

シンガポール 長距離下水道建設工事

—長距離シールド掘削と防食シート採用の2次覆工—

一 瀬 邦 生 ・ 木 戸 義 和

全長 5.2 km に及ぶシンガポールの長距離下水道建設にあたり、掘削及び2次覆工をいかに効率の良い方法で高速に行うか。このためには、施工方法及び設備計画が非常に重要なポイントであった。株式会社熊谷組（以下、当社）の数多い海外のシールドトンネルプロジェクトの実績に基づき、高速施工のための設備と機械配置を試みた。本報文では長距離シールドトンネル工事で採用した掘削及び2次覆工の施工方法及び設備について報告する。

キーワード：シールドトンネル、シールド掘進、2次覆工、防食シート、100年耐久

1. はじめに

シンガポール政府は、大深度トンネルによる新しい下水道システム建設工事を行っている。新しい下水道システムは、政府の全ての水に関する部門を一本化し、水を1滴も無駄にしないことを目的とするプロジェクトである。

例えば、下水道の水を飲料水（シンガポールではニューウォーターと呼んでいる）に再利用する計画も盛り込まれており、シンガポールの慢性的な水不足解消策の一翼を担っている。シンガポール政府の工事担当機関は、当初、環境庁内の下水道局であったが、上記ニューウォーター計画の進行に伴い、上水、雨水、汚水の各部門を統合編成し、現在は Public Utilities Board と改名してプロジェクトを担当している。

政府は、この新しい下水道システムの完成により、現在稼働している 146 箇所のポンプ場及び 6 箇所の処理場が将来 unnecessary になることから、この余剰の土地の有効活用を考えている。そのため、建設費用は十分に補うとともに利潤に繋がると公表した。

大深度トンネルシステム下水建設工事は、今回が第 1 期工事で、全長約 40 km の下水道幹線を建設する。

当社施工の T0-3 工区は、全工区の中でほぼ真中に位置し、当社施工中の地下鉄東北線 705 工区と交差するとともに、ルートの大部分が高速道路の直下に位置している（図-1）。

本工区の課題は、

- ① 構造物の 100 年耐久が要求されており、品質管理には十分に注意を払う必要があること、
 - ② 工期が 47 カ月と短く、1 次・2 次覆工とも高速施工を求められていること、
- である。

そのため、工事全般の施工計画を行うにあたり、各々の条件をクリアできる、慎重かつ斬新な発想での施工計画の必要性が生じた。

シールド掘削は、延長が最長時においても、シールド掘進、セグメント組立て後、直ちに掘削が開始できるようなサイクルタイムを計画した。また、2次覆工においては、型枠 3 台を同時に施工する計画を行った。

さらに、技術的に未開分野の防食シート採用による 2 次覆工は、型枠と防食シートの両メーカーと検討とともに各種試験を実施し、工法の確立を行った。

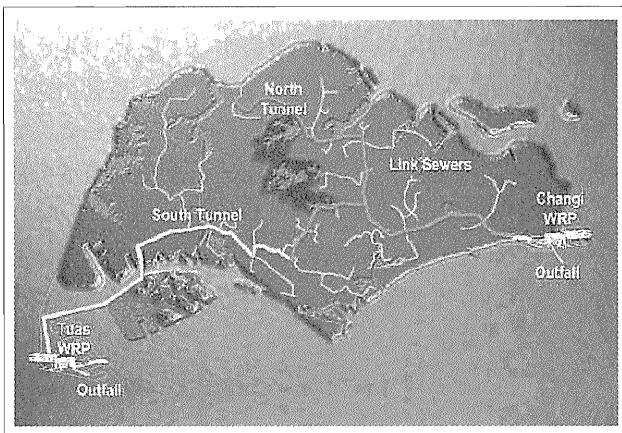


図-1 施工区間

2. 工事概要

(1) 工事概要

泥土圧シールド工法による大深度長距離シールド掘削及び新工法である防食シートを採用した2次覆工の施工方法及び設備についての工事概要は以下の通りである。

工事名称	大深度トンネル下水道システム建設工事 (T0-3)
工事場所	シンガポール共和国バヤレバ地区
契約工期	2000年1月12日～2003年12月9日
発注者	Public Utilities Board (政府機関)
施主コンサルタント	CH2M/PB JV (アメリカ)
請負形態	設計施工、一式契約 (一部単価契約)
JV形態	熊谷組 (SP)/SembCorp JV JV比率 (50%/50%)
設計	仮設計 熊谷組/SembCorp JV 本設計全般 Hyder 社 (イギリス), トンネル設計 Geoconsalt 社 (オーストリア)
トンネル延長	5,155 m (勾配 0.5%, 最小曲線 R=320 m) (土被り 25~32 m)
1次覆工	セグメント製作 Readland Precast Concrete Products 社 (香港) セグメントモールド CBE 社 (フランス) RCセグメント (ストレートボルト)/外径 7.0 m 厚さ 250 mm/幅 1.5 m
2次覆工 HDPEシート	仕上がり内径 6.04 m/コンクリート巻厚 230 mm Engineering Linings 社 (南アフリカ) 厚さ 2.5 mm, 100年耐久性保証
アクセス立坑 接続横坑	4箇所 仕上がり内空 2 m/全長 322 m (NATM工法)

(2) 地質概要

シンガポールは、複雑な地質構成をしている。当該工区において、地質資料によれば掘削断面は、 N 値 50以上の Old Alluvium (OA) と称する沖積層が大半を占め、残りは N 値 0~26の Marine Clay (軟弱粘土) および Fluvial Sand (河口堆積砂) である。地下水位は、GL-3 m である。

しかし、実施工においては、OA層であっても風化した軟弱層から固結した強固な層が存在し、しかも滞水軟弱砂層の Fluvial Sand が OA 層内にレンズ状に存在するなどの混合地質の区画があり、掘削管理に注意が求められた。また、シンガポール地下鉄工事において石英分を多く含む OA 層の掘削でシールド機の異常摩耗を経験しており、この対策が求められた。

3. シールド掘削

(1) シールド掘進

(a) シールド機

シールド機の選定においては、シンガポール地下鉄

北東線 C 504 工事の実績を考慮するとともに本工事の特殊条件である長距離掘進および高速施工に対応可能なシールドマシンを選定した (写真-1)。

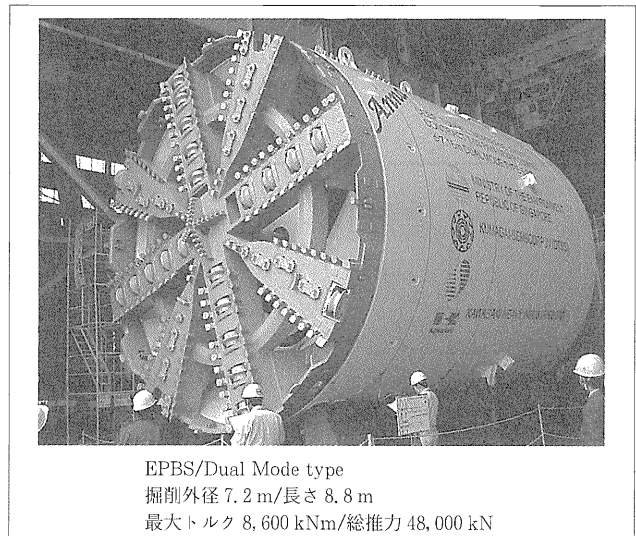


写真-1 シールド機 (土圧式)

長距離対策としては、単に耐久性を高めるだけでなく、日常点検整備が容易で、異常の兆候を事前に察知することを可能にし、さらに予想される問題に対して可能な限り構内で対応が可能とすることに重点をおいた。

カッタについては、地盤に応じてローラカッタと先行ビットを選択できる仕様にし、耐摩耗性の高いカッタチップを採用するとともにカッタ交換作業の作業性を高めた。また、ベアリングシール同様に日常点検で異常を検知できる仕様を施した。

高速施工対策としては、900 kW (180 kW×5台) のモータにより 8,600 kN・m のトルクを装備し、シールドジャッキ、エレクタの仕様を高速施工対応とし、なおかつ操作性を向上させた。

(b) シールド掘進

シールド機の掘進速度には、添加材が大きく影響し、長距離で広範囲の土質条件に遭遇することが予想された。そのためポリマー注入設備と気泡注入設備の両方を装備し、初期段階から各種材料、注入方法を変えたトライアルを実施し、経済性も加味して掘削方法の確立に努めた。

その結果、OA層では、気泡注入を主体としながらも被圧水を有する軟弱砂層には、ポリマー注入で対応することとした。

掘削管理システムによる掘削データ、シールド機運転状況のモニタ、記録をフルに活用することで掘削状態を把握することができ適切な掘削管理が可能になっ

た。

海外のシールドトンネルでは、マシンオペレータの教育と管理が課題であるが、数値データを詳細に分析することで状況を把握でき適切な指導と管理が可能になった。

中間位置で摩耗部の交換、補修を施したが日常点検と運転状態の把握により致命的問題の発生に至る前に対策を取ることが出来たことにより、ほぼ順調な掘削を続けることができた。

(2) 排土及び運搬システム

(a) 概 念

課題は、長距離シールド掘削及び2次覆工である。よって作業の優位性、特に2次覆工時を想定した場合、軌条設備は簡素に計画すべきである。そこで軌条は全線単線で計画した。

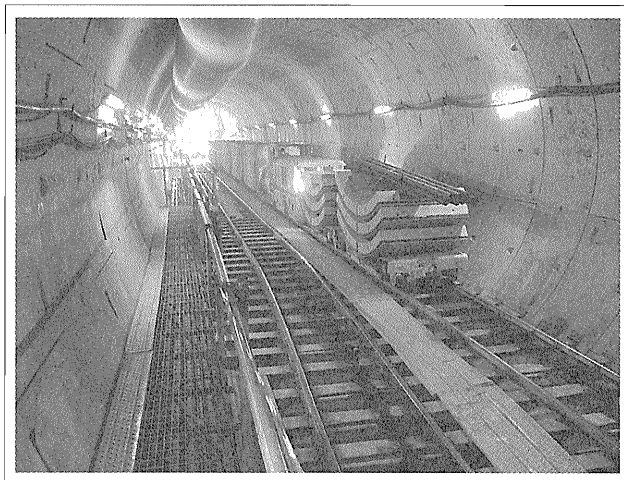
また掘削土の搬出方法は、施主指定の土捨て場の条件と状況により、海外で一般的な方式であるずりトロッコによる排土方式を採用した。

以下の項目を基に排土計画を行った。

- ① 1車両編成で、Ring分の進捗に必要な排土能力及びセグメント運搬が可能。
- ② 運搬速度は、排土積荷時において、最低10 km/hの速度。
- ③ 保守点検が容易で耐久性に優れ、スペア等の調達が容易。
- ④ 路上に設置したずりピットへの搬出操作が容易。

(b) 坑内設備

掘削の排土及びセグメント運搬は、Schoma社（ドイツ製）の25tディーゼルロコとMühlhauser社（ドイツ製）の容量20m³ずりトロッコによる組合せで行った。



写真一 立坑複線部で入坑を待っているローリングストック

ずりトロッコ6両とセグメント台車2台をディーゼルロコで牽引する編成で、2セット用意した。編成の全長が60m以上となるため、走行中の安全を確保するためにテレビによる監視システムを設置した。

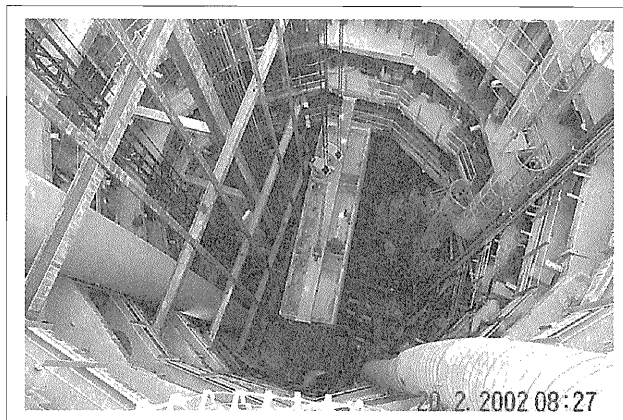
発進立坑は、直径10mの円形である。排土時の作業性を考え、本トンネルの反対側に作業用のトンネルを設け、スムーズな排土及び運搬作業が行えるよう配慮した。軌条は30kgレールを使用し、立坑部に複線を敷設した（写真一2）。

また、掘削の高速化のため、延長3,300mの場所に、複線区間を設けた。

(c) 路上設備

立坑から地上へのずり搬出には、トロッコを門型クレーンにより吊上げ、ずりピットに転倒させるシンプルな構造である。

安全、耐久性には充分信頼のおける機種が要求された。検討の結果、Demac社（ドイツ製）の45t門型クレーンを採用した（写真一3）。



写真一 3 45t門型クレーンによるずり出し作業 (20m³トロッコ)

(3) サイクルタイム

工程から平均10 Ring (15m)/日が要求された。目標サイクルタイムを検討するにあたり、掘進速度を25 mm/minと想定し、平均10 Ring/日の進捗が得られるサイクルタイムを計画した。

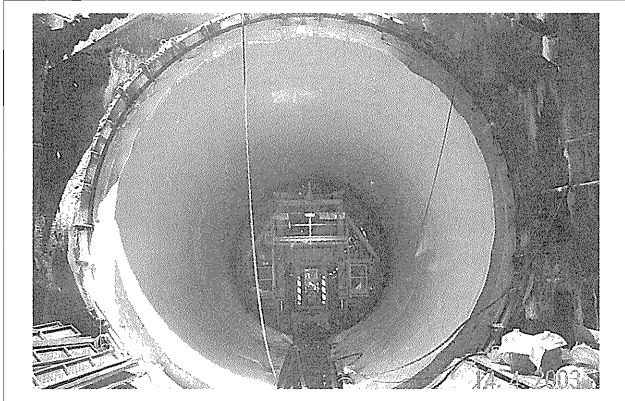
実掘進速度は20~60 mm/minで、計画に沿った進行を確保することができた。実績をみると、初期推進を除いた稼働日当たりの平均進捗は10.7 R (16.1 m)であり、最大記録として、日進21 R (31 m)、週間100 R (150 m)、月間357 R (535.5 m)であった。

4. 2次覆工

(1) 概 念

1章に述べたように、構造物の100年耐久保証が要

求されていることより、写真—4のようなインバート部 30°を除いたトンネル全周に、厚さ 2.5 mm の HDPE シート (High Density Polyethylene Sheet, 高密度ポリエチレンシート) を装着することが契約の設計条件である。従来、6 m 径断面で、長距離にわたり防食シートを現場打ちコンクリートで設置した例はないが、工程上から 30 m/日の進捗が要求された。



写真—4 インバート部のコンクリートは後打ちして2次巻き完了 (アーチ部)

これらの条件を満たすため、以下の概念に沿って施工計画を立案した。

- ① 3台の型枠による同時施工
- ② 1打設/1日/1型枠の進捗が得られる型枠と防食シート装着 (アンブレラフォーム) の設計及び開発
- ③ 型枠内の車両通過
- ④ 型枠設計は、コンクリート打設速度が最大 2 m/h で、170 回以上の転用可
- ⑤ コンクリート設備は高速施工に適合した能力

(2) 施工計画

(a) 型枠およびアンブレラフォーム

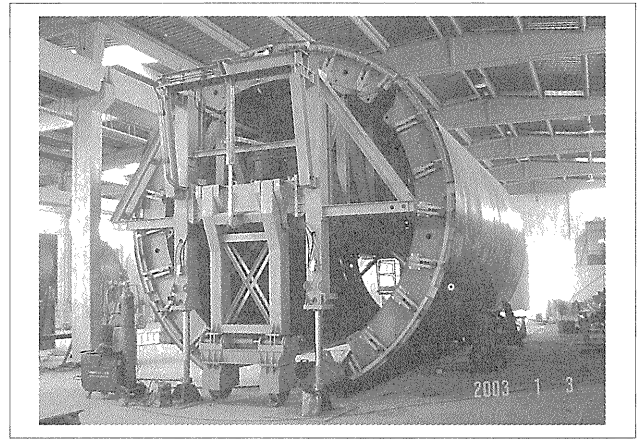
比較検討の結果、CIFA 社 (イタリア) の型枠 (長さ 10.5 m) を 3 台使用した (写真—5)。型枠は、長さ 10.5 m のコンクリート型枠と防食シートを固定するアンブレラフォームから構成されている (写真—6)。

アンブレラフォームは、写真—7 に示すように、防食シートを取込み、組立て、コンクリート型枠へ横移動させる機能を備えている。

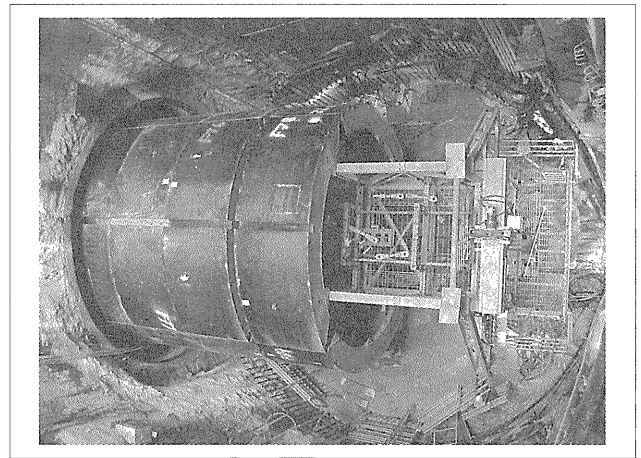
この型枠は、次の特長を有している。

- ① 型枠内部を機関車等の車両が通過している。
- ② 防食シート継ぎをラップ方式とし、トンネルの曲線に対応できる。

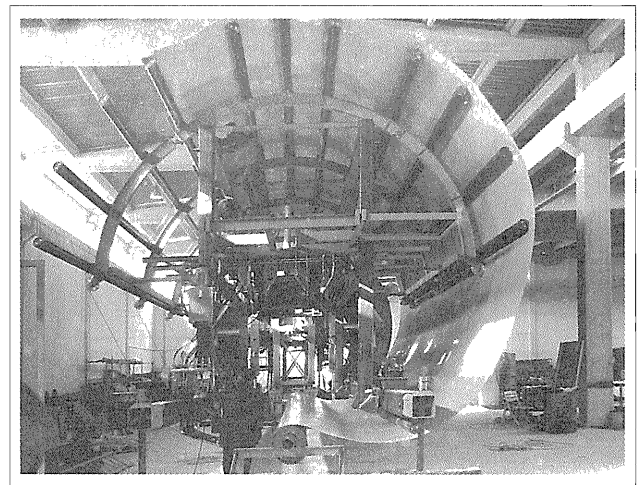
型枠の製作は、油圧及び精密加工等の主要部品はイタリアで、鋼材の加工等をトルコで行った。最終的に、トルコのアンカラ工場で両者を組上げ、作動検査を行っ



写真—5 型枠 (CIFA 社)



写真—6 立坑での型枠組立て



写真—7 アンブレラフォームの作動検査 (トルコ・アンカラ工場)

た。また、実物大の防食シートを持ちこみ、システムの確認を行った。

(b) 防食シートの固定

防食シートは、南アフリカで工場加工された幅 2.7 m、長さ 17.5 m のサイズで現地に送られてくる。トンネル内への投入前に、地上で型枠長さに合わせて投入した (写真—8、写真—9)。

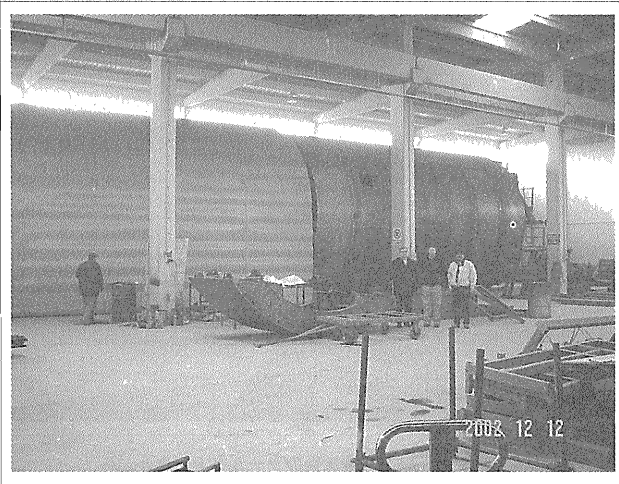


写真-8 防食シートの移動検査（トルコ・アンカラ工場）



写真-9 ワンタッチグループにより防食シートの引込み

防食シートの接続は、約5cmのラップをとり溶接した。溶接には、品質や省力化等を考慮して、写真-10に示すような自動溶接機を採用した。

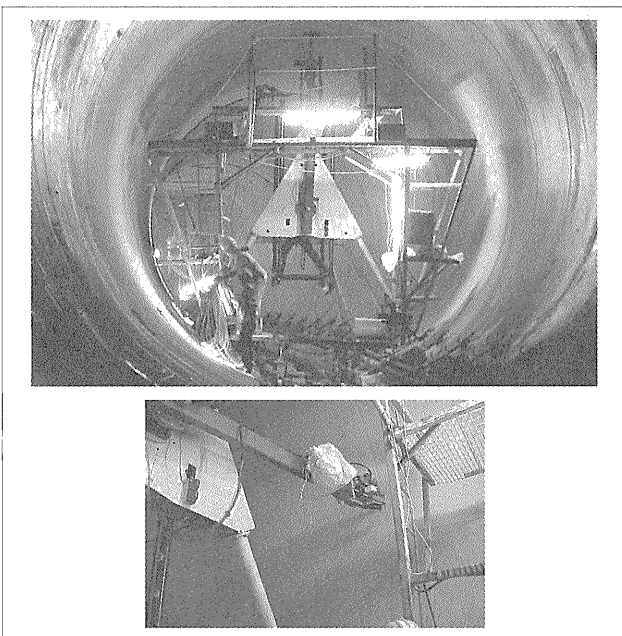


写真-10 自動溶接機全景（上）と自動溶接機（下）

防食シートを張った状態でコンクリート打設を行うと、コンクリートの側圧により防食シートが型枠に押付けられる。シートの固定が充分でないと、余剰の長さのシートが下からコンクリート打設圧力に従い、アーチ上部に押し上げられる。そのため、アーチ上部に溝状のシートによる変形が生じ、最悪の場合、2次覆工の厚さを犯す可能性もある。よって、シート固定方法には、細心の注意を払う必要があった。詳細な検討、実験の結果、写真-11に示すようなシートテンションシステムによる固定方法を開発した。

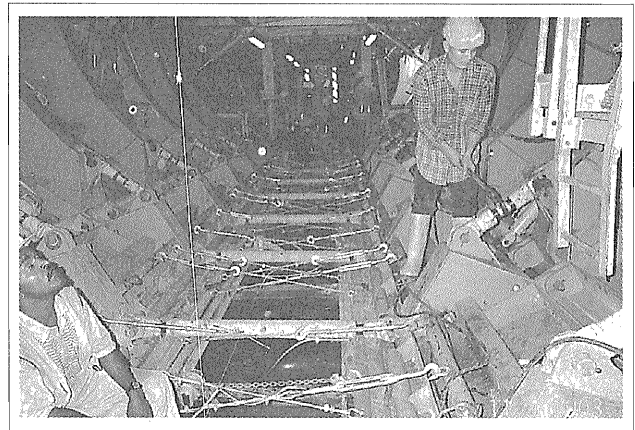


写真-11 シート端末に特殊金物装着する防食シートテンションシステム

(c) コンクリート打設

コンクリート設備として、Mühlhauser社（ドイツ）のアジテータカー（9m³）（写真-12）及びPutzmeister社のコンクリートポンプ（電動45/110kW）（写真-13）を使用した。

打設は、次の理由により、吹上げでなく棲部から水平管による方式を採用した。

- ① 吹上げ方式では、防食シートに穴を設けて固定することが必要となるため複雑となる。
- ② 水平管方式では、棲部からコンクリートの打設状



写真-12 コンクリート吐出しが両端から行える特殊タイプの9m³容量のアジテータカー

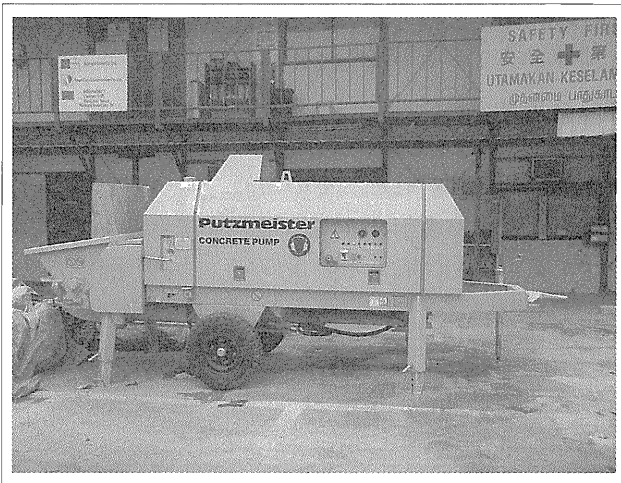


写真-13 コンクリートポンプ

況を観察しながら施工できるため、打設の調整が可能であるとともに、型枠に余分な圧力の作用させることがない。

(3) 施工結果

一般の2次覆工に比べ、防水シートの運搬、取込み、セット、固定の作業が加わる。打設設備とコンクリート性状等から、2次覆工のコンクリート打設に5時間、養生に9時間程度を要する。そのため、1日に1回打設するためには、型枠移動や防水シートのセットのための作業を簡素化し効率を高めていく必要がある。

作業開始当初は、作業員の不慣れ等のため、作業時間を要したが、システムの改良や作業の熟練等により1日に1サイクルの工程を達成できた。

2次覆工のサイクルタイムを表-2に示す。

表-2 2次覆工サイクルタイム

項目	作業	時間	累計
1	コンクリート準備・検査	1	1
2	コンクリート打設	5	6
3	片付け	4	10
4	シート運搬・アンブレラ取込み	2	12
5	妻板バラシ・ボトムフォームセット	4	16
6	脱型及び移動	3	19
7	防食シート移動	1	20
8	型枠セット・シート固定・妻板	4	24

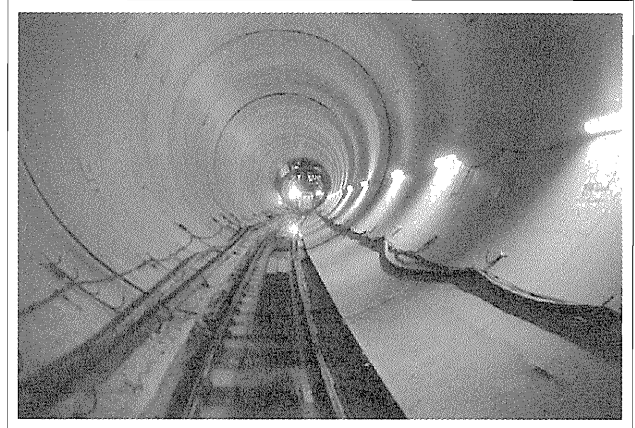


写真-14 2次覆工後のシールドトンネル

写真-14に二次覆工後の状況を示す。

5. おわりに

安全、品質、施工性、コスト等を検討し、試行錯誤のくり返しであった。特に、2次覆工の防食シート採用に関して、大断面では実績のない工法であり、改善と改良の余地が残っている。しかし、100年耐久を考慮したこの工法は、資源、コスト、環境等に配慮したこれからの都市トンネル構築に寄与していくものと考えている。

JCMA

【筆者紹介】

一瀬 邦生 (いちせ くにお)
株式会社熊谷組
国際支店
香港営業所
副所長



木戸 義和 (きど よしかず)
株式会社熊谷組
土木事業本部
シールド技術部
部長

