

工業用内視鏡を利用した 新たな切羽前方地山調査手法の開発

法橋 亮^{1*}・関根 一郎¹・小林 由委¹・石垣 和明²

¹戸田建設株式会社（〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1）

²応用理学技術士事務所（〒399-8101 長野県安曇野市三郷明盛2698-1メゾン中萱A201）

*E-mail: ryou.houhashi@toda.co.jp

トンネル切羽前方地山の可視化技術として、通常のトンネル現場に配備されている油圧ジャンボを使用し、ロッドを連結して所定の深さまで削孔した後、ロッドの送水孔に内視鏡を挿入し、ロッドをケーシング代わりとしながら、ビット先端の孔壁画像を供する技術「DRiスコープ」を開発した。本技術の適用により、従来は調査が難しかった崩壊性地山でも切羽前方の地質観察が行える。削孔検層等を併用すれば、より有意な地質情報が得られる。これらの調査手法を組合わせて現場に適用した結果、トンネル工程に与える影響を抑制しながら精度の高い地質情報が得られ、新たな切羽前方地山調査手法として有効な調査手法であることが示せた。本稿では本技術の特徴と適用事例について紹介する。

Key Words : *survey method of tunnel face, industrial endoscope, DRi-scope, Drilling survey system*

1. はじめに

近年、切羽崩落災害等のトラブル防止あるいは、トンネル掘削時の支保パターンの妥当性を事前に評価する観点から、切羽前方地山調査に係るニーズが高まっている。その中でも、岩種判別、一軸圧縮強さ、風化変質の程度といった、切羽評価に直結するほぼ全ての地質情報が視覚的に得られる点で、コアボーリングに勝る調査技術はないと言える。ただし、良質なコアを採取するためには長時間に及ぶ切羽での占有作業が必要となり、トンネル掘削工程に与える影響は大きい。一方、削孔検層や弾性波探査等の調査は、トンネル工程に与える影響こそ小さいものの、得られる物理量が間接的なデータとなっている(表-1)。

このような背景のもと、当社では工程への影響を最小限としながら精度の高い地質情報が得られる切羽前方地山調査技術の開発に取り組んでいる(例えば1)2)3)。

この中で開発した切羽前方可視化技術「DRiスコープ」は、ノンコア削孔した孔内に小口径（ $\phi 8\text{mm}$ ）の内視鏡を挿入することで、切羽評価に直結する地質情報を直接映像で確認できる。従来の削孔検層と併用して実施することにより、映像だけでは判別できない地山の硬軟等の情報も得られ、地山の状態を精度良く把握できる。

このように、DRiスコープと従来からの調査技術を組み合わせることで、各々の短所を補うことが可能となり、新たな切羽前方地山調査として期待できる方法と考える。本稿では本技術の特徴と適用事例について紹介する。

表-1 切羽前方地山調査手法の調査精度と各調査が工程に及ぼす影響

評価項目 調査方法		調査精度					工程に 及ぼす影響	備考	
		岩種判別	一軸圧縮強さ (地山の硬軟)	風化 の程度	割れ目				
					幅	状態			頻度
先進ボーリング		○	△	○	△	○	△	×	工程への影響大
削孔検層		×	○	×	△	△	△	○	工程への影響小
弾性波探査	速度検層	×	○	×	△	△	△	△	不良地山部に適用できない
	TSP、HSP	×	○	×	△	△	△	△	解析・評価が難しい
孔内観察	ポアホールカメラ	○	×	○	○	○	○	△	不良地山部に適用できない
	DRiスコープ	○	×	○	○	○	○	△	不良地山部でも適用できる
DRiスコープ（削孔検層併用）		○	○	○	○	○	○	△	組合わせ技術で短所をカバー

2. DRiスコープの特徴

「DRiスコープ」の概念図を図-1に示す。本技術は、通常トンネル現場に配備されている油圧ジャンボを使用し、ロッドを連結して所定の長さまで削孔した後、写真-1のようにロッドの送水孔内に工業用内視鏡を挿入し孔内を観察するものである。本技術の最大の特徴は、ロッドをケーシング代わりとするため、ボアホールカメラ等従来の調査技術では観察することができなかった崩壊性の地山でも適用可能なことである。この技術に削孔検層等の調査技術を組み合わせることで、画像としての地質情報と、穿孔エネルギー等の間接的な情報が得られ、精度の高い切羽前方の地質情報を把握することができ、施工時の安全性向上および合理的な施工に寄与できる。本技術の諸元（表-2）と特徴は下記のとおりである。

表-2 DRi スコープの諸元

光学系※	視野角	120°（60°のタイプもあり）
	視野方向	直視（前方視）、側視
先端部	外径	φ8.5mm
挿入部有効長		30m

※光学アダプタにより変更可能

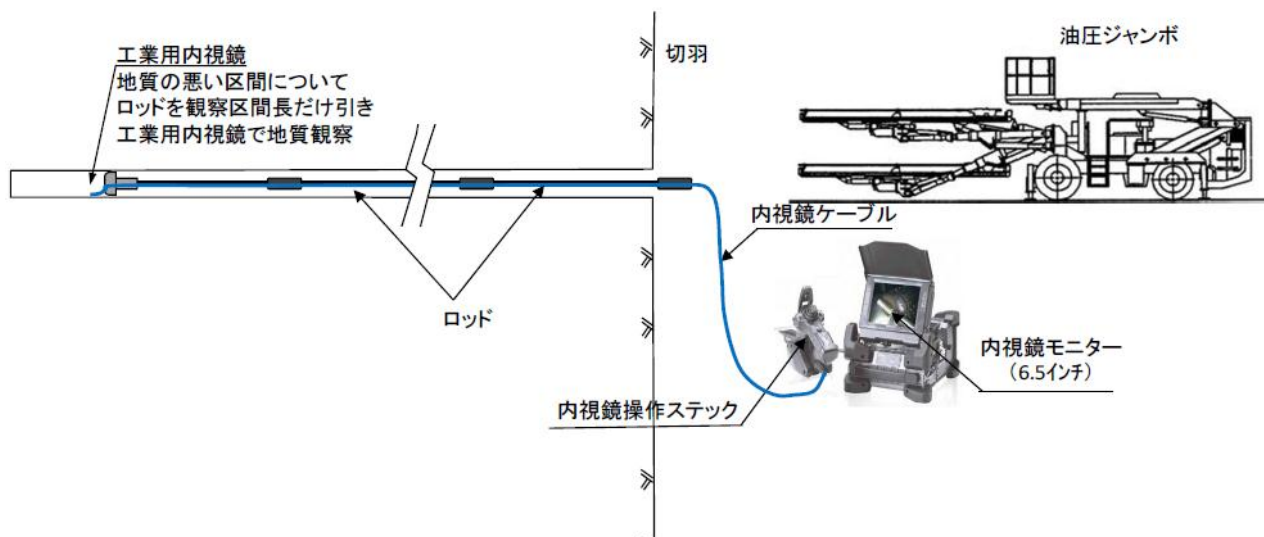


図-1 DRi スコープ概念図



写真-1 内視鏡挿入状況



写真-2 モニター観察映像

- (1) 孔荒れが発生するため従来調査機器を挿入できなかった不良地山でもロッドがケーシングの代わりをするため、切羽前方の地山を可視化した情報が得られる。
- (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の複雑な形状の部分を通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。
- (3) 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動画やピンポイントで静止画像が得られ、地山状態の変化が把握できる(写真-2)。
- (4) ステレオ撮影機能により、割れ目の開口幅や礫等の大きさを測定できる。
- (5) 1mm単位で検知可能な挿入長検知装置を備え、孔内の観察位置をモニター上でリアルタイムに把握することができる(写真-3)。
- (6) 重力方向インジケータにより、上下左右等カメラの向きが把握でき、観察したい孔壁位置をピンポイントで観察できる(写真-3)。これにより、割れ目の方向についても間接的な情報が得られる。

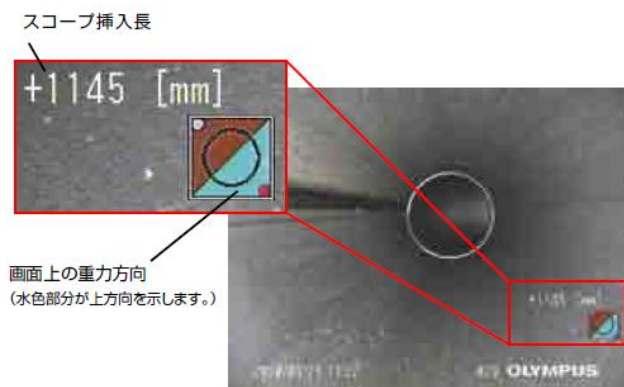


写真-3 挿入長と重力方向の確認モニター画面



写真-5 切羽状況



写真-4 挿入補助器具

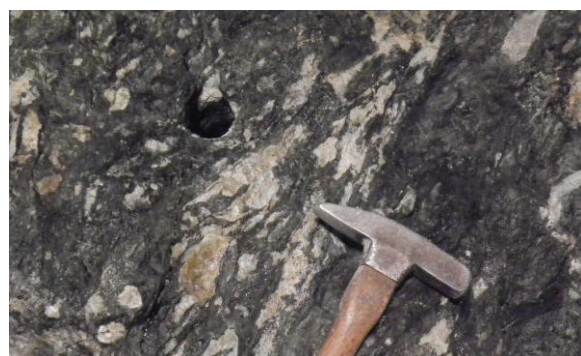


写真-6 切羽状況近景（黒色部：泥質岩、白色部：玄武岩）

- (7) 挿入補助器具を使用することにより工業用内視鏡をロッド送水孔に挿入した状態で送水し、挿入を円滑にすることができる(写真-4)。
- (8) 工業用内視鏡はトンネル切羽での使用を想定していないので、トンネル切羽での使用には防水機能が充分とは言えない。そのため、DRiスコープでは湧水、滴水に対する防水機能を強化している。

3. 適用事例

ここでは、DRiスコープの適用事例を紹介する。適用現場のトンネルには、既存の水路トンネルと近接・交差する区間があり、この直上交差区間の地質を先行把握することを目的として、削孔検層を併用したDRiスコープによる調査をL=16m行った。

(1) 調査時間（トンネル工程への影響）

1ロッド長3m当たりの孔壁観察に要する調査時間は、カメラの挿入・回収作業を含めても10分程度であり、削孔検層による削孔時間を考慮しても、トンネル工程に大きな影響とはならないことを確認した。

(2) 調査精度（地質評価）

適用現場の地質は、中生代ジュラ紀の付加体構成岩類と、局所に貫入する閃緑岩等から構成される。調査実施時までには得られた掘削実績から、主要構成岩種が泥質岩と玄武岩からなる混在岩となっていることが判明していたが、ここでは、通常は暗灰色を呈する玄武岩が、炭酸塩化作用により白色に変質交代しており、複雑な地質状況を呈していることが特徴であった（写真-5、写真-6）。

a) 岩種判別

DRiスコープによる孔内観察の結果、切羽状況と変わらない白色に変質交代作用を被った玄武岩と黒色の泥質岩からなる混在岩が確認でき（写真-7）、その優勢度に応じて岩相区分することができた。また、深度10.74mから15.47mには緑灰色を呈する細粒の閃緑岩が貫入している様子も確認できた（写真-8）。これらDRiスコープによる孔内観察を基に判読した柱状図を図-2に示す。

当該区間の地質は、混在、変質、貫入作用等の影響を被り、初生的な岩盤性状をほとんど残していなかったが、事前の地表地質踏査結果や掘削実績、くり粉等による情報を参考とすることで、DRiスコープによる孔内観察で明確な岩種判別を行うことができた。



写真-7 孔壁画像（混在岩；玄武岩優勢部）

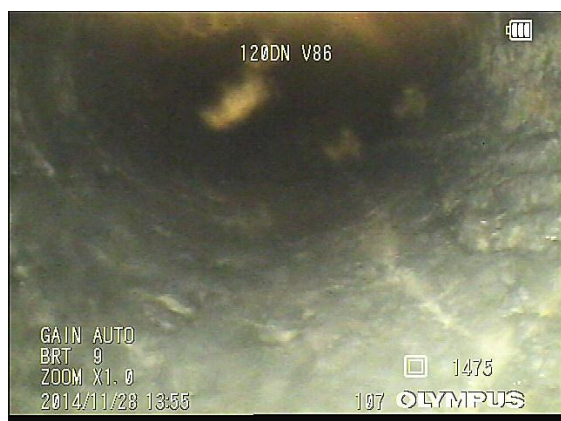


写真-8 孔壁画像（閃緑岩）

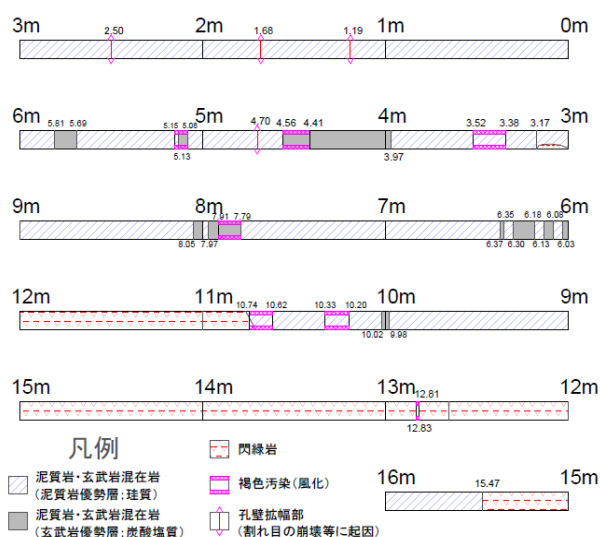


図-2 DRi スコープによる判読柱状図

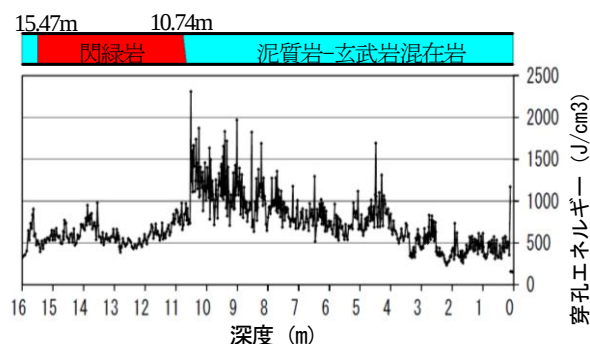


図-3 岩種区分 (DRi スコープによる判読結果) と穿孔エネルギー値との関係

b) 風化の程度

DRiスコープによる孔内観察の結果、局所で褐色に風化している区間が捉えられ、新鮮部と明確に識別可能であることが分かった。風化状況およびその度合いを識別する方法として、孔内映像観察に基づく色調の差異を利用した方法が有効であることを示せた。

c) 削孔検層との対比

DRiスコープの単独使用では、地山の硬軟を評価することができないため、併用して実施する削孔検層との対比が有効である。削孔検層の結果を図-3に示す。

泥質岩-玄武岩混在岩から閃緑岩との地質境界である深度10.5m付近までは、穿孔エネルギー値の増加傾向が認められるが、以降はエネルギー値が低下している。穿孔深度の増加とともに漸増傾向を示すエネルギー値は亀裂質-破碎質の岩体で見られる摩擦に伴うエネルギー値の増加を示すもので、硬質の節理性岩盤である閃緑岩では、逆に孔壁の安定（摩擦の低下）により、エネルギー値の低下を見ているものと考えられる。このことを説明する資料として、写真-7、写真-8の孔壁画像が好例である。混在岩では孔壁に多数の凹凸が認められ不均質となっているが、閃緑岩では均一で滑らかな仕上がり形状となっている。今回の調査では割れ目の頻度や状態の差

異等を反映して、エネルギー値が明瞭な違いとなって現れていることを確認できた。

d) 掘削結果との対比

図-4は、当該区間の掘削実績を基に作成した地質縦断面図と平面図である。

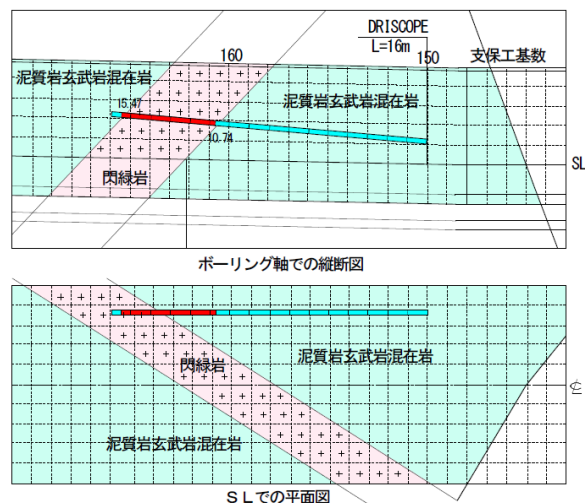


図-4 掘削実績を加味した地質縦断面図と平面図

No.30+2																	No.30+18																	測 点									
No.30+3		No.30+4		No.30+5		No.30+6		No.30+7		No.30+8		No.30+9		No.30+10		No.30+11		No.30+12		No.30+13		No.30+14		No.30+15		No.30+16		No.30+17		深 度													
16m		15m		14m		13m		12m		11m		10m		9m		8m		7m		6m		5m		4m		3m		2m		1m		柱 状 図											
		閃 緑 岩						泥質岩・玄武岩混在岩互層														褐色風化岩		貫れ目	岩 種 区 分																		
黒色		緑 灰 色						黒 色						白 色		黒 色		白 色		黒 色		白 色		黒 色(泥質部優勢)		黒 色(泥質部優勢)		色 調															
割れ目らし、貫れ目ほとんど認識されない																	局所で小規模な割れ目が認識される (深度1.19m、1.88m、2.50m、3.38m)										割れ目の状態																
基本的に新鮮な。ただし、局所(深度3.4m、4.4m、5.1m、7.8m、10.2m、10.6m付近)で、孔壁部が褐色風化している様子が観察できる。																																		風 化 ・ 変 質									
DRスコープ④(※測点)		DRスコープ③(※測点)				DRスコープ④(※測点)				DRスコープ③(※測点)				DRスコープ④(※測点)				DRスコープ③(※測点)				DRスコープ④(※測点)				DRスコープ③(※測点)				DRスコープ④(※測点)				ファイル 番号									
34秒		62秒		43秒		43秒		47秒		41秒		40秒		48秒		33秒		29秒		44秒		37秒		33秒		60秒		25秒		動 画 時 間													
3.8cm/s		3.3cm/s		3.0cm/s		3.2cm/s		6.5cm/s		3.2cm/s		3.9cm/s		7.8cm/s		4.1cm/s		5.0cm/s		5.1cm/s		3.8cm/s		5.6cm/s		12.5cm/s		6.3cm/s		7.7cm/s		引 抜 き 速 度											
白黒の斑模様		白黒の斑模様から、全体的な色調を緑灰色とする半深成岩状(粗粒の石英・斜長石結晶が目立つ)の岩石が出現。その特徴と既往調査結果と照し、一括して閃緑岩とした(一部に、火山岩である安岩山も含む)。										割れ目のほとんど認められない。泥質岩・玄武岩互層。白黒の斑模様が地層判別のポイント。										白色で後退変質した玄武岩と泥質岩が混在、顕著な斑模様が形成。変質による脆弱化に伴わず堅固である。										硬質な基盤岩、直前(No.31+2)で未固結した砂帯から岩盤と切り替わったことを確認。黒色部は泥質岩優勢部。白色部は炭酸塩による後退変質作用を伴った玄武岩(顕微鏡判定結果より)。										記 事	

貫入岩である閃緑岩は、切羽左側から天端付近にかけて出現し始め、掘削進行に従い右側踏まえ部に連続しており、DRiスコープで捉えた閃緑岩の位置とほぼ調和的であった。切羽の状況も、DRiスコープによる孔壁画像と同様に、混在岩分布域では凹凸形状著しい破碎質な状態、閃緑岩部で平滑な状態となっていることが確認できた。

5. おわりに

変質作用を伴う混在岩からなり複雑な地質状況であったが、DRiスコップと削孔検層を組み合わせることで、岩種、風化度、割れ目の頻度や状態等の切羽評価に直結する有意な地質情報が得られた。結果として、作業時の安全性向上につながり、当該区間の掘削を無事完了できた。

参考文献

We have developed a new survey technology of natural ground ahead of tunnel face. It is a technique named “DRi-scope” for visualizing the state of a ground forward tunnel face using a industrial endoscope. When combined with survey techniques such as Drilling Survey System, We can get more significant geological information. Applying these techniques to the tunnel site, highly accurate geological information is obtained while minimizing the impact on the tunnelling process. We could show that these techniques are new effective survey methods of natural ground forward tunnel face. In this paper, we will introduce the features and application examples of the present technology.