

偏心多軸シールド工法 に関する共同研究

1. はじめに

近年、都市の過密化とともに地下埋設物が輻輳化し、既設構造物との近接施工も多く見られるようになってきており、これらに影響を与えず、安全にトンネルを築造する技術の必要性が今後も高まっていくと考えられる。特に下水道トンネルは、所定の管渠勾配を確保する必要から深度や線形の制約を受けるため、近接施工時の既設構造物への影響を最小限にするとともに、必要に応じて地中構造物を撤去しながらトンネルを築造できるシールド工法が求められている。このような社会ニーズに応えるため、偏心多軸シールド(DPLEX)工法の技術マニュアルの作成に際し、本工法が実施された実証工事結果をとりまとめたものであり、円形断面の偏心多軸シールド工法の掘進性能の確認や機内注入、鋼矢板撤去などの機内における応用作業の検討を行っている。なお、本機構では矩形の掘削が可能なシールド工法として、任意断面シールド工法設計マニュアル〔矩形断面編〕を1996年9月に作成しているが、掘削カッターが偏心し、多軸で支持されている本工法の特徴を明確にするため、今回のマニュアルより工法名を偏心多軸シールドに変更している。

2. 工事概要

1) 発注者 東京都下水道局

2) 工事件名 東京都江東区南砂一丁目、北砂一丁目付近再構築工事

3) 施工場所 東京都江東区南砂一丁目、北砂一丁目

4) 工事内容 シールド一次覆工

- ・線路延長 $L=1,455.9\text{m}$
- ・シールド外径 $\phi 3,480\text{mm}$
- ・セグメント外径 $\phi 3,350\text{mm}$
- ・仕上り内径 $\phi 2,600\text{mm}$

地盤改良工 二重管ストレーナ工法(単層式) 残置鋼矢板撤去部 2カ所(機内注入)

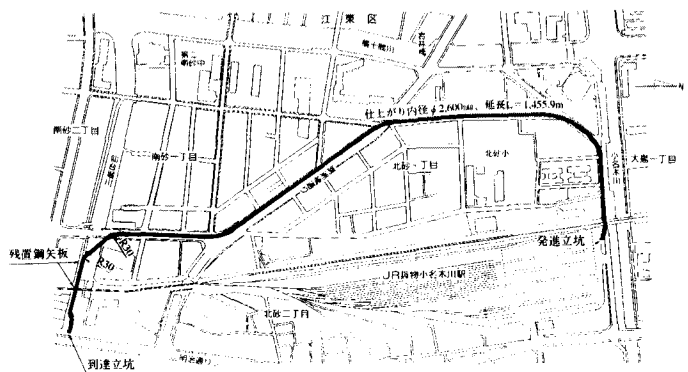


図-1 路線平面図

5) 地質概要

本路線の土質は、上部より表土及び埋土、上部有楽町層(シルト層: N値0~4 層厚3~7m)、下部有楽町層(シルト層: N値0~4 層厚10~30m)、となっている。掘削対象地盤は、下部有楽町層で、土被りは8~11.5mである。

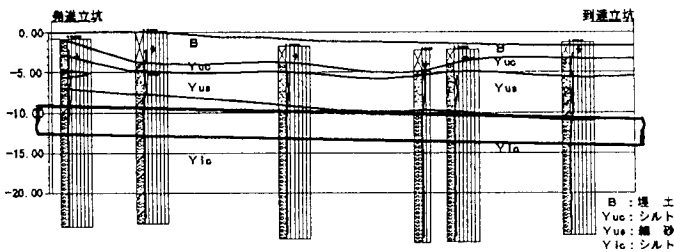


図-2 路線断面図

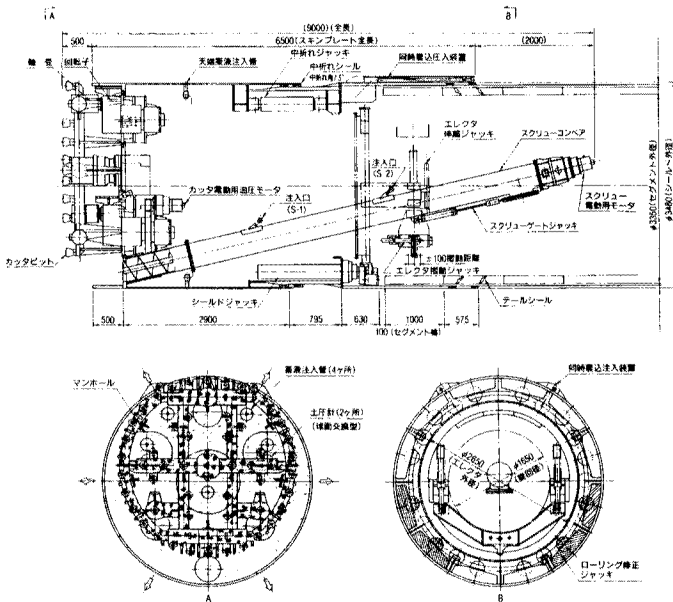


図3 φ3.48m DPLEX シールド全体図

3. 偏心多軸(DPLEX)工法の掘進性能の確認

3.1 切羽の安定性の確認

1) チャンバー内泥土圧

土被りは9~10m, 土質はN=0~4のシルトであり, 管理土圧を主働土圧+水圧+ α とすると, 管理土圧は1.9kgf/cm²~2.5kgf/cm²となる。

図-4に示す様にチャンバー内泥土圧を1.9kgf/cm²~2.5kgf/cm²で管理した結果, 地盤変状や近接構造物への影響は小さく, 良好な掘進結果が得られた。

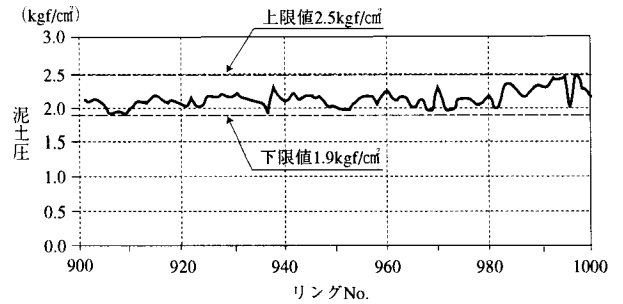


図-4 チャンバー内泥土圧変化図

2) 排土量

排土量は, フローメーター, 排土ポンプのポンピング回数, スクリューコンベアの回転数で管理した。

いずれの計測値も1リング当たり設計掘削土量9.5m³に作泥土材(水)注入量を加えた排土量にはほぼ一致する値が得られた。

RI水分密度計による排土の含水比は, 75~80%程度(平均78%)であり, 湿潤密度は1.6kgf/cm³であった。これらは土質調査結果と作泥土材(水)の注入量を加えた値にほぼ一致した。図-5に排土量変化図を示す。

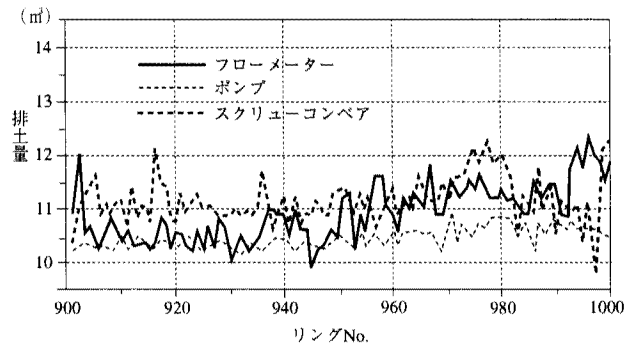


図-5 排土量変化図

3) 地盤変状

掘進線路上の測量により計測した路面沈下量は, シールドセンター直上において, 2mm~7mm, 平均5mm, 左右でおよそ2mm程度であった。図-6に地盤変状変化図を示す。

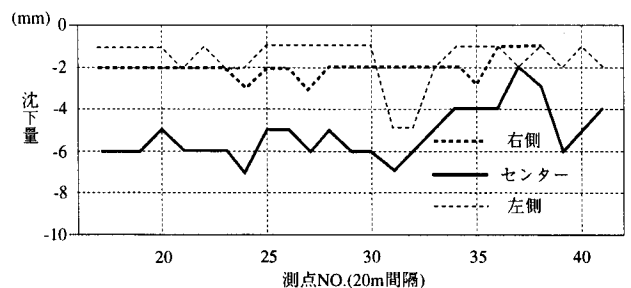


図-6 地盤変状変化図

4) まとめ

チャンバー内泥土圧及び排土量の管理は、従来の泥土圧シールドと同様の管理で可能であった。

また、地盤変状も泥土圧の管理と同時裏込め注入により、最小限の沈下量となっており、従来のシールドより良好な結果が得られた。

3.2 シールドの掘進性能の確認

1) カッタートルク

装備カッタートルクは、これまでの実績と繊維補強仮壁の切削を考慮し、 $27.2\text{tf}\cdot\text{m}$ （トルク係数 $\alpha = 0.64$ ，カッター油圧 $210\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）に設定したが、実掘進時のカッター油圧は、 $35 \sim 45\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，カッタートルクは $4.5 \sim 5.0\text{tf}\cdot\text{m}$ （トルク係数 $\alpha = 0.11 \sim 0.13$ ）であった。図-7にカッター油圧変化図を示す。

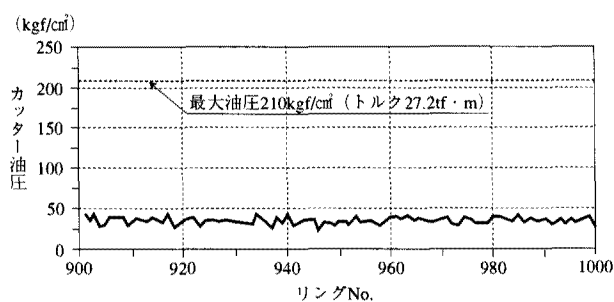


図-7 カッター油圧変化図

2) カッター回転数

カッター回転数は、装備した最大回転数である 3.8rpm としたが、当該地盤では掘進及び練混ぜに支障はなかった。

3) ジャッキ推力

ジャッキ総推力は $300\text{tf} \sim 400\text{tf}$ ，単位掘削断面積あたりの推力は $32\text{tf}/\text{m}^2 \sim 42\text{tf}/\text{m}^2$ であり、装備したジャッキの推力は 1200tf の $25 \sim 33\%$ で掘進することができた。図-8にジャッキ推力変化図を示す。

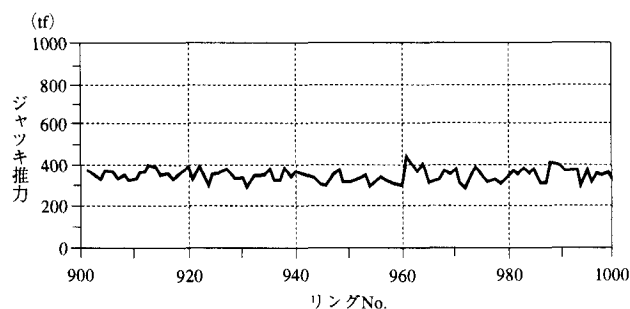


図-8 ジャッキ推力変化図

4) 掘進速度

掘進速度は、 $30\text{mm}/\text{min} \sim 40\text{mm}/\text{min}$ で一定に掘進できた。図-9に掘進速度変化図を示す。

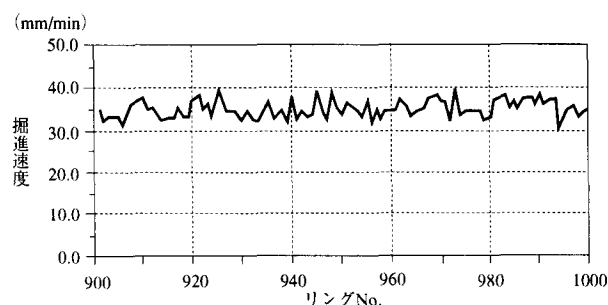


図-9 掘進速度変化図

5) まとめ

シールドの掘進性能のうち、ジャッキ推力と掘進速度については、従来の泥土圧シールドと同等の性能を有していることがわかった。

また、カッタートルクは、従来の泥土圧シールドに比べ、かなり小さな値で掘進できることが確認された。

3.3 シールド機の姿勢制御及び方向制御の確認

1) ローリング

マシンのローリングは、最大 1° 程度以内で管理し、特に問題となるローリングは発生しなかった。

2) ピッチング

ピッチングは、設計縦断勾配 -1.0% にほぼ合わせて、 -1% (0.06°) で掘進することにより、所定の勾配を維持して掘進できた。

3) オーバーカット量及び中折れ角

ほぼ計算通りのオーバーカット量と中折れ角により、 $R=30\text{m}$ 他曲線施工ができた。

4) まとめ

シールドの姿勢制御及び曲線施工を含む方向制御は、従来のシールドと同様に施工することが確認できた。

3.4 裏込め注入機構の確認

1) 注入圧

注入圧は同時注入管の吐出口部に取り付けた圧力計（テール土圧計）により管理し、土被り、地下水位より $2.1\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 2.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ で管理した。これに対し、実際の注入圧は $2.2\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 2.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，平均 $2.3\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。図-10に裏込め注入圧変化図を示す。

2) 注入量

注入量は $1,000\text{ l} \sim 1,400\text{ l}$ （平均 $1,230\text{ l}$ ）であり、

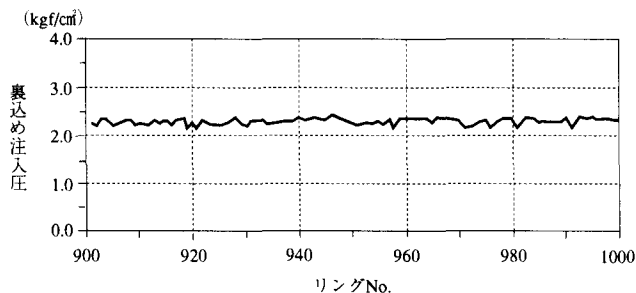


図-10 裏込め注入圧変化図

テールボイド (0.7m³) に対して、140%~200% (平均170%) であった。この注入量は、これまでの軟弱地盤の実績とほぼ同程度であった。

4. 立坑コンクリート壁の切削性能確認

4.1 到達立坑仮壁概要

本工事の到達立坑は別工事で施工された。仮土留め壁はSMW工法で、応力部材としてH形鋼 (H-440) を建て込んでいる。シールドが通過する箇所は、応力部材の一部にプレキャスト製の繊維補強部材 (9本) を使用し、上部及び下部の応力部材には通常部と同じH型鋼 (H-440) がプレートを用いてボルト接合されている。仮壁の仕様を以下に示す。

コンクリート：石灰碎石コンクリート

設計基準強度：750 kgf/cm²

主筋：ピッチ系炭素繊維 6本

保証切断強度：8,080 kgf/cm²

呼び径：φ 30mm

断面積：5.383cm²

スターラップ：PAN系炭素繊維

呼び径：φ 10mm

断面積：0.785cm²

補強部材製作時に実施した材料試験結果は、コンクリートの圧縮強度が810kgf/cm²、CFRP スtrandの引張 (切断) 強度が9,200kgf/cm²であった。

4.2 繊維補強仮壁掘進状況

1) 掘進時間

立坑コンクリート壁の掘進時間を下記に示す。

実掘進時間：17時間

繊維補強部材切削厚さ：580mm

(ストローク320~900mm)

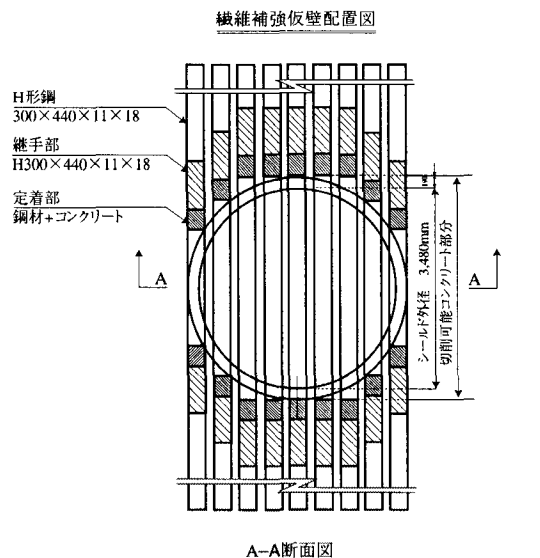


図-11 繊維補強仮壁配置図

平均掘進速度：0.6mm/min

カッター回転数：3.8 rpm

同サイズのビットを用いた掘進実験の結果から想定した速度 (1 mm/min) より、平均掘進速度が小さくなった要因として、到達部直前の異物により、一部のビットが破損したことが考えられる。

2) カッタートルク

図-12に示す推進管理経時変化より、トルクの値は最大装備トルク (27.2tf・m) 以下となっている。

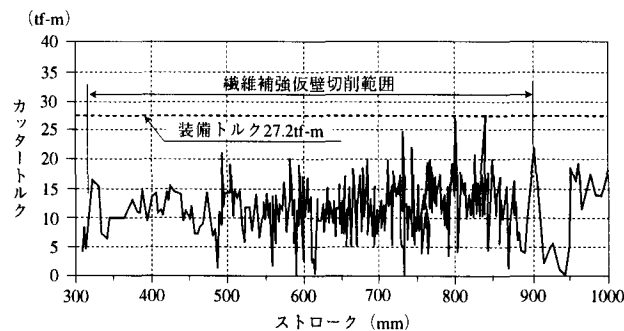


図-12 カッタートルク変化図

3) ジャッキ推力

立坑コンクリート壁切削当初のジャッキ推力は、最大400tfであったが、徐々に推力及びカッタートルクが上昇したため、カッター停止を起こさない掘進速度で掘進し、推力は50～200tfに下がった。この時の掘削断面当たり推力は5～21tf/m²である。図-13にジャッキ推力変化図を示す。

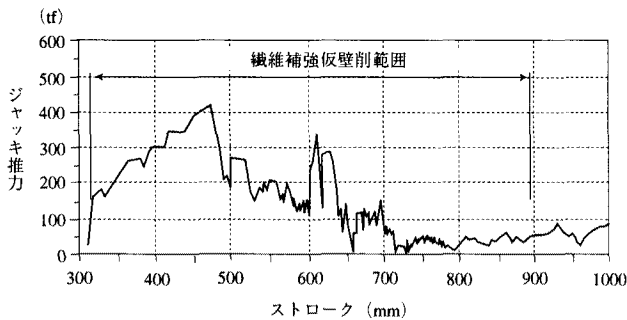


図-13 ジャッキ推力変化図

4) 土圧

シールドのチャンバー内土圧は、推進速度と切削ずりの排土量を制御しながら掘進し、1.0～2.0kgf/cm²を維持した。図-14に土圧変化図を示す。

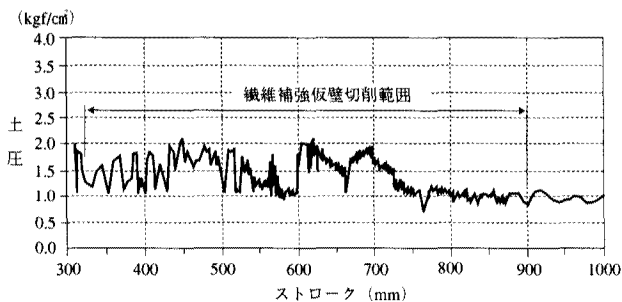


図-14 土圧変化図

5) カッタービットの摩耗量

ビットの摩耗量は、0.16～0.55mmでビット摺動距離1km当たりの摩耗量を表す摩耗係数は0.02～0.08mm/kmであった。

5. 機内からの鋼矢板撤去に関する作業性の確認

鋼矢板撤去作業に先立ち、切羽作業の安全性を高めるため、地盤改良と圧気 (0.4～0.5kgf/cm²) を併用した。機内からの鋼矢板切断撤去は、2回行い、1

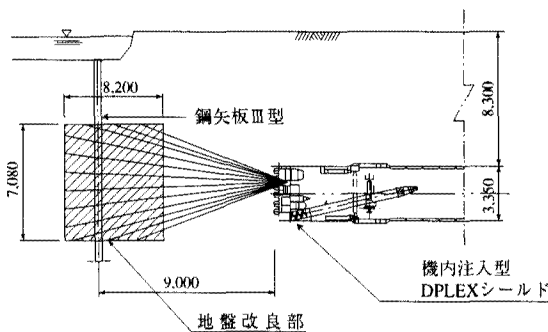
回目の鋼矢板撤去は、延べ65日、2回目の鋼矢板撤去作業は、延べ49日間かかった。(表-1)

施工は、地盤改良、地山掘削・支保工は昼夜2交代、鋼矢板切断は3交代で行い、特に問題なく完了した。2回の鋼矢板撤去作業を通じて以下のことを確認した。

- ① シールド内の作業空間を確保できたため、機内からの地盤改良は、1mのロッドで容易に施工することができた。
- ② マンホール (850mm×700mm) を2カ所設けたことにより、作業員と材料の出入及び換気用風管の設置を行うことができ、機外での鋼矢板撤去作業を安全に施工することができた。

また、図-15に機内地盤改良図、表-1に全体工程、表-2に矢板撤去工程を示す。

地盤改良状況



鋼矢板切断・撤去状況

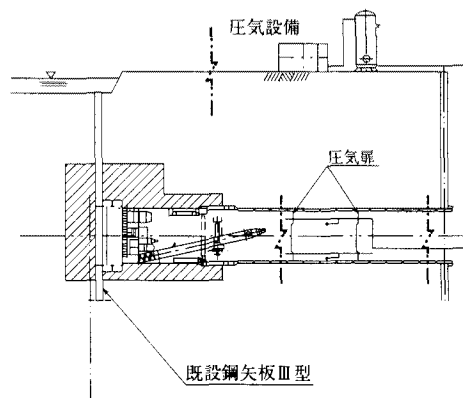


図-15 機内地盤改良図

表-1 全体工程表 (実績)

	平成9年												平成10年		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	
初期掘進,到達掘進	(34)													19	(2)
本掘進					(14)									(7)	
棄注,鋼矢板撤去								(48)	(7)	(5)	(1)	(32)	(13)		

() 内は実績動日数

表-2 鋼矢板撤去工程表（1箇所当たり）

数量		10	20	30	40	50
準備工	一式	(5)				(2)
薬液注入	105ℓ			(34)		
圧気設備設置	一式	(15)				
	28.7㎡					(3)
鋼矢板切断	46.5m					-(1)
再発進準備	一式					-46 (1)

()内は実稼動日数

6. おわりに

円形断面偏心多軸シールドの実証工事は、一次覆工及び機内からの鋼矢板撤去、到達仮壁掘削まで、大きなトラブルもなく順調に完了した。以上のことから本工法は、都市部における下水道の再構築工事など地中障害物の多い施工条件下においても有効なシールド工法であることが確認された。これらの実証工事データをもとに、偏心多軸シールド工法設計マニュアル〔円形断面編〕を発刊する予定である。

<参考文献>

- 1) 古川・鈴木・平林：世界初の円形DPLEXシールド，土木工学社 トンネルと地下，H.9.8.
- 2) 多軸（DPLEX）シールドの高強度コンクリート切削性能実験（その1，その2），土木学会第52回年次学術講演会、Ⅲ-B92,Ⅲ-B95,H.9.9.

●この研究に関する問い合わせは

研究第二部長	前田 正博
研究第二部主任研究員	佐伯 守久
研究第二部研究員	石川 泰裕
研究第二部研究員	苧木新一郎