

地山の経時劣化に起因するトンネル変状現象に関する調査・解析

Investigation and analysis on deformed tunnel due to the time degradation of the rock mass strength

東日本高速道路㈱
鹿島建設㈱
㈱エーティック

○正会員 加藤文啓 (Fumihiko Kato)
正会員 藤原浩一 (Koichi Fujiwara)
非会員 菊山浩喜 (Hiroki Kikuyama)

1. はじめに

山岳トンネルでは、スレーキング等による地山の経時劣化に起因して、変形やひび割れなどの変状を生じることがある。道路トンネルにおいて重大な変状が確認された場合に、その対策工はインバート新設等の通行規制を必要とする大規模なものとなる場合が多く、変状の初期段階からの計画的な維持管理が求められる。

大夕張トンネルは、道東自動車道 夕張 IC ～ むかわ穂別 IC 間に位置し、平成 23 年 10 月に供用した延長 4,172m のトンネルである。平成 24 年 2 月のトンネル点検時に、当該トンネルの避難坑および避難連絡坑に床版コンクリートの変状が確認され、平成 26 年 10 月に避難連絡扉の機能回復のため、対策工を実施した。¹⁾ このような事象を受け、まだ変状が発生していないトンネル本坑（供用部）への影響を検討するため、変状区間の地質調査およびそれに基づく解析的検討を実施した。

本稿では、大夕張トンネル避難坑における地質調査結果および変状現象の再現解析結果を基にトンネル変状挙動の傾向と特徴について考察する。

2. 地質概要

図-1 に地質縦断面図を示す。当該トンネルの地質は中生代白亜紀の函淵層群、上部蝦夷層群、中部蝦夷層群で構成され、砂岩、泥岩または砂岩泥岩の互層と、一部に凝灰岩泥岩の互層が分布しており、避難坑の変状区間は主に「上部蝦夷層群の泥岩」となっている。

建設時に確認された切羽は、本坑・避難坑ともに、所々に風化・土砂化が見られたものの、湧水もなく安定しており、変状区間の大部分は、CⅡパターンが適用された地山である。また、掘削時に計測された内空変位は、本坑で約 10～20mm、避難坑で約 5～10mm であり、地山のひずみに換算すると 0.2%程度であった。

3. 大夕張トンネル避難坑の変状状況

3.1 変状状況および変状発生区間

大夕張トンネルでは、全長 4,172m のうち、避難坑中央部の約 1,600m 区間に盤ぶくれが確認され、床版コンクリートに開口クラックを伴う変状が発生した。併せて、本坑と避難坑をつなぐ避難連絡坑にも同様の変状が発生し、避難用扉の変形に伴い、開閉不能または扉が開閉し難くなっていることも確認された。図-2 に大夕張トンネルの変状区間平面図を示す。

当該トンネルの本坑（供用部）は、覆工コンクリートとインバートとで閉合された構造となっているが、変状

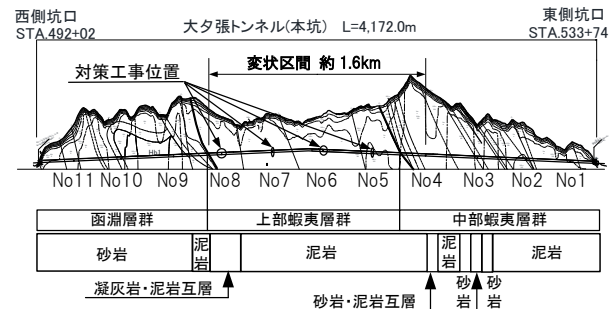


図-1 地質縦断面図

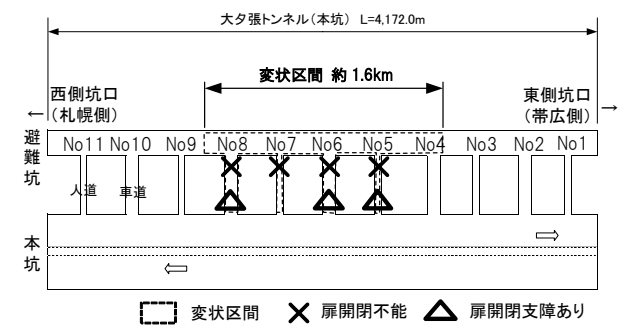


図-2 変状区間平面図

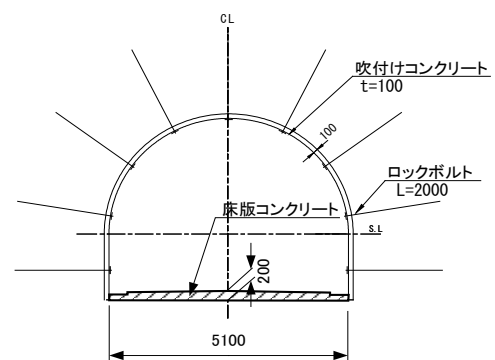


図-3 トンネル避難坑構造図

が発生した避難坑や避難連絡坑は、吹付けコンクリートとロックボルトからなるシングルシェル構造であり、底盤部には車両走行用の床版コンクリートが施工された構造である（図-3）。避難坑の目視点検の結果、トンネルアーチ部には、吹付けコンクリートのひび割れやロックボルトの変状等は認められておらず、変状は底盤部のみで発生している。変状が最も顕著な避難連絡坑 No 6 近傍の床版コンクリートには、トンネル軸方向に最大開口幅約 5mm のひび割れが確認された。

3.2 避難坑の底盤変位計測結果

最初に変状を確認した平成 24 年 2 月のトンネル点検時に、避難坑底盤部を対象に地中変位計を設置した。計測は、平成 24 年 3 月から対策工事を開始する平成 25 年 7 月までの約 1 年 4 ヶ月間継続し、変位が生じている深度や変位速度を確認した。図-4 に変状が最も著しい No6 避難坑底盤部の地中変位分布図を示す。

地中変位計の計測結果から地山の変位発生領域は、避難坑底盤から概ね 4m の深度範囲と確認された。また、底盤表面では最大 21mm 程度の隆起が観測され、観測期間中の変位速度は最大で 2.8mm/月、平均で約 1.6mm/月と非常に緩やかに進行していることが確認された。

また、平成 25 年の対策工事期間中には避難坑アーチ部や供用中のトンネル本坑を含めて新たに地中変位計を追加し、現在も計測を継続している。

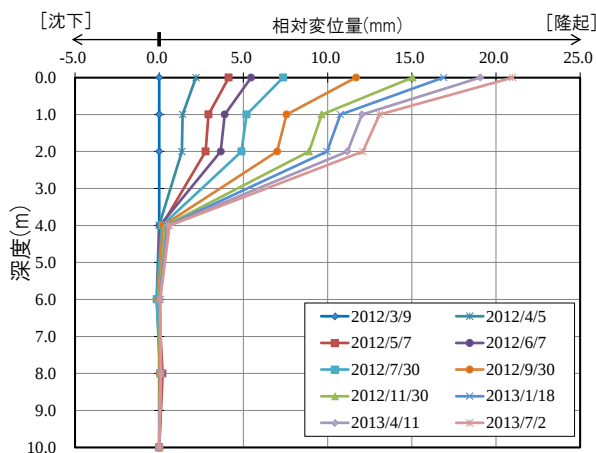


図-4 避難坑底盤部の地中変位分布図

4. 地質調査

4.1 地質調査の方法と目的

地質調査は、コア観察によりトンネル近傍における地山の状態を把握するとともに、1) 避難坑の変状区間と非変状区間、2) 変状区間における本坑と避難坑、における地質性状の対比を行い、これらの結果から変状素因を把握することを目的とした。

今回調査を行った箇所は、いずれも上部蝦夷層群に属する泥岩層が分布する。主な調査内容は、ボーリング調査、原位置試験として孔内水平載荷試験、室内試験として三軸圧縮試験（UU）、超音波伝播速度試験であり、これらにより各地点の地質性状・力学特性を把握した。

事前に実施した上部蝦夷層群泥岩の膨張性判定では、変形係数とスレーキング性のみが基準値を超過し、スメクタイト含有量等他の指標は基準値未満であった。そのため、今回は、乾湿繰返し吸水率試験を複数個所で実施し、地点間のスレーキング性の相違を把握するとともに、スレーキング性と関連性の高い、岩盤中の微細亀裂性状を顕微鏡観察により確認した。

4.2 ボーリング調査および力学試験結果

図-5 に避難坑変状区間（No 6 近傍）におけるコア観察に基づく、岩盤性状区分図を示す。避難坑底盤部から深さ約 3m の間には、粘土状コア、または岩片・角礫・

砂状コアを呈し、割れ目沿いを中心に粘土を伴う「破碎部」が確認された。この区間は図-4 に示す地山の変位発生領域と概ね一致している。また、孔内水平載荷試験の結果、破碎部の変形係数は健全部と比較して 1/10 程度であり、顕著な力学特性の低下が確認された。一方で非変状区間の避難坑や本坑近傍においても、類似のコア性状を示す破碎部が確認された。しかし、健全部と比較した変形係数の低下率は「変状区間＞本坑＞非変状区間」という傾向を示しており、力学特性の低下率は異なる。

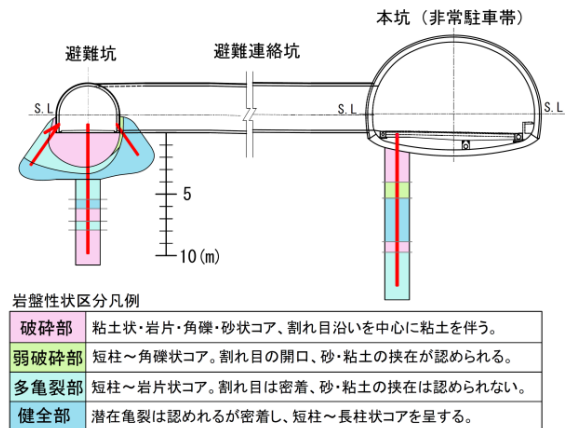


図-5 ボーリング調査結果（No 6 近傍）

4.3 スレーキング性の比較

避難坑における変状区間と非変状区間との地質性状を対比した結果、スレーキング性に大きな相違があることが明らかとなった。図-6 に乾湿繰返し吸水率試験結果を示す。変状区間の吸水量増加率が 18～98%であるのに対し、非変状区間は 2%と、ほとんどスレーキング性が認められない結果となった。一方、変状区間における避難坑と本坑とを比較すると、避難坑は破碎部と健全部とで吸水量増加率が大きく異なるのに対し、本坑はほぼ同等の結果を示す。これは、スレーキングの進行程度を示していると考えられ、避難坑の破碎部は本坑と比較してスレーキングがより進行しているものと考えられる。

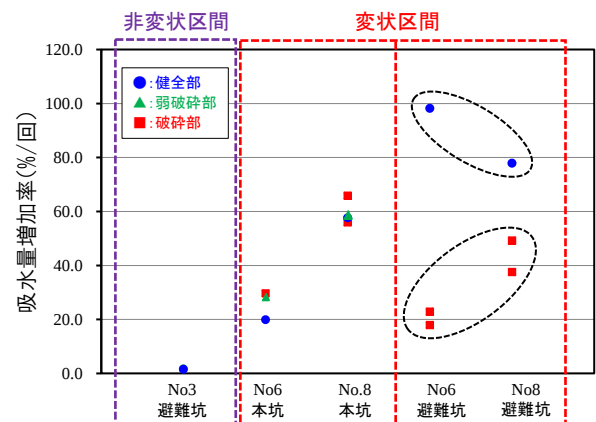


図-6 乾湿繰返し吸水率試験結果

薄片顕微鏡観察の結果、どの地点においても岩盤内に微細亀裂が顕著に発達していることが確認された。また、

特徴的な点として、変状区間の破砕部は、健全部に対し亀裂幅が広いことが確認された。これは、トンネル掘削による緩みの影響であると推察され、トンネル近傍の地山は、亀裂が開口し、水分の浸透が容易となることで、スレーキングが進行しやすい状態にあったと考えられる。

4.4 変状素因に関する考察

前節までの各区間の比較から、本トンネルにて確認された変状の素因は、「スレーキング性」にあると推察できる。変状区間は建設時および調査時において地下水が確認されておらず、水に乏しい環境であった。しかし、一方で供用期間中には、本坑と避難坑の寒暖差によって、避難坑側に結露が発達し、床版コンクリートに水たまりが発生していたことも確認されている。こうした水分がトンネル掘削により開口した微細亀裂を伝わって地中に浸透することで、スレーキングの進行による強度低下が緩やかに進み、掘削後、遅れて地山が変形したものと考えられる。したがって、トンネル本坑についても変状が発生する素因は有しているものと考えられるが、変形係数の低下率や吸水量増加率から、スレーキングの進行度は避難坑と比較して低いものと推察できる。

5. 地山劣化モデルによるシミュレーション解析

5.1 解析手法と目的

解析は、地山の経時的な力学特性の低下を模擬できる「地山劣化モデル²⁾」を用い、有限差分法により実施した。地山劣化モデルは、地山を模擬した各要素の強度定数および変形係数を逐次低下させることで、地山の経時劣化に伴う地中応力の再配分および変形挙動を表現するものである。本検討では、地山を Mohr-Coulomb の破壊基準に従う弾完全塑性体と仮定して解析を行った。

地山劣化モデルを用いたトンネル変状現象の再現を実施するにあたっては、1) 劣化前後における地盤物性値、2) 地山の力学特性の低下と時間との関係、3) トンネル周辺における地山の劣化範囲と主に3つのパラメータを定める必要がある。本検討では、この内、1) に関しては、地質調査にて実施した乾湿前後の三軸圧縮試験(UU)より設定し、2) は避難坑にて計測された盤ぶくれ変位量を再現し得る関数²⁾を設定した。その上で、3) は解析パラメータとして設定し、各パラメータにおける解析結果と実測値との対比を行う。これらの結果から、大タ張トンネルにて発生したトンネル変状現象の考察を試みた。

5.2 スレーキングによる力学特性の低下を考慮した地盤物性値の設定

地山劣化モデルによる解析シミュレーションでは、スレーキングの進行による強度低下を模擬するため、劣化前後における強度・変形係数を把握する必要がある。そこで、本検討では、変状区間の三軸圧縮試験(UU)は、「採取直後」と、「24時間水浸飽和後、24時間炉乾燥させてスレーキングを促進させた後」の2段階で実施し、劣化後の強度変化を把握した。また、三軸試験の载荷条件はひずみ制御とし、ピーク強度と残留強度の双方を算

出した。表-1 に三軸圧縮試験(UU)から得られた岩盤強度値を示す。表には各区間別にピーク強度・残留強度を整理している。変状区間の強度は「採取直後」と「24時間水浸、炉乾燥後」とで大きく低下しており、これはスレーキングによる強度低下を模擬したものである。

解析に用いる地盤物性値を表-2 にまとめる。スレーキングが生じる前段階の初期強度は、三軸圧縮試験における乾湿前のピーク強度を用いることとし、室内試験と原位置試験比、つまり三軸圧縮試験における変形係数と孔内水平載荷試験における変形係数の比からせん断強度Cを1/2に低減した。スレーキング後の残留強度は、乾湿後の残留強度を用いた。また、初期変形係数は建設時のトンネル坑内変位を再現し得る値を逆算により設定し、劣化後の変形係数は、三軸試験における乾湿前後の変形係数比から初期変形係数の1/20と設定した。

表-1 三軸圧縮試験(UU)から得られた岩盤強度

対象区間	試験条件	ピーク強度	残留強度
非変状区間 (No3)	健全状態 (乾湿前)	C=2,417kN/m ² Φ=34°	C=1,176kN/m ² Φ=28°
変状区間 (No6,8)	健全状態 (乾湿前)	C=3,399kN/m ² Φ=37°	C=1,298kN/m ² Φ=36°
	劣化状態 (乾湿後)	C=913kN/m ² Φ=17°	C=660kN/m ² Φ=13°

表-2 解析用地盤物性値一覧

項目		記号	単位	数値	備考
単位体積重量		γ_t	kN/m ³	24.0	密度試験
ポアソン比		ν	—	0.35	一般値
ダイレーション角		ψ	°	18	$\Phi_0/2$
初期値 (劣化前)	せん断強度	C ₀	kN/m ²	1700	乾湿前の三軸試験 におけるピーク強度
	内部摩擦角	Φ_0	°	37	
	変形係数	D ₀	MPa	1000	建設時の再現解析
残留値 (劣化後)	せん断強度	C _d	kN/m ²	660	乾湿後の三軸試験 における残留強度
	内部摩擦角	Φ_d	°	13	
	変形係数	D _d	MPa	50	D ₀ /20

5.3 地山劣化曲線の設定

大タ張トンネル避難坑にて計測された盤ぶくれ変位は、地山の劣化が開始してから現在までの総変位量ではなく、床版コンクリートの変状が確認されてから発生した増分の変位量(平成24年3月～平成25年7月までの1年4ヵ月間および平成25年10月～現在)である。そのため、この増分変位量を再現するためには、地山の強度低下に時間の概念を組み込む必要がある。本検討では、地山の強度低下と時間との関係を地山劣化曲線と呼ぶ関数で定義した。地山劣化曲線には、計測された盤ぶくれ変位の経時変化を最も適切に再現できる対数型²⁾の曲線を採用した。図-7には再現解析によって決定した地山劣化曲線および避難坑底盤変位の経時変化図を示しており、大タ張トンネルにて計測された底盤変位を概ね表現できていることがわかる。

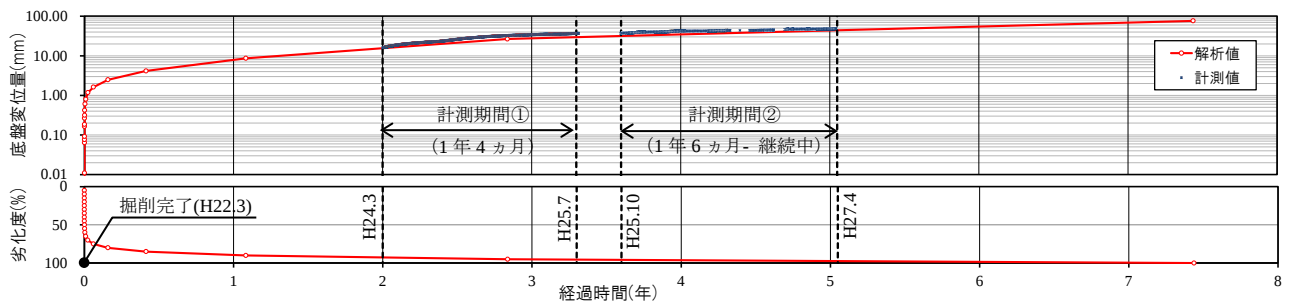


図-7 地山劣化曲線と避難坑底盤変位の経時変化図

表-3 劣化領域の設定に応じた解析結果一覧

	劣化領域①：モデル全域	劣化領域②：1D(=掘削径)	劣化領域③：底盤部 1D
劣化領域図			
塑性領域図 (計測期間①)			
避難坑	内空変位 解析：28mm (実測：2mm) 底盤変位 解析：14mm (実測：12mm)	内空変位 解析：27mm (実測：2mm) 底盤変位 解析：14mm (実測：12mm)	内空変位 解析：1mm (実測：2mm) 底盤変位 解析：14mm (実測：12mm)
本坑	底盤変位 解析：3mm (実測：0mm)	底盤変位 解析：3mm (実測：0mm)	底盤変位 解析：3mm (実測：0mm)

5.4 トンネル挙動に関する考察

表-3 に劣化領域の設定に応じた解析結果の一覧を示す。劣化領域は、トンネル周囲全域、掘削影響領域の1D(=掘削径)および底盤部のみとした場合を仮定した。また、表には平成24年3月から平成25年7月までの計測期間①における塑性領域図(解析値)および平成25年10月から平成27年4月までの計測期間②の増分変位量(実測値と解析値)を示した。シミュレーション解析と実測値を対比した結果、以下の傾向が確認された。

- 1) 計測期間①における避難坑底盤部の塑性領域は3～4mとなり、計測により確認された変位発生領域や調査により確認された破砕部と概ね一致する。
- 2) 劣化領域をトンネル周囲全体の領域とした場合(劣化領域①、②)には、解析から得られる内空変位が実測値を大きく上回り、底盤部のみを劣化領域とした場合(劣化領域③)に最も実測値と整合する。このことから、スレーキングの進行が顕著なのは底盤部の地山のみであり、側壁部やアーチ部周辺の地山は、底盤部と比較してスレーキングの進行度が低いものと推察される。
- 3) 避難坑と本坑の周辺地山が同一速度で劣化すると仮定した場合、解析から得られる本坑底盤変位は実測値を上回る。このことから、本坑周辺の地山はスレーキングの進行度が低いものと推察される。

前述の2)、3)に示すように、避難坑底盤部のみで盤ぶくれ変位が発生し、避難坑アーチ部や本坑において変位が発生していない点については、シミュレーション解

析にて考慮可能な断面形状や支保・覆工等の構造条件では説明できない。したがって、この現象はトンネル掘削施工中からの底盤部への水分供給量や亀裂の開口状況の差異、すなわち、環境条件によってスレーキングの進行度が異なることに起因しているものと推察される。

6. あとがき

本稿では大夕張トンネルにて確認された避難坑の盤ぶくれ変位現象を受け、地質調査および地山劣化モデルを用いた解析シミュレーションの観点から、その挙動について考察を試みた。その結果、この変位現象はスレーキングを素因とし、環境条件の違いに応じて変位の進行に差異があるものと推察された。

調査と地山劣化モデルを組み合わせた本手法は、スレーキング等の地山の強度劣化に起因するマクロなトンネル挙動を評価する上では非常に有効であると考えている。今後は、避難坑および供用中の本坑における挙動を継続して監視するとともに、本手法により本坑の将来予測が可能となるよう評価を継続していきたい。

参考文献

- 1) 加藤他：道東自動車道 大夕張トンネル避難坑の変状対策の中間報告、第50回地盤工学研究発表会
- 2) 野城他：地山劣化モデルによるトンネル変位の再現解析とその長期予測への適用、土木学会論文集、Vol.65 No.1, P107-119, 2009.2