

2 本同時施工の両発進立坑で月進800mを 可能にしたシールド工事の計画と実績

High speed (800m/mon) tunneling construction with high performance tunnel shafts
that accommodates two simultaneously operating TBM excavation

木原晃司¹・木田博光²・上原啓史³

Koji Kihara, Hiromitsu Kida and Hiroshi Uehara

¹正会員 工修 東京ガス(株) 東部導管NC (〒116-8522 東京都荒川区南千住三丁目13-1)

²正会員 鹿島・清水・大林・大成建設共同企業体 (〒124-0011 東京都葛飾区四つ木二丁目23-10)

³正会員 工修 鹿島・清水・大林・大成建設共同企業体 (〒124-0011 東京都葛飾区四つ木二丁目23-10)

E-mail: ueharah@kajima.com

The planned gas pipe line route (23.1km) runs through congested commercial area of the downtown Tokyo. In order to minimize environmental impact to the local society and the already busy traffic, the number of tunnel shafts and also the construction period is to be minimized to the extent practical. To this goal, we planned long span tunnels with high speed TBM excavation and high performance tunnel shafts that accommodate two simultaneously operating TBM excavation (opposite direction) at each shaft. In addition, we applied a direct underground TBM docking method at the connections of tunnels, and multistage TBMs for enlarged tunnel diameter in some sections.

Key Words : slurry shield TBM, tunnel shaft, underground TBM docking, multistage TBM

1. 工事概要

東京ガスは、首都圏の増加するガスの需要に対応して、ガスの安定供給を確保するため、既存の環状幹線の中央を貫く新たな高圧幹線「中央幹線(23km)」(図-1参照)を2009年の開通を目標に建

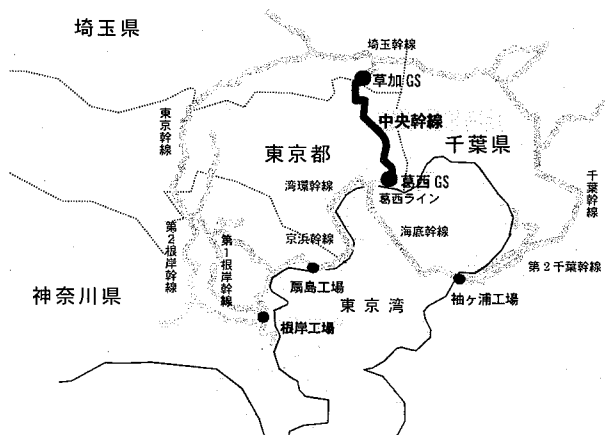


図-1 中央幹線路線図

設する計画をした。そこで2001年9月、プロジェクトの施工性および経済性などを考慮した施工技術と幹線の路線提案を受ける技術提案型の指名競争入札(設計施工)を行った。

プロジェクト実施の確実性、工費・工期の低減などを総合的に評価し、4台の親子シールドマシンを2箇所の中間立坑から両方向に発進し、2箇所で地中接合させることで施工進捗の向上を図りながら、大深度地下(地下40~50m, 最大65m)に高圧ガス幹線を形成する立坑の合理的配置と数の低減および長距離高速施工の提案を選定した。

本幹線は首都圏を縦断する23.1kmを、5本の小口径(内径φ2000)泥水加圧シールド機で同時施工するもので、小口径、大深度、長距離、高速施工の世界トップ水準の工事である。

セグメントには鋼製セグメントを採用し、そのまま本設構造として利用する。また、トンネル内はガス配管敷設後に空隙をエアモルタルで充填する。図-2に完成時のトンネル断面を示す。

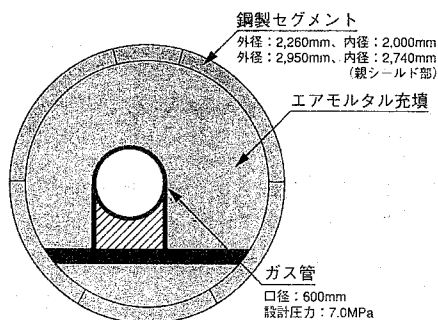


図-2 トンネル断面図

2. 問題点

本工事の路線は東京下町の密集した商工業地域であり、立坑用地の確保が難しいこと、既設の地下構造物への影響を低減すること、地域住民・交通への影響をできるだけ少なくすることが課題であった。

これらを解決する施策として「大深度」、「親子シールド」、「長距離施工」、「高速施工」、「地中接合」、「立体化立坑」を採用した。特に周辺地域への環境負荷の配慮から、立坑の数を低減し、かつ、短工期での施工を可能にするため、狭い立坑用地で、2本の長距離シールドを同時高速施工するための立坑設備を計画することが最大の問題となった。図-3に計画した立坑およびシールドトンネルの概要を示す。

(1) 大深度、長距離施工の問題

大深度の問題に関してはシールド機およびセグメントの耐荷性能を向上することで解決ができた。長距離施工に関しては、換気とカッタービットの磨耗

との対策が問題となる。換気に関しては、漏気および圧力損失の少ない新規開発の風管（ピタジョイント・ダクト）を採用し、全区間にわたって地上からの集中排気方式で坑内風速0.3m/秒の換気量を確保し解決した。また、長距離をカッタービット交換無しで掘削するため、同一パス上にビットを3段階差配置した。第1先行ビットが摩耗限界に達するまでは第2先行ビットは第1先行ビットに保護され、第1、第2先行ビットが摩耗限界に達するまではツールビットは第1、第2先行ビットに保護される形となり、結果的にビット交換を行うことなく10kmまで掘進可能である。

また、長距離になると情報伝達の面でも問題が出てくる。たとえば、切羽でトラブルがあっても担当者が地上から切羽に到着するまで1時間弱かかってしまう。これに対しては、坑内にLANのネットワークを設置し、任意の場所にWebカメラを設置したり、ノートパソコンをつないで情報交換できるようにした。また、このLANを利用して坑内PHS携帯電話を導入し、坑内のどこからでも直接（外線で）、専門業者にトラブルに関する連絡ができるようにした。

(2) 高速施工と立坑数縮減の問題

まず、立坑数の縮減を直接的に解決する地中接合を2箇所に導入した。これと同時に、トンネルのスパンを長距離化し、両発進の立坑とすることで、さらに立坑数を減らすこととした。しかし、限られた数と広さの立坑で目標とする短工期を実現するためには、立坑自体のセグメントや資機材の搬入などの処理能力が最大のボトルネックとなる。そこで、本計画の主な目標を、「合計月進800mを可能にする両発進立坑」とし、立坑処理能力の向上のための方法を検討した。特に今回の工事のような、都市部密集

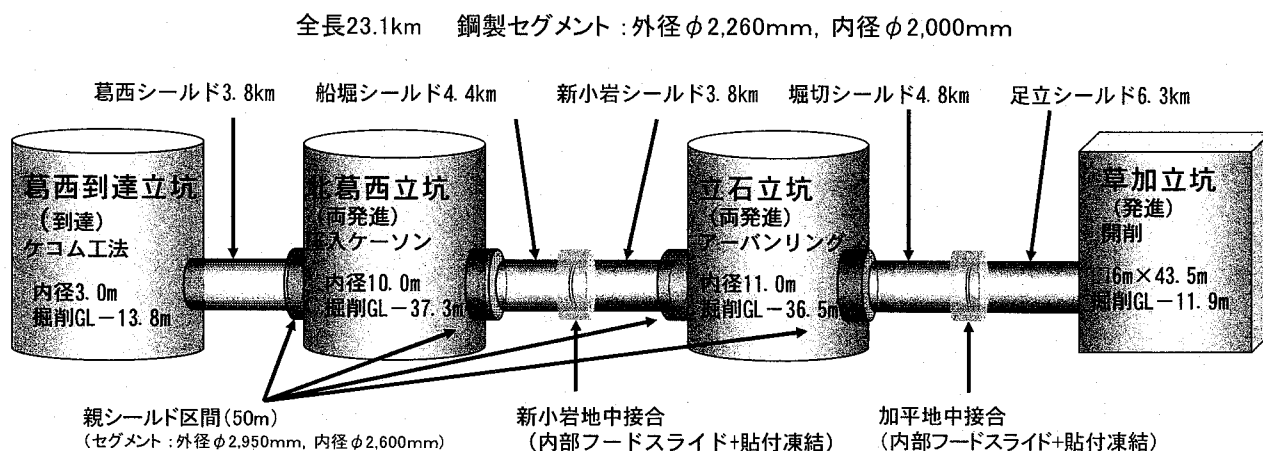


図-3 工事概要

地域での小面積立坑の場合の処理能力とは、①立坑・坑内でのロジスティックス（ストックヤード、荷捌き、搬送）の問題、②狭い立坑用地での処理プラント設計と配置、③材料・残土の搬入出の問題に分けて考えることができる。次章では、これらの問題点に対する解決策に焦点を絞って紹介する。地中接合等の詳細については参考文献1)を参照されたい。

3. 解決の方法

(1) ロジスティックスの問題

a) セグメントストックシステム

1日平均40リング（40m分）のセグメントを受入および供給するための手段として、セグメント受入から立坑下までのセグメント供給を自動化するセグメントストックシステムを採用した（図-4、写真-1）。

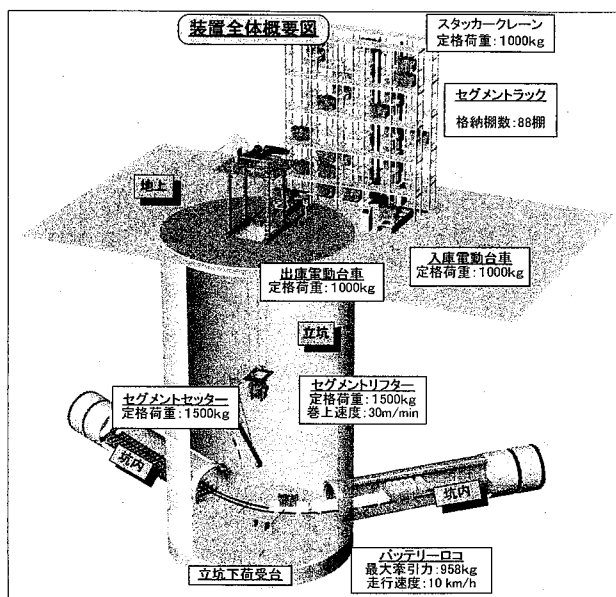


図-4 セグメントストックシステム図

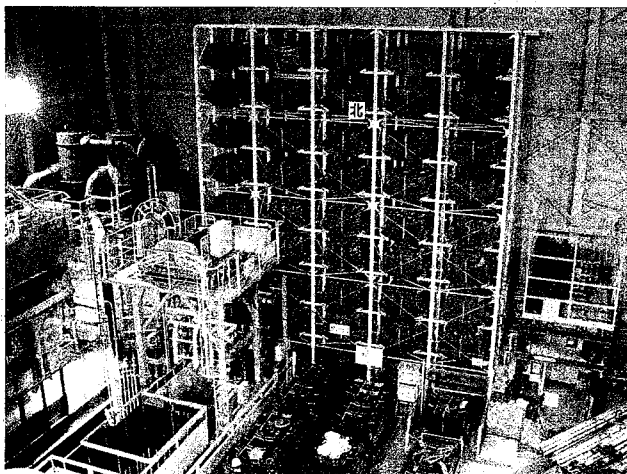


写真-1 セグメントラックとリフター

本システムはセグメントを受入・保管するセグメントラック、セグメントを立坑下まで自動供給する垂直搬送機、セグメントをセグメント台車に移載するセグメントセッターで構成される。

セグメントラックはセグメント2日分程度（80リング以上）の保管を可能にする。また、本工事で使用するセグメントは17タイプあり、両発進立坑であることを考慮して、セグメントの選択のミスが無いように立体駐車場のような在庫管理システムを導入した。これにより、オペレーターが出庫ボタンを押すだけで必要なセグメントが立坑下まで自動搬送される。

b) 親子シールド

内径2mの坑内では単線の軌道設備のみ設置できる。そこで、坑内での搬送効率を上げるため、立坑より50mの区間は親子シールドを採用してトンネル径を拡幅し、複線区間を設けて1編成の台車が切羽へ搬送中に、もう1編成の台車で積込ができるようにした。

当初案として内径5mほどの親シールド区間を設け、地下ストックヤードとして活用する計画もあったが、道路管理者や他の埋設企業者から確実に施工の許可が得られること、ストックヤードは上記のセグメントストックシステムで代替可能であることを考慮し、親シールドの径と区間は台車の離合に必要な空間に留めた（図-3参照）。

写真-2は工場での分離確認試験の様子である。親子シールドは両発進立坑（北葛西、立石）の4台すべてのシールドに採用された。

c) 切羽部セグメント搬送装置

狭い切羽付近でのセグメントの搬送を円滑に行うため、また、セグメント台車を切羽での荷卸後、直ちに坑口に引き返させるため、切羽部にセグメ

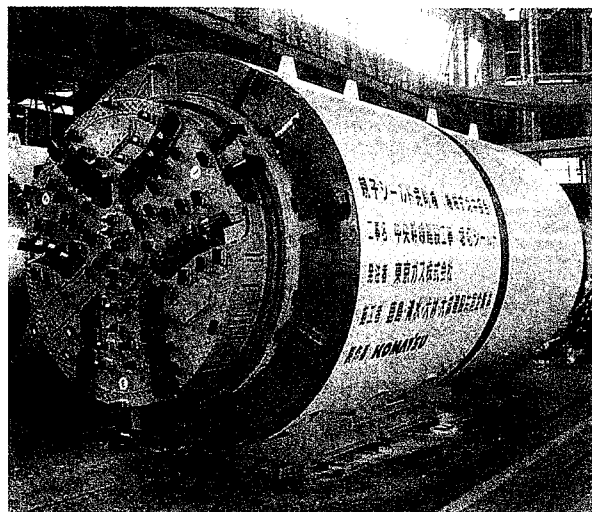


写真-2 親子分離状況

ントの搬送装置を導入した。

切羽部セグメント搬送装置は、表-1のような構成とセグメントの流れになる。

表-1 切羽部セグメント搬送装置の構成

セグメントの動き	搬送リング数	動力源
セグメント台車	1～4リング一括搬送	バッテリーロコ
↓		
台車部荷受け装置	一括荷受	油圧駆動
↓		
エアー式自走台車または ブレーキ付手押し台車	0.5リング(3ピース)毎	エアー駆動
↓		
切羽部搬送装置	1ピース毎	エアーホイスト 電動横行
↓		
エレクター		

セグメント台車で運ばれて来た4リング分のセグメントは、荷受け装置で一括に吊り上げられ、台車は坑口に向けて引き返す。切羽でのセグメント組立に合わせて、セグメントはエアー式自走台車（平坦区間は手押し台車で）、切羽部搬送装置、エレクターへと順繰りに運ばれる（写真-3、写真-4）。

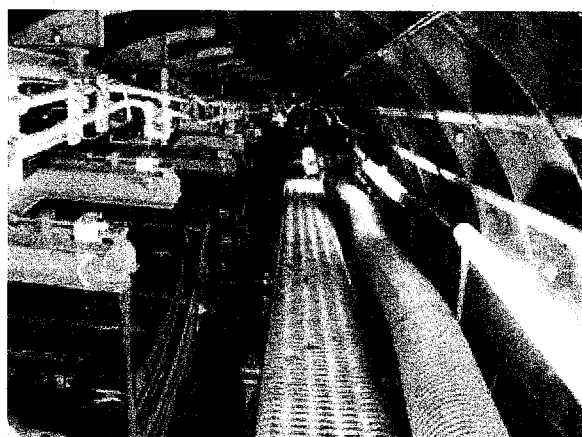


写真-3 台車部荷受け装置

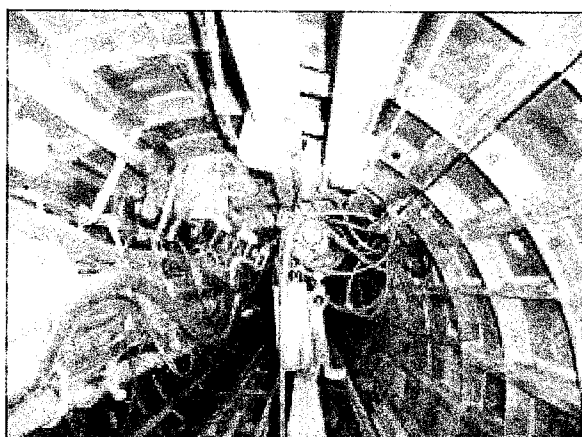


写真-4 切羽部搬送装置

これらの装置により、少なくとも3リング目の組立に入るまでの3×40分（組立時間）＝120分が節約されセグメント台車の切羽での足止め時間が最小になった。

(2) 処理プラントの問題

泥水処理施設は、立坑あたり最大日進量80mとして各シールドの掘削土層に適応した設備を導入し、設備能力に余裕を持たせて高速掘進に備えた（表-2 泥水処理設備スペック表参照）。

これらの設備を立坑用地内に配置するため、立石

表-2 泥水処理設備スペック表

		立石工区 (堀切・新小岩)	北葛西工区 (船堀・葛西)
設置条件	敷地面積	1064m ²	943m ²
	処理設備1F面積	560m ²	370m ²
	階層	2階	3階
	設備延床面積	668m ²	670m ²
一次処理設備	一次サイクロン	MD-9*3台*2系統	MD-9*3台*2系統
	二次サイクロン	MD-6*2台*2系統	MD-6*4台*2系統
	振動篩	3床1.5*3.6*2台	3床0.9*2.4*2台
	泥水受槽	8m3*2台	6m3*1台
	一次調整槽	45m3*2台	20m3*1台
二次処理設備	二次調整槽	53m3*2台	60m3*2台
	余剰泥水槽	80m3*1台	60m3*1台
	スラリー槽	80m3*1台	60m3*1台
	雑排水槽	スラリー槽兼用	10m3*1台
	フィルタープレス	10.9m3*2台	5.0m3*2台
	ろ水槽	希釈水槽兼用	10m3
	清水槽	36m3*1台	20m3*1台
	希釈水槽	55m3*1台	40m3*2台
	貯泥槽	無	60m3*1台
	作泥設備	有	無
	一次土砂ピット	120m3	162m3
	二次土砂ピット	120m3	135m3

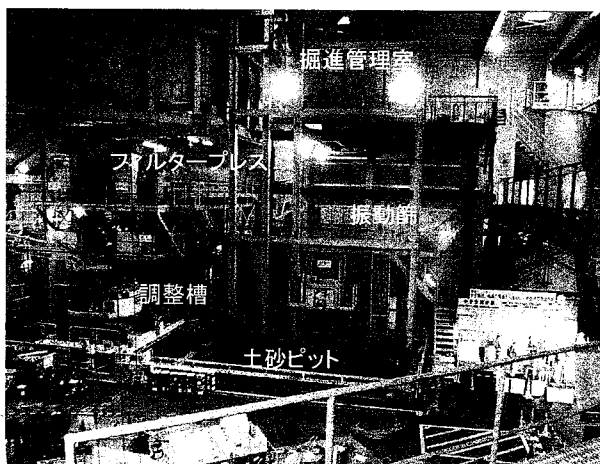


写真-5 処理プラント（立石立坑）

立坑は2階建（掘進管理室を入ると3階建，写真－5），北葛西は3階建の配置とした．北葛西は収容面積が狭いため，泥水受槽，一次調整槽などは2シールド（船堀，葛西）兼用となり，振動篩とフィルタプレスの容量も立石の約半分となっている．船堀シールドが砂層掘削中に葛西シールドが粘土層を掘削するとき，あるいはその逆の場合に，泥水処理設備は2シールド分の処理能力を必要としない．掘進工程に沿ってお互いの土層を見比べると大部分で砂層，粘土層の掘削タイミングがずれるため，これらの設備でうまく処理できると予想できた．

(3) 搬入出の問題

各立坑では標準セグメントで日最大 60 リングの受入を行う．常時延べ 40 台前後の残土搬出ダンプトラックが出入する中で，セグメント搬入車両 1 台に 20 リング積載したトラックを朝，昼，午後と 3 回に分け搬入し，シールド貼りが終了次第，ラックの中にセグメントを収納する．特に立石立坑は，セグメント搬入車両とダンプの同時入場は出来ないため，車両搬入のやり繰りに懸念が生じた．

表-3 立石立坑の搬入出の具体例

時刻	車両内訳 (H18年9月6日)
7:00～7:30	セグメント(1台目)
8:15～9:05	ダンプ8台積み込み(1回転目)
9:23～9:35	裏込固化材
9:40～10:30	ダンプ8台積み込み(2回転目)
11:00～11:15	資材(各種配管)
11:35～12:05	セグメント(2台目)
12:41～13:46	ダンプ8台積み込み(3回転目)
13:50～14:15	2段枕木
14:20～14:35	資材(レールなど)
14:35～15:25	ダンプ8台積み込み(4回転目)
15:45～16:10	セグメント(3台目)
16:15～16:45	風管
16:50～17:40	ダンプ4台積み込み(5回転目)
計	ダンプ:39台 その他:8台

- ・ 宅配便や雑材の小型車両含まず
- ・ 掘進リング数:47リング

表-3に立石立坑の搬入出の具体例を示す．1日に計47台の車両が出入りし，積み込み，積み下ろしを行うためには，分刻みのスケジュールで車両の入場を管理しなければならない．これを実現するために，搬入出業者の協力を得て以下のような工夫をした．

- 事前の分刻みの入場スケジュール調整と緊急連絡先（運転手）の確認
- 入場前の携帯電話（運転手）による現場状況の確認（あわせて，現場周辺での待機の回避）

- 大型車両（ダンプ以外の）入場時の誘導員の増強と車両種別ごとの誘導パターンの周知
- ラインテープ，コーン，車止め等による場内誘導路の設置
- 有能な誘導員（搬入出スケジュールを正確に把握して，第三者交通と現場との状況をすばやく察知し，スムーズな誘導ができる．）

搬入出の効率化に関しては，最新技術の導入よりも人的な要素に負うところが大きかった．

4. 施工実績

以下に，立石立坑の施工実績を中心に説明する．

本工事では，シールド掘進工とそれを支える立坑の処理能力とに分けて計画を考えた．長距離，高速掘進と相反する都市部の狭隘な立坑用地という条件から，立坑の処理能力がボトルネックになると予想した．そこで，立坑の処理能力をさらにワークフロー的に並列になる要素に分解し，その各々の要素に効率化の工夫をし，シールド掘進工の最大能力をバランスよく上回るように処理能力の向上を図った．

図-5に立石立坑の要素ごとの日進量の目標値と施工実績を示す（ここで注意を要するのは，要素ごとの実績は全体としての実績とまったく同じである．能力が実績を上回るのは，PERT用語のフリーフロートと同じ意味で，それだけ能力に余裕があるということである．）．実績の日進量による月平均値の最大値は44リング（＝m）となり，シールド掘進および組立の計画上の最大値にかなり近い値となった．これは様々なロスタイム等を考えると十分な成績であり，技術提案上の目標値である月進800mを大幅に上

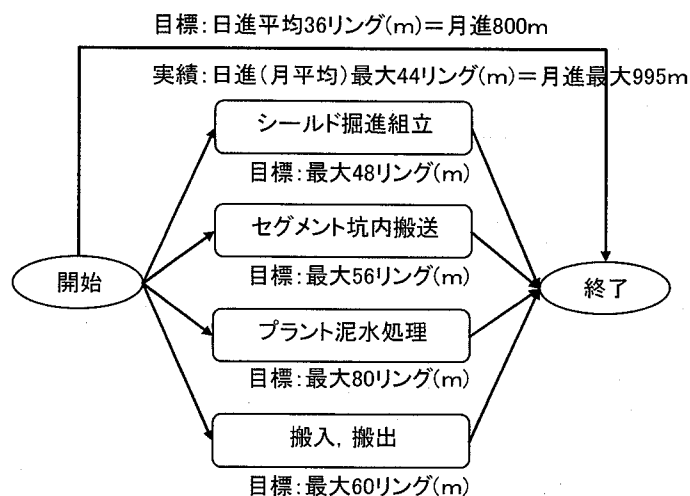


図-5 立石立坑の日進量の実績

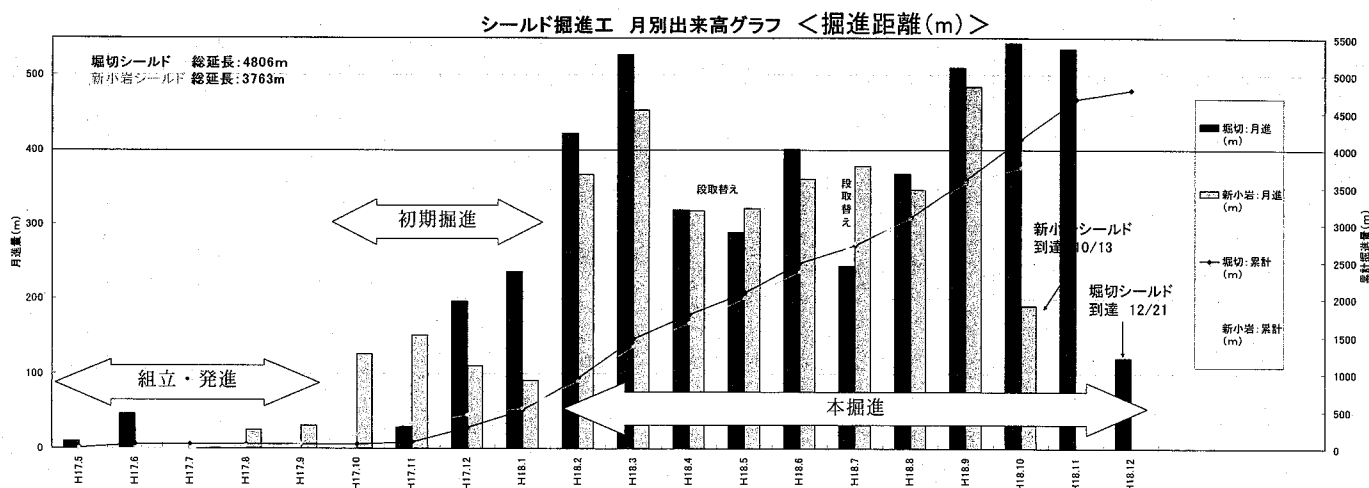


図-6 立石立坑 月別出来高(掘進距離)グラフ

回る結果(月進最大995m)となった。

北葛西立坑の場合は、泥水プラントの処理が当初の予測どおりに稼働せずに(船堀シールドと葛西シールドの砂分、粘土分の排泥のタイミングがうまくずれること)、この処理能力がボトルネックになってしまったこともあった。ちなみに、北葛西立坑での最大月進は856mであった。

上記は計画上の最大能力と実績上の最大値に着目した考察であるが、次に時系列に沿って平均的に目標値を達成したかどうかの検証を行う。

図-6は立石立坑の月別掘進距離をグラフにしたものである。初期掘進や大きな段取り替えのあった月を除くと、月進量の平均値は863mとなり、目標の合計月進800m(1シールド当たり400m)を達成した。当初、長距離になり坑内搬送時間が長くなると進捗が落ちていくと予想されたが、実際にはグラフが示すように、距離が長くなるにつれて、進捗率も向上している。これは、これまで述べた各種の工夫により坑内搬送能力自体に余裕があったことと、掘進組立の作業に関し、作業員の作業効率が上がったためと考えられる。これに対し、北葛西立坑の結果は月進量の平均値812mであり、立石立坑の最大月進995m(図-6のH18.9)のような伸びはなかったが、目標値は達成できたと言える。

5. おわりに

シールド掘進工は同じ作業が継続する工事である。極端な話をすれば工程表がたった1本の線になってしまう。工程管理というとなずPERTを思い浮かべるが、シールド掘進工はタスクが1つしかない。タスクは1つだが、そのリソースはたくさんある。実は、

タスクとリソースは行列の行と列の関係にあり、PERTはタスク側からしか世界を見ていない。

ここで、行列の行と列を入れ替えて、リソース側から世界を眺めると、図-5で示したように、「シールド掘進組立」、「セグメント坑内搬送」、「プラント泥水処理」、「搬入、搬出」という4つの要素が見えてきて、処理能力をうまくバランスさせることでアウトプットを最大にすることができた。

今回の立坑の処理能力の向上に関する知見として以下のことが挙げられる。

- いわゆる目標関数であるシールド掘進組立の能力がボトルネック(クリティカルパス)となるようにする。
- 容易に変更が不可能な処理能力(プラント設備など)にはより多くの余裕を持たせる。
- 残りの処理能力については費用対効果を考え、バランスよく余裕を設定する。

実はこれはCPM(クリティカルパスメソッド)の考え方そのものであり、暗黙のうちにCPM的な考え方をしていたわけである。

優れた実績が、新技術や高性能の機械によるものだけではなく、むしろ、それを支える数々の裏方の改善によるところが大きいことが、リソース側の世界から眺めて、よく見えたことが印象に残った。

参考文献

- 1) 木原晃司, 矢口岳彦, 木田博光, 上原啓史: 小口径親子シールドで大深度・長距離の高圧ガス管路を建設, トンネルと地下, Vol.38, No. 2, pp.35-42, 2007.2.