

破砕質な砂岩泥岩互層の強度と異方性に関する 調査事例

—一般国道452号芦別市鏡トンネル工事における 先進ボーリングコアの分析—

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム ○川又 基人
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム 岡崎 健治
北海道開発局 札幌開発建設部 岩見沢道路事務所 山田 慶太

褶曲-衝上断層帯に位置し亀裂の卓越する破砕質な地山のトンネルでは、ボーリングコアを利用した力学試験による強度の適切な評価が難しい場合がある。本調査では、破砕質な砂岩泥岩互層のコアを対象に、非破壊計測の可能なエコーチップ硬さ試験機を用いた反発値の計測を行い、砂岩、泥岩およびそれらの含有状況の違いに伴う強度の比較と、強度の異方性について解析した。その結果、エコーチップ硬さ試験機は簡易計測でありながらコアの岩相の変化による強度の変化や強度の異方性を数値的に敏感に捉えることができおり、コアの物理的性質の把握に有用であることが分かった。

キーワード：トンネル、砂岩泥岩互層、岩石強度

1. はじめに

山岳トンネルの建設では、設計段階で地山状況を調査し、その条件に応じてあらかじめ支保パターンを決めておくが、実際の掘削後には設計と異なる地山が出てくることがある。特に断層等の地質構造運動により岩盤が破砕された脆弱地山では、トンネル掘削に伴う初期変位量が大きく、切羽が崩落するなど安全性を損なう場合がある。国土交通省北海道開発局の道路設計要領における地山分類では岩種ごとの地山弾性波速度 V_p^* 、RQD (Rock Quality Designation)、亀裂係数 K 、準岩盤圧縮強度 σ_{c^*} 、地山強度比などが指標として用いられている¹⁾。これらのパラメータの測定の一部には調査ボーリングによるコア試料が用いられるが、脆弱地山の岩盤は、岩石試験用の供試体の整形が難しい。物理試験に用いるコアは供試体を作成できる比較的健全部から採取・整形される。その物理試験結果から得られる結果は、高強度側の見積もらざるをえず、本来の地山強度の適切な評価は難しい。

以上のように、脆弱地山であるD～E級は現在の地山分類表の適用範囲の下限から外れている¹⁾。適切な地山評価の困難性は、施工時の安全面におけるリスクの増加、当初予定していなかったインバートの掘削、コンクリート打設の必要性に伴う工程の遅延や支保パターンの修正といった大幅な段取り替えによるコストの増加にもつながる²⁾。そのため、破砕質な岩盤の地山における安全かつ効率的なトンネル施工のためにも、新たな指標を用いた地山分類手法の構築が必要である。

破砕質地山における地山分類の評価法については、針貫入試験機等の非破壊試験機を用いた物性値測定の検討が行われている例がある³⁾。破砕質地山に対する今後のトンネル施工を見据えた上でも、さまざまな地質における破砕質地山の特徴の把握や知見の体系的な集積と、それに基づく新たな指標の構築は重要と言える。

そこで本調査では、現在掘削中の一般国道452号芦別市鏡トンネルにおける破砕質な砂岩泥岩互層の先進ボーリングコアを対象にエコーチップ硬さ試験機を用いた非破壊物性測定を実施した。また砂岩泥岩互層の岩相区分や、RQDとの対応関係など詳細に分析した。本稿では破砕質な砂岩泥岩互層におけるエコーチップ硬さ試験機の反発強度 L 値、また強度異方性についての結果を報告し、一般的な地山評価における評価項目であるRQDとの関連性について考察した。

2. 事業および現場周辺の地質概説

一般国道452号は、夕張市を起点に旭川市に至る延長約110 kmの幹線道路である。盤の沢道路は、通行不能区間の解消、地域間交流の活性化、および物流効率化等の支援を目的とした、芦別市黄金町から上川郡美瑛町字ルベシベに至る延長18.5 kmの区間のうち6.8 kmの事業である。鏡トンネルは事業区間の中間に位置する $L=2,102$ mのトンネルで現在施工中である⁴⁾。

図-1に鏡トンネルの地質断面図を示す。トンネル周辺

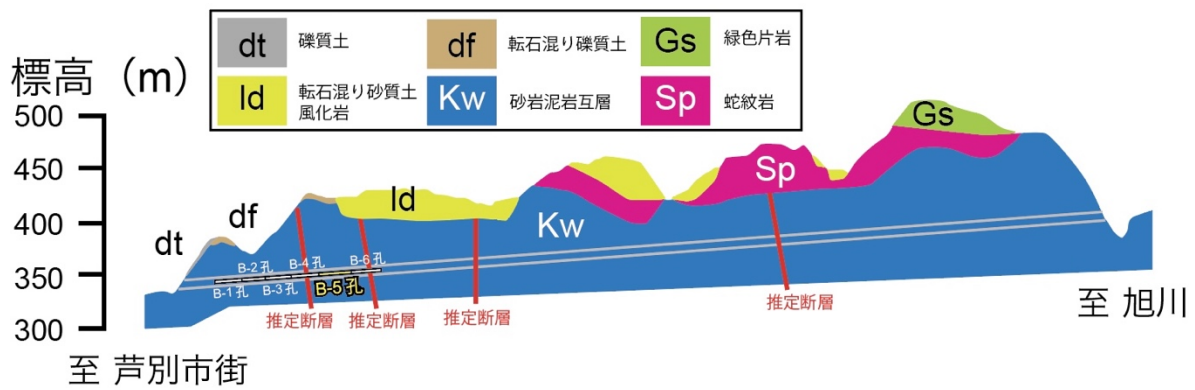


図-1 鏡トンネル地質断面図（山田ほか、2021⁴⁾の地質断面図を一部改変し作成）

の地質は、先白亜系神居古潭変成岩類の蛇紋岩が、新第三紀中新世川端層（砂岩泥岩互層）に衝上性の断層として分布する。起点側の一部では細粒の礫層、砂層、および凝灰質粘土層などの互層からなる新第三紀鮮新世の滝川層が分布するほか、第四系の斜面堆積物、地すべり堆積物等が分布する⁵⁾。

トンネル地山の地質である川端層は主に暗灰色の砂岩とシルト岩とからなる砂岩泥岩互層である。一方で、各層理は連続性が悪くメランジュとなっている。また多数の南北方向の断層が発達し、著しい褶曲構造を示す⁴⁾。泥岩は中硬岩であるがヘアクラックが発達しており細片化しやすい地質構造となっている⁴⁾。

3. 手法

(1) エコーチップ硬さ試験機による計測

物性値を得るための手法として、エコーチップ硬さ試験機（以下、エコーチップ）を用いた。エコーチップは、タングステンカーバイド製の球状テストチップが先端についたインパクトボディを、バネの力で材料の表面に打ち付けることでその反発値（L値）を得る。今回用いたD型エコーチップの打撃エネルギーは11 Nmmであり、コンクリート強度の簡易推定等に用いられているシュミットハンマーの打撃エネルギー2.2 Nm（N型の場合）の200分の1程度である。そのため、エコーチップは、岩石供試体において非破壊で硬さの指標となる反発値を計測できる特徴がある。L値と岩石の一軸圧縮強さ等の力学特性との関連や、試験条件がL値に与える影響等が調べられており、岩石に対する簡易な物性試験機としてのエコーチップの有用性が示されている^{6) 7) 8)}。

今回の計測では先進ボーリングコアにおいて、明らかな割れや欠損した部分を除き50 cmおきにエコーチップを用いたL値の測定を行なった（図-2）。計測についてはB-1孔からB-6孔まで（全長377 m）実施し、895点のデータを取得した。計測では、1地点において3回打撃を行い、その平均値を採用した。3回の打撃の際には、すで

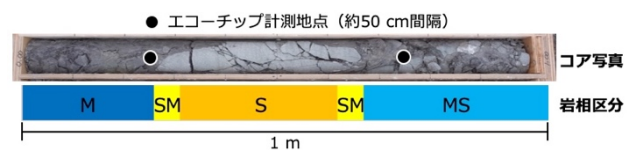


図-2 エコーチップ計測点と岩相区分の例

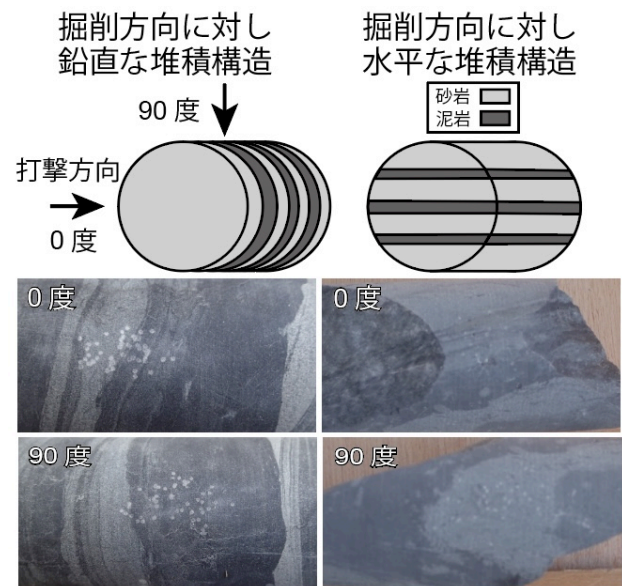


図-3 砂岩泥岩相における堆積構造別コア岩相と打撃方向、およびコアの打撃部の状況

に打撃した同一地点を避けた。これは、同じ箇所を連打することで形成される微小な窪みによるL値の変動を避けるためである⁸⁾。また、岩相ごとの強度異方性について検討するため、礫岩相（G）、砂岩相（S）、泥岩相（M）および、砂岩泥岩相（SM）の鉛直・水平層構造において、方向を90°変えて50回ずつ打撃を行なった（図-3）。

(2) 岩相区分

今回は砂岩泥岩互層について、大きく5つの岩相（礫

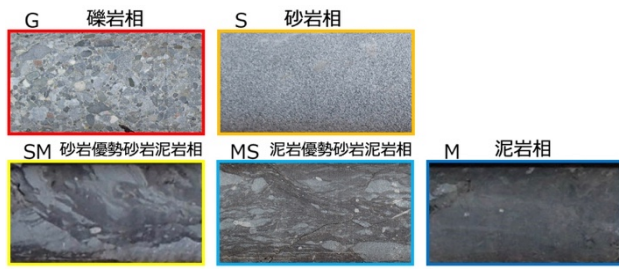


図-4 本報告における砂岩泥岩互層の岩相区分

岩相：G、砂岩相：S、砂岩優勢砂岩泥岩相：SM、泥岩優勢砂岩泥岩相：MS、泥岩相：M) に区分した(図-4)。岩相区分においては、エコーチップ測定地点895点(B1～B6) および、B-5区間(70 m)において5 cmごとに岩相区分を行い、その産出割合を整理した(図-2)。

(3) RQD (Rock Quality Designation)

RQDは計測寸法を5 cmとしたRQD(5)とした。すなわち、ボーリングコア長1 m中に含まれる5 cm以上の棒状コアの長さの合計を割合で示したものであり、RQDは岩盤の割れ目の多さの指標となる。ただしRQDは採取後から時間が経過すると岩石の風化の影響等で変化するため⁹⁾、今回はボーリングコア採取直後に現地計測されたRQD(5)をデータとして取りまとめた。

4. 結果

(1) エコーチップ物性

a) 岩相ごとのL値

図-5に各岩相ごとのL値を示す。礫岩相(G)では最大値、最小値、平均値、中央値それぞれ、814、215、546、600であった。砂岩相(S)では718、245、523、555であった。砂岩優勢砂岩泥岩相(SM)では653、36、369、378であった。泥岩優勢砂岩泥岩相(MS)では600、33、322、311であった。泥岩相(M)では559、25、333、346であった。最大値に関しては礫岩相から泥岩相にかけて粒径が小さくなるにつれ値は低くなる傾向がある。また中央値に関しては礫岩では600および、砂岩では555でその差は45であった。砂岩優勢砂岩泥岩相、泥岩優勢砂岩泥岩相、および泥岩相の中央値はそれぞれ378、311、346であり、礫岩相および砂岩相と比較して200以上低く同程度の値をとった。

b) 岩相別の強度異方性

図-6に各岩相におけるボーリングコアで、ある一面(0°方向： L_0)と、それから90度方向を変えた面(L_{90})それぞれで50回打撃を行なった平均値を示す。 L_0 、 L_{90} は礫岩相ではそれぞれ694および、698であった。砂岩相ではそれぞれ567および567であった。両者に大きな差は

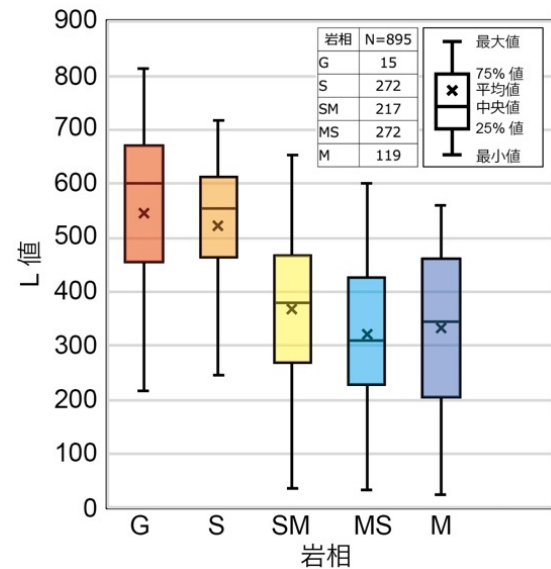


図-5 岩相別のL値の箱ひげ図

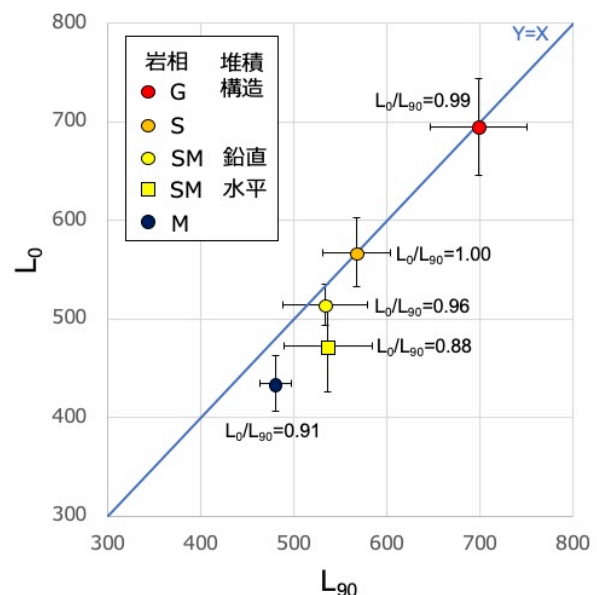


図-6 各岩相の強度異方性の検証

2面(0°方向： L_0 および90°方向： L_{90})で50回打撃した平均値をプロットし、エラーバーはその標準偏差を示す。

確認されず、礫岩相および砂岩相には強度異方性は確認できなかった。砂岩泥岩互層では472、536、および514、533であった。砂岩泥岩相においてはボーリング掘削方向と鉛直な堆積構造を有するものでは $L_0/L_{90}=0.96$ である一方、水平な堆積構造を有するものでは $L_0/L_{90}=0.88$ となり強度異方性が確認された。

(2) 岩相とRQDおよびL値との関連性

図-7にB-5区間(70 m)における柱状図、1 m区間における各種岩相割合、RQD(5)、およびL値を示す。0～29 mまでは明瞭な泥岩を一部狭在しつつも比較的砂岩が優勢

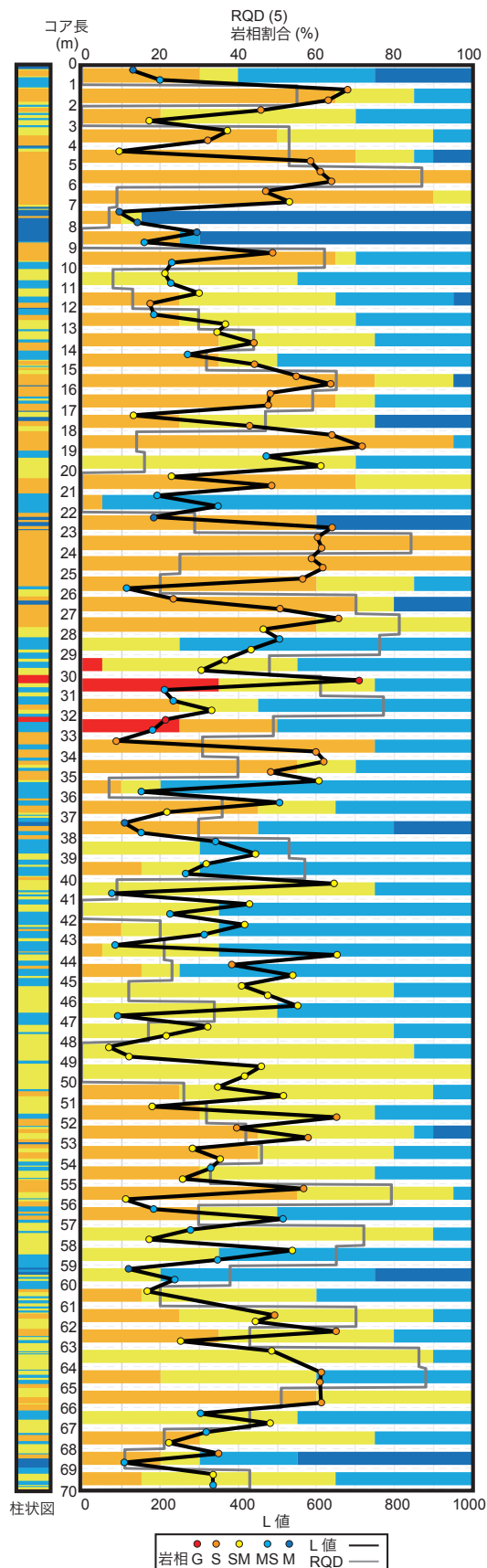


図-7 B-5 区間 (70m) における柱状図、1m 区間における各種岩相割合 (積み上げ棒グラフ)、RQD(5) (灰色折線)、および L 値 (黒色折線)。

L 値の色別丸記号は計測地点の岩相を示す。

である。それ以降50 m付近までは比較的泥岩優勢砂岩泥岩相の割合が増加する。およそ50 m付近以降はブロック状の砂岩が確認できるようになり、砂岩割合が増加する。

RQDおよびL値は、それぞれ0~88および70~718の間で変化し、その傾向は概ね砂岩優勢で相対的に高い値、泥岩優勢で相対的に低い値を示した (図-7)。

一方、18~19 m区間のように、L値は600を超える高い値を示すものの、RQDは14と低い値となる地点も確認された。また逆に、31~32 m区間ではL値が234と335と相対的に低い値を示すものの、RQDは77と高い値を示しており、一部の地点や区間でL値とRQDが相反する結果が見受けられた。

5. 考察

(1) 岩相とL値および強度異方性

今回の結果から、泥岩を含有するとL値は下がる傾向にあることが確認された (図-5)。事前の地山評価の一環で実施されたB-5区間の岩石の一軸圧縮試験後の供試体を観察すると、試験後に泥岩部の破砕、および砂岩と泥岩境界における破断が観察された (写真-1)。この結果は、本地山の砂岩泥岩互層において泥岩が弱面となっていることを支持する。

また強度異方性については、砂岩泥岩相の水平の堆積構造の場合が L_0 と L_{90} の値が最も異なり ($L_0/L_{90}=0.88$)、強度異方性が確認された。堆積岩の堆積方向が強度的に強く、層理面に沿う方向の強度は相対的に弱い傾向にあると言える。L値は一軸圧縮強さとの相関関係が確認されており⁶⁾、今回確認された異方性の特徴は、地山評価時の事前物性試験で行う一軸圧縮強さの測定にも同様に反映される可能性がある。すなわち、岩石の一軸圧縮強さを指標として地山区分を行う場合、地山によっては強

圧縮強度試験：前



圧縮強度試験：後



写真-1 B-5 区間における圧縮強度試験前後の供試体

度の異方性の考慮が必要となる場合も考えられる。

以上のように、エコーチップによる測定は、岩相ごとの物理的性質を数値的に把握することにおいて非常に有用であったと言える。

(2) 岩相とL値およびRQDの関係性

岩相とL値、および岩相とRQDには、砂岩相（礫岩相）でその値が高く、泥岩が含有することで低下する傾向が示唆された（図-7）。

図-8にL値とRQDを岩相別に散布図としてプロットした。なお、RQDは1 m区間で測定しているため、図中のRQDとL値との回帰直線に用いたL値に関しては、1 m区間で測定した2点のL値の平均とした。1 m区間の2点の平均L値とRQDの回帰直線については相関係数0.38で正の相関が見受けられた。そこで問題になるのは、正の相関から外れる傾向にある①L値が高く、RQDが低い領域、および②L値が低く、RQDが高い領域にプロットされる場合である。

L値が高く、RQDが低い岩相（L値550以上、RQD40以下）に対応するのは砂岩相と砂岩優勢砂岩泥岩相のみであった。この原因として、エコーチップは点での反発強度のため、1 m区間ごとに測定しているRQDよりも岩相に敏感に反映するためと考えられる。特に24～26 m区間は砂岩相が卓越するが、亀裂は縦方向（ボーリング掘削方向と水平方向）が卓越していた。RQD(5) はボーリングコア長1 m中に含まれる5 cm以上の棒状コアの長さの合計の割合のため、縦方向の亀裂が卓越すると棒状コアとしてカウントされず、RQDは低く計測される。

以上の理由でRQDが低くなった一方で、点のデータであるエコーチップは硬質な砂岩相に対応して高いL値が計測されたと示唆される。

L値が低く、RQDが高い場合（L値250以下、RQD60以上）に対応するのは、主に以下2つのパターンであった。1つ目は、1 m区間中に礫岩相や砂岩相といった比較的硬くRQDが高くなる岩相が含まれる一方で、エコーチップ計測地点の岩相が反発強度の弱い泥岩優勢砂岩泥岩相であったというパターンである。今回は基本的に50 cm等間隔で測定を実施していたため、岩相の出現状況により以上のようなパターンがあったと考えられる。

2つ目は、砂岩優勢ではあるが、砂岩ブロックが岩片化しているものである。岩片間は軟質ではあるが基質で埋まり柱状コアの連続性は良い。このため、RQDは良く計測される一方、L値では細かい亀裂や軟質な基質部の影響を受け、砂岩や砂岩優勢砂岩泥岩相においてもL値が低く計測されたと考えられる。

以上のように、点で計測するエコーチップのL値と、1 m区間で算出するRQDの計測方法の違いにより、結果が相反する地点・区間が出てきたと示唆される。亀裂の入り方等RQDに影響を及ぼすのはコアで確認される地質構造の影響が大きいと示唆される。今後、岩相の把握

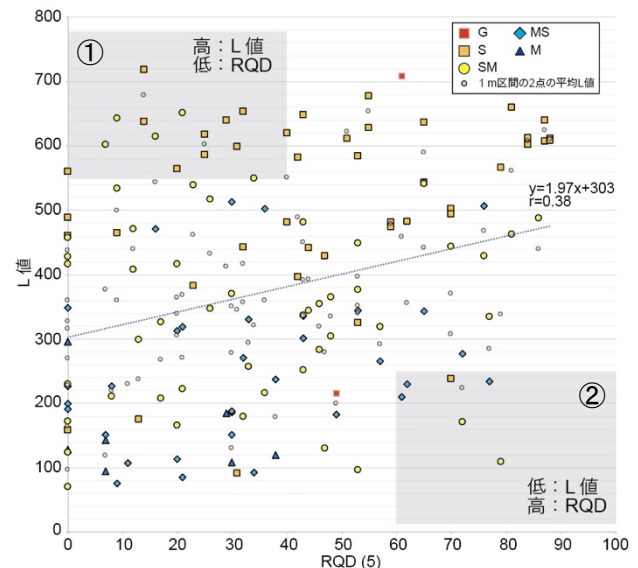


図-8 L 値、RQD(5)の岩相別の散布図

に加え、地質構造の解釈を加えることで地山分類の新たな指標作成につながる可能性がある。

エコーチップによるコア計測は、少なくとも岩相の違いを数値的に判断するのに有効であり、コアの良好度等の数値的な岩盤評価手法として、RQDと同様に用いることが可能であろう。

5. まとめと今後の課題

破砕質な砂岩泥岩互層の先進ボーリングコアを対象に、非破壊計測の可能なエコーチップ硬さ試験機を用いた反発値（L値）の計測を行なった。また岩相ごとに強度を比較し、RQDとの相関を分析した。本報告の結果を以下にまとめる。

- エコーチップのL値は礫岩相、砂岩相で相対的に大きい結果だったが、泥岩を含有することで反発値は大きく下がる傾向にあった。
- エコーチップは簡易計測でありながらコアの岩相の変化による強度の変化や強度の異方性を数値的に敏感に捉えることができており、コアの物理的性質の把握に有用である。
- 今回確認された岩相ごとの強度の相対的な違いや、砂岩泥岩互層の異方性といった先進ボーリングコアで確認された特徴が、切羽断面においてどのような変位・変状として確認できるのかといった実務的な議論は今後の課題である。

謝辞：国土交通省北海道開発局札幌開発建設部岩見沢道路事務所ならびに鏡トンネル作業所の熊谷組・宮坂建設工業JVから資料の提供、および計測において様々なご協力を頂いた。ここに記して深く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局：北海道開発局道路設計要領第4集 トンネル、p.4-2-13～4-2-37, 2022.
- 2) 岡崎健治, 倉橋稔幸, 大日向昭彦, 山崎秀策, 亀村勝美, 村山秀幸：トンネル施工時の先進ボーリング調査の費用対効果に関する分析事例, 寒地土木研究所月報, 第807号, pp.16-22, 2020.
- 3) 山本拓治, 佐藤秀史, 齋藤宏樹, 鹿嶋辰紀, 伊達健介, 横田泰宏, 成田 望：断層活動により破碎した新第三紀泥岩のトンネル掘削における評価法. 応用地質, 第56巻, pp.325-335, 2016.
- 4) 山田慶太, 須田典一, 林 貴博：一般国道452号芦別市鏡トンネルの施工状況報告について, 第65回(2021年度)北海道開発技術研究発表会論文, pp.872-876, 2021.
- 5) 鈴木 守, 渡辺 順, 春日井 昭：5万分の1地質図幅説明書「美瑛」および同説明書, 北海道開発庁, 32p., 1964.
- 6) 青木 久, 松倉公憲：エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強さとの関係に関する一考察, 地形, 第25巻, pp.267-276, 2004.
- 7) 川崎 了, 吉田昌登, 谷本親伯, 舩屋 直：簡易反発硬度試験による岩質材料の特性評価手法の開発.試験条件の影響と基本特性に関する調査, 応用地質, 第41巻, pp.230-241, 2000.
- 8) 中家 渉, 青木 久, 早川 裕式, 松倉公憲：連打法によるエコーチップ硬さ試験機の反発値と微小窪みとの関係, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 第10号, pp.29-36, 2009.
- 9) 岡崎健治, 丹羽廣海, 村山秀幸, 伊東佳彦, 笹谷輝勝, 倉橋稔幸：岩石の時間依存性劣化過程の室内試験による分析, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp.246-250, 2016.