

# 丹波帯・付加体堆積物が分布する地山での 前方探査事例

長沼 諭<sup>1</sup>・原田 建志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(株)鴻池組 土木事業本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

<sup>2</sup>(株)鴻池組 大阪本店土木部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

丹波綾部道路須知第二トンネルは、丹波帯の「付加体堆積物」が分布する地帯に位置しており、工事着手前に実施された地質調査では断層破碎帯の存在が推測されていた。断層破碎帯の位置や分布、地山性状等を切羽到達前に正確に把握し、早期に不良地山対策を検討・実施するため、切羽前方探査を実施した。

キーワード 山岳トンネル、前方探査、丹波帯、付加体堆積物

## 1. はじめに

トンネル施工において、事前に切羽前方地山の地質や性状を把握することは、安全かつ経済的にトンネルを掘削するうえで最も重要なことの1つである。しかしながら、工事着手前に行われる調査は、主に地表からの探査やピンポイントのボーリング調査等であり、トンネル全体の地質や地山性状を把握することは困難である。そのため、断層破碎帯などの不良地山が想定される場合には、施工時に切羽前方探査による調査が積極的に行われるようになっている。

丹波綾部道路須知第二トンネルは、丹波帯の「付加体堆積物」が分布する地帯に位置しており、工事着手前の弾性波探査による地質調査からは、4箇所低速度帯(断層破碎帯)の存在が推測されていた。

本稿は、須知第二トンネルで行った切羽前方探査について紹介するものである。



図-1 工事位置

## 2. 工事概要

丹波綾部道路は、南北に長い京都府を縦貫して宮津市から久御山町に至る、長さ約100kmの京都縦貫自動車道のうち、綾部市～京丹波町間29.2kmの一部区間である。開通により、京都南北間の移動時間短縮、京都北部の観光客の増加など沿道地域の活性化が期待されている。

須知第二トンネルは、丹波綾部道路の南端に位置する丹波ICにほど近い延長380mの山岳トンネルである。

図-1に工事位置を、表-1に工事内容を示す。

表-1 工事内容

工事名称	丹波綾部道路 須知第二トンネル工事	
工事場所	京都府船井郡京丹波町 須知地先～曾根地先	
工期	2012年10月2日～2014年2月28日	
工事内容	延長	工事延長 L=708.6m, トンネル延長 L=380.0m
	断面	内空面積 75.5㎡
	施工法	NATM
	掘削方式	発破掘削方式
	掘削工法	上半先進ベンチカット工法
補助工法	注入式長尺鋼管フォアパイリング	

### 3. 地形・地質概要

当該工事は、丹波山地の南西部、須知盆地の南側に位置する。標高400m前後の山地が低地と接する付近であり、山腹斜面の傾斜は25°～30°であるが、谷に沿って部分的に緩傾斜を示す箇所も認められる。また、谷部には段丘面が形成されている。

地質学的には、中生代・ジュラ紀(約2.1億～約1.5億年前)に形成された丹波帯の「付加体堆積物」が分布する地帯に属しており、緑色岩、層状チャート、頁岩・砂岩を主とする砕屑岩類が分布する。

### 4. 前方探査概要

当現場では、工事着手前の現地踏査と弾性波探査による地質調査から4箇所の低速度帯(断層破碎帯)の存在が推測されていた。断層破碎帯では地山の緩みによる切羽の肌落ちや崩落、天端の抜け落ち等が発生しやすく、掘削に先立ち正確な破碎帯の位置を把握し、必要な対策を講じる必要があった。

そこで、地質縦断図に記載されている断層破碎帯を確認するために、以下の順で前方探査を実施した。まず、想定されている破碎帯位置の約20m手前で、①TSP切羽前方探査を行い、破碎帯の位置をある程度特定する。特定した破碎帯位置の10m手前から、②先進調査ボーリング、および③DRISS検層調査を行い、破碎帯の地質や地山性状を把握することとした。

事前調査により想定されていた破碎帯の位置と各探査の実施位置を図-2に示す。

#### (1) TSP切羽前方探査概要

TSP切羽前方探査は、3成分弾性波反射法に属する探

査法である。トンネル側壁に複数の発振孔を設け、発破により順次振動を発生させ、断層等で反射した反射波を受振することにより、切羽前方100～150mまでの地山状況を3次元的に予測・評価できる。

トンネル側壁で発破すると、その振動が岩盤内を球面状に拡大しながら伝播する弾性波として伝わる。その弾性波が地質不連続面に到達すると、岩盤強度の変化量に応じた反射波を生じてトンネル側に戻ってくる。この反射波を、振動計(受振器)を用いて高精度に測定すると、反射波が戻ってきた方向と所要時間(数ミリ秒～数十ミリ秒程度)が得られる。このデータを多数集めて立体的に分析することで反射面、すなわち岩盤強度の変化面の位置を知ることができる。図-3にTSP切羽前方探査のイメージ図を、写真-1に探査実施状況を示す。

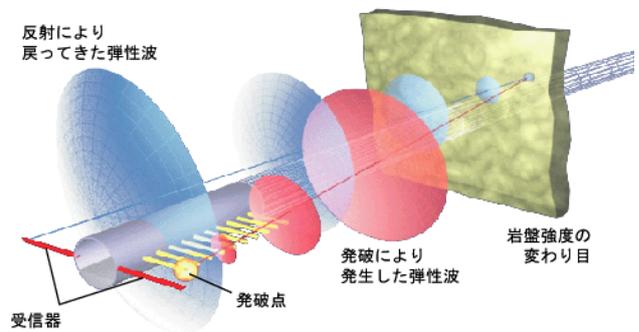


図-3 TSP切羽前方探査イメージ



写真-1 TSP切羽前方探査実施状況

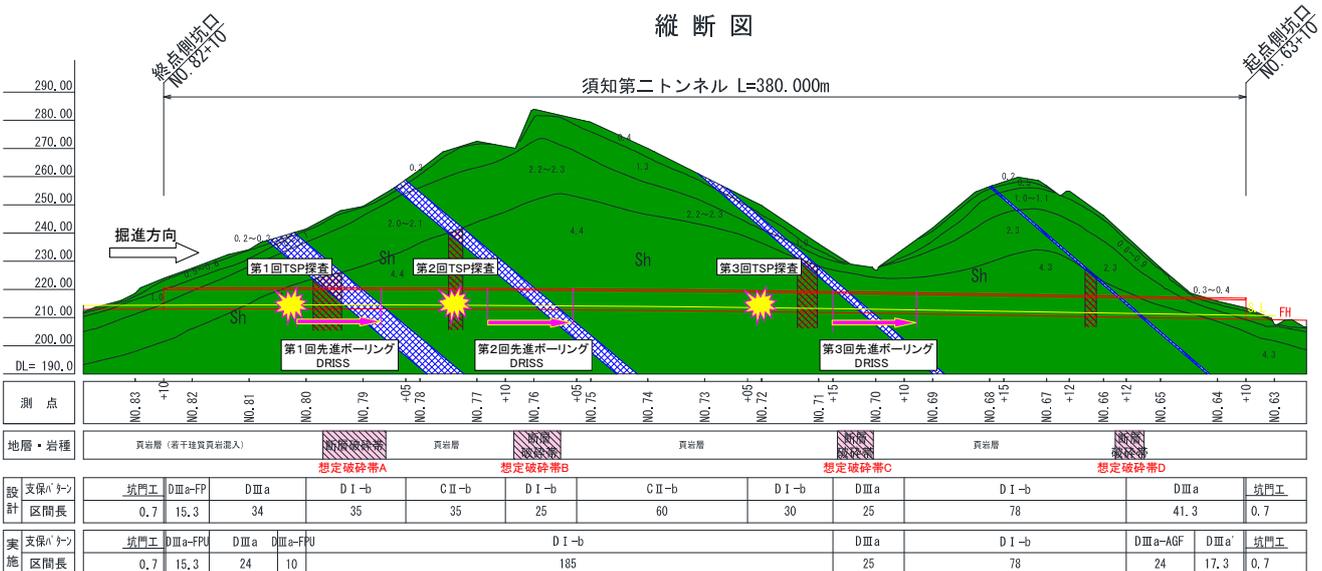


図-2 想定破碎帯および前方探査実施位置

(2) 先進調査ボーリング概要

今回、先進調査ボーリングには、油圧式ロータリーパーカッションドリルによる急速コアサンプリングが可能なワイヤーライン工法(以下PS-WL工法)を採用した。

PS-WL工法は油圧式ロータリーパーカッションドリルにコア採取機能を持たせたシステムである。回転打撃に対応できるコアバーレルを装着し、穿孔時にコアを採取する。コアの回収はロッド内にワイヤーで接続した回収器(オーバーショット)を水圧で送り込み、ロッド内のインナーチューブアセンブリーを回収する。

この工法は、従来コア採取の困難な礫層や破碎質地盤のコアを効率よく採取できる工法として多くの実績をあげている。

ボーリング箇所は切羽中央部1箇所とし、30mの穿孔およびコアサンプリングを行った。写真-2に先進ボーリング実施状況および穿孔位置を示す。

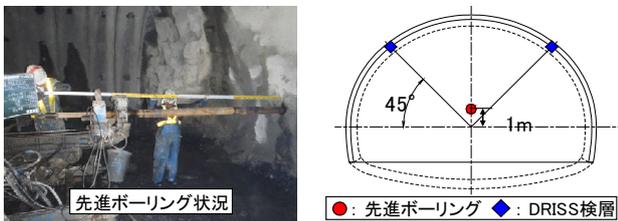


写真-2 先進ボーリング実施状況および穿孔位置

(3) DRISS検層調査概要

DRISS検層調査は、トンネル掘削に使用する油圧式削岩機(ドリルジャンボ)の穿孔時における機械データを計測し、これを基に地山性状を推定するシステムである。

DRISS (Drilling Survey System) は、一般的に実施される“探り削孔”と同様の手法で行われ、穿孔作業時に削岩機の各油圧データを自動測定し、これらのデータを基に地山性状に対する定量的な推定・評価を行う。測定データは、削岩機の機械データ(フィード圧、打撃圧、回転圧、ダンピング圧、フィードシリンダ油量(穿孔距離・速度に換算))と、穿孔時の目視観察データ(湧水量、くり粉の性状等)である。専用のソフトウェアにより、機械データから穿孔エネルギーを算出し、切羽前方の地山評価指標とする。

DRISS検層箇所は両肩部2箇所とし、30mの削孔検層を行った。写真-3にDRISS検層調査の実施状況を示す。

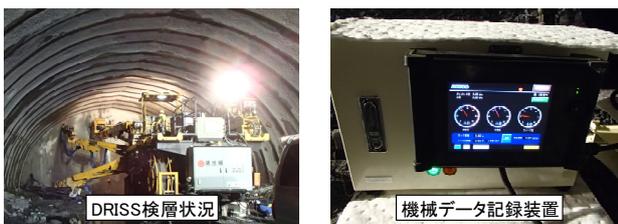


写真-3 DRISS検層調査実施状況

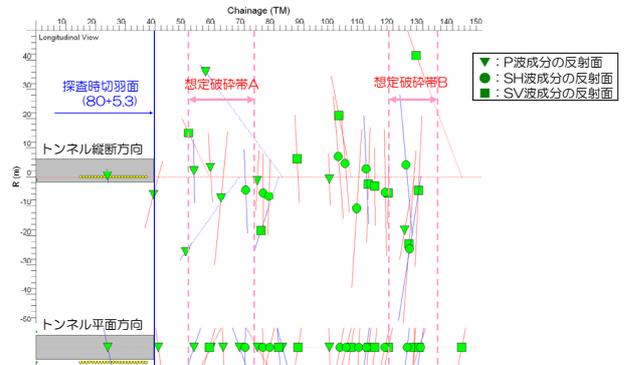
5. 前方探査結果

(1) TSP切羽前方探査結果

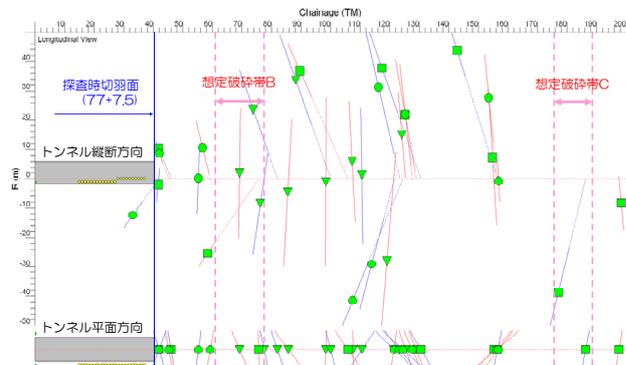
TSP切羽前方探査により得られた弾性波反射面の分布を図-4に示す。これは、計測した反射波をP波、SH波、SV波の3成分に分解し、各成分で反射強度の強い上位10位までの反射面を抽出したものである。

1回目の探査では、探査区間全体に反射面の分布が認められた。地質縦断面図に示される想定破碎帯A、Bにおいても反射面は認められるが、顕著な反射面の集中や弾性波速度の落ち込みは確認されなかった。このため破碎帯を含む脆弱な地山がある程度の広がりをもって分布していると判定した。想定破碎帯AとBに挟まれた区間は、設計ではCII-bで計画されていたが、探査時切羽と同じDIIIaからDI-b相当の地山が分布するものと想定した。

1回目TSP探査 反射面分布



2回目TSP探査 反射面分布



3回目TSP探査 反射面分布

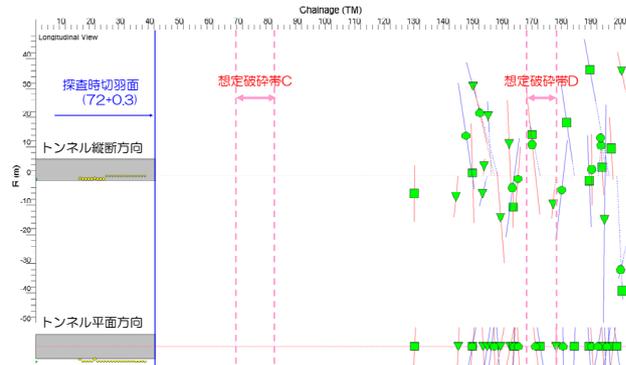


図-4 TSP切羽前方探査結果(弾性波反射面分布)

2回目の探査でも、想定破碎帯Bでの顕著な反射面の集中や弾性波速度の落ち込みは見られず、想定破碎帯Bを含む切羽前方約100mにわたり、反射面が分布している。想定破碎帯BとCに挟まれた区間は、設計ではCⅡ-bであったが、1回目の探査結果と同様に、破碎帯を含む脆弱な地山が分布していると判断し、探査時切羽と同じDⅠ-b相当の地山が分布するものと想定した。

3回目の探査では、切羽から90m前方までの区間に大きな反射面は認められなかった。このため、想定破碎帯Cは存在せず、探査時切羽のDⅠ-b相当の岩相が続くものと考えられた。90mから先の区間については反射面が多く、亀裂などの不連続面が発達し、地山が脆弱化するものと想定されたが、1回目、2回目の探査結果と同様に、想定破碎帯Dのみでの顕著な反射面の集中や弾性波速度の落ち込みは見られず、破碎帯を含む脆弱な地山が広がりをもって分布していると判定した。

実際の掘削記録や先進ボーリングの結果から、想定破碎帯A、Bでは、図-5に示されるような軟質な破碎された黒色頁岩（泥岩基質）に硬質な珪質頁岩、緑色岩、砂岩の岩塊が混在する「混在岩相」を確認しており、TSPで観測された多くの反射面は各岩塊の境界面での反射波をとらえたものと考えられる。想定破碎帯A、B、Cに挟まれた区間でも混在岩相が分布しており、設計でCⅡ-bであった区間は、岩質判定の結果、DⅠ-bパターンに変更されている。想定破碎帯C付近では、比較的硬質な珪化した頁岩と砂岩が分布しており、破碎帯は確認されなかった。想定破碎帯D付近では、地山が著しく破碎され脆弱化し、注入式長尺鋼管フォアパイリングを補助工法として採用して掘削を行っている。以上のことより、TSP探査により得られた前方地山の想定は、実際の地山状況に概ね一致するものであったといえる。

切羽写真 測点:No.73+17.3m (断面番号:No.173)



切羽スケッチ

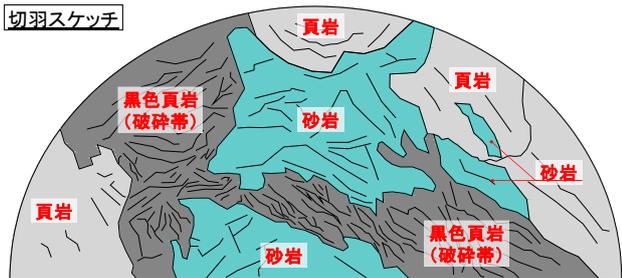


図-5 切羽写真およびスケッチ (混在岩相部)

(2) 先進調査ボーリング結果

先進調査ボーリングの範囲は、TSP切羽前方探査により破碎帯位置を特定して決めるものとしていたが、脆弱部が広い範囲で分布すると想定され、明確に連続した形態での破碎帯が確認されなかったため、地質縦断面図に記載された想定破碎帯位置でのボーリング調査とした。

1回目の調査は想定破碎帯Aを対象にボーリングを行った。地質は主に頁岩が分布し、一部に砂岩を狭在する。頁岩の岩相は、剥離性を有し、一方向に割れ易く、亀裂面は鏡肌である。岩質は硬質だが潜在的な片理が発達し、片理面に沿って割れ易く3~14cm程の柱状~片状コアが目立つ。深度1.5m~8.0m区間には、緑色岩を混在する。深度18.0m~21.0m及び29.4m以深には、粗粒砂岩を狭在する。深度8.0~8.95m, 17.3~18.0m, 21.0~22.5m区間においては、粘土化を伴った破碎帯が確認された。

2回目の調査は想定破碎帯Bを対象にした。この区間でも、引き続き混在岩相が確認された。特に、11.5mから16.1m付近では、頁岩の粘土化した破碎帯が約5m幅で観察され、深度3.5~16.1m区間は、頁岩砂岩互層部も含め破碎帯とみなされる。また、17.1~21.0m区間では、約4m幅で硬質な砂岩が分布している。

3回目の調査区間では想定破碎帯Cを対象とした。この区間はTSP切羽前方探査で反射面の分布が少なかった区間である。地質は砂岩と頁岩の互層状態を呈している。頁岩、砂岩とも珪化して硬い。頁岩は剥離性を有し、一方向に割れ易く、亀裂面には鏡肌がみられたが、3回目の調査区間内に、破碎帯と判断されるような著しい劣化部は確認されなかった。

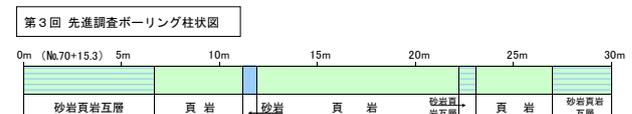
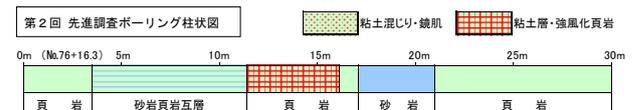
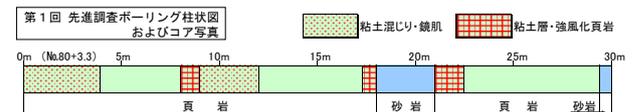


図-6 先進調査ボーリング結果

(3) DRISS検層調査結果

DRISS検層位置も先進調査ボーリングと同じ区間で実施した。図-7に1回目から3回目までのDRISS検層調査結果（穿孔エネルギー）を示す。

1回目のDRISS検層結果からは、左右の連続性を明確に示す穿孔エネルギーの相関は認められない。ボーリングで確認された21.0～22.5m区間の約1.5m幅の破碎された粘土層についても、連続性は確認できない。

2回目のDRISS検層結果も1回目と同様に左右の連続する大きな不連続面は認められない。特に、ボーリングで確認された11.5mから16.1m付近の約5m幅の粘土化した破碎帯と、17.1mから21.0m付近の約4m幅の硬質砂岩においても、左右の結果に明確には表現されていない。これは、地質縦断面に記載されているような明確な連続性をもった断層破碎帯としてではなく、硬質岩塊を含む地山脆弱部が断続的に分布している状態、「混在岩相」からなる地質構造を想定すれば、妥当な結果である。

3回目のDRISS検層結果も、左右の連続する大きな不連続面は認められなかった。この区間では、TSP探査や先進ボーリングの結果からは比較的硬質な岩の分布が想定されていた。しかし、左肩部0.0m～14.0m付近のエネルギーの高い区間で硬質岩の分布が想定される以外は、1回目、2回目と比べて穿孔エネルギーが全体的に小さく、軟質な岩の分布が想定される結果となっている。これは、調査区間が最小土被りが約8mの谷部にあたり、DRISS検層調査ではトンネル肩部の高い位置から若干上向き角度で穿孔を行ったため、表層に近い位置の地山状況を反映したのと考えられる。

6. 前方探査の活用

実施工において、前方探査結果は、岩質判定時の資料として有効に活用することができた。岩質判定時に最も信頼の高い調査結果は先行調査ボーリングといえるが、コストや工程に与える影響が大きいと、広い範囲に適用することは困難であった。そのため、TSP探査の結果において、ボーリングを実施した区間での反射面密度と同程度の反射面分布を示す区間では、同様の地質状況が続くものと判定することで、支保工選定の判定材料とした。実際の掘削に際しては、当初C II-bで計画されていた区間も混在岩相を呈し、脆弱部が広く分布していたため、D I-bにて施工されており、岩質判定時に想定した地山状況は実際の地山に合致していたものといえる。

7. まとめ

TSP探査では、ボーリング調査で得られた粘土化した破碎帯など特に脆弱な部分のみを抽出して特定すること

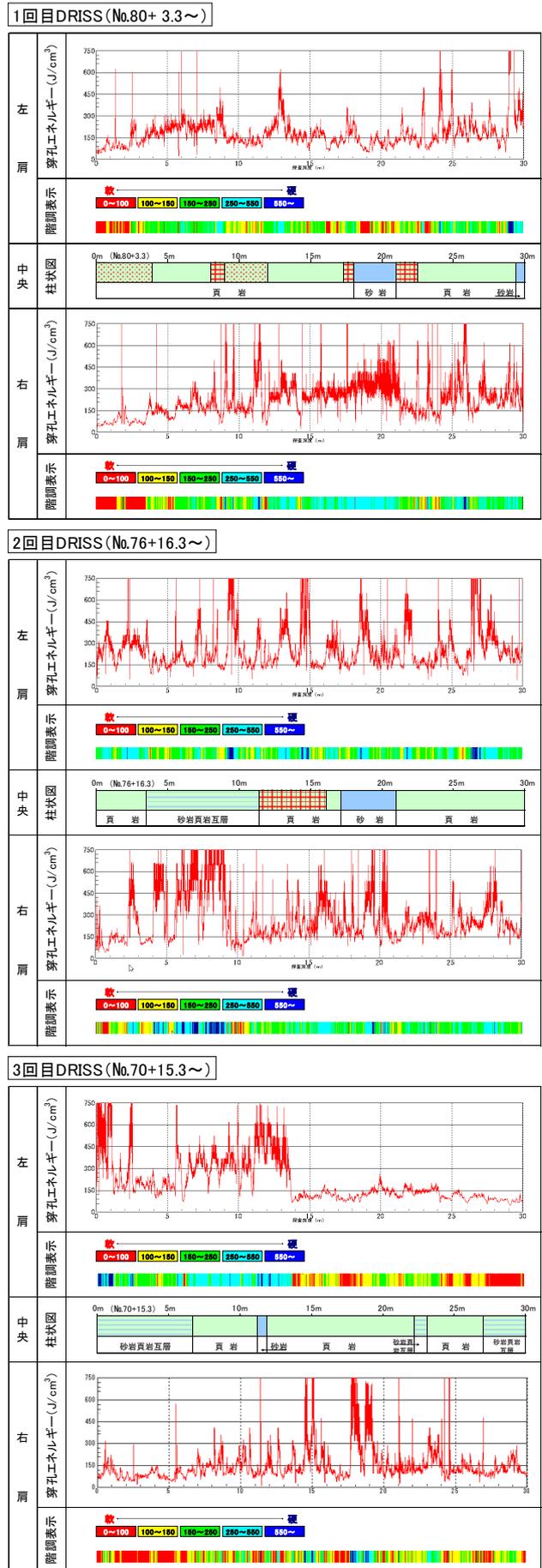


図-7 DRISS検層調査結果

はできなかつたものの、岩塊の境界面の分布をとらえ混在岩相による地山の脆弱区間を読み取ることができ、実際の地山状況と整合のとれた前方地山の推測を行うことができた。また、TSP探査では、探査範囲が一度で150mまでと広い範囲の探査が可能であり、TSPによりある程度の地質状況の推定を行うことで、ボーリング範囲を最適化、限定化できると思われる。

先進調査ボーリングでは、PS-WL工法を採用した。パーカッションドリルで打撃を加えて掘削を行うためRQD値は得られないものの、岩石種や岩性状等を容易に観察できた。また、粘土を伴う地層でもコアを採集でき、粘土層を含む破碎帯を確認することができた。ただし、削孔水を多量に使用すると、細粒化した岩や粘土層部分の流出が見られるため注意が必要である。施工においては、通常のボーリング調査より探査時間を大幅に短縮可能であり、30mのボーリング探査を土曜、日曜の昼間で施工できたため、工程への影響を抑えることができた。直接、地山試料を確認できることから、今回行った3つの探査方法の中では、最も信頼性の高い調査方法といえる。

DRISS検層調査は、岩種は特定できないものの、くり粉の性状確認や岩の硬軟変化の把握から、地質変化点を大まかに推定することができる。今回、地山が付加体の中でも複雑な地質構造である混在岩相であったため、破碎帯や同一岩種の明確な連続性は認められなかったが、比較的単純な地質構造を示す地山では、切羽の左右2箇所検層調査を実施し、切羽中央で実施した先進調査ボーリングと併用することによって、ボーリングだけでは把握できない不連続面の走向傾斜や3次元的地層分布の想定に有効であると思われる。DRISS検層では、地山の相対的な硬軟を知るために、全線でデータを採取して多くのデータを蓄積し、精度を高めることが望ましく、そうすることで、より有効に活用できるものと思われる。

前方探査の選定においては、工事位置での地質構造や工事における工程、費用等の条件に応じ、各探査技術の特徴を踏まえて単体もしくは組み合わせて前方探査を実施することが重要であり、本稿が同類工事の参考になれば幸いである。