

高水圧下における斜坑泥水式推進工法 による換気立坑の施工

黒川満¹・久原高志²・飯泉勝³・中川拓也²

¹横浜市下水道局 管理部（〒244-0841 神奈川県横浜市栄区長沼町82）

²正会員 清水建設株式会社 土木事業本部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3）

³正会員 清水建設株式会社 土木横浜支店（〒231-0041 神奈川県横浜市中区吉田町65-7）

斜坑泥水式推進工法は、立坑と表現した方がふさわしいほどの急勾配を施工する特殊な推進工法である。

ここに紹介する工事例は、道路下87mの深さに既に築造されている地下調節池の頂点に取り付く換気用立坑を、道路に近接する公園敷地内から伏せ角度75.6度の直線で繋げたものである。本工法の施工においては、掘進機の大深度・高水圧対策、地上設備の推力、掘進機および推進管の浮き上がり対策、管内部の安全作業足場対策（エレベータ設置）を実施した。推進工事は短期間で完了し、地下調節池へ高い精度で到達した。

キーワード：斜坑泥水式推進，換気立坑，推力，浮力対応

1. はじめに

近年、推進工事における施工技術は急速に発展し、延長 1,000m を超える超長距離や、曲線半径 10m 以下の急曲線施工などが報告されている。数 10% の急勾配推進も事例が報告されているが、今回報告する推進工事施工事例は急勾配というよりは立坑と表現した方がふさわしいほどの他に例を見ない特殊な斜坑推進工事である。

場所は横浜市保土ヶ谷区の国道 1 号線。毎年正月に開催される大学箱根駅伝の難所と言われる榎太坂の直下 87m の深さに、地域の浸水被害防止、軽減を目的として、内径 10.8m、延長 2,000m のシールドトンネル式地下調節池が建設され、平成 13 年度よ

り暫定供用されている。今回の特殊な推進工事は、この地下調節池の換気用立坑として、国道に隣接する高台の公園敷地内地表面から伏せ角度 75.6 度、-389% という勾配で呼び径 2,000mm の斜坑泥水式推進工事を実施し、地下調節池の坑内 1,600m 地点へ接続したものである。地下調節池の概略を図-1 に示す。

接続部は地下 87m の大深度であり、地下水圧は 0.66MPa にもおよび、通常の推進工事では考えられないほどの大きな水圧や、大きな浮力が作用する。そのため、大深度・高水圧に対応した掘進機、地上仮設備である反力構台、斜坑エレベータ構台、浮き上がり防止用管固定装置等の数多くの対策を必要とした。

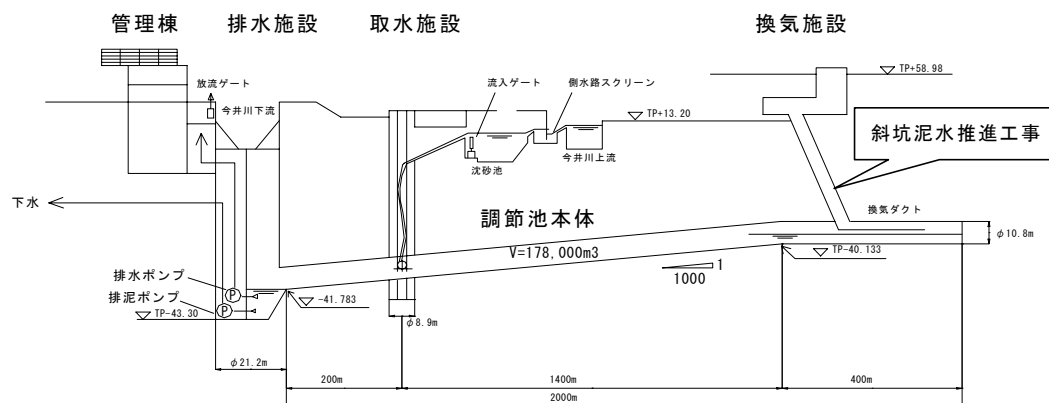


図-1 地下調節池概略図

2. 工事概要

① 泥水式推進工法

- ・管種：呼び径2,000mmダクトイル推進管
- ・延長：87.7m
- ・勾配：-389‰（伏せ角度75.6度）
- ・水压：最大水压0.66MPa
- ・土質：盛土，ローム，洪積粘土，砂礫，細砂
固結シルト

③ 地盤改良工

- ・到達防護薬液注入（地下調節池内部から）

④ 調節池内支保工

- ・到達部シールドセグメント変形防止用支保工

浅い地点の推進では浮力を受けない状態にある．その場合は掘進機および推進管が自重によって落ち込

表-1 土質層序表

時代		地質名	土質名	記号	層厚(m)	N値
第四紀	現世	盛土	ローム	B	0～2.05	－
	更新世	黒ボク	黒ボク	K b	1.25～1.30	2
		ローム	ローム	L m	3.80～4.90	2～4
		相模層群	砂質粘土	D c	2.05	6
			砂礫	D g	0.45～0.80	7
第三紀	鮮新世	上総層群	固結シルト	K m	72.82～83.27	18～50以上
			細砂	K s		－

3. 土質概要

推進工事を施工する箇所の土質は，第三紀鮮新世～第四紀前期の更新世に堆積した上総層群（固結シルトおよび細砂）を基盤とし，上位に相模層群（層厚さ：砂礫 0.5～1.0m，粘性土 2.0m），ローム（層厚さ 4.0m～5.0m），黒ボク（層厚さ 1.5m）が堆積している．土質層序表を表-1 に示す．

上総層群は基本的に固結シルトを主体とし，厚さ 1cm～2.4m の砂層が挟在する．この挟在砂層は全体的に若干の傾斜を有し，ちょうどシールドとの接続箇所では厚さ 50cm 程度となっている．

上総層上部 4～5m は風化しており，N 値は 50 を下回っているものの，それ以深では新鮮で硬質になり，一軸圧縮強度で 2.7N/mm^2 (27kgf/cm^2) を有している．挟在している砂層は細砂を主体とし，粒径は均一で，良く締まっている．砂層の透水係数は $1.1 \times 10^{-3} \sim 9.6 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ を示し，到達部での間隙水压は 0.66Mpa (6.6kgf/cm^2) である．図-2 に換気坑断面および土質縦断面を示す．

4. 推進用設備

施工に先立ち，斜坑推進工事における下記のポイントについて重点的に検討を行った．推進用機械設備概略図を図-3 に示す．

① 掘進機および推進管の浮き上がり

推進工事であるため，掘進中は推進管外周に摩擦力低減を目的とした滑材充填を行う．このことにより，周辺地盤からの摩擦が期待できなくなり，地下水による浮力の影響を常時受けるようになる．また

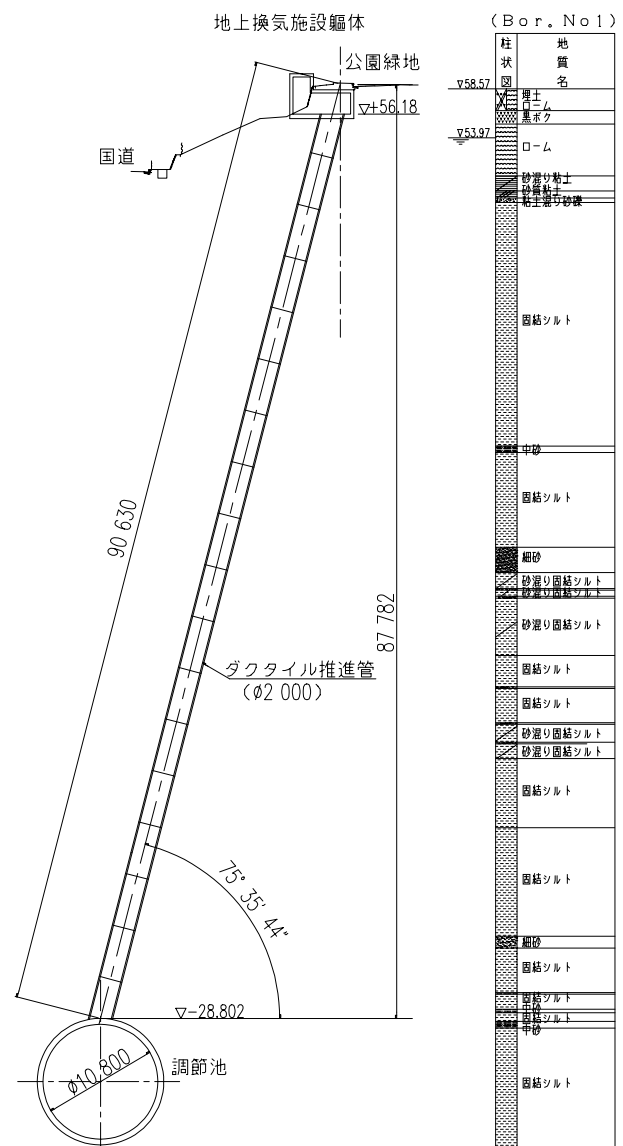


図-2 換気坑断面および土質縦断面図

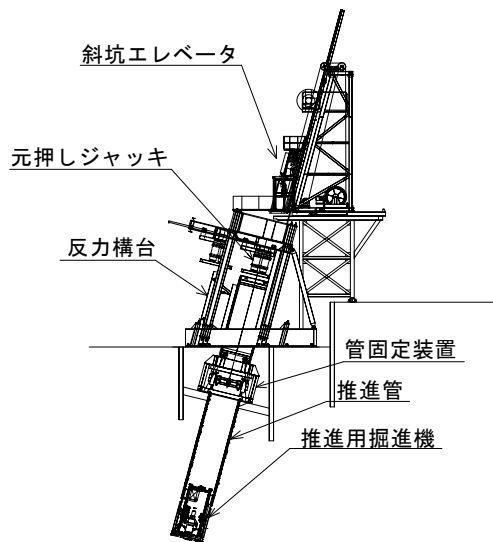


図-3 推進用機械設備概略図

み、掘削地盤に食い込もうとする。したがって管接続時を含め、常時推進管を把持・固定する必要がある。

②急勾配

直線ではあるが、伏せ角度 75.6 度の斜坑であるため、高度な方向制御が必要となる。したがって先端掘進機の方角修正がしやすい機構とする必要がある。

③高水圧

到達地点が地下 87m で水圧が 0.66Mpa という高水圧であるため、推進管および掘進機の耐水圧性能は充分なものが必要である。

④掘進機の解体

調節池シールドトンネル頂点まで推進が完了した後、到達地点で掘進機の外筒を残し、駆動部解体の必要がある。これは地下調節池内部への掘進機回収を行った場合、後続する推進管の地下調節池内への抜け落ちが発生しやすくなることや、接合部の高水圧に対し、止水性確保が困難となるためである。また、地下調節池は暫定供用されているため、掘進機内部の解体した部材等は、全て推進管内部を通じて地上に回収する必要がある。内径 2.0m、深さ 87m の立坑と同様の作業空間での解体作業や、部品引き上げ作業は極めて危険を伴うため、解体作業や部品回収作業の安全性をも考慮する必要がある。

⑤測量

地上の発進基準地点と地下調節池の到達目標地点を結ぶトンネル基準線を三次元座標で管理する必要がある。しかし通常のトランシットでは伏せ角 75.6 度は視準が出来ない。したがって測量機器の選定、測量方法の管理に充分留意する必要がある。

(1) 泥水式推進工

a) 泥水式掘進機

泥水式掘進機は下記の対策を考慮した仕様で製作した。泥水式掘進機を図-4 に示す。

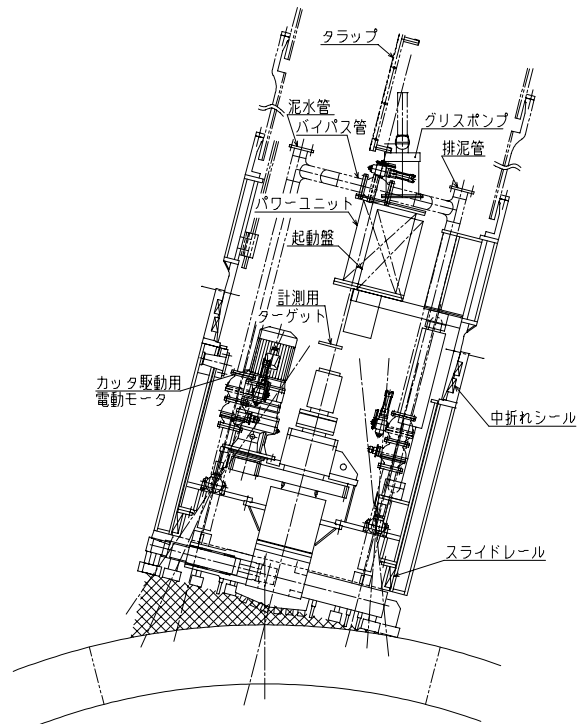


図-4 泥水式掘進機

①高水圧対策

- ・駆動部シールをはじめ、全てのシール類の止水性能は 1Mpa（水深 100m 相当）仕様とした。

②斜坑推進精度の確保

- ・トンネル基準軸線に対する方向修正方法として全方向最大中折れ角 1.0 度を有する中折れ機構を装備した。中折れ機構は球面中折れを採用し、シール部の高水圧対策を行った。
- ・外周の余掘りはオーバーカット機構として最大余掘り量 50mm の伸縮式オーバーカッタを 1 基装備した。

③到達部地下調節池との接続部の防護

- ・スライドフード（外筒）機構を設け、到達部のシールドセグメントと掘進機先端の地山開放域を極力少なくするようにした。
- ・バルクヘッド面に薬液注入口を設け、到達部で掘進機周辺に薬液を注入できる構造とした。

④解体作業の簡素化

- ・主要解体品は全てボルト接合として、ガス溶断等の火気を使用しないで解体可能な構造とした。
- ・カッタ駆動部を 2 分割のボルト接合として大ブロ

表-2 泥水式掘進機の仕様

項 目	仕 様
外径 × 全長	φ 2209 × 3880 mm
方向制御 ジャッキ	700kN × 500mm × 6 本
カッタトルク	(最大) 60.6 kN-m
カッタ回転数	3.5 min ⁻¹
オーバカッタ ジャッキ	79.4 kN×225mm×1 本

ックにて解体引き上げができる構造とした。
泥水式掘進機の仕様を表-2 に示す。

b) ダクタイル推進管

換気用立坑の構造部材となる推進管は日本下水道協会規格 JSWAS G-1 および G-2 規格品の下水道推進工法用ダクタイル铸铁管である。呼び径は 2,000mm で今回工事では U 形推進工法用管・植え込みボルトタイプを使用した。植え込みボルトタイプを採用した経緯には、斜坑という条件により、掘進機および先行する管の目地部抜け出しや外周摩擦力が取れない状況での掘進機および推進管のローリング防止のためである。1 本の長さは 5.0m、管厚さは設置深さの土水圧に応じて特厚管、1 種～5 種管の 6 種類が採用され、最大重量は 14.9tf である。掘進作業中の揚重機械としては 65t 吊りクローラークレーンを設置した。

ダクタイル推進管の特徴として下記の項目があげられる。

- ・保証水圧としては 4.5Mpa (5 種管) 以上であり、継手部についても正規に接合されれば管の保証水圧と同じとなり、高い継手止水性能を有する。
- ・継手は外部植え込みボルトにより接合するものであるが、植え込みボルトのナットは完全に締め付けを行わず、0.1 度のガタを持たせ、止水性を確保しながらも方向修正によって発生する管の目地開きに対応できるようになっている。
- ・圧縮強度が高いので、大きな推力に耐える。
- ・管内部にはモルタルライニングが施されているが、施工時にはエレベータガイドレールや送泥管、排泥管、掘進機や排泥ポンプの電源・操作線等を設置するため、これらが取り付け固定できるようにボルト取り付けピースを管内面に設置した。内面ライニングは 15mm と薄く、現場での後打ちアンカー等でボルト固定をすることはできないため、製作工場にてダクタイル管の鉄部にピースを溶接し、取り付けを行った。また、推進管には製作誤差があるため、管内設備を推進管に取り付けた際の不具合防止のため、



写真-1 地上仮設備

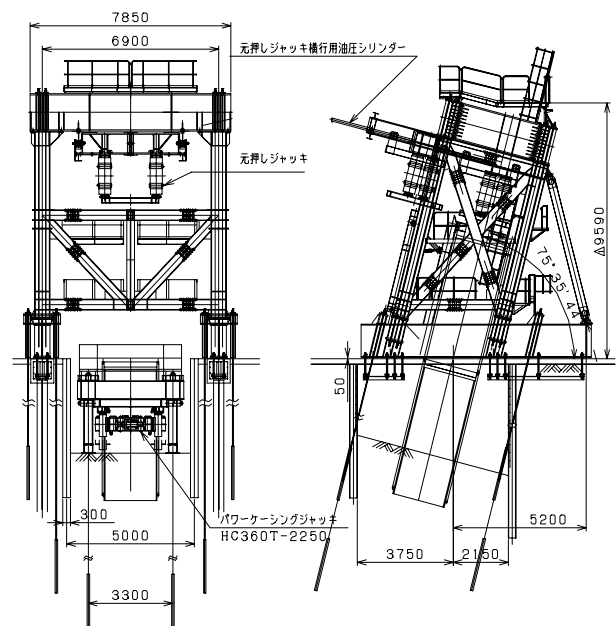


図-5 地上仮設備詳細図

推進管製作工場内で推進管全数を接続し、内部設備との接続状態を確認しながらピースの取り付けを行うなど入念な準備を行った。

(2) 推進仮設備工

斜坑推進という特殊性を考慮して各設備機械の設計製作を行った。地上の仮設備全体の写真を写真-1 に、詳細図を図-5 に示す。下記に各設備について

特色を述べる。

a) 元押しジャッキおよび反力構台

・元押しジャッキを横行スライドさせることにより推進管の投入・据付や斜坑内の揚重作業を容易にできる構造とした。

・推進管投入接続作業を容易にするため掘進角度と同じ角度（伏せ角度 75.6 度）の発進レールを設置した。これは初期掘進時の方向性をも保持するものである。

・使用する推進管の長さが 5.0m であるため、通常使用する元押しジャッキではストローク（最大ストローク：3.0m）が不足する。そこで残りの 2.0m を補うために長さ 2.8m のストラットを製作し、使用した。ストラット挿入作業により送排泥管等の切り離し接合の作業が生じないよう形状を工夫した。

・元押しジャッキの能力は推力の計算結果から決定した。推力算定は下記の計算により求めた。

$$F = F_w + F_m - W_g - W_h$$
$$F_m = F_0 + f_0 \times L$$

ここに、 F ：総推力、 F_w ：浮力、 F_m ：推進抵抗、 F_0 ：先端抵抗、 f_0 ：周面抵抗、 L ：推進延長、 W_g ：推進用掘進機重量、 W_h ：推進管重量

総推力 $F \approx 6,500\text{kN}$ となり、元押しジャッキの能力は $2,000\text{kN}/\text{本} \times 4 \text{ 本} = 8,000\text{kN}$ とした。ただし、推進開始から 30m 程度までは掘進機と推進管の重量合計の方が浮力よりも大きく、自重で掘進機が地山に食い込んでしまうため、掘進機を吊り下げながら掘進することとした。

・反力構台の反力はグラウンドアンカーにて確保した。アンカー引抜き力は元押しジャッキと同じとした。

b) 管固定用浮き上がり防止装置

・地下水位以下での掘進時には、掘進機および推進管に浮力が作用する。掘進時には元押しジャッキにてその浮力に対抗する推力を与えて掘進を行うが、推進工事であるが故、管の投入接続作業時には元押しジャッキの圧力を解除する必要がある。その際、固定していないと掘進機および推進管が浮き上がることが推力計算で判明した。その間はパワーケーシングジャッキ（通常の使い方をした場合の引抜き力 $3,600\text{kN}$ ）を装備した浮き上がり防止装置にて管を固定し、浮力に対抗させた。

・管固定用浮き上がり防止装置の反力も反力構台と同様にグラウンドアンカーにて確保した。アンカー引抜き力はパワーケーシングジャッキ能力と同じと

した。

c) 斜坑エレベータ

・今回使用したダクタイト推進管の継手構造は、管継手内面にゴム輪を挿入し、専用の押輪を締め付けることで止水性を確保する形状のものである。この接続作業や送排泥管、掘進機、排泥ポンプ等の電源

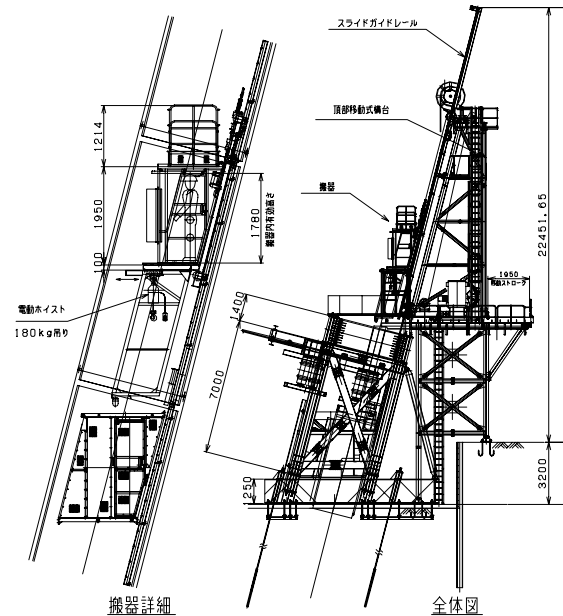


図-6 斜坑用エレベータ

および操作線の接続作業を行うには、斜坑内での作業が必要になる。この推進管内接続作業用足場および斜坑内点検等の昇降設備として斜坑用エレベータを設置した。

・推進管の投入・据付け時はエレベータ設備が支障となるため、エレベータ構台の頂部を前後にスライド可能とした。また上端部エレベータガイドレールは上下にスライド可能とし、推進管内に設置・固定したエレベータガイドレールと切り離しができる構造になっている。

斜坑用エレベータの詳細を図-6 に示す。

d) 測量機器

掘進精度を確保するため、地上の構台上から計画トンネル軸線をレーザ光線により掘進機に取付けたターゲット板まで照射し、そのターゲット板を CCD カメラで撮影し、運転操作室で監視するという方法を採用した。このレーザセオドライドは自動追尾ノンプリズム式光波距離計を内蔵し、地上に設置した基準点（X, Y, Z 座標）を 3 点視準することにより、自器の座標を自動計算することが可能である。蛇行量管理はこのレーザ光線軸に対するズレで管理する方法とした。

5. 推進工

(1) 施工サイクル

①推進管投入

- ・既設の推進用泥水配管および配線類の切り離し
- ・クレーンを使用し、ダクタイト推進管投入
- ・反力構台の発進レールに沿って管の設置

②推進管接続

- ・エレベータ構台が前進・移動
- ・エレベータガイドレール下降および接続
- ・エレベータ下降
- ・管内部接続作業
(同時に管外部接続作業)
- ・エレベータおよびエレベータガイドレール上昇

③一段目掘進

- ・泥水配管，配線類接続
- ・エレベータ構台後退
- ・元押しジャッキ横移動設置
- ・管固定装置を解除
- ・元押しジャッキ伸びにより掘進
(ストローク 3,000mm)

④ストラット設置

- ・管固定装置を作動し管を固定
- ・元押しジャッキ縮およびジャッキ横移動
- ・ストラット投入・設置

⑤二段目掘進

- ・元押しジャッキ横移動設置
- ・管固定装置を解除
- ・元押しジャッキ伸びにより掘進
(ストローク 2,000mm，合計 5,000mm)

⑥ストラット撤去

- ・管固定装置を作動
- ・元押しジャッキ縮および横移動
- ・クレーンにてストラット撤去

以上のサイクルを繰り返し行う。

(2) 初期掘進

推力の算定で述べたように地下水位以下では総重量より浮力の方が大きいという結果になったが，地表面から，一定の深さまでは浮力よりも重量が優る区間が存在する．この区間では，掘進機は重量により地盤に食い込まないように吊っておく必要がある．この区間を初期掘進区間と称し，本掘進よりもゆっくりとした掘進速度（平均で約 10mm/分）で施工した。

また，掘進機を吊るのは P C 鋼棒で計画していたが，実施工において P C 鋼棒の盛替えや，緊張力の調整が複雑であるため，管固定装置のパワーケーシ

ングジャッキの上下伸縮による掘進速度調整に切り替えた．その結果，推進管継手ボルトに引張り力が作用し，継手ボルトのガタによる伸びにより先端掘進機は垂れる傾向を強く示した．対策として掘進機中折れ装置を作用させ前胴を持ち上げるようにして姿勢を維持するようにした。

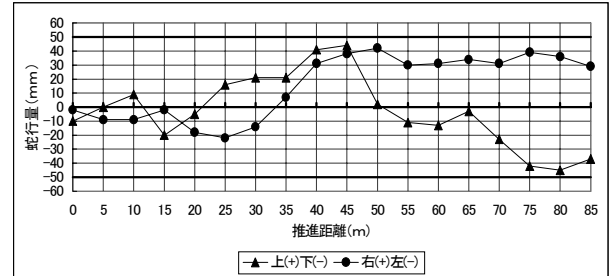


図-7 推進管出来形グラフ

(3) 本掘進

掘進の深度につれて徐々に浮力が大きくなり，やがて掘進機（推進管）を吊りながらの施工から，元押しジャッキによる推進に移行した．本工事においてはこれから以深を本掘進と称し，切り替え深さは深度 35m 地点を想定していたが，実際に元押しジャッキを必要とし始めたのは深さ 25m からであった。

計画掘進速度 20mm/分，計画日進量 1 本 (5.0m) / 1 日に対し，実績は前半平均 15mm/分，後半平均 10mm/分で，2 本 (10.0m) / 3 日の施工ペースであった．姿勢制御については初期掘進と反対に推進管先端に作用する浮力により先端が持ち上がろうとする傾向を強く示し，対策として掘進機中折れ装置を作用させ前胴を下に折るようにして姿勢を維持した．（図-7 推進管出来形グラフ参照）

計画日進量を下回った大きな原因の 1 つは掘削土である固結シルトによる排泥管閉塞や機械的原因であるポンプ能力低下であった．また，排泥管閉塞により管内圧力が一時的に高くなり，排泥ポンプのケーシングが破損し漏水が発生する等，ポンプ交換のため作業が中断したことがあった。

計画掘進速度が下回った大きな原因は掘進機のカッタートルクが固結シルト層で掘進速度 20mm/分を超えると装備トルク 100%に達し，また，掘削土塊による排泥管閉塞が発生しがちになったためであった．固結シルトが予測以上に硬いため掘削抵抗が大きくなったものである．また，排泥孔位置が高い位置にあるためカッタ攪拌抵抗も高めに作用したものであると思われる。

推力は大きくばらつき 1,500～3,800kN を示した．掘進時の切羽泥水圧や推進速度の変化に加え，方

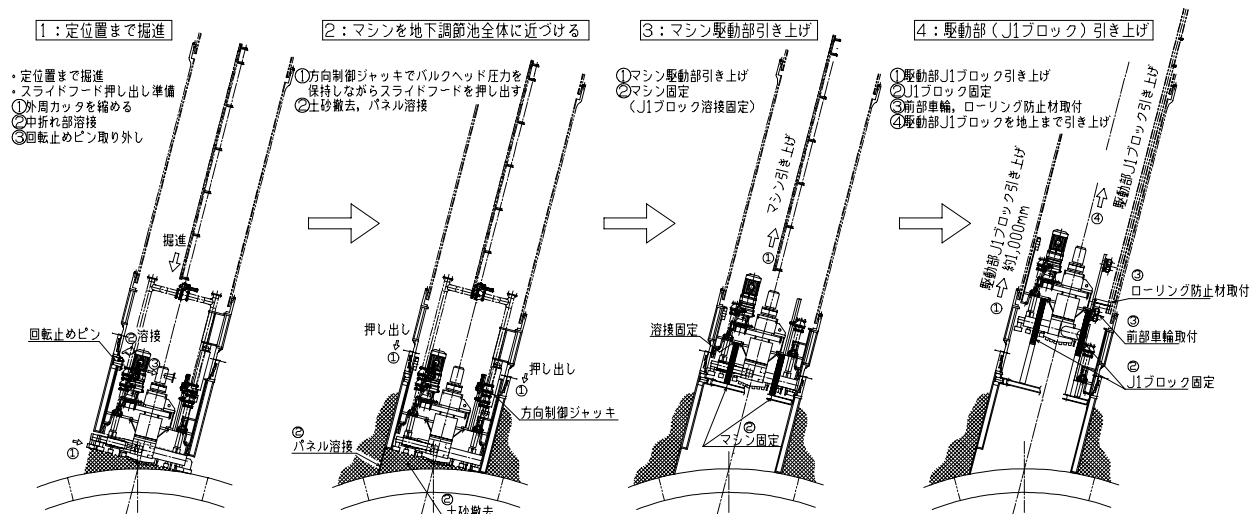


図-8 泥水式掘進機内部解体手順図

向修正による周面抵抗に敏感に反応したものと考えられる。

(4) 到達

定位置まで掘進後、到達は予定のジャッキストロークおよび既設地下調節池シールド坑内監視員により確認をおこなった。掘進機のカッタが既設シールドのセグメントに触れて急激に掘削トルクが上昇したことで確認が出来た。到達の施工精度はX方向+29mm、Y方向-37mmで掘進途中の蛇行量も通常の推進工事の管理値(±50mm)以内であった。

到達後、掘進機先端と既設シールドセグメントとの間隙(地山露出)を縮めることで接続作業の安全性を向上させるため、掘進機全体を既設シールドセグメントに近づける作業を行った。地下調節池のシールドセグメントは、この換気用立坑との接合部のみが鋼製セグメントになっており、その他の区間はR.C.セグメント(二次覆工省略)となっている。換気用立坑との取り付け部は開口補強が施されているが、換気用立坑の重量すなわち推進管および掘進機の自重を支える構造にはなっていない。そこで、セグメントに荷重を加えないよう、到達後は以下の手順で接合作業を行った。図-8に泥水式掘進機内部解体手順図を示す。

①準備

- ・定位置まで掘進
- ・外周カッタを縮める
- ・中折れ部固定溶接
- ・駆動部回転止めピン取り外し

②掘進機押し出し到達

- ・元押しジャッキで掘進機および推進管を押し込む
- ・同時にチャンバ内圧力を保持させながら方向修正

ジャッキ(スライドジャッキ兼用)を締めカッタスポークをスライドフード内に格納。方向修正ジャッキを縮める操作はジャッキのリリーフ圧力を調整することによって、チャンバ内圧力を変動させることなく、フードを地下調節池へより近づけることができるようにした。

- ・スライド完了後、掘進機および推進管廻りのボイドを裏込充填し、斜坑全体を固定。
- ・地下調節池シールド内から到達部セグメント撤去
- ・チャンバ内土砂撤去
- ・掘進機先端とシールドセグメント間鋼板溶接

(5) 掘進機内部解体・引上げ

到達部の地下調節池シールド坑内での作業は資機材の投入搬出口が他の工事(地下調節池排水施設工事)との競合になっているため、大幅に制限されていた。そのため掘進機の解体された部材は、全て斜坑を通じて地上に引上げを行うこととなった。また作業員が内径2.0mの推進管内部を87m下り、人力で解体し、部品を地上に引上げるのは非常に危険であると判断し、事前の計画段階で機械内部部品を一括して引上げることとしていたが、この方法により安全性が確保されたのと同時に大幅な工期短縮が可能となった。以下に解体作業のステップを示す。引上げ作業は2日間(昼間のみ)で完了した。

①駆動部全体引上げ

- ・駆動部を中折れ部まで引上げ
- ・駆動部仮固定

②駆動部分割引上げ

- ・1ブロック目仮固定
- ・引上げ用車輪取り付け
- ・斜坑エレベータ用ガイドレールを利用して地上ま

で引上げ

- ・ 2ブロック目を同様に引上げ

6. 既設シールド防護工

(1) 到達部地盤改良

事前の土質調査結果により，到達・接続部近傍に帯水砂層の存在が確認されたため，到達・鏡切り時の出水防止を目的とした薬液注入工事を推進工事開始前に実施した．薬液注入作業は，河川増水時期をはずして，既設の地下調節池シールド坑内にセグメント変形防止用支保工を兼用する薬液注入用足場を組立て，足場から上向きに注入をおこなった．また，薬液注入材の作液プラントは地上に設置し，注入材をタンクにて坑内台車で運搬した．

注入範囲は掘進機到達地点である既設シールド天頂を中心に直径 8.5m，厚さ 3.0m の二重管ストレーナー工法である．改良対象土量は約 170m³ で，注入率は 12.1%，注入率は事前の土質調査結果に基づき算出した．

注入作業期間中に集中豪雨が発生し，坑内からの退避を余儀なくされたことが 4 回あったが，注入用機械の水没は免れた．

到達後の鏡切りで，当初，出水量が多かったが，徐々に減少し，最終的には 0.5 リットル／分未満と，鋼板溶接に支障のない量であり，薬液注入の効果が確認できた．

(2) 既設セグメント変形防止用支保工

セグメント外周に薬液注入を施工する場合，注入圧力がセグメントに作用し，変形を伴う応力増加が発生する．

セグメントに発生する応力が増加しても許容応力度内に収まるようセグメント変形防止用支保工を既設シールド坑内の到達部に設置した．事前の解析でセグメントのスプリングラインでの変形量が 5mm 以下であることが求められたため内空変位計を設置し，薬液注入作業時のセグメント変形量を計測した．薬液注入と推進到達，セグメント開口をおこない，最終的なセグメント変形量は 5mm 以下に収まった．

(写真-2 既設セグメント変形防止用支保工参照)



写真-2 既設セグメント変形防止用支保工

7. おわりに

本工事は，斜坑泥水式推進工法を用いることで地下構造物へのアクセスシャフト直接接続を可能とした．従来の施工法である立坑からの横坑接続に比べ，本工法は工費，工期共に優れる有効なものであった．

以前から，縦方向の推進工法として管路からの分岐用小口径削進や家庭用下水管（径 10cm～20cm）の取り付け管の削進のような事例はあったが，呼び径 2,000 mm もの大口徑泥水式推進工法は今回が初めての事例である．

この報告が，今後の同様な工事に携わる方々の参考となれば幸いである．

参考文献

- 1) 扇原 博，黒川 満，浦田 修，飯泉 勝：高水圧下における斜坑泥水推進工法による施行—今井川地下調節池建設工事，建設の機械化，No. 636，2003．
- 2) 黒川 満，田中邦和，飯泉 勝，久原高志，鹿島竜之介：泥水式推進工法による大深度換気立坑の施工，トンネル工学研究論文・報告集，第13巻，2003．