

トンネル前方探査における地震波干渉法の試行

村山 秀幸 丹羽 廣海

概 要

筆者らは、トンネル施工中の地質調査手法として、トンネル浅層反射法探査(SSRT:Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels)を開発してきた。SSRT は、現場条件に応じて探査用発破、機械震源(油圧インパクト、バイブレータ)、トンネル掘削用段発破を震源に選択でき、坑内からはもとより掘削以前に坑口から切羽前方を探査することも可能な汎用性の高い調査手法である。前報では、従来のSSRTにおけるP波を用いたVSP処理に加え、トンネル切羽前方の地下水性状や地山物性の推定に有効なS波を用いた探査について検証した。本報では、さらに新しい概念として地震波干渉法を切羽前方探査に導入する考え方とその適用性を検証した結果を述べる。地震波干渉法では特別な震源が不要であり、従来ノイズとされてきた坑内の掘削作業で発生する様々な振動ノイズを切羽前方探査に活用できる可能性が示唆されると同時に、坑内観測機器の簡素化が期待できる。

Application study of seismic interferometry ahead of tunnel faces

Abstract

The authors have developed a survey of Shallow Seismic Reflection for Tunnels (SSRT) to evaluate the geological features ahead of tunnel faces. The previous paper described vertical seismic profiling using the S-wave survey that could be useful in terms of the presence of groundwater or the presumption of the physical properties of the ground. This paper describes an application study of the seismic interferometry method as a new survey idea for areas ahead of tunnels. Seismic interferometry can be applied to the tunnel survey without special seismic sources. Therefore, it can be surmised that the various seismic noises that occur in tunnel work could be useful for tunnel surveys and for downsizing the measurement system in tunnels.

キーワード: トンネル切羽前方探査、SSRT、地震波干渉法、自己相関、S波

§1. はじめに

筆者らは、山岳トンネルの施工時調査手法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、様々な現場で検証を進めてきた。筆者らのトンネル切羽前方探査に対する現在までの取り組みについて、探査原理別にまとめて表1に示す。

SSRTは、弾性波反射法のVSP処理が基本原理であり、小薬量の探査用発破を震源として坑内に多発震・多受振点の測線を配置する。トンネル工事での発破使用では、事前に各種の許可申請が必要となり、トンネル掘削方式に発破が採用されている場合を除き、坑内での発破使用には制約がある。よって、SSRT開発当初から使用制限の無い機械震源(油圧インパクト、バイブレータ)に着目した¹⁾。これら探査用発破、機械震源を用いて実用化したP波探査をSSRTと称することにした²⁾。

この開発初期段階では、「一般に、発破掘削によるトンネルは堅硬地山からなりトラブルが少ないあるいは規模が小さい傾向にあるが、発破が使用できない機械掘削におけるトンネルは軟質地山でありトラブルの頻度、規模共に大きくなる傾向がある。よって、機械掘削トンネルにおいて切羽前方探査に対するニーズが高い」と考え、探査用発破と併用して機械震源によるSSRTの実用化に注力した。

一方、フルフェイスのTBMでは切羽において地山観察ができず、脆弱地山に遭遇した場合、胴締め等によって掘進不能に陥る事例が少なからずあること、トンネルでは土被りの薄い坑口付近において地山トラブルの発生頻度が高いこと等が知られている。よって、特殊条件における探査として、機械震源を用いたTBM探査³⁾と坑外から坑口付近を探査する手法⁴⁾を実用化した。さらに、同時期に発震点と受振点を坑内と坑外に展開し弾性波ジオトモグラフィによる地山評価も試行している^{5),6)}。

発破掘削のトンネルでは、常に段発発破を用いて掘削しており、この発破振動を震源に活用するのが連続SSRTである⁷⁾⁻⁹⁾。本手法の特徴は、DS電気雷管の段間時間(瞬発雷管から2段目までの時間差約250ms)を利用すること、坑内に探査機器(測線)を常設することにより、施工サイクルに影響を与えずに探査することが可能となった。

表1 トンネル切羽前方探査における現在までの取り組みに関するまとめ

震源	弾性波反射法(VSP処理)		地震波干渉法(自己相関処理)	
	発破(探査用発破、掘削用段発発破)	専用機械震源(インパクト、バイブレータ)	発破(掘削用段発発破)	機械振動ノイズ(削孔、切削、重ダンブ走行等)
P波探査	○ (SSRT,連続SSRT)	○ (SSRT,坑外SSRT)	△	△
S波探査	△	○ (S波SSRT)	-	-

※○: 実用化済み, △: 検証実施中, -: 未着手

連続SSRTにおける最大の技術課題は、坑内に常設する振動記録装置の時刻校正にあり、この課題に対して、GPS信号を坑外から坑内に光ケーブルで伝播する方式⁹⁾と、坑外でGPS信号に校正した高精度の原子時計を坑内に携行し常設する方式⁹⁾を考案し実用化に至った。

山岳トンネル工事では、地質構造、地山物性、地下水等が主な注目すべき事象である。P波は地質構造の把握に有効であるが、地山物性や地下水性状を把握するためにはS波を併用した探査が有効と考えられ、S波探査の開発に着手した^{10),11)}。S波探査では、先行するP波の影響を除去することが観測データのS/N比向上に必須となる。そこで、P波の影響を相殺可能なP波S波併用の油圧インパクト、S波用バイブレータを震源として現場で検証した^{10),11)}。その結果、S波探査を坑内での観測システムとして実用化した。適用現場において地山物性や地下水が課題となることは無かったため、P波とS波を併用した地山評価が真に必要な現場において、さらに検証する必要がある。

一般に、発破はP波探査においてS波成分が少なく得られる周波数領域も広いことから最も有効な震源とされている。そこで、段発発破においてS波が抽出可能かを小薬量の探査発破と比較して検証した¹²⁾。その結果、芯抜きを伴う掘削発破ではS波が相応に発生していることを確認できたが、先行波であるP波の影響をいかに除去するかが障壁となり、発破S波によるSSRTの実用化には至っていない。

地震波干渉法は、従来の弾性波探査と原理が異なり特別な震源が必要ない。すなわち、トンネル工事における発破、削孔、切削、重ダンブ走行等の従来ノイズとされてきた振動を活用し切羽前方探査を可能とする画期的な概念であり、P波、S波共に適用できる。本報告では、地震波干渉法を切羽前方探査に導入するための基本的な考え方、音響場シミュレーション、現場適用について述べる¹³⁾。

§2. S 地震波干渉法の概要と適用事例

2.1 地震波干渉法の概要

本手法の理論提唱は古く、1968年に Claerbout¹⁴⁾によって一次元モデルにおける反射記録が自己相関(auto-correlation)から導かれることが示され、2006年頃から物理探査分野^{15)~17)}で急速に注目されはじめた。

図1に地震波干渉法の概念図¹⁶⁾を示す。地震干渉法では、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擬似的な振動記録を合成することができる。図1では、振動記録 $T(x_A, x_i, t)$ と $T(x_B, x_i, t)$ の相互相関処理により、仮想振動記録 $R(x_A, x_B, t)$ を合成できる。すなわち震源から点Bに到達した波(走時 t_B)とその波が地表面で反射し地中を伝播して点Aに達した反射波(走時 t_A)の相互相関によって、走時 $t_A - t_B$ に点Bを震源として点Aで観測される反射波が合成される。

図1の例では、震源を自然地震と仮定しており、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¹⁸⁾。地震探査の分野では、受動的観測記録として主に自然地震の観測記録を用いた地下のイメー

ジングに地震波干渉法が適用されつつある¹⁷⁾。

一方で、前述のClaerboutは、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(auto-correlation)により、地表に震源および受振器を設置したとする反射記録が抽出できることを示した。自己相関とは、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現象とは、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。

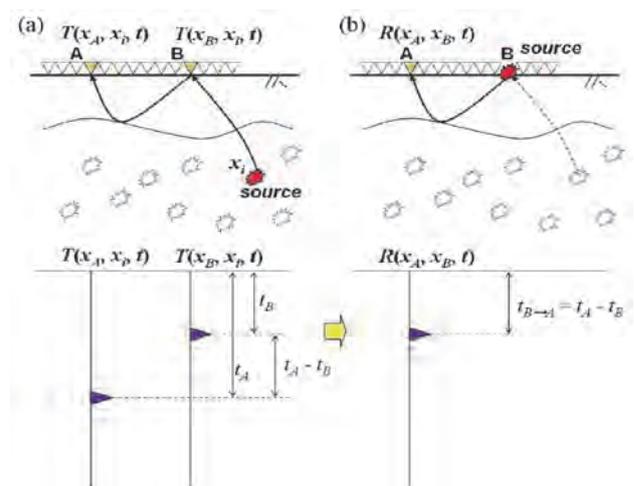


図1 地震波干渉法の概念図¹⁶⁾

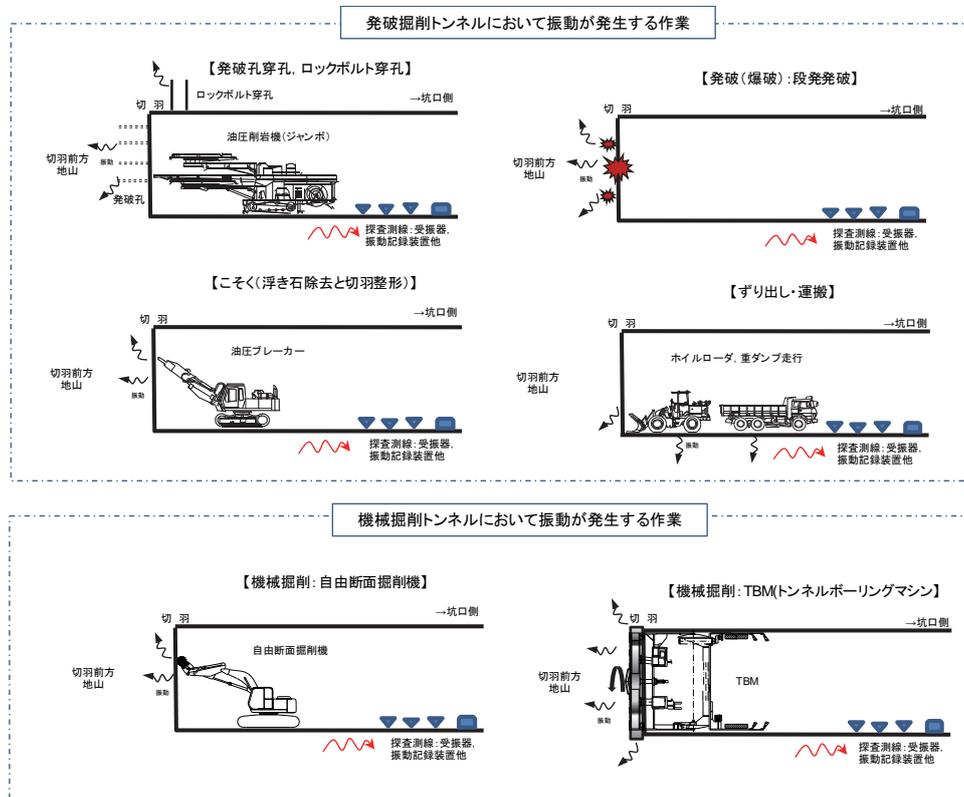


図2 トンネル施工中にノイズ振動が発生する作業

以上から、切羽前方探査に地震波干渉法を概念を導入する際には、図2に示すようなトンネル施工中にノイズ振動が発生する作業に注目する必要がある。すなわち、発破、油圧削岩機による穿孔(発破孔、ロックボルト)、自由断面掘削機による切削、油圧ブレーカによる掘削やこそく、ホイールローダと重ダンプ走行によるずり出し作業等である。

一方、波形処理としては、相互相関と自己相関を行う場合が想定される。例えば、連続SSRTにおける相互相関処理とは、坑内の各受振点(12ch)において仮想震源波形を合成することに相当し、その合成波形を用いてVSP処理し切羽前方の反射記録を得る手順となる。他方で、坑内の各受振点における発破振動記録を自己相関処理すると、発破点である切羽を仮想受振点とする切羽前方からの反射記録を含む波形が受振点毎に得られることになり、自己相関の方が相互相関より解析手順として平易と考えられる。

2.2 地震波干渉法のトンネルでの適用事例

トンネルにおける地震波干渉法の適用として、Petronioら¹⁹⁾は、TSWD(Tunnel Seismic While Drilling)を提案しており、本手法は連続SSRTの開発コンセプトと類似する。TSWDでは、坑外に設置した3成分ジオフォンと坑口付近の坑内に設置した3成分加速度計を用いて観測を行い、TBM切削時に発生するノイズ振動を震源として地震波干渉法に基づく自己相関処理を行い、トンネル周辺の反射面を抽出し、その反射面分布と地質データ(RMR値)を比較検証している。さらに、得られた振動記録からP波とS波(トンネル軸と直交方向)の周波数分析を実施し、共にS/N比が高く品質がよいことを示している。なお、本事例はトンネル施工中に適時適用した事例ではなく、トンネル施工後に観測データを検討した結果であると推察できる。

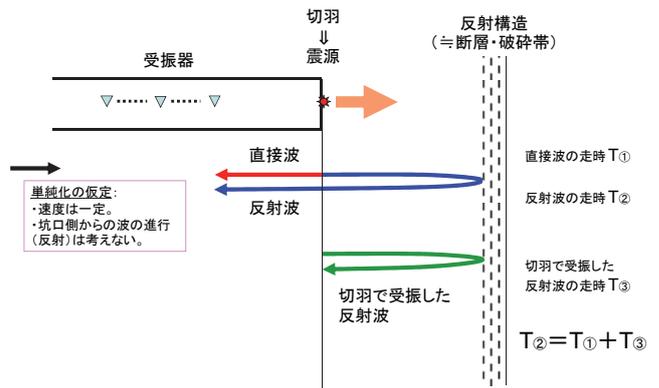
一方、国内のトンネルにおける地震波干渉法の適用事例としては、伊東らの報告²⁰⁾がある。本報告は、トンネルの地震防災や維持管理を目的としており、供用中のトンネル周辺地山の堆積層の厚さや断層、褶曲などの地質構造を把握する目的で地震波干渉法を適用している。適用したトンネルは、いずれも供用中であり、山岳地の道路と鉄道および都市部のトンネルである。地震波干渉法としては、疑似ショット記録を求めていることから相互相関処理であると考えられる。伊東らの適用は、得られた探査結果と例えば

ボーリングデータ等による地質性状の対比がなされておらず結果の検証が不十分であると言える。

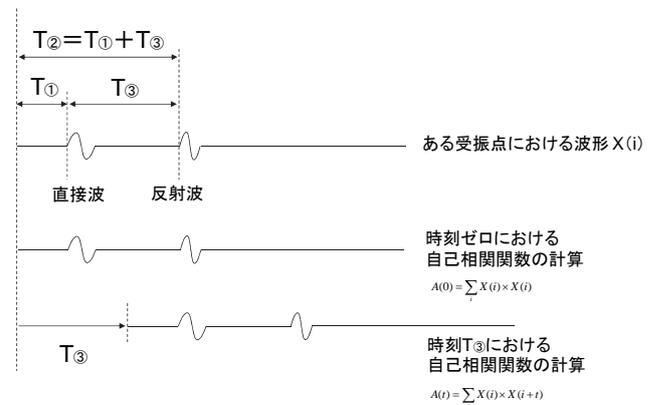
以上から、トンネル切羽前方探査に地震波干渉法の概念を導入するためには、Petronioらの提案するTSWDが最も参考となる。

§3. 地震波干渉法の切羽前方探査への導入

本章では、連続SSRTを例として地震波干渉法の切羽前方探査への導入の考え方を概説する。図3に、連続SSRTの坑内観測機器配置における地震波干渉法の適用原理を示す。連続SSRTでは自己相関処理を実施する。単純化の仮定としては、地山弾性波速度は一律として、測線後方となる坑口側からの反射は考慮しない。図3に示すように各受振点では、切羽＝発破点からの直接波が記録され、その後切羽前方に想定される反射構造(断層や破碎帯等)からの反射波が記録されていると考えられる。



(a)切羽(発破点)で抽出される切羽前方の反射波形の概念



(b)受振点波形と切羽(発破点)で自己相関処理によって抽出される切羽前方の反射波形の概念

図3 連続SSRTにおける自己相関処理の適用原理

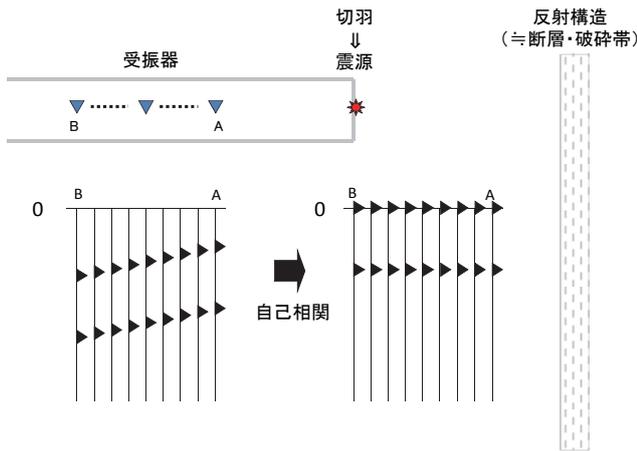


図4 複数受振点での自己相関波形の重ね合わせ概念図

受振された波形の類似性を抽出する自己相関処理(ある時刻同士の積和)では、時刻0(切羽=発破点)における値が最大(切羽での発震と受振)となり、切羽を原点(仮想受振点)として、それ以降の時刻に得られる波形に切羽前方地山からの反射構造が抽出されることが期待できる。

図4に、1回の発破において複数の受振点で得られる自己相関波形を重ね合わせる概念図を示す。従来のSSRTでは各受振点の反射記録が弾性波速度に相当する遅れ(傾き)を持つことから各受振点での反射記録を積算してカラーバーで表示してきた。一方、自己相関では1つの受振点から処理波形を抽出することが可能となるが、図4のように各受振点での処理波形を重ね合わせるにより強調することが可能となる。

なお、従来からのSSRTにおけるVSPでは処理過程で地山弾性波速度を仮定する必要があるが、自己相関の処理過程で弾性波速度は必要ない。ただし、VSP処理と同様に得られた時間断面の波形記録から、切羽前方の距離を算出する際には弾性波速度を仮定する必要がある。

以上から、地震波干渉法(自己相関)を連続SSRTに導入するメリットとして以下が期待できる。

- ①発破時刻の記録が不要になること
- ②1回の発破でも切羽前方の反射記録が得られること
- ③受振点は複数点が望ましいが1箇所でも可能なこと

この地震波干渉法におけるメリットは、探査結果の即時性と坑内機器の簡素化が期待でき、理想的な切羽前方探査手法になり得ると言える。

§4. 音響場シミュレーションと現場適用事例

4.1 音響場シミュレーション

(1) 概要

切羽前方探査における地震波干渉法の適用性を検証するために、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。地震波の数値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、近年食い違い格子による定式化^{21)・22)}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²³⁾のスタッガード格子有限差分法を実施した。

図5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 Wavelet²⁴⁾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(瞬発)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6(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6(b)に示すように4段の段発波形を用いた。図6(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5に示したモデル図では、深度方向900~1100m、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

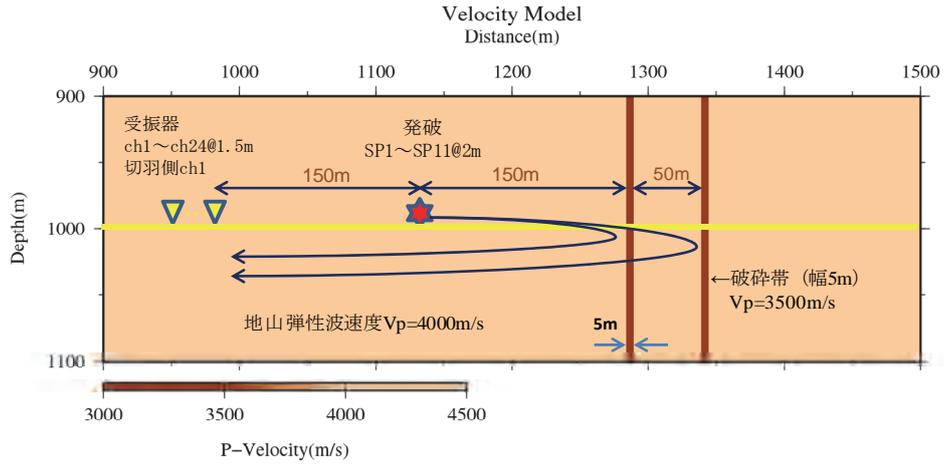


図5 音響場シミュレーションモデル

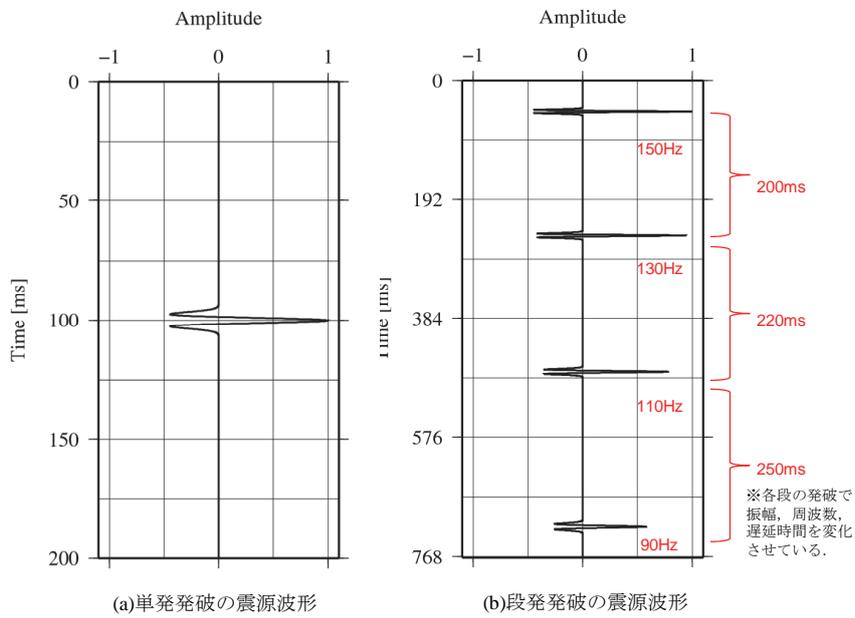


図6 発破震源モデル(単発発破、段発発破)

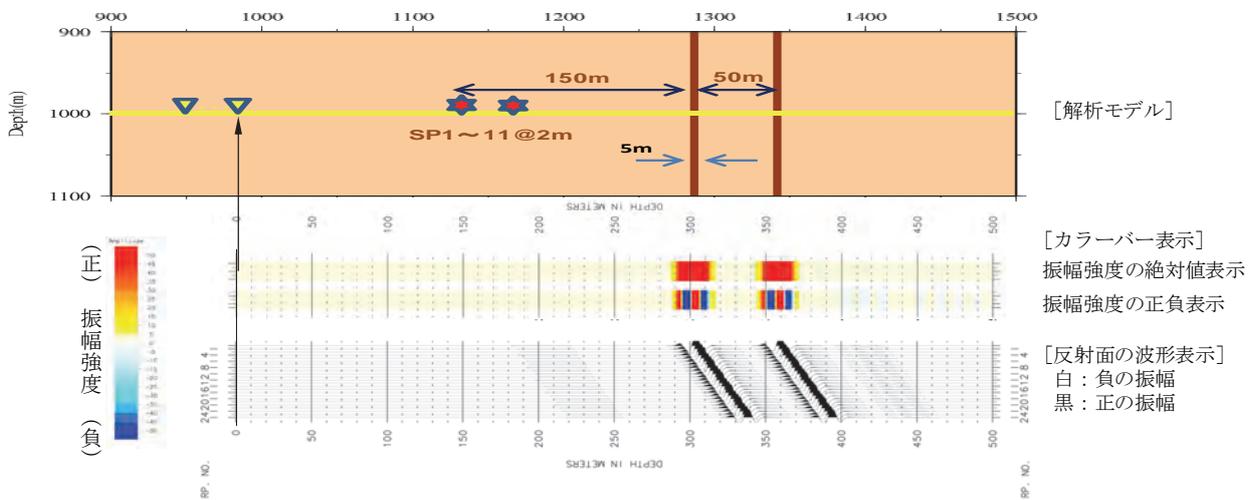


図7 連続SSRTにおけるモデル計算結果(単発発破震源と段発発破震源で同一の結果)

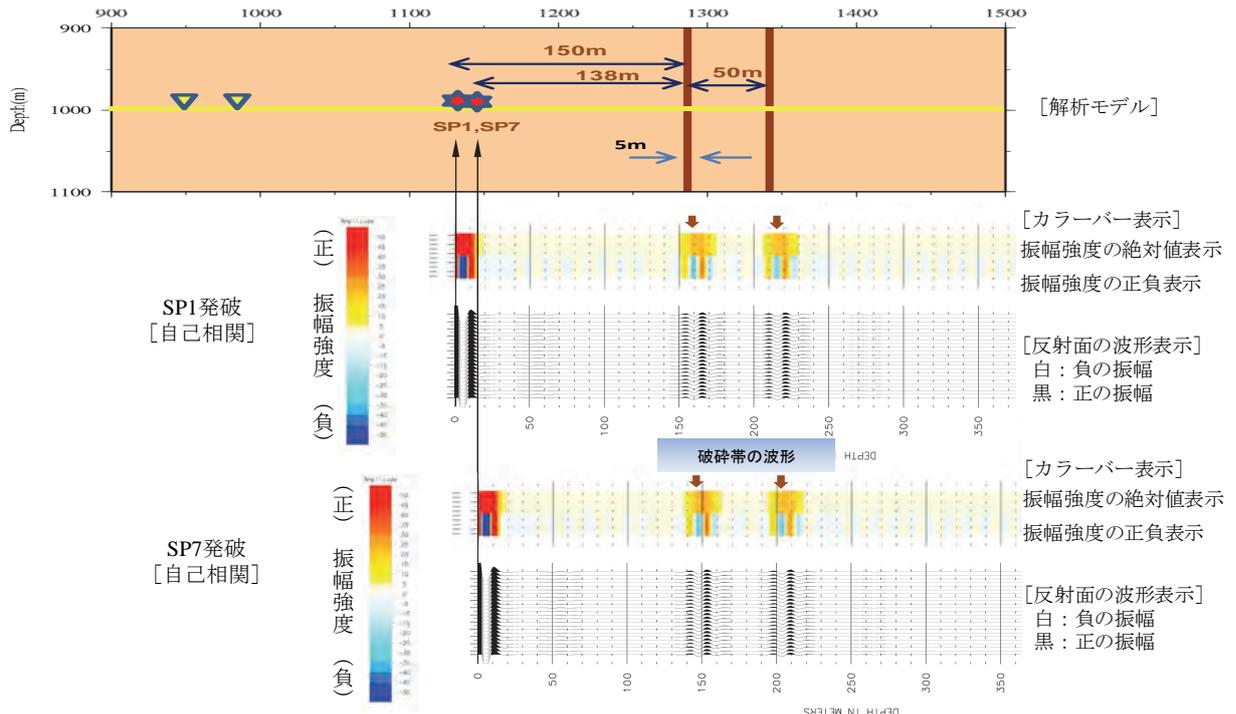


図8 単発発破震源による地震波干渉法(自己相関)のモデル計算結果[ゲート長500ms]

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7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7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る。この結果は、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確認したこと相当する。

なお、連続SSRTでは段発発破における1段目(瞬発)と2段目の段間時間を波形処理に用いるため、図6(b)に示した段発発破を震源とした結果と図6(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。

(3) 単発発破震源によるモデル計算

図8に、単発発破(SP1とSP7)を震源とする自己相関処理を実施したモデル計算結果を示す。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8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、処理波形は、この仮想受振点(切羽)において類似性が最大となるため最大振幅値を示し、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7に示した連続SSRTの距離原点0mの位置が受振点の切羽側(ch1)であることと異なるので注意が必要である。

図8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8に示すように、発破SP1と発破SP7ともに破砕帯の位置が10m程度後方にシフトするが2箇所の破砕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7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。

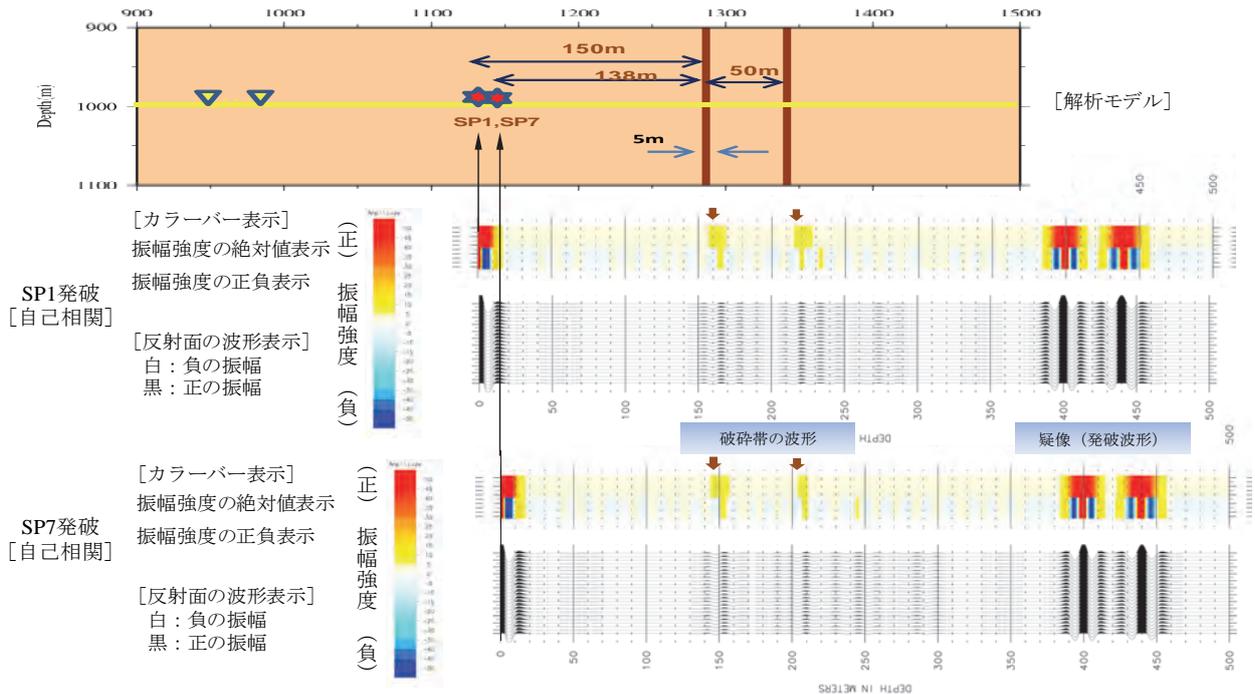


図9 段発発破震源による地震波干渉法(自己相関)のモデル計算結果[ゲート長500ms]

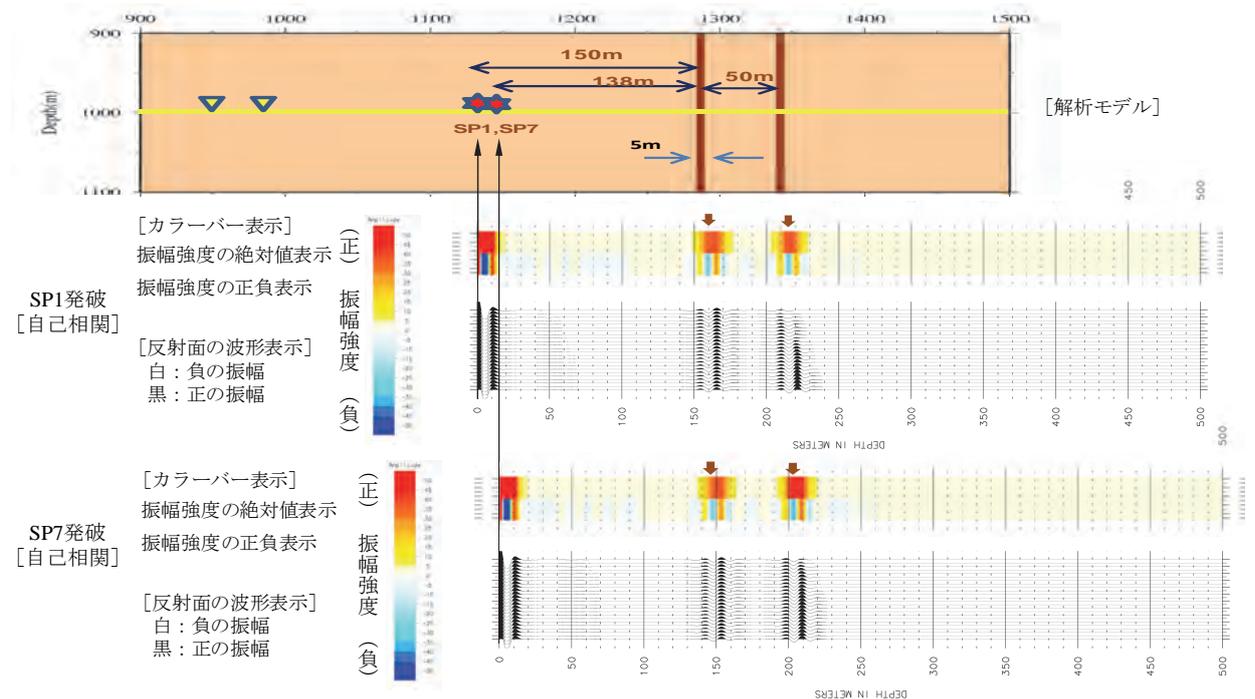


図10 段発発破震源による地震波干渉法(自己相関)のモデル計算結果[1段目からゲート長150ms]

(4) 段発発破震源によるモデル計算

図9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(瞬発)～3段目の段発発破記録が含まれる500msである。図9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である。

1段目(瞬発)～2段目における段間時間を200ms、地山弾性波速度4000m/sとして往復走時を考慮すると、

(段間時間200ms × 地山弾性波速度4000m/s) / 往復走時2 = 400m
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(瞬発)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調され、破砕帯等の地山変化を抽出することが困難となると言える。

一方、地震波干渉法ではノイズを長い時間取得し処理すること、すなわち自己相関におけるゲート長を長くすれば類似波形が抽出され易いとされている。しかしながら、図9、10に示した段発発破を用いたモデル計算結果から、発破のよう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強調されるため、ゲート長を1段目(瞬発)～2段目の段間時間内に設定すべきであることが分かる。

図10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10より、図9で見られた距離400mと450mで確認された段発発破の波形に起因する疑像が抽出されないことが分かり、破砕帯位置を図8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8と一致する。

一般に、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。よって、自己相関における探査深度は、連続SSRTの約半分となると考えられる。一方、自己相関は1回の発破で処理結果を得られることが大きな利点であり即時性が高いと言えるが、連続SSRTでは10数発の発破データを蓄積してから処理するためその時間ロスが欠点と言える。

4.2 現場適用事例

地震波干渉法は、連続SSRTによって切羽前方探査を実施した現場において適用した。自己相関では、ゲート長が長い方が類似波形を抽出するために有利であるため、まず、最適なゲート長を検討するための比較を実施した。

段発発破10段におけるゲート長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音響シミュレーション結果から予見されるため、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した。

図11に、10段の全発破時間に相当する2.5秒をゲート長とし、前処理として平滑化を実施した自己相関処理結果と、1段目発破から0.1秒(100ms)で2段目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4000m/sである。

図11より、切羽(発破位置)から20～60m付近に反射波が集中する傾向は両処理結果で一致しており、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記録と整合している。

しかしながら、図11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12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、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12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。

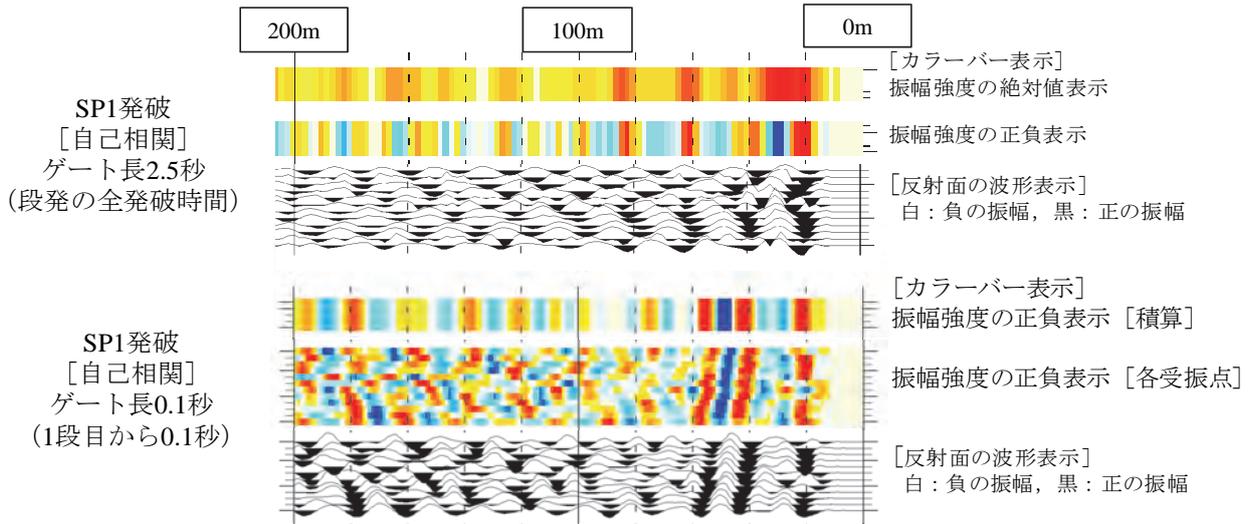


図 11 段発発破記録のゲート長の相違による自己相関結果の比較

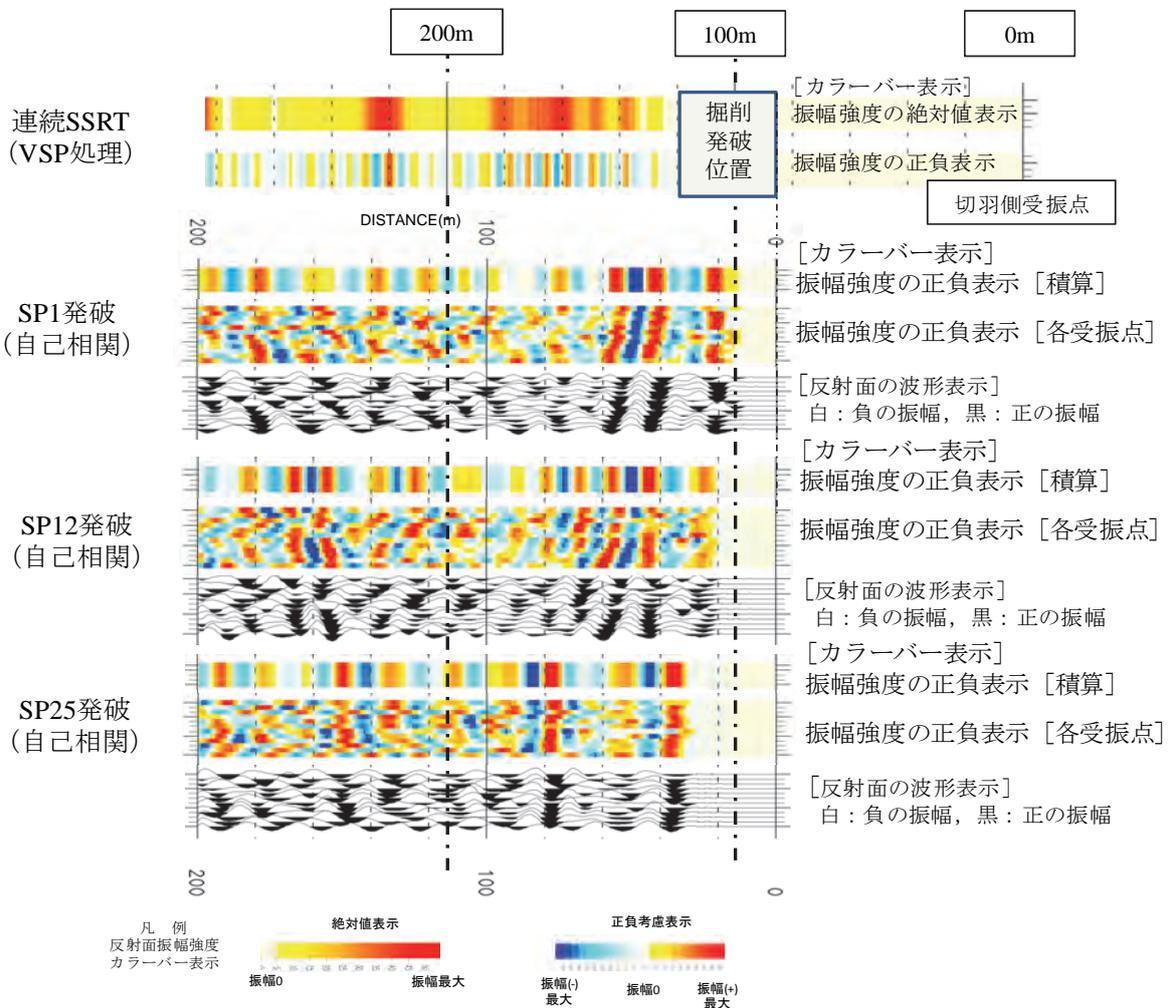


図 12 現場観測データを用いた連続 SSRT 処理と自己相関(発破 SP1、SP12、SP25)処理結果

[1 段目からゲート長 100ms]

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12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12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。

§5. おわりに

本稿では、筆者らのトンネル切羽前方探査における現在までの取り組みを冒頭で総括した。その後、現在取り組んでいるトンネル切羽前方探査に地震波干渉法の概念を導入するための考え方、音響場シミュレーションによる単発発破および段発発破のモデル実験結果を述べ、最後に現場適用事例として、現場観測記録を用いてゲート長をパラメータとした自己相関処理を実施した結果について述べた。本稿から得られた知見を以下に列挙する。

- P波を用いた切羽前方探査はほぼ実用化に至ったが、発破を震源とするS波探査の実用化は現段階で困難である。
- 新しい概念として地震波干渉法(自己相関)の考え方を切羽前方探査に導入することで、即時性の向上、探査機器の簡素化が期待できる。
- 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、地震波干渉法の相互相関処理によって破碎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(時間)をゲート長として自己相関処理すると、発破波形の類似性が顕著に強調され、地山

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(瞬発)から2段目の段間時刻を自己相関処理のゲート長として採用することが有益である。また、自己相関の信頼性はゲート長の約半分程度で高く、自己相関処理した結果における探査深度は連続SSRTの約半分程度と考えられる。
- 段発発破10段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が課題となった。
- 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を示唆した。

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

と考えられている。トンネル掘削のための段発発破記録は、初動が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十分考えられるが、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実用化に関して、その方位性を示すことができたと考えている。

一方、トンネル工事では坑内でノイズ振動源となりえる多くの作業を実施しており、これらの振動記録を地震波干渉法に応用することを現在鋭意進めているが障壁も高い。

最後に、雑感を述べる。山岳トンネル工事において重大な地山トラブルが発生することはごく稀であり、ほとんどのトンネルが多少のトラブルを除き問題は発生していない。当社においてもSSRT開発当初に、延長100m規模の断層破碎帯に遭遇した事例はあるが、それ以降、ほとんど重大な地山トラブルが発生していないのが実状である。よって、通常のトンネルであれば、SSRTや連続SSRTを常時実施する必要性は低く、これらの探査法は、特殊な目的や地山において実施されているトンネルB計測に相当する調査法であると位置付けることができる。連続SSRTの開発コンセプトは、トンネルA計測として日常的に地山を監視すること

であり、掘削発破に注目したことからその目的を達成できる手法ではあるものの、坑内における探査機材の簡素化が課題であると言える。地震波干渉法は1回の発破で結果が得られる即時性と、坑内探査機材の簡素化が期待でき、A計測としてより有益な探査手法となり得ると考えている。すなわち、地震波干渉法によって日常的に地山を監視し、何らかの異常があれば、SSRTや連続SSRT、あるいは水平ボーリングのような削孔調査を随時実施するという各調査手法の利点を生かした棲み分けができるまでに、地震波干渉法を発展させることが、今後のトンネル切羽前方探査の研究開発における大きな着眼点であると考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 村山秀幸、上野博務、福田秀樹、黒田徹：TBM 先進導坑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
- 4) 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.
- 5) 加藤卓朗、村山秀幸、清水信之、岡村浩孝、望月斎也：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.
- 6) 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山評価、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.
- 7) 大野義範、渡辺正、吉田泰士、村山秀幸、清水信之：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、土木学会トンネル工学研究報告集、第15巻、pp.219-226、2005.12.
- 8) 村山秀幸、丹羽廣海、福田秀樹、黒田徹、東中基倫：トンネル掘削発破を震源とする連続的な切羽前方探査の適用、土木学会トンネル工学報告集、第 19 巻、pp.157-164、2009.11.
- 9) 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.
- 10) 村山秀幸、丹羽廣海：S 波震源を用いたトンネル前方探査、フジタ技術研究報告、第 49 号、pp.55-60、2013.
- 11) 村山秀幸、鈴木信之、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、岩の力学国内シンポジウム&第 6 回日韓ジョイントシンポジウム講演論文集、第 13 巻、pp.701-706、2013.

- 12) 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(平成 26 年度)、III-093、pp.185-186、2014.9
- 13) 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.
- 14) Claerbout, J.F. : Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response, *Geophysics*, Vol.33, pp.264-269. 1968.
- 15) Wapenaar, K. and Fokkema, J. : Green's function of an representations for seismic interferometry, *Geophysics*, Vol. 71, pp.S133-S146, 2006.
- 16) 白石和也、松岡俊文、川中卓：地震波干渉法概説、地学雑誌、第 117 巻、第 5 号、pp.863-869、2008.
- 17) 例えば、物理探査学会：物理探査（小特集：地震波干渉法）、第 61 巻、第 2 号、pp.85-144、2008.4.
- 18) 例えば、物理探査学会：図解物理探査、pp.182-183、1989.4.
- 19) 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.
- 20) 伊東俊一郎、相澤隆生、松岡俊文：地震波干渉法によるトンネル地山の可視化、土木学会トンネル工学報告集、第 20 巻、pp.59-62、2010.11.
- 21) Virieux, J. : P-SV wave propagation in heterogeneous media : Velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, 51, 889-901, 1986.
- 22) Levander, A.R. : Fourth-order finite-difference P-SV seismograms, *Geophysics*, 53, 1425-1436, 1988.
- 23) 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 回日本地震高価シンポジウム、pp.875-880, 1998.
- 24) Ricker, N. : The form and laws of propagation of seismic wavelets, *Geophysics*, 18, 1953.

ひとこと



村山 秀幸

本研究の実施期間において NETIS 登録技術である SSRT が他社施工のトンネルで初めて採用されました。本技術が他社でも認められたことは、長年周辺技術の開発に従事してきた担当者として、無類の喜びを感じる次第です。