

岩盤構造物の性能評価における課題 —先進ボーリング調査結果に基づく地山分類—

亀村勝美

深田地質研究所

Some Issues On the Performance Evaluation of Tunnel and Underground Cavern - Rock Mass Classification based on Advancing Boring Results -

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：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を行うことが原則とされており、これによって施工中に地山に関する多くの情報が得られる。そこで先進ボーリングが実施された16のトンネル（全長31km）における事前調査結果、先進ボーリング結果と施工実績の関連性について検討を加えてきた。そしてこれまでに、ある程度の費用と時間を必要とするが先進ボーリングから得られる豊富な情報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を明らかにしてきた。一方で、先進ボーリングにより得られる大量の情報のすべてが必ずしも地山分類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、評価精度を向上させることが出来る可能性があることを示した。

キーワード：山岳トンネル、地山分類、先進ボーリング

Abstract: 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.

Keywords: mountain tunnel, rock classification, advancing boring

1. はじめに

我が国で山岳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状況を回避するためにはトンネル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く、様々なトラブルに遭遇している現状がある。

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(土木学会, 2007)。その中で、いかに事前の地山分類評価結果と実際に合わないかが示されている。表1は、事前調査に基づいて設計時に設定した地山等級が、実際に施工された際に評価された等級と一致したのか? 実際には良かった(上位側)のか?あるいは実際には悪かった(下位側)のか?を示したものである。

表1 設計時と施工時の地山等級の差
岩種ごとの変更の割合(%) 37トンネル 総延長41.6km

	上位側	一致	下位側
片岩	9	26	66
粘板岩	14	53	34
花崗岩	6	54	40
凝灰角礫岩	20	42	39
砂岩頁岩互層	7	36	57
泥岩	5	42	53

これを見ると全体的な傾向として想定と実際が一致するのは4割程度しかなく、上位への変更は1割、下位への変更は実に5割にもなっている。この結果は、事前調査に基づく地山等級判断がいかに難しいかを示している。

そしてその原因として5項目を示している。この5項目とその問題の種類で分類した結果を表2に示す。

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いて最も重要な情報の流れがトンネルの竣工とともに止まってしまっていることによる問題ということができる。

表2 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

こうした原因により、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。したがって表2に示すような原因による地山評価の不一致をできる限り少なくし、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が、山岳トンネルの施工における重要な課題となる。

2. 山岳トンネル施工におけるリスク

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。

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り、リスクは、損失の発生確率(probability)と損失(consequence)の積(これを損失期待値という)で定義される。式で示すと次のようになる。

$$R(\text{リスク}) = P(\text{発生確率}) \times C(\text{損失})$$

例えばトンネルの施工の進展と共に新たな断層が出現したり、それまでに予測しなかった大規模湧水が生じたりする。この場合、これらの事象に対応するために工法変更や補助工法が必要となり、新たな工費と工期延長が必要となる。またこうした対策費用だけでなく、工事の竣工が遅れることによる営業損、予期しない事象による人的被害が発生した場合の損害、企業としての社会的信頼の喪失など様々な損失が生じる。さらには施工中に大規模な対策工が行われたトンネルでは、供用開始後に徐々にトンネル変状が生じ、大規模な改修工事を必要とする例も少なくなく、維持管理費用の点でもコスト増を招く可能性がある。

こうしたことは、起こるかどうかが判断することは難しい(不確実である)が、ひとたび起こると大きな損失となるリスクに他ならない。

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ことは多くの無駄を生じる可能性がある。一方で最小限の建設投資しか行わず、その変わりに大きなリスクを覚悟しようとすることは

取り返しのつかない事態を招くことに繋がる。すなわち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。

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程には明確にされていない。その上に、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。

さて、山岳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投資に十分見合うことなどを示してきた(亀村ほか, 2012)。

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(亀村ほか, 2014)。

3. 先進ボーリングによる地山等級評価

3.1 コアの弾性波速度と地山等級

図1は先進ボーリングによりコアの弾性波速度が得られている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などの評価結果は、コアの弾性波速度だけではなく、コアの状況など他の判定指標と併せて評価した結果、一つの等級に絞り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。とはいえ、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。

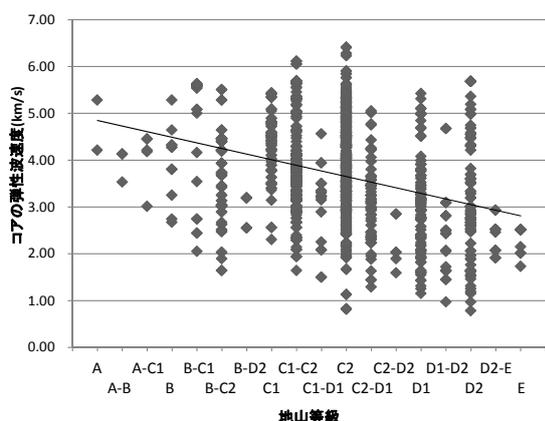


図1 先進ボーリングによるコアの弾性波速度と地山等級判定結果

それでは実際に施工結果はどうなったのか？表3は先進ボーリングによる地山等級判定結果と施工時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。

このように先進ボーリングによる評価で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

が幅を持った場合は、施工結果にある傾向が見られる。例えば先進ボーリングによる評価結果の幅の中にC2を含むものはB-C2からC2-D2まで計335あるが、そのうち299（89%）がC2で施工されている。

表3 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	

一方D1を含むものは、B - D2からD1 - D2までの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単一の等級への絞り込みができず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＝判定指標がばらばらで様々な可能性が否定できないような場合、支保パターンとして最も地山の様々な状況に対応し易いC2パターンを選択している」ことが考えられる。

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と考えられる。

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4～4.5 (km/s)にピークがあり凝灰角礫岩3～3.5 (km/s)、火山角礫岩3.5～4 (km/s)、砂岩4～4.5 (km/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4.23 (km/s)、角礫凝灰岩3.33 (km/s)、火山角礫岩3.50 (km/s)、砂岩4.35 (km/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3～3.5 (km/s)、凝灰角礫岩で2～2.5と3～3.5 (km/s)、火山角礫岩3～3.5と4～4.5 (km/s)、砂岩1.5～2 (km/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4.42 (km/s)、角礫凝灰岩3.11 (km/s)、火山角礫岩3.51 (km/s)、砂岩2.70 (km/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と評価されていること、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。

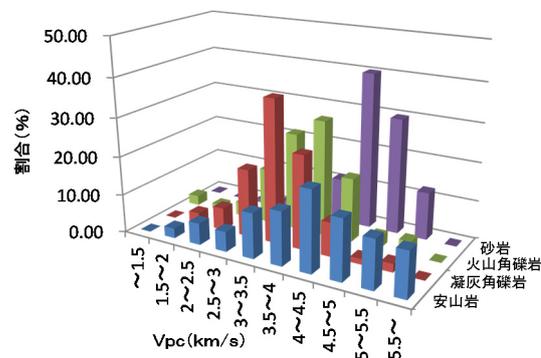


図2 岩盤等級C2におけるコアの弾性波速度V_{pc}の分布

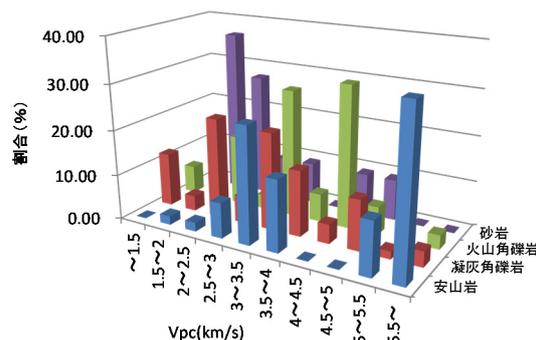


図3 岩盤等級D1におけるコアの弾性波速度V_{pc}の分布

3.2 地山等級判定における岩盤の弾性波速度と準岩盤強度

北海道の道路トンネルでは、道路設計要領（北海道開発局，2012）に基づきトンネルの調査から施工までが行われている。その中で提示されている地山分類表では、岩種ごとの地山弾性波速度V_p^{*}、RQD (5)、亀裂係数K、準岩盤圧縮強度σ_c^{*}、地山強度比などが分類のための指標として用いられている。ここでは比較的データ数の多い安山岩について指標間の関係を分析する。

表4は、設計要領に示された分類表の一部を示し

たもので、 Vp^* とRQD(5)は「剥離性に富まない古生層～深成岩、火成岩」について適用される値、そのほかは全岩種について適用されるものである。

16トンネルの内、安山岩が認められるのは9トンネルの412データであるが、そのうち孔内検層による地山弾性波速度 Vp^* と室内試験によるコアの弾性波速度 Vpc と一軸圧縮強度 σc^* が得られているのは280データである。

表4 地山分類表 (部分)

地山区分	Vp^* (km/s)	RQD(5) (%)	K (%)	σc^* (MPa)
A	4.5-	60-		140-
B	4.0-3.5	50-80	-25	140-35
C1	3.5-3.0	30-70	25-50	35-15
C2	3.0-2.5	20-50	50-70	15-7
D1	2.5-3.0	-40	70-80	7-3.5
D2		-30	80-	3.5-1.5

地山分類表で指標の一つとして用いられている準岩盤圧縮強度 σc^* は、 Vp^* と Vpc を用い次式で計算される。

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

この式から求められた σc^* と Vp^* の関係を図4に示す。この図には表4で示された岩盤区分の範囲も示している。

このように σc^* と Vp^* の広く分布している関係に対し、地山分類表の閾値の傾向は大まかに対応しているものの σc^* による判定結果と Vp^* による判定結果が一致しているものは少ない。具体的に分布の状況を数え上げると表5ようになる。ただし280のデータのうち52については表4に示した分類表で対応するカテゴリーがないため残りの228データが分析対象となっている。

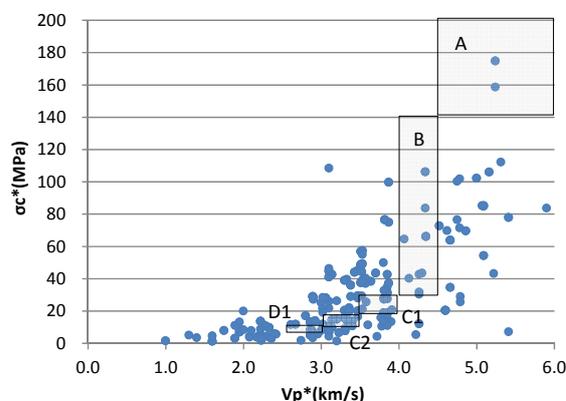


図4 準岩盤圧縮強度と地山の弾性波速度の関係と現行の分類表による区分閾値

表5 現行の分類表による準岩盤圧縮強度 σc^* と地山弾性波速度 Vp^* による地山等級判定結果

上：対応するケース数 下：全体に対する割合

		σc^* (MPa)						
		140以上	140~35	35~15	15~7	7~3.5	3.5~1.5	
Vp^* (km/s)	4.5以上	3	27	9	1	0	0	A
	4.0~4.5	0	10	2	2	1	0	B
	3.5~4.0	0	40	19	7	1	0	CI
	3.0~3.5	0	19	31	24	5	0	CII
	2.5~3.0	0	0	8	11	5	3	DI
		A	B	CI	CII	DI	DII	

		σc^* (MPa)						
		140以上	140~35	35~15	15~7	7~3.5	3.5~1.5	
Vp^* (km/s)	4.5以上	1.3%	11.7%	3.9%	0.4%	0.0%	0.0%	A
	4.0~4.5	0.0%	4.3%	0.9%	0.9%	0.4%	0.0%	B
	3.5~4.0	0.0%	17.4%	8.3%	3.0%	0.4%	0.0%	CI
	3.0~3.5	0.0%	8.3%	13.5%	10.4%	2.2%	0.0%	CII
	2.5~3.0	0.0%	0.0%	3.5%	4.8%	2.2%	1.3%	DI
		A	B	CI	CII	DI	DII	

表5を見ると σc^* による判定結果と Vp^* による判定結果が一致しているのはC2の10.4%を最高に全体で26.5%でしかない。すなわち多くのケースで判断に迷うことになる。

この σc^* と Vp^* による判定結果の一致割合を高めるためには、区分判定の閾値を変える必要がある。図5は、 Vp^* についてのみ閾値を変更した例を示したものである。

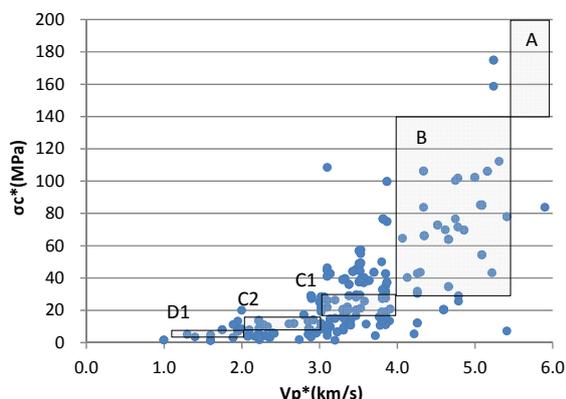


図5 区分の閾値を変えた場合の準岩盤圧縮強度と地山の弾性波速度の関係

表6 閾値を変えた場合の準岩盤圧縮強度 σ_c^* と地山弾性波速度 V_p^* による地山等級判定結果

上：対応するケース数 下：全体に対する割合

		$\sigma_c^*(MPa)$						
		140以上	140~35	35~15	15~7	7~3.5	3.5~1.5	
$V_p^*(km/s)$	5.5以上	0	1	0	0	0	0	A
	4.0~5.5	3	36	11	3	1	0	B
	3.0~4.0	0	59	50	32	6	1	CI
	2.0~3.0	0	0	10	22	18	9	CII
	~2.0	0	0	0	6	4	5	DI
		A	B	CI	CII	DI	DII	

		$\sigma_c^*(MPa)$						
		140以上	140~35	35~15	15~7	7~3.5	3.5~1.5	
$V_p^*(km/s)$	4.5以上	0.0%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	A
	4.0~4.5	1.1%	12.7%	3.9%	1.1%	0.4%	0.0%	B
	3.5~4.0	0.0%	20.8%	17.6%	11.3%	2.1%	0.4%	CI
	3.0~3.5	0.0%	0.0%	3.5%	7.7%	6.3%	3.2%	CII
	2.5~3.0	0.0%	0.0%	0.0%	2.1%	1.4%	1.8%	DI
		A	B	CI	CII	DI	DII	

このような閾値を仮定すると表6のような判定結果の対応が得られる。この場合、 V_p^* に対する閾値の範囲が広がったため対象とするデータは229から277へと増加している。この場合、 σ_c^* と V_p^* による判定結果が一致する割合は、C1の17.6%を最高に全体で39.4%と大幅によくなっている。とはいえ、まだ60%しか対応していない。

この一致割合を高めるためには、様々な岩種に

ついて様々な判定指標間での関係性を評価していく必要がある。その際、単に得られているデータの統計的な分析結果だけによるのではなく、物理的あるいは工学的な観点からの検討も併せて行っていく必要がある。

4. 地山等級判定における問題点

3章で示したように、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。また、地山分類表の複数の評価項目を用いても単一の地山等級を評価することは難しい。では実際にどのような判定が行われているのであろうか？

図6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・地下水状況・RQD (5)・亀裂係数があり、その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。

ここに示した3例の場合、判定対象とする岩種は同一トンネルの角礫凝灰岩である。図に示されるように判定結果は大きく異なっており、傾向を見出すことはできない。ちなみに、この3例の最終評価結果はすべてC2となっている。

このような場合、地質調査担当者はどう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以下に示す。

Q1:地山分類表は判断に十分か？

A1: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。

Q2:では、何を判断の拠り所とするのか？

A2: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。

Q3:それはどうして？

A3:V_{pc}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。

Q4:どんな事例がありますか

A4: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、V_{pc}とV_{ph}がほぼ等しく、亀裂係数として反映されないこともある。

Q5:ではRQDは信頼できないのか？

A5: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。

Q6:ではどうしたらいいのでしょうか？

A6: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。

このQ&Aの6で述べられていることは、1.はじめにの表2で指摘し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。

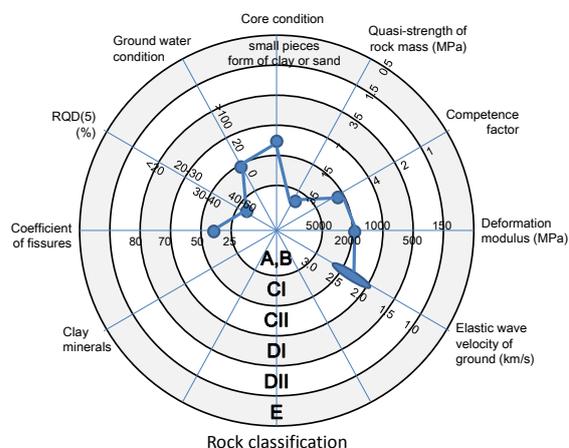
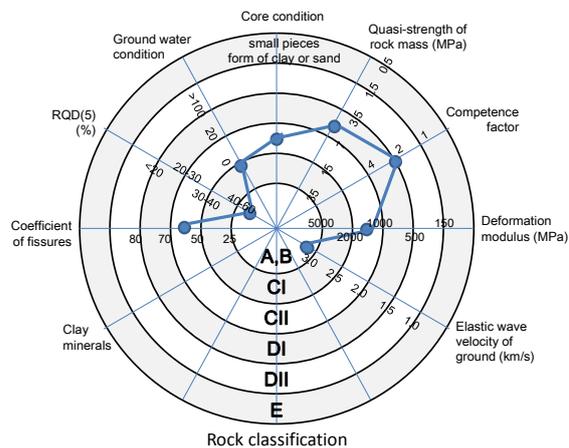
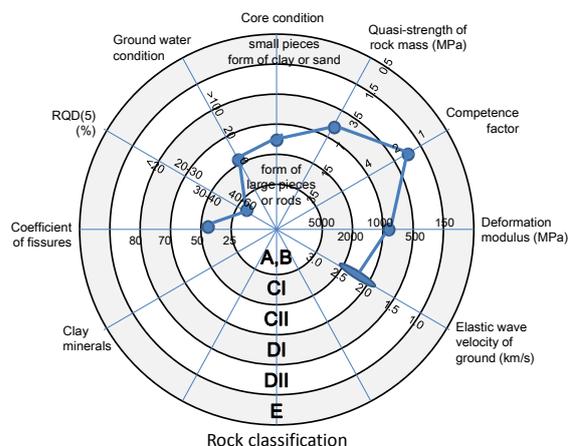


図6 地山分類評価結果の例

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。

5. おわりに

ここでは、先進ボーリングによって得られる大量の地山の工学的特性に関する情報を詳細に分析し、トンネルの設計・施工の基礎となる地山分類について検討した。

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（いわゆるNATM）が導入されて30年が経過しようとしている。この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。

かつて木山は、「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」と指摘している。（日本材料学会編，1993）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ると、分類の指標として用いているデータの種類も、またその数も桁外れに多く既往の分類法の適否を評価するのに最適であると考えられる。

岡崎ら（岡崎ら，2011）は既にトンネルの地質調査・施工計測データを情報資源とみなし、それを如何に活用するかについて検討を行っている。

筆者もその一環として、貴重なデータに関し様々な検討を行ってきた（亀村ほか，2013）。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

- 土木学会（2007）：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，18.
- 北海道開発局（2012）：道路設計要領第4集トンネル.
- 亀村勝美・岡崎健治・伊東佳彦（2012）：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13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，岩の力学連合会.
- 亀村勝美・岡崎健治・伊東佳彦・佐々木博一（2013）：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，土木学会.
- 亀村勝美・岡崎健治・伊東佳彦（2014）：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.
- 日本材料学会編（1993）：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.
- 岡崎健治・伊東佳彦・佐々木博一（2011）：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.

