

TBM先進導坑内における切羽前方探査の適用

Application of Shallow Seismic Reflection Survey for Tunnels using Hydraulic Impactor as Vibration Source to TBM Pilot Tunnel

村山秀幸¹・上野博務²・福田秀樹²・黒田徹³

Hideyuki Murayama, Hiromu Ueno, Hideki Fukuda and Toru Kuroda

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西松・鴻池・フジタ共同企業体 (〒426-0084 静岡県藤枝市寺島 564-1)

³(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 Refection 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. SSRT has been improved and performed using a hydraulic impactor for TBM tunnel named the 1st SHIMADA of 2nd Tomei expressway. As results, good reflection images along a tunnel axis were created according to VSP processing. The processed results show that characteristic strong reflection images coincide with the zones of collapsed rock area and those seismic images of SSRT.

Key Words : Geological prediction ahead of tunnel face, Shallow Seismic Reflection survey for tunnels(SSRT),Hydraulic impactor, TBM(Tunnel Boring Machine)

1. はじめに

筆者らは、施工中に切羽前方の地山性状を把握し、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 Tunnels: 以下SSRTと称す)を開発し、地形条件、地山条件、施工条件等の異なる各種トンネルにおいて検証を進めてきた^{1)~5)}。SSRTは起震源として発破および非爆薬の油圧インパクトやパイプロサイズ等が利用可能な探査手法である。

SSRT探査の適用実績⁴⁾から、地山条件としては地山弾性速度 $V_p=3.0\text{km/s}$ 以下の軟岩(最小 2.4km/s)から弾性波速度 $V_p=4.0\text{km/s}$ 以上の硬岩まで幅広い地山に適用可能である。一方、特殊な地山条件および地形条件におけるSSRT探査の適用としては、①活断層により地山が破碎された低土被り区間の探査 ②トンネル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位置予測 ③低土被りで沢部を通過する路線における沢部周

辺の地質予測などの実施事例がある。SSRT探査ではこれら各現場の特殊条件と個々の探査目的を考慮して、探査機器の適切な配置(坑内および坑外からの発震・受振等)、複数の震源装置の併用(発破、油圧インパクト、パイプロサイズ)、各種波形処理方法による検討(VSPによる切羽前方・後方強調、水平構造解析、トモグラフィ等)等により、トンネル切羽前方および周辺地山の探査を実施することができ、汎用性、応用性、適用性等を兼ね備えた探査手法である。

第二東名高速道路島田第一トンネル(下り線)工事は、延長2,675mのうち2,278mをTBM先進導坑(外径 $\phi 5,000\text{mm}$)で掘進し、TBM導坑貫通後に大断面に拡幅掘削する計画であった。しかしながら、TBM掘進中に大小の地山崩壊が頻発し、特にSTA.533+60付近で発生した大きな崩壊によって、TBMマシンが拘束され掘進の停止を余儀なくされた。よって、施工中にTBM導坑内から切羽前方探査を実施し、前方地山状態を予測することが施工管理上重要となった。

本稿では、作業空間と使用資機材が限定されるTBM導坑内において切羽前方探査が実施可能な探査手法を検討し、油圧インパクトを起震源とするSSRT探査において起震方法等を改良することによって島田第一トンネル（下り線）で探査可能であると判断し、TBM導坑内で切羽前方探査を実施した結果について報告する。

2. TBM坑内における切羽前方探査実施例とSSRT探査方法の改良

(1) TBM坑内での切羽前方探査実施例と課題

TBMは、一般に比較的良好な地山で延長の長い水路トンネルや島田第一トンネル（下り線）のような大断面トンネルの先進導坑に適用され、発破掘削と比較して高速掘進が期待できることから経済性に優れた工法とされている。しかしながら、切羽の安定性の悪い地山や膨張性地山、断層破碎帯などでは、TBMマシンが地山に詰め付けられて拘束状態に陥ったり、マシンが沈下し掘進不能となったりすることがある。よって、TBM工法は掘進速度が速いことから、より一層地山性状を吟味し地山トラブルを早期に予測しながら対応することが施工管理上重要となり、施工中に実施する切羽前方探査に対するニーズが高いと言える。

TBM坑内における切羽前方探査実施例としてはTSP⁶⁾、HSP⁷⁾、TRT(True Reflection Tomography)⁸⁾などがある。TSPとHSPは起震源に発破を用いており、TRTは通常ハンマー起震である。

島田第一トンネル（下り線）のTBMマシンは外径φ5,000mmのフルシールド型であり後続設備がマシン後方の約100m区間に連なっており、切羽から約100m区間は特に作業空間が狭く限定されている。よって、TSPやHSPにおける発破孔を2m程度の一定間隔で後続設備区間の側壁に削孔することは容易ではない。また、発破孔は通常水タンピングによって起爆力を孔口側に逃がして振動のみを地山に伝達させ、孔周辺の地山を破壊させないようにする。よって、発破時には後続設備の各種計器に影響を与えないために入念な防爆処理を施す必要がある。なお、当然ながらこのような限定された作業空間で発破を行うこと自体安全管理上好ましい作業ではない。

一方、TBM工法では通常火薬類の使用許可を申請しない。島田第一トンネル（下り線）でもTBM掘進期間は火薬類使用の許可申請を実施していな

かった。よって、TBM工法のトンネルにおける緊急対応としてTSPやHSPを実施することは発破使用の許可申請の上でも制約がある。

TRTは通常ハンマー起震で手軽であるが、ハンマーでは打撃エネルギーが小さく切羽前方50～100m程度しか探査できない。

TSPやHSPの探査深度は100～150m程度であることから、比較的作業空間が確保可能な後続設備後方の区間で探査しても切羽前方の探査できる領域は限定される。一方、仮に切羽に近い後続設備区間で探査したとしてもTBMの掘進速度は、トンネル規模にもよるが一般に月進200～300m程度であり、1回の探査で1ヶ月分の掘進距離も探査できないことになる。

以上から、TBM工法においては安全な非爆薬震源を用いて切羽前方200～300mまで探査可能な手法の開発が望まれていると言える。そのためにはSSRTで用いているような打撃エネルギーの大きな起震源と手軽な探査機器を応用することが肝要であると考えられる。

(2) SSRT探査方法の改良

SSRTは非爆薬震源として、油圧インパクトやパイロサイスが利用可能で探査目的等に応じていくつかの機種を選定することができる。油圧インパクトは、打撃エネルギー（ピストン下死点ガス圧0.6MPa）3,000ジュール、6,400ジュール、2,000ジュールの3機種⁹⁾がある。そのうちミニインパクト（JMS-MINI65）は、最も小型（打撃エネルギー2,000ジュール）であるがP波を用いた地表からの反射法探査で深度500m程度の起震能力を有する。ミニインパクトは、小型油圧ショベルをベースマシン

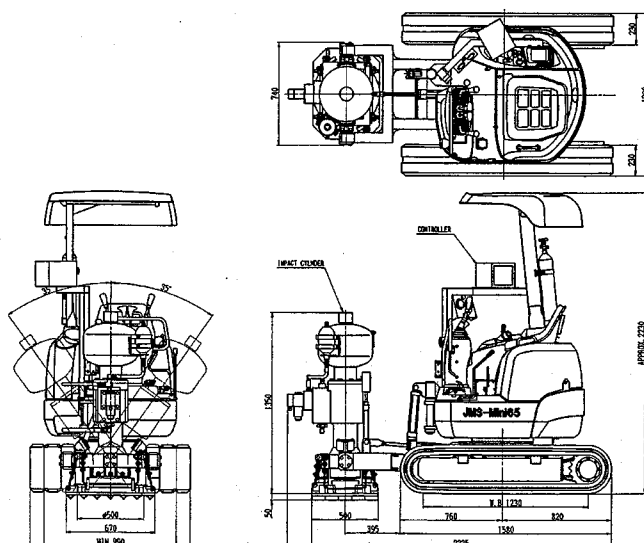


図-1 ミニインパクト [JMS-MINI65] 寸法図

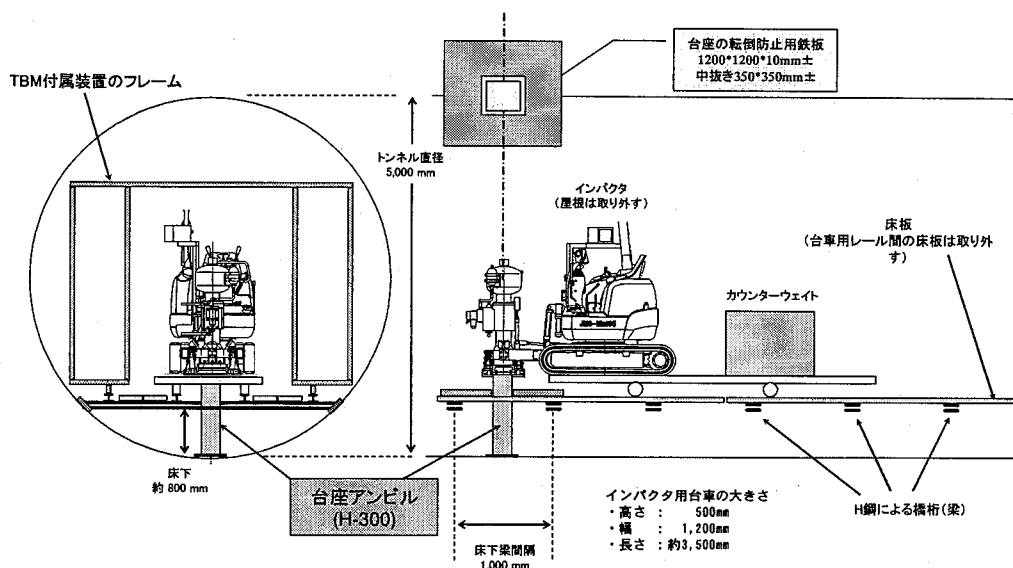


図-2 TBM 導坑内の後続設備区間を考慮したミニインパクト起震方法の概念図

とした自走式震源であり、従来から機動性を重視してトンネル坑内でのSSRT探査に使用しており探査実績が多い。

図-1にミニインパクトの寸法を示す。ミニインパクトは、最大幅1,200mm、高さ約2,230mmでありベースマシンの軽微な改良（屋根の取り外し）によって、寸法からは外径 ϕ 5,000mmのTBM導坑内の後続設備区間で探査が可能であると考えられ、総重量も1.2tfであり現場への輸送や坑内での移動に問題がない。

図-2にTBM導坑内（後続設備区間）におけるミニインパクトでの発震方法の概念図を示す。図に示すように導坑内は軌道式であり、ミニインパクトを台車に乗せて後続設備内に搬入できる。しかしながら、ミニインパクトは通常鉛直下向きにトンネル底盤を起震しながら指定起震箇所への移動を繰り返すが、トンネル底盤から軌道上の台車まで約1,300mmの離隔が発生し直接底盤を起震することができない。そこで、図-2に示したように、専用の台座アンビルを作成して起震力を地山に伝達させることとした。台座アンビルはH型鋼（H-300）を用い基準高さを1,200mmとして、底盤の凹凸に合わせて100mm単位で高さ調整が可能なピース材を用いて起震位置で順次高さを調整することを可能とし、常に最大の起震力が地山に伝達されるように工夫した。

受振器（ジオフォン、100Hz）は、図-3に示すように底盤起震位置から100mm程度離して、地山にニードル状のスパイクを打ち込み設置した。

受振器から坑内に設置した記録装置への配線は軌道上に敷設し、ミニインパクトの移動等によって断線しないように配慮した。

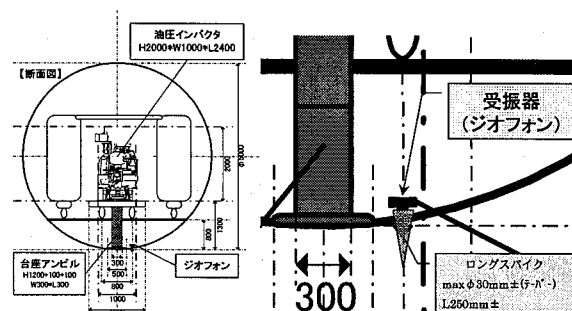


図-3 受振器（ジオフォン）の設置位置

3. 現場概要とSSRTの実施方法

(1) 現場概要

図-4に島田第一トンネル（下り線）の地質縦断を示す。本トンネルは、静岡県中部を南東方向に流下する瀬戸川と大井川支流大津谷川に挟まれた山地で静岡県島田市の北方約4kmに位置する。山地は概ね300m～400mの高さで、主な河川方向と同じ北西－南東方向の尾根が発達する。このような地形発達方向の規則性は、地質構造や岩相の相違を反映していると考えられる。

トンネル地質は、大部分が瀬戸川層群と呼ばれる古第三紀～新第三紀中新世前期に形成された堆積岩類からなる。東側坑口部付近は新第三紀前期中新世に形成された大井川層群からなり瀬戸川層群とは断層で接している。瀬戸川層群は砂岩と泥岩を主体とし、その含有率によって砂岩～砂岩優勢層～泥岩優勢層～泥岩に区分されている。地山弾性波速度は風化部を除く地山深部で $V_p=3.4\sim 3.6\text{km/s}$ であり、数箇所到低速度帯($V_p=2.0\text{km/s}$)が確認されている。

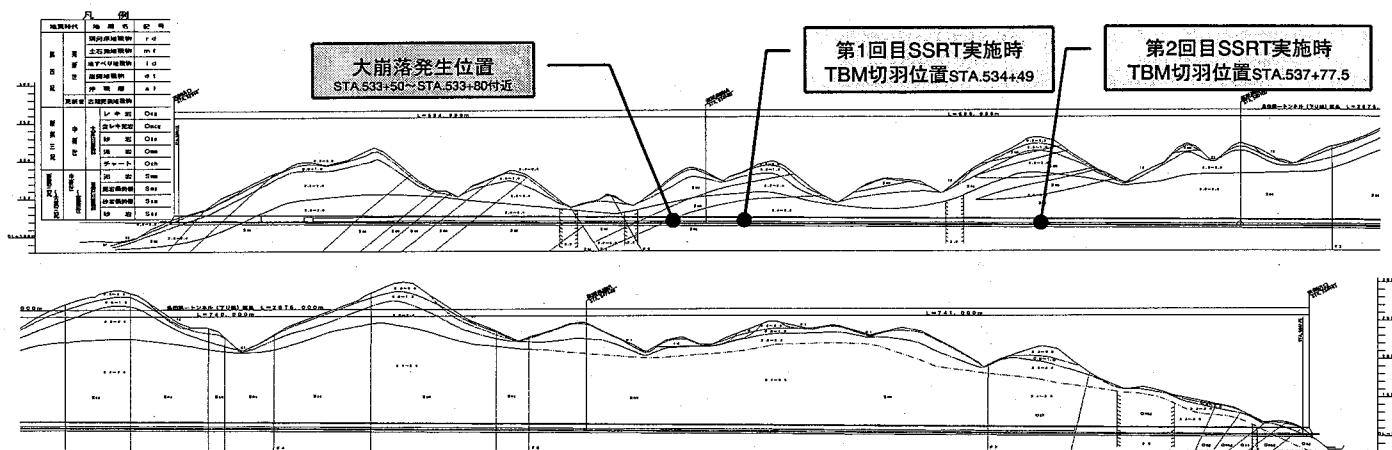


図-4 島田第一トンネル（下り線）地質縦断図〔SSRT 探査実施時の TBM 切羽位置を併記〕

(2) SSRTの実施方法

SSRT探査は計2回実施した。図-5に第1回目のSSRT探査測線位置を示す。探査測線は、天端の大崩壊によってTBMマシンが拘束された位置 (STA.533+50～STA.533+80付近) を挟んで、その前後に測線①と測線②を設定した。

測線①は切羽前方探査を主目的とし、測線②は大崩壊位置の地山特性（反射波特性）の把握を主目的としている。測線延長は共に長さ34mで受振器を2mピッチで18箇所設置し、起震は各受振点位置にミニインパクトを移動し8回のスタッキングを行った。

なお、この段階では既にTBMマシンは掘進を再開していたが、切羽では小崩落が連続的に発生し不安定な状態であった。

図-6に第2回目のSSRT探査測線位置を示す。探査測線③は第1回目の探査結果を踏まえ、屈折法によるP波速度を精度よく把握するために測線長を70mとした。探査測線③の切羽側34m分を主測線として、受振器を2mピッチで18箇所設置し発震も2mピッチで実施した。坑口側36mを副測線として、同様に受振器を2mピッチで18箇所設置し、発震を4mピッチで実施した。

さらに、第1回目の測線①、②と第2回目の測線③間における地山弾性波速度を把握するために、

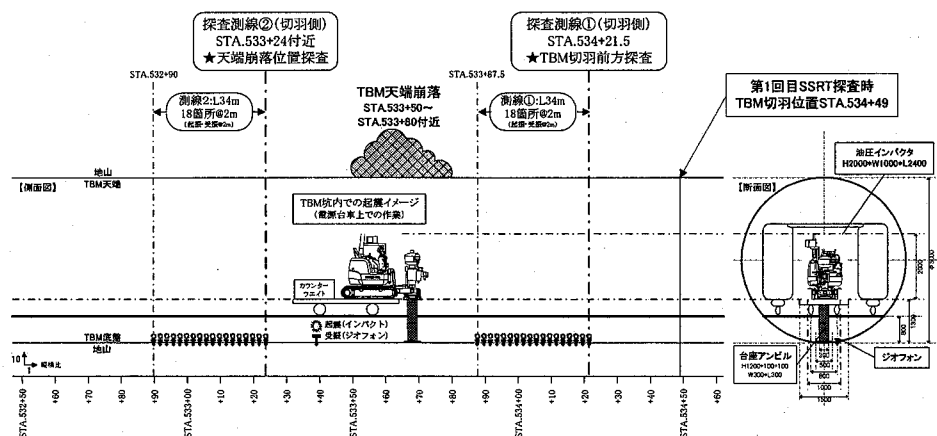


図-5 第1回目 SSRT 探査測線配置図

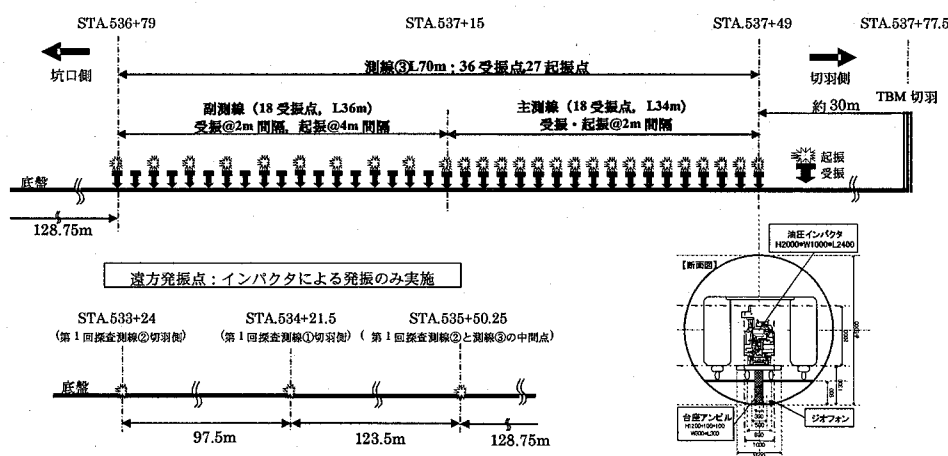


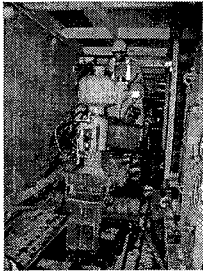
図-6 第2回目 SSRT 探査測線配置図

遠方発震点として測線①および②の切羽側受振点位置、測線②と③のほぼ中間点で発震を行った。

遠方発震点ではスタッキングを20回実施し、測線③では10回実施した。

なお、TBM切羽後方の約30m区間はマシン本体およびベルトコンベアによる排泥設備が導坑内に錯綜しており、ミニインパクトでの起震はTBM切羽から約30m後方が限界であった。

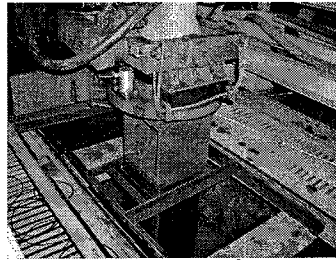
写真-1(a)～(d)に探査実施状況を示す。1回の起震に要する時間は移動を含めて5分程度であった。



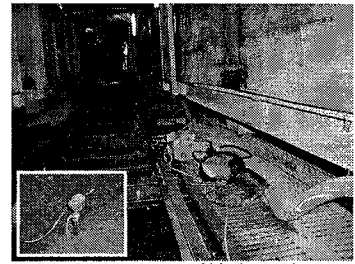
(a)後続設備区間の起震状況



(b)後続設備後方区間の起震状況



(c)起震中のベースプレートとアンビル



(d)受振器および坑内配線

写真-1 TBM 導坑内での SSRT 実施状況

4. 探査結果と掘削実績の対比

(1)第1回目SSRT探査結果と地山評価の見直し

a)速報における地山評価

記録した波形処理は、探査結果を即時に施工へ反映させるために、現場にて1日で処理し速報としてまとめた。ただし、速報では測線①と②における切羽側の前方反射面強調処理結果（VSP処理）のみから切羽前方地山を予測しており、後述する坑口側の後方反射面強調処理や反射法（水平構造解析）等はデータを持ち帰って整理した。

解析に用いる地山弾性波速度は、測線①と②の初動走時から得られる弾性波速度の平均値として $V_p=3.09\text{km/s}$ を採用した。なお、事前調査の屈折法で得られた弾性波速度は $V_p=3.4\sim 3.6\text{km/s}$ である。

図-7に、探査結果および地山の評価結果を示す。得られた反射面の振幅差は反射面の相対的な強度差に相当し、白塗りが硬質から軟質への変化、黒塗りが軟質から硬質への変化に相当する。地山性状の評価においては、反射面の連続性と頻度等が注目点となり、測線①と②の結果を総合的に勘案して、ゾーニングによって評価することとした。

大崩壊の発生した区間では、測線②において非常に振幅の大きな反射面が連続する領域を捕らえており、発生した崩壊現象を的確に反射面構造として捕らえたと考えられる。よって、このように強い反射波が連続する区間を「強破碎」で要注意区間であると評価した。同様に強い反射面が連続する区間として、測線①では切羽側距離140～180mの区間、測線②では切羽側距離250～290mの区間で確認することができ、この区間は要注意区

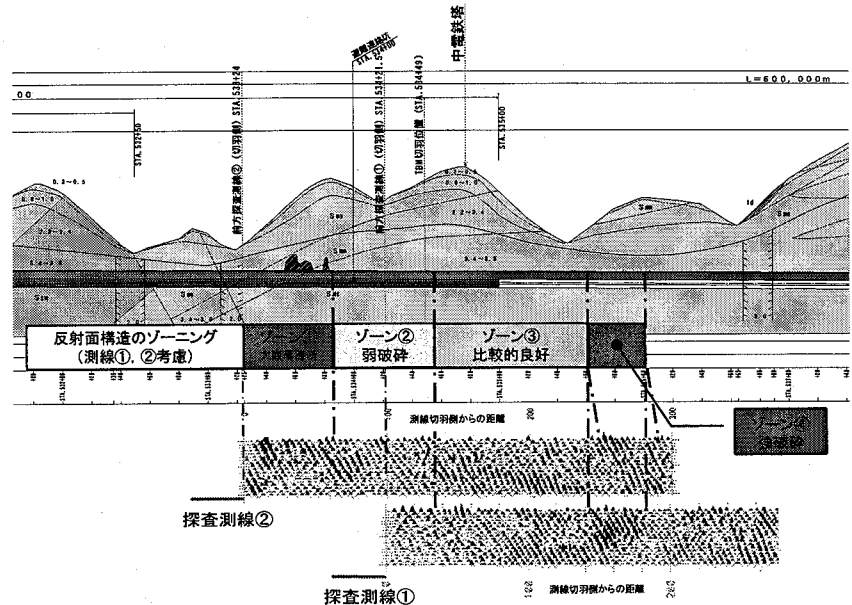


図-7 第1回目SSRT探査結果の速報〔現場での波形処理結果〕

間と想定できる。なお、両者で反射面位置に10m程度のずれが発生しているが、このずれは、距離同定の際に一律に弾性波速度 $V_p=3.09\text{km/s}$ を用いているからであると考えられ、特に測線②では切羽側距離が250mを超えており位置同定の精度がかなり低下していると考えられる。

以上から、図-7に示したように地山評価および切羽前方地山の予測として、以下の4つのゾーンを設定した。

- ・ゾーン①（既掘削区間）：大崩壊発生区間に相当し非常に強い反射波が連続して確認できる。
- ・ゾーン②（既掘削区間）：いくつかの反射面が単独に分布する弱破碎ゾーン。
- ・ゾーン③（切羽前方）：反射面の発生頻度が低く比較的良好な地山と想定されるゾーン。
- ・ゾーン④（切羽前方）：切羽から遠方であっても非常に強い反射波が集中する区間であり、大崩壊発生箇所の反射面構造に近いことから、地山が強く破碎されている可能性が高いゾーン。

この速報段階におけるTBM切羽位置は、ゾーン②と③の境界付近まで約8mであり、この区間は天

端の小崩落が頻発していたが、ほぼゾーン②と③の境界で切羽が自立し、施工していたフォアボーリングを中止した。さらに、ゾーン③では最大日掘進距離18mを記録し順調に掘進できた。

以上から、ゾーン①～③までの区間における地山評価はTBM掘削実績から妥当であったことが示された。一方、反射波分布から探査深度は200～250m程度と想定でき、ミニインパクトの起震方法の改良によって良好に切羽前方地山を探査できたと考えられる。

b) 地山評価の見直し

TBM切羽が強破碎と想定したゾーン④に達しても順調に掘進でき、天端・切羽は安定してことから、地山評価の見直しを実施した。

図-8に測線②における坑口側の後方反射面強調処理と切羽側の前方反射面強調処理結果をTBM掘進記録から得られる推定岩盤強度と併記する。図-8には、図-9で示す反射面の連続性と相対的な強さを示すバーチャートを表示した。このバーチャートから連続性が高く相対的に強度の強い反射面を視覚的に抽出することができる。図-8より、強い反射が確認される箇所として強反射①～⑦を抽出することができ、強反射⑥が大崩壊発生位置に相当する。この強反射位置とTBM掘進記録から推定される岩盤強度を比較すると強度変化の大きな箇所とほぼ一致し、強反射①～④、⑦の位置では天端・切羽が不安定となり小崩壊が頻発している。なお、強反射⑤では掘進時には崩落が発生していなが、近傍で発生した大崩壊の影響で地山に緩みが進行したと考えられる。

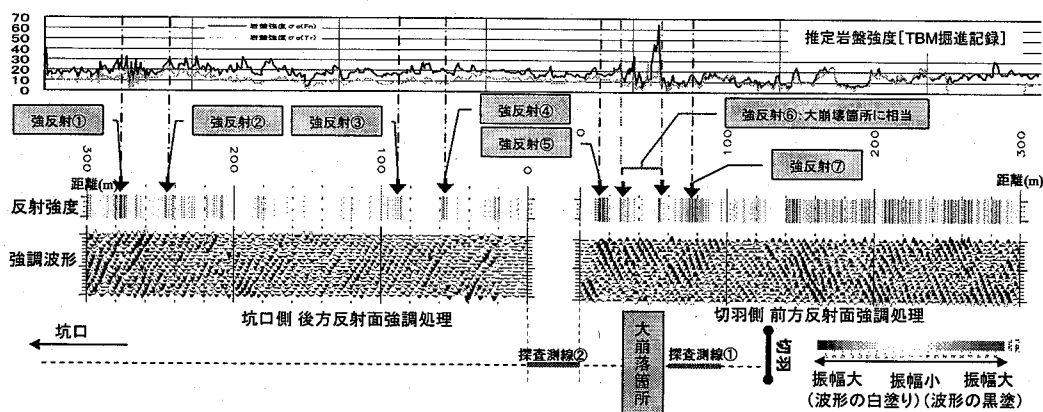


図-8 後方および前方の反射面強調処理結果とTBM掘進記録

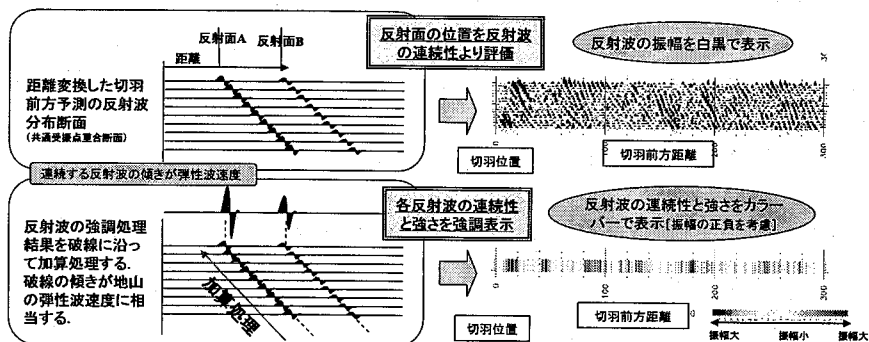


図-9 反射面強度のバーチャート表示の考え方

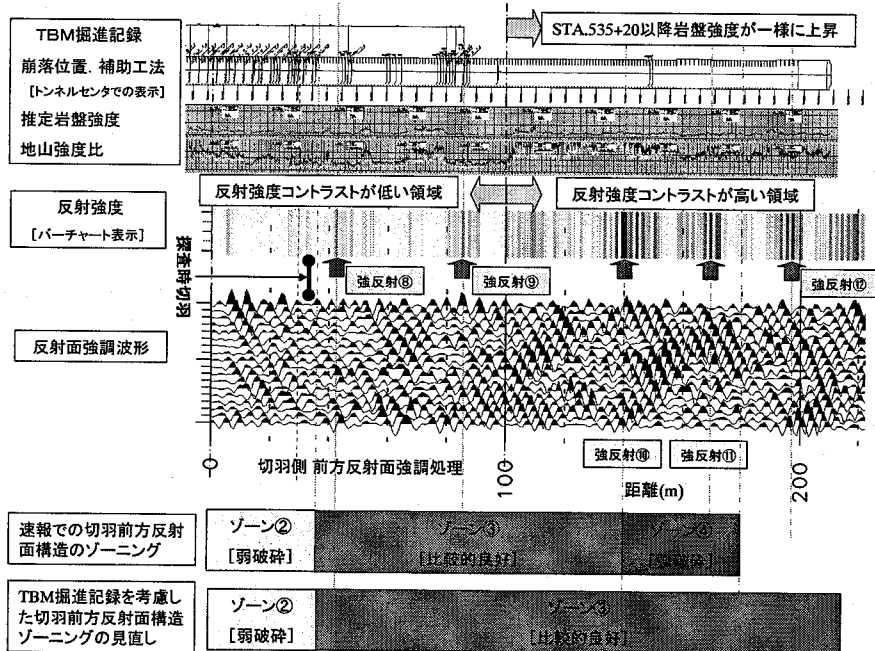


図-10 測線①の前方強調処理とバーチャート表示の掘進記録との対比

一方、後方反射面強調区間は全体として反射強度コントラストが低く、コントラストが低い領域に単発的に強反射が分布する。同様に大崩壊発生位置は全体として反射面強度のコントラストが低い領域に強反射が集中していることが分かる。

図-10に、測線①の切羽側の前方反射面強調処理結果とバーチャート表示による反射強度およびTBM掘進記録を併記して示す。図より、TBM掘進

記録からSTA.535+20から推定岩盤強度が僅かではあるが一樣に上昇し天端・切羽崩落がほとんど発生していないことが分かる。この境界位置は全体的な傾向として反射強度コントラストが低い領域と高い領域の境界に相当し、反射強度コントラストは地山強度の相違を示していると考えられる。この反射強度コントラストの高い領域では強反射が分布しても崩壊がほとんど発生していないが、反射強度コントラストが低い領域では強反射位置で崩落が発生している。

以上から、図-10に示したように速報時の反射面構造のゾーニングをTBM掘進記録から見直すと、強反射が連続し強破碎と評価したゾーン④は地山評価を取り違えており、比較的安定したゾーン③の延長とすべきであったと言える。

図-8、10から本現場の地山評価においては、全体的な反射強度のコントラストと強反射位置に注目することが重要であると考えられる。表-1に、TBM掘進記録から天端・切羽の安定性を反射強度コントラストと強反射の分布性状をパラメータとしてマトリックスで示す。表より、崩壊は全体的に反射強度コントラストが低い領域の強反射が分布する区間で発生しており、コントラストが高い領域とコントラストが低くても強反射が分布しない区間では崩壊は発生していないことがわかる。

SSRT探査結果の反射面分布から地山性状を評価する際には、通常反射面が集中する区間を地山が破碎された要注意区間と評価し、反射面が分布しない区間を岩相変化のない安定した区間と評価する場合が多く、本現場の速報時にはそのような観点から地山評価を実施した。しかしながら、過去のSSRT探査¹⁾からは、反射面が分布しない領域が規模の大きな破碎帯に相当し、反射面が分布する領域は源岩組織が残された相対的には良好な地山であったケースもある。よって、本現場の反射面分布と地山評価においては、一般的評価手法が適用できないことが分かる。

以上の結果から、本現場の地山に対して土木地質的な考察を加えると以下のようなものである。反射強度コントラストが低い領域は泥岩優勢層に相当し地山強度が低く素因として不安定要素を有しているが、コントラストが高い領域は全体として砂岩含有率が上昇し地山強度が上昇するので天端・切羽が安定する。反射強度コントラストの低い泥岩優勢層中の強反射面は砂岩の挟在層に相当し、この砂岩の強度は相対的に泥岩優勢層より高くこの強度差によって緩みが助長され崩落が発生し易く

表-1 切羽・天端の安定性に対する反射面コントラストと強反射面の分布マトリックス

		強反射面		
		なし	単発	連続
反射強度のコントラスト [全体傾向]	低	安定	小崩落	大崩落の危険性あり
	高	安定	安定	安定

なる。特に、泥岩優勢層中の挟在砂岩層の分布頻度が高くなると地山のバランスが崩れ易くなり、地下水などがトリガーとなって大きな崩壊に繋がる危険性が高くなる。

なお、TBMでは切削によって掘削ズリが乱されているので、ズリの観察からは上記の地質変化は判然としなかった。

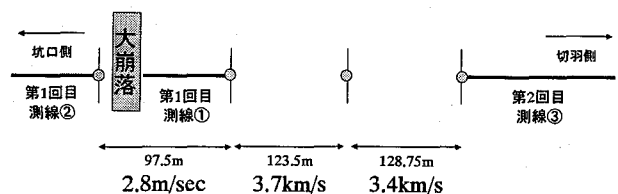


図-11 遠方発震における平均地山弾性波速度

(2)第2回目SSRT探査結果と考察

解析に用いた地山弾性波速度は、前回と同様に測線③における初動走時から得られる平均値として $V_p=3.4\text{km/s}$ を採用した。図-11に、遠方起震による第1回目の測線②～①および今回の測線③間における平均地山弾性波速度を示す。図より、大崩壊発生位置を挟む区間で弾性波速度が $V_p=2.8\text{km/s}$ と低く、天端・切羽の安定性が高くTBM掘進にトラブルが発生しなかった区間の地山弾性波速度は $V_p=3.4\sim 3.7\text{km/s}$ と大きいことが確認できた。

図-12に、第2回目のSSRT探査結果を示す。切羽前方地山の評価は、第1回目における地山評価の見直しを考慮して、反射強度コントラストと強反射面の分布性状に着目し、表-1に示したマトリックスによって以下のようにした。

ゾーン①および③：反射強度コントラストが低く、単発的に強反射面が分布するので小崩落が発生する可能性がある領域。

ゾーン②：反射面強度が高く強反射面が連続する区間であり安定していると考えられる領域。

TBM掘進記録からこの予測結果を検証すると、ゾーン②と③の境界付近のゾーン③側で小規模な崩壊が10m程度連続して発生したが、それ以外の箇所ではほとんど安定していた。よって、切羽前方地山の予測結果は、妥当であったと考えて良い。

一方、第2回目の探査深度は350m程度であったと考えられる。よって、第1回目と第2回目で平均的に切羽前方約300mの領域を探査することができたと考えられる。従来のミニインパクトを起震源としたトンネル掘削幅10m～18m程度の探査事例からは、探査深度は150～200m程度であり、今回の探査深度は従来の約2倍程度となった。探査深度が深くなった要因としては、TBM導坑が円形で直径が小さく発生した震動がトンネル周辺で減衰することなく切羽前方に伝達されたことや導坑内での起震方法の改良によって十分な起震力が地山に伝達されたことなどが考えられる。

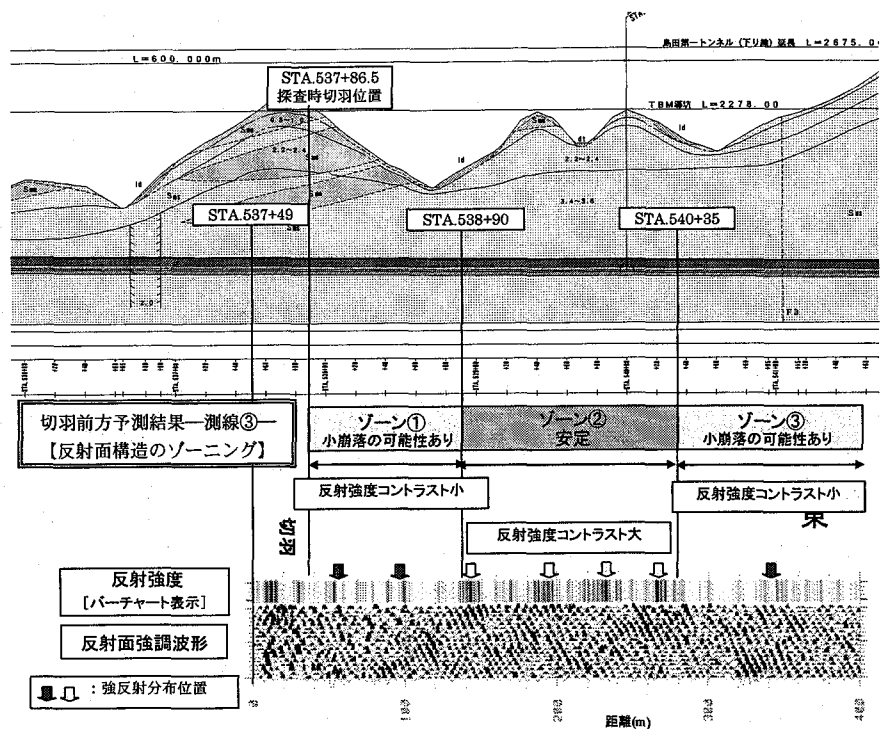


図-12 第2回目 SSRT 探査における切羽前方地山の予測結果

5. おわりに

本稿では、外径φ5,000mmのTBM導坑内という限られた作業空間において、従来からSSRT探査で利用してきたミニインパクトの起震方法を改良し計2回の切羽前方探査を実施した結果について報告した。第1回目探査では、地山評価を一部取り違えたが、反射強度のコントラストという指標を導入して地山評価の見直しを行い、本地山に適した評価マトリックスを作成した。その結果、第2回目探査の切羽前方予測結果はTBM掘進記録から妥当であることが示された。

本現場では、TBMマシンが大きな崩落によって拘束され、切羽前方の地山評価が非常に重要となった。SSRT探査における切羽前方地山の予測結果を概括すると、崩壊が発生した区間より良好であると予測しており、この区間ではTBM掘進において大きな地山トラブルは発生していない。以上から、本手法による切羽前方予測結果はTBMの順調な掘進に十分寄与したと言える。

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震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.
- 2) 加藤卓朗, 村山秀幸, 清水信之, 岡村浩孝, 望月齋也: 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.
- 3) 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.
- 4) 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.2227-234, 2005.12.
- 5) Shimizu, N., Murayama, H., Asada, H., and Hagiwara, M., 2006, The Comparison of Different Seismic Sources in the new method for Seismic Reflection Survey ahead of a Tunnel Face, *Proceedings of The 2nd International Conference on Environmental and Engineering Geophysics, Chinese Geophysical Society & CUG*.
- 6) 港高学, 工藤正彦, 服部弘通: 断層部における TSP による地山前方予知手法の検討, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, 第三部門, pp.110-111, 1997.9.
- 7) 稲崎富士, 倉橋稔幸, 飯酒益久夫, 河村茂樹, 林久夫: TBM 施工トンネルにおける HSP の連続適用, トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会, pp.69-74, 2001.5.
- 8) 白鷺卓, 山本拓治, 佐藤淳, 本庄竹志, 西岡和則: 反射とモグラフィ"TRT"の現場適用結果, 土木学会第 56 回年次講演会, III-B014, pp.28-29, 2001.10.
- 9) 井川猛, 黒田徹, 渡辺勉, 山田正則: 油圧インパクトによる地下探査, 建設の機械化, pp.53-57, 1989.11.