# ノンコア削孔トンネル切羽前方探査システム 「トンネルナビ」による軟弱地山の前方探査

桑原 徹1・中西隆司2・関山健一3・三橋賢久4

 <sup>1</sup>正会員 理博 (株)大林組 技術研究所(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
<sup>2</sup>正会員 (株)大林組 樽峠トンネル北工事事務所(〒424-0302 静岡市清水区小河内字上倉43-15)
<sup>3</sup>正会員 (株)大林組 本社土木本部(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟)
<sup>4</sup>非会員 国土交通省関東地方整備局 長野国道事務所中部横断自動車道出張所(〒389-0516 長野県東御市田中450-28)

山岳トンネルの前方予測技術として油圧ジャンボのドリフターを利用したノンコア削孔調査がある.本 論文では、フィード圧の影響を排除した「削孔速度変換解析システム」によるノンコア削孔調査の全体概 要を紹介し、未固結〜半固結状態の軟弱地山での実施例を報告する.

該当トンネルは第四紀層の火山礫凝灰岩層の地山から構成され,前方探査は約50m/回,探査区間は 800mである.その結果,弾性波速度1.0~1.8km程度の地山でも本解析システムが有効であることを確認 した.一方,硬岩~中硬岩とはやや異なる削孔記録も現れるので,削孔作業の管理,測定時のモニタリン グに留意し,データ解析や地山の解釈にはきめ細かい注意を払い,前方探査業務を完了できた.

キーワード:切羽前方探査,軟弱地山,ノンコア削孔調査,正規化削孔速度比

#### 1. はじめに

山岳トンネルの施工に際し、トンネルの切羽前方 の地質を的確に予測することは安全で合理的な施工 を行う上で不可欠である.山岳トンネルの前方予測 調査技術としては過去に様々な手法が試みられてき たが<sup>1)</sup>,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.その結果, 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 たノンコア削孔調査技術(削孔検層,穿孔検層,穿 孔探査など)に大きな期待が寄せられている.

ノンコア削孔調査は、ドリフターに搭載された専 用の計測システムを利用して、削孔時の機械データ を取得し、そのデータから切羽前方の地質特性を定 量的に評価するものである.一般的に、ノンコア削 孔では削孔速度(穿孔速度)、打撃圧、回転圧、フ ィード圧(以上は計測値)および打撃エネルギー (削孔エネルギー、投入エネルギーなどとも呼ばれ る計算値)が表示される.削孔速度や打撃エネルギ ーによる地山評価は、フィード圧や回転圧一定の大 前提があるが、不均質帯、亀裂集中帯、断層破砕帯 などの地質の悪い地山では、特にフィード圧が大き く変動してしまう場合が多い.このような場合、削 孔速度や打撃エネルギーは大きな変動を生じ、波形 のピークも多数現れ、どの変化が地山の変化に対応 しているのか、判断が難しい状況にあった.

筆者らは、各種の実験と詳細なデータ分析に基づき、フィード圧の変動影響を除去した削孔速度の変換解析システムを開発し、事例研究に基づき本解析システムの有効性を確認すると伴に、ノンコア削孔調査による新たな地山評価手法を提案してきた<sup>2)~7)</sup>.

従来は,硬岩~中硬岩の地山を対象にこの削孔速 度変換システムを適用してきたが,今回初めて未固 結~半固結状態の軟弱なトンネル地山の前方探査に 適用した.その探査結果と検証結果を報告する.

## 割孔速度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 ナビ」

## (1)システム構成と解析の流れ

測定・解析のシステム構成を図-1に示す.測定



図-1 「トンネルナビ」のシステム構成

に際しては、油圧ジャンボのドリフターに事前に専 用の計測システムを搭載しておく必要がある.前方 探査の距離は30~55m/回程度、測定時間は地山の状 態によるが平均2時間程度、10~14日毎に実施する ことが多い.

施工管理として利用する場合は,解析は工事事務 所用に開発した専用解析ソフトを使用する.解析・ 図化の自動化,操作の簡便性,短時間で作業の完了

(5分程度)を特徴とする.通常は、図-1の基本機能(断層などの検出、地山の硬軟判定、地山分類の 判定)で対応するが、必要に応じてさらにオプション機能も用いて、地山の評価を多面的に行うことが 出来る.

削孔速度変換解析システムの考え方は、2つの段階から構成される(図-2). すなわち、

STEP 1: 最初にノンコア削孔データからフィー ド圧~削孔速度との相関関係を明らかにする.

STEP 2: この相関関係を利用して、ノンコア削



図-2 削孔速度変換解析システムの考え方

孔時に常に変動しているフィード圧を一定にした場合のそれに対応する等価な削孔速度(換算削孔速度と呼ぶ)を計算する.これにより、フィード圧の変動影響を除去した条件で地山の評価が可能となる.

STEP 3: 次に,換算削孔速度を正規化・無次元 化した新しいパラメーター「正規化削孔速度比」を 計算する. 「正規化削孔速度比」は,フィード圧と 削孔速度を組み合わせて無次元化した新しいパラメ ータとも言える. 正規化・無次元化は,解析結果か ら分り易い地山評価を目指して取り入れたものであ る.

## (2) 削孔速度とフィード圧の相関関係

ノンコア削孔調査における削孔速度とフィード圧の関係を把握するために、大型岩石供試体(1×1× 2m)を利用した削孔実験<sup>2)</sup>、現場での削孔実験、既往 ノンコア削孔データの詳細な分析<sup>3)</sup>を行い、以下の 結論を得た.



図-3 フィード圧~削孔速度に関する概念図



すなわち、フィード圧が減少すると削孔速度も減 少、逆にフィード圧が増加すると削孔速度も増加す ることを確認した.この概念を図-3に示す.削孔速 度〜フィード圧の相関関係は、削孔速度Vの変化〜 フィード圧Fの変化( $\Delta V \sim \Delta F$ )の相関として捉え、 3次多項式の回帰式を得た<sup>3)</sup>(図-4).

## (3) 正規化削孔速度比

計算の手順と正規化削孔速度比の定義を示す<sup>3)</sup>. ただし,

*i*: i 番目の削孔データ

*F(i)* : フィード圧 (MPa)

*V(i)* : 削孔速度 (cm/min)

V'(i) : 換算削孔速度(cm/min)

実測フィード圧と基準フィード圧 
$$Fc$$
の差を計算  
 $\Delta F(i) = F(i) - Fc$  (1)

$$\Delta V(i) = a \left(\Delta F(i)\right)^3 + b \left(\Delta F(i)\right)^2 + c \Delta F(i) + d$$

(2)

(3)

*a,b,c,d*:係数 (図−4 中の相関式に相当) 換算削孔速度 V'の計算

 $\Delta F(i) \leq 0 \quad \text{total}, \quad V'(i) = V(i) + \Delta V(i)$ 

 $\Delta F(i) \ge 0$  ならば、 $V'(i) = V(i) - \Delta V(i)$  (4) 正規化削孔速度比の計算

ここで適当な閾値と定数を設定して,新しい削孔 パラメーター「正規化削孔速度比」を以下に定義した.

正規化削孔速度比 NVR(i)

	` '
=(V'(i) + A) / (V'(max) - V'(min))	6)

ここで, 0.0≦*NVR(i)*≦1.0, *A* : 定数

以上のようにして求められた正規化削孔速度比の 増減パターンは、切羽で観察された地山の硬軟の変 化と良く対応し、断層破砕帯、亀裂集中帯、風化・ 熱水変質帯の分布や掘削実績による地山分類の変動 とも良く対応していることを事例研究により検証し てきた.

これらの事実に基づき,正規化削孔速度比と地山 分類との関係を提案している.**表**-1はその標準案<sup>3)</sup> である.各現場で前方探査を実施する際には,この 標準案を参考にしながら、2~4回程度の試行を行い, その地山に適した関係を構築する.地質条件による 差異も認められるが,たとえば0.35≦CII<0.40が基 準であるが,地質条件によっても概ね0.325≦ CII<0.375,あるいは0.375≦CII<0.425程度の範囲に 収まることが多い.

正規化削孔速度比~切羽の地質~湧水・変状・崩 落状況~補助工法実施内容の関係についても情報を 蓄積中である.断層破砕帯や脆弱な頁岩層などの地 山においては,正規化削孔速度比の変動傾向と補助 工法実施内容について一定の傾向が認められており, 将来補助工法の施工やその時期の判定に役立つ可能 性がある<sup>3</sup>.

以上が図-1に示す解析の基本機能となる.

表-1	ノ	ンコ	ア削孔	によ	る地口	山分類	(案)
-----	---	----	-----	----	-----	-----	-----

正規化削孔速度比	相対的に均質な区間 (※1)	断層・破砕帯による不均質性 や力学的異方性を示す区間 (※2)		
0.45~	DII			
0.40~0.45	DI	DII ヘランクダウン		
0.35~0.40	CII	DI ヘランクダウン		
0.30~0.35	CI	CII ヘランクダウン		
~0.30	В	CI ヘランクダウン		

(※1) 正規化削孔速度比が平均的な値に対して±0.025程度の範囲に収まり, あまりばらつかない区間. (※2) 正規化削孔速度比の平均的な値に対してノイズ的な値が頻発し,著しく ばらつく区間.





図-5 正規化削孔速度比~岩石物性の相関

## (4) 正規化削孔速度比と岩盤物性の相関

次に、図-1に示す解析のオプション機能について 述べる.オプション機能は、主に正規化削孔速度比 と岩盤物性の相関性を利用して、前方探査に有効な 地山特性を新たに評価しようとするものである.

ノンコア削孔調査に併せてトンネル切羽から岩石 試料を採取し、室内試験結果に基づき、以下のよう な正規化削孔速度比~一軸圧縮強度、単位体積重量、 弾性波速度の室内試験結果の相関を得た<sup>5)</sup>(図-5).

#### (5) 地山強度比の算定

押し出し性地山あるいは膨張性地山では、トンネ ル切羽の安定性を判断する指標の一つとして「地山 強度比」がある.地山強度比は掘削地点での,地山 強度(地山の一軸圧縮強度)と,そこでの地圧の大 小関係を表し、切羽の安定性を判定するための指標 である.実際には地圧の測定は簡単ではないの で、"一軸圧縮強度/土被り圧"から得られる比の 値により判断される. しかし切羽前方においてこ れらのパラメーターを事前に把握することは簡単で はない. 例えば、試験体に含まれる亀裂の影響によ り検討に必要な場所で強度試験等が適切に実施でき ない場合が少なくない. 試験に際しては、ボーリン グ掘削あるいは切羽から岩石試料を採取し必ずコア 整形と室内試験が必要となるので、施工に対してリ アルタイム的な判断は難しい. また実データが得ら れたとしても離散的にならざるをえない.

一方,連続的なデータであるノンコア削孔データ を利用して地山強度比を推定できれば,地山中での 連続的な地山強度比の変動を得ることが出来るので, 膨張性地山や断層破砕帯などの弱層部を含む区間の 予測技術として有効と考えられる.

ノンコア削孔による地山強度比は,ノンコア削孔 のデータサンプリング毎に,式(7)から求める<sup>5),6)</sup>.

地山強度比=*oc(i)* / (*y(i)*・*H(i)*) (7) ただし,*i*:i番目の削孔データ,*oc(i)*:地山の一軸 圧縮強度(kN/m<sup>2</sup>),*y(i)*:地山の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>),*H(i)*:土被り高さ(m).*oc(i)*および*y(i)*は図-5中の該当する相関式から計算し,*H(i)*はトンネル の設計図書(トンネル縦断面図)から読み取る.

#### (6) 弾性波反射率の算定

弾性波の反射率を利用して断層破砕帯や亀裂集中 帯,地層境界面,貫入岩の位置などを推定できる. この考えを利用した前方探査技術がトンネルHSP法 やTSP法と呼ばれる坑内弾性波探査である.このよ うな坑内弾性波探査は,比較的岩質が均質で岩盤中 の亀裂や断層が少ない欧米などでは適用可能とされ ているが、日本のように地質構造が複雑、岩質が不 均質、亀裂が多い地質条件では、探査結果の地質的 評価が難しかった.従来の地質展開図による坑内弾 性波探査の検証方法に加えて、ノンコア削孔調査に 基づく弾性波反射率によるクロスチェックの有効性 を確認している<sup>6,7)</sup>.一次元的なノンコア削孔調査 と二次元~三次元的な坑内弾性波探査の組合せは前 方探査として期待されるが、坑内弾性波探査の精密 な地質評価法の確立が今後の研究課題である.

ノンコア削孔データによる反射係数は,式(8) から求める.

反射係数  $r(i) = (\gamma(i+1) Vpc(i+1) - \gamma(i) Vpc(i))$ /( $\gamma(i+1) Vpc(i+1) + \gamma(i) Vpc(i)$ ) (8)

ただし,*i*:i番目の削孔データ,*Y(i)*:地山の単位 体積重量(kN/m<sup>3</sup>),*Vpc(i)*:コア試料の弾性波速度 (km/s).*Y(i)*および*Vpc(i)*は,図-5中の該当する相関 式から計算する<sup>6,7)</sup>.

#### (7) 適用状況

現時点での適用事例(研究用および実適用物件, 実施予定物件も含む)は合計12件,探査区間の総延 長は約18kmである.調査対象の地質条件は,付加体 (砂岩・頁岩・互層など)3件,断層破砕帯(圧砕 岩)1件,花崗岩4件,火山岩〜凝灰岩類(新第三紀 〜第四紀層の軟岩,軟弱地山)4件である.

## 3. 臼田トンネルの工事概要

中部横断自動車道は,静岡県静岡市(旧清水市) から長野県佐久市に至る延長約150kmの高速道路で あり,北関東自動車道・上信越自動車道と一体とな



図-6 臼田トンネル 位置図



図-7 地質断面図(当初想定断面図)

り東京から100~150km圏を環状に連結する路線である.今回報告する臼田トンネル工事は中部横断自動 車道の一部であり,長野県佐久市に位置している (図-6).

本工事の概要を以下に示す.

- ・工事名称 中部横断自動車道 臼田トンネル工事
- ・工期 平成19年3月6日~平成21年8月31日
- ·工事場所 長野県佐久市下小田切地先
- ・施工会社 (株)大林組
- ·施 主 国土交通省関東地方整備局
- ·工事管理 関東地方整備局 長野国道事務所 中部横断自動車道出張所

・工事内容 トンネル800m(2車線),標準部 内 空幅12.4m,高さ8.1m,非常駐車帯(2箇所)内空 幅13.7m,高さ8.2m. その他,明かり区間を含む.

## 4. 臼田トンネルの地質概要

#### (1) 地質概要

当該トンネルは八ヶ岳連峰東側の山麓斜面の末端 部に位置している.地質は第四紀更新世の八千穂層 群と呼ばれる湖沼~河川堆積物と火山噴出物から構 成されている.

トンネル地山では,表層から深部に向かって,未 固結~半固結状の軟質な火山礫凝灰岩層(Ylt1層), 良く固結し比較的硬質な火山礫凝灰岩層(Ylt2層), 未固結~半固結状でシルト分および軽石を多く含む 火山礫凝灰岩層(Ylt3層)が分布している(図-7). 前方探査を含めた地質の全体は、図-8に示す.

#### (2) 切羽観察

当初設計では、切羽においては未固結~半固結状のYlt1層やYlt3層が多く現れると予想された.しかし、掘削結果ではYlt1層は認められず、また距離0~505mまではYlt2層とYlt3層が見られたが、505~800mでは固結状態のYlt2層のみとなり、全体として地山は当初設計よりも良い状態で推移した.

**表-2**に支保パターンに対応する補助工法などを示 す.支保パターンと切羽評価点の関係は図-8-(b)に 示す.両坑口付近を除いて,概ね,Y1t2層とY1t3層 が見られる場合はDII,Y1t2層のみの場合はDIと判 表−2 支保パターンおよび補助工法

支保 パターン	鋼製 支保工	ロック ボルト	長尺鋼管 (AGF) 先受工	注入式 鏡ボルト (GFRP)
DIII-a	H-200	0	0	0
DII- LL, LR	H-200	0	_	_
DII-s	H-150	0	0	0
DII	H-150	0	—	—
DI-b	H-125	0	_	_







#### 写真-1 切羽の地質状況



#### -226-

定した. 掘削は全線において機械掘削による上半先 進ベンチカット工法である.

Y1t2層~Y1t3層からなる切羽断面を示す.写真-1-(a)は距離115m,支保パターンDII,切羽評価点 22.5である.写真-1-(b)は距離410m,支保パターン DII-LL,切羽評価点19である.いずれも切羽の中央 部~天端部には,固結~半固結の火山礫凝灰岩Y1t2 層が見られる.中央部~下部付近には未固結の凝灰 岩層(Y1t2層)が見られる.未固結地山はバックホウ で容易に掘削可能で,切羽面にはバックホウの爪跡 が残る.一方,火山礫凝灰岩にはブレーカが必要で あった.湧水は天端付近,脚部に滲む程度見られた.

**写真-1-(c)**にY1t2層のみからなる切羽断面を示す. 距離640m,支保パターンDI-b,切羽評価点32.5で, 切羽は固結~半固結の火山礫凝灰岩である.ブレー カ掘削を行ったが,掘削後ブレーカの掘削跡が残っ た.湧水はほとんど見られず,切羽は自立している.

#### (3) 弾性波探査

事前調査で実施された高密度弾性波探査の結果を 考察する(図-8-(a)). トンネル深度での弾性波速 度は0.75~2.00km/secに及ぶが、1.4~1.8km/secの 区間が多い. 切羽付近での地質構成は、下位の未固 結~半固結状態のYlt3層の上に、固結状態のYlt2層 がほぼ水平に分布するという特徴を示す. したがっ て,屈折法弾性波探査では,Ylt2層に対して相対的 に弾性波速度の低いYlt3層の分布(弾性波速度の逆 転現象)を解析出来ていない可能性も高い.このよ うな観点から弾性波速度をみると、距離520~800m のYlt2層(DI級)分布区間では妥当な結果が得られ ているが、Y1t2層とY1t3層の両者が現れる0~520m 区間は複雑である. 50~185mおよび435~520m区間 では前出の理由から、低速度のYlt3層の分布を解析 出来ていない.一方,185~435m区間ではYlt1層と Ylt3層に挟まれた速度の高いYlt2層が薄いためか

(弾性波探査でいうブラインド層),速度の低い DII級地山としての解析結果が得られている.

## 5. 前方探査の実施状況と結果

従来のノンコア削孔調査が硬岩~中硬岩で実施さ れてきたのに対して、今回の調査は初めて未固結~ 半固結の軟弱地山が対象という点で技術的には大き な特徴がある.

前方探査は約50m/回,合計18回,探査区間はト ンネル全線800mである.削孔位置は,SLの上1.5m, トンネル中心から向かって左側へ4mの位置で,上向 き5度で削孔を行った(図-9).

正規化削孔速度比(本章では,以下「速度比」と 記す)の特徴として以下の3つの点が,従来の研究 から判明している.

地山が軟弱・弱層であるほど速度比は大きく,逆 に新鮮・硬質であるほど小さくなる.

断層破砕帯, 亀裂集中帯, 不均質帯では, 速度比 はばらつく傾向にあり, 均質な部分では一定してい る.

中硬岩~硬岩の地山では,道路トンネルの地山分類と速度比の関係について標準的な関係を提案している(表-1).

前方探査の詳細結果を図-8-(c)に示す. 解析結果 の図中には,破線で解析の元データが,太実線で平 滑化されたデータが示されている.全体的な傾向は 太実線の平滑化データで,局部的な不均質性などは 破線の元データも加味して判断する.これらの結果 は,以下のようにまとめられる.

なお,以下の区間は速度比の変動傾向を説明する ための便宜的な区間分けであり,速度比による地山 区分の区間ではない.

区間A(距離0~100m): 速度比は0.54から0.40 まで低下しており、この変化は支保パターンの変化 (DIII-a  $\rightarrow$  DII-s  $\rightarrow$  DII)および切羽評価点の増 加に一致している.

区間B(距離100~525m): DII区間であるが, 速度比の変動が非常に大きい.この原因としては, 切羽が不均質な火山礫層であるために,削孔位置が マトリックスの軽石凝灰岩質砂層であるか安山岩の 礫(10mm程度)を含む部分であるかにより違いが大 きい,また削孔位置がY1t2層とY1t3層の境界付近に あるためにばらつきが大きくなりやすい,などの条 件によるものと推察される.



図-9 切羽での前方探査作業

その中で区間B-1 (距離180~260m) では速度比が 0.55を超えるようなピークを生じているが,これは 切羽評価点の低下区間(距離200~210m)や,やや ずれるが弾性波速度の低速度区間(Vp=1.20km/sec, 距離250~280m)に対応している.

また区間B-2(距離350~500m)では速度比が0.55 に近いピークを生じており、これは切羽評価点の低 下区間や、弾性波速度の低速度区間(Vp=1.40km/ sec,距離400~435m)と一致している.これら2ヶ 所は、当初推定された6箇所の低速度帯の一部であ る.

区間C(距離525~600m): 速度比は0.50から, 大きな変動を含みながらも0.425まで低下している. この変化は、支保パターンの変化(DII  $\rightarrow$  DI-b)お よび切羽評価点の増加に一致している.

区間D(距離600~800m): 速度比は0.425から 0.600まで増加しており、この変化は支保パターン の変化(DI-b → DIII-a)および切羽評価点の低下 に一致している.なおDI-bのY1t2層中でも速度比の ばらつきは少なくないが、これも安山岩の礫(最大 50mm)に伴う不均質性に負うものと考えられる.

以上から,正規化削孔速度比の変動傾向は,大き く見ると地山の変化,支保パターンと対応している が,未固結~半固結地山に特有な大きなばらつきも 生じている.したがって,今回の記録から正規化削 孔速度比と地山分類(支保パターン)との関係を定 めることは難しいが,次回の適用に向けて以下のよ うな目安が考えられる.

DIII: 0.55 以上

- DII : 0.475~0.55
- DI : 0.475 以下

今後の事例調査によるデータの蓄積が必要である.

#### 6. まとめ

本論文では、「削孔速度変換解析システムによる ノンコア削孔切羽前方探査技術」の全体概要を紹介 すると伴に、軟弱地山での実施例を報告した.

該当トンネルは第四紀層の未固結~固結凝灰岩類 の地山から構成され,前方探査は約50m/回,18回 行った.探査区間は800mである.

本解析システムは,硬岩~中硬岩を対象に開発し てきたが,基本的には現状のまま未固結~半固結地 山(屈折法弾性波速度1.0~1.8km)でも有効である ことを確認した.

一方、硬岩~中硬岩とはやや異なる削孔記録も現

れるので,削孔作業の管理,測定時のモニタリング に留意し,データ解析や地山の解釈にはきめ細かい 注意を払い,前方探査業務を完了できた.

前方探査の検証は、切羽観察、切羽評価点、弾性 波速度などを利用して行った.

前方探査の結果(正規化削孔速度比の変化)は, 大きく見ると地山の変化と対応していたが,未固結 ~半固結地山に特有な大きなばらつきも含まれ,地 山分類に関しては今後の課題となった.

従来の硬岩~中硬岩では、軟弱区間(坑口風化帯, 断層破砕帯,風化変質帯など)でもDI~DIIに相当 する結果しか得られなかったが,未固結~半固結地 山ではDIIIに該当する結果が一般的に得られること を初めて確認できた.

#### 参考文献

- ジェオフロンテ研究会 新技術相互活用分科会 前方探査WG:トンネル切羽前方探査技術 技 術資料, 1997.
- 2) 稲川雄宣、畑 浩二、桑原 徹、中岡健一: ノンコア削孔による切羽前方予測技術の基礎的研究 -大型花崗岩供試体を利用した削孔実験-、 土木学会トンネル工学委員会、トンネル工学報告集第16巻、pp.107-112,2006.
- 3) 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,土木学会トンネル工学委員会, トンネル工学論文集第18巻, pp.1-10, 2008.
- 4) 桑原 徹,畑 浩二,林下敏則,小野寺 仁, 田中幸一:削孔速度解析システムによる花崗岩 地山でのトンネル切羽前方探査,土木学会第64 回年次学術講演会,第VI部門,pp.577-578, 2009.
- 5) 桑原 徹,畑 浩二,玉井昭雄,田湯正孝:ノ ンコア削孔トンネル切羽前方探査による地山強 度比の推定,土木学会トンネル工学委員会,ト ンネル工学報告集第19巻, pp.145-156, 2009.
- 6) Kuwahara T. and Hata K. : Geological Prediction Ahead of the TunnelFace by the Exploration Drilling System During the Tunnel Excavation, ITA-AITES 2010 World Tunnel Congress, 2010.
- 7) 桑原 徹,畑 浩二,玉井昭雄:ノンコア削孔 切羽前方探査と坑内弾性波探査,土木学会第65 回年次学術講演会,第VI部門,2010.