

## シンガポールでの長距離シールド工事

網野 巖

1999年12月、シンガポールにおいて、大深度トンネル下水道工事を設計施工方式で受注した。本工事の主要工種であるシールドトンネル工事では、軟弱な沖積層、洪積層、岩盤層を泥土圧シールド機1台で延長7.7km（当時としては世界最長クラス）を掘進するという特異な条件下での工事であった。

このような施工条件を克服するため、設計・計画・施工の各段階では数多くの工夫を凝らした。本報では計画段階と施工段階でどのような考え方で工事に臨んだのか、シールド機と後方設備に着目して述べる。

キーワード：長距離シールド、高速施工、摩耗対策、硬質地盤、海外シールド工事、泥土圧シールド

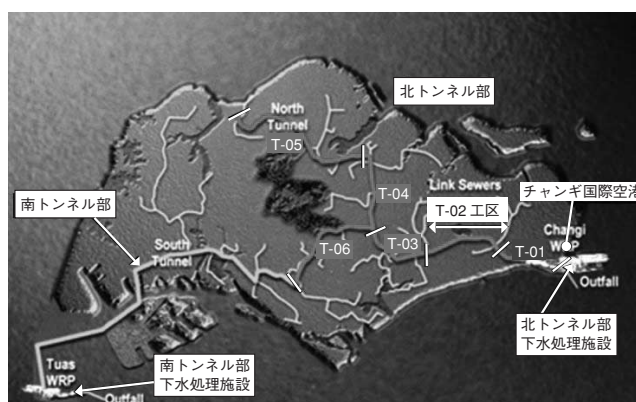
### 1. はじめに

東京23区とほぼ同じ面積の中で様々な国籍や文化を持った人々約448万人が暮らしているシンガポール（東京23区の面積は約700km<sup>2</sup>で、シンガポールは698km<sup>2</sup>である）では、狭い国土を有効に活用していくため、地下鉄や高速道路、下水道や港湾施設などの社会基盤整備を積極的に推進する一方、近年ではカジノやホテル、大規模な娯楽施設建設などの観光事業にも力を注いでいる。また今年の秋には国際自動車レース（F1グランプリ）も開催が予定されている。このような背景から、05年は9,000億円の建設投資額であったが、08年は2兆円を超える見込であり右肩上りの成長を続けている。

シンガポール大深度トンネル下水道システム（The Deep Tunnel Sewerage System：以下DTSSと称す）は既存の下水道システムを再構築し、前述のような大規模開発に伴う下水処理量の増加に対応するために、シンガポール政府のPublic Utilities Board（PUB：公益事業庁）が事業を推進しているものである。現在では関連施設も全て完成し、すでに供用を開始している。

DTSSはシンガポール島北部から東部を網羅する北トンネル部と西部から南部を網羅する南トンネル部から構成され、これらを2期に分割して建設するものである。システム全体として、仕上り内径6m級の下水道幹線トンネルが総延長約80km、仕上り内径3m級の下水道枝管トンネルが総延長約170km、1日あたりの処理量2,000,000m<sup>3</sup>規模の集中下水処理施設と海中放流施設が各1箇所構成されている。図—1

にDTSS位置図を示す。



図—1 DTSS位置図

ここで紹介する工事は、DTSSの第1期工事である北トンネル部の下水道幹線トンネル全延長約48km、全6工区に分割発注されたうちのT-02工区である。T-02工区の主要工種である下水道幹線トンネルは、1台の泥土圧シールド機による延長距離7.7kmの掘進を2年間で完了する計画であった。シールドの掘削対象となる土質は軟弱沖積層、洪積層、岩盤層と多くの種類で構成されていた。このため土質変化に柔軟に対応することが求められた。

本報では下水道幹線シールドトンネルの一次覆工築造にあたり、長距離施工、高速施工、耐久性向上と土質の変化への対応、これらの課題を克服するために設計段階、計画段階、施工段階とステップ毎に数多くの取組みを行った。特に施工段階において、どのようなことを考えて工夫を凝らしていったのか、シールド設

備に関係する事柄を中心に報告する。

## 2. 工事概要

T-02 工区はシンガポール島南東側のベドック地区を工事の始点として、そこから西側に位置するパヤレバ地区に到達するシールドトンネルと約 1.5 km 間隔に築造する点検用人孔および発進・到達部に築造する脱臭施設などの構造物を設計施工するものである。工事概要を表—1 に示す。

表—1 T-02 工区の工事概要

工事件名	大深度トンネル下水道工事 T-02 工区 <Deep Tunnel Swerage System T-02>
発注者	公益事業庁 <Public Utilities Board>
施主コンサル	CH2M/PB Jv Pte.Ltd.
施工者	五洋建設株式会社 <PENTA-OCEAN Construction Co.,Ltd.>
設計コンサル	TY-LIN/HALEY & ALDRICH/KISO-JIBAN/KTP/DR SAUER/SQUAR MECH Jv
工事期間	契約時：2000 年 1 月～2004 年 2 月 23 日 契約後：2000 年 1 月～2004 年 3 月 18 日
工事場所	シンガポール ベドック地区～パヤレバ地区
工事内容	<p>①下水道幹線トンネル工</p> <p>延長 7,717 m 仕上り内径 6.0 m 土被り 30～50 m 平面曲線 最小 R = 220 m 縦断勾配 0.05 % セグメント 外径 φ 6.96 m 長さ 1.5 m 厚さ 250mm 分割数 5 + K</p> <p>重要構造物 鉄道高架橋 &lt;MRT&gt; 高速道路 &lt;PIE&gt; 運河 &lt;BEDOK Canal&gt; 主要幹線道路 &lt;Upper Changi Road&gt;</p> <p>対象土質 固結砂層 &lt;Old Alluvium&gt; 花崗岩 &lt;Granite&gt;</p> <p>②付帯設備</p> <p>立坑（点検人孔） 発進立坑×1 到達立坑×1 中間立坑×5 基</p> <p>脱臭施設 2 基</p> <p>小口径トンネル 200 m</p>

## 3. 土質概要

図—2 に土質縦断（概略）図を示す。シールドトンネルの掘削対象となる地盤は、一部区間で Kallang Formation（沖積層，海成／河成堆積物）がトンネルクラウン付近まで分布している場所があるものの、そのほとんどが Old Alluvium（洪積層，固結砂質

土：以下，OA 層と称す）であった。OA 層の粒度構成は砂分が 65～85% を占め，その砂分の組成は長石と石英が大部分を占めている。N 値は場所によっては 100 以上，透水係数は  $10^{-5}$  以上である。これらから磨耗性が非常に高い硬質な地盤であると判断した。また工事着手後，詳細設計に反映させるために追加土質調査を行ったところ，発進立坑から約 6.9 km の位置で花崗岩層の存在が確認され，入札時想定外の土質として発注者と協議して各種の対策工を実施した。さらに掘進中に発進立坑から約 4.7 km の位置では高水圧滞水砂岩層にも遭遇した。これら想定外土質の出現がシールド掘進の進捗に大きな影響を及ぼした。

## 4. シールド設備計画

### (1) 施工計画の基本方針

前項までに述べてきた施工条件を全てクリアにするため，当工事の条件に適したシールド設備を選定することが最も重要であるとの認識から，施工計画の策定においては多大なる労力と時間を費やし，より良い方法を追求した。

当工事の主な課題を以下にまとめる。

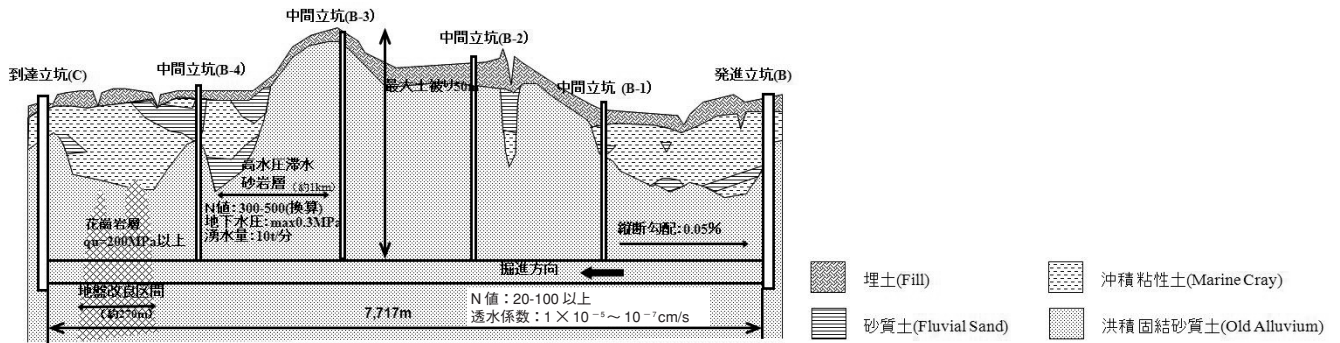
- ①長距離施工：延長 7.7 km を一台のシールド機で掘進する
- ②高速施工：平均日進量 13 m を 2 年間維持する
- ③硬質地盤：磨耗性が高く非常に硬い地盤を掘進する
- ④複合地盤：掘削対象地盤は沖積層から洪積層，花崗岩層と多岐に及んでいる

これらの課題に対応できるシールド設備を計画するために『長距離・高速施工に対応したシールド機とそのシールド機の能力とバランスの取れた後方設備（後続台車～地上設備）』にするとの基本方針に基づいて施工計画を進めた。

### (2) シールド機の計画

シールド機の設計をするうえで，発注者からの要求仕様を満足することはもちろん，磨耗性の高い地盤において長距離・高速施工を実現させるために以下の課題をクリアする必要がある。

- ①耐久性の向上：特にカッタービットやスクリュコンベアは掘削土砂と直接接触するので，優れた耐久性が必要
- ②余裕のある装備機器の能力：カッタートルク・推進力・排土能力には十分な余裕が必要
- ③円滑な交換作業：カッタービットなど消耗部品の交換作業をスムーズに行うための構造や道具の工夫



図一 戦略土質縦断面



写真一 シールド機全体



写真二 カッターヘッド

- ④花崗岩層の掘進：花崗岩層も掘進するために必要な装備と能力
- ⑤予備品のストック：海外工事であることを考慮した予備品の保管・調達方法

写真一に $\phi 7.16\text{ m}$  泥土圧式シールド機全体、写真二にはカッターヘッドを示す。

カッターヘッドの耐久性向上のため、カッターリング部は高張力鋼で製作し、カッタスポーク部は随所に磨耗防止板を設置した。また全てのカッタービット（コピーカッターやフィッシュテールビットも含む）は交換可能なようにボルト固定とし、掘削地盤によってディスクカッターも設置可能な構造とした。スクリュコンベアも耐久性向上を目指して、オーガやケーシングに多量の硬化肉盛りを施し、さらに部分的な交換が可能ないように二重ケーシング構造とした。

またカッター回転軸受けは故障すると完全に致命傷となるため、土砂シールの設置数量や給脂量の増量、軸受け部分の状態監視のために潤滑材の成分分析など過酷な条件下で連続運転ができるシールド機を設計した。

### (3) 後方設備の計画

#### (a) 後方設備計画の課題と考え方

長距離・高速施工を実現させるために、シールド機

の能力が十分であることは当然であるが、付随する後方設備もシールド機と同等以上の能力を有している必要がある。後方設備を計画するうえでの課題は、1日当りの掘削土砂搬出量が $1,200\text{ m}^3$ 以上となることである。したがって後方設備は掘削土砂搬出設備を主体に計画し、それに付帯設備を肉付けすることで計画した。

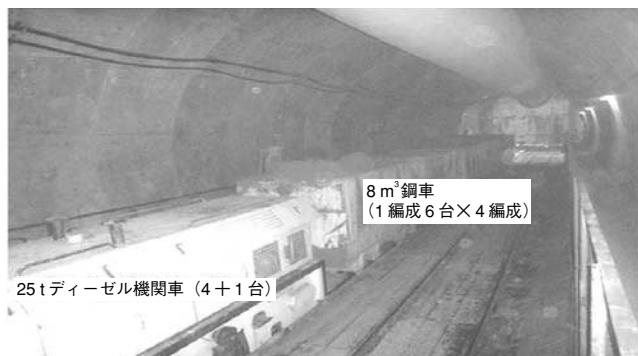
使用機器の選定に当たっては、汎用性ある機器を積極的に選定し、予備品の現場内ストックや代替機器の検討など日進量を絶対に“ゼロ”にしない方法を追求していった。

#### (b) 掘削土砂搬出設備

掘削土砂搬出方法の選定において、計画当初は多くの選択肢を挙げた。特に連続ベルトコンベアなど連続的に残土を坑外に排出できることは、高速施工を目指すうえで非常に魅力を感じた方法であったが、トラブルが発生した場合には、それが解消されるまで掘進停止となることから、このような方法は避け、信頼性が高く、あらゆる状況にも柔軟に対応できるベルトコンベアと鋼車による掘削土砂搬出方法を採用した。写真一3～5に掘削土砂搬出設備の設置状況を示す。



写真一三 掘削土砂搬出状況 1 (シールド機)



写真一四 掘削土砂搬出状況 2 (坑内)

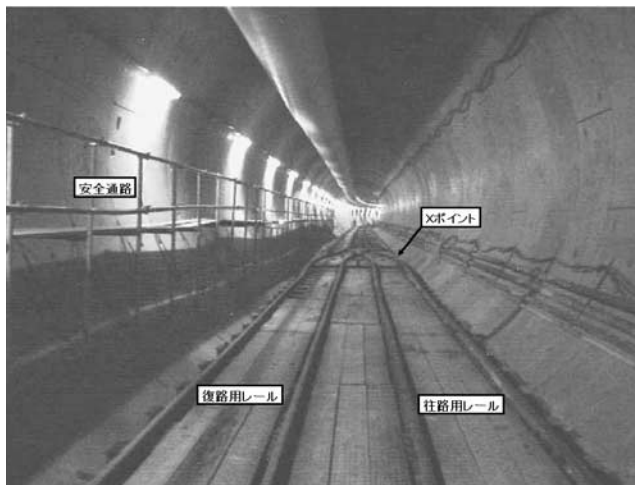


写真一五 掘削土砂搬出状況 (発進立坑)

(c) 坑内資材運搬設備

掘削土砂の坑外搬出やセグメントなどの必要資材の坑内運搬には、25tディーゼル機関車1台に8m³鋼車6台、セグメント台車1台、裏込注入材料運搬台車1台を連結した編成を4セット使用した。計画当初、バッテリー機関車の使用を検討したが、バッテリーの蓄電能力不足によるサイクルタイムへの影響が大きいことに加え、海外のシールド工事ではディーゼル機関車が一般的に使用されている点からも、ディーゼル機関車の採用を決定した。

軌条については全線にわたって等三複線軌条を敷設して、往路線と復路線とした。また坑内の数箇所にはポイント(X式やY式)を設け、機関車編成がトラブルなどで坑内の途中で立ち往生した場合でも資材運



写真一六 軌条設置状況



写真一七 セグメント運搬状況

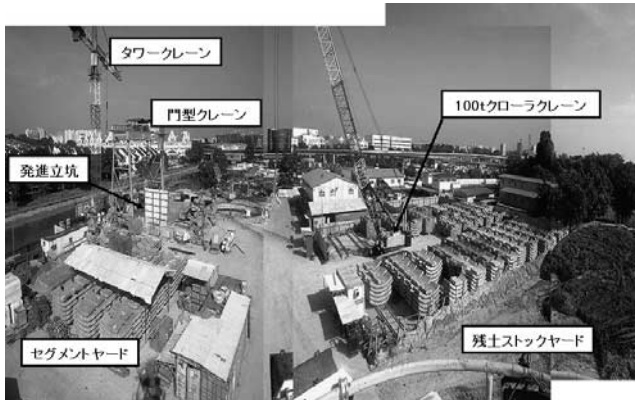
搬が滞ることがないようにした。写真一六に軌条設置状況、写真一七にセグメント運搬状況を示す。

(d) 地上クレーン設備と作業基地

坑内との資材等搬出入のために、発進基地には3種類のクレーン設備を設置した。坑内からの掘削土砂搬出用として25t吊2フック式橋型クレーン、坑内へのセグメント投入用としての16t吊タワークレーン、地上での資材仮置きのための100t吊クローラクレーンを設置した。これらは代替運転が可能な能力を有している機器を選択した。つまり1基のクレーンが故障した場合でも、残る2基のクレーンで故障したクレーンの作業を補完できる仕様とした。

一方、高速施工を可能にするために、作業基地は広大なものが必要であった。セグメントの仮置き場、軌条材料などの仮設資材のストック場、シールド設備の予備品のストック場など国外からの輸入に対応できる面積が求められた。さらに設備のメンテナンスを行う施設や掘削土砂の仮置き場も作業基地に含めた。

写真一八に作業基地全景を示す。



写真—8 作業基地全景

## 5. シールド掘進

2001年2月初旬に発進したシールド機は、約90mの初期掘進と本掘進への段取り替え作業を終えた後、7.7km先の到達立坑に向けて同年4月19日に本掘進を開始した。

### (1) 施工上の基本方針

実際の施工では、平均日進量13mを確保するために施工上でどのような工夫が必要なのか、磨耗性の高い地盤を掘進することによる機械の磨耗を減らすために施工上でどのような工夫が必要なのか、最重要課題であった。

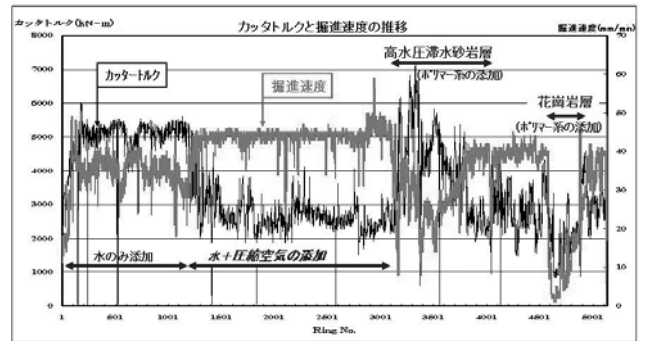
『今日の1リングよりも7.7km先を目指す』、これを基本方針に掲げ、種々の取組みを実施していった。

### (2) 本掘進での取組み

課題克服の基本方針に基づき、それらを実現するために実行した取組みを、具体例を交えて以下に示す。

#### ①シールド機の負荷軽減となる掘進方法の確立

長期間継続して必要日進量を維持するためには、低負荷でのシールド掘進が必要であった。特にカットトルクの軽減は、カットモータ出力を抑制し、機器の高温化による悪影響を最小限にすることやカットヘッドの磨耗低減に大きく寄与することが期待された。カットトルクの低減を図るうえで、掘削土砂の適切な塑性流動化は不可欠である。現地で入手可能な添加材を多数試みたが、磨耗性が高いばかりでなく、細粒分も20～30%と含有するOA層は粘着性も高く、添加材の注入によって余計に粘着力が増す傾向が認められたため、水のみでの添加で掘削土砂の塑性流動化を図った。さらに水とともに圧縮空気を切羽に送り込むことにより、カットトルクはこれまでの50～60%程度に激減したため、日進量は飛躍的に向上した。図—3にカ



図—3 カットトルクと掘進速度の推移

ットトルクと掘進速度の推移を示す。

#### ②効率的な資材の坑内運搬方法の確立

必要な日進量は平均13mであったが、これを維持するために実際には13m以上の日進量を確保していく必要があった。そのためには資材運搬をスムーズに行うことが重要であった。しかしながら、機関車編成の走行速度を速くすることは安全上好ましくない。そこで資材運搬に関わるムダを省くために、作業手順を分析した後、投入資材の仮置き方法や機関車編成の待機方法、またクレーンの空フックの待機方法など細部にわたって徹底的に作業員を指導していった。

#### ③日常的な改善の実施

作業での様々な取組みも、幾多の改善によって効果を実感するものである。改善案が見つければすぐに試して効果を確認し、効果的なものは即実施していく。全職員が常日頃から改善策を意識することで、より効果的な方法を追求していった

#### ④予防措置的なメンテナンスと突発的なメンテナンス

シールド機ではカットビット、カットヘッドおよびスクリュコンベアなど土砂の掘削と排出を行うための機器設備に対して、磨耗の予防措置を施すメンテナンスを、時期を先取りして効率良く実施した。シールド機本体を磨耗疲弊させることを回避し、平均日進量の確保に影響を与えかねない大規模な補修は発生させないことを目指した。

後方設備については、設備に飛散・落下した土砂の清掃には特に気を配った。清掃は日常的なものに加え、定期的(毎週日曜日)にも行い、清掃が不備な場合には、シールド掘進を停止してでも確実に行うように指導していった。このようにすることで、設備の稼動状態を常時監視して、早期に異常発生を発見することができる考えたのである。

一方、シールド掘進中に設備の異常を発見した場合は、すぐに状況を調査して補修方法を即座に判断した。

特に補修するタイミングは重要で、補修に要する時間や予備品の有無や保管場所を総合的に判断して、掘進を停止する時間を最小限に抑えるような補修方法を選択していった。例えば、機器のユニット単位での交換や、短期的な延命措置を施して定期点検日に補修作業を行うなどの工夫をして突発的なトラブルに対応した。また予備部品の在庫状況（数量や保管場所）の確認や必要工具の準備なども重要な業務で、海外工事であることを意識した管理を行っていった。

⑤日本国内での施工と同等の施工管理体制の確立

シールド工事の担当職員は、シールド工事経験者の日本人職員（土木・機電職）を中心に、現地職員（土木・機電職）もバランス良く配置した組織とした。

現場稼動サイクルは、1週間で6日間がシールド掘進日で24時間2交代制とし、日曜日を定期メンテナンス日として昼勤のみとした。しかしシールド掘進期間が2年間と長期間となることから、職員に過度な負担が掛からないように人数や休日、また金銭的な待遇など職場環境にも配慮した。

6. シールド掘進完了

図-4 にシールド掘進の実施工程と計画工程を比較して示す。実施工程全体では約10ヶ月の工程遅れを生じる結果となった。これは高水圧滞水砂岩層と花崗岩層の遭遇による影響であった（発注者との協議に

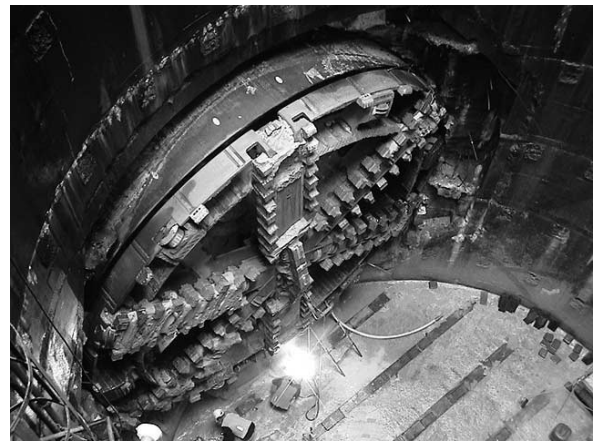


写真-9 シールド機到達

より工期延長は認められた)。しかし実掘進日当りの平均日進量は、想定外土質区間での実掘進日を含め14.2mであり、計画平均日進量13mを上回ることができた。特にOA層区間での掘進においては、最大日進量28.5m、最大月進量614m、最大年間掘進量4,779mを記録した。また到達するまでにシールド掘進中に数多くの設備トラブルが発生したが、日進量が“ゼロ”となった日は2日間だけであった。

2003年12月19日、到達立坑に7.7kmの掘進を完了したシールド機が再び全姿を現した。写真-9に到達時の様子を示す。

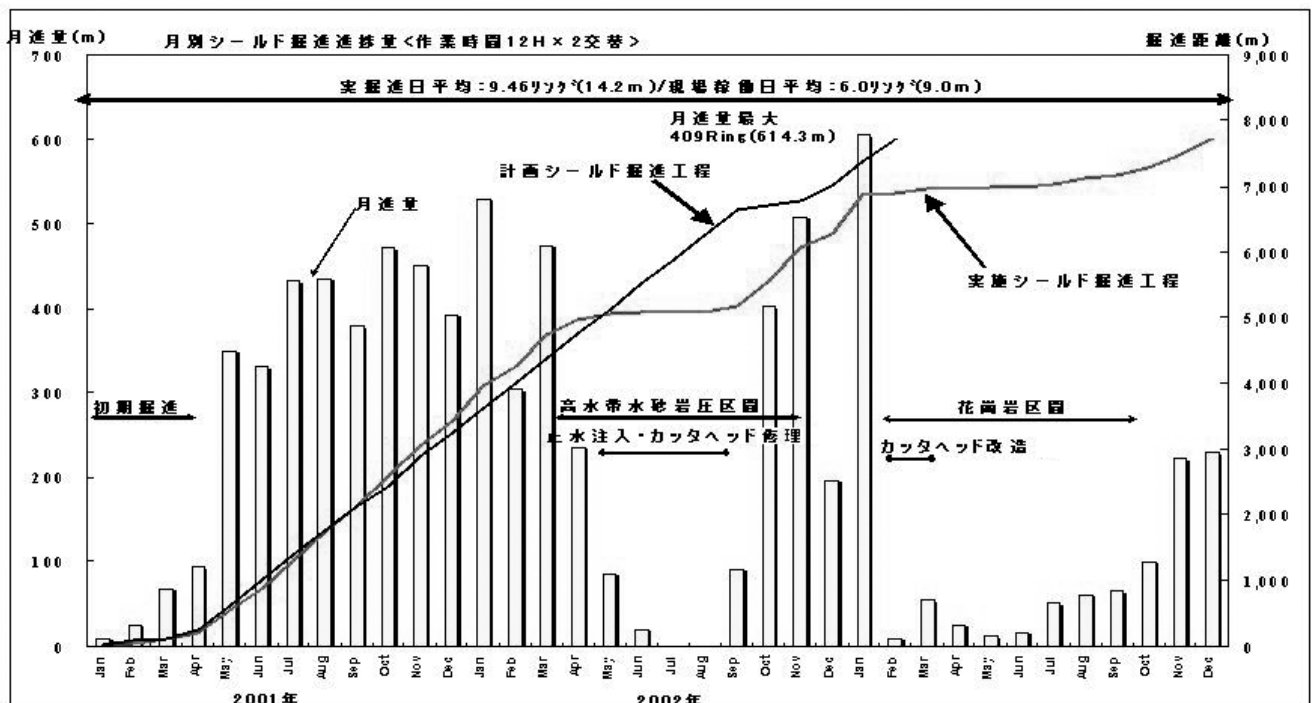


図-4 シールド掘進進捗図

## 7. おわりに

本工事は沖積層・洪積層・花崗岩層と多岐に及んだ地盤中に、平均日進量 13 m で延長 7.7 km のシールドトンネルをどのように築造するのか、という戦いであった。本報では数々の計画と対策の中で、誌面の都合上、シールド機とシールド設備に関係した取組みに注目し、その中の一部を報告したが、報告できなかった取組みはこの数倍ある。数々の取組みを実行し、無事に到達することができたのは、組織全体で問題点と方針が共有化でき、全職員が同じ意識の中で業務を遂行したことが大きな要因であったと今でも確信している。

長距離シールド工事は、延長 1 km 程度のシールド工事とは全く別物である。シールド機を含めた設備全

体と工事組織を含めた工事全体の構成要素がバランス良く計画され運用されることが肝要であることを実感した工事であった。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) 五洋建設㈱：土圧系シールドによる世界最長級トンネル掘進への取り組み，技術年報 [34] (2004)

### 〔筆者紹介〕

網野 巖 (あみの いわお)  
五洋建設㈱  
名古屋支店  
地下鉄 6 号線工事事務所  
工事所長代理



## 「建設機械施工ハンドブック」改訂 3 版

近年、環境問題や構造物の品質確保をはじめとする様々な社会的問題、並びに IT 技術の進展等を受けて、建設機械と施工法も研究開発・改良改善が重ねられています。また、騒音振動・排出ガス規制、地球温暖化対策など、建設機械施工に関連する政策も大きく変化しています。

今回の改訂では、このような最新の技術情報や関連施策情報を加え、建設機械及び施工技術に係わる幅広い内容を取りまとめました。

### 「基礎知識編」

1. 概要
2. 土木工学一般
3. 建設機械一般
4. 安全対策・環境保全
5. 関係法令

### 「掘削・運搬・基礎工事機械編」

1. トラクタ系機械
2. ショベル系機械
3. 運搬機械
4. 基礎工事機械

### 「整地・締固め・舗装機械編」

1. モータグレーダ
2. 締固め機械
3. 舗装機械

● A4 版 / 約 900 ページ

### ● 定 価

非 会 員：6,300 円 (本体 6,000 円)

会 員：5,300 円 (本体 5,048 円)

特別価格：4,800 円 (本体 4,572 円)

【但し特別価格は下記○の場合】

○学校教材販売

〔学校等教育機関で 20 冊以上を一括購入申込みされる場合〕

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも沖縄県以外 700 円、沖縄県

1,050 円

※なお送料について、複数又は他の発刊本と同時申込み

の場合は別途とさせていただきます。

●発刊 平成 18 年 2 月

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>