

河川横断を含む $\phi 7.45$ m 土圧バランス式シールドの 施工について

Shield Tunneling Works through River by Earth Pressure Type Machine

菊田 昌良* Masayoshi Kikuta 熊谷 勝彦 Katsuhiko Kumagai

伊藤 眞*** Makoto Ito

要 約

当工事は、名古屋市交通局発注の、名古屋市地下鉄3号線浄心～伏見間のうち西区六句町～中区丸の内間のシールド工事で、 $\phi 7.45$ mの土圧バランス式シールド工法で施工したものである。本文においては、その工事概要、施工実績を河川下横断の施工を含めて、この報告書をまとめた。

目 次

§ 1. 工事概要

§ 2. 掘 進

§ 3. 覆 工

§ 4. 裏込注入

§ 5. 残土処理

§ 6. 土質と地表面沈下

§ 7. む す び

平均土被り 16m

河川下横断 各1ヶ所

横断河川幅 22m

河底被り 8m

シールド掘削機—土圧バランス式シールド

$\phi 7.45$ m $\ell = 6.65$ m $W = 400$ t

セグメント —RC構造, 外径 7,300mm

幅 900mm

厚 300mm

数量 2,075リング

§ 1. 工事概要

1-1 工事概要

工事件名：高速度鉄道六句町工区新設工事

工 期：自 昭和52年9月6日

至 昭和56年5月31日

工事内容：（開削工法区間）駅部 57.5m

単線ずい道 56m

（シールド区間）

シールド路線 単線並列延長 1,881.23m

1 番線 966.23m

2 番線 915.0 m

最小曲線半径 305m

最大縦断勾配 33‰

掘削土量 81,834 m³

裏込注入 3,270 m³

2次覆工 覆工厚 300mm

コンクリート 13,976 m³

鉄 筋 400 t

防護工 小学校体育館アンダーピニング1ヶ所

地盤注入工（溶液水ガラス）

16,287 m³

1-2 路 線

本工区の路線は、Fig.-1に示すように、両線ともに半径305mと350mの曲線の組合せによるSカーブのルートで六句町方より掘進する。

発進立坑は六句町方の幅員50mの道路内で開削工法で施工した駅部及び単線ずい道の一部を各々利用して設けられている。発進後すぐ民家の下にはいる。途中小学校

*中部支店六句町(出)所長

**中部支店六句町(出)副所長

***中部支店六句町(出)工事係長

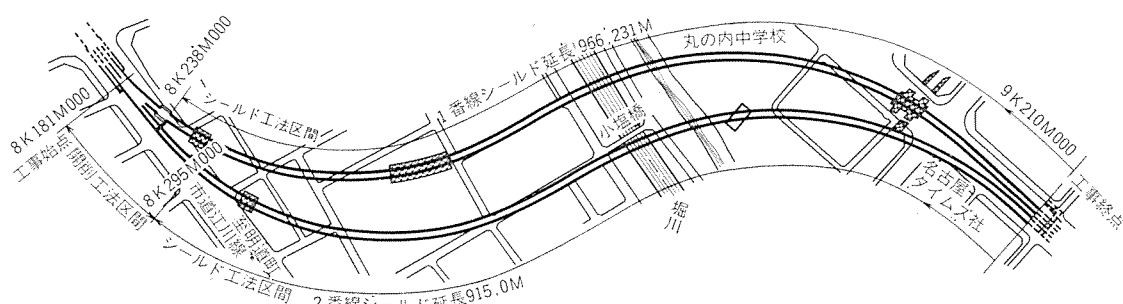


Fig-1 路線平面図
Route map of Rokkucho works

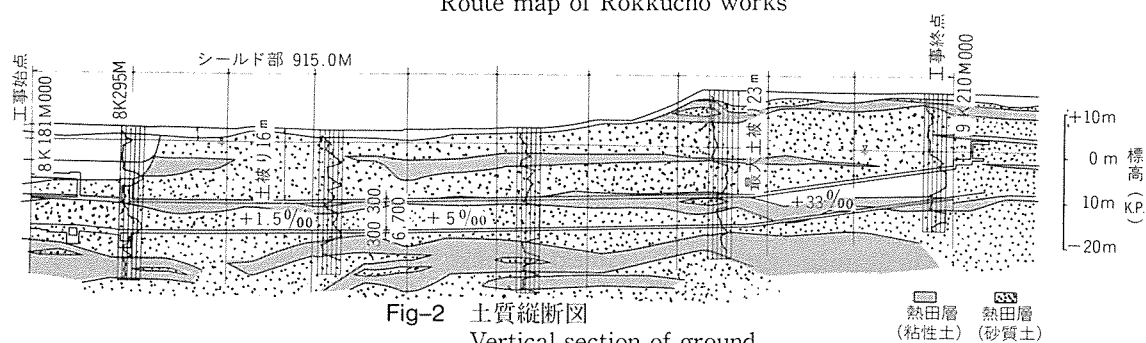


Fig-2 土質縦断面図
Vertical section of ground

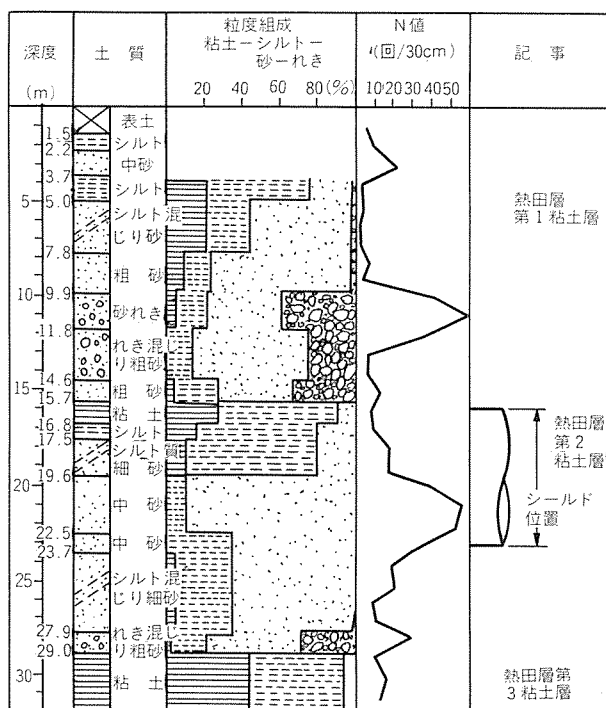


Fig-3 六句町工区No.16地点土質性状図
Soil map at No.16 station

の体育館、プール、校舎の下を通過し、道路下、民家下を通過して、さらに、堀川の下を横断し丸の内方に至る。堀川を過ぎて丸の内側は、いわゆる熱田台地である。堀川以西の発進方は概略16mの土被りで、線路勾配は2～5%である。熱田台地の下は最大土被りが23mとなり、丸の内駅に到達するまで33%の勾配となる。

1-3 地質概要

Fig-2、Fig-3に示すように、第四紀洪積世に形成された熱田層であり、この層は砂質土を主体とところどころに粘性土質が挟在している。シールド断面付近の代表的な土質の性状を示しているのがFig-3である。

砂質土は粒子の均一な細粒砂を主体とし、全体にφ5mm～10mmの細礫が点在している。N値は10～50、平均N値30程度の地盤である。

粘性は含水中位、塑性中位で、やや圧縮されて凝固性を呈した粘土を主体とし少量の細粒砂が混在している。地下水位はシールドのクラウン上、約12mの位置にある。

1-4 シールド掘進機

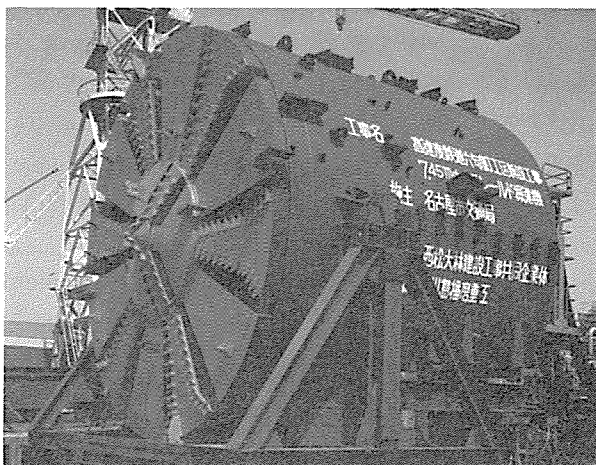
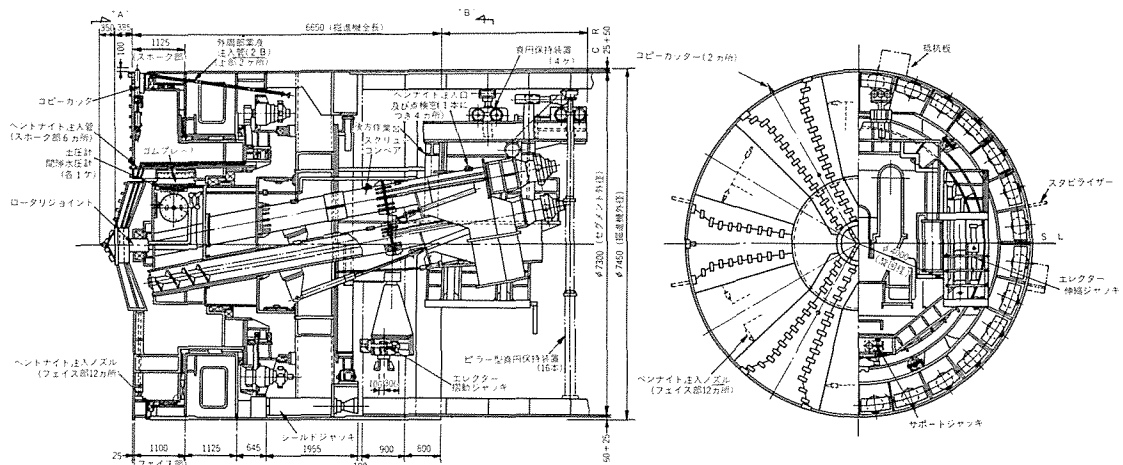


Photo-1 シールド機
Shield machine

Fig-4 シールド機
Shield machine

本機（土圧バランス式シールド機）は、カッタにより切削された土砂をカッタ後室（圧力室）に充満させた状態で推進して、地山の土圧並びに水圧に対抗しながら圧力室内の土を推進に合せてスクリュウコンベアで圧密させながら排出させる機構になっている。すなわち、掘進量と排土量をバランスさせることにより地山を保持しながら掘進していくものである。

本機的设计に当り在来の土圧式シールド機に次の点を改良した。

- (1) 土の流動抵抗を減少させるために、シールドカッタの前面を円錐形に前方に突き出してカッタ後室（圧力室）内の空間を多くするようにした。
- (2) (1)によりスクリュウコンベアの先端を圧力室内のカッタ面の直く近くまで前進させて土砂の取出し易さを増進することにした。
- (3) カッタ後室内へ土砂が取込まれ易くするため、カッタスリットを放射状にし、外周部に向って幅を広くした。ただし、外周部の先端部は、再度スリット幅が狭くなるようにして、切削した土砂が中心部に進み易くすると同時に、シールド上部の土砂の取込みを防ぐよ

うに配慮した。

- (4) カッタトルクの不足、異常時にカッタ前面に注入施工が可能なように、カッタ上部、前面およびカッタ後室内に泥水等が注入できるような装置を装備した。

以上のほかスクリュウコンベア3本の内、1本にはその排土口にロータリフィーダ(φ600mm)を取付けた。

Table-1 シールド仕様表
Shield machine specifications

仕 様	
掘進機本体	外 径 7,450mmφ
機 長	6,650mm
推 進 速 度	35mm/min (設計基準速度)
シールドジャッキ	200t×350kg/cm ² ×1,050mm×28本
伸縮ジャッキ	8.9t×140kg/cm ² ×1,000mm×2本
摺動ジャッキ	6.2t×140kg/cm ² ×400mm×1本
サポートジャッキ	3.5t×70kg/cm ² ×100mm×1本
カッタ	回 転 数 0～1.0r.p.m
	トル ク 548T・m(175kg/cm ²) 657T・m(210kg/cm ²)
	回 転 数・方 向 0.68r.p.m 0.51r.p.m 正逆両方向
スクリュウコンベア	カッタモーター台数 14台
	回 転 数 (上2本) 0～20r.p.m (下1本) 0～8r.p.m
	排 土 量 0～74m ³ /h×2本 0～30.5m ³ /h×1本
コ ー	本 数 3本結合
カッタ	11t×140kg/cm ² ×130mm×1本
スタビライザ	50.1t×350kg/cm ² ×600mm×2本
真円保持	25t×140kg/cm ² ×250×4本

Table-2 シールドパワーユニット表
Shield power units

パ ワ ー ユ ニ ッ ト						
項目	推 進 系	エレクター施回系	カ ャ 系	エレクタージャッキ系	スクリュウコンベア系	
ポンプ型式	プランジャー型	プランジャー型	プランジャー型 (可変)	ギ ャ 型	上2本 プランジャー型	下1本 プランジャー型
最高使用圧力	350kg/cm ²	160kg/cm ²	210kg/cm ²	140kg/cm ²	210kg/cm ²	210kg/cm ²
吐 出 量	64ℓ/min	62ℓ/min	305ℓ/min(at140kg/cm ²)	22ℓ/min	190ℓ/min	77.5ℓ/min
電 動 機	45KW×4P×440V	22KW×4P×440V	90KW×4P×440V	7.5KW×6P×440V	75KW×6P×440V	37KW×6P×440V
台 数	1 台	1 台	6 台	1 台	2 台	1 台

また、圧力室内の土砂の閉塞状態を探る探針棒装置と閉塞状態の時に圧力水で、これをほぐす注水洗浄装置を取付けた。

§ 2. 掘 進

当工事は、2番線が昭和54年10月末に発進し、昭和55年8月6日に到達した。一方、1番線は昭和55年5月初めに発進し、昭和55年12月1日に到達した。

2-1 初期掘進

発進部の施工は、Fig-5のように行った。すなわち、立坑壁から10mの区間は、地下連続壁と泥水硬化壁で囲まれた段掘り区間となっていて、路面覆工下の初期掘進となっている。

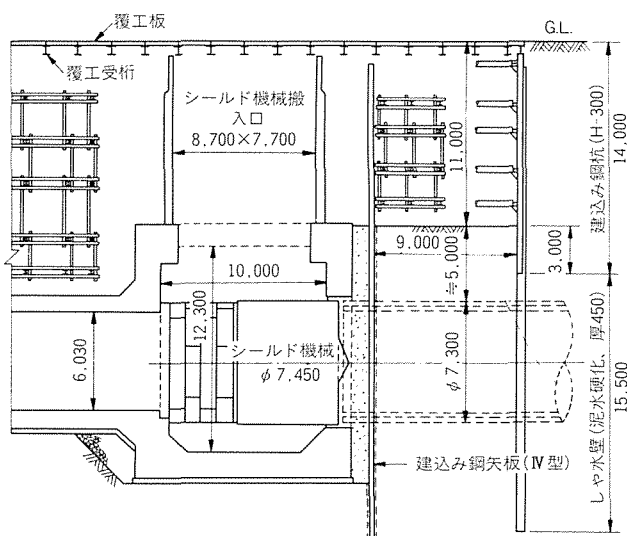


Fig-5 シールド発進部施工図
Execution map at starting point

立坑壁の発進口にはエントランスパッキングを設置した。シールド機を発進させ、エントランスパッキングにシールド機が突込んだ時点でシールド機を停止させて、立坑壁と鋼矢板の間を砂で埋戻しを行い、同時にシールド機の圧力室内にも砂を充填する。こゝで鋼矢板を抜き、シールドを発進させた。

2番線の初期掘進においては、発進後、3リングの掘進を行った時点でカットトルクが上昇し、掘進が不可能になった。

この原因は、地下連続壁と泥水硬化壁に囲まれている範囲は、地下水の供給が断たれているために、土砂がシールド圧力室及びスクリュウコンベア内で脱水状態となって、圧密され、固結付着して、掘削土の流動性を失ったためである。

処置としては、圧力室内に固結付着した土砂を圧力水

で除去し、再掘進に際しては、土砂の流動性を保つために、泥水をシールド機に装備した装置により注入しながら掘進した。

注入した泥水は、ベントナイト、陶土、水、減水剤を混合した比重1.2のものである。

注入量は排土の状況に応じて30ℓ/min～60ℓ/minの変化をさせた。

なお、地下連続壁と泥水硬化壁に囲まれた区間を通過した後も、今後の掘進に備えて注入試験を行いながら初期掘進区間の掘進を終えた。

結果として地下水が供給されているならば粘土、シルト分が全体の土量の15%以上含まれている土砂ならば掘進が可能である自信を得た。

1番線の初期掘進においては、2番線の経験を生かして、次のような対応策をとった。

- (1) 地下連続壁と泥水硬化壁に囲れた区間は発進前に、あらかじめ、地山に削孔した、φ50の孔より注入して地下水を補った。
- (2) 掘進に当っては前述の泥水注入をシールド内に施しながら進めた。

これにより円滑に初期掘進を終えることができた。

2-2 本掘進

2番線については、種々の試行を重ねて52リングの初期掘進の完了した時点で、圧気設備、発進用仮組セグメントの撤去、礪揚げ設備等の段取替を行い、昭和55年2月8日に本掘進を開始した。それ以降、到達までの約6ヶ月の掘削期間中には、種々の問題に遭遇したが、坑内圧気を0.5kgf/cm²～0.8kgf/cm²の状態掘進した。このシールド掘進を大別すると、

- (1) 本掘進開始より450mまでのシルト粘土分含有率が約15%～25%位の区間
- (2) 450mから500mまでの河川下横断部（シルト、粘土分含有率70%）
- (3) 500m～850m間のシルト、粘土分含有率40%～20%の区間
- (4) 850m～950mの到達までのシルト、粘土分含有率約10%の区間に分けられる。

土圧バランス式シールドの場合、シルト、粘土分の含有率がシールドカッタのトルク値、掘進速度に重要な役割を果たす。すなわち、この含有率が15%以下になると、カットトルク値が上昇して、推進を停止して、カッタを空運転しトルク値の下降するのを待って推進することになる。また推進速度を大きくすると、トルク値が上昇する。シルト、粘土分含有率が15%以上の場合、大体、

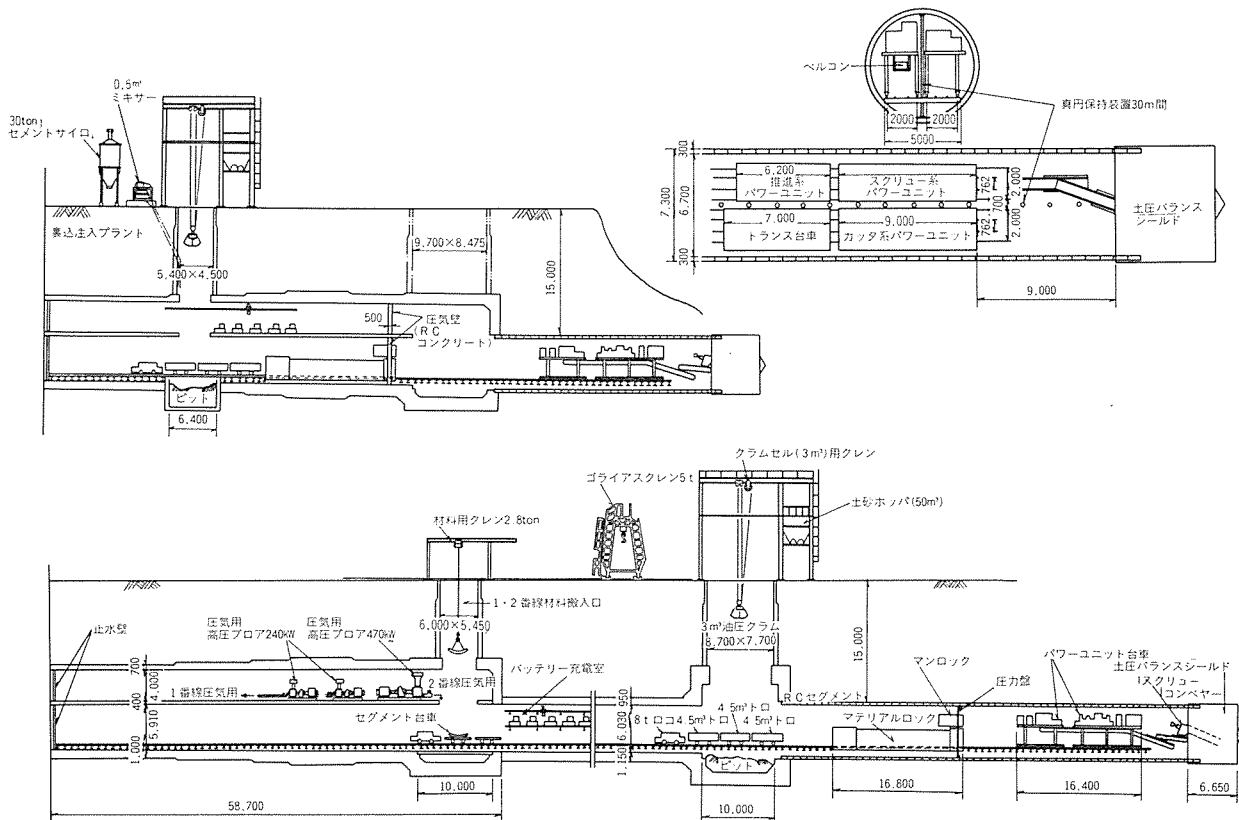


Fig-6 シールド掘進設備概要図
Excavation equipment

推進速度を18mm/min～25mm/minに保って掘進することができた。

(1)及び(3)の区間は比較的順調に掘進することができた。

(2)の河川下横断部分は、シルト、粘土分含有率が70%であったために、シールドのトルク並びに掘進そのものには問題はなかったが、排土がスクリュウコンベアの後端のスライドゲートを通過した後のベルトコンベアに落ちる間のホップの区間で粘着力が大きいために、柱状となって詰まり、したがって排土が連続的にできなくなる現象が出た。これには、ゲートの出口にカッタの役割をする帯鉄を取付け、土柱を縦に二分するような配慮をして対処した。この状態が長く続くなれば機械的に根本的な改良を施す必要があるが、幸い短かかったのでこの程度の改良で切抜けることができた。

(4)のシルト、粘土分含有率が10%からやや下廻る場合は推進速度を10mm/min位にして掘進しなければカットトルク値の上昇を来すことになる。すなわち、掘進速度が落ちる結果となった。

一方、1番線については、2番線の経験により、種々の対応策を施して初期掘進を終え2番線と同様に段取替作業を行った後、昭和55年6月10日から本掘進を開始し

た。以後、到達までの6ヶ月の掘進は大別すると、次のように分けられる。

(1) 本掘進開始から450mまでのシルト，粘土分含有率
20%～30%の区間

(2) 450m地点、すなわち、河川下横断部の手前でシルト、粘土分が急に10%位になって、掘削、排土のバランスがとれなくなり地上の陥没事故が発生した。これの対処については後述するが、これを含めての河川横断区間。

(3) 河川下横断後、880mまでのシルト、粘土分含有率が20%~40%の区間。

(4) 880mから到達までのシルト，粘土分含有率10%～8%の区間。
に分けられる。

2番線の掘進のところで述べたように、(1)及び(3)の区間は、掘進と排土のバランスが良くとれて比較的良好な状態で掘進することができた。

(4)の区間については2番線の掘進時と同様に掘進速度は遅くなるが、2番線の経験を生かして、泥水注入を施したり、坑内圧気圧を減じたりして乗切ることができた。

(2)の河川下横断部手前の陥没事故と河川下横断の掘進

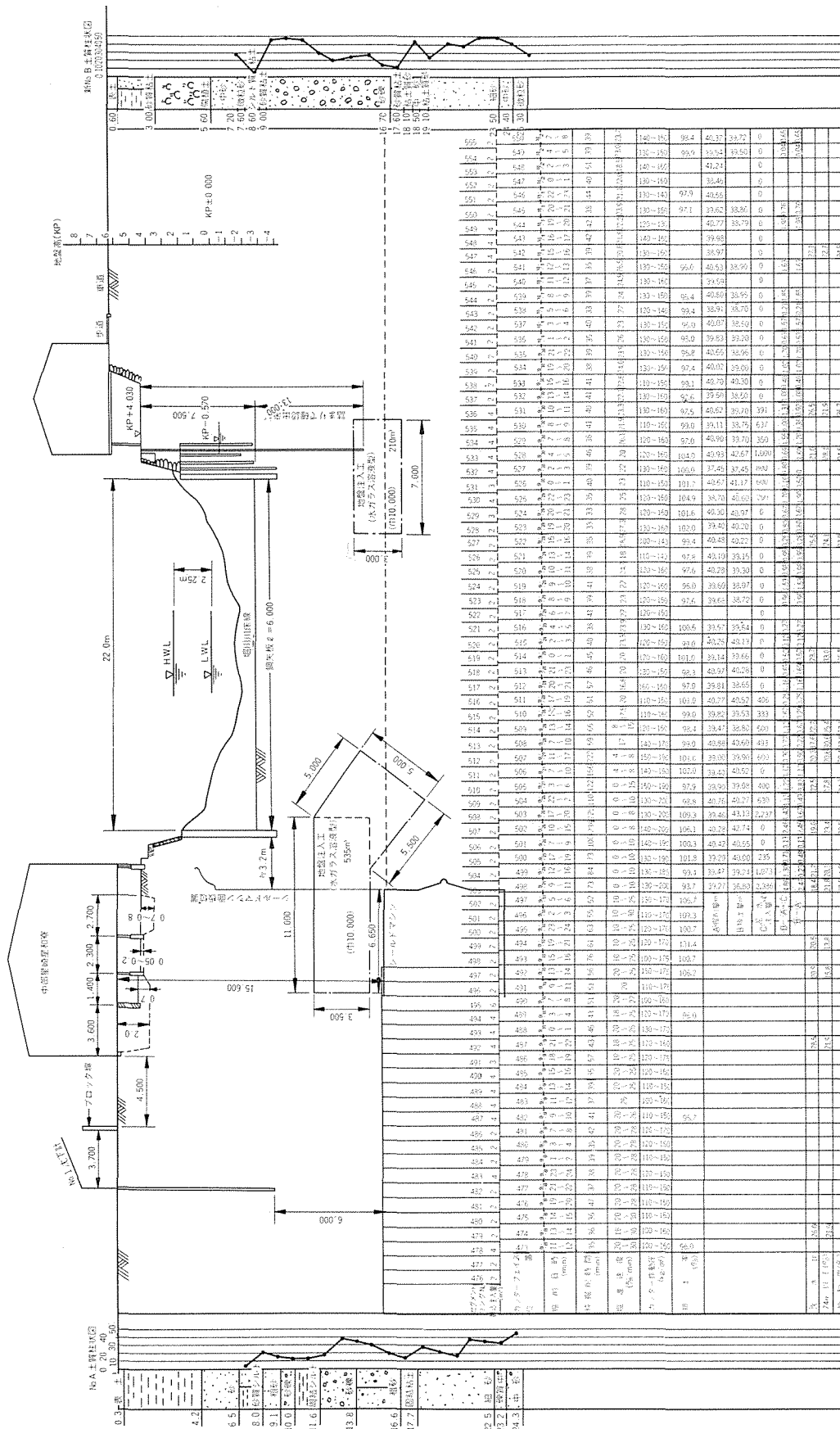


Fig-7 1番線シールド埠頭川附近縦断面図
Section at about Horikawa river of No.1 line

について記述する (Fig.-7 参照)。

昭和55年9月10日の掘進から排土に水分が多くなり、No.497Rの掘削ではシルト、粘土分含有率が15%位となった。排土率を絞って掘進するとトルク値が上昇すると云う、いわゆる、掘削と排土のバランスが悪化してNo.499Rの掘進においては、掘削量と排土量の比が131%となりφ50mmの円礫及び固結粘土塊が排出され掘進が難しくなった。そこでシールドカッタートルクを上げて (油圧を上限210kgf/cm²にセット)、排土率を絞り、掘削量と排土量の比を100%位にして掘進したところ、9月11日No.502Rの掘進中に地上の家屋の床下が40m³位陥没した。直ちに、掘進を中止し陥没箇所の埋戻しを行い、その床下の空洞部にLW注入を施工して陥没の進行を止めると同時に善後策の検討を行った。

まず、河川横断の手前と対岸に土質調査のボーリングを行った。その結果はFig.-7のNo.A, No.Bの土質柱状図に示すように、シールド断面の上部のシルト粘土層が少なくなっていた。すなわち、2番線の河川下横断部とは全く異った土質状況であることが判る。

なお、排土率は排土された土量を礫トロの積込状態を1函毎に測定し、1リングの掘進の左、右、上の3本のシールドジャッキのストロークゲージの進行量の平均値から求めた掘削量との比較から割出したものである。礫トロの積込状態の測定誤差が3%位はあると思われる。

シルト、粘土分含有率の測定は排土の平均的な部分を採取し、乾燥フルイ分けを行って74μm以下の含有率を出したものである。

土質調査の結果、陥没前後の掘進中の資料を準備した時点で検討会を開催し、次の結論が出された (Fig.-7 参照)。

- (1) 陥没部分から護岸の下にかけて、シールド断面上部に厚み3.5m、幅10mの部分に溶液型水ガラス注入を施す。
- (2) 対岸の護岸下にも厚3m、幅10mの注入を行う。
- (3) 掘進には圧力室内への泥水注入 (比重1.23) を補助工法として施す。
- (4) No.1のスクリュコンベアにロータリフィーダを使用して掘進する。
- (5) 坑内圧気圧を0.8kgf/cm²に上げて掘進する。

なお、河川中央部は、通運、両岸部の貯木場の関係から、栈橋を組んでの薬注施工が河川管理者の許可を得るのに日時を多く要する等、実際の対応上難点が多いことから上記の両岸部の注入施工のみで河川下横断をせざるを得なかった。

上記の(1)から(5)の施工と準備をして、9月25日から掘

進を再開した。Fig.-7中の表に示すように、薬注の効果と、河川中央に向うに従い、土質が74μm以下の含有率が15%を上まわってきて、掘進制御に良い方向になってきたこともあり9月30日中に無事河川を横断を終えることができた。

この間の泥水注入量、カッタートルク値、掘進速度、排土率、排土含水比、シルト、粘土分含有率等はFig.-7中の表に示すとおりである。また、兩岸の護岸の沈下量も10mm～13mm位で収まった。

2-3 掘進管理及び制御

掘削量と排土量の管理が余掘、地表の沈下を防ぐ基であるが、その管理は礫トロ (4.5m³) の積込状態を1函毎に測定して行った。しかし前述のように、その測定誤差が3%位はあり、しかも掘進の後にしかその排土率は判明しない。このために掘進中の排土の状況を目視しながらの制御、管理を運転経験と合せて行っているのが実状である。

掘進制御のフローシートは次のFig.-8のとおりである。掘進の制御用にシールド機の圧力室内に土圧計及び間隙

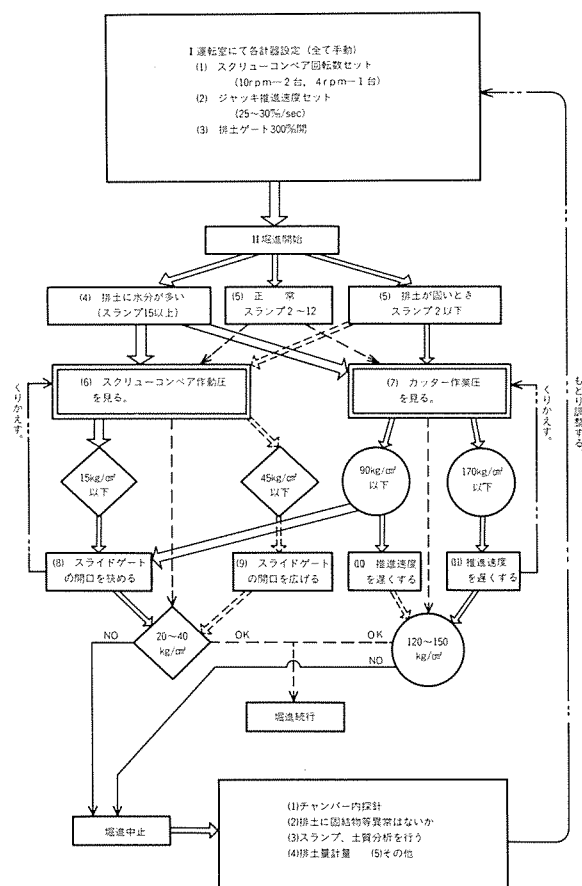


Fig-8 掘進制御フローシート
Flow sheet of excavation control

水圧計を装備しているが、粘性分の多い土砂の場合は、土圧計は作動して $0.5\text{kgf/cm}^2 \sim 1.0\text{kgf/cm}^2$ の値を示す。しかし砂分が多くなると作動しなくなったりして制御の指針とすることができなくなる。

一方、間隙水圧計は圧力室内の土砂が静止している時、すなわち掘進停止中は作動するが、掘進中の圧力室内の土が動き出すと、その値は、ばらばらで何を示しているのか判らなくなり制御に効果はないようであった。これは計器の取付の位置によ問題があると思われ、今後の検討課題であろう。

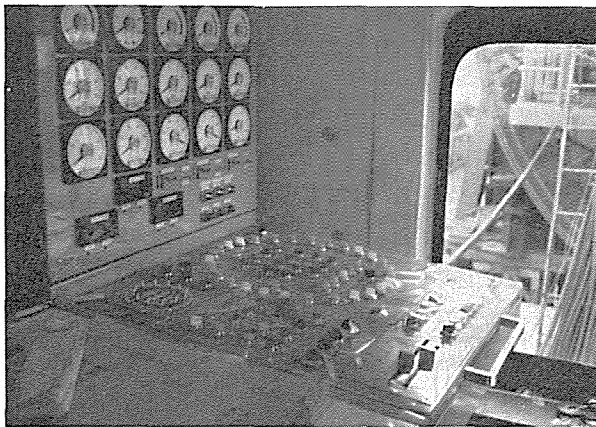


Photo-2 運転計器制御室
Excavation control unit

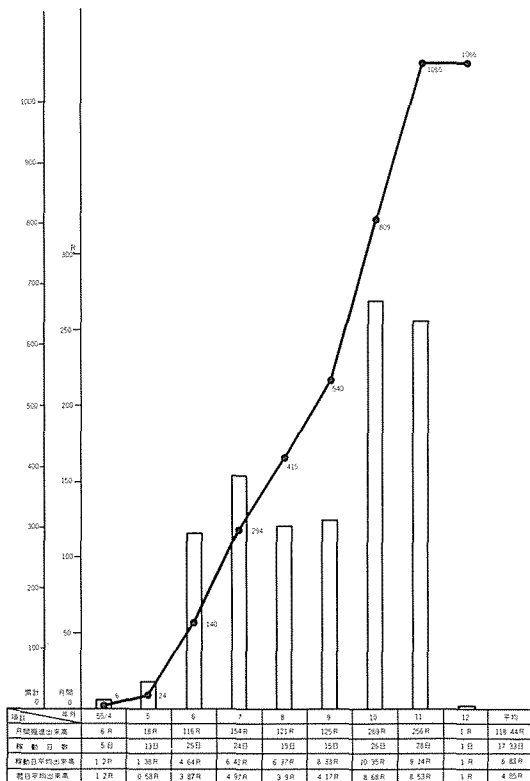


Fig-9 1番線シールド掘進実績
Achievements of No.1 shield machine

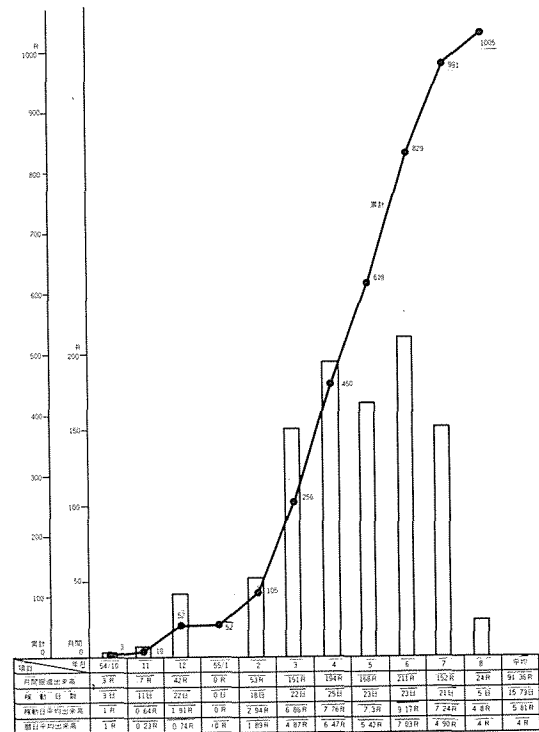


Fig-10 2番線シールド掘進実績
Achievements of No.2 shield machine

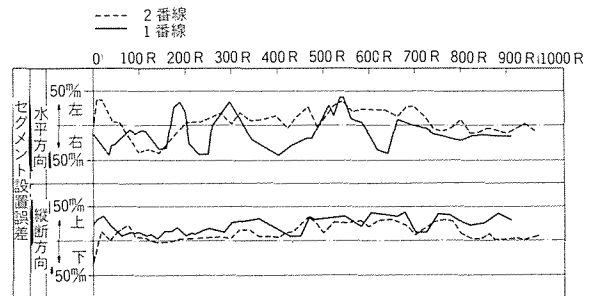


Fig-11 蛇行実測図
Survey map of tunnel winds

§ 3. 覆 工

一次覆工用セグメントは、R C構造で幅900mm×外径7,300mm×厚さ300mmである。仕様は、Fig.-12のとおりである。

セグメントは、各々ピース間、リング間ともに、Fig.-13に示すようにシールド材を張り付けて組立て、組立後、シールド推進圧の影響のなくなった所からコーキング工を施工した。

Table-3 裏込注入配合表 (1 m³ 当り)
Back filling proportion (per 1 m³)

セメント	ベントナイト	砂	水	減水剤
200kg	50kg	1,300kg	420ℓ	0.5~0.2kg

Table-4 裏込注入機械
Back filling machine

名 称	型 式	仕 様
コンクリートミキサー	山中式強制練 YG-500	混練容量: 0.5 m ³ 、20 m ³ /h ドラム寸法: 内径1,700×深650 モーター: 22K
コンクリートポンプ	大和 LCS-45×2"	打設能力: 6.5 m ³ /h ホッパー容量: 1.0 m ³ 回転数: 0~10.5rpm 出力: 11KW

§ 5. 残土処理

土圧バランス式シールド機による掘削の場合、掘進が良好な状況で行われれば地山の含水率とほぼ同様の含水率の排土が出て来る(当トンネルでは22%~25%位)。スクリュウコンベアで混練状態になって排土されるために、土中の砂分とシルト分が混合され、残土のいわゆる鋭敏比が上昇し、水分が運搬中に分離されることなく、土が流動性を持続する性状のものであった。

坑内排土は、サイドダンプ式礮トロ(4.5 m³)を使用してバッテリーコで立坑下まで牽引し、ピットにダンプし、油圧クラムシエル(3 m³)で立坑上のホッパ(50 m³容量)に移し、コンテナダンプで残土捨場に搬出した。

残土処理での問題点として次のことがある。

- (1) サイドダンプ式礮トロの扉の隙間から流動性の土が坑内運搬中にこぼれる量が多く、二次覆工のインバート清掃の工程上、障害となる。礮トロの扉には、ゴムパッキンを貼付け改良したものを使用したが、パッキンに土砂が付着して効果が少なかった。
- (2) 土捨て場において先述のとおり砂分とシルト分が混練された残土は、いわゆる水切れが悪く、含水率は問題のない数値のものでも均し作業に難点がある。すなわち何時までも乾かないので上の上積み、均した所へ次にトラックが入れない状況となって埋立地でも埋立て深さの大きい所でないと継続して捨て土ができないために、捨て場の確保を十二分しておく必要がある。

§ 6. 土質と地表面沈下

大断面トンネルの土圧バランス式シールド機の掘削を1,881m施工して、当然のことであるが、土質の状況により、掘進状態が変化するが、ここに1番線、2番線ともに、礫分、砂分、シルト粘土分の構成分布と地表面沈下量を、Fig.-14、Fig.-15、に表してみた。

-----は施工前のボーリングによる土質縦断面図による値であり、——は実際の排土におけるシルト・粘土分の分析値を示している。

シルト・粘土分含有率が10%前後になると沈下量が多

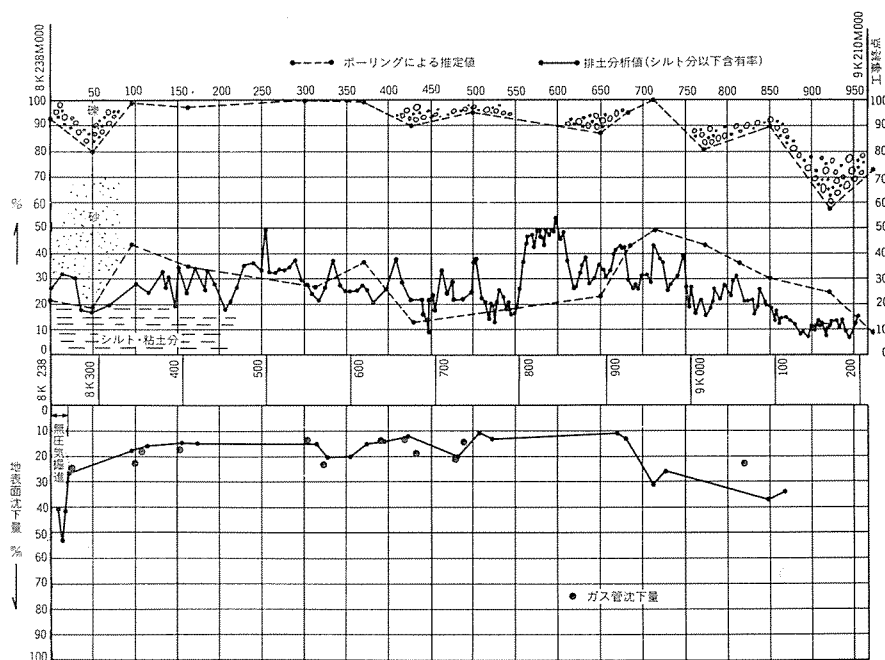


Fig-14 1番線礫分・砂分・シルト粘土分構成率分布図、地表面沈下量
Distributinal map of gravel, sand and silty clay
and surface displacement at No.1 line

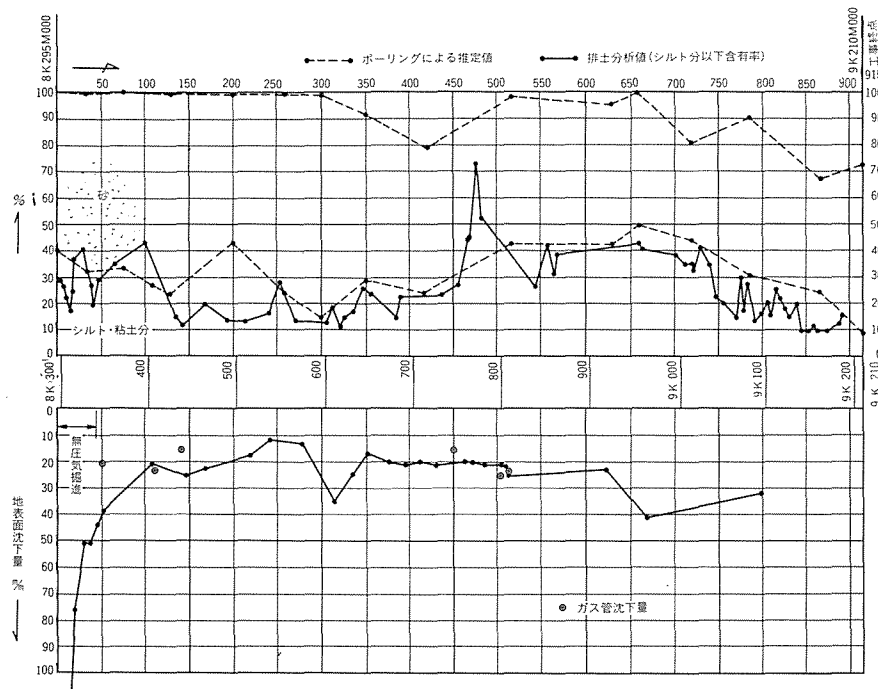


Fig-15 2番線礫分・砂分・シルト粘土分構成率分布図, 地表面沈下量
Distributional map of gravel, sand and silty clay
and surface displacement at No.2 line

くなることが判る。これはシルト粘土分が減ると、シールドの圧力室内の土砂の流動性が悪くなり、トルク値も上昇し、バランスをとる為に排土を絞るとトルクが上昇し、排土を緩めると、圧力室内に空洞（水洞）が発生し切羽で土砂の呼込現象が生じて沈下量が大きくなるものと思われる。

一応、分類的に $74\mu\text{m}$ 以下をシルト粘土分としているが、土圧バランス式シールドの掘進においては、分類的には砂の領域に入るが、 $74\mu\text{m}$ 以上で $74\mu\text{m}$ に近い砂分の含有量も問題になると思う。今回はそこまでは分析することができなかったが今後はこの点まで、突込んで解明する必要がある。

当トンネルの砂層は一部を除いて、大略細いこの $74\mu\text{m}$ に近い砂分が多くあったように思われるし、またトンネル上部を2m～3mの厚さのシルト質粘土層が覆っている区間が比較的多くあったことで、何とか平均して地表面沈下を20～30mm上限に抑えて掘進できたと思っている。

§ 7. むすび

当工事も、1番線、2番線、併せて1,881mの掘進を終えて、現在、二次覆工を施工中で竣工を目指して鋭意努力をしているが、今回得た経験を基にし、今後の改良点を見出すべく研鑽していきたいと考えている。シールド工法には新しい種々の試みが生み出されている中で、土圧バランス式工法はその適用対象土質の幅が狭いよう

にも思われる。各種シールド工法と同じくその適用対象土質を見極める努力をして、今後のシールド工事の機種、工法の選定に誤りのないようにするため、諸兄の御賢察を迎ぎ、これからの我社の技術向上の一助になれば幸いである。

最後に本工事の施工に当り、ご指導、ご協力をいただいた関係各位に心より感謝申し上げます。

[昭和56年1月原稿受領]