

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

桑原 徹¹・畑 浩二²・玉井昭雄³・田湯正孝⁴

¹正会員 理博 株式会社大林組 技術研究所地盤技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
E-mail: kuwahara.toru@obayashi.co.jp

²正会員 工博 株式会社大林組 技術研究所地盤技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

³正会員 工修 株式会社大林組 名古屋支店 土木工事部 (〒461-8506 愛知県名古屋市中区東桜
1-10-19 大林組名古屋支店ビル)

⁴非会員 株式会社大林組 東京本社 御坂トンネル西JV工事事務所 (〒405-0074 山梨県
笛吹市一宮町国分948-1)

山岳トンネルにおけるノンコア削孔切羽前方探査において、筆者ら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」を開発し、事例研究を通じて本解析システムの有効性を確認してきた。本論文では、本解析システムから導かれた新しいパラメータ「正規化削孔速度比」の水平展開として、正規化削孔速度比と岩盤物性との相関性を利用して、ノンコア削孔による切羽前方の地山強度比の推定方法を提案した。事例研究では、正規化削孔速度比による地山評価を検証した上で、正規化削孔速度比から算定された地山強度比の妥当性を、切羽から採取された岩石試料の物理力学試験結果に基づいて検証した。これにより、削孔速度変換解析システムが弱層部を含む押し出し性区間の予測技術としても有効であることが、明らかになった。

Key Words : *tunnel excavation, geological characteristics ahead tunnel face, drilling logging, normalized drilling velocity ratio, Competence Factor in Tunnel Rock Mass*

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。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¹⁾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。結果として、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、穿孔探査等とも呼ばれる)に大きな期待が寄せられている。

ノンコア削孔調査は、ドリフターに設置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。ノンコア削孔データの評価に際しての理論的背景は、Hustruid et al²⁾ ほかによって資源分野で発展した削孔理論による。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、断層破碎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、大型岩石供試体を利用した削孔実験³⁾、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を行い、特にフィード圧の影響を考慮した削孔速度の変換解析システムを開発した⁴⁾。ノンコア削孔調査ではフィード圧は常に変動しているが、仮にフィード圧を一定に出来た場合、それに対応する仮定の削孔速度(換算削孔速度と呼ぶ)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はずである。このシステムでは、現場での削孔データから削孔速度～フィード圧の相関を抽出し、換算削孔速度を求め、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」を定義した。この「正規化削孔速度比」を利用した前方探査とその検証について事例研究を行い^{4),5)}、本解析システムの有効性を確認した。

ところでノンコア削孔調査の対象としては、地山の硬軟（風化変質帯、亀裂集中帯、断層破碎帯など）や地山分類の判定、湧水予測などがあるが、押し出し性地山あるいは膨張性地山では地山強度比に代表されるような膨張性指標の判定もまた前方探査の対象と考えられる。地山強度比による地山評価は、① 設計段階で事前の調査結果を用いて設計検討に利用する場合、② 施工中に軟弱な地山に遭遇した場合、がある。地山強度比は地圧と地山強度から計算されるが、切羽前方においてこれら2つ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であるので、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碎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。

本論文では、「正規化削孔速度比」と岩盤物性との相関性を利用して、ノンコア削孔による切羽前方の地山強度比の推定方法を提案する。すなわち、正規化削孔速度比による地山分類の推定に加えて、同時に地山強度比も計算して、地山特性の判定に利用しようとするものである。

これにより、前方予測区間において、従来の離散的な地山強度比のデータ分布に対して、連続的な地山強度比のデータ分布によって、判定の精度を上げることが出来る。

2. 削孔速度変換解析システムによるノンコア削孔データ解析方法と正規化削孔速度比

削孔速度変換解析システムによるノンコア削孔データの解析方法の概要を以下に示す。詳細は既往文献⁴⁾を参照されたい。

(1) 解析の流れ

解析方法は2つの段階に分かれる（図-1）。すなわち、

- 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 1）。
- ② この相関関係を利用して、ノンコア削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仮定の削孔速度（換算削孔速度と呼ぶ）を計算する（STEP 2）。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。
- 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（STEP 3）。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。

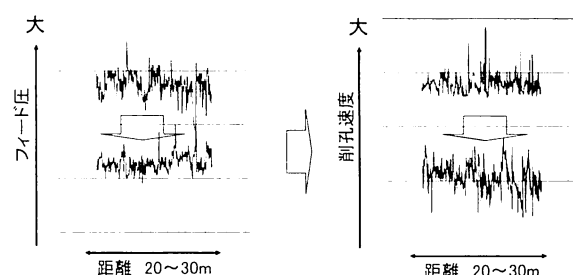


図-2 フィード圧～削孔速度の概念図

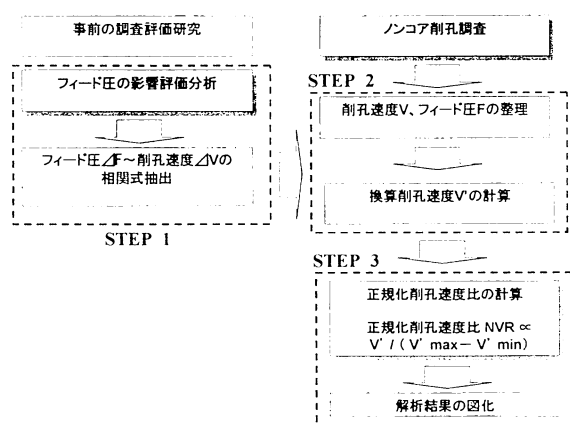


図-1 解析の流れ

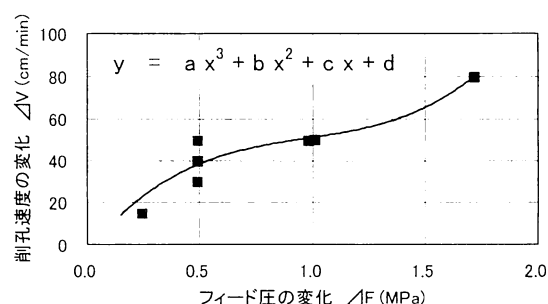


図-3 フィード圧～削孔速度の関係

(2) 削孔速度とフィード圧の相関関係

削孔速度とフィード圧の関係を把握するために、以下の3つの段階を経て検討を行った。

- ① 均質な大型花崗岩供試体(1×1×2m)を用いた、各種削孔パラメーターに基づく削孔実験の実施。
- ② 岩質条件がほぼ同様と推定される区間において、フィード圧を段階的に変えたトンネル切羽での削孔実験の実施。
- ③ 同一区間（ほぼ同じ地質・岩質条件）で繰り返し測定した既往ノンコア削孔データの詳細分析の実施。

以上の検討から、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。これを概念的に示すと図-2 のようになり、フィード圧と削孔速度の変化に関して一定の関係が得られることが期待できる。

削孔速度～フィード圧の相関関係は、前出② 現場削孔実験および③ 既往ノンコア削孔データの分析結果をまとめて、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、回帰用データをプロットし、3 次の多項式の回帰式を作成した (図-3)。

(3) 正規化削孔速度比の定義と算定

削孔速度 V (測定値) に対して、フィード圧4.9MPaにおける削孔速度を基準として、これを換算削孔速度 V' とする。換算削孔速度 V' を求めるために、上記の削孔速度～フィード圧の3次多項式を補正式として利用する。

計算の手順と正規化削孔速度比の定義を示す。

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)

- ① 実測フィード圧と基準フィード圧の差を計算

$$\Delta F(i) = F(i) - 4.9 \quad (1)$$

- ② 換算削孔速度 V 計算のための補正値を計算

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

a, b, c, d : 係数 (図-3 中の相関式に相当)

- ③ 換算削孔速度 V' の計算

$$\Delta F(i) \leq 0 \quad \text{ならば, } V'(i) = V(i) + \Delta V(i) \quad (3)$$

$$\Delta F(i) \geq 0 \quad \text{ならば, } V'(i) = V(i) - \Delta V(i) \quad (4)$$

- 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 $NVR(i)$

$$\propto V'(i) / (V'(max) - V'(min)) \quad (5)$$

$$= (V'(i) + A) / (V'(max) - V'(min)) \quad (6)$$

ここで、 $0.0 \leq NVR(i) \leq 1.0$, A : 定数

以上のようにして算定された正規化削孔速度比の増減

パターンは、切羽で観察された断層破碎帯の分布や掘削実績による地山分類の変動と良く対応していることが確認出来ている^{4),5)}。

3. 正規化削孔速度比に基づく地山強度比の算定方法

(1) 地山強度比の算定方法の流れ

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、地山の一軸圧縮強度と、そこでの地圧 (≒土被り圧) の大小関係から、切羽の安定性を判定するための目安としての指標である。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。硬岩ではあまり関係ないが、中硬岩～軟岩～土砂あるいは断層部などの地山では、地山強度比もよく利用される。

地山強度比は、以下の式(7)で求める。

$$\text{地山強度比} = \sigma c / (\gamma \cdot H) \quad (7)$$

ただし、

σc : 地山の一軸圧縮強度(kN/m²): 地山の一軸圧縮強度 σc は、亀裂などが無視できる地山ではコア試料の一軸圧縮強度 qu をそのまま適用し、 $\sigma c = qu$ として取り扱う。

γ : 地山の単位体積重量(kN/m³): コア試料の単位体積重量測定により求める。

H : 土被り高さ(m): 設計図書 (地質断面図) に基づく。

一方、地山の一軸圧縮強度 σc は、亀裂の影響を考慮した準岩盤強度 qu' の項に差し替えて、式(9)により地山強度比を求める場合もある^{6),7)}。

$$\text{準岩盤強度 } qu' = qu \cdot (V_p / V_{pc})^2 \quad (8)$$

(ただし、 $V_p \leq V_{pc}$)

$$\text{地山強度比} = [qu \cdot (V_p / V_{pc})^2] / (\gamma \cdot H) \quad (9)$$

軟岩などでスレーキングや土被りなどの関係で $V_p \geq V_{pc}$ となる場合は、 $V_p / V_{pc} = 1$ として地山強度比を求める。

ただし、

V_p : 地山の弾性波速度(km/s): 設計図書 (地質断面図) に示された原位置での弾性波速度の測定結果による (調査設計段階で実施された屈折法弾性波探査あるいは高密度弾性波探査から解析されたP波速度)。

V_{pc} : コア試料の弾性波速度(km/s): 室内でのP波超音波速度測定結果により求める。

次に、正規化削孔速度比を利用した地山強度比計算の手順を示す。ノンコア削孔におけるデータサンプリング毎に、式(7)あるいは式(9)の計算に必要な項を以下のように求めて、地山強度比を算出する。

1) V_p : 地山の弾性波速度(km/s), H : 土被り高さ(m) はトンネルの設計図書 (トンネル縦断面図) から読み取る

ことが出来る。ノンコア削孔データが計測されている距離は、設計図書の図面情報（測点番号に対するトンネルからの計画高さや地盤高さ）を利用して、比例配分で計算できる。したがって、すべての正規化削孔速度比に対応する土被り高さが計算できる。

2) qu ：地山の一軸圧縮強度（ kN/m^2 ）、 γ ：地山の単位体積重量（ kN/m^3 ）、 V_{pc} ：コア試料の弾性波速度(km/s)は、正規化削孔速度比～室内試験結果の相関関係から求める。正規化削孔速度比～室内試験結果の具体的な相関関係については、次節で述べる。

3) 以上の準備作業で得られた5つの項の値を、式(7)あるいは式(9)に代入して地山強度比を計算する。この作業をノンコア削孔におけるすべてのデータサンプリング地点毎に繰り返し行う。

(2) 正規化削孔速度比と岩盤物性の相関

トンネル施工現場でノンコア削孔調査を行い、併せて

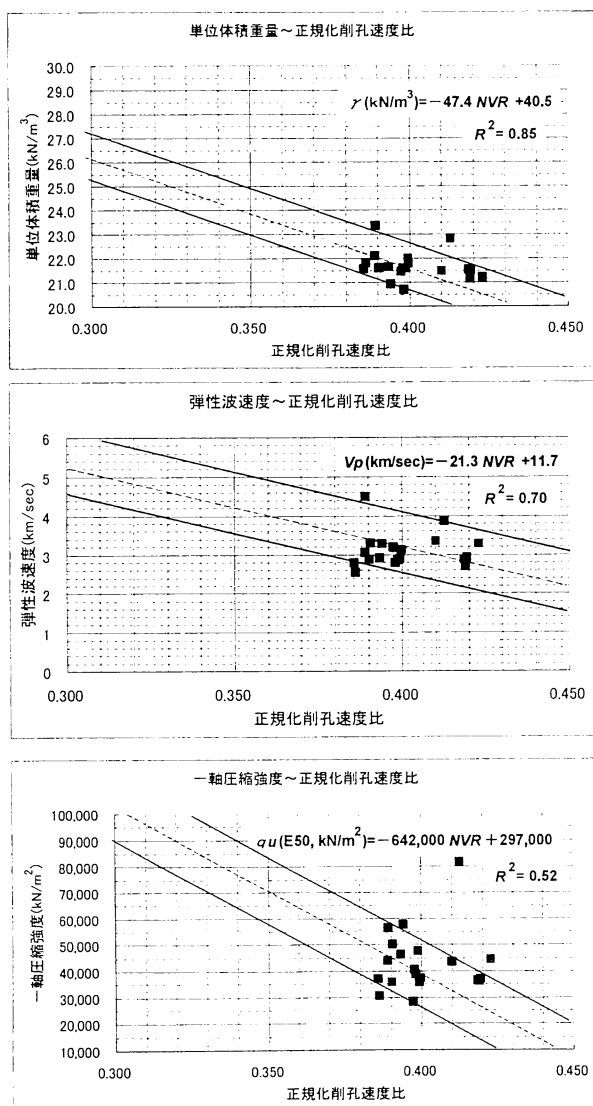


図-4 正規化削孔速度比～岩石物性の相関

トンネル切羽から岩石試料を採取し、必要な室内試験を行い、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。この試験区間は約25m、岩石試料は20回採取し、室内試験試料の個数は計60個である。

得られた正規化削孔速度比～室内試験の相関関係を図-4に示す。結果としては、対象としたデータにおいては正規化削孔速度比の分布範囲がやや狭いという課題もあるが、以下のような一定の相関式が得られた。各相関式の相関性は、決定係数 R^2 で図中に示した。

$$\gamma(i) = -47.4 NVR(i) + 40.5 \quad (10)$$

$$V_{pc}(i) = -21.3 NVR(i) + 11.7 \quad (11)$$

$$qu(i) = -642,000 NVR(i) + 297,000 \quad (12)$$

ただし、

i ： i 番目の削孔データおよびそれに対応する物性値

$NVR(i)$ ： 正規化削孔速度比

$\gamma(i)$ ： 単位体積重量(kN/m^3)

$V_{pc}(i)$ ： 弾性波速度(km/s)

$qu(i)$ ： 一軸圧縮強度(kN/m^2)

前節の流れに基づき、式(10)～(12)を式(7)あるいは式(9)に代入して、地山強度比を逐次算定する。

4. 正規化削孔速度比に基づく地山強度比の算定事例

(1) 事例研究の概要

国土交通省三遠南信鳳来地区三遠トンネル新設工事⁸⁾の避難坑（ $L=2.739\text{m}$ ）において事例研究を行った。地質条件としては、中央構造線を貫くことに大きな特徴がある。施工的には、①新第三紀の流紋岩質溶結凝灰岩・流紋岩質凝灰岩・火山礫岩（設楽火山岩類）、②細川断層、③中央構造線に伴う固結断層岩類（花崗岩・珪質岩・泥質岩起源のカタクレサイトおよびろう石鉱床）、④凝灰岩（巢山火砕岩）、泥岩（河内層）、⑤蛇紋岩（三波川結晶片岩）、⑥中央構造線、⑦砂岩層（七郷一色累層）の順序で掘削が進行した。

ノンコア削孔調査は、坑口付近を除くほぼ全線、約2710mの区間で実施し、正規化削孔速度比および地山強度比を算定した。前出第3章2節に関する事前の調査研究は、流紋岩質凝灰岩（①）（距離780m付近）で実施した。一方、以下のような特定の地質条件を対象として、ノンコア削孔調査以外の各種調査も追加した、総合的な前方探査を3回実施した。

第一回（距離約1180m付近）：細川断層（②）

第二回（距離約1600m付近）：花崗岩起源のカタクレサイト（③）

第三回（距離約2570m付近）：蛇紋岩（⑤）

前方探査の項目は、先進ボーリング（コア採取）、TSP探査、速度検層、物理力学試験、超音波速度測定、X線回折分析、スレーキング試験などである。

地山強度比の検証は、これら3回の調査データを利用して行った。検証の内容は大きく二つに分かれる。第一の検証は、細川断層周辺における正規化削孔速度比、地山強度比とその他の前方探査結果との比較検討である。第二の検証は、正規化削孔速度比から算定された地山強度比と、物理力学試験から一般的な方法により求められる地山強度比の比較検討である。なお今回、地山強度比は $V_p/V_{pc}=1$ として求めた。

(2) 正規化削孔速度比による断層調査結果の検証

a) 実施内容

最初に、第一回前方探査の対象である細川断層を中心にして正規化削孔速度比による地山評価の妥当性について検証を行った。正規化削孔速度比により地山の硬軟や断層破碎帯を評価可能であることは、切羽での地質観察や掘削実績の地山分類（支保パターン）との対応性から既に検証済みである。ここでは、ノンコア削孔調査と同時に実施された先進ボーリング（コア観察）、速度検層（P波）、TSP探査、および切羽の地質観察の結果を利用して、正規化削孔速度比による地山評価の妥当性についてより詳しい評価と検証を行った。なおノンコア削孔調査は、切羽のスプリングラインから750mm下、センターラインから500mm右の位置から、右手方に5度振りながら削孔した。また先進ボーリングは、スプリングラインとセンターラインの交点からセンターライン沿いに真っ直ぐ掘削した。

b) ノンコア削孔調査結果

ノンコア削孔データの解析結果を図-5に示す。図には、一般的なノンコア削孔データである削孔速度・打撃圧・回転圧・フィード圧・打撃エネルギー、および削孔速度変換解析システムによる正規化削孔速度比・地山強度比を示す。これらの削孔データの比較を行うために、先進ボーリングのコア観察から特徴的な2箇所を選んだ。ひとつは頁岩層からなる細川断層（図中、区間Ⅲ。後述する図-6の区間Ⅲに該当）、もうひとつは花崗岩質カタクレサイト中の顕著な破碎部分（図中、区間Ⅶ。同じく図-6の区間Ⅶに該当）である。この2箇所について、それぞれの削孔パラメータの特徴は以下の通りである。

- 1) 打撃圧と回転圧は、通常大きな変化を示さないが、これらの両区間でも特徴的な変化は無い。
- 2) フィード圧は、両区間において、その区間の前後に対して明らかに特異な変化を示している。ノンコア削孔調査では本来フィード圧一定が前提であるが、断層破碎帯や不均質地山の調査ではこの前提を守ることが難しいことを示している。

3) 削孔速度および打撃エネルギーは、地山の評価に利用されている一般的なパラメータである。断層破碎帯や風化変質帯などの軟弱な地山では削孔速度は大きくなり、削孔に必要な打撃エネルギーは小さくなると考えられている。しかし、図-5から明らかなように、このような基準に基づいて地質の判定を行うことが難しい場合もある。フィード圧の変動に伴って、削孔速度や打撃エネルギーでは地山評価が困難になっていることが示唆されている。

4) 正規化削孔速度比では地山が悪くなるほど値が大きくなるが、両区間において値の急上昇が、また地山強度比では値の急激な低下が認められ、両区間の地質的特異性を示している。なお地山強度比に関しては、式(10)～(12)の相関式の適用限界として、正規化削孔速度比 >0.47 に対して、地山強度比がマイナス値となり、図中にプロットされていない。したがって正規化削孔速度比のデータの密度に対して、地山強度比のデータがやや疎である印象を与えている。

以上の考察から、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は、地質特性の抽出に大きな効果があると判断できる。

c) 各種前方探査データによる検証

図-6に正規化削孔速度比、コアの岩種、岩質（主にコアの性状）、RQD、P波速度、TSPによる反射面の分布区間を示す。岩質は、棒状、短柱状、細片状、礫状、粘土状の5段階に分けた。

先進ボーリング、速度検層、TSP探査の結果から8箇所の地山不良区間をまず抽出した（図-6中のⅠ～Ⅷ）。これらの地山不良区間は、断層部、細片状～礫状～粘土状の軟弱部、低RQD区間、低速度帯、反射面分布区間などが該当する。これらの地山不良部と正規化削孔速度比に見られる特徴的な変動（以下、「イベント」と呼ぶ）の対応性を検討・整理した（表-1）。

- 1) 8箇所の地山不良区間に対して、正規化削孔速度比のイベントは5箇所では明確な対応が、1箇所は位置的にややずれた対応が、また2箇所に関しては対応が認められなかった。
- 2) 明確な対応が認められる5箇所（図-6中 Ⅱ～Ⅳ、Ⅵ、Ⅶ）に関しては、コアの粘土化、礫状、細片状、および低RQDとの対応が顕著であるが、低速度帯やTSPによる反射面との対応は明確ではない。
- 3) 対応が認められない2箇所（図-6中 Ⅰ、Ⅷ）は礫状区間であるが、対応が顕著な5箇所に比べると、区間が短いという違いがある。
- 4) 削孔時湧水が5箇所認められている。図-6中に示したが、いずれの場合も、単独で出現する正規化削孔速度比の軽微なピークに対応しているようである。しかしこのような軽微なピークは、全体の地山評価にはほとんど関

細川断層(頁岩)

花崗岩質カタクレーサイト (RQD≒0)

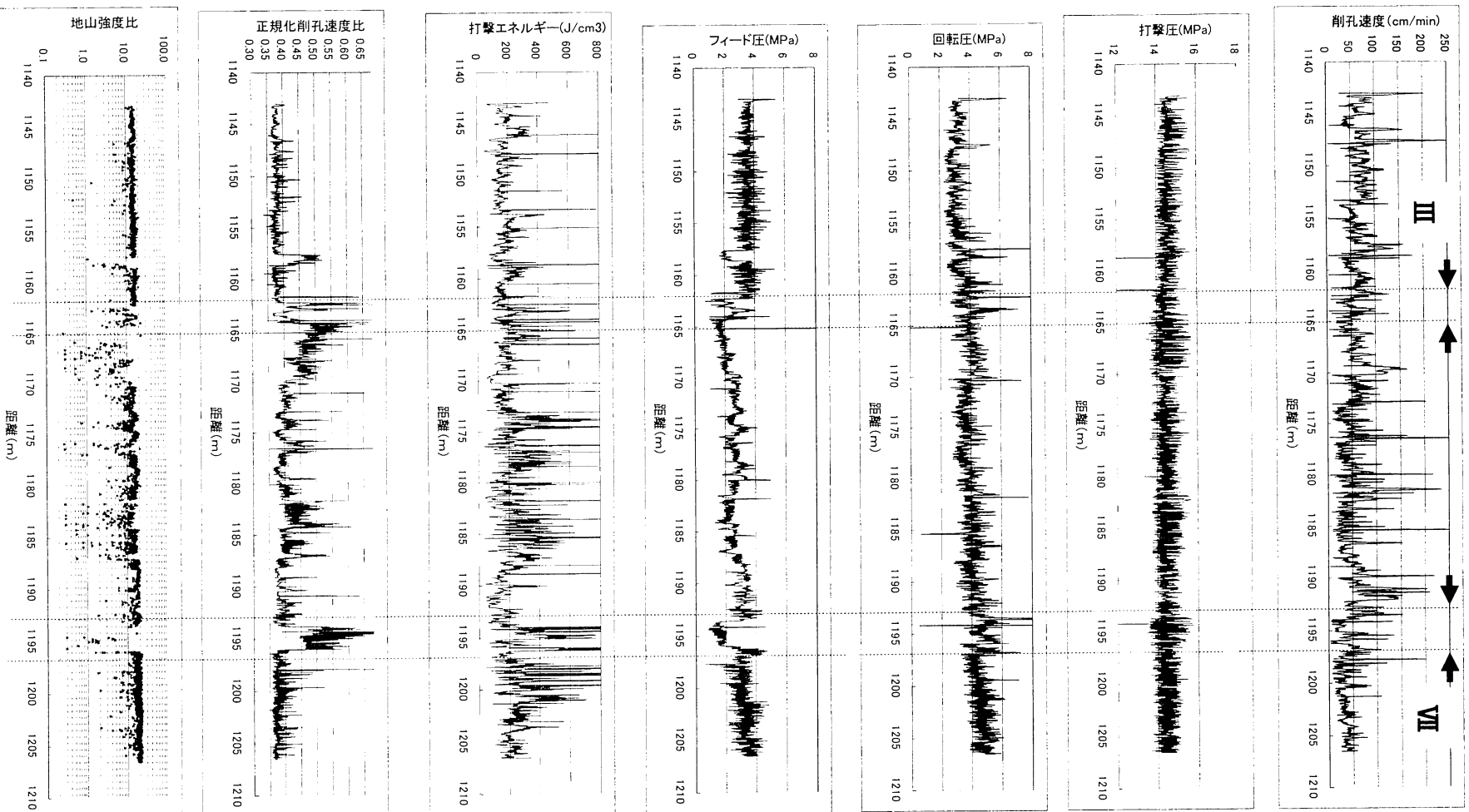
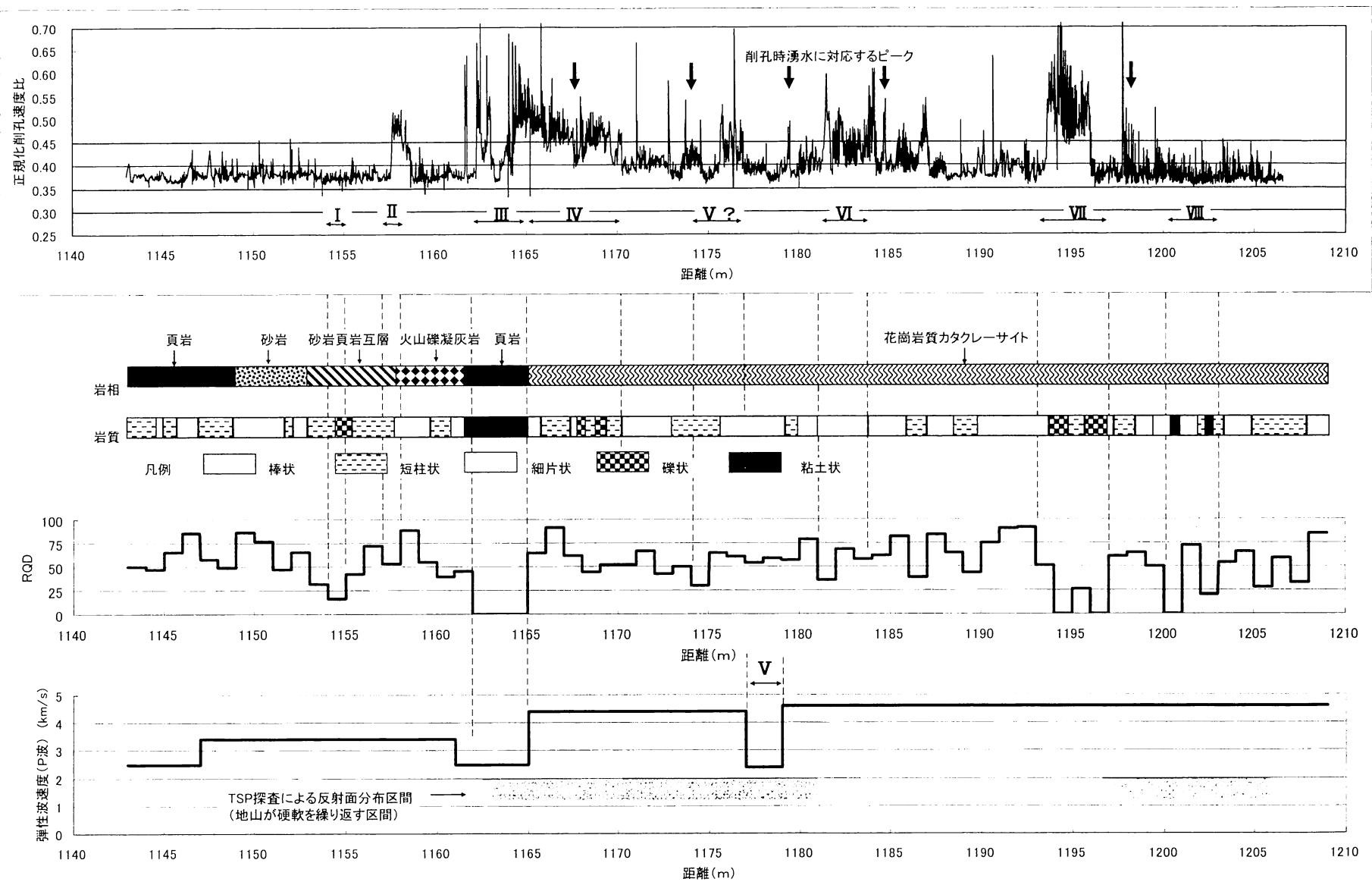


図-5 第一回前方探査区間におけるノックア削孔データ



図ー6 第一回前方探査における正規化削孔速度比の検証

係していない。

5) 正規化削孔速度比の観点から見ると、イベントの大きさは、Ⅲ＋Ⅳ、Ⅶ、Ⅵ、Ⅱのような順位をつけられると考えられる。Ⅲ＋Ⅳは細川断層主部の粘土質・礫状の頁岩および花崗岩質カタクレサイト、ⅦおよびⅥは、細川断層主部からはやや離れるが、それぞれ礫状あるいは細片状の花崗岩質カタクレサイト、Ⅱは断層手前の砂岩頁岩互層から火山礫凝灰岩への境界部分に相当する。これらの区間は、低RQDの区間であり、低速度帯にも該当する。すなわち、正規化削孔速度比からみたイベントは、重要な地山変化をほぼ検出していると言える。

6) 正規化削孔速度比による地山変化の検出精度は、特にボーリングコア調査、速度検層との比較によると数10cmで、概ね1m以内と考えられる。

d) 切羽評価点

切羽評価点に係わる項目は、A圧縮強度・B風化変質・C割目間隔・D割目状態・E走向傾斜（差し目・流れ目）およびF湧水量・G劣化（水によるスレーキング）の7項目である。これらの評価区分に基づき、切羽の右肩・中央・左肩の3箇所では評価点を求め、以下の重み付けを行って切羽全体の評価点を得る。

評価点 = {(右肩) + (中央) * 2 + (左肩)} / 4

7つの評価項目の中で、A～Eの地山特性はノンコア削孔データに直接反映されるものであるが、F～Gでは反映されない場合が多いと考えられる。したがって、湧水やスレーキング現象を大きく評価する場合、あるいは切羽全体で不均質性が大きい場合などは、ノンコア削孔結果と切羽評価点は、必ずしも一致しない場合も多いと想定される。

今回の第一回前方探査区間周辺での切羽評価点～正規化削孔速度比の関係を図-7に示す。ここでは切羽評価点と正規化削孔速度比が、細川断層を境にして、同様な変動傾向を示しており、正規化削孔速度比と切羽地質観察結果の整合性を確認できた。

以上をまとめると、削孔速度変換解析システムに

よって求められた正規化削孔速度比による地山評価は、同時に実施された他の前方探査結果および掘削時の切羽観察結果とも非常に良く対応するものであった。このような正規化削孔速度比による地山評価の妥当性の検証を行った上で、次節の正規化削孔速度比から算定された地山強度比の検証を実施した。

(3) 正規化削孔速度比から算定された地山強度比の検証

a) 地質条件

3回の前方探査区間の地質状況を、掘削時の切羽地質観察結果から整理した。これら3箇所を含むトンネル全線の地質構成は、後述する図-10中に示した。

1) 第一回前方探査区間（距離1143m～1250m）

図-6の区間Ⅲまでに至る区間（距離1143m～

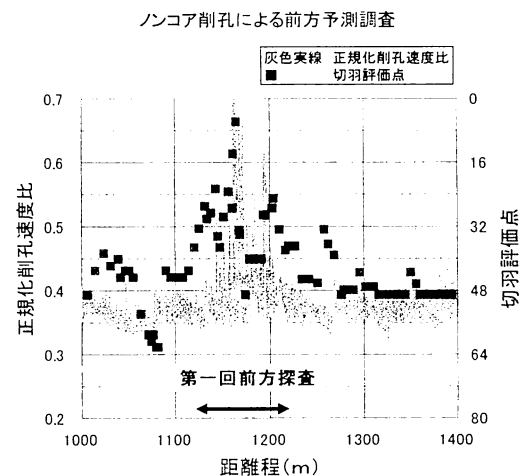


図-7 第一回前方探査区間周辺における正規化削孔速度比～切羽評価点の関係

表-1 第一回前方探査における各調査結果の比較

地山不良区間	コア観察結果	RQD	速度検層	反射面分布区間 (TSP)	正規化削孔速度比にみるイベント
I	砂岩頁岩互層中の礫状区間。	前後に比べて低い。	—	—	該当するピークは無い。
II	砂岩頁岩互層から火山礫凝灰岩への境界部分。	前後に比べて低い。	—	—	ピークが対応。
III	粘土質・礫状の頁岩。細川断層の主要部。	前後に比べて著しく低く、RQD=0	相対的な低速度帯、 $V_p=2.5\text{km/sec}$ 。	反射面の出現。	複合ピークが対応。後半のピークが、最初の反射面位置と概ね一致。
IV	花崗岩質カタクレサイト。亀裂の密集部分と亀裂の無い部分が交互に出現。	RQD=50前後。	—	反射面分布区間の中に位置する。	正規化削孔速度比の漸移帯。
V	花崗岩質カタクレサイト	—	$V_p=2.4\text{ km/sec}$ の低速度帯	反射面分布区間の中に位置する。	位置がややずれるが、ピークが $V_p=2.4\text{km/sec}$ の低速度帯が付近にある。
VI	花崗岩質カタクレサイト、細片状。	—	—	—	複合ピークが対応。
VII	花崗岩質カタクレサイト、礫状。	前後に比べて著しく低く、RQD=0を含む。	—	—	ピークが対応。
VIII	花崗岩質カタクレサイト中の粘土状区間	前後に比べて著しく低く、RQD=0を含む。	—	反射面分布区間の中に位置する。	該当するピークは無い。

1162m)では、黒色頁岩と灰色の凝灰質シルト岩が互層状あるいは混在状態を呈し、一部で火山礫岩・凝灰岩が認められる。前方探査ボーリング孔から100～150ℓ/分程度の湧水が認められ、茶褐色に風化し粘土分を含む部分もある。亀裂の少ない切羽では、地山は脆弱であるが崩落はない。

区間Ⅲ（距離1162m～1165m）は、ほぼ切羽全面で頁岩が粘土化した状態にあり、中央構造線の南縁にあたる細川断層である。粘性があり切羽は自立しているが、非常に脆弱でバックホウのバケットで容易に掘削ができる。湧水は無い。区間Ⅳ（距離1165m～1170m）では、先進ボーリングによると花崗岩質カタクレサイトであったが、切羽全体としては凝灰質シルト岩と頁岩が卓越していた。この区間ⅢおよびⅣにおいて、正規化削孔速度比の増大と地山強度比の低下が顕著である（図-5）。後述する試験試料T1-1シリーズ（表-2）は、この区間から採取された断層部を構成する頁岩である。

区間Ⅳ以降では（距離1170m～1250m）切羽全面で灰色（～淡緑色）花崗岩質カタクレサイトが現れた。全体としては、大きな亀裂は無く、潜在的な細かい亀裂が多く、湧水は認められない。岩石の強度はハンマーで軽く砕ける程度であるが、切羽の肌落ち等もない。区間Ⅶのような微細亀裂による破碎状態が顕著な区間では、補助工法として鏡吹付けおよび注入式フォアパイリングを採用した。試験試料T1-2～T1-6（表-2）は、この区間から採取された花崗岩質カタクレサイトである。

2) 第二回前方探査区間（距離1535m～1675m）

前半（距離1535m～1587m）は、花崗岩質カタクレサイト（淡緑色～灰色）および泥質・凝灰岩質（黒色・灰色）カタクレサイトの混在区間である。破碎が著しく、微細な潜在亀裂も多く、肌落ちの危険性が高い。試験試料T2-1（表-2）は、この区間

から採取された凝灰岩質カタクレサイトである。

後半（距離1587m～1675m）は、花崗岩質カタクレサイト・ろう石鉱床・硫化変質部（黄鉄鉱結晶を含む）・白色脈という特徴的な地質構成からなる。潜在的な微小亀裂が多いが、切羽は自立している。前方探査ボーリング孔から30～150ℓ/分程度の湧水が発生した。試験試料T2-3（表-2）は、この区間から採取されたとろう石鉱床である。

3) 第三回前方探査区間（距離2372m～2538m）

前半の区間（距離2372m～2515m）では、堆積岩起源の破碎帯からなる。距離2372m～2515mでは、灰緑色凝灰岩および火山礫凝灰岩からなる。これらの破碎帯・粘土化帯とハンマーで強打して砕ける程度に硬い硬質部が、不規則に混在している。一部に軽微なろう石化帯や硫化鉱物が見られる。亀裂に沿って地下水に起因すると考えられる風化・茶褐色化している部分がある。脆弱であるが、湧水が少ない場合、肌落ちは少ない。距離2515m～2538mでは、凝灰岩と河内層泥岩が圧砕や剪断を受け層状を呈す。小断層が頻繁に認められる。

後半の区間（距離2538m～2607m）では、濃緑色の蛇紋岩および灰色の角閃岩が混在する。蛇紋岩部は層状（葉片状）で、片状に剥離しやすい。距離2538m～2588mでは、比較的硬質な部分もあり、亀裂は多いが湧水が無いために、切羽は自立しており肌落ちなどは少ない。試験試料T3-1シリーズ（表-2）は、この区間から採取された蛇紋岩である。一方、2588m～2607mでは潜在的な亀裂が著しく発達し脆弱化が顕著で、ズリは発破により、土砂状になる。天端は掘削後時間が経過すると小規模な抜け落ちを生ずる。試験試料T3-2シリーズ（表-2）は、この区間から採取された破碎性の蛇紋岩である。

b) 検証方法

3 回の前方探査で実施された試験の中から、地山

表-2 前方探査区間での物理力学試験結果

試料番号	坑口からの距離	地質、岩質 (C:カタクレサイト)	土被り m	密度 kN/m ³	超音波 P波速度 (km/sec)	超音波 S波速度 (km/sec)	動弾性係数 (MN/m ²)	静弾性係数 (MN/m ²)	一軸圧縮 強度 全試験結果 (MN/m ²) データ①	回帰式用 一軸圧縮 強度 (MN/m ²) データ②	回帰式による 推定一軸 圧縮強度 (MN/m ²) データ③	地山強度 比	地山強度 比
										検証データ1	検証データ2	検証データ1	検証データ2
T1-1-1	1163.00	断層部頁岩	153.08	21.89	1.99	0.87	4,660				6.5		1.9
T1-1-2	1163.00	断層部頁岩	153.08	23.50	2.32	1.01	6,770				9.5		2.6
T1-1-3	1163.00	断層部頁岩	153.08	22.98	2.07	0.90	5,270				7.2		2.0
T1-2	1176.50	花崗岩質C	143.33	25.69	4.73	2.68	47,500	45,100	79.70	79.70	83.0	21.6	22.5
T1-3	1191.50	花崗岩質C	134.01	25.75	4.56	2.52	42,700	43,800	70.50	70.50	71.5	20.4	20.7
T1-5	1204.50	花崗岩質C	132.69	25.60	3.74	2.01	27,400	18,000	40.50	40.50	34.8	11.9	10.2
T1-6	1204.50	花崗岩質C	132.69	25.96	3.56	1.90	24,800	8,610	21.30	21.30	28.5	6.2	8.3
T2-1	1576.55	凝灰岩質C	100.10	26.55	4.54	2.25	36,700	27,300	23.60		57.1		21.5
T2-3	1608.38	ろう石鉱床	93.52	26.26	4.79	2.31	38,600	24,200	17.80		61.7		25.1
T3-1-1	2568.25	蛇紋岩	84.56	29.59	5.56	2.91	67,100				130.1		52.0
T3-1-2	2568.25	蛇紋岩	84.56	29.34	5.75	3.04	72,200				142.3		57.3
T3-1-3	2568.25	蛇紋岩	84.56	29.58	5.65	2.99	70,300				137.7		55.1
T3-2-1	2573.55	蛇紋岩	84.03	29.08	4.71	2.26	41,000	617	0.44		67.4		27.6
T3-2-2	2573.55	蛇紋岩	84.03	28.98	4.47	2.14	36,600	2,990	1.73		56.9		23.3
T3-2-3	2573.55	蛇紋岩	84.03	29.03	5.11	2.43	47,300	885	0.70		82.5		33.8

強度比の計算に関係する物理力学試験結果を表-2に示す。試験数量は計15であり、一軸圧縮試験の数量は9個であった(表-2中の一軸圧縮強度データ①)。得られた一軸圧縮強度～動弾性係数(超音波速度測定結果から計算)の関係(図-8、ただし表-2中の一軸圧縮強度データ①および対応する動弾性係数による)および試験過程を考慮すると、試験供試体に内在する亀裂の影響を大きく受けたと推定される結果が多く(図-8中の▲のデータ)、妥当な試験結果と類推されるものは4個(図-8中の■のデータ)であった。この4個のデータ(表-2中の一軸圧縮強度データ②)を、「検証データ1」とした。

次に残りの11個の試験データの有効活用を検討した。まず、「検証データ1」とした4個のデータについて、一軸圧縮強度～動弾性係数の回帰式を求めて、その回帰式(図-8 $qu=0.0024 Ed-31$)からカタクレサイト・蛇紋岩などの一軸圧縮強度を推定した(表-2、試料T2,T3シリーズの計8個のデータ)。

また3個の頁岩試料に関しては、図-8の回帰式によるとマイナス値となるので、別途作成していた頁岩～泥岩の一軸圧縮強度～P波速度の回帰式(図-9)を利用して、一軸圧縮強度を推定した(表-2、試料T1-1シリーズの3個のデータ)。以上のデータに加えてT1-2～T1-6の4個の花崗岩質カタクレサイトについても同様に、図-8の回帰式を利用して超音波速度測定記録から再度一軸圧縮強度を推定し、計15個の推定一軸圧縮強度のデータ(表-2中の一軸圧縮強度データ③)を、「検証データ2」とした。

c) 検証結果

「検証データ1」および「検証データ2」について、地山強度比をそれぞれ計算した(表-2)。

次に、図-10に削孔速度変換解析システムにより得られた前方探査結果を示す。図-10において、中段の図は正規化削孔速度比、上段の図は正規化削孔速度比から算出した地山強度比である。地山強度比は縦軸を常用対数表示としている。

図-10上段の地山強度比の図中には、正規化削孔速度比から計算された地山強度比を△で、また「検証データ1」から得られた地山強度比を●で、「検証データ2」から得られた地山強度比を□で示す。これらの検証データは、正規化削孔速度比から計算された地山強度比と良い対応を示している。

ただし「検証データ2」の3点(第三回、蛇紋岩中のデータ、表-2、T3-1シリーズ)は、やや大きな値を示している。図-8で相関を得た試料のデータ(表-2)を見ると、回帰式は $3.5\text{km/s} \leq Vp \leq 4.8\text{km/s}$ で成立している。一方、問題の試料は $Vp=5.65\text{km/s}$ 前後と大きく、この範囲では図-8の回帰式が成立していない可能性があり、一軸圧縮強度の推定に誤差が大きいことが考えられる。したがって地山強度比の誤差は、「正規化削孔速度比から計算された地山強度比」自体の問題ではないと判断できる。

以上の検討により、正規化削孔速度比から計算された地山強度比の妥当性が検証出来たと判断した。

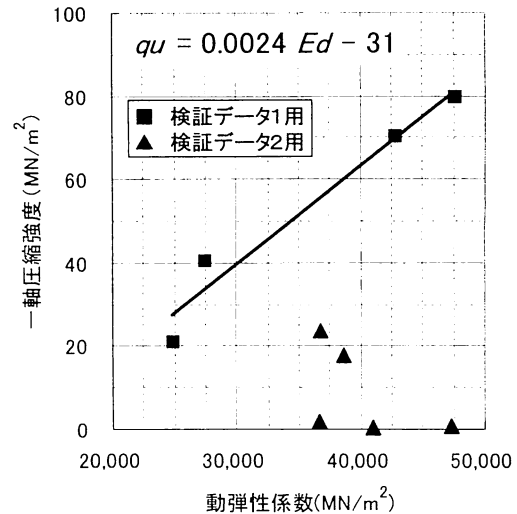


図-8 一軸圧縮強度～動弾性係数の関係

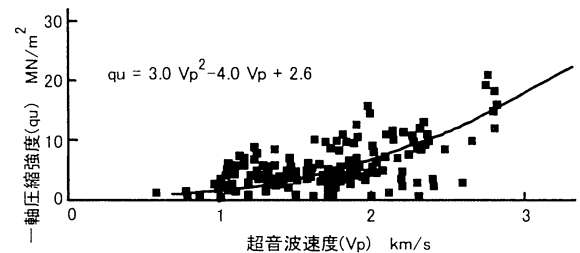


図-9 頁岩～泥岩の一軸圧縮強度～P波速度の関係

5. まとめ

- 1) 筆者らは、大型岩石供試体を利用した削孔実験、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を行い、特にフィード圧の影響を考慮した削孔速度の変換解析システムを開発した。このシステムでは、削孔データから削孔速度～フィード圧の相関を抽出し、フィード圧が一定と仮定した際の削孔速度の換算値を求め、この換算削孔速度を正規化・無次元化した新しいパラメータ「正規化削孔速度比」を定義した。この「正規化削孔速度比」を利用した前方探査とその検証について事例研究を行い、本解析システムの有効性を確認してきた。本論文では、「正規化削孔速度比」の水平展開として、「正規化削孔速度比」と岩盤物性との相関性を利用して、ノンコア削孔による切羽前方の地山強度比の推定方法を提案した。
- 2) 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、必要な室内試験を行い、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。これ

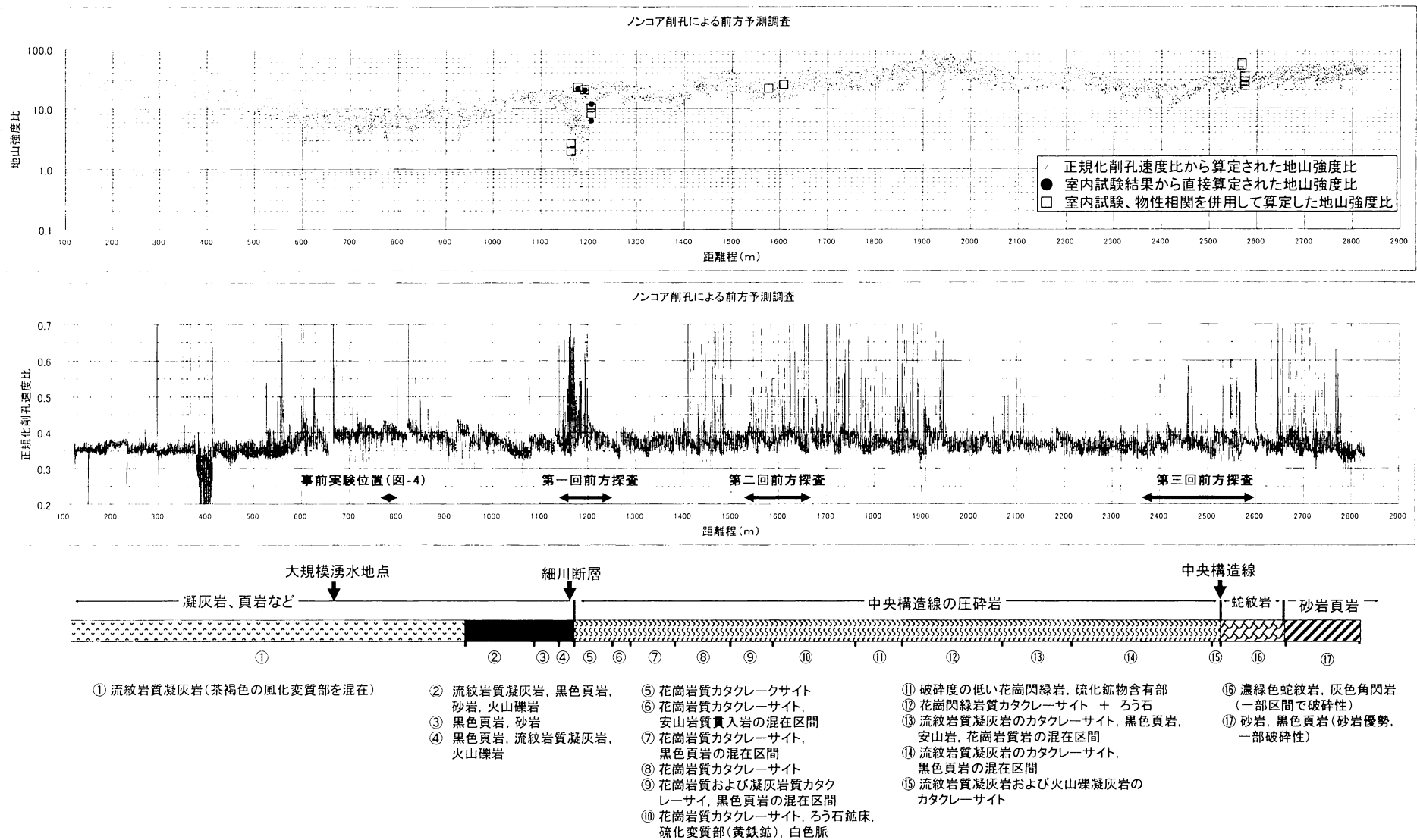


図-10 ノンコア削孔データから算定された地山強度比の検証

らの相関を利用して、ノンコア削孔調査から地山強度比を計算できる。

- 3) 事例研究では、最初に、削孔速度変換解析システムによって求められた正規化削孔速度比による地山評価を、同時に実施した他の前方探査結果および掘削時の切羽観察結果により検証した。このような正規化削孔速度比の妥当性の検証の上に立って、正規化削孔速度比から計算された地山強度比の妥当性を地山の物理力学試験結果に基づいて検証した。
- 4) 今回の検証により、「削孔速度変換解析システム」に基づき、正規化削孔速度比による地山分類の推定に加えて、同時に地山強度比も計算して地山特性の判定が可能となった。これにより、従来の離散的な地山強度比のデータ分布に対して、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碎帯などの弱層部を含む押し出し性区間の予測技術として有効である。また試験供試体に含まれる亀裂の影響により一軸圧縮試験が適切に実施できず、結果として地山強度比が本来必要な地点で得られない場合も多い。このような地山条件でも本システムは適用可能である。

謝辞： 本研究結果の内容を御理解いただき、論文発表を許可して頂いた国土交通省中部地方整備局浜松河川国道事務所の関係各位に深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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) W.A.Hustrulid, C.Fairhurst : A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock, *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.*, Vol.8, pp.331-333, 1971.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針, 鉄道トンネルの地山等級（計画段階における地山分類基準）, pp.37-42, 1996
- 7) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル(1)トンネル本土工建設編, 道路トンネルの地山等級, pp.71-74, 2002
- 8) 秋田 修, 真弓英大, 玉井昭雄, 岡山 徹：中央構造線擾乱帯を貫く－三遠南信自動車道 三遠トンネル－, トンネルと地下, 第39巻, 10号, pp.713-723, 2008

New Calculation Method of Competence Factor in Tunnel Rock Mass Based on the Exploration Drilling System Ahead of the Tunnel Face by Conversion Analysis of Non-Core Drilling Velocity

Toru Kuwahara, Koji Hata, Akio Tamai, Masataka Tayu

The authors previously proposed the new drilling parameter named “Normalized Drilling Velocity Ratio” for evaluation of geological characteristics ahead of the tunnel face, using conversion analysis of non-core drilling velocity. In this paper we propose the new calculation method of competence factor in the tunnel rock mass using “Normalized Drilling Velocity Ratio”. We also discussed the relation of competence factor caused between by this new method and by the conventional method based on the material tests of core samples, then we were successful in the getting of continuous competence factor ahead of the tunnel face contemporary in the exploration non-core drilling.