

軟弱地盤における大断面泥水式・泥土圧シールド トンネルの施工実績

THE CONSTRUCTION ACTUAL OF LARGE-SECTION SLURRY SHIELD AND SLURRY-EARTH-PRESSURE SHIELD IN SOFT GROUND

藤木育雄¹⁾・末富裕二²⁾・荻野竹敏³⁾・大塚 努⁴⁾

Ikuo FUJIKI, Yuji SUETOMI, Taketoshi OGINO, Tsutomu OTSUKA

The four shield tunnel between stations and one station part shield tunnel(triple multiface shield) were constructed between Suitengumae and Oshiage stations of the Teito Rapid Transit Authority No.11 Line(Hanzomon line).

In consideration of the equipment installation space of character of soil for excavated, and start base, slurry and slurry-earth-pressure shield driving method were adopted.

Since it became excavation of adoption of the first slurry-earth-pressure shield in a corporation, construction of the single track parallel shield by slurry and slurry-earth-pressure, and a soft ground, while performing measurement of ground deformation in the initial drivesection of each shield and determining the suitable control values, the construction actual result of a large-section shields were accumulated.

Key Words: slurry shield method, slurry and earth-pressure shield method, neighboring construction, soft ground,

1. はじめに

営団半蔵門線延伸区間(図-1)では、4本の駅間シールドトンネル(単線 $\phi 6,900$:2区間、複線 $\phi 9900$ 、 $\phi 9600$ 各1区間)と清澄白河駅部シールドトンネル(三連型 $\phi 7,440 \times$ 幅16,440)を施工した。掘進対象地盤の土質、発進基地の諸設備設置スペース等を考慮して泥水式及び泥土圧シールド工法を採用した。

営団初の偏心多軸式泥土圧シールド工法の採用、泥水式と泥土圧による単線並列シールドトンネルの同時期施工、N値0~4で液性指数1.0以上と軟弱な粘性土地盤の掘進となることから、各シールドの初期掘進区間で地盤変状計測を行い、掘進における適切な掘進管理値を定めた。

本報告は、これらの施工実績を基に、同一地盤における掘進において、トンネル径や工法による相違の有無について検証する。

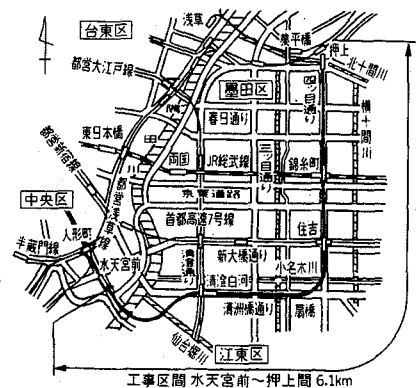


図-1 半蔵門線延伸区間平面図

- 1) フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部
- 2) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 積算課
- 3) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 計画課
- 4) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 技術開発担当

2. 工事概要

シールド工事は、営団半蔵門線の水天宮前駅～押上駅間のすべての駅間と清澄白河駅部で施工した。特に清澄白河駅と留置線を築造する清澄工区は、開削工法によって築造した清澄白河停車場始端部を発進立坑とし、三連シールドにより停車場部を掘進した後、同終端方立坑（延長75.4m）においてシールドを移動させ、再度留置線部の掘進を行った。また、扇橋A線・B線工区は、単線シールドをほぼ同時期に掘進した。

各シールドが掘進する地質状況は、GL-30m程度までが沖積層（有楽町粘性土）で構成されており、その下に洪積層（粘性土及び砂礫）が存在する（図-2）。

有楽町粘性土層は、N値が0～4程度の軟弱粘性土で、その粒土構成は粘性土80%、砂質土20%となっている。自然含水比は、ほとんどの箇所では液性限界を超えており、乱した後の試料の形成が不可能で鋭敏比を得ることができず、乱された場合に極めて強度劣化が大きいことが判明している。

シールドの掘進対象地盤、発進立坑部の諸設備スペース等を考慮し、表-1に示す工法を採用した。

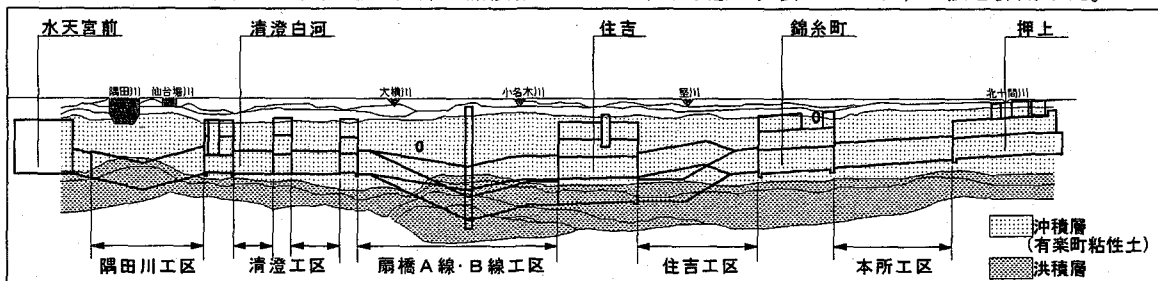


図-2 各シールド掘進区間と地質縦断面図

表-1 各シールド掘進区間の諸元

	隅田川工区	清澄工区	扇橋A線工区	扇橋B線工区	住吉工区	本所工区
マシシ径	複線 φ 9900	複線 W16440×H7440	単線 φ 6900	単線 φ 6900	単線 φ 6900	複線 φ 9600
シールド形式	泥水式	泥水式	泥水式	泥土圧	泥土圧	泥土圧
掘削対象地盤	沖積粘性土 洪積砂礫	沖積粘性土	沖積粘性土 洪積砂礫	沖積粘性土	沖積粘性土 洪積砂礫	沖積粘性土
掘進時期	H12.10～H13.8	H12.12～H13.8	H12.11～H13.7	H12.12～H13.8	H13.1～H13.11	H12.6～H13.2
備考	ビット交換対応	三連型側部先行	併設施工		Uターン施工	偏心多軸式

3. シールド掘進管理実績

(1) 初期掘進区間地盤変状計測

軟弱粘性土地盤の掘進においては、掘進に伴う地盤の乱れに起因する後続変位が大きくなる場合があり、極力地盤を乱さない掘進管理値を決定する必要がある。工事区間内最初の掘進であるとともに営団初となる偏心多軸式泥土圧シールド（本所工区）では6断面、大断面掘削となる三連型泥水式シールド（清澄工区）では3断面の計測断面を設置してトライアル施工を実施した（図-3）。その他の工区でも簡易的に地表面変位計測を実施し、切羽圧力管理値等の検証を行った。

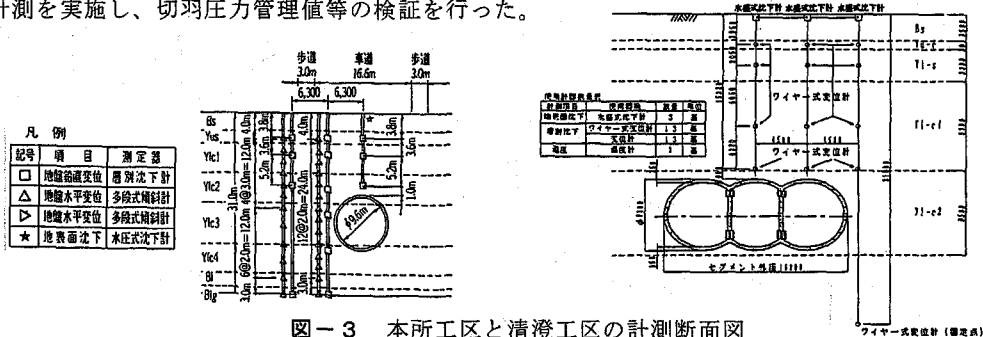


図-3 本所工区と清澄工区の計測断面図

(2) 切羽圧力管理

掘進する沖積粘性土の性状を確認する本所工区では、トライアルとして主働および受働土圧相当（主働相当：235kN/m²、受働相当：258kN/m²）を設定した。図-4 上段は主働土圧相当で計測断面を通過したグラフであるが、切羽手前 15 m 程度から 5mm 程度の先行沈下を生じていることがわかる。受働土圧相当では先行隆起を確認した。この結果から、沖積粘性土に対する静止土圧相当の係数として 0.8 で評価できることを確認し、後発の各シールドも本係数値を基本とすることにした。本掘進中、0.8 で設定した切羽管理圧で先行隆起の傾向が現れたため、段階的に係数を見直し、全体としては、0.7 程度の実績となった。

また、三連型シールドによる沖積粘性土地盤の大断面掘削となる清澄工区は、静止土圧相当係数 0.8 で設定した切羽管理圧 250kN/m² で計測断面を通過し、最初の断面で最大 3.1mm の先行隆起を確認したが、その他断面では安定した状態であり、妥当性を確認した（図-4 下段）。

ほぼ同時期に単線並列トンネルを施工した扇橋 A・B 線工区では、2 機のシールドが 1 つの発進基地を使用することによる諸設備スペースの制限から、泥水式（扇橋 A 線）と泥土圧（扇橋 B 線）のシールドを選択した。

静止土圧相当係数 0.8 で計画し初期掘進を開始したが、簡易的な地表面変状測定で先行隆起の傾向を示したため、段階的に管理圧を下げ、泥水式で 0.65、泥土圧で 0.75 で管理することに決定した。図-5 に初期掘進区間の切羽圧力管理値実績値を示す。

沖積粘性土地盤における切羽管理圧は、静止土圧相当係数として、泥水式 0.65 ～ 0.7（三連型は 0.8）、泥土圧 0.7 ～ 0.75 で評価でき、単線・複線による相違はみられなかった。

(3) 裏込め注入

裏込め注入管理については、これまでの施工実績を勘案し、各工区とも、計画裏込め注入率：130 %、計画裏込め注入圧（上限値）：切羽圧力 + 100kN/m² とした。軟弱粘性土地盤では、注入率をあげても注入圧はそれほど上昇せず、過大な注入により、かえって周辺地盤を乱すことが懸念される。本工事でも、初期強度が早期に得られる可塑状固結型の材料を使用するとともに、適切な管理値を設定することが要求された。

地盤変状計測では、テール通過直後以降の変位量に着目しながら、適切な管理値を検証し、先発の本所工区では、

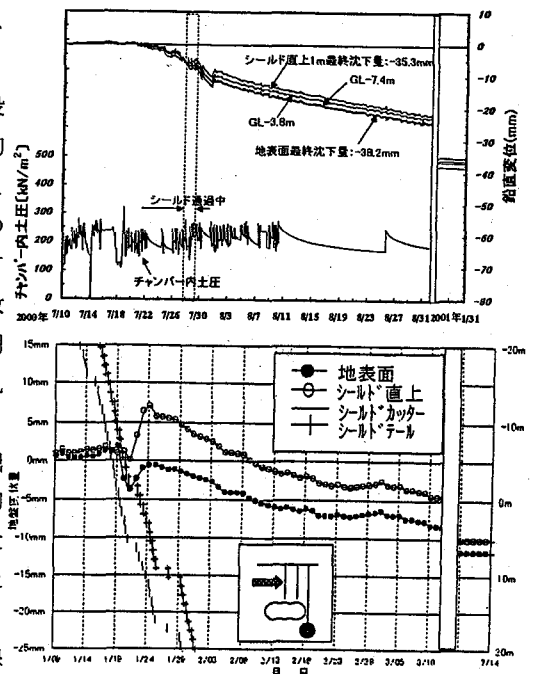


図-4 地盤変状計測結果

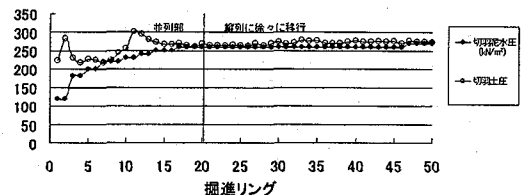


図-5 切羽管理圧実績（扇橋）

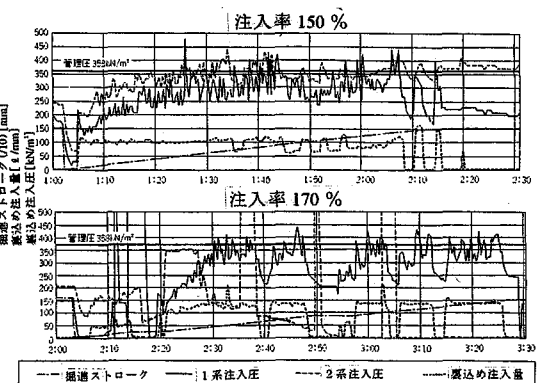


図-6 裏込め注入経時変化図（本所）

初期掘進で 130 %、150 %、170 % の注入率をトライアル施工した。図-6 は、注入率 150 % と 170 % の注入圧の経時変化を示しているが、170 % では圧高による裏込め注入の停止が数回発生し、安定した連続的な注入が施工できなかった。これらの結果を考慮し、本所工区は 150 % の注入率を主管理とし、注入圧を従管理することとした。後発の泥土圧も本所工区と同様、注入率 130 % では注入圧が上がらない傾向となり、段階的に注入率を上げ、140 ~ 160 % の実績となった。

扇橋 A・B 線工区初期掘進の裏込め注入実績を図-7 に示す。扇橋 A 線工区（泥水式）は、130 ~ 140 % 程度の注入率で安定した注入圧を示している。これは、複線泥水式の隅田川工区も同様の実績が得られた。一方、扇橋 B 線工区（泥土圧）では、扇橋 A 線工区と同程度の注入率でも注入圧が上がっていないことがわかる。

扇橋 B 線工区では、A 線工区が掘進した後に掘進するため、先行する扇橋 A 線工区の影響を受けた地盤を掘進するという事も考慮し、注入圧が上がるよう初期掘進で 170 % 程度の注入を実施したが、後続変位が通過後間もなく 10mm 程度と大きく発生したため、本掘進では注入率 160 % とした。泥土圧における適切な裏込め注入率に対する裏込め注入圧を検証した結果、概ねシールド天端部の土圧に等しいことがわかり、管理注入圧も天端土圧相当とした。他の泥土圧の施工実績でも同様の傾向を示していることがわかった。

清澄工区では三連型の掘削となるため、計画裏込め注入率を 140 % として初期掘進を開始した。図-8 に示すとおり、安定した注入圧を確認することができた。当初懸念されたリング全周への裏込め注入充填も、セグメントに設置した土圧計によって確認し、計画どおり注入率 140 % を本掘進に採用した。

土圧計測結果を図-9 に示す。

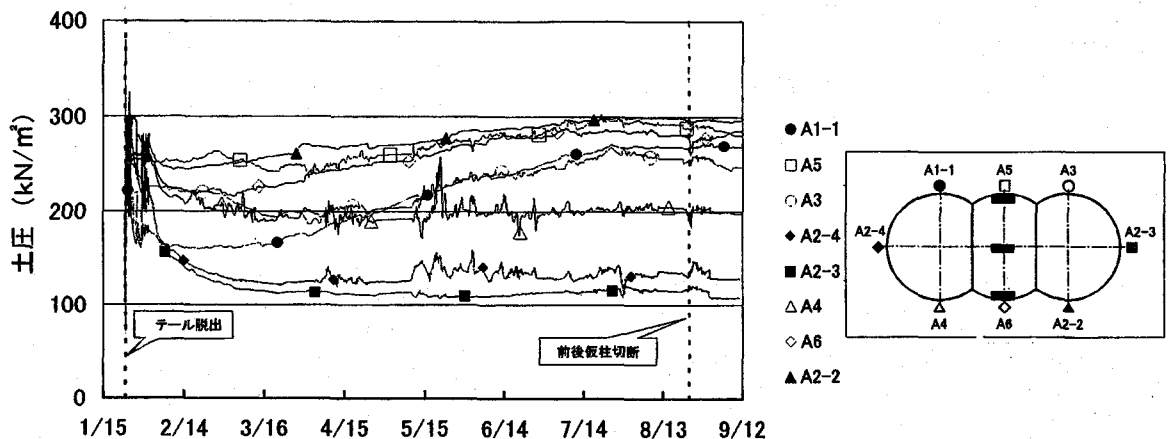


図-9 テール脱出時からの土圧計測結果（清澄）

(4) カッタトルク

装備カッタトルクの決定については、起動時に必要な最大カッタトルクに対し 20 % 程度の安全率を確保

することで計画している。各工区の装備トルクについて、表－2にまとめた。これらの装備トルクは、沖積粘性土地盤の掘進に必要な掘進時計画カットトルクの約2倍となっている。

表－2 各シールド工区の装備トルク

	隅田川工区	清澄工区	扇橋A線工区	扇橋B線工区	住吉工区	本所工区
種別	複線	三連型	単線	単線	単線	複線
マシン外径	φ9900	W16440×H7440	φ6900	φ6900	φ6900	φ9600
シールド形式	泥水式	泥水式	泥水式	泥土圧	泥土圧	泥土圧
装備トルク(kNm)	9512	3172/1438	4047	4509	4810	3283
トルク係数 α	9.8		12.3	13.7	14.6	3.7
カット回転数(rpm)	0.52	0.72	0.65	0.70	0.89	1.00
外周ピッチ速度(m/min)	16.1	16.8	14.0	15.1	19.3	3.1

沖積粘性土地盤における平均カットトルクの実績は、単線泥水式で 400kNm、単線泥土圧で 900kNm、複線泥水式で 2,000kNm、複線泥土圧（偏心多軸式）で 900kNm、三連型側部で 500kNm となり、沖積粘性土地盤に必要な計画カットトルクの半分程度で掘進した。

これらの平均カットトルクは、無負荷状態カットトルク（工場組立検査時）の 10 %増程度の大きさであり、地盤の掘削抵抗が非常に小さい値であったことがわかる。これは、沖積粘性土が非常に軟弱なため、カッタの慣性力で十分な切削が行われたものと考えられる。

(5) 総推力

装備推力の決定については、必要な装備推力に対し 50 %以上の安全率を確保することで計画している。各工区の装備推力について表－3にまとめた。

表－3 各シールド工区の装備推力

	隅田川工区	清澄工区	扇橋A線工区	扇橋B線工区	住吉工区	本所工区
種別	複線	三連型	単線	単線	単線	複線
マシン外径	φ9900	W16440×H7440	φ6900	φ6900	φ6900	φ9600
シールド形式	泥水式	泥水式	泥水式	泥土圧	泥土圧	泥土圧
装備推力(kN)	84,000	107,800	48,000	44,000	44,000	70,000
使用ジャッキ	3,000kN×28本	3,000kN×28本 3,000kN×28本	2,000kN×24本	2,000kN×22本	2,000kN×22本	2,000kN×14本 3,000kN×14本
切羽面積あたり推力(kN/m)	1092	1007	1284	1177	1177	968

本所工区では、偏心多軸式を採用し機長を 8,160mm とコンパクトにしたことから、軟弱粘性土地盤の掘進での姿勢制御を考慮し、表－3に示したとおり、上半に 2,000kN、下半に 3,000kN のジャッキを配置して姿勢制御性能の向上を図り、実施工に寄与した。

沖積粘性土地盤における平均総推力の実績は、複線級で 25,000 ～ 30,000kN、単線級で 10,000 ～ 15,000kN、三連型で 30,000 ～ 35,000kN となり、いずれの場合も装備推力の 30 %程度となった。沖積粘性土に対して計画を実施した工区の必要総推力に対しては、50 ～ 60 %程度となった。これは、必要推力を算定する上で考えるシールド外周と地山との摩擦抵抗が、実施工においてかなり小さいことが原因と考えられる。

切羽単位面積あたりに換算したの推力は、複線級で 360kN/m²、単線級で 300 ～ 350kN/m²、三連型で 300kN/m² となり、シールド外周と地山との摩擦抵抗がかなり小さく、沖積粘性土地盤における実績値は概ね切羽前面抵抗が主要因であると考えられる。

6. まとめ

本報告では、同一の沖積粘性土地盤における大断面シールド掘進を泥水式と泥土圧により施工した実績について述べるとともに、沖積粘性土地盤の特質や工法の違いによる相違等について検討した。

以下に検討結果をまとめる。

表-4 各シールド工区の施工実績

	隅田川工区	清澄工区	扇橋A線工区	扇橋B線工区	住吉工区	本所工区
種別	複線	三連型	単線	単線	単線	複線
マシン外径	φ9900	W16440×H7440	φ6900	φ6900	φ6900	φ9600
シールド形式	泥水式	泥水式	泥水式	泥土圧	泥土圧	泥土圧
切羽圧力管理係数	0.7	0.8	0.65	0.75	0.7	0.7
裏込め注入率	130	140	130	160	140	150
平均カットトルク	2,000	500(側部)	400	900	900	900
平均総推力	28,000	32,000	13,000	12,000	11,000	26,000
切羽面積あたり推力	360	300	350	320	300	360

- ①切羽圧力管理については、泥水式・泥土圧とも静止土圧相当で管理することが適切であることを確認した。計画時は、静止土圧相当の側圧係数として 0.8 としていたが、地盤変状計測等の結果を基に修正し、泥水式で 0.65～0.7、泥土圧で 0.7～0.75、三連型で 0.8 程度の実績となった。切羽安定に対し、泥水式では面版と泥水圧で、泥土圧では掘削地山で保持するという機構の相違が、同一地盤における相違の一要因であると推測される。
- ②裏込め注入管理については、泥水式で注入率：130～140%、注入圧：切羽圧力+100kN/m²、泥土圧で注入率：140～160%、注入圧：シールド天端土圧相当の実績となった。泥水式では注入圧が上がるのに対し、泥土圧では、注入率を上げてほとんど注入圧は上昇しなかった。泥水式では、切羽泥水のテールへの回り込んでいることの影響もあると推測される。
- ③カットトルクについては、各シールドとも、無負荷状態におけるカットトルクの 10%増程度の実績となり、地山切削抵抗や摩擦抵抗がほとんど生じていない状況と考えられる結果となった。複線で用いた偏心多軸式は、単線とほぼ同程度のトルクでの切削という実績であった。
- ④総推力については、各シールドとも、装備推力の 30%程度となった。沖積粘性土に対して計画を実施した工区の必要総推力に対しては、50～60%程度であり、シールド外周と地山との摩擦抵抗がかなり小さいことが考えられる。他工事での沖積粘性土地盤における掘進時総推力を調査したところ今回の実績もこれらに準ずる結果となった。
- ⑥今回、工法の異なるシールドをほぼ同時期に施工したが、泥水式と泥土圧の掘進管理において難易の差はなく、掘進管理を適切に行えば、どちらの工法でも十分適用可能であると判断できる。

今後、軟弱粘性土地盤の大断面シールド工事において、本報告が参考になれば幸いである。営団においても、これから進める洪積地盤を対象とした 13 号線シールド工事において、経済的な工事計画を進めていきたい。

参考文献

- 1) 大門信之・藤木育雄・大塚努：軟弱地盤における偏心多軸式大断面泥土圧シールドの施工と地盤変状計測、トンネル工学研究発表会発表会論文報告集、第 11 巻、2001 年 11 月
- 2) 藤木育雄・入江健二・末富裕二・鈴木章悦：軟弱地盤における三連円形シールドの施工と地盤変状計測、トンネル工学研究発表会発表会論文報告集、第 12 巻、2002 年 11 月
- 2) 矢萩秀一・瀬野健助・米島賢二・荻野竹敏・大塚努：軟弱地盤における工法の異なる大口径シールドの併設施工と地盤変状計測、トンネル工学研究発表会発表会論文報告集、第 12 巻、2002 年 11 月