

泥質岩中の割れ目の密集部がトンネルの変状に与える影響の検討

川越 健^{1*}・嶋本 敬介²・野城 一栄²

¹ (公財) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部地質 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

² (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部トンネル (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

*E-mail: tkawagoe@rtri.or.jp

トンネル建設時に変状を起こしやすい地山であることを評価する指標は多く提案されているが、それらを用いても建設時や完成後の変状を予測できない場合がある。本報告では、既往事例などの分析から変状が発生した箇所の地山性状や地質構造について検討を行い、変状が生じる箇所の一つとして泥質岩地山で割れ目が多く分布する区間があることを示す。岩石試験の結果から、そのような箇所では吸水膨張応力が大きくなる傾向にあること、既往の膨張性地山の目安となる指標と盤ぶくれに相関が乏しいことを示した。また、弱層とトンネルの交差関係により完成後の変状箇所や量が建設時と異なることを解析から示した。

Key Words : mudstone ,fractuer zone,mountain tunnel,swelling test, numerical amalysis

1. はじめに

トンネルの変状を調査、施工の各段階で予測するための指標は多く提案されている¹⁾。しかし、それらと掘削時の切羽の調査、例えばA計測の結果に基づいてもトンネル完成後に変状が生じる場合がある。北川²⁾はトンネル掘削後の時間の経過と共に徐々にトンネルの断面が縮小する作用を「膨圧」と呼び、これは軟岩特有の現象であり新第三紀泥岩のいわゆる「鏡肌」が生じている地山でその発生が著しいと述べている。既往の変状事例でも割れ目が多く分布する区間(断層や断層破碎帯)で変状が発生している事例が多く報告されている³⁾。仲野⁴⁾は、新生代の泥岩を主な掘削対象とした事例から地山強度比による岩盤分類の重要性を指摘するとともに、乱した泥岩の吸水性が大きければ押し出し性地圧(塑性圧)はより大きくトンネルに作用することを示している。しかし、そのような割れ目を多く含む地山においては試料採取が困難なことから岩石力学的な性質には不明な点が多く、また岩石供試体ならびに地山としての力学的な不均質性や異方性を有していることからトンネルの安定性に関わる評価が難しいのが現状と考えられる。また、微細な割れ目などは掘削時の切羽観察簿で十分に評価が出来ておらず、切羽スケッチに記載されるのみのことも多い。ここで仲野のモデル^{4), 5)}に従えば、トンネルの変状はその初期には主に地山の強度に関係し、遅れて吸水軟化による強度低下が要因となると考えられる。通常の排水型ト

ンネルでは、切羽の進行に伴い地下水流動も変化するため、地山の含水状態も掘削前とは時間とともに変化すると考えられる。そのため、完成後のトンネル変状の要因の一つとして岩石の吸水による物性変化が考えられる。

完成時のトンネル変状を防ぐためには、地質構造や割れ目の多寡など岩石試験のみでは把握が難しい項目にも着目する必要があると考えられる。そこで、本報告では泥質岩が分布する地域におけるトンネルの変状事例について地質学的観点から分析を行い、さらに変状との因果関係が想定される割れ目の有無と岩石の吸水膨張について検討した結果を報告する。また、割れ目を多く含む層、つまり力学的な弱層がトンネル変状に与える影響を解析的に検討し、弱層の3次元的な分布と完成後のトンネル変状の発生箇所について考察した結果を示す。

2. 変状トンネルにおける地質構造

(1) 文献調査から得られる変状トンネルの地質構造⁶⁾

トンネルが変状した区間の地質構造を把握するために文献調査を行った。対象文献は平成25年8月以前に発行されたものである。トンネル変状に関わる地質の情報が記載されている文献(223文献)の内、変状箇所の地質構造が把握できた74トンネルについて整理をした。その結果、トンネルの変状に係わる地山のタイプ(地質構造)は以下の3つに大別できることがわかった(図-1)。

地山タイプ1：力学的な強度に著しい差のある地層が分布する（13トンネル）

地山タイプ2：断層破砕帯や割れ目を多く含む地層などの力学的な弱層が局所的に分布する（32トンネル）

地山タイプ3：力学的に均質であるが強度などが小さい地層が分布する（12トンネル）

また、湧水がある、膨潤する鉱物が含有される場合、変状が促進されることがある。変状箇所は主な岩種は泥岩・頁岩が最も多く（全体の39%）、次いで火砕岩類（同23%）であった。

(2) 変状箇所の検討事例⁷⁾

新第三紀鮮新世の泥質岩が広く分布する地域をほぼ東西に貫くトンネル（以下、「Aトンネル」と呼ぶ。）の例を示す。Aトンネルでは一部の区間でトンネル完成後にインバートクラックや盤ぶくれが生じ、対策が実施された。当該区間の土被りは起点方で約100m、終点方に向かって徐々に増大して約150mとなっている。掘削時の内空変位量は40～60mm、天端沈下量は約40mmであった。変状に係わる地質的な要因を検討するために切羽観察記録の整理を行った。まず、切羽観察記録中の観察項目の区分に着目した。主な項目の区分は、記録されたほとんどの切羽で、「切羽の状態：鏡面から岩塊が抜け落ちる」、「素掘面の状態：時間がたつと緩み肌落ちする」、「風化変質：なし～岩目に沿って変色・やや強度低下」、「割れ目の頻度：5cm～1m」、「割れ目の状態：部分的に開口」、「湧水：なし・滲水程度」、「水による劣化：なし」、であり、特定の区間で変状が大きく発生した原因は読みとれなかった。そこで、切羽スケッチおよびそこに記載されているコメントを整理した。図-2に変状区間の一部についての検討結果を示す。当該区間では主に砂質泥岩、凝灰質砂岩が分布しており、地層は概ね図中で右側から左側に向かって30°程度の角度で傾斜する単斜構造を示すが、切羽ごとでの走向傾斜は

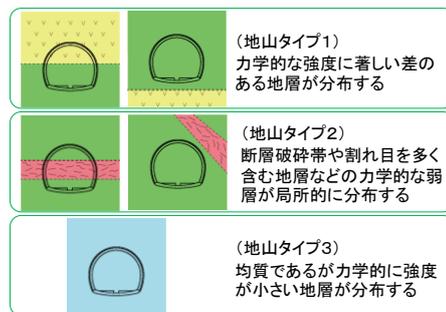


図-1 文献調査から得られた地山のタイプ

細かく変化している。湧水は一部区間で滲みだし程度であり、それ以外では「なし」、もしくは記載がなかった。割れ目は、多くのスケッチで複数の卓越する方向が記載され、分布密度の増減はあるものの全体に割れ目の多い地山であったと考えられる。また、キロ程140mより終点方では、掘削後の時間経過とともに割れ目が開口する旨の現象が記載されていることから、掘削後に緩みを生じやすい地山であったと推測される。また、割れ目に沿って地層の変位が認められる（断層と推定される）箇所がキロ程160m付近、280m付近、740m付近にある。検討区間の全体でインバートが隆起しているが、割れ目が多い区間で隆起量が相対的に大きく、地層境界がインバート下に分布するキロ程280m付近で断層が分布している箇所では隆起量が特に大きくなっている。

(3) 変状箇所の地質的な特徴

文献調査および事例検討の結果、完成後の変状箇所は力学的な弱層の分布と関係しており、同一の地層の場合、割れ目の多寡も影響する可能性があることがわかった。

3. 岩石試験

2章の結果を踏まえ、割れ目が多く分布する地山から、割れ目を含む岩石を採取して吸水膨張について岩石試験から検討した。

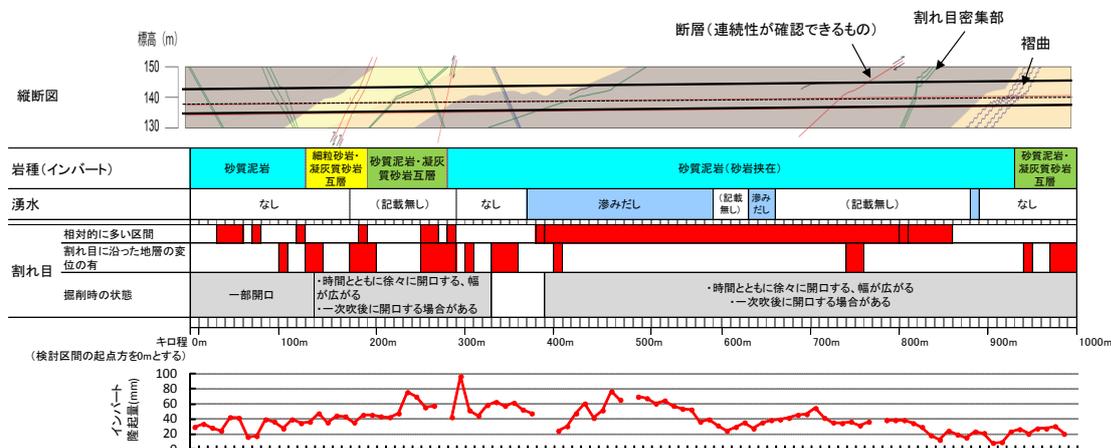


図-2 変状トンネルの検討事例

(1) 岩石試料の概要

岩石試験は建設時あるいは建設完了後に変状が生じた区間から採取した古第三紀の泥質岩、新第三紀の泥質岩、酸性凝灰岩を対象とした。岩石試験に用いた試料を表-1に示す。Aトンネルではインバート変状箇所のボーリングコアを用い、それ以外は切羽などで採取した岩塊を用いた。泥質岩におけるサンプリングは、割れ目が密集する箇所（以下、「割れ目部」と呼ぶ。）と塊状を呈する箇所（以下、「塊状部」と呼ぶ。）で実施した。酸性凝灰岩はいずれの箇所でも層理面が不明瞭で割れ目が認められない塊状を呈する岩塊を用いた。

(2) 岩石試験の方法

実施した主な岩石試験は、スメクタイトの含有量試験、スレーキング試験、陽イオン交換容量試験（CEC）、一軸圧縮試験、吸水膨張試験、超音波伝播速度試験である。

スメクタイトの含有量試験は桜井ほか⁸⁾の方法によった。それ以外の試験などは学会などで示される基準に準拠して行った。Aトンネル以外の試料での吸水膨張試験は、載荷荷重による割れ目の密着や開口などの状態の変化を考慮し、1)基準の荷重（以下、「無載荷」と呼ぶ。）に加えて、2)基準の荷重+10kN/m²（コンクリート厚さ400mm相当。以下、「10kN/m²載荷」と呼ぶ。）、3)無載荷時の最大吸水膨張応力に相当する荷重（以下、「最大荷重載荷」と呼ぶ。）、の3通りの荷重で膨張応力、膨張率を測定した。

(3) 超音波伝播速度と一軸圧縮強さの関係

図-3にAトンネルを除く試料の超音波伝播速度（ v_p ）と一軸圧縮強さの関係を示す。両者の間には正の相関性が認められる。また、同一の地層で比べると泥質岩では割れ目部から採取した試料は塊状部と比べて、速度が遅く、一軸圧縮強さが小さい傾向にある。

(4) 既往の膨張地山の判定に関する指標との関係

図-4にスレーキング試験の結果を示す。古第三紀の泥質岩では、塊状部と比べて割れ目部でスレーキング指数が大きい傾向にあるが、新第三紀泥質岩では明瞭な傾向は認められなかった。Aトンネルの試料は全てが3または4であった。Aトンネルの試料について、盤ぶくれ量とスレーキング指数や鉱物学的指標との関係を図-5に示す。変状が発現していない区間のデータとの比較は出来

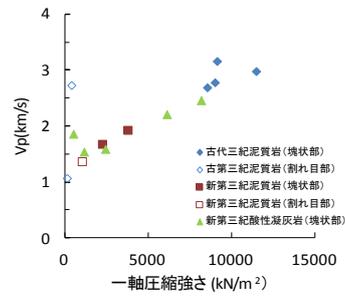


図-3 超音波伝播速度と一軸圧縮強さの関係

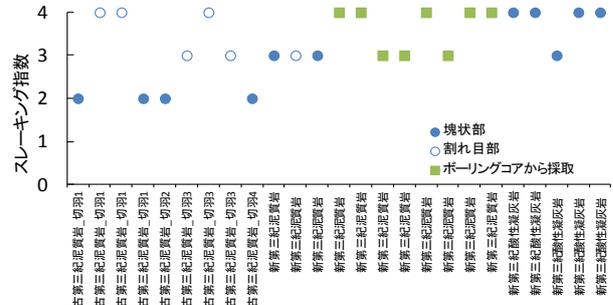


図-4 スレーキング試験の結果

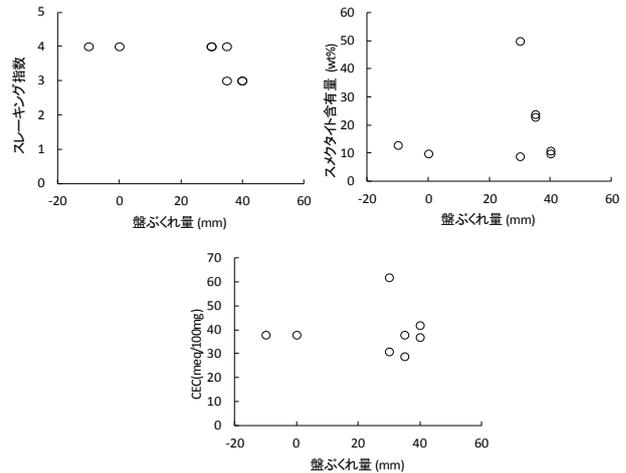


図-5 盤ぶくれ量と鉱物学的指標との関係

てはないが、これらの指標と盤ぶくれ量の間には明瞭な関係は認められない。図-6に全ての試料について、スレーキング試験の結果と膨張性の指標などとの関係を示す。スレーキング指数と各試験結果の間には明瞭な関係はないが、それぞれの関係で下限値と考えられる関係は見いだせる。例えば、スレーキング試験時の吸水率が小さい試料はスレーキング指数が小さく、吸水しやすい試料はスレーキングしやすいことを示唆する。

4. 割れ目を含む岩石の吸水膨張特性

(1) 吸水膨張応力と吸水膨張率

図-7に吸水膨張応力と吸水膨張率の関係を示す。全体のプロットを見ると膨張応力が大きい試料では膨張率も大きい傾向にある。また、同じ地層では割れ目部で膨

表-1 岩石試験に用いた試料

年代	岩種	採取箇所	箇所数
新第三紀	酸性凝灰岩	切羽など	4切羽
	泥質岩	切羽	1切羽
	泥質岩	ボーリングコア	5箇所(Aトンネル)
古第三紀	泥質岩	切羽	4切羽

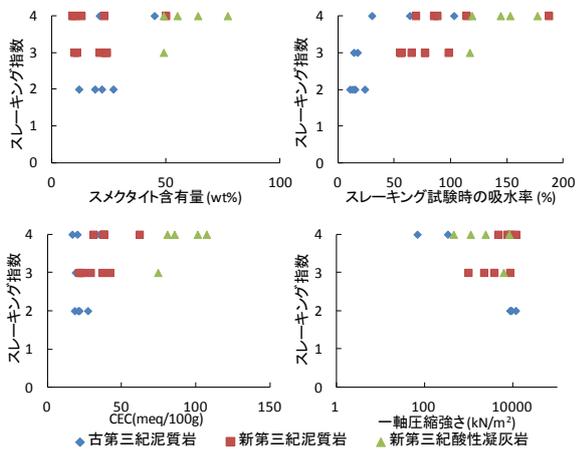


図-6 各試験結果とスレーキング指数の関係

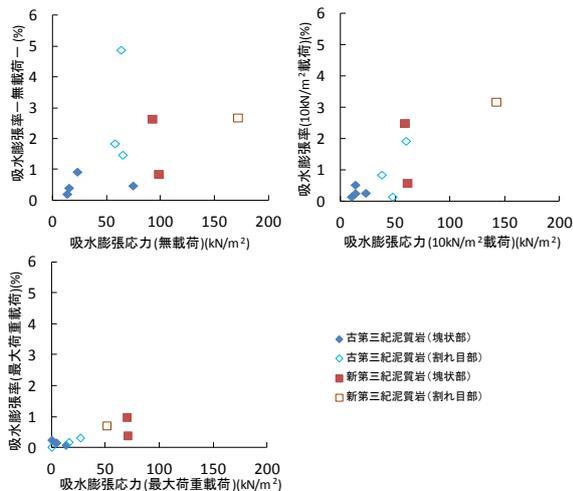


図-7 吸水膨張試験結果

張応力、膨張率とも大きな値を示す傾向が認められる。さらに、載荷荷重の大きさを大きくすると、膨張応力、膨張率ともに小さくなる傾向が認められ、この傾向は割れ目部ほど顕著である。これらのことから、割れ目の多寡により岩石の吸水膨張特性が異なると考えられる。

(2) 吸水膨張応力とスレーキング

図-8に無載荷時の吸水膨張応力とスレーキング試験の結果との関係を示す。図から、吸水膨張応力が大きい試料はスレーキング指数が3、4と相対的に高い値となる傾向があることが分かる。ただし、スレーキング指数3、4において、吸水膨張応力の差を明確に区分することはできない。次に、CECの値、スメクタイト含有量との関係を図-9に示す。吸水膨張応力との間には、それらの値が大きいと、応力も大きい傾向はあるが、明瞭な相関は認められない。これらのことは、膨潤性鉱物の量では岩石としての吸水膨張特性を説明できないことを示唆していると考えられる。

(3) 吸水膨張応力と一軸圧縮強さ

図-10に一軸圧縮強さと無載荷時の吸水膨張応力の関

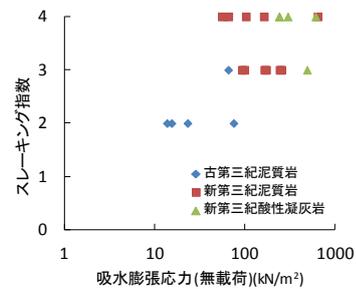


図-8 吸水膨張応力とスレーキング試験結果

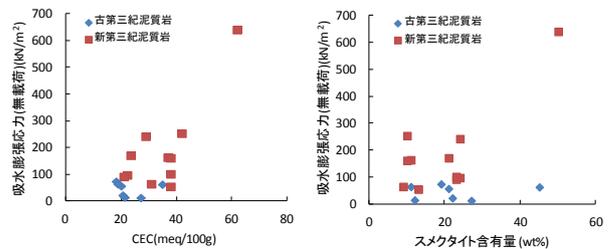


図-9 吸水膨張応力と CEC, スメクタイト含有量

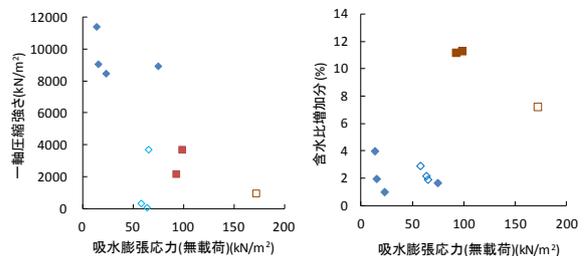


図-10 吸水膨張応力と一軸圧縮強さの関係 (凡例は図-7 参照)

図-11 吸水膨張応力と試験時の含水比変化 (凡例は図-7 参照)

係を示す。一軸圧縮強さが小さいと膨張応力が大きい負の相関が認められる。

(4) 吸水膨張応力と含水比の変化

吸水膨張試験前後の含水比の変化と吸水膨張応力の関係を図-11に示す。泥質岩では数%の含水比の増加で100kN/m²程度の吸水膨張応力が発生している。同じ地層の場合、同様の含水比の増加程度であれば割れ目部の方が塊状部に比べて大きな応力が発生する傾向がある。

5. 弱層の3次元的な分布が完成後のトンネル変状の発生箇所にも及ぼす影響

(1) 解析方法

弱層の3次元的な分布がトンネル変状に与える影響を検討するため、3次元数値解析を行った。完成後の変状を考えるためにはトンネル掘削時の影響も考慮する必要がある。そのため、トンネル掘削時の変状と完成後の変状を対比して検討するためにトンネル掘削から完成後の変状発生までを一貫してモデル化した⁹⁾。トンネルの掘削においては、鋼製支保工をBeam要素、ロックボルト

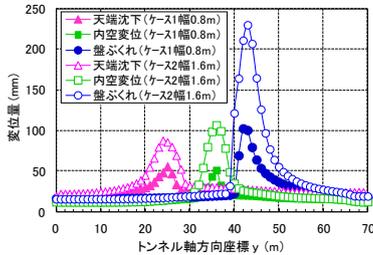
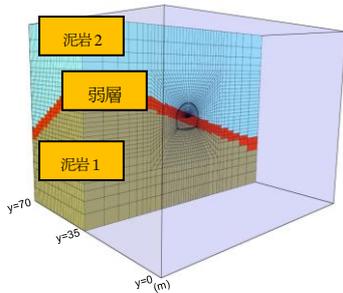


図-13 施工時に発生した変位量

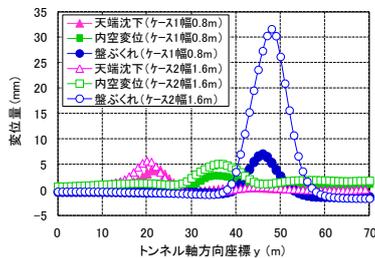


図-14 完成後に発生した変位量 (50年後)

をCable要素, 吹付けコンクリート, 覆工, インバート, 地山をSolid要素で表現し, ベンチ長3mの補助ベンチ付き全断面工法とし, 1mずつの逐次掘削解析を行った. 支保パターンは新幹線断面における I_{NP} 相当とした. 完成後の変状は, 時間の経過とともに地山の強度を低下させることで表現した. 地山の応力が強度低下によりトンネルに作用することで数値解析上でトンネルに変状が表現される. 施工時の地山の緩みの影響を考慮して強度低下をさせており, その強度低下と時間経過の関係については, 実際の変状トンネルの再現解析を実施してパラメータを同定した.

(2) 弱層とトンネルの交差関係による変状の発生位置¹⁰⁾

図-1で示したタイプ2の地山を対象として, 弱層の幅を, ケース1: 0.8m, ケース2: 1.6mの2ケースで解析を実施した. ケース2の解析モデルを図-12に示す. 鉛直方向60m, 横断方向80m, トンネル延長方向70mをモデル化した. 上面以外をローラー支持, 上面には土被り200m相当となるように残りの荷重を作用させた. 図-12中の泥岩1, 弱層(割れ目部), 泥岩2の物性値は, 実際の切羽で採取した岩石試験で得られた値を用いた. 解析の結果, 施工時に発生した変位量を図-13に示す. 幅によらず弱層がトンネル変状に与える影響が認められ, ケース2では内空変位が100mmを超えた. また, 弱層が切羽面で観察されなくなる距離 $y=43m$ で盤ぶくれが大きく

発生する.

完成後の変位量を図-14に示す. 距離 $y=48m$ の位置で最も大きな盤ぶくれが発生した. 弱層が路盤と交差する箇所は盤ぶくれに繋がる可能性がある. また, 建設時と完成後では変位量のピーク位置が異なり, 変位区間が長くなる. これは, 弱層の上盤の地山の強度劣化の影響も含まれるためと考えられる.

(3) 変状トンネルの地質構造と変位量

(2)と同様の解析を図-1で示した地山タイプごとに行った. 解析ケースを図-15に示す. 物性値は一般部の地山強度比 C_f を1.0, 弱層で C_f を0.3とした. 支保パターンは, ケース1~3の I_{NP} が上下半の吹付け厚150mm, 鋼製支保工125H, ロックボルト3m×14本に対して, Case4の特SPは閉合距離10mで一次インバートによる早期閉合とし, 上下半, インバートの吹付け厚を250mm, 鋼製支保工200Hとした. ロックボルトは上下半のみ4m×22本とした. 解析結果を表-2に示す. Case3の建設時で最も大きな変位が発生し, 供用時の変位量も大きい傾向にある.

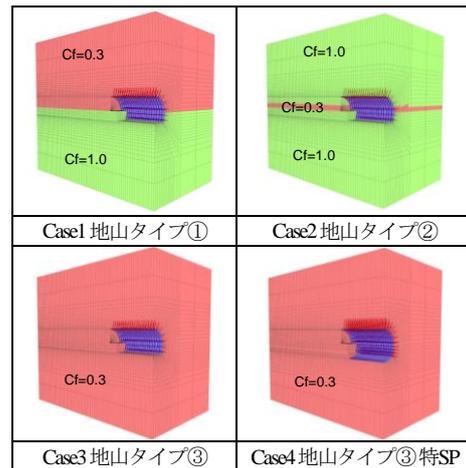


図-15 解析ケース

表-2 施工時に発生した変位量

	施工時の変位 (mm) (先行変位除く)			完成後10年間に 発生した変位 (mm)		
	天端沈下	内空変位	盤ぶくれ	天端沈下	内空変位	盤ぶくれ
Case1	38.4	88.5	16.1	-1.2	2.1	19.6
Case2	17.1	42.3	18.4	-0.7	2.6	18.4
Case3	83.2	243.3	295.9	-1.3	10.8	38.3
Case4	24	101.3	25.6	0.4	0.4	-0.4

(4) 変状の発生にかかわる弱層とトンネルの関係

数値解析の結果, 弱層とトンネルの3次元的な関係によりトンネル完成後の変状発生位置や量が異なることが分かった. これは, 切羽の断面外の地質分布を考慮した覆工設計が重要であることを示すと考えられる.

6. 考察

3章で示した岩石試験の結果から、地山の吸水膨張特性には既往の鉱物学的な指標のみでは十分に評価することは難しく、4章で述べたように割れ目の多寡も影響していると考えられる。また、スレーキングしやすい試料は吸水しやすいと考えられる。村山ほか¹¹⁾は、軟岩の吸水膨張時には土粒子間の間隙に保持される毛管ポテンシャルが重要な役割を果たすことを述べている。掘削後の時間の経過に伴う塑性域の拡大により、割れ目の伸展、増加、およびそこに地下水が入ることで地山の吸水膨張が徐々に促進されると考えられる。割れ目が多い箇所がせん断帯で有る場合は、そこが水みちとなることも考えられ、そのような場合は岩石の吸水によりトンネル覆工へ作用する応力は大きくなる可能性が考えられる。さらに、5章で示した3次元数値解析の結果から、弱層とトンネルの3次元的な関係によっては、完成後の変状はより広い範囲に及ぶ可能性がある。そのため、掘削時には割れ目が密集する範囲の把握とその吸水膨張特性に着目した調査、計測が必要と考えられるとともに、切羽の断面外の地質分布を考慮した覆工設計が重要となると考えられる。また、先に述べたように、本研究の範囲では吸水膨張応力は一軸圧縮強さと負の相関が認められ、また一軸圧縮強さは超音波伝播速度と正の相関が認められる。そのため、同様の地層が連続する範囲では、既往の指標に加え、地山の弾性波速度の違いも完成後のトンネル変状を予測する上で有用である可能性が考えられる。

7. まとめ

トンネル完成後に生じる変状の原因と場所について、事例分析、岩石の吸水膨張に着目した試験および数値解析により検討した。泥質岩地山では割れ目の多寡が変状発生と関係している可能性があること、割れ目を含む岩石では吸水膨張応力、膨張率ともに大きいことが分かった。また数値解析から弱層とトンネルの3次元的な交差関係により変状位置や量が異なることを示した。これら

を踏まえ、掘削時には割れ目が密集する範囲の把握とその吸水膨張特性に着目した調査や切羽断面外の地質分布を考慮した覆工設計が重要であることを示した。

謝辞

岩石の組成分析や試験において、(株)ジェーイアール総研エンジニアリングの石田良二博士およびセントラル技研(株)のご協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，土木学会，322p，2006.
- 2) 北川修三：多重支保工は有力な膨張性地山対策，トンネルと地下，Vol.34，No.2，pp.55-65，2003.
- 3) 例えば，高木敏雄：営業線トンネルの変状と対策 JR 北海道函館本線神居トンネル，トンネルと地下，Vol.28，No.11，pp.7-11，1997.
- 4) 仲野良紀：膨張性地山の実態，トンネルと地下，Vol.10，No.6，pp.15-25，1975.
- 5) 仲野良紀：第三紀層泥岩の力学的性質と膨張性トンネル，地すべり等のメカニズムに関する一連の研究，第43回地盤工学シンポジウム，pp.11-22，1988.
- 6) 川越健，西金佑一郎，野城一栄，嶋本敬介，石田良二：トンネルの変状に関わる地質構造と割れ目密集部の力学的性質，日本応用地質学会平成26年度研究発表会講演論文集，pp.95-96，2014.
- 7) 川越健，太田岳洋，赤澤正彦，上野光，石田良二：泥質岩を掘削対象としたトンネルの変状と岩石の吸水膨張特性，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，III-106，2015.
- 8) 桜井孝，立松英信，水野清：膨潤性粘土鉱物の簡易定量法の研究，鉄道技術研究報告，No.1312（施設編第574号），1986.
- 9) 嶋本敬介，野城一栄，小島芳之，塚田和彦，朝倉俊弘：建設時の影響を考慮した山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究，土木学会論文集 F1，Vol.69，No.2，pp.105-120，2013.
- 10) 川越健，嶋本敬介，石田良二：泥岩を掘削対象とするトンネルの変状に関わる割れ目密集部の力学的性質，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，III-203，2014.
- 11) 村山朔郎，関口秀雄，鳥井原誠，沢田守生：軟岩の吸水膨張に関する一考察，京大防災研究所年報第17号 B，pp.391-401，1974.

STUDY OF SWELLING CHARACTER OF MUDDY STONE WITH FRACTURE IN MOUNTAIN TUNNEL

Takeshi KAWAGOE, Keisuke SHIMAMOTO, Kazuhide YASHIRO

We investigate deformation of mountain tunnels, constructed by NATM, after completion to attention on swelling. In this paper, we showed that the crack density influence to tunnel deformations in some case from case study. And swelling character of mudstones was different by the density of crack from rock tests for engineering properties. In addition we showed that deformation zone was changed by situation of intersection of weak layers and tunnel from numerical analysis.