

工業用内視鏡を利用した切羽前方地山調査手法 (DRi スコープ) の開発 技術の特徴と適用実績について

DEVELOPMENT OF GEOLOGICAL SURVEY METHOD "DRi-SCOPE" AHEAD OF TUNNEL FACE USING AN INDUSTRIAL ENDOSCOPE Features of technique and application results

法橋亮*¹, 関根一郎*², 石垣和明*³, 小林由委*⁴
Ryo HOHASHI, Ichiro SEKINE, Kazuaki ISHIGAKI and Yoshitsugu KOBAYASHI

We have developed a new geological survey method "DRi Scope" to visualize the state of the bore-hole wall by inserting an industrial endoscope into the hole drilled ahead of the tunnel face. This technique is characterized by being able to conduct surveys even in highly collapsible geological conditions such as fault fracture zone which was difficult to apply by conventional survey method. In addition, combined with existing survey techniques such as *Drilling Survey System*, it is also possible to improve the accuracy of the survey while minimizing the influence on the tunneling process. We have confirmed the effectiveness of the survey in the past achievements, and think that it can be expected as a new survey method ahead of the tunnel face.

In this paper, we introduce the features of this technique and typical case studies.

Keywords : *Geological Survey Method ahead of Tunnel Face, Bore-hole Wall Observation, Industrial Endoscope*
トンネル切羽前方地山調査, 孔内観察, 工業用内視鏡

1. はじめに

社会資本の整備を効率的に進めるため、生産性の向上が重要である。山岳トンネル工事の分野においても「掘削施工の効率化」と「切羽崩落災害の防止」をはじめとする重点課題に対して、様々な技術開発の試みが行われている。中でも、合理的かつ安全な施工に直結する「切羽前方地山調査技術」の開発に対しては期待が大きく、高精度かつ工程への影響が小さい新技術の開発が待たれている。

このような状況の中、当社では、部門横断組織である「トンネル新技術開発 WG」の中で新技術開発に取り組んでおり、調査・計測班の活動の中で、切羽前方地山調査に関する技術開発を推し進めている。

本稿では、オリンパス(株)と共同で開発を進めている切羽前方地山の可視化技術「DRi スコープ」について、技術の特徴を紹介するとともに、これまでの適用実績(延べ30回, 総延長L=600m以上)の中から代表的な調査事例を取り上げ報告する。

2. DRi スコープの概要

DRi スコープは、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、ロッドの送水孔にこれをケーシング代わりとして内視鏡を挿入し、孔先端と孔壁周面の地山を画像として観察する調査技術である(図-1)。

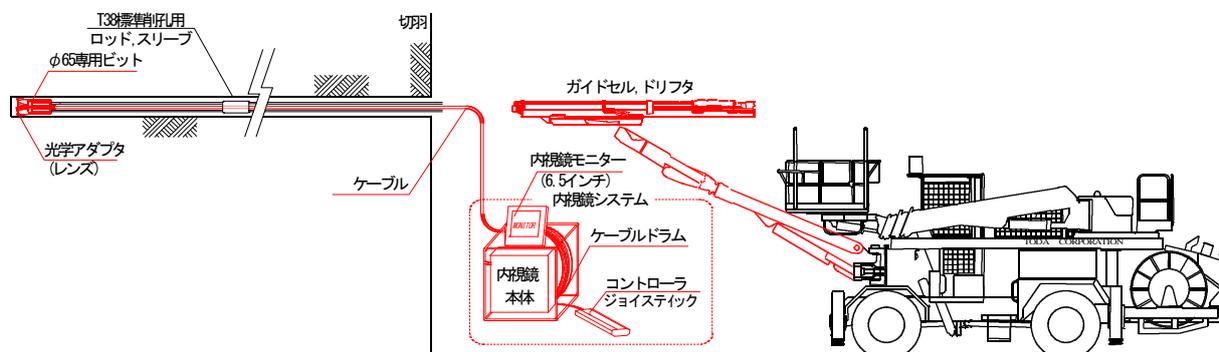


図 - 1 DRi スコープ概要図

*1 戸田建設株式会社土木工事技術部 修士 (理学)

*2 戸田建設株式会社アーバンルネッサンス部 博士 (工学)

*3 戸田建設株式会社名古屋支店土木工事部 修士 (理学)

*4 戸田建設株式会社技術営業部 修士 (工学)

Civil Works Engineering Department, TODA CORPORATION, M.Sc.

Urban Renaissance Department, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

Civil Engineering Department, Nagoya BO, TODA CORPORATION, M.Sc.

Civil Engineering Technology Sakes Department, TODA CORPORATION, M.Eng.

ボアホールカメラやボアホールスキャナ等従来の孔内観察技術では、調査機器の挿入・回収が困難となるため適用対象となり難かった「破碎帯や未固結土砂等」崩落性の強い地質条件でも調査を行える点が大きな特徴である。また、ロッドを引抜きながら延長方向の動画像を得ることで、切羽前方の地山の状態変化を把握することができる。

2.1 DRi スコープの諸元と特徴

DRi スコープを構成する工業用内視鏡の諸元を表-1に示し、続けて本技術の特徴について列記する。

表-1 DRi スコープを構成する工業用内視鏡の諸元

光学系	視野角	標準 120°	視野角、視野方向とも光学アダプターにより変更可能。ケーブル先端の稼動域より
	視野方向	全周方向	首振り（全周方向 60° までの湾曲）が可能
	記録形式と解像度	動画：AVI 形式（約 30 万画素） 静止画：JPEG 形式（最大約 30 万画素）	
光学アダプター	外径	φ 8.5mm	LD 照明（レーザーダイオード）
ケーブル	長さ	30m (φ 8.5mm)	最大有効観察長 27m 程度

①小口径の調査機構（φ 8.5mm）を採用することで、ロッドがケーシングの代わりを兼ねるため（写真-1）、孔壁崩壊が発生するような不良地山でも可視化した情報が得られる（写真-2）。



写真-1 ビットから突出した光学アダプター（φ8.5）
（ロッドとビットはケーシングを兼用）



写真-2 孔内観察画像のモニター表示の一例

- ②ロッドを引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の静止画像が得られ、地山状態の変化が把握できる（写真-2）。
- ③トンネル掘削進行のほぼ1週間分を網羅できる調査仕様（最大観察長27m程度）とすることで、工程への影響を低減しながら、効率的な調査が行える。
- ④穿孔探査（DRISS）等の既存の調査技術と組み合わせることで、切羽占有時間を最小限としながら、前方地山に対する精度の高い情報が得られる。
- ⑤同梱のステレオレンズに変更することで、ステレオ計測機能の使用が可能となり、割れ目の開口幅や礫、鉱物の大きさ等を測定できる。
- ⑥防水機能を強化した距離カウンターが付属しており、孔内への挿入長をモニター画面に表示させることができる（写真-3）。

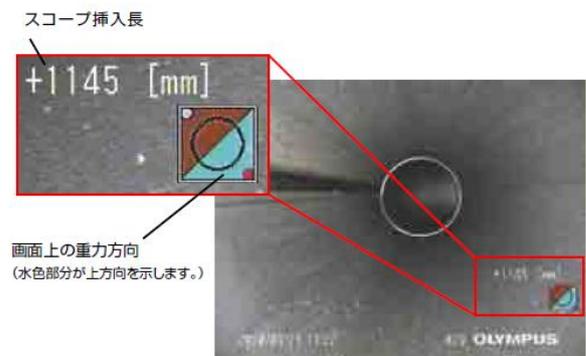


写真-3 挿入長と重力方向の確認モニター画面

- ⑦内視鏡先端部の重力センサーにより、上下左右等光学アダプターの向き（45° 刻み）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。
- ⑧付属の「挿入補助装置」（写真-4）を使用し、DRi スコープをロッド送水孔に挿入しながら送水することが可能で、これにより摩擦抵抗を低減して挿入を円滑にすることができる。



写真-4 挿入補助装置

- ⑧一般の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、防水機能が充分とは言えないが、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。

2.2 DRi スコープの適用可能延長と調査時間

ケーブル長の制約から、1 回当たりの調査延長は 25m 前後（最大 27m 程度）が基本となる。

調査対象が軟岩地山を主体とする場合には、準備・削孔時間を含めても 1 回 2 時間程度で調査を完了させることが可能である。週 1 回の調査を掘削サイクルに組み込めば、工程への影響を最小限にしながら、トンネル全線の適用も可能となる。

2.3 DRi スコープで識別可能な地質情報

得られた孔内画像の観察で識別できる地質情報は以下の通りである。

(1) 岩種

色調・組織・表面粗さ・亀裂傾度等の差異より特定する。ただし、造岩鉱物の同定は困難な場合が多く、くり粉を採取しこれを鑑定することが前提となる。また、調査前までの掘削実績（切羽状況）や既往の調査報告書等を参照する必要がある。

(2) 地層境界位置・深度

記録動画の引抜き開始時刻と終了時刻とから、延長 1m 区間毎の引抜き時間と引抜き速度を求め、観察点の深度を算定する。つまり、本調査は一定速度で引抜くことを前提としている。距離カウンターを併用することで、深度特定精度の向上が図れる。

(3) 風化・変質の有無とその程度

風化の程度の指標となる「褐色汚染の程度」に着目して判定を行う。観察モニターに表示される色調により、風化の程度を十分に評価することが可能である。

(4) 割れ目の程度

幅の広い開口割れ目であれば明瞭に識別可能である。密着した割れ目等は識別困難である場合が多いが、孔壁画像の陰影等を利用することで多少なりの判定ができることがある。また、同梱のステレオレンズを用いれば、開口幅等の測定が可能となる。

(5) 地質脆弱区間の特定

孔壁崩壊等による孔径の大小変化、孔壁面の表面粗さ等に着目することで、相対的な地質脆弱部を抽出することも可能である。

以上の地質情報は、穿孔エネルギー値やノミ下がり、くり粉の観察結果と関連付けて評価することで、より精度の高い前方地山の情報として活用できる。

3. 適用事例

H26 年 7 月に DRi スコープを現場で試行してから、H29 年 7 月までの 3 年間に延べ 30 回、総延長 L=600m 以上の適用を行った。この間、「名古屋支店上高地トンネル（L=588m）」では、技術提案のコアボーリングに代えて DRi スコープによる調査を行うことが認められた。また、「名古屋支店祖山トンネル（L=512m）」では、最初の技術提案履行現場として、トンネル全線にわたる DRi スコープの調査適用を実現した。

本章では、これまでの適用実績から、代表的な調査事例を取り上げ紹介する。

3.1 未固結・崩壊性地山への適用

はじめに、自立性の悪い未固結・崩壊性地山の孔内画像を連続的に取得できた事例を示す。

本調査は、トンネル直上（ $\Delta H \approx 8m$ ）で交差する導水路への掘削影響を把握することを目的として、この直下を構成するトンネル部の地山の状態を事前に把握するため、DRi スコープを適用したものである。本節記載の調査では、DRISS 削孔 6m 時点で逸水が起こり削孔不能となったため、その段階で第 1 回目の DRi スコープを適用することとし、後日次節に示すとおり、第 2 回目の調査を実施した。

孔内観察の結果、花崗岩由来の斜長石や石英を主とする $\phi 10mm$ 程度の鉱物・岩片（崖錐-扇状地性堆積物）が孔壁を構成していることが明らかとなった。細粒分を含まないために自立性が悪く、ロッドの引抜きと同時に孔壁が崩壊してしまいそうな状態である（写真-5）。このような条件下では、ボアホールカメラ等従来の調査機器では挿入・回収を含めて適用が難しいが、ロッドをケーシング代わりとする本工法では、何ら問題なく調査を行うことができ、孔内・孔壁の状態を高精度で記録することができた。



写真 - 5 未固結地山中の孔内画像

本技術が、断層破砕帯のような崩壊性地山においても十分に適用可能であることが改めて裏付けられた。山岳トンネルで一般に問題となりやすい”突発的な断層破砕帯の位置や性状の把握”，あるいは”坑口部における岩盤と未固結層の地層境界の把握”等、特殊条件下において有効な調査手法として今後期待できるものと考えられる。

3.2 地質変化の把握

次に、孔壁の色調および形状等の差異に着目し、地質の変化を明確に把握した事例を示す。

本調査は、前節の調査の延長として後日行った第 2 回目の調査である（L=16m）。この間、崖錐-扇状地性堆積物は、高角度不整合面（アバット）を境に急変し、基盤岩である中生代の付加体構成岩類が分布する状況となっていた。事前調査の結果から、今回の調査区間には泥質岩・玄武岩混在岩とこれを貫く閃緑岩の分布が予想されていた。

3.3 地層境界面の方向の把握

続いて、重力センサーの情報と砂岩泥岩互層の地層境界面の出現状況等より、地層の傾斜方向を特定できた事例を示す。

調査地の地質は、新第三紀のグリーンタフ層からなり、海底地すべり（スランピング）による異常構造・堆積物を伴い地質が急変することが特徴であった。スランブ層の出現をいち早く特定するため、DRi スコープによる調査を適用した。

孔内観察の結果、砂岩泥岩の地層境界面が明確に捉えられた。この地層境界面と孔壁面とがなす交差線（写真 - 8）を、DRi スコープ引抜き時の連続動画像より分析したところ、トンネル縦断方向に約 20 度で傾斜していることが予測できた。傾斜方向やその角度は現地一般部の切羽状況とも整合し、乱れのない地層構成であったことから、スランブ層ではなく、正常堆積物と判定し調査を終えた。

孔内観察に基づく割れ目の方向の特定は、堆積岩地域における前方地山の地質構造の 3 次元的な把握や、火成岩等塊状岩盤地域において抜け落ちを発生させる割れ目（キープロック）の抽出にも一役を買うものと期待される。現状、その精度は十分なものと言いが、将来的には地層面の走向・傾斜を正確に特定できるレベルまで発展・成長させたい。

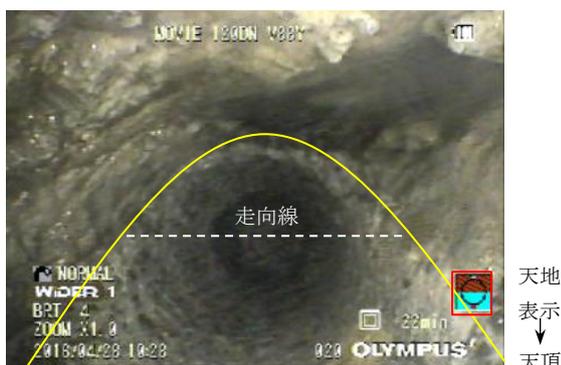


写真 - 8 地層境界面と孔壁面とがなす交差線

3.4 割れ目間隔の把握

最後に、割れ目（節理系）の発達する硬質塊状岩盤が分布するトンネルで、ステレオ計測機能を用いて、割れ目の幅・間隔を特定できた事例を示す。

本調査は、切羽評価に直結する割れ目の幅・間隔の定量測定を試みるとともに、直上斜面に分布する岩塊が、落石危険岩体となりうる開口性亀裂を有しているのかどうかを確認するため、DRi スコープを適用したものである。ステレオ計測は、側視レンズで適当な割れ目の位置を抽出した後（写真 - 9）、ステレオレンズに交換して実施した。

調査の結果、孔壁部を構成する系統的な開口節理の存在が明らかになり、主要な割れ目で 1.1~4.5mm 開口している状況が確認された（写真 - 10）。これにより、切羽評価の一項目である「割れ目の幅・間隔」を定量的に把握することができた。岩判定等の発注者立会時に、有効な資料になるものと期待される。



写真 - 9 側視レンズによる割れ目の位置抽出



写真 - 10 開口割れ目の間隔測定状況 (W=4.54mm)

また、開口性の節理が系統的に存在する状況から、落石危険岩体となりうる可能性があるものと判断し、後続の調査につなげることができた。

4. おわりに

本稿では、DRi スコープの特徴と代表的な調査事例について紹介した。

本技術は、切羽前方の地質状況を穿孔エネルギー値やノミ下がりといった定量的なデータとして把握しながら、孔壁地山の状態を地質条件に関係なく、原位置で可視化し評価できる点で優れた調査手法と言える。とくにトンネル工程への影響を最小限にしながら、調査の高精度化を実現できた利点は大きく、新たな切羽前方調査手法として期待ができる。

今後、適用事例を更に充実させ、切羽前方地山より正確な把握に尽力していきたい。

参考文献

- 1) 関根一郎, 小林由委, 法橋亮, 石垣和明, 平田康夫: 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, Vol.51, No.7, pp 35-38, 2015.
- 2) 関根一郎, 法橋亮, 小林由委, 石垣和明, 平田康夫: 工業用内視鏡による切羽前方地山調査法の開発, 地盤工学会誌, Vol.65, No.5, pp 20-23, 2017.
- 3) 法橋亮, 関根一郎, 小林由委, 石垣和明: 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, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2016.