

切羽前方探査におけるS波探査と 地震波干渉法について

村山 秀幸¹・丹羽 廣海²・野田 克也³・藤原 明³・東中 基倫³

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 (同上)

E-mail:hiroumi.niwa@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: katsuya.noda@jgi.co.jp, akirafujiwara@jgi.co.jp, motonori.higashinaka@jgi.co.jp@jgi.co.jp

筆者らは、トンネルの施工時調査として弾性波反射法のVSP処理に基づくトンネル浅層反射法探査 (Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels, 以下SSRTと称す)を開発してきた。SSRTはいくつかの開発ステージを経て、現在掘削発破を震源とする連続SSRTとしても実用化している。切羽前方探査ではP波を用いた反射法探査が主流であるが、さらにS波が活用できれば、地山の物性等を評価できる可能性が示唆されより多角的な地山評価が期待できる。一方、従来ノイズとされてきた様々な振動記録を活用して地下構造をイメージングする地震波干渉法が注目されている。本稿では、S波探査と地震波干渉法をトンネル前方探査に活用する取り組みについて現状と課題を報告する。

Key Words : *Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels(SSRT), P-wave, S-wave, seismic interferometry, auto-correlation,*

1. はじめに

筆者らは、施工中の切羽前方探査技術として、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、多くのトンネルに適用^{1)~6)}してきた。SSRTの実用化においては、山岳トンネル掘削方式と探査手法の汎用性に着目し、まず震源が「発破か機械か」に注目して、発破震源として探査用の小葉量発破、機械震源として油圧インパクトとバイブレータによる探査手法を確立した¹²⁾。次に、山岳トンネルの地山トラブルは、小土被りの坑口付近で発生する頻度が高いことから「坑口部 (坑外)」に注目し、坑外からの坑口部の探査を機械震源によって確立³⁾した。また、その間 TBM 等の特殊な山岳トンネルにおける適用性も検証した⁴⁾。

一方、これらの切羽前方探査作業は、探査機器および震源が 1 日程度の短期間であるが、坑内を占有するため探査の実施が休日等に限定され、本当に必要とされる適切な時期に探査ができないという課題を考慮し、「掘削

サイクルへの影響」に注目し、掘削に用いる段発発破を震源とする連続 SSRT (SWE-SSRT : Seismic While Excavation using SSRT)を開発⁵⁾⁶⁾した。連続 SSRT は、掘削に発破を用いるトンネルに適用が限定されるものの坑内に探査機器を常設し、必要に応じて適切な時期に波形処理を実施し前方を探査することをコンセプトとしており、掘削サイクルに影響を与えない。

S 波を用いる切羽前方探査としては、TSP が実用化に成功したとして市販され、本手法を用いた報告がなされている⁷⁾が、技術的根拠を示すデータの開示がなされておらず、S 波の抽出方法や S 波区間速度の算出方法等に関する技術的妥当性が議論できない状況にあると言える。

地震波干渉法⁸⁾は、従来の弾性波探査の理論とは異なり、従来ノイズとして扱われてきた振動記録を探査に活用しようとする試みであり、特別な震源が必要無く探査機器の省力化がはかれるなどトンネル前方探査にとって魅力的でありメリットが大きいと考えられる。

Petronioら⁹⁾の提案するTSWD (Tunnel Seismic While Drilling) は、施工中のTBMにおける掘削振動ノイズの主

波成分を用いた地震干渉法（自己相関）の適用事例であるが、トンネル掘削後に振動データを取りまとめたと考えられ施工中にS波地震波干渉法探査を実施し設計・施工に反映した事例ではないと考えられる。

本稿では、山岳トンネルの切羽前方探査におけるS波探査と地震波干渉法における現在までの筆者らの取り組みと課題について報告する。

2. S波探査の現状と課題

(1) 概要

S波をトンネル切羽前方探査に活用するメリットとしては以下が想定される。

①S波はP波と比較して振幅エネルギーが大きいことから長深度の探査が期待できること。

②P波とS波速度が同時に得られ密度が既知の場合地山物性値の推定に活用できること。

③P波とS波では地下水に対する性状が異なることから、S波は地下水探査としての有効性が示唆されること。

一方、S波はP波の後続波として観測されP波と同時にS波成分を高品位で抽出することが一般に困難であること、S波にはSV波とSH波があり、SV波は伝播中に境界面においてP波に変換したりP波から変換されたりするのでS波の取り扱いには注意が必要であることなどが、S波を切羽前方探査に活用するための課題と言える。

S波を切羽前方探査に活用する手法は、TSPが実用化したとして海外において適用事例の報告⁷⁾が散見されるが、国内では技術的根拠となるデータの開示が無く懐疑的であるとの見方がなされている¹⁰⁾。

TSPで用いる震源は、トンネル側壁に穿孔した発破孔における小薬量の発破であり、発破孔後方の両側壁に穿孔した受振孔で振動を観測する。この探査用発破は、タンピング材として水を用いるいわゆる鉄砲発破であることから、発破時に水が孔壁と接触しせん断波であるS波が発生する可能性が示唆される。

一方、掘削発破は段発で1段目は芯抜きであり爆破によって岩片が周辺岩盤と接触しながら押し出されることによってS波の発生が期待できると考えることもできる。よって、筆者らは探査用発破と掘削発破のS波発生実験に関して報告している¹¹⁾。その結果、探査用発破と掘削発破1段目の直接波においてS波の発生が確認できたが、切羽前方探査（反射法）に適用するためには、S/Nを上げる工夫が必要となりより高品質にS波を抽出する必要があるとしている。

以上から、従来の弾性波探査における発破震源では、タンピング材として砂等を用いて極力S波の発生を抑える発破方法を採用しているといえ、発破は最も良好なP

波震源として活用されてきた。しかしながら、発破方法によっては、S/N比が高いS波を抽出できる可能性が示唆されたといえる。

一方、S波震源としては、従来からの板たたき法が現在でもPS検層などに用いられているが、起震にハンマーを用いるためその振動エネルギーは限定的であり長深度の探査には不向きである。一方、その他のS波用機械震源としては、打撃角度を左右に傾けることができるS波用油圧インパクトやS波用バイブレータがある。

(2) S波用機械震源による切羽前方探査

S波用油圧インパクトとは、写真-1に示すように打撃角度を左右に傾けてベースプレートに打撃することによりせん断波を地盤に伝播させる構造となっている。この左右打撃によって得られるP波の振幅方向は、同方向となるが、S波の位相は逆方向となる。よって、左右打撃における振幅を適切に揃えて減算処理すればP波の影響を除去しS波のS/N比を向上することができる。このS波用油圧インパクトを用いたP波とS波による探査事例は既に報告¹²⁾した。

本稿では、S波用バイブレータを用いた探査事例について報告する。写真-2に、坑内で使用したS波用バイブレータを示す。本機は、車載型で機動性に富みS波用バイブレータとしては最も小型であり、写真に示したようにバイブレータのマスを水平に設置すればS波発震、鉛直に設置すればP波発震が可能となる。現場測定においては、測線直交方向に加振しSH波を水平受振器で受振する。当然ながらS波探査では、水平動を測定できる1成分（SH方向）あるいは3成分（上下動と水平動SV,SH方向）の受振器を使用する。写真-3に、水平動受振器と上下動受振器の設置状況を示す。

図-1に、切羽前方（測線切羽側）および切羽後方（測線坑口側）のS波探査結果を示す。本現場では比較のためのS波用油圧インパクトによる探査も同時に実施していることから油圧インパクトによるS波探査結果も併記する。図から、カラーバー表示として反射面を強調している箇所において、バイブレータとインパクトの結果に多少の相違があるが、白黒で表示した反射波の並びや反射パターンがほぼ一致していることが分かる。よって、バイブレータ、インパクトを用いたS波震源によって共に探査深度200～300mの前方探査が可能であることを示し、SH反射波を良好に捕らえたと考えられる。

なお、本現場では、測線後方では比較的地山が良好であったが、測線付近から地山が急激に脆弱化した。よって、図-1に示したように、S波速度 V_s を切羽後方では1200m/s、切羽前方では800m/sを採用している。その後の掘削記録から切羽地山が脆弱化したことから、 V_s 速度値の設定はほぼ妥当であったと考えられる。



写真-1 S波用油圧インパクトによる左右打撃状況¹²⁾



(a)車載型S波発震用パイプレータ全景



パイプレータのマスをS波用に変更

(b)パイプレータマスと振動方向



(c)S波発震状況（測線方向）



(d)S波発震状況（測線直交方向）

写真-2 S波用パイプレータの構造と現場での発震状況

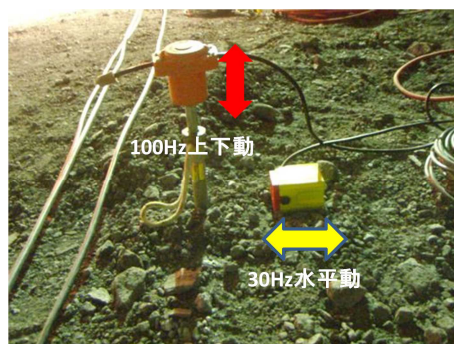


写真-3 水平動受振器と上下動受振器の設置状況

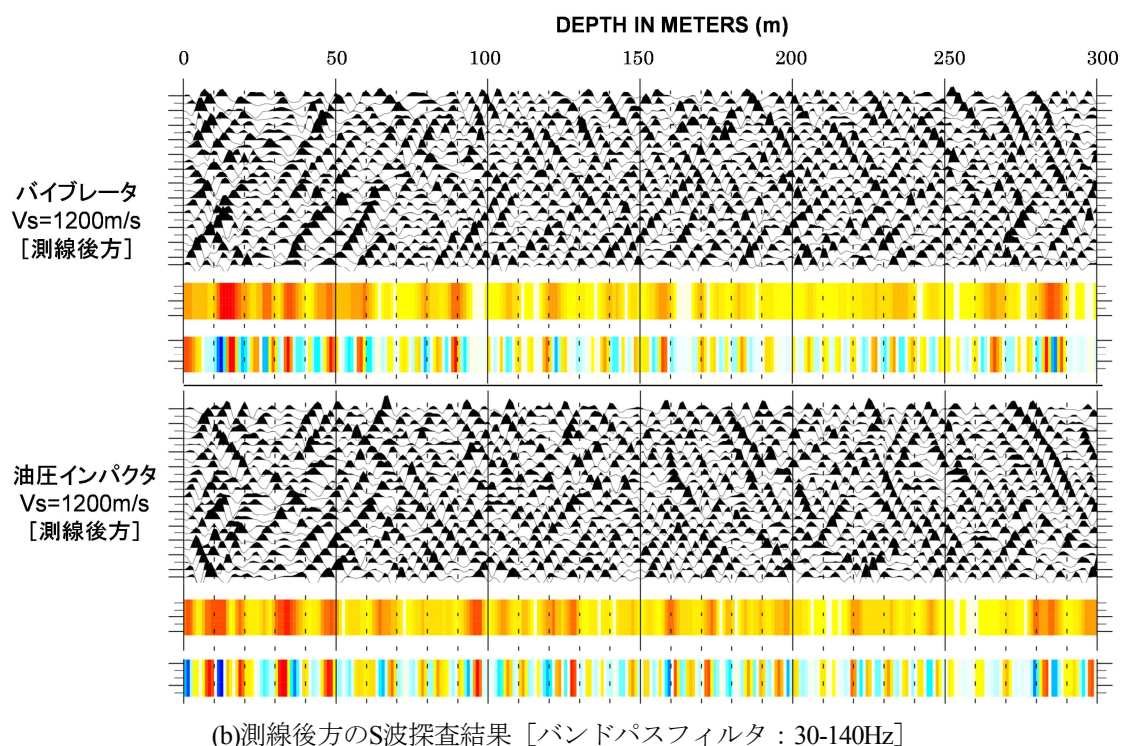
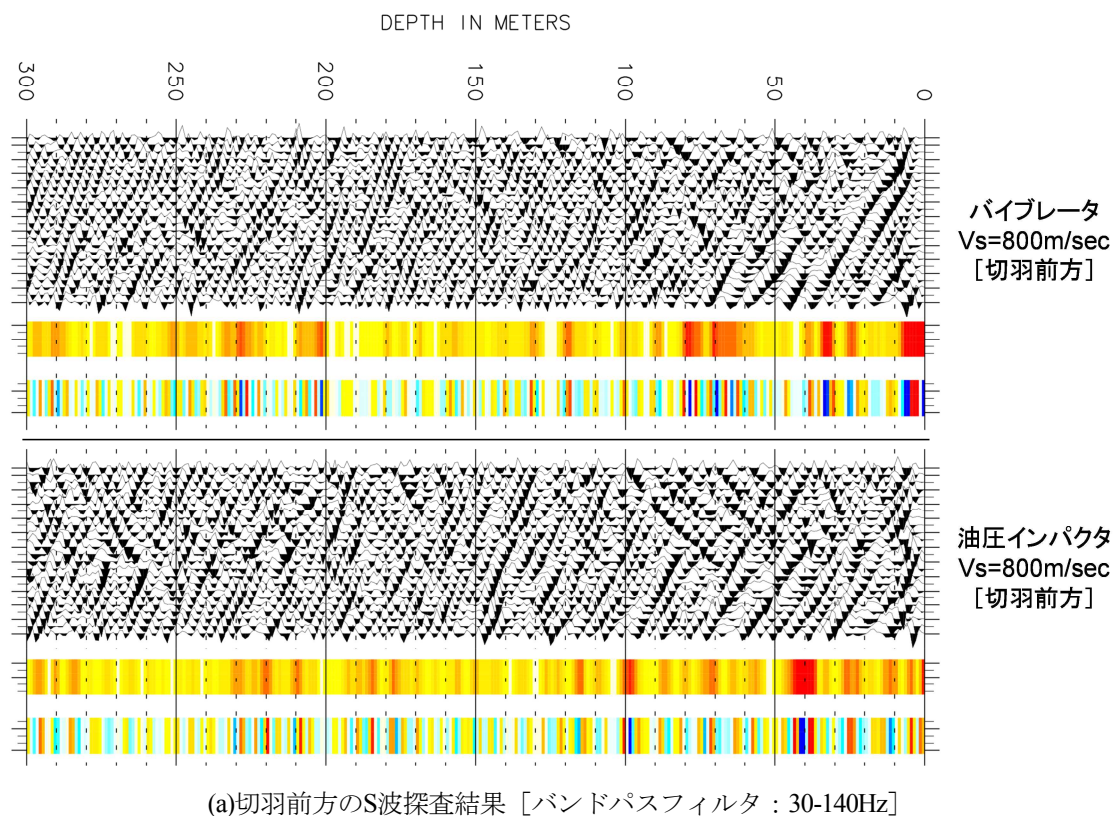


図-1 S波探索結果の対比

(3) まとめ

S波探索に関しては、油圧インパクトやバイブレータなどのS波用震源を用いれば通常のP波を用いたSSRTと同じ手順で良好な探索が実施できることを示した。よって、例えば、湧水が豊富なトンネルにおいてP波とS波を併用した探索の適用が今後期待できる。

しかしながら、S波用震源は探索時に坑内を占有するためトンネル掘削サイクルに影響を与えないためには、掘削発破において品質の高いS波を抽出しS波探索に適用することが今後の課題となる。なお、VSP処理において切羽前方のP波とS波の区間速度を算出する手法に関しては別途課題が残る。

3. 地震波干渉法の現状と課題

(1) 概 要

地震波干渉法を切羽前方探査に活用するメリットとしては、以下が想定される。

①専用の震源を必要としない。坑内作業で発生する様々な振動ノイズを震源として活用できる。当然、従来震源として活用してきた掘削発破や油圧インパクトの振動もノイズと同様の取り扱いとなる。

②①から震源として活用する掘削発破の起爆時間を正確に坑内で記録する必要がない。よって、連続SSRTで発破時刻を記録するために必要な原子時計を坑内に持ち込む必要が無い。ただし、坑内に常設する振動記録装置の時計精度の確保は必要となる。

③SSRTや連続SSRTにおける受振器は12～24chを標準としているが、地震波干渉法では最低1つでよい。

④①～③によって、坑内に設置する観測機器が少なくなり探査装置の簡素化や省力化が期待できる。

⑤地震波干渉法の波形処理で扱うデータは微弱な振動ノイズであり、従来の弾性波探査において結果を左右する振動データのSN比や品質といった概念が存在しない。よって、S波探査の導入に有利であることが示唆される。

一方、課題としては、トンネル坑内で発生している振動ノイズのうち前方探査に適した振動データとはどのような振動データでありどのように処理すべきかが検証されていないこと、探査結果の信頼性や探査深度に関して検証がなされていないことなどが挙げられる。

前述のように、地震波干渉法を用いたトンネル前方探査に対する既往研究として、TBMの掘削振動を用いたTSWDがある。

一方、筆者ら^{10,13)}は、従来からの震源である掘削発破の振動データに着目した地震波干渉法の適用性に関する検証を実施している。まず、従来のSSRTあるいは連続SSRTの観測機器の配置において、音響場シミュレーションを用いてモデル実験を実施し地震波干渉法の適用可能性に関して言及し、掘削発破を地震波干渉法で取り扱う場合の課題を整理した¹³⁾。次に、連続SSRTを実施したトンネルにおける観測データを用いて、掘削発破を用いた地震波干渉法を試行しその適用性と課題を報告した^{10,13)}。

以上から、現在までの検討において掘削発破を用いた地震波干渉法による切羽前方探査は可能であることを示したと言える。すなわち、掘削発破の場合には、1段目から2段目の段間時間を自己相関処理における解析時間（ゲート長）として採用することが適切であること、このゲート長を採用する場合原理的に探査深度が従来の連続SSRTの約半分程度になることなどを示した。一方、切羽前方探査に最適な振動ノイズや探査結果の信頼性に関する検証は今後の課題である。

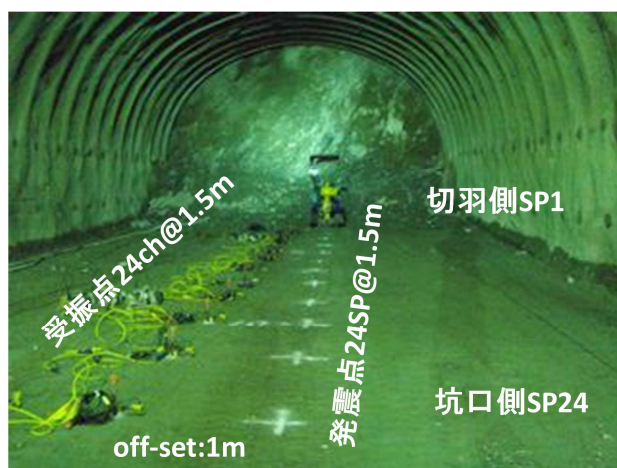


写真4 探査測線の配置状況 (P波, S波測定) ¹²⁾

(2) 地震波干渉法による切羽前方探査

本稿では、地震波干渉法の適用として、P波とS波の発震が可能な油圧インパクトを震源、すなわち振動ノイズと想定してP波とS波の地震波干渉法を実施した。

写真-4に適用現場における観測機器の配置を示す¹²⁾。現場は、油圧インパクトの左右打撃によりS波探査の可能性を検証した現場であり、SSRT配置によってP波とS波を測定している。

図-2に、切羽側のSP1を発震点とするP波とS波に相当する振動データを自己相関処理した結果を示す。地山のP波速度は3 200m/s、S波速度は2 000m/sであり、自己相関処理のゲート長は0.5秒である。自己相関処理ではゲート長の半分が信頼できる範囲と考えられることから、このゲート長を切羽前方距離に変換するとP波で400m（速度3 200 × ゲート長0.25秒/往復走時2）となりS波で250mとなる。

図-3に、自己相関による反射波形と複数受振点における重ね合わせの概念図¹⁰⁾を示す。図は、掘削発破を震源とする連続SSRTにおける観測配置であるが、SSRT配置においても基本的には同様となる。

図-3の概念図を考慮し、油圧インパクトを震源とする図-2のP波とS波の自己相関波形を考察すると、反射波に相当する波群が識別できるものの部分的に反射波に相当する波形の並びが不規則に乱れており、切羽前方の反射波を明確に捕らえた波群とは言い難い。特に、P波とS波ともに受振点SP1～3あるいはSP18～24における波群は、図-3に示した概念図のように整然と並んでおり反射波に相当する波群と考えられるのに対して、受振点SP4～SP17における波群の乱れが顕著であり反射波に相当するとは評価できない。なお、図-3の概念図で示した切羽前方の反射構造（断層や破碎帯）が傾斜している場合、自己相関波形が一定方向に傾斜して得られる可能性も示唆されるが、規則的な傾斜波群も見られない。

以上のような自己相関波形の不規則性を検討するために、各受振点における地盤状況の相違点を検証した。

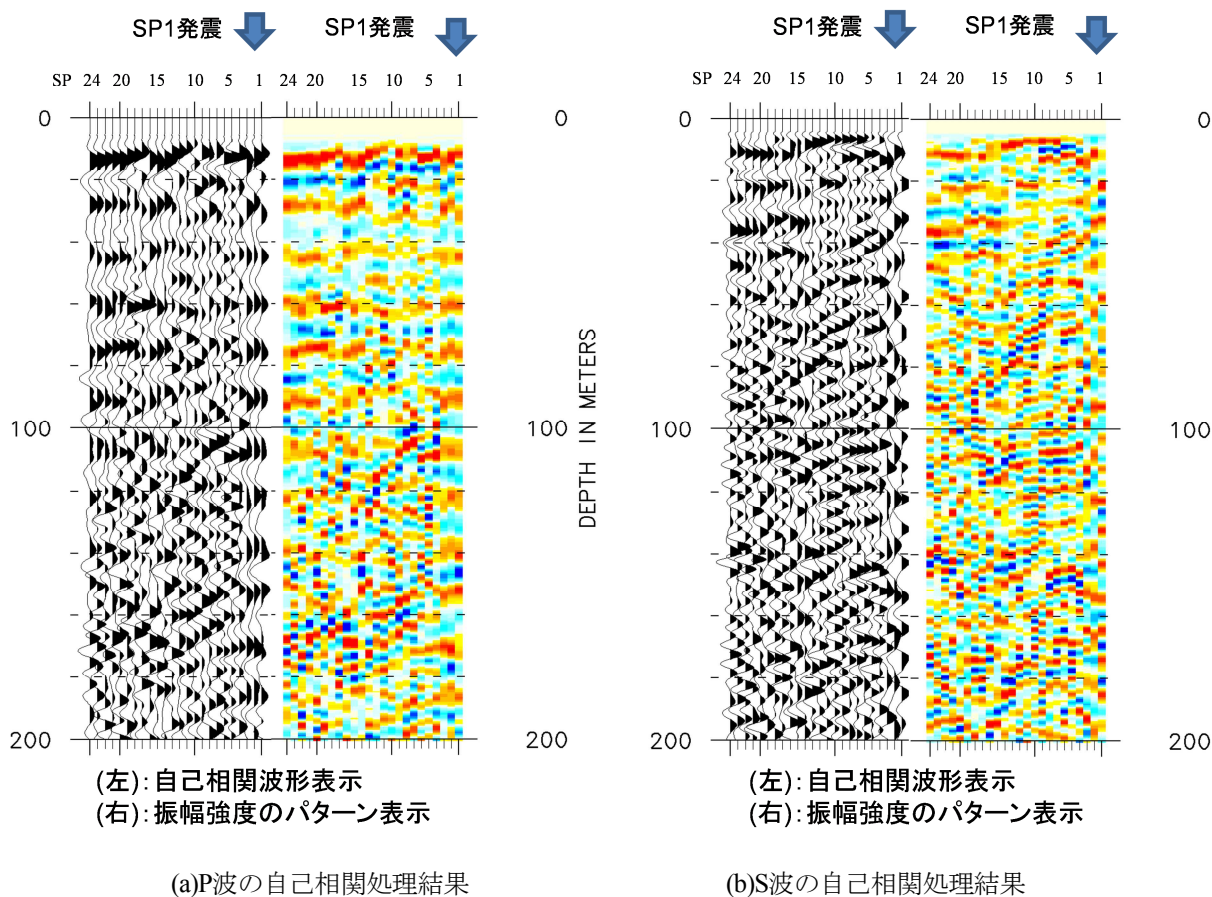


図-2 P波とS波の自己相関波形図（切羽側SP1発震）

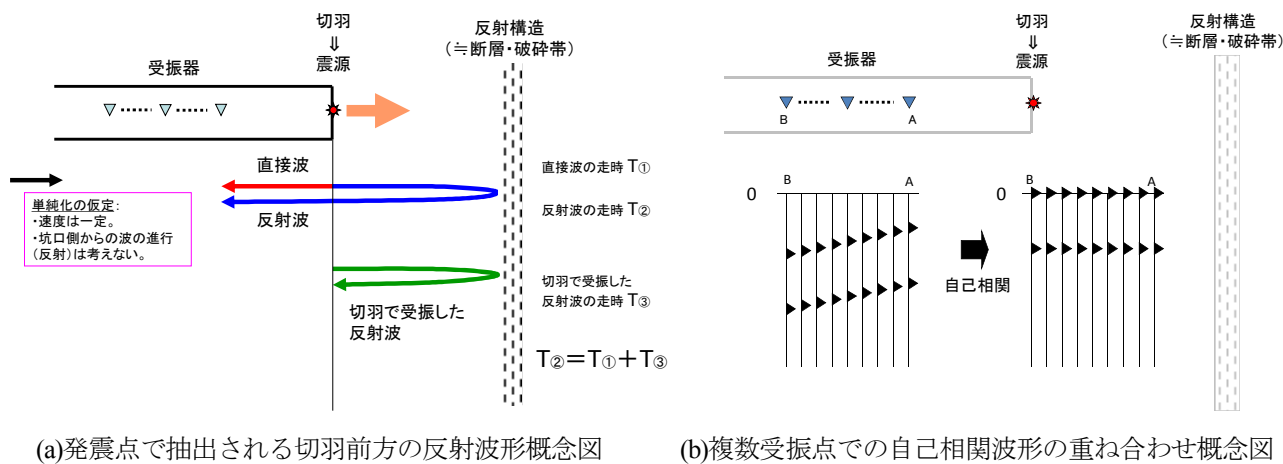
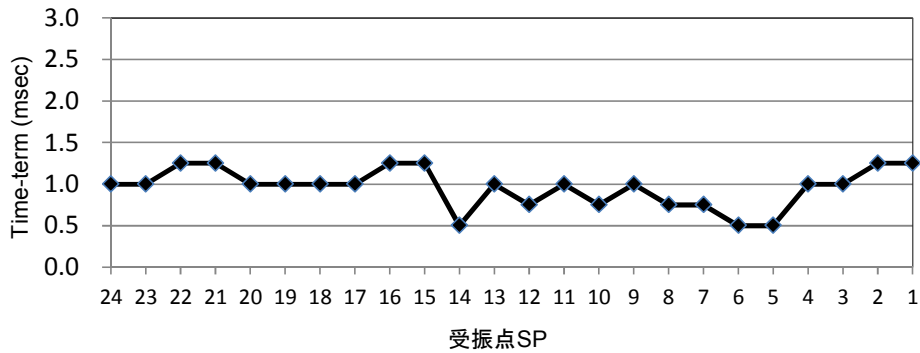


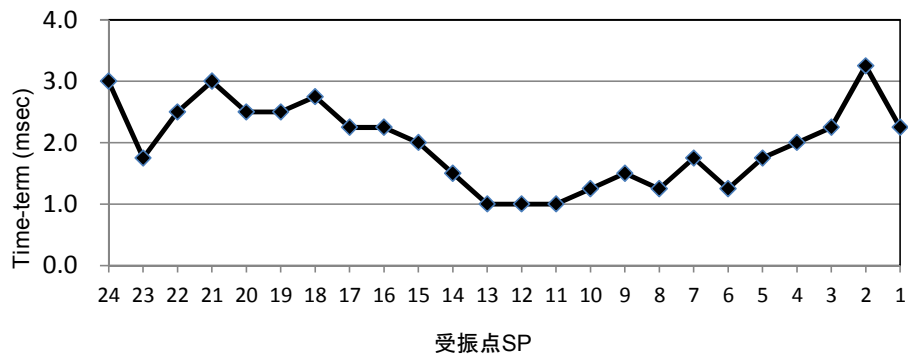
図-3 自己相関による反射波形と複数受振点における重ね合わせの概念図¹⁰⁾

図-4に、簡易的な弾性波屈折法に相当するタイムターム法を用いて測線の底盤構造をP波とS波によって推定した結果を示す。図-4は、基盤を二層構造と仮定して表層と基盤の速度を仮定した場合の受振点位置におけるタイムターム値（ミリ秒）を示しており、この値の相違が表層深さの相違（基盤の凹凸）に相当する。図-4は、P波の基盤速度を4100m/s、表層速度を600m/sと仮定し、S波の基盤速度を1900m/s、表層速度を300m/sと仮定した結果である。

図-4より、P波とS波ともに受振点SP4～16付近においてタイムターム値の相違が見られ、特にS波において顕著である。すなわち、この区間における受振点付近の基盤構造は凹凸を有しており、基盤構造が変化する位置であると得る。図-3で示した概念図は、切羽前方の反射構造を除き、地山の弾性波速度は一樣であると仮定している。よって、探査測線上の個々の受振点位置において基盤構造が異なると、得られる自己相関処理波形は、その影響を受ける可能性が示唆され、複数受振点における



(a)P波によるタイムターム法



(b)S波によるタイムターム法

図-4 簡易弾性波屈折法タイムターム法による測線下の基盤構造の相違

る自己相関処理の評価においては、個々の受振点位置の基盤構造の相違に注意すべきであると考えられる。

(3) まとめ

地震波干渉法は、本来微弱な振動ノイズを処理対象としているものの、本検討ではSSRTや連続SSRTと切羽前方探査結果を比較し適用性を検証する必要がある。よって、振動エネルギーが大きく従来の弾性波探査で良好な震源として活用されている油圧インパクトと掘削発破を対象とした地震波干渉法の検証を実施した。特に、本検討では油圧インパクトによるP波とS波に注目した。

その結果、油圧インパクトを震源とするSSRTの観測配置における複数受振点で得られた自己相関処理波形において、切羽前方からの反射波に相当する波群を識別できるとも考えられるが、不鮮明で規則性に乏しい結果であると言わざるを得ない。そこでこの原因を検証した結果、測線上の各受振点位置における基盤構造の差が自己相関処理波形に影響している可能性を示唆した。

以上から、従来のSSRTや連続SSRTにおける観測配置や震源に拘らずに地震波干渉法の適用性を検証することが重要と考えられる。

4. おわりに

本稿では、S波探査と地震波干渉法をトンネル前方探査に活用するための現在までの取り組みと課題に関して報告した。得られた知見を以下に列挙する。

- ・S波探査については、S波用機械震源を用いれば坑内においても良好な切羽前方探査が可能である。

- ・掘削サイクルに影響を与えない掘削発破を震源とするS波探査を実用化することが今後の課題となる。なお、切羽前方地山のP波とS波の区間速度の算出に関しては別途課題が残る。

- ・油圧インパクトを震源とするP波およびS波の地震波干渉法処理を実施した。その結果、従来からのSSRT観測機器の配置における複数受振点の自己相関波形に切羽前方の反射構造に相当する波群も識別できるが、不鮮明であった。その原因として測線上の各受振点位置の基盤構造の相違が影響している可能性を示唆した。

以上から、S波探査に関しては、掘削サイクルに影響を与えない掘削発破による探査の実用化が課題といえる。地震波干渉法に関しては、従来からの震源である掘削発破および油圧インパクトによる検証を進めてきたが、いずれも実用化段階に達したとはいえず、今後、従来の観測配置や震源に拘らずに検証を進めることが肝要と考えている。現在、坑内における微弱な振動ノイズである

機械掘削による振動や削孔作業における振動などに注目して検証を進めている。

本研究の最終目標は、トンネル前方探査において地震波干渉法によるP波およびS波探査を実用化することにあると考えている。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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) 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.
- 7) Zhang, L., Qiu, D., Li, S. and Zhang, D.: Study of advance surrounding rock classification based on TSP203 and extenics, *ASCE Conf. Proc.*, 2011.
- 8) Gerard Thomas Schuster: Seismic interferometry, *Cambridge University Press*, 2009.
- 9) Petronio, L., Peletto, F. and Schleifer, A.: Interface Prediction ahead of the excavation front by the tunnel-seismic-while-drilling (TSWD) method, *Geophysics, Vol.72, No.4*, pp.G39-G44, 2007.8-9.
- 10) 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.
- 11) 村山秀幸, 丹羽廣海, 小室仁弘, 渡辺正, 野田克也, 東中基倫: 発破震源によるS波取得の検証実験について, 土木学会, 第69回年次学術講演会, III-195, pp.389-390, 2014.9.
- 12) 村山秀幸, 鈴木信行, 丹羽廣海, 石川浩司, 藤原明: P波とS波による切羽前方探査と先進ボーリング結果の比較検討, 第13回岩の力学国内シンポジウム (13th Japan Symposium on Rock Mechanics & 6th Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, 2013) pp.701-706, 2013.1.
- 13) 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.

(2014.9.15 受付)

THE SEISMIC REFLECTION SURVEY AHEAD OF TUNNEL FACE USING S-WAVE AND THE SEISMIC INTERFEROMETRY

Hideyuki MURAYAMA, Hiroumi NIWA, Katsuya NODA, Akira FUJIHARA
and Motonori HIGASHINAKA

The authors had developed the seismic reflection survey ahead of tunnel face based on VSP method under tunnel construction. This method is called SSRT (Shallow Seismic Reflection survey for tunnels).

The seismic survey mainly uses the P-wave. Generally it is difficult for the S wave to be a secondary wave, to be subject to the influence of the P wave, and to extract with sufficient quality. The seismic survey using by the P wave and an S wave becomes very useful when evaluating geological condition around the tunnel. Recently, the seismic interferometry method that does not need a special seismic source and only needs conventional noise records is focused on.

This paper describes the verification results and subjects by the present about the S-wave survey method and the seismic interferometry to estimate the tunnel geological condition.