

坑外からの切羽前方探査における 到達側坑口受振記録の活用

丹羽 廣海¹・村山 秀幸²・小笠原 和久³・中島 耕平⁴・黒田 徹⁵

¹正会員 株式会社フジタ 技術センター 基盤技術研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

E-mail:hiroumi.niwa@fujita.co.jp

²正会員 工博 株式会社フジタ 技術センター 基盤技術研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

³株式会社フジタ 東北支店 (〒980-0803 宮城県仙台市青葉区国分町2-14-18定禅寺パークビルディング)

⁴株式会社フジタ 九州支店 (〒812-8568 福岡市博多区博多駅中央街8-36博多ビル)

⁵株式会社地球科学総合研究所 (〒112-0012 東京都文京区大塚1-5-21茗溪ビルディング)

トンネル浅層反射法探査 (Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels:SSRT) は震源が発破に限定されず汎用性の高い探査手法である。一般国道45号恋の峠トンネル工事では、発進側坑口からSSRTを実施し延長343mのトンネル全線の地山性状を予測した。探査に際して、到達側坑口にも受振器を設置し到達するP波の初動を読み取ることによってトンネル路線の地山弾性波速度の実測を試み、この方法で求められた地山弾性波速度をSSRTにおける切羽前方の距離換算に用いることにより反射面位置推定精度の向上を図った。その結果、実測地山弾性波速度を解析に利用することにより探査精度が向上したが、総合的な反射面の評価にあたっては掘削時の切羽観察結果などを参考にして適宜評価結果の修正を図ることも重要である。

Key Words : geological prediction ahead of tunnel faces, Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels (SSRT), P wave velocity

1. はじめに

筆者らが開発し適用を進めているトンネル浅層反射法探査 (Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels : 以下SSRT と称す) は、弾性波反射法を応用し切羽前方地質を予測する手法である¹⁾²⁾³⁾。SSRT は図-1 に示すように直線上に発震・受振点となる探査測線を展開し、弾性波を地山内に発進し切羽前方およびトンネル周辺に存在する地層境界、断層破碎帯等からの反射波を同じくトンネル坑内に設置した受振器により受振し、地質状況、特に断層破碎帯の位置や規模を把握する探査法である。

一般国道45号恋の峠トンネルは延長343m、仕上がり内空断面62.7m²のNATMトンネルである。本トンネルでは、掘削に先立ち発進側坑口ヤードから、トンネル全線に対しSSRTを適用した。また、到達側坑口にて実測した地山弾性波速度をSSRTにおける反射面位置の距離換算に用いた。

本稿では、以上のようにして予測した延長 343m のトンネル全線の地山状況に対して、掘削時の切羽観察データと対比し、予測結果の妥当性について報告する。

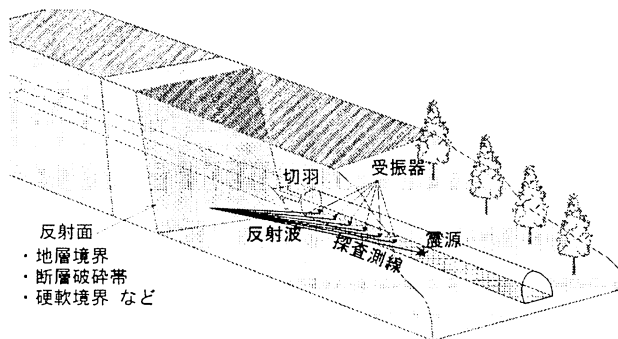


図-1 SSRTによる切羽前方探査概念図

2. 現場条件とSSRTの適用性

(1) 探査原理

SSRT の探査結果は図-2 に示す反射波形として表わされ、切羽前方に反射面がある場合、波形は規則的に配列する。弾性波は地山の音響インピーダンスに差が生じる境界面で反射し、その差が大きいほど反射は強くなる。

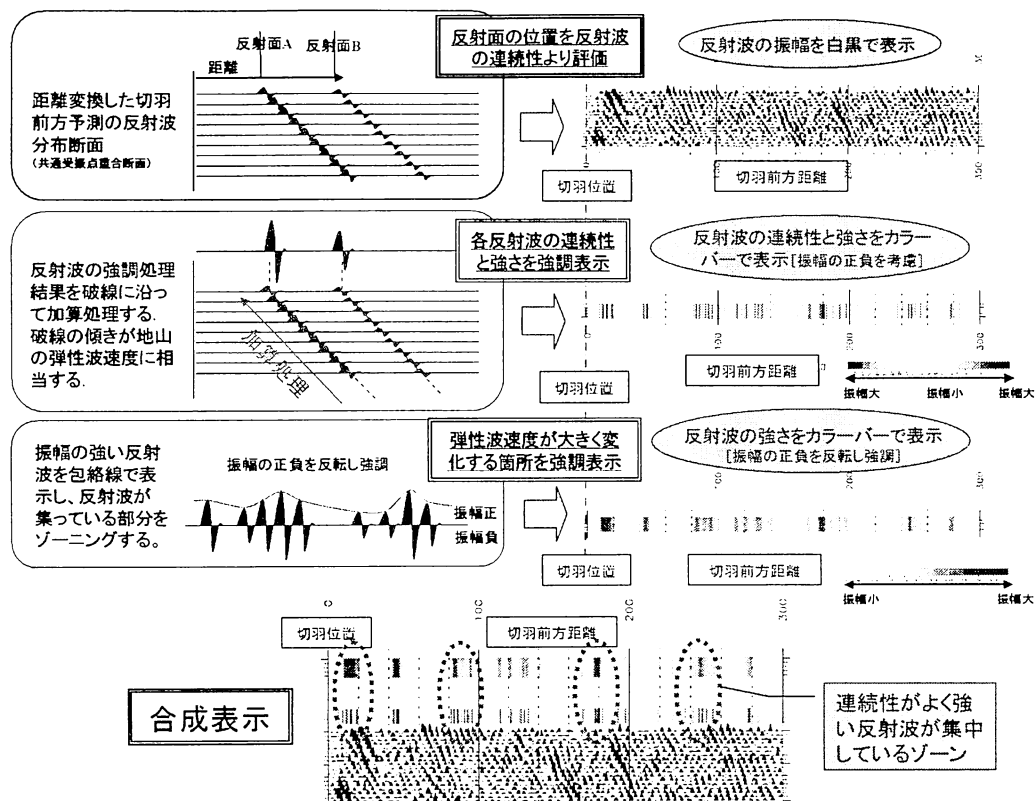


図-2 SSRTで得られた反射波形の表示方法

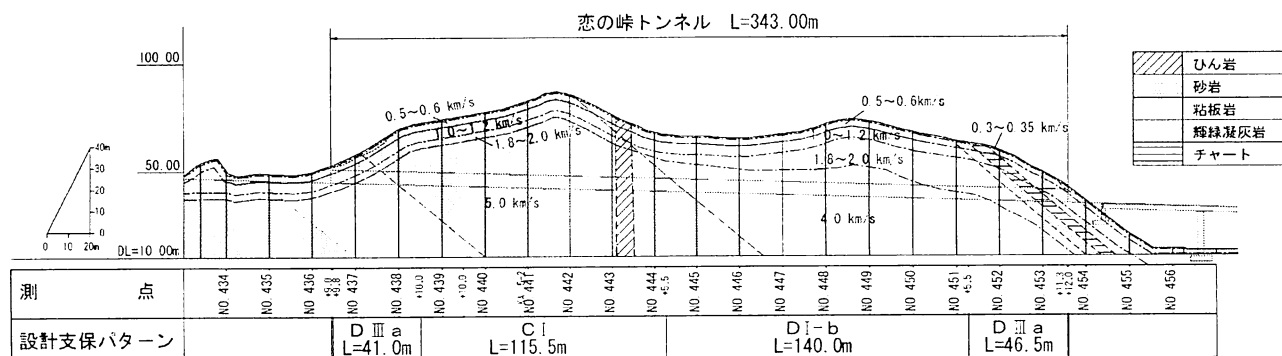


図-3 恋の峠トンネルの推定地質縦断面図および設計支保パターン

音響インピーダンスは地山の密度と弾性波速度の積で表されるため、弾性波の反射面は地山の密度の境界面を表すと考えられる。よって反射面の集中する箇所を断層破碎帯に相当する地山脆弱部と評価する場合が多い。このため、探査結果は反射面が集中する箇所を視覚的に分かりやすく表示することを目的として、図-2 に示すような手順で検出された反射波形を振幅の強弱に応じて濃淡を付けたカラーバーで表示することとした。

(2) 現場条件

恋の峠トンネルを構成する地山は古生代二畳紀（ペルム紀）に形成された釜石層の粘板岩、輝緑凝灰岩を主体とする。設計支保パターンは図-3 に示すとおり、発進

側の輝緑凝灰岩分布区間をC Iパターン、到達側の粘板岩分布区間をD Iパターン、土かぶり1.5Dまでを坑口部としてD III aパターンとして計画されていた。すなわち設計支保パターンによると、発進側坑口部から輝緑凝灰岩に入る箇所まで支保パターンがD III aからC Iに3ランクダウンしている。また、トンネル中間部には輝緑凝灰岩と粘板岩の境界が推定されているが、ここでは支保パターンで2ランクアップしている。このため、坑口の風化帯と輝緑凝灰岩、またトンネル中間部の粘板岩と輝緑凝灰岩の境界位置を事前の探査によって予測しておくことが有効と考えられた。

上記のように、本トンネルでは探査ターゲットのひとつが発進側坑口部周辺にあることから、SSRTによる探

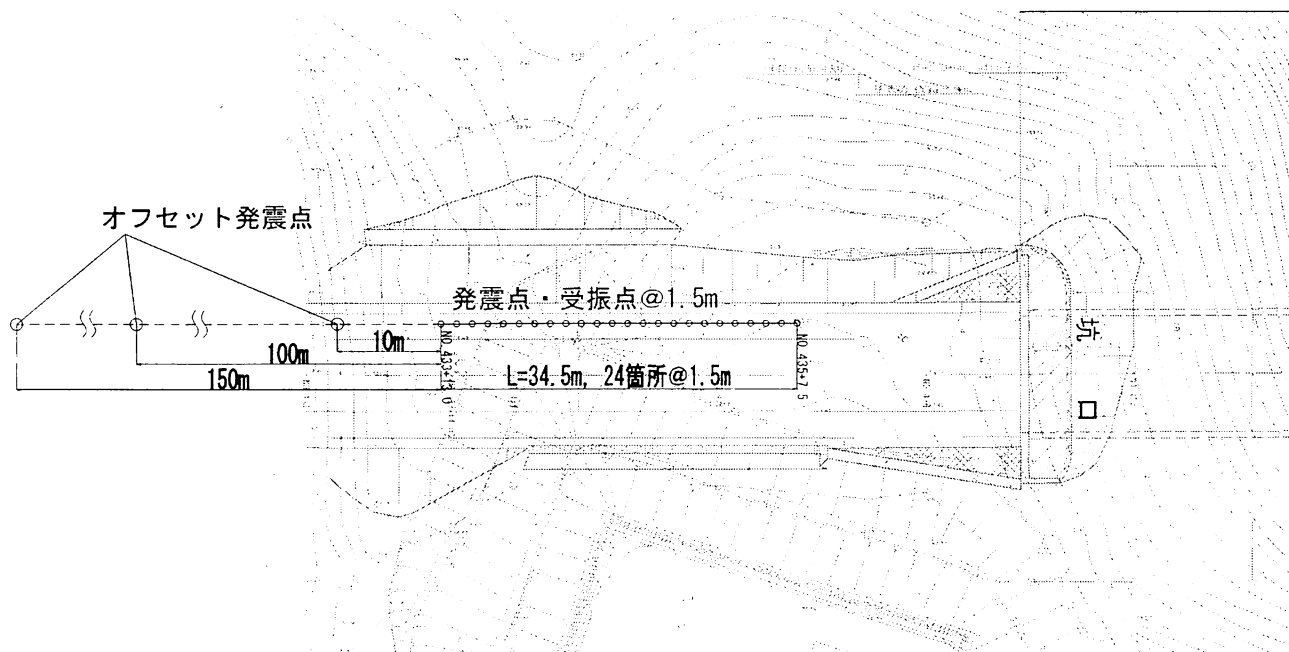


図-4 SSRT測線展開位置図（発進側坑口ヤード）

査はトンネル掘削に先行し坑外から実施する必要があった。

(3) SSRTの特徴と優位性

SSRT の他に弾性波反射法を用いる切羽前方探査手法として TSP, HSP などが挙げられる⁴⁾。表-1 に SSRT と他の切羽前方探査手法の比較を示す⁵⁾。表より、SSRT は他の手法に比べて測定・解析に時間を要するが、下記の点で汎用性が高い手法である。

- ・震源に非爆薬の機械震源である油圧インパクトやパイプレータを用いるので発破に対し制限のある市街地や近接施工、または TBM 導坑内などにおいても適用可能（発破も利用可能）。
- ・油圧インパクトなどの機械震源は、機動性に優れていることから精度の高い測定方法である多起震点・多受振点観測を採用できる（条件や探査目的に応じて測定配置を任意に変更可能）。
- ・地山状況や地形条件に応じた解析手法を採用でき、坑口周辺や低土かぶり区間でも実績がある。

なお、坑外から弾性波反射法を用いてトンネル地山を予測した試みはSSRTのほかには報告が無いが、SSRTでは坑口から約200m程度前方までの探査実績がある⁶⁾。坑外における探査の適用にあたって、SSRT以外の手法による場合は震源が発破に限定されるが、火薬使用許可は通常トンネル坑内で発破をおこなうものとして申請すること等から制限がある。以上より、本トンネルでの適用においては他の探査手法と比較してSSRTの採用が有利である。

表-1 弾性波反射法を用いた切羽前方探査手法の比較

比較項目		SSRT	TSP	HSP
機材	起震	重	軽	軽
	受振	多	少	多
震源		機械震源 (ミニインパクト・パイプレータ) 発破	発破	発破
受振器		1成分	2成分	2成分(3成分)
測定配置	起震	多起震点 (掘削底盤)	多起震点 (側壁)	少起震点 (側壁)
	受振	多受振点 (掘削底盤)	2点 (側壁)	多受振点 (側壁)
削孔の必要性		無(発破では必要)	有	有
測定		1日	前日半日 当日半日	1日
解析		1～2日	半日～1日	1～2日
解析方法		VSP (水平構造解析・ トモグラフィも可能)	VSP	VSP
探査深度		パイプレータ・発破： 150～300m ミニインパクト： 100～200m	100～150m	100～150m

3. SSRTによる前方地山予測

(1) SSRTによる切羽前方探査方法

SSRTの実施にあたって、図-4に示すように発進側坑口前面に探査ヤードを確保し測線を展開した。測線は発震点および受振点を1.5m間隔で24箇所設け（測線延長34.5m）、受振器は上下動1成分で固有周波数100Hzのジオフォンを使用した。

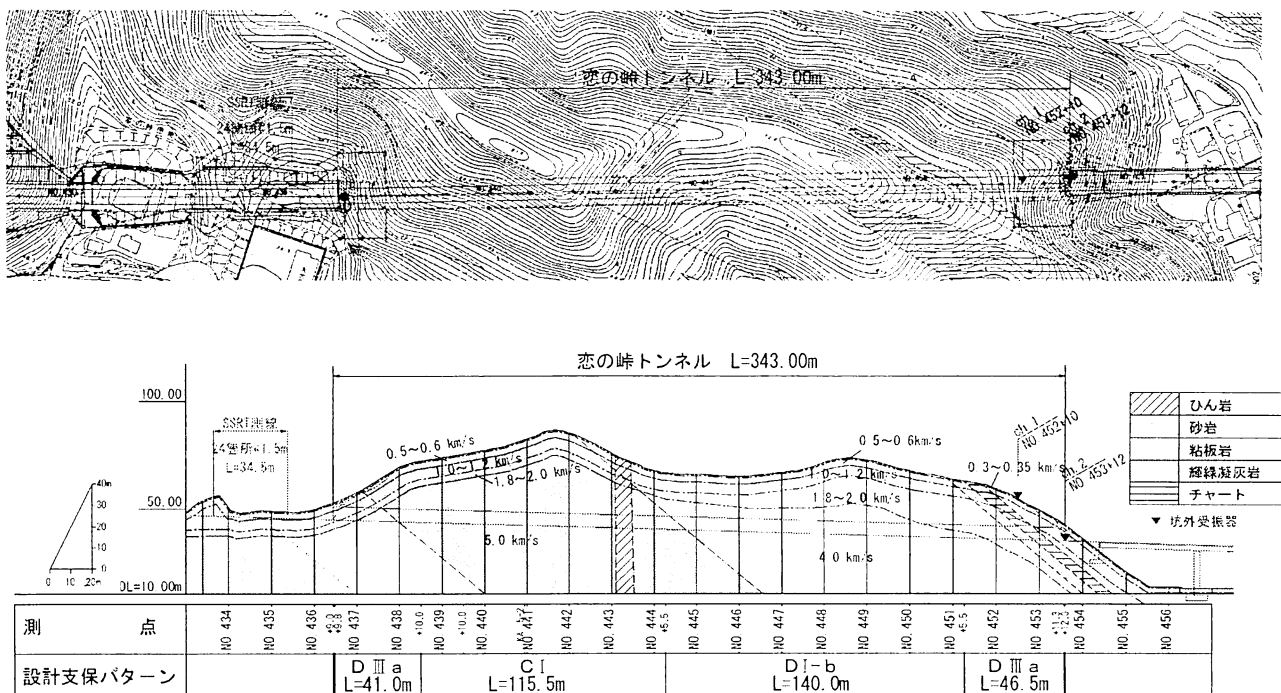


図-5 到達側坑口の受振器展開位置

SSRTの震源には起震力が大きく前方300m以上の探査に有効なバイブレータと、それに比べて起震力は劣るが周波数帯域が受振器の固有周波数と近く前方100～150m程度の探査に精度が高い油圧インパクトを併用した。バイブレータによる発震はスイープ周波数20～180Hz、スイープ長14sでおこなった。油圧インパクトによる発震はピストンの打撃によりおこない、1箇所あたり5回スタックした。

バイブレータは全長6.10m、全幅1.83mで、発震能力はピークフォース66.0kN、ホールドダウンウェイト7.4t、周波数範囲10～250Hzである。油圧インパクトは全長2.48m、全幅1.00mで、打撃エネルギー2,000J、ロッド重量64.0kgである。トンネル坑内における探査では、バイブレータを用いて弾性波速度 $V_p=4.5\text{km/s}$ 程度の地山で約300～500m前方までの探査実績があり、同型の油圧インパクトは弾性波速度 $V_p=4.5\text{km/s}$ 程度の地山で約150m前方までの探査実績がある⁷⁾。

SSRTの実施には探査測線を展開できる平地が必要であることから、坑口前面ヤードの整地完了後、トンネル仮設備設置直前に実施した。探査実施前日に資機材の搬入をおこない、探査測線展開から、探査実施、資機材の撤去までの工程を1日でおこなった。解析はVSP法 (Vertical Seismic Profiling) を応用しておこない、フィルタリング処理、CRP 重合処理を経て測線前方からの反射波を強調した。こうして強調された反射波の到達時間と弾性波速度から反射面までの距離を求めた。

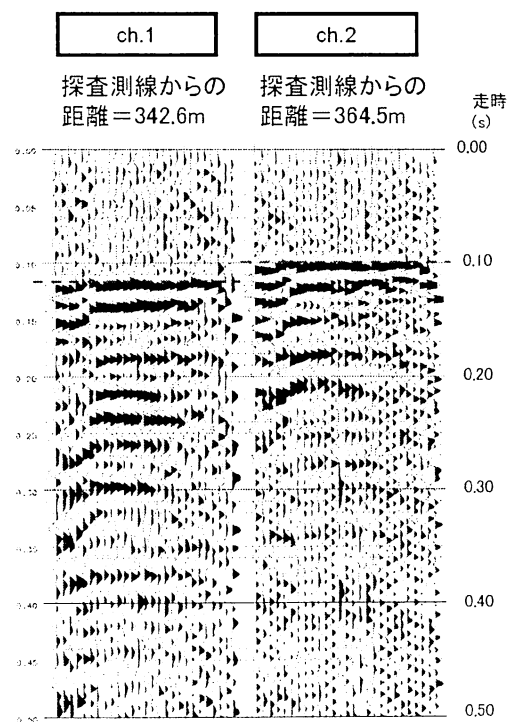


図-6 到達側受振点で観測された初動記録

(2) 到達側坑口受振記録の活用

通常の切羽前方探査では、事前の屈折法探査結果などから前方地山弾性波速度を推定し解析に用いる。解析では反射波の到達時間と地山弾性波速度から反射面までの距離を求めるため、地山弾性波速度の推定を誤ると反射面位置の推定精度が低くなる。

探査測線を展開した坑口前面ヤードには比較的新鮮な

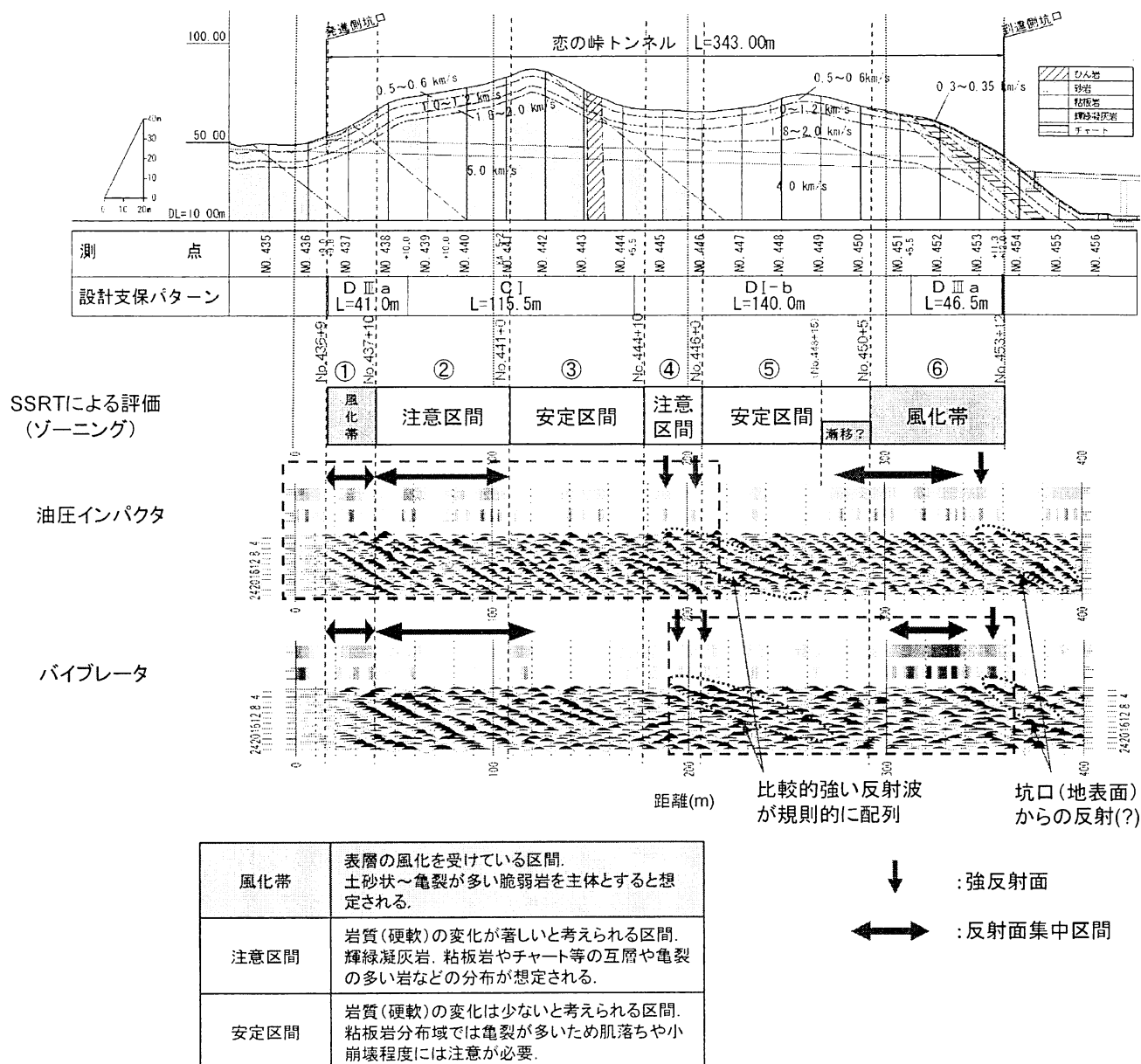


図-7 SSRTによる前方地山予測縦断面図

地山が露出していたことから、発震した弾性波が地山へ伝播しやすい条件にあり、延長 343m の本トンネルでは到達側坑口で P 波を観測できる可能性があると考えられた。そこで SSRT 実施時には、図-5 に示すように到達側坑口にも受振器を設置し、到達する P 波の初動を読み取ることによってトンネル路線の地山弾性波速度の実測を試みた。到達側坑口に設置した受振器は、発震点からの距離が遠いため、距離減衰の小さい固有周波数 10Hz の受振器を使用した。発震側記録装置の内蔵時計と到達側坑口受振点記録装置の内蔵時計は、GPS 衛星から発信される 1pps 信号にそれぞれ同期させた。到達側坑口において観測された P 波の波形を図-6 に示す。図より、ch.1 では ch.2 より探査測線からの距離に近いにも関わらず初動到達が遅い結果が得られた。この原因は、ch.1 の受振器設置位置は自然斜面上にあたるため、表層土または風

化帯からなる弾性波速度の低い経路を弾性波が伝播しているためと考えられる。一方、ch.2 の受振器設置位置は坑口切土面上の地山が露出している箇所にあたるため、表層土や風化帯の影響が少なくトンネルルート上の地山弾性波速度を反映していると考えられる。よって、ch.2 で求められた地山弾性波速度の平均値 $V_p=4.3\text{km/s}$ を切羽前方予測に用いる地山弾性波速度として採用した。 $V_p=4.3\text{km/s}$ という地山弾性波速度は、事前調査結果における新鮮岩における弾性波速度 $4.0\sim 5.0\text{km/s}$ を参考にするとう適切な値であると評価できる。

(3) 前方地山予測結果

図-7 に、油圧インパクトとパイプレータの両震源による反射面強調処理結果と想定地質断面図を示す。また、検出された顕著な強反射面および反射面集中区間に基

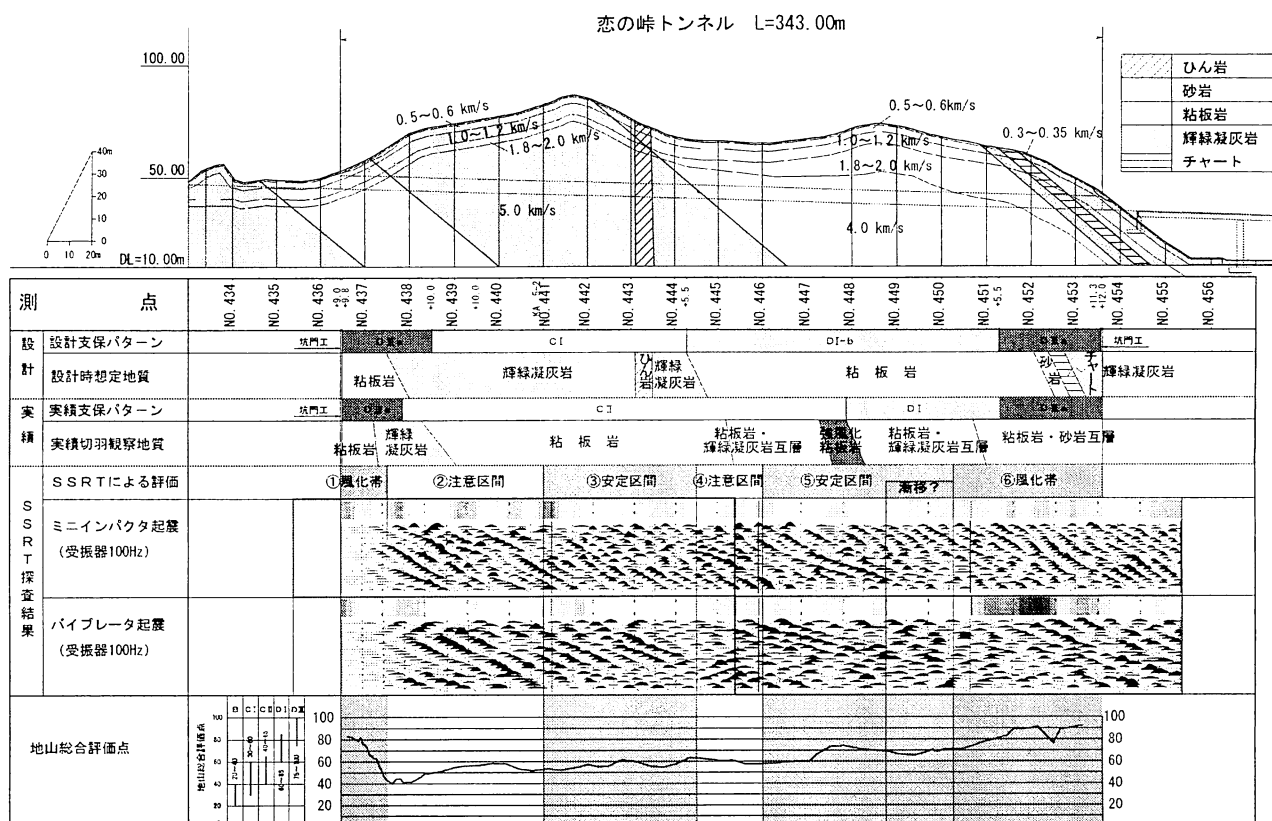


図-8 施工時の地山総合評価点とSSRT探索結果の対比

く前方地山予測結果をあわせて示す。

油圧インパクトによる結果は、探索測線前方約 200m を境に前方（到達側）の反射波の強度が比較的弱い結果となっており、油圧インパクトは発震エネルギーが小さいため 200m 以上前方からの反射波の減衰が大きいと考えられる。前述のとおり、油圧インパクトの発震周波数帯域は受振器の固有周波数と近く、探索深度が浅い場合にはパイプレータに比べて精度が高いと考えられる。よって探索結果の評価にあたっては、探索測線前方 200m 程度までの区間は、油圧インパクトの探索結果を重視して評価し、200m より前方の到達側坑口までの区間はパイプレータの探索結果を重視して予測した。この結果より、特に注意が必要な区間を下記のとおり予測した。

- ・発進側坑口部の風化帯から続く約 60m 間は、ボーリングコア状態は堅硬だが、反射面の集中が認められるため注意区間と評価した。この区間の地山は硬軟に差のある輝緑凝灰岩と粘板岩やチャートなどが互層状に分布する可能性、所々で風化の影響により地山が劣化している可能性などが考えられた。
- ・トンネル中央部では輝緑凝灰岩と粘板岩の境界が想定される箇所付近に顕著な強反射面が検出された。この位置は設計支保パターン（C I パターンとD I パターン）の境界位置と一致する。
- ・探索測線の約300m前方から到達側坑口（約360m前方）までの間は反射波が集中している。既往ボーリン

グコアの状態を考慮すると、本区間は風化により地山が劣化している区間に相当すると予測した。

4. 探索による地山予測結果と施工時の地山状況の対比

(1) 前方地山予測結果の妥当性

恋の峠トンネルの地山は、設計時の予測では測点 No.444+5.5 を境に発進側は主に輝緑凝灰岩、到達側は主に粘板岩の分布が想定されていた。しかし実際の切羽観察結果からは、恋の峠トンネルの地山は全体に粘板岩と輝緑凝灰岩が互層状に分布しており、当初想定したような粘板岩と輝緑凝灰岩を分ける明瞭な地層境界は確認されなかった。施工時に最も地質変化の大きかった箇所は、No.447+10～No.448+0 の強風化粘板岩出現区間で、C II からD I パターンへ変更をおこなった。

SSRT による予測結果と、施工時に実際に確認された切羽状況を対比するにあたって地山総合評価点を参考にして対比する。地山総合評価点は切羽観察結果より得られる評価点で、実際の地山状況を定量的に評価するための指標となる。本トンネルで採用した地山総合評価点は点数が高くなるほど地山状態が不良であることを意味する。

図-8 に地山総合評価点と SSRT 探索結果をまとめて示

した。図より、反射面の位置と地山総合評価点の傾向はおおむね整合しており、全体の傾向としては反射面位置の距離換算に採用した地山弾性波速度 ($V_p=4.3\text{km/s}$) は妥当であったと考えられる。例えば、反射面が多く確認され風化帯と評価した区間⑥ (No.450+5~No.453+12) は地山総合評価点 80 点以上となる区間と一致する。

以下、前方地山予測の段階で区分した区間ごとに施工時に実際に遭遇した地山状況について述べる。

①風化帯 (No. 436+9~No. 437+10 : 区間長 21m)

反射面の集中が認められた区間と、切羽観察により風化の影響が強く見られた区間がおおむね一致した。

本区間では探査ターゲットとした坑口部の地山状況を精度良く予測することが出来たと評価できる。

②注意区間 (No. 437+10~No. 441+0 : 区間長 70m)

既往ボーリング調査では堅硬な地山が確認されていることと、反射面がいくつか認められたことを考慮して硬軟変化が激しい地山状況と予測した。実際に確認された地山状況は予測どおり硬軟変化の激しい粘板岩主体の地山であった。

本区間では SSRT 結果と既往調査結果を総合的に評価することによって、より合理的な前方予測が出来たと評価できる。

③安定区間 (No. 441+0~No. 444+10 : 区間長 70m)

規則的な配列をなす反射面が少ないことから、地質変化の少ない良好な地山と予測した。実際に確認された地山状況は地質変化が予測どおり少ないものの、亀裂が多く片状に剥離しやすい粘板岩が続きトンネル掘削に対してはそれほど良好と言える地山ではなかった。

本区間では地山状態は予測とは異なりそれほど良好ではなかったが、音響インピーダンスに差が無い地山が連続するために反射面が強く検出されなかった結果と考えられる。

④注意区間 (No. 444+10~No. 446+0 : 区間長 30m)

当初の探査計画では、本区間に想定されていた粘板岩と輝緑凝灰岩の境界をターゲットとした。恋の峠トンネルの地山は全体に粘板岩と輝緑凝灰岩が互層状に分布しており、当初想定されたような粘板岩と輝緑凝灰岩を分ける明瞭な地層境界は確認されなかったが、漸移的な地層変化が見られた。

本区間における地層変化はトンネル施工上で大きな変化点とは言えないが、地層変化を反映して反射波が検出されたものと考えられる。

⑤安定区間 (No. 446+0~No. 450+5 : 区間長 85m)

規則的な配列を示す反射面が少ないことから安定区間と評価したが、No.447+10 以降に脆弱な強風化粘板岩が確認された。

本区間では評価の段階で前後区間に比べてそれほど顕著な反射面の集中が確認されなかったために安定区間と

予測したが、強風化粘板岩分布位置に相当する弱い反射面は検出されていたものと評価できる。

また、測点 No.448+15 から漸移的に地山変化すると予測していたが、その 10m 手前から漸移的に脆弱地山に変化した。10m 程度の誤差があったものの、地山変化の傾向としては予測したとおりの傾向であったと評価できる。

⑥風化帯 (No. 450+5~No. 453+12 : 区間長 67m)

探査結果より顕著に反射面の集中が認められ、既往調査結果からも脆弱地山が想定されることから、地山劣化の著しい風化帯に相当する最も注意が必要な区間と予測した。実際に確認された地山状況は、予測どおり風化による地山劣化が顕著に認められた。

この区間では、SSRT 結果と既往調査結果を総合的に評価することによって、より合理的な前方予測が出来たと評価できる。

(2) 予測精度向上に向けての課題

SSRT による前方地山予測は、実際の施工で確認された地山状況と対比して、全体的な傾向としてはおおむね整合する結果が得られた。しかしながら、予測段階での結果評価にあたって以下のような課題があった。

区間③、区間⑤では比較的顕著な地層変化があったが、それに対応する反射面は弱く予測の段階では前後区間との相対的評価をすることによって重要視しなかった。反射面は音響インピーダンスの差が大きい境界面で発生するため、地山が不良な場合でも音響インピーダンスに差がない地山が連続する場合に反射面が検出されないケースがある⁹⁾。

また、区間④は輝緑凝灰岩と粘板岩の境界が当初想定されていた位置に相当し、顕著な強反射面が確認されたことから注意区間と評価した。本区間の実際の地山状況は、粘板岩主体であったところへ漸移的に輝緑凝灰岩の占める割合が増すような地層変化が認められたもののトンネル施工上大きな問題となるものではなかった。本区間は事前の屈折法弾性波探査結果より地山弾性波速度が 5.0km/s から 4.0km/s に変化する区間に相当することを考慮すると、この境界には音響インピーダンスに差があったため反射面が検出されたものと考えられる。しかし、工学的には、このような音響インピーダンスの差がトンネル施工に対して影響を与えるようなものではなかったと考えられる。

上記の課題に対しては、トンネル掘削の進行とともに予測結果と実際の地山状況を対比することによって、施工中にも継続的に予測結果を修正してゆくことが有効であると考えられる。

どのような手法による切羽前方探査にも利点、欠点がある。ここまで述べたように SSRT も必ずしも万能な手

法ではないため、切羽前方地山の予測にあたっては SSRT 結果をひとつの目安として利用し、既往ボーリングなどの調査結果を考慮に入れた総合的な地山評価をおこなうことが必要である。

5. おわりに

以上、恋の峠トンネルのトンネル全線の地山状況に対して、掘削時の切羽観察データを対比し予測結果の妥当性について考察した。

前方地山予測にあたっては、反射面位置の距離換算に用いる地山弾性波速度に、探査時に到達側坑口の受振点で実測した地山弾性波速度値を採用し精度向上を図った。

予測結果と施工時の地山状況の対比については、全体的な傾向としておおむね整合する結果が得られたが、トンネル施工に影響する地山変化を必ずしもすべて把握しきれたわけではなく、工学的な見地においては予測精度が低い箇所もあった。今後それぞれの地山に合った的確な評価をおこなうためには、探査結果と既掘削区間の地山状況の対比によるデータの集積をおこない、適宜探査結果を修正してゆくことが有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 村山秀幸, 上野博務, 福田秀樹, 黒田徹: TBM 先進導坑内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.
- 2) 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.
- 3) 丹羽廣海, 村山秀幸, 青山高明, 黒田徹, 東中基倫: トンネル全線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17巻, pp.75-80, 2007.11.
- 4) 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, pp.18-46, 1997.11.
- 5) 加藤卓朗, 柳内俊雄, 村山益一, 清水信之: 油圧インパクタ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講演集, pp.22-28, 2001.
- 6) 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.
- 7) 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, 土木学会トンネル工学報告集, 第 15 巻, pp.227-234, 2005.12

APPLICATION OF SHALLOW SEISMIC REFLECTION SURVEY FOR TUNNELS (SSRT) REFERING TO THE P WAVE VELOCITY MEASURED AT OPPOSITE SIDE OF TUNNEL

Hiroumi NIWA, Hideyuki MURAYAMA, Kazuhisa OGASAWARA,
Kouhei NAKAJIMA, Toru KURODA

The authors have developed the Shallow Seismic Refection survey for Tunnels (SSRT) to determine geological conditions ahead of tunnel faces. At the Koinotoge Tunnel, we had applied an improved SSRT survey executed from outside at the tunnel entrance. We have measured actual value of P wave velocity at opposite side of tunnel under SSRT survey. The actual P wave velocity is applied as conversion factor of distance in analysis of SSRT. Although the accuracy of predictions of geological conditions ahead of tunnel faces was improved by using the actual P wave velocity, it is important to adjust the predictions reffering the face observations.