

トンネルの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

Development and field application of shallow seismic refraction survey for tunnels
using daily excavation blasts as a seismic source†

大野義範¹・渡辺正¹・吉田泰士²・村山秀幸³・清水信之⁴

Yoshinori Ohno, Tadashi Watanabe, Yasushi Yoshida,
Hideyuki Murayama and Nobuyuki Shimizu

¹(株)フジタ 大阪支店土木部 (〒530-0003 大阪市北区堂島2-1-16 フジタ・東洋紡ビル)

E-mail:ohno@fujita.co.jp

²和歌山県東牟婁郡新宮建設部 (〒647-8551 和歌山県新宮市緑ヶ丘2丁目4番8号)

³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)

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

One of the authors has developed the Shallow Seismic Refraction survey for Tunnels (SSRT) to determine geological conditions ahead of tunnel face. In general, tunnel survey work requires multiple pick-ups and seismic sources, and it takes 8 hours and occupies about 100m behind the tunnel face. Therefore, for safety reasons tunnel surveys were often limited to holidays. On the other hand, 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 tunnel survey method.

This paper describes the development of SSRT method using daily excavation blasts as a seismic source and includes real-world results from experiments undertaken in a tunnel (tentative name Takada 1 tunnel).

Key Words : *Geological prediction ahead of tunnel face, Shallow Seismic Reflection survey for tunnels(SSRT),
Excavation blast, Seismic source*

1. はじめに

筆者らの一人は、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、パイプロサイス、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、様々な波形処理が実施可能なトンネル切羽前方探査手法として、トンネル浅層反射法探査（Shallow Seismic Refraction survey for Tunnels：以下 SSRT と称す）を開発した。SSRT 探査の現場への適用としては、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、坑内および坑外に探査機器を配置してトンネル切羽前方の地山を評価してきた。

通常、SSRT 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、探査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場合が多い。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。また、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切羽前方探査の技術課題をまとめると以下のようである。

1) 10 段程度の段発雷管を使用する掘削発破（段発

発破)において切羽前方探査が行えることことを検証すること。

2)掘削発破後数 10 分程度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)掘削発破の起爆信号を正確に記録・取得できること。

4)掘削発破位置が発破毎に異なることから、通常の SSRT 探査における VSP 処理とは異なること。

本稿では、トンネル掘削発破を起振源とする日常切羽前方探査(以下 SSRT-D と称す)の開発で課題となる上記の技術課題に対して、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。

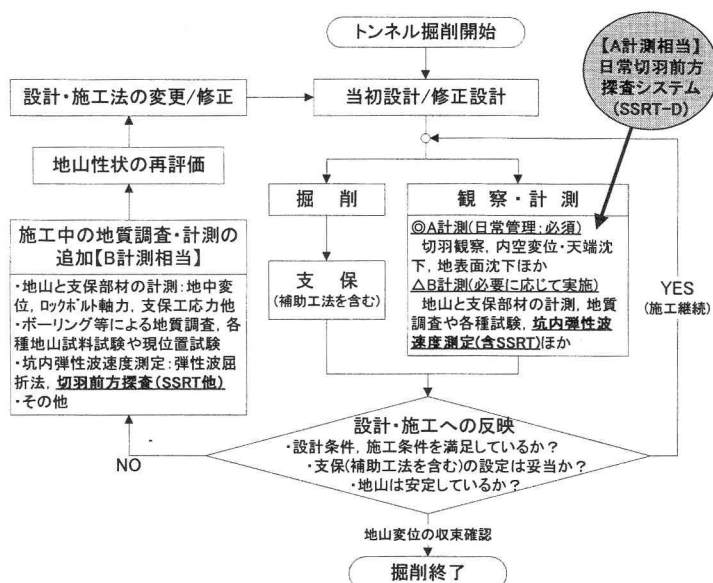


図-1 トンネル施工における切羽前方探査 (SSRT と SSRT-D) の位置づけに関するフロー

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を示す。SSRTのような切羽前方探査は、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採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計測に相当する手法として位置づけることを開発コンセプトとしている。よって、SSRT-D探査では、特別な探査作業工程を設定しないで日常的な掘削サイクルにおいて切羽前方探査に必要なデータが順次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探査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

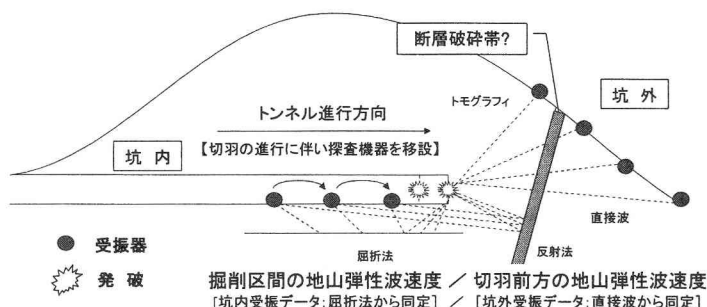


図-2 日常切羽前方探査システム(SSRT-D)における探査機器の配置と探査実施イメージ

設する。VSP 処理を基本とする反射法探査では、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速度は得られない。しかしながら、図-2に示したように、坑外に受振器等の探査機器を設置すれば、切羽前方の平均的な地山弾性波速度が把握できると考えられる。

以上から、図-2のように坑外と坑内に探査機器を配置し、掘削発破を起振源として切羽進行に伴う各種データを連続的に蓄積すれば、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することが可能となる。実務的には、取得したデータを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評価することを想定している。

目 DS 雷管なし]~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) を 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 に受振器の設置と探査測線状況を, 写真-2 に記録装置を, 写真-3 に発破時の起爆信号の取得状況をそれぞれ示す。

図-5 に, 得られた走時波形を示す。ケース①, ②共に約 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 $V_p=4.0\text{km/s}$ となり, 約 0.04 秒 ($160\text{m}/4000\text{m/s}$) で 1 段目の初動を捕らえ, 音波速度を 330m/s とすれば約 0.5 秒 ($\approx 160\text{m}/330\text{m/s}$) で音波を捕らえていることから, 本測定で掘削発破の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②で誤差がやや大きい概ね DS 雷管の公称段間隔時間 (0.25 秒 $\times$ 2) の遅れと一致している。一方, 各発破の第 1 波から 2 波の段間隔時間には, 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性が示された。

次に, 切羽前方地山からの反射面の往復走時を単純に 2 倍と考えると発破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の通常段発発破: 約 0.22 秒 (第 1 波から第 2 波までの時間遅れ) $\times$ 4.0km/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雷管を用いた通常の段発掘削発破を起振源として用いた探査において切羽前方400m



写真-1 受振器と探査測線

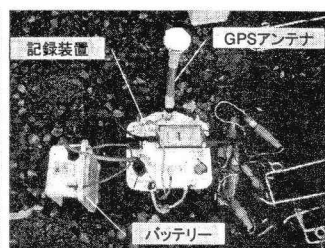


写真-2 記録装置

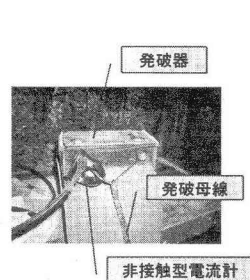
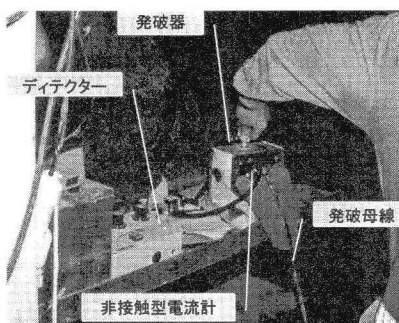
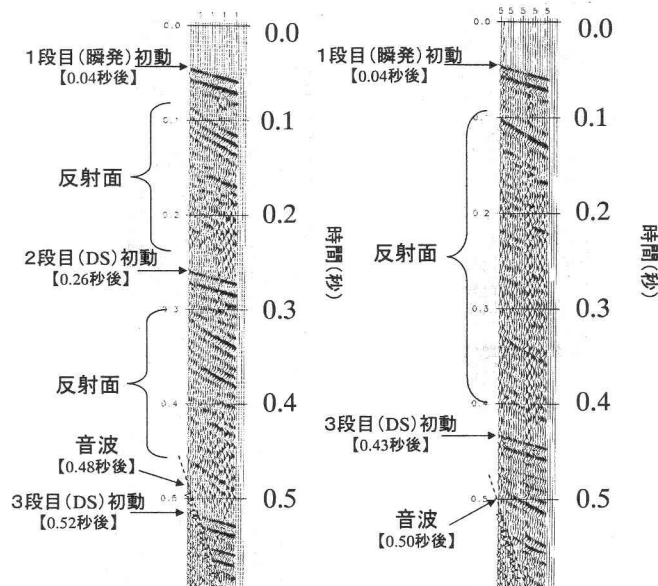


写真-3 発破時の起爆信号取得 (非接触型電流計とディテクター)



(a)ケース①: 通常段発発破 (b)ケース②: 段飛ばし発破

図-5 通常段発発破と段飛ばし発破の走時波形

程度の領域が探査可能であることが示され, 探査必要深度としては十分な距離であると考えられる。

一方, 音波の影響と作業性・安全性 (発破による飛石や爆風等) 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区間で問題がないことがわかった。

b) 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

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、切羽進行に伴う掘削発破（3 発破）のデータを取得して、それぞれ波形処理を実施した。

図-6 に、VSP 処理結果を SSRT と SSRT-D 探査で比較して示す。VSP 処理に用いた地山弾性波速度は、切羽後方の探査測線間において得られた平均地山弾性波速度 $V_p=4.2\text{km/s}$ を採用した。図より、両手法によって得られた処理波形は調和的でよく一致している。掘削発破では、同一切羽で多数の瞬発雷管を使用しているため厳密には各瞬発雷管で僅かな時間遅れが発生している。しかしながら、図-6 の VSP 処理段階において問題が発生していないことから、段発掘削発破は切羽前方探査に用いる起振源の品位・精度として問題がないことが検証された。

一方、図-6 より掘削発破では、1 段目の瞬発雷管で用いる火薬量が多く、周辺地山に大きな振動エネルギーが伝搬されることから必然的に切羽前方における探査可能深度が通常の SSRT 探査より深いことがわかる。よって、掘削発破を振源とする SSRT-D 探査は探査深度が通常より深いことが利点となる。

c) 切羽前方の平均地山弾性波速度

図-7 に、坑外と坑内の探査機器の配置および切羽前方の平均地山弾性波速度が地山状態によって変化する概念図を示す。坑内と坑外に設置した記録装置の内部時計は、GPS 信号を受信し適時時刻校正がなされている。ここで、坑外で受振される発破記録の初動は、切羽前方地山の最短距離を伝搬する直接波であると仮定する。その仮定に基づけば、坑内における掘削発破の起爆信号を記録した時刻と、坑外における発破記録の初動時刻の時間差を算出し、発破地点と坑外受振器の距離差から、切羽前方の平均的な地山弾性波速度が算出できる。ここで得られる切羽前方の平均地山弾性波速度は、前節で実施した VSP 処理で用いられ、反射面の位置同定をする際に重要となる。前節の VSP 処理では、切羽後方の探査測線間で得られた平均地山弾性波速度 $V_p=4.2\text{km/s}$ を採用しているが、切羽前方地山の平均弾性波速度が分かれば、VSP 処理を実施する際に有益な情報となり処理結果の精度をより高めることに寄与する。

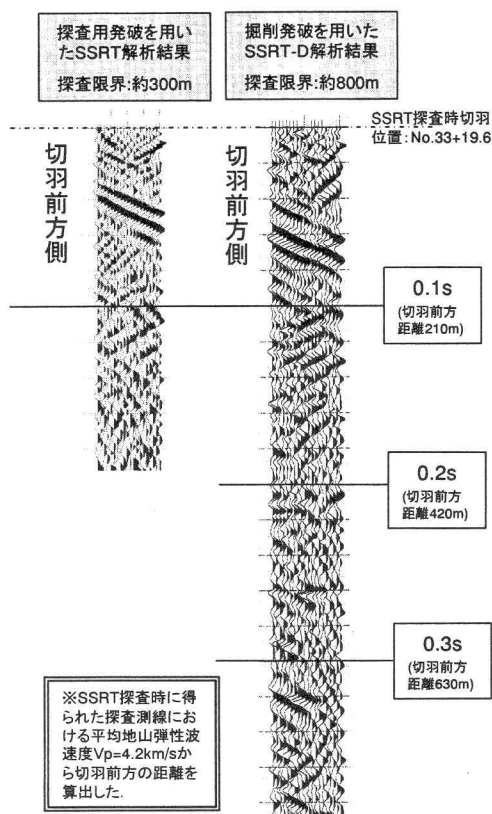


図-6 SSRT 探査と SSRT-D 探査結果の比較
(切羽前方 VSP 処理波形)

一方、図-7 に模式的に示したように、トンネルの地山状況として地山弾性波速度が比較的高い堅岩部に、ある程度の幅を有する断層破碎帯のような弾性波速度の低い領域がほぼ鉛直構造で発達していると仮定すれば、掘削発破位置に伴って坑外の受振器から得られる切羽前方の平均地山弾性波速度は図のように変化すると考えられる。すなわち、断層破碎帯に切羽が近づくにつれて徐々に平均地山弾性波速度が低下し断層破碎帯の入口で最小となり、切羽が断層破碎帯内に入ると平均弾性波速度が徐々に上昇すると考えられる。この想定は、前述した坑外受振器で得られる初動が直接波であるとの仮定に基づく。

トンネル掘削では、切羽の日常管理として切羽観察や坑内変位計測を実施しているものの、現切羽と比較して今後地山が良好となるか、あるいは地山不良箇所近づきあるかを判断することは困難である。しかしながら、図-7 に模式的に示したように、切羽前方の平均地山弾性波速度の変化から、その値が低下傾向を示す場合には、「切羽が弾性波速度が高いゾーンから断層破碎帯のように低いゾーンに向かいつつある」ことを示しており、平均地山弾性波速度

が上昇傾向を示す場合には、「切羽が弾性波速度の低いゾーンから高いゾーンに向かいつつある」ことを示唆していると考えられる。一方、切羽前方の平均地山弾性波速度に顕著な上昇・下降傾向が見られない場合は、比較的地山が均一であり、急激な上昇・下降を繰り返す場合には、地山の硬軟変化が著しいことを示唆していると考えられる。

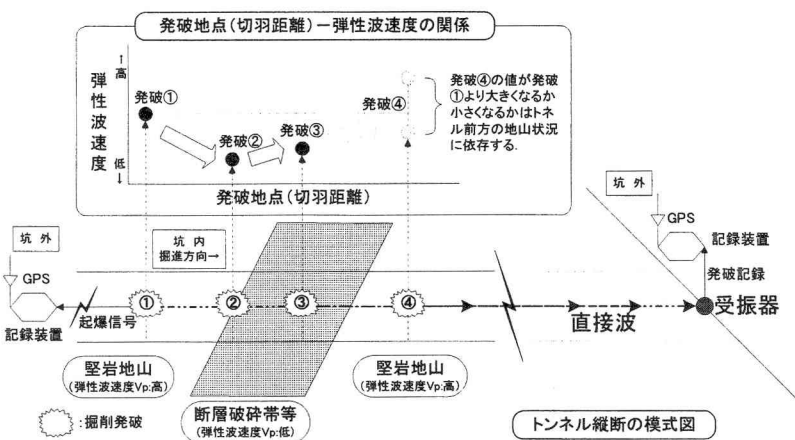


図-7 坑外と坑内の探査機器の配置および切羽前方の平均地山弾性波速度と地山性状に関する概念図〔断面図〕

以上のような概略的な切羽前方地山の予測は、切羽の日常管理（A計測）として非常に有益となり、SSRT-D探査はトンネル施工の日常管理に十分寄与する可能性があると言える。また、この切羽前方の平均地山弾性波速度の変化は、支保パターンの選定やその延長距離を判断する指標としても目安となると考えられる。

本トンネルは、図-3に示したように、起点側坑口（出口側）近傍でトンネル平面線形がカーブする。よって、切羽前方の平均地山弾性波速度を把握する目的で設置する受振器は、第1回目実験を実施したトンネル直線部の延長上に相当する坑外に設置し、掘削発破と探査用発破を記録した。

図-8に、坑外に設置した受振器で観測した掘削発破と探査用発破の初動を読みとり、切羽前方の平均地山弾性波速度を算出した結果をその発破位置における切羽観察記録の切羽評価点（評価点が高いほど良好な地山）と併記して示す。なお、図に示した発破区間における実施支保パターンはCⅡであり、地山状況に極端な変化はなくこの区間で支保パターンの変更を実施していない。

図-8より、切羽評価点は坑口からの距離で254～271m区間で低下し、地山がやや脆弱化する傾向を示している。一方、切羽前方の平均地山弾性波速度はデータが少ないものの258～275m区間で低下している。よって、切羽前方の平均地山弾性波速度と地山性状の変化には、5m程度のずれがあるが調和的な傾向を示すことが分かる。

以上の結果から、SSRT-D探査における坑外と坑内の連続的な同時観測から得られる切羽前方の平均地山弾性波速度によって、概略的に切羽前方地山の性状を予測することが可能となることが示唆されたとと言える。

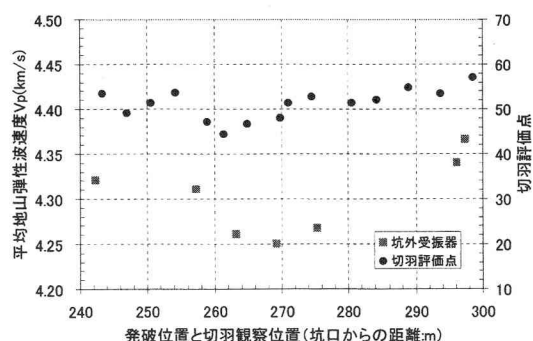


図-8 切羽前方の平均地山弾性波速度と切羽評価点の関係

なお、図-8に示した平均地山弾性波を算出した発破記録の内訳は、掘削発破が2データ、探査用発破が5データである。掘削発破記録は3データ取得されていたが、そのうち1データの発破起爆信号は100ミリ秒以下の明らかな時間遅れがありデータから除外した。前節で述べた探査用発破20孔においてはこのような起爆信号の明らかな異常は観測されていない。この起爆信号の時間遅れに対する原因は不明確であるが、坑内には高压線など様々なノイズ源があり、微弱な電気信号を取得する作業環境としては好ましい状態ではない。探査用発破は火薬量が50g/孔と少なく、受振点と発破間の距離が600m程度と遠方であることから20発破のうち5データしか初動が読みとれていない。また、この5データについても数ミリ秒程度の誤差が含まれる可能性が考えられる。

一方、第1回目の実験において、発破の起爆信号取得に関するエラー回数は、前述の1データのみであり人為的なミスを除き1/23回であった。

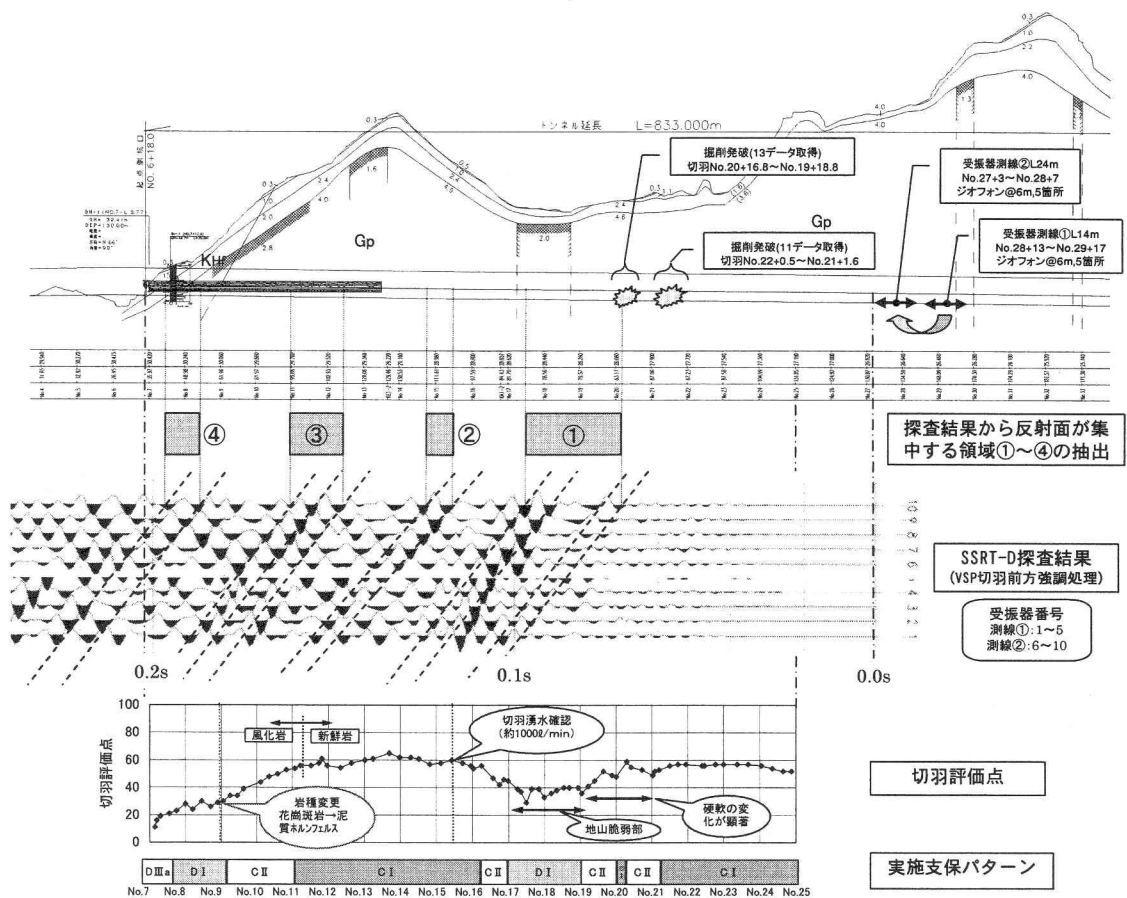


図-9 SSRT-D 探査配置および探査結果と掘削実績（切羽評価点，支保パターン）に関する総括図

(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．よって，第2回目実験では坑外での観測は実施していない．

図-9 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 13 回の掘削発破データ（切羽進行長 18m）を取得した．掘削発破の起爆信号取得やデータ取得間隔は第1回目実験と同様である．なお，第2回目の実験では，昼夜間の掘削作業で連続的にデータを取得し，発破起爆信号の取得作業を発破士が実施している．得られた発破起爆信号記録には，人

為的なミスを除き，不確かな時間遅れを有するエラー信号は含まれていない．

図-9 には，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）を総括的に示している．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領域を，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，事前調査における弾性波屈折法で想定された約 40m 区間の低速度帯 $V_p=2.0\text{km/s}$ 位置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 の 10m 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した．掘削実績から，No.21~No.19 区間は，切羽評価点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 CII と CI 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、切羽評価点が低下してきたこと、および SSRT-D 探査結果を考慮して、この地点で支保パターンを DI 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 リットル/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 CI パターンで施工可能であった。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、トンネル出口側で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 CI から CII 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ルンフェス) とほぼ一致している。

以上の SSRT-D 探査と掘削実績の対比から、坑内に最小限の観測機器を配置し、日常的な掘削サイクルにおける掘削発破を起振源として切羽前方探査が可能であり、SSRT-D 探査結果から施工中の日常管理 (A 計測) として切羽前方地山の予測が可能となることが示唆された。なお、図-9 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 SSRT-D 探査では、1 測線あたり受振点を 10 箇所程度設置することが望ましいと考えられる。

5. おわりに

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有効に活用することができる。

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ほぼ正確に取得できる。なお、坑内の作業環境や人為的なミス等から取得信号がエラーとなるケースもあり、取得記録を十分吟味する必要がある。

3) 掘削発破を用いた SSRT-D 探査と通常の SSRT

探査の結果は調和的ではば一致し、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) 坑内と坑外に同時に配置した探査機器から、切羽前方の平均的な地山弾性波速度を算出することが可能であり、この値は、切羽前方探査の VSP 処理における反射面の位置同定の際に有益な情報を提供すると同時に、掘削発破に伴う平均地山弾性波速度の変化から切羽前方の概略的な地山性状を予測することが可能である。

5) SSRT-D 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。

6) 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。

以上から、SSRT-D 探査はトンネル掘削における日常管理 (A 計測) として有効に機能する可能性が示されたと言える。

今後は、坑内に配置する探査機器の小型化を目指し機動性と安全性を向上させると同時に、様々な施工条件・地山条件におけるトンネル現場に適用し探査システムとしての完成度を高める計画である。

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.
- 5) 例えば，共立出版：現場技術者のための発破工学ハンドブック，pp.90-91，2001.8.