

## S 波震源を用いたトンネル前方探査

村山 秀幸 丹羽 廣海

### 概 要

筆者らは、トンネル施工中に切羽前方地山を予測する手法として、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、震源として探査用発破、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現場条件や地山条件によって選択でき、坑内はもとより掘削以前に坑外から切羽前方を探査することも可能であり汎用性が高い。従来の SSRT では、P 波を用いた VSP 処理によって切羽前方を予測してきたが、S 波を併用できればトンネル切羽前方の地下水性状や地山物性の推定の可能性が示唆され、施工性の向上や安全管理に寄与することが期待できる。本稿では、S 波震源装置として打撃角度が調整可能な油圧インパクト、車載自走型の S 波バイブレータの比較実験を実施し、受振装置としては 1 成分と 3 成分の受振器を比較検討することより S 波を用いたトンネル前方探査の可能性を検証した。

### Tunnel seismic reflection survey using S-wave as a seismic source

#### Abstract

The authors have developed a Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels (SSRT) to evaluate geological features ahead of the tunnel face. For SSRT surveys, a hydraulic impactor, vibrator or explosives can be used as the seismic source according to the construction methods and geological conditions of each tunnel. Vertical seismic profiling using the P-wave has been used in conventional SSRT. And if S-wave can be used together, it is thought that it may become possible to determine the ground physical properties for instance groundwater. This paper describes experiments comparing different seismic source equipments and one or three component receivers to use the S-wave for tunnel survey.

キーワード: 切羽前方探査、SSRT、S 波、油圧  
インパクト、バイブレータ

§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・適用<sup>1)~5)</sup>してきた。SSRTは、震源として小薬量の探査用発破、機械震源(バイブレータ、油圧インパクト)を選択可能なことを特徴とし、波形処理手法としては、切羽前方と後方地山のVSP処理による反射構造の推定、屈折法による測線直下の弾性波速度の推定、坑内と坑外(地表)に受振装置と震源を配置する弾性波トモグラフィによる切羽前方地山の速度構造の推定<sup>2)</sup>など、様々な施工条件と種々の探査目的に応じてトンネル切羽の前方地山を評価・予測することを可能としてきた。

一方、地山トラブルは坑口周辺で発生することが多いことを考慮し、SSRTではトンネル掘削前に坑口近傍からも切羽前方地山を探査することを可能とし、坑外SSRTと称している<sup>4) 5)</sup>。一般に坑外では、発破の使用が制限されることから、坑外SSRTでは機械震源を基本とし、探査深度が200m以上必要な場合にはバイブレータ、それ以下の場合には油圧インパクトを震源に採用する。

さらに、その適用が発破工法のトンネルに限定されるが、段発となる掘削発破を震源に活用し、トンネル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連続SSRTを開発した<sup>5)</sup>。連続SSRTは、坑内と坑外に同時に振動記録装置を設置することを特徴とするため、発破時刻を高精度で記録する必要がある。そのため、坑外で受信したGPS刻時信号を光ケーブルで坑内に伝送する装置の開発、原子時計であるルビジウム素子を用いた高精度の刻時装置を坑内に携行し掘削作業中は観測機器を坑内に常設する手法を開発し実用化した。

以上のように従来のSSRTは、P波(縦波、疎密波)を用いた探査技術であるが、最近、S波(横波、せん断波)を用いる手法が注目されつつある<sup>6) 7)</sup>。S波はP波と比較して振幅が大きく振動エネルギーが高いことから減衰しづらいこと、P波が固体、液体、気体(音波)を伝播するのに対して、S波は固体のみを伝播することなどから、S波は地下水探査への応用が期待できる。一方、地山のP波速度とS波速度が求まり密度が既知な場合には、地山の動的弾性パラメータ

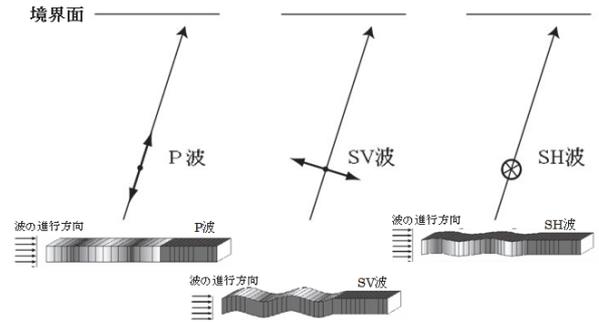


図1 P波とS波(SH波とSV波)の伝播模式図

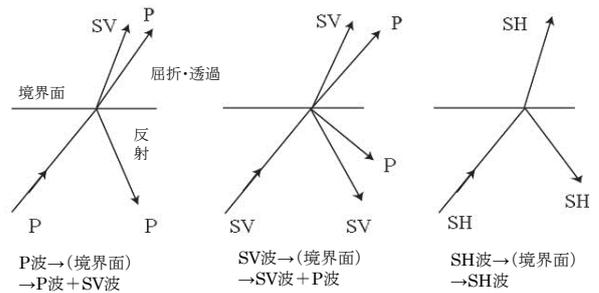


図2 P波とS波における境界面での伝播挙動の相違

(剛性率、ヤング率、体積弾性率など)が算出でき、切羽前方地山の物性を推定できる可能性が期待できる。

以上から、P波とS波を併用する切羽前方探査は、従来のP波のみとは異なる様々なメリットが期待できると言える。

本稿では、S波を併用するSSRTの開発を目指し、S波探査に関する既往の知見と課題を整理すると共に、2箇所(トンネル現場)において検証実験を実施した結果について述べる。S波震源装置としては、打撃角度が調整可能な油圧インパクト、車載自走型のS波バイブレータの比較検証を実施した。受振装置としては、上下動用と水平動のジオフォンを比較検討した。最後に、現場におけるP波とS波を併用するSSRT探査結果を示し、S波を併用するトンネル前方探査の適用性を検証した結果について述べる。

§2. S波の特性と既往研究

2.1 S波の特性

S波はP波より遅れて伝播するため観測記録からS波のみを分離抽出することが困難であり、P波を用いた各種の探査に比べてその普及が遅れていると言える<sup>8)</sup>。

図1、2に示すように、S波は、波の進行方向と粒子の振動方向が垂直な波であり、地表面に平行に振動するものを

SH波、地表面に垂直なものをSV波と称する。SV波はSV波のまま伝播するほかに、反射・屈折によりP波から変換したりP波に変換したりすることが知られている。しかしながら、SH波はSH波としてしか伝播しないので、取り扱いが比較的容易となる。よって、S波を用いたトンネル前方探査において対象となるのはSH波となる。

S波探査用震源としては、古くからハンマと木板を用いる板たたき法が主流であり現在も用いられているが、最近ではS波発震用の油圧インパクトやバイブレータが開発されている<sup>8)</sup>。なお、一般に単独孔の発破震源においてS波を効率的に発生させることは困難とされている。

## 2.2 S波探査の既往研究

土木・建築構造物における耐震設計では、地盤のS波特性の把握が必要不可欠であり、主にボーリング孔を利用する速度検層(PS検層)や音波検層により地盤のP波とS波速度や減衰特性などが把握されている<sup>9)</sup>。

以下に、S波を用いた山岳トンネルの地山探査に関する既往研究を述べる。

国内で切羽前方探査という用語を普及させ、トンネルにおける適用実績が最も多いTSP<sup>10)</sup>は、当初P波用探査装置として販売された。現在ではS波の測定と処理が可能となり、国内でも導入事例が報告されている<sup>7)</sup>。TSPでは、側壁に長さ約1.5mの発破孔を複数削孔し、水をタンピング材として小葉量(50g程度)の探査用発破を実施し震源とする。受振器は、側壁に発破孔と同様に長さ約2mの受振孔を削孔し専用ケーシングを埋設して3成分加速度計を両側の側壁に設置する。TSPで得られた波形記録は、専用システムで処理されるため、どの程度の品質でS波が記録されているかあるいは、受振記録の周波数特性などをユーザーが検証することができない。

三谷ら<sup>6)</sup>は、TSPにおいてP波とS波の速度が得られる優位性に着目し現場検証を実施している。その結果、TSPで得られるP波とS波の速度分布は直接波を処理することから側壁近傍の地山速度に強く依存すること、速度変化の絶対値は信頼性が低いことなどを指摘しており、P波とS波の速度分布から算出される各種地山の力学パラメータは、その物理的意味を議論できる段階に無いとしている。なお、海

外ではTSPにより算出される地山物性値を岩盤分類に応用する事例も報告<sup>11)</sup>されている。

一方、Petronioら<sup>7)</sup>は、TSWD(Tunnel Seismic While Drilling)と称するトンネル施工中の探査手法を提案しており、本手法は連続SSRTの開発コンセプトと類似する。TSWDでは、トンネル坑外に設置した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トンネルの切削に伴うノイズ信号を震源として、地震波干渉法<sup>12)・13)</sup>に基づく自己相関処理によりトンネル周辺の反射面を抽出しており、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(トンネル軸方向と直交方向)の周波数分析を実施し、S/N比が高く品質よい波形記録であることが示されており、S波を主体とする波形処理により地山の反射面分布を抽出している。なお、TSWDは、地震波干渉法という最近注目されている探査概念を導入しており、S波探査と共に今後発展が期待される手法であるが、国内のトンネルにおける本格的な適用報告例は少ない<sup>14)・15)</sup>。

以上の既往研究から、S波の発震装置と観測装置に関しては、S波の発生効率と品質が高い震源とS波の測定に有効なジオフォンを選定すると同時に、得られた記録を周波数分析等で吟味し品質の高い波形記録が得られているかを検証できることなどが重要と考えられる。一方、S波処理に関しては、TSPのような地山の区間速度に拘らず、まずはP波と同様に一様なS波速度でVSP処理することにより、切羽前方の反射面を抽出することが肝要と考えられる。

## §3. 現場におけるS波探査の試行実験

### 3.1 Aトンネルでの試行実験

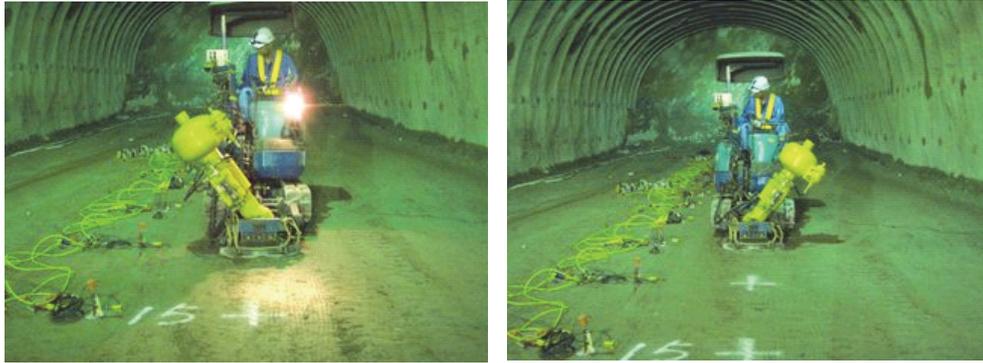
#### (1)トンネル概要

Aトンネルは、延長373m、内空断面積63m<sup>2</sup>の道路トンネルであり、トンネル地質は、西南日本内帯の領家帯に属する変成岩類が分布し、岩種は砂質および泥質の片麻岩から構成される。

#### (2)探査仕様

##### a)震源と受振器

S波用震源としては、SSRT<sup>1)</sup>において通常P波の震源とし



(a)左からの打撃 (b)右からの打撃  
写真1 油圧インパクトによるS波発震方法(35°左右傾斜)



(a)油圧インパクトにて板を固定 (b)大ハンマによる打撃  
写真2 油圧インパクトで固定した板たたき法震源

でも使用している油圧インパクトを使用した。写真1に示すように、本震源は、ベースプレートの打撃角度を左右で鉛直から35°まで傾けることができ、傾斜させた方向からベースプレートを打撃することにより、せん断波を地盤に伝播させ易い構造となっている。さらに、左右からの打撃記録における振幅を適切に揃えて減算処理すれば、S/N比の高いS波記録の取得が期待できる。なお、今回は通常のP波発震となる鉛直方向の上下打撃とS波発震となる右および左からの打撃を各5回ずつスタッキングし1発震点の記録とした。

さらに写真2に示すように、油圧インパクトのS波記録と比較する目的で、大ハンマを用いた板たたき法で発震した記録を数箇所取得した。

P波の卓越周波数は、150-180Hz程度<sup>3)</sup>となることが分かっており、P波を用いたSSRTでは分解能向上のため通常よりやや高周波数領域となる卓越周波数100Hzのジオフォンを使用する。一方、S波の卓越周波数は、概ねP波の半分程度となることから、S波受振用としては卓越周波数30Hzのジオフォンを使用することとした。

写真3に各ジオフォンの設置状況を示す。P波用には、



写真3 ジオフォン(受振器)の設置状況



写真4 測線配置状況(発震点オフセット1m)

S 波震源を用いたトンネル前方探査

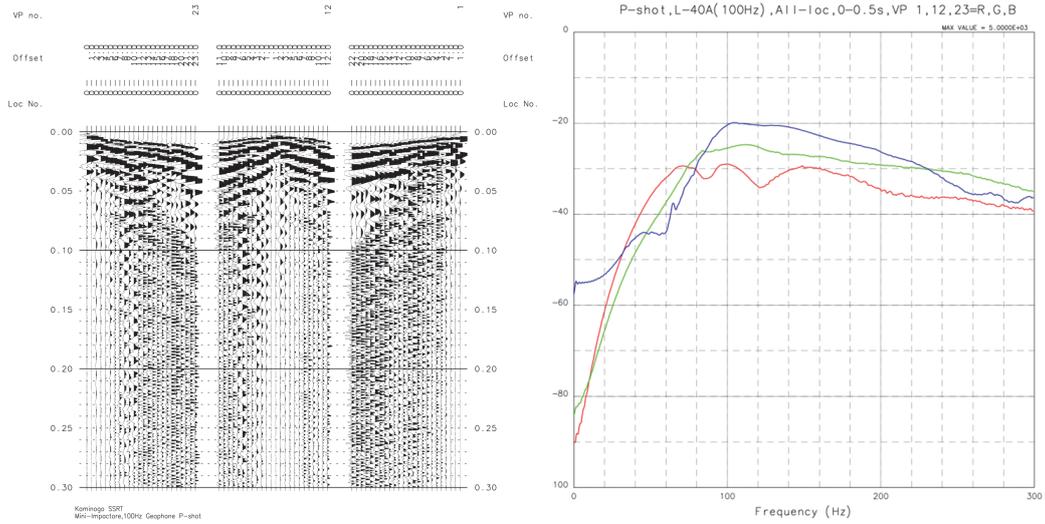


図3 油圧インパクト上下ショットの記録(P波、100Hz上下動ジオフォン)

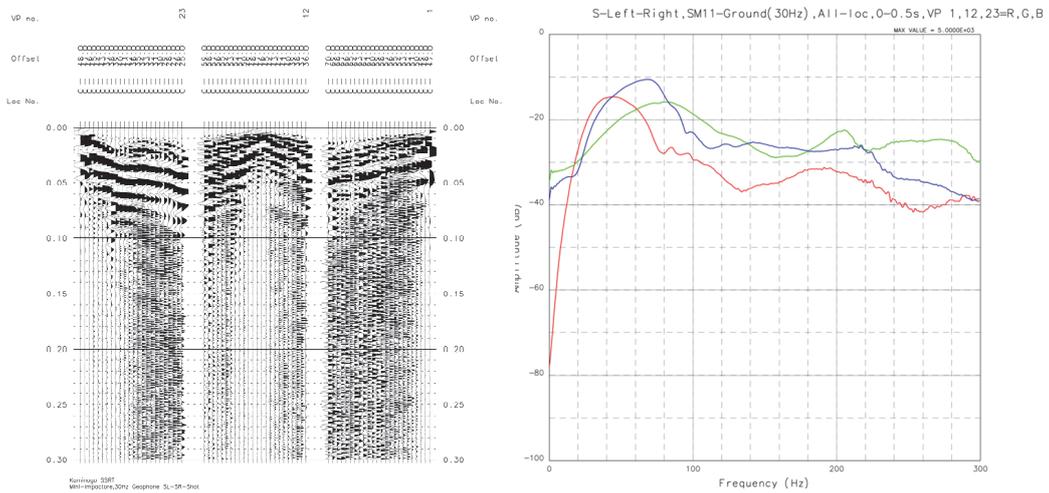


図4 油圧インパクト(35°傾斜)の左右ショット減算処理後の記録(S波、30Hz水平動ジオフォン)

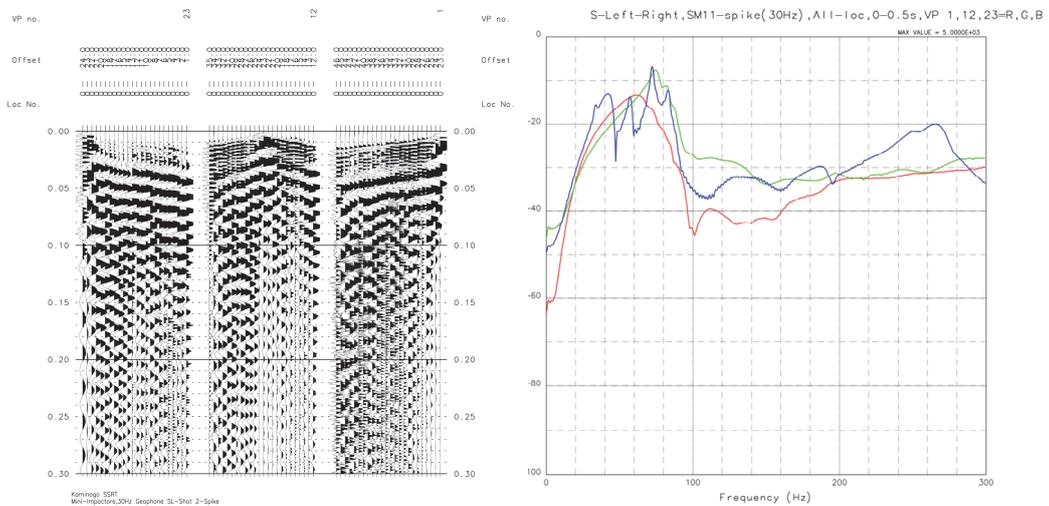


図5 油圧インパクト(35°傾斜)の左右ショット減算処理後の記録(S波、30Hz上下動ジオフォンの水平方向設置)

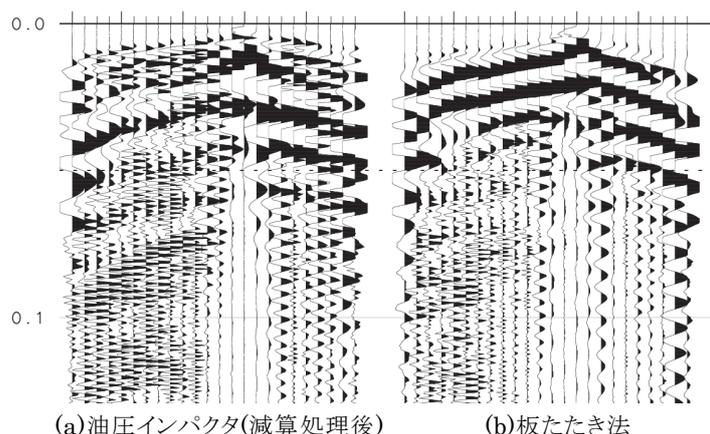


図6 震源別のS波記録の比較(30Hz水平動ジオフォン)

100Hz上下動ジオフォンを地盤に固定した2軸スパイクの上下方向に設置し、近傍にS波専用で管体を加工した30Hz水平動ジオフォンを設置した。さらに、汎用性を考慮して2軸スパイクの水平方向に上下動用の30Hzジオフォンを設置し波形記録を比較することとした。

写真4に測線配置状況を示す。受振点間隔は1.5mで計24箇所とし各受振点に写真-3で示した3個のジオフォンを設置した。発震点も受振器と同様に間隔を1.5mとして、受振点からの発震点のオフセット距離を1mとした。

#### b)振動記録装置

振動記録装置は、多チャンネル地震探鉱機(G-DAPS Light)を使用した。発震信号(TB)は油圧インパクト側から探鉱機に有線で送信し、総チャンネル数72ch、サンプリング間隔0.5ミリ秒、データ長2秒として記録した。

#### (3)波形記録と周波数特性の比較

図3、4、5に、P波およびS波における波形記録と卓越周波数を各々示す。各々の図では、探査測線の切羽側、中心点、坑口側において発震した波形記録と各発震点において記録された波形の周波数特性を示している。

図3の100Hz上下動におけるP波の卓越周波数は100-160Hz程度で、従来と比較するとやや低い値を示すがP波記録として遜色ない。

図4、5は共に左右の打撃記録を減算処理した後の30Hz水平動と30Hz上下動のジオフォンを水平方向に設置した記録である。卓越周波数は、共に40-80Hz程度と考えられるが、30Hz上下動を水平方向に設置した記録は波

形にリンク現象が発生している。この原因は、地盤に固定した2軸スパイクの固有周波数がS波の周波数に近いことため共振したと考えられ、2軸スパイクでの記録は好ましくないと言える。一方、図4の30Hz水平動の左右ショットの減算処理後の記録は、S/N比が高く品質が良いと言える。

図6に、同一発震位置における油圧インパクトの30Hz水平動の減算処理後と板たたき法による記録を比較して示す。図より、板たたき法では非常に良質なS波が発震されていることが分かる。しかしながら、探査対象が数100mとなる切羽前方探査用の震源としては、発震エネルギーが小さくS波震源としては不十分と考えられる。

## 3.2 Bトンネルでの試行実験

### (1)トンネル概要

Bトンネルは、延長567m、内空断面積58.6m<sup>2</sup>の道路トンネルであり、トンネル地質は秩父帯に属する頁岩と砂岩およびその互層から構成される。

### (2)探査仕様

#### a)震源と受振器

BトンネルではAトンネルでの実験結果を踏まえ、さらに高品質で振動エネルギーが大きいことが期待できるS波震源を採用した。写真5に示す油圧インパクトは、打撃角度を60°まで傾斜することが可能であり発生するS波の品質向上が期待できる。ただし、本インパクトは写真1に示したように左右に傾斜することは不可能であり、左右の打撃はベースマシンの前後を入れ替えて別途実施する必要がある。

写真6に示すS波パイプレータは、車載自走型であり坑



写真5 油圧インパクトによるS波発震(60°片側傾斜)



写真6 車載型S波バイブレータの構造と発震状況



写真7 受振器と測線配置状況(インパクト発震オフセット1m、バイブレータ発震オフセット2m)

内での機動性に優れ、マスダンパーの設置方向を鉛直から水平方向に変更することでP波からS波の発震装置に切り替えることが可能である。本バイブレータは油圧インパクトより大きな振動エネルギーを地盤に伝播する能力がある。

写真7に受振器と測線配置状況を示す。受振器は、SH波の取得を目的として30Hz水平動ジオフォンとP波用に100Hz上下動ジオフォンを使用した。発震点は、油圧インパクトを測線1mオフセットとし、バイブレータは2mオフセットとした。油圧インパクトの発震は左右のショットをベースマシンの前後を入れ替えて実施した。スタッキングは油圧インパクト、バイブレータ共に各発震点で5回ずつとした。

#### b) 振動記録装置

振動記録装置は、バイブレータの発震制御が可能な多チャンネル地震探査機(DAQⅢ)を使用した。S波バイブレータのスweep周波数は10-140Hz、スweep長は14秒である。総チャンネル数は48ch、サンプリング間隔は1.0ミリ秒、データ長2秒はである。

#### (3) 波形記録と周波数特性の比較

図7に、60°片側傾斜の油圧インパクトの左右打撃を減

算処理した記録を示し、図8のS波バイブレータの記録をそれぞれ示す。

図7より、一部100-140Hzにピークが確認できるものの卓越周波数が50-80Hzに集中しており、S波成分に相当する記録が得られていることが分かる。一方、図4の35°傾斜の油圧インパクト記録と比較すると波形が非常にシャープであることから、35°傾斜より60°傾斜の油圧インパクトの方がS波発生の品質が高いと考えられる。

図8のS波バイブレータの卓越周波数は、油圧インパクトと同様に、一部100-140Hzにピークが確認でき卓越周波数が各発震点でやや不整合となっているが、S波成分に相当する周波数40-80Hzにピークが確認できる。図8のS波波形は非常にシャープであり振幅も大きいことが特徴である。なお、図3~8では振幅の大きさを揃えた波形表示ではないことから、単純に振幅の大きさから震源エネルギーの大きさを比較できないが、図8の波形表示から、S波バイブレータの震源エネルギーは、油圧インパクトより相応に大きいことが示唆される。

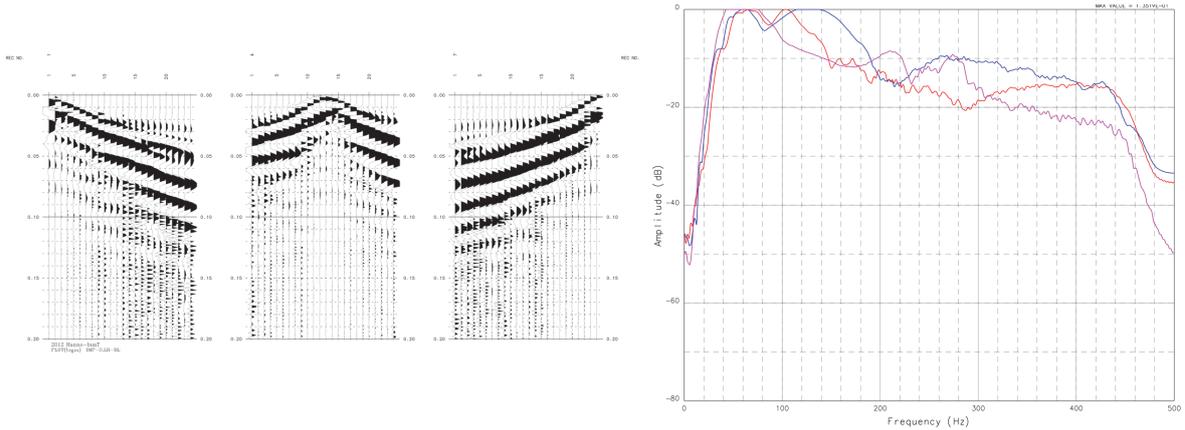


図7 油圧インパクト(60°片側傾斜)の左右打撃減算処理後の記録(S波、30Hz水平動ジオフォン)

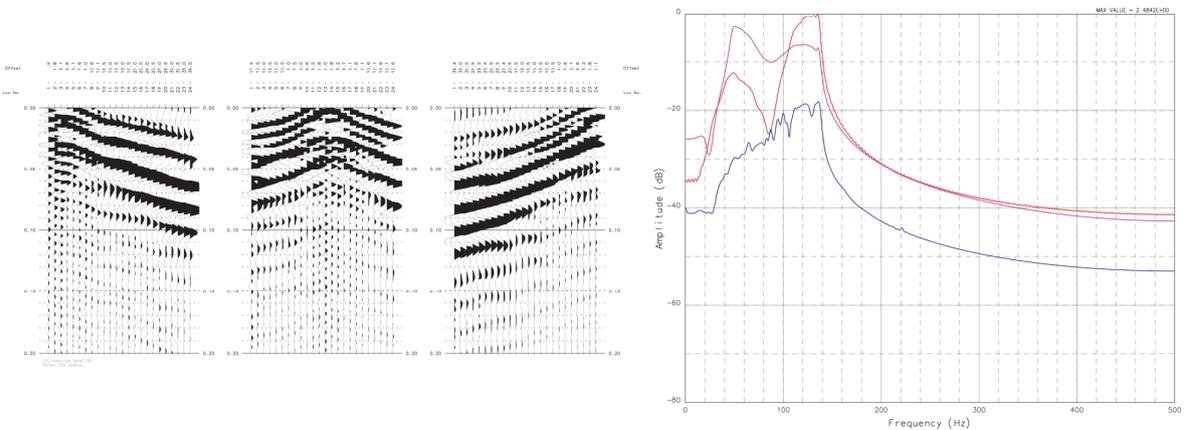


図8 S波バイブレータの記録(S波、30Hz水平動ジオフォン)

### 3.3 まとめ

以上の2箇所のトンネル現場で実施した試行実験から、各種のS波震源装置および受振装置に対するS波探査への適用性をまとめると表1となる。なお、表1には受振装置として3成分ジオフォンの適用性も併記した。各受振器に対しては、写真8に示すようにトンネル現場での試行実験に先立ち実験施設内において予備実験を実施している。

表1に示すように、S波震源としてS波の品質と振動エネルギー(探査深度の深さ)の観点からはS波バイブレータが最も良好な震源と考えられる。しかしながら、坑内における機動性、作業性、汎用性、コストなどを総合的に考慮すると油圧インパクトの方が山岳トンネルにおけるS波探査としては適用性が高いと評価した。一方、油圧インパクトの35°左右傾斜と60°片側傾斜では、S波の発生品質において60°傾斜の方が高いと考えられること、トンネル掘削断面の大きさなどの現場条件を考慮して両者を選択することが

望ましいと考えられる。

受振装置に関しては、水平動専用の管体に加工した30Hzのジオフォンが現状で最も適用性が高く有効と考えられる。なお、10Hzの3成分ジオフォンも有効であるが、設置精度が要求されトンネル底盤等に精度よく設置することが容易ではないことが欠点となる。当初、最も汎用的な上下動のジオフォンを2軸スパイクで設置する方法が安価で設置が簡便と考えていたが、スパイクの共振問題が課題となった。しかしながら、2軸スパイクの長さを短くすれば共振周波数は大きくなることから共振を避けることは不可能でなく更なる改良によって適用性が向上すると考えられる。

SSRTにおけるP波探査では、1軸のスパイクを用いて100Hzの上下動ジオフォンを地盤に設置することから、今後P波とS波同時に測定可能な受振装置として、上下動は100Hz、水平動は30Hzの2成分あるいは3成分のジオフォンを専用管体に加工し使用することが想定される。

表1 S波探査のための震源装置と受振装置の適用性に関するまとめ

| 震源装置                                 | 特徴   | 適用性 |
|--------------------------------------|--|-----|
| 油圧インパクト<br>(35°左右傾斜)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・小型で機動性が高く(輸送は4t ユニック車)、低コストである。</li> <li>・同一発震点でS波の左右打撃とP波上下打撃が可能であり作業性が高い。</li> <li>・S波のS/N比がやや低いことから、現場測定時に生波形からS波の品質を判別しづらい(左右減算処理で明確化する)。</li> </ul>       | ○   |
| 油圧インパクト<br>(60°片側傾斜)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・小型で機動性が高く(輸送は4t ユニック車)、低コストである。</li> <li>・同一発震点でS波とP波を打撃可能であるが、S波の左右打撃はベアスマシンの前後入れ替えて実施することから作業性がやや劣る。</li> <li>・S波のS/N比は高く、現場での生波形からS波の品質を判別可能である。</li> </ul> | ◎   |
| S波バイブレータ<br>(車載自走型:4tトラック)           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・車載登載型で自走式であるが、油圧インパクトより大型であることから坑内での機動性や作業性がやや煩雑となる。</li> <li>・掘削断面の小さなトンネルには不適で汎用性が低い。</li> <li>・S波のS/N比は非常に高く、探査深度も深い。</li> </ul>                            | △   |
| 受振装置                                 | 特徴   | 適用性 |
| 30Hz 水平動ジオフォン<br>(専用筐体)              | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水平動専用の筐体に加工する(コストアップ)。</li> <li>・設置時に水平精度を要求され、簡便性にやや劣る。</li> </ul>  | ◎   |
| 30Hz 上下動ジオフォンの<br>水平設置<br>(2軸スパイク使用) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・汎用性があり安価で、設置も簡便である。</li> <li>・2軸スパイクの共振対策(スパイク長さの調整)が必須となる。</li> <li>・水平方向に確実に固定する必要がある。</li> </ul>  | △   |
| 10Hzの3成分ジオフォン                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・専用の筐体が大きく、設置に手間がかかる。</li> <li>・設置時に水平精度が要求され、簡便性に劣る</li> </ul>   | ○   |

#### §4. P波とS波を用いた切羽前方探査

##### 4.1 概要

P波とS波を用いた切羽前方探査を前述のAトンネルで実施した結果について述べる。本トンネルでは、施工中の地質調査として全線で先進ボーリングを実施している。よって、SSRTによるP波とS波探査と先進ボーリングによる結果、切羽観察結果を総合的に評価した。

##### 4.2 先進ボーリングとSSRT 前方探査結果の比較

図9に、SSRTによる通常のP波処理によって得られた切羽前方(図右側)と切羽後方(図左側)の反射面記録をトンネル地質縦断、先進ボーリング記録、切羽観察による評価点の推移グラフ等と併記して示す。SSRTにおけるVSP処理では、切羽前方のP波の地山弾性波速度を3,200m/s、後方を3,600m/sとして処理し距離換算した。

起点側坑口の先進ボーリングは、通常のロータリー式、その他はロータリーパーカッション式であり、穿孔方式によ



写真8 予備実験で使用した受振装置

りコア品質に差がある。よって、ロータリー式はRQDが25%以下の区間を抽出して図9にハッチングした。一方、ロータリーパーカッション式は、岩級区分でD~CL級となる箇所を図9にハッチングし反射記録と対比することとした。

図9より、切羽後方の先進ボーリングにおける劣化箇所は、反射面が集中する箇所と良く一致する。一方、切羽前

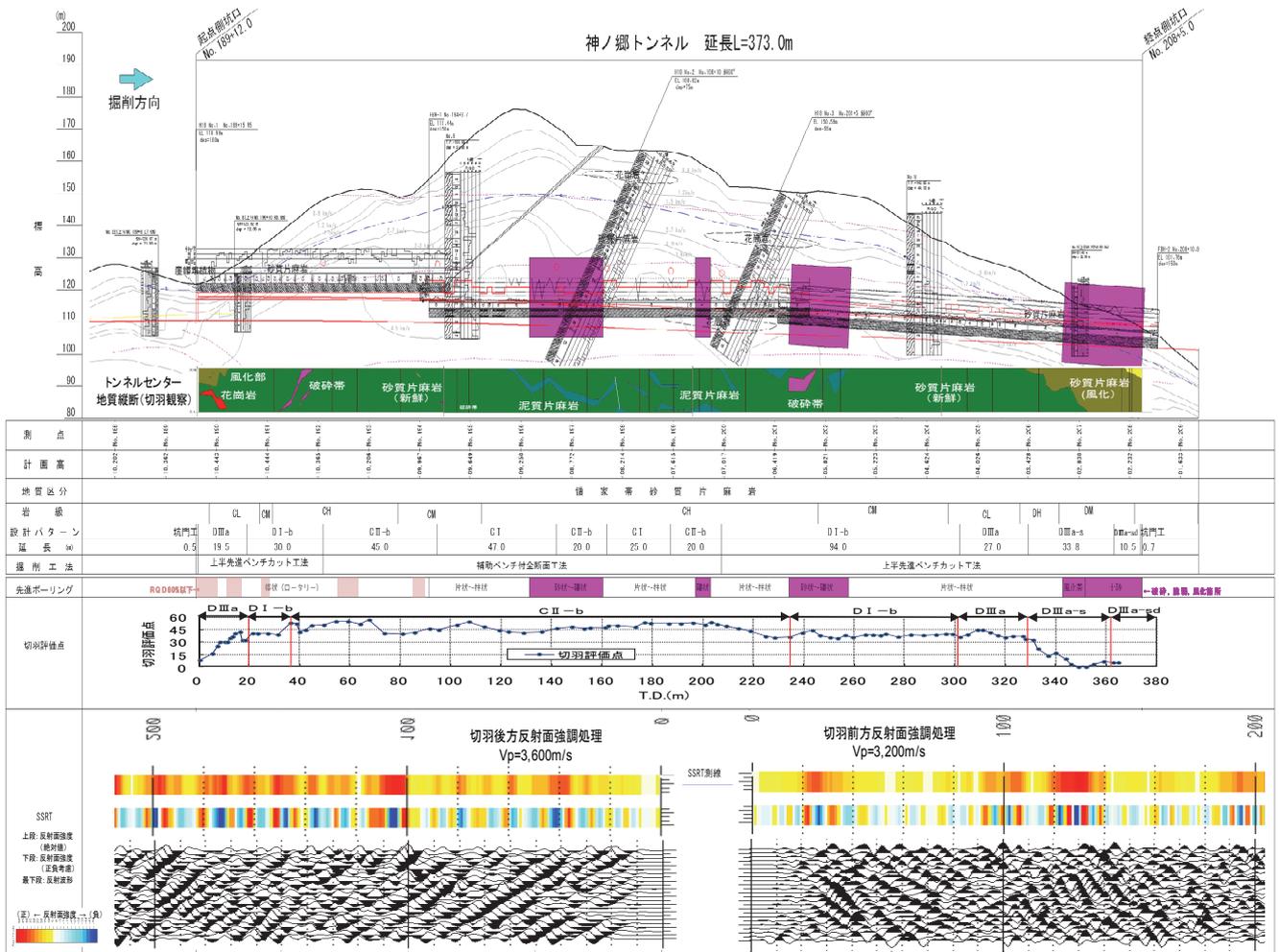


図9 SSRTによる通常のP波処理によって得られた切羽前方と切羽後方の反射面記録と地質記録の対比

方の反射記録は、終点側坑口付近の風化部と先進ボーリングによる劣化部および反射面集中箇所がほぼ一致している。しかしながら、探査測線から前方約20~40m区間において先進ボーリングで確認された劣化部と反射面が集中する箇所が一致しているものの、切羽観察の評価点に差がなく施工上支障はなかった。すなわち、この20m区間では、先進ボーリングとP波探査において地山変化点が想定されるものの切羽観察からは変化を確認できなかったと言える。

図10に、切羽前方のP波およびS波による反射記録を切羽評価点パラメータ(圧縮強度、風化変質、割れ目間隔、割れ目状態)の推移と比較して示す。S波速度は初動解析を参照として2,000m/sを採用し、その結果 $V_p/V_s=1.6$ となり一般的な $V_p/V_s$ 比となっている。S波による反射面は、P波よりコントラストがやや小さいが、2区間に反射面が集中する箇所が確認できP波探査結果とよく整合する。一方、

本トンネルはほとんど湧水が確認されなかったが図に滲水箇所を明示し、S波探査結果と比較した結果、滲水箇所と反射面記録に相関性は見られなかった。

一方、前述の探査測線から前方20~40m区間はS波でも地山変化が想定されている。切羽評価点の各パラメータから、この区間は「変質が強いが強度が上昇し割れ目間隔が粗となるアンバランスな変化」を呈することがわかる。よって、この区間は地山強度が上昇したことにより切羽は安定し施工上問題なかったが、周辺地山と異なる性状であった可能性が示唆される。

以上の現場適用から、先進水平ボーリングやSSRTのような弾性波を用いる探査結果においては、目視による切羽観察あるいは観察に基づく評価点のみでは、判別しがたい地山変化を捕らえている可能性も示唆されると言え、現場適用により、P波とS波併用するSSRT探査の有用性が示されたと考えられる。

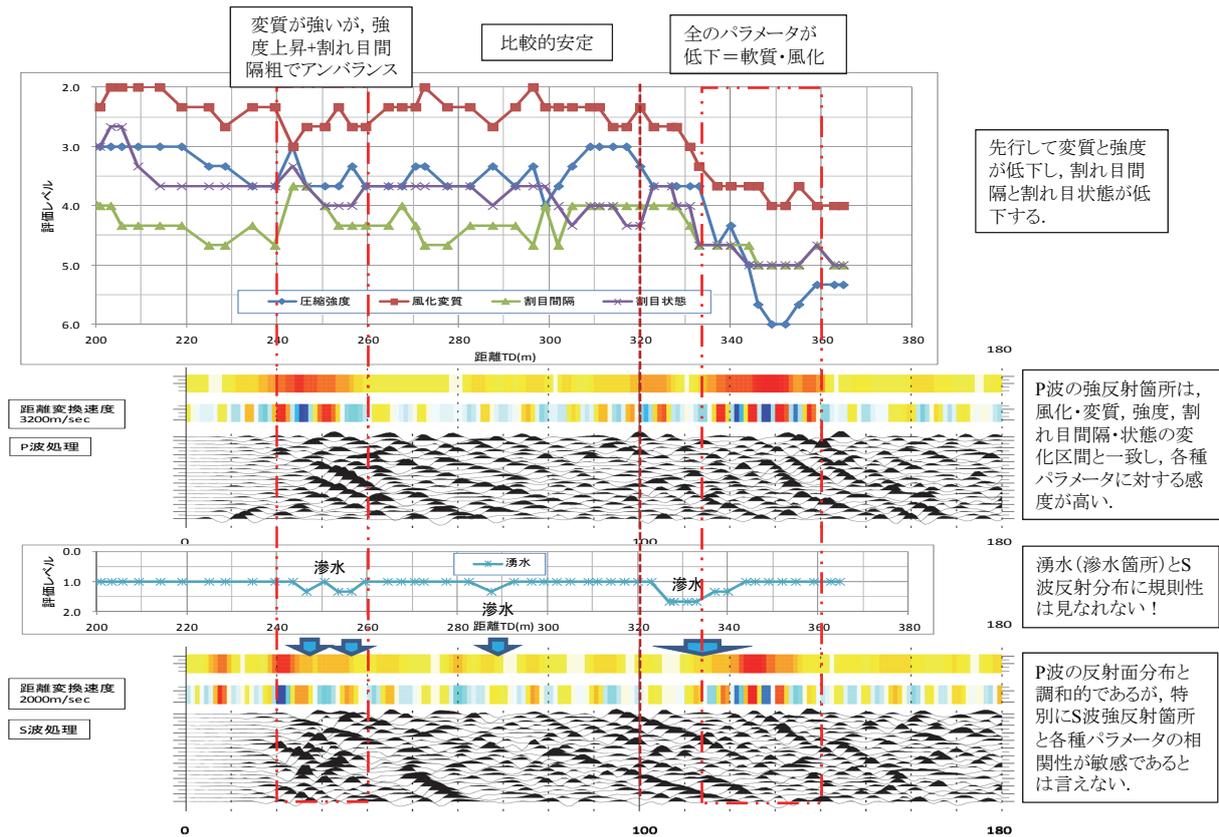


図10 切羽前方のP波とS波による反射記録の対比と切羽評価点パラメータ

## §5. おわりに

本稿では、S波を用いたSSRT切羽前方の開発を目的として実施した試行実験について述べた。その結果、S波の震源装置としては、油圧インパクト(35°左右傾斜打撃、60°片側傾斜打撃の2タイプ)、S波バイブレータ(車載自走型)を検証し、各震源の特性を把握すると同時に、山岳トンネルにおける油圧インパクトの優位性を確認した。さらに、受振装置に関しては、卓越周波数30Hzのジオフォンを水平動専用に筐体加工したタイプが最も有効であることを示した。最後に、現場においてP波とS波を用いた切羽前方探査を実施し、各探査結果を水平ボーリング結果と切羽観察結果と比較することにより、P波とS波を併用する探査手法の有効性を示し、今後、地下水の豊富なトンネルなどへの適用性を確認した。

一般に、発破震源は、S波を分離抽出することが困難であり、発破はS波の発生が少ない震源であるとされてきた。現在、SSRTにおける小薬量の探査用の発破震源と連続SSRTにおける掘削発破(段発破)のS波成分に関する

検証実験を現場で実施しており、観測配置を工夫することによって、発破においてもS波が品質よく取得できる可能性が示されつつある。

地下構造探査等における震源としての発破作業においては、発破孔に爆薬を装填しダンピング材を用いて発破孔を十分閉塞することによって、爆破の影響を周辺に与えないように配慮する。SSRTの探査用発破では、タンピング材として水を用いることから、いわゆる鉄砲発破状態となり発破孔の側壁においてせん断波の発生が期待できる。同様に、掘削発破(段発破)においては、各発破孔は粘土等によるタンピングを十分実施するものの複数孔で構成される第1段目の発破は芯抜きのための発破であり、発破で破砕される岩盤と周辺の岩盤がこすれてせん断波が発生する可能性が期待できると言える。

現在、探査用発破、掘削用発破を震源とする観測記録から、このせん断波の発生現象が確認されつつあるが、P波とS波を分抽出し前方探査に反映させることが課題となっている。今後、発破を震源とするS波探査に関してさらに開発を進める計画としている。

## 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) 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.
- 3) 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.
- 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) 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.
- 6) 三谷一貴、友野雄士、青木智幸、山上順民、今井博：トンネル切羽前方弾性波反射法探査における速度解析について、土木学会第 66 回年次学術講演会（平成 23 年度）、III-093、pp.185-186、2011.9
- 7) Petronio, L., Peletto, F and Schleifer, A. : Interface Prediction ahead of the excavation front by the tunnel-seismic-while-drilling (TSDW) method, *Geophysics*, Vol.72, No.4, pp.G39-G44, 2007.8-9.
- 8) 例えば、物理探査学会：物理探査ハンドブック（手法編 1 章-4 章）、pp.92-95、1998.
- 9) 例えば、佐々宏一、芦田讓、菅野強：建設・防災技術者のための物理探査、森北出版株式会社、pp.113-117、1993.
- 10) 例えば、社団法人日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針-平成 21 年改訂版-、pp.69-80、2001.2.
- 11) Zhang, L., Qiu, D., Li, S. and Zhang, D., : Study of advance surrounding rock classification based on TSP203 and extenics, *ASCE Conf. Proc.*, 2011.
- 12) Gerard Thomas Schustet : Seismic inertferometry, *Cambridge University Press*, 2009.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.



村山 秀幸

## ひとこと

トンネル技術者にとって、「湧水の予測と対策」は、施工性と安全性を向上させるうえで悲願と言えます。そこで S 波に注目した地下水探査の開発を目指すものの、切羽から湧水があれば直ぐに水を抜き地下水を低下させることが施工の基本であり、S 波探査開発の障壁となっています。