

P25 トンネル（避難坑）の変状特性の調査と評価

山本哲人(日本道路公団 佐久管理事務所), ○加登住誠, 井上隆, 松田義則, 鷺見浩司(八千代エンジニアリング株)

1. はじめに

現在供用中止となっている避難坑で、盤膨れや吹付けコンクリートの崩落・土砂化が確認されていた。これらの変状が本坑の安定性に影響を及ぼす可能性が懸念された。

避難坑で発生した変状特性（特に発生機構と進行速度）を明らかにし、今後の対応方針を検討したことを報告する。

2. トンネル概況

調査対象は、上信越自動車道の群馬県と長野県の県境に位置する八風山トンネルⅠ期線避難坑(以後単に避難坑と呼ぶ)。

避難坑とⅠ期線本坑（平成4年完成）、Ⅱ期線本坑（平成11年完成）の位置関係を図-1に示す。Ⅰ期線本坑は避難坑に並走し離隔は約30mである。Ⅱ期線本坑は避難坑の下位に位置する。起点側では最大で8Dの離隔があるが、終点側に向かってその離隔は徐々に小さくなり起点側の坑口から約4.0kmの地点で避難坑と交差する。トンネル径は避難坑が4m、本坑が10mである。

調査対象区間は避難坑の起点側坑口 Sta581+86～発砲モルタルによる閉塞開始地点 Sta615+60(約3.4km)で、避難坑の底盤の標高は900～925mである。

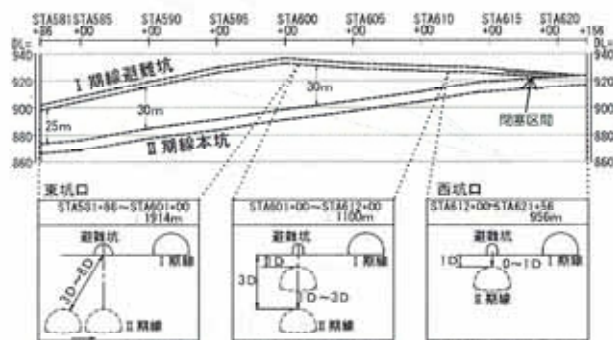


図-1 避難坑と本坑の位置関係

3. 地形・地質概要

八風山トンネルは群馬県と長野県の県境に位置する八風山（標高1,475m）を貫く山岳トンネルである。

八風山は標高1,000～1,500mの山々から構成される、“妙義-荒船山地”の北端に位置し、急峻な山岳地形をなす。

八風山トンネルは主に新第三紀の本宿層に相当する凝灰岩類と溶岩類から構成される。一部に井戸沢層に対比される凝灰岩や凝灰質砂岩・泥岩互層が分布する。

本宿層は構造性の凹地（本宿堆積盆地¹⁾）を埋積し、その後大規模な火山活動に伴う熱水変質を受けている。

4. 変状の概況

避難坑で確認される変状は、底盤コンクリートが隆起する盤膨れと、側壁や天端吹付けコンクリートの崩落や土砂化が確認された。

以下にそれらの概況と湧水状況を整理する。

1) 盤膨れ

・盤膨れによる底盤の隆起高さが10cm以上確認される区間は5区間（1つの区間の長さは20～40m）あり、総延長140mで、調査対象区間の約4%である（区間最小単位は20m）。

・隆起高さが10cm以下の区間も含め盤膨れが目視で確認される区間は480m（10cm以下の区間340m）で、調査対象区間の約15%である。



写真-1 盤膨れの状況。トンネル底盤で約20cmの隆起が確認される。

2) 吹付けコンクリートの崩落・土砂化

・崩落や土砂化は調査区間全域に点在している。

・崩落や土砂化が確認される区間の総延長は660mで、調査対象区間長（3,234m）の約20%に及ぶ。

・吹付けコンクリートが崩落・土砂化した箇所の地山は黄褐色～赤褐色を呈している。また、平成11年3月に施工した補修金網には腐食（錆）が進み破れている箇所もある。

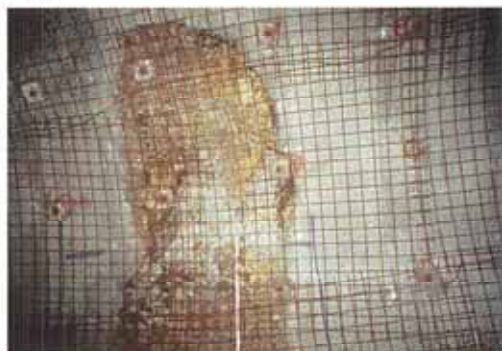


写真-2 吹付けコンクリートの崩落・土砂化の状況。

3) 湧水 (滴水)

- ・滴水程度の湧水のみが確認される。
- ・滴水沿いにはコンクリートが溶脱している (写真-3)。
- ・滴水により路盤コンクリートが溶けている箇所がある。
- ・変状箇所と滴水箇所の関係はほとんどない。

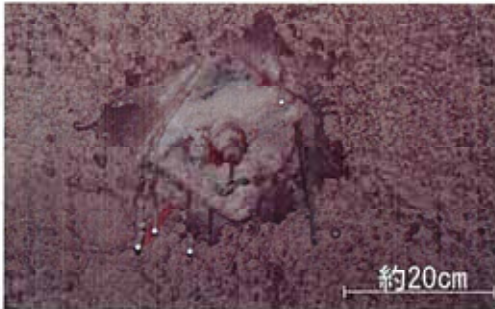


写真-3 ロックボルトからの滴水。周辺のコンクリートが溶脱。滴水沿いにつら石が形成される。

5. 調査方法

変状特性を把握することを目的に、以下の調査を実施した。

まず、調査から施工、維持管理段階までの各種データを収集、整理した。整理した項目は、地質調査データや、施工時の支保パターン、内空変位・天端沈下量測定結果、補強対策箇所、維持管理段階での補修工事履歴である。

次に現地調査として、坑内弾性波探査、ボーリング調査、地中変位計観測等を実施した。

室内試験は、X線回折、一般項目 (比重・吸水、岩のpH、中性化、一軸圧縮、超音波伝播速度)、コンクリート吹付のEPMA面分析、EDS分析を実施した。

6. 調査結果

1) 既往資料の整理

施工時の内空変位と変状箇所の関係は次に示す傾向が確認された。

(1) 盤膨れ

- ・内空変位が20mm以上の箇所が発生している傾向がある。
- ・但し、内空変位が20mm以上であっても、支保パターンDで施工されている場合は発生していない。

(2) 吹付けコンクリートの崩落・土砂化

- ・内空変位と変状箇所の関係はほとんどない。

2) 現地調査

(1) 弾性波探査

- ・掘削または変状の影響による底盤直下の緩みゾーンとして、P波速度2.5km/s以下の速度層が厚さ1~7m (1.8D以下) 確認された。
- ・盤膨れ箇所では底盤直下の緩みゾーンのP波速度は1.8km/sより小さく、盤膨れしていない箇所に比べ低い値である。
- ・基盤岩のP波速度は盤膨れ箇所が3.0~4.0km/s、盤膨

れしていない箇所は4.7~5.4km/sと、盤膨れしていない箇所は相対的に低い値を示す。

(2) ボーリング調査

- ・いずれの岩種も全体に熱水変質を被っている。
- ・盤膨れ箇所の地山は凝灰角礫岩 (一部に砂岩・泥岩互層)、安山岩で構成され、何れも熱水変質を強く受け軟質化している (強変質)。
- ・盤膨れのない箇所の地山は、凝灰角礫岩、安山岩、斑岩で、熱水変質の影響は弱く岩片の軟質化はほとんど認められない (弱変質主体)。
- ・肉眼で確認される酸化の下端深度 (酸化フロント²⁾) は抗壁からの深度10~50cmである。

(3) 地中変位計観測 (H14.12.27~H16.3.17: 422日間)

- 以下に盤膨れが最も顕著な箇所の観測結果を整理する。
- ・約4.5mm/100日を越える地中変位が確認され、収束傾向はない。(図-2)。
- ・m当りの区間歪の最大値は0.7%で、その位置は坑壁から深度2.5~3.5m区間にある(図-3)。
- ・最大で坑壁から4m地点 (3~4m区間) の地山まで変状が及んでいる(図-4)。
- ・地山側へ変状が波及しているが、その速度は極めて小さい(図-4)。

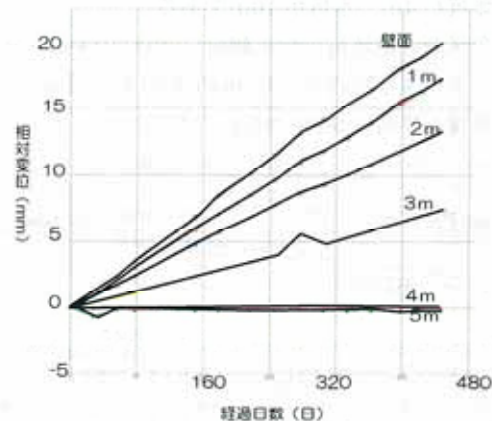


図-2 m毎の相対変位量

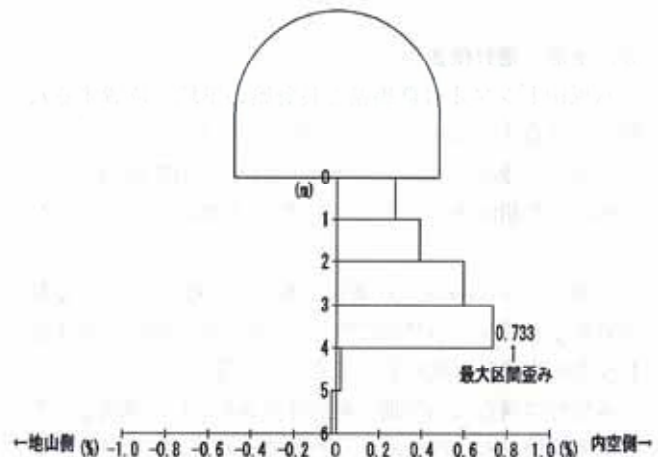


図-3 m毎の区間歪み

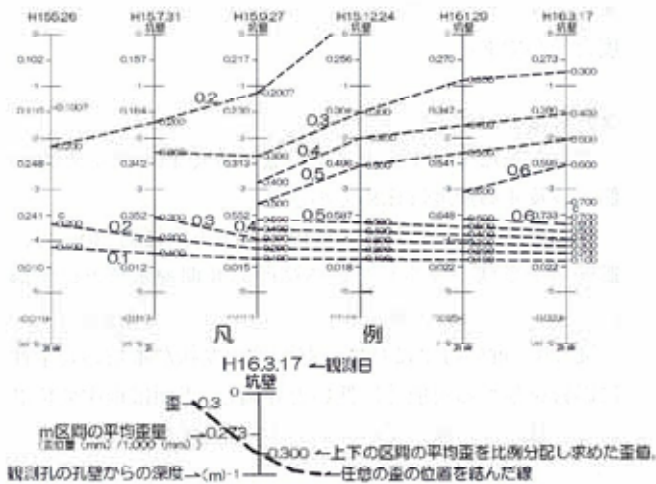


図-4 区間歪みの経時変化(地中変位計観測結果)

3) 室内試験

(1) X線回折結果

粘土鉱物の同定を目的にX線回折を実施した。岩種別のX線回折結果を表-1に示す。

いずれの岩種にも熱水変質鉱物が確認される。但し、土砂化や褐色化した箇所では、黄鉄鉱は確認されず、ジャロサイトが確認される。

表-1 岩種別の構成鉱物

岩種名	主な鉱物(X線回折結果) *相対的量の多い順より記載
凝灰角礫岩	石英、雲母/スメクタイト混合層鉱物(熱水変質脈沿いに多い)、Al緑泥石、方解石、斜長石、黄鉄鉱、雲母鉱物、カオリン
砂岩・泥岩互層	石英、スメクタイト、Al緑泥石、斜長石、黄鉄鉱、雲母鉱物、雲母/スメクタイト混合層鉱物
安山岩(デイサイト)	石英、スメクタイト、パイロフィライト、Al緑泥石、黄鉄鉱、カオリン、雲母鉱物、雲母/スメクタイト混合層鉱物
斑岩	石英、斜長石、方解石、雲母/スメクタイト混合層鉱物、黄鉄鉱(熱水変質脈沿いに多い)、カオリン
土砂化・褐色化した箇所	石英、石膏、スメクタイト、雲母/スメクタイト混合層鉱物、ジャロサイト、斜長石、Al緑泥石、斜長石、カオリン

(2) 中性化試験・岩のpH試験

ここでは室内試験の一般項目のなかで、中性化試験と岩のpH試験結果について整理する。

① 中性化試験

盤膨れとコンクリートの崩落が確認される箇所で、コンクリートの中性化試験を実施し、内空側で2cm、地山側で5cmの中性化を確認した。



写真-4 中性化試験結果

② 岩のpH試験

盤膨れ、コンクリート吹付の変状が確認される箇所において岩のpH試験を実施した。試験結果を表-2に示す。

変状が確認される箇所の地山は弱酸性～酸性で、吹付けコンクリートが土砂化する箇所の地山は、pH3.25～4.04とより酸性値を示す。

表-2 岩のpH試験結果

変状	岩のpH試験
盤膨れ	3.69～6.78
吹付けコンクリートの崩落・土砂化	3.25～4.04

(2) EPMA面分析、EDS分析研磨

吹付けコンクリートが崩落している箇所近傍のコンクリートに対し、カルシウム(Ca)、アルミニウム(Al)、硫黄(S)のEPMA面分析とEDS分析を実施した。

写真-5に分析試料の写真と、硫黄の面分析結果、EDS分析測定点を、表-3にEDS分析結果を示す。

ここでは、硫黄分の分析結果についてのみ述べる。

分析試料の写真に示すマイクロクラック沿いと、地山との接触面はSO₂が欠如している。一方、マイクロクラック沿いでSO₂が欠如する縁辺では6.4wt%と、普通セメントの一般的値1～2wt%より高い値を示している。

これは、マイクロクラック沿いに酸性水が侵入し、SO₂を移動させていることに起因する。

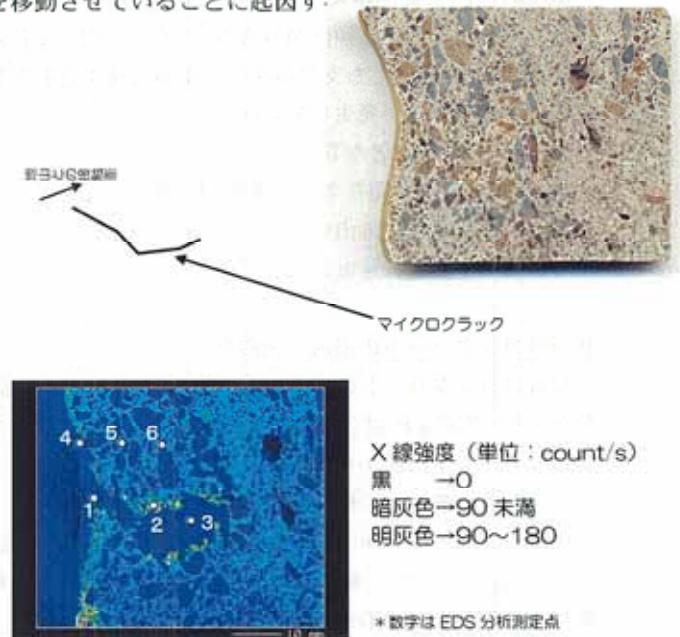


写真-5 EPMA面分析試料(上)と硫黄のEPMA面分析結果とEDS分析測定点(下)。

表-3 EDS分析測定結果一覧

分析測定点	SO ₂ (wt%)	Al ₂ O ₃ (wt%)	CaO(wt%)
1	0.0	13.1	38.1
2	6.4	11.7	43.6
3	0.0	13.7	40.2
4	0.0	12.0	40.7
5	2.1	10.0	48.6
6	1.8	10.1	46.4

7. 評価

1) 地山特性と変状特性

(1) 地山特性

新第三紀中新世の本宿層に対比される、凝灰角礫岩、砂岩・泥岩互層、安山岩（デイサイト含む）、斑岩が分布する。いずれの岩種も全体に熱水変質を被る。

熱水変質により生成された鉱物として、Al 緑泥石や、カオリン、スメクタイト、スメクタイト/雲母鉱物混合層、黄鉄鉱が識別される。これらの鉱物組成より熱水の温度は150～250°で、酸性～中性の熱水であったと考えられる。

(2) 変状特性

盤膨れ

盤膨れの主要因は、膨潤性鉱物であるスメクタイト、雲母/スメクタイト混合層鉱物が結晶格子間に水を含んで膨張したためと判断される。また、地山に普遍的に存在する黄鉄鉱が地下水（酸性水）、空気と反応することにより硫酸塩鉱物である石膏が生成されることも盤膨れの発生要因の一つと考えられる^{2), 3), 4)}。

盤膨れは斑岩を除く凝灰角礫岩、砂岩・泥岩互層、安山岩の軟質化した強変質部で発生している。このことから、盤膨れは岩種よりも熱水変質の影響度—熱水変質を被った時点での透水性の違い—に強く規制されていると考えられる。

施工時の内空変位の大きい箇所（20mm以上）では、盤膨れが発生している傾向がみられる。但し、内空変位が20mm以上であっても支保パターンがDで施工されている箇所では盤膨れが発生していない。

最も盤膨れが顕著な箇所の底盤の盛り上がり速度は4.5mm/100日、現在でも収束傾向はみられない。変状は時間の経過と共に地山側へ波及（最大で坑壁から4m）、しているがその進行速度は極めて小さい。

吹付けコンクリートの崩落・土砂化

吹付けコンクリートの崩落箇所の地山は黄褐色～赤褐色を呈し、岩のpHは3～4と酸性である。また、吹付けコンクリートが地山側から中性化していることと、吹付けコンクリートへの酸性水の侵入が確認された。

吹付けコンクリートが土砂化した箇所の地山では黄鉄鉱がほとんど見られず、黄鉄鉱と水、空気の反応によって形成される硫酸塩鉱物のジャロサイトが確認される。

従って、コンクリートの崩落・土砂化は、地山の黄鉄鉱と地下水（酸性水）、空気が反応することで硫酸が生成し、この硫酸がコンクリートを化学的に腐食^{5), 6)}させているためと判断される。

地山には普遍的に黄鉄鉱が存在し、地下水と空気が触れる条件が揃えば硫酸の生成が始まるため、崩落箇所が坑内に点在していると考えられる。また、このような化学反応による変状であるため、施工中の内空変位が小さい箇所であっても変状が発生していると考えられる。

硫酸が生成される深度（空気が到達している深度）は酸

化フロントまでと考えられ、それは調査時点では50cm程度と僅かである。

2) 今後の対応方針

変状が及んでいる範囲は現時点で最大4mであり、地山側へ波及する速度は極めて小さい。

避難坑とⅠ期線本坑との離隔は水平方向に約30mで、避難坑で変状が発生している箇所のⅡ期線本坑との離隔は鉛直方向に25～30mであり、ずれも十分な離隔がある。

従って、近い将来に亘って避難坑の変状が本坑の安全性に影響を与える可能性は低いと評価し、当面は地中変位計による計測と目視による点検により、対応することとした。

8. おわりに

Ⅰ期線本坑では避難坑と同様に盤膨れが発生（平成14年度にインパート設置）していたが、覆工コンクリートの崩落は全く確認されていない。これは、本坑では防水シートが施工されており地山が空気と触れず、硫酸が生成される環境にないためと考えられる。

本調査結果より、熱水変質を受けた地山の設計・施工時の留意点を次に整理する。

- ・熱水変質により軟質化した地山で内空変位が大きい（本避難坑の径と同等の場合は20mm以上を目安）箇所では、盤膨れが発生する危険がある。そのため、施工時には計測結果と併せて地山の状況を適切に評価し、必要に応じて支保パターンやインパートの設置を検討することが肝要である。
- ・黄鉄鉱が存在する地山では避難坑や連絡坑でも、防水シートの施工を検討する必要がある。

- 1) 日本の地質「中部地方Ⅰ、Ⅱ」編集委員会；中部地方Ⅰ、1988
- 2) 落合ほか他；硫酸イオンを含む地盤における住宅基礎、土と基礎 34-6 1986
- 3) 大山他；泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ、応用地質 第39巻第3号 1998
- 4) 陽田；新第三紀泥岩の生化学的風化現象と被害 土木学会論文集 No. 617/Ⅲ-46 199
- 5) 岸谷ほか；コンクリート構造物の耐久性シリーズ、化学的腐食 1986
- 6) 日本下水道事業団センター；下水道構造部に対するコンクリート腐食技術及び防食技術の評価に関する報告書 2001