

平成25年度

# 防水型トンネルによる ヒカリゴケ生育環境保全について

北海道釧路総合振興局 釧路建設管理部 中標津出張所 ○古田 研太郎

道道知床公園羅臼線の共栄地区において、越波や落石による交通障害が発生していたことから、安全で安心な道路交通確保を目的にトンネル計画を行った。トンネル区間近傍には、北海道指定天然記念物であるヒカリゴケが生育するマッカウス洞窟が存在していたことから、トンネル建設に伴うヒカリゴケの生育環境を保全することが課題となっていた。

ヒカリゴケ生育環境保全のために採用した防水型トンネルの実施状況について報告する。

キーワード：自然環境、保全・共生、防災

## 1. はじめに

道道知床公園羅臼線は、全長 24.5km の海岸道路で、平成 17 年 7 月に登録された知床世界自然遺産に近接しており、約 8km の区間が国立公園内にあり、羅臼町市街地と相泊地区を結ぶ唯一の連絡路として沿線にある集落の生活や経済にとって欠くことのできない主要道路である。この内、共栄地区では、越波や地震・降雨による落石、土砂崩れなどにより、通行止めを余儀なくされることが多く、集落の孤立化などが起きていることから、防災対策を目的とした全長 498.5m のトンネルを計画した。ここでは、ヒカリゴケの生育環境を保全するために道道知床公園羅臼線マッカウス洞窟トンネルで採用した防水型トンネル（ウォータータイト）に関する設計・施工および計測について報告する。



図-1 マッカウス洞窟（ヒカリゴケ生育）

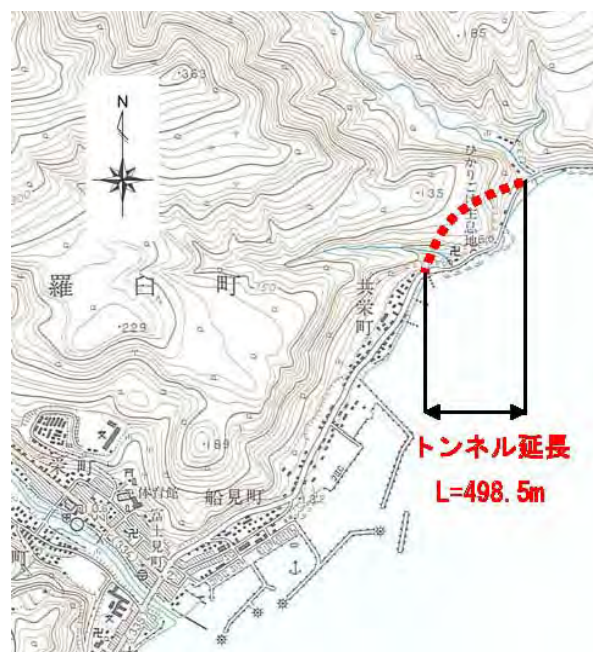


図-2 トンネル位置図

## 2. ルート選定

### (1) ルートの比較検討

ルート選定は、マッカウス洞窟への影響、水産資源への影響、越波への対策および不安定斜面の対策等を考慮した現道案、海上案およびトンネル案の3ルートについて検討を行った(図-4参照)。



図-3 ルート選定する上での留意点

比較ルート案の概要は、以下である。

- ①現道案：現道ルートは変更せず、崩壊の危険性のある斜面对策と越波対策を行う案
- ②海上案：崩壊の危険性のある斜面を回避するため、岩石崩壊が到達しない位置まで海側へ沖だしし、越波対策を行う案
- ③トンネル案：崩壊の危険性のある斜面および越波を回避するため、山側にトンネルを掘る案

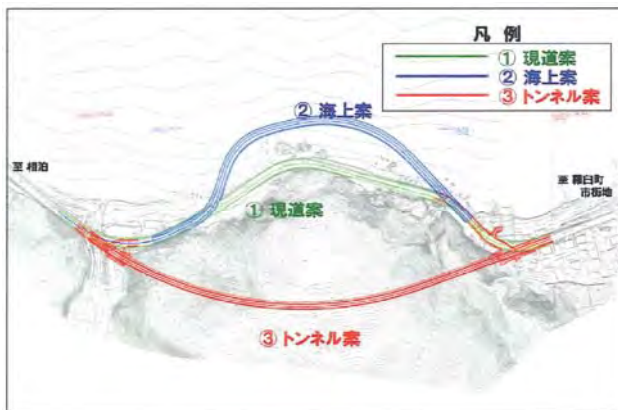


図-4 比較ルート図

表-1 ルート選定概要表

	現道案	海上案	トンネル案
平面形状	・現道ルートと同じ(曲線3箇所)	・曲線数が増える(4箇所) ・非対称クローズド曲線 両方向曲線	・問題なし(曲線数1箇所)
施工性	・現道に対し、長期にわたる交通規制、プロテクターが必要	・大規模な交通規制はなし	・大規模な交通規制はなし ・トンネルをウォータータイト(防水)構造とする必要がある
安全性	・斜面状況の経年変化に伴い、長期的な維持管理が必要	・基本的に安全性は恒久的に確保	・基本的に安全性は恒久的に確保
環境(ヒカリゴケ)	・ヒカリゴケ育成箇所の環境を大きく変えてしまう可能性があり ・斜面対策時の振動により、洞窟内への落石によりヒカリゴケへの影響が懸念される	・ヒカリゴケに対する問題は特になし	・トンネルをウォータータイト(防水)構造とし、洞窟内環境を維持することでヒカリゴケへの影響は小さい
環境(その他)	・越波対策により水産資源への影響が懸念(熱湯消失4,800 m <sup>3</sup> ) ・施工中は洞窟への立入を制限する必要あり	・海上への張り出し、越波対策により水産資源への影響が懸念(熱湯消失23,700 m <sup>3</sup> ) ・海岸擁壁等により、景観が劣る場合がある	・水産資源面での問題なし
景観性	・大規模な斜面対策となり、景観的に劣る		・景観上特に問題なし
経済性	・工事費(経費含まず) 約1,922百万円	・工事費(経費含まず) 約2,482百万円	・工事費(経費含まず) 約1,594百万円

比較検討ルートについては、「防災対策検討協議会」を設立し、事業方針などについての検討を行った結果、ヒカリゴケなどの自然環境への配慮、水産資源への影響および羅臼町の産業面など判断し、トンネル案に決定された(表-1参照)。

### (2) 防災対策検討協議会の開催

防災対策検討協議会は、安全で安心な道路交通確保のための防災対策を実施するにあたり、必要な検討項目について、学識経験者、地域住民代表、地元関係団体・自然保護・教育関係者等による意見調整及び各種対策工について検討することを目的に設立され、平成19年度に3回開催された。協議会では、以下の方針が提言された。

- ①トンネル線形及び工法については、現在の洞窟内環境を維持するための地下水保全策を検討するとともに工事コストの縮減にも配慮すること。
  - ②トンネル施工による洞窟内の環境変化について監視を行い、洞窟内環境の維持に極力努めること。
- 上記提言内容を踏まえ、トンネル設計を行なった。

## 3. トンネル設計概要

### (1) 地質概要

基盤層は、新第三紀鮮新世のサシルイ川層で、周辺には、その上位にハシコイ溶岩・登山口溶岩、更新世の段丘堆積物、現世(沖積世)の崖錐及び沖積層(現河床堆積物及び海浜堆積物)が分布していた。サシルイ川層は、安山岩質集塊岩を主体として部分的に安山岩質凝灰角礫岩(ハイアロクラスタイト)が分布し、泥岩層・凝灰質砂岩層・流紋岩質凝灰岩を挟む。

ハイアロクラスタイトは、大別して上下2層あり、上層をSc-1、下層をSc-2とした。また、同様に下層のSc-2を透水性によってSc-2(U)、Sc-2(L1)、Sc-2(L2)の3層に区分した。トンネル区間の大部分は、下層のハイアロクラスタイトで占められている。

凝灰質砂岩は、上下のハイアロクラスタイトの間に挟まれており、流紋岩質凝灰岩・泥岩・凝灰質砂岩に相当する。ボーリング調査で確認されているとともに、露岩でも確認されている。岩相は、砂岩・泥岩・凝灰岩で層状に堆積している。

安山岩は、ボーリング調査で確認されたとともに、露岩でも確認されている。安山岩の性状は、ハイアロクラスタイト中にシート状に進入したり、岩脈状に貫入していた。

トンネル掘削中は、ハイアロクラスタイト層や安山岩層の地層境界(縦断方向および上下方向)位置などについては、相違なく推移した。ハイアロクラスタイト層は、塊状であるが軟質、安山岩層は硬質であるが多亀裂で透水性が高く湧水が多いことが特徴である(図-5参照)。

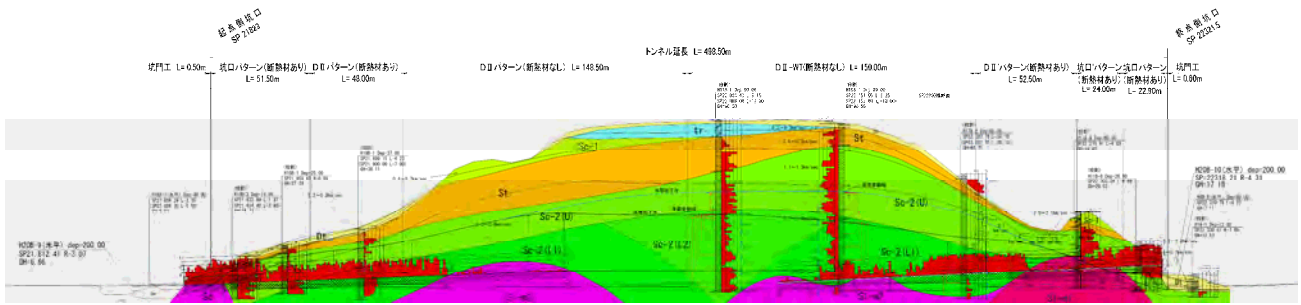


図-5 地質縦断面図

(2) 設計概要

一般的に山岳トンネルは、周辺の地下水を覆工背面に滞留させることなく排水し、過大な地下水圧や覆工背面からの漏水を生じさせない排水構造としている。

本トンネルでは、ヒカリゴケ環境保全対策として防水型（ウォータータイト）トンネルを一部区間に採用した。以下に、ウォータータイト区間の延長、構造、断面について詳述する。ウォータータイト区間の設定は、三次元地下水流動解析により、極力マッカウス洞窟内環境に影響を与えない区間（延長 L=150m）で計画することとした。

a) 防水型（ウォータータイト）区間の延長

延長の設定は、三次元地下水流動解析にて種々の延長ケースを解析し、地下水低下の影響評価を行い決定した。解析プログラムは、地表流も含めたモデル流域内の水循環を総合的に計算・再現することができる三次元統合型多相流水循環解析プログラム（積分型有限差分法）を用いた。このプログラムは、基本的に地下水・地表流の変化を時系列的に計算する非定常計算モデルである。図-6 に解析実施フロー図を、図-7 に領域初期化の概念図を示す。

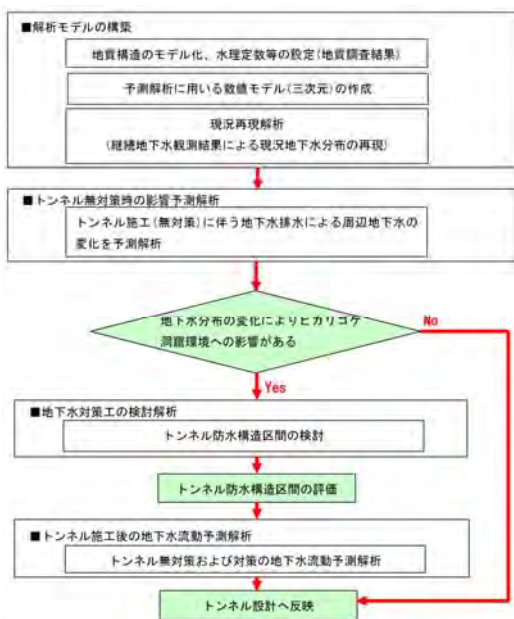


図-6 解析実施フロー図

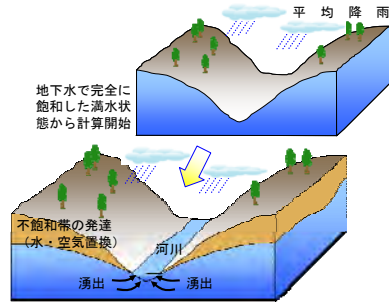


図-7 領域初期化の概念図

トンネル建設により洞窟に湧出する地下水を保全するためには、ウォータータイト区間長を延ばすことが有利であることは明白であったが、区間を延ばすことは、掘削断面の増加、全周防水シート敷設等の施工量の増加や事業工費の増額につながることからトンネル建設時の洞窟に湧出する地下水低下の影響評価を行った上で、延長 L=150m が最も優位と考えた。図-8 に延長 L=150m とした場合の洞窟周辺の地下水位低下、図-9 に三次元地下水流動解析ケースを示す。

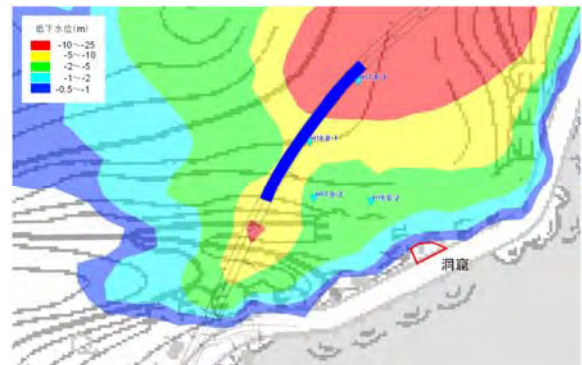


図-8 洞窟周辺の地下水位低下図（区間延長 L=150m）

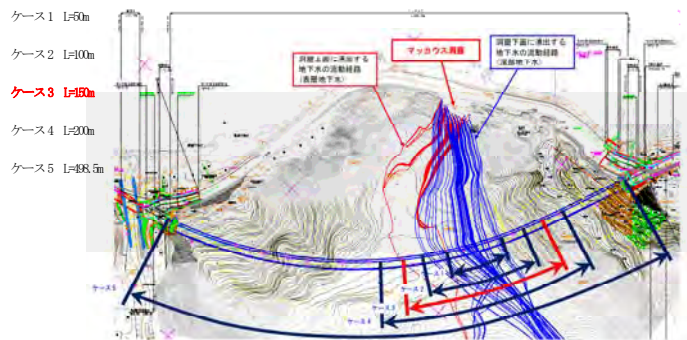


図-9 三次元地下水流動解析ケース

**b) 防水型（ウォータータイト）の概要**

山岳トンネルは、排水型（図-8 参照）であり覆工は力学的機能を有さないものとして無筋コンクリートを基本としている。これに対し、防水型（図-9 参照）は、防水工、覆工打設完了後、地下水位の上昇により、覆工に水圧が作用する。このような外力に対し、覆工をはり要素、地盤をバネでモデル化して骨組構造解析を行い、覆工を鉄筋コンクリート構造とし、覆工強度発現までの期間、二次覆工に水圧が作用しないように仮排水工を設け、湧水を排出する計画とした。また、経年劣化に伴う亀裂、防水シート破損等の漏水、保水対策としてリペアシステム、ウォーターバリアを設置し、長期的な環境保全が図れる構造とした。

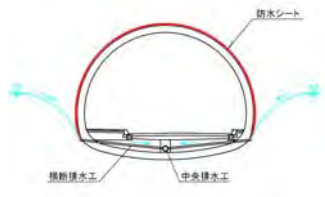


図-8 排水型（通常のNATM）

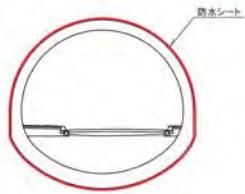


図-9 防水型（ウォータータイト）

**c) 内空断面形状**

本トンネルは、内空幅 8.5~12.5m 程度であるため、“通常断面”に区分されることから通常の条件の上半単心円断面を採用した。ウォータータイトの断面は、水圧等の外力に対して構造的な安定性を確保する必要があったことから、インバート半径を小さくし円形に近づけた断面、あるいは真円断面の比較検討を実施した。

結果（図-10 参照）は、インバート半径を上半半径の1.2倍とした内空断面（ウォータータイト断面②）が最も経済性に優れ、真円断面に比べインバート半径が大きく施工性にも優れると評価し採用した。

断面形状	上半単心円断面	ウォータータイト断面①	ウォータータイト断面②	ウォータータイト断面③
断面図				
断面諸元	R1=5.150m R2=5.150m R3=15.470m R4=1.500m R5=1.500m e=0.500m	R1=5.150m R2=5.150m R3=16.300m R4=2.000m R5=1.500m e=0.500m	R1=5.150m R2=5.150m R3=16.200m R4=3.000m R5=1.500m e=0.500m	R1=5.150m R2=5.150m R3=16.200m R4=5.150m R5=1.500m e=0.500m
内空	62.40㎡	65.75㎡	74.12㎡	85.52㎡
断面積	(+11.72㎡)	(+8.35㎡)	(+8.35㎡)	(+9.20㎡)
掘削率	21.9%	21.6%	20.9%	20.5%
アーチ	50m	50m	50m	50m
覆工厚	150mm	120mm	80mm	80mm
鉄筋量	R10R20	R10R20	R10R20	R10R20
インバート	R20R25	R20R25	R20R25	R10R20
掘削断面積	109.99㎡	103.40㎡	103.40㎡	109.72㎡
工事費	(+6.52%)	(+6.52%)	(+6.52%)	(+5.96%)
その他			・インバート半径が大きいため、真円断面に比べ掘削に有利	・インバート半径があるため掘削に有利 ・コンクリートの厚さ削減によるコスト削減 ・掘削断面積等が従来より1トンから工事費は約1割削減
評価	×	△	◎	◎

図-10 内空断面検討結果表

**4.トンネル施工概要**

**(1) 防水型（ウォータータイト）区間の施工**

防水型区間の防水シート敷設において、従来の施工法では、防水シートの背面に水みち（空隙）が残ることや、ウォーターバリアと防水シートの接着が確実とならない場合があるなど、施工品質の確保に課題が残されていた。

そのため、覆工背面の空隙をなくし防水シート及びウォーターバリア設置面を平滑にするFILM（旧称：ハイ・イータス工法）工法を採用し、確実に理想的な防水構造を構築した。

インバート部に防水シートを張る場合、一般的にはインバート吹付けコンクリートの不陸分を考慮し、シートをたるませて施工するが、隣接するシート同士での溶着部の長さの違い（たるみ）が溶着不良の原因となり、防水機能に問題が生じやすい。

この問題を解決するために、インバート吹付け面を平滑に仕上げ、また、吹付け表面に現れている粗骨材の鋭角部をカバーする目的で、モルタルによる仕上げ吹付け（写真-1参照）を行い、溶着の確実性と防水シート及びウォーターバリアの信頼性を向上させた。



写真-1 インバート仕上げ吹付



写真-2 防水シート設置状況



写真-3 覆工完了全景

## (2) トンネル終点坑口側方空洞部の施工

地質調査およびトンネル掘削施工中には、終点側坑口側方部に空洞が確認されたため、トンネル掘進がそこに至る前に空洞部を充填する必要があった。空洞の規模は当初1,200m<sup>3</sup>程度の想定であったが、実際に5,000m<sup>3</sup>（3Dレーザースキャナの活用）に及ぶことが施工中に判明した（図-10参照）。長期的なトンネル本体の安定を考慮し、支持地盤層までの掘削及び排土、掘削床保護コンクリート、インバート部置換コンクリートを施工したうえでエアモルタルでの空洞充填を行うこととした。

エアモルタル充填方法は、空洞の拡がりが入り口より上部に向かい13mもの高さがあったため、各打設リフト毎に注入配管を設置し充填することとした。

最終的な充填の確認は、注入パイプ1孔、注入兼リターン確認パイプ2孔、エア抜き兼リターン確認パイプ2孔の合計5孔で行い（図-11参照）、低い位置から順にリターンを確認しながら充填した。ここでは、ダブルチェックとして充填センサーを併用した。エアモルタルが設計基準強度に達した後に、コンタクトグラウトを実施し、注入後の収縮等による微細な空隙を無収縮モルタルで再充填し、より確実な施工とした。

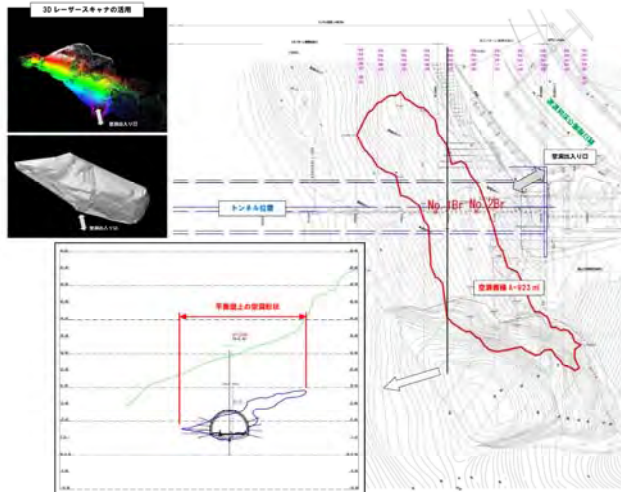


図-10 空洞部平面・断面図

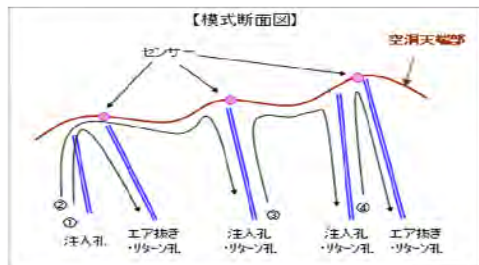


図-11 空洞天端部注入模式図

## (3) 施工中のモニタリング

施行中のモニタリングは、トンネル施工による洞窟内環境への影響を把握し、ヒカリゴケの生育環境保全を目的に実施された。

トンネル施工中は、周辺地下水位の低下は避けられず

一時的な環境変化は許容さざるを得ない状況であったため、施工中に生じる洞窟内環境の変化に着目する必要があった。

図-12にモニタリング項目および実施方法を示す。

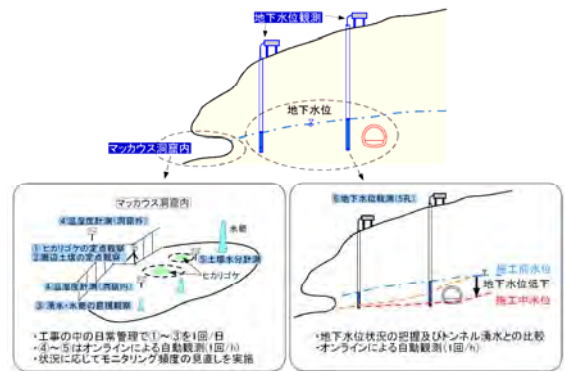


図-12 モニタリング概要図

トンネル施工中は、図-13に示したフローに従い、不測の事態により異常が確認された場合は、迅速な対応によりヒカリゴケの生育環境維持に努めた。

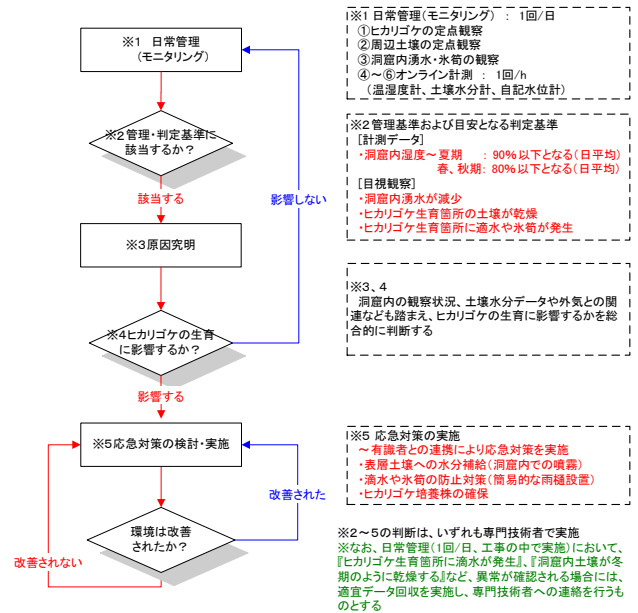


図-13 施工中のモニタリング対応フロー図

トンネル施工中は、掘削に伴う周辺地下水の低下や洞窟奥の湧水の減少が確認されたものの、洞窟内湿度はいずれの期間も基準値を満足し、洞窟内土壌水分についても、トンネル施工に伴う大きな変化は確認されていない。トンネル施工完了時点においても、ヒカリゴケに影響を与えるような洞窟内環境の変化はないものと判断された。また、低下した地下水位は、防水型区間の仮排水閉塞後より回復傾向にある。

## (4) 施工評価会議の開催

トンネル施工実施にあたり、設計・施工上の問題点について検討・助言を加え、詳細設計・施工への指針

を提起することを目的に施工評価会議が設置され、平成24年度に3回、平成25年度に1回開催された。

施工評価会議にて提言された各委員の意見を踏まえ、主に以下の設計変更を行った。

- ①掘削中の変位が微小であったことから、終点側D IIパターンの変形余裕量10cmを5cmに変更
- ②空洞内インバート部に分布するN値10以下の海浜堆積物層 (Sg1層) の除去・置換 (図-14参照)
- ③空洞部の標準支保パターンは、坑口部を除いて当初D IIパターンと設定していたが、長期安定性を考慮し、斜面や地表に影響を及ぼす可能性のある範囲に用いる坑口パターン支保構造に変更 (天端ロックボルト配置) した (図-15, 16参照)。

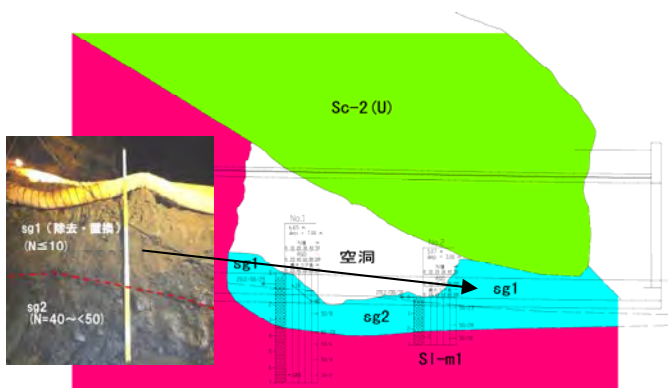


図-14 空洞縦断面図

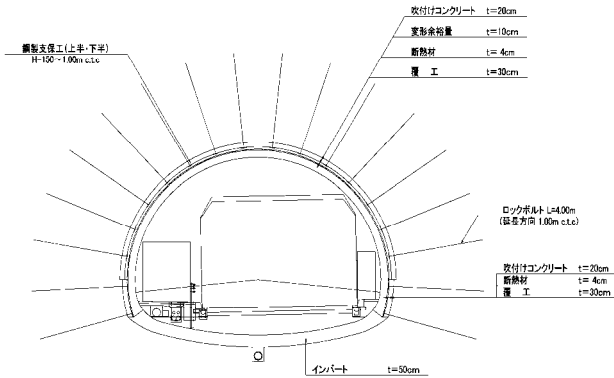


図-15 D IIパターン (当初)

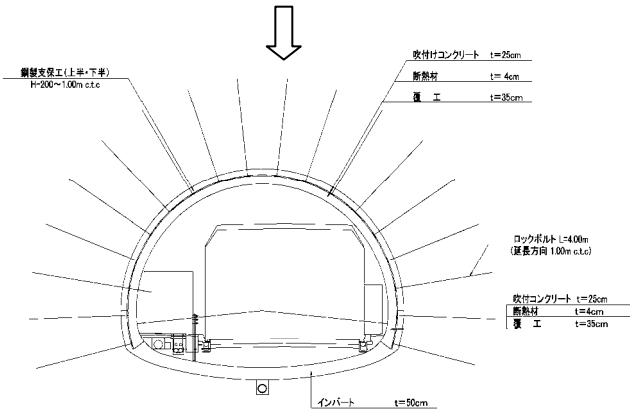


図-16 坑口'パターン (変更)

## 5. 防水型 (ウォータータイト) 区間の評価

今後の地下水位の動向を継続的にモニタリングすることを原則として、現段階では以下の理由から防水型区間設定は妥当であったと考えている。

- ①三次元地下水流動解析時のトンネル地質情報データおよびトンネル内湧水量について観測値との検証を行った結果、トンネル施工進行状況との相関性はとれていること。
- ②マッカウス洞窟に最も近接した観測孔の現状地下水位は、予測解析値と同等値で復水目標値に推移しているため、洞窟周辺部の地下水位は保たれていること。
- ③各観測孔共に、防水型区間完成後に緩慢ではあるが復水傾向を示しているため、予測解析値である復水目標値に近づいていく可能性があること。
- ④マッカウス洞窟内の環境 (ヒカリゴケ分布、湿度、気温および土壌水分) は現状で異常を示していないことから、環境維持に必要となる洞窟周辺部の地下水位は保全されていること。

地下水三次元流動解析結果では、防水型区間完成後に地下水は1~2ヶ月間で徐々に上昇し、4~6ヶ月後に概ね平衡状態 (復水目標値) に至ることを解析により得ていることから、今後も継続的にモニタリングを実施する必要があると考えている。

## 6. おわりに

マッカウストンネル施工時の最重要課題であったヒカリゴケの生育環境保全をはじめ、トンネルの長期耐久性の向上などに対して、三次元地下水流動解析による防水型区間の設定、施工中の洞窟内環境変化のモニタリングによる環境維持、確実な空洞部の充填処理、有識者の提言項目を踏まえ検討実施した設計変更等により目的が達成できたものと考えている。

平成25年10月に無事、トンネル本体工事が完了し、平成26年3月の開通を迎えることにつきまして、ご協力を頂いた関係各位の方々に深く感謝いたします。