

トンネル掘削に伴う湧水対策について

函館開発建設部 函館道路事務所 計画課 ○宗山 徳史
伊藤 学
パシフィックコンサルタンツ株式会社 直原 俊介

北海道縦貫自動車道 七飯～大沼で計画している（仮称）オオヌマトンネルは、本坑及び避難坑からなる延長約7kmの長大トンネルである。本トンネルは、破碎帯、低強度地山、酸性湧水等、種々の課題を有しており、有識者から助言をいただきつつ検討を進めている。本報告では、函館開発建設部において実施した、トンネルの設計施工に向けた課題解決の内、トンネル掘削により酸性湧水が発生するプロセスの検討状況について述べる。

キーワード：トンネル、酸性湧水

1. はじめに

北海道縦貫自動車道は、函館市を起点とし室蘭市、札幌市、旭川市、士別市、名寄市等を経由して稚内市に至る681kmの高速自動車国道である。このうち七飯～大沼間は、（仮称）七飯インターチェンジから大沼公園インターチェンジに至る延長約10kmの事業であり、高速ネットワークの拡充による道央圏と道南圏との連絡機能の強化を図り、地域間交流の活性化及び、物流効率化の支援等を目的とした道路であり、平成17年度より旧日本道路公団から事業主体が変更となり、現在、北海道開発局にて鋭意整備を進めている。

（仮称）オオヌマトンネルは、北海道開発局では初めてとなる避難坑を有する延長約7kmの長大トンネルである。本トンネルは、平成24年7月にラムサール条約登録湿地となった自然豊かな大沼等を有する大沼国定公園に隣接しており、トンネル施工に伴うトンネル湧水や掘削ずり等による周辺環境への影響に配慮した計画を進めている。また、トンネルルート地質は、主に峠下火山砕屑岩類、木地挽山溶岩類が存在し、火山活動に伴う熱水変質作用を受けている区間を通過するため、土被りが約300mの地下深部に粘土化帯や破碎帯などが出現すると想定され、トンネル掘削に伴う強大な地圧の作用や高圧湧水など多くの課題があることから、計画段階から学識者や有識者から助言をいただきながら慎重な計画を進めきたところである。

本報告では、トンネルの設計施工に向けた課題解決の内、トンネル掘削による酸性湧水発生プロセスの検討状況について述べる。



図-1 位置図

2. トンネル概要

（仮称）オオヌマトンネルの計画条件および概要を表-1、トンネル内空断面形状を図-2に示す。

表-1 計画条件および概要

項目	内容
道路規格	第1種第2級
計画交通量	10,600台/日
設計速度	100km/hr (暫定2車線)
トンネル等級	AA等級
トンネル延長	本坑、避難坑：約7km ※詳細設計により変更する場合がある
平面線形	直線、R=15,000、直線、A=900、R=1,800、 A=1,050
縦断線形	2.036%、3.00%、2.00%、-3.00%、-0.30%

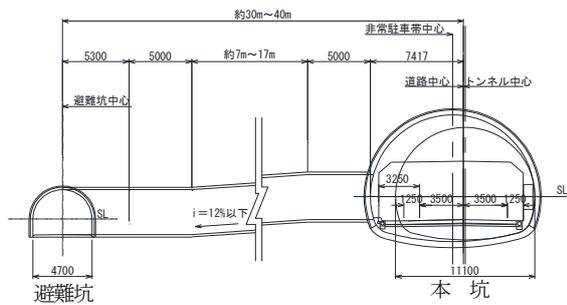


図-2 トンネル断面

3. 地形・地質概要

本トンネルは、函館平野の北端から、亀田半島基部のほぼ中央の山地を貫いて駒ヶ岳西麓の低地にて南北約7 kmに計画された山岳トンネルである。この山地は、渡島山地南端の木地挽山山系と亀田山地横津岳山系の東西の山地が接する位置にある標高300 m程度の低山地がなす南北方向の峠となっている。

本トンネル周辺に広く分布する新第三紀中新世～鮮新世の峠下火山砕屑岩類は、熱水変質作用を受けており（三谷ほか,1966）¹⁾、広域的な中性変質が及んだ後に、デイサイトの貫入境界や破碎帯に沿って酸性変質が進行し、その後さらにアルカリ性の熱水が上昇したものと整理されている。また、オオヌマトンネル周辺の地表踏査とボーリング調査から、安山岩やデイサイトなどの溶岩類の下位に熱水変質作用を受けた変質岩が分布していることが捉えられている。（図-3、4）また、国道5号大沼トンネル、新大沼トンネルでは、酸性の熱水変質作用を受けた地山に起因する酸性水や掘削土処理の対応を行っており、広く熱水変質作用を受けた地域であることを裏付けている。

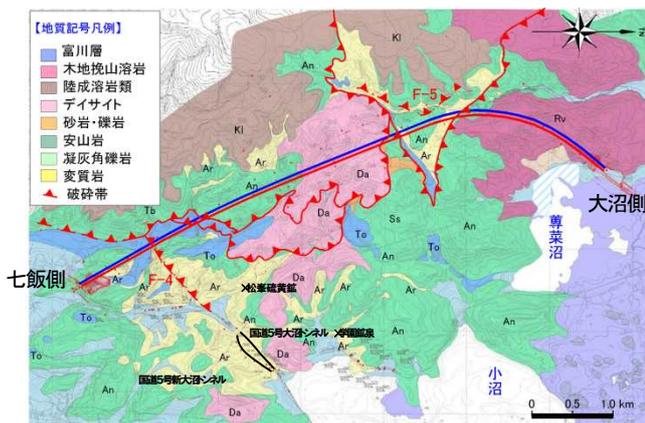


図-3 地質平面図

4. 技術検討への取り組み

本トンネルでは、一連の整備を安全かつ円滑に実施するために必要な事項について調査・審議し、周辺環境に配慮した効率的・効果的な設計・施工方法に関する検討を行うことを目的として、「オオヌマトンネル技術検討委員会」を設置している。本委員会では、主にトンネルの構造や施工方法に関する課題検討のための「設計・施工WG」と、トンネル掘削土やトンネル湧水による周辺環境への影響に関する課題検討のための「土・水処理WG」を組織して各種課題に取り組んでいる。また、本委員会と並行して「七飯大沼道路環境検討懇談会」を設置し、周辺環境に配慮した道路事業を進めている。

本委員会では平成20年度から平成28年度現在まで技術検討委員会を4回、設計・施工WGを5回、土・水処理WGを5回等、延べ19回に渡り開催し、トンネルの設計・施工及びびずり処理、湧水処理に関連する基本方針の整理を行ってきた。主な審議内容を表-2に示す。本報告ではこの内、土・水処理WGで検討されているトンネル掘削による酸性湧水について報告する。

表-2 技術検討委員会の経緯

年月	技術検討会・WG	主な審議内容
H21.1	第1回技術検討会	課題整理、審議事項抽出、縦断線形
H21.9	第1回土水処理WG	地山変質区分、周辺水環境予測方針
H21.10	設計施工WG(意見交換会)	類似事例、設計方針確認
H22.12	第2回土水処理WG	地山変質区分
H22.12	第1回設計施工WG	湧水・水環境への影響予測
H23.4	第2回技術検討会	地山変質区分、トンネル線形、設計方針
H23.6,7	現地視察会	坑口、露頭地質確認
H24.3	第3回土水処理WG	掘削びずり対策方針
H24.3	第2回設計施工WG	避難坑の構造、施工法、計測計画
H25.2	第3回技術検討会	トンネル構造、施工法、湧水・掘削びずり対策方針
H25.11	第4回土水処理WG	現地盤特性を考慮したびずり処理方法他
H25.11	第3回設計施工WG	トンネル構造、施工法
H26.11	設計施工WG(坑口検討会)	JR盛土近接坑口、土石流対策と坑口構造
H27.1	第4回設計施工WG	掘削びずり処理、湧水処理、モニタリング方針
H27.2	土水処理WG個別説明	地盤改良工事と盛土箇所視察
H27.11	土水処理WG(現地視察会)	坑口形状検討、避難坑びずり搬出方式
H28.1	第5回設計施工WG	掘削びずり処理、湧水処理、モニタリング方針
H28.7	第5回土水処理WG	
H28.10	第4回技術検討会	

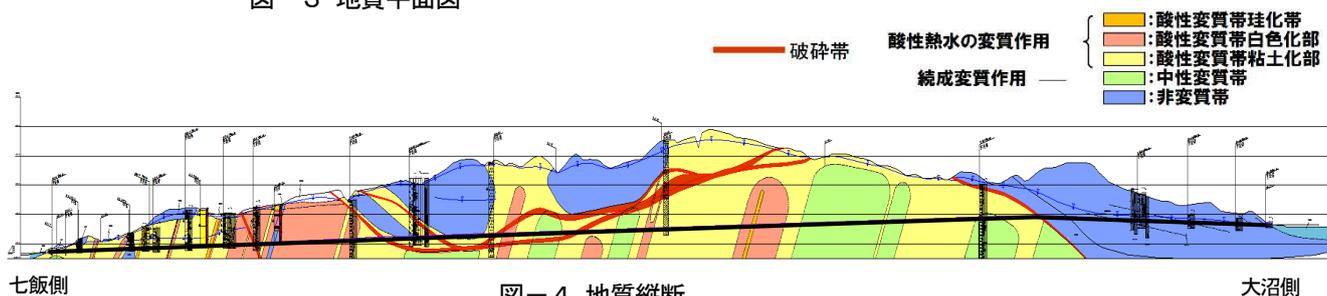


図-4 地質縦断

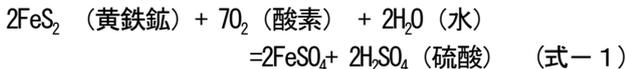
5. 酸性湧水発生メカニズムの検討

5.1 検討の背景

本ルート上には熱水変質作用を受けた変質岩が分布していることが捉えられており、ルート東方約1 kmには熱水変質に起因すると考えられる松峯硫黄鉱山が分布している。近隣には酸性の湧水がある学園鉱泉や、オオヌマトンネルと同様の熱水変質作用を受けた地山を通過する既存トンネルにおいて酸性湧水が確認されている。これらのことから、技術検討委員会の発足当初よりオオヌマトンネルにおいても酸性湧水の発生が懸念され、酸性湧水の発生機構について検討されている。

5.2 酸性湧水発生メカニズムの想定

一般的に酸性の熱水変質作用を受けた地山には黄鉄鉱(FeS₂)が普遍的に含まれており、これが酸素や水と反応することで、硫酸が発生し、pHが低下することで酸性を示すことが知られている(式-1参照)



本トンネルでは、式-1の左辺の項目のうち、黄鉄鉱は地山に普遍的に存在し、酸素は地下水に含まれる溶存酸素と大気中に存在する酸素、水は地下水に該当すると考えられる。

本トンネルにおける酸性湧水発生メカニズムについて、以下に示すA~Dの4つの案を想定した。

◎A案(地下水位の低下)：表層付近の地下水には溶存酸素が存在し、トンネル掘削により表層付近の地下水がトンネル掘削面付近まで低下し、地下水中の溶存酸素が周囲の岩盤と反応し酸性湧水が発生する。(図-5左)

◎B案(岩盤の割れ目)：岩盤の割れ目は透水性が良好なため、地下水中の溶存酸素がトンネル掘削面付近まで到達すると周囲の岩盤と反応し酸性湧水が発生する。(図-5右)

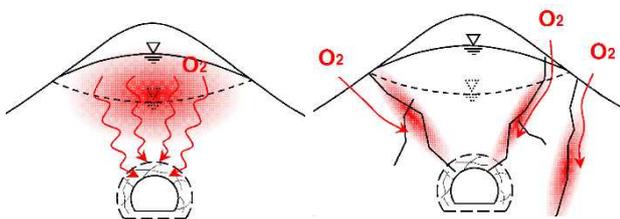


図-5 酸素供給源(左:A案、右:B案)

◎C案(岩盤の緩み)：トンネル掘削に伴って発生したゆるみ領域にトンネル掘削面(内側)から酸素が供給され、酸性湧水が発生する。(図-6左)

◎D案(地山全体)：トンネル掘削前から地山の地下水が酸性を示し、掘削に伴い酸性湧水が発生する。(図-6右)

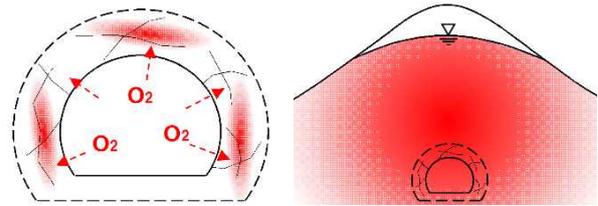


図-6 酸素供給源(左:C案、右:D案)

5.2 酸性湧水発生箇所の想定

これまでの検討結果より、酸性湧水発生メカニズムA案からD案について、酸性湧水発生箇所をそれぞれ想定した。

◎A案：三次元地下水シミュレーション解析から、トンネル掘削により、地表付近の地下水位が施工基面付近まで低下する区間としては、概ね七飯側坑口から1 km付近であり、この区間で酸性湧水が発生する。

◎B案：多数の破碎帯が分布するトンネル中央部付近で酸性湧水が発生する。

◎C案及びD案：トンネル全線に渡り酸性湧水が発生する。

6. 酸性湧水発生メカニズムの検証結果と課題

6.1 酸性湧水発生メカニズムの検証結果(A~D案)

a) A案(地下水位の低下)

地下水中の溶存酸素によって酸性湧水が発生すると仮定した場合、現状(トンネル掘削前)の地下水の一部は酸性を示し、熱水変質作用を受けた変質岩の一部も溶存酸素によって酸性化していると想定される。(図-7)

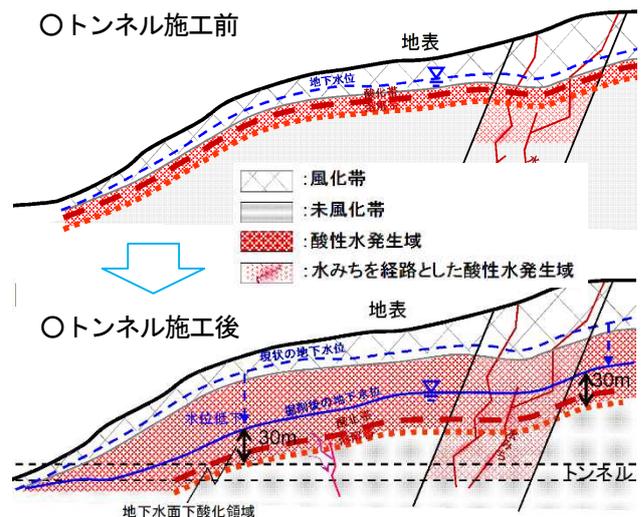


図-7 トンネル施工前後での地下水の酸性化領域

この現象を検証するため、熱水変質作用を受けた地質帯が集中し酸性湧水の発生が想定されている七飯側坑口から1 km付近周辺にて4本のボーリング調査を実施し（図-8、図-9）、地質状況を把握すると共に、深度方向の地下水質の連続観測等を行った。各調査方法は表-3に示す通りである。

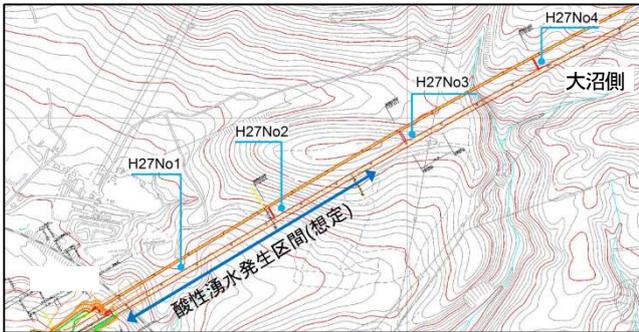
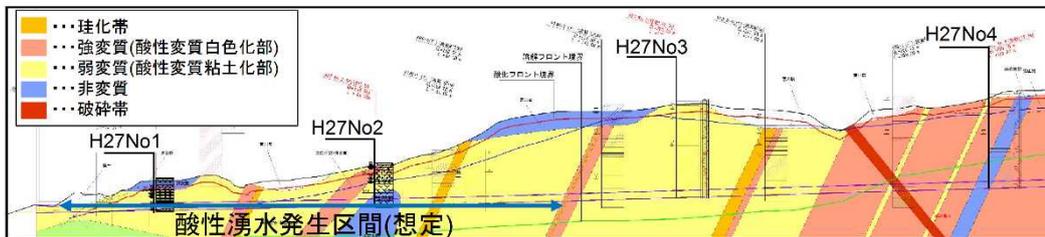


図-8 ボーリング調査位置平面図



七飯側

図-9 地質縦断面図

大沼側

表-3 各調査方法

調査項目		調査方法
ボーリングコア	①地山の酸性化の有無(掘削当初)	・掘削直後のボーリングコアについて、1m毎に「土懸濁液のpH試験方法」に準拠しpH(H ₂ O)の測定を行った。
	②地山の酸性化のポテンシャル(強制酸化)	・ボーリングコアについて、10m毎に「過酸化水素水による土及び岩石の酸性化可能性試験方法」に基づきpH(H ₂ O ₂)の測定を行った。
③地下水質		<ul style="list-style-type: none"> ・多項目水質計(WQC-24型:ターミナル及びWMS-24型:センサモジュール)にてボーリング孔内の地下水の水質を深度方向に測定 ・測定項目は、pH、DO(溶存酸素)、EC(電気伝導度)、濁度、水温 ・測定時期は、2015/11/25(秋季)、2016/1/26(冬季)の2回

ボーリングコアを用いた試験結果を図-10に示す(酸性湧水発生区間のH27No2抜粋)。掘削当初のpH(青線)は全ての深度において、6~8と中性を示す。強制酸化させたpH(オレンジ線)は表層の風化部を除き、2前後と酸性を示す。このことから、地山の地質は酸性化のポテンシャルを有するものの、地山中においては酸性化していない。

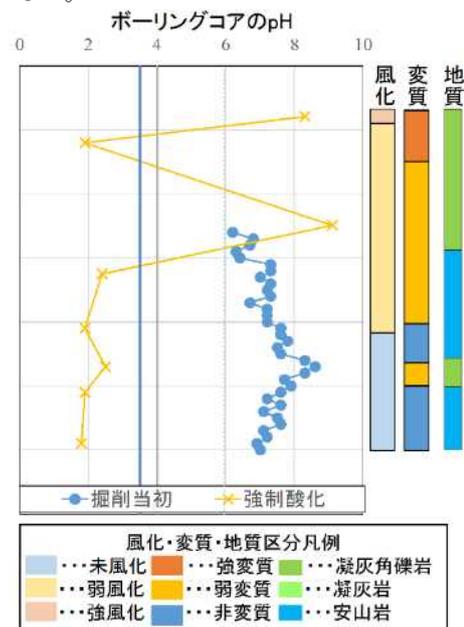


図-10 H27No2ボーリングコアのpH

地下水質の調査結果を図-11に示す（酸性湧水発生区間のH27No2抜粋）。地下水の深度方向のpHは、全ての深度において6～7と中性を示す。DO（溶存酸素）は、水深10m程度までは5～10mg/L、それ以深では0～5mg/Lを示す。水深10m程度までは、大気中の酸素が溶け込んでいる可能性も考えられる。このことから、酸性湧水を発生させるための溶存酸素は存在するものの、地下水中のpHは中性を示している。

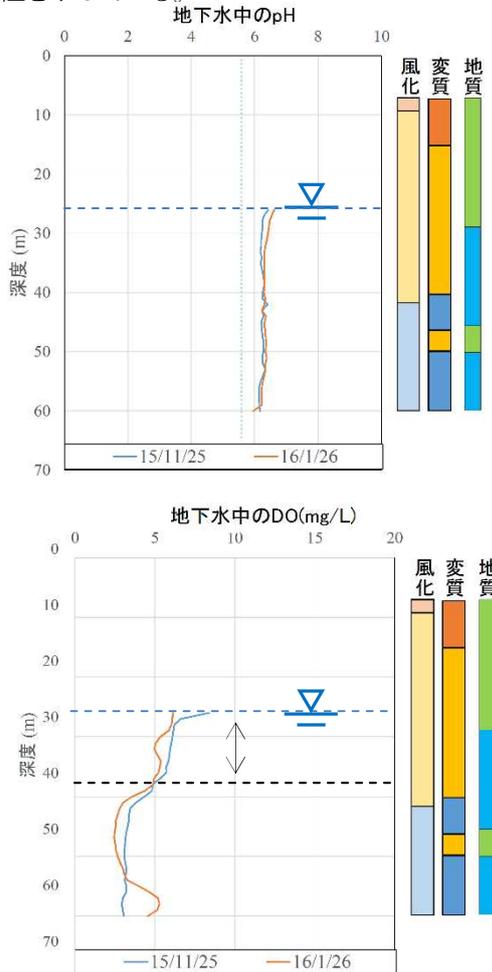


図-11 H27No2の地下水中のpHとDO（溶存酸素）

以上の調査結果から、地下水中に溶存酸素は存在し、地山は酸性化のポテンシャル(能力)を有しているものの中性を示し、トンネル掘削前の地下水は中性を示すことが確認された。このことから地下水中の溶存酸素のみでは、地山は酸性化されず、地下水も酸性を示さないと考えられる。

b) B案(岩盤の割れ目)

施工前の調査段階では、破碎帯等の岩盤の割れ目の性状を把握することは困難であり、施工時の先進ボーリングや切羽観察等で確認する予定である。

c) C案(岩盤の緩み)

施工前の調査段階では岩盤の緩み領域の範囲の想定は困難であり、施工時の先進ボーリングや切羽観察で確認する予定である。

d) D案(地山全体)

本トンネル周辺の湧泉や表流水において水質分析(pH)が実施されている(図-12)。その結果、酸性を示す湧泉が確認されているのは4箇所と局所的である。トンネルルート上の流域の湧泉のpHは中性を示しており、地山の地下水全体が酸性を示しているとは考えにくい。

6.2 酸性湧水発生メカニズムの考察

以上の検討結果から、酸性湧水を発生させるために必要となる酸素の供給源としては、大気中に存在する気体の酸素の可能性が高いと考える。本トンネルはNATMでの掘削を予定しており、掘削により生じた緩み領域への大気中の酸素の供給は、吹付けや覆工等で遮断できるため、施工後については酸性湧水が発生しない可能性も想定される。

今後は追加の室内試験や先行掘削する避難坑での現地試験を行い、本トンネルにおける酸性湧水発生メカニズムを特定する必要があると考える。

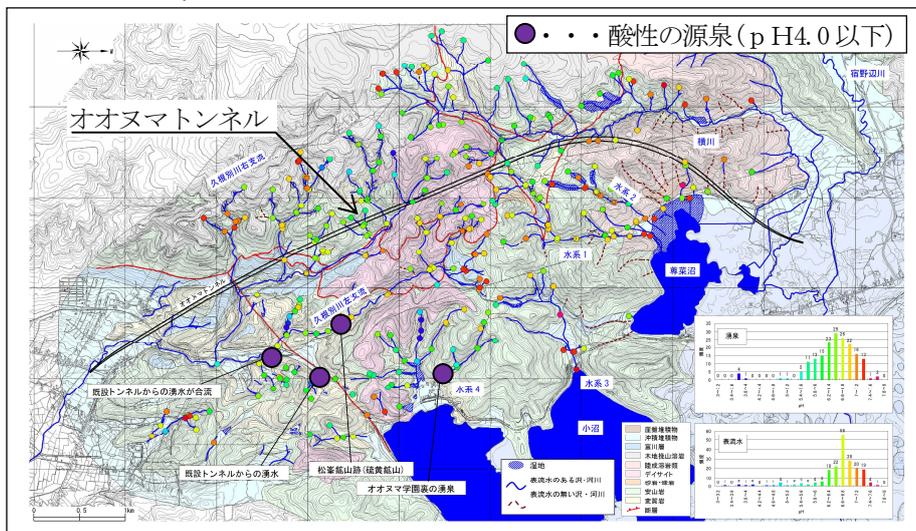


図-12 本トンネル周辺の湧泉や表流水のpH

7. 今後実施予定の検証試験

7.1 室内試験

酸性湧水を発生させるための酸素の供給経路としては大きく分けて水（地下水）を媒介した経路（A案地下水水位の低下、B案岩盤の割れ目）と大気を媒介した経路（C案岩盤の緩み）が想定される。水と大気による酸素供給経路の優劣を把握するために、表-4に示す室内試験を実施する予定であり、本試験結果によりオオヌマトンネルにおける酸性湧水の発生メカニズムが概ね特定可能と考えている。

7.2 先行掘削する避難坑での現地試験

本坑に先行して掘削する避難坑において、比較的地山が安定している区間の複数箇所において試験区間を設定する。酸素の供給経路が「C案岩盤の緩み」と仮定した場合、吹付けにより緩み領域への酸素供給は遮断できると考える。このため、1つの試験区間において、一方は吹付け有りとし、もう一方を吹付け無しとする。吹付け有無の区間において定期的に湧水のpHを把握すると共に、トンネル周方向へ定期的にコア抜きし、地山の酸性化の状況を把握すること想定している。

7.3 酸性熱水変質地山におけるその他の課題

酸性の熱水変質作用を受けた地山には黄鉄鉱(FeS₂)が普遍的に含まれており、掘削ずりを盛土した場合に盛土からの浸出水が酸性を示すことが懸念されている。ただし、現在実施中の試験結果からは、一定深度以上の地山においては、黄鉄鉱が含まれるものの、大気中に暴露させても酸性化は進行していないことが確認されている。

施工時の先進ボーリングでのコアを用いて、酸性化の深度や酸性化に要する時間等についても検討することを予定している。

8. おわりに

本報告では、北海道縦貫自動車道 七飯～大沼における（仮称）オオヌマトンネルの技術検討委員会の内、主にトンネル掘削により酸性湧水が発生するプロセスの検討結果について報告した。本トンネルのように複雑で脆弱な地質を対象とし、かつ自然環境への影響に配慮した計画を進めるうえでは、全国の難工事と言われるトンネルに関する多くの委員会等を経験された学識者や有識者による委員会を組織し、計画段階から多くの助言をいただくことで合理的で安全な計画のための基本方針を取りまとめることができたことは、今後の難事業を進めるうえでの参考になると考える。本委員会に参加いただいた学識者・有識者に深く感謝する次第である。

現在は、今後のトンネル工事の着手に向け、本委員会で審議いただいた基本方針に基づき詳細な設計を実施していく段階である。なお、本坑における防水型トンネル構造や耐酸性構造の採用の可否については、室内試験結果や先行掘削する避難坑での現地試験結果を踏まえて判断する予定である。

さらに、トンネル掘削を開始してからが、本格的な課題解決のための具体的検討が必要となることから、今後も学識者・有識者からご意見をいただけるよう組織を継続して行く所存である。

参考文献

- 1) 三谷ほか(1966), 5万分の1地質図幅および説明書「大沼公園」

表-4 今後実施予定の室内試験案

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
概念図	<ul style="list-style-type: none"> ・密封 ・酸素なし ・水なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・大気開放 ・水なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・大気開放 ・地山地下水 	<ul style="list-style-type: none"> ・大気開放 ・地山地下水 	<ul style="list-style-type: none"> ・密封 ・酸素なし ・地山地下水
酸素供給源	なし	大気	主に水	水+大気	水
備考	比較試験。酸性化は進行しない	大気を通じての酸素による酸性化を把握	大気から水を介した酸性化を把握	大気と水を通じての酸素による酸性化を把握	水を介した酸性化を把握
対応メカニズム	—	C(岩盤の緩み)	A(地下水水位低下) ※NATM工法に相当	C(岩盤の緩み) ※在来工法に相当	A(地下水水位低下) ※NATM工法に相当