions ahead of tunnel face.

This paper describes the development of an SSRT method using daily excavation blast as a seismic source (SSRT-D) and includes real-world results from experiments undertaken in a tunnel (tentative name Takada 1 tunnel) located at the Shingu city, Wakayama Prefecture.

キーワード: 山岳トンネル, 切羽前方探査,
弾性波反射法, 掘削発破

*1 大阪支店 土木部

§1. はじめに

筆者らは、施工条件や地山条件によって起振源(機械振源:油圧インパクト,パイロサイス,爆薬振源:発破)が選択でき、探査目的によって自由に探査配置を変更し、波形処理が実施可能な探査手法としてトンネル浅層反射法探査(Shallow Seismic Refection survey for Tunnel : SSRT)を開発した。SSRT探査の現場への適用事例としては、通常のトンネル坑内における切羽前方探査¹⁾はもとより、低土被りが連続する区間²⁾、坑口部周辺区間³⁾、沢部を低土被りで通過する区間⁴⁾等の施工条件に対して、坑内および坑外からの探査を併用して切羽前方地山を評価した。

通常、SSRT 探査等の切羽前方探査作業では、受振器の設置や発破等を起振源として用いるために切羽から 100m 程度後方の坑内を 1 日 (8 時間) 程度占有することとなり、作業の安全性確保とトンネル掘削サイクルに影響を与えないためには、掘削作業を実施しない休日等に探査作業を実施する機会が多い。一方、発破掘削トンネルでは、掘削のために 1 日に数回発破作業を実施するので非常に大きな起爆力による振動が発破ごとに切羽からトンネル周辺地山に伝達されている。よって、この掘削発破の振動を活用すれば、特別な探査作業工程を伴わずに日常的かつ効率的に切羽前方の地山性状を把握することが可能となると考えられる。一方、通常発破掘削トンネルでは 10 段程度の段発雷管を使用している。

以上から、掘削発破を起振源とする探査における技術課題をまとめると以下のようである。

- ①10 段程度の段発雷管を使用する掘削発破において十分な精度で切羽前方探査が行えること。
- ②発破後数 10 分で坑内作業を開始することから、保安上の観点から探査機器の設置位置が限定されること。
- ③発破の起爆信号を正確に記録・取得できること。
- ④発破切羽位置が発破毎に異なることから、波形・解析処理手法が通常の VSP 処理とは異なること。

本稿では、上記のトンネル掘削発破を起振源とする日常切羽前方探査(SSRT-D と称す)の開発で課題となる事項に対して、和歌山県新宮市内のトンネル(仮称高田 1 号トンネル)で検証実験した結果について報告する。

§2. 日常切羽前方探査システム(SSRT-D)の開発コンセプト

図1に、トンネル施工における切羽前方探査の位置づけに関するフロー図を示す。切羽前方探査は、地山条件や施工条件を勘案して必要に応じて実施する B 計測に相当し、特別な条件のトンネルを除き当初設計段階で探

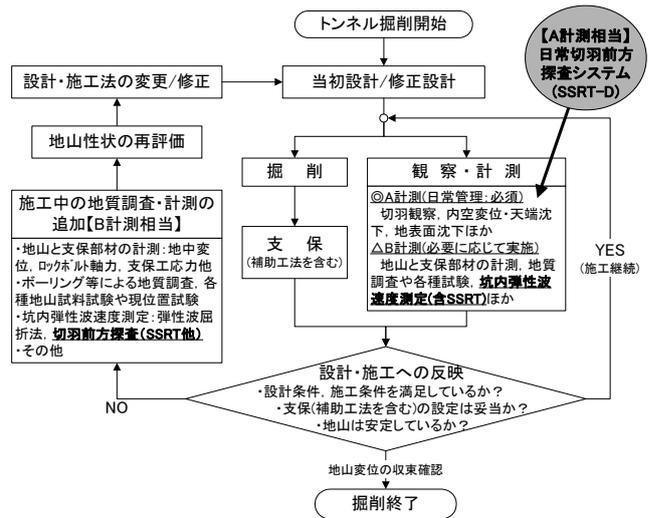


図1 トンネル施工における切羽前方探査 (SSRT と SSRT-D) の位置づけに関するフロー図

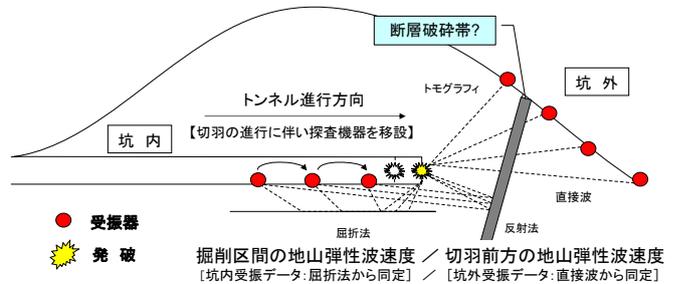


図2 日常切羽前方探査システム(SSRT-D)における探査機器の配置と探査実施イメージ

用されている事例は少ない。しかしながら、設計・施工の妥当性を検証する一つの評価指標としては、施工中に適時切羽前方探査を実施することが望ましいと考えられる。よって、日常施工管理で必須となる A 計測に相当する切羽前方探査の開発が望まれているといえ、日常切羽前方探査(SSRT-D)は A 計測に相当する。よって、SSRT-D 探査では、特別な探査実施工程を設定しないで日常的な掘削作業において前方探査に必要なデータが蓄積されていること、探査機器の取り扱いが簡単・容易であり、坑内の作業環境を考慮して、小型・軽量かつ防水・防塵加工されていることなどが必須要件となる。

図2に、SSRT-D における探査機器の配置および探査実施イメージを示す。図2に示すように、起振源としては掘削発破を想定しており、坑内に設置する探査機器は、切羽の進行に伴い順次切羽側に移設する。探査弾性波反射法の VSP 処理を基本原理とする手法では、得られた反射面の位置を同定する際に、切羽前方の地山弾性波速度が必要となる。しかしながら、通常探査測線は切羽後方の坑内に設置することから、切羽前方地山の弾性波

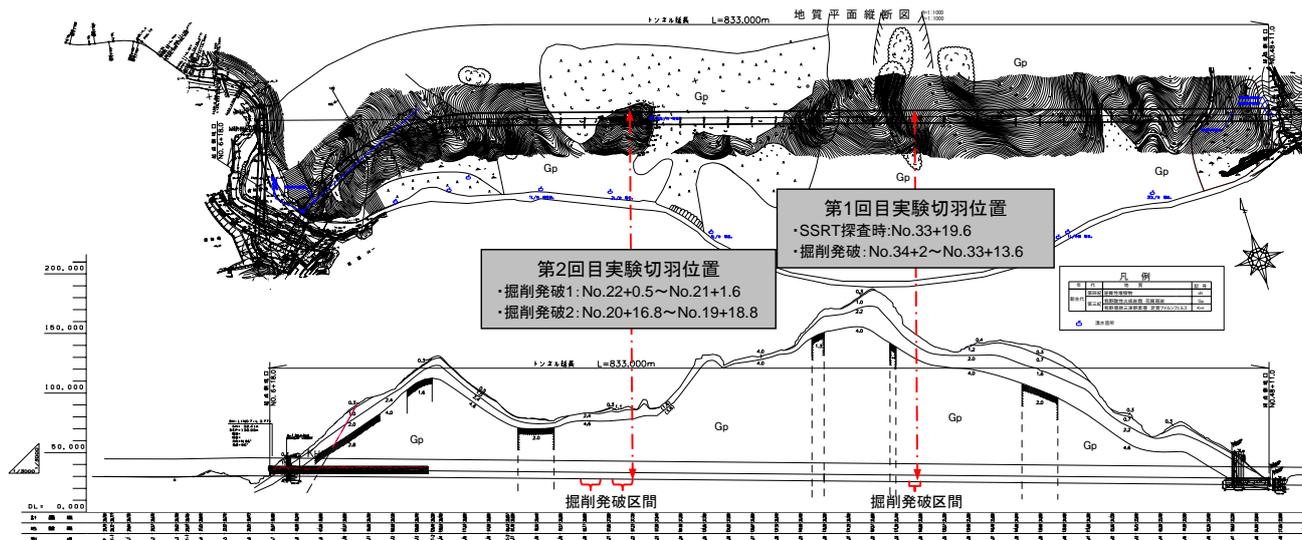


図3 高田トンネル地質平面縦断図(第1,2回目実験における切羽位置と掘削発破位置)

速度は得られないが、図2のように坑外に受振器を設置すれば、切羽前方地山の平均的な弾性波速度が把握できると考えられる。

図2のように坑外、坑内に受振器等を配置し、掘削発破を起振源として切羽進行に伴うデータを蓄積すれば、波形処理として屈折法、反射法、トモグラフィ解析など様々な手法で切羽前方地山を評価可能となる。取得したデータは、1週間に1回程度の頻度で探査専門技術者へ送付し、波形処理・解析を実施し切羽前方地山を予測する。

§3. 現場概要と地質概要

実験を実施したトンネルは、県道高田相賀線道路改良工事に伴う2車線道路トンネル(仮称高田1号トンネル)であり、仕上がり内空断面 49.4m²、延長 833mである。図3に高田トンネルの地質平面縦断図を示す。

トンネル地質は、新第三紀中新世に周辺の基盤となる四万十類帯熊野層群(主に砂岩、泥岩)とはほぼ同時期に貫入した熊野酸性火山岩類(花崗斑岩:G_p)が主体で、一部四万十類帯が熊野酸性火山岩類の貫入によって熱水変質を受けた泥質フォルンフェルス(K_{mp})が分布する。

事前地質調査では、トンネルルートが高田川の左岸側に位置することもあり地下水が豊富であると同時に、地表からの弾性波屈折法で数カ所に幅 5~30m 程度の弾性波低速度帯が分布すると想定されていた。堅岩部の地山弾性波速度は $V_p=4.0\sim 4.6\text{km/s}$ を示すが、低速度帯の弾性波速度は $V_p=1.3\sim 2.0\text{km/s}$ であり、部分的に地山が脆弱化する可能性が示されていた。

§4. 現場検証実験

4.1 第1回目実験

4.1.1 段発発破実験

本現場の掘削発破では、火薬として含水爆薬を用い、雷管は瞬発電気雷管とDS段発電気雷管を用いている。DS雷管(デシセコンド雷管)は、一般に段間隔時間 0.25~0.5秒で段数 2~15段であり、段間隔時間に関しては数 10 ミリ秒程度の誤差(個体差)がある。段発発破を起振源とする切羽前方探査では、瞬発雷管(1段目発破)の起爆時間を正確に記録することと、瞬発から次の段発発破までに周辺地山からの反射面を捕らえていることをまず検証する必要がある。よって、以下のような段発掘削発破で有益な波形が取得できるかを検証した。

ケース①:通常段発発破(1段目瞬発雷管~2段目DS雷管~3段以降DS雷管, 1~2段目の公称段間隔時間:0.25秒±)

ケース②:段飛ばし発破(1段目瞬発雷管~[2段目なし]~3段目DS雷管~4段以降DS雷管, 1~3段目の公称段間隔時間:0.50秒±)

図4に、実験における探査機器の配置概念図を示す。探査機器は、切羽から約 160m 後方の側壁脚部に受振器(ジオフォン 100Hz 上下動 1成分)3m 間隔で 20 箇所(測線長 57m)トンネル縦断方向に配置し、記録装置を坑外に設置した。データ取得間隔は 1 ミリ秒とし、起爆信号は、発破母線に非接触型電流計を設置しディテクター(信号検出器)を介して記録装置に記録した。写真1に受振器の状況を、写真2に記録装置を、写真3に発破時の発破母線に非接触型電流計とディテクターを設置した状況を示す。

図5に、得られた走時波形を示す。ケース①, ②共に

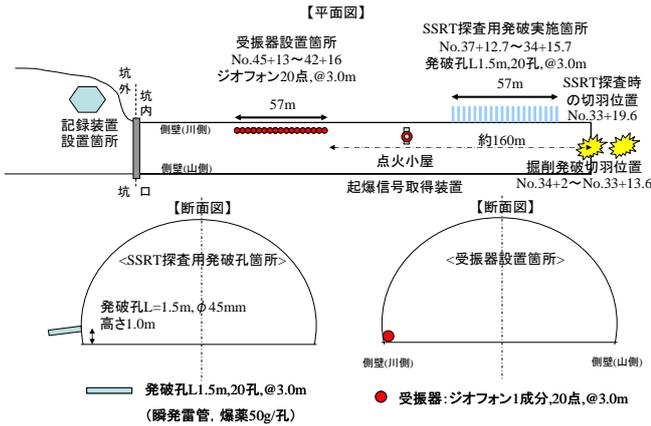


図4 第 1 回目実験における探査機器の配置概念図

約 0.04 秒後に 1 段目発破の初動を捕らえ、音波を約 0.5 秒後に捕らえている。各発破における初動の時間遅れ勾配から見掛けの地山弾性波速度は約 $V_p=4\text{km/s}$ となり、約 0.04 秒(160m/4000m/s)で 1 段目の初動を捕らえ、音波速度を 330m/s とすれば約 0.5s(=160m/330m/s)で音波を捕らえていることから、本測定で起爆信号を正確に取得していることが分かる。2 段目発破は 0.26 秒後に、3 段目発破はケース①で 0.52 秒後、ケース②で 0.43 秒後に捕らえており、ケース①で誤差がやや大きい概ね DS 雷管の公称段間時間 0.25 秒と一致している。一方、各発破の第 1 波から 2 波の段間時間には、周辺地山からの反射面に相当する波形が捕らえられており VSP 処理で切羽前方からの反射面を抽出できる可能が示された。

次に、切羽前方の反射面からの往復走時を単純に 2 倍と考えて発破(切羽)位置から探査可能な切羽前方距離をケース①で算出すると以下となる。

ケース①の通常段発破:約 0.22 秒(第 1 波から第 2 波までの時間遅れ) $\times 4\text{km/s}$ (見掛けの地山弾性波速度) $\div 2$ (往復走時)=切羽前方約 440m

以上から、DS 電気雷管を用いた通常の段発掘削発破を起振源として切羽前方探査が十分可能であることが示された。一方、音波の影響と作業性を考慮した受振器測線の配置としては、今回実施した切羽後方約 150m で問題がないことがわかった。

4.1.2 通常の SSRT 探査と掘削発破を起振源とする SSRT-D 探査結果の対比

次に、通常の SSRT 探査と掘削発破を起振源とする SSRT-D 探査結果を比較しその妥当性を検証した。通常の SSRT 探査は、図4に示したように側壁に探査用発破孔(20 孔、瞬発雷管、爆薬 50g/孔)を削孔し、受振器 20 点を配置して実施した。SSRT-D 探査では、SSRT 探査における受振器の位置と数量を変えずに、切羽進行に伴う段発

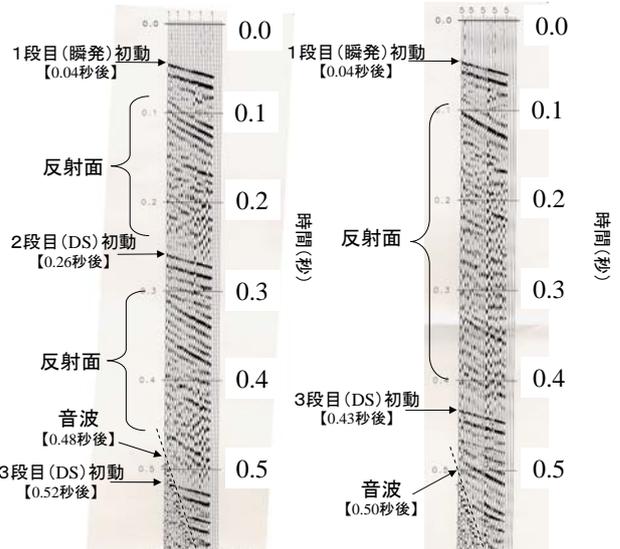


写真1 受振器

写真2 記録装置



写真3 発破時の非接触型電流計とディテクター



(a)ケース①: 通常段発破

(b)ケース②: 段飛ばし発破

図5 通常段発破と段飛ばし発破の走時波形

掘削発破(3 発破)のデータを取得して、各々解析処理を実施した。

図6に、VSP 処理による探査結果を比較して示す。図より、両手法によって得られた処理波形は非常によく一致している。段発掘削発破では多数の瞬発雷管を使用し、厳密には各瞬発雷管で僅かな時間遅れが発生していると考えられるが、切羽前方探査に用いる起振源の品位・精度としては問題がないことが検証された。

なお、図より掘削発破では 1 段目の瞬発雷管で起爆する火薬量が多く、大きな振動が発生することから必然的に切羽前方における探査距離も深いことがわかり、切羽前方探査としては非常に有利であると言える。

4.2 第2回目実験

第2回目実験では、SSRT-D 探査が通常の掘削サイクルで実施可能であるかを検証することを目的とした。すなわち、実験では、最小限の探査機器を坑内に配置し、掘削発破に伴い受振器測線を順次切羽側に盛り変えて連続的に測定し、探査結果を掘削実績と比較した。

図7に示すように、受振器測線①、②は、切羽後方約120～150mの側壁脚部に受振器を6m間隔で5箇所トンネル縦断方向に設置した。測線①では11回の掘削発破データ(切羽進行長19.5m)を取得し、約1週間で測線を30m切羽側に盛り変えて、測線②として13回の掘削発破データ(切羽進行長18m)を取得した。起爆信号の取得やデータ取得間隔は第1回目実験と同様である。

図7に、SSRT-D 探査結果(VSP 処理結果:測線①と②の重ね合わせ)、掘削実績(切羽評価点、実施支保パターン等)を総括的に示す。探査結果の評価としてVSP 処理結果から反射面が集中する箇所を、地山の脆弱化が予測される領域として領域①～④の4箇所を抽出した。

領域①は事前調査における地表からの弾性波屈折法の低速度帯 $V_p=2\text{km/s}$ の約40m区間とほぼ一致している。さらに、探査結果における領域①のうち前半のNo.20～No.18+10の約30m区間は、反射面はあるがその規模と連続性がやや乏しいことから切羽地質の変化が著しい領域と考えられ、後半のNo.18+10～No.17区間には比較的規模の大きな反射面が存在することから、地山脆弱部の本体であると予測された。掘削実績から、No.21～No.19区間は、切羽評価点(評価点が高いほど良好な地山)の変化が激しく切羽毎に切羽地質の硬軟が変化する地山性状であり、支保パターンの選定が難しく探りボーリング(L=20m, 2本)を併用しながらC IIとC Iパターンで対応した。その後切羽がほぼNo.19に達した段階で実施した探りボーリングにて切羽前方に脆弱部が存在することを確認したこと、および切羽評価点が低下してきたことから、この地点で支保パターンをD Iに切り替えて施工した。切羽観察からNo.19～No.17の40m区間は、切羽評価点が30～40点であり地山脆弱部に相当した。以上のように、領域①で想定された地山性状は掘削実績とよく一致し、SSRT-D 探査結果から適切な施工対応が可能となったと考えられる。

領域②に相当する箇所では、突発的に1,000リットリ/分の湧水が発生したが1日程度で湧水は減少し切羽の自立性には特に問題がなくC Iパターンで対応可能であった。領域②は地山の割れ目等の空隙に地下水が賦存した領域を捕らえた可能性が考えられる。

領域③、④は、トンネル平面線形がカーブすることからその想定位置がずれると考えられるが、領域③は新鮮岩から風化岩へ漸移する領域(支保パターンC IからC II

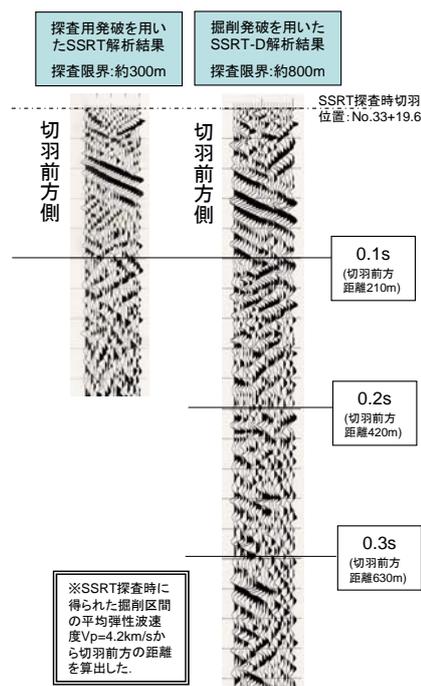


図6 SSRT 探査とSSRT-D 探査結果の比較
(切羽前方 VSP 処理波形)

への変更箇所)、領域④は岩種変更箇所(花崗斑岩から泥質フォスフェス)とほぼ一致している。

以上から、日常的な掘削サイクルにおける段発発破を起振源として切羽前方探査が可能であることを示した。なお、図7では測線①と②を重ね合わせて評価していることから、今後の探査では1測線あたりの受振点を10箇所程度とすることが望ましいと考えられる。

§5. まとめ

本稿で得られた知見をまとめると以下となる。

- 1) 段発掘削発破における1段目発破(瞬発雷管)は、切羽前方探査における起振源として良好である。
- 2) 掘削発破の起爆信号を発破母線に設置した非接触型電圧計とディテクターの組合せによって正確に取得できる。
- 3) 掘削発破を用いたSSRT-D 探査と通常のSSRT 探査の結果はほぼ一致し、掘削発破を用いて日常的に切羽前方を探査することが可能である。
- 4) 探査機器の配置としては、切羽後方150m前後の側壁脚部に受振器を10箇所程度設置し、切羽進行に伴い受振器測線を盛り変えることによって、掘削サイクルに支障なく安全に連続的な探査が可能となる。
- 5) 起振位置と受振位置が一致しない場合でもVSP 処理によって切羽前方からの反射面を抽出できる。

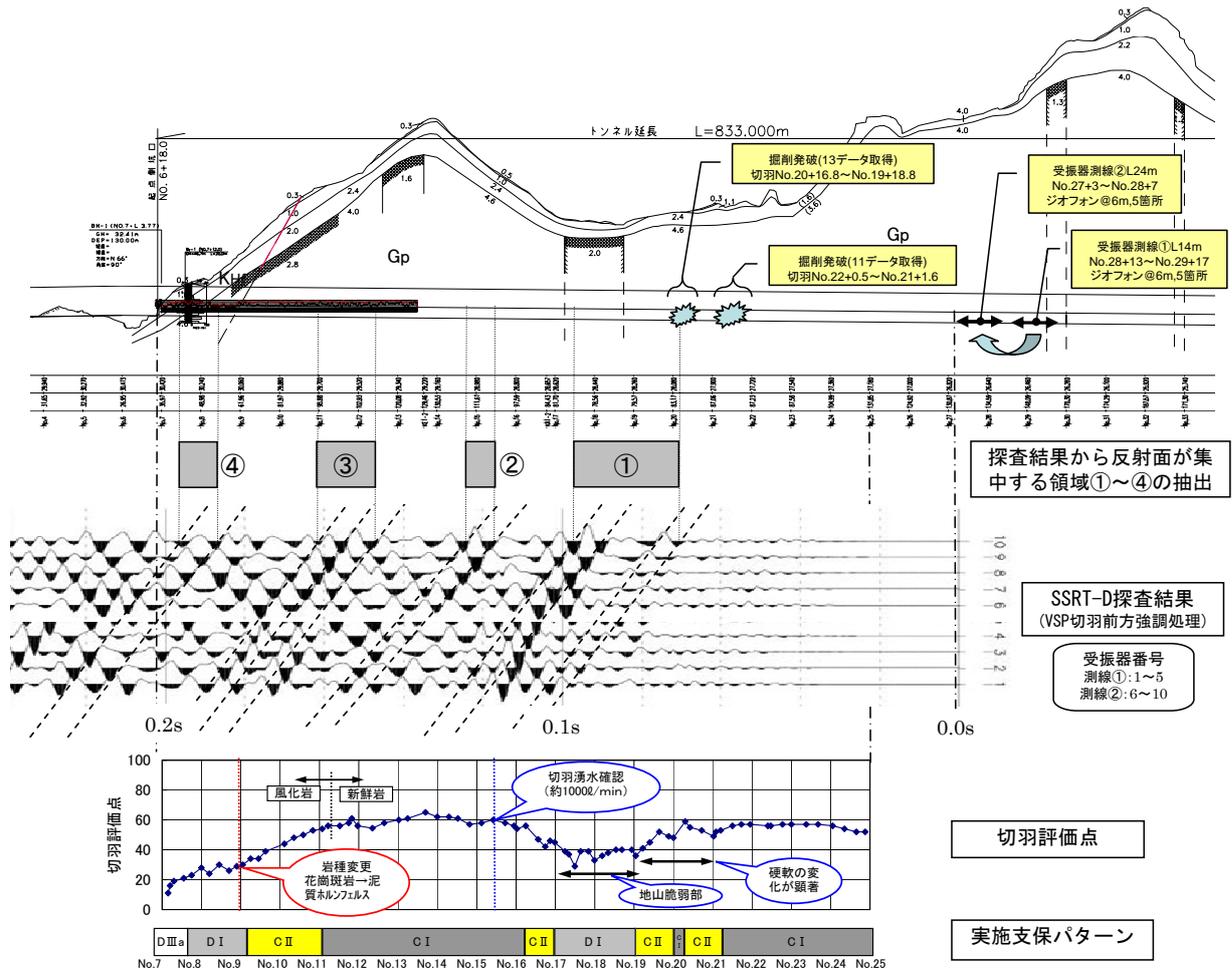


図7 SSRT-D 探査配置および探査結果と掘削実績(切羽評価点, 支保パターン)に関する総括図

今後は、坑内での探査機器の小型化を実施すると同時に、坑内および坑内で測定し、日常切羽前方探査システムの探査精度をさらに向上させる計画である。

謝辞 本研究は、(株)地球科学総合研究所との共同研究における成果であり、清水信之氏、黒田徹氏並びに川部善朗氏には多大なる御尽力を賜りました。和歌山県東牟婁振興局の担当者には、現場検証実験に多大なるご便宜を賜りまわり、高田トンネル作業所のフジタ・本間・丸山共同企業体各位には現場にて格別のご協力を賜りました。ここに関係各位に深謝致します。

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講演論文集, pp.22-28, 2001.1.
- 2) 加藤卓朗・村山秀幸・清水信之・岡村浩孝・望月齋也: 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) Nobuyuki Shimizu, Takuro Kato, Hideyuki Murayama: Development and Application of Seismic Reflection Survey in a Tunnel using Hydraulic Impactor or Vibrator, The 7th SEGJ International Symposium Imaging Technology-(Sendai),2004.11.

ひとこと



村山 秀幸

本研究の成果は、前任研究担当者である加藤卓朗君(現、株式会社神戸製鋼所)の功績が多であったことを付記する。本手法を今後さらに現場で検証し、日常的に切羽前方地質を予測できる探査システムとして実用化を目指したい。