

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 -

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、全線にわたって切羽から先進ボーリングを実施することが原則となっている。先進ボーリングが実施された16のトンネル(全長31kmと661区間)の施工実績を分析した結果、不確実性が多く含まれている事前調査結果よりも、ある程度の費用と時間は覚悟する必要があるが切羽からの先進ボーリングから得られる地質データに基づく地山評価の方が精度が高いことが明らかとなった。

また、先進ボーリングで得られた多くの定性的なデータと地山等級評価結果の関係を詳細に検討し、調査結果に基づく地山評価法の問題点について検討を加えた。将来的には現行の地質調査結果に基づく地山評価法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, observational method

1. はじめに

供用開始から長い時間を経た山岳トンネルでは、様々な変状を生じているものが少なくない。それらは、湧水の発生・増加、覆工コンクリートのひび割れの発生などのトンネル構造の安定性に直接影響を及ぼす心配のない軽微なものから、複数のクラックの発生、進展に伴うコンクリート片のはく離などのより深刻なものまで様々である。中には明らかなトンネル内空変位の増加、側壁の変状、路盤の隆起などトンネルの機能に重大な支障を来すものもあり、この場合には大規模な補修工事を余儀なくされることになる。

しかし、既に供用されているトンネルに対する大規模な対策工は、単に高額な工事費を要するだけではなく、工事期間中の交通・物流機能の低下など2次的に生じる社会的損失も大きく、対策をより困難なものにしている。

トンネルの施工にあたっては、このような事態に至らぬようにすることが重要であり、そのためには地山特性に適合した掘削法、支保パターンで施工する必要がある。しかし、事前の地質調査による情報だけでは詳細な地山情報を得ることは難しく、施工中の観察、計測によって得られる地山情報をいかに活用するかが問題となる。ここに山岳トンネルの情報化施工の重要性がある。

NATMでは、施工中に地山情報を得る目的で切羽観察

とトンネル内空変位や支保応力の計測が行われる。これに関して、北海道開発局道路設計要領第4集トンネル¹⁾の第11章観察・計測工では、「地山の条件や掘削時の挙動を把握し、支保構造の設計や施工方法をより最適なものに変更することによって、工事の安全性と経済性を図る」として観察・計測工に加えて施工中の調査が規定されている。その解説で「従来、施工中における前方地質の検討は、切羽状態を経験的、定性的に判断して実施パターンを検討する方法が多く用いられ、地質の悪い区間や破碎帯が予想される場合においてのみ、先進ボーリングで調査精度を高める方法が取られてきた。しかし、昨今、NATMトンネルの計測管理によって、施工後の内空変位等による定量的検証手段が確立されるに至って、施工前の実施パターン決定に用いる前方地質確認手段に、よりいっそうの定量的、継続的な判定が要求されてきている。」と述べ、具体的には施工中の先進ボーリングを全線において実施することを原則としている。

ちなみに、先進ボーリングをはじめとする切羽前方探査手法について日本道路協会の「道路トンネル観察・計測指針」では、切羽前方に地質急変部が予想されるなどの場合に利用されるもので、必ずしもトンネル全長にわたり実施するべきものではないとしている。すなわち全線にわたる先進ボーリングは、北海道でしか実施されていないことになる。

ここではこうして得られた貴重な先進ボーリングのデータを事前調査結果と比較し、現行の地山評価法について検討する。

2. 情報化施工管理における課題

(1) NATMにおける情報化施工

山岳トンネルの標準工法である NATM の特徴は、施工中に得られる情報を活用し施工管理を行うことにある。図-1 は情報化施工管理の概念を示したものである。トンネルはこの図に従い以下のようにして施工が進められる。

- (i) 事前地質調査を行い弾性波速度 V_p 、ボーリングコアの状況・RQD、地質条件、不連続面の間隔、切羽自立時間などの項目について評価する。
- (ii) 調査結果に基づき地山分類を行う。
- (iii) あらかじめ設定されていた地山分類毎の支保パターンの中から対応するものを選択する。または数値解析などを行い、支保パターンを決定する。
- (iv) 施工を開始する。
- (v) 施工中に地質観察、地山と支保の挙動計測を行い、支保パターンが適切であったかを判断する。
- (vi) 設計時に設定した管理基準に基づき対策の必要性を判断する。必要であれば支保パターンの変更、掘削法の変更、再設計、再調査などを行い、次の切羽の掘進に掛かる。(v→viを繰り返す)

このように切羽において得られる情報を観察・計測ごとに活用して最適なトンネル構造を構築するのが NATM である。しかし、このような施工法が必要ということは、トンネルの計画から施工に至る様々な項目の中に多くの不確実なものが存在していることに他ならない。実際、地質情報における不確実性の存在という山岳トンネル特有の問題から、施工中に限らずトンネルの供用後においても変状を生じ、対策工を講じることを余儀

なくされる事例は少なくないのが現状である。

しかし、NATM の要諦である施工時の観察・計測結果を評価し、設計の変更、更新を行うための判断は非常に難しい。実際、日本道路協会の道路トンネル観察・計測指針²⁾においては、その重要性が指摘されながらも「なお、現時点では評価手法が確立されていない・・・(後略)」と述べられている。

このように情報化施工の本来の機能を発揮させるためには、切羽における観測・計測で得られた情報を次の掘削に的確に反映させる手法の確立が不可欠であり、切羽前方の地山に関する大量の定性的データを提供するトンネル全線にわたる先進ボーリングは重要な役割を果たすと考えられる。

(2) 地山評価における課題

山岳トンネルが施工中や供用後に変状を生じ、その対策に多くの追加費用を必要とする一因として、事前調査とその結果に基づく事前設計が実態を反映したものになっていないことがある。土木学会ではこのことについてトンネル工学委員会に検討部会を設け、様々な観点からの検討を行い、その成果をライブラリー³⁾として出版した。

その中で、事前の評価結果と実際が合わない(地質が違う場合と地質は合っているが工学的性質が異なる場合の2つがある)原因として地質情報を得るためのハード的な問題と評価に関わるソフト的な問題を示している。

ハードに関わる問題は、機器開発なども伴い一朝一夕には解決出来ない困難な問題である。一方、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に関わるソフト的な問題は、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ことによって問題解決が図れると考えられる。しかし個々のトンネル施工結果に対する幾つかの検討事例はあるものの、統一的な検討はこれまで行われたことはない。

また、地質調査結果の解釈にかかわる問題は、調査担当者や設計施工担当者間で知見や経験を共有し意思疎通を図ることによって可能となると以前から指摘されているが、いまだに根本的な解決に至っていないのが現状である。

結果として、トンネル施工経験者はいつまでも「地質調査結果は余り当てにならない」という感覚を持ち続けることになるのではないだろうか。

このように情報化施工の本来の機能を発揮させるためには、切羽における観測・計測で得られた情報を次の掘削に的確に反映させる手法の確立は不可欠である。しか

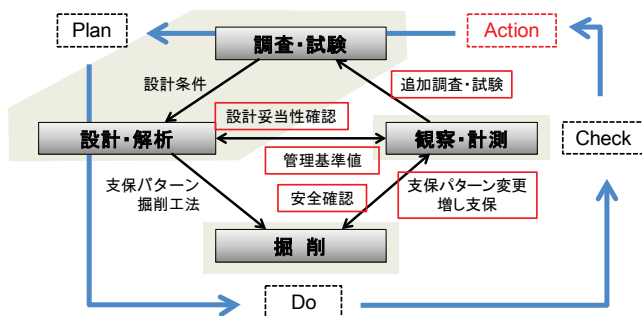


図-1 観測的手法によるトンネル施工の概念

しそのためには、その基本となる詳細な地山情報が必要であり、この意味においてトンネル全線にわたる先進ボーリングは有用な情報を提供するものである。

3. 先進ボーリングを用いたトンネル施工

北海道の道路トンネルでは、北海道開発局の定める設計要領に基づきトンネルの調査から施工までが行われている。その内容は、高速道路事業者や日本道路協会が定めるものと基本的に同じであるが、先進ボーリングを全線にわたって実施し施工中に詳細な地山情報を得るという点において大きく異なっている。

切羽からおよそ 100m 毎に実施される先進ボーリングでは、地質の確認だけではなく P 波検層や岩石試験なども行われ、表-1 に示すように実に多くの情報が得られる。ここでは北海道において施工された 16 トンネルのこうしたデータから、まず先進ボーリングの効果を予測地山等級と施工地山等級の一致度で示す。検討の対象としたのは、事前調査（岩種、地山弾性波速度など）に基づいて設定した地山等級、先進ボーリングに基づいて設定した地山等級、実際に施工した地山等級の 3 つが揃った 1245 のデータである。

表-2 は事前調査に基づいて設定した地山等級と実際に施工した地山等級の関係を、表-3 は先進ボーリングに基づいて設定した地山等級と実際に施工した地山等級の関係を示したものである。表-3 において先進ボーリングに基づく地山評価が B-C2 や C1-C2 などのように幅をもって評価されたケースは検討対象外としたためデータ数は 857 となっている。これを基に予測と実際に施工した結果が一致したのか、良くなったのか、悪くなったのかでまとめたものが表-4 である。

表-2 事前調査による地山等級と施工結果の関係

		施工時地山等級				
		C1	C2	D1	D2	E
事前調査による地山等級	C1	57	117	11		
	C2		717	49	37	1
	D1	3	40	72	10	
	D2	1	2	22	91	8
	E			1		6

表-3 先進ボーリングによる地山等級と施工結果の関係

		施工時地山等級				
		C1	C2	D1	D2	E
先進Brによる地山等級	C1	60	19		1	
	C2	1	514	18	2	
	D1		6	100	32	2
	D2		3	4	89	
	E					6

表-1 先進ボーリング調査記載項目

トンネル名		
位 置	SP (m)	起 終
	孔 番	
	深度(m)	
土被り		
岩 種	地 層 名	
	柱状図岩種	
	風化	
	変質	
事前調査	記号	
	地山弾性波Vpg(km/s)	
	亀裂係数Kg(%)	
	地山等級	
先進ボーリング	設計P	
	P波検層Vph(km/s)	
	亀裂係数Kh(%)	
	載荷試験E(MPa)	
	岩石試験	σ_c (MPa)
		Vpc(km/s)
		ρ t(g/cm ³)
		Ec(MPa)
		RQD(10)
	RQD,RCI	RQD(5)
		RCI(1)
		RCI(2)
		RCI(3)
		RCI(4)
		RCI(5)
		SRCI(1)
		SRCI(2)
		SRCI(3)
		SRCI(4)
		最大コア長
		柱状コア率
	平均RQD,RCI	RQD(10)
		RQD(5)
		RCI(1)
		RCI(2)
		RCI(3)
		RCI(4)
		RCI(5)
		SRCI(1)
		SRCI(3)
		SRCI(4)
	コア長 (cm)	最大コア長
		柱状コア率
		①
		②
		③
		④
		⑤
	データ数	
	最大湧水量(l/min)	
	地山強度比Vpg	
	地山強度比Vph	
	地山強度比 $\sigma/h\gamma$	
	地山強度比による地山等級(Vpg)	
	地山強度比による地山等級(Vph)	
	地山強度比による地山等級($\sigma/h\gamma$)	
	平均RQD(10)による地山等級	
	先進Brによる地山等級	

表-4 予測地山等級の一致度

	事前調査-施工		先進ボーリング-施工	
	施工数	割合	施工数	割合
+2段階以上	49	3.9%	5	0.6%
+1段階	184	14.8%	69	8.1%
一致	943	75.7%	769	89.7%
-1段階	62	5.0%	11	1.3%
-2段階以上	7	0.6%	3	0.4%
計	1245	100.0%	857	100.0%

このように事前調査結果と施工結果が一致しているのは約76%で、19%は想定より1段あるいは2段悪い結果となっている。しかもその中にはC1、C2からD1、D2、Eへと変更したケースが全体の実に11%もあり、施工に際して地山変位が想定より大きくなり、インバートなしのパターンからインバート付きのパターンへと大きな工法変更を余儀なくされたことになる。これに対して先進ボーリングの場合は、一致したのが約90%もあり、9%が1、2段階悪くなるもののCからDへの変更は2.5%しかなく、施工途中での大きな工法変更が少なかったことが判る。

こうした地山等級予測の一致率の差は、トンネル施工時の内空変位の差として明確に表れてくる。亀村⁴⁾らは、先進ボーリングを実施していないトンネルと先進ボーリングを実施している北海道のトンネルにおける最終内空変位を比較し、先進ボーリングを実施しているトンネルにおける内空変位が小さいことを示した。特にD1、D2地山ではその差は大きくなっている。

すなわち先進ボーリングを行うことで詳細な地山の地質情報が得られ、精度の高い地山分類を行うことが出来る。結果として施工中の工法変更が少なくなり、地山変位の増大を招くことなく施工を終えることが出来ると考えられる。

4. 先進ボーリング調査結果による地山等級評価

さて表-1に示した貴重なデータが地山等級の決定に的確に用いられているのかという点と必ずしもそうではない。ここでは先進ボーリングの結果として評価された地山等級と、先進ボーリングで得られた様々なデータの関係を整理し、地山等級の設定法のどこに課題があるのかを探る。

(1) 地山等級と弾性波速度

まず弾性波速度について検討する。事前調査段階での弾性波探査などにより得られた弾性波速度は、地質構造の推定や地山等級を決定する重要な因子である。従って先進ボーリングにより詳細な弾性波速度に関するデータが得られれば、地山等級の評価はより詳細に、精度良く行うことが出来ると考えられる。図-2は、先進ボーリングで得られたデータに基づいて評価した地山等級とコアの弾性波速度V_{pc}の関係を示したものである。図に示したように各等級でV_{pc}は広く分布している。図中に示した近似直線からはAからEに向けてV_{pc}は低下する傾向が読み取れるものの、V_{pc}が与えられたとしても等級を決定することは難しい。

先進ボーリングでは、コアの弾性波速度に加えてボー

リング孔を用いた孔内P波検層が行われ、コアよりも地山の特性を反映した弾性波速度V_{ph}が得られている。しかしこのV_{ph}もV_{pc}と同様に分布しており、やはり等級判定の決め手にはならない。

表-5には、地山等級ごとの弾性波速度の平均値と速度比(V_{ph}/V_{pc})の平均値を示した。また図-3には、地山等級の判定結果が複数のランクにわたっているもの（例えばA-C1）を除いた地山等級における弾性波速度の平均値と速度比を示した。速度比は、岩盤の強度を評価する際に亀裂の影響を考慮するために用いられるもので、準岩盤強度σ*は、 $\sigma^* = \alpha_c \times (V_{ph}/V_{pc})^2$ として計算される。また、速度比は岩盤の亀裂の程度を示す亀裂係数の計算にも用いられる。

表に示されたC1-D1などのように等級の評価が定まらないような場合とEを除くと速度比は1を下回っており、しかも図-3から判るようにAが最小でB、C1と次第に大

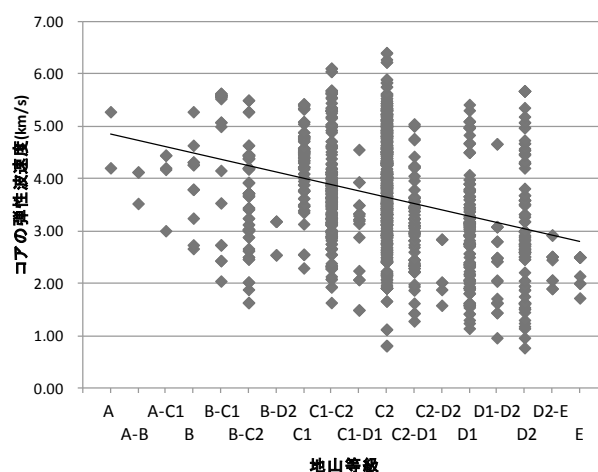


図-2 先進ボーリングによる地山等級とコア弾性波速度

表-5 地山等級毎の弾性波速度比

先進Br. 地山等級	弾性波速度		速度比 Vph/Vpc
	地山 Vph(km/s)	コア Vpc(km/s)	
A	3.14	4.75	0.68
A-B	3.56	3.83	0.93
A-C1	1.76	2.76	0.76
B	3.15	3.87	0.83
B-C1	3.62	3.59	1.06
B-C2	3.09	3.72	0.87
B-D2	3.14	2.98	1.07
C1	3.82	4.18	0.93
C1-C2	3.13	3.64	0.91
C1-D1	3.38	3.18	1.20
C2	3.52	3.88	0.96
C2-D1	2.88	3.21	0.92
C2-D2	2.38	2.09	1.18
D1	2.74	2.89	1.03
D1-D2	2.46	2.70	1.02
D2	2.31	2.75	0.93
D2-E	1.71	2.36	0.74
E	2.45	2.33	1.05
平均	3.17	3.53	0.95

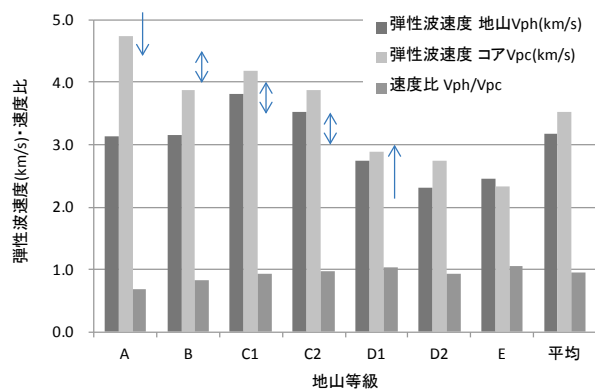


図-3 地山等級ごとの弾性波速度の平均値

きくなっている。このことは、硬質岩ほど亀裂の影響を受けやすいこと示している。

図-3中に示した矢印は、開発局による地山分類表¹⁾に提示された地山区分「剥離性に富まない古生層～深成岩、火山岩」に対する地山弾性波速度の範囲を参考にしたものである。亀裂の影響を受けていると考えられる地山等級AとBを除くと、地山弾性波速度VphのC1からEへ向けた低下傾向は明らかであり、また分類表で示された弾性波とも良好な対応を示している。従ってコアや孔内検層による弾性波速度によって地山等級を評価できると考えられる。問題は各地山等級ごとに弾性波速度が大きくバラついていることである。

図-4は、図-2に示した地山等級C2と評価されたコア(228データ)の弾性波速度の分布状況を、また図-5は地山等級D1のコア(60データ)の分布を示したものである。C2地山(平均値は3.88km/s)では、4～4.5km/sが最も多くその前後できれいに分布している。D1地山(平均値は2.89km/s)では、3～3.5km/sで最多となりC2との差は明瞭であるが2km/s付近にもう一つのピークがあり分布形状はC2とは異なり複雑である。このような分布状況を考えると各地山等級ごとに3.5～4km/sというように狭い範囲で分類の閾値を定めることは難しい。

(2) 岩種毎の地山等級と弾性波速度

一方こうしたバラつきは、様々な岩種のデータが混在しているために生じているとも考えられる。そこで幾つかの岩種について地山等級とコアの弾性波速度の関係を整理した。

図-6は、粘板岩あるいは粘板岩砂岩互層と分類された182のコアの弾性波速度と地山等級を示したものである。図中には地山分類表に示された地山区分「剥離性に富む古生層～深成岩」に対する地山弾性波速度の範囲を矢印で示した。平均値で見る限り弾性波速度と地山等級の関係は良好で、しかも他の火成岩などのようにC1-C2といった範囲をもった評価結果がない。こうしたことから粘

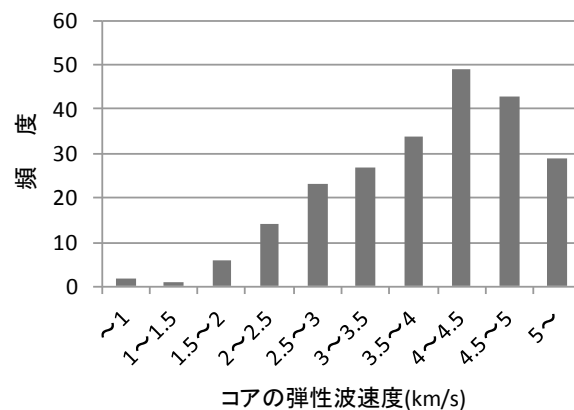


図-4 地山等級C2におけるコアの弾性波速度Vpcの分布

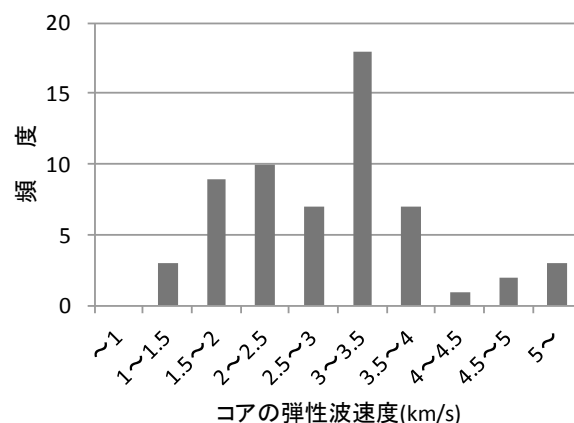


図-5 地山等級D1におけるコアの弾性波速度Vpcの分布

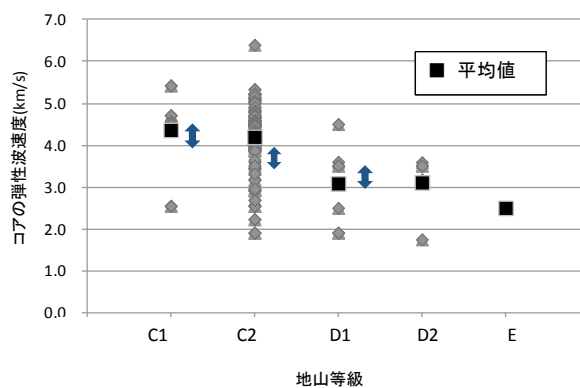


図-6 粘板岩・粘板岩砂岩互層のコアの弾性波速度と地山等級

板岩については、地山等級に対応する弾性波速度の範囲を見直すことにより評価の精度を向上させることが出来る可能性があると考えられる。

一方、図-7は火山角礫岩と分類された172のコアの弾性波速度と地山等級を示したものである。この場合、B-C1など幅をもった評価結果が多いのが特徴となっている。地質調査担当者からすると様々な状況から一つの等級に絞り込むことが困難なため、こうした幅をもった評価結果となったと考えられるが、これでは施工のための地山分類には有用な情報とは言えない。どのような状況からそうした結果となったのかについて更なる調査を行

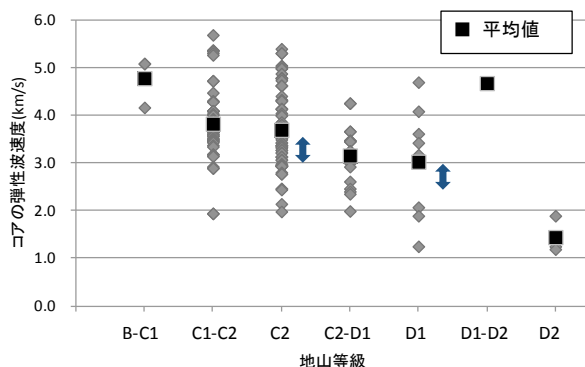


図-7 火山角礫岩のコアの弾性波速度と地山等級

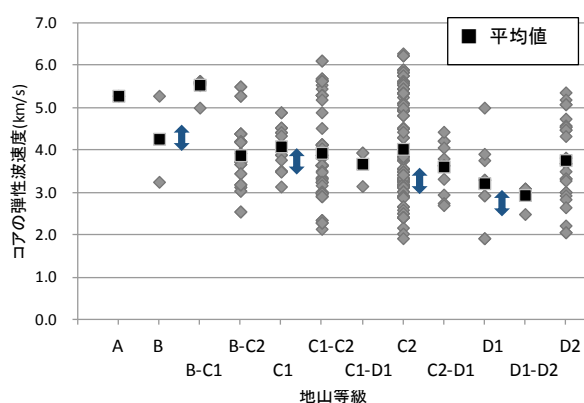


図-8 安山岩類のコアの弾性波速度と地山等級

い、先進ボーリングより得られるデータの評価の実態と最終的な判断における問題点を明らかにする必要がある。

図-8は、安山岩類に分類されたコアの弾性波速度と地山等級を示したものである。火山角礫岩の場合と同様、幅をもった評価結果が多く、しかも地山等級ごとのバラつきも大きい。特にB-C2, C1, C1-C2, C2と評価された弾性波の平均値はほぼ等しく、弾性波速度が地山等級を決定する際の決め手にはなっていないと考えられる。

先進ボーリングから得られる様々な定量的なデータは、詳細な地山評価を可能にしていると考えられる。しかし、

ここで示したようにどの項目が支配的なのか？どのような閾値を設定すればより精度が増すのかなどについては、更なるデータの分析が必要であり、まだ多くの労力を必要とする。

5. おわりに

現在の山岳トンネルの標準工法となっているNATMの特徴である情報化施工においては、如何に信頼に足る地質情報を施工前に得るかが重要であるが、標準工法となってから20年以上の経験によっても、その精度は必ずしも満足できるものになっていない。一方で、事前に得られた地山情報に基づいて地山等級を設定するための分類表についてもその適用性は議論されてきていない。

ここでは、北海道の道路トンネルにおける先進ボーリング調査の結果を詳細に分析し、トンネルの設計・施工の基礎となる地質情報について検討した。ここでの検討は、まだ一部に過ぎないが、現在の地山情報に基づく地山分類法にはまだ検討の余地があることが浮かび上がってきた。これらのデータの評価方法についてさらなる検討を行い、先進ボーリングで得られる多くのデータの内の、どの項目が地山等級を決定する際に有効な指標となるのかを明らかにするとともに、将来的には先進ボーリングに対応した地山分類法についても検討して行きたい。

参考文献

- 1) 北海道開発局：道路設計要領第4集トンネル，2012.4.
- 2) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，2009.2
- 3) 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
- 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

ON THE EFFECTIVENESS OF ADVNCING BORING EXAMINATION OF RELATION TO PRE-INVESIGATED RESULT

Katsumi KAMEMURA, Kenji OKAZAKI and Yoshihiko ITO

As a result of analyzing construction data of 16 tunnels where advancing borings had been carried out, the accurate rock classification can be obtained using the geological data of advancing boring from tunnel face rather than using the pre-investigation result that many uncertainties might be included. However, it needs certain amount of cost and time. Here, a number of qualitative data of advancing boring and rock classification results were analyzed in detail, and the problems of present rock classification method were examined. It can be pointed out that there is a possibility that the accuracy of the evaluation result can be improved by reviewing the rock classification method in future.