# 自走式孔内観察ロボットによる水平ボーリング孔内の可視化

藤 岡 大 輔 中 岡 健 一 森 拓 雄

# Visualization of Horizontal Borehole by a Self-Propelled Borehole Inspection Robot

Daisuke Fujioka Kenichi Nakaoka

Takuo Mori

## Abstract

A self-propelled borehole inspection robot was developed for borehole observation and generation of unfolded borehole images for visualization of a horizontal borehole. While traveling through a borehole of 85 mm or more in diameter, the self-propelled borehole inspection robot observed the borehole geological conditions in real time. From the experiments with a non-core drilling exploration, by comparing the borehole images and drilling data, good geological conditions without cracking or collapse could be confirmed. Based on the experiments with a core borehole, by generating unfolded borehole images, it was possible to acquire the strike and dip of a crack, which could not be obtained from the core photo. This contributed to the improvement of the reliability of the boring survey results.

#### 概 要

ノンコア削孔検層では、コアを採取せずに切羽前方の地質を把握することができる。加えて、その孔内を観察 することで風化・変質や割れ目の状態といった脆弱性の原因を特定でき、ノンコア削孔検層の信頼性が向上する。 水平ボーリング孔の孔内観察と孔壁展開図を作成するため、孔内観察ロボットを開発した。このロボットは、 々85mm以上のボーリング孔内を自走し孔内の状況をリアルタイムで観察することができる。ノンコア削孔検層 孔に適用した結果、孔内映像と削孔データを比較することで、孔壁に亀裂や崩れはなく良好な地山であることを 確認できた。また、コアボーリング孔にも適用した結果、定速で走行することにより孔壁展開図を作成し、コア 写真から得られなかった亀裂の走向傾斜を取得することができ、ボーリング調査結果の信頼性向上に寄与した。

## 1. はじめに

山岳トンネル工事では、切羽前方の地山状況を把握す るため、水平方向のオールコアボーリングやノンコア削 孔検層が実施される。オールコアボーリングは、専用の マシンで岩石試料(コア)を採取し高精度に地質情報を得 ることができる。一方ノンコア削孔検層は、トンネル工 事の汎用機である油圧削岩機で行う。コアは採取せず、 削孔速度や削孔エネルギーに基づき地山の硬軟の判定や 脆弱区間の検出を行うものである。ノンコア削孔検層は、 オールコアボーリングよりも短い工期で安価に実施でき る。しかし、削孔速度や削孔エネルギーは、風化・変質や 割れ目の状況といった複数の要因に影響されるため、脆 弱性の原因の特定はオールコアボーリングに劣る。ノン コア削孔検層の信頼性を向上させるためには、孔内観察 や孔壁展開図によるボーリング孔内の可視化が効果的で ある。

筆者らは、これまで削孔長50m程度のノンコア削孔検 層孔を可視化するため、手動で挿入する簡易な孔内カメ ラを開発し、実用化している<sup>例えば1),2)</sup>。近年、その適用範 囲を超える、削孔長100m以上の中尺ノンコア削孔検層の



Photo 1 自走式孔内観察ロボット The Self-propelled Borehole Inspection Robot

施工が増加傾向にある。また, 亀裂の方向を正確に取得 するには孔壁展開図が有効であるが, 展開図を作成する ためにはカメラを定速で移動させる必要がある。そこで, 100m以上の孔内観察と孔壁展開図の作成による孔内の 可視化を目標に, 水平ボーリング孔を定速走行可能な自 走式孔内観察ロボット(Photo 1, 以下「孔内観察ロボット」 と記す)の開発を行った。

本報告では、ノンコア削孔検層と孔内観察の組合わせ による前方探査の信頼性向上について述べたのち、孔内 観察ロボットの概要と実際のボーリング孔で試行した事 例を述べる。

Table 1

## 2. 前方探査における孔内観察の効果

Table 1にノンコア削孔検層と孔内観察により評価でき る地山の性状や状態を示す。ノンコア削孔検層は、地山 の硬軟から地山等級や最適支保規模を予測するとともに 圧縮強度や地山強度比も推定できる。しかし,風化・変質 や割れ目の頻度,割れ目の状態(開口幅や挟在物の有無) は複合して削孔速度や削孔エネルギーに現れるため、項 目ごとの状態を判別することは難しい。また、湧水箇所 と湧水量についてはボーリング孔口から流出する水量を 計測することで大まかに把握できるものの、詳細な位置 や量までは求められない。それに対し, 孔内観察では, 孔壁の状態から風化・変質や割れ目の頻度,割れ目の状態, 地山の自立性を目視確認することができる。また、湧水 箇所や湧水の程度,地山の水による劣化(水による緩みや 崩壊)も目視観察が可能である。さらに、不連続面による 開口が孔壁に現れている場合には、不連続面の方向も求 めることができる。このように、ノンコア削孔検層の力 学的な地山評価に、孔内観察による視覚的な地山評価を 組合わせることで, 切羽前方探査の信頼性向上に繋げる ことができる。

例として、ノンコア削孔検層の結果と簡易な孔内カメ ラ<sup>1)</sup>(Photo 2)を用いて撮影したノンコア削孔検層孔の孔 内画像との比較を示す(Fig. 1)。ノンコア削孔検層では、 削孔速度にフィード圧(掘削用の刃先を押し込む力)の影 響を考慮して計算された「正規化削孔速度比」<sup>4)</sup>により地 山の硬軟を評価した。その結果、総じてCII相当の地山と 評価された。なお、CIIとは道路トンネルの地山等級であ り、DII、DI、CI, CI、Bの順に硬く安定した地山である ことを示す<sup>5)</sup>。孔内観察の結果、5m地点では破砕質な砂 岩が強風化かつ破砕的な状況であることを確認した。 17m地点では砂岩が茶褐色に風化・変質している状況を 確認した。27m地点では粘土と思われる茶褐色部が亀裂 に介在する頁岩が確認された。いずれの地点においても 正規化削孔速度比は上昇しており,孔内観察によりその 原因を判別することができた。38m地点からは均質かつ 自立した孔壁が確認できており,軟質である一方,亀裂 が少なく自立性のある地山であると判断することができ た。このように,同じ地山等級と評価されても,その特

ノンコア削孔検層と孔内観察による地山評価項目

Evaluations of Geological Properties by Non-core Drilling

Exploration and Borehole Observation			
評価項目 (地山の性状・状態)	<ol> <li>①ノンコア</li> <li>削孔検層</li> </ol>	②孔内観察	<ol> <li>①と②の 組合せ</li> </ol>
地山の硬軟	0	×	0
風化·変質	$\bigtriangleup$	0	0
割れ目の頻度	$\bigtriangleup$	0	0
割れ目の状態	$\bigtriangleup$	0	0
地山の自立性	×	0	0
湧水箇所と量	$\bigtriangleup$	0	0
水による劣化	×	0	0
不連続面の方向	×	0	0



Photo 2 簡易な孔内カメラ The Simple Borehole Inspection Camera



Fig. 1 孔内画像とノンコア削孔検層結果の比較

A Comparison Between Images of the Borehole and a Result of Non-core Drilling Exploration

徴は大きく異なり,施工時における注意点も変わってく る。したがって,ノンコア削孔検層と孔内観察の結果か ら,地山の硬軟に加えて地質の違いを把握することに よって,より高精度な切羽前方探査が可能になる。

## 3. 自走式孔内観察ロボットの概要

ノンコア削孔検層の削孔長は50m程度が主流であるが, 近年では,100mを超える削孔が行われるようになってき ている。大林組は,削孔長150mの中尺ノンコア削孔検層 として「高速ノンコア切羽前方探査技術<sup>0,7</sup>」を開発して おり,孔内観察ロボットはその削孔長と削孔径に適用で きるように開発した。

Fig. 2に孔内観察ロボットと周辺機器の坑内配置図, Photo 3に孔口でのロボットとケーブルの挿入状況を示 す。Table 2に孔内観察ロボットの諸元を示す。孔内観察 ロボットは孔口に手で設置する。また,孔口には測長器 を設置し,走行距離を計測する。車体の主要寸法は長さ 1194mm,幅70mm,高さ74mmであり, φ85mm以上のボー リング孔を走行できる大きさとした。車体の構成は,LED 照明付きカメラと駆動輪,従動輪で構成され,ケーブル を通じて坑内のコントローラーBOX に接続される。コ ントロールモニターには、回転補正された孔内映像と走 行距離,孔内観察ロボットの姿勢がリアルタイムに表示 され,孔内状況を確認しながら孔内観察ロボットの走行 制御を行う(Photo 4)。孔内映像や時刻等のデータはノー トPCに保存される。

## 実現場での試行

本章では、孔内観察ロボットをノンコア削孔検層と オールコアボーリングが実施された2つの現場で試行し た事例について述べる。

## 4.1 現場試行1 (ノンコア削孔検層孔)

鉄道トンネルの建設現場において、中尺ノンコア削孔 検層「高速ノンコア切羽前方探査技術<sup>の,7</sup>」が実施された。 ノンコア削孔検層と孔内観察ロボットの結果を比較した。 以下にボーリング孔の詳細を示す。

- ボーリング内径:92mm
- 地質:粘板岩
- 地山等級: IN-2(道路トンネルでCII相当)
- 湧水量:0.1m<sup>3</sup>/分
- 削孔方向:上向き3度の排水勾配を付け、トンネル掘 進方向と同じ方向に削孔

**4.1.1** 孔内観察の状況 Photo 5に撮影した孔内状況を示す。孔内はほとんどの地点が湧水で満たされていたが、5m/分で走行することができた。孔口(0m地点)や孔口から1.4m地点では凹凸が小さく、良好な孔壁であった。



Fig. 2 孔内観察ロボットと周辺機器の坑内配置図 Layout of the Self-Propelled Borehole Inspection Robot and Equipment set in Tunnel



Photo 3 孔口でのロボットとケーブルの挿入状況 A Situation of Robot and Cable Insertion at the Borehole

Table 2 孔内観察ロボットの諸元 Specifications of the Self-Propelled Borehole Inspection Robot

項目	諸元
車体の主要寸法	長さ 1194mm, 幅 70mm, 高さ 74mm (85mm 径用タイヤ装着時)
車体の構成	LED 照明付きカメラ 駆動輪(2 軸), 従動輪(1 軸)
走行機構	タイヤ方式
搭載センサー	傾斜計, 方位計
孔内状況の表示	孔内映像,走行距離 孔内観察ロボットの姿勢(ピッチ角,ロール 角,方位角)
走行距離の計測	孔口に設置した測長器により計測
孔内映像の補正	ロール角(ボーリング軸回りのカメラの回転 角)の値に応じて回転補正して表示
牽引力	自重やケーブル牽引荷重, 流水抵抗を考慮
防水性能	IPX7 相当
移動速度	5 m/分~7.5m/分
データの保存	ノート PC に孔内映像とログデータ(時刻, 走行距離, ロボットの姿勢)を保存



Photo 4  $\exists \mathcal{V} \mid \exists \mathcal{V} \mid \exists \mathcal{P} : \mathcal{P} :$ 

4.9m地点には,流れ目方向(掘削方向に対して上っていく 方向)の亀裂があり空気が流入していた。この亀裂は,切 羽観察時においても確認することができた (Fig. 3)。 6.5m地点は孔壁が荒く凹凸があり、孔壁と孔内観察ロボットが接触した。走行不能になる危険性を考えて、それより奥へ走行させなかった。

4.1.2 中尺ノンコア削孔検層と孔内観察の結果比較 Fig. 4に, ノンコア削孔検層の孔口から10mまでの削孔 データ(削孔速度,送水圧,エネルギー指標値)を示す。 エネルギー指標値は削孔速度と送水圧から計算され,値 が大きいほど硬い地山であることを示す。エネルギー指 標値から地山等級が推定される。

深度2.3m付近と深度4.5m付近で削孔を一時停止した ため削孔データが大きく変化していたが、その他の地点 では削孔データの変動は小さく、地山状況が急変するこ とはないと推定された。孔内映像からは、4.9m地点に幅 数mmの亀裂が確認されていたが、その影響は削孔デー タにはほとんど表れなかった。理由としては、ノンコア 削孔で得られるデータの間隔は10mmであり今回の亀裂 の幅よりも大きかったため亀裂の影響が削孔データに表 れなかったと考えられる。その他の孔内映像からは、亀 裂等は確認されず、壁面も滑らかであり自立していたこ とから、地山状況が急変することはないことがわかった。 切羽評価の結果として上記の区間ではIN-2(道路トンネ ルでCII相当)と判定され、支保パターンの変更はなかっ た。

4.1.3 **まとめ** 0.1m<sup>3</sup>/分の湧水において, 孔内観察 ロボットの防水性能を確認し, 鮮明な画像が得られ, 地 質状況や湧水状況を確認することができた。6.5m地点ま では湧水の抵抗を受けながら走行することができた。孔 内映像と削孔データを比較したところ, 削孔データが推 定した通り, 孔壁に亀裂や崩れはなく, 良好な地山であ ることがわかった。

引き続き,ノンコア削孔検層孔に孔内観察ロボットを 適用し,長距離における孔内可視化の効果を確認する予 定である。

## 4.2 現場試行2(コアボーリング孔)

2車線道路トンネルの建設現場において、コアボーリン グ(PS-WL工法<sup>8</sup>)が実施された。コア観察から得られる地 質情報と、孔内観察や孔壁展開図の整合性を確認するた め、そのボーリング孔を用いて孔内観察ロボットを試行 した。以下にボーリング孔の詳細を示す。

- ボーリング内径:101mm
- コア径:45mm
- 地質:硬質なチャート
- 地山等級:CI
- 湧水量:0.12m<sup>3</sup>/分
- 削孔方向:上向き1度の排水勾配を付け、トンネル掘 進方向より左に3度の方向に削孔

4.2.1 孔内観察の状況 Photo 6に撮影した孔内状 況を示す。孔内は断面の9割以上湧水で満たされていたが,



Photo 5 ノンコア探査孔を撮影した孔内状況 Images of the Non-core Drilling Borehole



Fig. 3 深度4.8m地点の切羽写真(上)と切羽スケッチ(下) The Tunnel Face Picture(up) and Tunnel Face Sketch(under) at Depth 4.8m Point



Fig. 4 前れアーダ(上校:前れ速度,中校:送水庄, 下段:エネルギー指標値)



5m/分で定速走行できた。水質調査結果から湧水は鉄分 を含んでいることが分かっており、その鉄分を含んだ湧 水により、壁面の一部が茶色く変色していることを確認 した。孔口から20m地点では開口幅10mm程度の亀裂を連 続的に確認した。26m地点に開口幅30~40mmの亀裂があ り、気泡を伴う湧水の流入を確認した。孔内観察ロボッ トは、この地点の亀裂を乗り越えて通過することができ た。40m地点では、開口幅10mm未満の亀裂が多く存在し ており、凹凸の多い荒れた孔壁であった。59.7m地点に は開口幅50mm以上と推定される亀裂があり、奥への走 行が困難と判断し、中止した。

孔内観察により確認した地質は、これまでに切羽で確 認されていたチャート主体で構成されており、コア観察 結果と一致した。

孔内観察の所要作業時間は,往路と復路を含めて合計 26.5分であり,準備や片付けを含めると所要時間は1~1.5 時間程度であった。

#### 4.2.2 孔壁展開図とボーリング調査結果の比較

Fig.5に孔壁展開図の作成方法の概要を示す。撮影された 孔内画像(前方視)の一部をリング状に16マスに分割して 切り出す。台形状の各マスを正方形に幾何学変換して縦 に順番に並べることにより部分孔壁展開図が作成できる。 部分孔壁展開図を孔内観察ロボットが一定距離進むごと に作成しそれらを並べることで孔壁展開図が作成される。 カメラが回転した場合は、傾斜計の値より孔壁展開図を 補正し亀裂の走向傾斜や幅を算定できる。

亀裂の走向傾斜の算定方法をFig.6に示す。孔壁展開図 を作成し,亀裂が孔天と孔底を通過する点を見つけ,そ の2点間水平距離とボーリング径から傾斜角を算定する。 走向角も同様に,亀裂が右壁と左壁を通過する点を見つ け算定する。

Fig. 7にボーリング調査結果の例として深度7~11m区 間のコア写真と孔壁展開図を比較した結果を示す。地質 は硬質なチャートであり, 打撃を伴って削孔したため, コアは幅3~5mmほどのディスク状に割れて採取された。 深度8~8.5m区間ではコアが砕かれて細粒化したため、コ アが流出していた。そこで、コア流出部を孔壁展開図に よって確認したところ,その地点は周辺の孔壁との違い は見られず、その前後と同じ岩種であることが確認でき た。同様にFig. 8に示した深度30~34m区間では多くの亀 裂の分布が確認できた。コアは細粒化して乱されている ため、コアからは亀裂の走向傾斜を確認することはでき ないが、例として31m地点の亀裂の走向傾斜を孔壁展開 図より算定した結果、便宜上削孔方向を北と定義すると 走向N62°W, 傾斜61°Sとなり, 削孔角度を考慮すると走 向N65°W, 傾斜62°Sとなった。削孔方向に対して上り勾 配であるため、流れ目の亀裂となる。周辺の亀裂の走向 傾斜も同様の傾向を示しており, 切羽観察の結果でも 60°~80°の流れ目と評価されていた。

結果として、コア観察から得られる地質情報と、孔内 観察や孔壁展開図の整合性を確認でき、さらにコアの乱



Photo 6 コアボーリング孔を撮影した孔内状況 Images of the Core Borehole



Fig. 5 孔壁展開図の作成方法の概要 Outline of Creation Method of Unfolded Borehole Image



Fig. 6 走向傾斜の算定方法 Method to Calculate Strike and Dip of Crack

れが著しい場合は孔内観察が有効であることを示すこと ができた。

4.2.3 まとめ 孔内観察ロボットをコアボーリング 孔で走行試験を行った結果,59.7mまで到達することが 出来た。また,孔内観察および孔内を定速走行させて孔



The Borehole Core Photo and Unfolded Borehole Image at Depth 30~34m Section

壁展開図を作成することにより,コアの流出や細粒化し た地点の孔壁を確認できた。さらに,亀裂の走向傾斜等 の情報を得ることができ,ボーリング調査結果の信頼性 を向上させることができた。

## 5. まとめ

削孔長が100mを超える中尺のノンコア削孔検層孔の 可視化として孔内観察と孔壁展開を行うため、自走式孔 内観察ロボットを開発した。以下に、現場試行を通じて 得られた知見を示す。

- ノンコア削孔検層孔の孔内観察を行うことにより、ノンコア削孔検層で得られなかった風化・変 質や割れ目の状態等の脆弱性の原因を把握する ことができ、前方探査の信頼性向上に繋がること がわかった。
- 自走式孔内観察ロボットは、 φ85mm以上のボー リング孔に適用できるように設計した。
- 3) 自走式孔内観察ロボットをノンコア削孔検層孔 に適用した結果,鮮明な画像により地質状況や湧 水状況をリアルタイムに確認することができた。 削孔データと孔内映像を比較した結果,孔壁に亀 裂や崩れはなく良好な地山であることを確認した。
- 4) 自走式孔内観察ロボットをコアボーリング孔で 試行した結果,59.7mの走行を確認した。また, 孔壁展開図を作成することにより,コア写真から 得られなかった亀裂の走向傾斜が取得できた。

今後は、さらにノンコア削孔検層孔での適用を進めて いき、亀裂幅や分布の定量化やBIM/CIMへの展開も行っ ていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 藤岡大輔,畑浩二:簡易な孔内カメラを用いたノン コア削孔切羽前方探査の高精度化,土木学会第70回 年次学術講演会講演概要集,VI-684, pp. 1367-1368, 2015
- 畑浩二,杉浦伸哉,後藤直美,藤岡大輔:山岳トン ネルにおけるICTを活用した予測型CIMの開発,土 木学会論文集F3(土木情報学), Vol.71, No.2, II\_78-II\_85, 2015
- 3) 鈴木拓也,西野俊論,畑浩二,後藤隆之,中戸敬明, 木梨秀雄:トンネル工事で採用した予測型CIMの事 例について,土木建設技術発表会概要集2017, pp. 160-164, 2017
- 4) 桑原徹,畑浩二,赤澤正彦:ノンコア削孔調査による山岳トンネル切羽前方探査精度の検討,土木学会トンネル工学委員会,トンネル工学報告集第23巻, I-1, pp. 1-9, 2013
- 5) 土木学会:トンネル標準示方書[共通編]・同解説/[山 岳工法編]・同解説, pp. 47-51, 2016
- 6) 斎藤有佐,加藤直樹,木梨秀雄,高橋佳孝,伊藤哲: トンネル切羽前方高速ノンコアボーリングシステムの開発,土木学会第67回年次学術講演会講演概要 集,IV-030, pp. 59-60, 2012
- 7) 磐田吾郎,天野悟,桑原徹,木梨秀雄:高速ノンコ ア切羽前方探査技術の開発,土木学会トンネル工学 委員会,トンネル工学報告集第24巻,I-23, pp.1-7, 2014
- 8) 鉱研工業「PS-WL工法」: https://www.koken-borin g.co.jp/engineering/pswl/pswl.html, 2019.9.13確認