

先進ボーリングに基づく 地山等級評価について

亀村勝美^{1*}・岡崎健治²・伊東佳彦²

¹フェロー会員 公益財団法人 深田地質研究所 (〒113-0021 東京都文京区本駒込2丁目13-12)
²正会員 独立行政法人 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸一条三丁目1-34)
*E-mail:kame@fgi.or.jp

北海道の道路トンネルでは、設計施工要領によって全線にわたって切羽からの先進ボーリングが実施され、地山に関する多くの情報が得られている。そこで16のトンネル(全長31km)における先進ボーリング結果と事前調査結果、施工実績の関連性について検討を加えた。その結果、先進ボーリングから得られる大量の情報をを用いることにより、予測と施工時の地山等級との一致率をかなり高くでき、最終的に合理的なトンネル施工が可能となることが明らかとなった。一方で先進ボーリングにより得られる大量の情報は必ずしも地山等級評価に活かされておらず、現行の地質調査結果に基づく地山評価法(地山分類表)を見直すことによって、評価結果の精度を向上させることが出来る可能性がある。

Key Words: mountain tunnel, rock classification, advancing boring, elastic wave velocity

1. はじめに

我が国で山岳工法トンネルを建設する場合、複雑でしかも風化・変質した地質さらには豊富な地下水といった必ずしも良いとは言えない施工条件を覚悟せざるを得ない。そしてトンネル施工に関わる技術者には、こうした困難な施工条件を如何に克服するかが問われる。

トンネル施工において事故や工期遅延、工費増などの問題を生じるような事象の発生を回避するためには標準工法の基本である情報化施工をその理念通りに行うこと、すなわち施工前、施工中に得られる様々な情報にもとづき、地山特性に適合した掘削法、支保パターンを遅滞なく選択する必要がある。しかし、実際に行われている事前の地質調査、施工中の観察・計測などによる情報だけでは的確に地山特性を評価することは難しい。

土木学会トンネル工学委員会では、こうした問題について検討し2007年にトンネルライブラリー第18号「山岳トンネルの事前調査・設計」を出版した。その中で、いかに事前の評価結果と実際が合わないかが示されている。¹⁾

そしてその原因として表-1の5つを示している。

ここで1と2は、地質情報を得るためのハード的な問題であり、3と4は調査結果として得られるデータを設計や施工に反映させるための工学的判断上の、いわばソフト的な問題と考えることができる。そして5は、地質

調査結果の解釈に関わる施工上の問題点、知見などの情報が施工担当者から調査担当者あるいは設計担当者に伝達されていないこと、言い換えるならば情報化施工における情報の流れがトンネルの竣工とともに止まってしまうことによる問題ということが出来る。

原因はともあれ、設計時に予想した地山の特性が大きくしかも悪い方へと外れることによってトンネル施工法は変更を余儀なくされ、工期と工費の増大を招く。場合によっては地山の変状や突発湧水など工事中の安全が脅かされる事態にも至る。こうした想定外の事象による損失すなわちリスクを如何に小さくするかは、山岳工法トンネルにおける重要な課題である。

我々が普段使っているリスクという言葉には2つの側面がある。一つは「何かを失う」という側面である。例えば想定していなかった断層に遭遇し、工期が大幅に遅延するという状況に対してリスクが意識される。

表-1 設計時と施工時の地山評価結果が一致しない原因

	原因(鈴木らによる)	分類
1	調査技術の限界	ハード的問題
2	不十分な調査	
3	事実と解釈の区別	ソフト的問題
4	解釈の個人差	
5	残された問題点の明記	システム上の問題

もう一つは、そうした事象が「不確実である」という側面である。事前の調査では明確ではないが、ひょっとしたら大規模な断層があるかもしれないというときにリスクが意識される。リスクを考慮して何か判断を下す場合には、リスクの持つこの二つの側面を評価する必要がある。

一般に様々な不確実要素に対して安全側の対応を取る、すなわち構造物の設計、施工、維持管理にお金を掛ければ掛けるほど、何らかの損失が生じる可能性（リスク）は小さくなる。とは言え莫大な（過剰な）建設費を投入し、リスクをできる限り排除しようとするのは多くの無駄を生じる。一方で最小限の建設投資しか行わず、その代わりに大きなリスクを覚悟しようとするのは取り返しのつかない事態を招く。適切な投資で関係者が許容できるリスクとすることが重要となる。

2. 岩盤構造物のリスク評価の困難さ

リスクの評価はもともと不確実な事象に対して確率的な評価を行うものであり、当然のことながらそこで扱われるデータの信頼性と精度が問題となる。しかし、様々な構造物の中でも岩盤に関わる構造物、例えば岩盤斜面、山岳トンネル、地下空洞などでは、岩盤そのものの挙動や岩盤と構造物の相互作用などが、鋼構造やコンクリート構造物には明確にされていない。その上、その状態を示すデータや破壊時のデータもきわめて限られているため具体的なリスクを評価することは難しい。

山岳工法トンネルにおける施工に関わる様々なリスクの低減のためには、地山特性の評価精度を如何に向上させるかが重要となる。著者らは、こうした観点から北海道において実施されている先進ボーリング²⁾に着目し様々な検討を加えてきた。その結果、先進ボーリングの情報を活用することにより地山の岩盤等級評価の精度が格段に向上すること。先進ボーリングに要する建設費用増は、先進ボーリングにより施工中の変状トラブルを防止できることから結果的に十分に見合うことなどを示してきた。^{3),4)}

一方で先進ボーリングにより大量の弾性波速度（コア、地山）に関するデータが得られたとしても、岩盤等級の決め手にはなり難いことも明らかとなった。

(1) 先進ボーリングによる地山等級評価結果

図-1 は先進ボーリングによりコアの弾性波速度 V_{pc} が得られている 1240 のデータについて、先進ボーリングによる地山等級判定結果との関係を示したものである。

ここで C1-C2 などの評価は、コアの弾性波速度だけではなく、コアの状況、RQD(Rock Quality Designation)など

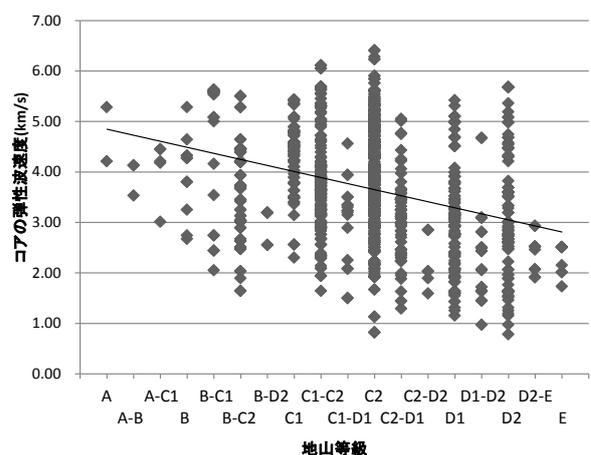


図-1 先進ボーリングによるコアの弾性波速度と地山等級判定結果

他の判定指標と併せて評価した結果、一つの等級に絞ら込むことが出来なかったことを示している。

このように幅を持った評価となる他、それぞれの地山等級に対応するコアの弾性波速度は広く分布している。図において単純に直線補間を取ると図中に示したように地山等級が下がるにつれて弾性波速度も小さくなっている。しかし分布の幅があまりにも大きいため、先進ボーリングによってコアの弾性波速度が明らかになったとしても地山等級の評価は難しい。しかしこうした判定結果であっても最終の施工パターンは単一の地山等級としなければならない。

では実際に施工結果はどうなったのか？表-2 は先進ボーリングに基づく地山等級判定結果と最終的に施工された地山等級の関係を示したものである。表中太字で示したものは先進ボーリングによる評価結果と施工結果とが一致したものである。ここで先進ボーリングはおよそ 100m 毎に実施され、RQD などのコアの評価は 1m 毎、コアの弾性波速度計測などは 5~10m 毎に行われている。

このように先進ボーリングによる評価で幅を持たない単一の地山等級となったものは、施工結果との一致度が非常に高いことが判る。これに対して評価の結果、幅を持った場合は施工結果にある傾向が見られる。例えば評価結果の幅の中に C2 を含むものは 335 あるがそのうち 299 (89%) が C2 で施工されている。一方 D1 を含むものでは 112 に対し 31 (28%) が D1 で施工され、67 (60%) が C2 で施工されている。すなわち様々な評価指標により幅を持った評価結果となったケースのほとんどが C2 で施工されている。その理由として「幅を持った評価結果の場合、支保パターンとして最も地山の様々な状況に対して対応し易い C2 パターンを選択する」ことが考えられる。

また先進ボーリングで A、A-B、A-C1、B、B-C1 などと評価されたものが施工時に C2 となっているのは、コ

表-2 先進ボーリングによる地山等級評価結果と施工時地山等級の関係

		施工時地山等級					計
		C1	C2	D1	D2	E	
先進Br.による地山等級	A		2				2
	A-B		2				2
	A-C1		1				1
	B		8				8
	B-C1		18				18
	B-C2		35				35
	B-D2		3				3
	C1	60	19		1		80
	C1-C2		201	2		1	204
	C1-D1		11	7			18
	C2	1	514	18	2		535
	C2-D1		45	24	2		71
	C2-D2		4				4
	D1		6	100	32	2	140
	D1-D2		4		12		16
D2		3	4	89		96	
D2-E					6	6	
E					6	6	
計	61	871	155	138	15	1240	

アの観察や試験では良い評価結果となったものの、切羽の状況はそれ程良いものではなく、それまでの地山評価結果も勘案しC2としたものと思われる。

こうした状況も先進ボーリングで得られる多くの指標に対する判定の閾値を見直すことや指標の優先順位を設定することによって改善され、より精度の高い地山等級評価が可能になることが考えられる。

(2) V_{pc} のばらつき

図-1に示したようにV_{pc}という定量的なデータが大量に得られたとしても、地山等級を精度よく判定することは難しい。ここではV_{pc}についてさらに詳しく検討を加える。

図-2は、先進ボーリングによる地山等級でC2と判定されたものについてそのV_{pc}の岩種ごとの分布状況を示したものである。岩種ごとに弾性波速度を0.5km/sの刻みで分け割合で示している。このように安山岩では4~4.5km/sにピークがあり凝灰角礫岩3~3.5km/s、火山角礫岩3.5~4km/s、砂岩4~4.5km/sと分布状況も含めて岩種ごとの特徴は明らかである。平均値で見ると安山岩4.23km/s、角礫凝灰岩3.33km/s、火山角礫岩3.50km/s、砂岩4.35km/sとなっている。

同様にして地山等級D1と判定されたものについて示すと図-3のようになっている。この場合ピークは、安山岩で3~3.5km/s、凝灰角礫岩で2~2.5と3~3.5km/s、火山

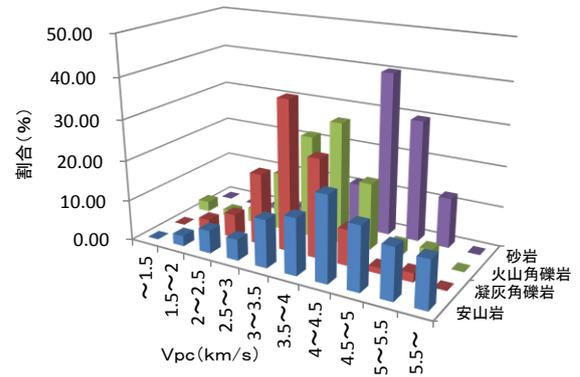


図-2 岩盤等級C2におけるコアの弾性波速度V_{pc}の分布

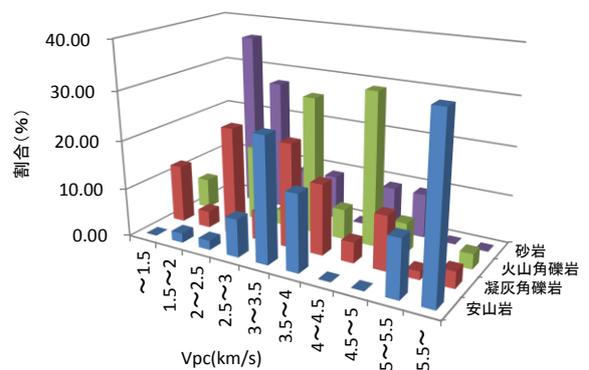


図-3 岩盤等級D1におけるコアの弾性波速度V_{pc}の分布

角礫岩3~3.5と4~4.5km/s、砂岩1.5~2km/sとなっておりC2との差は明らかである。平均値では安山岩4.42km/s、角礫凝灰岩3.11km/s、火山角礫岩3.51km/s、砂岩2.70km/sとなっている。砂岩を除きC2との差は小さい。これは安山岩では、V_{pc}が5.5km/s以上のコアであるのにもかかわらず、他の地山評価項目（おそらくRQDなどの不連続性評価結果）によってD1と評価されたこと、角礫凝灰岩や火山角礫岩ではピークが二つ存在することによる。

このように岩種ごとにV_{pc}の分布状況は特徴付けられるが、地山等級判定の観点から見ると明確な閾値を定めることは非常に難しいと考えられる。

3. 地山等級判定における問題点

2で示したように、コアの弾性波速度が大量に得られたとしても地山等級の判定は容易でない。これはRQDやコアの一軸圧縮強度などの他の地山評価指標についても同様であり、単一の指標によって地山等級を評価することはできない。では複数の指標を組み合わせることで問題は解決するのか？

図-4 は、あるトンネルにおける地山等級判定の状況を示したものである。図に示すように判定のための指標として、地山弾性波速度・変形係数・地山強度比・準岩盤強度・コアの状況・湧水状況・RQD(5)・亀裂係数があ

る。ここで準岩盤強度 σc^* は次式で定義される亀裂を含む岩盤の一軸圧縮強度である。

$$\sigma c^* = \sigma c \times (Vp^* / Vp)^2$$

σc : コアの一軸圧縮強度
 Vp^* : 地山の弾性波速度(km/s)
 Vp : コアの超音波伝播速度(km/s)

また湧水状況は、切羽からの湧水量(l/min)、RQD(5)は、1片 5cm 以上のコアの総延長÷掘進長×100(%)で算出したもの、亀裂係数 K は、次式で定義される割れ目状態の判定指標である。

$$K = \{1 - (Vp^* / Vp)^2\} \times 100\%$$

しかしこうした指標毎の評価結果は A,B から DII までばらばらであり、この結果から総合的に判断を下し一つの等級を示すのは容易ではない。

このような場合、地質調査担当者はどのような判断を行うのか、素朴な疑問をぶつけてみた。そのやり取りの一部を表-3 に示す。

Q&A-6 で述べられていることは、表-1 の 5 で指摘されていることと同じである。この問題についてはこれまでも様々な議論がなされ、地質技術者と設計技術者の知見の集約と意思疎通の必要性がたびたび指摘されている。しかし、いまだに根本的な解決に至っていないのが現状である。これについては施工が完了した時点で、どのような地質情報でどの段階でどのような判断、解釈が行われたのか、そしてその結果はどうであったのかを多くの事例について検証し、その中から具体的な問題点を抽出する必要がある。

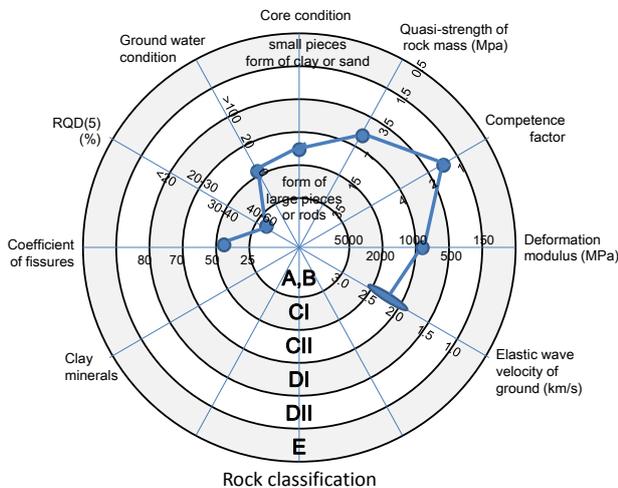


図-4 地山等級判定例

表-3 地山評価に関する Q&A

	問	答
1	地山分類表は判断に十分か?	均質で風化を受けてなく、断層もないような地山に対してはOK。しかし、そうではない場合は、判断に迷うことが多い。
2	では、何を判断の拠り所とするのか?	自分で見たコアの状況を大事にする。コアの状況を事前調査段階で想定されている地質状況と照らし合わせて判断する。
3	それはどうして?	Vpc や一軸強度は点でのデータである。参考にはなるが、トンネルの施工対象としての地山評価は、地山の地質学的評価を反映させて判断する。
4	どんな事例がありますか?	RQD を主体に判断すると、評価結果は厳しくなる。また、亀裂は多いが、Vpc と Vph がほぼ等しく、亀裂係数として反映されないこともある。
5	では RQD は信頼できないのか?	RQD は単純に思えるかもしれないが、実際は評価する担当者の個性が出てしまう。実際、評価に迷う場合が多々ある。
6	ではどうしたらいいのでしょうか?	地質調査担当者が施工前に評価した結果が実際はどうだったのかという情報が、担当者に還元されていない。もし還元されれば、判断に迷った場合の対応などを具体的に議論することができる。その結果を指針などに反映できると思う。

4. おわりに

我が国に情報化施工を基本理念とする山岳トンネル工法が導入されて30年が経過しようとしている。このいわゆる NATM 工法によってすでに多くのトンネルが施工され、供用されている。しかし、この間の調査、設計、施工そして維持管理に関わる情報は、必ずしも活用されているとは言い難い状況にある。

木山⁹⁾は、「経験に基づいて設計し、観察・計測によって修正するトンネルで用いられる岩盤分類は、分類に用いられた実績の範囲とその数、およびその後の適用数と適用範囲の実績のみで分類法の適否、良し悪しが評価される」と述べている。こうした観点から北海道における先進ボーリングについて考えて見てみると、分類の指標として用いているデータの種類の多さ、またその数も桁外れに多く分類法の適否を評価するのに最適であると考えられる。

これまで筆者らは、貴重なデータに関し様々な検討を行ってきた^{6),7)}。しかし膨大な情報の評価はまだ道半ばであり、明確な結果を得るまでには至っていないのが現状である。今後とも、より合理的なトンネルの設計施工を目指し更なるデータの分析、検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 土木学会：より良い山岳トンネルの事前調査・事前設計に向けて、トンネルライブラリー第18号，2007。

- 2) 北海道開発局：道路設計要領第4集トンネル，2012.4.
- 3) 亀村勝美，岡崎健治，伊東佳彦：変状トンネルへの対策工の選定法に関する研究—対策工としての先進ボーリングの効果について—，第41回岩盤力学に関するシンポジウム，土木学会，2012.
- 4) 亀村勝美，岡崎健治，伊東佳彦，佐々木博一：山岳トンネルにおける先進ボーリングの効果に関する検討，第68回年次学術講演会，2013.
- 5) 日本材料学会編：岩の力学—基礎から応用まで，13章岩の工学的分類と原位置岩盤試験，日本材料学会，1993.
- 6) 岡崎健治，伊東佳彦，佐々木博一：トンネルの地質調査・施工計測データの情報資源化に向けた検討例，第66回年次学術講演会，土木学会，2011.
- 7) 亀村勝美，岡崎健治，伊東佳彦：先進ボーリングの効果について—弾性波速度と地山等級の関連性—，第42回岩盤力学に関するシンポジウム，土木学会，2013.

ROCK MASS CLASSIFICATION BASED ON THE RESULTS OF ADVANCING BORING

Katsumi KAMEMURA, Kenji OKAZAKI and Yoshihiko ITO

In the road tunnel in Hokkaido, an advancing boring from tunnel face has been regulated by the road tunnel design and construction guidelines. So a lot of information concerning to rock mass properties are acquired. Here, rock mass classification results based on the advancing boring of 16 tunnels (31 km in total length) are compared with constructed results. As a result, it is clearly shown that the accuracy of rock mass classification can be made higher by using advancing boring data. On the other hand, a lot of information acquired by advancing boring have not been properly used in rock mass classification, so the further study might be possible to improve the rock mass classification table.