

# 空洞調査ボーリングおよび軟弱地盤区間，空洞出現区間の掘削 Underground cavity survey and tunnel excavation of soft ground section and cavity section

小林 優太\* 木村 幸雄\*  
Yuta Kobayashi Yukio Kimura

## 要 約

底原トンネル付近の琉球石灰岩層内は雨水による浸食で鍾乳洞や亀裂が多数存在する。掘削中にトンネル底盤下に空洞や流入粘土が出現した場合は底盤の陥没、支保工の支持力不足が懸念された。そこで掘削開始前に、空洞出現によるトンネル掘削の安全確保、大規模な工法変更防止のための空洞調査を実施した。空洞調査項目は、水平ボーリング、鉛直ボーリングおよびリモート空洞測定システムによる調査とし、調査結果から空洞形状および軟弱地盤範囲とトンネル掘削断面の位置関係を確認した。調査結果をもとに補助工法としての軟弱地盤対策を検討・計画し、実施工では空洞到達後に遅滞なく対策工を実施してトンネル掘削を進め、工期内に施工を完了することができた。

## 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 水平ボーリング調査
- § 4. 追加調査
- § 5. 対策工
- § 6. おわりに

## § 2. 工事概要

沖縄県宮古島市では昭和 52 年から地下ダム建設工事が進められている。しかしながら、地下ダム建設に伴う地下水位の上昇により、一部地域においては、雨水の地下浸透速度以上の大量降雨時には冠水被害の発生が予測されている。そのため地下ダム建設に並行して雨水をダム外へ逃がす排水路の工事が進められている。底原排水トンネルはその排水路となる延長 983 m の矢板工法による小断面水路トンネルである。

本トンネルは琉球石灰岩層、土被り約 10 m 内を掘削する。地質縦断面図に示す棒状コア石灰岩（水色）は非常に硬質で RQD も 100% に近い。しかし、トンネル後半の礫状コア石灰岩（オレンジ色）は雨水による浸食を受け、節理が発達し、鍾乳洞または亀裂が多く存在する層となっている（図-1）。また、その鍾乳洞、亀裂の内部に地下水と共に流入し、堆積した軟弱粘土（以下、流入粘土）

## § 1. はじめに

沖縄県宮古島市は沖縄本島から南西に 300 km の場所に位置し、総面積は 159 km<sup>2</sup> の離島である。この島は琉球層群琉球石灰岩（以下、「琉球石灰岩」と称す）に覆われた地形であり、その琉球石灰岩部では大小様々な鍾乳洞が多く確認されている。トンネル掘削に先駆けて行った空洞調査ボーリングおよび軟弱地盤対策の事例について報告する。

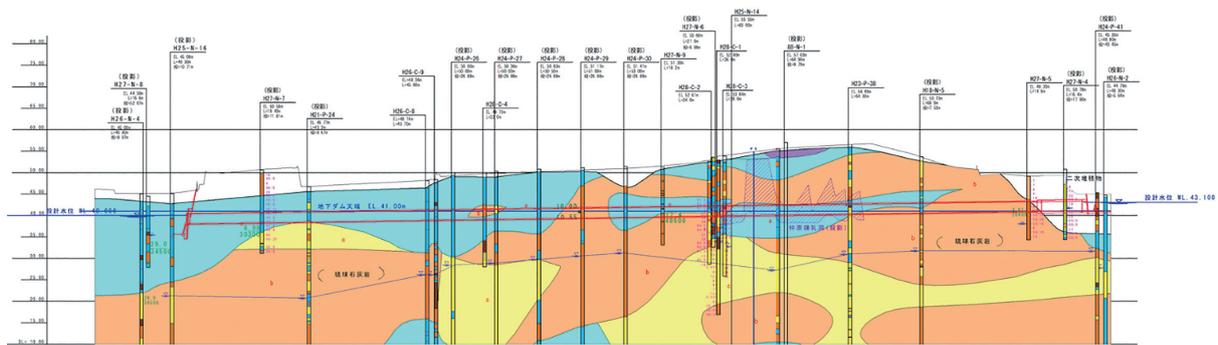


図-1 地質縦断面図

\*九州（支）底原トンネル（出）

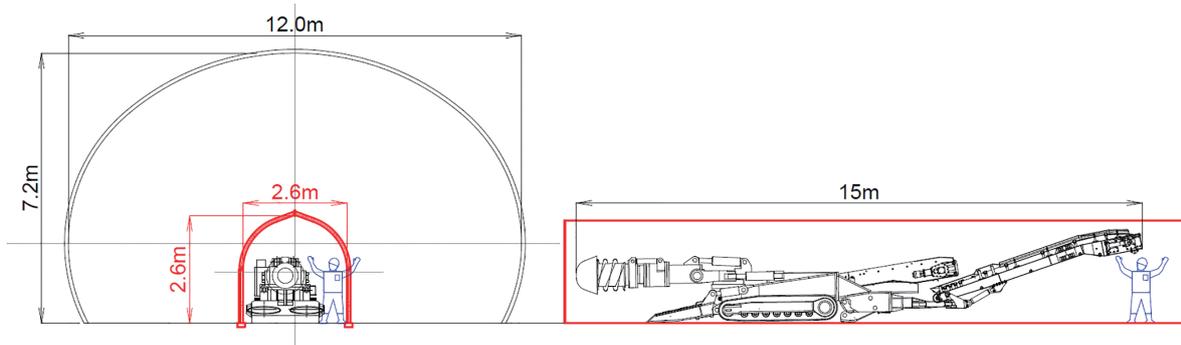


図-2 底原トンネル標準断面図, 100 kW 級自由断面掘削機 : 32 t

が堆積している箇所も既往の地質調査で確認されている(写真-1, 2)。しかし、既往の地下ダム工事における地質調査などは地表からの鉛直ボーリングの結果から得られたものであり、点としての空洞や流入粘土の深さは確認できるものの、方向や面的な広がり把握することは非常に困難である。

掘削中にトンネルに空洞や流入粘土が出現するパターンは大きく分けて上部(天端)、前方(切羽)、下部(底盤)3つに分かれる。天端、切羽に出現した場合は、トンネル掘削による新たな荷重は作用せず、空洞自体は既に自立した状態で存在しているため内部の流入粘土の崩落はあれども空洞自体の更なる崩落は考えにくい。一方、底盤に空洞や流入粘土が出現した場合は底盤の崩落、陥没、支保工の支持力不足が懸念される。さらに底原トンネルは非常に狭小であるため、空洞に掘削機械(100 kW 級自由断面掘削機 : 32 t, 図-2)が沈んだ場合は使用可能重機に限られる坑内からの引上げは非常に困難となる。坑内からの復旧が出来ない場合は、地上部からの開削する等、工程の大幅変更の可能性も考えられた。よって、突発的な空洞出現によるトンネル掘削の安全確保、大規模な工法変更防止のためにトンネル工事に先駆けて事前空洞調査が必要とされた。



写真-1 既往地質調査コア

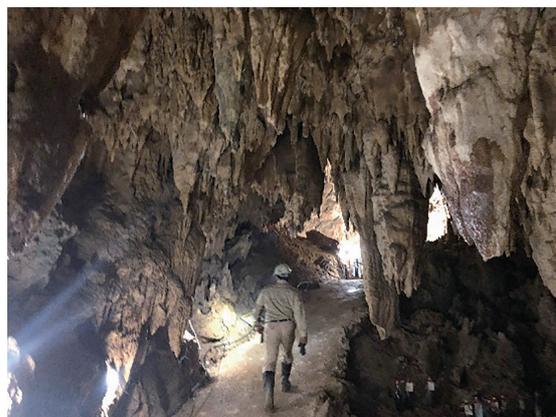


写真-2 仲原鍾乳洞

### §3. 水平ボーリング調査

トンネル工事工程に影響を与えず、トンネル掘削に先立ち、確実に空洞や空洞流入粘土の存在が確認できる調査として、φ 3.5 m の立坑(図-3)を約 200 m 間隔に6か所設置し、立坑内からトンネル線形に沿って水平ボーリング調査(総本数 : 13 本, 総延長 : 969.4 m, 最長 : 100 m, 図-4)を実施した。

立坑はオーガー併用ダウンザホールハンマー削孔により地盤をほぐしたのちにミニバックホウによる掘削、クラムシェルによる排土で施工した。水平ボーリングは油圧式ロータリー試錐機を使用してφ 66 mm のシングルまたはダブルコアチューブで施工した。調査深度については、トンネル掘削に対して危険性が高い底盤の空洞を調査対象とするため、トンネル掘削に伴う緩み荷重と掘削機の重量と、掘削による地山荷重の除荷の関係からト

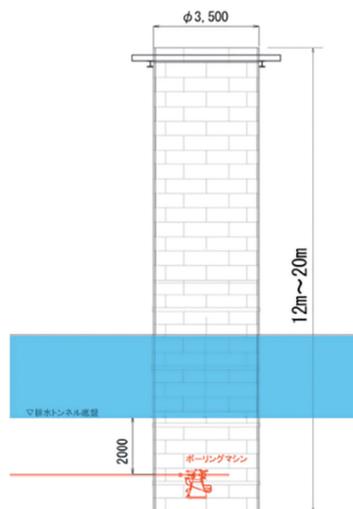


図-3 立坑図

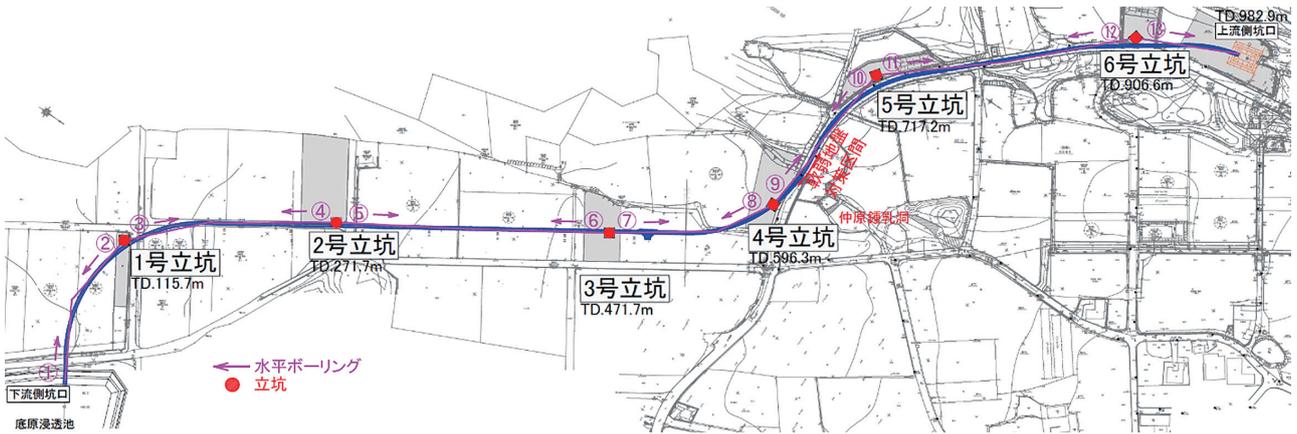
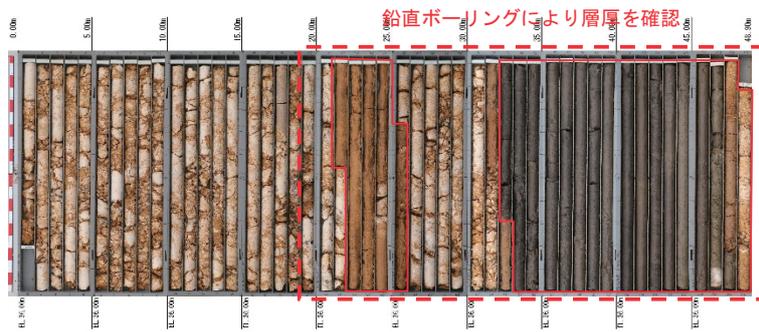


図-4 水平ボーリング位置図



暗褐色粘土部：4.2m      黒灰色粘土部：15.7m

図-5 水平ボーリングコア (図-4 ⑨：4号立坑上流側、48.9m)

ンネル底盤から下 2.0 m 位置に設定した。

調査結果から、ほとんどの調査で地質縦断面と同様の棒状、礫岩状のコアが採取されたが、仲原鍾乳洞近傍の4号立坑、5号立坑間においては大規模な流入粘土(暗褐色粘土部：4.2m、黒灰色粘土部：15.7m)が確認された(図-5)。

§ 4. 追加調査

4-1 鉛直ボーリング

発見された大規模な流入粘土の鉛直方向の層厚を調べるため、黒灰色部で3孔、暗褐色部で1孔の鉛直コアボーリングを実施した(図-6)。

実施した結果、黒灰色水平分布部のトンネル底盤以深の厚みは15m以上、トンネル上部においても2m程度の層が確認された。暗褐色水平分布部においてもトンネル底盤以深に15mの薄層の石灰岩を挟む粘土層が確認され、トンネル上には空洞も発見された(図-7, 8)。調査結果を確認すると、粘土層のN値=0~1であり、各孔から採取したコアを用いたX線回折分析結果から、島尻泥岩特有の鉱物は検出されなかったことから、粘土層は表層からの流入粘土であるであると判定した。

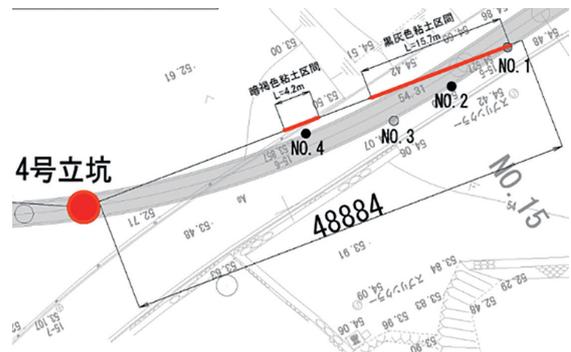


図-6 鉛直ボーリング位置図

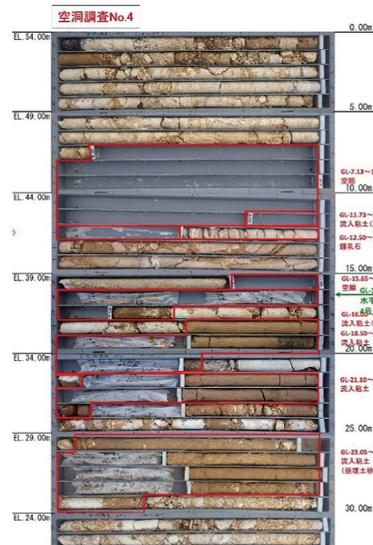


図-7 鉛直ボーリングコア (No.4)

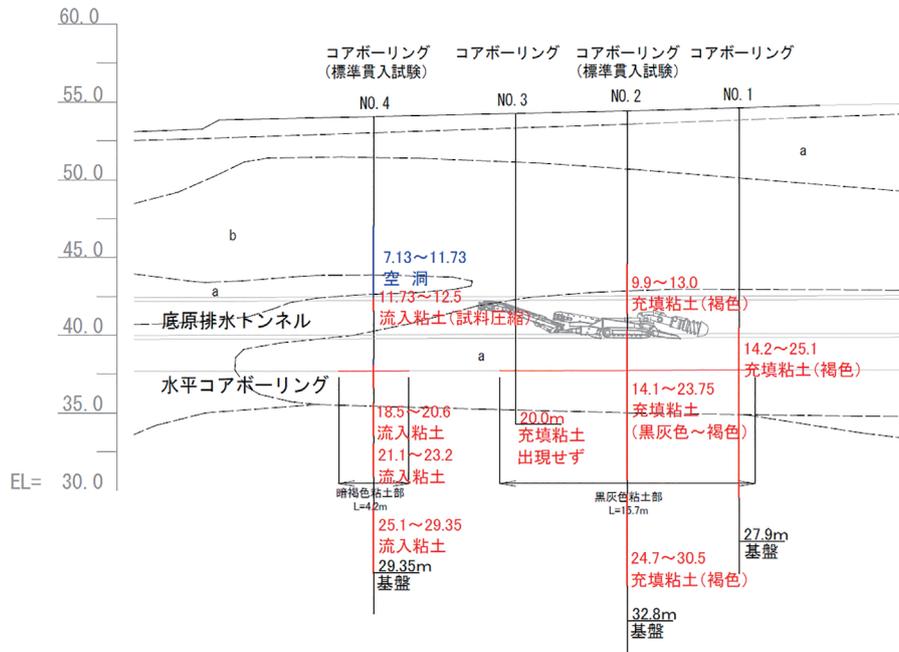


図-8 鉛直ボーリング結果

4-2 ボアホールカメラ

発見された空洞に対しては、鉛直ボーリング孔からボアホールカメラを挿入し、空洞調査を行った。しかし、ボアホールカメラの撮影では挿入孔近くの鍾乳石は視認できたが奥行き、全体像は全く分からなかった(写真-3)。これにより、発見された空洞は水平方向に広く、光源が弱いカメラでの調査は難しいことが分かった。

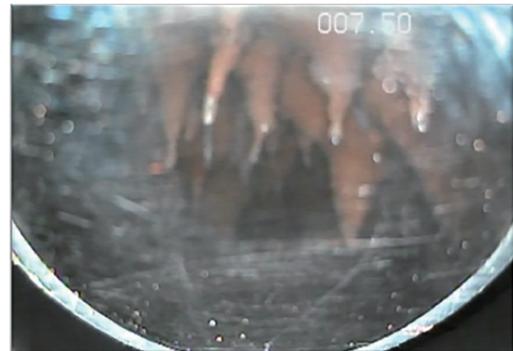


写真-3 ボアホールカメラ

4-3 リモート空洞測定システム

そこで、リモート空洞測定システム(Carlson C-ALS, 写真-4)による計測を実施した。これは鉛直ボーリング孔(φ66)に挿入でき、レーザー部分が垂直、水平に回転するため天井部を含め全方位150mまでの3Dスキャンが可能である。調査はレーザー部とそれを取り付けたロッドを鉛直ボーリング内へ挿入していき、空洞の中間高さ付近でレーザー部を1回転させるだけの約30分で空洞全体の性状や明確な位置を確認することができた。これにより空洞はトンネル縦断方向4m、横断方向18m、鉛直方向6m程度の規模であり、空洞下部とトンネル上半部が交差することが判明した(図-9)。

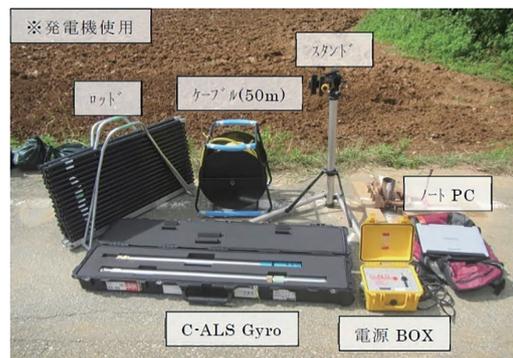


写真-4 Carlson C-ALS

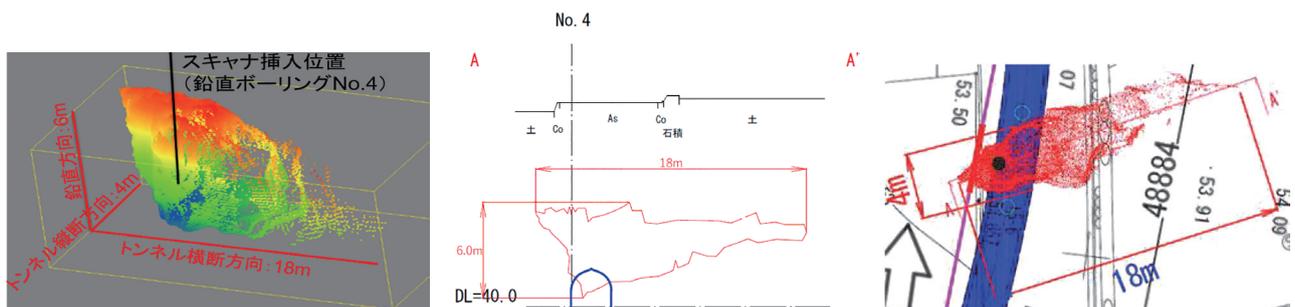


図-9 空洞測定結果 (左: 3D点群データ, 中: 横断図, 右: 平面図)

§5. 対策工

5-1 軟弱地盤対策工

事前調査及び追加調査により、トンネル掘削断面と軟弱地盤および空洞との位置関係が明らかとなった。これらの情報を元に、軟弱地盤対策工として3案(①地上からの改良 ②トンネル坑内からの改良 ③トンネル迂回)を検討した。「①地上からの改良」は仮設備が大規模となり、一般道の通行止めが発生するため迂回道路の確保など、施工前および施工に時間を要す。また、トンネル到達前に対策工を完了させることは工程的に非常に厳しく費用も3案の中では一番高価となる。「③トンネル迂回」についても迂回したルートに別の空洞が存在する可能性があり、立坑を増築して再度水平コアボーリング調査を実施する必要があることから調査に多くの日数が必要である。また、現ルートより規模の大きい軟弱地盤や空洞が確認される可能性もある。一方、「②トンネル坑内からの改良」は施工サイクル毎に切羽前方の地山を確認できることから、確実に地山改良効果を確認しながら施工を進めることが可能である。また、費用も最も安価となることが分かった。以上より、「②トンネル坑内からの改良案」を採用した。具体的なトンネル坑内からの軟弱地盤対策工として、トンネル縦断方向への変位による不等沈下やひび割れ等の変状に対してD2への支保工のランクアップ、支保工の沈下を想定して100mmの上げ越し、空洞部手前から地山改良のため全周注入式フォアボーリング、路盤沈下防止のために重量の小さい掘削機械へ変更、強化型プラスチック敷板の設置、機械通過後には路盤置換を実施した(図-10)。なお、多数の注入式

フォアボーリングの施工効率向上のため、施工は1ブームミニジャンボにより実施した。

路盤置換についてはトンネル掘削中に切羽から出現した暗褐色粘土部、黒灰色粘土部のそれぞれから試料を採取し、物性を把握するために三軸強度試験を実施した。その試験結果を基に「置換え厚さ」を検討した結果、 $t=200\text{ mm}$ 以上必要なことが判明した。ただし、重機のこね返しや移動時の衝撃荷重、ダンプトラックによる繰り返し荷重の影響やロードヘッダ(32t)が沈下した場合の復旧の長期化による工程の圧迫を回避し、確実な施工を行うため現場における置換え厚さの管理は $t=300\text{ mm}$ 以上とした。また、長期的な沈下(圧密)については当該区間施工時点で判断することが困難であることから、鋼製支保工の天端高さを経時的に測定し、その結果により恒久的な対策の有無を判断することとした。

掘削を進めると空洞測定で判明した通りに空洞と交差し、内部もリモート空洞計測通りの規模であることが確認できた(写真-5)。空洞下部においても鉛直ボーリング結果の通りに流入粘土の層が確認された。また、空洞部に達したフォアボーリングには注入は行わず、空洞内に入ってから地山箇所のみ注入式フォアボーリングを施工した。

対策工により該当区間の掘削中の大きな変位、地盤沈下はなく、軟弱地盤区間通過後に入れ替えた100kW級自由断面掘削機(ロードヘッダ)も通過可能であった。また、長期的な粘性土の(圧密)については約1年経過後も天端高さの変化はなかったことから、恒久的な対策は必要ないと判定した。

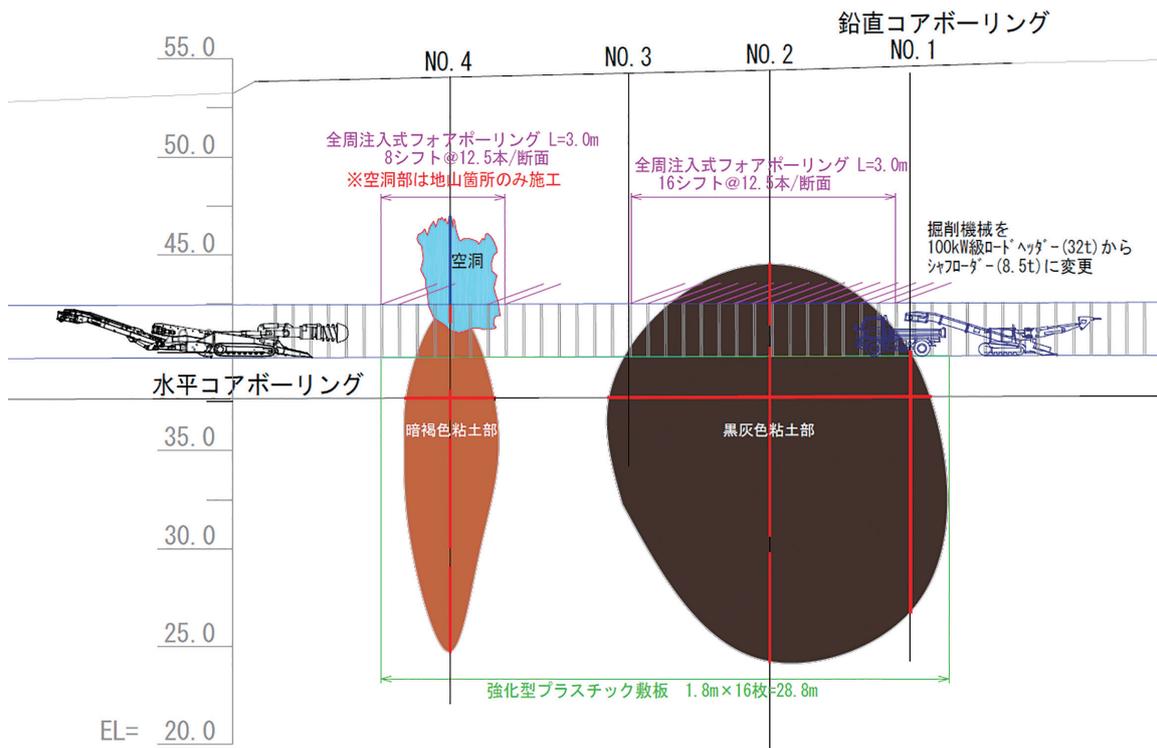
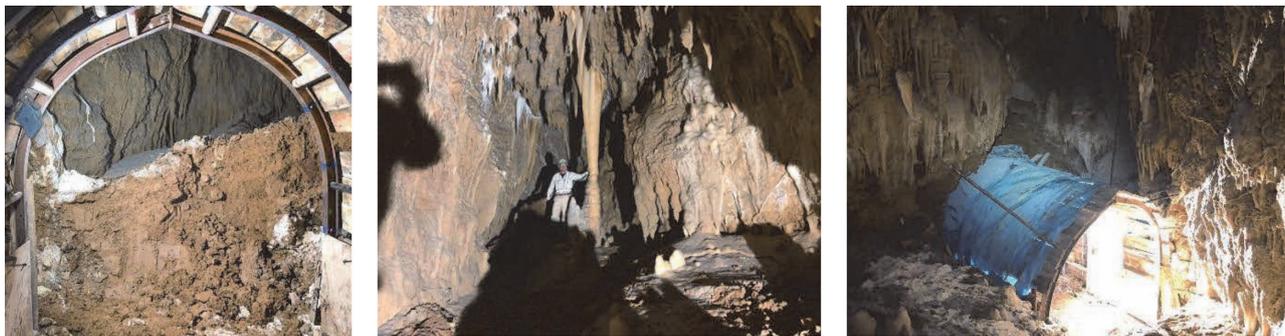
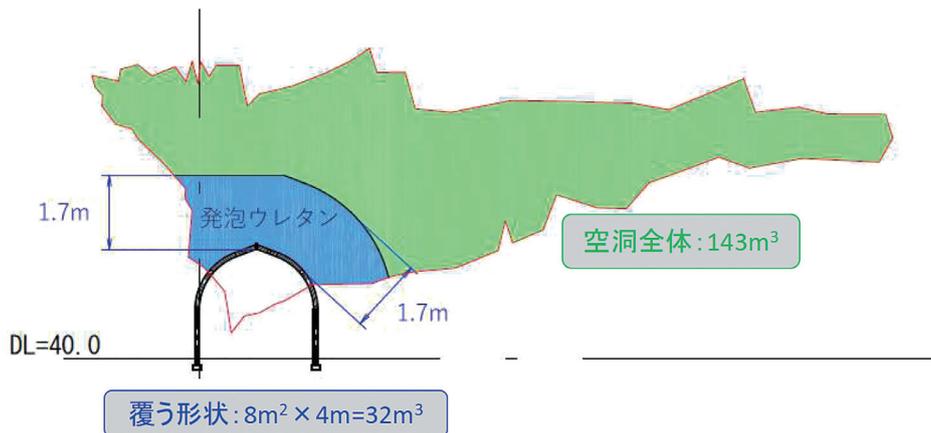


図-10 軟弱地盤対策工図



写真—5 空洞内部



図—11 空洞対策工図

5—2 空洞対策工

空洞部については鍾乳洞化している空洞であるため、トンネル掘削による新たな緩み土圧は発生しないと考えられる。しかしながら、覆工背面に空洞を存置した場合は覆工背面地山の風化要因となる。また、掘削中においても掘削機械の振動や風化による浸食により岩盤の落下の危険性が考えられる。当該区間を安全に通過するには、先行して空隙を充填、天端部分を形成したのちに掘削することが望ましいと考えられる。したがって、切羽が空洞を通過した直後に注入を実施した。

注入材は「若鈴コンサルタンツ(株)；令和元年度 宮古伊良部農業水利事業 仲原地下ダム底原排水トンネル補足検討業務 報告書」に基づき、強度 1 MPa 以上の高発泡ウレタン (12 倍) を使用した。充填範囲については空洞全体を坑内から充填するには困難であり、コストも高くなるため、必要最小限の範囲で充填することとした。最小限の範囲となるよう、充填材厚はディーブームの考え方を用いて検討した。ここでトンネル掘削幅を梁として想定し、「充填材厚さ」が「トンネル掘削幅」の 1/2 以上となるように設定したところ、1.7 m となった。これにより充填範囲は、鋼製支保工外縁より 1.7 m の厚さでトンネルを覆う形状とした (図—11)。

空洞充填については想定量の 32 m<sup>3</sup> (実注入量 31 m<sup>3</sup>) を 3 本に分け注入した。充填を行った後、ミニジャンボでトンネル周方向に対して垂直に削孔し、層厚 1.7 m の確認を行った。

§ 6. おわりに

空洞を発見した 5 月初旬から当該区間施工の 10 月下旬までの約 6 ヶ月間に、入念な事前調査で空洞形状や規模まで確認し、具体的な対策工および数量を検討した上での協議を行うことができた。そのため当該区間に到達してからの遅滞はなく、約 1 ヶ月で当該区間の施工を無事に終えることができた。

宮古島は、資機材の運搬が九州からでも船便で 1 週間かかり、台風等の場合はさらに 1 週間遅延する。沖縄本島からさらに離島の宮古島という地域特性を持つ僻地・離島環境において、最も重要なことは資機材を遅延することなく調達することであると感じた。今回の空洞が事前調査無く出現していたら、掘削を停止して対策を検討し、施工計画が必要となり、工期を圧迫したと考えられる。また、小断面トンネル内の狭小な空間で施工可能な対策についても検討できたことで、事前に必要な資機材を準備することができた。今回の空洞は空洞下部とトンネルが交差していたことが事前調査によって確認できたため対策工が計画できたが、空洞との交差関係が不明な場合は、具体的な計画もできないと考えられる。以上のことから今回の事前調査による空洞の発見、事前協議は工期圧迫の回避に十分に役割を果たしたと考える。

本報告が空洞多数地域での一例として、また類似事例の施工の一助となれば幸いである。