

供用中のれんがトンネルにおける地山評価と 変状対策

小瀬 喜已¹・水野 光一朗²・磯崎 司³・齋藤 英之⁴

¹ 正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター (〒163-0231 東京都新宿区西新宿 2-6-1)
E-mail:kose@jreast.co.jp

² 正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター (〒163-0231 東京都新宿区西新宿 2-6-1)
E-mail:kou-mizuno@jreast.co.jp

³ 東日本旅客鉄道株式会社 八王子土木技術センター (〒192-8502 東京都八王子市旭町 1-8)
E-mail:tsukasa-isozaki@jreast.co.jp

⁴ 東日本旅客鉄道株式会社 八王子土木技術センター (〒192-8502 東京都八王子市旭町 1-8)
E-mail:saitou-hide@jreast.co.jp

鉄道れんがトンネルにおいて側壁部の局所的な押出しが確認された。この変状はトンネルの一部の範囲で確認され、供用開始から 100 年以上が経過した後に確認された特殊なものであった。変状が確認された後の進行性は緩やかであることがわかったが、変状原因の分析を行うとともに対策方法を確立させる必要があった。筆者らは坑内および坑外からの調査を実施するとともに、ボーリングを活用した各種試験を実施し、特殊な変状の原因が水の影響を受けて地山の一部が軟化したことによる塑性的な押出しと地山の吸水膨張が相伴って生じたと推定した。また、膨張性粘土鉱物を多く含む地山であっても強度がある地山では変状を生じさせないことを示した。さらに、調査結果に基づき、対策方法としてロックボルトによる対策を検討した。

Key Words: mountain tunnels, ground assessment, mechanical characteristic, degree of slaking, railway

1. 研究の背景と目的

山岳トンネル工法で建設されたトンネルでは地圧の作用による変状が発生する事例がある。山岳トンネルの代表的な変状としては、側壁のひび割れやトンネル内空方向への押出し、盤ぶくれなどがある¹⁾。これらの変状は、トンネル掘削直後から発生する場合は膨張性地山として取扱われ、トンネル完成前に各種の対策が行われる²⁾。また、トンネルが完成した後の供用開始後にも、盤ぶくれや側壁の押出しが顕在化する事例が多く報告されている³⁾。

供用開始後に変状が確認されたトンネルでは、変状の進行が継続する事例もある。これらの事例では、掘削直後に内空変位も小さく、切羽の自立性も良かった地山において、時間とともに覆工に変状が発生する事例^{例えば 4)}や、供用開始後、一定の時間の経過後に変状が発生する事例^{例えば 4)~6)}が多いように思われる。

筆者らが維持管理するれんが造の鉄道山岳トンネルにおいて、供用開始から 100 年以上経過した後に変状が確

認された。変状はトンネル坑口から約 150m 付近で発生し、トンネル側壁部の局所的な押出しやひび割れが主なものであった。前述の通り、供用開始後の山岳トンネルで変状が確認されることはあるが、供用開始後 100 年以上が経過した後に変状が確認される事例は少ないように思われる。そのため、変状原因の分析を行うとともに対策方法を確立させる必要があった。

本稿では確認された変状について、規模や進行性の診断を行うとともに、トンネル周辺の地山の評価により、確認された特殊な変状の原因を解明する。また、地山の評価に基づき、対策方法を検討する。

2. トンネルの概要

(1) トンネルの諸元

対象とするトンネルは、経年約 115 年のれんが造の単線トンネルである。延長は約 550m であり、覆工厚はれんがブロックの三層巻で 35cm から 40cm 程度である。ト



図-1 変状箇所概况

ンネル全線にわたりインバートは施工されていない。また、トンネルの土被りは約8mから25mである。

(2) トンネル周辺の地形や地質

トンネル周辺の地質は、新第三紀の御坂層群の安山岩質角礫岩、凝灰岩などで構成されている⁷⁾。また、当該トンネルは河川左岸側の段丘に位置している。

(3) 確認された変状の概要

2017年の目視検査において坑口から約150m付近に側壁の局所的な押出しや、それに伴う覆工表面のひび割れなどが確認された。

側壁の押出しが確認された箇所の周辺では、覆工表面のひび割れやくい違いが過去においても確認され、10年程度にわたり、トータルステーションによる内空断面の計測を継続的に行っていた。計測結果では、その進行性は1～2mm/年程度と小さく¹⁾、確認された局所的な側壁部の押出しとは変状の原因が異なると想定された。また、当該部ではトンネルアーチ部に過去に補修としてセメント系材料の吹付け工が施工されており、補修材の表面に滲み出す程度の漏水が確認された。変状箇所周辺の概况を図-1に示す。

確認された変状は、供用開始後100年以上が経過した後に確認された特殊なものであった。そのため、側壁の局所的な押出しが発生した原因を推定することや変状の進行速度を把握する必要が生じた。さらに、変状規模を特定し、対策範囲および対策方法を定めるために、調査を実施した。

3. 現地踏査に基づく調査方法の検討

確認された変状は、概観や内空断面の計測結果から供用開始後に一定の経過後に生じる緩やかな変状が進行する事例とは異なるものと想定された。また、変状が比較的短期間で進展したと想定された。そのため、変状の進

行速度や規模、範囲の把握および変状原因を推定するために、目視による調査と併せて、現地においてひび割れ箇所の覆工表面のマーキングや接着剤を用いた開口幅の測定、トータルステーションによる内空断面測定、レーザープロファイラによる建築限界余裕量の測定を行った。

さらに、局所的な変状は比較的短期間で進展したと想定され、トンネル周辺の環境変化が懸念されたため、変状が確認された付近のトンネル上部の利用状況の調査を行った。

(1) 現地踏査の結果

坑内の調査として、トンネル全長にわたる目視による調査や現地における継続したひび割れ測定を行った。その結果、変状が発生している範囲はトンネル長手方向の延長で狭い範囲に限定されていた。また、変状を確認した際は比較的短期間で変状が進行したと想定されたが、約1.5年にわたる調査の結果、変状の範囲はトンネルの長手方向および断面方向でやや広がっていたものの、急速な変状の進行はみられなかった。

トータルステーションによる内空断面の測定の結果からも急速な変位の進行は確認されなかった。レーザープロファイラによる計測の結果、建築限界に対しても十分な余裕を確保していた。

坑外の調査として、変状が確認された付近のトンネル上部の調査を行った。その結果、トンネル上部の土地利用状況が畑から商業施設の駐車場（アスファルト舗装）に変更されていた。

(2) 調査方針の検討

現地踏査の結果、変状が側壁部の押出しやひび割れであり、変状が発生している範囲が限定されていることから、変状の原因として覆工背面の地山の影響を第一に想定した。そのため、この地山の劣化の性状とその原因を確認するために、坑内からの水平ボーリングを実施することとした。

4. 調査および室内試験の結果

(1) ボーリング調査および室内試験の内容

坑内からの水平ボーリングによる調査にあたっては、変状の規模や範囲、今後の進行性の予測を行うために、側壁の局所的な押出しの変状が確認された箇所（以下、変状部：測定箇所①）、健全な箇所（以下、健全部：測定箇所③）、変状部と健全部の間に位置し、坑内の現地踏査で変状が進行しているようにみられた箇所（以下、遷移部：測定箇所②）の3箇所で実施した。これらの3箇所は15m程度の狭い範囲にあった。



図-2 測定箇所①（変状部）のコア（コア長 L=3.6m）



図-3 測定箇所②（遷移部）のコア（コア長 L=3.4m）



図-4 測定箇所③（健全部）のコア（コア長 L=3.4m）

また、地山の特性を評価するため、採取したボーリングコアに対して、コア観察を実施するとともに、室内試験として一軸圧縮試験、粒度試験、液性・塑性限界試験、粉末 X 線回折、スレーキング試験、CEC・交換性陽イオン分析試験を実施した。

(2) ボーリングコアの観察結果

水平ボーリングにより、覆工背面の地山を採取した。ボーリングコアを図-2から図-4に示す。図-2から図-4のボーリングコアの観察結果から以下のことがわかった。

なお、地山の岩石区分には、偏光顕微鏡による観察結果も加味した。

変状部および遷移部は、厚さ 35cm から 40cm のれんが覆工の背面から深さ 100cm までは地山が劣化して粘土化し、軟弱な土砂状であった。この範囲以降は、岩片状と棒状コアが交互に存在した。また、劣化が進行したコアは水を多く含んでいた。

変状部および遷移部の黒色の岩石は、流紋岩質な凝灰岩であり、変状部の深部は流紋岩と区分した。

一方で、健全部は、厚さ 40cm のれんが覆工の背面の深さ 40cm から 60cm の範囲で地山が岩片状で、やや軟質であった。この範囲以降は、岩質は硬質で、棒状コアとなっていた。健全部の地山を流紋岩と区分した。

(3) 室内試験の結果

採取したコアに対して、各種の室内試験を実施した。室内試験の結果を表-1に示す。表中の数値は、ボーリングの深度であり、トンネル内空側のれんが覆工表面からの深さを表す。地山の評価に際し、地山の性状を示す指

表-1 室内試験の結果

試験 位置	地質 岩石 区分	試料 採取 位置 (cm)	一軸 圧縮 強度 (N/mm ²)	粒度試験		X線回折 スメクタイト 含有量 (%)	CEC・交 換性陽イ オン分析 (meq/100g)	スレーキン グ試験 浸水崩壊度(ス レーキング指数)
				細粒分(2 μm以下 含有率(%))	自然含 水比 (%)			
測定箇所① 変状部	流紋岩	300~330	6.6					
	流紋岩	205~220	16.9					
	凝灰岩	90~100				23	45.4	D (4)
測定箇所② 遷移部	凝灰岩	50~70		24.5	21.7			
	流紋岩	260~290	17.6			20	59.8	A (1)
測定箇所③ 健全部	凝灰岩	80~90						
	流紋岩	110~130	32.2					
	健全部	40~55				30	49.7	A (0)

※一軸圧縮強度および地山強度比は深さ 300~330cm で採取した比較的堅固な岩質のコアの値を用いて表記

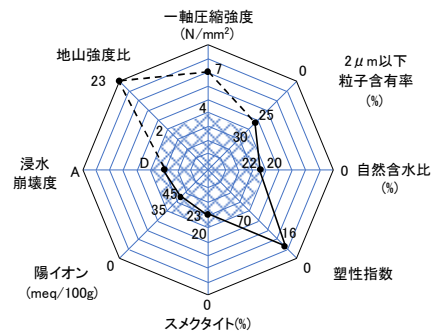


図-5 変状部の地山の評価

表-2 粉末 X 線回折の結果

試験 位置	地質・岩石 区分	試料採取 位置 (cm)	組成鉱物								
			Qz	Fl	Am	Mi	Ch	Sm	Ze	Gl	Ca
測定箇所① 変状部	凝灰岩	90~100	◎	△	▼	▼	▼	◎	△	▼	△
測定箇所② 遷移部	凝灰岩	80~90	○	◎	—	—	—	◎	▼	△	△
測定箇所③ 健全部	流紋岩	40~55	◎	○	—	—	—	◎	△	○	▼

凡例
相対的な量の目安 ◎: 多量 ○: 中量 △: 少量 ▼: わずか
Qz: 石英 Fl: 長石 Am: 角閃石類 Mi: 雲母類 Ch: 緑泥石 Sm: スメクタイト
Ze: 沸石類 Gl: ガラス Ca: 炭酸塩鉱物

標として、トンネル標準示方書²⁾の地山の膨張性を示す指標の例を参照とすることとした。この指標に基づく変状部の地山の評価を図-5に示す。

なお、図-5の一軸圧縮強度および地山強度比は、覆工背面にて試験体を成形できるコアを採取できなかったため、深さ 300cm から 330cm の範囲で採取した比較的堅固な岩質コアの値を用いて表記した。

a) 一軸圧縮試験

表-1より、一軸圧縮試験の結果、変状部、遷移部、健全部ともに覆工背面は軟質化しているもの、棒状のコアを採取し、試験体を成形できた一定の深さ以降では、一軸圧縮強さ q_u の硬さによる分類で、目安の数値として示される範囲の軟岩²⁾($2\text{N/mm}^2 \leq q_u < 15\text{N/mm}^2$)から中硬岩程度²⁾($15\text{N/mm}^2 \leq q_u < 50\text{N/mm}^2$)の一軸圧縮強さを有することが確認された。

b) 粉末 X 線回折

粉末 X 線回折の結果を表-2に示す。また、X 線回折から求めたスメクタイトの含有量を表-1に併せて示した。

前述の通り、変状部および遷移部の試料は凝灰岩、健



図-6 変状部のスレーキング試験の結果



図-7 遷移部のスレーキング試験の結果

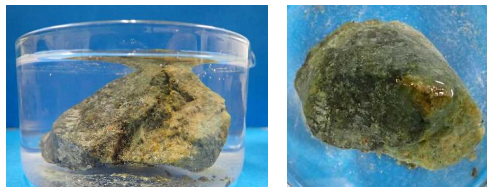


図-8 健全部のスレーキング試験の結果

全部は流紋岩と区分したが、表-2より、3箇所とも主成分の鉱物は石英、長石類、ス멕タイトであることがわかる。岩種が異なるにも関わらず、同様な鉱物組成を示した。また、相対的な量の目安ではあるが、膨張性粘土鉱物であるス멕タイトが多く含まれることが特徴的であった。

c) スレーキング試験

スレーキング試験は地盤工学会の試験方法⁸⁾（JGS 2124-2009「岩石のスレーキング試験方法」）に準拠し、1回の乾湿による劣化の形状および程度で判定を行った。これは、膨張性粘土鉱物を含有する試験体では、1回の乾湿で劣化することがあるためである。スレーキング試験の結果を図-6から図-8に示す。

変状部では浸水直後から劣化がみられた。試験結果として、スレーキング指数は4であり、浸水崩壊度としてはDであった。図-6に示すように顕著な劣化を示した。遷移部では、図-7に示すように試験体の表面が僅かに細粒化したものの、その後の変化はほとんどなかった。結果としては、スレーキング指数は1であり、浸水崩壊度はAであった。健全部は図-8に示すように変化がなく、スレーキング指数は0で、浸水崩壊度はAの結果であった。試験結果を表-1に併せて示した。

d) CEC・交換性陽イオン分析

試験結果を表-3に示す。また、地山の性状を判定するに際し、各種試験との比較を行うために試験結果を表-1に併せて示した。いずれの試験体も陽イオン交換容量CEC値は50から60程度であり、比較的大きな値²⁾であった。

なお、変状部でCaイオンの量が突出しているが、こ

表-3 CEC・交換性陽イオン分析の結果

試験 位置	地質・岩石 区分	試料採取 位置 (cm)	交換性陽イオン(meq/100g)					陽イオン 交換容量 (meq/100g)
			Na	K	Ca	Mg	合計	
測定箇所① 変状部	凝灰岩	90～100	29.4	5.0	142.1	4.9	181.4	49.7
測定箇所② 遷移部	凝灰岩	80～90	30.4	5.1	16.0	3.8	55.3	45.4
測定箇所③ 健全部	流紋岩	40～55	19.5	5.5	37.6	3.2	65.8	59.8

の原因は明確にはならなかった。

5. 調査結果に基づく変状原因の推定

現地の踏査やボーリング、各種の室内試験の結果、今回確認された変状および周辺の地山の性状として以下の特徴があった。

- ・主な変状はトンネル側壁部の局所的な押し出しと覆工表面のひび割れであった。
- ・変状部のトンネルのアーチ部には滲む程度の漏水が確認され、変状箇所周辺では水が供給される環境であった。
- ・変状が確認された範囲は広範囲ではなく、限定的であった。また、変状の進行性は、確認された後の約1.5年の計測の期間では急速ではなかった。
- ・今回調査を行ったトンネル周辺では岩種が異なるにもかかわらず、同様な鉱物組成を示した。これより、当該箇所の流紋岩および凝灰岩は、火成岩および堆積岩と岩種が異なるが、元が同じ溶岩と火山灰から生成されたと推定した。
- ・トンネル周辺の地山には膨張性粘土鉱物のス멕タイトが多く含まれていた。当該箇所でも確認されたス멕タイトは、トンネル周辺の地山の生成過程において地山が熱水変質と破碎により粘土化し、生成されたと推定した。
- ・変状部では覆工背面で一軸圧縮試験の試験体を成形できるコアを採取できなかった。また、図-5で試験結果をまとめたように、覆工背面の地山が水の影響を受け、膨張性を示す性質を含んでいた。これらのことから、変状部では覆工背面の地山が水の影響を受けて、地山の一部が劣化し、軟質化や吸水膨張したと推測された。一方で、変状部においても、軟質化していない箇所の地山は、軟岩から中硬岩程度の強度を有していた。
- ・健全部や遷移部では、変状部と同程度のス멕タイトを含有していたにもかかわらず、試験体がほとんど劣化しなかった。これは、健全部や遷移部の岩石の強度が大きく、ス멕タイトが吸水し、膨張する圧力よりも岩石の固結度が大きかったためと推測される⁹⁾。これらのことから、今回確認された特殊な変状は、生

成過程において熱水変質と破碎の影響を受けた地山において、水の影響を受けて軟質化した地山の強度低下による塑性的な押し出しと、地山に多く含まれる膨張性粘土鉱物であるスメクタイトによる吸水膨張が相伴って生じた変状と推定した。

すなわち、健全部で変状が発生しないのは地山の強度が大きく、水の影響を受けにくいためであり、変状部では破碎などにより軟質化した地山の一部のみが、供用開始後 100 年以上が経過した後に何らかの環境変化などにより更なる軟質化や吸水膨張を生じ、側壁の局所的な押し出しなどの特殊な変状を発生させたと思われる。

なお、トンネル上部の環境条件が変わったことにより、トンネル周辺に水が供給される環境となったかは現時点では不明である。

6. 対策方法の検討

確認された変状に対して監視を強化するとともに、対策工事を計画している。対策方針として、地山の劣化が確認された変状部においても、覆工背面から深さ 100cm 以深は地山が軟岩から中硬岩の強度を有していた。よって、地山の改良効果と内圧効果が期待できるロックボルト工を対策工として採用した。

打設長や打設パターン、配置などを現地の状況に応じて実施するほか、鉄道れんがトンネルの施工方法に起因する覆工背面の空洞の存在も考えられるため、ロックボルト工と並行してクラウン部の覆工背面の空洞を調査する。クラウン部の空洞が確認された場合、必要により可塑性注入材による空洞充填をロックボルト工と併せて実施し、合理的な対策計画とする。

7. まとめ

本稿では、供用開始後 100 年以上が経過した後に確認

された特殊な変状に対して、坑内および坑外からの調査を実施するとともに、ボーリングを活用した各種試験を実施した。そして、膨張性粘土鉱物を多量に含む地山であっても強度がある地山では水の影響を受けにくいことや、変状の原因が破碎などにより軟質化した地山の一部のみが、何らかの環境変化により更なる軟質化や吸水膨張を生じ、変状を発生させたと推定した。

また、詳細な調査結果に基づき、対策方法を検討した。

本稿での知見が今後のトンネルの維持管理の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修・鉄道相模技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，2007.
- 2) 土木学会：2016 年制定トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，2016.
- 3) 鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，1998.
- 4) 野澤伸一郎，伊藤忠八，竹内定行：既設トンネルの膨圧を克服，只見線六十里越・田子倉トンネル，トンネルと地下，第 23 巻 10 号，pp.17-22，1992.
- 5) 片寄紀雄，松本武海，興石逸樹：緩やかな膨圧減少と付き合って 30 年，JR 信越本線塚山トンネル，トンネルと地下，第 28 巻 3 号，pp.7-15，1997.
- 6) 佐久間智，菅原徳夫，多田誠，遠藤祐司：供用中に発生した急激な盤ぶくれ変状を復旧する，山形自動車道盃山トンネル（上り線），トンネルと地下，Vol.40，No.12，pp.27-37，2009.
- 7) 産総研地質調査総合センター：20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2，データ更新日：2019 年 3 月 22 日，<https://gbank.gsj.jp/seamless/>
- 8) 地盤工学会：岩石のスレーキング試験方法 JGS 2124-2009，2009.
- 9) 石田良二：スメクタイトを含む軟岩の諸性質および劣化に関する基礎的研究，早稲田大学学位論文，1995.

(2019. 8. 9 受付)

EVALUATION OF GROUND CONDITIONS AROUND BRICK MOUNTAIN TUNNEL AND PLANNING OF COUNTERMEASURE WORK AGAINST DEFECTS

Yoshimi KOSE, Koichiro MIZUNO, Tsukasa ISOZAKI and Hideyuki SAITO

This report describes evaluation of ground conditions around brick mountain tunnel and planning of countermeasure work against defects. In the mountain tunnel, defects were observed such as deformation of side wall and cracks of tunnel lining. Although these defects were not fatal, inspections and examinations regarding cause of defects into tunnel lining and ground conditions were needed.

Authors defined cause of defects through inspections and examinations, and method of rational and adequate countermeasure work against observed defects.