

地山分類指標としてのRQDと 地山弾性波速度の関係について

亀村 勝美^{1*}・倉橋 稔幸²・岡崎 健治²・山崎秀策²・村山秀幸³

¹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番12号）

²国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

³株式会社フジタ 技術センター 土木研究部（〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1）

*E-mail: kame@fgi.or.jp

北海道開発局のトンネル施工要領では、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。これにより詳細な地山情報が得られ、設計時の地山分類を見直すことによって、より地山に適した支保を施工することができる。その効果は、既往の研究で明らかである。一方で、先進ボーリングにより得られるRQD、地山弾性波速度、準岩盤強度、変形係数などに基づいて地山分類表によって評価した結果は、ばらつくことが多く、詳細な地質情報を得たとしても地山評価は難しいことも判明した。ここでは、地山分類指標間の関係を示した上で、RQDの特性について考察する。こうした検討により地山評価法を見直すことができれば、評価結果の精度をさらに向上させることが出来る可能性がある。

Key Words : rock classification, advancing boring, RQD, elastic wave velocity

1. はじめに

NATMによる山岳トンネルでは、まず事前の地質調査結果に基づき地山評価が行われ、示方書などに規定された地山分類に対応する支保工、掘削法が設定され施工が行われる。そして施工時には、掘削切羽で得られる地質情報や、トンネルの内空変位などの計測データを適宜評価し、より地山条件に適合した支保工や掘削工法に順次変更していく「情報化施工」が行われる。

しかしながら、我が国の複雑な地質条件から当初の想定とは大きく異なる地山条件に遭遇し、大幅な支保の変更、掘削工法の変更あるいは支保の補強、縫返しなどを余儀なくされる事例は多い。また、施工中には特に大きなトラブルは生じなかったものの、トンネルの供用開始後に時間経過とともに徐々に変状を生じ、最終的に大規模な対策工を強いられる例も少なくない。結果として多くの追加費用を必要としている現状がある。

このような状況を避けるためには、切羽で得られる情報（地質、変位量など）を如何に評価し、地山条件に適した支保構造を構築するかが重要である。

しかしながら、実際には事前調査による地質情報は予算上の制約から数量が限られているばかりでなく、その手法上の特性から多くの不確実性を含んでいる。一方、施工時に得られる切羽の地質情報は、施工の合間の短い

時間を実施されるもので、得られる情報は目視観察による項目に限定されている。

また、NATMの基本とされる掘削中のトンネル内空変位や支保の応力などの計測は、地山と支保の力学挙動を示す有用な情報であるが、計器の設置時期、数量、精度などの問題、さらには、これらを実測する解析的手法の問題などから、施工時点でのトンネル構造の安定性の評価はできても、それ以降の経時的な挙動を次の掘削までの短時間の内に予測することは難しい。結果として、多くのトンネルにおいて経時的な変状のリスクが残されることとなる。

こうした変状リスクに対し亀村ら¹⁾は、その事象が生じる確率と結果として生じる追加コストの積として定義される期待値＝変状リスクが、対策工を講じるかどうか、あるいはどのような対策工にするかの判断を下す際の有用な指標となることを示した。

一方、岡崎ら²⁾は、北海道内のトンネルで供用開始後に変状を生じた20事例についてデータを収集、分析しその特徴を示した。そして、将来的な変状の可能性について、これまでのように経験的な指標（地質の種類、粘土鉱物の有無、地山強度比の大小、周辺トンネルの変状事例の有無など）によって経時的な地圧の発生を判断し、対策工の検討を行っても施工中は勿論、供用後においても予期しない変状が生じることを指摘してい

る。その上で、事前や施工中の調査に十分なコストを掛けることによって変状を防止し、最終的な事業コストを抑制できる可能性があるとしている。

以上のように、トンネルの施工に当たっては変状が生じた後にどう対応するかではなく、事前調査や施工中に得られるデータに基づくよりの確な評価により、地山の状態を反映した支保を施工することが重要である。しかし、十分な情報がない中で施工中や供用後の経時的な変形の増加の有無を判断し、それへの対策を計画することは非常に難しい。この意味において施工中の情報の量、質ともに格段に向上させることができる計画的な先進ボーリングは非常に有効であり、変状リスクへの事前の対策として有用と考えられる。

ここでは、北海道で施工された道路トンネルの施工データを分析し、先進ボーリングの効果を示すとともに、先進ボーリングのデータ評価に用いる地山分類表の適用性について検討を加える。

2. 事前調査と先進ボーリング調査に基づく地山評価結果

北海道開発局道路設計要領第4集トンネル（平成30年4月）³⁾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。その中で「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」とし、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。

亀村ら⁴⁾はこうして得られた北海道における16本の道路トンネルにおける先進ボーリング調査結果に基づき、事前調査結果による地山区分と実際の施工結果、先進ボーリング調査による地山区分と実際の施工結果の関係について検討を加えた。表-1はその結果の一部を示したものである。

表は例えば、事前調査結果に基づきC1区間と評価されたものの、実際にC1で施工されたものは24区間、1段悪いC2で施工されたものが94区間、2段悪いD1で施工されたものが11区間であることを示している。この結果に基づき、表-2のように評価結果と施工結果の評価すると表-3が得られ、先進ボーリングの効果が明確に示される。

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66%で、27%は想定より1段あるいは2段悪い結果となっている。しかもその内容を詳しく見ると、Cクラス

からDクラスへと変更したのは表-1左に示すように全体の実に10% $\{=(11+29+28)/649\}$ であり、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を用いた場合は7%が1、2段階悪くなるものの、CクラスからDクラスへの変更は

表-1 事前調査・先進ボーリングの結果と実際の施工区分

事前	施工		割合(%)	先進	施工		割合(%)
C1 (129)	C1	24	18.6	C1 (42)	C1	25	59.5
	C2	94	72.9		C2	17	40.5
	D1	11	8.5		D1	0	0.0
	D2	0	0.0		D2	0	0.0
	E	0	0.0		E	0	0.0
C2 (377)	C1	0	0.0	C2 (394)	C1	1	0.3
	C2	320	84.9		C2	382	97.0
	D1	29	7.7		D1	10	2.5
	D2	28	7.4		D2	1	0.3
	E	0	0.0		E	0	0.0
D1 (77)	C1	1	1.3	D1 (132)	C1	0	0.0
	C2	28	36.4		C2	32	24.2
	D1	42	54.5		D1	82	62.1
	D2	6	7.8		D2	16	12.1
	E	0	0.0		E	2	1.5
D2 (62)	C1	1	1.6	D2 (72)	C1	0	0.0
	C2	1	1.6		C2	12	16.7
	D1	13	21.0		D1	4	5.6
	D2	39	62.9		D2	56	77.8
	E	8	12.9		E	0	0.0
E (4)	C1	0	0.0	E (9)	C1	0	0.0
	C2	0	0.0		C2	0	0.0
	D1	1	25.0		D1	0	0.0
	D2	0	0.0		D2	0	0.0
	E	3	75.0		E	9	100.0
計		649		計		649	

表-2 調査結果に基づく地山等級と施工結果の関係

想定 \ 施工	B	C1	C2	D1	D2	E
B	一致	1段悪くなる	2段悪くなる	3段悪くなる	4段悪くなる	5段悪くなる
C1	1段良くなる	一致	1段悪くなる	2段悪くなる	3段悪くなる	4段悪くなる
C2	2段良くなる	1段良くなる	一致	1段悪くなる	2段悪くなる	3段悪くなる
D1	3段良くなる	2段良くなる	1段良くなる	一致	1段悪くなる	2段悪くなる
D2	4段良くなる	3段良くなる	2段良くなる	1段良くなる	一致	1段悪くなる
E	5段良くなる	4段良くなる	3段良くなる	2段良くなる	1段良くなる	一致

表-3 地山等級の一致率

事前調査による評価			
施工結果	件数	割合(%)	
3段良くなる	1	0.15	6.93
2段良くなる	3	0.46	
1段良くなる	41	6.32	
事前=施工	428	65.95	65.95
1段悪くなる	137	21.11	27.12
2段悪くなる	39	6.01	
先進ボーリングによる評価			
施工結果	件数	割合(%)	
3段良くなる	0	0.00	7.55
2段良くなる	12	1.85	
1段良くなる	37	5.70	
先進=施工	554	85.36	85.36
1段悪くなる	43	6.63	7.09
2段悪くなる	3	0.46	

1.7% {=(10+1)/649} (表-1右) しかなく、施工途中での大きな工法変更がほとんどなかったことが判る。

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できる。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できると考えられる。しかし、先進ボーリングに基づく地山評価においても課題はある。

3. 先進ボーリングによる地山等級評価

表-4 は、設計要領に示された分類表で、Vp* (孔内検層による地山弾性波速度) と RQD(5)は「剥離性に富む古生層～深成岩」, 「剥離性に富まない古生層～深成岩, 火成岩」, 「第三紀堆積岩類」に分けて適用される値, そのほかは全岩種について適用されるものである。

先進ボーリングの結果に基づいて地山分類をする場合、各評価項目の評価結果が一致し、先進ボーリングによる地山分類が簡単に決定できるのは稀であり、多くの場合図-1 に示すように各評価項目で評価結果が異なり、先進ボーリングを用いた地山評価を困難なものにしている。そこで、実際にどのように評価結果がばらついているのかについて調べた。

北海道の16本のトンネル(総延長31km)で得られた先進ボーリングデータの内、表-4に示された項目の外、コアの弾性波速度、先進ボーリングに基づく地山等級と施工時地山等級などが全て揃っている安山岩に分類され

る241のデータについて分析を加えた。

これらのデータで地山分類表に基づく各評価項目ごとの評価結果と実際の施工での地山区分の一致度を調べた結果は、表-5に示すようになった。このように評価結果が最も実際の施工結果と一致するのはVp*であるが、241データ中88, 36.5%が一致しているに過ぎずRQD(5)では、わずかに6.6%が一致しているだけである。

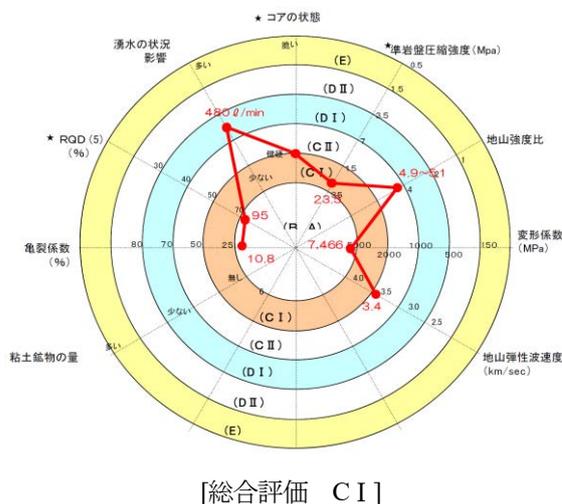


図-1 先進ボーリングによる地山評価の例

表-5 各評価項目の評価結果と施工結果の関係

評価項目	Vp*	RQD(5)	K	σ_c^*
一致数	88	16	37	68
割合(%)	36.5	6.6	15.4	28.2

表-4 北海道開発局の地山分類表⁴⁾

地山区分	剥離性に富む古生層～深成岩		剥離性に富まない古生層～深成岩, 火山岩		第三紀堆積岩類		亀裂係数 K (%)	主な地質状況	地山定数					地山強度比 $\frac{\sigma_c^*}{\gamma H}$
	Vp* (km/s)	RQD(5) (%)	Vp* (km/s)	RQD(5) (%)	Vp* (km/s)	RQD(5) (%)			準岩盤圧縮強度 σ_c^* (MPa)	粘着力 C* (MPa)	内部摩擦角 ϕ^* (°)	変形係数 Es* (MPa)	ポアソン比 ν^*	
A	4.8以上	60以上	4.5以上	60以上				1.新鮮にて亀裂ほとんどない 2.肌落ちほとんどない	140以上 <1,400以上	6以上 <60以上	55以上	5,000以上 <50,000以上	0.25以下	≥4
B	4.5～4.8	50～60	4.0～4.5	50～80	3.0以上	60以上	25以下	140～35 <1,400～350	6以上 <60以上	55～50	5,000以上 <50,000以上	0.25以下		
C I	4.0～4.5	30～50	3.5～4.0	30～70	2.5～3.0	40～60	25～50	1.新鮮にて亀裂少ない 2.肌落ち少ない	35～15 <350～150	6～3 <60～30	55～45	5,000～2,000 <50,000～20,000	0.25～0.30	
C II	3.5～4.0	20～30	3.0～3.5	20～50	2.0～2.5	30～40	50～70	1.わずかに風化, 亀裂やや多い 2.肌落ち多い	15～7 <150～70	3～1.5 <30～15	45～40	2,000～1,000 <20,000～10,000	0.25～0.30	
D I	3.0～3.5	20以下	2.5～3.0	40以下	1.5～2.0	20～30	70～80	1.風化受け亀裂多い 2.一部変質破砕帯あり	7～3.5 <70～35	1.5～1 <15～10	40～35	1,000～500 <10,000～5,000	0.30～0.35	4～2
D II				30以下	1.0～1.5	20以下	80以上	1.風化強く受け亀裂多い 2.一部に変質破砕帯	3.5～1.5 <35～15	1～0.5 <10～5	35～30	500～150 <5,000～1,500	0.30～0.35	2～1
E								1.強風化及び破砕帯 2.変質を伴う破砕帯	1.5～0.5 <15～5	0.5～0.1 <5～1	30～15	150～30 <1,500～300	0.35～0.40	1以下

注1) 古生層～深成岩のうち、吸水膨脹性を有する蛇紋岩、片岩類は別途考慮
 注2) 地山定数欄の()内は、従来単位(kgf/cm²)での値
 注3) MPa=N/mm²

このように分類表に示された評価項目のそれぞれの評価結果は、実際の施工結果とかなり異なっている。すなわち先進ボーリングにより大量のデータが得られたとしても分類表に基づいて機械的に地山区分が決まるわけではなく、これらのデータに加えて切羽の地質調査結果、過去の同様の岩種での施工経験などと合わせて総合的に評価する地質技術者の判断によるところが大きいことが伺われる。

次にこれらの評価項目ごとの評価結果がお互いどれだけ施工結果と一致していたのかを調べた結果を表-6に示す。このように、 V_p^* 、 $RQD(5)$ 、 K 、 σc^* の4項目がすべて一致したケースはなく、3項目が一致したのが4.1%、2項目が一致したのが14.5%、1項目が一致したのが37.8%であり、43.6%は4項目とも一致していない結果となった。

更に評価項目の組合せを変えた場合に一致率がどう変化するかを調べた。3項目で評価する場合、 V_p^* を含まない組合せでは一致率が悪くなることが判る。また V_p^* を含む項目では、 $RQD(5)$ を含まないものの組合せが最

表-6 評価項目の組合せと施工結果との一致率

評価項目		一致無	1項目が一致	2項目が一致	3項目が一致	4項目が一致
4	$V_p^*-RQD(5)-K-\sigma c^*$	個数 105 割合(%) 43.6	91 37.8	35 14.5	10 4.1	0 0.0
	$V_p^*-K-\sigma c^*$	個数 115 割合(%) 47.7	83 34.4	37 15.4	6 2.5	-
3	$V_p^*-RQD(5)-\sigma c^*$	個数 121 割合(%) 50.2	87 36.1	32 13.3	1 0.4	-
	$V_p^*-RQD(5)-K$	個数 124 割合(%) 51.5	96 39.8	18 7.5	3 1.2	-
	$RQD(5)-K-\sigma c^*$	個数 151 割合(%) 62.7	77 32.0	13 5.4	0 0.0	-
	$V_p^*-RQD(5)$	個数 142 割合(%) 58.9	94 39	5 2.1	-	-
2	V_p^*-K	個数 135 割合(%) 56.0	87 36.1	19 7.9	-	-
	$V_p^*-\sigma c^*$	個数 131 割合(%) 54.4	82 34.0	28 11.6	-	-
	$RQD(5)-K$	個数 191 割合(%) 79.3	47 19.5	3 1.2	-	-
	$RQD(5)-\sigma c^*$	個数 177 割合(%) 73.4	62 25.7	2 0.8	-	-
	$K-\sigma c^*$	個数 162 割合(%) 67.2	71 29.5	8 3.3	-	-

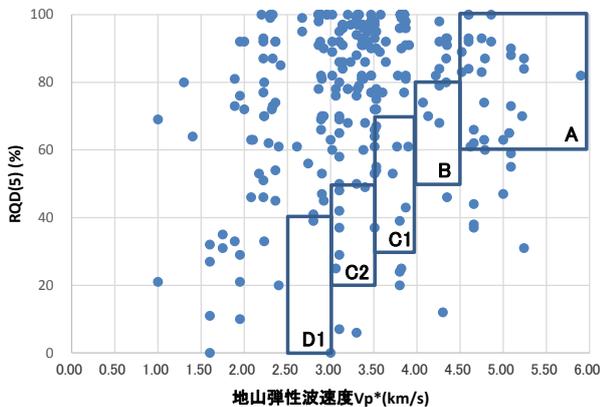


図-2 安山岩における地山弾性波速度とRQD(5)の関係

も一致率が高い。2項目では V_p^* と σc^* の組合せで一致率が最も高く、 V_p^* 以外の項目と $RQD(5)$ の組合せは一致率が非常に悪くなっているすなわち、今の分類表の閾値では、 V_p^* が最も施工結果との関連性がよく、 $RQD(5)$ の関連性が悪い結果となっている。

実際、 V_p^* と $RQD(5)$ の値とそれぞれの地山分類表での閾値の関係を示すと図-2のようになっている。このように $RQD(5)$ の数値は50%以上でA、B、C1と評価されるものが、地山弾性波速度ではC2以下と評価されてしまうものが非常に多いことが判る。

4. RQDと地山弾性波速度の関係について

そこで地山弾性波速度とRQDの関係について検討を試みた。地山弾性波速度とRQDが亀裂数によって決定されると仮定し、まずN本の亀裂がランダムに生じていると仮定した場合に、RQDがどのような値を取るのかを数値シミュレーションした。亀裂は図-3に示す方法でN本発生させ、そのそれぞれについてRQDを評価した。その結果得られるコアのイメージを図-4に示す。このように同じ亀裂数であってもRQD(10)は大きく変動している。これに対してRQD(5)は、それほど変化していないことが判る。

亀裂数 $N=5, 10, 15, 20, 25, 35, 50$ とし $n=50$ の試行を行った結果得られたRQD(5)とRQD(10)の関係を図-5に示す。このようにRQD(5)とRQD(10)の関係は広く分布しており、相関はあるものの一対一の関係を議論することは難しいことが判る。この結果に対し実際の安山岩の先進ボーリング結果から両者の関係をプロットすると図-6のようになっている。数値シミュレーションの結果と同様の分布をしていることが判る。

一方、亀裂数 N とコアの弾性波速度の関係を以下のようにモデル化する。今1本の亀裂において弾性波速度の低下により、伝搬時間に dt の遅れが生じると仮定する。すると N 本の亀裂を有する長さ L のコアの見かけの弾性波速度 V_p^* は、(1)式で求まる。

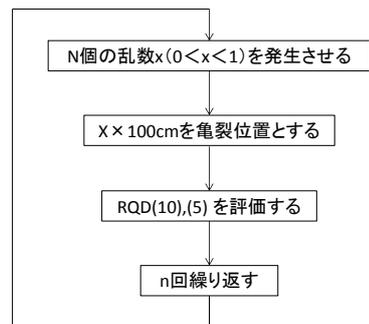


図-3 コアモデルの作成法

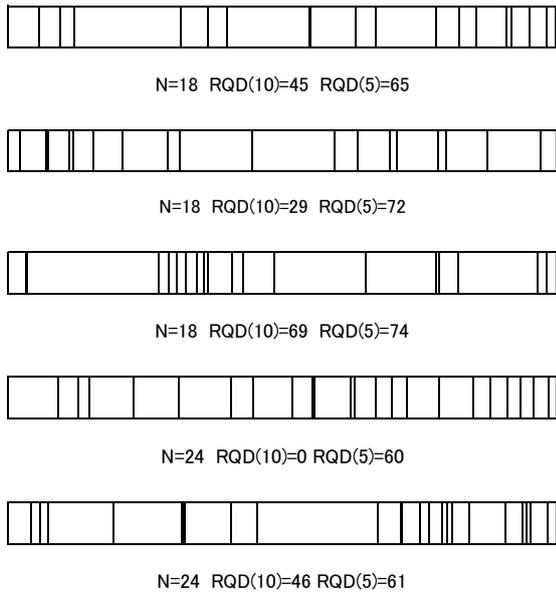


図-4 1mのコアにおけるN本の亀裂とRQD

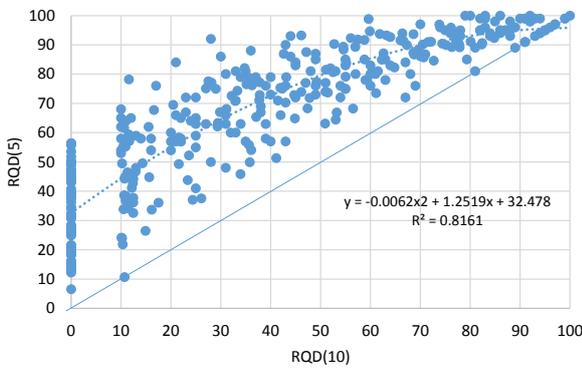


図-5 数値モデルによるRQD(5)とRQD(10)の関係

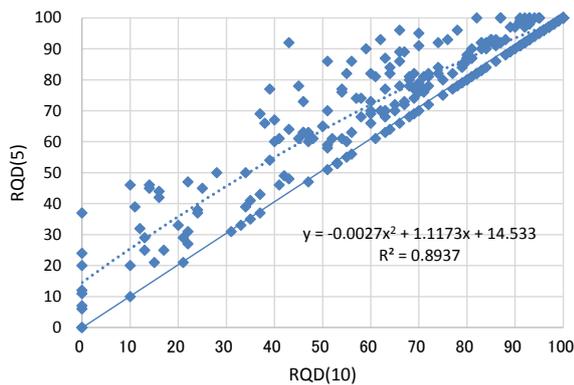


図-6 安山岩コアにおけるRQD(5)とRQD(10)の関係

$$V_p^* = \frac{L}{t_0 + Ndt} \quad (1)$$

ここに t_0 は亀裂の無い健全な岩盤での伝達時間であり、弾性波速度は $V_{pc} = L/t_0$ で与えられることから、N本の亀裂を有する岩盤の弾性波速度の低下率は(2)式で与えら

れる。

$$\frac{V_p^*}{V_{pc}} = \frac{t_0}{Ndt + t_0} \quad (2)$$

この式のNをRQDの関係式として評価出来れば弾性波速度とRQDの関係が判る。

そこで先の数値シミュレーションでの亀裂数Nに対応するRQD(5)とNごとの平均値関係を示すと図-7のようになる。これから

$$RQD(5) = 100 - 1.5N \quad (3)$$

をRQD(5)とNの近似式とする。この関係を用い dt を仮定すれば弾性波速度の亀裂の存在による速度低下比率とRQD(5)の関係が判る。

図-8 は安山岩のデータから弾性波速度の低下率を求め、低下率が1.0以下となるものについてRQD(5)との関係を示したものである。このように広く分布しているが、これはRQD(5)が1m毎に評価されているのに対し、地山弾性波速度 V_p^* はある区間を代表した数値として、またコアの弾性波速度 V_{pc} は数mおきに採取したコアについて計ったものであるためと考えられる。

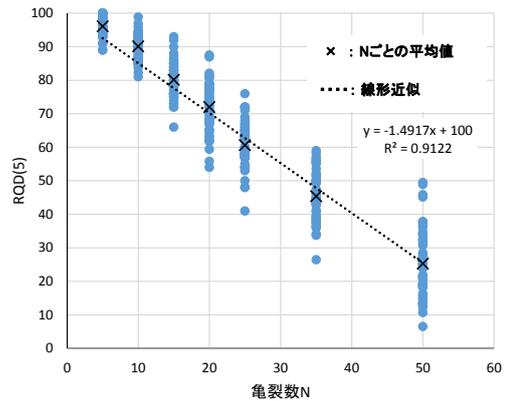


図-7 亀裂数NとRQD平均値の関係

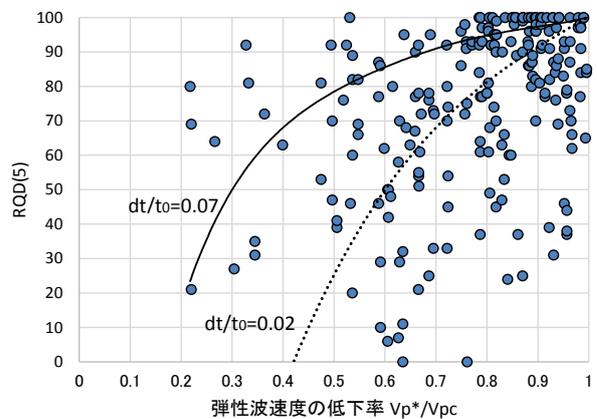


図-8 安山岩コアにおける弾性波速度の低下率とRQD(5)の関係

図中実線で示した曲線は $dt/t_0=0.07$, 点線は $dt/t_0=0.02$ と仮定した場合の RQD(5) と V_p^*/V_{pc} の関係である. このように亀裂 1 本当たりの伝搬時間の遅れが大きいほど, また亀裂が多いほど弾性波速度の低下率が大きくなる.

こうした不連続面における弾性波の遅延時間については富樫ら⁹⁾が室内試験で検討している. そこではアルミニウム, ナイロンとともに岩石材料として泥岩と玄武岩が試験対象とされ, $N=0, 1, 3, 7$ の長さ 10cm の供試体について速度計測が行われている. その結果, 軸圧にもよるが dt として $1\sim 9\mu s$ という値が示されている. これを dt/t_0 に換算すると $0.02\sim 0.45$ という値になり, 先に示した数値とオーダー的には対応している.

実際の岩盤亀裂による伝搬速度の遅れは, 亀裂の形状や巾, 介在物の有無, その特性などによって大きく異なると考えられるが, その評価は難しい. しかし以上の検討の結果は, 弾性波速度と RQD は岩盤内に存在する亀裂の特性に依存するものの, その評価対象とする領域の相違, 同じ亀裂数 N に対しても RQD は広範囲の数値を取りうるものであることなどから一対一の関係を評価することが難しいことを示している. したがって RQD を地山分類指標として具体的な閾値を設定する際には, RQD が具体的な物理的特性に対応しているものではないことに留意し, 岩種に応じた亀裂の評価など更に工夫する必要があると思われる.

5. おわりに

情報化施工によってすでに多くの山岳トンネルが施工

され, 大量の調査, 設計, 施工そして維持管理に関わる情報が蓄積されている. しかしそれらは, 十分に活用されているとは言い難い状況にある. 今回の検討対象とした先進ボーリングによる地山分類の指標に対するこれまでにない質と量のデータは, 既往の分類法の見直しを可能とし, その結果はより合理的なトンネルの設計施工につながるものであり, 今後とも更に検討を進めていきたい.

謝辞: 先進ボーリングデータおよびトンネル工事記録を提供していただいた国土交通省北海道開発局の関係各位に, ここに記して感謝いたします.

参考文献

- 1) 亀村勝美, 稲垣大介, 井尻裕二: 供用後のトンネル変状リスクへの対策工の選定法について, トンネル工学報告集第 20 巻, 251-258, 2010.
- 2) 岡崎健治, 伊東佳彦: トンネルの供用開始後に生じる変状と経時変化に関する考察, トンネル工学報告集, 21, 183-188,, 2011.
- 3) 北海道開発局: 北海道開発局道路設計要領第 4 集トンネル, 2018.
- 4) 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 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 307-312, 2013.
- 5) 富樫陽太, 谷和夫, 岡田哲実, 佐藤浩章: 積層供試体の弾性波速度計測による不連続面での遅延時間の検討, 第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.163-167, 2012.

ON THE RQD AS A INDEX OF ROCK CLASSIFICATION

Katsumi KAMEMURA, Toshiyuki KURAHASHI, Kenji OKAZAKI,
Shuusaku YAMAZAKI and Hideyuki MURAYAMA

Hokkaido Regional Development Bureau specifies the advancing boring on the whole tunnel line. As a result, detailed ground information can be obtained, and the rock mass classification at the time of design is reviewed. So it is possible to construct more suitable supports and the effectiveness is already discussed. On the other hand, the results evaluated by the rock mass classification table based on RQD, V_p , σ_c and E are often different from each other and this makes the decision of rock mass class very difficult. Here, the relationship between the rock mass classification indexes is examined and the possibility to re-examine the rock mass evaluation method is shown.