

φ12.82m の大口径シールドトンネル

12.82-Dia Shield Machine

山内 喜郎* 里見 八宗**
Yoshio Yamanouchi Yatsumune Satomi

要 約

本報文は東北新幹線第2上野トンネル寛永寺橋工区において施工した世界最大級の超大断面シールド(φ12.82m)工事の報告である。シールド機型式は、多くの既設基礎ぐいが撤去可能な特殊手掘式を採用、①圧気工法、②薬液による地盤改良、③オーガ内蔵特殊ムーバブルフード、山留スクリーン、④瞬結型裏込注入を行って、国鉄営業線下および既設橋脚基礎下という苛酷な施工条件下での超大断面シールドの掘進に成功した。また、掘削土砂の搬出には、土砂風送工法を用いた。

目 次

- §1. 概要
- §2. シールド掘進機
- §3. 施工実績
- §4. あとがき

§1. 概要

1-1 工事概要

工事件名：寛永寺橋 T 新設工事

工 期：自昭和56年3月24日

至昭和58年11月12日

主要数量：掘さく土量 60,310m³

一次覆工延長 460m(R.Cセグメント、外径12.660m)

裏込注入量 2,210m³

薬液注入量 23,370m³

1-2 路線

本工区の路線は、寛永寺橋陸橋の高架下に築造した寛永寺橋たて坑を発進基地として、陸橋下の一部、国鉄線京成線路下のななめ横断、及び谷中墓地の下を通過して日暮里たて坑に至る延長470mのシールドトンネルである。

トンネルの土被りは、国鉄線の線路下で15m、谷中墓地の下では18mであるが、到達部の日暮里たて坑手前では5mと極端に浅くなる。またトンネルの線形は25/1000の上り勾配で、大半が半径600mの右曲線である。



Photo1 一次覆工

* 関東(支)根岸(出)係長
** 関東(支)根岸(出)

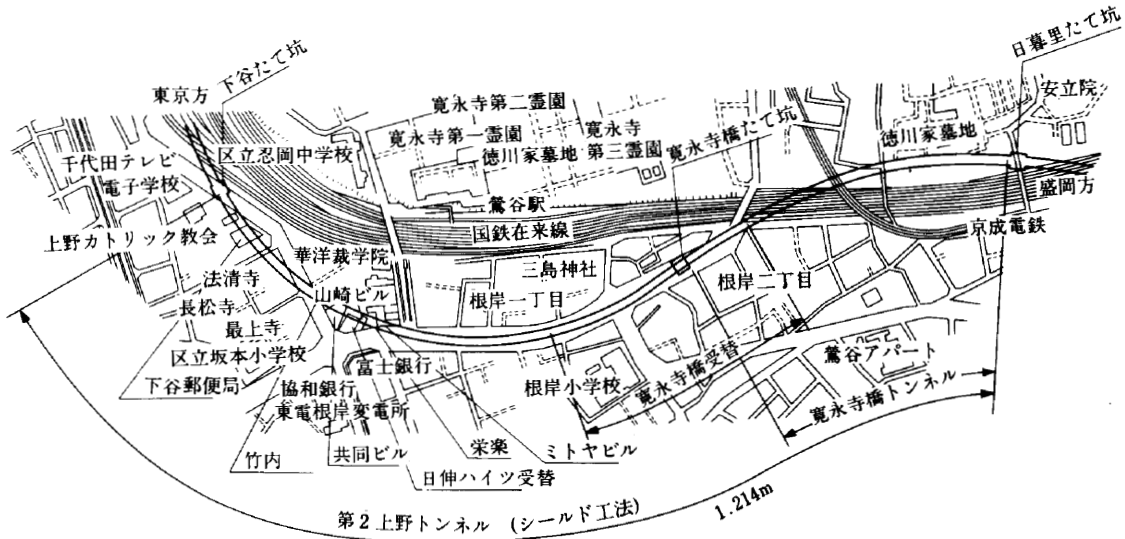


Fig.1 トンネル路線平面図

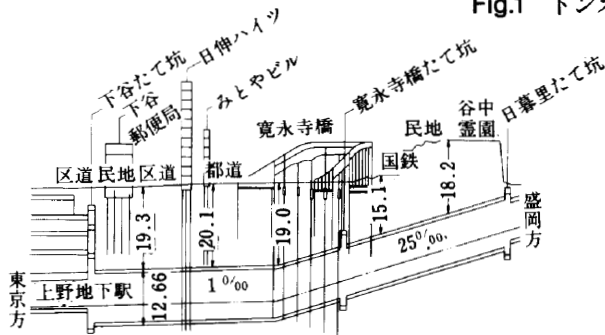


Fig.2 トンネル路線縦断面図

1-3 地質概要

本工区付近の地質は、寛永寺橋付近で上部に沖積層の盛土がある他はすべて洪積層で形成され、上から順に武蔵野ローム層砂質土層、砂礫層、東京砂質土層、粘性土層そして砂礫層となっている。トンネル断面内の地層は、東京砂質土層（滞水砂層）と粘性土層（シルト層）が互に積み重なった複合層である。トンネル前半部分では上部に滞水砂層、下部に固結シルト層が分布しているが、後半部分は滞水砂層が主体となり、地層の分布は逆転する (Fig.3 参照)。

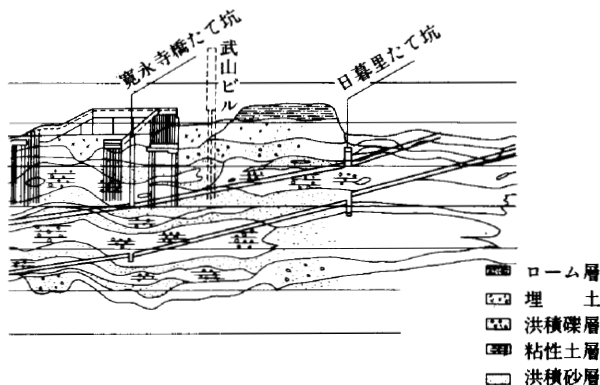


Fig.3 地質縦断面図

§ 2. シールド掘進機

2-1 構造

このシールド機の特徴は、寛永寺橋の基礎杭がシールド断面内にあるので、杭切断のために手掘式シールド工法を採用した。また切羽の安定を考慮して、スクリーオーガ内蔵のカッティングムーブブルフード及び山留スクリーンを設けるなど特殊型とした。このシールド掘進機的设计製作には約1年を要した (Fig.4, Table 1, Photo 2 参照)。

2-2 現地組立

シールド掘進機を組立てる寛永寺橋たて坑が陸橋高架下であり、地表から橋梁までの空間が6mと狭いので、機械本体の外殻はフード部、リングガード部、テール部と輪切りの形に3分割し、さらに円周方向に6、6、4、に細分化し、合計16分割したものを個別搬入して、たて坑内部の鋼製発進受台上に組立てた。なお投入組立てには60t吊りの特殊橋形クレーンを使用した。現地組立てには3ヶ月を要した。

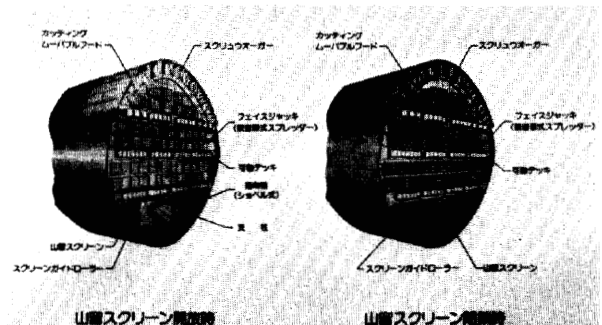


Photo2 シールド掘進機(φ12,820mm)

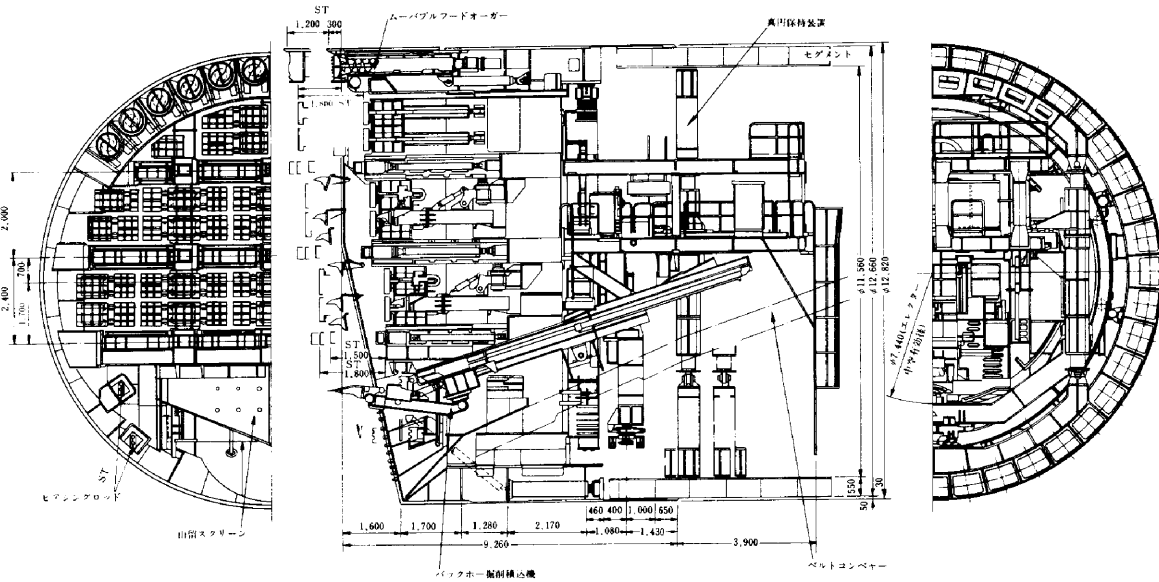


Fig.4 特殊手掘式シールド掘進機構造図

Table1 特殊手掘式シールド掘進機仕様

シールド本体要目		エレクター要目		ムーバブルフォードオーガ要目		バックホー要目	
外径	φ12,820 mm	型式	リングドラム式	回転数	18.2R.P.M	バケットジャッキ	25T×600ST×250kg/cm ² ×2本
全長	9,260 mm	岸荷量	4,522 kg	電動機	11kW×4P×200V×50Hz(減速機付)	ブームジャッキ	45T×540ST×250kg/cm ² ×1本
シールドジャッキ	300T×1,500ST×300kg/cm ² ×40本	押込力	30,000 kg	台数	12台	旋回ジャッキ	18T×360ST×250kg/cm ² ×2本
ムーバブルフォードジャッキ	100T×1,200ST×300kg/cm ² ×12本	回転数	0.097R.P.M 0.58R.P.M	真田保持装置要目		揺動ジャッキ	15T×4,500ST×100kg/cm ² ×2本
フェイスタジャッキ	50T×1,800ST×300kg/cm ² ×26本	伸縮ストローク	MAX:950 mm			押込力	120,000 kg
ダッキジャッキ	50T×1,800ST×300kg/cm ² ×24本	滑動ストローク	前120mm 後430mm	駆動ストローク	MAX:1,000 mm	ブームジャッキ	30T×1,800ST×210kg/cm ² ×1本
補助ダッキジャッキ	30T×1,500ST×300kg/cm ² ×9本	油圧モーター	5×504BM-100 クラウド減速機付×6台	前後ストローク	MAX:1,700 mm	上ドジャッキ	30T×140ST×210kg/cm ² ×1本
スタリオンジャッキ	32T×600ST×210kg/cm ² ×4本	伸縮ジャッキ	15T×950ST×75kg/cm ² ×2本	旋回ジャッキ	60T×1,000ST×220kg/cm ² ×2本	旋回ジャッキ	15T×190ST×210kg/cm ² ×1本
コビージャッキ	1T×220ST×40kg/cm ² ×4本	揺動ジャッキ	7T×550ST×90kg/cm ² ×1本	揺動ジャッキ	13T×1,700ST×170kg/cm ² ×2本	台数	8台
サポートジャッキ	32T×1,400ST×210kg/cm ² ×2本	駆止めジャッキ	7T×150ST×60kg/cm ² ×2本	センターリングジャッキ	10T×150ST×130kg/cm ² ×2本		
ヒービングダロッドジャッキ	50T×1,000ST×300kg/cm ² ×4本						

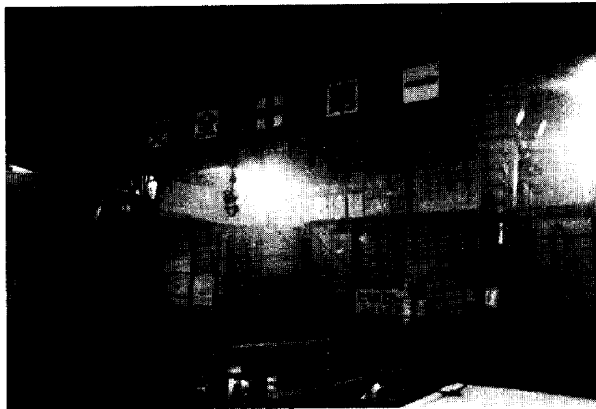


Photo3 特殊橋形クレーン

§3. 施工実績

3-1 初期掘進

この区間は寛永寺橋陸橋の盛土部であり、またシールドの切羽に橋台および擁壁の基礎杭が出るので、深礎工法による場所打ち杭とスラブコンクリートで事前に受替を行った。

初期掘進は無圧気で施工するため、地山安定処理とし

て、被圧水の抑止に深礎杭間に柱列杭を設け、さらに薬液注入を行った。また、発進口にはエントランスパッキンを設置してシールド機を発進させた。仮壁の撤去は、押えの鋼材(H-900)を全て外した後、地下連続壁のコンクリート(厚さ700mm)をこわし、シールド山留ジャッキと土留矢板を併用して山留を行った。掘進7mでP₂橋台および盛土よう壁の基礎杭が出たため、杭振り掘進のくり返し作業となった。施工中の湧水量は平均で120ℓ/min、最大で230ℓ/minを記録した。途中2箇所で地山の安定をはかるため補足注入を行ったが、それ以外には大きなトラブルもなく58m(49R)の初期掘進を約100日間で完了した。

3-2 本掘進

本掘進は圧気施工であるが、滞水砂層の関係で薬液注入による地山安定処理を行った。墓地部は地上からの注入が可能であったが、国鉄線下は地上からの注入が不可能なため、パイロットトンネル(セグメント内径3,900mm)から注入を行った(Fig.6, Fig.7, Table 2 参照)。

初期掘進完了時点で段取替を開始、ずり出し設備、圧

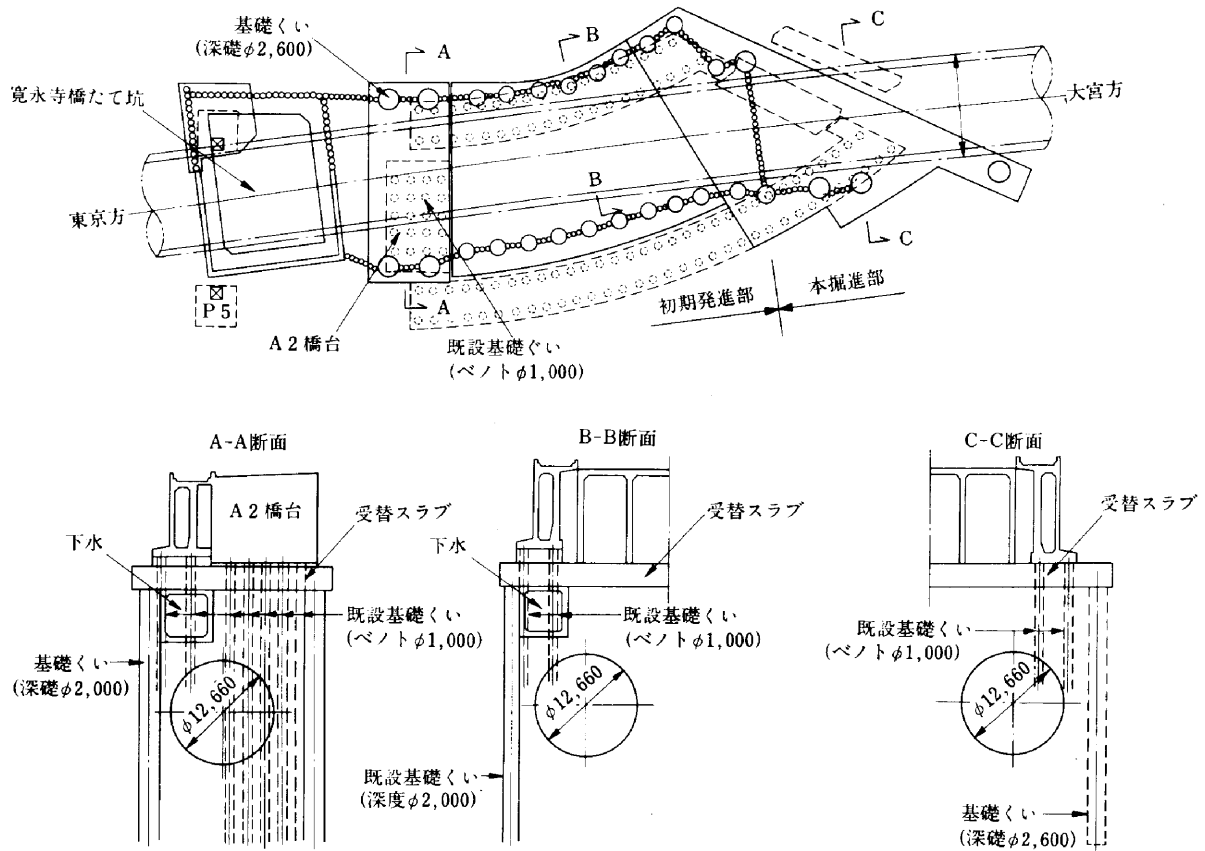


Fig.5 止水用連続柱列杭と既設基礎杭



Photo4 仮壁撤去(コンクリートこわし)

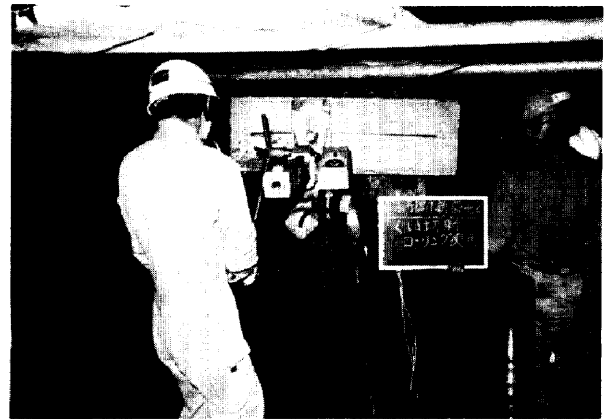


Photo5 基礎杭撤去

Table2 使用薬液, 注入工法一覧表

初期発進部	施工場所	工 法	使用薬液	注入率	注入方法	ゲルタイム	吐出量	注入圧力	ステップ長さ	摘 要	
本掘進部	盛土路下 (国鉄線下)	二重管ロット方式による複合注入	エスタイト3S	35%	ロット先端注入	5秒~10秒	16ℓ/分	15kg/cm ²	50cm毎の定量注入	無機質	
			エリートン	30%, 35%	ロット先端注入	10秒~15秒	16ℓ/分	15kg/cm ²	25cm毎の定量注入	有機質	
		二重管ロット方式による複合注入	アロンSR-ldi	35%	ロット先端注入	7分~20分	16ℓ/分	15kg/cm ²	50cm毎の定量注入	無機質	
			MGロック7号1	30%, 35%	ロット先端注入	5秒~20秒	16ℓ/分	15kg/cm ²	50cm毎の定量注入	有機質	
	寛永寺墓地	二重管ロット方式による複合注入	サンソルトTN-600	35%	ロット先端注入	7分~20分	16ℓ/分	15kg/cm ²	50cm毎の定量注入	無機質	
			DDS工法	クリーンロック2号	35%	ロット先端注入	5秒~8秒	16ℓ/分	15kg/cm ²	25cm毎の定量注入	無機質
			二重管瞬結工法	エスタイト3S	35%	ロット先端注入	5秒~10秒	16ℓ/分	15kg/cm ²	50cm毎の定量注入	無機質
			二重管瞬結工法	アロンSR-US	35%	ロット先端注入	5秒~8秒	16ℓ/分	15kg/cm ²	25cm毎の定量注入	無機質
		二重管瞬結工法	LB-3	35%	ロット先端注入	3秒~6秒	16ℓ/分	15kg/cm ²	50cm毎の定量注入	無機質	

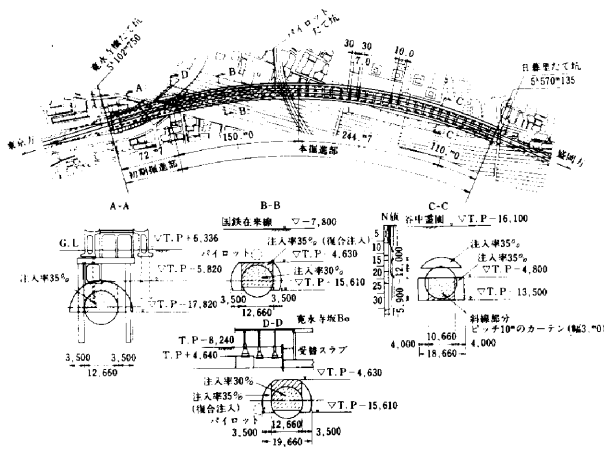


Fig.6 薬液注入平面図及び断面図

気設備、軌道設備の設置及び、プレスリングの撤去などが50日間で完了し、昭和57年11月19日に本掘進を開始した (Fig.8, Fig.9 参照)。

(1)国鉄線横断面

約140mをななめ横断する区間には最小2mの土被りで真上にパイロットトンネルがあるため、クラウン部での切羽崩壊によるパイロットトンネルの変状、それにとともなう地上線路への影響が最も心配された箇所であり細心の注意をはらって施工を行った。

この区間の薬液注入は、掘進断面内が注入率30%の無

寛永寺橋パイロットトンネル概要

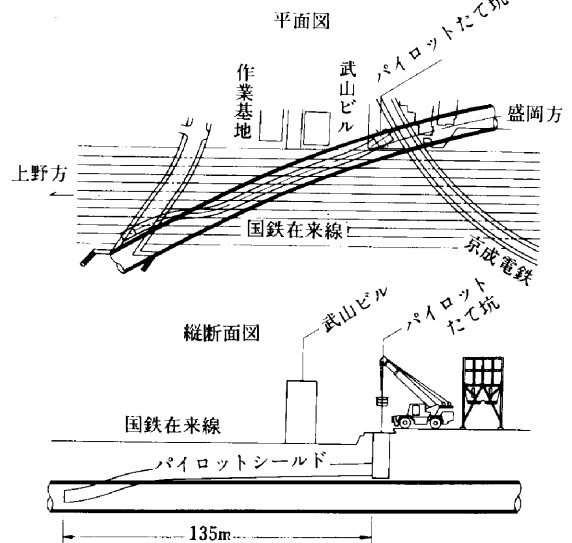


Fig.7 パイロットトンネル

機質薬液注入、断面外が注入率35%の無機質・有機質薬液複合注入という安全性を十分配慮した設計であったため0.8kgf/cm²の圧気の併用と相まって、予想以上の効果があった。湧水は10~15ℓ/minと切羽でにじむ程度で、切羽は完全に自立し、掘削にはピックを要する程であった。

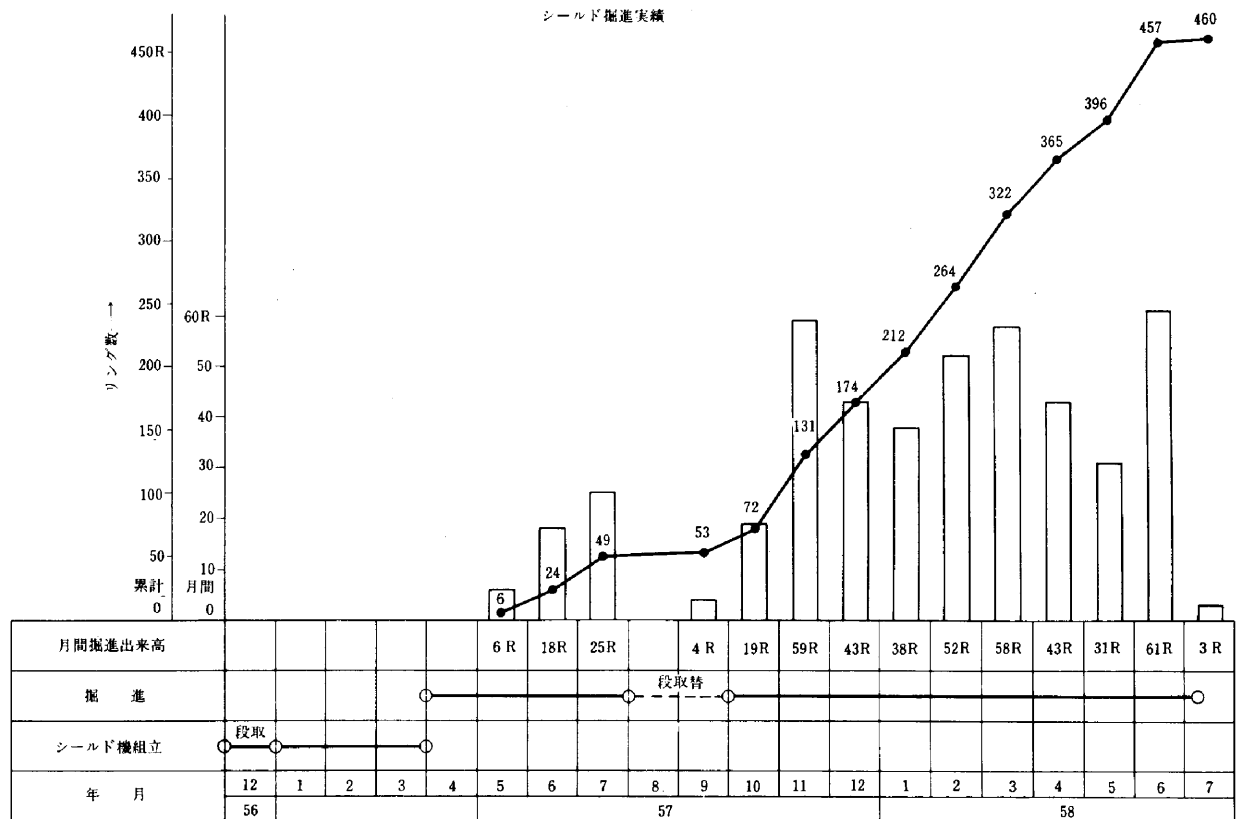


Fig.8 シールド掘進実績

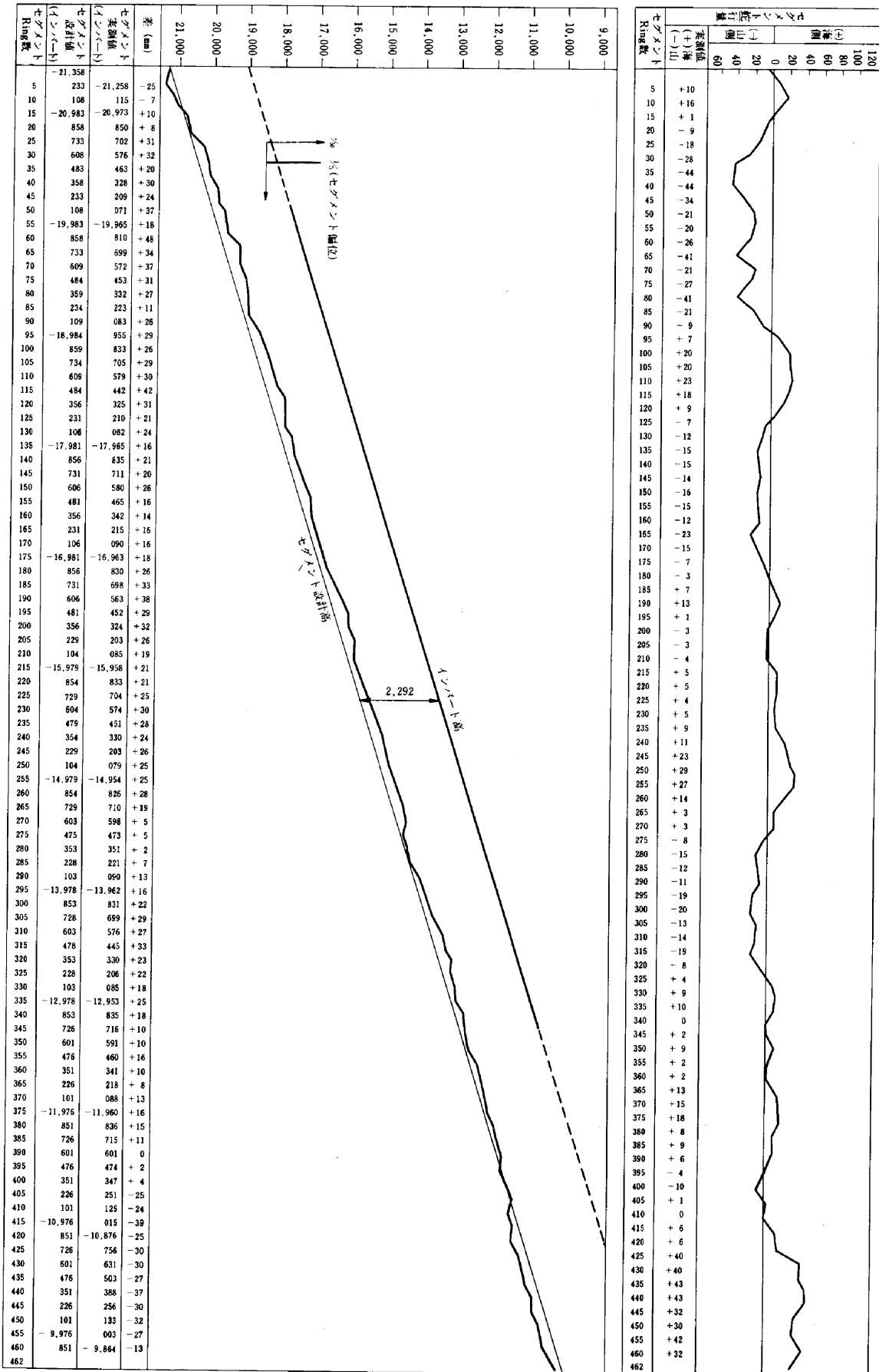


Fig.9 蛇行実測図

掘進による地表の変位は Fig.10 に示すように、一部で先行隆起がみられるが、変位現象のほとんどが極くわずかであるが先行沈下を起した後に、シールド切羽からテール通過迄に沈下の大部分が発生している。そして裏込注入が完了すると沈下は落ちつき、ほぼ安定した状態となる。この区間での最大沈下量は、京浜東北線北行で23mmを記録した。

この区間での問題点は、シールド推進時のノッキングの影響が意外に大きくシールド路線から40m離れた建物へ振動をあたえた。この対策として、できるだけ余掘りを行う、減摩剤の注入、推進スピードのダウンなどを試みて掘進し、ある程度の効果をあげることができたものの、十分ではなかった。この大断面シールドのノッキング問題の解決が今後の課題として残った。

(2)墓地区

この区間の薬液注入は、滞水砂層でのシールド断面の両外側に4mの壁(無機30%)を作り、10m毎に断面内に3mの隔壁を設けた。圧気は0.8kgf/cm²を併用したが線路下に比べて湧水がやや多く、20~30ℓ/minを記録した。この区間は長時間掘進を止めると滞水砂層で多少の崩壊がみられたが、シールド掘進機のゲート式スクリーンの活用で掘削には特に影響はなかった。

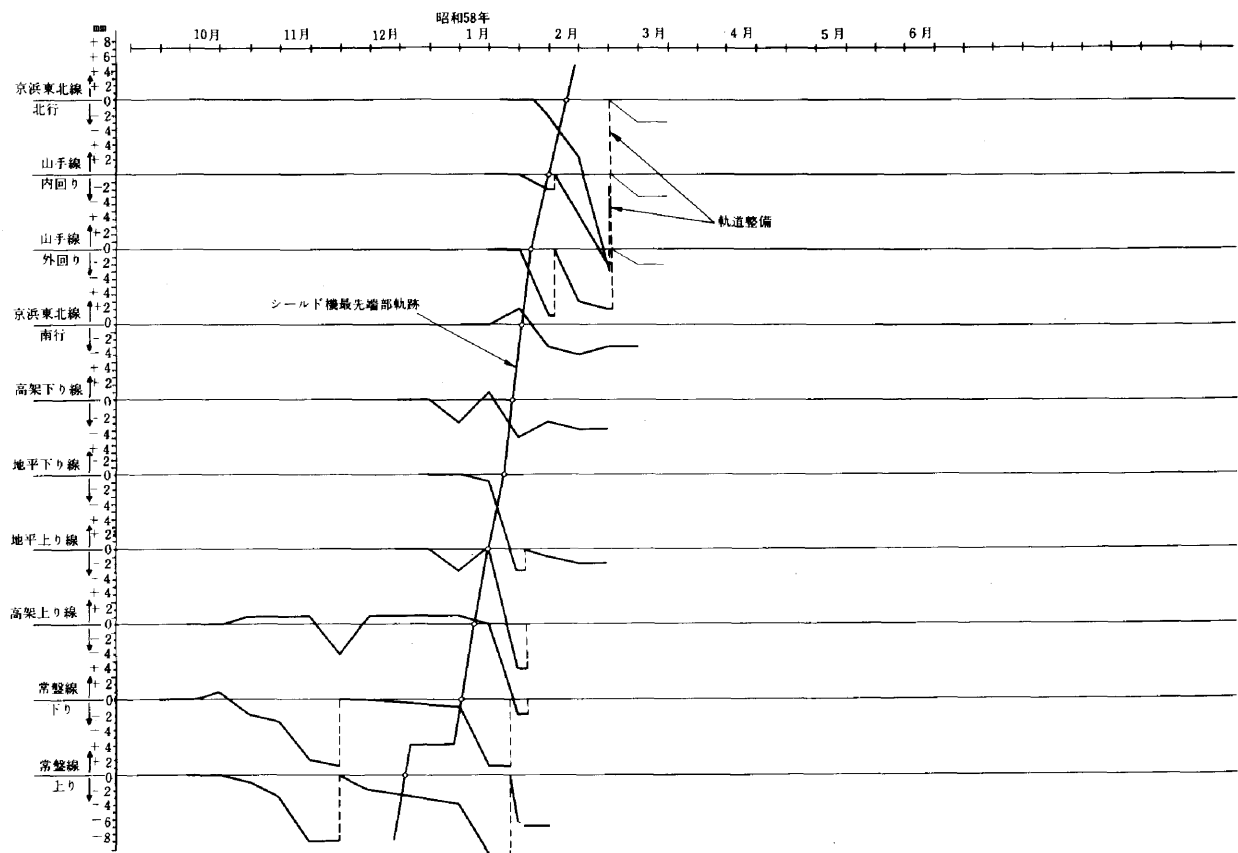
墓地区の地表変位は、シールド中心部でシールド機先端部の5~10m手前から先行沈下を起し、裏込注入が完了すると安定した状態となる。Fig.11のグラフが墓地区の最大沈下量を表わしたものであるが、約45mmを記録した。

(3)到達部

日暮里たて坑手前10m区間は土被りが5mと極端に浅くなるため、圧気によるふん発を防止するため無圧気施工とした。このため、この10m区間は掘進断面の内外共、薬液注入による地山の安定処理を行った。断気により切羽からの湧水は30~50ℓ/minと増えたが、特に掘進に影響はなかった。またシールドの到達はムーバブルフードをたて坑コンクリート壁に約40cm貫入させるために、壁の手前でシールドを止めて、研り作業に入ったが、その振動でクラウン部の地山がゆるみ、一部が崩落して、地上部では幅3m×長さ2m×深さ1mの陥没が発生した。この部分は墓地防護壁と立坑壁とに囲まれていたため、幸いにも国鉄線や墓地への影響は全くなかった。

3-3 一次覆工

セグメントは平板形鉄筋コンクリート製で、1リング13ピースの組合せである。構成はA型10ピース、B型2



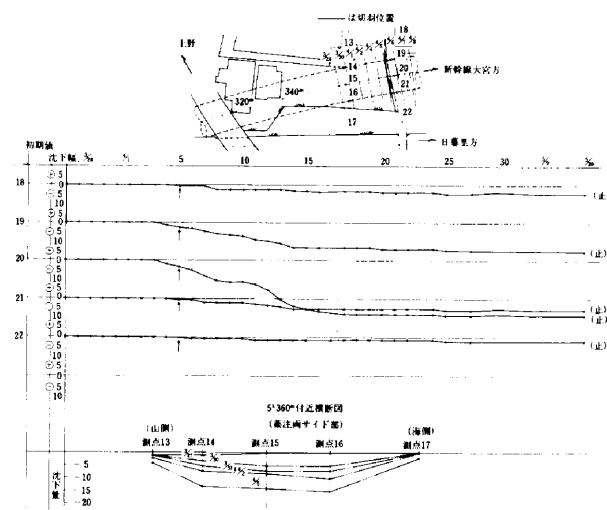


Fig.11 墓地内沈下測定図(5k320m, 5k380m付近)

ピース, K型1ピースでK型のみ鋳鉄製である。寸法は標準型で幅1,000mm, 厚さ550mm, 組上りで外径

12,660mm, 内径11,560mmで, 1リングの重量は, 54,000kgである。止水のためのシール材には, リング間に硬質スポンジゴム(エンバーシール), ピース間に吸水膨張性ゴム(ビノンアクアタイト)を使用した。

このセグメントの特色はピンボーズ継手を採用したことである。この継手は通常のボルト継手に比べて, せん断耐力が大きく, セグメント間の応力の伝達がスムーズである。また, 組立てが簡単であるという利点もある。しかし, 確実な真円保持を行い精度良い組立てを実施しないと, リング間のピンが折損する恐れがあるので慎重な施工が必要である。1リングの組立て時間が, 平均で1時間15分で終了した。ピンボーズ継手の採用により超大断面ではきわめて短時間で施工が可能であった。

3-4 裏込注入

従来のセメントベントナイト系のモルタルでは, ①ゲルタイムが長い場合テールボイドが完全に填充されないうちに, 切羽及びシールドテール内から漏出する, ②早

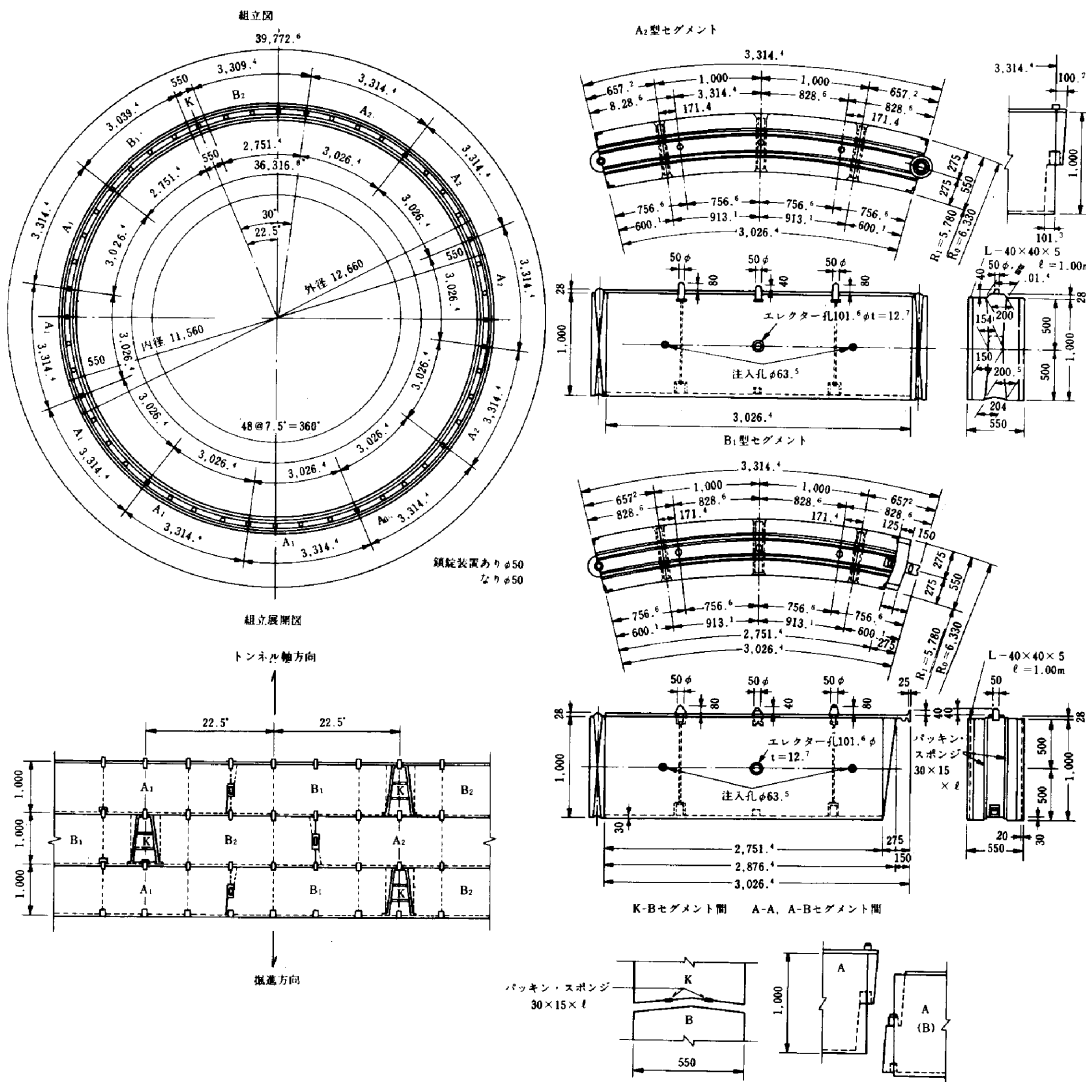


Fig.12 セグメント設計図

期強度がきわめて低いため、地山のゆるみ防止、止水性およびセグメントの安定に不安がある、などの問題点があり、これを解決するため、クレーサンド気泡モルタル(TAC-II S工法)の注入を試みた(Table 3, Table 4, Fig.13)。

Table3 TAC-II Sの配合表

A液(クレーサンド気泡モルタル)						B液
セメント	TAC-1S	TAC-2	TAC-R	水	空気量	TAC-3
300kg	300kg	2.0kg	3.0kg	420ℓ	36%	100ℓ

Table4 TAC-II Sの強度表

経過時間	一軸圧縮強度
30分	1.5kgf/cm ²
60分	0.4kgf/cm ²
24時間	8.0~10.0kgf/cm ²

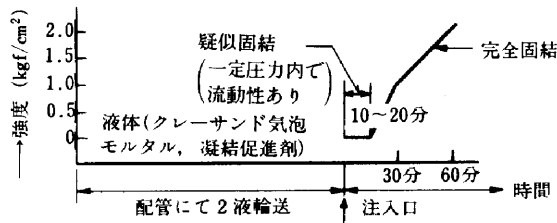


Fig.13 TAC-II Sの性状変化

TAC-II S工法の特徴は、クレーサンド気泡モルタルと凝結促進剤を先端で混合させることにより、瞬時にゲル化し疑似固結の状態であらゆるボイドに填充され、数10分後には完全に固結状態となる。このため配管によるポンプでの長距離輸送が可能となり、また高い早期強度が得られることである。

注入はたて坑プラントから注入ポンプによって直接注入する方式とし、シールド推進と同時注入を行った(Fig.14, Table 5 参照)。

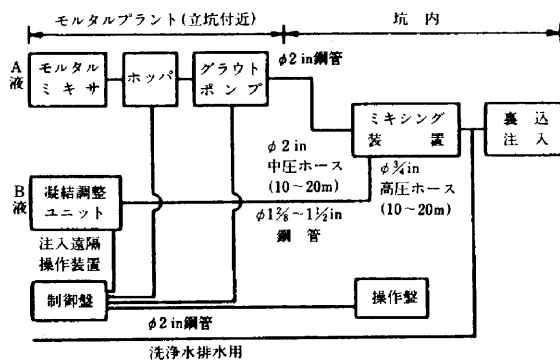


Fig.14 裏込注入システム

Table5 裏込注入量総括表

	空隙量 A(m ³)	設計注入量 B=A×150% (m ³)	実注入量 C(m ³)	実注入率 C/A(%)	設計に 対する 注入率 B/C(%)
初期推進	147. ²⁹	220. ⁹³	508. ⁶⁴	345	230
本推進	1,315. ⁹⁹	1,973. ⁹⁸	2,227. ²⁸	169	113
計	1,463. ²⁸	2,194. ⁹¹	2,735. ⁹²	187	125
摘要	シールド外径 12,820mm	1m当りボイド (12.82 ² -12.66 ²)×π/4=3.2019m ³ /m			
	セグメント外径 12,660mm				
	ボイド量 80mm				

3-5 設備状況 (Fig.15, Table 6)

立坑周辺の条件から土砂の搬出にはかなりの制約を受ける。このため寛永寺橋陸橋上に土砂ホッパを設け、風送によって掘削土砂を搬出する計画とした。土砂は比重が高いことと、摩耗性が高い条件の他にシールドトンネルでは、①土質が変化する。②含水率が変動する、③粒塊径が一定でない、④付着性がある、などの特異な条件が加わるため、その対策については、かなりの期間の検討とテストを行って実際の施工に入った。砂層でも一部の細砂では順調に搬送が行われたが、その他の部分では地山の粘性土が予想以上に多いことと、薬液注入の影響からか、風送管内の付着度が意外に高くなり、テスト時に比べて搬出量が低下した。これを補うため現場において可能な範囲での改善(混合室の改造, エアパルスの増設, サージピンスクリューの改造, 風量の増加措置など)

Table6 主要機械設備一覧表

名称	機械名	寸法形式	数量	備考
シールド設備	シールド掘進機	特殊手掘式 φ12,820×9,260mm	1	
	ベルトコンベヤ	900mm×(5~19.5m)	4	5m, 7m, 17m, 19.5m
	土砂風送設備	40m ³ /hr	1	サージピン, ロータリフィーダ, ほかり
	風送用ブロウ	(240~250kW)×125 m ³ /min	3	240kW(固定回転)× 2台 250kW(可変速)× 1台
運搬設備	電動ホイスト	5t×10m	2	セグメント搬入用
	バッテリー機関車	8t	1	坑内用
	バッテリー機関車	4t	2	坑外用
	セグメント台車	10t	6	坑内5, 坑外1
注入設備	モルタルミキサ	800l×2槽	1	
	グラウトポンプ	250l/min×22kW	2	
	凝結調整ユニット	55l/min×3.7kW	1	
立坑および坑外設備	ミキシング装置	200l/min	1	A液, B液退職
	門形クレーン	10t	1	立坑部
	門形クレーン	7.5t	1	セグメントヤード
	門形クレーン	3t	1	鉄管, レールほかストックヤード
	エレベータ	500kg×24m	1	人間昇降用
	土砂ホッパ	50m ³ , 特殊型	2	マルチクロン装備
圧気設備	ブロウ	150kW×50m ³ /min	8	圧気専用
	コンプレッサ	定置式 130kW× 23.2m ³ /min	3	圧気, 掘削兼用
	コンプレッサ	可搬式 175PS× 17.0m ³ /min	1	非常用
	マンロック	φ1,800×13,000mm	2	
	マテリアルロック	φ3,400×115,000mm	1	
ホスピタルロック	耐圧 5.5kg/cm ²	1	再圧用	

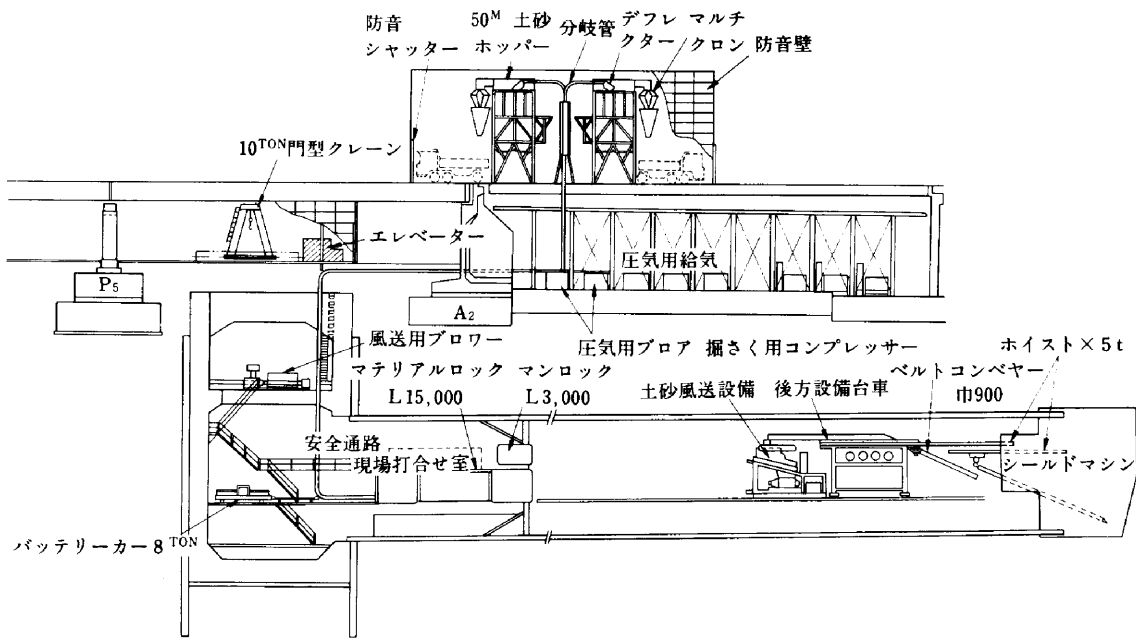


Fig.15 設備断面図

を行い、礫・砂の搬送については一応の成功をみたものと確信したが、シルト、粘土についてはさらに今後の研究に期待したい (Fig.16, Photo 6)。

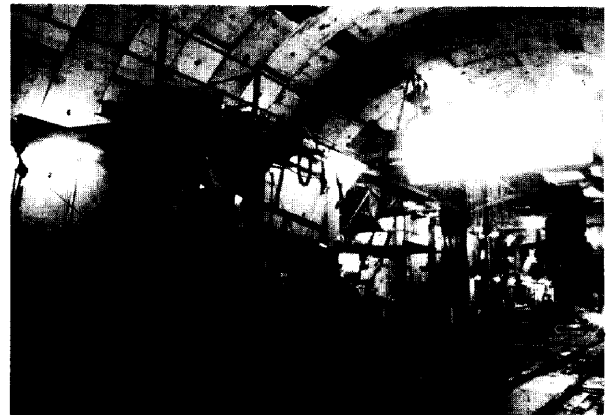


Photo 6 土砂風送設備

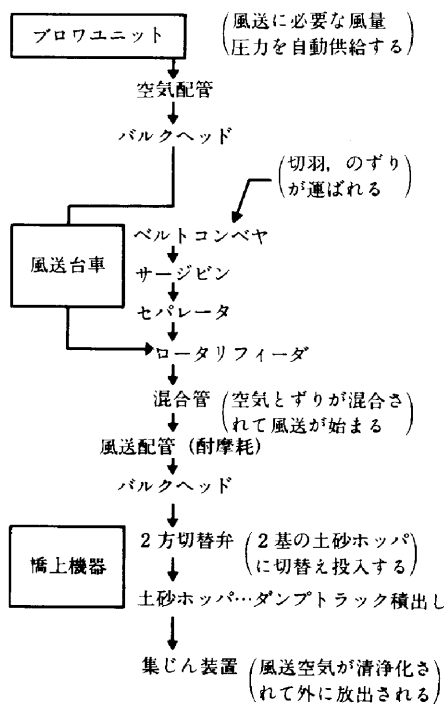


Fig.16 土砂風送フローチャート

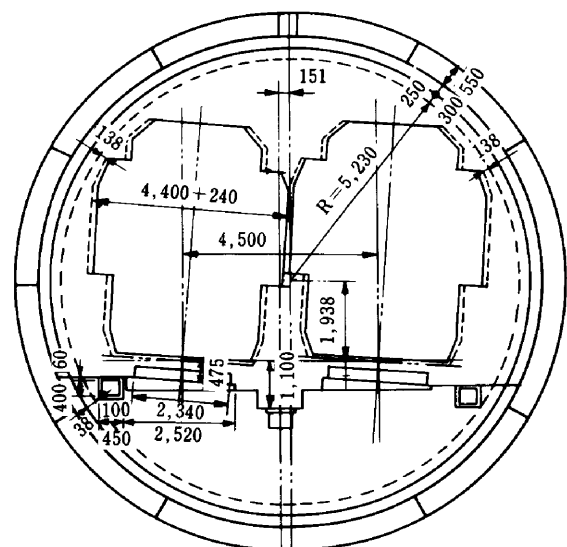


Fig.17 トンネル標準断面図

作業基地周辺は、下町の住宅密集地であり、騒音、振動には特に配慮が必要であった。このため作業基地は周囲を防音壁で完全に囲い、しゃ断することにより約25ホ



Photo7 作業基地の防音壁

ンの騒音レベルの減少効果をあげることができた (Photo 7)。また、最も大きな騒音、振動の発生源となるブロワ (圧気用) と、コンプレッサ (掘削用) は、特に寛永寺橋陸橋下のコンクリート構造の半地下ボックスカルバート内に設置し、入口は二重構造として外界と完全にしゃ断し、約30ホンの騒音レベル減少効果をあげた。

§ 4. あとがき

本工事は、昭和58年7月7日に掘進を完了し、シールド掘進機の解体、到達たて坑仮壁撤去を終えて、現在2次覆工を施工中である。

今回は超大断面シールドの施工全般に亘っての実績を簡単に記述した。本工事で得た貴重な経験と実績を基にして、さらに大きな断面のシールドトンネルの施工を可能ならしめるよう前進させていきたいと思う。

参考文献

- 1) 河田, 池田「φ12.66mの超大型シールドトンネル (1), 東北新幹線第2上野トンネルの設計・施工計画」, トンネルと地下, 1980.10, p 7~p14, 日本トンネル技術協会
- 2) 河田, 池田「φ12.66mの超大型シールドトンネル (2), 東北新幹線上野トンネルの設計・施工計画」, トンネルと地下, 1980.11, p30~p40, 日本トンネル技術協会
- 3) 伊藤「世界最大級のシールド工事, 東北新幹線・第2上野トンネル」, セメントコンクリート No. 431 (1983) p24~p32
- 4) 沢「東北新幹線上野 Tセグメントの設計について」, 東工 Vol.32, No.4(1982), p130~p141, 国鉄東工第1工事局