

高品質・高精度の 海底シールドトンネル構築に向けた取り組み

阿部 聡¹・山崎 信一²・向井 昭弘³・高柳 哲⁴・渡邊 和英⁵・畠田 大規⁶

¹正会員 鹿島建設(株) 石狩湾新港放水設備JV事務所 (〒061-3283 北海道小樽市銭函5-192-1)
E-mail: abesat@kajima.com

²正会員 鹿島建設(株) 石狩湾新港放水設備JV事務所 (〒061-3283 北海道小樽市銭函5-192-1)
E-mail: nobukazu-yamazaki@kajima.com

³正会員 鹿島建設(株) 石狩湾新港放水設備JV事務所 (〒061-3283 北海道小樽市銭函5-192-1)
E-mail: a-mukai@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設(株) 横環南公田笠間トンネルJV事務所 (〒244-0842 神奈川県横浜市栄区飯島町28-6)
E-mail: takayanagi@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設(株) おながわまちづくりJV事務所 (〒986-2261 宮城県牡鹿郡女川町女川浜字新田9-1)
E-mail: watzukazu@kajima.com

⁶正会員 北海道電力(株) 石狩湾新港火力発電所建設所 (〒061-3283 北海道小樽市銭函5-192-1)
E-mail: H2010023@epmail.hepco.co.jp

北海道電力(株)石狩湾新港発電所新設工事では，復水器冷却水を防波堤外側の外洋に放出する放水設備を構築する．このうち，放水路トンネル工事は，掘削外径 $\phi 5.44\text{m}$ ，セグメント内径 $\phi 4.7\text{m}$ のシールドトンネルを泥水式シールド工法により施工し，海底下に沈設した放水口へ接続する極めて難易度の高い工事である．

海底到達する上で，品質管理精度の向上および安全管理の向上を目的とし，トンネル内作業の管理システムの構築やCIMの開発・導入による施工管理の省力化と3次元による品質管理，到達精度向上技術および新凍結工法などを積極的に採用した．本報告ではこれらの実績について報告する．

Key Words : Undersea shield tunnel, CIM(3D BIM System) for construction, New ground freezing method using CO₂, Pipe direction measuring system, Under high water pressure

1. はじめに

本事業は，北海道初のLNGを燃料とするコンバインドサイクル方式の火力発電所を石狩湾新港内に建設するもので，当工事では放水設備のうち，放水路立坑，放水路トンネル，放水口(以下，J管)の構築を担当する．

シールド工事の発進立坑として利用した放水路立坑では，国内初となる内面平滑型RCプレキャストブロック圧入工法による大断面・大深度施工を行った．到達部となる放水口は周辺海域に環境影響を与えず，かつ波浪の影響を受けない没水型鋼管矢板井筒工法により構築した．

掘削延長1,045mの放水路トンネルは，最大水圧約0.4MPaの海底下を掘削外径 $\phi 5.44\text{m}$ ，セグメント内径 $\phi 4.7\text{m}$ の泥水式シールド工法により築造した．海底到達する上で，安全性の向上と品質の確保を目的とし，トン

ネル作業の管理システムやCIM，到達位置探査技術および新工法であるCO₂凍結工法を積極的に取り入れることで，高精度・高品質な放水路トンネルを築造することができた．本文ではそれらの施工実績について報告する．



図-1 石狩湾新港放水設備工事概要図

2. 工事概要

(1) 地盤条件

図-2にトンネル縦断線形と通過土層の設計定数を示す。平成23年から平成26年までの計13地点の地質調査結果に基づき、土質縦断図を確定した。対象地域は比較的水平的成層であることから、線形は主に浮き上がりリスクのあるシルト混じり砂層(As1)、砂質粘土層(Ac1)を回避し、安定した堅固な洪積土層(Ds1、Ds2、Ds3)を通過する提案を行った。

(2) シールドマシン

表-1にシールドマシンの仕様、写真-1にシールドマシン全景を示す。本機は到達精度向上のためのチェックボーリング管と到達防護のための貼付凍結管を機内に設置している点が特徴である。

表-1 シールドマシンの仕様

本体寸法	外径	φ5440mm	伸長速度	50mm/min
	本体長	7265mm	カット回転速度	1.08min ⁻¹
スキンプレート	マシン長	7800mm	総推力	28800kN
	板厚	45mm	駆動制御	油圧クランチ駆動
テールクリアランス	材質	SM490A	形状保持装置	上下拡張式
				25mm
テールシール	ワイヤブラシ:2段 ウレコンシール:1段			
シールドジャッキ	推力	1200kN	ストローク	1950mm
	本数	24本	圧力	35Mpa



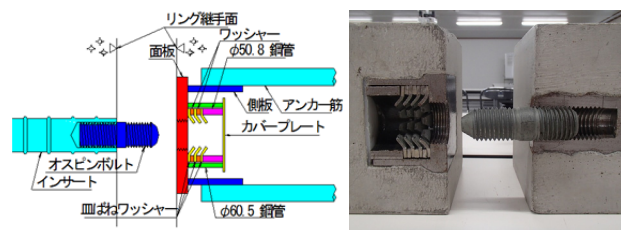
写真-1 シールドマシン全景

(3) セグメント

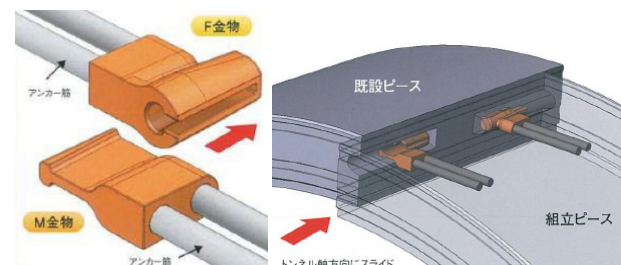
表-2にセグメントの仕様を示す。RCは鉄筋仕様の異なる2種類の内面平滑型セグメント(タイプⅠ、タイプⅡ)を適用した。さらに、北防波堤の上載荷重影響区間では、より耐力の大きいコンクリート中詰め鋼製セグメント(SSPC)を適用した。図-3に使用した継手構造を示す。セグメントは6等分割とし、「リング継手にはDS継手(RC・SSPC共通)」、「セグメント継手にはコーンコネクタ(RC)、M36ボルト継手(SSPC)」をそれぞれ採用した。

表-2 セグメントの仕様

種類	RCセグメント		コンクリート中詰め鋼製セグメント(SSPC)
	タイプⅠ	タイプⅡ	
	D19×4+D22×6	D22×4+D25×6	t16×4本主筋
セグメント継手	コーンコネクタD25型 ×2セット/継手		M36(10.9) ×4本/継手
リング継手	DS継手 M24×4セット/ピース		
セグメント概略図			



(a) DS継手



(b) コーンコネクタ継手

図-3 使用した継手構造

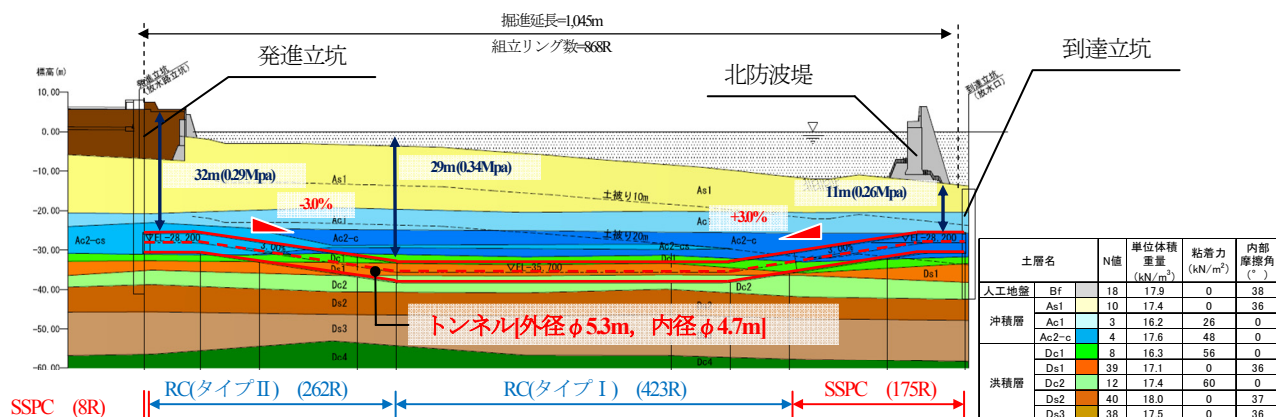


図-2 トンネル縦断線形と通過土層の設計定数

3. 坑内位置検知システムの導入

(1) 導入背景

トンネル工事では、中央管理室や各詰所から作業員およびバッテリーロコの所在がリアルタイムに把握・管理できないことに加えて、有事の際に作業員の適切な所在が分からないという問題点が存在する。また、坑内ではP2ポンプ等の騒音により緊急事態発生時の一斉通報が聞こえないリスクや、作業員の慣れによるバッテリーロコ接近の認識遅れ等の安全面での懸念が存在する。そこで、安全への取り組みの一環として、発進からマシン解体までの約8ヶ月の間、スマートフォンを活用したトンネル坑内位置検知システムを導入した¹⁾。

(2) 坑内位置検知システムの概要

図-4に位置検知システムのイメージ図を示す。本システムを有効化するために、地上各所とトンネル坑内100mごとにアクセスポイント(以下、AP)を設置し、現場内全域にWi-Fi環境を設けた。地上部では寒冷地仕様の-10℃まで対応できる耐環境用のAPを設置した。また、所持するスマートフォンは高耐久性かつ防水性のあるものとした。以下にその機能について述べる。

リアルタイムでの位置検知

管理端末、各スマートフォンからリアルタイムで作業員やバッテリーロコの所在地を検知することが可能なシステムである。図-5に中央管理室でのリアルタイム位置検知画面を示す。地上部では“防音ハウス内”や“中央管理室”といったエリアごとで検知するが、坑内では10m程度の誤差で坑口からの位置を把握することができる。

バッテリーロコと作業員の衝突防止

位置検知システムにより収集した位置情報を基に、入坑者とバッテリーロコの接近を判断して、両者に接近警報を出すシステムである。図-6にバッテリーロコ接近警報時の作動画面を示す。バッテリーロコからの閾値を100mとすることで進行方向に対して100m先の入坑者を

判断し、入坑者が所持しているスマートフォンおよびバッテリーロコに装備されているタブレットに音と振動で警報が発信される。なお、閾値は任意に設定が可能である。

緊急時一斉通報

有事の際にどの作業員からでも一斉通報を可能とするものであり、スマートフォンでの複雑な操作や手順なく警報を発報することが可能である。図-7に緊急時一斉通報概要図を示す。一斉通報には、避難勧告と救助要請の2機能が存在する。ここで発報された警報は全てのスマートフォン、中央管理室およびバッテリーロコに装備されているタブレットに通知することができる。図-8に緊急時一斉通報の作動画面を示す。それぞれの端末では緊急時一斉通報の内容と発報時刻、発報場所および通報者名が表示される仕組みになっている。

ガス検知連携

高精度ガス検知器等の外部システムで検出されたガス情報を事務所内の管理端末上でも監視することができ、警報発報時には各スマートフォンおよびバッテリーロコ搭載端末に一斉通報を行うことが可能である。通報内容としては発生場所とガスの種類が表示され、メタン発生土層の掘進中には非常に有効に働いた機能である。

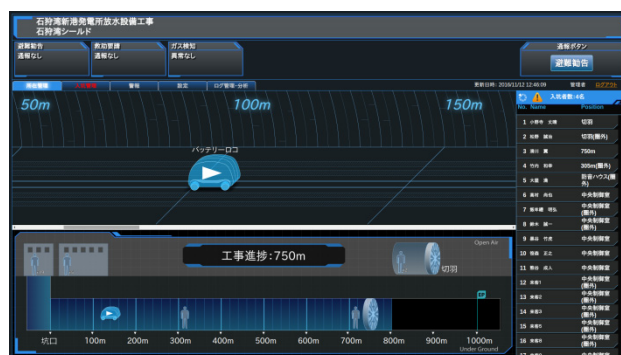


図-5 中央管理室でのリアルタイム位置検知画面

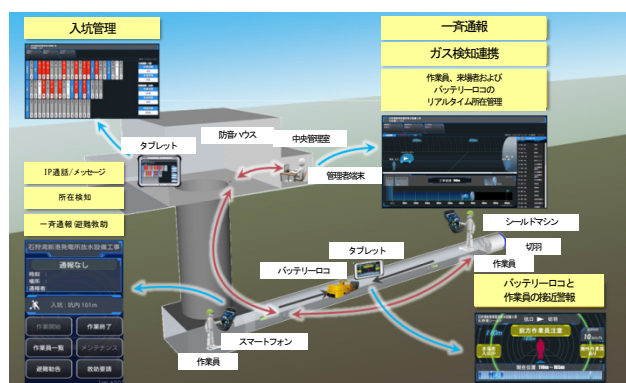


図-4 位置検知システムのイメージ図



図-6 バッテリーロコ接近警報時の作動画面
(左：ロコ搭載タブレット 右：スマートフォン)



図-7 緊急時一斉通報概要図

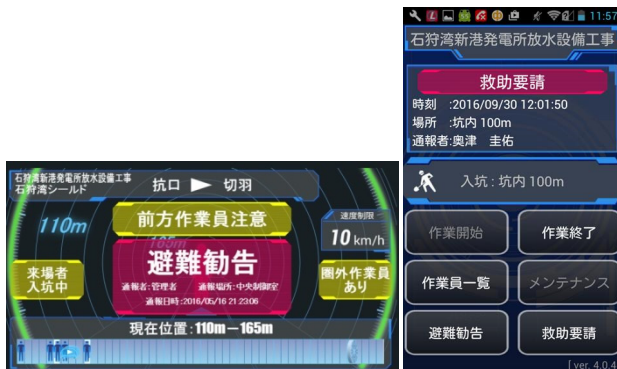


図-8 緊急時一斉通報の作動画面

(左：ロコ搭載タブレット 右：スマートフォン)



写真-2 立坑上に設置した自動入坑管理端末

リアルタイム入坑管理

位置検知システムにより自動で入坑管理を行うことが可能である。立坑上に設置した据付端末(タブレット等)に入退坑画面を表示させておき、坑内外の位置検知を行うことで自動的に入退坑管理を行うシステムである。なお、この情報はどこでも閲覧することができ、発注者、JV職員および作業員もスマートフォンからリアルタイムで確認できる。写真-2に立坑上に設置した自動入坑管理端末を示す。

(3) 位置検知システムの精度

測位精度実証実験の結果、実測との平均誤差は10m程度であり、非常に高精度な位置検知であった。その反面、坑内APの接続切り替わり地点で通信障害が発生することがあった。そのため、今後は坑内電波環境を測定しつつ、システムの設定変更を行いながら運用する必要があると考えられる。

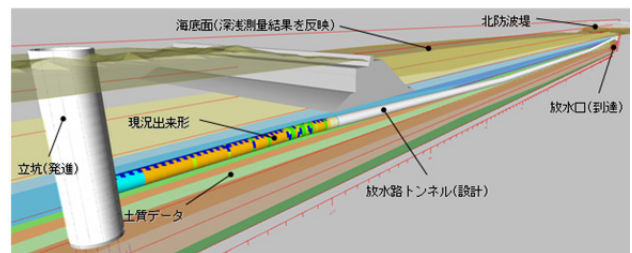


図-9 CIMの全体表示画面

4. CIMによる品質の見える化と施工管理への適用

掘進・出来形管理の一元化と合理化を目的として、シールド工事で初めてCIMを開発・導入した。本現場では、鹿島掘進管理システム(以下、KSCS)と3次元モデルを自動で連動させ、日々の測量結果と施工情報を反映させた“CIM”を構築した²⁾。

これにより、毎方終わりでの出来形管理やマシン・セグメントの傾向管理に加えて、情報の一元化と品質の見える化、施工管理の省力化も同時に達成し、より高度な掘進管理を実現した。

(1) 自動出来形生成と属性情報自動付与

図-9にCIMの全体表示画面を示す。本現場のCIMでは「自動出来形生成」と「属性情報自動付与」が可能な点に大きな特徴がある。

前者は、毎方終わりのマシン・セグメント測量の結果をKSCSに入力することで、その座標データを認識したCIMがその方の組立リングとマシンの位置を自動で3次元表示・更新していくシステムである。

後者は、毎方終わりで自動生成された3次元モデルに属性情報を自動で与えるシステムであり、属性情報にはセグメントのトレーサビリティや水平・鉛直偏差に加えて、裏込め注入圧や掘進トルクなどの掘進・マシンデータも含まれる。

上述の特徴を有する本現場のCIMは、日々の測量業務を行うだけで、3次元上でマシンとセグメントが自動で生成・更新され、視覚的に掘進情報を捉えることが可能である。

(2) 属性情報の色分け表示による施工情報の傾向管理

本現場では、自動付与された属性情報を3次元モデル上で自由に色分け表示することが可能である。

図-10に裏込め注入量の色分け表示を示す。色分け表示の方法は、管理値などから任意で設定可能であり、土砂の取り込み過ぎや裏込め注入不足箇所など、リアルタイムで管理し、視覚的に特異値を確認することが可能である。

(3) 最短距離計測による離隔の把握

最短距離計測機能を有していることも大きな特徴である。図-11にテールクリアランス計測時の表示画面、図-12に近接距離構造物までの離隔の表示画面を示す。これにより、クリック一つでリング毎の360度最小テールクリアの算出と位置の表示、リアルタイムでの土盛り計測および近接構造物との離隔の把握が可能である。

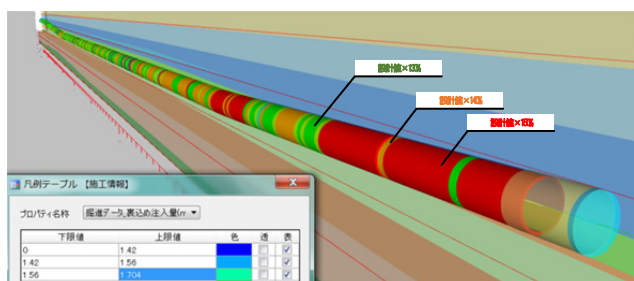


図-10 裏込め注入量の色分け表示

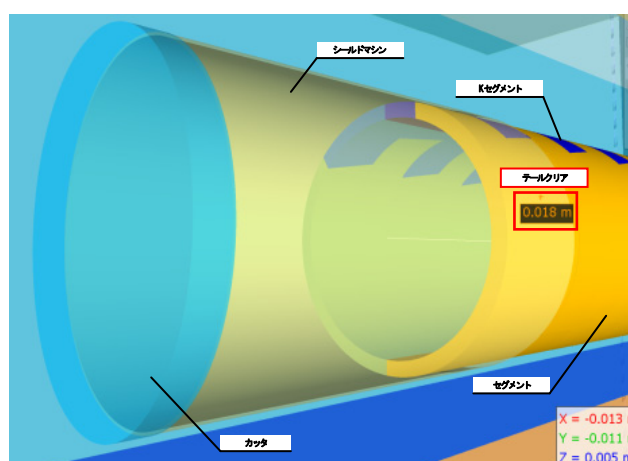


図-11 テールクリアランス計測時の表示画面

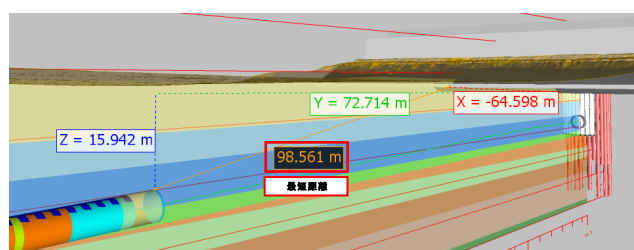


図-12 近接距離構造物までの離隔の表示画面

(4) 施工管理への適用

本現場では主に、毎方作業後に現在のマシン位置での土盛りから設定切羽圧の妥当性を評価したとともに、管理値以上の裏込め材が充填されているかの判断材料としてCIMを活用した。また、測量結果を反映したマシンとセグメントの3D画像により、実測できないテール部のクリアランスなど、互いの位置関係を詳細に把握することで、掘進指示の判断基準の一つとした。

このように、日々の掘進データの傾向をCIMから読み取り、施工管理の1つとして活用したことで、設計線形に対して最大水平偏差52mm、最大鉛直偏差49mmの出来形を確保することができた。

5. 機内からの到達位置探査工

(1) 概要

海底面に設置したJ管の位置・向き・傾き等を海上から正確に把握することは困難である。そこで、J管に向けて機内からの水平ボーリングを実施し、マシンとJ管の相対位置関係を探査することとした。図-13に到達位置探査の施工イメージ図を示す。水平ボーリングでは管路計測システムによる位置探査に加えて、予めJ管に設置した700mm四方の視準パネルをTVカメラにより確認する探査方法を計画・実施した。写真-3にJ管に設置した視準パネルを示す。視準パネルは赤・黄・青の3色に分かれており、20mm格子の中に文字が羅列されている。

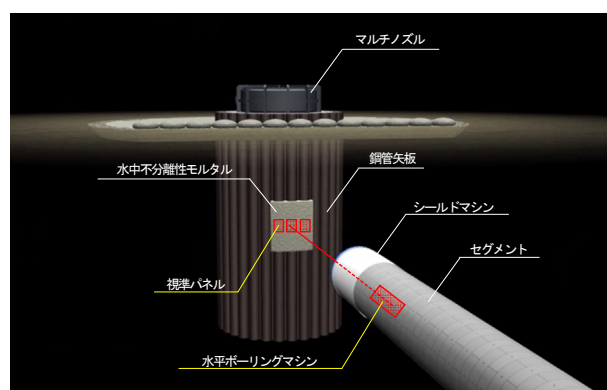


図-13 到達位置探査の施工イメージ図

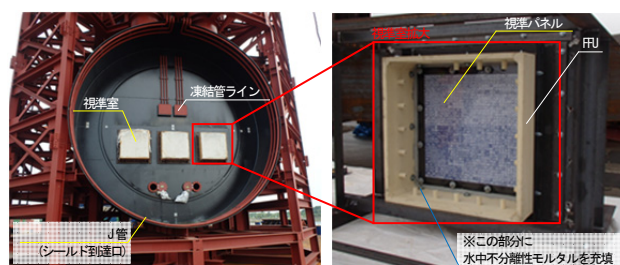


写真-3 J管に設置した視準パネル

主要な施工機械はボーリングマシン、計測リール、送り込み装置およびプラント設備であり、シールド掘進中の設備を残したまま施工を実施するため、プラント設備は後続台車の後方に配置した。また、削孔水ホースは枕木下に配置することで、後続台車区間の安全通路を確保した。

(2) 施工状況と計測結果

写真-4に到達位置探査工の水平削孔状況、図-14に管路計測システムの計測結果、写真-5にTVカメラ画像、図-15に削孔ロッド先端到達位置関係図を示す。

シールド掘進中の限られたスペース・削孔径および被圧水下という条件での水平ボーリング作業は不具合なく実施することができた。その一方で、削孔完了時にロッドが視準パネル（アクリル製）まで到達したか否かの判断が難しく、オペの感触とトルクで判断した。

また、今回削孔した地山は軟弱粘性土であることから修正削孔が難しく、15m程度のロッドの引き抜き・再削孔を5回ほど繰り返し、井筒内の水中不分離性セメントミルクへの進入角度を調整しながら削孔を行った。

計測の結果、J管は設計線形に対して右197mm、上37mmの位置にあることが確認できた。

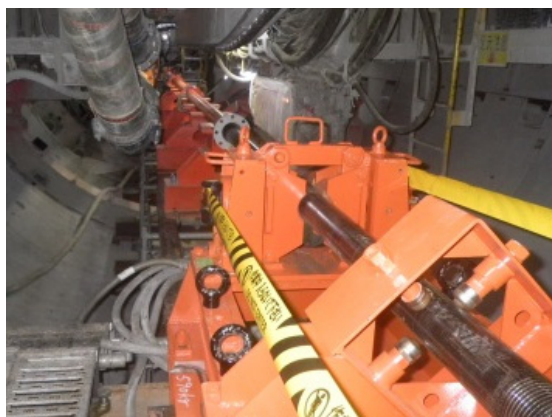


写真-4 到達位置探査工の水平削孔状況

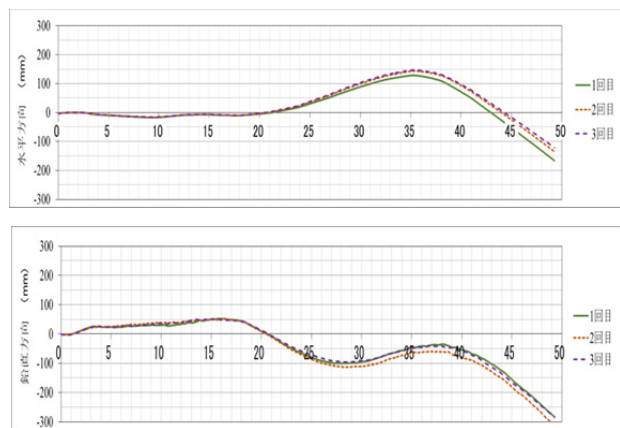


図-14 管路計測システムの計測結果

(3) 管路計測システムの精度の検証

マシン到達後のJ管測量の結果、J管は設計線形に対して右51mm、上58mmという高精度で設置されていたことを確認した。

以上より、J管から30m手前の地点での到達位置探査工との誤差は、右146mm(精度：1/342)、下21mm(精度：1/2380)であった。表-3にJ管の設計線形からの差(30m地点)を示す。計測精度はベクトルで1/338であり、内径φ45mmと径の小さい削孔ロッド内を計測した精度として良好であった³⁾。

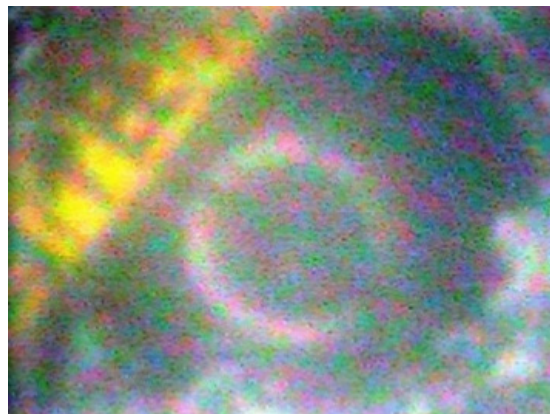


写真-5 TVカメラ画像

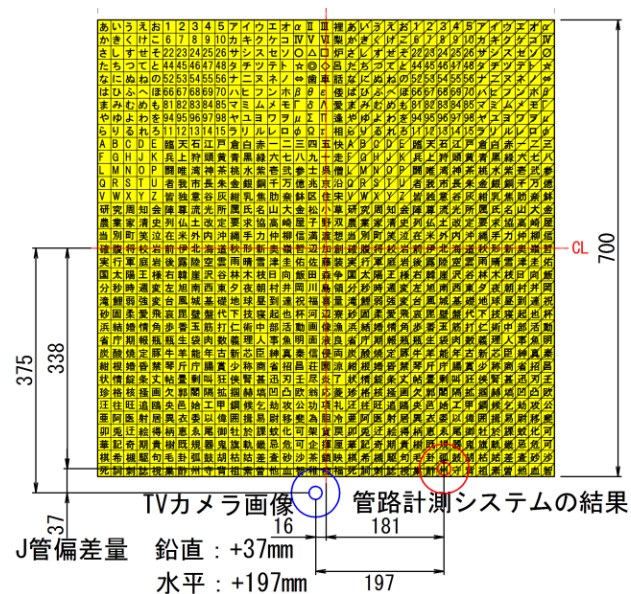


図-15 削孔ロッド先端到達位置関係図

表-3 J管の設計線形からの差(30m地点)

	水平	鉛直
管路計測システム	右 197mm	上 37mm
到達後 J管測量	右 51mm	上 58mm
誤差	右 146mm	下 21mm
精度	1/342	1/2380
	1/338	

6. CO₂気液混合流体による到達防護凍結工

(1) 到達手順とCO₂凍結工法の仕組み

海底下におけるJ管とマシンの接続作業を安全に行うため、マシン側およびJ管側から二重の凍結を実施した。図-16に到達防護凍結工の施工イメージ図を示す。

冷媒には従来のフロン・塩化カルシウム溶液に代わり、建設で初適用となる気液混合の二酸化炭素(以下、CO₂)を使用した。図-17に従来システムとの比較図を示す。本凍結では、液体で送られたCO₂が一部気化して戻ってくる際の潜熱で地盤から熱を奪う。CO₂の潜熱は、従来工法の不凍液の顕熱よりも大きいので、従来方式の1/10程度の流量で同等の凍土を造成することが可能である。その結果、配管径の縮小、消費電力および環境負荷の低減効果が得られる。

本工事では、マシン解体作業を止めることなく施工可能な作業性と凍土造成期間半減による工期短縮を期待して本凍結工法を採用した。

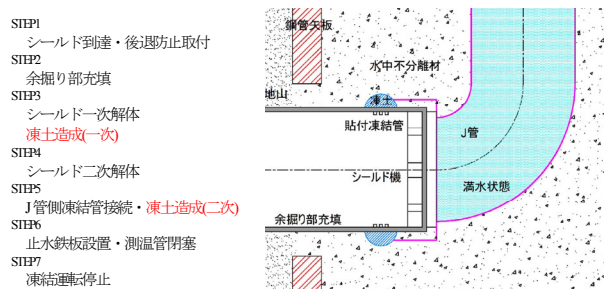


図-16 到達防護凍結工の施工イメージ図

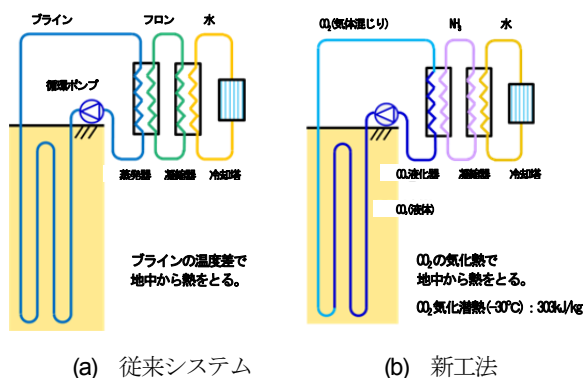


図-17 従来システムとの比較図

(2) 施工状況と工期短縮効果

写真-6に坑内設置完了後の凍結設備およびメイン配管、写真-7に凍土造成状況の様子を示す。マシン解体作業の妨げにならないよう、通常一体物である凍結設備を分割式にすることにより幅を1.2m以下とした。更に、冷凍機内の配管等の配置を工夫し、坑内運搬時の高さ制限に対応した。また、後続台車が存在したため、凍結プラント

からシールド切羽まで約100mの距離があったが、バッテリーロコの軌道の枕木下にCO₂のメイン配管とヘッダー管を設置することで、解体した資材を搬出するスペースを確保した。加えて、工場での凍結設備の仮組の実施とCO₂の粘性が低い等の利点から配管径の縮小、現場溶接の削減ができたことにより作業が効率化できた。

その結果、マシン到達後、約1週間で凍結プラントの設置作業を完了し、従来のフロン・塩化カルシウム溶液を使用する工法と比較して、約1ヶ月半の工期短縮を実現した。



(a) 凍結設備



(b) 枕木配管

写真-6 坑内設置完了後の凍結設備およびメイン配管



写真-7 凍土造成状況の様子

7. 結論

本現場では、シールド到達部となる放水口が海中に没していることから、その位置を正確に把握することが難しく、シールド到達精度の確保が大きな課題であった。また、シールド到達後、シールドマシンと放水口の接続、シールドマシンの解体作業を高水圧下で安全に行うことも大きな命題となっていた。

そこで、坑内位置検知システム、CIM、到達位置探査およびCO₂凍結工法を積極的に採用した。

1) 坑内位置検知システムによるリアルタイム管理

中央管理室や現場詰所等の地上各所とトンネル坑内100mごとにアクセスポイントを設置し、Wi-Fi環境を設けることで、職員・作業員・見学者の所在管理を実現した。本システムは、一般的には個別に運用管理している、入坑管理・リアルタイム位置検知、バッテリーロコ接近警報、IP通話、ガス検知および緊急時一斉通報(避難勧告・救助要請)という多様な機能をスマートフォンで管理できる点が特徴である。

2) CIMによる品質の見える化と施工管理への適用

開発・導入したCIMは、測量結果を鹿島掘進管理システムに入力することで、その方の組立リングとマシンの位置を自動で3次元表示・更新できる。

施工管理にCIMを活用した結果、さまざまな情報が“見える化”され、確実な施工管理とデータの蓄積がなされ、高度な品質管理と施工の安全性を確保した。

3) 水平ボーリングによる到達位置探査工

シールドマシンの前方に水平ボーリングを行った。作業条件が坑内の限られたスペース、かつ高水圧下という厳しいものであったが、不具合なく実施することができ、シールドマシンと放水口の相対位置関係を把握することができた。

4) CO₂凍結工法による到達防護工

従来のブラインに替えて、液化CO₂を採用した。本工法は設備の小型化、配管径の縮小、設備設置撤去の簡略化が可能である。

本工法の採用により、シールド到達後、約1週間で凍結プラントを設置できた。凍結期間中に湧水はなく、従来工法と比較して約1ヶ月半の工期短縮を実現した。

以上の技術を積極的に取り入れた結果、高品質・高精度の海底シールドトンネルを構築し、海底到達までの工事を無事故・無災害で終えることができた。

謝辞：本海底シールドトンネルは、2016年6月に発進し、2017年1月に無事故・無災害で到達した。設計段階から施工に至るまで、多くの方々に多大なご理解と援助を頂いた。関係各位に、ここに深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 畠田大規, 遠藤勉, 高柳哲, 阿部聡: 海底シールドトンネル工事における施工実績と位置検知システムの開発, 第 72 回土木学会年次学術講演会, pp.695-696, 2017.
- 2) 渡邊和英, 遠藤勉, 畠田大規, 高柳哲, 高橋裕一: シールドトンネル工事における CIM の取り組み, 第 72 回土木学会年次学術講演会, pp.697-698, 2017.
- 3) 塩屋祐太, 齋藤寿秋, 畠田大規, 高柳哲, 渡邊和英, 阿部聡: シールド内からの到達位置探査工, 第 72 回土木学会年次学術講演会, pp.699-700, 2017.
- 4) 相馬啓, 齋藤寿秋, 畠田大規, 高柳哲, 渡邊和英, 阿部聡, 塩屋祐太: CO₂ 凍結によるシールド到達防護, 第 72 回土木学会年次学術講演会, pp.701-702, 2017.

(2017. 8. 11 受付)

APPROACH TO CONSTRUCTION OF UNDERSEA SHIELD TUNNEL

Satoshi ABE, Nobukazu YAMAZAKI, Akihiro MUKAI, Satoshi TAKAYANAGI,
Kazuhide WATANABE and Daiki HATAKEDA

This paper describes the construction of outer discharge tunnel in new port of Ishikari-bay of Thermal Power Station. The tunnel is 1,045m long and its inner diameter of segmental ring is 4.7m. This undersea tunnel was constructed by Slurry Shield Method. The shield machine arrived at the mouth of shaft in the ocean. In order to improve the safety of work and quality of shield arrival accuracy, we developed the location management system of the tunnel working, 3D BIM system for construction, pipe direction measuring system, and new ground freezing method using CO₂. Utilizing these technologies actively, we could achieve a lot of labor-saving and finally, the shield machine arrived at the correct location without any troubles, no disasters.