

トンネル先進ボーリングデータの分析による 合理的地山評価に向けた検討

丹羽 廣海^{1*}・倉橋 稔幸²・岡崎 健治²・亀村 勝美³

¹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)

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)

*E-mail: hiroumi.niwa@fujita.co.jp

国土交通省北海道開発局では、トンネル施工中に先進ボーリングおよび各種検層、試験等をおこなうことが標準とされており、得られる物性値を地山区分の指標として活用することによって支保パターンの見直しがなされている。その際、各種物性値に基づき判定される地山区分はそれぞれの項目で評価が一致しないことが多く、多様な地質に対して物性値の評価区分は必ずしも十分に対応していないことが指摘されている。本稿では、多様な地質の分類法および地山評価法の合理化を図ることを目的として、49トンネル分のトンネル施工記録の分析を試みた。地質別に坑内変位量および先進ボーリングで得られる物性値と、採用支保パターンと支保工の変状の有無の関係を整理し地山評価の合理化に向けた検討をおこなった。

Key Words : rock classification, advanced boring, construction record, displacement, deformation

1. はじめに

一般に土かぶりの大きい山岳トンネルでは、事前に地表から実施できる地質調査には限界があり、設計段階では限られた地質情報に基づき地山評価がなされているのが実情である。このため山岳トンネル工事は、施工中に予期せぬ地質変化や突発湧水に遭遇し、大規模な変状や事故などのトラブルが発生するリスクがほかの工事に比べて大きいと言える。国土交通省北海道開発局の道路設計要領¹⁾では、トンネル施工では地山条件の予知と把握がきわめて重要であるため、接近した地点からの調査ボーリングや各種試験等をおこなって掘削箇所から前方の地質状態を確認する必要があるとして、原則としてトンネル全線において先進ボーリングをおこなうことが規定されている。先進ボーリングでは、ボーリングコアの観察はもとより、ボーリング孔を利用した速度検層および孔内水平載荷試験、ボーリングコアを使用した室内岩石試験などがおこなわれ、地山評価に必要となる各種物性値が得られることが一般的である。こうして得られた物性値は、地山区分の指標として支保パターンの見直しに活用されている。亀村ほか²⁾は、北海道の道路トンネルの施工記録を分析し、先進ボーリング結果に基づいて見直した支保パターンが実際に施工された実績支保パターンと良く一致することを示し、先進ボーリングが地山ト

ラブルの防止に加え費用対効果の面でも有効であることを指摘している。

一方、先進ボーリング結果に基づく地山評価は、各種試験等により得られた物性値を表-1に示す地山区分(A～E)の目安値と照らし合わせて、評価項目ごとに判定された地山区分を図-1の例のようにとりまとめ、最終的には技術者の総合評価により地山区分が決定される。このとき、それぞれの評価項目の物性値で判定された地山区分は、すべての項目で一致した評価となることは稀で、図-1の例のようにばらついた判定となることが多い。このように評価項目ごとに判定がばらつく原因としては、地質の不均一性や、岩石試験の供試体などの試験対象の大きさに対する岩盤不連続面の影響が試験方法により異なる点など、様々な原因が考えられる。一方、わが国の地質は複雑で多岐にわたるが、変形特性などが異なる多様な地質に対して、現行の地山分類基準では表-1に示すように地質を3種に区分すると物性値からはほぼ一義的に地山区分が決まることになり、岩種ごとの特性に応じた地山評価が反映されにくい状況になっている可能性がある。そこで、本稿では多様な地質の分類法および地山評価法の合理化を図ることを目的として、北海道の道路トンネル49本分の先進ボーリングデータおよび施工記録を用いて、地質別に物性値と実績支保パターンを整理し、坑内変位量から地質別の変形モードについて考察した。

表-1 国土交通省北海道開発局の地山分類表¹⁾

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	140以上	6以上	55以上	5,000以上	0.25以下	
B	4.5～4.8	50～60	4.0～4.5	50～80	3.0以上	60以上	25以下	2.肌落ちほとんどない	140～35	6以上	55～50	5,000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	6～3	55～45	5,000～2,000	0.25～0.30	≥4
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	3～1.5	45～40	2,000～1,000	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	1.5～1	40～35	1,000～500	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	1～0.5	35～30	500～150	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	0.5～0.1	30～15	150～30	0.35～0.40	1以下

古生層～深成岩のうち吸水膨張性を有する蛇紋岩、片岩類は別途考慮

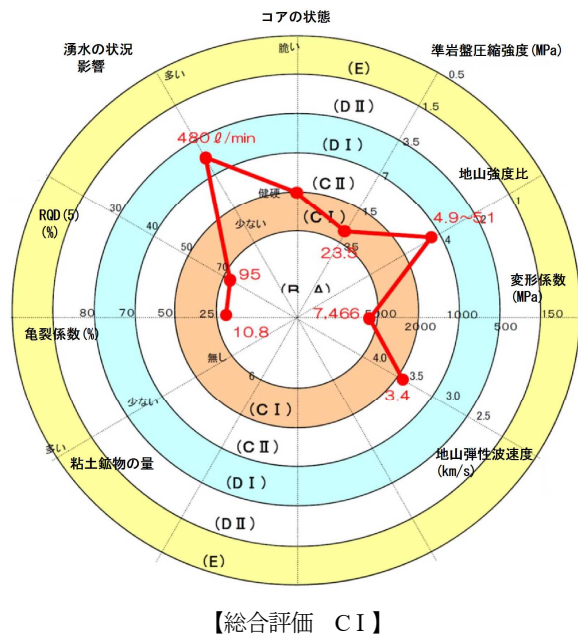


図-1 先進ボーリングによる地山評価の例

表-2 本検討で使用した施工記録情報

種別	使用した施工記録情報
地質	岩種名
施工記録	実績支保パターン トンネル幅
変状記録	変状の有無 増し支保工施工の有無
先進ボーリング記録	弾性波速度 (Vp) ※速度検層による 一軸圧縮強さ (σ_c) ※室内岩石試験による 変形係数 (E) ※孔内水平載荷試験による 地山強度比 (Gn)
坑内計測 (A計測)	内空変位量 天端沈下量 初期変位速度 1D掘削時の変位量 (D: トンネル径) 最終変位量

2. 先進ボーリングデータと施工記録

検討に使用したデータは、北海道開発局が保有する49トンネル分の施工記録である。施工記録には、A計測の計測断面ごとに、切羽で確認された岩種名、実績支保パターンや変状および増し支保工の有無、内空変位量、天端沈下量に関するA計測の記録、および切羽観察記録などが一覧表の形でまとめられている。先進ボーリングの情報は、上記のA計測断面における速度検層結果、孔内水平載荷試験結果および、ボーリングコアを用いて得られた室内岩石試験結果が示されている。本検討で使用した施工記録情報を表-2にまとめる。

3. 地質別の物性値と地山評価

(1) 地質分類と代表岩種

先進ボーリングで得られた物性値を地質別に整理するにあたり、表-3に示す地質分類を考えた。すなわち、施工記録に示されている岩種名から、北海道開発局の地質分類¹⁾である「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」および「第三紀堆積岩類」の3種と、道路トンネル技術基準（構造編）・同解説²⁾に示される岩石グループである「H塊状」、「M塊状」、「L塊状」、「M層状」および「L層状」の5種を勘案し区分した8種の地質分類に区分し

表-3 岩種に応じた地質分類

開発局 道路協会	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
H塊状	なし	片麻岩 ホルンフェルス 中古生層砂岩 中古生層礫岩 花崗閃緑岩 花崗岩 輝緑岩	なし
M塊状	なし	輝緑凝灰岩 玄武岩 安山岩 石英安山岩	第三紀砂岩 第三紀礫岩
L塊状	なし	凝灰角礫岩 第三紀集塊岩 火山礫凝灰岩	第三紀凝灰岩
M層状	粘板岩 中古生層泥岩・頁岩	なし	なし
L層状	黒色片岩 緑色片岩	なし	第三紀泥岩・頁岩

太字：代表岩種

た。8種の地質分類の中で、代表岩種としてデータ数の比較的多い8岩種を選びそれらの物性値を整理した。

(2) 地質別物性値と地山評価

先進ボーリングで得られる物性値のうち、弾性波速度 V_p 、一軸圧縮強さ σ_c および変形係数 E について、それぞれ表-1に基づいて地山区分を判定し、実績支保パターンとの一致率を求め表-4にまとめた。ここで、表-1の指標は準岩盤圧縮強さ σ_c' で示されているが、施工記録にはボーリングコアの弾性波速度が含まれていなかったため、一軸圧縮強さの値を用いて地山区分を判定した。準岩盤圧縮強さは、亀裂の無い供試体で求めた一軸圧縮強さに地山の亀裂の影響を加味するために、地山弾性波速度と供試体の超音波伝播速度の比から求めた係数をかけるため、亀裂の多い地山では一軸圧縮強さが低減されることとなるが、ここでは低減されていない値で地山区分をしたことになる。

この結果より、すべての岩種および物性値において一致率が50%を超えるものは無く、 V_p 、 σ_c 、 E ともに地山状態を端的に表す万能な物性値とはなり得ないことがわかる。亀村ほか⁴⁾でも指摘されるように、先進ボーリングの結果は技術者によって総合的に評価され、場合によっては幅を持った地山評価がなされることも多く、一義的に支保パターンが決まるわけではないことがこのデータからも読み取れる。このなかで、実績支保パターンとの一致率が高い項目としては、中古生層泥岩・頁岩における V_p 、 E や凝灰角礫岩における E が挙げられる。実績支保パターンと一致率の低い項目としては、中古生層砂岩における V_p 、 σ_c 、安山岩における σ_c 、黒色片岩における σ_c 、第三紀泥岩・頁岩における σ_c などが挙げられ

表-4 評価区分ごとの実績支保パターンとの一致率

n：データ数

a)弾性波速度 V_p による地山区分

開発局 道路協会	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
H塊状	なし	中古生層砂岩 n=62 6%	なし
M塊状	なし	安山岩 n=213 30%	第三紀砂岩 n=99 14%
L塊状	なし	凝灰角礫岩 n=154 37%	第三紀凝灰岩 n=21 19%
M層状	中古生層泥岩・頁岩 n=134 49%	なし	なし
L層状	黒色片岩 n=0 データなし	なし	第三紀泥岩・頁岩 n=113 24%

b)一軸圧縮強さ σ_c による地山区分

開発局 道路協会	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
H塊状	なし	中古生層砂岩 n=34 3%	なし
M塊状	なし	安山岩 n=182 2%	第三紀砂岩 n=55 38%
L塊状	なし	凝灰角礫岩 n=160 33%	第三紀凝灰岩 n=16 13%
M層状	中古生層泥岩・頁岩 n=93 15%	なし	なし
L層状	黒色片岩 n=12 0%	なし	第三紀泥岩・頁岩 n=98 5%

c)変形係数 E による地山区分

開発局 道路協会	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
H塊状	なし	中古生層砂岩 n=53 26%	なし
M塊状	なし	安山岩 n=94 21%	第三紀砂岩 n=40 15%
L塊状	なし	凝灰角礫岩 n=88 49%	第三紀凝灰岩 n=12 17%
M層状	中古生層泥岩・頁岩 n=29 48%	なし	なし
L層状	黒色片岩 n=12 17%	なし	第三紀泥岩・頁岩 n=57 21%

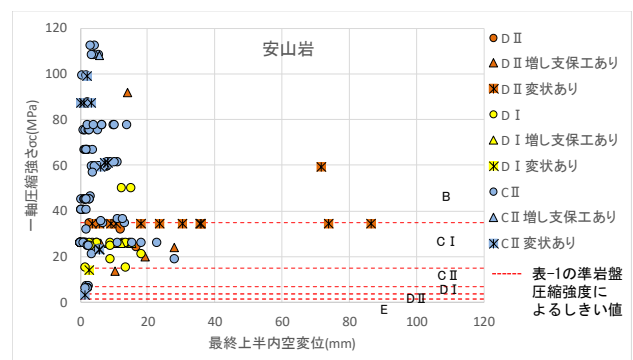


図-2 安山岩の一軸圧縮強さと内空変位量

る。これらのデータから、実績支保パターンと一致率の高いパラメータは岩種別に異なる傾向があることがわかった。この中で、中生層泥岩・頁岩、安山岩、および第三紀泥岩・頁岩では V_p 、 E に比べて σ_c の一致率が大きく低下する傾向にある。泥岩・頁岩は層理面や割れ目の状態に性状が支配されやすいため、割れ目の無い供試体の一軸圧縮強さでは地山状態を過大に評価してしまう可能性が要因にあると推定できる。しかし、安山岩に関しては現在のところ σ_c の一致率が低下する要因が明確でない。図-2は安山岩の最終内空変位量、 σ_c について、実績支保パターン、変状および増し支保工の有無により区別してまとめたものである。図より、安山岩の一軸圧縮強さ σ_c は、表-1の区分に従うとほとんどがB~C Iに区分されるが実績支保パターンはC II以下で施工されている。また、 σ_c の値はB~C Iに相当する箇所がD IIで施工され、さらには変状が発生している例が複数あることがわかる。これは亀裂の影響を考慮した準岩盤強度でなく一軸圧縮強さで評価していることを差し引いても乖離があると考えられる。なお、図-2で特筆すべき点として、C IIでの変状が多く確認されていることが挙げられる。これらの変状は、物性値が十分に大きく、切羽で確認された地山状態も良好であったにもかかわらず変状した事例と考えられる。このように、物性値と施工実績の乖離がいくつかの岩種で認められる。

4. 岩種別の坑内変位量の傾向

(1) 実測変位量と限界ひずみ

先進ボーリングコアの一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強さから桜井⁵⁾の方法によって限界ひずみ（下限値）を求め、施工中に計測された最終天端沈下量をトンネル掘削幅で除して求めた計測ひずみとの関係を図-3に整理した。図より、限界ひずみを超える天端沈下が確認された岩種は、粘板岩、中生層泥岩・頁岩、安山岩、石英安山岩、凝灰角礫岩、火山礫凝灰岩、第三紀凝灰岩、第三紀泥岩・頁岩である。これらの岩種について、計測ひずみと限界ひずみの比を求め、地山強度比との関係を図-4に示した。図より、粘板岩は計測ひずみが大きいのが限界ひずみを超える変位が発生している箇所はすべて地山強度比が小さく、道路トンネルの地山等級D I以下の目安⁶⁾に相当する4以下であることがわかる。一方、安山岩では、地山強度比が大きいにも関わらず計測ひずみが限界ひずみを超えるデータが散見され、土かぶり圧に対して強度が十分あるのに大きな変形が発生していることがわかる。このような変状の原因としては、膨潤性粘土鉱物の膨張や長期的な強度低下による変形などが考えられる。

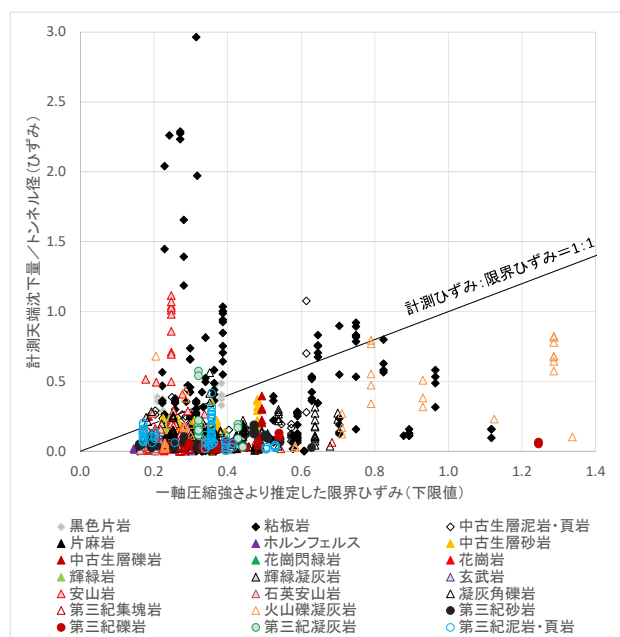


図-3 限界ひずみと計測ひずみの関係（天端沈下量）

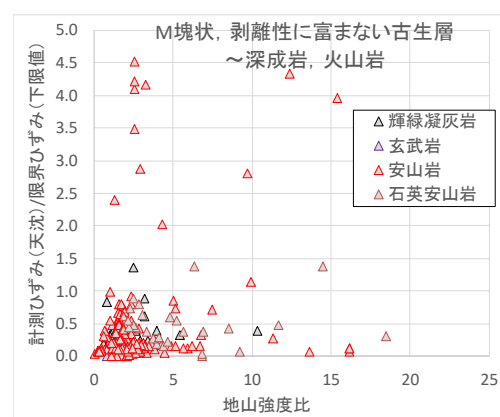
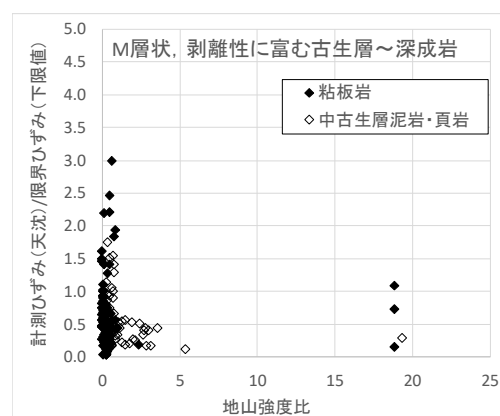


図-4 地山強度比に対する計測ひずみと限界ひずみの比

(2) 岩種別の変形モード

施工中に実測された内空変位量と天端沈下量の傾向を岩種別に整理した。表-3に示した地質分類に基づき8種の代表岩種について施工中の最終上半内空変位量と最終天端沈下量を図-5にとりまとめた。とりまとめにあたり、施工記録から各計測断面の実績支保パターンと増し支保工の有無、変状の有無を読み取り、それらを区別し

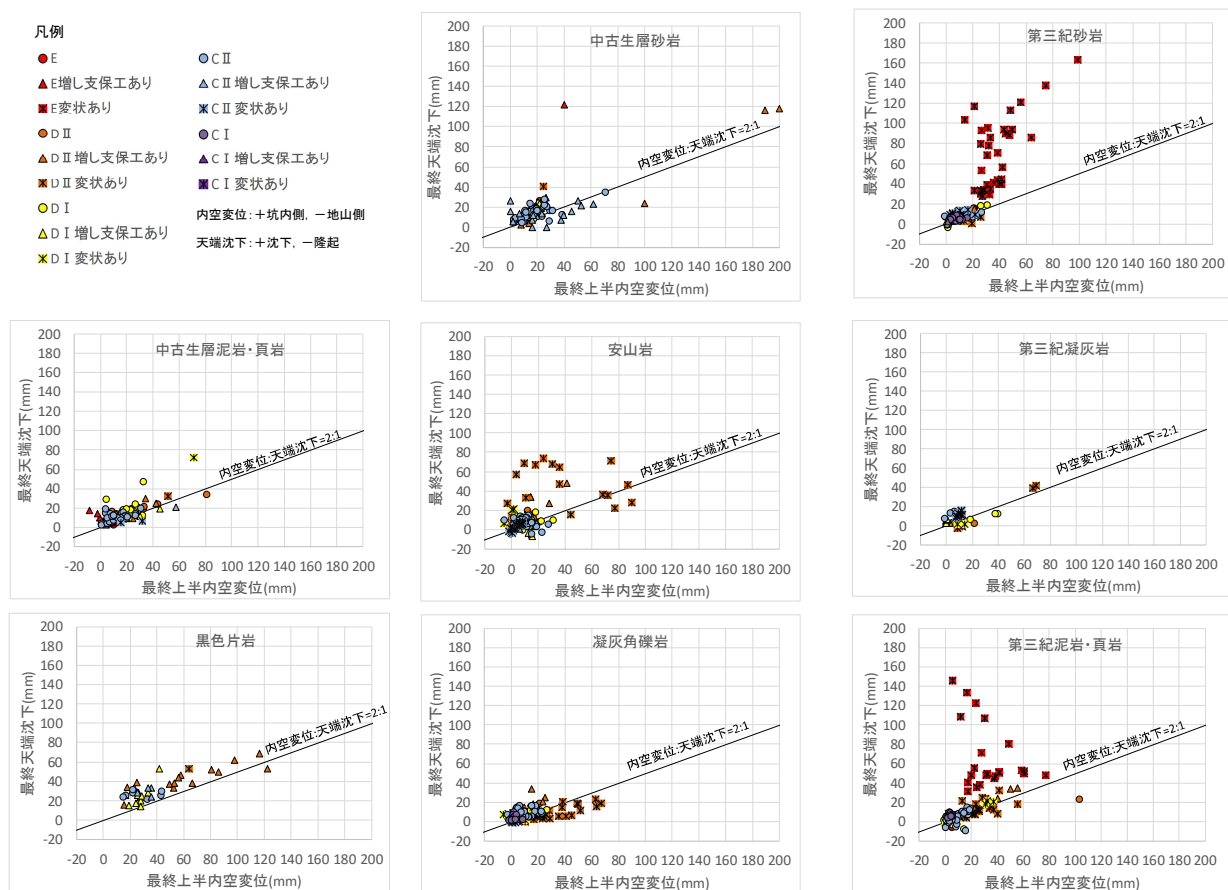


図-5 8岩種の最終上半内空変位量と最終天端沈下量の関係

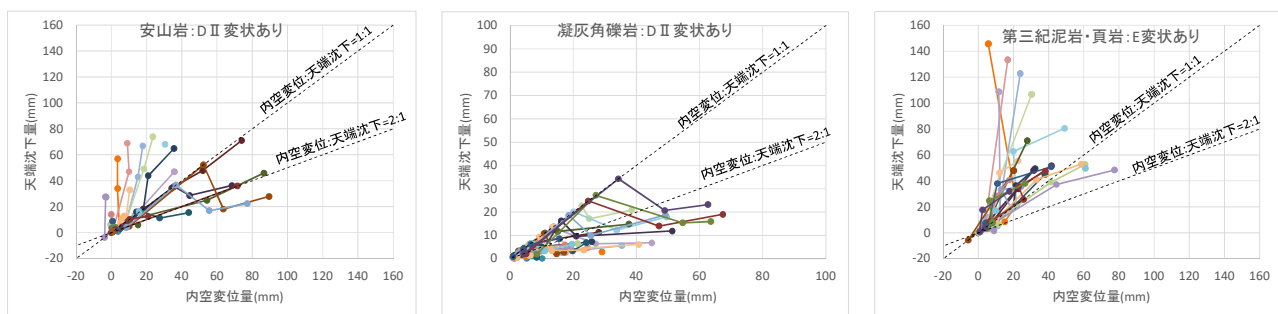


図-6 変状箇所の変形モード経時変化図

て整理した。施工記録によると、発生した変状は切羽崩壊、盤ぶくれ、鋼アーチ支保工の変形、ロックボルト頭部の変形、吹付けコンクリートのひび割れ、および二次覆工コンクリートのひび割れなど様々である。図より、変状が発生していない場合は全ての岩種で内空変位と天端沈下の比は2:1程度となっていることが読み取れる。変状ありのデータに着目すると、黑色片岩、中古生層泥岩・頁岩、凝灰角礫岩および、第三紀凝灰岩では内空変位と天端沈下の比が2:1程度のまま変状に至る傾向が認められる。第三紀砂岩および第三紀泥岩・頁岩では変状した断面では内空変位に対して天端沈下が卓越する傾向にあることが認められる。安山岩では、内空変位と天端沈下の比が2:1程度のまま変状に至る場合と、内空変位に対して天端沈下が卓越する場合の両方があることが読

み取れる。以上のように、変状が発生した断面では岩種によって坑内変位の傾向が異なり、沈下卓越の変形モードを示すものとそうでないものがあることが分かった。

岩種別の変形モードの違いを詳しく見るために、内空変位卓越型の安山岩、凝灰角礫岩および天端沈下卓越型の第三紀泥岩・頁岩の変状箇所の計測データについて、計測値の経時変化を図-6に示した。図には計測断面ごとの変位量を、掘削から1日経過時点、1D掘削時点(D:トンネル径)、最終計測時点の順にプロットし、計測断面ごとに線で結んで示した。1日経過時点の変位量は、施工記録に示される初期変位速度の値を変位量と考えプロットした。

初期変位速度を評価する時点では地山は弾性的に挙動していると仮定すると、天端沈下と内空変位の比は初期

地圧の鉛直圧と水平圧の比に依存すると考えられる。この観点から図-6の結果について考察を加えると、どの岩種でも初期の段階では天端沈下：内空変位=1:1に近い挙動を示しており鉛直圧の卓越した地山での変位挙動となっている。しかし、さらに掘削が進行しID掘削時点になると、天端沈下が急増するパターン（安山岩の一部と第三紀泥岩・頁岩の一部）と天端沈下が減少に転じ内空変位が急増するパターン（安山岩の一部と凝灰角礫岩）に変化し、変状を生じている。

以上より、安山岩の一部と、凝灰角礫岩は第三紀泥岩・頁岩などとは変形モードが異なり、内空変位卓越型の変状を起こすことがある。また、掘削初期から時間経過後に変形モードが変化することが示唆される。

5. おわりに

先進ボーリングで得られた物性値の傾向から、実績支保パターンと一致率の高いパラメータは岩種別に異なることがわかった。また、物性値から判定される地山区分と施工実績の乖離が安山岩などのいくつかの岩種で認められる。これより、岩種によっては現行の地山評価指標だけでは地山評価が難しい場合があることが示唆される。一方、坑内変位の傾向から、安山岩などで地山強度比が大きいにも関わらず大きな変形が発生している箇所が散見される。こうしたデータからも岩種によっては地山評価が難しい場合があることが示唆される。

岩種別の変形モードに着目すると、内空変位卓越型の変状が多く確認される安山岩、凝灰角礫岩の変状箇所では、掘削初期は沈下卓越型であったモードが時間経過後に内空変位卓越に変化している傾向にある。北海道では、熱水変質を受けた安山岩や凝灰角礫岩で盤ぶくれ変状が発生した例が報告されており、いくつかの例では時間経過後に変状が顕在化する場合がある⁷⁾。内空変位卓越型の変状はこうした盤ぶくれ変状に近い変形モードと考え

られる。そのように考えると、安山岩や凝灰角礫岩の変状箇所では、掘削から時間経過後に地山の強度低下などが起こっている可能性があり、先進ボーリング実施時点での物性値を低減して評価することが必要となる可能性も考えられる。こうした岩種による変形特性の違い等が、物性値と実績支保パターンの乖離の一因となっている可能性が考えられる。

あるいは、図-5、図-6において天端沈下卓越型を示す箇所は支保パターンEが多く、内空変位卓越型を示す箇所はDIIパターンが多い傾向にある。これより、支保の剛性の違いが変形モードの変化に影響を及ぼしている可能性も考えられる。

今後は、さらに多くの岩種および支保パターンについても施工記録と先進ボーリングによる物性値等の分析を進め、地山評価にあたり注意が必要な岩種を明らかにするとともに、合理的に地山評価をおこなうための方法について検討していきたい。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 亀村勝美、倉橋稔幸、岡崎健治、山崎秀策、村山秀幸、丹羽廣海：先進ボーリングによる地山評価とその効果、トンネル工学報告集第28巻、2018。（投稿中）
- 3) 社団法人日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説、p.80、2003。
- 4) 亀村勝美、岡崎健治、伊東佳彦：先進ボーリングに基づく地山等級評価について、第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.31-35、2015。
- 5) 桜井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法、土木学会論文報告集第317号、pp.93-100、1982。
- 6) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説、p.76、2016。
- 7) 佐々木隆・石黒 聡・宇治川徳夫・福田和寛：熱水変質自破砕溶岩地山におけるトンネル変状の挙動解析と施工実績、土木学会、トンネル工学報告集Vol23、pp.231-238、2013。

A CASE STUDY FOR RATIONAL CLASSIFICATION OF TUNNEL GROUND BASED ON ANALYSIS OF ADVANCED BORING

Hiroumi NIWA, Toshiyuki KURAHASHI, Kenji OKAZAKI
and Katsumi KAMEMURA

Hokkaido Regional Development Bureau specifies geological survey using advanced boring of whole tunnel. Tunnel construction is carried out while correcting a design based on rock classification evaluated by test results of geological survey. The rock classification is not often parallel with the adopted support pattern, thus it is pointed that existing evaluation index is not always suitable for various geology in Japan. Authors analyzed construction records of 49 tunnels in Hokkaido. Tunnel displacements and rock properties obtained by advanced boring are compared with adopted support pattern and deformation for rational classification of tunnel ground.