大深度立坑から東京港を横断する水道シールド
WATER SUPPLY TUNNEL CROSSING POPT OF TOKYO FROM DEEP SHAFTS

太田　健視[1]・松山　瑞穂[2]・高橋　和信[3]・関根　喜雄[4]
Kenshi OTA・Mizuho MATSUYAMA・Kazunobu TAKAHASHI・Yoshio SEKINE

For the effective operation of water and the reinforcement of backup function for the emergency such as earthquakes, transmission main network connected with purification plants and water supplying stations has been constructed by Bureau of Waterworks, Tokyo Metropolitan Government.

South-east trunk line, a part of the transmission main network, is the large scale transmission main that connect Misato purification plant (in Misato City, Saitama) to Tokai water supplying station (in Ota ward, Tokyo) and its length is 43km.

This paper reports the construction of undersea shield tunnel of 2.4km crossing the Tokyo Bay, which is the part of the south-east trunk line that is not constructed yet (with 10km length), for the construction of transmission main (with diameter of 1,800mm).

Key Words : water supply shield tunnel (south-east trunk line), continuous wall shaft, crossing Tokyo Bay, high water pressure

1. はじめに

東京の水道は，水道需要への対応のため相次ぐ拡張事業を重ね，これまで諸施設の整備を進めてきた．しかし，効率的な水運用や地震などの非常時におけるバックアップ機能の不足などといった問題が顕在化したことから，各施設間の相互融通機能等を総合的・体系的に整備し，施設全体の機能をより充実させ，給水の安定性及び信頼性を一層向上させることを目的に，浄水場および給水所間を連絡する送水管ネットワークの構築を進めている[1)]（図-1）．

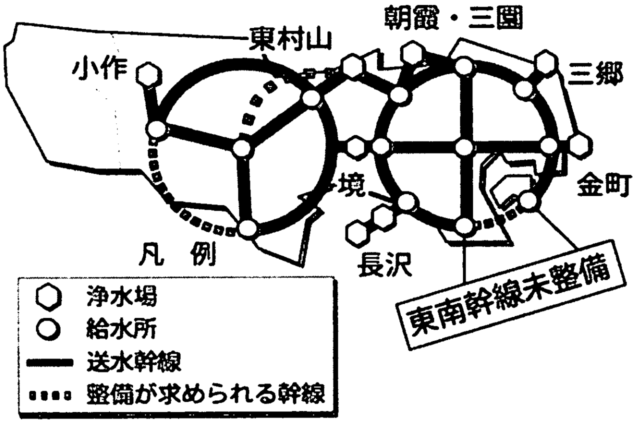


図-1　送水管ネットワーク整備概念図

このうち東南幹線は，東京都水道局三郷浄水場（埼玉県三郷市）から現在築造中の東海給水所（東京都大田区）に至る延長約 43km に及ぶ大規模送水管である．

東南幹線の最後の整備区間となる，東京港を横断する本シールド工事（L=2.4km）は，大規模な水道管用

キーワード：水道シールド(東南幹線)，連続壁立坑，東京湾横断，高水圧

[1]非会員　東京都水道局東部建設事務所工事第一課工事第一係係長
[2]非会員　東京都水道局建設部設計課設計第三係係長
[3]非会員　東京都水道局東部建設事務所工事第一課課長補佐
[4]正会員　東京都水道局東部建設事務所工事第一課工事第一係

海底トンネル築造としては日本初である．また，土かぶりが 50m を超え高水圧かつ硬質地盤（土丹層）での難易度の高いシールド工事であった．

今回は，トンネル築造工事の着手から貫通に至るまで様々な課題の取組みについて報告する．

2. 東南幹線整備事業

(1) 整備経過

東南幹線は三郷浄水場から水元給水所，豊住給水所などを経て東海給水所へと至る延長約 43km の大規模送水管である．東南幹線のルート全体図を図-2 に示す．

三郷浄水場から水元給水所に至る延長約 6ｋｍの送水幹線については，三郷浄水場の浄水能力を考慮し口径 2,600mm の三郷東線として平成 8(1996)年 6 月に完成している．

また，水元給水所から江戸川区大杉三丁目までの延長 12.3km は，昭和 47 年に策定された，第四次利根川系水道拡張事業計画に基づき整備されている．管の口径は 2,600mm，工事は 11 の区間に分割され，昭和 49(1974)年 6 月に金町浄水場上流側から着手し昭和 60(1985)年 3 月に完成をみている．

続く江戸川区大杉三丁目から江東区豊洲二丁目に至る全長約15.8kmは，昭和58年策定の東京都水道局送配水施設総合整備計画に基づき，水道送配水施設整備事業として昭和63(1988)年8月から7年８箇月にわたって工事が行われた．工事は大杉三丁目から豊住給水所間を7工区，豊住給水所から豊洲二丁目間を2工区に分割して進められ，平成7(1995)年4月に完成している．当初は口径2,600mmとして計画されていたが，平成10年に策定された東京都水道局長期施設整備方針に基づき，江東給水所までは口径2,400mm，豊住給水所までは口径2,200mm，残りの豊洲二丁目までは口径2,000mmで整備されている．

現在は豊洲二丁目から東海給水所までの残り約 10km の区間の整備を行っており，平成 23(2011)年度に全線の完成を見込んでいる．

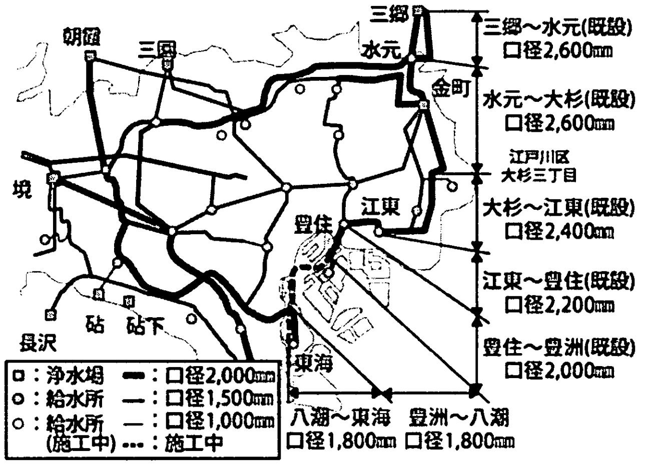


図-2　東南幹線ルート全体図

(2) 東南幹線整備の目的

この東南幹線は，三郷浄水場からの送水による区部南東部地域への給水とともに，将来的には城南地区までの整備により北部幹線，第一，第二城南幹線等との送水管網をループ状に形成し，浄水場，給水所間の相互融通機能の強化と各幹線間の有機的な運用を図ることを目的として整備が進められている[2]．

また，現状では大井や蒲田をはじめとする城南地区へは，標高の高い地域を経由して送水しているが，東南幹線が完成することにより，標高の低い経路を利用して送水を行うことが可能になる（図-3）[3]．これにより，城南地区への送水に際してのポンプ運転費は，それまでの北部幹線を利用した場合と比較して年間約 2.4 億円の削減となることが試算されている．

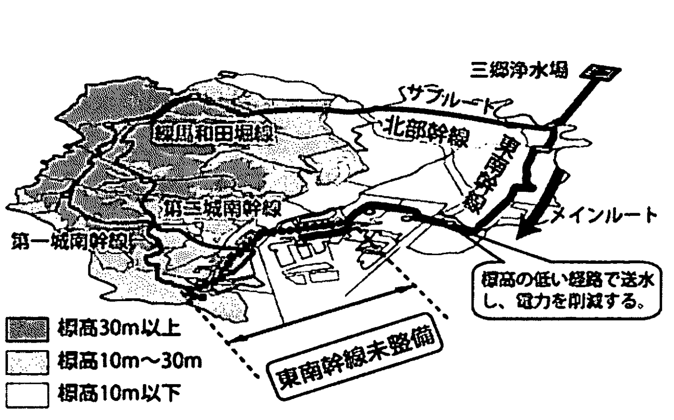


図-3　送水ルート比較図

(3) 本工事概要

本工事は，東南幹線の未整備区間（約 10km）のうち，港区港南五丁目から江東区豊洲六丁目までの区間（約 2.4km）で，口径 1,800mm の送水管新

設に先立ち，シールドトンネルを築造するものである．

その内容はまず，品川埠頭北端に発進立坑を築造し，その後，豊洲埠頭の到達立坑に向け，泥水式シールド工法により施工した（写真-1）．

工期は図-4 に示すように，平成 18(2006)年 1 月から平成 20(2008)年 5 月までの約 2 年 4 箇月である．

そのうちシールドの本掘進は平成 19(2007)年 5 月から平成 20(2008)年 2 月までの 9 箇月間であった．

3. 本工事の設計・施工における課題と取り組み [4)]

(1) 東京港海上部のボーリング調査

海上部のボーリング調査は，船舶航行の非常に多い東京港内で行うこととなり，東京海上保安部をはじめ関係機関との綿密な調整が必要となった．そのため，学識経験者，海事関係者，関係官公庁で構成する「船舶航行安全対策委員会」を設置し，航行する船舶の安全を確保するために，以下の項目等について詳細な検討を行った．

①東京港の気象状況
②港湾施設の利用状況
③船舶の航行状況
④河航幅（航路の幅員）

これらの検討の結果，ボーリング調査は船舶の航行に支障を与えない位置を選定し，品川埠頭から東京港を経て豊洲埠頭までの範囲において実施した．

海上部でのボーリング作業は，プラットホームに櫓を組み，調査地点まで曳航し，スパットで固定・設置して調査を実施した（写真-2）．

シールド通過位置の土質は，海底下が砂層を狭在する北多摩層で，豊洲埠頭側については，N 値 50 以上

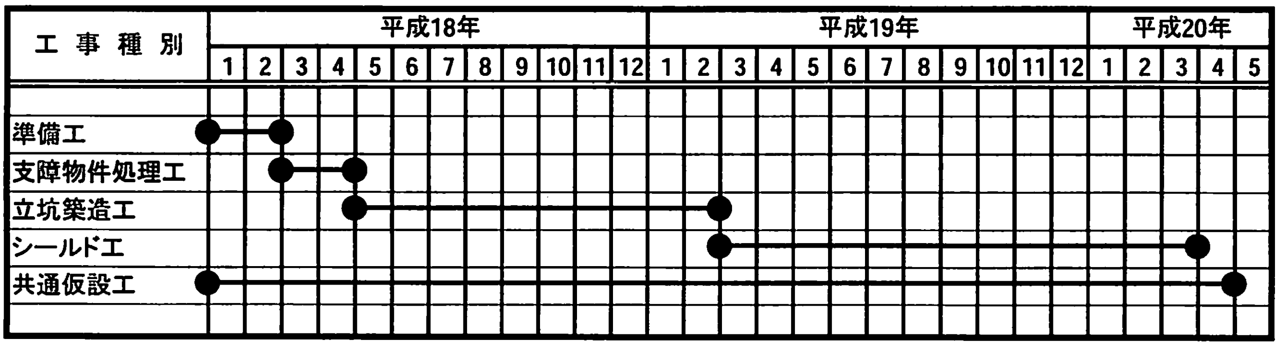


図-4 全体工程図

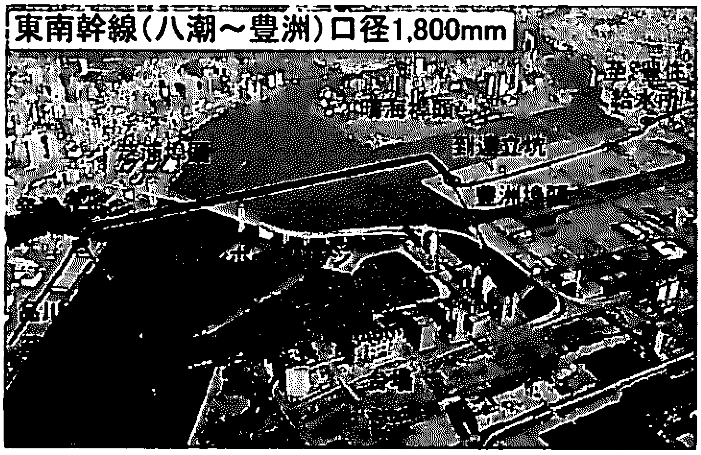


写真-1 作業エリア上空

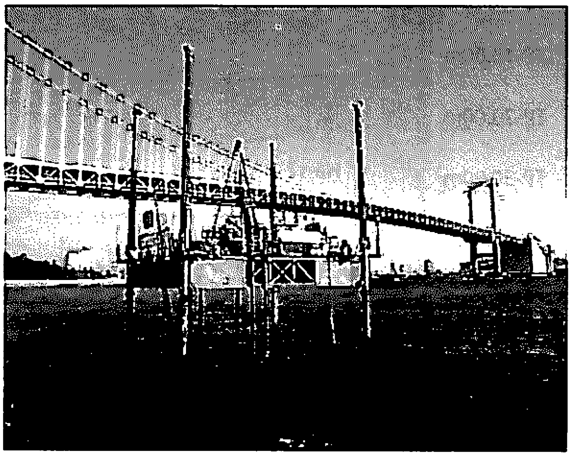


写真-2 海上部ボーリング作業

の砂及び砂礫で構成される江戸川層であった（図-5）.

また，ガス調査の結果，北多摩層の土丹層に狭在する砂層から，メタンガス及び一酸化炭素の賦存が確認された．特に，港区港南五丁目の発進立坑付近では高濃度の一酸化炭素が検出され，江戸川層からも高濃度メタンガスの賦存が確認された.

(2) 大深度連続壁の施工

発進立坑形状は 12.2mの円形とし，掘削深さ 70m のうち 40m 以上は堅い北多摩層が占めるため，硬質地盤に適している地中連続壁工法を採用した（図-6）.

本工事では，連壁掘削深さが非常に深く，先行エレメントの鉄筋籠が非常に細長いものとなり，後行エレメント施工時のトラブル発生リスクが非常に高くなるため，先行エレメントを３ガット 1 エレメント，後行側を１ガット 1 エレメントのコンクリートカッティング工法を選定した．検討段階では，立坑のサイズとガットサイズの制約により先行と後行のラップ部となる台形状のカッティング量が非常に大きく，施工性の著しい低下が掘削機械の振動の原因となるため，大きなトラブルの発生が予測された.

このため，先行エレメントにおけるガット割付を調整してカッティング量の低減を図ることとした（図-7）．また，連壁全体の施工精度向上のため，APS（絶対位置測定システム）を採用し，リアルタイムに掘削機の絶対変位を計測しながら確実に施工をするとともに連壁掘削機の姿勢制御を細かく操作できるようにアジャスターを改造した．さらに，地山掘削時とは，異なるビット配列に変更して掘削を実施した.

これらの工夫により，カッティング方式における課題を克服し，掘削深さ 70mでありながら，最大変位 25mm という高精度が実現した.

地層凡例

地質年代	地層区分			地層名称
現世	人工		B	埋土・盛土
完新世	沖積層		Yu-c	上部有楽町層（粘性土）
			Yl-c	下部有楽町層（粘性土）
更新世			Na-c	七号地層（粘性土）
			Na-g	七号地層（砂レキ土）
	洪積層	谷埋段丘堆積層	Bt	埋没ローム層（粘性土）
			HBG	埋没段丘礫層（砂レキ土）
		東京層群	To-c	東京層（粘性土）
			To-s	東京層（砂質土）
			To-g	東京層（砂レキ土）
			Ha-c	晴海層（粘性土）
			Ha-s	晴海層（砂質土）
			Ha-g	晴海層（砂レキ土）
		上総層群	Ed-c	江戸川層（粘性土）
			Ed-s	江戸川層（砂質土）
			Kl	北多摩層

(3) 狭隘な立坑からのシールド発進

道路上の常設作業帯の中に設置した狭隘な発進立坑であるため，資材の揚重作業時の安全性向上及び，作業員の動線確保を目的としてセンターホールジャッキ工法による発進方式を採用した（写真-3）.

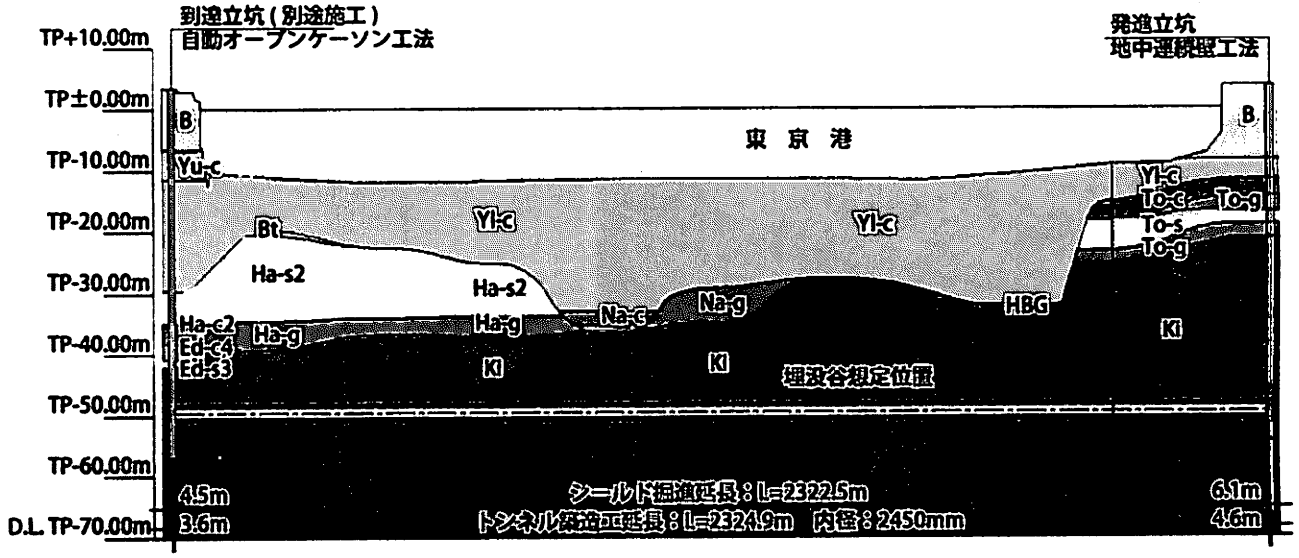


図-5 土質断面図

従来工法は仮組セグメントをセットしシールドマシンの油圧ジャッキを用いて掘進を行うが，本工法は，シールド機の油圧ジャッキを推進力として使用せず，マシン外部に設置したセンターホールジャッキを用いて掘進を開始した．本工法の採用により，①仮組みセグメントを必要としないためマシン後方部に空間が確保でき，初期掘進時におけるセグメントの搬入や，配管及び配線類の取り回し等が容易に行える．②空間が生まれることにより，作業員の動線を確保しやすく安全面でも非常に大きなメリットが得られる．③バックアンカー枠を坑口まで圧入して固定するため，セグメントの摩擦により反力が得られるまでの反力材としても活用できるなど非常に効果があった．

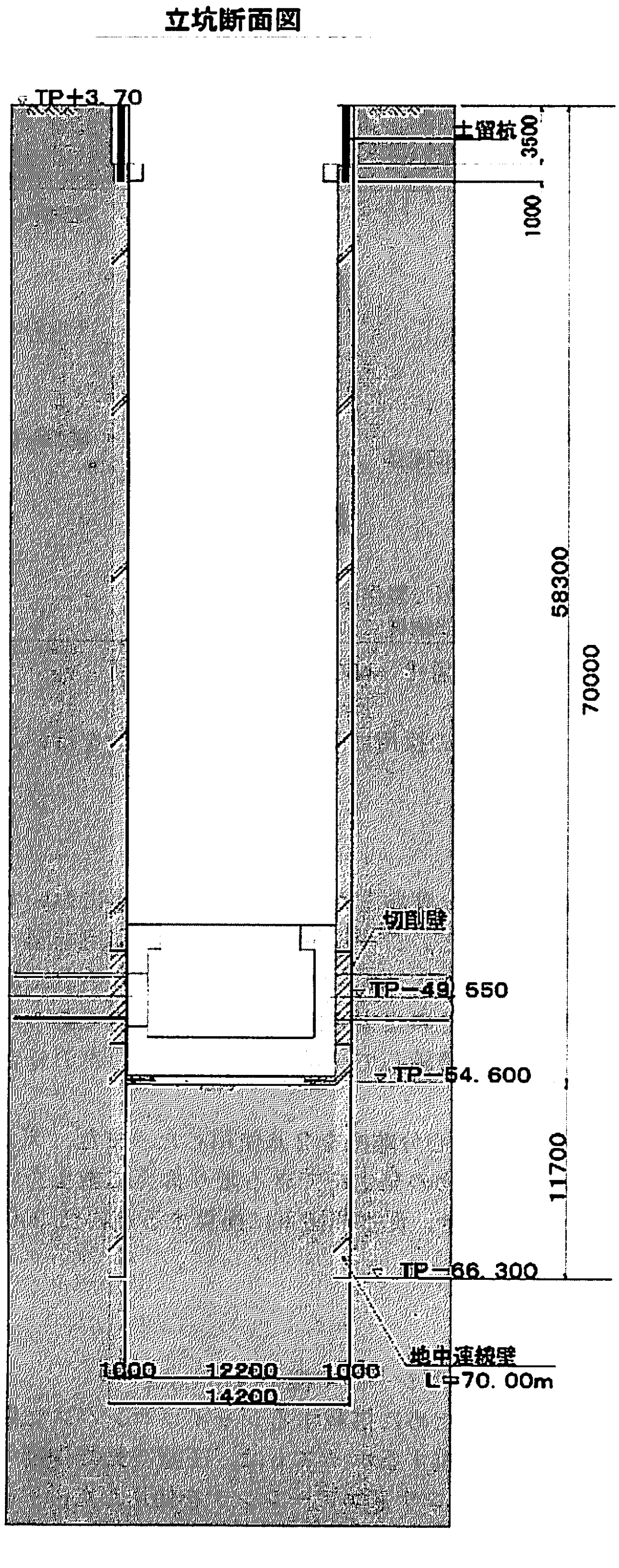


図-6　発進立坑断面図

(4) NOMST 部材の改良

シールド発進防護工は，NOMST (Novel Material Shield-cuttable Tunnel-wall System) 壁である．従来型の NOMST 壁（ロッドタイプ）では，掘進時に発生する振動等による悪影響も少なくないため，新素材である GRM (Grid Reinforced Mortar) による NOMST 壁を採用した（写真-4）．

また，従来型 NOMST 壁の課題として，CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic: 炭素繊維強化プラスチック）ロッドが閉塞の原因となることも想定されるため，応力部材に炭素繊維を格子

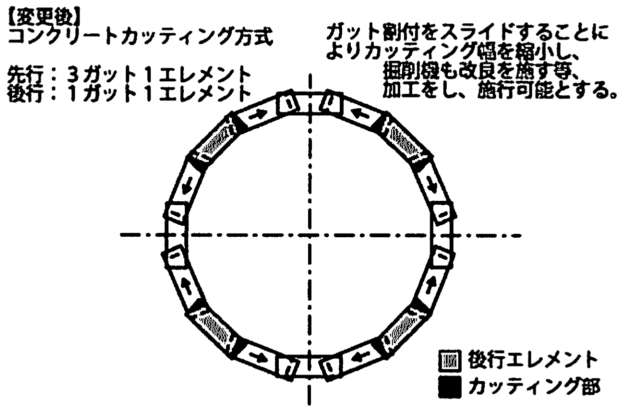


図-7　変更ガット割り図

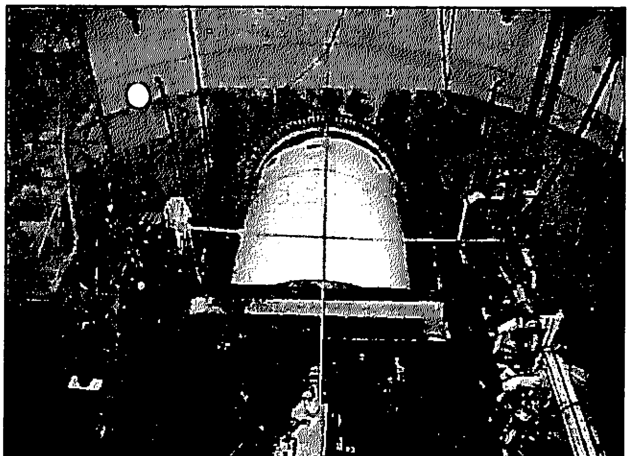


写真-3　センターホールジャッキ施工状況

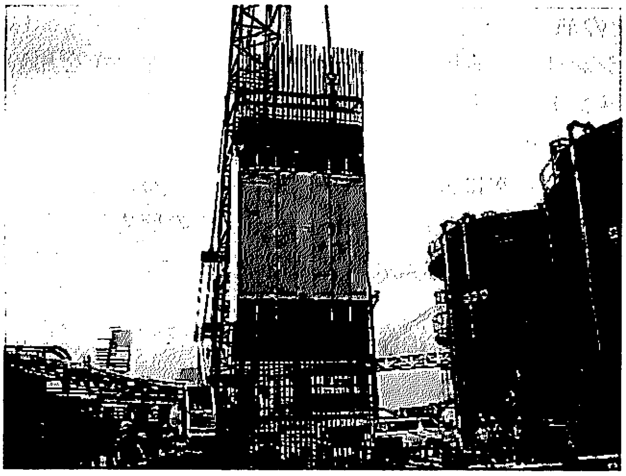


写真-4 NOMST部材

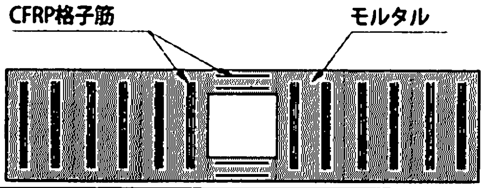
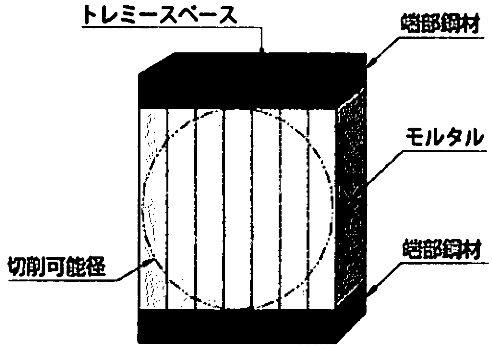
	GRM(Grid Reinforced Mortar)プレキャスト	
コンクリート	モルタル (粗骨材：なし)	石灰石コンクリートより切削性に優れている. 粗骨材がないので細かく割れやすい. また, 大割れした場合, 細分化されやすい.
筋材	CFRP格子筋 (薄手の格子筋)	2mm厚の筋材なので, 切削屑として数 cm に粉砕され取り込まれる.
断面図 (概要)	 	
全体図 (概要)	 特徴 ・分割で製作後, 合体 ・端部鋼材による定着	

図-8 NOMST部材概要図

状のシートに加工したネフマックを使用し，石灰石コンクリートにかわってモルタルによる部材を製作した（図-8）.

現況においては，GRM が柱部材として製作されているため，この柱部材を上部と下部に鋼材で固定し，シアコッターにより応力を伝達し，一体の NOMST 壁とした.

施工実績としては，当初想定した，切削時における振動や筋材等による閉塞は発生せず，改善効果が大きく認められたものの，モルタルを使用したことにより，切削部にクラックが発生しにくく，メインビットを押し付けてしまう格好となり，マシンのカッタートルクの上昇により切削効率が低下してしまった．NOMST 壁の採用に際しては，切削実験を行い，適正な条件を見出すことが今後の課題といえる.

(5) 環境に配慮した掘削泥水の再利用

近年，地球環境の悪化が深刻化し，環境問題が世界的にも大きな課題となっている．本工事においては「東京都水道局環境計画（2007～2009）」の環境基本方針を踏まえ，シールド掘削泥水の再利用を図った.

再利用は，「地下鉄 13 号線」（東京メトロ副都心線）の新設工事において埋戻材として使用された流動化処理土の原料とした．この時，シールド掘進に伴う余剰泥水をそのまま搬出することも可能であったが，本工事では，この余剰泥水の比重をコントロールすることにより濃縮して減量化し，泥水運搬車の延台数の削減を図った.

余剰泥水の濃縮化は，処理能力 30m^3/hr のデカンタと呼ばれる遠心分離機を２基使用した．また，デカンタより排出されるオーバー水は希釈水として再利用し，産業廃棄物の発生をできる限り抑えて施工を実施した（図-9）．このことにより，搬出泥水量を約 13,000m^3 減量でき，泥水運搬車に換算すると約 1,900 台の削減となった.

(6) シールド掘進時の安全対策

事前の土質調査によりメタンガスの賦存が確認されたため，防爆型シールド機を採用した.
シールド機の電気関係部品は防爆型のものを使用し，位置制御のために搭載するジャイロコンパスに関しても防爆型ケース内に設置した．さらに，セグメントを機内で揚重するホイストは，圧縮空気で作動するエアーホイストを使用し，さらに，セグメントボルトを締付けるレンチもエアーレンチを使用した.

監視システムとしては，24 時間連続計測ができるガス監視システムを導入し，センサーを切羽部，坑口部，立坑覆工直下部，防音ハウス天井部に設置し，坑内においては 300m 毎に設置した.

さらに，異常が認められれば直ちに中央監視室等にサイレンや回転灯で知らせることができるようにするとともに，施工時，ポータブルのガス感知器を携行したガス監視員を配置して万全の監視体制を敷いて施工した．なお，万が一，ガスが発生しても，爆発事故を未然に防ぐことを目的とした換気システムに鋼製の風管を使用し，ジョイント部には漏風防止措置を施す等の工夫を図り，坑内風速を確保し施工した．

また，東京港海底下の大深度施工であるため，トンネルは，0.5Mpa の高水圧に対応することが必要であることから，セグメントのシール材は圧縮の容易さ，及びセグメント組込性に配慮した形状とし，長期止水性が確認されている製品を選定することとした．このため，シール材は水圧 0.6MPa の止水性能を有するクロロプレン系ゴムを主成分とした材料を選定したほか，鋼製セグメントの継手面にはシール溝を設けた．

さらに，セグメントシールは通常の帯状シール材ではなく，コーナー部を額縁加工することによりシール材の密着性を高めるとともに，浮き上がり防止を図ることとして，継ぎ目がなく各セグメントピース形状に合わせて加工したシームレスタイプを採用した．施工中は，シールド掘進に合わせてセグメントの注入孔から裏込注入を並行して行い，漏水のない一次覆工トンネルが施工できた．

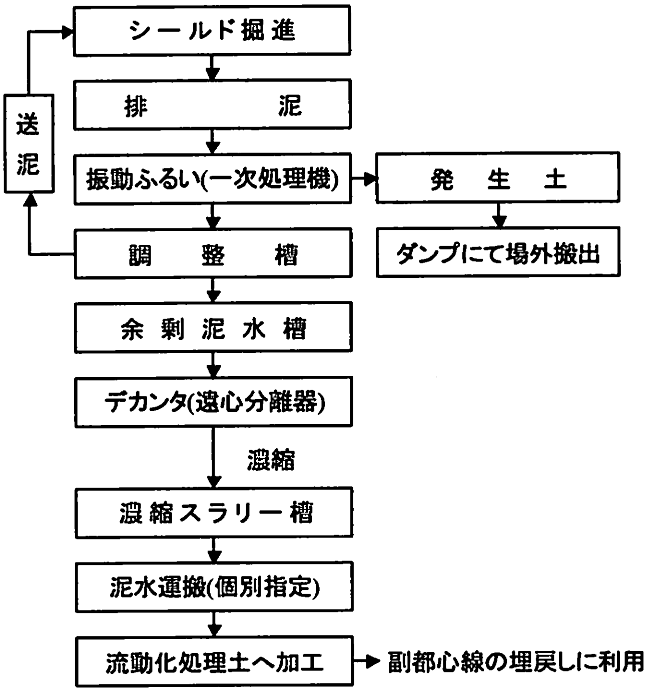


図-9　泥水再利用フロー図

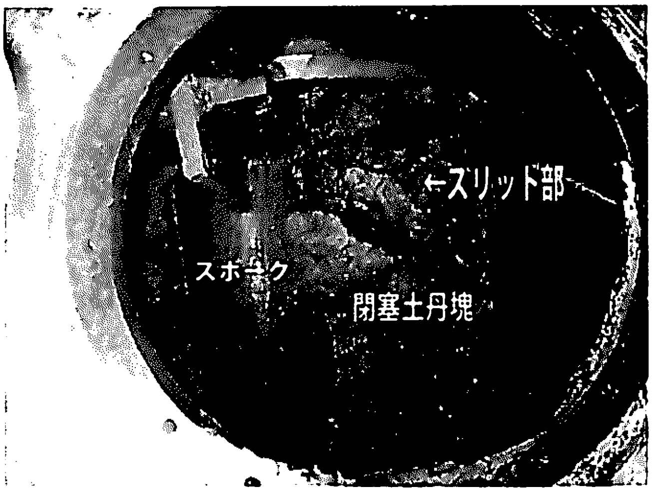


写真-5　切羽チャンバー内閉塞状況

(7) 土丹層におけるシールド閉塞対策

本工事の対象土質は，泥水式での掘削は難しいといわれている土丹層であった．土丹層の泥水式シールド掘進が難しいとされるのは，泥水の粘性が上がりやすく，ひとたび粘性が上昇するとシールドマシンの面板やそのカッタービットの周りに土丹片が付着し，地山の掘削性能を著しく低下させ，さらに，面板のスリット部にも多重に付着・固結し，面板閉塞を発生するなど，掘削土の流体輸送を不可能にしてしまうことである．本工事においても同様な現象が見られたが，初期掘進時に幸運にもチャンバー内に数回入ることが可能だったので，閉塞状況も早期に確認することができた（写真-5）．

閉塞対策としては，まず，分散剤・浸透剤といった添加剤を使用して面盤洗浄を実施した．また，面板を一部分切断し，開口率を約 2 倍にすることで掘削土の取り込み性能の向上を図った．これにより，面板閉塞による掘削不能状態に陥ることが回避でき，粘性上昇によって掘削スピードが 5mm/min 程度以下まで低下したものの，通常時の標準掘削スピードである 25～30mm/min を概ね確保できるようになった．また，一旦粘性が上がると，チャンバー内のみならず，排泥管にも閉塞が発生しやすく，管内に土塊が付着することでシールドマシン後部のエルスターホースが大きく揺動するため，排泥管の固定補強を施すなど，万が一の泥水噴出に備えた．さらに，泥水の希釈効率をより高めるため，地上設備の改造を行うなどした結果，円滑に施工を実施できた．

4. おわりに

本工事は，海底トンネルで，かつ大深度，高水圧下におけるシールド工事の施工で技術的に難しい工事であった．海上ボーリング調査をはじめ施工における諸課題への対応など，各関係機関の多大なるご協力により成功に至ったことに感謝するとともに，立坑工事及びシールド工事における新技術や施工実績が，今後の類似工事の参考になれば幸いである．

参考文献

1) 東京都水道局：東京近代水道百年史，1999

2) 東京都水道局：東京都水道施設整備事業誌(昭和61年度～平成11年度)，2005

3) 東京都水道局：東京水道長期構想　STEPII，2006

4) 原茵一矢，対馬一郎，太田健視，赤坂茂：大深度立坑から東京航路を横断する水道シールド，トンネルと地下，Vol.39，No.6，pp.37-42，土木工学社，2008