

掘削発破を活用する地震波干渉法による 切羽地質の評価について

村山 秀幸¹・池田 奈央²・川崎 慎治³・今野 正明⁴・由井 紀光⁵

¹正会員 株式会社フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)
E-mail: murayama@fujita.co.jp

²正会員 株式会社フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)
E-mail: nao.ikedada@fujita.co.jp

³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)
E-mail: shinji.kawasaki@jgi.co.jp

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)
E-mail: masaaki.konno@jgi.co.jp

⁵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)
E-mail: norimitsu.yui@jgi.co.jp

筆者らは、施工サイクルに影響を与えずに、掘削発破を震源とする連続的な切羽前方調査手法として、弾性波反射法のVSP処理に基づく調査手法を実用化した。しかしながら、本手法では数10発破の振動データを蓄積してから解析処理するために、結果が得られるまでのタイムラグが課題となった。そこで地震波干渉法の概念を導入すれば、1つの受振点で1回の発破振動を処理し前方地山のイメージを得ることができ、即時性と観測機器の簡素化が期待できる。本稿では、地震波干渉法の切羽前方探査への適用性に関する過去の取り組みを整理すると共に、掘削発破を震源として活用する地震波干渉法を現場に適用し、その有用性を確認すると同時に、本手法の現場での運用方法や実用化に対する今後の課題を考察した。

Key Words: *geological survey ahead of tunnel face while excavating, seismic interferometry excavation blasts, geophysical exploration*

1. はじめに

我が国の地質は複雑であり山岳トンネル工事では、施工時に予期せぬ地質に遭遇することが少なくなく、切羽崩落災害防止の観点からも切羽地質を予測・評価し設計施工に反映することが重要となる。トンネルの計画・調査段階では、各種の制約から地質調査が限定的とならざるを得ないことから、施工中の調査として削孔調査や物理探査が様々な実用化されてきた^{1,2)}。

筆者らは、トンネル坑内に高精度の原子時計を用いた観測機器を常設し、掘削発破を震源に活用することで施工サイクルに影響を与えない切羽前方探査手法(連続SSRTと称す)³⁾を実用化してきた。しかしながら、本手法では20発破程度の振動データを蓄積してから解析処理を行う必要があり、結果が得られるまでに10日程度のタイムラグが発生する。一方、地震波干渉法の原理を導入すれば、1つの受振点で1回の発破振動データから

切羽前方の反射イメージが得られ、即時性の向上と坑内観測機材の簡素化が期待できる。

筆者らは、従来からトンネル施工サイクルにおいて坑内で発生する様々な振動ノイズを用いて地震波干渉法の適用性について検討を進めてきた^{4,7)}。その結果、従来の連続SSRTと同様となるが掘削発破を震源に活用する地震波干渉法が有益であるとの結果を得た⁸⁾。

本稿では、まず地震波干渉法の切羽前方探査への適用性に関する過去の取り組みを整理し、本研究の位置づけを明らかとした。次に、現場実験として掘削発破の振動を連続的に観測し、自己相関処理による切羽前方地山の反射イメージを従来法と比較することによって検証した。最後に、掘削発破を用いた地震波干渉法の現場運用システムとして「切羽予報」のコンセプトを述べると共に、実用化に対する今後の課題を考察した。

2. 地震波干渉法の切羽前方探査への適用性検証

(1) 地震波干渉法の適用について^{4), 6)}

地震波干渉法では、異なる二点間で同時に観測された振動記録の相互相関処理 (cross-correlation) により、一方を震源として他方を受振点とする疑似的な振動記録 (仮想震源波形) を合成することができる。相互相関処理では、個別の二つの波形がどれだけ似ているかを示すことができるため、自然地震の観測記録を用いた地下のイメージング等に適用されている。

一方、地中にある震源からの波を地表で観測した透過波記録の自己相関処理 (auto-correlation) により、地表に震源と受振器を設置したと見做す反射記録を得ることができる。自己相関処理では、同一の波形記録において過去の波形が現在の波形とどれだけ似ているかを示しており、ある時間ごとに自己相関が大きくなるとは、元の波形はその時間で周期性・類似性 (繰り返し現象) を持つことを示している。

従来の連続SSRTにおける波形処理 (VSP) と上記の地震波干渉法における波形処理と得られる結果の相違点を図-1に示す。連続SSRTでは、トンネル坑内においてトンネル縦断方向に上下動12chの受振器を測線として常設配置 (トンネル側壁脚部) し、発破時刻を原子時計で記録する。従来の連続SSRTでは複数回の掘削発破記録 (通常20発破程度) がVSP処理するために必要となるが、地震波干渉法では1回の発破記録を相互相関処理あるいは自己相関処理することとなる。相互相関処理では1回の発破で受振器12ch分の仮想震源波形が得られるためその結果をVSP処理することによって、測線前後に対する反射記録を得ることができる。一方、自己相関処理では、12ch全ての処理結果が同じ記録となるはずであり、1つの受振記録を処理すれば、震源位置 (切羽) からの切羽前方の反射記録を得ることができる。

以上から、地震波干渉法を導入すれば、現在の連続SSRTの坑内観測配置における1回の発破記録で、切羽前方の反射イメージングを取得でき即時性が高い。さらに、自己相関処理によれば、原理的に受振器は1つでよく波形処理が平易で、坑内観測装置の簡素化が期待できる。本研究では、地震波干渉法として現場で運用する自動化システムの構築に有利な自己相関処理を採用した。

(2) 従来法と地震波干渉法の比較

表-1に、従来法として連続SSRTと地震波干渉法 (自己相関) の比較一覧を示す。地震波干渉法のメリットは、1回の発破で結果が得られること、筆者らが長年開発に苦慮してきた発破時刻を正確に記録 (10⁶秒精度) する必要がないこと、受振器が1つでよいことなどであり、坑内機材が簡素化でき、現場での自動化システムの構築

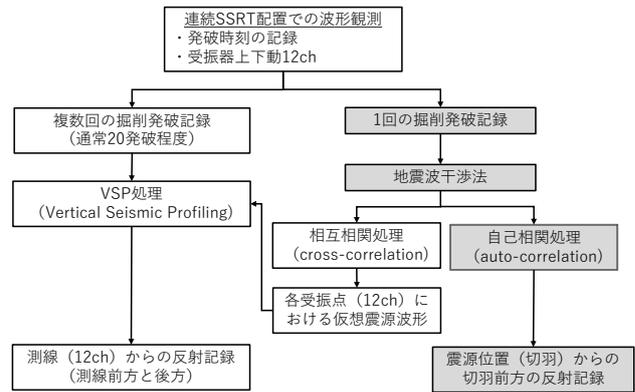


図-1 連続SSRTと地震波干渉法における波形処理と得られる結果の相違点

に有利な特徴を有していると言える。

一方、地震波干渉法の最大のデメリットは切羽後方 (坑口側) の反射イメージングが得られないことにある。一般に、連続SSRTなどの切羽前方探査手法は、トンネル掘削期間中、常に実施していることは稀であり、事前調査等から地質に不安要素、例えば断層等の分布が予測される区間で実施するケースが多い。その場合、掘削途中から探査を実施するため、切羽後方の既掘削区間の反射記録と掘削実績 (採用支保パターン、切羽観察記録、坑内変位計測など) を切羽前方の反射記録から地山性状を評価する際に参照・比較することが有益となる。

地震波干渉法 (自己相関) の探査深度は、連続SSRTの約半分程度となる。探査深度に関する両手法の考え方の相違点等に関しては、別途3.(3)、3.(4)節で後述する。

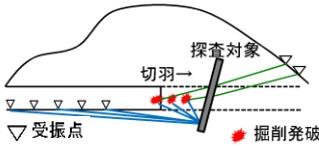
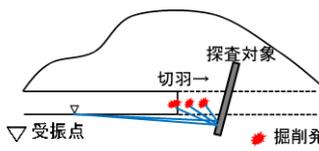
(3) 音響場シミュレーションによる検証^{5), 6)}

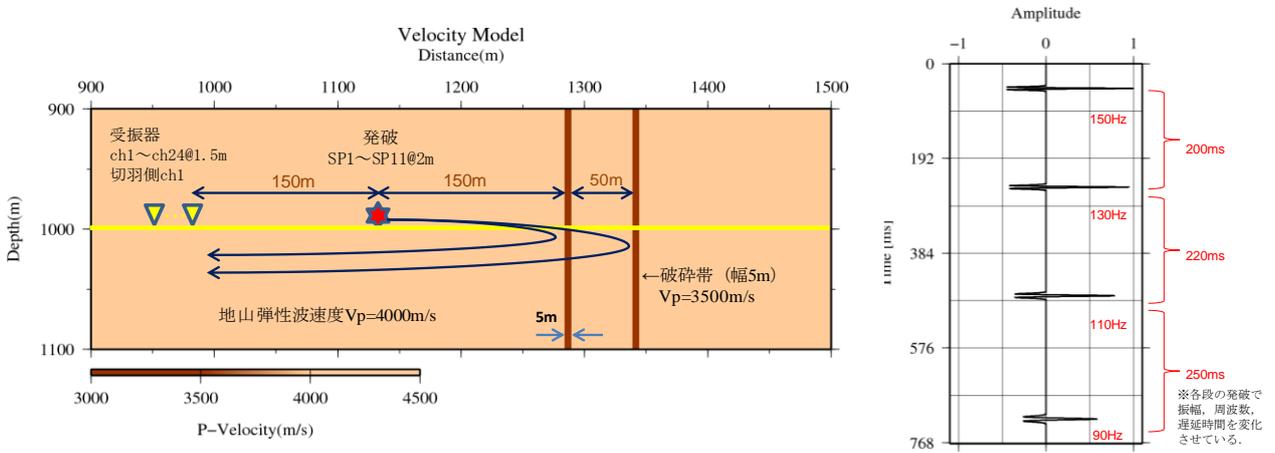
段発の掘削発破を震源とする地震波干渉法の技術成立性について、音響場シミュレーションにより検証している。ここでは、既存の検討結果^{5), 6)}の概要を述べる。

図-2に、音響場シミュレーションモデルと震源波形を示す。地山弾性波速度はP波速度で $V_p=4000\text{m/s}$ とし、掘削発破SP1~SP11を2m間隔、SP1地点の後方150mに受振器ch1~ch24を1.5m間隔で配置し、切羽前方150mと200mの2か所にP波速度 $V_p=3500\text{m/s}$ で幅5mの破碎帯を模擬した構造を配置した。震源波形は、爆薬型震源であるRicher Waveletを用い、掘削の段発発破で用いるDS雷管 (公称段間時間250ms) における起爆時間の誤差を考慮して段間時間を200, 220, 250msとし、卓越周波数を90~150Hzとした。

図-3に、段発発破を震源とする地震波干渉法 (自己相関) のモデル計算結果を、ゲート長 (解析処理時間) をパラメータとして1段目~3段目の発破を含む500msと1段目の発破のみとなる150msのケースを比較して示す。図-3にはそれぞれSP1とSP7の2地点で発破したケースの結果を併記した。

表-1 連続SSRTと地震波干渉法（自己相関）の比較一覧

	連続SSRT	地震波干渉法（自己相関）
坑内配置の概要		
発破時刻の取得	・GPS信号光伝送装置 ・原子時計（ルビジウム素子、セシウム素子等）刻時装置	ー（発破時刻は必要ない） ※振動記録装置を坑内に長期間常設する場合には内部時計の精度確保が必要
震源データ数	・掘削発破（DS雷管）：20発破程度	・掘削発破（DS雷管）：1発破
測線（受振点）	・受振器12ch@2m（基本配置）	・（原理的に）受振点1ch
波形処理	・VSP処理	・自己相関処理
結果出力の即時性	・観測機器設置後：10日程度	・観測機器設置後：数時間
探査深度（地山弾性波速度 $V_p=4000\text{m/s}$ ）	・約300m	・約50～150m（初期ノイズ考慮、連続SSRTの約半分）
得られる反射イメージの位置	・測線から前方（切羽側）と後方（坑口側）の反射イメージ	・発破位置（切羽）から前方の反射イメージ



(a) 音響場シミュレーションモデル

(b) 段発発破の震源波形

図-2 音響場シミュレーションモデルと段発発破の震源波形

図-3(a)のゲート長500msの結果から、発破地点から距離400mと440m付近に振幅強度が非常に強い反射が確認でき、この位置の反射が非常に強いために破碎帯を配置した距離150mと200m付近の記録が判然としない。この強い反射は1段目と2段目の段間時間を200ms、2段目から3段目の段間時間を220msに設定したことによる疑像（地山状況の変化ではない）に相当し、1段目と2段目の波形の類似性が自己相関によって距離400mの位置に、2段目と3段目の波形の類似性が距離440mに反映されている。

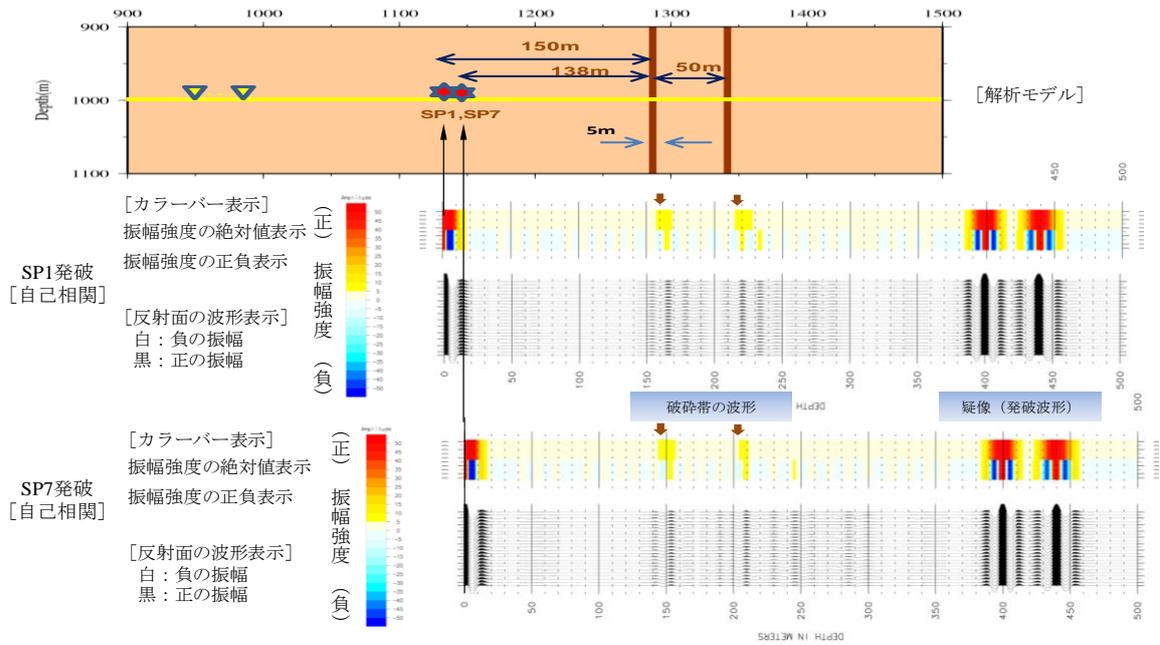
図-3(b)のゲート長150msの場合は、1つの発破振動しか含まれないことから上記のような偽像は発生せず、破碎帯を想定した位置に明瞭な反射記録が得られている。よって、段発となる掘削発破を震源とする地震波干渉法では、1段目の波形のみで2段目以降の波形を含まないゲート長で処理すれば、切羽前方の反射イメージを得ることが可能となる。これが音響場シミュレーションで示されたと言える。

一方、地震波干渉法で取り扱う振動データのゲート長は、長ければ長いほどよいとされ、ゲート長の半分程度が信頼できる処理結果であるとされている⁵⁾⁶⁾。

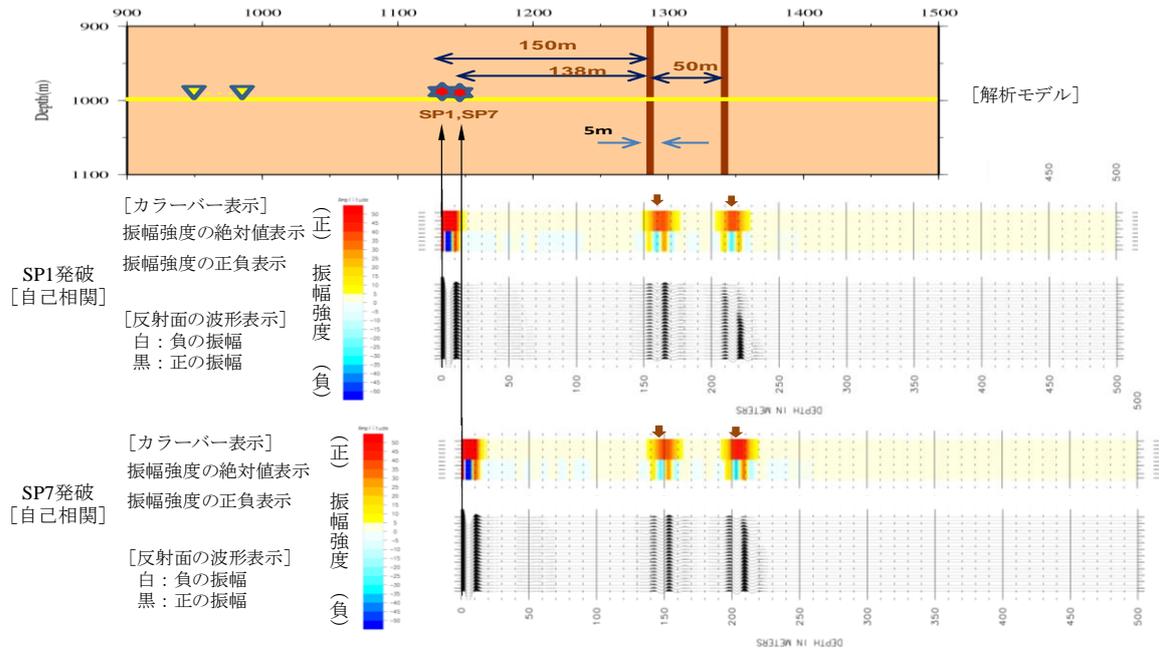
音響場シミュレーションで採用したゲート長150msにおいて信頼できる探査範囲は、地山弾性波速度 $V_p=4000\text{m/s}$ として、 $(4000\text{ms} \times 150\text{ms}) / 4 = 150\text{m}$ （往復走時とゲート長の半分を考慮）となる。

一方、図-3の自己相関処理結果からもわかるように、発破実施位置に相当するタイムゼロ点付近では、地山変化と関連しない初期反射が集中し、後続波形が埋もれてしまう傾向があることがわかる。よって、初期反射のミュート（除去）に関する考え方を検討すると同時に、切羽近傍50m程度の処理結果は信頼できないと考えた。

以上が、表-1に示した地震波干渉法（自己相関処理）の探査深度を約50～150mとした根拠である。



(a) ゲート長500ms



(b) ゲート長150ms

図-3 段発発破を震源とする地震波干渉法(自己相関)のモデル計算結果

(4) 各種の坑内振動ノイズを用いた検証結果の概要⁷⁾

表-2に、過去に実施した各種坑内作業で発生する振動ノイズに対する切羽前方探査への適用性の検証結果を一覧で示す。地震波干渉法に適した坑内作業による振動ノイズとしては、当初油圧削岩機が有望と考え注目していた。しかしながら、現場での実測振動を自己相関処理しても判然とした結果が得られないことから、表-1に示したように、ロックボルト削孔時の振動データを音響場シミュレーションの入力データとして、図-2に示したモデルで計算したところ距離50m以内に反射が集中した。表

-3に示す段発発破や機械で発生する振動の周波数と往復到達距離の試算一覧より、油圧削岩の打撃による振動は地山弾性波速度 $V_p=4000\text{m/s}$ において往復到達距離が40mに相当することから、上記シミュレーションで得られた距離50m以内の波形は、図-3(a)と同様に地山変化に関係のない偽像であることが判明した。よって、油圧削岩機による振動を用いた自己相関結果から切羽遠方の地質変化を予測することは不可能であることが検証できた。

同様に、ずり出し・こそく作業で発生する振動を用いて音響場シミュレーションを実施した結果、表-3より

表-2 各種坑内作業で発生する振動ノイズに対する切羽前方探査への適用性の検証結果

坑内作業	振動発生源（機械）	検討手法とその内容	切羽前方探査への適用性
削孔（ロックボルト打設，発破削孔）	油圧削岩機	・現場観測データを音響シミュレーションの入力振動として使用し地山変化を抽出できるかを検証	不適：油圧削岩機の打撃周波数から切羽前方探査には不適と判断
ずり出し・こそく	重ダンプ，ペイロダー，油圧ブレーカー等	・同上	不明確：振動発生源が広範囲で発生位置の同定が困難
発破	段発発破（DS雷管）	・音響シミュレーションでの検討（発破のモデル震源，現場観測データ） ・段発発破データの自己相関結果，従来手法の反射記録，切羽観察結果との対比	良好：1段目から2段目の段間時間250msを活用，実質その半分の探査可能深度となるため従来法より浅く
機械掘削	自由断面掘削機S-100	・現場観測データの自己相関結果と切羽観察結果の対比	不明確：硬岩用大型機械での更なる検証が必要

周期的な振動の発生源となる油圧ブレーカーの往復到達距離は200～400mと遠方で探査に有利であるが，想定位置に明瞭な破碎帯は確認できなかった．その要因として，ずり出し・こそく作業時には，重機が移動する範囲が広く様々な場所で振動が発生するため振動発生位置の同定が困難であること等が考えられる．

掘削発破の振動は，表-2に示した各種検討から地震波干渉法に最も有望な振動と考えられる．表-3では，DS雷管の段間時間を公称値250ms，誤差を想定した200ms，150msとして往復到達距離を試算した．地震波干渉法ではこの段間時間がゲート長に相当し，ゲート長の半分が信頼できる探査深度である．一方，連続SSRTでは段間時間200msで往復到達距離400mが探査測線からの探査深度となり，探査測線から切羽までの距離を100mとして最大探査深度300mとしている（表-1参照）．

機械掘削の振動ノイズを震源とする検討は，現状で小型の軟岩用掘削機での検証しか進んでおらず硬岩用の大型機械での検証が今後必要と考えている．

以上の検討から，掘削発破を震源に活用する地震波干渉法（自己相関）の実用化を進めることとし，その略称を「発破干渉法」とした．

3. 掘削発破を用いた現場での検証実験

(1) 適用現場の概要

発破干渉法の検証は，新三国トンネル工事（国道17号，国土交通省関東地方整備局高崎河川国道事務所）で実施した．現三国トンネルは完成後60年以上が経過し劣化が著しく，過去の補修による覆工断面の増厚により内空断面が縮小しており通行の安全性向上が求められていた．そのため現トンネルに双設する新たな2車線トンネルとして（仮称）新三国トンネル（延長L=1,284m）が計画された．図-4に，（仮称）新三国トンネルの地質平面図と地質縦断面図を示す．両トンネルの離隔はトンネルセンターで30mを基本とし，地質は新第三紀のひん岩（図-4の地質記号Po，Pe）を主体としており，ひん岩に取り込ま

表-3 段発発破や機械で発生する振動の周波数と往復到達距離の試算一覧

機械や発破による振動発生回数	想定周波数λ	地山弾性波速度Vp=4000m/sにおける往復到達距離 [(Vp/λ)/2]
油圧削岩機（3000回/分）	50Hz	40m
油圧ブレーカー（300～600回/分）	5～10Hz	200～400m
段発掘削発破（DS雷管：公称段間時間：250ms）	4Hz（250ms） 5Hz（200ms） 3.3Hz（150ms）	500m 400m 300m



写真-1 坑内側壁における観測機器の設置状況

れた泥岩（Am）が分布する．一部熱水変質帯やせん断帯が想定されているものの全般的に地山は堅硬であることから発破掘削が採用されていた．

(2) 掘削発破振動の取得

写真-1に，坑内側壁における観測機器の設置状況を示す．発破干渉法では，受振器（ジオフォン）は1つでよいが試験的に3成分（GS-ONE10Hz）と上下動1成分（GS-100Hz）を側壁脚部に設置し，原子時計付き4ch振動記録装置を用いた．振動データはトリガー設定により，ある振幅レベル以上をプレトリガー2秒で計10秒間の記録とした．サンプリング間隔は0.5msである．観測機器は，切羽の進行に伴い3回切羽側に盛替え，盛替えの初期段階で切羽からの距離が100m程度となるようにした．

表-4に，観測位置の異なる観測期間をTem-1～4と称

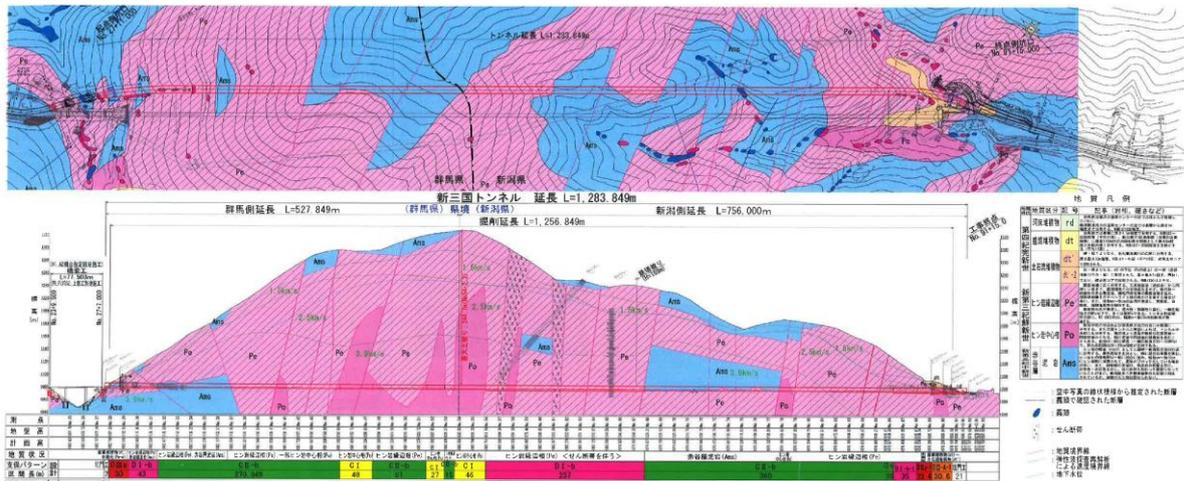


図-4 (仮称) 新三国トンネル地質平面図と地質縦断面図

表-4 観測期間(Term-1~4)における掘削発破数と処理結果の概要

観測期間	掘削発破数と連続SSRTの実施	卓越周波数	処理結果の概要と考察
Term-1 (2018/9/10~10/6)	10発破 [有効10]	50~100Hz	・地山が軟質で発破数が少なく薬量も少ない。 ⇒参考データ
Term-2 (2018/10/6 : 連続SSRT~2019/2/8)	105発破 [有効81] 第1回連続SSRT (探査用発破)	30~80Hz	・地山が硬質となり薬量も増えた。 ・発破毎の連続的な反射記録取得 ⇒第1回連続SSRTとの比較
Term-3 (2019/2/11~2/21 : 連続SSRT~4/11)	61発破 [有効26] 第2回連続SSRT (掘削発破)	30~80Hz	・同上で、発破毎の連続的な反射記録を取得。 ⇒第1,2回連続SSRTとの比較
Term-4 (2019/4/11~6/13)	103発破 [有効99]	60Hz	・前半は地山が硬質であったが、後半から軟質となり薬量が少なく、後半部分の反射記録が異質となる?
まとめ	77%有効 [216/279発破]	30~80Hz	・客観的な根拠に基づき、異質データの除去が必要となる (精度向上と品質確保)。

し得られた発破記録と波形処理結果の概要を示す。表-4から、全4期間において計279発破の振動データを取得したが、この中には、当たり発破や箱抜き掘削の発破も含まれるため明らかに薬量が少なく発破や振動データが異常なものは除去した。その結果、全取得発破の約77%にあたる216発破を有効なデータと判断し、3成分受振器の上下動成分に対して自己相関処理を実施した。

(3) 発破干渉法の処理結果に対する考察

得られた216発破の振動記録を自己相関処理した結果の妥当性を検証するために、2か所で連続SSRTを実施し探査測線前後の反射記録と発破干渉法による自己相関処理結果を比較することとした。

図-5に、観測期間Term-1の10発破とTerm-2の81発破の振動データを自己相関処理 (ゲート長250ms : 1段目のみの発破記録, 初期ミュート処理実施) した結果と2回実施した連続SSRTの探査結果を示す。図-5では、地山からの反射波の振幅強度を帯状のカラーバーで表現している。発破干渉法では、この帯状カラーバー1本が1回の発破から得られる自己相関処理結果である。このカラーバーにおいて、反射波の集中や強弱の変化が大きな箇所を地質変化が顕著な区間、反射波が弱く少ない区間を地質

が安定した区間と通常解釈している。

観測期間Term-1の結果は表-4にも示したように、この区間の地山が軟質で一部機械掘削を併用したため発破数が少なく薬量も少ないため参考データとの位置づけとなり、連続SSRTの結果との比較に不向きであった。

観測期間Term-2の結果と第2回連続SSRTの結果を比較すると、図-5に示した2か所で強反射位置がほぼ一致し整合性のある反射記録となっている。よって、発破干渉法の結果が切羽前方地山の評価に有益であると言える。同様に、図-6に観測期間Term-4における発破干渉法と連続SSRTの結果を示す。表-4および図-6から、観測期間の前半は地山が硬質で後半では地山が風化影響を受け軟質となり薬量も少なくなることがわかってる。図-6から発破干渉法の記録は、前半部分は連続SSRTと整合するが後半は整合しない。この整合しない理由は、地山の風化の違いに起因するのか、薬量の相違が処理結果に影響を与えているのか、今回のデータだけでは判断が難しい。しかしながら、発破干渉法より得られる反射イメージは、切羽前方地山の予測に有効であることが十分示されおり、データを蓄積し精度向上のための検証を進めることによって実用化が可能で有益な技術になり得ると言える。

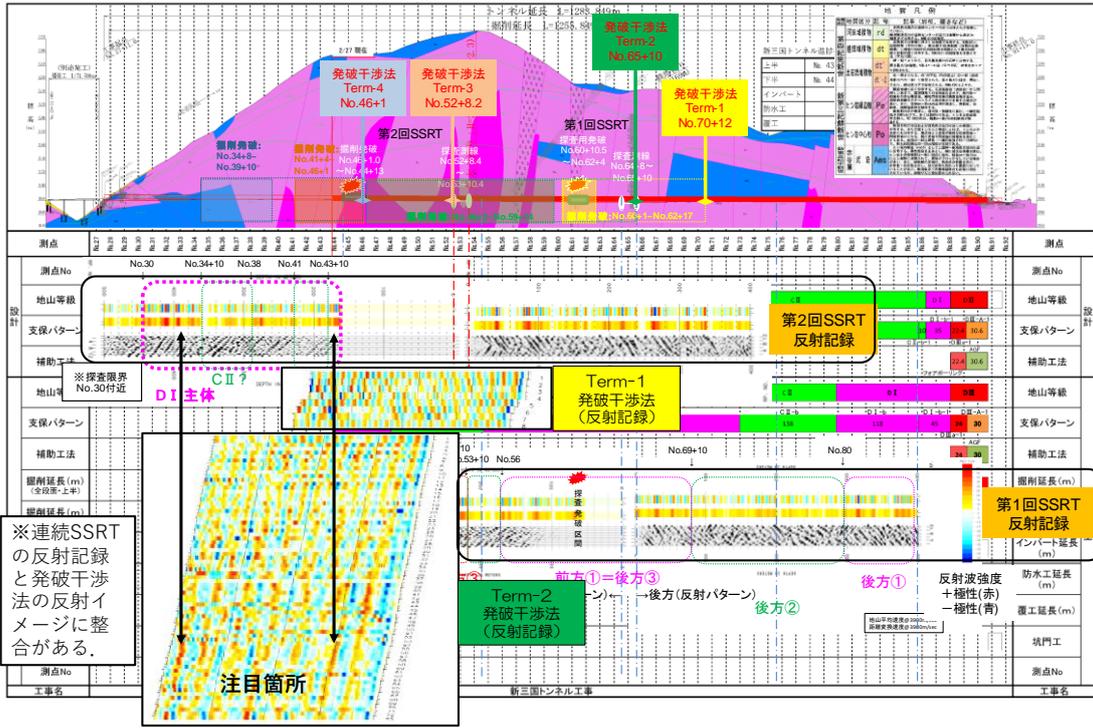


図-5 発破干渉法（観測期間Term-1, Term-2）における反射イメージと連続SSRTにおける反射記録の比較

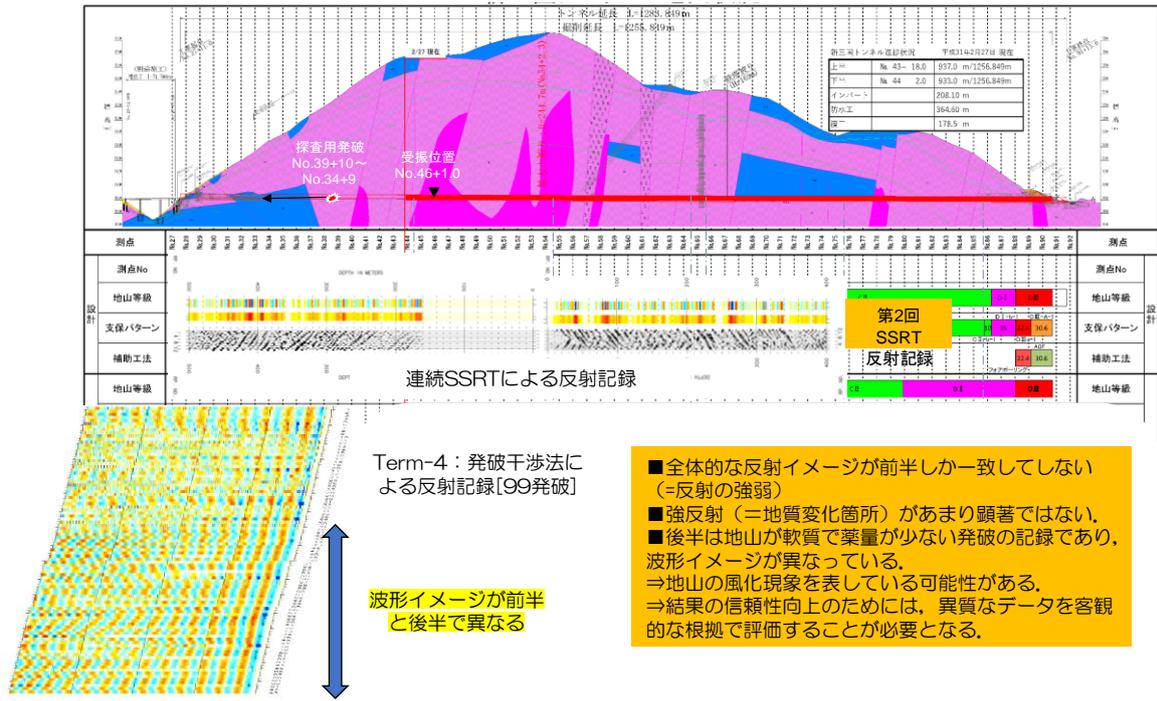


図-6 発破干渉法（観測期間Term-4）における反射イメージと連続SSRTにおける反射記録の比較

4. 現場運用におけるコンセプトと課題

(1) AIによる初動の自動ピッキング⁸⁾

地震波干渉法の現場での自動運用のためには、毎回の発破振動データの初動読み取りを自動化する必要があり、AIによる初動の自動ピッキングを試行した⁸⁾。

図-7に、転移学習を用いた初動読み取り自動化のプロ

ーを示す。図-7より、転移学習におけるモデル学習を地震データ記録とし、本学習として表-4に示した観測期間Term-3での初動記録を学習させた。以上から、観測期間Term-4での初動値の自動読み取りを実施した。その結果、手動との読み取り比較において90%程度の正解率を得たことから本手法の妥当性が示されたと考えられる。

- 全体的な反射イメージが前半しか一致してしない (= 反射の強弱)
- 強反射 (= 地質変化箇所) があまり顕著ではない。
- 後半は地山が軟質で薬量が少ない発破の記録であり、波形イメージが異なっている。
 ⇒ 地山の風化現象を表している可能性がある。
 ⇒ 結果の信頼性向上のためには、異質なデータを客観的な根拠で評価することが必要となる。

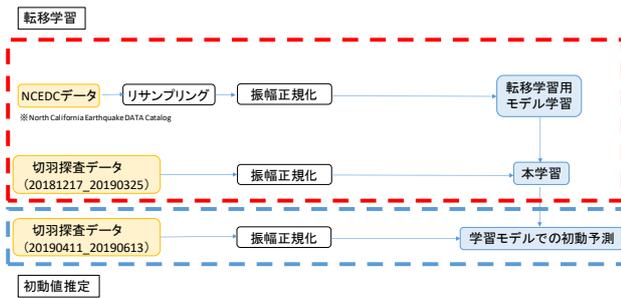


図-7 転移学習を用いた初動読み取り自動化のフロー

(2) 「切羽予報」の開発コンセプト

通常、発破掘削によるトンネルでは、昼夜作業として発破を一日に3～5回程度実施するため、発破干渉法に必要な振動データがその頻度で取得され、切羽前方の反射イメージを自己相関処理で得ることができる。この次々と予測結果が得られることが、従来の調査や探査とは異なる特性である。一方、地震波干渉法として波形処理が平易な自己相関処理を選択したことから、現場での自動化システムの構築と運用が容易となる。

以上の特徴を生かした発破干渉法による切羽前方予測システムを「切羽予報」と称することとした。切羽予報とは天気予報を模した名称であり、そのコンセプトとして、「最新のデータを用いて適時、適切に切羽地質の予報結果を修正、見直す機能を有すること、短期予報として本日掘削する区間の予報、長期予報として今週や今月の切羽地質の推移などの情報を的確に発令・修正できるシステムとすること」などを開発目標としている。

図-8に、現場に波形処理を実施する現場処理サーバーを導入し、切羽予報を適時発令して現場内で情報の共有化と活用を実施するイメージを示す。このイメージ図のうち、システム化の上で最も難しいのは、切羽予報の精度向上のため予報の採否を判断し、次の予報に反映するロジックであると考えている。

(3) 今後の課題

図-9に、現場における振動データの取得から切羽予報までの処理フローの概略を示す。①振動収録装置のトリガー設定機能である一定振動レベル以上のデータを自動的に取得し、②AIを用いた初動ピックアップ機能を用いたデータの切り出しまでの手順は、既に構築されている。

次に、発破は坑内で発生する最も振動レベルの大きな振動であるが、受振点近傍における作業ノイズが取得されるため、③掘削発破以外のデータを除外することが必要となり、周波数特性等から比較的容易に選別可能と考えている。

本システムにおける今後の重要な課題は、④の結果の信頼性向上と精度確保（データの品質確保）および、切羽予報における判定基準と見直しに関するアルゴリズム

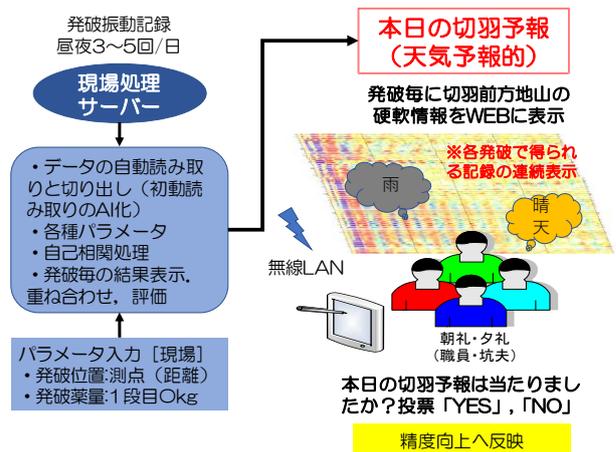


図-8 現場処理サーバーと切羽予報のイメージ図

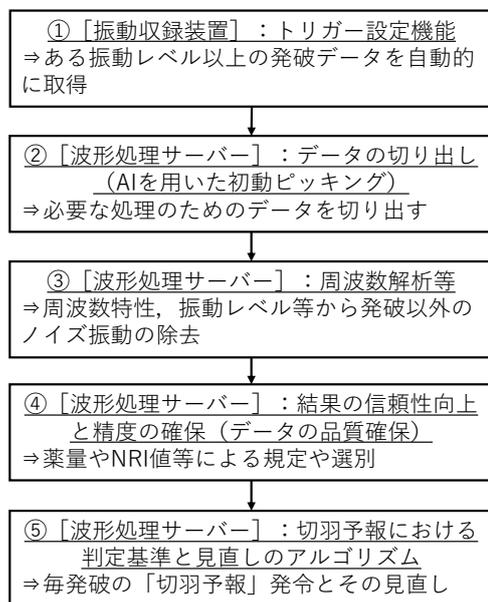


図-9 振動データ取得から切羽予報までの処理フローの概略

ムであると考えている。一般に、弾性波探査ではS/N比を向上させることがデータの品質確保に繋がるとされているが、地震波干渉法の場合、従来ノイズとして扱われていたランダム性の高い振動を対象としていることから、従来と異なる考え方が必要となる。よって、筆者らが波形のランダム性を示す指標として提案したNRI値⁷⁾を参照することを考えている。一方、段発の掘削発破において、各段それぞれの薬量を確定することは困難であるが、各発破における総薬量は施工管理上必要な情報であり容易に知ることができる。

図-10に、前章の現場検証における観測期間Term-4におけるNRI値、掘削発破総薬量、切羽前方の反射イメージを対比して示す。図-10に示した反射イメージの相違は、前章では、振動データの品質の相違が地山の風化の違いを示している可能性を示したが、この区間はNRI値が5以下かつ総薬量が30kg以下の発破データに相当し、

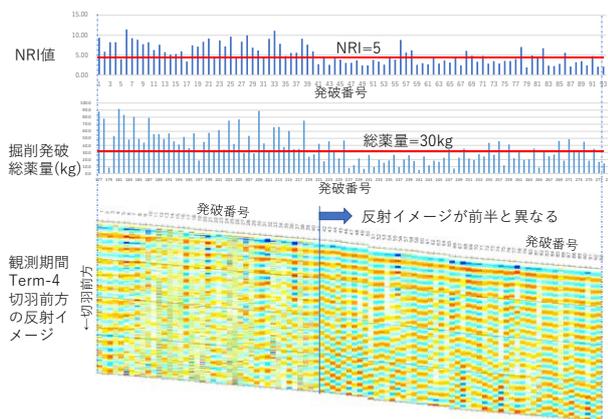


図-10 観測期間Term-4におけるNRI値，掘削発破総薬量，切羽前方の反射イメージの対比

データの品質確保の指標としてNRI値や総薬量は有効となる可能性を示していると言える。

なお，既存報告⁷⁾では，地震波干渉法に適する波形のランダム性の指標としてNRI値100以上が望ましいことを指摘している．今回現場で測定された掘削発破波形のNRI値は最大でも20程度であり，掘削発破の振動波形は，複数の段発データを含まない場合においてもランダム性が低く，周期性や類似性が高いと言える．掘削発破におけるNRI値に関する検討も今後の課題となる．

図-9の⑤切羽予報の判定基準と見直しに関するアルゴリズムは，今後の現場適用で検証を進めたい。

5. おわりに

本稿では，掘削発破を活用する地震波干渉法による切羽地質評価について，まず過去の様々な取り組みから掘削発破の自己相関処理が現場での自動化システムの構築に有利となることを示した．次に，現場適用によって，毎日数回実施される発破振動を約300発破取得し，発破干渉法の切羽地質評価への可能性を従来法と比較検証することで明らかとした．最後に，本手法では，切羽前方の反射イメージを掘削発破毎に得ることができ，その特性を生かした自動化システムとして，天気予報を模した

切羽予報の開発コンセプトについて述べた。

今後の課題として，予測結果の信頼性向上と精度確保，切羽予報における判定基準と見直しのアルゴリズムの構築等に関して現場適用を通じて検証を進めたい。

謝辞：本研究を進めるにあたり，国土交通省関東地方整備局高崎河川国道事務所の関係者には，本手法の現場適用に関してご理解とご助言を賜った．株式会社フジタ新三国トンネル作業所のメンバーには，現場作業と機器管理に対するご便宜と本手法の実用化に向けた貴重なご意見を賜った．ここに関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 村山秀幸，岡崎健治，山崎秀策，倉橋稔幸，亀村勝美：切羽前方地質の調査手法と地山評価における現状と課題に関する考察，土木学会第29回トンネル工学研究発表会，土木学会トンネル工学報告集，第29巻，1-9，2019.
- 2) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，pp119-123，2009.
- 3) 村山秀幸，丹羽廣海，大野義範，押村嘉人，渡辺義孝：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，土木学会トンネル工学報告集，第20巻，pp.51-58，2010.11.
- 4) 村山秀幸，野田克也，石川浩司，藤原明，清水信之：切羽前方探査における地震波干渉法の試行，土木学会トンネル工学報告集，第22巻，pp.169-176，2012.11.
- 5) 村山秀幸，丹羽廣海，野田克也，新部貴夫，東中基倫：切羽前方探査における地震波干渉法の適用性検証，土木学会トンネル工学報告集，第23巻，pp.11-18，2013.11.
- 6) 村山秀幸，丹羽廣海：トンネル前方探査における地震波干渉法の試行，フジタ技術研究報告，第52号，pp.15-26，2016.
- 7) 村山秀幸，新井智之：トンネル前方探査における地震波干渉法の試行（その2），フジタ技術研究報告，第53号，pp.9-18，2017.
- 8) 川崎慎治，田中康久，村山秀幸，新井智之，菅原宗，今野正明，由井紀光，東中元基倫，小沢光幸：AI初動キングを利用したトンネル切羽前方探査の自動化に向けて，第141回（2019年秋季）物理探査学会学術講演会，pp.17-20，2019.10.

(2020.8.7受付)

CONSIDERATION FOR GEOLOGICAL CONDITON OF TUNNEL FACE USING EXCATION BLASTS AS SEISMIC INTERFEROMETRY SOURCES

Hideyuki MURAYAMA, Nao IKEDA, Shinji KAWASAKI,
Masaaki KONNO and Norimitsu YUI

The authors had developed SWE-SSRT (Seismic While Excavating using Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels) based on VSP (Vertical Seismic Profiling). This method uses excavating blasts as seismic sources which avoid interrupting tunnel construction works. However, it is a problem to cause the time lag of analysis work until blast vibrational data was accumulated. By using seismic interferometry theory, we can get the reflection images ahead of tunnel face using either only one excavating blast or geophone. And so, the immediacy of process and simplification of observation equipment can be expected. This paper describes the consideration for geological condition of tunnel face using excavation blasts as seismic interferometry source.