

切羽前方探査における地震波干渉法の 適用性検証

村山 秀幸¹・丹羽 廣海²・野田 克也³・新部貴夫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, takao.niibe@jgi.co.jp, nobuyuki.shimizu@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の実用化に達している。近年、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。前稿では地震波干渉法における既往研究を整理し、掘削発破を震源とする連続SSRTにおいて地震波干渉法を試行した結果について報告した。本稿では、掘削発破を震源と仮定した音響場シミュレーションによるモデル実験を実施し、連続SSRTにおける地震波干渉法の適用性を検証した結果について報告する。

Key Words : *Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels(SSRT), seismic interferometry, auto-correlation, the finite difference method(FDM)*

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してきた¹⁾。SSRTは、使用可能な震源の多様性—探査用発破、段発の掘削発破、油圧インパクト、パイプレータなど—、解析手法の豊富さ—VSPによる切羽前方と後方からの反射面抽出処理、坑内と坑外に観測機器を配置するトモグラフィー解析など—、探査目的と現場条件に合わせた探査配置の採用—坑内における通常探査、坑外からの探査、坑内と坑外での同時測定、坑内に探査機器を常設する連続的な探査など—類似探査手法にはない多くの特徴を有している。

連続SSRT(SWE-SSRT: Seismic While Excavation using SSRT)では、切羽掘削のための段発発破を震源に活用し、観測機器を坑内に常設しながら掘削サイクルに影響を与えずに、日常的かつ連続的に切羽前方を探査するこ

とができる。

一方、地震波干渉法とは、「異なる受振点で観測された振動記録の相互干渉により、あたかも一つの受振点位置を仮想的な震源として、他の受振点で観測を行ったような振動波形を合成することができる信号処理手法」である。すなわち、地震波干渉法によれば、受振点を仮想的な発震点(相互相関)あるいは、発震点を仮想的な受振点として振動波形を合成(自己相関)でき、特別な震源が必要なく従来ノイズとされてきた振動記録を地盤探査に有効に活用できる可能性が示唆される。

掘削発破を震源とする連続SSRTに地震波干渉法を導入できれば、坑内において高精度の原子時計を用いた掘削発破時刻の記録が不要となること、1回の掘削発破で切羽前方の反射記録が抽出できることなど様々なメリットが期待でき、さらに将来的には坑内に常設する観測機器の簡素化も期待できる。

前稿²⁾では、地震波干渉法の概要と既往研究、とくにトンネルへの適用事例の整理を行い、地震波干渉法の概

念を連続 SSRT に導入するための基本的な考え方をまとめ、現場観測データを用いて地震波干渉法に基づく切羽前方探査を試行した結果とその課題について述べた。

本稿では、連続SSRTに地震波干渉法の導入を検討する際の基本的なモデル実験として、発破を震源とする音響場シミュレーション^{3,4)}を実施し、連続SSRTにおける地震波干渉法の適用性を数値解析により検証した結果を述べるとともに、本モデル実験結果にもとづき現場観測データを地震波干渉法で処理した結果について、前稿の処理結果と対比して考察する。

2. 音響場シミュレーション

(1) 概要

連続SSRTにおける地震波干渉法の適用性を検証することを目的として、単純な地盤モデルを設定し音響場シミュレーションを実施した。

地震波のシミュレーションにおいては、運動方程式を有限差分近似することで数値解析的に解く手法が従来から行われており、近年食い違い格子よる定式化^{3,4)}が一般的に用いられている。本検討では、空間4次精度・時間2次精度⁵⁾のスタッガード格子有限差分法を実施した。

図-1に、音響場シミュレーションのモデル図を示す。

数値解析モデルは、掘削発破を震源に活用する連続SSRTの観測配置を考慮し以下とした。

- ・地山弾性波速度 (P波) : 4000m/s
- ・受振器 : 水平方向速度成分, 1.5m間隔に24チャンネル配置
- ・発破位置 : 受振器位置 (切羽側受振点ch1) から150m前方を最初の発破点として2m間隔で11発破実施
- ・破砕帯の諸元 : 最初の発破位置から前方150mと200m位置に幅5mで2箇所においてトンネルと直交方向に配置, 弾性波速度 (P波) 3500m/s

数値解析における振動記録のサンプリング間隔は0.5ms, レコード長は600msである。

震源は、爆薬型震源に相当するRicker Wavelet⁶⁾を用いた。連続SSRTでは、掘削に用いる段発発破 (DS電気雷管, 公称段間時間250ms) における1段目から2段目までの段間時間の振動記録を処理することによって、切羽前方の反射構造を抽出する。よって、数値解析による検討は、震源波形をパラメータとして、まず図-2(a)に示すような単発発破波形 (卓越周波数150Hz) を用い、次に段発発破震源として図-2(b)に示すように4段の段発波形を用いた。図-2(b)の段発発破波形においては、DS雷管における起爆時間の誤差を考慮して遅延時間 (段間時間) を200~250msとし、卓越周波数を90~150Hzとした。

なお、図-1に示したモデル図では、深度方向900~1

100m, トンネル方向900~1500mの領域を示しているが、実際の解析領域は、解析境界からの反射の影響を考慮して深度方向2000m, トンネル方向2092mの領域を設定し、解析境界からの反射がほとんどないことを確認している。

(2) 連続SSRTにおけるモデル計算

図-3に、単発発破震源における11発の振動記録 (SP1~11) にもとづき連続SSRTにおける波形処理であるVSPを実施した結果を示す。図-3より、切羽前方に50m間隔で配置した破砕帯位置を良好にイメージングしていることが分かり、従来からSSRTや連続SSRTで実施してきた観測方法と波形処理手法の妥当性を改めて数値シミュレーションで示したことになる。

なお、連続SSRTでは段発発破における1段目と2段目の段間時間を波形処理に用いるため、図-2(b)に示した段発発破を震源とした結果と(a)に示した単発発破を震源とした処理結果はまったく同一となる。

ここで、本論文における着目点とやや異なるが、SSRTのようなVSP処理を用いた切羽前方の反射面の同定位置精度と反射パターンについて、あまり議論^{7,8)}がなされていないことから本稿で概説すると以下となる。

本モデル実験では、図-1, 3に示したように受振点から300m前方に幅5mの破砕帯 (P波弾性波速度ギャップ500m/s) を50m間隔で2箇所に配置した。反射面の振幅を積算処理しカラーバーで振幅の正負を考慮した場合と絶対値表示した図から、破砕帯の幅は解析モデル上5mであるが図の反射面の分布領域から2箇所の破砕帯においてともに約25mと同定される。一方、理論的には得られる境界面の振幅は、弾性波速度が小さくなる境界面 (破砕帯の入口) で正(0)から負となり、弾性波速度が大きくなる境界面 (破砕帯の出口) で負(0)から正となることが知られている。よって、破砕帯の幅は負の振幅領域に相当することになる。しかしながら、図-3では、破砕帯入口に相当する負の振幅の前にやや弱い正振の幅を有する反射面が確認され、破砕帯出口に相当する負から正に振幅が変化する反射面の後方にもさらに負の振幅の反射面が連続している。すなわち、正負の振幅の反射面が破砕帯前後の反射面にサンドイッチ状に分布することが確認できる。このサンドイッチ状の反射面パターンは50m離れた破砕帯においても同様である。

以上のように、連続SSRTのモデルシミュレーションによって得られた反射面位置と反射パターンは、理論上の位置と反射パターンにおいて厳密には異なることが分かる。実際のトンネルにおける切羽前方の地質性状は複雑であり、地山の弾性波速度の変化や構造も単純ではない。よって、SSRTから得られる切羽前方地山の反射面位置とそのパターンから、トンネル地質を解釈するためには、多くの現場データの蓄積が肝要となると言える。

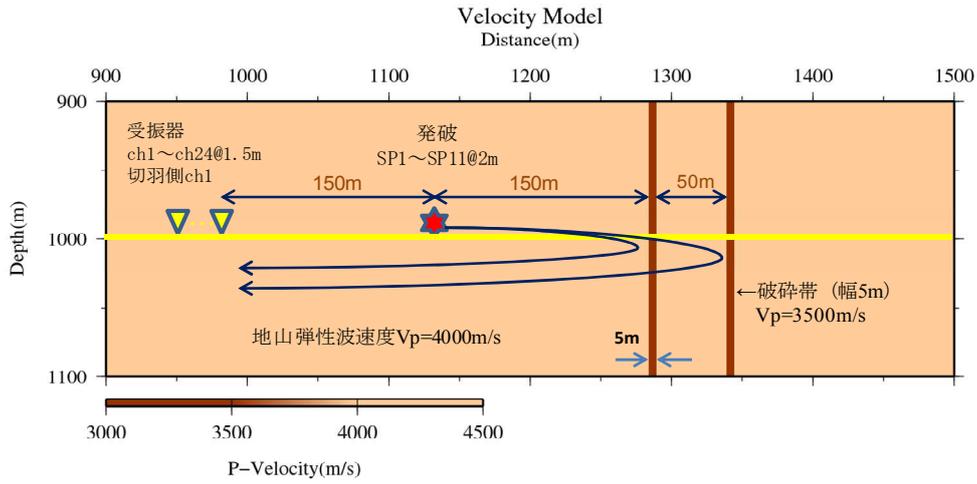


図-1 音響場シミュレーションモデル

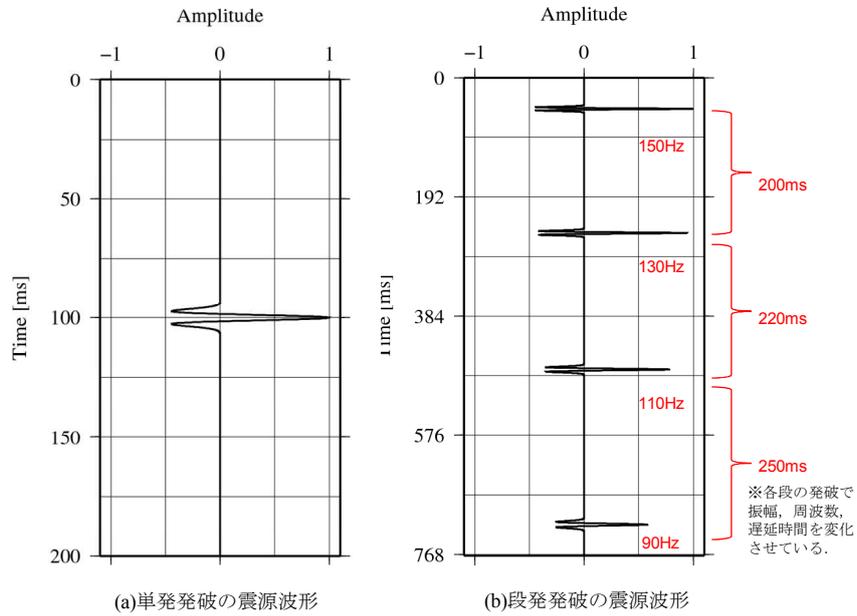


図-2 発破震源モデル (単発発破, 段発発破)

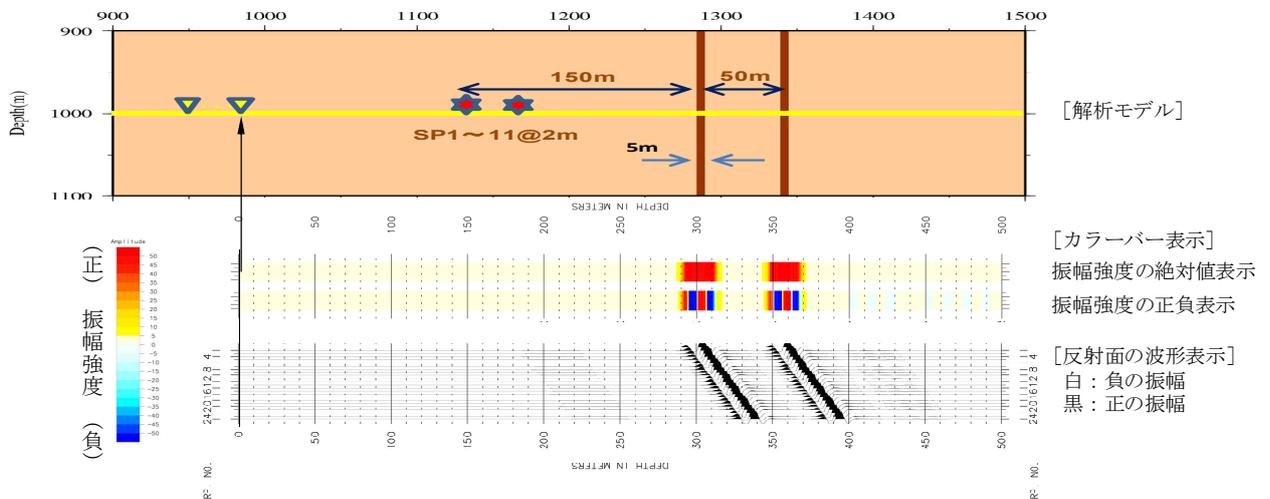


図-3 連続SSRTにおけるモデル計算結果 (単発発破震源と段発発破震源で同一の結果)

(3) 単発発破震源によるモデル計算

図-4に、単発発破（SP1とSP7）を震源とする地震干渉法のうち自己相関²⁾を実施したモデル計算結果を示す。

自己相関とは、受振された波形の類似性を抽出する波形処理手法であり、ある時刻同士の積和に相当する。自己相関処理を実施するデータの時間長さをゲート長と称するが単発発破の場合、レコード長600msのうち500msをゲート長として採用した。

図-4は、時間軸で得られた結果を地山弾性波速度4000m/sを用いて距離に変換している。自己相関における距離原点0mの位置は切羽＝発破点であり、仮想受振点となることから波形の類似性が最大の振幅を示し、それ以降に反射構造が抽出される。自己相関における原点が切羽であることは、図-3に示した連続SSRTの距離原点0mの位置が受振器の切羽側（ch1）であることと異なっている。

図-4に示した発破SP1とSP7における自己相関では、発破位置が12m切羽側にずれることから、両処理結果の距離原点が12mずれることになる。

図-4に示すように、発破SP1と発破SP7ともに破碎帯の位置が10m程度後方にシフトするが2箇所を破碎帯位置を同位置でほぼ正確に捉えており、反射パターンも連続SSRTの処理結果である図-3と一致している。

以上から、単発発破を震源とする場合、発破位置に依存することなくほぼ正確に切羽前方の反射構造を捉えることが可能であることが示されたと言える。

(4) 段発発破震源によるモデル計算

図-5に、段発発破震源であるSP1とSP7を用いて自己相関を実施したモデル計算結果を示す。自己相関におけるゲート長は1段目～3段の段発発破記録が含まれる500msである。図-5より、破碎帯位置に振幅強度が小さく弱い波形が確認できその位置は破碎帯位置とほぼ一致することが分かる。しかしながら、距離400mと440m近傍に非常に振幅強度の大きい波形が確認でき、この波形の影響により破碎帯位置の波形、とくに発破点から遠方の破碎帯位置における波形の識別が相対的に困難となっている。

1～2段目の発破における段間時間は200msであり、地山弾性波速度4000m/sと往復走時を考慮すると、

$(\text{段間時間}200\text{ms} \times \text{地山弾性波速度}4000\text{m/s}) / \text{往復走時}2 = 400\text{m}$ となる。

すなわち、本来自己相関によって直接波の影響は除去されるはずであるが、1段目と2段目の直接波成分における発破波形の類似性が自己相関によって非常に強く抽出され疑像として出現していると考えられる。同様に、距離440m位置の振幅強度が大きい波形は、2～3段目の段間時間220mに相当する疑像と考えられる。このように考えると、仮に自己相関におけるゲート長を800msとして、4

段目の発破記録を含めた場合、3段目と4段目の段間時間が250msであることから距離500m付近に振幅強度の大きな波形が出現することが容易に想像できる。

以上から、段発発破を震源とする自己相関では、発破の直接波と考えられる波形の自己類似性が強く抽出され、破碎帯などの地山変化を抽出することが困難となると考えられる。

一方、地震波干渉法では用いるノイズデータを通常より長く取得し処理することが有利と考えられており、自己相関においてはゲート長を長く取ると類似波形が抽出され易いと考えられている。しかしながら、段発発破を用いた自己相関のモデル計算結果により、発破のように非常に振動エネルギーが大きな震源では、発破波形の類似性が顕著に抽出されることが分かり、1段目の段間時間をゲート長に設定すべきであると言える。

図-6に、ゲート長を1段目と2段目の段間時間200msより小さい150msとした場合の自己相関のモデル計算結果を示す。図より、図-5で見られた距離400mと450mで確認された発破波形に起因する疑像が抽出されないことが分かり、破碎帯位置を図-4と同様にほぼ正確な位置で捉えており、反射パターンも図-4と一致する。

なお、自己相関において信頼できる処理結果は原理的にゲート長の半分程度であり、ゲート長を200msと設定した場合には100ms程度の領域が信頼できる範囲となる。一方、自己相関は1発の発破で処理できることが利点であり、連続SSRTにおいては10数発の発破データを蓄積して処理することが欠点となるが、段発発破において使用するデータ長（ゲート長）の時間領域に関しては相違がないと言える。一方、自己相関における探査深度は、信頼性の高い領域がゲート長の約半分となることから、連続SSRTの約半分となると考えられる。

3. 現場観測データを用いた検証

前稿²⁾では、現場観測データを用いた地震波干渉法の試行として、連続SSRTを実施した現場の観測データを用いて自己相関処理を実施した。その際、前述のように自己相関においてゲート長を長くすることが類似波形を抽出するために有利であることから、10段の段発発破における全発破時間に相当する2.5秒をゲート長とした。前稿の段階においては、前章で示したモデル実験を実施していない。しかしながら、10段の発破を含むゲート長2.5秒の振動記録を自己相関処理すると発破波形が類似波形として抽出される可能性が予見されることから、試行錯誤的な対応として波形の平滑化処理（AGC処理）を実施し発破波形を平滑化したのちに自己相関処理を実施している。前稿においては、3つの段発発破記録を自己相関処理し

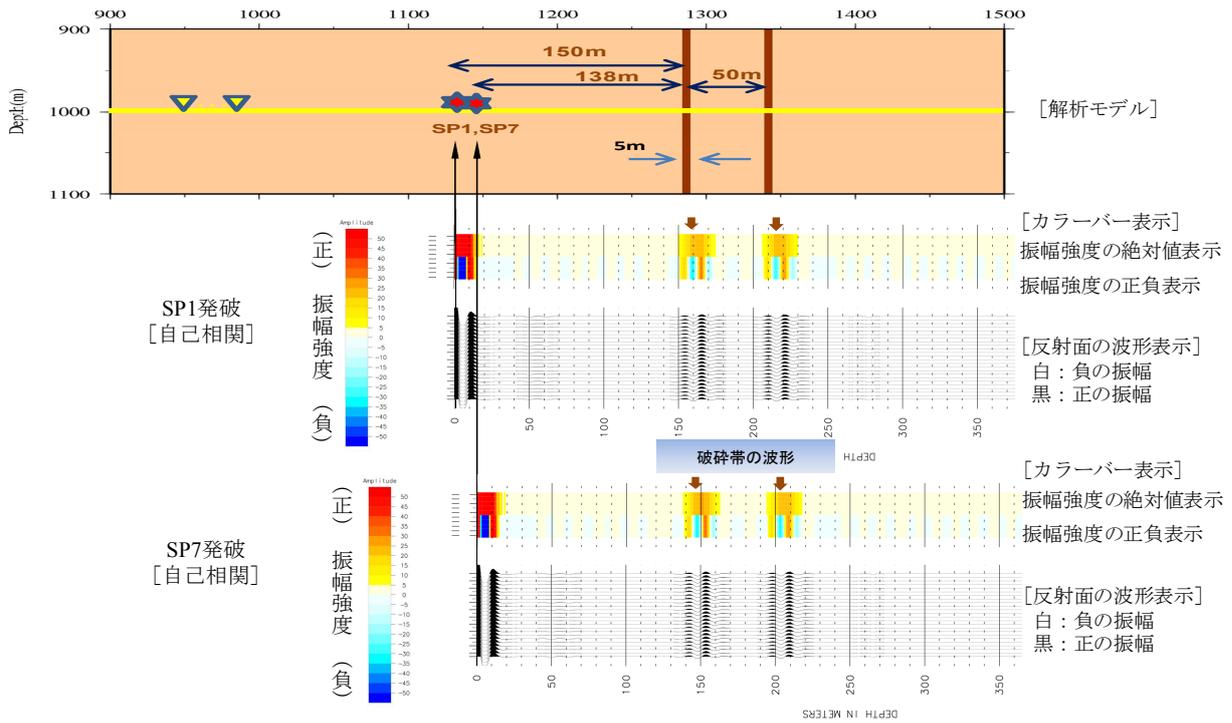


図-4 単発発破震源による地震波干渉法（自己相関）のモデル計算結果 [ゲート長500ms]

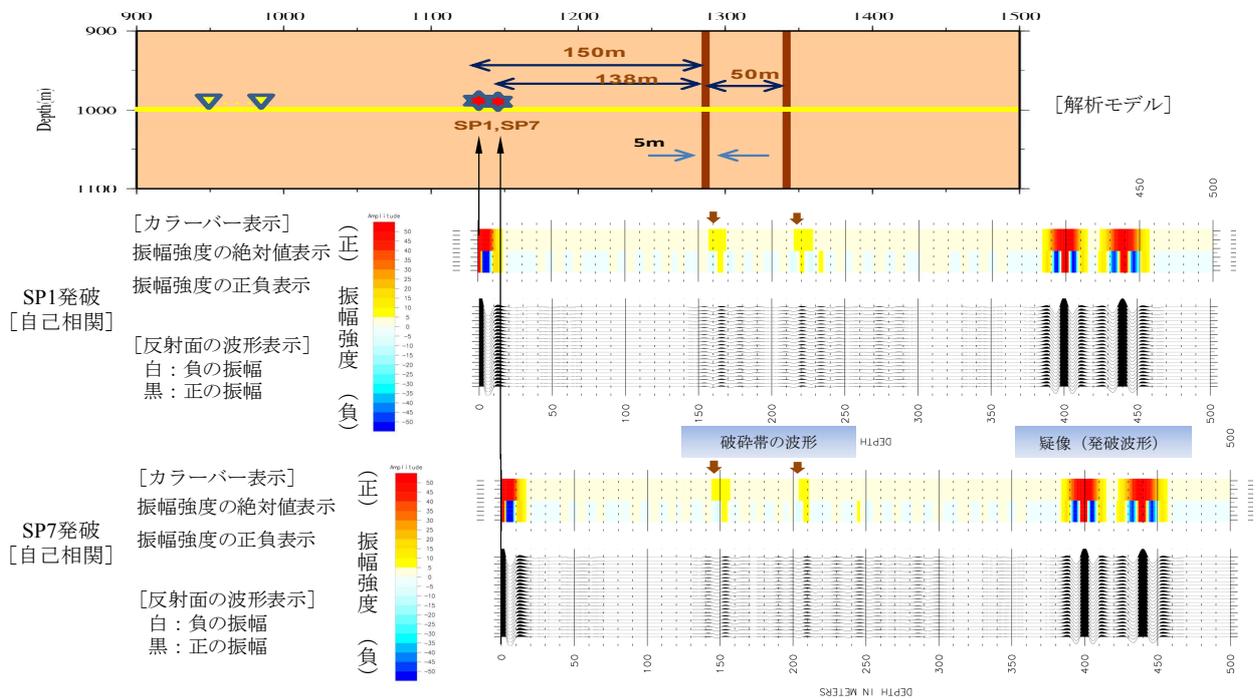


図-5 段発発破震源による地震波干渉法（自己相関）のモデル計算結果 [ゲート長500ms]

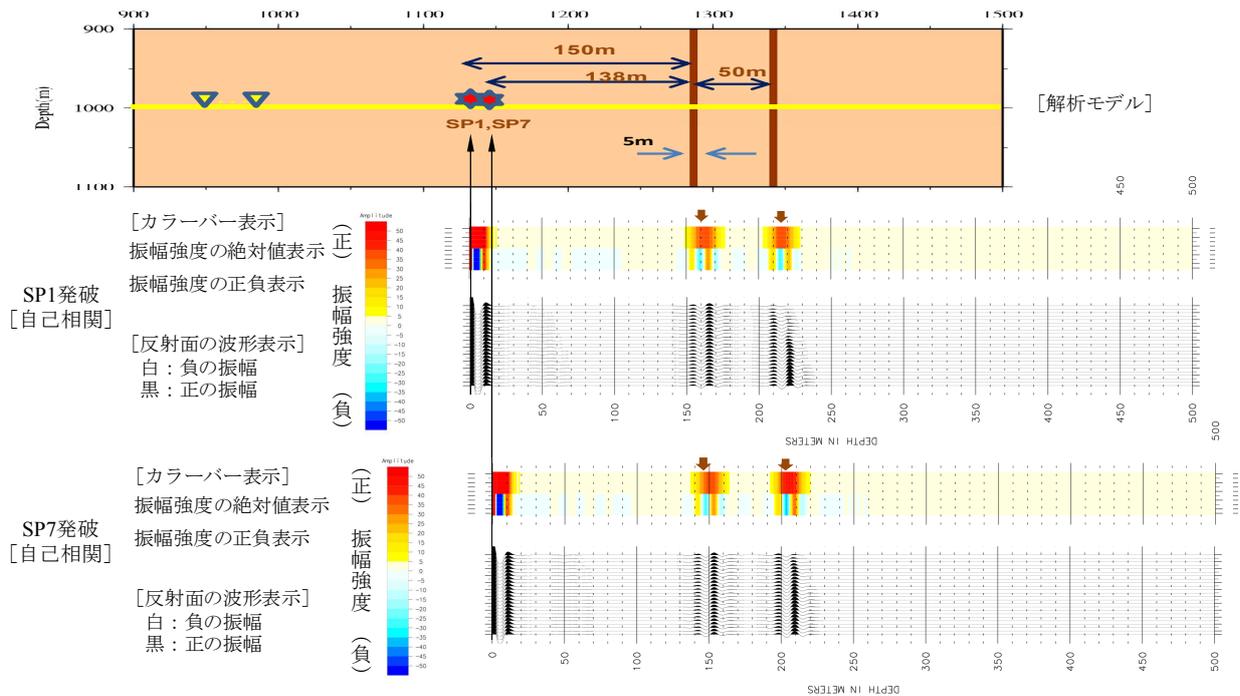


図-6 段発発破震源による地震波干渉法（自己相関）のモデル計算結果 [1段目からゲート長150ms]

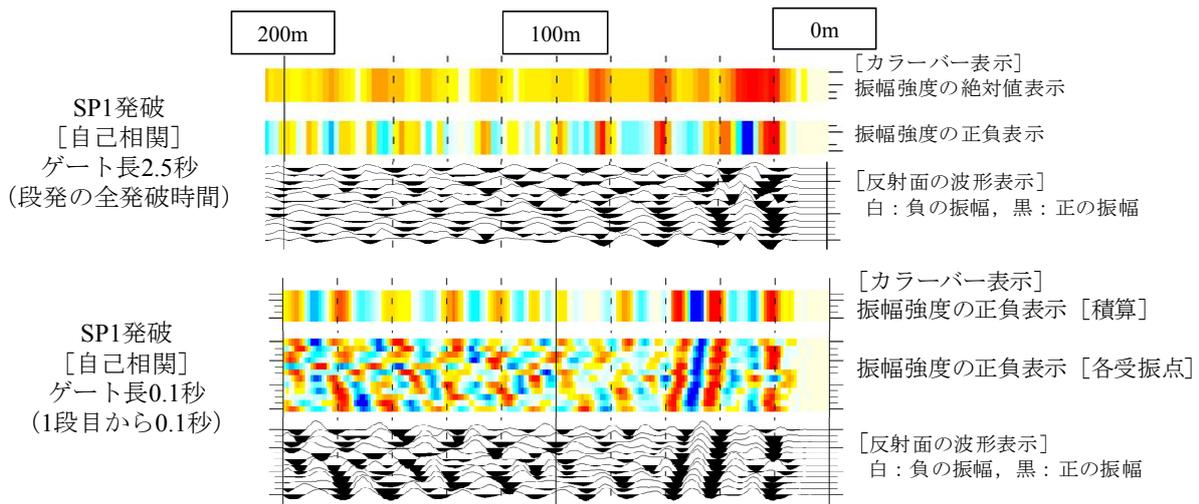


図-7 段発発破記録のゲート長の相違による自己相関結果の比較

た結果と連続SSRT処理の結果を対比し、両処理結果に類似性を認めることができるものの、発破毎に結果が異なる傾向を示し自己相関処理結果の再現性が課題となった。前章における段発発破を震源とするモデル実験から、段発発破を自己相関する場合、複数の発破記録が含まれる記録をゲート長に設定すると発破波形が強調されやすいことから、段発発破を震源とする場合においても連続SSRTと同様に、1段目から2段目までの段間時間を用いて処理すべきであることが示された。

図-7に、前稿で示した10段の全発破時間に相当する2.5秒を前処理として平滑化を実施し、ゲート長とした自己相関処理した結果と、1段目発破から0.1秒（100ms）で2段目の発破を含まない記録をゲート長とした処理結果を

対比して示す。なお、地山弾性波速度は4 000m/sである。

図-7より、切羽（発破位置）から20～60m付近に反射かが集中する傾向は両処理結果で一貫しており、切羽観察において発破切羽から80m付近までが硬軟の変化が著しい区間であった観察記録と整合している。

しかしながら、図-7の下段に示した各受振点における波形の傾向にかなりの差があることが分かり、ゲート長が0.1秒の波形の方が全体的に各受振点における波形の整合性が高いと言える。

図-8に、前稿と同様に、3つの発破（SP1、SP12、SP25）におけるゲート長0.1秒（100ms）の自己相関処理結果を連続SSRTにおけるVSP処理結果と対比して示す。SP1とSP12およびSP12とSP25の発破では発破切羽位置が

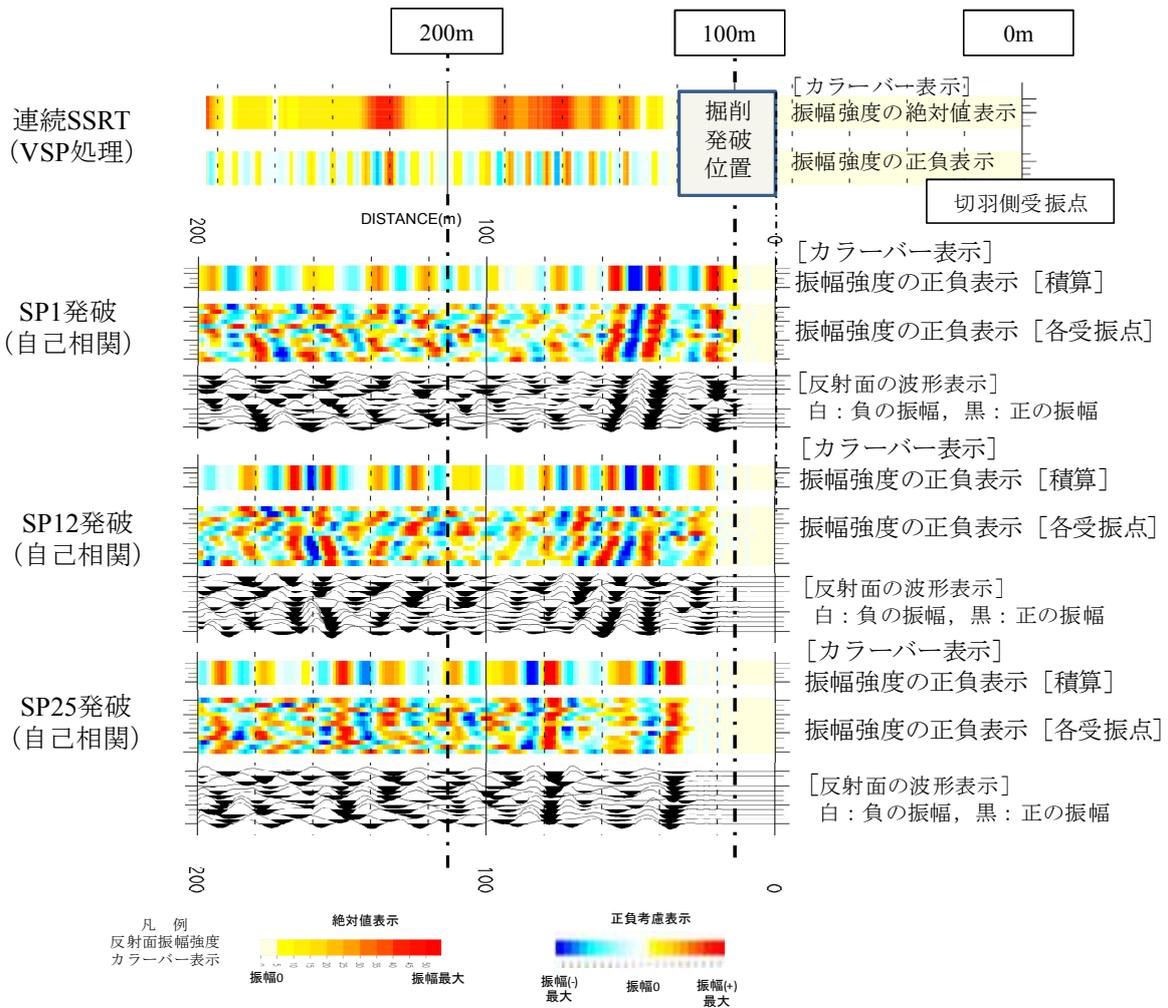


図-8 現場観測データを用いた連続SSRT処理と自己相関（発破SP1, SP12, SP25）処理結果 [1段目からゲート長100ms]

各々18m離れているので各々の処理結果の原点は18m離隔するが、SP12とSP25の距離換算を実施する際にSP1の発破位置を原点として補正し表示している。

図-8より、SP1とSP12の発破において、とくに切羽前方40～60m区間における波形は各受振点記録における波形においても再現性が高いことが分かる。一方、SP25においては切羽前方80m付近に顕著な波形が確認されるもののSP1やSP12のような位置での波形は顕著ではない。SP25で再現性が低いのは、切羽が36m進行しSP1とSP12で抽出された波形位置に起爆力の大きな発破が近接したことから、発破切羽近傍の反射記録が明瞭には抽出できなかった可能性が要因として考えられる。

一方、SP1とSP12で抽出されている切羽前方40～60m区間における各受振点における反射面は、受振点1で切羽側となり受振点12に向かうにつれて切羽深部側に徐々に変化する傾向を示し、図の各受振点の波形記録が傾斜していることが分かる。切羽前方の反射構造がトンネルと直交する場合、各受振点での反射面は原理的には同一箇所となるはずであるが、図のように徐々に傾斜する場合、反射面がトンネル軸と斜交している可能性が示唆さ

れる。しかしながら、反射面の傾斜が切羽に対して受け盤であるか流れ盤であるかの判断はできない。以上のように、各受振点における自己相関結果を対比することによって、反射構造の傾斜に関しても今後議論できる可能性が示されたと言える。

4. おわりに

本稿では、施工中の切羽前方探手法である連続SSRTに地震波干渉法概念を導入するために、音響場シミュレーションによるモデル実験を、単発発破震源および段発発破震源についてそれぞれ実施し、その検討結果を踏まえて現場観測記録を用いた自己相関処理を実施し、前稿における処理結果との対比を実施した。本稿の検討から得られた知見を以下に列挙する。

- 音響場シミュレーションによるモデル実験結果から、従来からのSSRTや連続SSRTにおけるVSP処理結果が有効な切羽前方予測手法であることを示した。
- 単発発破震源におけるモデル実験から、相互相関に

よって破砕帯等の切羽前方の地質変化を精度よく予測できることを示した。

- ・ 段発発破震源におけるモデル実験から、複数の発破が含まれる振動記録を自己相関処理のゲート長として用いた場合、発破波形の類似性が非常に強く抽出され、地山の変化を抽出することが困難となることを示した。
- ・ 段発発破震源の記録を自己相関処理する場合、連続SSRTと同様に1段目から2段目の段間時刻を処理時間（ゲート長）として採用することが有益となるが、自己相関の信頼性はゲート長の約半分程度で高く、探査深度は連続SSRTの約半分程度となると考えられる。
- ・ 前稿では、10段の段発発破の全発破時間を自己相関のゲート長とし平滑化処理によって発破波形が強調されることを抑制しようと試みたが、発破毎における自己相関結果の再現性に課題があった。自己相関にゲート長を1段目から2段目の段間時間とし複数の発破記録を含まない記録で実施すれば、発破毎における再現性が向上することを示した。
- ・ 自己相関における各受振点における波形の連続性と傾きから地質境界面の傾斜構造を検討できる可能性が示唆された。

前稿でも述べたように、一般に、地震波干渉法で採用すべきノイズデータは、

①一見すると無相関で個々のシグナルを識別不能なランダムな波動場を観測したデータ

②振動源は少なくとも非定常な振動が生じている波動場の観測データ

と考えられており、相関処理には長時間の振動ノイズデータが必要とされている。

トンネル掘削の段発発破記録は、段発発破の初動がほぼ明確に判別できる波形記録であり、本来地震波干渉法には適さない振動記録である可能性も考えられるが、本稿で実施した音響場シミュレーション結果から、段発発破を震源とする地震波干渉法の適用性に関してその方位性を示すことができたと考えられる。

一方、掘削発破以外にも坑内には多くの振動源が施工中に稼働しており、これらの振動記録を地震波干渉法に応用することも現在検討中である。

参考文献

- 1) たとえば、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.
- 2) 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.
- 3) Virieux, J.: P-SV wave propagation in heterogeneous media : Velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, 51, 889-901, 1986.
- 4) Levander, A.R. : Fourth-order finite-difference P-SV seismograms, *Geophysics*, 53, 1425-1436, 1988.
- 5) 青井真、藤原広行：不連続格子を用いた4次元精度差分法によるは波形合成、日本地震工学会、第10回日本地震高層シンポジウム、pp.875-880, 1998.
- 6) Ricker, N. : The form and laws of propagation of seismic wavelets, *Geophysics*, 18, 1953.
- 7) 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.
- 8) 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.

(2013. 9. 2 受付)

THE APPLICATION STUDY ON THE SEISMIC INTERFEROMETRY AHEAD OF TUNNEL FACE

Hideyuki MURAYAMA, Hiroumi NIWA, Katsuya NODA, Takao NIIBE
and Motonori HIGASHINAKA

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 to continuously evaluate the geological features. We called this method Seismic While Excavating using SSRT (SWE-SSRT). 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 application study on the seismic interferometry using numerical analysis model test – the finite difference method (FDM) in sound field.