

長距離海底シールドの高速施工と地中接合

辻井 孝¹・岡本 正芳²・臼井 徹弥³・亀井 達司⁴・小坂 琢郎⁵

¹正会員 鹿島建設株式会社 伊勢湾横断シールド統合事務所
(〒510-8114 三重県三重郡川越町大字亀崎新田字町屋86-3)

²正会員 鹿島建設株式会社 伊勢湾横断シールド統合事務所 知多工区 J V 工事事務所
(〒478-0045 愛知県知多市南浜町27-1知多エル・エヌ・ジー(株)内)

³正会員 鹿島建設株式会社 中部支店 (〒460-0004 愛知県名古屋市中区新栄町2-14)

⁴正会員 鹿島建設株式会社 伊勢湾横断シールド統合事務所 川越工区 J V 工事事務所
(〒510-8114 三重県三重郡川越町大字亀崎新田字町屋86-3)

⁵正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

伊勢湾横断ガスパイプライン設置工事は、中部電力(株)と東邦ガス(株)が天然ガスの効率的運用を目指して進めている共同事業である。同事業のガスパイプライン敷設用トンネル構築までを行うシールド土木工事（Ⅰ、Ⅱ工区）のうち、川越と知多を結ぶ延長13.3kmのⅠ工区では、2台のシールドで両岸から6kmを超える長距離を高速掘進し、伊勢湾海底高水圧下でメカニカル地中接合を行った。本報文では、本工事の施工計画とその施工実績を報告する。

キーワード：海底横断シールド、長距離施工、高水圧、高速施工、泥水式シールド、地中接合

1. はじめに

中部電力(株)と東邦ガス(株)は、天然ガスの安定供給のため、愛知県の知多地区 LNG 基地と三重県の中部電力(株)川越火力発電所および東邦ガス(株)四日市工場間をガス導管で結ぶ伊勢湾横断ガスパイプライン敷設事業を進めている(図-1)。

本工事は、このうち、ガス導管を設置するためのシールドトンネルを構築するものであり、図-1に示すとおり、2工区に分かれている。

Ⅰ工区は川越立坑と知多立坑を結ぶ延長約13.3km・内径φ3,000mmのトンネルを、Ⅱ工区は川越立坑と四日市立坑を結ぶ延長約4.0km・内径φ2,000mmのトンネルを構築する。図-2にトンネル断面図を示す。Ⅰ工区は、川越・知多両発進立坑から掘進し、伊勢湾中央部で海底地中接合する。Ⅱ工区は、四日市立坑から発進し、川越立坑に到達する。

Ⅰ・Ⅱ工区のほぼ全線が、0.4MPaを越える海底高水圧下での施工である。また、Ⅰ工区は川越側6.5km、知多側6.8kmの長距離掘進であり、川越側650m/月・知多側600m/月の高速施工が必要となった。

本報文では、長距離高速施工に対応したⅠ工区の施工計画とその施工実績について報告する。

2. 工事概要

Ⅰ工区の工事概要を以下に示す。

工事名：伊勢湾横断ガスパイプライン設置工事の内土木工事

発注者：中部電力(株)

施工者：鹿島・清水共同企業体

J V比率(鹿島80：清水20)

工期：2008(H.20).4.4～2011(H.23).1.31
(34ヵ月)

工事場所：知多エル・エヌ・ジー(株)知多 LNG 事業所～中部電力(株)川越火力発電所

工事内容：シールド工 セグメント外径φ3,340mm
セグメント内径φ3,000mm
トンネル延長 13,314.0m

立坑工 外径φ12.062m(川越,知多共通)

内径φ11.400m(川越,知多共通)

深度(リング長)

川越52.0m 知多50.0m

地中接合一式

3. 施工計画

(1) 地盤条件

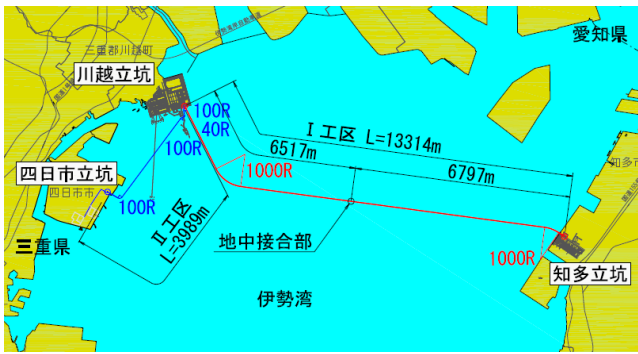
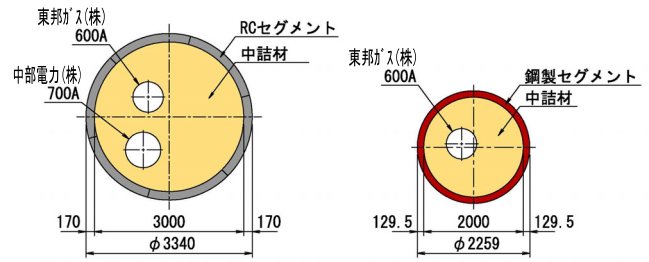


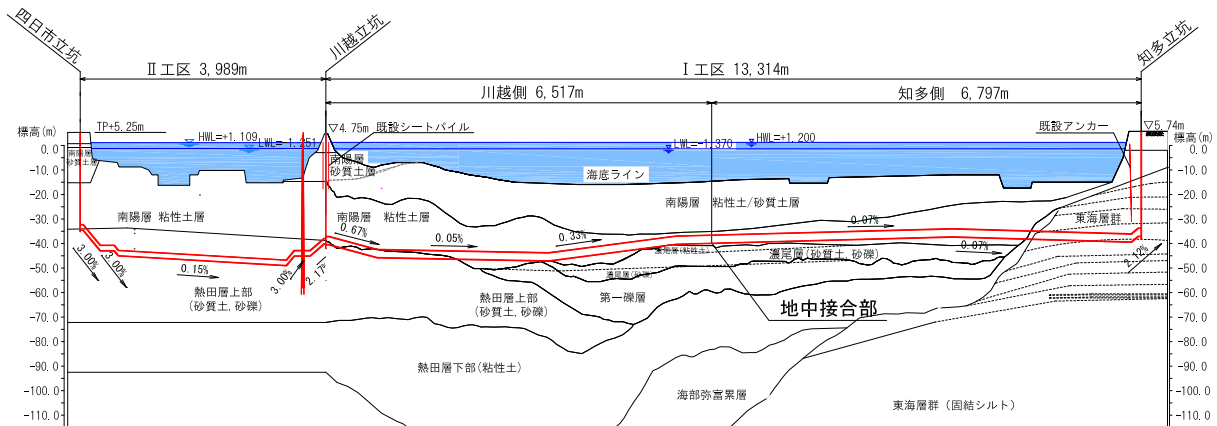
図-1 平面図



I 区

II 区

図-2 トンネル断面図



凡例

新 生 代	第四紀	完新世	沖積層	地層名	土質名	N値	新 生 代	第四紀	更新世	地層名	土質名	N値
				南陽層・砂質土層	砂質土	0~18				段丘堆積物	第二礫層	砂礫
南陽層・粘性土層	粘性土	0~4	段丘堆積物	海部・弥富果層	粘性土 砂質土	50以上						
濃尾層	粘性土	0~23					東海層群	固結シルト・砂質土	50以上			
第一礫層	砂礫	20~50以上	更新世	熱田層 (上部)	砂質土 砂礫	10~30 16~50以上						
熱田層 (上部)	砂質土 砂礫	10~30 16~50以上										
熱田層 (下部)	粘性土	6~50以上										

図-3 土層縦断面図

伊勢湾海域部の地盤は、①海域部ボーリングデータ、②既往の地質調査結果^{1) 2)}、および、③本工事に実施したトンネル線形位置での音波探査結果、を基に分析し、**図-3**に示す土層縦断構成を想定した。

各土層の特徴を以下に示す。川越-知多間の海底部には概ね、完新世の南陽層 (N 値 0~4 の粘性土層, N 値 0~18 の砂質土層) が 25m~40m 堆積しており、その下には更新世の濃尾層や第一礫層、熱田層が堆積している。

また、知多側には N 値 50 以上の東海層群 (固結シルト・礫・砂地盤の互層) が陸から海に向かって急激に傾斜する形で分布しているものと想定された。

シールドトンネル通過土層は、次項で記す設計条件を満たしつつ、極力、礫層掘進を避けるよう計画し、川越側は熱田層上部 (砂質土, 砂礫: N 値 10~30) から南陽層粘性土層 (N 値 0~4)、知多側は東

海層群から南陽層粘性土層に設定した。

(2) セグメント

セグメントは、経済性、施工性、品質、耐久性等の検討を経て、内径φ3,000mm程度の中口径で実績豊富なRCセグメントを採用した。

セグメント仕様は、6等分割・幅広セグメント (幅1,350mm, セグメント厚さ170mm) とし、**図-4**に示すように、トンネル軸方向にエレクタで押し込むだけで組立できるピン式継手 (DS (locked Disk Spring) 継手) を採用した。**表-1**にセグメント諸元を示す。

シールドトンネル工事に際しては、6km超の長距離施工、0.4MPa高水圧下での施工および地中接合に対応でき、さらに高速施工も可能とする泥水式シールドを選定した。マシン構造等を**写真-1**および**図-5, 6**に示す。

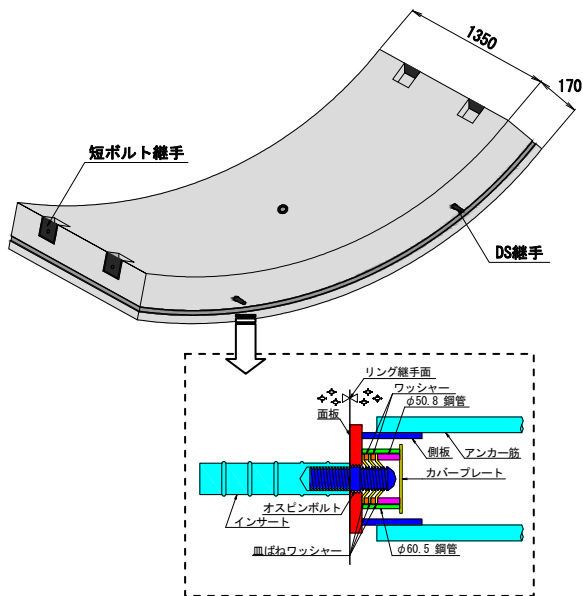


図-4 セグメント概要図

表-1 セグメント諸元

名称	DS セグメント
材質	鉄筋コンクリート
内径/外径	3,000mm/3,340mm
分割	6等分割
Kセグメント	軸方向挿入式
セグメント幅/セグメント厚	1,350mm/170mm
継手(セグメント間/リング間)	短ボルト継手/DS継手
セメント種類	高炉セメントB種
設計基準強度	54N/mm ²

(3) シールド

a) 長距離施工への対応(耐久性の確保)

長距離施工に対応するため、ビット交換なしで全線を掘進できるように仕様を決定した。カッタビットには、先行ビット2段+ツールビット1段の計3段の段差ビットを配置し、超硬チップ材質には耐衝撃性、耐摩耗性を兼ね備えたE-5種を採用した。テールシールにはワイヤブラシ式テールシールを4段装備し(前3段は腐食防止のためSUS材を採用)、最後段にはウレコンシールを採用した。その他、ロータリージョイント駆動部には耐摩耗性に優れたスリッパシールを採用し、機内送・排泥管にも厚肉鋼管を用いた。

b) 高速施工への対応

川越側計画月進 650mおよび知多側計画月進 600mを確保するため、昼夜2交代制を採用するとともに、必要サイクルタイム(掘進+セグメント組立: 36分~41分)以内になるようにシールドジャッキ速度を最大 100mm/min(従来の同クラスでは 50mm/min)と設定した。また、セグメント組立時に



写真-1 川越側シールド

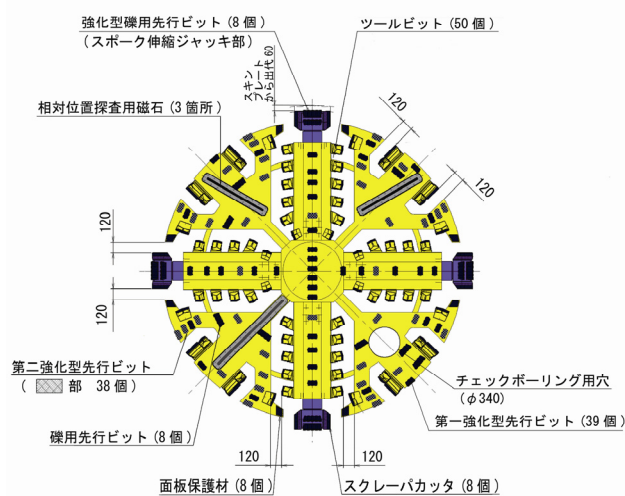
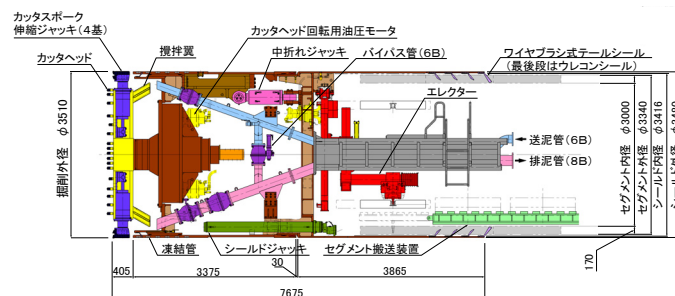


図-5 川越側シールドカッターフェース



カッタヘッドおよびスリット洗浄管(知多側シールドに装備)の有無を除き川越・知多共通

図-6 川越側シールド構造図

は、複数ジャッキを抜く際、従来は油圧回路の関係で縮み速度が低下していたが、これを改善するため、5本同時の縮み操作で全ストローク 1,900mmの作動時間を1分以内とする早戻し油圧回路を装備することとした。

なお、カッタヘッドの回転速度は、常用で最大 3.0min⁻¹(従来同クラス 2.0min⁻¹)に、エレクタ高速回転速度は 1.8min⁻¹(従来同クラス 1.0~1.5



写真-2 高速橋形クレーン（定格荷重 7.5 t）



写真-5 泥水処理設備全景（川越側）



写真-3 セグメントセッター台車



写真-6 マッドセパマシン（川越側）

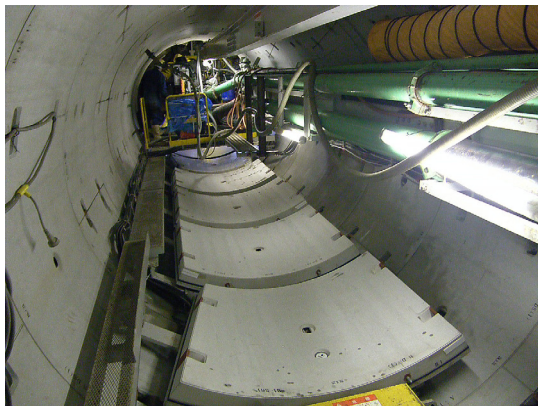


写真-4 切羽セグメント供給装置

min⁻¹) にそれぞれ設定した。荷役設備としては、立坑下への荷下ろしのために、地上部に定格荷重 7.5 t の高速橋形クレーン（巻上速度 19.2m/min）を設置（写真-2）し、坑口切羽間は 6t 自走式バッテリーロコ（最大 2 編成，最大速度 10km/hr）で運搬させ、離合箇所を坑口部，2,800m地点の 2 箇所に設置した。

さらに、切羽部にセグメントセッター台車（写真-3）を配置し、2 リング分のセグメントを一括で荷下ろしできるようにするとともに、セグメント供

給効率化のため、スライドテーブル式のセグメント供給装置（写真-4）を装備した。

c) 泥水処理設備

泥水式シールド工法における掘削後の排泥水は、地上の泥水処理設備（写真-5）により砂礫分は振動篩・サイクロンにより分離し（一次処理）、泥水中に溶け込んでいる粘性土分は脱水装置であるフィルタープレスに打込み分離する。

本工事では、泥水の比重低下処理と産業廃棄物となる脱水ケーキの減容化を図るため、一次処理後の泥水を含水率の低い土砂と処理水に分離する 1.5 次処理のマッドセパマシン（遠心分離機）（写真-6）を装備するとともに、その処理水の脱水処理（二次処理）を行う圧搾式フィルタープレスを装備した。

d) 流体輸送設備

砂礫層の掘削中でも 100mm/min の掘進速度を確保するため、排泥流量 3.4m³/min に設定し、送泥管 8B×1，排泥管 6B×1 とした。また、ポンプ設置作業，メンテナンス手間を軽減するため、排泥ポンプは高揚程型を使用し、台数を約半分とした。

また、配管延長の回数を減らすため、ホースリール台車を 2 台配置し 1 回の追加延長を 12m とし、配管延長中でも泥水循環運転が行えるように、中間バイパスバルブセットを設置した。

e) 地中接合

地中接合方式は、川越側、知多側で進捗が異なる場合への対応として、どちらのシールドが先着しても受入貫入が可能となるメカニカルドッキング方式とした。施工手順を**図-7**に示す。長距離施工後の地中接合を確実にを行うため、STEP3に示すように、先着シールドから相対位置探査用の水平ボーリング（φ280mm）を実施することとした。（**写真-7,8**）

水平ボーリングマシンには姿勢制御のために中折れ機構と姿勢確認用のターゲット（2個）およびプリズムミラーを装備することとした。

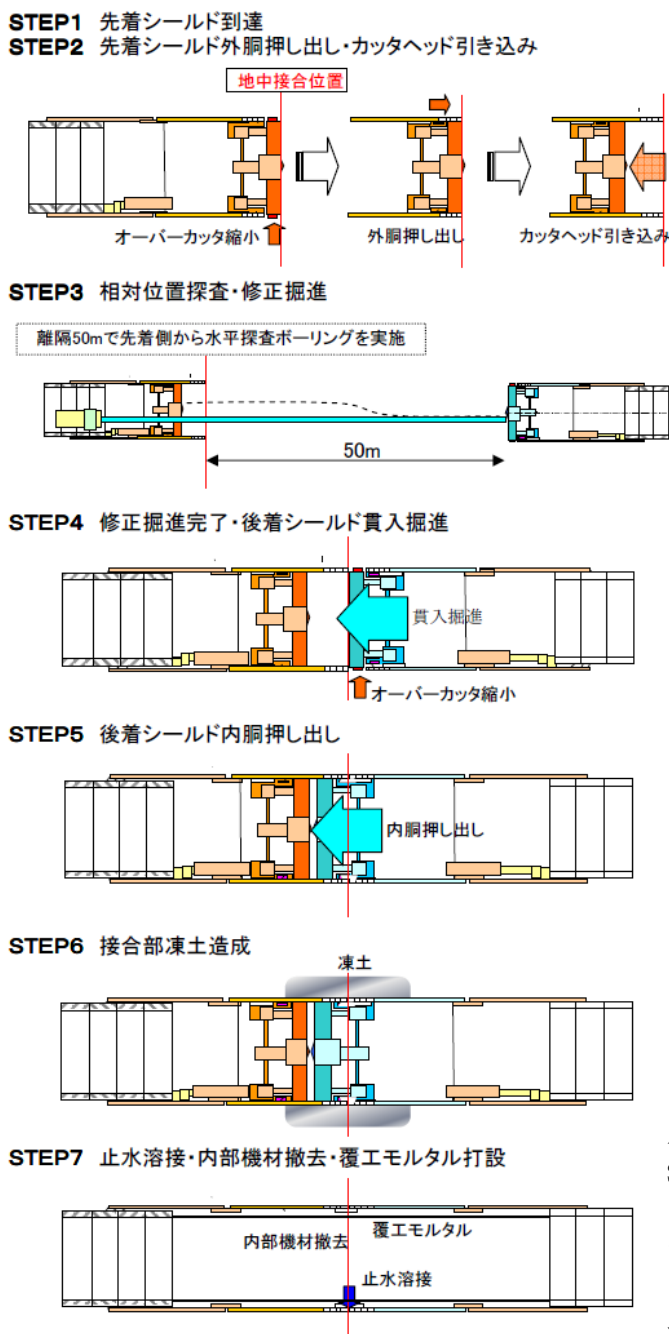


図-7 地中接合施工手順

表-2 相対位置探査方法

名称	精度	探査方法	相対位置探査機器	
			発信	受信
磁気探査	±100mm	カッタを回転させたときの磁気波形を読み取ることで水平ボーリングマシン位置を把握	シールドカッタフェースに埋め込まれた磁石（3箇所）	水平ボーリングマシン外周部に埋め込まれた磁気センサー（6箇所）
R I 探査	±1mm	R I 線源を感知することで水平ボーリングマシン（R I センシングロッド先端）位置を把握	水平ボーリングマシン・R I センシングロッド先端に設置されたR I 線源	バルクヘッドのマンホール部のR I 線感知センサー



写真-7 水平ボーリングマシン（φ280mm）

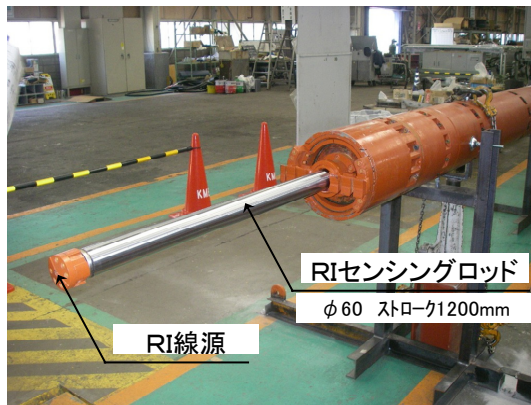


写真-8 水平ボーリングマシン
φ60 R I センシングロッド

両シールドの相対位置探査法には地中接合で実績のある磁気探査とR I（Radio Isotope）探査を併用した。**表-2**に磁気探査とR I 探査の概要を示す。STEP4, 5におけるシールド貫入時の接合許容誤差は50mmに設定し、高水圧下での接合への対応として接合時の内胴・外胴摺動部シールには耐圧1.0MPaの山形シール2段を装備した。止水にはSTEP6に示すように、凍結工法を採用し、前胴先端部に貼り付け凍結管を装備した。

4. 施工実績

(1) 掘進実績

図-8に掘進実績を示す。

川越側の掘進実績は、本掘進開始からの平均月進量が701mとなり当初計画の650m/月を大きく上回った。知多側は、当初計画の600m/月に対して平均月進量が644mとなり川越側同様に当初計画を大きく上回る実績を挙げた。（掘進実績は川越側の到達掘進（6月10日まで）、知多側の相対位置探査ボーリングの受け入れに伴う修正掘進（6月18日まで）が含まれるため、平均月進量の計算では2010年6月分は除外。）

a) 川越側 掘進実績

川越側の掘削残土搬出実績表を表-3に示す。

川越側では、想定外に長い熱田層（砂・礫層）の掘進を強いられたため、振動篩にはφ20～40mmの玉石がかかるようになり、掘進400mを過ぎたあたりから流体輸送設備と泥水処理設備に磨耗によるトラブルが生じた。

排泥側のポンプフロントカバーやバックカバーにピンポイントで穴が開いたり、インペラ磨耗によりポンプ能力が低下したりした。対策として、定期的に配管やポンプの超音波板厚測定を行い、磨耗速度を把握し、これを元に部品の交換時期を計画し、損傷前に交換することとした。部品交換は、進捗に伴う段取り替えと併せて実施した。

b) 知多側 掘進実績

知多側は約1,950mまで東海層群（固結シルト・礫の互層）、以降は南陽層粘性土層であり、ほぼ想定通りの地盤を掘進した。知多側の掘削残土搬出実績表を表-4に示す。

この南陽層粘性土はシルト分が多い軟弱粘性土であり、二次処理設備の圧搾式フィルタープレスは高稼働な状態を維持し、濾布の洗浄や設備のメンテナンスは掘進停止時に適宜実施した。

c) セグメント

セグメントは幅と厚さの比で7.94（＝幅1,350mm / 厚さ170mm）という幅広薄型であったが、川越側、知多側ともに施工時の割れ欠けや漏水も殆どなく、トンネル真円度も良好であった。（写真-9）セグメントの平均組立時間は17分（計画18分）であった。

(2) 地中接合実績

a) シールド一次解体（STEP1, 2）

先着した川越側は、掘進完了後にエレクタ・ジャッキ等の不要機材を撤去した後、①スポーク伸縮

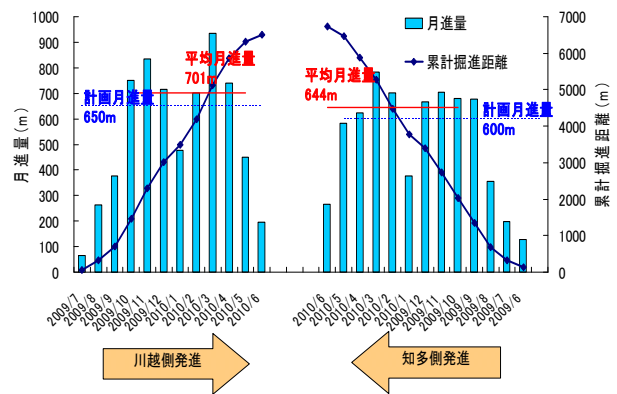


図-8 掘進実績

表-3 川越側 掘削残土搬出実績表

土層	分類			合計
	1次	1.5次	2次	
	75μm以上	75μm未満		
熱田層	27,551	2,671	13,800	44,022
	63%	6%	31%	100%
南陽層	2,695	1,838	13,384	17,917
	15%	10%	75%	100%
計	30,246	4,509	27,184	61,939

単位：m³

表-4 知多側 掘削残土搬出実績表

土層	分類			合計
	1次	1.5次	2次	
	75μm以上	75μm未満		
東海層群	10,413	1,286	6,452	18,151
	57%	7%	36%	100%
南陽層	1,081	7,762	37,250	46,093
	2%	17%	81%	100%
計	11,494	9,048	43,702	64,244

単位：m³



写真-9 トンネル坑内

（坑口から切羽 川越側3,500m付近）

カッタ全縮、②中折れ部溶接固定、③スキンプレート（外胴）押し出し、④カッタヘッド（内胴）引き込みを実施した。④の引き込み時は、泥水を補充、バルクヘッド水圧計を監視しつつ施工した。また、

引き込み作業では摺動面を傷つけずに中折れブラケット等の不要材を溶断・撤去する必要があったため、一次解体に10日間を要した。

b) 相対位置探査・修正掘進 (STEP3~5)

シールド掘進完了後、両シールドの離隔50mで、先着川越側から水平ボーリングを行った。

当初計画では、シールド離隔50m~20mでは磁気探査(精度±100mm)で概略の相対位置確認を行い、離隔20mとなった段階でR I探査(精度±1mm)を併用する計画であった。

しかし、離隔50mで行った第1回磁気探査でR I探査が可能なほど水平ボーリングと知多側カッタフェースボーリング用孔の相対位置精度が良好であったため、最終的には知多側シールドの修正掘進なしでR I探査を実施できた。

図-9に相対位置探査結果を示す。写真-10に坑内でのボーリングマシン据付状況を示す。R I探査結果が示すように、シールド離隔50mでの相対誤差は水平+57mm、鉛直-33mmであり、シールド掘進完了までに行っていた基線測量精度の高さが確認された。

以降の修正掘進では、磁気探査は実施せず、R I探査のみ実施した。

計8回のR I探査を実施したが、最終勘合時のマシン相対変位は、水平-9mm、鉛直+1mmという高精度であった。

水平ボーリングマシンは、川越側から発進し、50m先の知多側シールドまで±10mmで姿勢を制御できた。

c) 凍結工及びシールド二次解体 (STEP6, 7)

両シールドスキンプレート(外胴)に埋め込んであるブライン配管に-45℃のブラインを循環して接合部に長さ2.3m×厚さ50cmの凍土を造成し、止水した。図-10に凍結工実施状況図を示す。また、写真-11に凍結時シールド内の状態(川越側)を示す。凍結機(100PS×2台)等の設備は川越側に配置した。

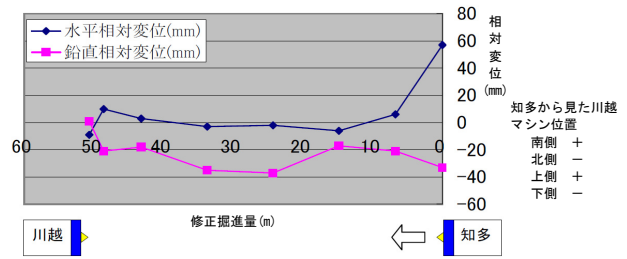


図-9 相対位置探査結果 (R I 探査結果)



写真-10 水平ボーリングマシン据付状況 (川越側)

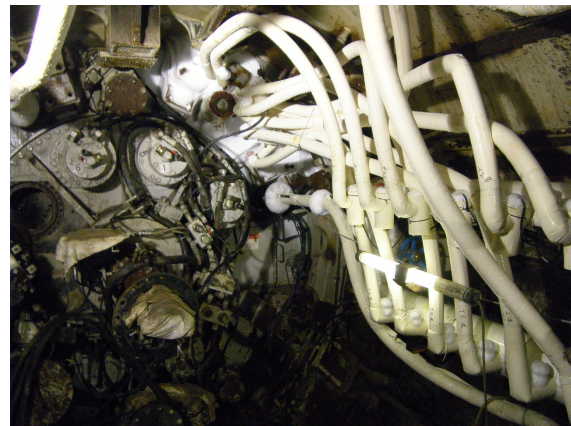


写真-11 凍結時シールド内の状態

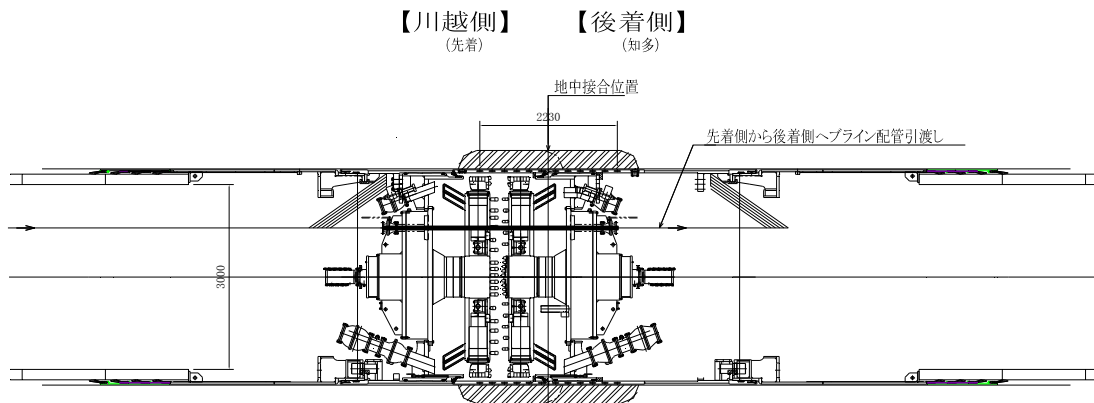


図-10 凍結工概要図

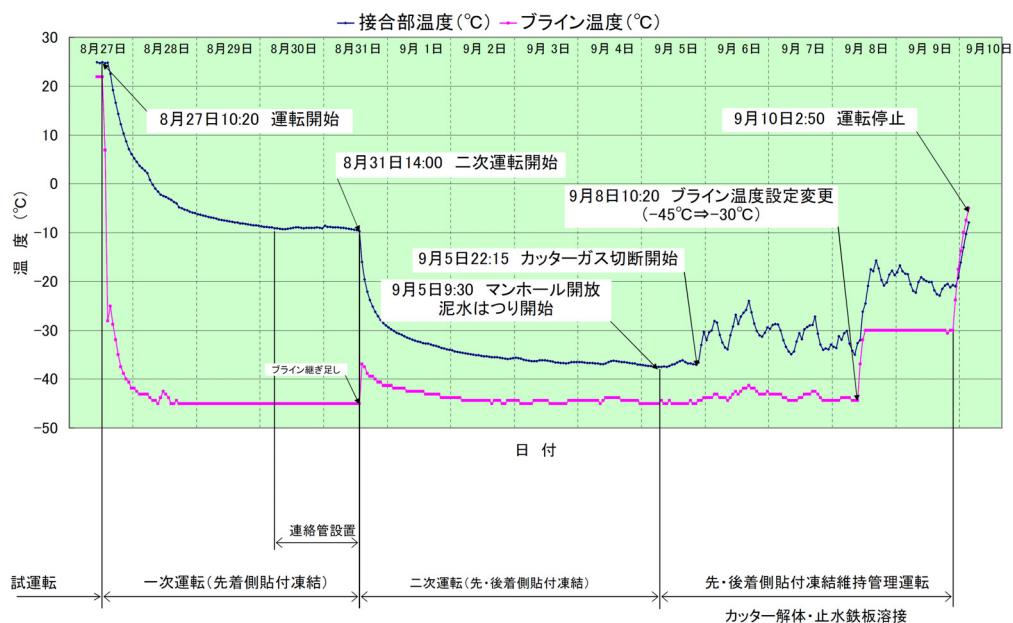


図-11 測温管温度の経時変化

一次凍結として、川越側シールドのみブラインを循環して凍結を行い、その後、川越側から知多側へ凍結連絡管を貫通して両シールドにブラインを循環させる二次凍結を実施した。

止水効果を確認後に知多側マンホールからチャンバ内に入り、接合部の止水溶接を行った。凍結運転日数は昼夜で15日間であった。図-11に測温管温度経時変化図を示す。

凍結工では、主に次のような施工管理を行った。

- ① 凍土の管理温度を -10°C 以下とし、シールド先端測温管の温度を常時監視した。
- ② バルクヘッド圧力計を確認し、チャンバ内湧水確認後に連絡管を施工した。
- ③ 二次凍結運転後、チャンバ内湧水確認を行い、長時間の作業中断時はマンホールを閉鎖した。
- ④ 止水鉄板溶接部のエアチェックを行い、止水効果が確認されてから凍結運転を解除した。

また、二次解体では①カッタモータ駆動部、②バルクヘッド部、③カッタヘッド部の順に解体した。

写真-12に知多側バルクヘッド・カッタヘッドを解体し、川越側シールド面を確認した状況写真を示す。

シールドのガータ、リブ等は内空 $\phi 3,000\text{mm}$ を侵さないよう溶断し、最終的にスキンプレート内側に高強度モルタル（設計基準強度 $54\text{N}/\text{mm}^2$ ）をスライドフォームを用いて打設した。高強度モルタルは地中接合部で混練してポンプで打設した。打設スパンは 2.4m で5回打設とした。



写真-12 接合時川越側シールド面
(知多側より川越側を望む)

5. むすび

以上、高水圧下での長距離・高速施工に対応した施工計画を実施することにより、平均月進 川越側 701m 、知多側 644m を実現することができた。

また、両シールドが長距離掘進後に 0.4MPa を超える海底高水圧下で地中接合を行うという厳しい施工であったが、2010年9月に無事、地中接合を完了することができた。

今後同種工事の参考になれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 海上保安庁水路部. 水路部研究報告 第36号, 2000年3月
- 2) 建設省計画局 愛知県 三重県. 伊勢湾北部臨海地帯の地盤 都市地盤調査報告書 第1巻, 1962年8月