

泥水式推進工法による大深度換気立坑の施工

Construction of shaft tunnel by slurry pipe jacking through sedimentary ground under high water pressure

黒川 満¹⁾、田中 邦和²⁾、飯泉 勝³⁾、久原 高志⁴⁾、鹿島 竜之介⁵⁾

Mitsuru KUROKAWA, Kunikazu TANAKA, Masaru IIZUMI, Takashi KUHARA, Ryunosuke KASHIMA

A shaft tunnel driven by pipe jacking was adopted in order to provide ventilation to the Imaigawa underground reservoir tunnel under the national highway in Yokohama, Japan, which has been temporarily in service since 2001. Downward excavation of the 2000mm ID ventilation tunnel starts from ground surface and reaches to the crown of the existing 10800mm ID reservoir tunnel, which is located 87.8m deep, through the stiff clay layer. Depression angle of the tunnel is set as 75.6 degree, and pore water pressure at the arrival is 0.66MPa. This project is one of the largest in this type of tunnels in Japan.

Keywords: shaft tunnel, slurry pipe jacking, high water pressure

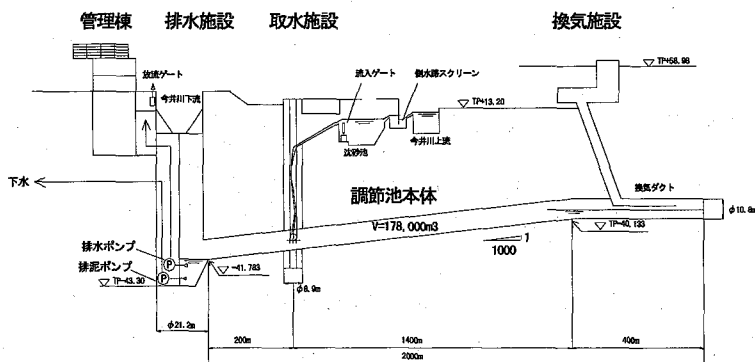
1. はじめに

横浜市では、市域のほぼ中央を西から東へ流下する今井川（延長 7.0 km・流域面積 7.6km²・二級河川）の改修事業を進めている。今井川流域には旧東海道の保土ヶ谷本陣跡などがあり、昔から人々が集う宿場町として活動の場が形成されてきた。昭和 30 年代からは特に市街化の進展が著しく、昭和 41 年以降、河川沿いの低地域では繰り返し大きな浸水被害をうけてきた。この浸水被害の防止、低減を図るため、河川流路のほぼ中間位置に、今井川地下調節池（シールドトンネル、内径 10.8m、延長 2,000m、貯留量 17.8 万 m³）の建設を進めている。

本報告は、この地下調節池（図-1）の坑内 1,600m 地点に、換気立坑を泥水推進工法で施工した事例について述べるものである。施工は地表面から下向き 75.6° で掘進し、供用中の地下調節池の頂点へ土被り 87m と前例のない深さで接合するというものであり、ほぼ垂直に近い状態で施工するため、推進設備は斜坑推進として必要な工夫を施すと同時に、地下調節池との接合点では通常の推進工事では考えられない大きな水圧が作用するため、様々な対策を施した。

2. 換気立坑の工事概要

-
- 1) 横浜市下水道局 北部下水道建設事務所
 - 2) 横浜市下水道局 北部下水道建設事務所
 - 3) 正会員 清水建設(株)土木横浜支店土木部
 - 4) 正会員 清水建設(株)土木事業本部技術第四部
 - 5) 正会員 清水建設(株)土木事業本部技術第四部



図－1 今井川地下調節池施設概略図

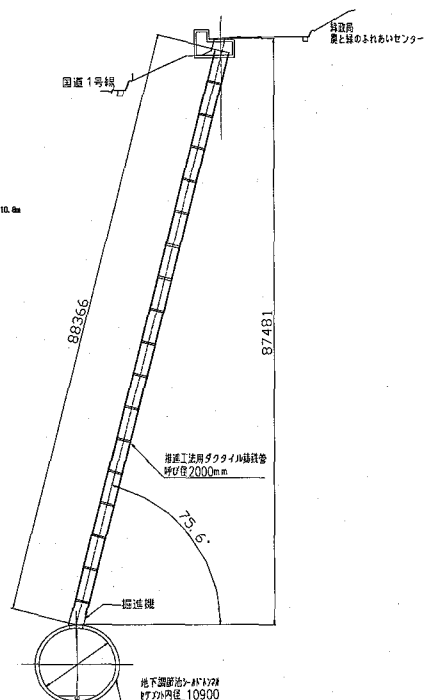
施工方法：泥水式推進工法

推進管径：呼び径 2,000mm（推進工法用ダクトイル鉄管）

斜坑角度：－389%（伏せ角 75.6 度）

推進延長：87.7m（ダクトイル鉄管・5 m 管×17 本）

最大水圧：0.66MPa



図－2 換気立坑断面図

内径 10.8m のシールドトンネル式地下調節池は国道 1 号線の直下約 80m の深さにある。このようなトンネルに換気立坑を設ける場合、一般的にはトンネル直上からリバー工法やケーソン沈設工法により立坑を築造する方法が考えられる。しかし、国道 1 号線は交通量が多く、交通規制を行い道路内に作業ヤードを設けての施工は困難である。そこで隣接する本市公共施設敷地内に作業用地を確保し、リバー工法や連続地中壁で立坑を鉛直に約 80m 掘削し、推進工法等で横坑を掘り調節池の天端に接続することなども検討した。しかし最終的には、施工性、経済性から、地上の作業用地を発達基地より斜めに推進工法によって掘削し、地下調節池の天端に直接接続する斜坑式換気立坑（図－2）に決定した。なお換気立坑の断面は、地下調節池の点検や清掃時に必要な換気量から内径 2.0m とした。

4. 土質概要

換気立坑の対象地盤は、第三紀鮮新世～第四期前期更新世と上総層群（固結シルトおよび細砂）を基盤とし上層には相模層群（砂礫、粘性土層厚 0.5～3.5m）、ローム層（厚 4.0～5.0m）、黒ボク（層厚 1.5m）となっている。上総層群の固結シルトには砂層を挟在し、地下調節池との接続箇所では砂層厚が 50cm 程度となっている。上総層群の一軸圧縮強度は 2.7N/mm^2 、砂層の透水係数は $1.1 \times 10^{-3} \sim 9.6 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 、間隙水圧は地下調節池との接合部で最大 0.66MPa となる。

5. 推進用設備の検討

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。

①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。したがって掘進機の方角修正がしやすい機構とする必要がある。また、固結シルト層における掘削性の向上を図る必要もある。

③推進到達地点では地下水圧が 0.66MPa となり、掘進機の耐水圧性能を施す必要がある。

④地下調節池との接続作業は高水圧下での作業となり、出水が生じた場合には施工不能になることも考えられるため、接続作業時の止水対策、安全対策が必要となる。

6. 対策

6-1 泥水式掘進機（図－3）

泥水式掘進機は下記の対策を考慮した仕様とした。

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 1 MPa の耐水圧性能とした。

2) 固結シルト層の掘削対策

先行ビット、フィッシュテールビットを配置し、切削性の向上を図った。またカッタスポーク背面に攪拌翼を設け、チャンパー内固結を防止した。

3) 掘進精度の確保

基準軸線に対する方向修正方法として、中折れ機構（全方向最大中折れ角 1.0 度）、シール部の止水性能に優れる球面中折を採用した。また、外周の余掘りはオーバーカット機構とし、最大余掘り 50mm の伸縮式を 1 基装備した。

4) 接続部の防護対策

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小さくするようにした。ま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。

5) 掘進機解体作業の簡素化

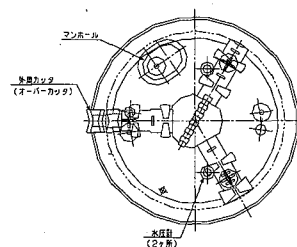
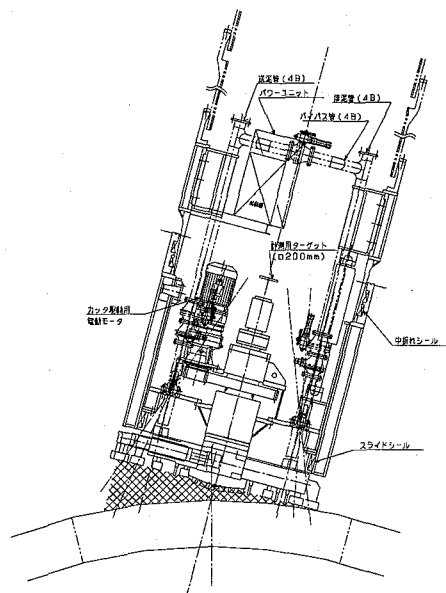
到達後、掘進機はスキンプレートを残置して解体される。本掘進機の主要解体品は全てボルト接合として、ガス溶断等の火気を使用しないで解体可能な構造とした。またカッタ駆動部は 2 分割のボルト接合として大ブロックにて換気立坑を通じて地上へ引き上げができる構造とした。

6-2 推進仮設備（図－4・写真－1）

斜坑推進という特殊性を考慮して、仮設備の仕様は次のとおりとした。

1) 元押しジャッキおよび反力構台

反力構台上に設置された元押しジャッキを、横行スライドさせることにより、推進管の投入・据付時等の作業を容易に出来る構造とした。また構台には推進角度と同じ角度の発進レールを設置した。これは管の



図－3 泥水式掘進機

接合作業を容易にし、また、初期掘進時の方向性を保持するものである。

推進管の長さは5 mであるが、採用した元押しジャッキのストロークは3.0mとしたため不足分はストラット (L=2.8m) を製作し推進を行った。元押しジャッキの能力は計算最大推力より2,000KN×4本=8,000KNの装備とした。

2) 推進管浮き上がり等の防止対策

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、管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。また地下水圧を受けない区間では、推進管の自重によって掘進機が地山へ食い込み、カットトルクの上昇が懸念されたが、推進管をパワーケーシングジャッキで吊り下げながら掘進を行うことによって、地山への食込みが防止できた。

3) 斜坑エレベーター設備

本推進工事の作業では、斜坑内作業足場兼坑内点検等の昇降設備として斜坑エレベーターを採用した。この斜坑エレベーターは推進管の接合作業時に坑内に投入し、作業足場として使用出来る構造とした。また、駆動方式はワイヤーロープ式を採用し、牽引ワイヤーが切断した場合でも、クサビ形状の落下防止装置が働き、エレベーターを停止させる安全装置を取り付けた。

6-3 到達防護対策

推進到達位置付近の帯水砂層の存在が確認されたため、調節池シールドセグメント外周に二重管ストレーナー工法により薬液注入 (厚さ3 m) を実施した。なお、薬液注入は調節池内部に注入圧力や推進到達時の応力によるセグメントの変形防止する支保工を作業用足場と兼用して使用し、調節池内部から行った。

7. 推力の算定

推進工の推力の算定は次式による。

$$F = F_w + F_m - (W_g + W_h)$$

F : 総推力 F_w : 浮力

F_m : 推進抵抗力 F_m = F₀ + f₀ + L

(F₀ : 先端抵抗力、f₀ : 周面抵抗力、L : 推進延長)

W_g : 推進用掘進機重量、W_h : 推進管重量

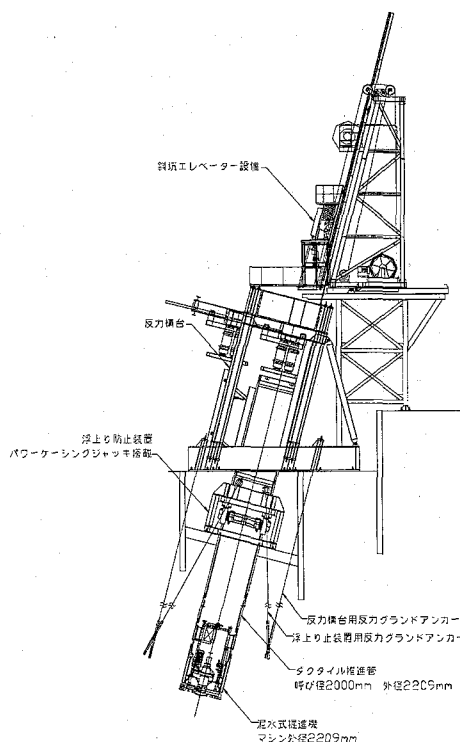


図-4 推進用設備全体図

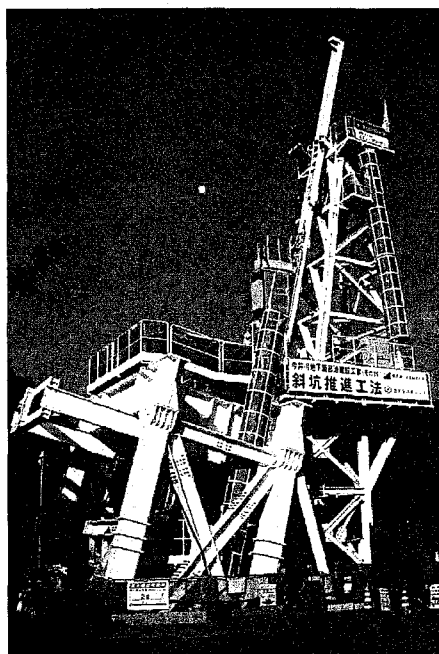


写真-1 地上部推進用設備

8. 施工

施工の手順や具体的な施工内容は次のとおりである。

8-1 推進工サイクル

①推進管投入

②推進管接続：エレベーターを推進管の真上まで前進し、ガイドレールに沿わせ搬器を降下させ、管内部で止水パッキン等の

接合。同時に送排泥管や掘進機等の操作線を接続。（写真－2）

③1段目掘進：元押しジャッキを推進管の上まで横移動させ、浮き上がり防止装置を解除した後、ジャッキ最大ストローク 3,000mm まで掘進。

④ストラット設置：浮き上がり防止装置を作動させ、推進管の固定を施した後、元押しジャッキを開放。その後のストラット投入。

⑤2段目推進：ストラットを投入した後、再度浮き上がり防止装置を解除し、掘進を再開。

⑥ストラット撤去：再び推進管を固定し、元押しジャッキを横に移動しストラットを撤去する。

以上の手順により推進を完了させ以降をこの手順の繰り返しにより推進を行う。

8-2 掘進工

GL-25m までは、周面抵抗・浮力よりも掘進機・推進機の合計重量が勝っている。この区間を初期掘進区間とし、それ以深では浮力が勝るのでこの区間を本掘進区間とした。本掘進区間における施工状況は次のとおりであった。

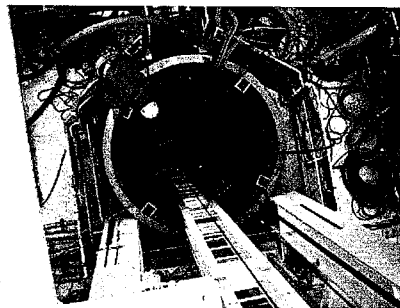
①掘進速度（図－5）

当初、掘進速度 20mm/分、日進量は 1 本（5m）/1 日と計画していたが、実績は前半平均 15mm/分、後半平均 7mm/分で、2 本（10m）/3 日のとなり計画量を下回った。計画日進量を下回った大きな要因としては、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。

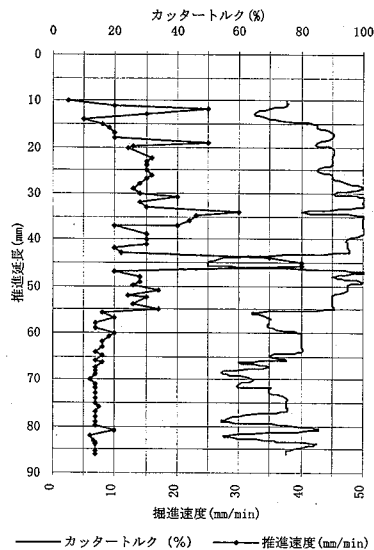
②掘進機カッタトルク（図－5）

固結シルト層での掘進では、計画掘進速度を 20mm/分を維持しようすると、固結シルトが予想以上に硬く装備トルク 100% になり、掘削土塊により排泥管の閉塞が発生した。特に、45m 以深では非常に硬く、カッタトルク 100% では排泥管の閉塞が頻発するようになった。そこで、掘進速度を 7～8mm/分に落としカッタトルクの上限を 80% として掘進管理を行ったところ順調に掘進出来た。

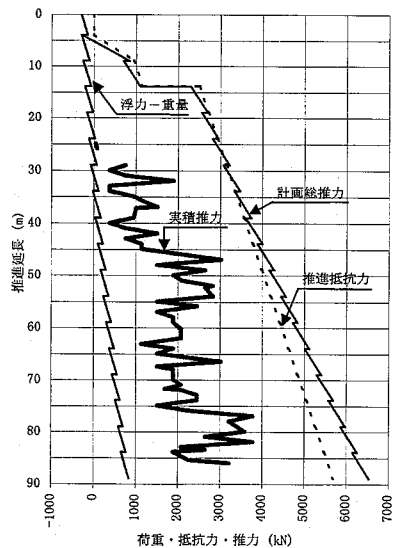
③推進力（図－6）



写真－2 斜坑エレベーター坑内稼働状況



図－5 掘進速度・カッタトルク関係グラフ



図－6 推力関係グラフ

カットトルクを上昇させないように推進を行った結果、推進力は最大推進力3,800K Nと計画値6,200K Nの約60%程度となった。

④掘進精度(図-7)

初期掘進時には掘進機、推進管の自重により落ち込むのをパワーケーシングジャッキで押さえたが、吊り下げのような状態になり先端掘進機が垂れ下がる傾向を示した。そこで中折れ装置を用い前胴を持ち上げるように修正して掘進を行った。

本掘進では反対に浮力により推進管が持ち上がる傾向を示したため、掘進機の中折れ装置を南向きに修正しながら掘進を行った。

⑤到達工

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。掘進機のカッター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も確認が出来た。到達精度は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。

⑥裏込注入工

地下調節池への到達後、切羽解放前に推進管外周に注入した滑材を裏込材と置き換えを行った。裏込材の充填が不十分な場合、扶在砂層から高水圧の地下水が推進管外周を伝わり地下調節池との接合部に供給され、作業が不能になったり、漏水が発生したりする恐れがある。そこで裏込注入は掘進機のパルクヘッド面に設けた薬液注入孔より掘進機の外周部への充填を行い、その後推進管の注入孔を使い到達側より順次注入を行った。

⑦推進機の撤去(写真-3)

推進機の撤去に当たっては、最初に駆動部の中折れ機構の部分まで引き上げ固定した。前述したように2分割した推進機の1ブロックに引き上げ用の車輪を取り付け、斜坑エレベーターを利用して地上まで引き上げた。その後、残りのブロックを同様に坑内から搬出した。引き上げ作業は2日間と非常に短い時間で終わらすことができた。

9. 終わりに

今回、通常は横方向に掘進する推進工法で縦方向への施工の可能性を実証することが出来た。推進管の重量や浮力といった要素が大きく係わってくるために、推進反力の算定時には圧入ケーソンの沈下関係図を応用してみたが、種々の荷重の関係を整理して考えるのには有効な方法であったと思える。

施工中、暫定供用中である地下調節池は、大雨により6回の貯留が実施された。地下調節池内作業用の機械設備等が水没し、坑内排水や復旧に約2週間を要したが、幸いなことに貯留は夜間や工事休止期間中であつたため大事には至らなかった。

最後に、本工事は通常の立坑築造による換気施設に比べ大幅なコスト削減が図れており行政の立場としても納得のゆくものであったと考えている。

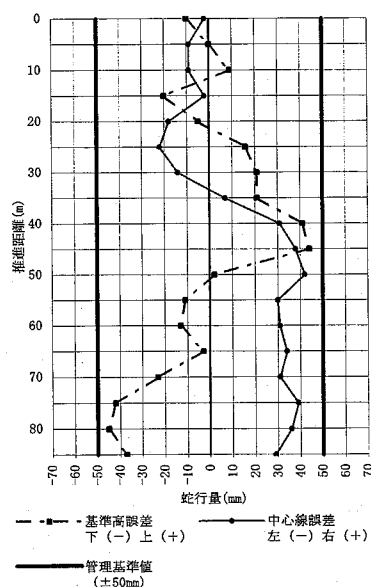


図-7 蛇行管理グラフ

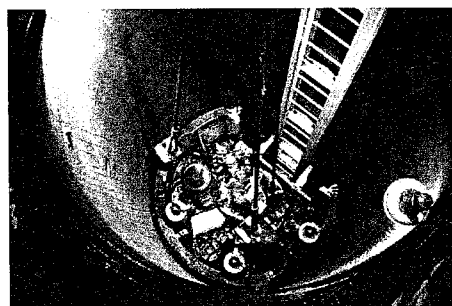


写真-3 掘進機駆動部引上げ状況