

多湧水花崗岩地山における 切羽前方探査技術の適用

秋田 伸治¹・木野村有亮^{2*}・木梨 秀雄²・桑原 徹³・畑 浩二³・渡辺 淳⁴

¹京都府道路公社建設事務所（〒626-0003 京都府宮津市漁師1775-26）

²株式会社大林組 生産技術本部トンネル技術部（〒108-8502 東京都港区港南二丁目十五番地2）

³株式会社大林組 技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸四丁目640）

⁴株式会社大林組 大阪本店（〒530-8520 大阪市北区中之島三丁目六番地32）

*E-mail: kinomura.yusuke@obayashi.co.jp

山岳トンネルの施工時に、切羽前方の地質を的確に予測することは安全かつ合理的な施工を行うために重要である。油圧ジャンボを用いたノンコア削孔による切羽前方探査は、先進コアボーリングや弾性波探査などと比較して施工サイクルへの影響を最小限に抑え、コスト面からも優れている。そこで本稿では、花崗岩地山のトンネルにおいて、当社開発の短尺及び中尺のノンコア削孔切羽前方探査技術を実施し、得られた結果から地山評価を行った。結果は以下のとおりである。1)脆弱部や断層部を定量的に事前予測できた。2)多量湧水区間を確認し、事前に地下水位を低下させることができた。3)地山等級を予測し、岩判定を最適時期に実施することで地山に適合した支保を施工できた。

Key Words : *investigation ahead of face, non-core drilling, water hammer drilling system, fault fracture zone, a large amount of water inflow*

1. はじめに

山岳トンネルの工事では、設計時の地質調査結果と掘削時の地質状況に大きな違いが出ることがしばしばある。したがって、トンネルの切羽前方を的確に予測することは安全で合理的な施工を行うために不可欠である。

トンネル掘削時には断層や熱水変質帯などの脆弱区間や小土被りの区間を対象にして、各種の前方探査を行うことが多い。切羽前方探査技術としては過去に様々な手法が試みられてきたが、調査可能な深度や精度、現場計測やデータ解析に要する時間などに問題があった。

また、地山等級や支保パターンは、先進ボーリングによりコア採取を行い、切羽前方の地質を直接確認したうえで決めることが多い。しかし、先進ボーリングをトンネル全線で実施する場合、ボーリング費用の増加やトンネル掘削作業の中断など問題が多い。このため作業時間の短縮とコストダウンが図ることができ、施工サイクルを乱さずに常時利用できる技術としては、油圧ジャンボに搭載されたドリフターを利用したノンコア削孔前方探査技術（削孔検層、穿孔検層、穿孔探査などとも呼ばれる）が多く適用されている。

本工事は多数の断層や脆弱ゾーンが予想されたため、全線でノンコア削孔検層を実施した。本論文では得られた削孔データに基づいた地山評価結果について述べる。

2. 工事概要

鳥取豊岡宮津自動車道は、周辺の主要道路を一体化させることを目的とした延長約120kmの地域高規格道路である。このうち、野田川大宮道路は京都府宮津市須津から京丹後市大宮町森本間に位置する一般国道312号バイパス道路である。

第14トンネルは国道312号バイパス道路の北西に位置する、全長1964mの2車線道路トンネルである。トンネル勾配は、終点側から起点側へ2.75～3%の下り勾配となっている。掘削工法はNATMで、主に発破掘削方式である。終点側から掘削した。

3. 地形・地質

本トンネル周辺には標高300m程度でトンネル軸と直交方向に延びる複数の尾根を有する丘陵があり、沢が発達している。また、両坑口付近は浸食や風化が進んでおり、深部まで強風化したマサ土となっている。周辺の基盤岩は白亜紀後期に形成された宮津花崗岩類で、このうち本トンネルの路線はほぼ全域が粗粒黒雲母花崗岩である（図-1）。谷沿いには沖積層が堆積しており、主に花崗岩起源のマサ土を主体とした砂質土から構成されている。

が少ない。これらにより、通常の地山で150mを1方（8時間）で削孔できる。ジャミングが伴う、孔壁が自立しない地山でドリルジャンボによる削孔をする場合、ビッドが地山につかまり削孔が不可能となるが、水圧ハンマでは悪条件でも長距離削孔が可能であるため今回採用に至った。

5. 結果・考察

(1) 正規化削孔速度比NVRによる評価

図-2、図-3 は坑口からの距離 TD と NVR の関係である。図-2 は切羽を見て左側を、図-3 は切羽を見て右側の前方探査結果である。また、 NVR を平滑化した結果もあわせて示す。図-2、図-3 の間には、全体的な傾向としては非常に類似しているものの TD の微妙な違いが認められる。これはトンネル軸方向に対して、花崗岩中の脆弱層や不均質区間が斜交していることに起因していると考えられる。坑口から 200m までのマサ土の不均質な脆弱区間を掘削の後、 $TD=600m$ および 840m 付近の脆弱層を経て相対的に良好な区間を通過し、終点坑口部の強風化帯に向かい NVR は徐々に大きくなり、脆弱度合いが高まっていると評価できる。図中の地山等級と NVR の範囲を表す凡例は、当現場における固有の値である。 NVR と地山等級の両者の関係は、当社における過去の適応実績に基づいた標準的な判定基準値とともに、各現場において 100m 程度の試行区間を設けることにより最適な判定値を決めている。

図-4 は切羽評価点 P を表している。図中の平均とは、左：中央：右の評価点を 1：2：1 の重みで平均して算出

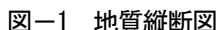


写真 1 高速ノンコアボーリングシステム削孔状況

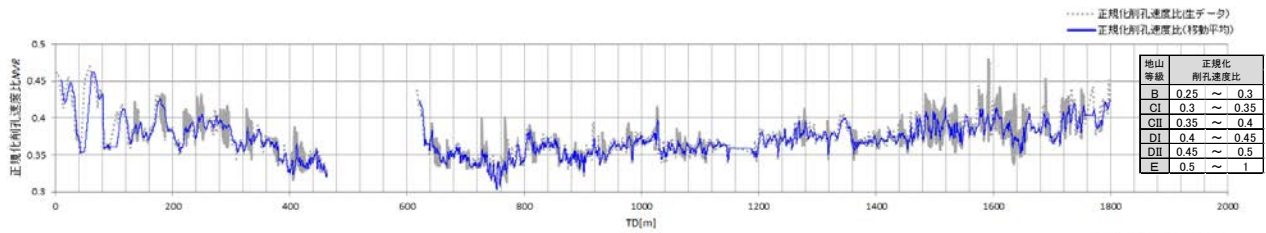


図-2 ノンコア削孔検層解析結果（切羽左側）

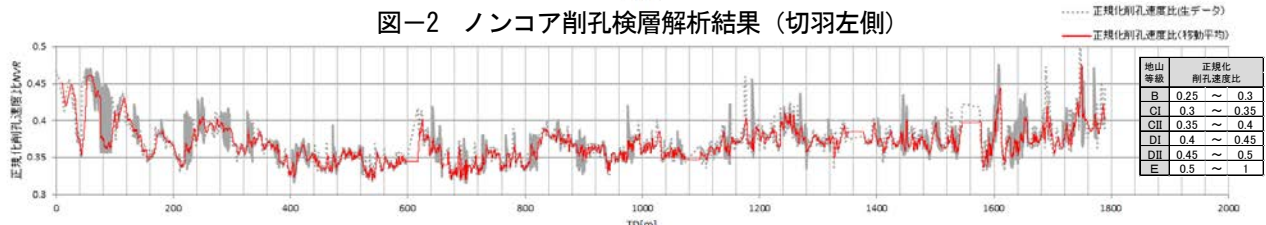


図-3 ノンコア削孔検層解析結果（切羽右側）

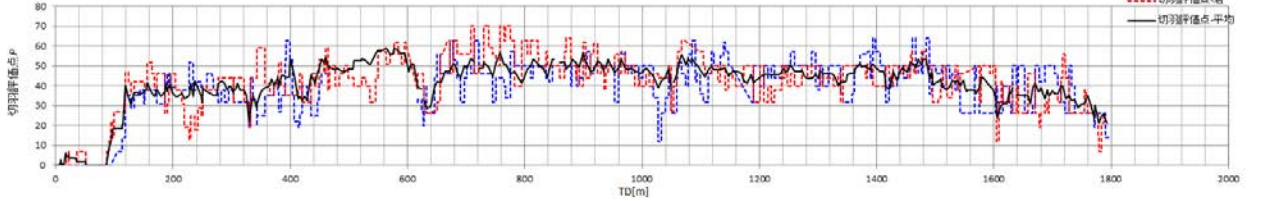


図-4 切羽評価点

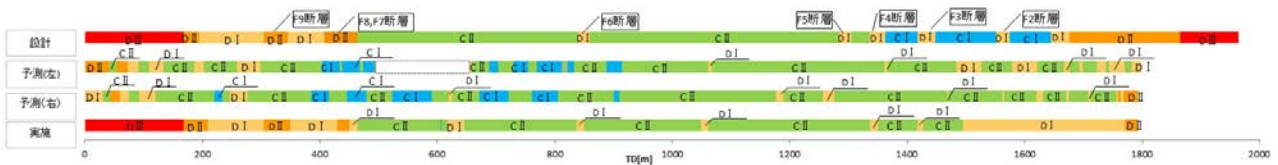


図-5 設計、予測（左、右）及び実施の掘削支保パターン

したものである。図-2、図-3と図-4を比較すると全体的にPが小さい区間でNVRが大きくなっており、Pが大きい区間においてNVRが小さい傾向が現れている。

図-5は設計、NVRによる予測（左、右）及び実施の掘削支保パターンを示している。TDにおける多少の違いはあるが、多くの範囲においてNVRによる予測と実施が一致している。実施パターンに対する予測の一致の割合は左が70%、右が65%であった。これはNVRから予測した支保パターンが実際の地山等級の変化に良く対応し、岩判定の重要な参考データとなることを示唆している。

b) F5, F6断層及び脆弱部におけるNVRの特徴

図-1に示すように想定されていた断層は全部で10カ所あり、それぞれ起点側からF1～F9およびF1'断層である。これらのF5及びF6周辺における探査結果について述べる。

図-6はTD=830～860mのノンコア削孔検層解析結果を表している。NVRがTD=837m付近で上昇しており、弱層が予想された。切羽観察の結果、F6断層（写真-3）と考えられる。当初の設計と比較すると、約13m終点側に寄っている結果となった。TD=850m付近でも脆弱部が検出されたが、切羽観察の結果、局所的な風化となっていた。

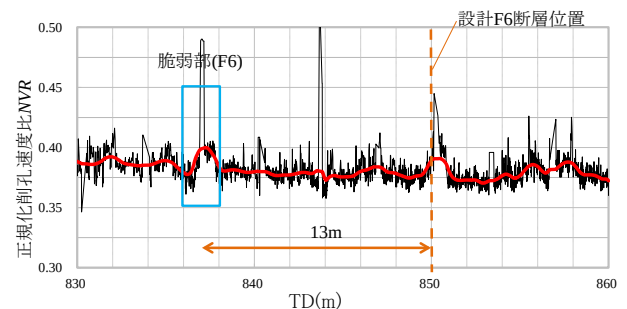


図-6 ノンコア削孔検層解析結果（TD=830～860m）

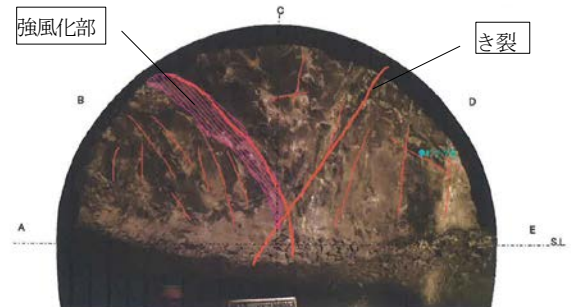


写真-3 切羽観察（TD=837）

図-7はTD=1365m付近のノンコア削孔検層解析結果を表している。NVRがTD=1340m付近で上昇しており、弱層があることが予想された。これは切羽観察の結果、F5断層（写真-4）と考えられる。断層位置を設計と比較すると、40m起点側にズレている。断層が想定されている場合、位置を捉えることが安全に施工するため重要で

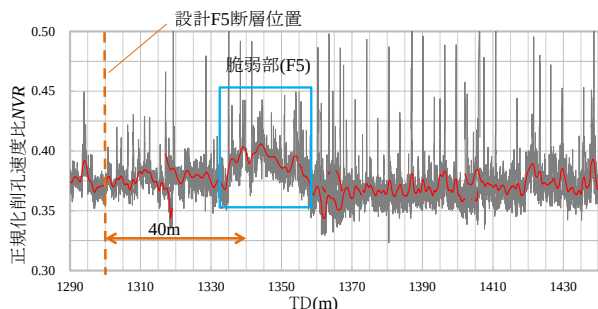


図-7 ノンコア削孔検層解析結果 (TD=1290~1440m)

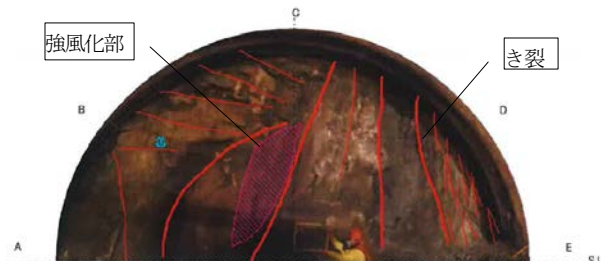


写真-4 切羽観察 (TD=1339m)

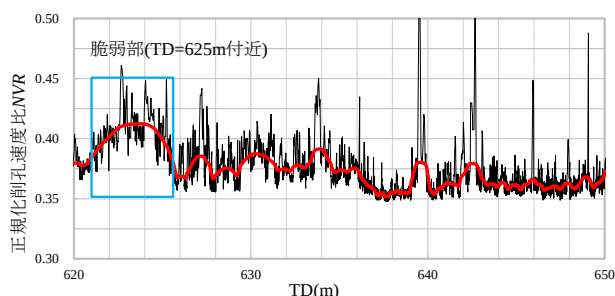


図-8 ノンコア削孔検層解析結果 (TD=620~650m)



写真-5 切羽観察 (TD=623m)

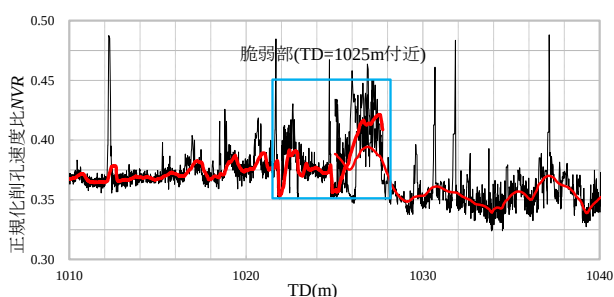


図-9 ノンコア削孔検層解析結果 (TD=1010~1040m)

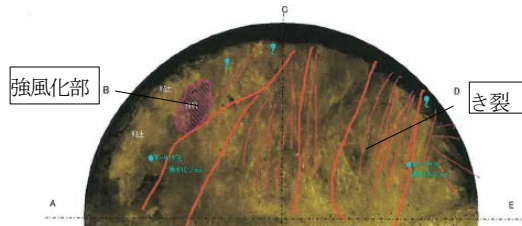


写真-6 切羽観察 (TD=1027m)

ある。ノンコア削孔検層によって事前把握したことで、岩判定を最適なタイミングで行い、断層部に適切な支保パターンを適用することができた。

図-8はTD=620~650m、図-9はTD=1010~1040mでのノンコア削孔検層解析結果を表している。設計段階において、この位置の断層や脆弱部は想定されていなかった。しかし、NVRがTD=620、1025m付近で上昇しており、脆弱部があることが予想された。そこで岩判定を行い(写真-5, 6)、支保パターンをDIに変更した。地山の脆弱な個所を予め予測しておくことで最適な支保パターン選定に繋がる。ノンコア削孔によってそれが推定できた。

c) 多量湧水箇所 (F2断層: TD=1485m付近) におけるNVRの特徴

当初より想定されていた緑閃岩貫入岩帯 (TD=1675m) の手前、TD=1485m付近において、ノンコア削孔検層中に最大で毎分1000リットルの湧水が発生した。これは設計時の位置から80m坑口側にずれているが、F2断層と判断した。

水抜きボーリング併用で、より詳細に脆弱部を把握するため、通常の左右2本に、新たに11本 (計13本) を加えてノンコア削孔検層を行った。

図-10はノンコア削孔検層解析結果及び削孔箇所の平面内での位置関係を示している。各箇所のNVRを整理するとTD=1500m付近に幅10mほどの脆弱帯があると予測できた。この脆弱部の切羽観察ではき裂も多く、風化変質を伴う大規模な脆弱箇所で崩壊リスクが高いと判断し、天端の安定対策として長尺フォアパイリングを採用した。

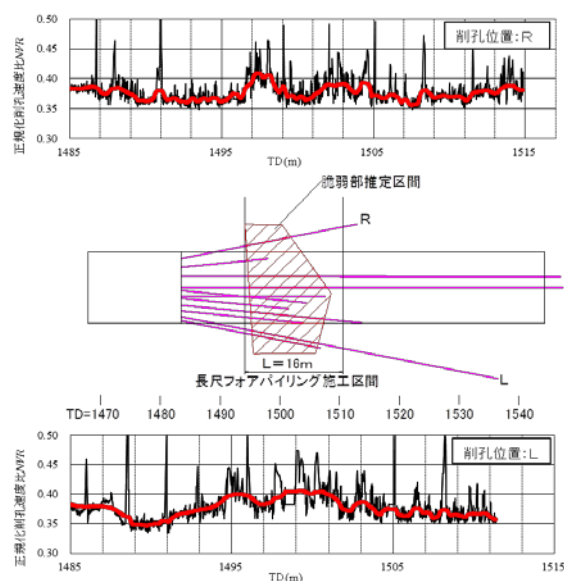


図-10 削孔位置とノンコア削孔検層解析結果の関係

(2) エネルギー指標値 E による評価

a) 閃緑岩貫入岩帯 (TD=1675m付近)

TD=1675m付近において、比抵抗探査の結果より多量の湧水が想定されていた。設計時に行った鉛直ボーリングコアの状態は非常に脆弱で、通常の油圧ジャンボによる検層では困難と判断した。そこで脆弱箇所でも長尺削孔が可能な水圧ハンマ削孔システムを採用した。

本トンネルにおいてTD=1620～1810mで水圧ハンマを適用し、水抜きボーリング兼用地山評価を行う。また、ノンコア削孔検層との比較を行った。

図-11は坑口からの距離 TD と水圧ハンマによる地山評価結果（エネルギー指標値 $E^{(3,4)}$ ）の関係を表している。 E は送水圧 P_a と振動数 f の積を、削孔速度 V で除したもので、下記の式(1)にて示す。

$$E = \frac{P_a \times f}{V} \quad \text{式(1)}$$

なお、水圧ハンマはダウンザホール方式で、先端で直接打撃するためエネルギーと岩石強度の相関が高いため NVR ではなく E を用いる。TD=1650、1690mで E が下がり、切羽評価点 P も同様に低下している。すなわち P の低い、脆弱な区間においては E が低下し、 P と E の両者の間には相関性が認められる。

図-12は、図-11と同じ区間におけるノンコア削孔検層解析結果である。図-12と図-11を比較すると、TD=1670～1700mの区間を除けば E と NVR は同様の傾向を

示している。これは NVR と同じように、 E を使用することで切羽前方の脆弱層をとらえることができることを示唆している。

一方、TD=1680m付近で採取したくり粉から、局部的に強風化した箇所が確認できた。TD=1670～1700mにおいて結果が一致しなかった要因としては、削孔位置が掘削断面より外側に行っており、掘削断面と位置的な乖離があったためと考えられる。

また、図-11でTD=1780m以降、 E が大きく下がっており、非常に脆弱な箇所があると推定される。この区間は掘削支保パターンもDIIとしており、水圧ハンマにより脆弱部を把握できたことがわかる。なお、ノンコア削孔検層を行ったところ、孔壁が崩れ、数メートル以降の削孔が不能になったが、その様な地山においても水圧ハンマでは単管削孔でも100mの掘削を行うことができた。

図-13は図-11と同じ区間における、区間湧水量を表している。TD=1650mで特に顕著な区間湧水量が確認されており、前方の脆弱部からの湧水を抜いていることがわかる。

6. まとめ

本報告では、ノンコア削孔による切羽前方探査を行うことで事前に脆弱部の位置を把握し、また地山の評価を定量的に推定した。それにより岩判定を最適な時期に行

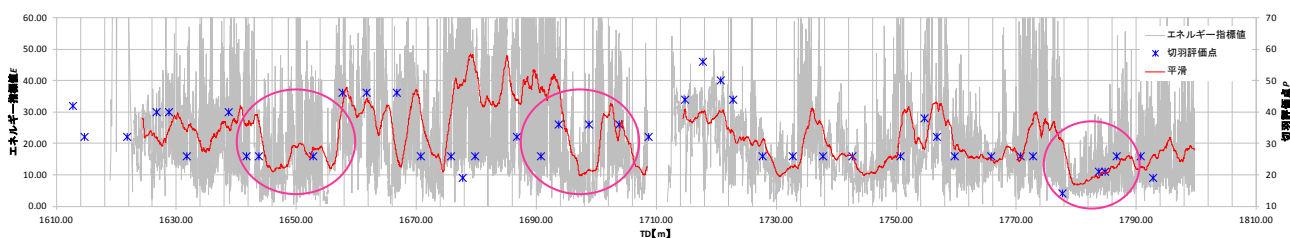


図-11 E と切羽評価点

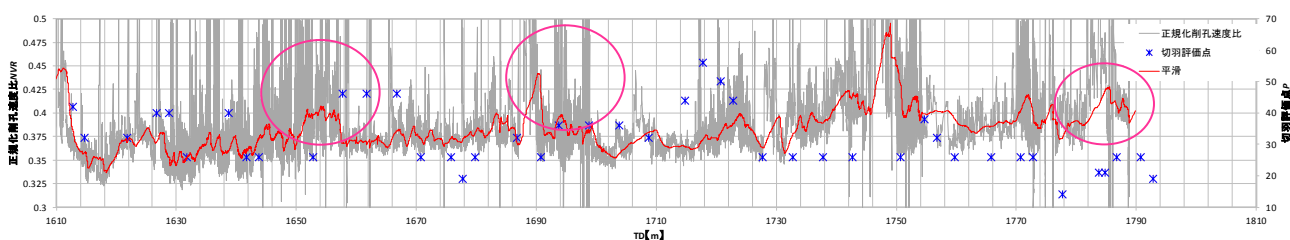


図-12 NVR と切羽評価点

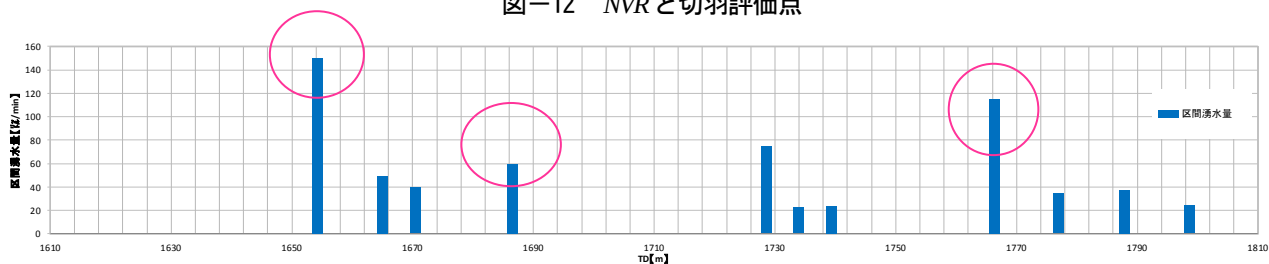


図-13 区間湧水量（湧水量増分）

い、地山に適合した支保パターンで施工できた。同様に、多量湧水帯においても、事前に位置を把握したことで水抜きボーリングを実施できた。

また、脆弱部において長距離のノンコア削孔検層と水抜きボーリングを兼用で施工できる水圧ハンマにおいても、事前に評価を行うことができた。これらのデータを蓄積していくことにより支保パターン選定の精度が向上し、さらには新規のトンネル工事に対しても既存のデータを有効に活用できると考えられる。

なお、油圧ジャンボを使用するノンコア削孔検層は、新たな搬出入等の手間がかからず、作業性が高い。一方、水圧ハンマは削孔能力が高く、また高速探査が行えるため、不良地山の長大トンネルにおいて能力を発揮できると考えられる。これら特性を踏まえて状況に応じた使い分けを行うことで、より安全で合理的な施工を行いたい。

参考文献

- 1) 桑原徹, 畑浩二, 稲川雄宣, 平川泰之: 変換解析システムによるノンコア削孔トンネル切羽前方予測技術, トンネル工学論文集第 18 巻, pp.1-10, 2008
- 2) 山崎貴之, 加藤建二, 後藤隆之, 黒川尚義, 桑原徹: 地すべり土塊を対象とした短尺・中尺ノンコア解析によるトンネル切羽前方探査, 土木学会トンネル工学委員会, トンネル工学報告集第 22 巻, pp.133-142, 2012
- 3) 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, VI-030, 2012.
- 4) 磐田吾郎, 斎藤有佐, 伊藤哲, 泉水大輔, 木梨秀雄, 天野悟: 高速ノンコアボーリングシステムによる前方探査技術の開発, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, VI-046, 2014.

APPLICATION OF NON-CORE DRILLING EXPLORATION AHEAD OF FACE IN GRANITIC ROCK MASS WITH LARGE WATER INFLOW

Yusuke KINOMURA, Hideo KINASHI, Toru KUWAHARA, Koji HATA,
Atushi WATANABE and Nobuharu AKITA

A new non-core drilling exploration system has been developed to predict the accurate location of fracture zones and the existence of water-bearing layer, and evaluate the ground condition with quantitative properties ahead of the face. In this paper, the benefit of the new drilling exploration system, with the result of application to the ground condition in granitic rock mass, were discussed. In this case, the system was conducted not only for investigation but also for dewatering since the rock mass has fracture zones and water-bearing layers in spots. By detecting fracture zones and dewatering, tunnel excavation was safely executed without abrupt water inflow and face collapse.