

複雑な岩相変化とラムサール条約登録湿地に 配慮したウォータータイトトンネルの施工

秋葉 芳之¹・柏木 亮²・湊 敦之³・石田 豪史⁴

¹正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社 敦賀鉄道建設所
(〒914-0055 福井県敦賀市鉄輪町一丁目3番26号)

E-mail: akiba.yos-2g8k@jrtr.go.jp

²正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社 敦賀鉄道建設所
(〒914-0055 福井県敦賀市鉄輪町一丁目3番26号)

E-mail: kashiwagi.ryo-p55b@jrtr.go.jp

³独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社 工事第四部 工事第七課
(〒532-0003 大阪府大阪市淀川区三丁目5-36 新大阪トラストタワー)

E-mail: minato.ats-t45k@jrtr.go.jp

⁴三井住友・極東興和・道端北陸新幹線、深山トンネル他特定建設工事共同企業体
(〒914-0016 福井県敦賀市余座4-12)

E-mail: TakeshiIshida@smcon.co.jp

北陸新幹線（金沢・敦賀間）の深山トンネルは、ラムサール条約に登録された中池見湿地付近に位置することから、周辺環境に一層の配慮が求められた。掘削に際しては、地層の傾斜が急傾斜、且つ、混在岩が互層状になっていることから、岩相が安定せず、小規模な破碎帯が繰り返し現れ、トンネル全線で切羽の不安定化が懸念されていた。これらの課題を踏まえ、中池見湿地等の周辺環境に配慮するため、ルート変更やウォータータイト構造の採用等について検討を行った。また切羽天端の不安定化については、長尺フォアパイリングの規格を段階的に変更することにより、安全且つ経済的に施工を行った。

Key Words: Ramsar convention, watertight tunnel, heavy metals, change of lithofacies, fore-piling method

1. はじめに

北陸新幹線は東京都を起点とし、長野市付近、富山市付近、小浜市付近を経由して大阪市に至る路線で、1997（平成9）年10月に高崎・長野間の約117kmが長野五輪にあわせて開業し、2015（平成27）年3月に長野・金沢間の約228kmが開業した。現在建設中の北陸新幹線（金沢・敦賀間）については、2012（平成24）年6月に国土交通大臣より工事実施計画（その1）認可を受け、2017（平成29）年10月に軌道・建築・電気・機械などの開業設備工事に係る工事実施計画（その2）認可を受けており、建設工事が進められているところである。

北陸新幹線（金沢・敦賀間）の工事区間は白山総合車両所（石川県白山市）から敦賀駅（福井県敦賀市）までである。工事延長は約115kmであり、内訳は、路盤約1.6km（約1%）、橋梁約15.5km（約14%）、高架橋約59.1km（約52%）、トンネル約38.4km（約33%）となっ

ている。深山トンネルは敦賀駅の起点方約2km付近に位置する山岳トンネルである。また、2012（平成24）年7月にラムサール条約に登録された中池見湿地付近を通過する計画になっている。本稿では、深山トンネルの施工において実施した、ラムサール条約登録湿地への配慮事項及びトンネル施工結果について報告する。

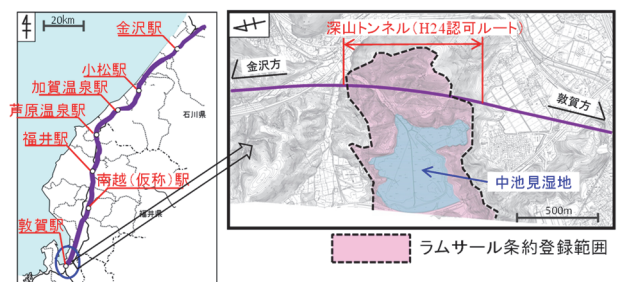


図-1 深山トンネル位置図

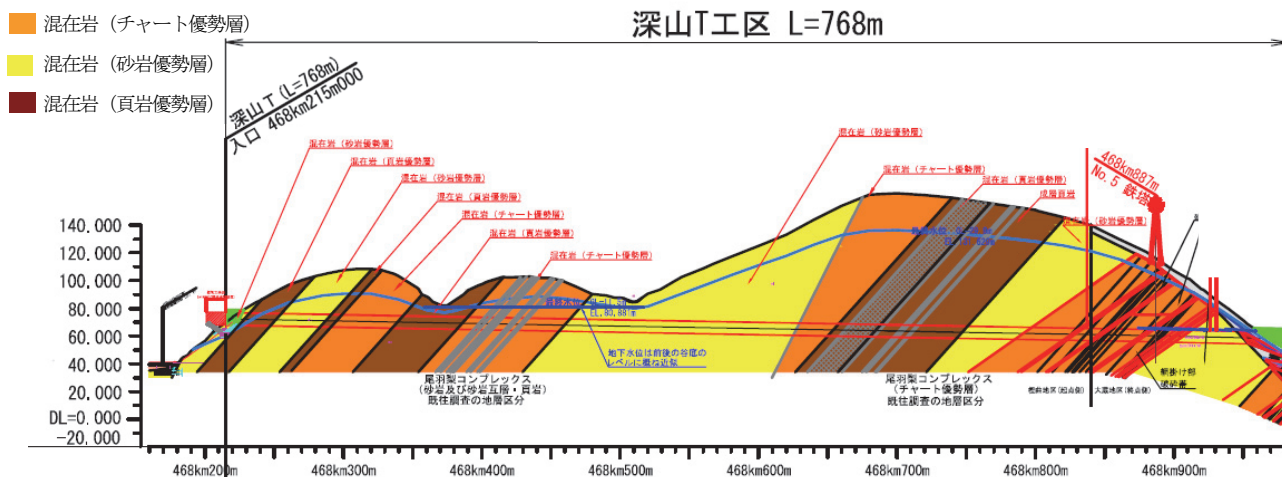


図-2 深山トンネル地質縦断面図

2. 工事概要

(1) 深山トンネルの工事概要

深山トンネル工事は、敦賀市に位置する全長 768m の山岳トンネルであり、敦賀方から金沢方にむけて NATM により、上り勾配 (18‰) で掘削している。

(2) 深山トンネルの地形・地質概要

本トンネルの地形は、敦賀平野の北東端に位置し低平な低地と丘陵が分布する。低地部は掌状の平面形状を示す埋積谷である余座池見と呼ばれる湿地帯に相当する。この埋積谷は、袋状となった谷に泥炭が堆積してでき上がった「袋状埋積谷」という独特の地形が大きな特徴で、湿原中央部には、ほぼ連続した泥炭層が地下約 40m に及び堆積している。周辺では、この他に中池見、内池見の袋状埋積谷が南北に配列し、これらは敦賀断層や敦賀方トンネル坑口付近に分布する池見断層等の活断層に並行した分布を示している¹⁾。

地質は、美濃・丹波帯堆積岩コンプレックスの尾羽梨コンプレックスに該当し、トンネル全体としては砂岩優勢層、頁岩優勢層（一部、成層頁岩）、チャート優勢層に大きく区分され、互層状に分布している。地層の傾斜方向は、比較的急勾配で北側（金沢方）に傾斜する状況にある（図-2）。

(3) 深山トンネルの周辺環境（中池見湿地）について

トンネル施工箇所付近にある中池見湿地は敦賀市のほぼ中央にあり、周辺を天筒山、中山、深山の三山に囲まれた低層湿原である。過去の活発な断層運動と地殻変動により水系がせき止められ、できあがった「袋状埋積谷」があり、2012（平成 24）年 7 月 3 日にラムサール条約に登録され、国際的にも重要な湿地に位置付けられている。なお、現在同条約においては、生活を支える重要な生態系として幅広く湿地の保全・再生を呼びかけるとともに、

ワイズユースが提唱されている。中池見湿地は、新田開発により、多様な水辺環境がつけられ、多様な植物相や動物相を育んでいる。

また、「中池見 人と自然のふれあいの里」として活用されており、市民向けの観察会などが実施されている。湿地の保全としては、地元の環境保全団体や敦賀市などが協働で維持管理をしており、外来種の侵入状況調査や駆除、水の流れをよくする作業などが行われている。

3. 課せられた課題

(1) 周辺水環境への影響

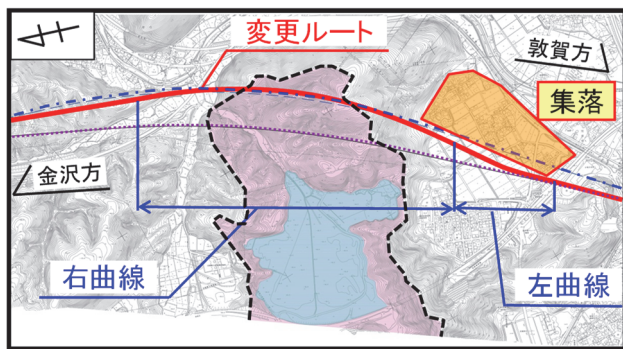
2012（平成 24）年 6 月に工事実施計画認可を受けた北陸新幹線（金沢・敦賀間）のルートは中池見湿地付近を通過することから、同年 7 月に中池見湿地がラムサール条約に登録されたこと等を踏まえ、トンネル工事が湿地に及ぼす影響が懸念された。

水環境については、深山の地下水位が最大でトンネル直上 60m 程度にあり、大きな逸水現象もなく山地内に豊富な地下水が保持されていると考えられ、トンネル坑内に地下水を引き込み、トンネル完成後の将来的な湿地の水環境等への影響の懸念から、引き込む地下水を極力低減させることが求められた。

(2) 複雑な岩相変化

トンネル全体の地質は混在岩で、掘削に際しては、地層の傾斜が急傾斜、且つ、混在岩が互層状になっていることから、岩相が安定せず、切羽の進行とともに変化に富み、小規模な破碎帯が繰り返して現れる状況であり、トンネル全線で切羽の不安定化が懸念されるなか、掘削作業の安全性と経済性を両立させた補助工法を選定する必要があった。

さらにトンネル掘削途中で実施した土壌調査において、



…… 認可ルート - - - アセスルート ■ ラムサール条約登録範囲

図-3 ルート変更平面図

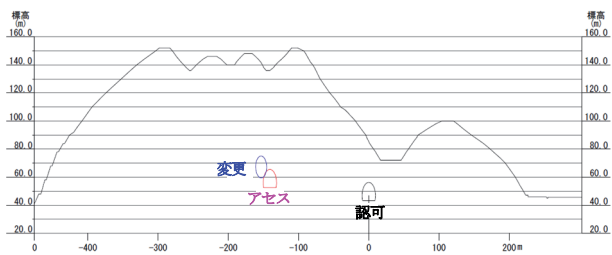
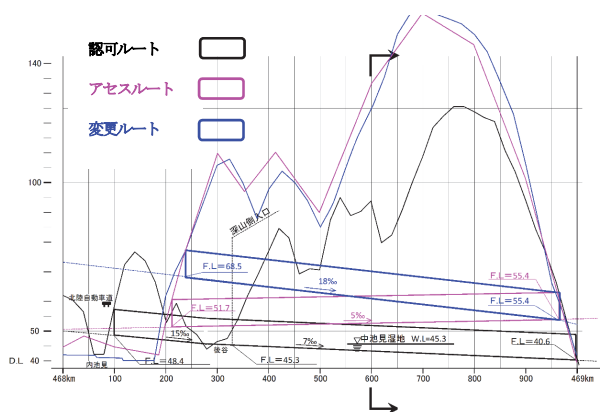


図-4 変更ルート縦断面図(上)、断面図(下)

一部区間で土壌汚染対策法の基準値を上回るヒ素が検出された。岩相が安定しない切羽においては、基準値超過の掘削土を適切に把握したうえで処理の必要があり、それに対して地元住民や自治体から不安の声が挙がり、適切且つ迅速な情報共有が求められた。

4. 中池見湿地へ配慮したルート選定と施工方法

(1) 深山トンネルのルート選定

中池見湿地がラムサール条約に登録されたこと等を踏まえ、国土交通省から工事实施計画の認可を受けたルート（以下、「認可ルート」という。）を採用した場合の影響の検証を目的として、2013（平成 25）年 11 月に動植物、水文関係の有識者で構成する「北陸新幹線、中池見湿地付近環境事後調査検討委員会」（以下「事後調査

検討委員会」という。）を設立し、2015（平成 27）年 3 月までに計 4 回の事後調査検討委員会を開催し、中池見湿地及び周辺環境に与える影響を極力回避できるルートについて検討した。

ルートについては、認可ルート及び 2002（平成 14）年の環境影響評価を実施した際に設定したルート（以下、「アセスルート」という。）の 2 つのルートで三次元浸透流解析により、湿地の水位、トンネルが通過する深山の地下水に与える影響等を検討した。検討の結果、アセスルートの方が影響をより小さくできることを確認し、第 4 回の事後調査検討委員会において、アセスルートに変更し、環境影響を回避、あるいは、より低減できるように配慮されることが望ましいとの提言を受けた。

提言を受け、アセスルートを基本とし、かつ、地域分断の問題点も回避するため、反向曲線を設置し集落の分断を避け、さらに、環境への影響をより低減できるよう、縦断線形を高くし、地下水位の低下をより抑えたルート（以下、「変更ルート」という。）を選定した、この変更ルートで 2015（平成 27）年 5 月に国土交通省より工事实施計画の変更認可を受け、中池見湿地への影響は一層軽減できるルートとなった（図-3、4）。

(2) フォローアップ委員会と環境管理計画

工事の実施にあたり、中池見湿地等の環境を保全し、新幹線事業を適切かつ円滑に実施していくため、工事による湿地付近への影響について、不測の事態や必要な対策等を審議し、工事による影響を適切に評価するべく、各分野の専門家で構成される「北陸新幹線、中池見湿地付近モニタリング等フォローアップ委員会」（以下、「フォローアップ委員会」という。）を 2016（平成 28）年 11 月に設立した。フォローアップ委員会において、ラムサール条約湿地に影響を及ぼす事業を行う場合は環境管理計画の策定を行うべきという意見を受け、策定にむけて具体的取組等の検討を行うこととなった。

北陸新幹線事業においては、ルート変更による環境影響への回避・低減を図ったが、環境管理計画を策定し、必要なモニタリング調査による影響の監視を継続するとともに、施工時の予防的措置や緊急対策を明確にし、必要な環境保全措置については、適切に実施することとした。以上により環境管理計画では、「中池見湿地に及ぼす環境影響の一層の回避・低減」を目的とし、それを達成するための基本方針と具体的取組を定めた。

モニタリング調査等は、フォローアップ委員会にて検討を行い、得られた意見を基に、追加保全対策を計画・実施することにより、事業へのフィードバックを行う。

モニタリング観測地点の選定について、流量観測地点は、湿地への水の流入、流出箇所、ホテル等の生物の生息箇所、水位観測地点は、トンネル周辺、湿地内水位



図-5 モニタリング観測地点図

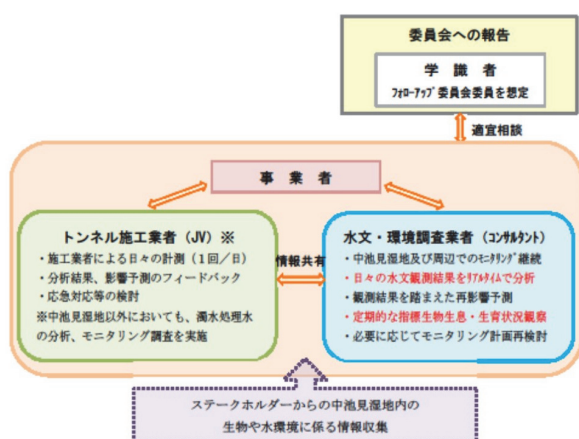


図-6 モニタリング管理体制イメージ図

を観測できる位置を選定し、トンネルの影響が把握できる体制とした。モニタリング観測地点を図-5に示す。

また、フォローアップ委員会の議事概要等はインターネットで公開し、地元 NPO 等のステークホルダーから意見を聴取し、その内容等について、フォローアップ委員会へ反映できる体制としている。

環境管理計画の目的達成にむけ策定した、主な具体的取組を下記に示す。

取組①【モニタリングの継続実施】

水文環境のモニタリング調査は、工事着手の約4年前から継続実施しており、トンネル掘削による影響への対応を行う。また、トンネル掘削の影響を即座に把握する必要があることから、変動が早期に現れると想定される地点の流量観測、水位観測については、自動転送装置を用いて、リアルタイムで観測できる体制とした。動植物に係るモニタリングとしては、元々実施していた猛禽類に係るモニタリングに加えて、中池見湿地の生態系を特徴づける指標生物を選定し、継続的なモニタリングを実施している。

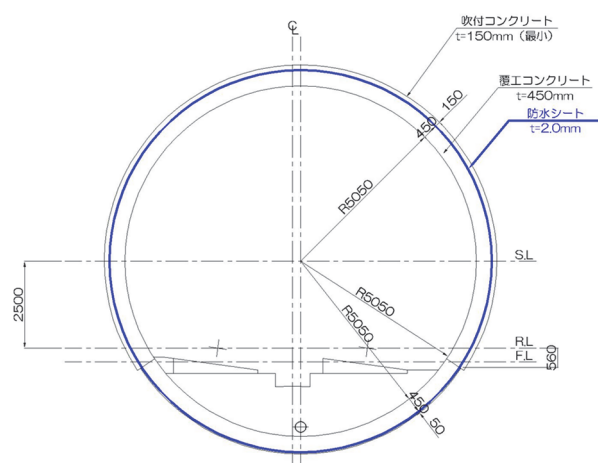


図-7 深山トンネルウォータータイト断面図

また、指標生物調査以外も、湿地の状況が見渡せる地点において定点観測を実施し、植生概況等を確認している。

さらに、トンネル掘削中は、日々巡回、主要地点の水位等計測を実施し、異常等があれば速やかに対応することとしている。

なお、調査において影響が懸念される場合は、適宜フォローアップ委員会で報告、審議し事業に反映する(図-6)。

モニタリング期間については、工事中は継続実施し、工事終了後も一定期間実施することを考えており、終了時期は今後の委員会で審議する予定である。

取組②【突発湧水に備えた先進調査ボーリングの実施】

トンネル区間において、必要に応じて、ボーリングによるコア採取を行い、地山情報、湧水の事前把握を行う。これにより、湧水帯を確認した場合には、減水対策等の実施を検討する。

取組③【ウォータータイトトンネルの採用】

施工中においては、トンネル湧水を濁水処理したのち放流するが、将来的な中池見湿地における水位低下等の環境への影響に対して、特段に配慮をする必要があることから、2016(平成28)年11月のフォローアップ委員会での審議を踏まえ、トンネル排水について、中池見湿地の水源の一つである深山付近から恒久的に地下水をトンネル内に引き込まないように、 $t=2.0\text{mm}$ の防止シートで全周を覆うウォータータイト構造とした(図-7)。

なお、ウォータータイト構造採用に伴う水圧への対策としては、山岳トンネルにおいて一般的な馬蹄形断面ではなく、トンネルの覆工厚の軽減が図られる円形断面とした。



写真-1 インバート防水シート施工状況

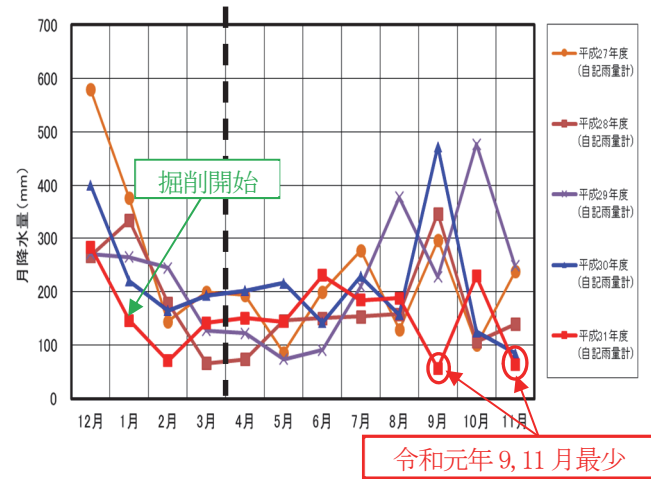


図-9 月別降水量

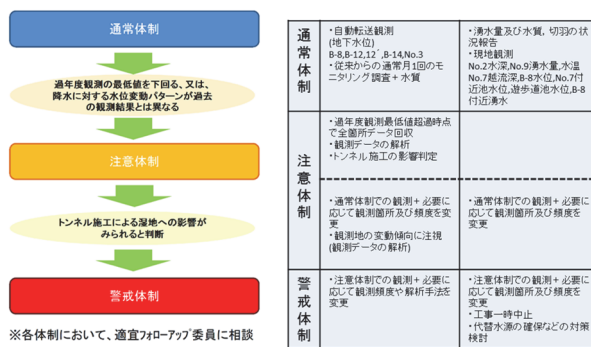


図-8 影響把握のための判定フロー

さらに 円形断面でのインバート施工に対応するため、シート張り足場を使用して施工した（写真-1）。

また、更になる対策として、防水シート外側と吹付面の間を走る湧水を止めるためのウォーターバリア、防水シート破損時の漏水対策となる化学接着性防水シートをそれぞれ採用して施工した（写真-1）。

取組④【トンネル掘削による影響への対応】

前述した水文環境のモニタリングの調査結果が、トンネル工事が原因で中池見湿地周辺に影響を与えるかどうか、影響把握のための判定フローに則り、調査を実施する。また、過年度観測データと比較し、トンネル掘削による影響の有無を判定し、中池見湿地の水位低下等の影響が疑われる場合においては、解析などを速やかに実施する（図-8）。

トンネル工事による中池見湿地の水位低下等の影響がみられた場合、速やかに代替水源確保による水位回復措置を講じることができるよう、下流域の流水利用を基本とした応急的な水位回復措置を検討する。この際、事前に水質分析を実施し、生態系に悪影響を及ぼす種の混入に留意した上で還流させる計画としている。

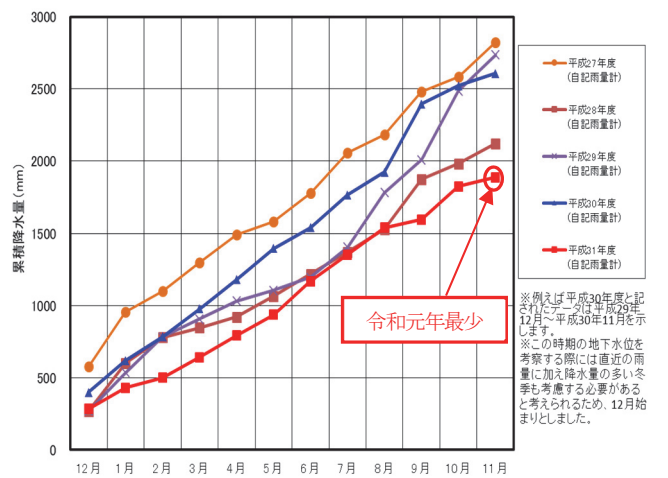


図-10 年別降水量

以上により、本工事においてはラムサール条約湿地内でのトンネル工事に際し、周辺環境に配慮した計画により工事を進めていくが、現場周辺において環境の変化等が生じた際は、フォローアップ委員会及びステークホルダーに適宜相談し計画の変更に柔軟に対応していくこととした。

(3) トンネル周辺環境のモニタリング調査

深山トンネルの施工による周辺水環境への影響を把握するため、深山および中池見湿地とその周辺の降水量や地下水位、流量等のモニタリングを実施している。

各観測箇所において、深山トンネルの掘削前と掘削後の地下水位を比較すると、概ね全ての観測箇所でも水位が低下している。但し、中池見湿地の降水量は2014（平成26）年より観測しており、2019（令和元）年度の降水量が観測史上最少の降水量となっているため、それも要因の一つであると考えられる（図-9、図-10）。

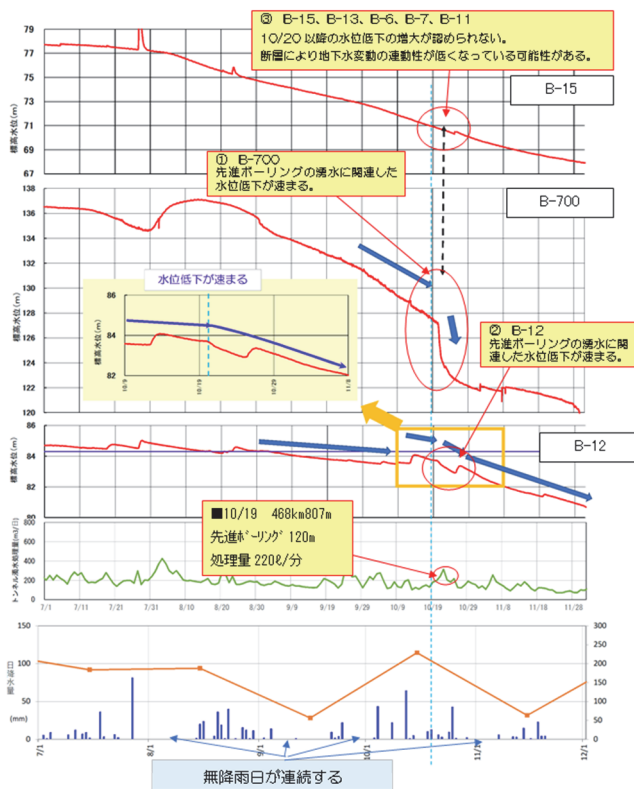


図-11 水位観測結果 (B-15,B-700,B-12)

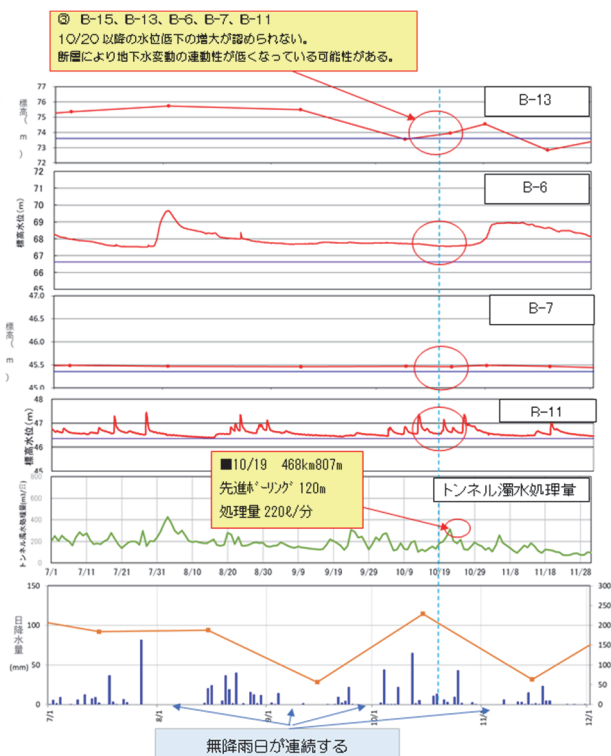


図-12 水位観測結果 (B-13,B-6,B-7,B-11)

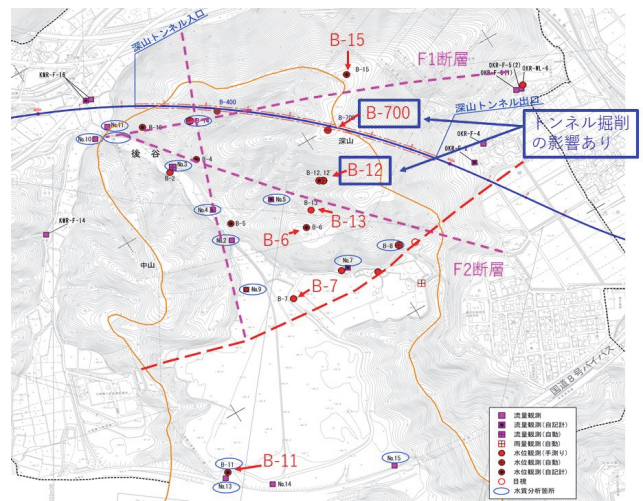


図-13 断層分布及び観測箇所的位置平面図

2019（令和元）年10月20日、先進ボーリング（180L/分）を実施したところ、トンネル直上のB-700の水位低下が速まった。それと同時にB-12において地下水位の低下が速まった。これについてはトンネルの影響により水位低下したものと考えられる。しかし、同じく近傍のB-15やB-13等の観測箇所では水位低下の確認されなかった。

地下水位が低下した観測箇所は、概ねF1断層とF2断層に挟まれた範囲にあることから、断層により水の流れが分断されているものと考えられる（図-11、12、13）。

上記のように、トンネル掘削に伴い深山の地下水位は低下しているものの、湿地への直接的な影響は現時点では確認されていない。但し、2019（令和元）年の降雨量が観測史上最低だったことも含め、引き続きモニタリング結果を注視する必要がある。また、動植物のモニタリング結果についても、併せて注視していく。

5. 掘削補助工法と重金属対策

(1) 長尺フォアパイリング

既往の調査より、深山トンネルは全線に渡り複雑な岩相変化や小規模な破碎帯の出現等が想定されていたため、切羽前方の地質を把握するために先進調査ボーリング及び削孔検層を全線で実施している。その結果より、補助工法等を選定して掘削を進めた。特に懸念された切羽天端の不安定化に対しては、長尺フォアパイリングの鋼管径（φ76.3、φ114.3）、改良径（φ400、φ450、φ600）、打設範囲（90°、120°）、注入材（ウレタン、シリカレジン、水発泡ウレタン）等について、それぞれの地質に対する効果やコスト等を組み合わせて検討し、段階的に変更することとした。

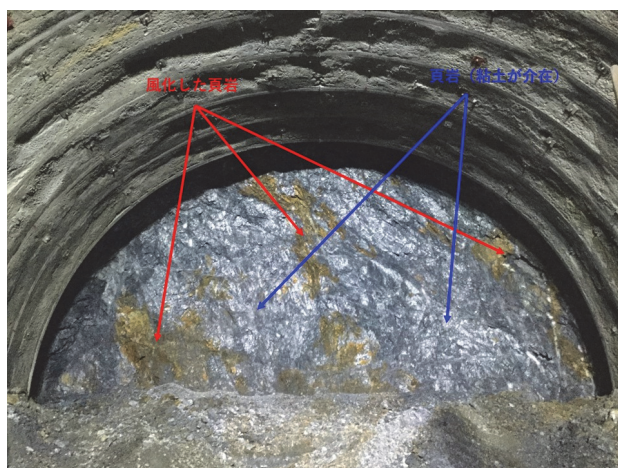


写真-2 切羽写真 (高崎駅起点 468km680m 付近)

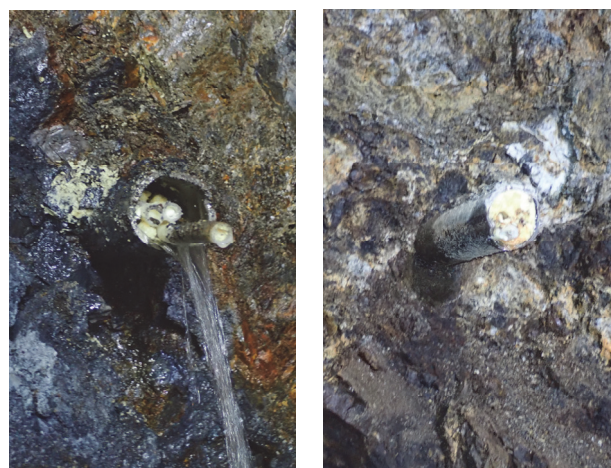


写真-3 湧水箇所における改良効果確認
(左: シリカレジン, 右: 水発泡ウレタン)

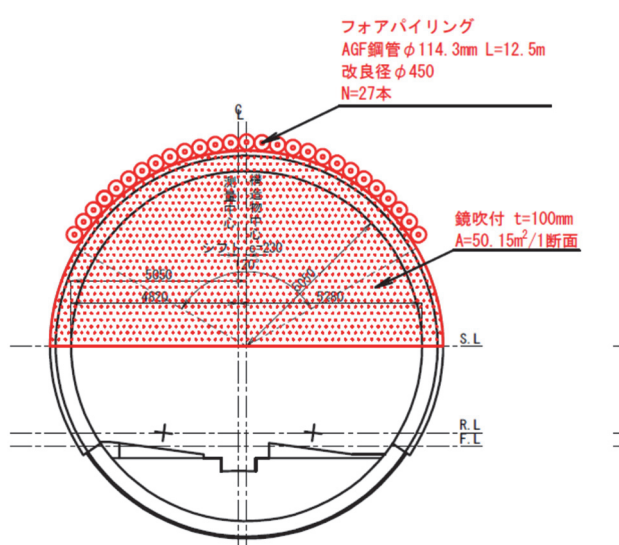


図-14 深山トンネル断面図 (補助工法)

長尺フォアパイリングについては、既往の地質調査結果より検討した「鋼管径φ114.3, 改良径φ450, 打設範囲120°, シリカレジン」(図-14)を基本として、先進調査ボーリング及び削孔検層の結果や切羽の地質や湧水状況に応じて、段階的に変更した。また、湧水が多い箇所については、シリカレジンであると十分に発砲しないまま流出してしまい、改良効果が得られないため、ウレタンや水発泡ウレタンを注入材として使用することを検討した。注入材の選定方法としては、鋼管削孔時の1本あたりの平均湧水量を基準にして、5L/min以下でシリカレジン、5～15L/minでウレタン、15L/min以上で水発泡ウレタンを検討することとした。上記基準については、それぞれの注入材にて試験施工を実施し、検討したものである。なお、実際の切羽においても、シリカレジンと水発泡ウレタンを試験施工しており、湧水がある場合、シリカレジンでは改良効果(発砲)が確認できず、水発泡ウレタンは改良効果が確認できた(写真-3)。

自然由来重金属等について

福井新聞(H31.2.21)【抜粋】

トンネルの坑口から約20メートル掘削を進めた個所で採取した残土から15日、国の環境基準(検液1リットル当たり0.01ミリグラム)を超える0.032ミリグラムのヒ素を検出した。

国の基準値は、70年間、1日2リットルの水を飲用することを想定し、一生運にわたりその水を飲用しても健康に対する有害な影響がない濃度として設定されています。

自然由来重金属等とは

- 自然界に存在するカドミウム、六価クロム、水銀、セレン、鉛、ヒ素、フッ素、ほう素で、温泉成分や食品等にも多く含まれているものです。
- 重金属等は人工物ではなく、通常の環境では人間も含めてすべての動植物に微量は存在している物質であり、その存在自体が危険というわけではありません。



ひじき(含:ヒ素)



魚介類(鰻節等)(含:セレン)

重金属等の特徴

- 重金属等の多くは人体に必要な元素となっていますが、摂取量によっては健康被害を生じることもあるため、慎重に対応する必要があります。

図-15 地元住民等説明資料(例)

上記のように、先進調査ボーリングや削孔検層等で前方の地質状況を把握しつつ、補助工法の変更を段階的に行うことで、効果的、且つ、経済的な補助工法を選定して、破碎帯が繰り返し出現する不安定な切羽に対し、安全に施工を進めることができた。

(2) 自然由来重金属(ヒ素)の出現

トンネル掘削を開始して20m程度の切羽で地層が変化するため、土壌調査(土壌汚染対策法における溶出量試験及び含有量試験)を実施したところ、ヒ素の溶出量において基準値超過の結果が出た。既往の土壌調査では重金属等は想定されていなかったため、直ちにトンネル掘削を中止し、先進調査ボーリングコアを用いた土壌調査やズリ仮置き場のヒ素流出防止対策等を実施した。

上記土壌調査結果が出た当初は、トンネル周辺の地元住民やズリ搬出先の関係者よりご不安やご心配の声が挙がった。そこで、調査結果や対策については迅速且つ丁寧な説明し情報共有に努めることで、ご理解を得た(図-15)。

そして、一時中止から4ヵ月後に掘削を再開することができた。その後は先進調査ボーリングのコアを用いた土壌調査で先行的にヒ素の有無を予想し、実際のトンネル掘削土を用いた土壌調査も日々実施し、ダブルチェックにて確実にヒ素を把握できるような体制を整えて掘削を進めた。

6. おわりに

本稿においては、深山トンネルの施工に係る、中池見湿地等の周辺環境への配慮事項及び複雑に変化する岩相への対応について報告した。

深山トンネル施工に伴う、中池見湿地等の周辺環境への配慮事項については、ルートの変更や環境管理計画に基づく取組みを実施することとした。それにより、深山トンネルが中池見湿地等の周辺環境に及ぼす影響をより一層軽減できることを確認した。但し、降水量の影響はあるものの、地下水位が低下しているため、今後もモニタリング結果を注視していく。

深山トンネルの複雑な岩相変化については、先進調査ボーリングや削孔検層等で前方の地質状況を把握しつつ、補助工法の選定を段階的に行うことで、破砕帯が繰り返し出現する不安定な切羽に対し、安全に施工を進めることができた。また掘削土から検出されたヒ素については、先進調査ボーリングのコアにて土壌調査を行い、事

前に検出状況を把握し、実際の掘削土においても日々土壌調査を行うことで、ヒ素が基準値超過となる区間を適切に判定し、処理した。調査結果については、逐次自治体や地元住民に迅速且つ丁寧に説明することで、ご理解を得ながら施工を進めることができた。

謝辞：本工事の施工にあたりご協力頂いた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 山田圭太郎, 加藤茂弘, 岡田篤正, 石村大輔: 福井県敦賀市内池見における池見断層の地下形状と活動性, 活断層研究, No.42, pp.55-71, 2015.
- 2) 滝澤日香里, 高原英彰, 永利将太郎, 石田豪史: ラムサール条約登録湿地に配慮したルート選定およびトンネル施工計画, トンネルと地下, Vol50, No.1, pp.23-32, 2019.1.
- 3) (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社: 北陸新幹線、中池見湿地付近モニタリング調査等フォローアップ委員会議事概要(第1～5回), 2016～2020.
- 4) (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社: 北陸新幹線、中池見湿地付近深山トンネル等工事に係る環境管理計画, 2018.10.

(2020. 8. 7 受付)

CONSTRUCTION OF WATERTIGHT TUNNEL IN CONSIDERATION OF COMPLICATED LITHOLOGY AND RAMSAR CONVENTION WETLAND

Yoshiyuki AKIBA, Ryo KASHIWAGI, Atsushi MINATO and Takeshi ISHIDA

Since the Miyama tunnel of the Hokuriku Shinkansen (Kanazawa-Tsuruga) is located near the Nakaikemi wetland registered in the Ramsar Convention, further consideration for the surrounding environment was required. At the time of excavation, the slope of the formation is steep and the mixed rocks are in alternating layers, so the lithology is not stable, small fracture zones repeatedly appear, and the instability of the cutting face is complete on the entire tunnel line. I was worried. Based on these issues, we examined the route change and watertight structure to consider the surrounding environment such as Nakaikemi wetland. Regarding the destabilization of the top of the cutting face, the construction was carried out safely and economically by gradually changing the standard for long forepiling.