

都心の地下を行く大断面泥水シールド施工

Tunneling Works of Large-Diameter Slurry Shield under the Urban

友原 建* 花房 健**
Takeshi Tomohara Takeshi Hanabusa

要 約

本報告は、営団地下鉄11号線(半蔵門線)人形町工区土木工事の泥水式シールド(φ10m・延長643m)についての施工報告である。

当シールド工事の特筆点として、以下のことが挙げられる。

- ① 営業線である地下鉄日比谷線および浅草線下の通過
- ② アンダーピニングを行なった4箇所ビル下の通過
- ③ 連続地中壁で施工した中間換気室部の通過
- ④ シールド延長の90%を占める曲線施工
- ⑤ 障害物の出現

目 次

- §1. はじめに
- §2. 概要
- §3. シールド機および仮設備
- §4. 準備工
- §5. シールド工
- §6. 今後の課題
- §7. おわりに

§1. はじめに

帝都高速度交通営団11号線(半蔵門線)は、渋谷～蛸殻町間の路線認可を受け、昭和48年に着工した。以来、順次開通し、昭和63年末には半蔵門～三越前間が開通、あとは人形町工区の一駅間を残すのみとなった。

当工区は、路線の40%を占める民地下の施工、民間ビルのアンダーピニングおよび地下鉄日比谷線・浅草線の

営業線下の通過等、都市トンネル特有の問題を抱えた工事となっている。このため、トンネルの築造に当っては、営団で実績の多い泥水式シールド工法が採用された。

§2. 概要

2-1 工事概要

工 事 件 名 11号線人形町工区土木工事
施 工 場 所 東京都中央区日本橋蛸殻町二丁目～中央区日本橋小舟町
企 業 先 帝都高速度交通営団
工 期 自 昭和61年11月1日
至 平成2年2月28日
〔シールド工〕
工 法 泥水式シールド
施 工 延 長 643m
一 次 覆 工 RCセグメント
外 径 φ9800mm 幅 1000mm
中子型 桁高 550mm 393リング

*関東(支)戸田焼却炉(作)工事係長
**関東(支)人形町(出)主任

平板型 桁高 450mm 240リング
 二次覆工 巻厚 200mm (平板型セグメント区間の
 み・延長 240mm)
 地盤改良工 発進部 CJG工 $\phi 2000\text{mm}$ 14.2m \times
 52本
 換気室部 二重管瞬結注入
 到達部 CJG工 $\phi 2000\text{mm}$ 16m \times 26本
 [換気室築造工]
 地下連続壁 壁厚 600mm 深度 41.6m
 面積 1938m²
 リバース杭 $\phi 1300\text{mm}$ 14m \times 3本
 [アンダーピニング]
 リバース杭 $\phi 2100\text{mm}$ 26m \times 6本
 ビル下受梁 鉄筋コンクリート 596m²

基礎杭撤去 深礎工 $\phi 3000\text{mm}$ 20m \times 6本
 [小舟町立坑 (到達部)]
 柱列式地下連続壁 $\phi 450\text{mm}$ 1,316m²
 [浅草線残置杭撤去工]
 柱列式地下連続壁 $\phi 450\text{mm}$ 451m² (路下施工)

2-2 路線

人形町工区平面図を Fig. 1 に示す。
 シールドは重要地下埋設物が輻輳する都道交差点下で
 発進し、東京電力洞道下を並走後、営団地下鉄日比谷線
 下55m間を斜め横断し、民地区間に入る。

民地区間では、アンダーピニングにより受替えた4箇
 所のビル (ナンヤビル・日土地ビル他・共同施設ビル)
 および換気室を通過し区道部にする。この他、この区間
 では4F~10Fのビルが数軒近接しており、それらのビル
 基礎杭との最小離隔距離は1.2mとなっている。

その後、都営地下鉄浅草線下140m間を斜め横断し、日
 本橋運河と近接した小舟町立坑に到達する。

2-3 地質概要

地質横断面図を Fig. 2 に示す。シールドの土被りは、発
 進部で16.4m、最深部で25.7m、到達部では19.9mとな
 っている。

シールド通過部の土質は、発進部の一部を除き全区間
 洪積層 (東京層および東京礫層) である。発進部付近は
 東京層に位置し、切羽上部は均等係数の小さい細砂を含

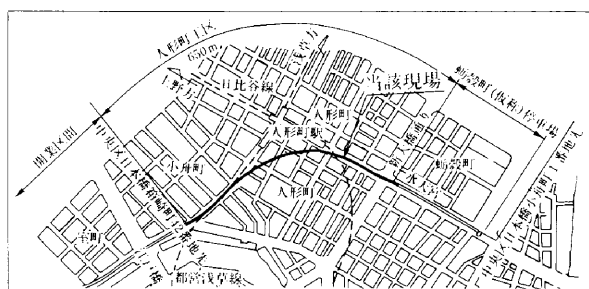


Fig.1 人形町工区平面図

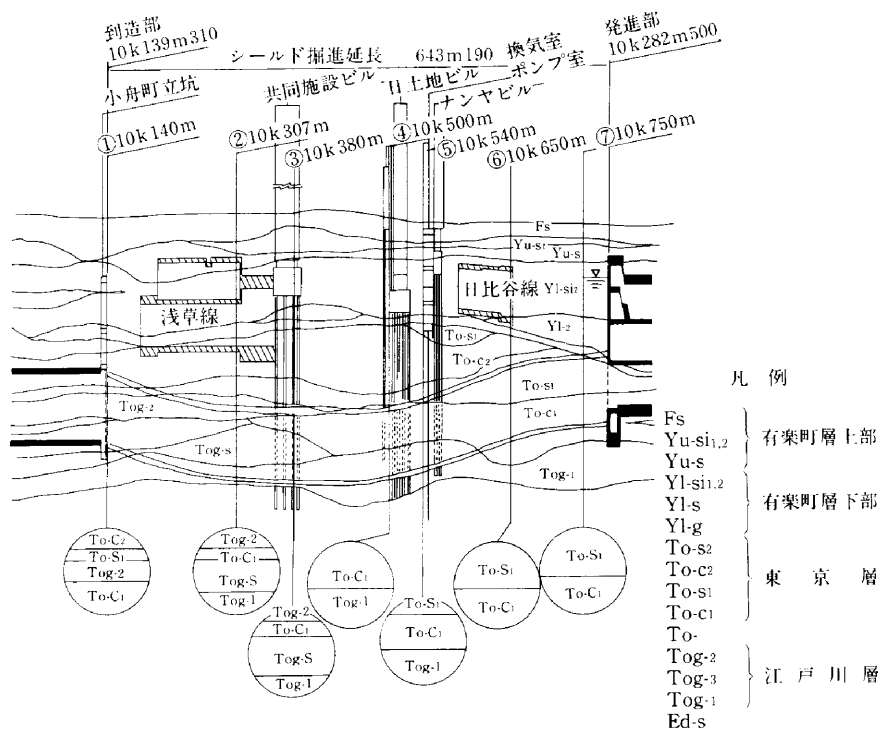


Fig.2 地質縦断面図

む砂層で、下部は粘土層となっている。中間部換気室付近では、上部は東京層の粘土層、下部は東京礫層となる。この東京礫層は透水係数が $1.8 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ と高く、礫率は約70%で最大礫径100mm程度の礫も点在しN値50以上を示す。到達部付近では、東京層の粘土および砂層と東京礫層の互層となっている。

2-4 線形

シールドの線形は、駅端部の発進立坑より発進し、直線約50mの後、 $R=304\text{m}$ 左曲線(曲線長471m)に入り、17m間の直線部を経て $R=350\text{m}$ 右曲線(曲線長105m)で到達となる。なお、路線の平面曲線率は90%である。

また、縦断線形は下り勾配-10%で発進し、-35%で換気室を通過したのち、+2%・+32.5%の上り勾配となり、最後は+40.4%の急勾配で到達する。この間の勾配変化には $R=3000\text{m}$ の縦曲線が挿入されている。

§3. シールド機および仮設備

3-1 シールド機

主要仕様は次の通りである。(Photo 1)

外 径	$\phi 10000\text{mm}$
全 長	8990mm
総 推 力	8700ton (110.8t/m ²)
シールドジャッキ	300t×1200st×350kg/cm ² ×29本
カッタートルク	常用1039t・m 瞬間最大1559t・m
カッター回転数	高速0.548rpm 低速0.274rpm

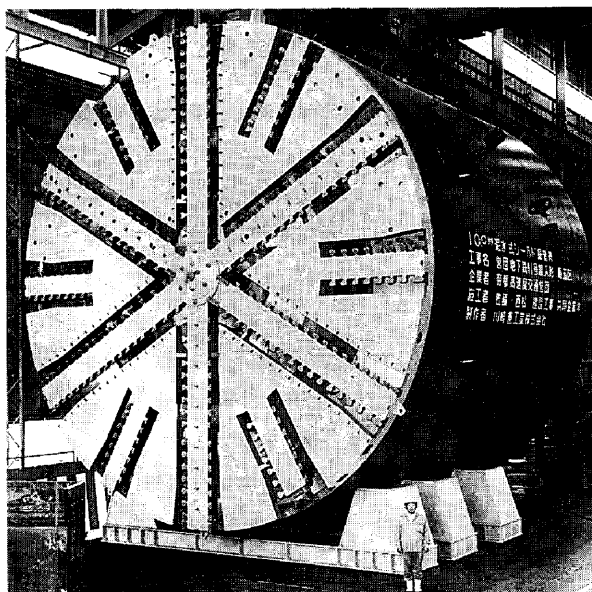


Photo 1 $\phi 10.0\text{m}$ 泥水式シールド機

カッター駆動方式	電動方式 $M=13$ 台
スリット開口率	28% (スリット幅 300mm)
コピーカッター	2基 $ST=150\text{mm}$
アジテーター	電動駆動 $M=4$ 台
切羽崩壊検知装置	検地棒方式 カッター部2箇所 中洞部1箇所
真円保持装置	油圧作動方式
テールシール	ワイヤーブラシ3段

他に障害物除去のための限定圧気設備として、マンロックを装備している。

3-2 泥水輸送および処理設備

泥水輸送設備および泥水処理設備は、蠣殻町駅(仮称)構内を使用して設備を行なった。

(1) 泥水輸送設備

泥水輸送は送泥1系統(12B)、排泥2系統(8B)を基本とした。構内地下3階(軌道階)に45m³調整槽4基とP1ポンプ4台を設置し、シールド後方台車にはP2ポンプ・分流器・クラツシャー・密度計等をセットした。このためシールド機から伸縮管台車後端迄の距離は90mとなった。また、掘進320m地点ではP3ポンプを設置した。

(2) 泥水処理設備

泥水処理設備は、一次処理設備として地下3階にサンドコレクターを4基、二次処理設備として地下2階にフィルタープレス3基・45m³余剰泥水槽2基・45m³ろ水槽2基を設置した。

3-3 裏込注入

裏込注入は構内からの圧送方式でおこない、主要設備として地下1階にサイロを、地下2階に混練りおよび圧送設備を設置した。なお、注入材料は二液式の可塑性注入材を使用した。

裏込注入方式はセグメント注入孔2箇所からの同時注入方式とした。このため、注入孔の位置を考慮してシールド機のテール長を決定した。

3-4 土砂搬出設備

土砂搬出設備(Photo 2)は、駅舎部に設けられた開口部を使用して設置した。シールド掘進によって掘削される土砂量は、1リング当り78.5m³(設計土量)であり、多量の土砂を連続して揚土することが可能な、連続土砂揚機方式の垂直二重ベルトコンベアーを採用した。この機械は上下2台1組のベルトコンベアーで構成されており、幅900mmの2枚のベルト間に土砂を挟み込み、上部に搬送し、地上の土砂ホッパー上で排出する機構となっている。土砂搬送能力は150m³/hrである。

地下3階(軌道階)で一次処理された砂・礫等の土砂

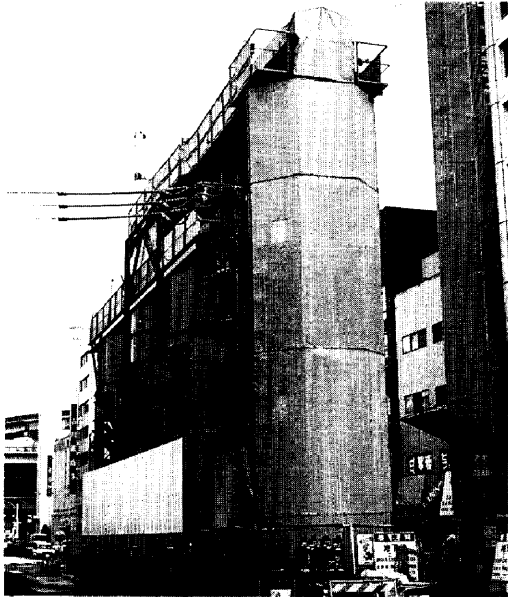


Photo 2 土砂搬出設備

は4組の水平ベルトコンベアーを経由して、垂直二重ベルトコンベアーにより直接地上の土砂ホッパー（60㎡×3基）まで搬出する。また、地下2階で二次処理された粘土ケーキも一旦地下3階に落とし、垂直二重ベルトコンベアーで搬出する。

§4. 準備工

4-1 アンダーピニング

アンダーピニングを行なったビルとシールドの位置関係を Fig. 4~6 に示す。

シールド機は、ナンヤビル・中間換気室・安田生命ビル（建築中、基礎杭はシールドを避けて施工済）・日土地ビルと、連続して直下を通過する。

4-2 都営浅草線残置杭撤去

都営浅草線との交差部については、建設時の土留鋼矢

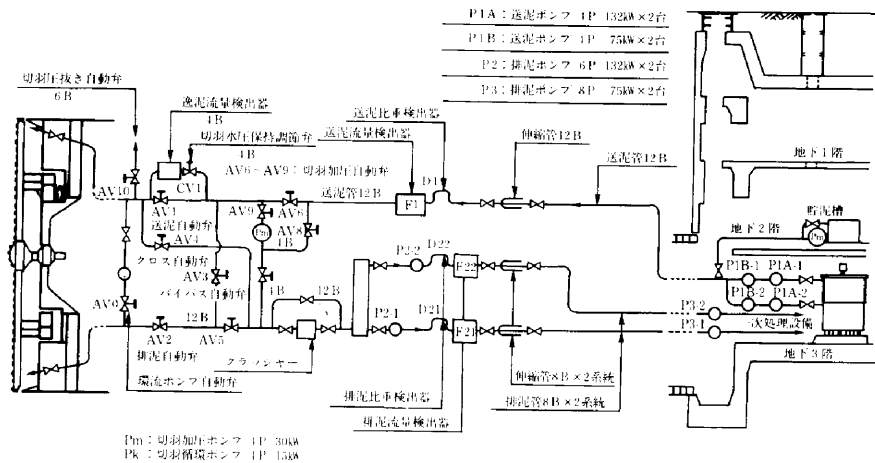


Fig.3 泥水輸送設備フロー図

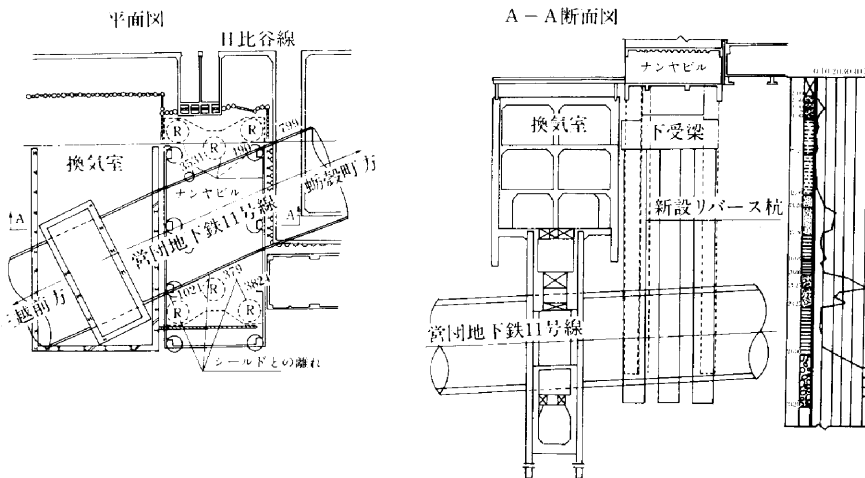


Fig.4 ナンヤビル下新設杭とシールドとの関係図

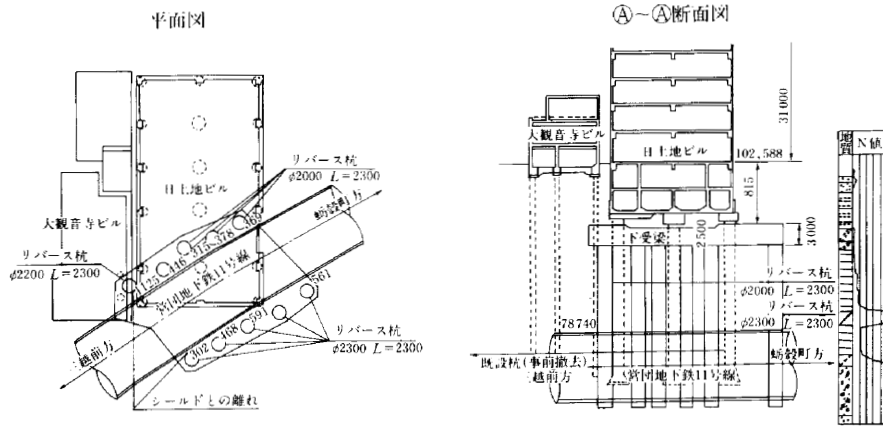


Fig.5 日土地ビル下新設杭とシールドとの関係図

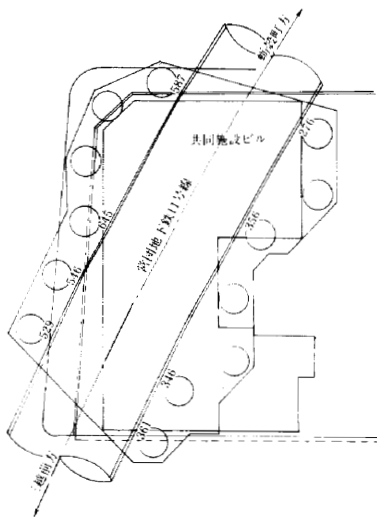


Fig.6 共同施設ビル下新設杭とシールドとの関係図

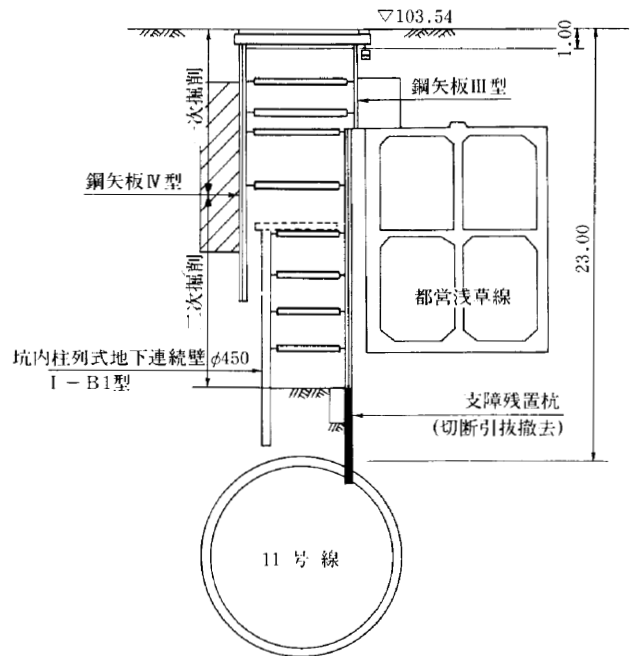


Fig.7 残置杭撤去断面図

板および中間杭が埋設残置されており、シールド通過の支障となることが予想された。このため、施工記録等の調査をもとに磁気探査およびボーリング探査を行なった結果、支障となる残置杭の位置が確認された。この残置杭の処理方法は、事前に開削工法により撤去することとなった。撤去断面図を Fig. 7 に示す。

延長24.5mを掘削深さ約20m開削工法によって掘削した結果、シールド掘進に支障となる残置杭（ライゼン型4型鋼矢板）10枚を確認し、これを撤去した。

§ 5. シールド工

5-1 掘進実績

シールド進行表を Fig. 8 に示す。平成元年2月27日掘進開始、初期掘進92リング、段取替2回を経て、9月5日小舟町立坑に到達した。当工事では、二次覆工および

換気室築造工程上、本掘進中に第2回目の段取替を行なった。内容は、換気室部仮セグメントの解体撤去および二次覆工セントルの搬入組立で、13日間を要した。

5-2 発進工

当初、シールド発進工として立坑内に仮コンクリート仕切壁を構築し、シールド機先端部を貫入、土留壁を分割撤去しながら埋戻し発進する方法が計画されていたが、スペースの問題、工程上の問題から次の方法に変更した。

- (1) 発進防護工であるコラムジェット工 (CJG) の範囲を広げ、 $\phi 2000\text{mm}$ CJG を4列施工する。
- (2) 仮コンクリート隔壁を作らず、立坑構築壁面にエントランス工を設置する。

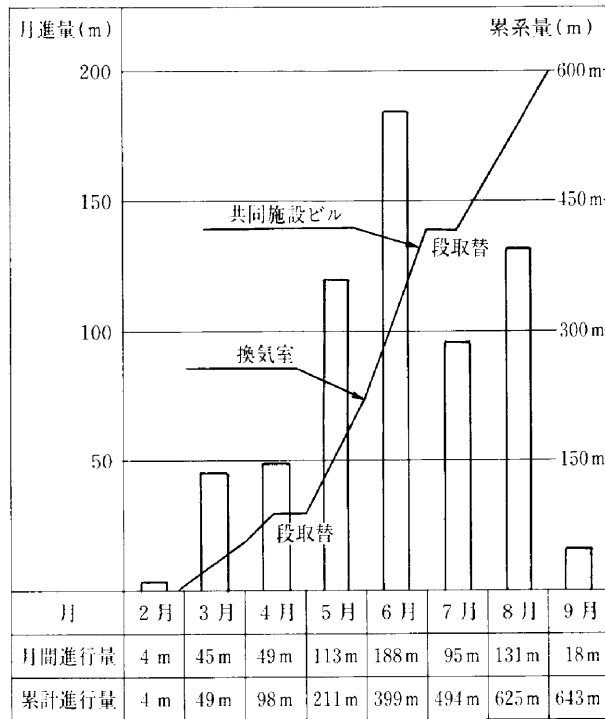


Fig.8 シールド進行表

(3) 構築の桁桁および土留壁を全面撤去する。

発進工の手順を、Fig. 9 に示す。

PIP 土留壁の撤去は、立坑構築時に多量の湧水があったため危惧されたが、CJG 杭の完成度が高く、湧水もなく全面撤去ができた。なお、撤去に当っては、鋼杭の歪み測定を行い、応力の変化が少ないことを確認しながら施工した。

5-3 近接施工

シールドと、アンダーピニング新設杭および換気室との位置関係 (Table 1) は極めて近く、箇所数も多い。また、基礎杭撤去跡は、埋戻しているため地山と土質が異なり、シールド通過時の切羽保持・土量管理・泥水管理・沈下計測・線形管理等の掘進管理は、細かな状況変化の把握とその対応に細心の注意を必要とした。

また、地下構築物については、東京電力洞道(2.6m×2.3m)下5.4mの40m間並走、営団地下鉄日比谷線(6.7m×10m)直下6.9mの55m間交差、中間換気室の通過、都営地下鉄浅草線(7.7m×10m)直下6.2mの140m間交差と、重要構築物が続き、掘進管理は緊張の連続となった。特に浅草線下については、区間が長いため、シールド後方のセグメントから坑内二次注入を行ない変位防止に努めるとともに、自動計測による管理を行なった。なお、営団日比谷線と都営浅草線の下部を通過したことによる両者の最終沈下量は、各々最大値で2.0mmと2.8mm

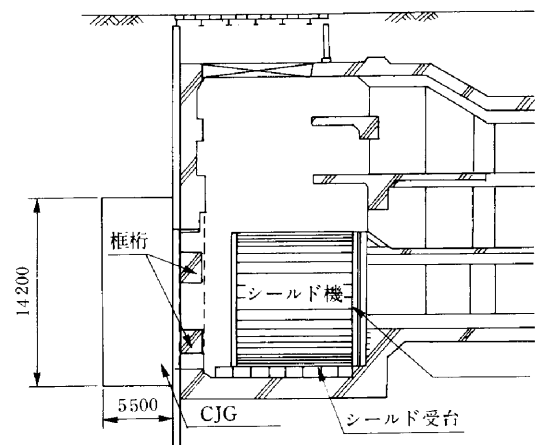
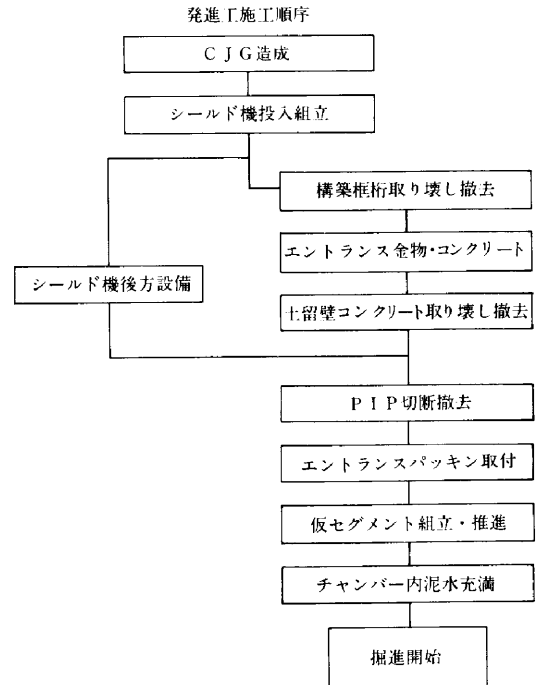


Fig.9 発進工施工順序図

Table 1 近接構築物との離隔距離

近接構築物 (アンペン)	シールドとの関係		備考
	左側離隔距離 (曲線内側)	右側離隔距離 (曲線外側)	
ナンヤビル φ2100新設杭	0.378 m	0.490 m	
中間換気室 エントランス	0.200 m	0.200 m	上下各 0.200 m
安田生命ビル φ2000新設杭	1.100 m	1.100 m	新築
日土地ビル 新設杭	φ2200mm杭 0.302 m	φ2000mm杭 0.369 m	
共同施設ビル φ2500新設杭	0.276 m	0.529 m	

であった。

5-4 障害物

浅草線近接にともない掘進状況の変化に注意していたところ、431リング掘進時、突然カッタートルクが上昇し障害物との接触が確認された (Fig. 10,11 参照)。障害物は後にシートパイルであることが判明した。

この2リング後の掘進時、流体輸送系統に閉塞を生じた。排泥経路を点検したところ、管内にシートパイル切

断片が入り込んで閉塞を起こしていた。

436リング掘進時、再度シートパイルと接触した。この二回のシートパイル切断取込み以降シールド貫通までの間、30回に及ぶ閉塞を引き起こした。

これらの閉塞によって回収されたシートパイル切断片 (Photo3,Photo4)は57片になり、総面積は1.7㎡におよんだ。排泥管内に流入したシートパイル断片の最大寸法は500mm×230mmであった。一方、シールド機も損傷を受けており、カッタービットが取付ボルトを破断した状態で脱落し、回収された。また、排泥経路の閉塞箇所も、クラッシャー・分流器・P2ポンプ・90度曲管部・P3ポンプ・サンドコレクター流入部と多様であった。

後に貫通後、シールド機チャンバー内から回収したシートパイル片は21片になり総面積1.6㎡となった。最大寸法は810mm×310mmであった。したがって、切断したシートパイル片の全面積は3.3㎡で (鋼矢板長にして約6m) である。

また、538リング掘進時には、土留用鋼杭に当たっている。この時は、杭の先端部わずかが接触しただけの様子だったが、カッタービットが脱落した。

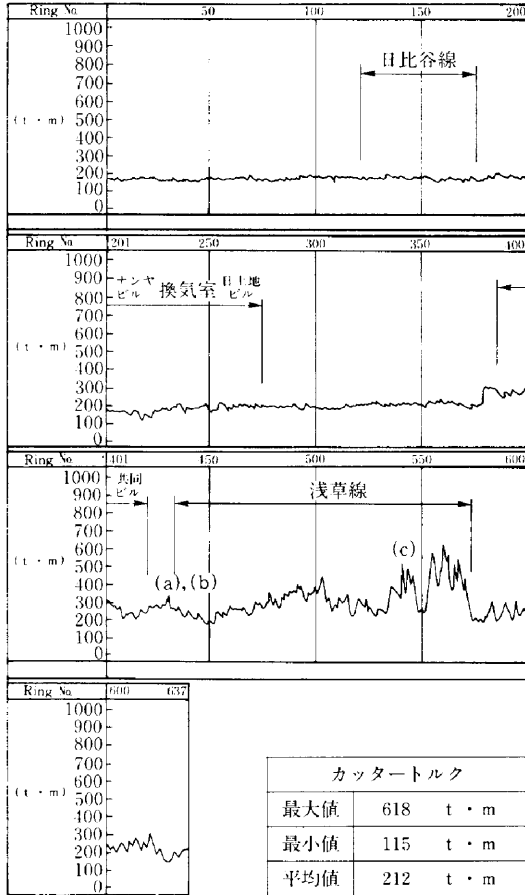


Fig.10 カッタートルクの変化

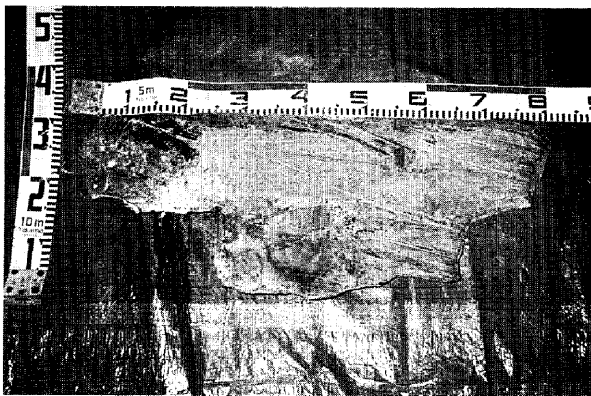


Photo 3 鋼矢板片(最大)

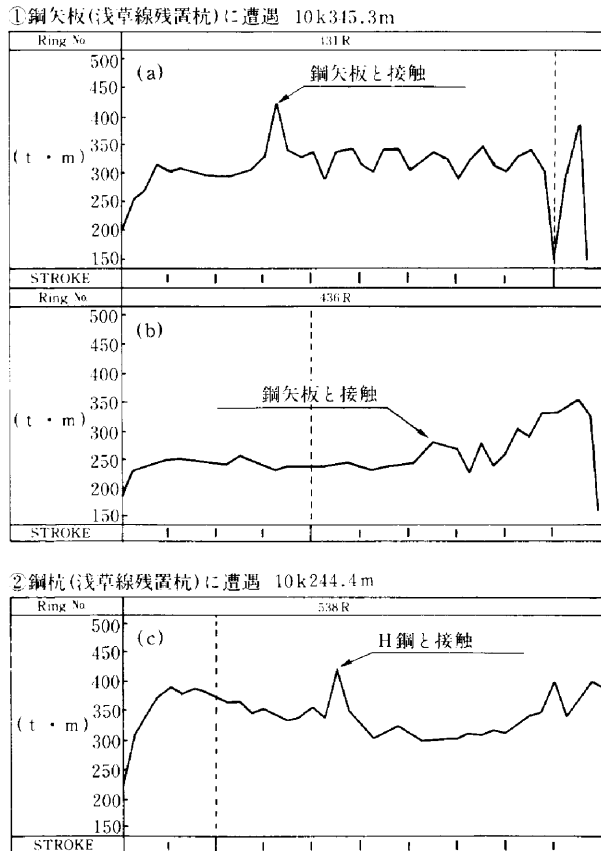


Fig.11 地中障害物によるカッタートルクの変化 (a),(b),(c)はFig.10に対応

これら3度にわたる障害物との接触によるシールドカッター部の損傷度合いは次の通りである。

外周カッタービット 2個脱落 (13個欠損)

標準カッタービット 10個脱落 (39個欠損)

摩耗を除く欠損と脱落を合わせたカッタービットの損傷率は全数288個の内22%であった。

5-5 曲線施工

当工事の曲線 $R=304\text{m}$ の掘進は、緩和曲線長を加えた曲線長が471mにおよび、更に途中3箇所の変換、ビル下・換気室の通過、土質の変化等もあり、難度の高いものであった。特に発進から400m間は、測量観測孔等による基線測量のチェックができず、ジャイロ測量の反復によって測量および施工精度の向上に務めた。

(1) 管理方法

掘進中の線形管理は、シールド機に搭載したジャイロコンパスによる自動位置姿勢計測システムを使用し、計画線形と現在位置を常時対比しながらシールド機の運転を行なった。また、光学測量による日常管理も頻度を増やし、シールド機・セグメントの位置を再確認しながら掘進を進めた。

(2) $R=304\text{m}$ 区間

都営浅草線下に入ったの450リング付近から、団結シルト層の割合が高くなり、余掘りの効果が見られず、シールド機側方からの抵抗の増加から推力が上昇した。このため、シールドジャッキ選択の制限を受けた。対策として、シールド機側部への減摩材注入を試みたが、効果はなかった。しかし、線形が左曲線から右曲線へと移行する位置であり、計画線形を維持すること



Photo 4 アジテーターにかみ込んだ鋼矢板片

ができた。

(3) $R=350\text{m}$ 区間

$R=350\text{m}$ 右曲線に入ってからは、土質が変化し、砂礫層の割合が高くなるとともにシルトの団結度も弱まり、徐々に制御が容易となった。

5-6 到達工

到達部は躯体に鋼材で隔壁を設置した構造とし、土留壁 PIP を撤去し埋戻した状態とした。

この隔壁の耐力はシールドの泥水圧および推力を考慮したものであったが、シートパイル切断片による閉塞が頻繁にあることから、閉塞による切羽水圧異常に対処するため、躯体内をシールド機天端+5m 迄水張りし、到達に備えた。

シールド掘進は前述のとおり閉塞を繰り返しながら進んで行ったが、到達前50m付近では4基のアジテーターのうち1基が停止した。原因は、大きなシートパイル片が噛み込んでいたためであった。その後大量の礫・シートパイル断片の沈降のため、残りのアジテーターも順次停止し、到達2リング手前では全基作動不能となった。

以後、シールド機内で泥水を逆送しながら掘進を続けたが、地盤改良区間であったため地山の崩壊もなく、到達できた。

§6. 今後の課題

6-1 障害物対策

(1) 調査

都営浅草線残置杭については、シールド工事の路線決定段階から慎重に検討を重ね、書類調査および磁気探査等の物理的探査を経て路線決定し、残置杭の撤去範囲を設定した。しかし、想定とはかなり異なり、探査範囲外の位置で残置杭に当たり、シールド掘進の障害となった。

障害物が予想される工事では、調査方法、範囲の設定、誤差の考慮および調査結果の判定等、多面的な検討が必要となる。

(2) 障害物除去

シートパイル等の切断によるカッタービットの損傷は前述のとおりであるが、掘削には支障がない程度と判断できた。しかし、泥水シールドにとって閉塞の頻発は、泥水圧異状、長時間の掘進停止といった切羽崩壊の要因となるため、避けなければならない。

したがって、密閉型シールドではシールド前方障害物探査装置および障害物切断除去装置の開発が課題となる。

6-2 曲線について

N値50の固結シルトに対するシールド掘進は、地山崩壊の危険が無く安心できる一面を持つ。しかし、掘削面では高トルクが続くことや固結シルトの塊状での取込みによる閉塞の危険性もある。

当工事では、推力が上昇し、曲線掘進の思わぬ障害となり線形管理を困難にした。

(1) 必要余掘り量の減少

余掘り量の減少は、裏込め注入量の節約等経済的な面のみならず、径盤変状防止にも重要である。

このため、大口シールドにおいても急曲線施工を伴う工事では、シールド機長の短縮および中折れシールド等を検討する必要がある。

(2) 余掘り部分の土砂取込

曲線掘進は余掘りを必要とするが、同時に切削した土砂の取込みも十分でなければ効果は減少する。

当工事では、固結シルトの取込み不良を生じたと推測されるためコピーカッターの形状およびカッターディスク外周開口部について、土質との適合性を検討する必要がある。

(3) 余掘り部分の確保

余掘り部分の土砂取込み不足に加え、周辺地盤の肌落ちは、シールド側方抵抗を増加させ、結果として推力の上昇を生じる。

このため、余掘り部分の確保対策として、泥水品質の向上や低強度材料による充填等を検討する必要がある。

§7. おわりに

当工事は、隣接施工、アンダーピニングおよび障害物といった都市トンネル特有の問題をかかえるとともに、施工面でも土砂搬出設備、発進工やシールド制御に改良を加える等特筆すべきものであったが、本報告ではこの概要を述べるに終わり、細かな分析や報告ができなかったことをご容赦願います。最後に、今回工事の施工にあたり、御指導御協力を戴きました帝都高速度交通営団の皆様と関係者の方々に、深くお礼を申し上げます。