

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

The comparison experiments of seismic reflection survey ahead of tunnel face
using different seismic sources (hydraulic impactor, vibrator and explosives).

村山秀幸¹・末松幸人²・萩原正道³・間宮圭⁴・清水信之⁵

Hideyuki Murayama, Yukito Suematsu, Masamichi Hagiwara, Kei Mamiya and Nobuyuki Shimizu

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フジタ・安藤建設・太平工業共同企業体 (〒420-0965 静岡県静岡市葵区有永 7-3)

³東日本高速道路株式会社 関東支社 佐久工事事務所 (〒385-0051 長野県佐久市大字中込2913)

⁴中日本高速道路株式会社 横浜支社 静岡工事事務所 (〒420-0804 静岡県静岡市葵区竜南1丁目26番20号)

⁵理博 (株)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)

The authors have developed the Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels (SSRT) to determine geological conditions ahead of tunnel face. In SSRT survey, it can be selected seismic sources from among hydraulic impactor, vibrator and explosives in consideration of variety construction and geological conditions on each tunnel.

Firstly, this paper describes the developmental concept of SSRT and summaries the application experience of SSRT in several tunnels. Secondly, it describes the comparison experiments of SSRT using different seismic sources (hydraulic impactor, vibrator, explosives) undertaken in a Shizuoka 1 tunnel located at the Shizuoka city.

Key Words : Geological prediction ahead of tunnel face, Shallow Seismic Reflection survey for tunnel (SSRT), Hydraulic impactor, Vibrator, Explosives

1. はじめに

トンネル技術者にとって施工中に切羽前方の地山性状を的確に予測し適切な対応を施すことは、安全・品質・原価等の管理において極めて重要であり、近年、弾性波反射法に基づく TSP, HSP^{1), 2)}などの切羽前方予測技術が種々のトンネルに適用されている。

筆者らは、施工中に切羽前方地山を把握し、トンネルの設計・施工に反映する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 Tunnel: 以下 SSRT と称す) を開発し、様々なトンネルで検証を進めてきた^{3)~8)}。

SSRT の主な特徴は以下である。①起振源として油圧インパクト、パイプロサイスなどの機械振源と爆破振源 (発破) を選択可能であること、②基本配置として多起振点・多受振点を採用していること、③トンネルの立地条件 (地形・地質) や探査目的に

よって様々な観測機器の配置での探査が可能であること、④③と関連して種々の解析手法 (VSP 処理、水平構造処理、トモグラフィ等) を用いて地山を評価できること。この SSRT の特徴から、通常の立地条件におけるトンネル坑内での切羽前方探査はもとより、低土被り区間や坑口部周辺という特殊条件においても探査を実施し設計・施工に反映してきた。

本報告では、まず、SSRT の開発コンセプトと特徴を明確にし、SSRT の現場適用実績から適用したトンネルの地形・地質条件、探査目的、用いた起振源、評価手法、探査深度等について整理した。次に、異なる起振源として油圧インパクト、パイプロサイス、発破を用いた切羽前方探査を同一現場の同一切羽位置で実施し、起振源の相違による探査結果を比較した結果について述べる。適用した現場は、第二東名高速道路静岡第一トンネル工事における上り線トンネル (静岡県静岡市) である。

2. トンネル浅層反射法探査(SSRT)の概要

(1) SSRT の開発コンセプト

a) 起振源と探査配置の多様性

SSRT はトンネル坑内で実施する弾性波反射法に相当し、その基本原理 (VSP 処理: Vertical Seismic Profiling) は TSP や HSP と同様である。一方、TSP や HSP は起振源が発破に限定されるが、SSRT はトンネルの各種条件を考慮して、油圧インパクト、パイプロサイス、発破を起振源として選択できる。

爆破工法の硬岩地山トンネルでは、発破の使用許可申請、有資格者による保安管理体制、発破用資機材等が整っており、発破を用いる切羽前方探査の実施に支障がない。しかしながら、主に軟岩地山に適用される機械掘削トンネルでは、上記の事前準備が整っていないことから緊急対応として発破を用いた切羽前方探査を実施することは困難となる。また、硬岩地山であっても各種条件から発破が使用できないトンネル (市街地、近接施工、TBM 導坑のような限られた作業空間等) も少なくない。一方、硬岩地山で発生する地山トラブルは、概して軟岩地山より発生頻度は少なくその規模も小さい場合が多いと考えられる。よって、切羽前方探査のニーズは、中硬岩から軟岩地山あるいは、地山の硬軟変化が著しいトンネルにおいてより高いと考えられる。

よって、SSRT は現場の各種条件を考慮して起振源を選択可能であり汎用性・適用性が高いと言える。

図-1 に、SSRT の坑内における基本配置を示す。SSRT ではトンネル底盤 (上半あるいは下半盤) を起振点とし、油圧インパクトやパイプロサイスは自走式で移動し、発破の場合は深さ L1.5m 程度鉛直に発破孔を削孔する。受振器は、起振点近傍に 1 成分ジオフォン (100Hz) をトンネル縦断方向に間隔 1.5m~3m で 20~40 箇所程度配置する。トンネル横断方向に 5 箇所程度配置する 3 成分受振器は、必要に応じて反射面の到来方向を見知するためである。各受振器はリモートステーションユニット (RSU, 6ch, A/D 変換) を経由して記録装置 (探鉱器) に有線接続する。起振信号は、有線あるいは無線で発振側の油圧インパクト等の制御装置あるいは発破の場合発破器から発信することも、記録装置側から起振装置を制御して発信することも可能となっている。

一方、SSRT は発振・受振・記録装置の組合せが多様で探査手法としての自由度が高く、探査目的や現場条件を考慮して、坑内での探査以外に坑内発振・地表受振等の様々な配置での探査が可能である。

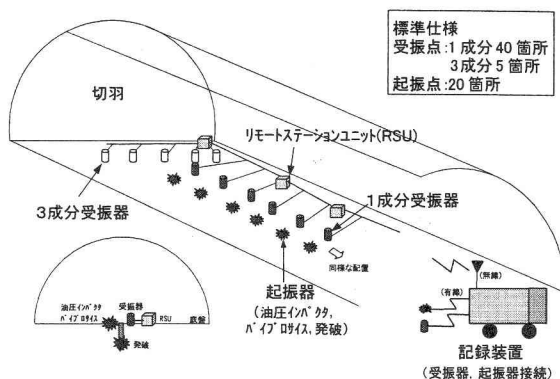


図-1 坑内における SSRT の基本配置

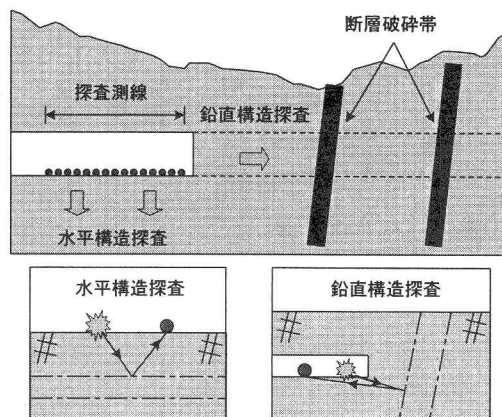


図-2 SSRT における探査と解析のイメージ

b) 波形解析処理と探査結果の評価

図-2 に、SSRT の探査と解析のイメージを、図-3 に、解析手順のフローを示す。SSRT では VSP により探査測線切羽側からの反射面を強調処理 (鉛直構造探査) し切羽前方地山の反射面構造を把握すると同時に、通常地表から実施する地下構造探査 (弾性波反射法) と同様な解析処理による評価 (水平構造探査) も可能である。また、VSP では探査測線後方 (通常坑口側) からの反射面も強調処理できる。よって、既掘削区間の実績 (支保パターン、切羽観察記録、計測結果等) と後方強調による反射面構造を対比して、得られた反射面がどのような地質現象 (地層境界や断層等) あるいは、地山の工学的性状 (硬軟、破砕帯、風化変質、湧水の有無等) に相当するかを検証することが可能となる。すなわち、SSRT では、1 測線の探査で切羽前方と後方からの反射面強調処理結果が得られ、既掘削実績と後方強調処理結果を参照・対比し切羽前方の地山予測に反映する。

なお、HSP では切羽前方と後方の強調処理を実施できるが、TSP では様々な制約から実施できない。

図-4に、切羽前方の反射面強調処理結果と切羽前方予測結果の一例を示す。図の反射波形の白塗り部は音響インピーダンスが大から小に変化する反射面を、黒塗り部はインピーダンスが小から大に変化する反射面を示している。音響インピーダンスは地山の密度と比例する物理量であり、地山の弾性波速度の変化や硬軟の変化に相当すると考えられ、振幅の大きさが相対的な反射波の強度を示している。

図-4の横軸は探査測線における受振点位置（距離）を示し、縦軸は反射波の到達時間（秒）を示している。切羽前方の同一反射面からの反射波は、等間隔に配置した受振点で到達時間が一定時間遅れることから図のような傾斜をもって直線状に並ぶことになる。理想的にはこの反射波は全ての受振点で観測され一定の傾斜を持って連続するはずであるが、図のように各受振点で連続性の高い反射波もあるが、むしろある限られた区間の受振点でのみ連続する反射波も多い。この連続性が低い反射波に対する評価としては、切羽側近傍の受振点での反射波の連続性や強度が高い場合には切羽前方に出現する可能性が高い反射構造と考え切羽前方予測に反映している。

切羽前方における反射面の出現位置は、探査測線で最も切羽側の受振点における反射波の到達時間（往復時間）の2分の1と地山弾性波速度（図-4では $V_p=4\text{km/s}$ を採用）の積から算出することができる。この地山弾性波速度は、反射面の位置同定精度を規定する重要な値であるが、通常の切羽前方探査では切羽前方の地山弾性波速度を実測できない。よって、坑内の探査測線内における地山弾性波速度や事前調査で地表から実施された弾性波屈折法における地山弾性波速度などを参照して決定している。

SSRTの切羽前方予測では、TSPのように個々の反射面位置を抽出し評価するのではなく、図-4のように主要な反射面の出現位置を同定し、反射面の連続性やその強度から「反射面が多い区間」あるいは、「反射面が少ない区間」等にゾーニングして評価する。通常、「反射面が多い区間」を地山の硬軟変化が著しい要注意区間、「反射面が少ない区間」を地山変化が少ない安定した区間」と評価する場合が多いが、過去の探査において「反射面が少ない区間が一様に破碎された大規模な破碎帯」であった事例^{3),4)}もある。よって、切羽前方予測では、前述のように後方反射面強調処理と既掘削区間の掘削実績を対比して、得られた反射面強調処理結果がどのような地質現象や地山の工学的性状に相当するかを評価することが非常に重要となる。

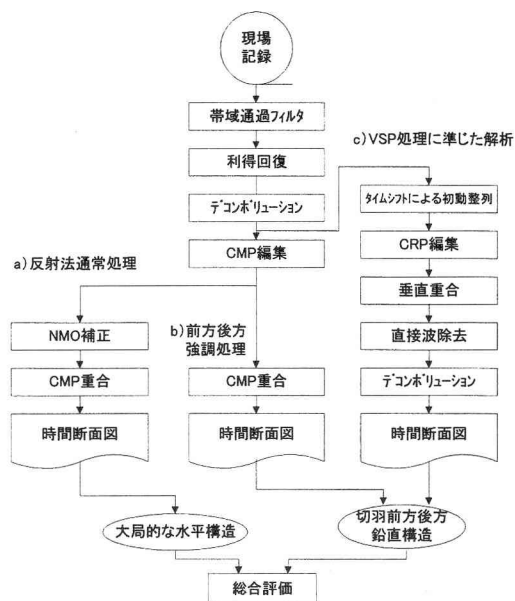


図-3 波形処理手順のフロー

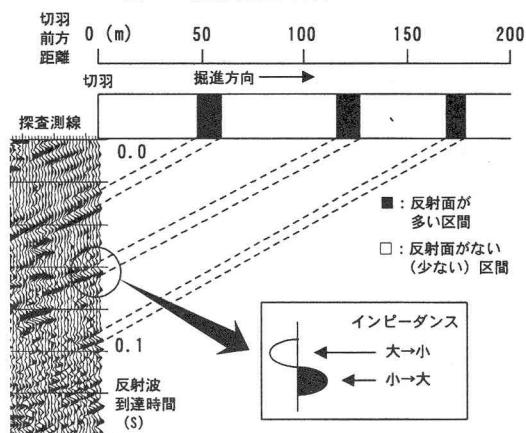


図-4 切羽前方からの反射面の強調処理波形と切羽前方予測

(2) SSRT 適用事例の整理

表-1に、過去に実施したSSRTの適用事例一覧を示す。岩種によって異なるので一概には言えないが、概ね地山弾性波速度 $V_p=3.0\text{km/s}$ 以下は軟岩(地山等級D)、 $V_p=3.0\sim 4.0\text{km/s}$ 程度が中硬岩地山(地山等級CII)、 $V_p=4.0\text{km/s}$ 以上が硬岩地山(地山等級CI~B)に相当する⁹⁾と考えられる。一般にTSPは軟岩地山での適用性が低い^{1),2)}とされている。表-1よりSSRTは、軟岩地山[美の山トンネル、長地トンネル]、中硬岩地山[己斐トンネル、三朝トンネル]、硬岩地山[天引トンネル]と幅広い地山条件に適用できることが分かる。なお、美の山トンネルの地山弾性波速度は比較的高いが、大規模な断層破碎

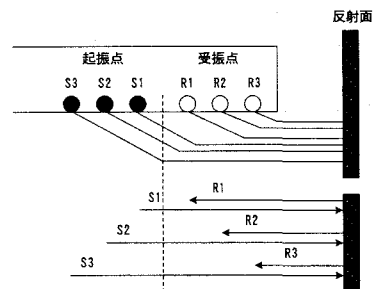
表-1 SSRT 適用事例一覧 [地山・地形条件, 探査目的と実施状況, 各起振源の探査深度, 波形処理他]

	トンネル名 [参考文献]	地山・地形条件 の概要	探査目的, 実施状況	起振源と前方探査深度	波形処理
1	埼玉県 皆野寄居バイパス 美の山トンネル[木 毛工区] [参考文献 3),4)]	・三波川結晶片岩 類:黒色片岩主体, 緑色片岩 ・事前調査における 地山弾性波速度 $V_p=2.5\sim 4.2\text{km/s}$	[探査目的] SSRTとTSPを同一位置で実 施し,両探査結果を比較してSSRTによる探 査手法の確立を目的とした,事前に想定され ている断層破砕帯位置と規模を把握する。 [実施状況]大きな変形を伴う大規模な断層 破砕帯に遭遇し計3回の探査を実施した。地 山弾性波速度実測値 $V_p=3.6\sim 4.0\text{km/s}$ 。	発破: 1)140m,2)240m,3)300m インパクト: 1)80m,2)140m,3)130m TSP 発破: 1)70m,2)160m,3)130m	切羽前方・後 方強調 水平構造解 析
2	広島高速道路公社 広島高速4号線 己斐トンネル [参考文献 5),6)]	・領家帯花崗岩 ・事前調査における 地山弾性波速度 $V_p=3.0\sim 4.5\text{km/s}$ ・最小土被り40m区 間に活断層が発達 する。	[探査目的] 活断層によって破砕された低 土被り区間の地山評価を坑内および坑外か らの探査で評価する。 [実施状況] 坑内と地表に受振点・起振点を 配置し同時および個別に探査する。地山弾性 波速度実測値 $V_p=4.0\text{km/s}$ 。	発破:約 400m インパクト:約 200m	切羽前方・後 方強調 水平構造解 析 トモグラフ イ
3	国土交通省 下諏訪・岡谷バイ パス 長地トンネル [参考文献 7),8)]	・安山岩,凝灰角礫 岩(風化部) ・事前調査における 地山弾性波速度 $V_p=2.4\text{km/s}$	[探査目的] 出口側坑口周辺の低土被り区 間における表層風化帯の分布を予測する。 [実施状況]坑内と地表に受振点・起振点を配 置し同時および個別に探査する。地山弾性波 速度実測値 $V_p=2.0\text{km/s}$ 。	発破:100m+ インパクト:100m+	切羽前方・後 方強調 トモグラフ イ
4	京都府 一般国道 372 号 天引トンネル	・貫岩,緑色岩,砂 質チャート,流紋岩 質貫入岩 ・事前調査における 地山弾性波速度 $V_p=4.2\sim 5.0\text{km/s}$	[探査目的] 事前に想定されている断層破 砕帯の位置と規模を把握する。トンネル竣 工直前(覆工・舗装後)に非爆薬振源で探 査し掘削中の探査結果と比較する。 [実施状況] 掘削時の地山弾性波速度実測 値 $V_p=4.5\text{km/s}$, 竣工直前における実測値 $V_p=4.2\text{km/s}$ 。 ※掘削時と竣工直前では若干 探査測線位置が異なる。	<掘削時> 発破:約 300m <竣工直前> パイプロサイズ:約 300m インパクト:約 250m	切羽前方・後 方強調
5	鳥取県主要地方道 鳥取鹿野倉吉線 三朝トンネル	・花崗岩,ひん岩 ・事前調査における 地山弾性波速度 $V_p=3.7\text{km/s}$	[探査目的] 事前に想定されている断層破 砕帯位置と規模を把握し,大断面の非常駐 車帯の最適位置を選定する。 [実施状況] 地山弾性波速度実測値 $V_p=3.6\text{km/s}$ 。	発破:約 300m インパクト:約 200m	切羽前方・後 方強調

帯に遭遇し掘削に発破を用いる必要がない地山であ
ったことから軟岩地山に相当すると考えてよい 3),4)。

切羽前方探査は,事前調査で想定されている断層
破砕帯等の地山脆弱部のトンネル路線上での位置や
規模(幅)を把握する目的で実施する場合が多い。
一方,地山脆弱部は地山の風化変質作用と関連して,
沢部や坑口部などの低土被り区間に分布する場合が
多い。己斐トンネルでは,活断層が分布する低土被
り区間において坑内と地表から同時および個別に探
査し切羽前方の地山を評価した事例 5),6)であり,長
地トンネルは,坑口部の風化帯の分布形状を予測し
た事例 7),8)である。以上のように,SSRTは様々な探
査目的を考慮して柔軟に対応することが可能である。

一方,TSPでは切羽前方に沢部などの低土被り区
間が存在すると地表面からの反射の影響を強く受け,
沢部以深の探査が困難となる事例が報告 10)されて
いる。TSPでは測定時に指向性のある2成分(上下
とトンネル軸方向)の受振器を用い,解析時に反射面
の走向角を仮定し反射強度から傾斜角を推定する
という疑似3次元的な処理を実施する。通常VSPで
は,図-5に示すように切羽前方の反射面はトンネル
軸に直交するとの仮定に基づき波形処理を実施する
ので,トンネル軸に斜交する反射構造は原理的に探
査が困難である。TSPはこのVSPにおける欠点を

図-5 トンネル軸に直交する反射面からの
反射波とCMP重合の概念図

考慮して疑似3次元的な処理を採用したが,逆に
TSPの欠点として波形処理の段階で地表面からの
反射を除去することが困難となっていると考えられ
る。SSRTはVSPの基本原理に則り波形処理を実施
しており,低土被り区間において地表面からの反射
の影響を受け地山評価に支障をきたした事例はない。

表-1から,起振源別の切羽前方の探査深度は,地
山の反射構造や弾性波速度に依存するので一概に
は言えないが,美の山トンネルのように大規模な断層
破砕帯に遭遇した場合を除き,油圧インパクトで
150~200m程度,パイプロサイズと発破はほぼ同等
で300m程度と考えられる。

3. 異なる起振源を用いた SSRT の現場実験

(1) 適用現場の概要

第二東名高速道路静岡第一トンネルは、静岡市北東に位置する標高 100～300m の庵原山地の山稜を北東－南西方向に貫く計画である。第二東名高速道路におけるトンネルは、掘削幅約 18m、掘削断面積約 190m² におよぶ大断面扁平の 3 車線道路トンネルである。トンネル路線の地質は、新第三紀中新世の静岡層群中部層に属する砂岩泥岩互層、砂岩層からなり、割れ目が多く風化・変質を受けやすい性状を示すが、岩片の一軸圧縮強度は砂岩部で 100～200MN/m²、泥岩部でも 40～100 MN/m² であり第三紀の碎屑岩としては比較的硬質である。

静岡第一トンネル（上り線）の事前調査における弾性波屈折法による地山弾性波速度は、新鮮部で $V_p=4.4 \sim 4.6\text{km/s}$ を示し、数カ所に低速度帯 $V_p=1.8, 2.1\text{km/s}$ が確認されている。一方、周辺の地表地質踏査に基づき断層破碎帯が数条発達する可能性が示されていた。地形条件としては最大土被り約 170m であり、沢部を最小土被り約 55m および 25m で 2 箇所通過する。

(2) 探査目的と探査実施内容の概要

SSRT は、主に 2 箇所の沢部周辺の地山性状を事前に把握すること、特に最低土被り約 25m の沢部で想定されている断層破碎帯(F-12)の位置および規模を推定することを目的とした。この 2 箇所の沢部は約 250m 離れていることから一回の探査で同時に切羽前方を予測するためには探査深度が深い起振源を用いる必要があり、油圧インパクト、パイプロサイス、発破の三種類の起振源を同一探査測線で用いて各起振源の特性を把握すると同時に、起振源の相違による探査結果の比較を実施した。

一方、発破起振において地震探鉱用電気雷管（以下、探査用雷管と称す）と通常掘削に用いる瞬発電気雷管（以下、通常瞬発雷管と称す）を用いた比較実験を実施した。探査用雷管は、地下構造や資源探査などで用いられ、通電から起爆までの時間（爆発時間）が 0.1ms 以下となるように製造されている。通常瞬発雷管の爆発時間は 3ms 以下である¹⁾。

図-6 に、現場における SSRT 探査配置を示す。図のように、切羽位置 STA.837+57 から約 5m 後方のトンネル上半盤のトンネル縦断方向に 1 成分ジオフォンを 40 箇所(@1.5m)、トンネル横断方向に 3 成分ジオフォンを切羽側 5 箇所(@3m)、坑口側 5 箇所(@3m)の計 10 箇所設置した。よって、トンネル縦断

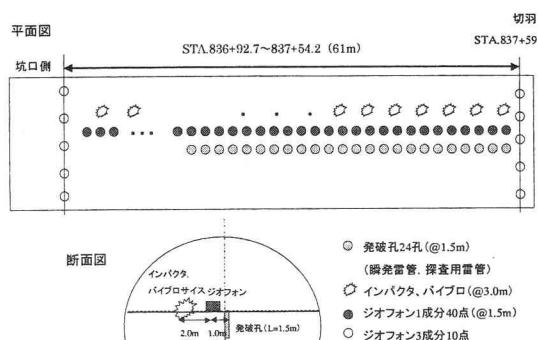


図-6 SSRT 探査配置図(静岡第一トンネル)



図-7 油圧インパクト起振状況

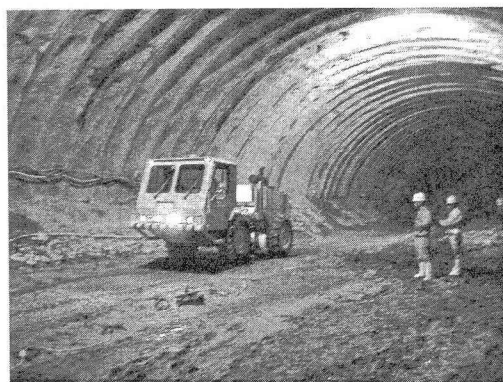


図-8 パイプロサイス起振状況

方向の探査測線長は 61.5m となる。

発破起振では、底盤に鉛直方向 L1.5m の発破孔を 24 孔削孔し、切羽側 20 孔で探査用雷管を用い、残り 4 孔に通常瞬発雷管を用いて起爆した。爆薬は含水爆薬を用い装薬量は 50g/孔である。発破孔と 1 成分ジオフォンは約 1m の離れを確保した。

図-7, 8 に、油圧インパクトとパイプロサイスによる起振状況を示す。油圧インパクトはガス圧で加速されたピストンが瞬時にシリンダー内を落下し、底盤に圧着されたベースプレートを打撃することによ

って地山に振動を伝達する。パイプロサイスは振動板を車両荷重で底盤に圧着し、油圧制御で発生させる周波数帯域を制御して地山に振動を伝達する。パイプロサイスは発振周波数帯域を制御できると共に、振源波形圧縮過程に相互相関処理を適用するために高ノイズ環境における探査で有利となる。

油圧インパクトとパイプロサイスの起振位置は1成分ジオフォンから約2mの離れを確保し、縦断方向に3m間隔で20箇所起振した。油圧インパクトでは同一箇所でも6回のスタッキングを実施した。

計50個配置したジオフォンはリモートステーションユニット(RSU)を経由して記録装置(探鉱器)に接続した。発破の起爆信号は有線にて記録装置に送信し、油圧インパクトとパイプロサイスの起振信号は無線にて記録装置に送信した。サンプリング間隔と記録長は油圧インパクトと発破でそれぞれ1ms, 1sとし、パイプロサイスで2ms, 2sとした。

(3) 探査結果と考察

a) 探査用雷管と通常瞬発雷管の比較

図-9に、探査用雷管と通常瞬発雷管の爆発時間の遅れを比較して示す。図は、各起振発破の発破孔に最も近いジオフォンで初動を感知した時間を探査用雷管でその頻度が最も多かった時間を0msとして相対的な時間差を示している。今回の実験では、記録装置のサンプリング間隔が1msで荒いこと、探査用雷管20本と通常瞬発雷管4本でその数量が異なることから単純に比較できないが、図-9からは探査用雷管と通常瞬発雷管において爆発時間のばらつきに差がないことが分かる。すなわち、一般に爆発時間は探査用雷管で0.1ms以下、通常瞬発雷管で3ms以下に製造されているが、今回そのような爆発時間の差は確認できなかった。よって、SSRTのようなサンプリング間隔1ms程度の探査においては、発破起振に用いる雷管を爆発時間が短く精度の高い探査用雷管に限定する必要がないことが明らかとなった。

b) 各起振源の周波数特性

図-10に、各起振源別に得られた周波数特性を示す。図の起振源別の起振箇所と受振点箇所は同一であり、各図には起振点-受振点間距離9m(CH20)、24m(CH30)、39m(CH40)の受振記録における初動付近60ms区間の振幅スペクトルを併記している。図より、発破と油圧インパクト振源は150-180Hzに卓越周期を持ち、全周波数で比較的フラットな振幅特性を有していることが分かる。パイプロサイス振源は周波数20-200Hzで発振し、この周波数帯域において比較的フラットとなり、発破とインパクト

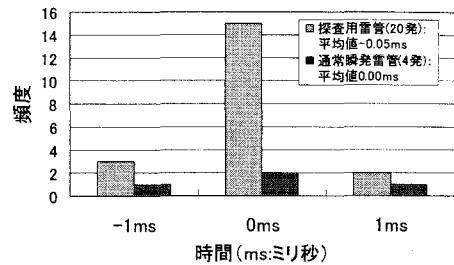


図-9 探査用雷管と通常瞬発雷管の爆発時間比較

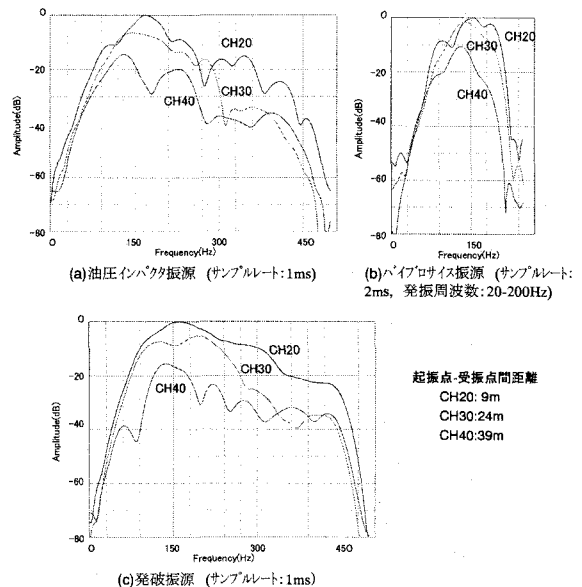


図-10 各起振源別の周波数特性

と同様に150-180Hzに卓越周期を持つ。パイプロサイス起振では、掘削中のトンネル底盤のように硬質で凹凸のある起振面において起振板と起振面とのカップリングが悪くなり周波数制御におけるフィードバック機能が十分働かないケースがあり、今回の起振においても高周波数領域での共振や低周波数領域でのエネルギー伝搬の劣化も認められたが、結果的には反射記録にほとんど影響がなかった。

以上から、各々の起振源において卓越周波数に顕著な差異は認められずいずれも150-180Hz程度となった。後述する観測された平均地山弾性波速度は $V_p=4.5\text{km/s}$ であり、卓越周波数の波長は25-30mとなる。ここで反射波による反射面の識別分解能としてcritical resolution thickness¹²⁾を適用すれば、1/8波長が最小識別可能な層厚となり、今回の探査環境をノイズの無い理想的な状態と考えれば最小分解能が3.1-3.8m程度となる。なお、ノイズレベルの高い環境下における探査では、現実的な最小分解能が1/2~1/4波長程度となっている場合も考えられる。

c) 切羽前方予測結果と考察

図-11 に、各起振源別の切羽前方および後方の反射面強調処理結果を示し、図には反射面が集中するゾーンを併記した。探査測線間で得られた平均地山弾性波速度は $V_p=4.5\text{km/s}$ となり、事前調査で実施された弾性波屈折法から $V_p=4.4\sim 4.6\text{km/s}$ が得られている。よって、VSP では地山弾性波速度 $V_p=4.5\text{km/s}$ を採用した。

図-11 から、各々の切羽前方反射面強調処理結果から、油圧インパクト起振の探査深度が比較的浅いこと、および振源によって数 10ms 程度反射面が集中ゾーンづれることが分かるが、全体的な反射面の傾向は非常に調和的であり、切羽前方地山の反射構造を的確に捉えたものと推定できる。

各反射面強調処理結果から反射面が集中するゾーンとしてゾーン①～⑧の区間を抽出した。ゾーン①、②は切羽後方であり、ゾーン⑦、⑧は探査位置切羽からの距離が 300m を越えるので位置同定精度がかなり低下すると想定した。既掘削区間は、事前調査で数力所に断層が発達すると想定されていたが典型的な断層はなく、割れ目が多いクラッキーゾーンが数力所に発達しこのゾーンに湧水を伴う場合が確認され、切羽観察における切羽評価点がこの割れ目の頻度と湧水の有無によって低下する（地山が悪くなる）傾向を示した。ゾーン①は湧水を伴うクラッキーゾーンであり支保パターンを CⅠから CⅡにランクダウンした位置に相当し、ゾーン②は砂岩泥岩互層から砂岩優勢層に漸移する区間に相当した。

よって、大局的な切羽前方地山予測としては、後方探査結果と既掘削実績を考慮し今後規模の大きな断層に遭遇する可能性は低いが数力所（ゾーン③～⑥）で時として湧水を伴うクラッキーゾーンあるいは地層境界に遭遇すると想定した。さらに、STA.839 付近の沢部直下は事前調査では良好地山とされていたが、沢部直下（ゾーン④）およびその背面（ゾーン⑤）にクラッキーゾーンが分布する可能性があるかと予測した。一方、STA.841+70 付近の最低土被り約 25m となる沢部は、探査限界に近く位置同定の精度が低いものの沢部背面にクラッキーゾーン（ゾーン⑦）が発達する可能性があるかと予測した。

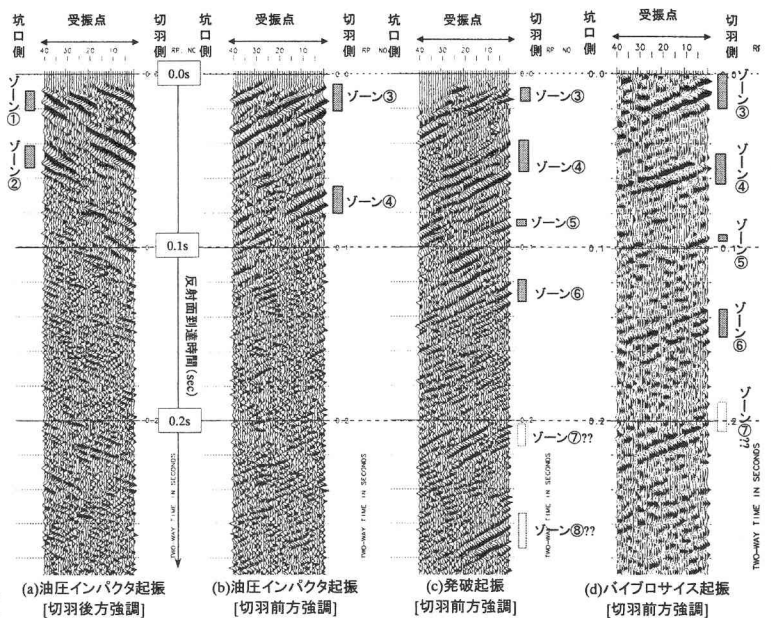


図-11 各起振源別の切羽前方・後方反射面強調処理結果

図-12 に、切羽前方地山の予測結果とトンネル掘削実績を総括的に示す。図より、ゾーン③、④はクラッキーゾーンに相当し油圧インパクト起振での想定位置が、切羽評価点の低下位置と良く一致する。ゾーン⑤、⑥もクラッキーゾーンに相当し、切羽評価点の低下位置は発破起振よりパイプロサイズ起振での想定位置と良く一致する。STA.841+70 付近の最低土被り約 25m の沢部では、沢部直下で風化の影響により切羽評価点が低下する傾向を示すが、湧水を伴う地山劣化ゾーンが確認されたのは沢部背面でありゾーン⑦位置とほぼ一致する。なお、トンネル全線で幅数 10m 規模の典型的な断層に遭遇することは無く、大局的には予測通りの地山性状であった。

本現場における探査限界深度は、油圧インパクト起振で約 150m、パイプロサイズで約 500m、発破起振で約 600m であり、従来と同様に切羽前方 150m 程度までは油圧インパクト起振での反射面の位置同定精度が高く、それより切羽遠方においては発破起振とパイプロサイズ起振が有効であることが分かる。

4. おわりに

本報告で得られた知見をまとめると以下となる。

1) SSRT は起振源として油圧インパクト、パイプロサイズ、発破を選定し硬岩～軟岩まで幅広い地山に適用でき、探査目的に応じて探査配置を変更し豊富な解析処理によって切羽前方地山を評価できる。

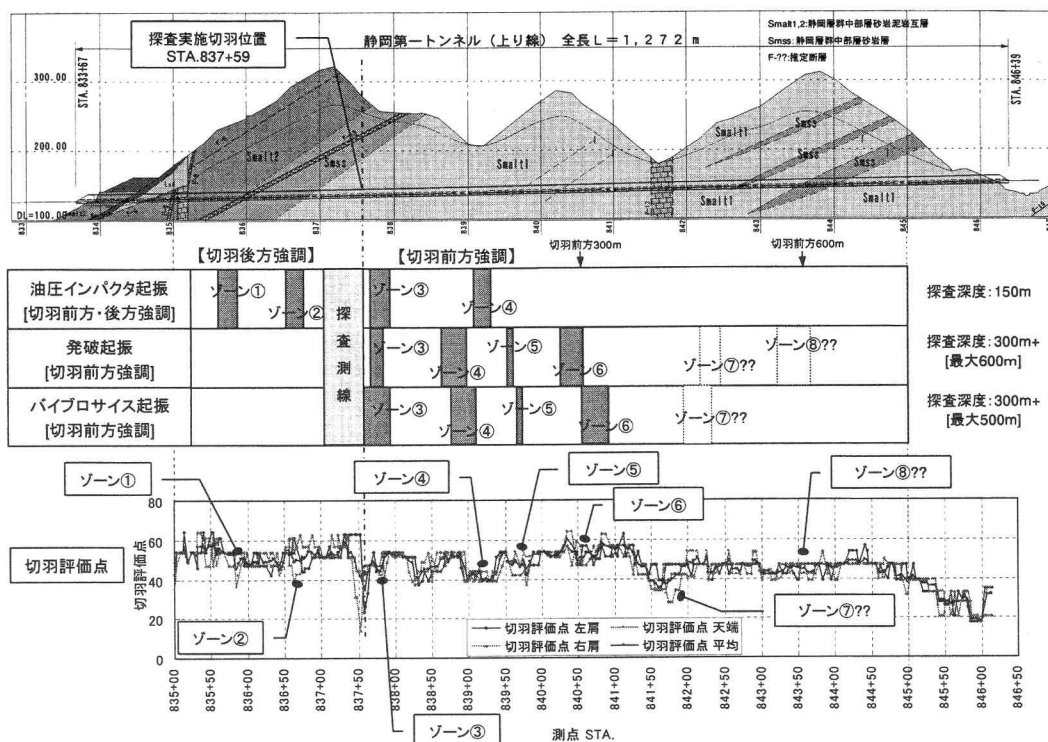


図-12 各起振源を用いた切羽前方地山の予測結果（ゾーン①～⑧）とトンネル掘削実績の総括図

2)発破起振に用いる雷管は、爆発時間の短い探査用雷管に限定されず通常の瞬発雷管で問題ない。

3)油圧インパクト、バイブロサイス、発破における卓越周波数はいずれも 150-180Hz 程度となり、起振源による反射面認識分解能に差がないといえる。

4)油圧インパクト、バイブロサイス、発破を用いた異なる起振源による切羽前方地山の予測結果とトンネル掘削実績を比較した結果、大局的には調和的な結果が得られた。

5)SSRT では、切羽前方に低土被りの沢部が存在しても特に支障なく探査することが可能である。

6)本現場における各振源別の最大探査深度は、油圧インパクトで約 150m、バイブロサイスで約 500m、発破で約 600m であり、反射面位置の同定精度は油圧インパクトが高く、切羽遠方の大局的な探査には発破とバイブロサイスが有効であった。

参考文献

- 例えば、ジェオフロンテ研究会 新技術相互活用分科会 前方探査 WG:トンネル切羽前方探査技術 技術資料, 1997.
- 例えば、土木学会関西支部:トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会 講演論文集, 2000.
- 村山秀幸, 加藤卓朗, 中村繁明, 柳内俊雄, 他田文孝: 結晶片岩トンネルにおける切羽前方弾性波反射法探査と地山

特性について, 第 54 回土木学会年次講演会(Ⅲ), 1999.

- 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, 第31回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp.22-28, 2001.
- 加藤卓朗, 村山秀幸, 岡村浩孝, 望月齊也, 中野常夫, 清水信之: トンネル浅層反射法(S²RT)による已斐断層周辺の切羽前方予測, 土木学会年次講演会(Ⅲ), 2001.10.
- 加藤卓朗, 村山秀幸, 清水信之, 岡村浩孝, 望月齊也: 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.
- 加藤卓朗, 村山秀幸, 浅川一久, 柳内俊雄, 西園裕一, 清水信之, 浦木重伸: トンネル浅層反射法探査(SSRT)による坑口周辺部の地山評価, 土木学会年次講演会(Ⅲ), 2002.9.
- 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.
- 例えば, 社団法人日本道路協会: 道路トンネル技術基準 (構造編)・同解説, 2003.11.
- 越野洋一, 山本浩之, 笠博義, 宇津木慎司, 工藤繁樹: 土被りが小さい区間における TSP 法による切羽前方探査の適用性, 第 31 回地盤工学研究発表会, pp.2251-2252, 1996
- 例えば, 共立出版: 現場技術者のための発破工学ハンドブック, pp.90-91, 2001.8.
- Widess, M.B.: How thin is a thin bed?, Geophysics, Vol.38, No.6, p.1176-1180, 1973.