

琉球石灰岩層に海水取水管路を築造 —アルティミット工法—



ひが さとし
比嘉 聡

座波建設(株)工務部



とくやま かずお
徳山 和男

(株)東京久栄エンジニアリング部



ふじはら としゆき
藤原 敏之

機動建設工業(株)九州支店

1 はじめに

本工事は、沖縄科学技術大学院大学の恩納村瀬良垣に位置する臨海実験施設に海水を供給する取水施設の取水方法・取水深度を変更するために、新たな取水管路を呼び径1000の推進管を使用して泥水式推進工法で築造するものです。

推進線形は平面方向には直線ですが、縦断方向には10.0%の下り勾配で発進し、VR=up500mの縦断曲線を経て0.5%の下り勾配で到達します。対象土質は岩盤であり、発進と到達の高低差は13.85m、到達部ではH.W.Lから換算すると管芯高さで0.25MPaの水圧が作用する条件となります。

本稿では、岩盤および海底推進と海底到達について報告させていただきます。

2 工事の概要

工 事 名：沖縄科学技術大学院大学
臨海実験施設・取水機能増強整備事業
工事場所：沖縄県国頭郡恩納村字瀬良垣地区
(瀬良垣漁港内)
発 注 者：学校法人沖縄科学技術大学院
大学学園
施 工 者：座波建設株式会社

協力業者：(株)東京久栄（海中工事担当）

機動建設工業(株)（推進工事担当）

工 法：アルティミット工法泥水式

管呼び径：1000

管 種：推進工法用鉄筋コンクリート管

50N2種 L=2.43m

内水圧0.4MPa 外水圧0.4MPa

推進延長：204.503m

曲 線：VR=up500m CL=47.334m

土 被 り：10.95m（陸上）～2.51m（海底）

土 質：琉球石灰岩

最大一軸圧縮強度70.1MPa

発進立坑：鋼矢板 IV型

L：7.6m×B：4.8m×H：12.5m

到達立坑：海底ピット

施工期間：2019年12月5日～2020年4月30日

（推進工のみ）

3 本工事での検討事項

本工事では、事前に考えられる課題を抽出し、入念に対策を検討しました。

以下にその内容を記述します。

3.1 縦断線形の検討

当初計画では縦断曲線を設けない6.8%の下り勾配と

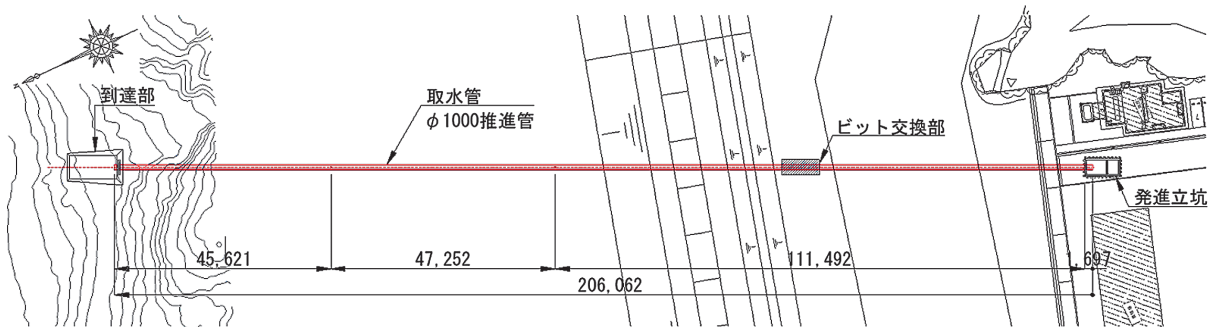


図-1 施工平面図

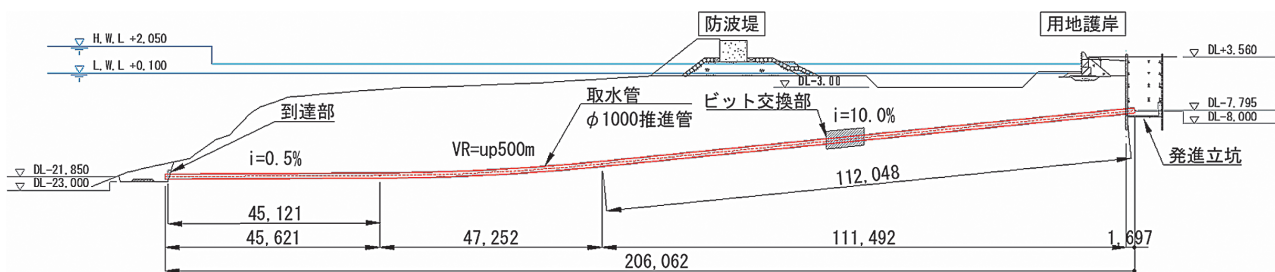


図-2 施工縦断面図

なっていました。この線形では琉球石灰岩層の上部にある砂礫層（礫率最大で50%超、透水係数 10^4 m/sオーダー）が一部区間において掘進断面に露出し、半岩半土となります。この状態での掘進における懸念事項としては、次の事項が考えられます。

- ①上部層の取込過多の発生
- ②岩線に乗り上げての精度不良の発生

そこで、発進高さおよび到達高さを変更せずに半岩半土を避けるように線形変更の検討を行いました。その結果、掘削対象土質が琉球石灰岩になるよう、発進側の下り勾配を10.0%として、その後は縦断曲線を設けてゆっくり勾配を戻して最終は0.5%の下り勾配としました（図-1、2に変更後の線形を示す）。

3.2 掘進機の選定

ボーリング調査は陸上1箇所と海上3箇所の合わせて4箇所実施され、各位置での一軸圧縮強度の試験結果は表-1のとおりです。

試験結果をもとに、掘進機選定の条件を次のように考えました。

- ①ローラビットによる掘削軌跡を全断面確保するための配置を考慮した面板構造であること

表-1 一軸圧縮試験結果一覧

測点	Bor.No.	土質	qu 値 平均 (MPa)	PQD (%)
発進側	B-4	琉球石灰岩	34.1	90
発進+59m	B-3	琉球石灰岩	39.2	95
中間付近	B-2	琉球石灰岩	31.2	80
到達側	B-1	琉球石灰岩	56.8	75

- ②一軸圧縮強度からは外周ローラビットについて交換が1回必要と判断するが、推進区間のほぼ全てが海底下のため機内からのビット交換が可能であること

検討した結果、掘進機隔壁にハッチを設けた機内ビット交換型掘進機であるDHL機を選定しました（図-3）。

3.3 ビット交換位置の検討

外周ローラビットについては交換が1回必要と判断しましたが、問題はどの位置で交換するかでした。アルティミット工法の基準では、一軸圧縮強度から推進延長170m以内での交換となります。推進延長が204.5mであること、到達側の一軸圧縮強度が他よりも高いことを考慮すれば、中間地点ではなく170m付近でのビット交換が望ましいと考えました。しかし、防波堤より外に出れば波が

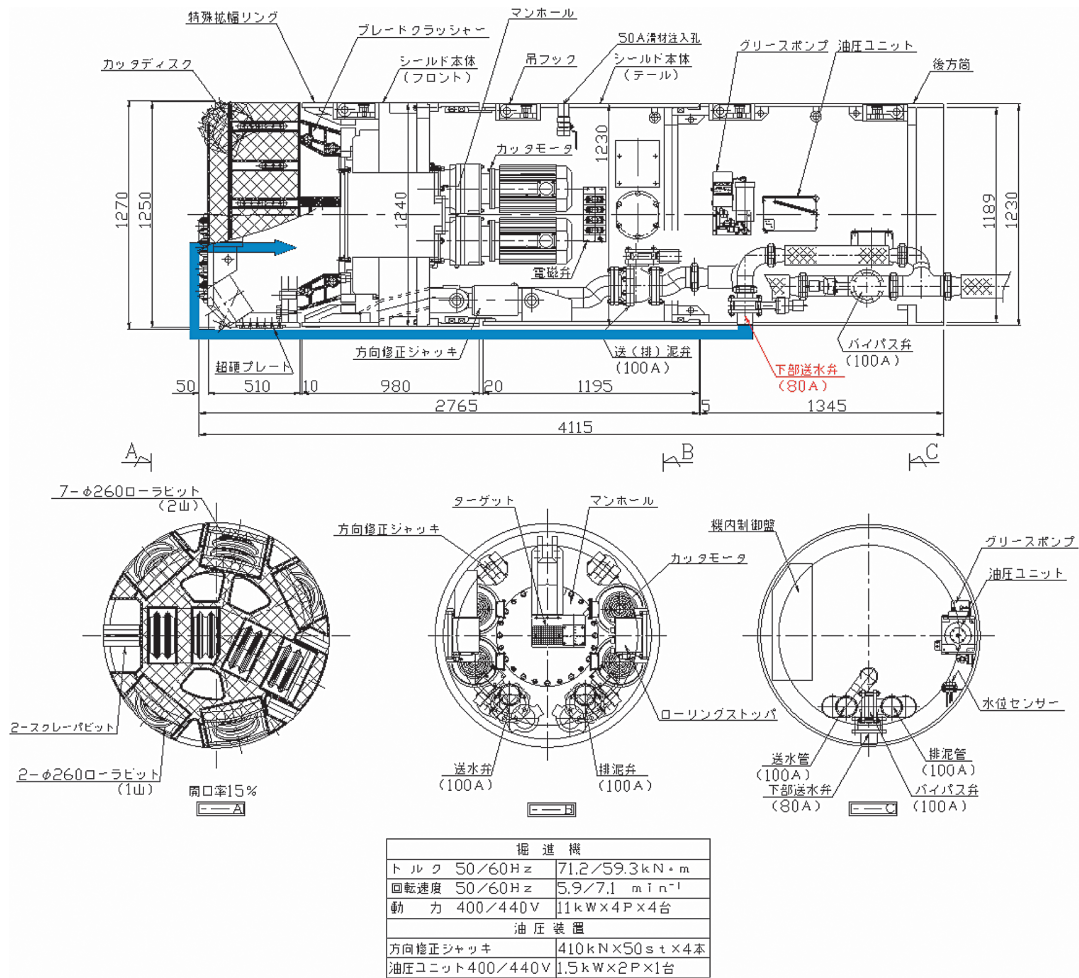


図-3 機内ビット交換型掘進機

高く海上での地盤改良が難しいと判断、また防波堤より内ではダイビング等に出て行く船の航路が設けられていることから、防波堤と航路の間の推進延長約60mの位置に設定しました（写真-1）。

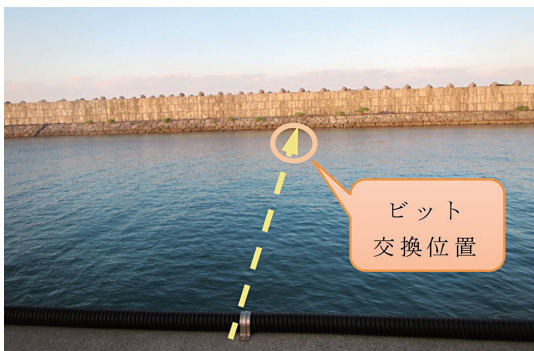


写真-1 管路部海上（発進→到達）
※奥に見えるのが防波堤

地盤改良工法は薬液注入（複相式）、改良範囲については一般社団法人日本グラウト協会発行の「薬液注入工 設計資料」に基づいて検討を行いました。

3.4 岩盤層における掘進

本工事における岩盤層掘進の課題を次のとおりと考え、それぞれの対策を講じました。

- ①琉球石灰岩の泥土化による面板閉塞
- ②切粉による周面抵抗力の上昇
- ③ローリング対策
- ④過度な押付によるビット摩耗の促進

【対策1】

当社において琉球石灰岩の施工実績はありませんでしたが、コア写真を確認すると泥土化する可能性はゼロではないと考えました（写真-2）。

掘進機は機内ビット交換型のため箱型面板で泥土化



写真-2 琉球石灰岩（到達部）

した土砂が堆積しやすい構造のため、外周部からの洗浄機構を設けました。図-3における後方筒下部の「下部送水弁（80A）」がこれに該当します。外周部から泥水を送りチャンバー部の取込口から排泥水として回収することで、切羽面に泥水を循環させて面板を洗浄します（図-3の青色ハッチ部）。

【対策2】

アルティミット工法では近年岩盤推進に積極的に取り組んでいますが、直近の岩盤推進施工現場において切粉による周面抵抗力の上昇事象が発生しました。この事象は作業手順により回避できると判明したこともあり、作業手順の周知徹底を行いました。

【対策3】

掘進機はカットトルクと回転数ともに高仕様であるため、当然ローリングしやすくなります。アルティミット工法では岩盤曲線推進の場合、ローラビットにより回転反力を得ることのできるアルティミットローリング防止筒（U-ARC）を掘進機後方に配置します。しかしながら、本工事は海中からの掘進機回収であるためローラ押し部に水密性の問題が生じることを懸念し、U-ARCの使用ではなく後続推進管との緊結による対応としました。

【対策4】

ローラビット内部のベアリングには許容耐荷力が設定されており、先端抵抗力が高いとベアリングを破損させてしまう可能性があります。先端抵抗力を把握するにはラスト荷重計の装備が理想ですが、今回使用する掘進機には装備されていないため中折れ部に配置した計測用ジャッキにより先端抵抗力を推察し、過度な押付を防止する対策としました。

3.5 海底下における掘進

管路は海底下であることから、地下水に塩分が含まれている可能性が高く、その影響により滑材が希釈劣化され周面抵抗力低減効果の減少が懸念されました。そこで、一次滑材として超高粘性で海水など地下水に塩分が含まれている場合でも影響を受けにくい流動性滑材「アルティークレイ」（2液型）を、二次滑材として高吸水性樹脂を含有しており透水係数の高い地盤でも逸散することなく滑材効果を維持することができる高粘性滑材「アルティーK」（1液型）を採用しました。

また、二次滑材の注入システムとして集中制御で掘進速度に合わせて自動で滑材注入を行うことができるアルティミット滑材注入システム「ULIS」を採用しました。

3.6 海中からの掘進機回収

海中での切離し設備は、施工実績のあるアルティミット工法独自の切離し設備筒を採用しました。この切離し設備筒は、掘進機側の第1隔壁筒と推進管側の第2隔壁筒で構成され、それぞれの隔壁筒には水密扉を設けています。

海中での切離しは、掘進機と第1隔壁筒を接続した状態で第1隔壁筒と第2隔壁筒の間の空間を海水で満たした後、第1隔壁筒と第2隔壁筒を切離し、第2隔壁筒は推進管内注水後に推進管と切離します。各切離し作業はそれぞれの隔壁筒内に配置した油圧ジャッキにて行います。掘進機と第1隔壁筒切離しのジャッキ操作は推進管内から、第2隔壁筒切離しは起重機船上からの操作となります。各切離し作業における潜水士の海中作業は、吊り上げ回収のための玉掛け作業、第2隔壁筒切離し時の油圧ホースの接続および推進管内への注水（バルブ開）、また切離し時の確認作業のみとなります。

以下に切離し設備筒の写真と切離し設備筒全体図を示します（図-4、写真-3～5）。

4 施工報告

4.1 岩盤層における掘進

初期掘進は掘進機のローリング、カットトルク電流値と推進速度の調整、先端抵抗力計測用ジャッキ圧力の確認、そして切粉による周面抵抗力の上昇を防止するた

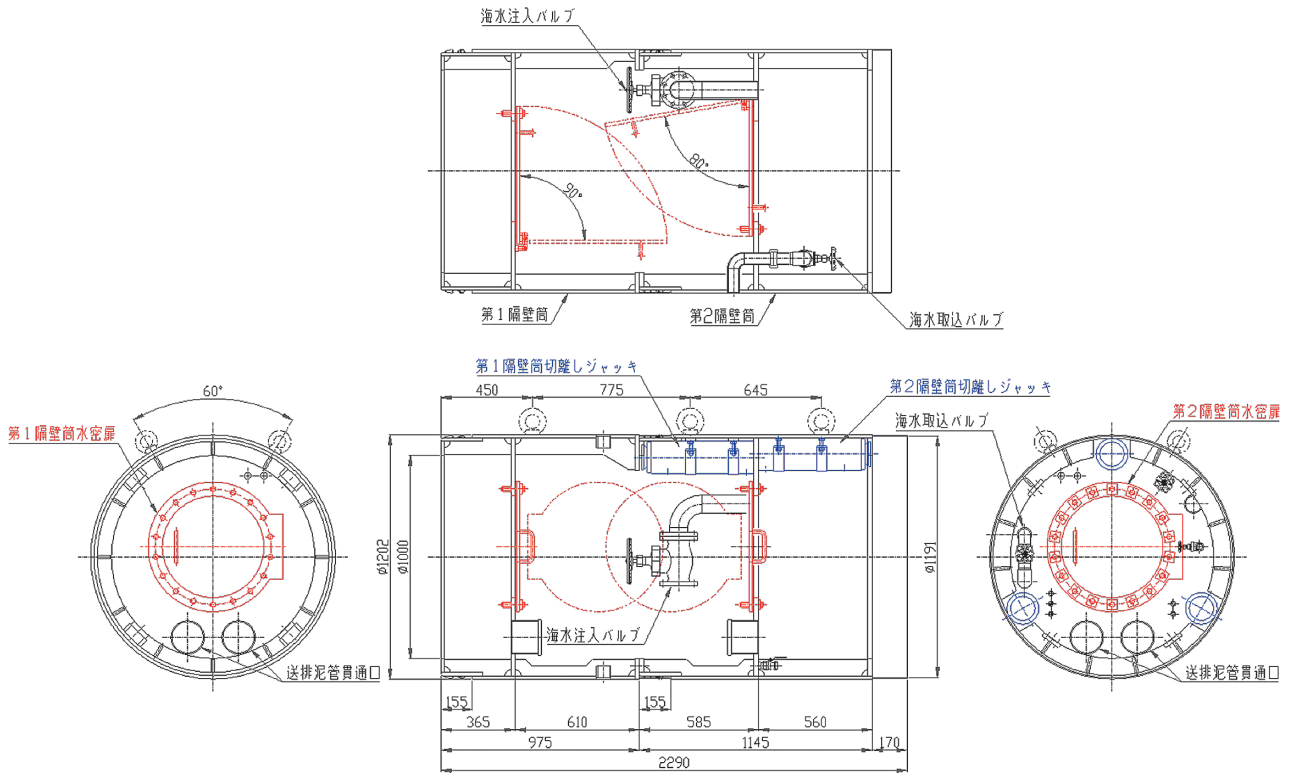


図-4 切離し設備筒 全体図



写真-3 切離し設備筒



写真-4 切離し設備筒（掘進機側）



写真-5 切離し設備筒（推進管側）

めテールボイドの充填作業を実施しながらの慎重な作業となりました。当初は推進速度を抑えていましたが、カットルク電流値と推進力、また想定先端抵抗力も落ち着いていたことから徐々に推進速度を上げていきましたが、その後も安定した掘進状況を維持することができました。

掘削土砂の泥土化による面板閉塞に対しては、上述したように安定した掘進状況を維持できたこともあり、検討時に懸念したような状態は発生しませんでした（写真-6）。



写真-6 琉球石灰岩 排土状況

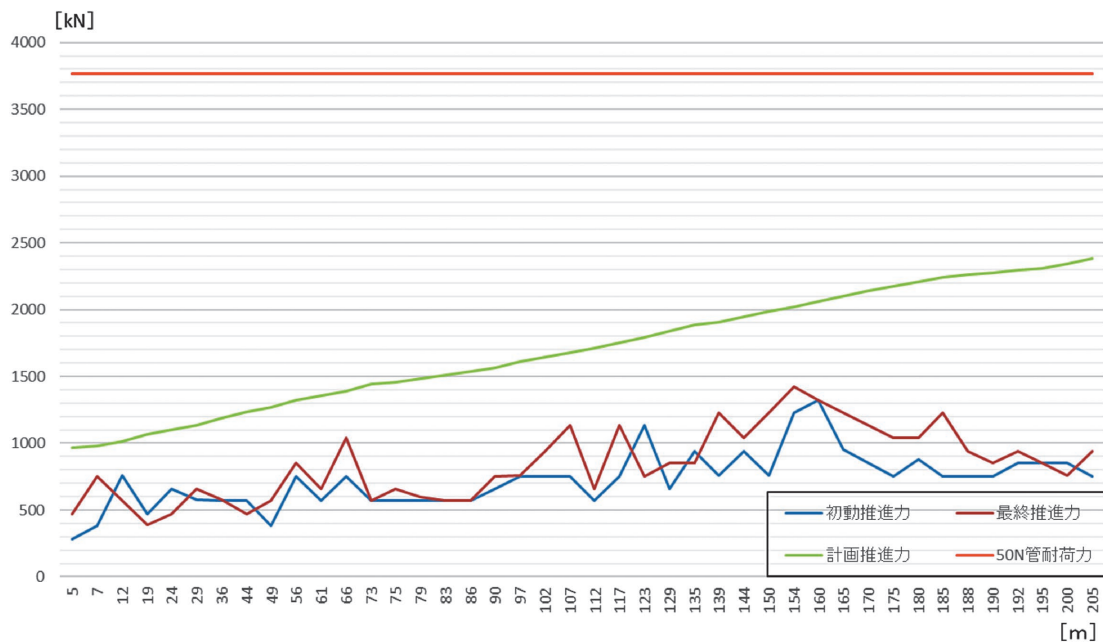


図-5 推進力管理グラフ

順調に掘進作業を継続していましたが、推進延長110m付近で不思議な現象が発生しました。掘進状態としては、カットルック電流値が無負荷の状態となり、ピッチングは下がり傾向、また逸泥も発生し一次処理機から排出される掘削残土も少ないというものでした。当初は土質が軟らかい層に変化したのだと判断し、泥水の粘性を高くし推進速度も上げて掘進作業を継続しました。しかし、その後もカットルック電流値が若干上がる場合もあるものの無負荷状態が続き逸泥も発生、掘削残土も徐々にほぼ排出されない状態となりました。また、50cm程度掘進すると調整槽の泥水が海水に変わっているという状況になりました。これらの状況から土質の変化によるものではないと判断し、万一を考え掘進機の注入孔から切羽にアルティークレイを注入しましたが、切羽圧に変化は見られませんでした。ここで、一連の事象から空洞に突入していると考えました。このままの状態を掘進を続ければ、掘進機が瞬時にローリングすることが懸念されたため、後続推進管との緊結状態を確認し、掘進機の姿勢を管理しながら慎重に掘進作業を継続しました。結果として、事象が発生してから約3mの地点からカットルック電流値の上昇が始まり、掘削残土の排出量も徐々に増え始めました。推進精度は鉛直方向で多少の下降はありましたが、許容値内で収めることができました。

岩盤ではまれに空洞があり、代表的な例として琉球石灰岩の鍾乳洞であるというのは、過去に文献で読んだ記憶があります。その際は想像できませんでしたが、今回の事象を経験し実感することができました。

4.2 海底下における掘進

施工前の検討では周面抵抗力の上昇による推進力の増大を懸念していましたが、初期掘進時から初動推進力と最終推進力ともに計画推進力を上回ることなく推移しました。その要因としては、岩盤対策にもありました切粉流入を防止するためのテールボイドの充填作業、地下水の塩分による影響を考慮した選定滑材の使用、ULISによる計画的な滑材注入の効果と考えます。最大推進力は初動で1,323kN(計画の65%)、最終で1,421kN(計画の70%)となり共に推進延長が約154mでの値となりました。

到達時の推進力は941kNで計画の40%の結果となりました。全体の推進力の推移は図-5に示す推進力管理グラフのとおりです。

また、到達部は立坑ではなく海底に直接到達のため海底土被りが徐々に小さくなる形状であり、泥水の噴発を懸念しましたが、噴発することなく到達部のモルタル壁に達し切削も順調に進み到達させることができました(写真-7)。



写真-7 掘進機到達状況

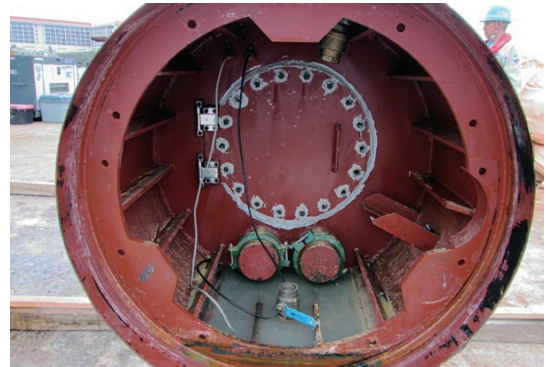


写真-9 第1隔壁筒切離し面



写真-8 掘進機+第1隔壁筒回収完了



写真-10 第2隔壁筒回収状況

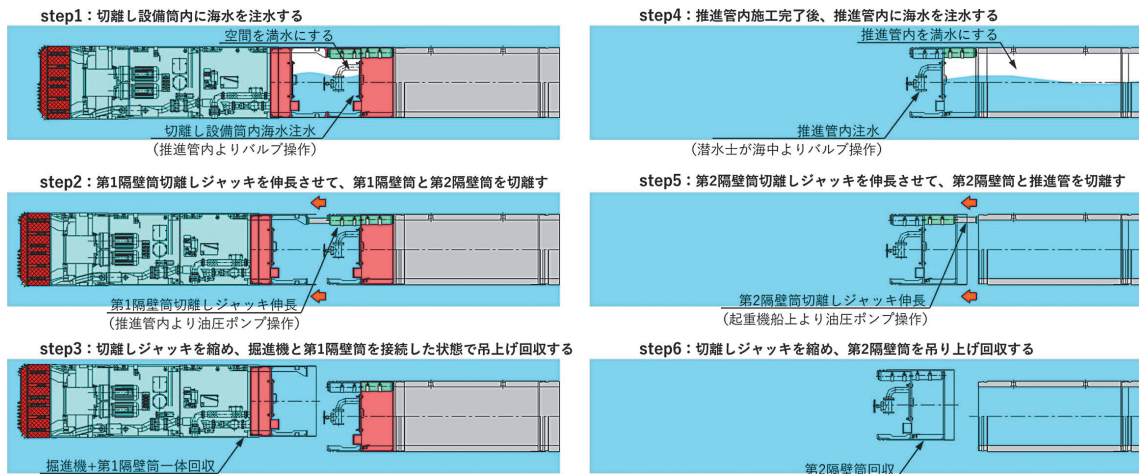


図-6 掘進機海中切離し回収フロー図

4.3 海中からの掘進機回収

掘進機を所定の位置まで押し出した後、切離し設備筒内への試験注水を実施し機内カメラによって掘進機側への漏水が無いこと、また目視で推進管側への漏水が無いことを確認しました。

なお、切離し設備筒については工場検査においてコ

ンプレッサーによる内圧をかけ、耐圧試験を実施しています。

今回の海中作業では視界が良好なため水中カメラをセットし、起重機船上で作業状況を確認しながら潜水士の方に指示を出すことができました。また、今回の施工条件では潜水士の潜水時間は50分、減圧時間は20分

のサイクルでした。

第1隔壁筒と第2隔壁筒の切離し作業は順調に進み、潜水班第1班が潜水を開始してから掘進機と第1隔壁筒を起重機船上に仮置きするまでの一連の作業は、2時間程度で終了しました。起重機船上に掘進機を仮置きした後、第1隔壁筒の水密扉を開けて掘進機内への浸水が無いことを確認しました（写真-8、9）。

第2隔壁筒の切離し回収は、掘進機回収から9日後に作業を実施しました（写真-10）。

切離し設備筒内にはさまざまな設備と部材が必要となります。今回は施工実績の中でも最小となる呼び径1000ということもあり、設備等の配置について製作サイドの方からは頭を痛めたと言いました。この点については、今後の課題として検討していきたいと考えています。

切離し設備筒内への海水注水から第2隔壁筒の切離し回収までの作業フローを、図-6に示します。

5 おわりに

今回の工事は海底下での岩盤推進、海中での掘進機切離し回収と難しい条件となりましたが、推進施工および海中施工において計画段階から細部にわたって検討を繰り返したことで無事に完了させることができました。ご協力いただいた関係者の皆様には、この場をお借りしてお礼申し上げます。

また、近年積極的に取り組んでいる岩盤推進においても、空洞による騒動はありましたが、安定した掘進状況を維持し良好な結果を得ることができました。

今後も海水資源を利用するための取水管路築造方法として、推進工法が貢献できればと考えます。

○問い合わせ先

[機動建設工業(株)九州支店]

〒812-0892 福岡市博多区東那珂2-14-28

Tel : 092-472-0151 Fax : 092-481-2407

[機動建設工業(株)土木本部]

〒553-0003 大阪市福島区福島4-6-31 機動ビル

Tel : 06-6458-6183 Fax : 06-6454-0274

