




#### 4.2.2 山岳トンネル

#### 【地下施設／山岳トンネル】

技術名	無線式 TRT 探査システム
番号	No. 4. 2-07
発注者	—
施設名	—
所在地	—
工事名称	—
施工期間	—
施工者	鹿島建設(株)
キーワード	無線式システム, 弾性波探査
<p>(1) 概要</p> <p>従来の TRT 探査システムでは、受振点(トンネル側壁に約 10 カ所設置された加速度計) から波形取得装置まで、30m 以上の長い伝送ケーブルを使用する必要があった。このため、次の問題点を抱えていた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・電磁誘導ノイズによる SN 比の低下(解析制度の劣化)</li> <li>・加速度計設置レイアウトの制限</li> <li>・探査準備作業にかかる人員、時間の増加</li> </ul> <p>伝送ケーブルに誘導される電磁ノイズの影響だけであれば、十分なシールド性能を持ったケーブルの選定や、あるいは光ファイバ通信などが考えられる。しかし、配線ルートを考慮せず自由なレイアウトで加速度計を配置し、また探査準備作業を軽減するためには、加速度計で取得した波形データを伝送ケーブルを介さずに無線伝送化することが望ましいと考え、新たに無線式 TRT 探査システムを開発するに至った。</p> <p>(2) 技術詳細</p> <p>TRT 探査システムは、弾性波の起振手段として発破を使う必要が無く、ハンマや超磁歪型の Sweep 波発生装置などによる人工的に発生させた振動を利用できるため、比較的短時間での探査が可能であり、トンネル掘進に大きな影響を与えることがない。さらに、評価結果は、-1 のように三次元的に出力され、複雑な地質構造を容易にイメージできるといった特長を有している。</p> <p>開発した無線式 TRT 探査システムの仕様を表-1 に示す。また、-2 および写真-1 に従来の TRT 探査システムの構成図と構成機器の写真を-3 および写真-2 に無線式 TRT 探査システムの構成図と構成機器の写真を示す。</p> <p>無線式 TRT 探査システムの開発にあたり、前述した既存の問題を解決できる一方で、各無線伝送器と受振信号記録コンピュータ間を無線化することで以下の新たな課題に対処する必要があった。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・各無線伝送器の時刻同期問題による、波形解析精度の劣化</li> </ul>	

- ・トンネル内部に配置された施工機械・設備等の無線通信への影響（高周波無線の指向性問題）
- ・トンネル壁面の電波多重反射（マルチパス）による無線通信への影響

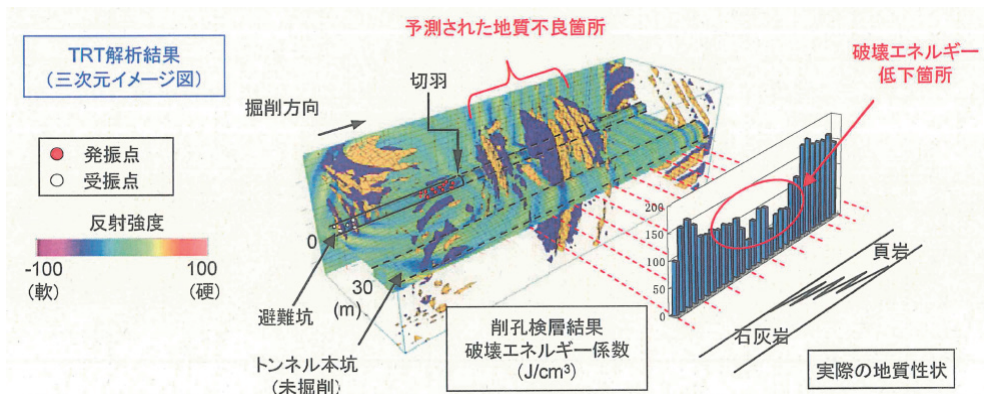


図-1 TRT 解析結果例(三次元イメージ図)

表-1 無線式 TRT 探査システム仕様

無線システム仕様	
A/D 分解能	24-bit
サンプリング間隔	0.0625ms(16kHz)~0.5ms(2kHz)
最大記録長	174752samples
無線規格	2.4GHz FHSS

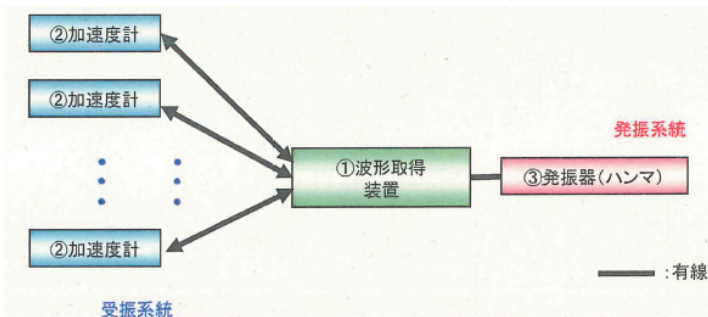


図-2 従来の TRT 探査システムの構成

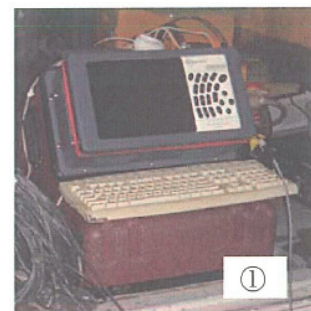


写真-1 従来の TRT 探査システムの構成機器

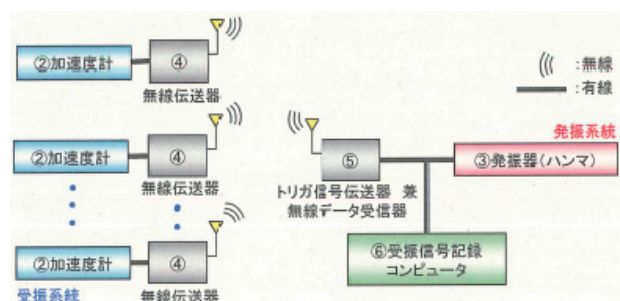


図-3 無線式 TRT 探査システムの構成

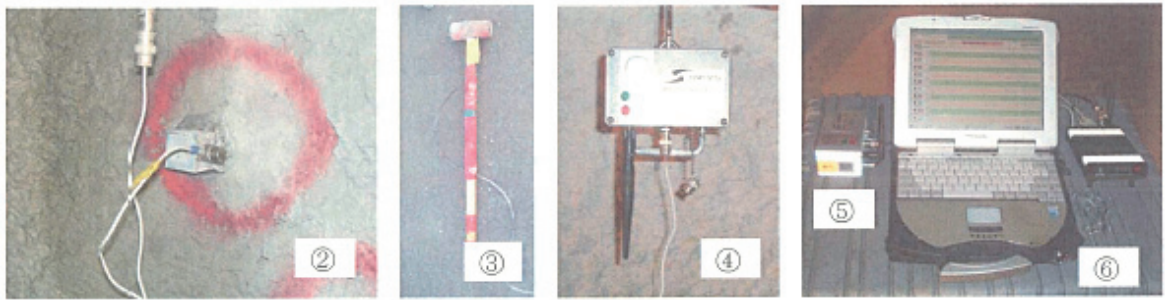


写真-2 無線式 TRT 探査システムの構成

そこで 1 点目の課題に対しては、各無線伝送器の時刻同期について、弾性波の発生時刻をトリガ信号伝送器から各無線伝送器へ一斉に送信し、受信した発生時刻情報を基準として、各加速度計で反射波を受振する方式を採用した。

2、3 点目の課題に対しては、無線モジュールに 2.4GHz 帯の特定小電力帯のスペクトラム拡散 (Spread Spectrum : SS) 通信方式の適用を試みた。ここで SS とは、変復調方式の一つで、情報信号を広い周波数帯に拡散して送信し、受信側では拡散された信号からもとの情報信号を取り出す方法である。図-4 に SS と狭帯域変調の違いを示す。SS は、狭帯域変調に比べて広い周波数帯域を必要とするが、以下のような多くの特長を有する。

- ・ 秘匿性
- ・ 低電力密度
- ・ 被干渉耐性
- ・ フェージング耐性
- ・ 時間圧縮
- ・ 符号分割

また、SS を使った通信方式は 2 種類あり、1 つは IEEE802.11b 規格の無線 LAN にも使われる直接拡散 (Direct Sequence : DS) 方式、もう一つ

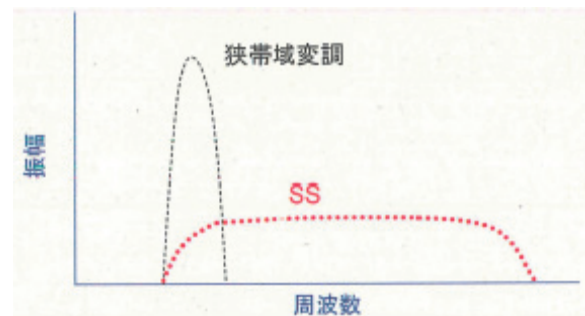


図-4 スペクトラム拡散通信イメージ

が Bluetooth に使われる周波数ホッピング (Frequency Hopping : FH) 方式である。本システムでは、狭い同一環境内に複数配置された無線伝送器のデータが干渉を受け難くするように、後者の FH 方式を採用している。

### (3) 結 果

本研究では、より高精度で経済的な TRT 探査を行うことを目的として、無線式 TRT 探査システムを開発した。その有効性を確認するため、小断面 TBM トンネルで行った実証試験から得られた知見を以下に示す。

- ・ 小断面 TBM トンネル (トンネル断面積  $6.15\text{m}^2$ 、機材占有率 30-40%程度) であっても、障害物による通信遮断やマルチパスによる通信エラーがおこらなかった。ただし、坑内の電磁環境や無線伝送器のレイアウト等で通信状態が変化することも考えられる。

- ・ 探査システムを無線化することで最も懸念された波形データの同期については、トリガ信号を無線で各伝送器へ一斉送信し、その基準時刻から波形データを記録する方式をとることで解決できた。
- ・ 従来システムで取得した波形と比べ、ノイズ成分が少なく、SN比の向上が図れた。
- ・ 狭い坑内で障害物がある場合でも、伝送ケーブルラインを考慮することなく受振点を自由にレイアウトすることができるようになった。
- ・ 計測準備や撤去作業に必要な人員や時間を削減できるようになった。

参 考 文 献	土木学会 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集:鹿島建設(株) 横田泰宏他、講演番号 56、pp304-309、2009.1
備 考	—

技術名	トンネル前方探査システム
番号	No. 4. 2-08
発注者	国土交通省近畿地方整備局
施設名	十九渎第一トンネル
所在地	和歌山県
工事名称	近畿自動車道紀勢線十九渎第一トンネル工事(実証実験)
施工期間	～2014年5月
施工者	清水建設(株)
キーワード	ロックボルト、直接波・反射波、受信センサ

## (1) 概要

## 1) 工事概要

工法：山岳工法

延長：388m



写真-1 十九渎第一トンネル全景

## 2) 技術概要

トンネル工事を安全かつ効率的に進めるためには、掘削部前方の地山状況を予測することが重要である。既に先進調査ボーリングや反射法弾性波探査などの予測手法が確立されているが、専用の機材や計測設備を使用する関係で掘削作業の中断を伴うとともに、高額な探査費用を要する。そこで、こうした予測手法の適用回数を必要最小限に留めつつ、必要な地山情報を確実に収集する「切羽前方探査システム」を開発した。

## (2) 技術詳細

システムの特徴は、掘削作業に使用する重機や資材を探査に利用するもので、掘削作業の中

断を伴わず、日常的に使用できることである。探査により地山性状が変化する地点を検知した場合に限り、先進調査ボーリングなどの探査手法を適用すれば施工管理に必要な地山情報を収集できるので、掘削作業の中断期間と地山情報の探査費用を最小限に抑えることができる。

受振センサーは、重機の打撃点から直接伝播する直接波と地山性状の変化地点から反射してくる反射波の両方を拾うこととなる。解析ソフトは、反射波が確認された場合、反射波と直接波の地山内の伝播速度は同じであることから、直接波のセンサーへの到達時間とセンサーの打撃点の距離をもとに、反射波の到達時間から反射地点を割り出すことができる。

なお、打撃振動は地盤内を四方八方に伝播するが、反射波が切羽前方からのものか否かは、日々の掘進量に比例して反射波の到達時間が短くなること、切羽方向から反射している振動を計測する加速度計の反応が卓越していることをもって判断する。

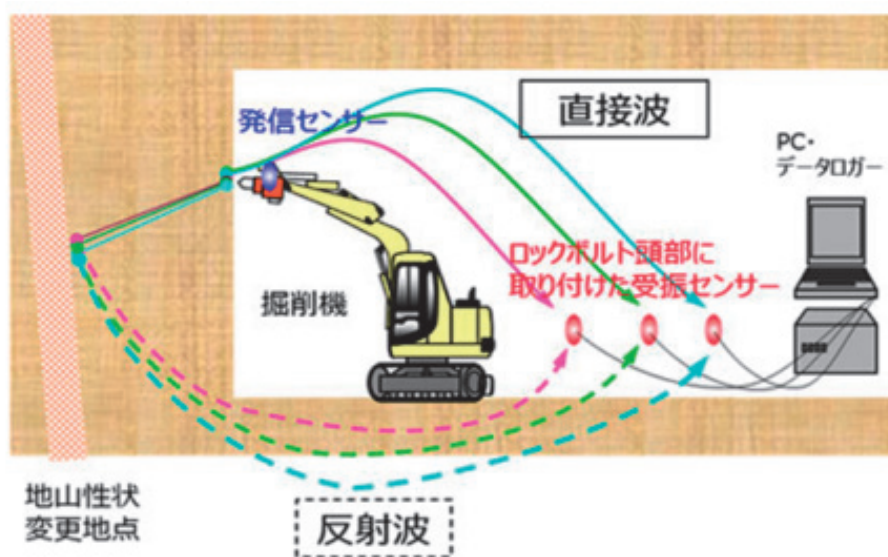


図-1 概要図

### (3) 結果

十九渕第一トンネルでの実証実験では、システムが地山性状の変化地点（複数）を検知した後、掘削を進めた結果、検知した地点と掘削によって地山の風化・変質が確認できた地点が一致するとともに、切羽前方 50m の距離までの高い検知精度を発揮することを確認した。また、システムの設置から探査、撤収に至るまでわずか 30 分程度で済むこと、そして掘削作業を継続しながら探査できることも確認できた。

<p>参考文献</p>	<p>清水建設(株)ホームページ          ニュースリリース 2014年(2016年9月1日入手)  <a href="http://www.shimz.co.jp/news_release/2014/2013056.html">http://www.shimz.co.jp/news_release/2014/2013056.html</a></p>
<p>備考</p>	<p>—</p>

【地下施設／山岳トンネル】

技 術 名	切羽前方観察システム「DRi スコープ」
番 号	No. 4. 2-09
発 注 者	—
施 設 名	—
所 在 地	—
工 事 名 称	—
施 工 期 間	—
施 工 者	戸田建設(株)
キーワード	切羽観察、油圧ドリルジャンボ、工業用内視鏡、ステレオ撮影
<p>(1) 概 要</p> <p>切羽前方の地山の地質を把握することは、トンネルを安全にかつ合理的に掘削するために重要な課題となっている。削孔検層システムは、油圧ジャンボで切羽前方の削孔をする際、削孔エネルギーや削孔速度を記録し、地山の良否に関する情報を得るものですが、間接的な情報でありデータからの地山推定に限界があった。</p> <p>本技術は、油圧ジャンボで切羽前方にロッドを繋いで削孔した坑内にロッドを介して工業用内視鏡をビット先端まで挿入し、孔壁を観察するシステムである。撮影はカメラの方向を変えて孔内の観察ができる。また、ステレオ撮影することで、孔壁に現れた破砕帯や割れ目の幅を測定し、数値データとして得ることもできる（図-1、写真-1）。</p> <p>(2) 技術詳細</p> <p>1) システムの概要</p> <p>主な技術内容・特徴として、下記の点が挙げられる。</p> <p>① ロッドがケーシングの代わりをするため、今まで簡易には調査ができなかった崩壊性地山でも切羽前方の地山を可視化した情報が得られる（写真-2）。</p> <p>② 工業用内視鏡には先端首振り機構があるので、ビットの送水孔分岐部等形状の複雑な部分を通過してビットの先端に工業用内視鏡を送り込み、カメラの方向を変えながら孔壁を観察することができる。</p> <p>③ ステレオ撮影することにより、孔壁に現れた破砕帯や割れ目の幅を測定し、数値データとして得ることができる。</p> <p>④ ロッドを引き抜きながら観察することで、延長方向に連続的な画像が得られ、地山状態の変化が把握できる。</p>	



写真-1 DRi スコープによる調査状況



写真-2 DRi スコープにより得られた孔壁画像

## 2) 現場へ導入したシステムの構成

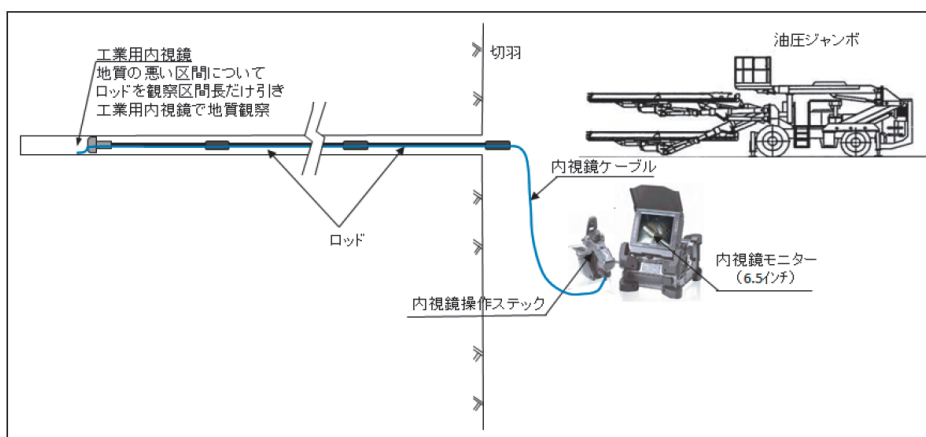


図-1 システム全体図

## (3) 結果

### 1) 現場への適用事例

泥質岩・玄武岩混在岩中の閃緑岩が貫入した地山で、切羽前方の地山の地質観察を行った山岳トンネルの事例を記載する。

事例は、既存の水路トンネルと近接・交差するため、その前後で長さ 15m の削孔検層を行うとともに、DRi スコープ (オリンパス (株) 製 IPLEXFX、挿入部外径 6.5mm、長さ 18m の工業用内視鏡) を適用した。

〈岩種の判別と掘削結果との対比〉

DRi スコープによる泥質岩・玄武岩混在岩の孔内画像を写真-3 に示す。写真-3 の岩の白色部分は玄武岩で、通常は暗灰色のものが炭酸塩化作用により白色に変質交代している。閃緑岩 (写真-4) は岩脈状に貫入しており、比較的細粒である。図-2 は DRi スコープによって観察した地質柱状図で 10.74m から 15.5m で閃緑岩が認められた。なお、これらの判読には事前の地表地質踏査、削孔検層実施時に削孔水から回収したクリ粉の情報も参考にして判断した。

図-3 は、掘削時に切羽で観察された地質縦断図である。貫入した閃緑岩が左側から天端付



近に出現し、掘削に従い右側踏まえ部に連続していた。図中に削孔検層システムと DRi スコープによる観察結果を併記したが、閃緑岩の岩脈の位置を捉えることができた。

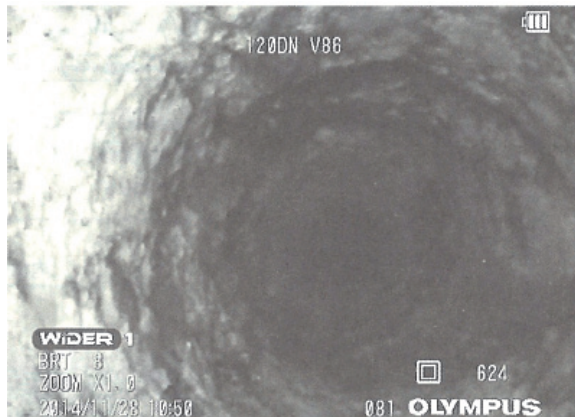


写真-3 泥質岩・玄武岩混合岩の孔内画像

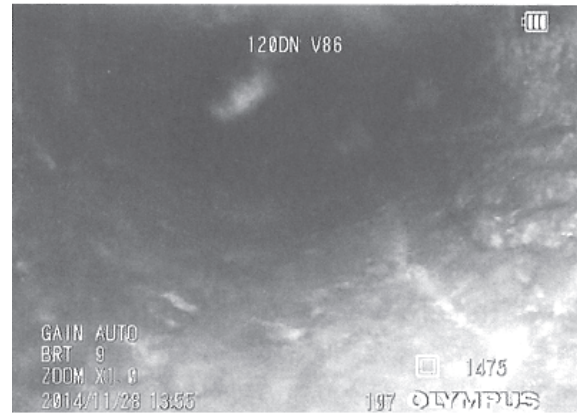


写真-4 閃緑岩の孔内画像

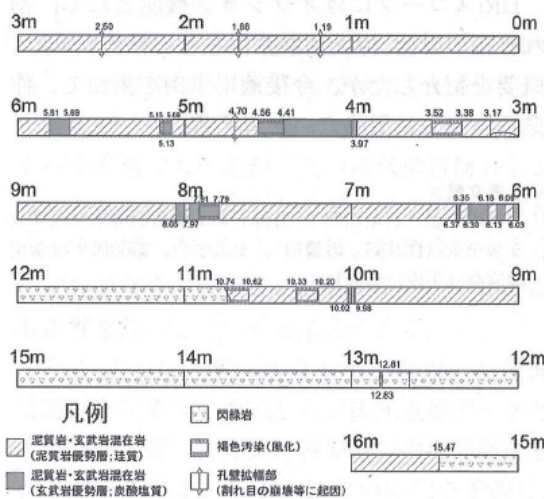


図-2 DRi スコープにより観察された柱状図

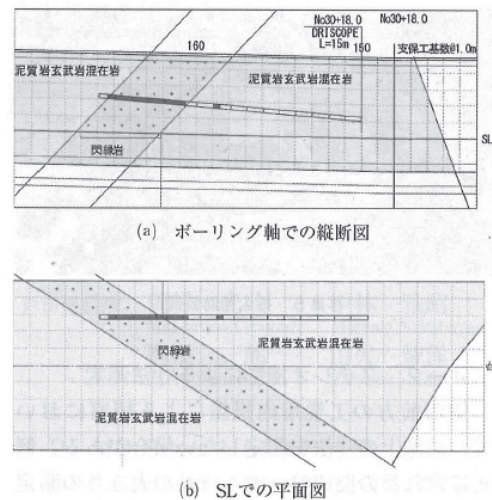


図-3 掘削時切羽観測による地質縦断面図

今回の事例では、DRi スコープにより従来観察できなかった、削孔検層システムのビットの先端の地山を可視化して観察することができた。

また、DRi スコープによる地質の観察に当たっては、クリ粉の観察や事前の地表踏査などを踏まえて総合的に判断する事が重要である。

## 2) 今後の課題・展開

適用事例を重ねて、作業性の向上に努めていく。

<p>参考文献</p>	<p>工業用内視鏡で切羽前方の地山状況を把握する=DRi スコープの開発=建設機械：戸田建設(株) 関根一郎他 pp.35-38 2015年7月 戸田建設(株)ホームページ：ニュースリリース(2014年8月18日) <a href="http://www.toda.co.jp/news/pdf/20140818.pdf">http://www.toda.co.jp/news/pdf/20140818.pdf</a></p>
<p>備考</p>	<p>—</p>

【地下施設／山岳トンネル】

技術名	高精度切羽前方探査システム「NT-EXPLORER」
番号	No. 4. 2-10
発注者	—
施設名	—
所在地	—
工事名称	—
施工期間	—
施工者	戸田建設(株)、西松建設(株)
キーワード	切羽前方探査、電磁波探査、弾性波探査、穿孔探査

(1) 概要

山岳トンネル工事において、切羽前方の断層破碎帯・帯水層・地質変化等の情報を事前に高精度で得ることは施工の安全性及び効率化の上で極めて重要である。しかし、事前調査として一般に行われている地表踏査・弾性波探査・ボーリング等の結果だけでは掘削をする上で不十分であることが多く、突発的な湧水・地質急変箇所遭遇することがある。その対策として各種の前方探査が行われているが、技術の適用・精度の上でバラツキが大きい。

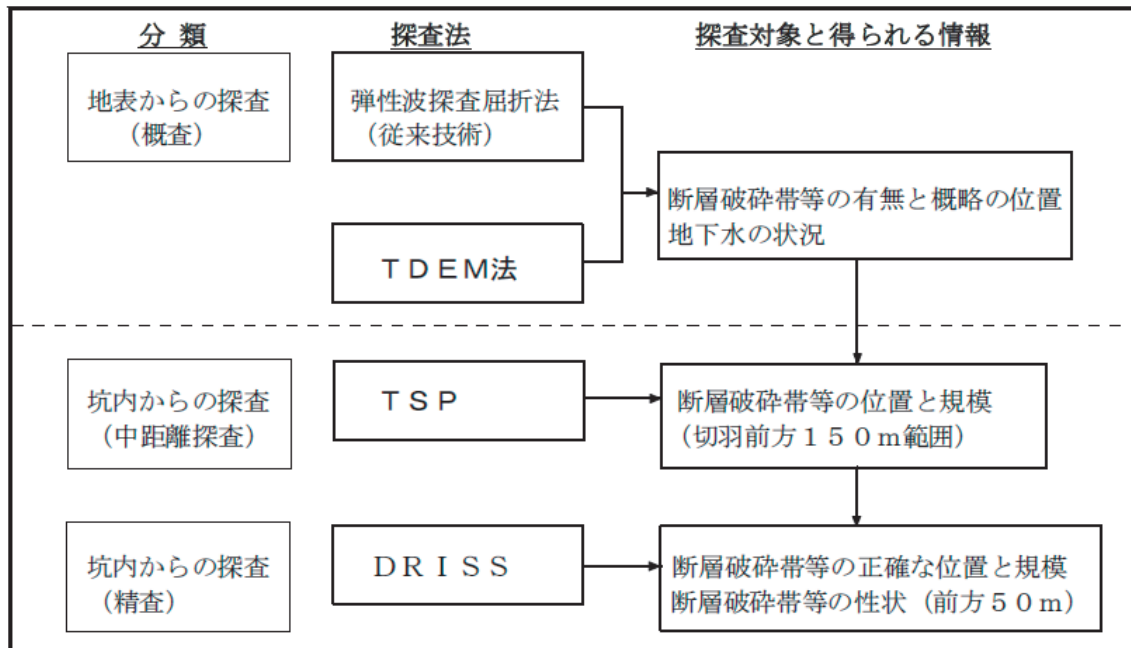


図-1 各探査法の要と流れ

## (2) 技術詳細

### 1) システムの概要

#### ① 高精度切羽前方探査システム

高精度切羽前方探査システム「NT-EXPLORER」は、電磁探査「TDEM」、弾性波探査「TSP」、穿孔探査「DRISS」を組合せることで切羽前方の断層や突発的な湧水を高精度に予測する探査システムである。電磁探査「TDEM」は、地表から概査として実施する。得られた比抵抗構造から地層境界、断層、地下水の状況が地下700m程度まで推定可能となっている。弾性波探査「TSP203」は、坑内から行う中距離探査として実施する。切羽前方100m範囲に得られた地層境界、断層等を弾性波の反射面として捉え、地質性状を推定することができる。穿孔探査「DRISS」は、精査としてトンネル切羽から実施する。ドリルジャンボで直接穿孔した際に得られた機械油圧の変化から穿孔区間の地山性状を定量的に評価することができる。(図-2)。

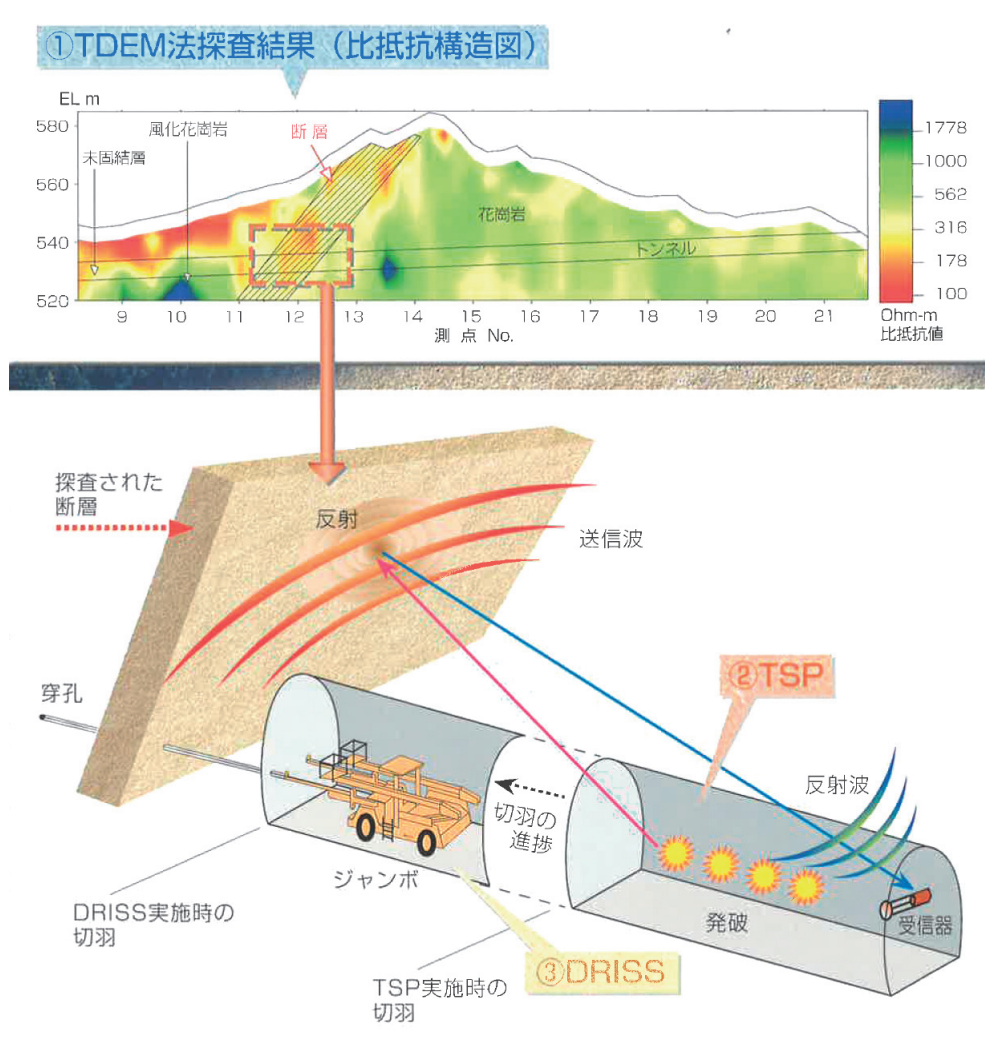


図-2 高精度切羽前方探査システム「NT-EXPLORER」の概念図

### ② TDEM (Time Domain Electro Magnetic method)

地表に設置した送信ループに断続電流を流すことによって生じる磁場の変化を、センサとレシーバーで測定し、地下の比抵抗値を求め、地下に帯水層や脆弱層があれば、低比抵抗帯としてとらえることができるシステム (図-3)。

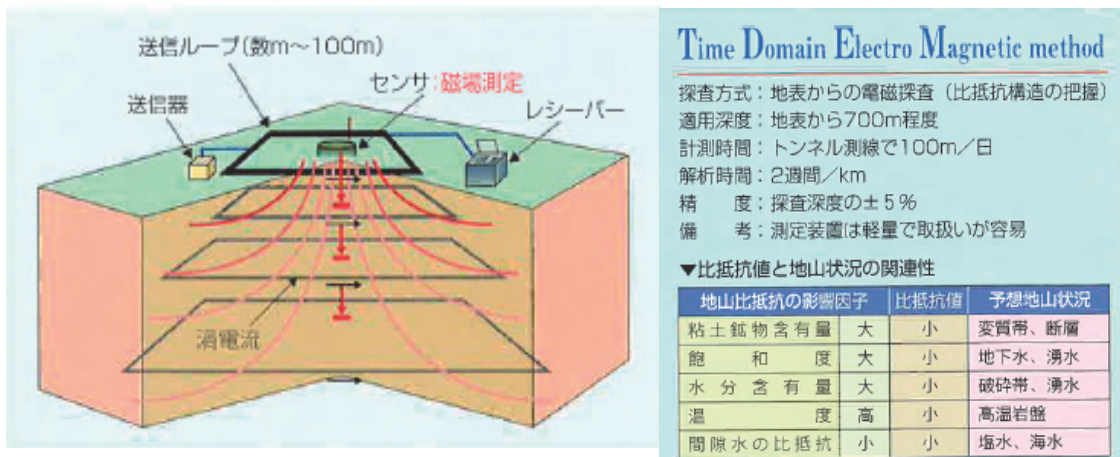


図-3 TDM の探査概要

### ③ TSP (Tunnel Seismic Prediction)

切羽よりの坑内で小規模な発破を行い、その振動を坑口側の受信器で観測する。切羽前方やその周辺に破碎帯や地質境界があると、振動の反射が起こり観測データに表れるため、これを分析して切羽前方の予想図を作成するシステム (図-4)。

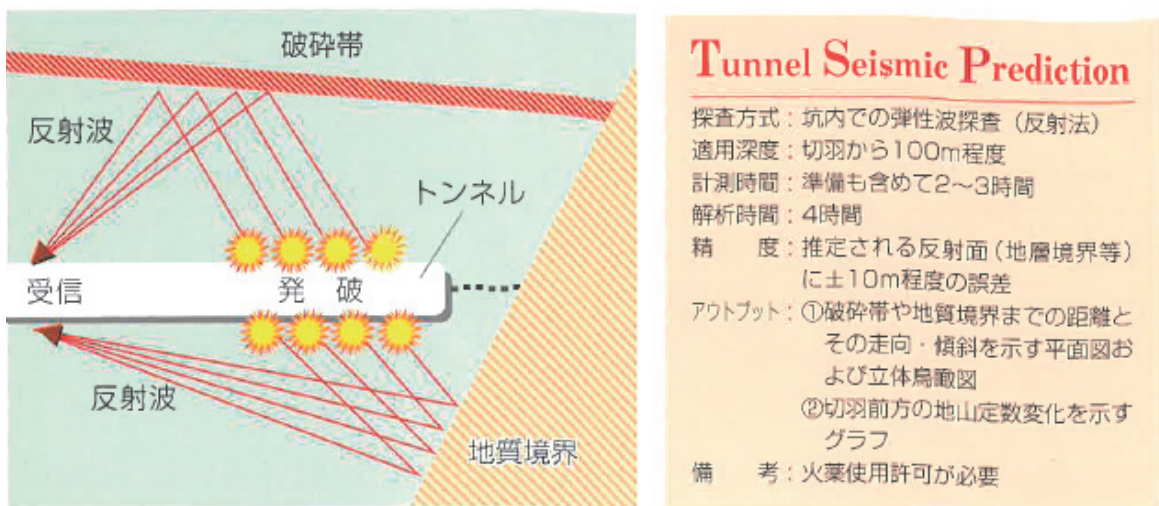


図-4 TSP の探査概要

#### ④ DRISS (Drilling Survey System)

穿孔時に得られるデータ（穿孔エネルギー、ダンピング圧、穿孔速度、回転圧、）により、地山性状を定量的に把握するシステム（図-5）。

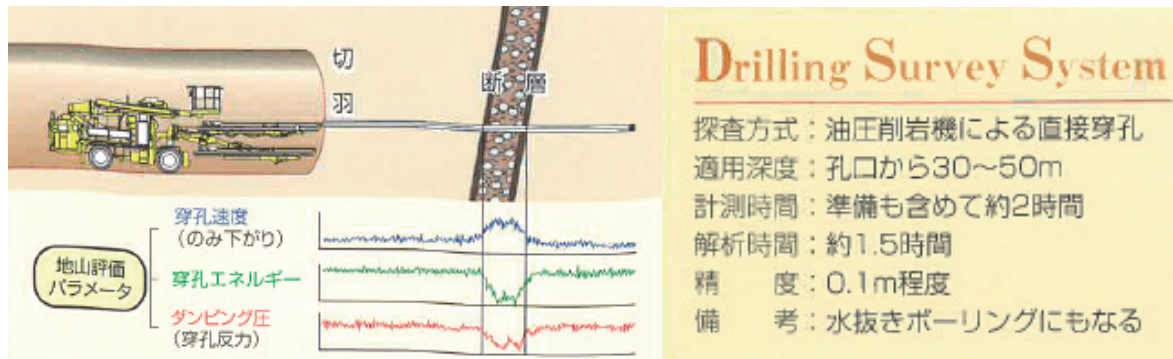


図-5 DRISS の探査概要

### (3) 結 果

#### 1) 現場への適用事例

高精度切羽前方探査システムを構成する各探査法の適用性、相互比較、探査限界、組み合わせによる効果等を把握するため、施工中のトンネルにおいて現場適用実験を実施した。

トンネルは、延長約3,000mの道路トンネルで、地質は主に溶結凝灰岩と、同時期の貫入岩である花崗斑岩からなる。溶結凝灰岩は塊状硬質岩で、垂直性の節理が発達しており、強風化部では軟質化し、粘土質砂状を呈する。貫入する花崗斑岩は硬質岩であるが、亀裂が発達し、強風化部ではタマネギ状風化が著しく、表層崩壊が見られる。一軸圧縮強度は、軟質部で $3.6\sim 6.7\text{N/mm}^2$ 、硬質部で $36.7\sim 41.6\text{N/mm}^2$ を示し、貫入する花崗斑岩部においても $81\sim 121\text{N/mm}^2$ を示す。断層破碎帯は、工区全体でF1～F6まで6ヶ所推定され、一軸圧縮強度 $51\text{N/mm}^2$ 、弾性波速度 $V_p=3.4\sim 5.2\text{km/s}$ の中硬岩～硬岩の地山である。本トンネルで、断層の位置及び性状、地下水状況等を把握するため、トンネル掘削前にTDEM法探査を、掘削中にTSP、DRISSを実施した。図-6に測点NO. 215～NO. 190区間の事前調査結果を、図-7に3探査法を適用した箇所での各探査法の探査位置、探査結果及びトンネル掘削結果、湧水状況を示す。図-6の事前調査に示したとおり、3探査法を実施した当該区間では、NO. 197～NO. 194区間（NO. 197～NO. 196+10：断層、NO. 196+10～NO. 194：断層に伴う破碎ゾーン）にF5断層の出現が予想されていた。3探査の実施結果とトンネル掘削結果との対照および、得られた知見及び効果について以下に示す。

#### ① TDEM 法探査

TDEM法探査は、地表から比抵抗構造を調査した。図-7に示した当該区間においては、比抵抗値は $100\sim 1,000\ \Omega\text{m}$ を示し、特にNO. 210～203付近及びNO. 194～191付近はトンネル掘削高さ付近で周囲と比較して比抵抗値が低下しており、亀裂の発達或いは湧水の発生が予想された。この予想に対し、図-7に示したトンネル掘削結果では、NO. 208～204付近は湧水量が $2,500\ \text{L}/\text{分}$ と、前後区間の約 $2,000\ \text{L}/\text{分}$ に対し明らかに多い。また、No. 195+06～NO. 190+18

区間は粘土、湧水を伴うF5断層が出現した。探査で得られた比抵抗値は、地下水、亀裂質岩盤、挟在粘土等の影響により低下したものと考えられ、探査結果と掘削結果は概ね一致していることが判明した。

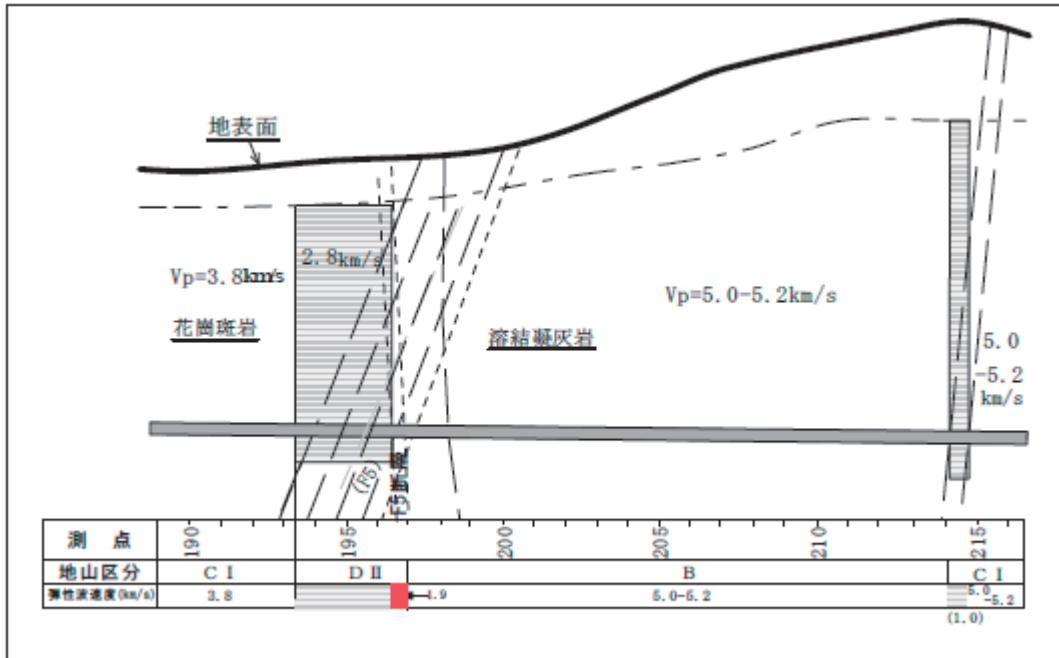


図-6 トンネル事前調査結果

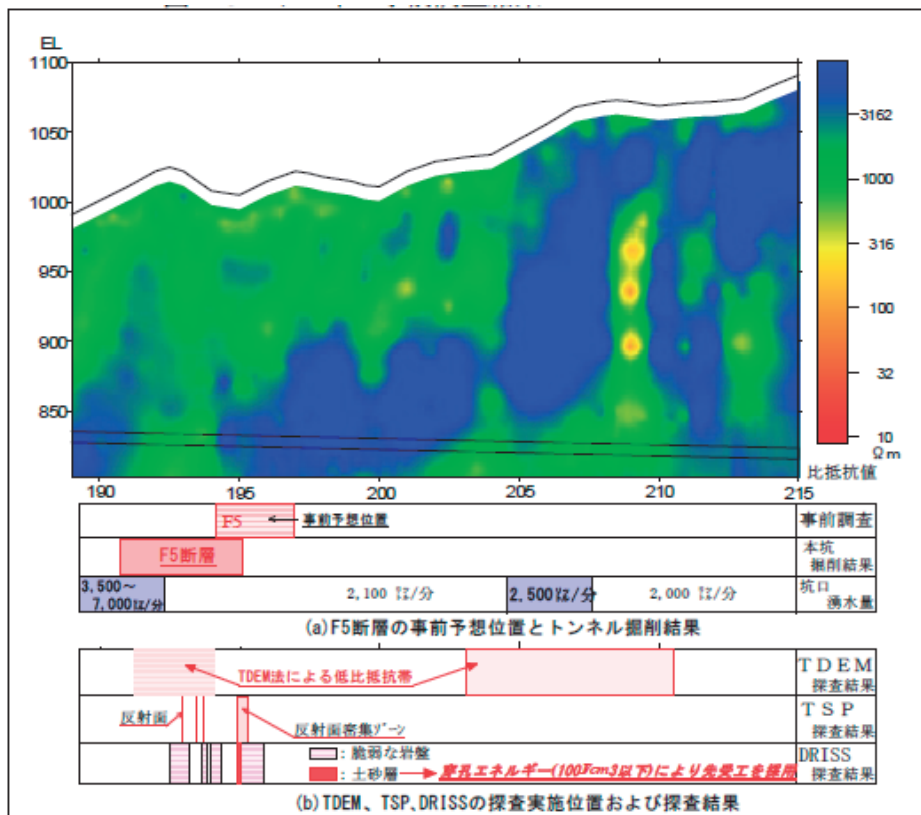


図-7 探査結果とトンネル掘削結果

## ② TSP

TSPは切羽位置が、①NO. 199+02 及び②NO. 195+14 の2地点で、主にF5 断層をとらえることを目的に探査を行った。探査実施位置及び探査結果の概要を図-7に示す。なお、探査器械は、①探査は二次元探査機、②探査は二次元探査機及び3次元探査機の両方を用いた。

### ① 切羽位置NO. 199+02 からの探査結果

NO. 198+16(探査切羽から6m)に薄い弱層、NO. 196+04(切羽から58m)から弱くなるという結果が得られた。掘削結果から、NO. 196+00 周辺から一部変質した花崗斑岩が出現し、反射面はこの境界を捉えたものと考えられる。NO. 198+16 では、明瞭な反射面と推定されるような地質変化はなかった。

### ② 切羽位置NO. 195+14 からの探査結果

反射面密集ゾーンがNO. 195+06～NO. 195+00 付近の1箇所(切羽から8m～14m)、弱層がNO. 193+11(切羽から43m)とNO. 193+05(切羽から49m)の2地点が得られた。探査結果の解釈としては、この反射面密集ゾーンをF5断層の始まりに相当すると推定した。また弾性波速度としては、 $V_p=4.0\text{km/s}$  が得られた。掘削結果からは、最初の反射面密集ゾーンはF5断層の始まりを示していると考えられる。その後の弱層は、F5断層の区間中に存在した。2回の探査結果は、切羽から50m 前後までの比較的明瞭な断層、弱層の始まりをほぼ捉えているが、反射面が明瞭でない(薄い弱層部)ところは地質変化点としてはトンネル切羽で認められなかった。またTSPによる弾性波速度と、割れ目の状態、粘土の挟み状況等DRISSの情報とを併せてD1地山と推測したところ、掘削結果と一致し探査の組み合わせの効果による精度のよい地山評価を行うことができた。

## 3-1-3 DRISS

事前調査、TDEM法及びTSPにより、F5断層と推定される地質構造を捉えるため、4地点(NO. 197+3.0、NO. 195+15.5、NO. 194+10.5、NO. 193+5.1)でDRISSを行った。探査実施位置及び探査結果の概要を図-7に示す。

① DRISSの実施結果では、NO. 195 付近から脆弱な岩盤、粘土を挟む土砂層があり、以後硬軟を繰り返す状況が把握された。この結果はトンネル掘削結果ともよく整合し、DRISSによる断層の位置確認が正確に行えることが確認された。

② F5断層は、トンネル掘削高さでの出現位置NO. 195+06～NO. 195+01 区間で、暗灰色粘土と主とする破碎部が出現した。事前のDRISSの結果では、この区間は穿孔エネルギーが $50\text{J/cm}^3$ を示し、その手前の硬質部が示していた $100\sim 150\text{J/cm}^3$ に対して非常に低くなった。またクリコは粘土質であったことなどから、この区間をF5断層の脆弱部と判断し補助工法を行うこととした。補助工法の選定にあたっては、脆弱な区間が4m程度と短いこと、DRISS実施孔からの湧水が殆どなかったことなどから、シリカレジンを注入式フォアポーリングを採用した。従来のDRISS探査では、補助工法への展開は砂岩・頁岩層への1例しかなく、そのケースでは、穿孔エネルギーが $100\text{J/cm}^3$ を境界としてAGFの採用に活用したものであった。今回のトンネルへの探査適用では、花崗閃緑岩中の断層への先受け工

実施の位置及び工法選定データの一つとして活用できた。

### 3-1-4 各探査法のまとめ

本現場では、断層、湧水が予想され、かつ土被りが200～250m と大きく、従来行われてきた弾性波探査では探査不可能とされるトンネルにおいて、弾性波探査屈折法と3探査法の比較を行った。F5断層のトンネル掘削高さでの出現位置は、弾性波探査で50m 違い、TDEM法で20m 違い、TSPは①探査(F5断層の手前76m 地点で実施)で18m の誤差、②探査(F5断層の手前8m 地点で実施)でほぼ特定、DRISSではほぼその位置が特定できた。またTDEM法による比抵抗構造から判断される低比抵抗部で施工上問題となる湧水量が検出された。この結果から、大土被り・湧水地山での探査結果の有効な活用事例が示されたと考えられる。

また本探査結果によれば、実施した相互の結果を考慮して探査をすれば、実施回数を減らせるだけでなく、その精度もいちじるしく向上することが示されたといえる。また、TSPによって得られた弾性波速度、DRISSによって得られた穿孔エネルギーは補助工法採用の参考データとなる可能性も示された。

### 3-1-5 TDEM 法、TSP、DRISS の組み合わせによる効果

図-8に示す探査システムの実施フローを用いて各探査を組み合わせることで、実施時期、精度、得られる物性値等が異なるものを、トンネル施工により有用なものとする事ができる。

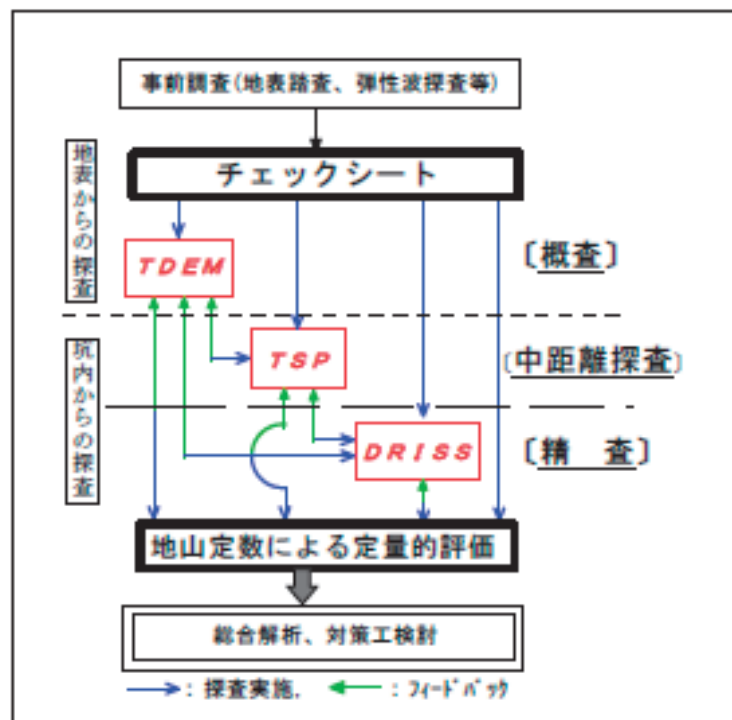


図-8 高精度切羽前方探査システムフロー



① TDEM 法と TSP の組み合わせによる特徴

TDEM法は探査方向が地表に対して垂直方向、TSPはトンネル坑内から主に水平方向に探査を行うため、組み合わせることにより水平成層構造および鉛直地質構造の両方に対して有効な探査方向となる。また、TDEM法は工事着手早期におけるトンネル区間の概要調査をおこなうことにより、TSPがより有効となる探査位置での実施が可能となり、探査対象に対する精度が向上する。F5 断層に対するTSPも、TDEM法の概査を参考にすれば、二次元探査機のみで有効なデータが得られたと考えられる。一方、TDEM法は比抵抗値、TSPは弾性波速度および弾性波反射面と得られる物理量が異なることにより、例えば破碎帯の評価では、岩の破碎と湧水量の変化に踏み込んだ予測を行える。

② TDEM 法と DRISS の組み合わせによる特徴

TDEM法によって得られた地質異常帯の概査の結果を参考に用いて、DRISSによる探査をトンネル坑内からの精査として地質異常帯出現予想位置の近傍で行うことにより、DRISS実施回数を減少させ、かつ問題地質箇所の詳細な位置の判明およびTDEM法により得られた低比抵抗部が破碎帯なのか或いは湧水帯なのかを判定できる。また、TDEM法で得られた低比抵抗部に帯水層が予想される場合には、低比抵抗部手前からのDRISS実施により、水抜きがより効果的に行える。

③ TSP と DRISS の組み合わせによる特徴

TSPとDRISSは、異なる物理量（各種穿孔反力）が得られることにより、TSPで観測可能な反射の発生が弱い対象、例えば①漸次的な地質変化、②平面境界を持たない不連続性、③局所的な脆弱層について判定が可能となる（例：花崗岩の風化帯、レンズ状に入った混在岩の調査など）。また、DRISSによる地山評価法は、穿孔エネルギー等の地山評価パラメータ値の大小で定量的に判断しているが、穿孔エネルギー値を、地山分類に用いる弾性波速度や一軸圧縮強度への換算する方法がなかった。そこでTSP203 の使用により得られる切羽前方の弾性波速度分布を用いれば正確に換算できる。すなわち、直接法であるDRISSとTSPの探査結果を比較検討することによって、切羽前方の弾性波速度分布がより高精度に把握可能となり、地山分類、補助工法採用のデータとして活用できる。

④ TDEM法、TSP、DRISSの組み合わせによる特徴

TDEM法による概査、TSPによる中距離探査、DRISSによる精査の組み合わせにより、探査対象とする地質構造の位置が絞り込まれ、TSPが有効な位置で実施でき、さらにDRISSを有効な位置のみで実施することができる。また、3探査法から得られる物性値（比抵抗値、弾性波反射面及び速度、穿孔油圧データ）はそれぞれ異なるので、データの総合的な検討により地山性状を把握することができる。

### 3-1-6 判明する地山定数を用いた定量的地山評価

高精度切羽前方探査システムの適用によって得た地山物性値を、施工へのフィードバック情報とするためには、この物性値を根拠にした地山評価とそれに基づく補助工法や支保選定の具体的手順を作成しなければならない。従来の探査適用と今回の研究によって判明した得られた物性値と地山評価の関連について、表-1にTDEM法により得られる比抵抗値と定量的な地山状況との関連、表-2にTSPによる地山分類事例、表-3にDRISSによる穿孔エネルギーと地山状況、補助工法の適用事例をまとめた。

探査結果の定量的地山評価については、TDEM法は得られる比抵抗値を弾性波速度・ボーリング結果等との対照により地山分類が行える可能性があり、TSPは203型によって得られる弾性波速度により、従来の弾性波反射面の把握だけでなく、地山分類が行えることが示された。DRISSについては、穿孔エネルギーが補助工法を採用する際の管理基準値の一つとなることが示され、地山分類、補助工法の施工箇所の特選定などの地山評価に役立つデータが掘削前に把握できるようになった。

表-1 TDEM法により得られる比抵抗値と地山状態

地山比抵抗の影響因子		比抵抗値	予想地山状況
飽和度	大	小	地下水、湧水
水分含有量	大	小	破碎帯、湧水
温度	高	小	高温岩盤
間隙水の比抵抗	小	小	塩水、海水
粘土鉱物含有量	大	小	変質帯、断層

表-2 TSPによる地山分類事例

地山分類	A	B	C I	C II	D I	D II
弾性波速度	4.8以上	4.8~4.5	4.5~4.0	4.0~3.5	3.5~3.0	3.0以下

表-3 DRISSによる穿孔エネルギーと地山状態、補助工法の適用事例

Case	削岩機	ビット	フィード圧	岩種	支保パターン	穿孔エネルギー (J/cm3)	地山状況、補助工法との関連
1	アトラス COP1238	クロス・Φ80	3MPa	砂岩・頁岩	D I	>100	AGFなし
					D I	≤100	AGFあり
2	アトラス COP1838	ポタン・Φ64	4MPa	花崗斑岩	D I	>100	先受け工無し
						≤100	充填式およびガス注入式フォードリング
3	古河 HD190	ポタン・Φ64	4MPa	礫層	D I	>100	
						≤100	AGFおよびガス注入式フォードリング

## 2) 今後の課題・展開

単独で用いてきた探査法をシステムとして構築し、組み合わせて行うことにより、探査システムの効果として、探査性能の補完、有効な位置での探査実施による探査回数の減少、地山脆弱部に対する探査精度の向上等といった利点があり、現場適用により探査結果によって地山分類、補助工法への定量的評価が行えることが判明した。

今後、探査結果による地山分類、補助工法への展開は、探査結果と施工状況の対照、探査実績の積み重ねにより、さらなる地山評価法の精度向上を目指す。

参 考 文 献	山岳トンネルにおける切羽前方探査の高精度化の試み 土木学会 トンネル工学研究会：戸田建設(株) 原敏明他 2002年11月 戸田建設(株)・西松建設(株)共同研究カタログ資料
備 考	—

【地下施設／山岳トンネル】

技 術 名	切羽前方コアサンプリングシステム
番 号	No. 4. 2-11
発 注 者	国土交通省北陸地方整備局
施 設 名	国道 49 号 新揚川トンネル
所 在 地	新潟県東蒲原郡阿賀町
工 事 名 称	国道 49 号 揚川改良新揚川トンネル工事
施 工 期 間	2011 年 1 月 22 日～2012 年 12 月 25 日
施 工 者	五洋建設(株)
キーワード	切羽前方コア、油圧ドリルジャンボ、切羽前方探査
<p>(1) 概 要</p> <p>トンネルを安全かつ効率的に掘削するためには、切羽前方の地質構造や地山性状を精度良く把握することが重要である。現在、坑内からの切羽前方地山の探査は、主に①専用ボーリングマシンによる水平ボーリング、②TSP（弾性波）探査等の物理探査、並びに③ドリルジャンボによる削孔エネルギー検層のいずれか、またはそれぞれを組み合わせで行われている。</p> <p>これらの探査手法は、精度は良いが機械設備が大規模になる、機械設備は小規模だが直接的に地質の評価ができないなどの問題点を有している。</p> <p>本技術は、専用の機械設備を用いずに切羽前方地山の岩石試料（コア）を採取し、直接的に地質を評価できるコアサンプリングシステムを開発したものである。</p> <p>(2) 技術詳細</p> <p>1) システムの特徴</p> <p>本システムの特徴は、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 専用の機械設備を用いず、汎用機械であるドリルジャンボでコア採取が可能</li> <li>② トンネル作業員による施工が可能</li> <li>③ 任意の探査深度で岩石コアの採取が可能</li> <li>④ ドリルジャンボで削孔できる場所であれば、任意の断面位置で迅速な探査が可能</li> <li>⑤ 採取したコアで、点載荷試験や浸水崩壊度試験、X線回折試験等の岩石試験により、地山性状を直接的かつ定量的に評価することが可能</li> </ul> <p>2) システムの構成</p> <p>本システムは、専用の機械設備を用いずに汎用機であるドリルジャンボを用いてコア採取を行うものである。</p> <p>図-1 に切羽前方コアサンプリングシステムの構成図を、写真-1 にコアサンプラーの一例を示す。</p> <p>本システムには、単管削孔方式と二重管削孔方式の2種類の削孔方式がある。単管削孔方式は、孔壁が自立しない地山では探査が困難であるが、高速削孔が可能である。一方、二重</p>	

管削孔方式は、単管削孔よりも削孔速度は低下するが、外管により孔壁の崩壊を防止できるため、亀裂性の地山でも探査が可能である。このように、本システムは、地山状況に応じて単管削孔方式と二重管削孔方式が選択できる。

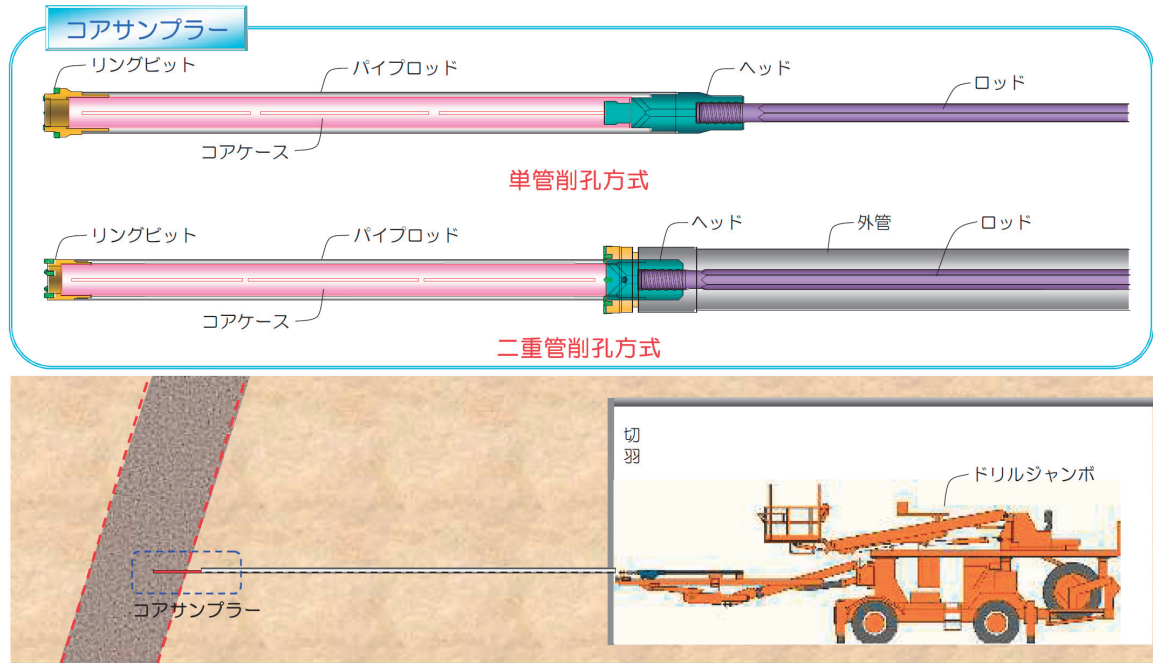


図-1 システム構成図



写真-1 コアサンプラーの一例

### (3) 実施結果

#### 1) 実施結果

試験施工において、“長尺先受け工（標準的な1シフト長：12.5m）の施工継続の可否を判断する際の切羽前方探査”という状況設定で、①切羽前方12m以奥から岩石コアが採取できるか、②任意の位置で断続的に岩石コアが採取できるか、について検証した。

図-2 に試験施工における岩石コア採取位置を示す。

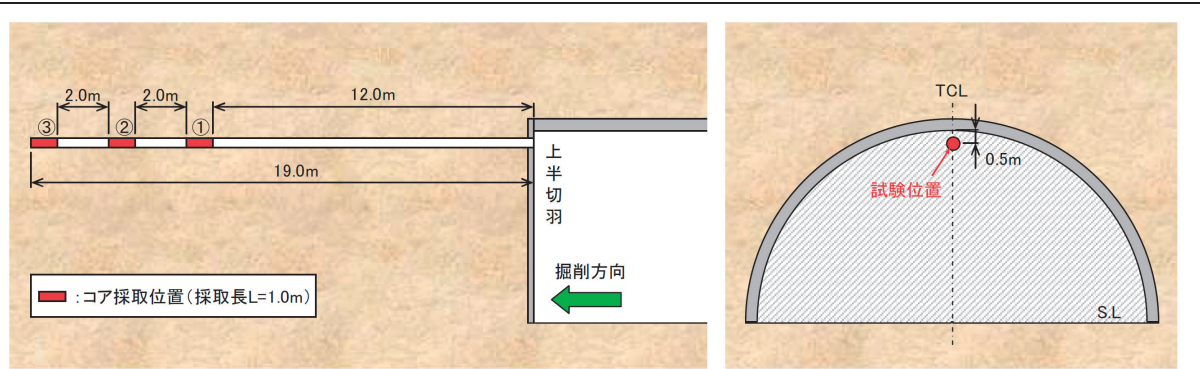


図-2 岩石コア採取位置図

試験施工の結果は以下のとおりであった。

- ① 切羽前方 12m 以奥におけるコア採取率は良好であり、採取した岩石コアと実際の切羽状況もよく一致した。
  - ② サイクルタイムはトンネル掘削に与える影響が小さい。
- 以上から、切羽前方コアサンプリングシステムは、実用上問題がないことを確認した。

## 2) 今後の課題・展開

今後想定されるシステムの改良点は以下のとおり。

- ① 地質に応じたビット形状の最適化
- ② 削孔水によるコアの流失防止対策
- ③ コア取り出し時のコアの損失・損傷防止対策

参考文献	<ul style="list-style-type: none"> <li>・トンネル技術研究発表会論文集 2013：北海道土木技術会</li> <li>・プレス発表資料</li> <li>・ホームページ：http://www.penta-ocean.co.jp/news/2012/120731.html (2016年4月14日現在)</li> </ul>
備考	特許第 5510958 号、共同開発者：西日本高速道路(株)