

既設トンネルを用いた事前地質調査の適切度について

ON APPROPRIATENESS OF PRELIMINARY GEOLOGICAL INVESTIGATION BASED ON THE RE-INVESTIGATION OF EXISTING TUNNELS

中川浩二¹⁾, 保岡哲治²⁾, 三木茂³⁾, 藤本睦⁴⁾, 北村晴夫⁵⁾

Koji NAKAGAWA, Tetsuharu YASUOKA, Shigeru MIKI, Mutsumi FUJIMOTO, Haruo KITAMURA

The purpose of this study was to clarify the disagreement of the classifications of ground from preliminary geological investigation stage and that from construction stage. This study was concentrated on 1) was the ground evaluation correctly did, and 2) was the investigation quantity reasonable, based on the results of re-investigation of three existing tunnels.

To increase the objectivity of the results, the investigations were down by several geological engineers based on the requirements close to preliminary geological investigation on the same tunnel. As a result, it was found that for different geographical and geological conditions, different conclusions were obtained.

Key Words : appropriateness, preliminary geological investigation, revaluation, existing tunnel

1. はじめに

山岳トンネルの事前地質調査では、地山評価に必要な調査数量を実施し、地山評価は地質調査技術者が行う。事前地質調査は、あくまでも地上からの地質予測となるため、その信頼性に限界があるといわれ、事前設計からトンネル施工時の支保パターンの変更実績も報告¹⁾されている。事前地質調査と施工の地山評価の食い違いは、鈴木ら²⁾の指摘にあるように、重要な技術課題となり、議論が続いている³⁾。

このような中、筆者らはトンネル設計に先立ち「正確な地山評価が行えたか」と「適切な調査数量であったか」の2側面をトンネル事前地質調査の適切度として捉えてみた。本研究では、適切度を地山分類表等の地山評価手法の限界や各調査法の信頼性等を考慮した上で、地山評価は正確であったか、また、地山情報量(調査数量)は合理的であったかとした。ただし、この両側面は互いに関係しあっており、分離して評価することは難しく、また、地質調査技術者の「技術力、自信あるいは満足度」といった対人依存性に関わる要因も関連して絶対的な評価を与えることは困難である。しかし、最近の社会・経済情勢の趨勢から、公共事業の経済性、透明性、リスク評価などを議論する場合、この問題は避けることはできない課題となっている。そこで、本文では、3本の既設トンネルを再調査することによって、事前地質調査の適切度について検討を試みた。

2. 再地質調査について

1) 再調査トンネルの概要

再調査トンネルとして、最近竣工した3本の2車線道路トンネルを取り上げた。再調査トンネルとそのトンネルで実施された事前地質調査の概要を表-1に示す。

-
- 1) 正会員 工博 山口大学工学部社会建設工学科
 - 2) 正会員 工修 元山口大学大学院学生 理工学研究科博士後期課程 (現: ㈱大林組)
 - 3) 正会員 理修 基礎地盤コンサルタンツ(株) ジェオエンジニアリングセンター
 - 4) 正会員 博士(学術) 復建調査設計(株) 防災システム部
 - 5) 正会員 ㈱東建ジェオテック 山口出張所

表-1 再調査トンネルとそのトンネルで実施された事前地質調査の概要

	トンネル延長 (m)	主要地質	主要地山等級 (当初)	最大土被り厚(m)	事前地質調査の概要
Aトンネル	833	泥質片岩	CⅡ	160	・地表地質踏査, 航空写真判読等 ・弾性波探査: トンネル軸方向, 総測線長 L=880m トンネル横断方向, 総測線長 L=200m (起点と終点側の各坑口で各1測線) ・ボーリング調査: 本数7本, 鉛直のみ, 総延長 L=244m
Bトンネル	463	安山岩, 凝灰角礫岩	B	80	・地表地質踏査, 航空写真判読等 ・弾性波探査: トンネル軸方向, 総測線長 L=510m トンネル横断方向, 総測線長 L=200m (起点側坑口と中央部で各1測線) ・ボーリング調査: 本数4本, 鉛直のみ, 総延長 L=110m
Cトンネル	422	流紋岩質凝灰岩	CⅠ	70	・地表地質踏査, 航空写真判読等 ・弾性波探査: トンネル軸方向, 総測線長 L=500m ・ボーリング調査: 本数4本 (鉛直3本+起点側坑口水平1本), 鉛直延長 90m+水平62m, 総延長 L=152m

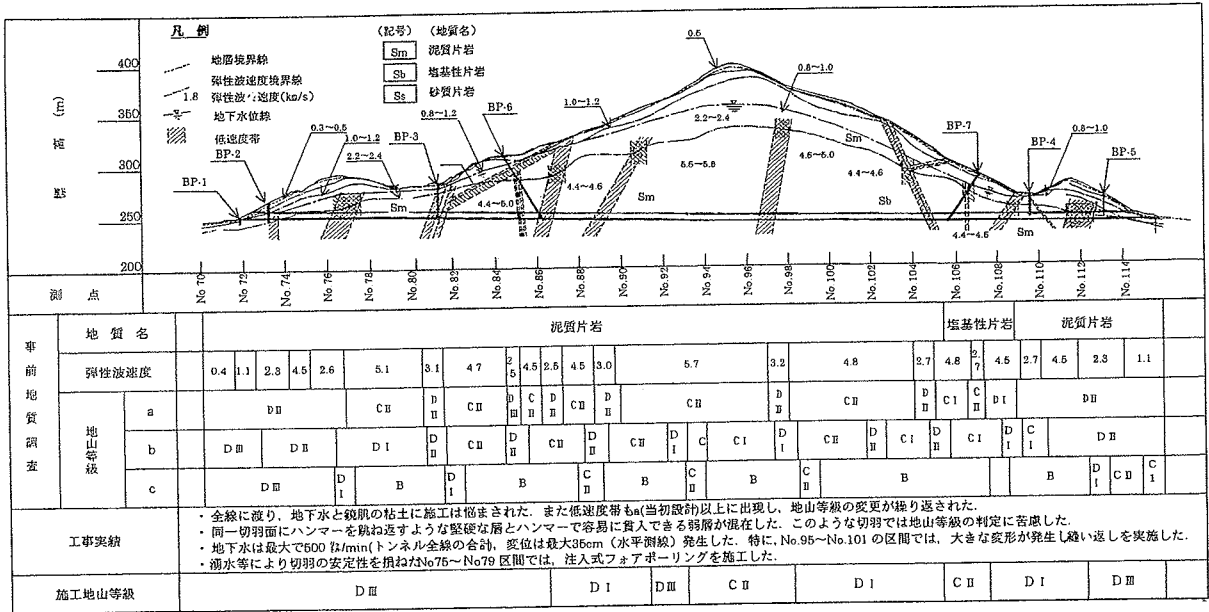


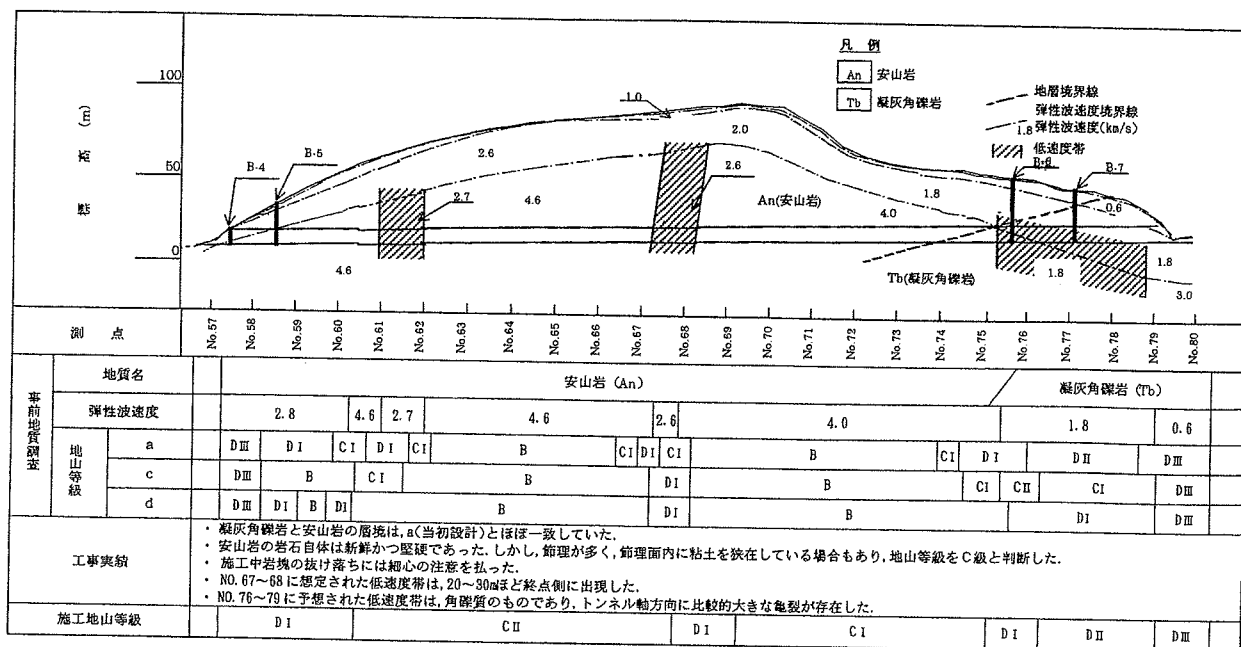
図-1 Aトンネルの再調査結果

表-2 Aトンネル再調査のコメント

	地表地質踏査	弾性波探査	ボーリング調査
片岩	・露頭が少なく, 劣化部や脆弱部を露頭で確認できなかった。(b, c)	・弾性波速度と掘削状況が地山分類表の関係通りでない場合がある。(b)	・片岩は, 局所性があり, ばらつきが多い。(b) ・ボーリングコアから B 等級の地山と判断した。(c)
低速度帯 (断層破砕帯)	・走向傾斜は複雑である。地山は相当揉まれている。破砕帯の位置は, 弾性波探査に頼らざるを得ない。(b)	・地山は, 硬軟が繰返され, 弾性波探査の技術的限界と考えられる。施工時, 前方探査を行う必要がある。(c)	・十分な本数のボーリングを実施するのが重要である。Sm 層の岩質はボーリングで未確認である。(b)
湧水	・相当量 (追加の湧水設備が必要な程度の量) が低速度帯に集中発生する可能性大。(b)		・地下水位が高く施工の困難さが予測される。(b)

2) 再調査の方法

再調査では, 対象トンネル周辺の地表地質踏査を行い, 事前地質調査から得られたデータを活用して地山等級を決定した。地山等級の範囲は, 事前地質調査と施工時の地山等級と比較するため, 坑口部を含んだ設計段階の等級 (B~DⅢ, ただし, DⅢは坑口部支保パターン) とした。また, 再調査は1トンネルにつき2組の地質技術者 (各グループは複数の技術士の資格保持者) の担当とした。再調査にあたって, 技術的判断が大きく異ならない項目は共通データとして事前に提供した。これは, ①ルートマップと航空写真, ②弾性波速度分布図 (走時曲線解析後の分布図), ③ボーリングコアの写真と柱状図等であった。再調査の成果品として, 工学的判断根拠を



図－2 Bトンネルの再調査結果

表－3 Bトンネル再調査のコメント

	地表地質踏査	弾性波探査	ボーリング調査
安山岩	・トンネルルートにそった海岸沿いに安山岩の連続露頭があった。(c, d)	・ほぼ全線が火山岩であり、弾性波探査の数値をそのまま地山等級に反映してよい状況と考えた。(c, d)	_____
安山岩と凝灰角礫岩の境界位置	・終点側坑口付近の安山岩と凝灰角礫岩の境界位置は未確認であった。(c)	・境界位置については、低速度帯としてデータ解析上、捉えた。(d)	・安山岩と凝灰角礫岩の境界付近で実施しているボーリング(B-6)で、その境界位置を捉えていた。(d)
岩盤の亀裂	・露頭を見る限り、弾性波速度に相当する地山(B等級)と判断した。(c)	・4.0km/s以上の弾性波速度が計測されていた。よって、亀裂の密集部については、重要視しなかった。(c)	_____

添付した設計パターンを提案してもらった。また、調査トンネルの地形・地質条件等の特徴を踏まえ、各調査結果に関するコメントも収集した。さらに、各グループの地山等級設定結果と施工実績を一覧した後、3トンネルにおける事前地質調査の適切度についてヒアリングした。

3. 再調査の結果

再調査結果を対象トンネル毎に図－1～図－3に示す。図中、当初設計は事前地質調査の1ケースと考え、当初設計(以下、a)、各グループ(b, c, d)および施工結果に分けた。ここで、当初設計は当初の地質調査をもとに設計技術者が実施したものである。そこで、各グループによる再設計に際しては、各グループのトンネル設計技術者にも直接参加してもらい、当初設計に準じる形とした。

1) Aトンネル

3グループの地質技術者間で地山評価は異なる結果となった。aとbは、C等級を主体とした。一方、cはトンネル延長の60%以上をB等級として判定した。aの考え方を整理すると、片岩の弾性波速度に関する異方性、十数条の破碎帯の存在、トンネル掘削基面よりも高い位置に地下水位がある等を考慮し、地山分類表に示される弾性波速度と地山等級間の関係より結果的に2等級(A→C)不良側に設定している。bとcグループのコメントについてAトンネルの重要課題であった“片岩”、“低速度帯”と“湧水”の3項目に分けて表－2にまとめた。

対象地山は、地表の露頭数が少なく、4.4～5.8km/sの弾性波速度が測定され、また、岩石の一軸圧縮強度は300N/mm²であった。よって、弾性波速度を主体とし、掘削時の特性を考慮した地山評価が実施された。低速度帯については、片岩自体が相当揉まれ、また、不良部の局所性などの理由から弾性波探査に頼るべき部分が大きいケースであった。一方、弾性波探査については、ボーリング結果から地山の硬軟が繰返されていることから、弾性波探査の特性上、この地質構造はブラインドとなり信頼度には限界があった。湧水については、地山が揉まれ

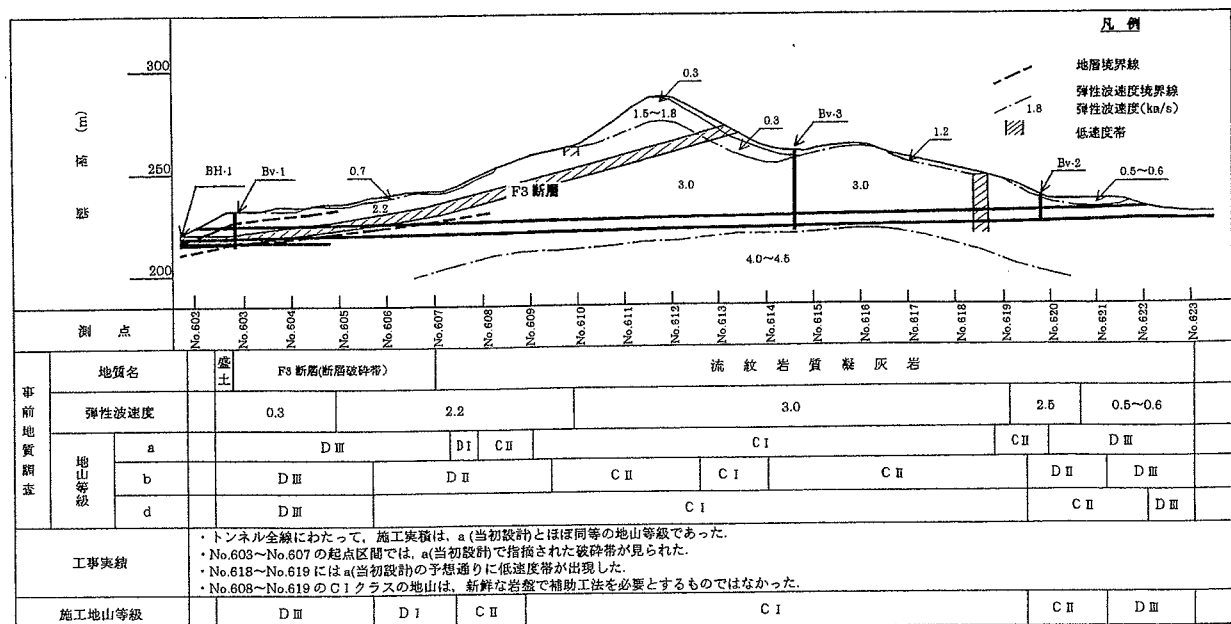


図-3 Cトンネルの再調査結果

表-4 Cトンネル再調査のコメント

	地表地質踏査	弾性波探査	ボーリング調査
流紋岩質凝灰岩	・全体的に露頭は多数あり、踏査条件としては良い。ただ、地質構造は複雑で地質境界の不明な箇所もあった。(b, d)	・弾性波速度に対応する地山等級を地山分類表から直接設定した。(b, d)	・本体部では、弾性波速度の基盤層(4.0~4.5km/s)の岩質を垂直ボーリングで未確認である。(d)
起点側破砕帯(F3断層)	・起点側坑口の露頭は少なく、踏査では破砕帯の存在は未確認である。(d)	・トンネル軸方向の他、トンネル横断方向の測線も実施したほうが望ましい。(b)	・水平ボーリング(BH-1)によって、破砕帯の位置は確認されていた。(d)

た低速度帯で集中発生(最大100m分の水頭)する可能性は大きい、その位置や幅の予測は難しいと考えた。

一方、施工実績は、全線にわたり湧水を伴う切羽崩壊と塑性圧による支保の変状(最大内空変位:35cm)に悩まされ、当初設計から変更が繰返された。一部区間(No.95~No.101)では、縫返しも実施された。

このように、露頭条件も悪く、弾性波探査の適用前提を超え、また、ボーリング結果に局所性があるような条件の場合、実務的な事前地質調査には限界のあることがわかる。

2) Bトンネル

3グループの地山等級はほぼ一致し、全区間の約50%をB等級、残りの区間をCとD等級とした。cとdグループのコメントは、“安山岩”、“安山岩と凝灰角礫岩の境界位置”と“岩盤の亀裂”に分け、表-3に示した。

安山岩については、海岸沿いの露頭を調査し、ボーリング結果からコアの状態を目視確認した。また、経験的に弾性波探査から直接地山等級を設定しても問題がないと判断し、B等級を設定した。両岩の境界位置については露頭で見られなかったが、弾性波探査とボーリングで確認することができ、事前地質調査で位置等は把握できていた。なお、安山岩の亀裂についてはB地山であることから重要視していなかった。

工事資料によれば、当初設計でB等級と判断した地山は、岩塊自体は硬質である反面、節理面に粘土を挟在し、岩盤が流れ目状であったと記載され、また、筆者らによる現地施工者へのヒアリングでも同様の説明を受けた。この結果、岩塊の抜落ち回避などを主目的として鋼製支保工のある標準支保パターンCII等への変更が多くなったと思われる。最終的に当初設計のB等級の地山は、1~2ランク不良側のCIとCII等級で施工された。

まとめると、この事例では、地質技術者間では地山評価が簡易で比較的課題の少ないと考えたが、施工技術者が肌落ち防止など施工の安全性を重要視し、結果的に調査段階と施工段階で地山評価の食い違いが発生した。

3) Cトンネル

対象トンネルの全延長の60%を3グループともC等級(CIとCII)と判断した。この判断は、Bトンネルと同様に地質技術者間で一致した。さらに施工実績は、3グループで予想したものとほぼ良い一致をみた。bとd

表－５ 事前地質調査の適切度に関するヒアリング結果

トンネル名	グループ名	事前地質調査の適切度に関するヒアリング結果	適切度
A	b	- 弾性波速度の信頼度は低かった。地質構造は、ボーリング結果より硬部と軟部（亀裂密集帯、破碎帯）が互層状になっていると予測できた。実際には、予想以上に不良地山がトンネル掘進方向に続いた。このような条件下では、軟部がブラインドとなり弾性波探査の信頼度は落ちる。 - 事前地質調査は、トンネル設計に必要な項目を満足しており、調査内容は適切であったと言える。ただし、断層破碎帯の幅や亀裂の影響範囲をやや過小評価している。また、弾性波速度がそのまま真の岩盤状況を必ずしも表していない。この辺が、地質技術者の技術力が発揮されるポイントであろう。	◎、○
	c	- 片岩の調査量は足りない。特に、土盛り厚の大きい中央部分の殆どが弾性波探査のみである。両側で追加の斜めボーリングを実施し、このボーリングを用いてトモグラフィー的手法等で弾性波探査を実施しても良かった。また、当該地域の片岩の特徴を把握する目的（亀裂密度や亀裂方向等の確認）で追加調査する方法もあった。 - 露頭が少なかったため、両坑口から水平ボーリングを実施しておけば、地山の硬軟の繰返し状況、断層破碎帯の性状や分布を一層的に把握できたと思われる。	△、△
B	c	- 実際のトンネルの地山状況は、事前地質調査の予測とそれほど変わらない結果と思われる。ただし、発破掘削時の節理面からの岩塊の剥離やすべりに関する考え方は、施工者側に立っていなかったとの反省はある。 - 地表地質踏査、弾性波探査およびボーリング調査とも、事前地質調査としての課題はない。これ以上の追加調査は必要ないと考えられる。調査結果としては、信頼の高いものである。反省点としては、安山岩の弾性波速度と一軸圧縮強度（20～30N/mm²）を考慮し、地山等級を設定すべきでなかったなどである。	◎、○
	d	- 全体事前地質調査の質と量に不足があったとは思えない。地質調査技術的には、施工時の地山等級が事前地質調査時と大きく異なった（不良側への変更）とは考えにくい。安山岩は、確かに多亀裂であったが、トンネル標準部（特に中央部）では密着していたのではないかと思う。発破掘削に伴うゆるみ（損傷）の発生は予測できるが、地山評価を含んだこの種の予測は難しい。 - 事前地質調査としての不足があるとすれば、亀裂の発達状況の把握であろう。特に、素掘面の肌落ちにつながる水平方向の亀裂の確認は重要であり、亀裂の方向や開口性を調べても良かった。地質技術者としては、施工時の設計変更で2ランク違いとなった結果（BからCⅡ等級への変更）は、理解しにくい。	◎、○
C	b	- 起点側坑口部に、事前地質調査を集中して実施すべき状況にあった。土盛り厚も薄いので、垂直ボーリングを増やす必要があった。断層破碎帯に伴う湧水に関する情報も不足している。全体的に、やや調査不足の感がある。 - このトンネルは、事前地質調査結果と施工実績は良く一致しているが、弾性波探査、ボーリング調査の調査配置・数量とも不足している。事前地質調査によって、対象トンネルの地質が十分解明されたという結果ではなく、不十分な調査結果であるが、施工実績と良く一致した事例であろう。	○、△
	d	- 起点側坑口部を中心に、事前地質調査は、やや調査不足である。 - 露頭条件等もよく、トンネル的には事前地質調査の難しいトンネルではない。ただし、全体的に事前地質調査量は、やや不足していると思われる。	○、○

*適切度は、◎：適切、○：やや不足、△：不足で表記。なお、各グループの意見は、2人で代表。

グループのコメントを、“流紋岩質凝灰岩”と“起点側破碎帯”の2項目に分け、表－４に整理した。流紋岩質凝灰岩については、比較的良好な露頭条件、3.0km/sの弾性波速度、数本の垂直ボーリング等によって、地山等級が設定されている。起点側破碎帯については、地質縦断図にその存在が記載されているが、露頭調査やボーリングから明確な位置は確認されていない。ただし、トンネル全体の地山等級に関しては、3グループの判定は同様で、施工実績と地質調査の地山評価は、概ね一致した。

4. 事前地質調査結果の適切度

地質技術者に実施した事前地質調査の適切度に関するヒアリング結果を表－５に示す。

1) Aトンネル

A トンネルの地山評価は、地質技術者間で必ずしも一致しておらず、施工結果とも一致していない。また、調査数量についても、地質技術者間で意見が分かれている。bグループでは、概ね適切な調査数量と考えている。これは、これ以上事前地質調査を行っても、地山状況をさらに明確にすることは困難であるとの判断に基づくものである。一方、cグループでは、調査数量は不足していると考えており、調査を追加することにより、一層地山状況が明確になるとの判断を行っている。両グループとも地山評価が施工結果とあまり一致していないことを考えると、「正確な地山評価が行えたか」については、必ずしも適切でなかったと考えられる。このトンネルでは、片岩の硬質部と軟質部が互層状となっている部分の分布範囲をとらえることが、地山評価を行う上で最重要であったと考えられる。調査数量については、評価を行うことは困難である。このような場合、事前地質調査としては、現状で明らかにできたこと、できなかったことを明確にし、施工段階の追加調査の必要性を明記することが、事前地質調査の適切化に不可欠であると思われる。

2) Bトンネル

B トンネルの地山評価は、地質技術者間で一致しているにも関わらず、施工結果と調査結果は一致していない。調査数量は、地質技術者間で一致し、概ね適切な調査数量であったと判断している。一方、このトンネル切羽観察記録に関するアンケート調査結果⁹⁾によれば、現地の施工技術者は、技術者（地質、設計、施工技術者の計 84 人）の平均的な地山評価に比べてやや安全性を最重視した地山評価を行っている。これらのことを考えると、「適切な調査数量であったか」については、調査数量自体は十分であったといえるが、地質技術者が安山岩中に見られる亀裂の掘削による緩みや方向性について配慮不足であったといえる。このようなことから、「正確な地山評価が行えたか」については、やや不適切さが残る結果であったと考えられる。

3) C トンネル

C トンネルの地山評価は、地質技術者間で一致しており、施工結果と調査結果も一致している。「正確な地山評価が行えたか」については、概ね適切であったと考えられる。また、調査数量についても、地質技術者間の判断は一致し、やや不足気味であると考えている。ヒアリング結果では、起点側坑口部の調査が不足しているとの意見が共通していたが、露頭条件も良く、難しい事前地質調査でないとの意見もあった。地質技術者間で地山評価が一致しており、施工とも一致していることを考えると、調査量についても結果的に適切であったと考えられる。しかし、地質技術者の調査に対する適切度は、やや調査量の不足感の残るトンネルであったといえる。

4) トンネル事前地質調査の適切度について

3 本の既設トンネルについて再調査した結果、トンネルの地形・地質条件によって必要な調査数量は異なることが明らかになった。C トンネルは、検討したトンネルにおいて最も適切な事前地質調査を行える条件にあったと考えられる。一方、A トンネルのような地山条件下では、地質技術者の地山評価や調査数量について意見が分かれる場合があり、必ずしも適切な事前地質調査とならないことがある(評価が難しくなる)と考えられる。B トンネルについては、概ね適切な調査が実施される条件にあったと考えられるが、やや「地山評価の正確さ」に適切さを欠く面があったといえる。

5. まとめ

3 本の既設トンネルを再調査することによって、事前地質調査の適切度について、「地山評価の正確さ」と「調査数量」の 2 側面から考えてみた。その結果、対象トンネルの地形・地質条件毎に、事前地質調査の適切度は異なる結果となった。例えば、強い異方性を示し、硬質部と軟質部が互層構造となっているような地山評価の難しい地形・地質条件では、調査数量を増やすことによって、必ずしも正確な地山評価ができない。また、強い異方性を示さず湧水のない硬岩地山のように平易な地形・地質条件では、経済的な調査数量であっても、精度の高い地山評価ができる等が再調査の事例で明らかとなった。

6. 今後の課題

トンネル事前地質調査の適切度を考えた場合、「地山評価の正確さ」と「調査数量」のトレードオフを考えなければならない。事前地質調査は、適切度を考慮して調査数量を決定し実施するのが理想であるが、実際には困難な面がある。また、本研究においても、「地山評価の正確さ」と「調査数量」のトレードオフを検討するには至っていない。このためには、「地山評価の正確さ」「調査数量」の評価を定量化することが必須であり、再調査トンネル数を増やすなど、さらなる研究が必要である。

参考文献

- 1) 鈴木昌次他：NATM 施工実績に基づく事前設計の評価に関する一考察，土木学会論文集 No. 427/VI-14，pp. 261-270，1991. 3.
- 2) 鈴木守，富田宏夫：トンネルの地質調査の性格と問題点(2)，トンネルと地下，第 24 巻，10 号，pp. 49-58，1993.
- 3) 中川浩二他：トンネル事前設計における地質調査の問題点とその評価に関する研究，土木学会論文集 No. 658/VI-48，pp. 33-43，2000. 9.