

トンネル浅層反射法による TBM 先進導坑内からの切羽前方探査

村山 秀幸 丹羽 廣海
上野 博務^{*1} 福田 秀樹^{*2}

概 要

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。SSRT 探査では各トンネル現場における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起震・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)工事では、大断面の本坑トンネル掘削前に TBM 先進導坑(外径φ5,000mm)にて掘進していたが、大小の地山崩落が頻発し TBM マシンが拘束され掘進停止を余儀なくされた。そこで、TBM 導坑内から切羽前方を予測し、適切な施工管理を実施することが重要となり SSRT 探査が採用された。

本報文では、作業空間と使用機材が限定される TBM 導坑内において、起震源となるミニインパクトとその起震方法を改良し TBM 導坑内で SSRT 探査を実施した事例について報告する。第 1 回目の SSRT 探査結果では、一部地山評価を取り違えたが、掘削実績と探査結果に対して新たな地山評価指標を提案し地山の再評価を実施した。その結果を第 2 回目の SSRT 探査に反映し、TBM 掘削の順調な掘削に十分寄与することができた。

Shallow Seismic Reflection Survey for Tunnels (SSRT) using a Hydraulic Impactor as the Vibration Source in a TBM Pilot Tunnel

Abstract

The authors have developed the Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels (SSRT) to determine geological conditions ahead of tunnel faces. For the SSRT survey, a hydraulic impactor, vibrator or explosives can be used as the seismic sources according to construction methods and geological conditions of each tunnel applied.

This paper describes an improved SSRT using a hydraulic impactor for a TBM (Tunnel Boring Machine) tunnel named the 1st SHIMADA of 2nd Tomei Expressway Project. With this technique good reflection images along a tunnel axis were created by VSP processing. The processed results show that characteristic strong reflection images coincide with the zones of collapsed rock area and those seismic images obtained from the SSRT.

キーワード: トンネル切羽前方探査, トンネル浅層反射法探査(SSRT), TBM

*1 横浜支店 *2 四国支店(元横浜支店)

§1. はじめに

一般に、TBMは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。

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φ5,000mm)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。

本稿では、作業空間と使用資機材が限定されるTBM導坑内において実施可能な切羽前方探査手法を検討し、油圧インパクトを起震源とするSSRT探査の起震方法を改良することによって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の実施例とSSRT探査方法の改良

2.1 TBM坑内での切羽前方探査の実施例と課題

TBM坑内における切羽前方探査の実施例としては、起震源に発破を用いるTSP¹⁾、HSP²⁾や通常ハンマ起震を用いるTRT(True Reflection Tomography)³⁾がある。

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区間に連なり、切羽からこの約100m区間が特に作業空間が狭く限定されている。よって、TSPやHSPにおいて、発破孔を間隔2m程度で後続設備区間の側壁に削孔することは容易ではなく、発破時には各種計器に影響を与えないために入念な防爆処理が必要となる。当然ながら、このような限定された空間での発破作業は、安全管理上避けるべきであることは周知と言える。

一方、TBMでは通常火薬類の使用を申請しない。島田第一トンネル(下り線)でもTBM掘進期間中は火薬類の使用申請を実施していなかった。よって、TBMにおいてTSPやHSPを実施することは、起震源となる発破の使用許可申

請の上でも制約がある。

TRTはハンマ起震で手軽であるが、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、比較的作業空間が広い後続設備後方の区間で探査しても探査可能な切羽前方領域は限定される。さらに、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、一般に月進300m以上程度を目標としており、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においては安全な非爆薬震源を用いて切羽前方300m程度まで探査可能であることが望まれていると言える。そのためには、打撃エネルギーの大きな起震源と手軽な探査機器を用いることが肝要であると考えられる。

2.2 SSRT探査方法の改良

SSRTは非爆薬震源として、油圧インパクトとパイプロサイスが利用可能で探査目的に応じて機種を選択できる。油圧インパクトには、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⁴⁾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に使用し探査実績が多い⁵⁾。

図1にミニインパクトの形状図を示す。本震源は最大幅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)により、寸法上は外径φ5,000mmのTBM導坑内の後続設備区間で探査可能であり、総重量も1.2tfで現場への輸送や坑内での移動に有利である。

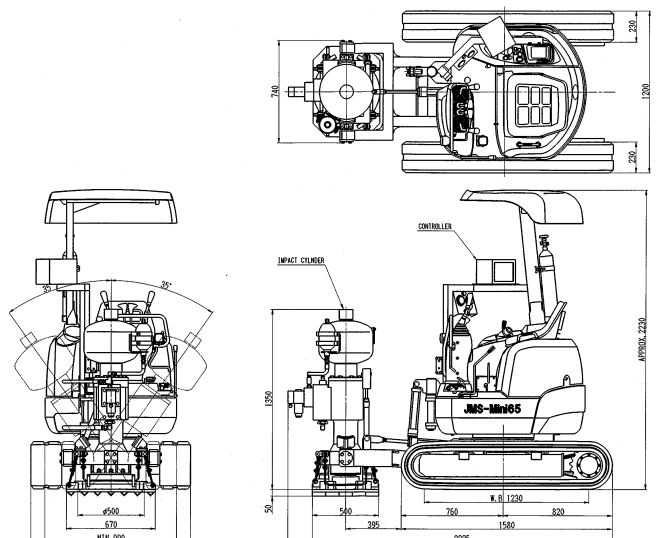


図1 ミニインパクト[JMS-MINI65]形状図

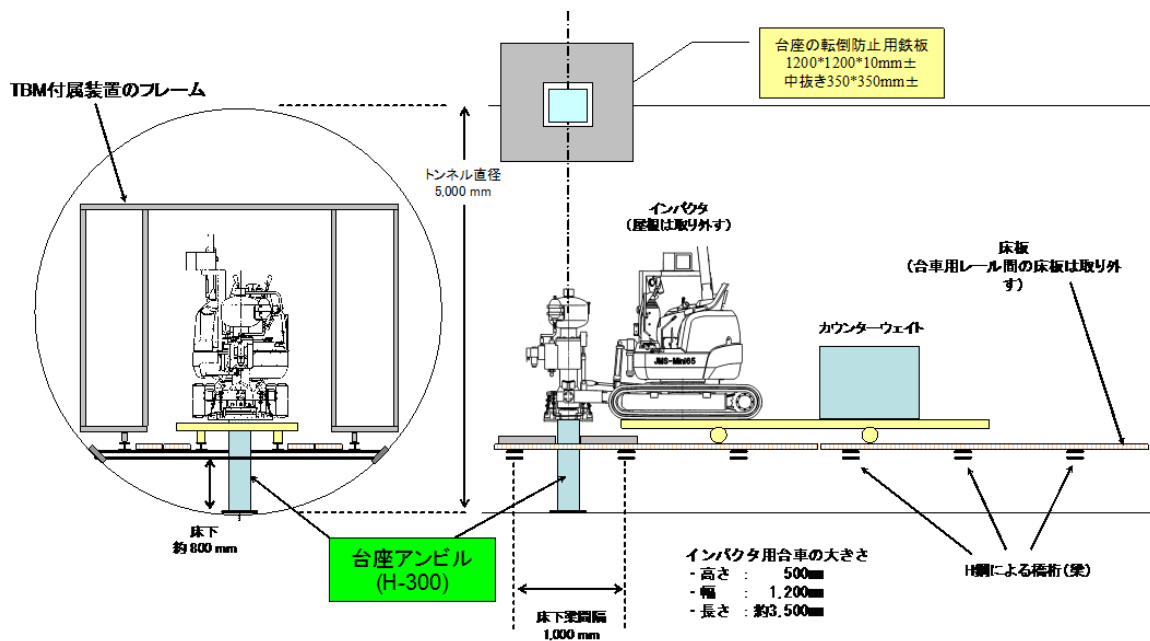


図2 TBM 導坑内の後続設備区間を考慮したミニインパクト起震方法の概念図

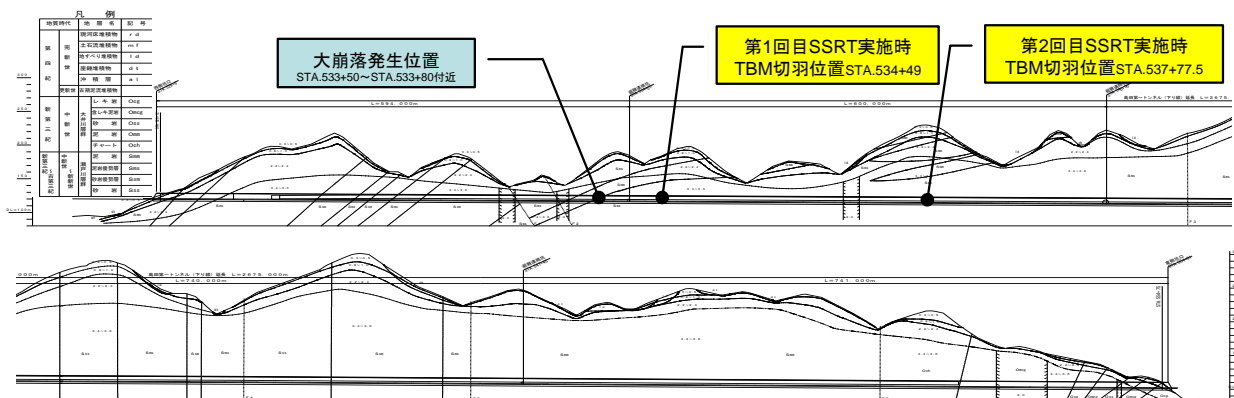


図3 島田第一トンネル(下り線)地質縦断図[SSRT 探査実施時のTBM 切羽位置を併記]

図2にTBM 導坑内の後続設備区間におけるミニインパクトでの起震方法の概念図を示す。導坑内は軌道式であり、ミニインパクトは台車に乗せて搬入する。通常ミニインパクトは鉛直下向きにトンネル底盤を起震しながら移動を繰り返すので、TBM 導坑内では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直接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、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。

§3. 現場概要と SSRT の実施方法

3.1 現場概要

図-3 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。山地は概ね標高 300m~400m で、主な河川方向と同じ北西-南東方向の尾根が発達する。

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~泥岩に区別されている。

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、数箇所に低速度帯($V_p=2.0\text{km/s}$)が確認されている。

3.2 SSRT 探査の実施方法

SSRT探査は計2回(3測線)を実施した。図4に第1回目の探査測線を示す。測線は、天端の大崩壊によってTBMマシンが拘束された 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の主な目的は切羽前方探査であり、測線②は大崩壊位置の地山特性(反射波特性)の把握にある。測線延長は共に34m、受振器は間隔2mで18箇所を設置し、起震はミニインパクトを各受振器に移動し8回スタッキングした。

なお、第1回目の探査段階でTBMマシンは拘束状態から脱し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地山は依然として不安定な状態にあった。

図5に第2回目のSSRT探査測線を示す。測線③は第1回目の探査結果を踏まえ、屈折法解析で地山P波速度を精度よく取得するために測線延長を70mと第1回目より長く設定した。測線③の切羽側34mを主測線として、受振器を間隔2mで18箇所に設置し起震も2m毎で実施した。坑口側36mを副測線として、同様に受振器を間隔2mで18箇所に設置し、起震を4m毎とした。さらに、各測線間の地山P波速度を把握するために、遠方起震点として測線①と②の切羽側受振器位置、測線②と③のほぼ中間点で起震を行った。起震回数は、遠方起震点で20回のスタッキングを実施し、測線③では10回とした。

一方、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、起震と受振は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。

§4. 探査結果と掘削実績の対比

4.1 第1回目 SSRT 探査の結果と地山評価の見直し

4.1.1 速報における地山評価

SSRT探査で得られた波形記録は、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

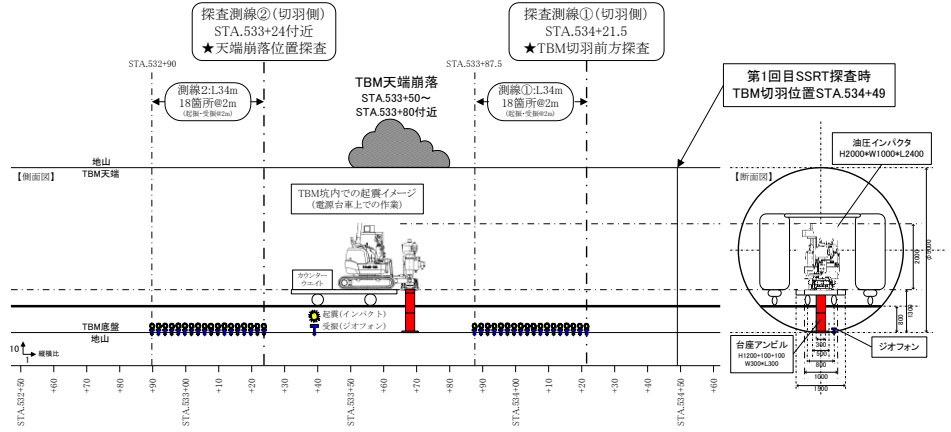


図4 第1回目 SSRT 探査測線配置図

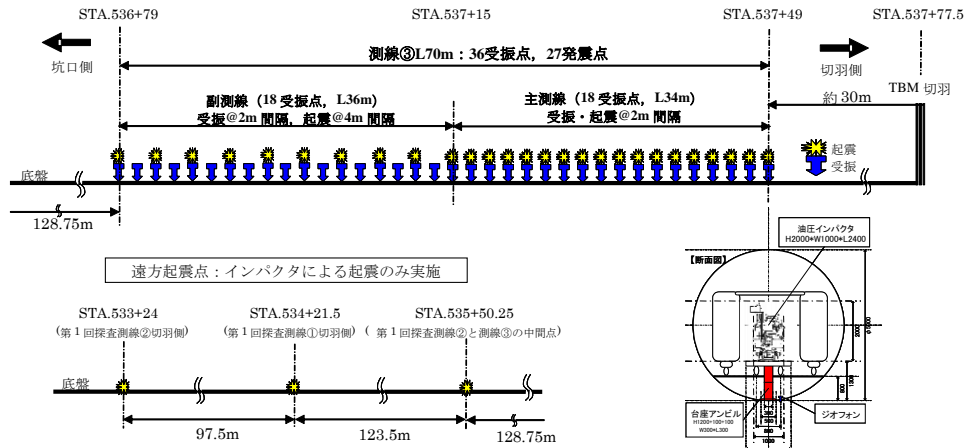


図5 第2回目 SSRT 探査測線配置図



(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) ベースプレートとアンビル

(d) 受振器と坑内配線

写真1 TBM 導坑内での SSRT 実施状況

まとめた。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)等は取得記録を持ち帰って整理した。

速報解析に用いた地山弾性波速度は、測線①と②の初

動走時から得られる弾性波速度を平均し $V_p=3.09\text{km/s}$ 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6に、探査結果および前方地山の評価結果を示す。反射面の振幅差は相対的な地山の強度差に相当し、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。地山性状の評価では、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、地山をゾーニングして評価する。

図6の測線②において、大崩壊が発生した区間に振幅の非常に大きな反射面が連続して分布しており、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面が連続する区間を「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で前方140～180m、測線②で前方250～290mを確認することができ、この区間は要注意区間と想定できる。なお、両測線における反射面位置が10m程度のずれる理由は、位置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り、特に測線②では前方距離が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6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面が連続して確認できるゾーン。
- ・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面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。

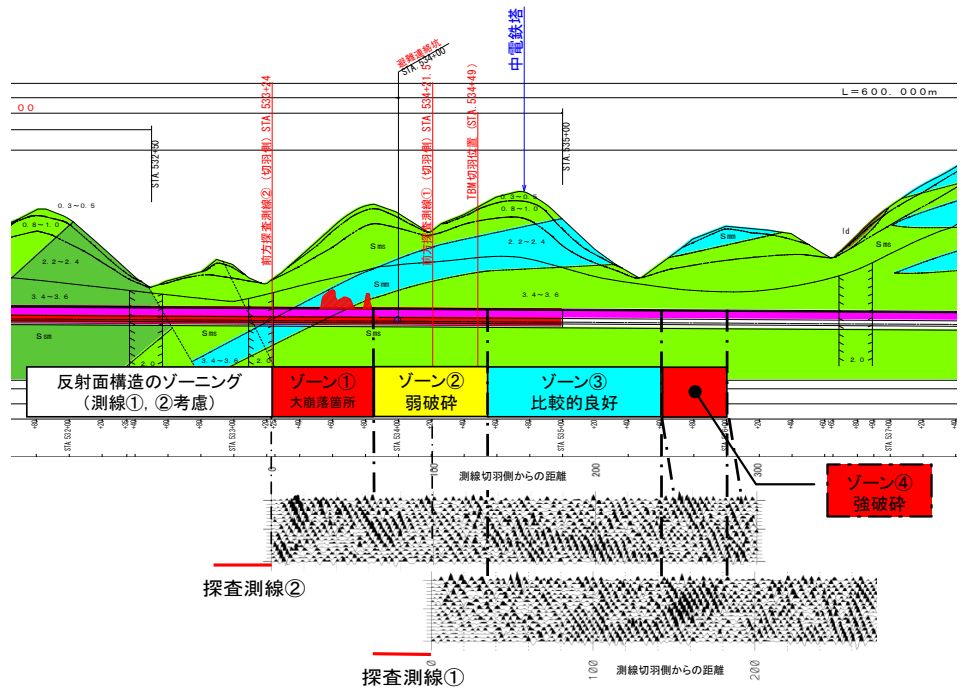


図6 第1回目 SSRT 探査結果の速報[現場での波形処理結果]

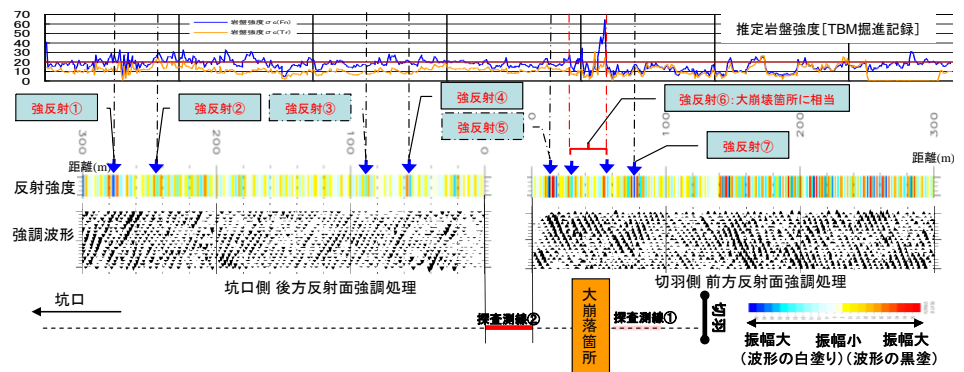


図7 後方および前方の反射面強調処理結果とTBM掘進記録

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ポ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。

4.1.2 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・切羽は安定していた。よって、地山評価の見直しを実施した。

図7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7には、図8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と併記した。このバーチャート表示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7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ことがわかる。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。

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している。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9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せず、反射強度コントラストが低い領域での強反射位置で崩落が発生している。

以上から、図9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の延長として評価すべきであったと言える。

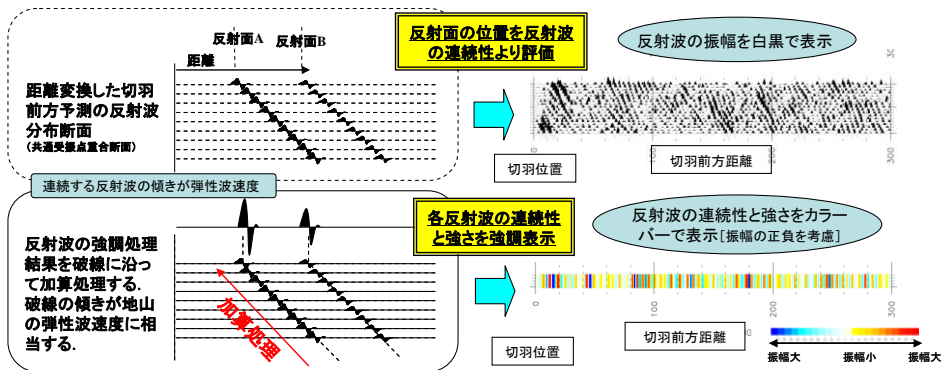


図8 反射面強度のバーチャート表示の考え方

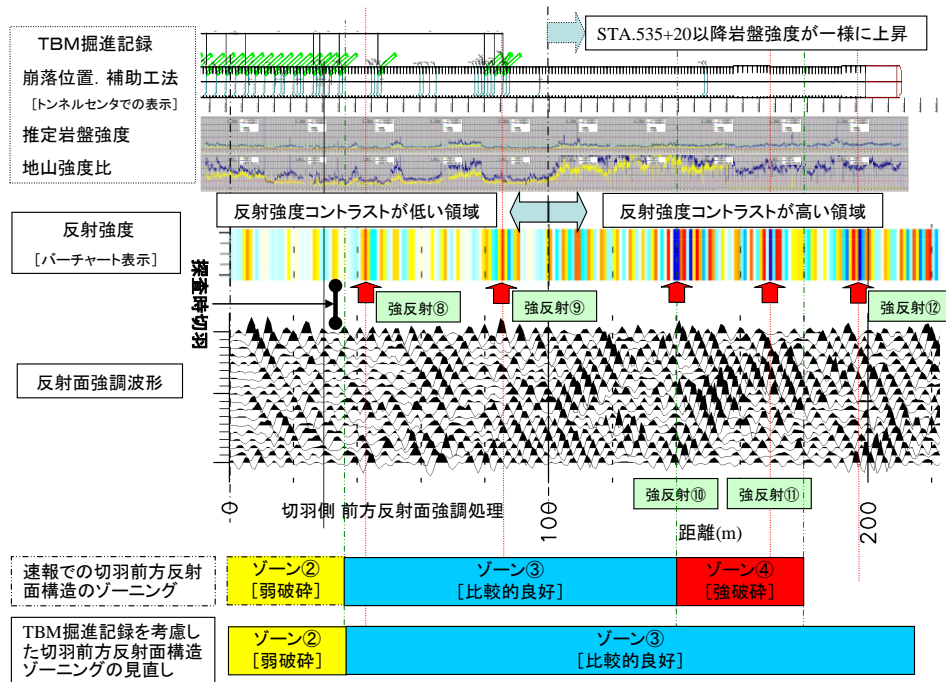


図9 測線①の前方強調処理とバーチャート表示の掘進記録との対比

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

		強反射の分布		
		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

4.1.3 地山評価指標の提案と土木地質的検討

本トンネルの地山評価においては、反射強度コントラストの変化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機会が多く、本現場の速報ではそのような一般的な観点から地山評価を実施した。しかしながら、過去のSSRT探査結果⁵⁾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。

以上から、SSRTによって得られる反射面構造から切羽前方地山を評価する際には、ここで提案した指標である反射面コントラストや強反射分布、あるいは切羽後方の反射面分布と掘削実績の対比や過去に実施した別トンネルでの事例などを総合的勘案し、その現場に特有な土木地質的な考察を加えて判断することが非常に重要となると言える。

一方、この段階で本トンネル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壊が発生し易くなる。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。

4.2 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10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 $V_p=2.8\text{km/s}$ とかなり低く、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 $V_p=3.4\sim$

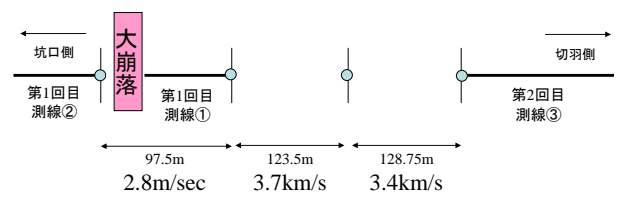


図10 遠方起震における平均地山弾性波速度(P波)

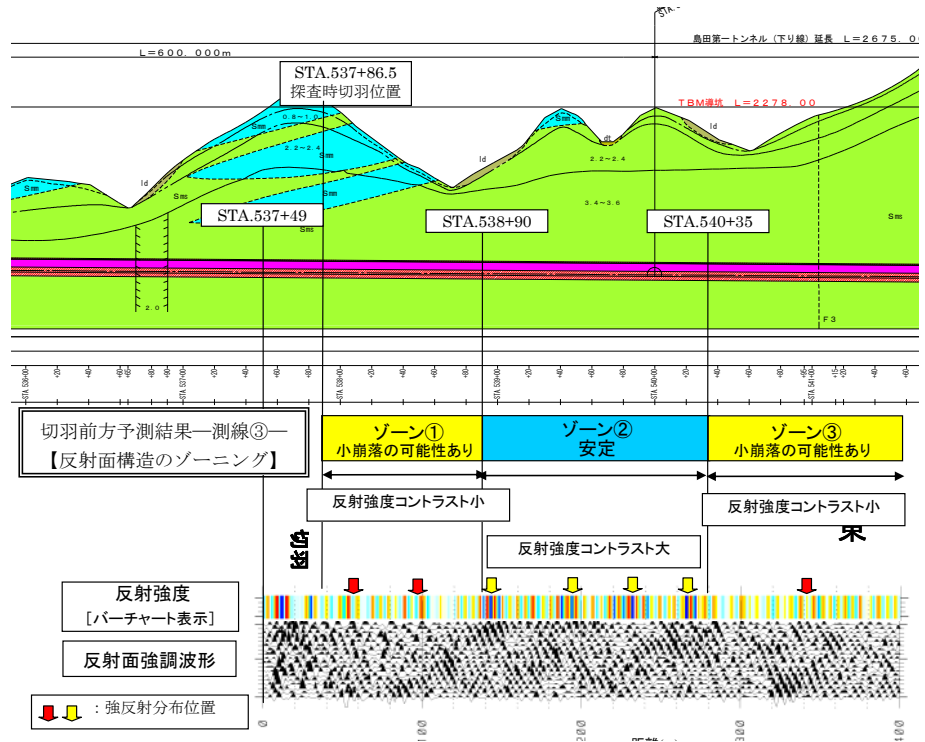


図11 第2回目 SSRT 探査における切羽前方地山の予測結果

3.7km/s と比較的大きいことが確認できる。

図-11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②: 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壊が発生する可能性がある領域。

- ・ゾーン③: 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の領域を探索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。

4.3 本坑掘削時の切羽観察結果との対比

図12にTBM掘進後の本坑掘削時に実施した切羽観察結果から砂岩混在率が高くなる領域と、測線①、②の前方探査区間における反射強度のカラーチャート表示を対比して示す。図より、強反射位置と砂岩混在率が高くなる位置は概ね一致し、反射強度コントラストが高くなる付近から砂岩の混在率も高くなる傾向を示している。

よって、4.1.3項で述べた本トンネルの反射構造が砂岩の含有率に依存するという土質地質的な推論は、ほぼ立証されたと考えられる。すなわち、本地山における崩壊性の素因は砂岩と泥岩の強度差等に依存する、換言すれば、地山の褶曲作用等において砂岩近傍の泥岩がその強度差から塑性化され易く、泥岩が強いダメージを受け崩壊性の素因となる影響を受けたことが示唆される。

§5. まとめ

本稿では、作業空間の限定された外径φ5,000mmのTBM導坑内において、起震源であるミニインパクトと起震方法を改良して計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、反射強度コントラストと強反射分布に注目した指標を提案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マシンが地山崩落によって拘束され、切羽前方探査が重要課題となった。実施したSSRT探査結果を概括すると、TBMマシンが拘束された区間より切羽前方地山は良好であると予測し、その区間では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。

一方、本坑掘削時の切羽観察結果から、本トンネルにおける反射構造が砂岩・泥岩互層中の砂岩混在率に依存することを明らかとし、泥岩の崩壊性素因を推定した。

謝辞 本研究は株式会社地球科学総合研究所との共

同研究の成果である。現場での探査および解析作業に

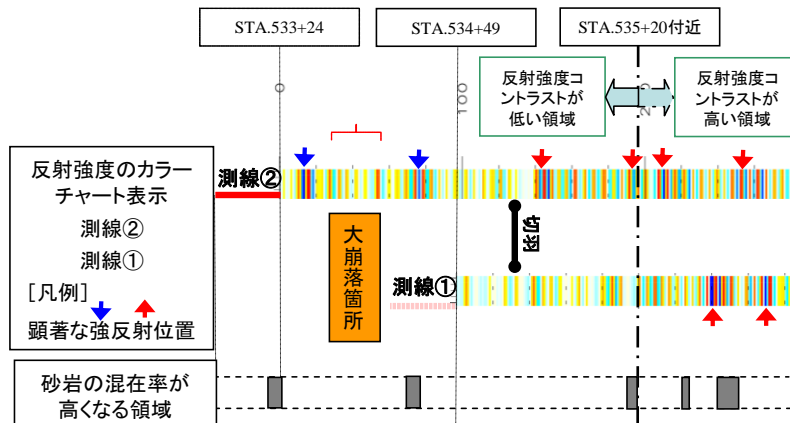


図12 砂岩の混在率と強反射位置の関係

多大なるご尽力を頂きました清水信之氏、黒田徹氏、東中基倫氏ほか関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 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Ⅲ部門, pp.110-111, 1997.9.
- 2) 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.
- 3) 白鷺卓, 山本拓治, 佐藤淳, 本庄竹志, 西岡和則:反射トモグラフィ”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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.



村山 秀幸

ひとこと

SSRTは9現場に適用し探査手法として成熟期に入った。SSRTでは得られた反射構造に対する土質地質的な評価と解釈が極めて重要であり、本現場での適用は特に有益であった。今後はSSRTの普及に努めたい。