

ボックスシールド工法実証施工に関する考察

多田幸司¹・谷口 徹¹・古川浩平²・中川浩二²

¹正会員 戸田建設(株)土木技術開発室 (〒104 東京都中央区八丁堀 4-6-1)

²正会員 工博 山口大学工学部社会建設工学科教授 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

非円形断面のシールド工法開発が活発に行われており、その一環として矩形断面シールドの研究を実施している。小型実験機による掘削実験や同時裏込め注入の実験などを踏まえて、今回、実機寸法の機械を製作して地山の掘進実験を行った。切羽の安定や姿勢制御、機械負荷、曲線施工、矩形セグメントの組立等矩形断面特有の課題の解決を目的とした。その結果、シールド工法としての実用性が認められると共に偏向ジャッキによるローリング制御やカッター負荷、曲線施工、地盤変状などに有用と思われる結果が得られたので報告する。

Key Words: shield tunneling method, box shield, experimental operation, cutter torque, erector, steering, bearing load, curve tunneling

1. まえがき

シールド工法は円形断面が圧倒的に多い適用例を持つが、非円形断面のシールド工法も研究開発が行なわれ、複円形をはじめとして最近では3連シールド¹⁾や楕円²⁾、矩形断面³⁾などの施工も行われている。これは都市内の狭い用地の中で、あるいは輻輳する既設構造物の間を縫って新設構造物を計画する必要が生じている事と共に、不用断面を少なくして掘削残土量を低減したいというニーズによると考えられる。設計条件によっては必ずしも掘削断面積の低減につながるとは言えないが、掘削幅あるいは掘削高さを縮小できるのが非円形シールドの利点である。筆者らも泥水式矩形断面シールドの研究を行っており、その一部は既に報告した。□1.04 m×1.04 mの実験機を用いた掘削性能実験⁴⁾においてはカッターの回転数、回転方向、軸方向等の諸条件を実験的に検討し、地山の掘削実験で切羽の安定保持や掘進速度、ピッチング制御等について確認した。また裏込め注入実験⁵⁾では2液性の可塑状注入材の配合について調べると共に矩形テールボイドの模型を作成して充填状況を確認した。しかしこの実験機は小型であるため、セグメントの組立ができない点や曲線施工の確認ができない点などいくつかの課題を残していた。そこで今回セグメントを組立ることができる実施工サイズのシールド機を製作して地山を掘進する実験(以下、実証施工と呼ぶ)を行ない未解決であったいくつかの点について検討したので、その結果について報告する。

2. 従来の研究と残された課題

ボックスシールド工法はドラムカッターとリングカッターの組み合わせによって矩形断面を掘削するという特徴を持っている。掘削手法と共に断面が矩形であることに付随して発生する問題点の検討を行ってきた。その概要は以下の通りである。

(1) □1.04 mの実験機による土槽実験及び地山掘進
ドラムカッターとリングカッターの組み合わせ1ユニットで構成される実験機を用いて掘削実験を行い表-1に示す結果を得た。

(2) アジテーターの実験

表-1のチャンバー底部堆積の結果を基に、攪拌性能を選定するための模型実験を行い、堆積しやすい部分に泥水を吹き付ける方法が有効であることが判った。

(3) 裏込め注入実験

アクリル板を用いた模型実験を行い、矩形断面における充填性を検証した。

(4) 礫破碎実験

ボックスシールドは泥水式であり、礫地盤に対する適用性は自ら限界があるが、カッターの間にはさんで礫を割る事ができるという特徴もあり、実験的に破碎性能を検討した。圧縮強度1000 kgf/cm²、直径25 cm程度の礫(花崗岩)でも破碎可能であり、1リングに数個という程度の出現頻度であれば、対処できる事がわかった。しか

表-1 従来の研究結果と残された課題

項目	切羽の安定	裏込め注入	姿勢制御	機械設計					チャンバー底部堆積	曲線施工	セグメント組立	
				カッター回転数	カッター回転方向	カッター軸方向	カッタートルク	推力				アジータトルク
今までの研究結果	ℓ=30mを推進した。岩盤突起掘削乾砂量、切羽土圧の3点から切羽の安定を確認できたことと判定される。	□1.0mの実験では推進工法であったため、未実証。矩形断面は上刃のアーチ作用が期待しにくいため、同時裏込め注入が重要である。テールボイド模型を用いて同時裏込め注入方法を実験的に実証した。	ピッチングは修正ジャッキ（シールドジャッキに相当）で修正可能。ローリングについては推進工法であったため、傾向を見ただけに留まっている。	砂、粘性土においては周速の考え方で問題なし。	土圧の刃定粘着からシヤア向けた土砂の流れる土圧の上昇を引き起こすことがわかった。	粘着を出すのは早い、実験結果から選択するならば水平軸となる。	N値=2~3の砂層経過においてはほとんど負荷がかかっていない。	従来の実験では推進工法であったため、シールド機の推力は推定に留まる。推進速度は40m/min程度までは問題なく、推進できる。	従来の実験ではほとんど負荷がかかっていない。	カッター支持付近に砂が堆積。	推進工法であったため、未実証。	推進工法であったため、未実証。
今後の課題	スケールアップした時の切羽の安定性を確認したい。またカッター上部の安定のために地山の土質定数とカッター径の関係を追求していく必要がある。	シールド推進と並行した加圧注入時の充填性を確認する。	カッター回転方向をピッチング修正に生かす方法を追求する。ローリング修正を実証する必要がある。	より多くの土質条件で粘着を出すべき。柔軟に考えたい。	カッターユニットの回転方向が複数になった時カッターの回転方向を検討する必要がある。	鉛直軸を採用する場合、切羽要素の応力変化等、検討の必要あり。	硬い地盤や粘性土におけるデータを探りたい。	シールド機としての推力を測定し40~50mm/minの推進速度を維持できる事を証明する必要がある。	土質、チャンバー形状と関係があると思われる。データの蓄積が必要。	設計上の工夫と共に堆積防止対策を講ずる必要がある。	曲線施工の性能はシールド機として重要な点であり、実証する必要がある。	組立用エレクターを考案する組立時間等を確保する必要がある。

し河川下のように礫が連続して出現する地盤に対してはカッター負荷が連続的に許容値をオーバーするため適用困難であり、ディスクカッター等の礫専用ビットを開発する必要があることが判明した。

これらの実験結果から表-1に示す課題が得られた。この課題を解決すれば、シールド工法として実用化することがおおむね可能と考えられ、それらを検証するために次の項目に重点を置いた実証施工を行った。

- ①切羽の安定性
- ②シールド機の姿勢制御
- ③曲線施工
- ④矩形セグメントの組立性能
- ⑤カッタートルク、推力等の機械負荷

3. 実証施工の内容

(1) 概要

実証施工では延長40mのトンネルを2本掘削した。図-1に施工平面図、図-2に縦断図を示す。曲線半径は80m及び100mとした。

土被りは図-2に示すようにシールド掘進による影響が地中で吸収されずに地表に現れる事を期待して4mとした。縦断勾配は上り5%としたが、これはボックスシールド機の重心が円形シールドに比べて少し前方にくるため、管理上、より厳しい条件である上り勾配を設定して所定の勾配を確保できるか否かを確認しようとしたものである。

掘削土質は図-3に土質ボーリング結果を示す通り、掘削断面の上部1/4程度がN値1~2の細砂、下部3/4がN値10程度の凝灰質粘土である。シールド機上部

はN値1~2の軟弱な粘性土である。地下水位は若干変動があるが、GL-1.5m程度である。

(2) 泥水式ボックスシールド実証施工機

製作したシールド機を写真-1に、断面図を図-4に示す。電力洞道や下水道などの断面を参考として断面寸法を縦2.85m×横2.85mとした。掘削断面積は約8m²になる。機械の設計条件は実証施工終了後の実際の工事への適用を考えて表-2に示す諸条件で設計した。この条件は先に述べた実証施工の条件を満足している。

シールド機を設計する上で留意した点を以下に述べる。

a) カッター

ドラムカッター2個とリングカッター2個で構成されるユニットを1つの駆動系で回転させる。これを上下に2ユニット配置した。この機構はビットの位置によらず地山の切羽面をカッターが均等な速度で掘削できるという特長を持っている。

□1.04mの実験機ではカッターは1ユニットであったが、本機では2ユニットであるため、互いの回転方向を変えてピッチングへの影響を把握できると考えられる。回転方向は図-5に示す通り、正・逆方向に選択できるが、カッター同士の反力を打ち消すa回転を基本的な回転方向と考えた。

カッター軸方向は基礎実験の結果を踏まえて水平軸としている。

回転数は基礎実験で用いたインバータ制御ではトルクが低下するため、ポールチェンジ機構を取り入れ、ドラムカッターで3.3rpm(周速15m/min)と2.2rpm(周速10m/min)、リングカッターで6.7rpm(周速15m/

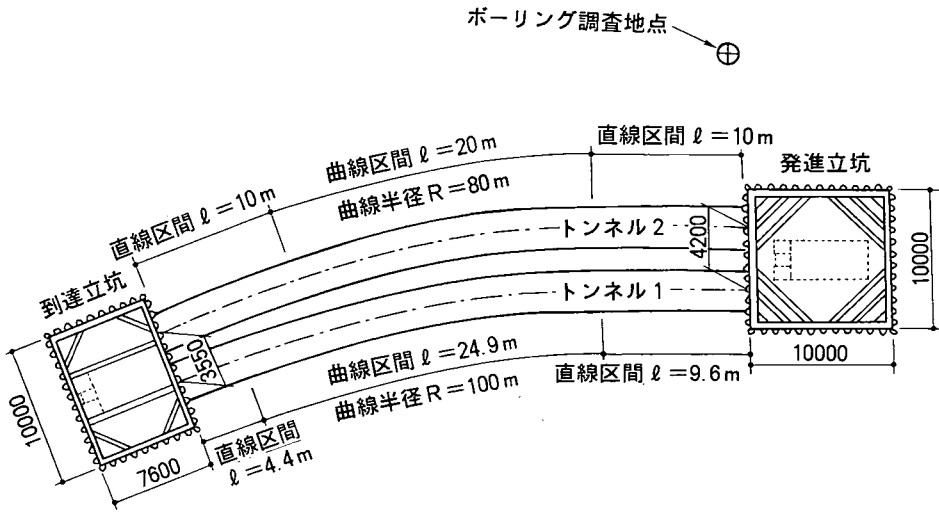


図-1 実証施工平面図

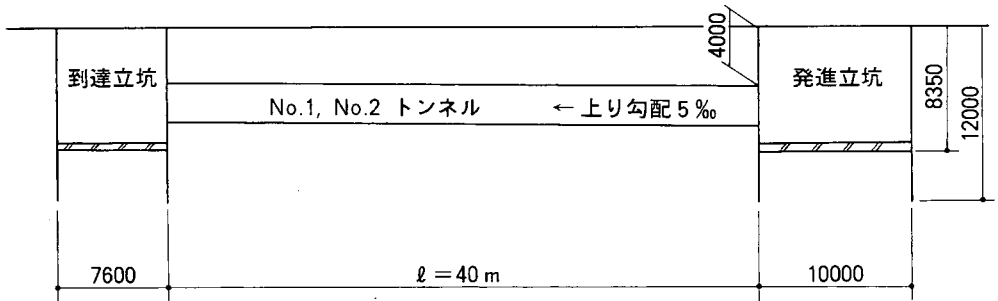


図-2 縦断面図

標尺	標高	深	層厚	柱状図	色調	地質名	観察記事	標準貫入試験											
								深度	打撃回数	10cm毎の打撃回数			N 値						
m	m	m	m					m	打撃回数	10cm	20cm	30cm	0	10	20	30	40	50	
1	27.534	0.80	0.60	暗褐	暗褐	埋土	ロームが主体である。ガラを若干混入する。	1.15											
	26.934	1.20	0.60			ローム	上部植物を多量に混入する。浮石・スコリアを少量混入する。	1.49	2/34	1/18	1/16								
2				黄褐	黄褐	凝灰質粘土	浮石・スコリア・有機物を少量混在する。2.95~3.15m細砂を挟む。	2.15	1/30										
						凝灰質粘土	均粒な細砂でなり、シルト分を若干混入する。	2.45	2/42	1/20	1/22								
3				青緑灰	青緑灰	凝灰質粘土	浮石・スコリア・有機物を少量混入する。	3.57											
						凝灰質粘土	上部粘土分を若干混入する。7.50m以深、色調が暗緑色に変わる。砂質は均粒な細砂でなる。	4.15	13/30	3	4	6							
4				青緑灰	青緑灰	凝灰質粘土	浮石・スコリア・有機物を少量混入する。	4.45	10/30	4/11	3/9								
						凝灰質粘土		5.45	6/30	2	2	2							
5				暗緑	暗緑	凝灰質粘土		5.45											
						凝灰質粘土		6.15											
6				暗緑	暗緑	凝灰質粘土		6.45											
						凝灰質粘土		7.15	11/30	3	3	5							
7				暗緑	暗緑	凝灰質粘土		7.45											
						凝灰質粘土		8.15	21/30	8	10	3							

図-3 土質調査結果

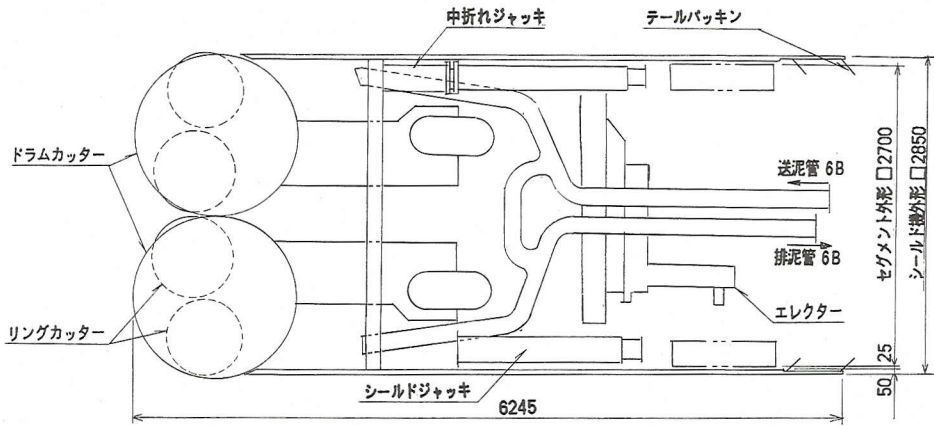


図-4 シールド機断面図



写真-1 ボックスシールド機

表-2 シールド機設計条件

項目	条件
土被り	17m
地下水位	G.L. -0m
土質	粘性土
土の単位体積重量	1.7 t/m ³
N値	4~10
上載荷重	1.0 t/m ²
曲線半径	40m

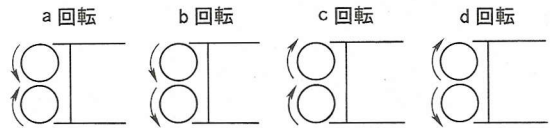


図-5 カッター回転方向

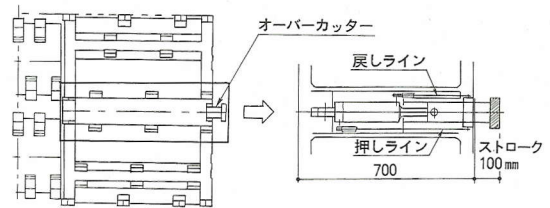


図-6 オーバーカッター機構

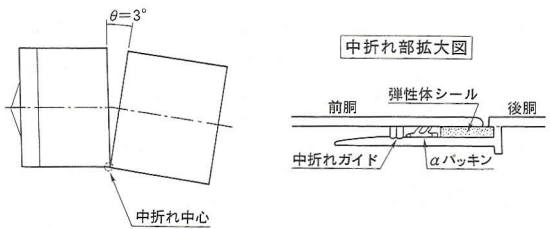


図-7 中折れ機構

min) と 4.5 rpm (周速 10 m/min) の 2 段階変速とした。

また曲線施工に必要な余掘り装置として図-6 に示すオーバーカッターを各ドラムカッターの側面に 1 個ずつ (ストローク最大 100 mm) 設置した。

b) チャンバー

□ 1.04 m の掘進結果からカッターの支持脚がチャンバー底部の土砂の滞留に関係する事がわかっていたため、支持脚は設けずバルクヘッド部で片持ちで支持する設計とした。またチャンバー隅角部はテーパ加工とし、

デッドゾーンを極力少なくすると共に、下部の隅角部に泥水を吹きつけて攪拌する方法を採用した。

c) 中折れ機構

曲線施工を目的として図-7 に示す中折れ機構を装備した。角度 3° のフラットタイプである。この中折れ角度や、オーバーカットを最大量使用した場合、半径 40 m の曲線施工が可能な設計とした。

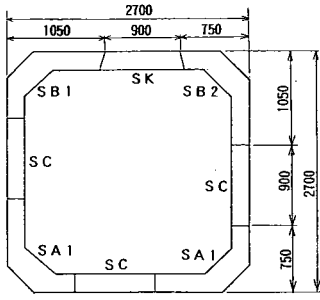


図-8 セグメントの分割

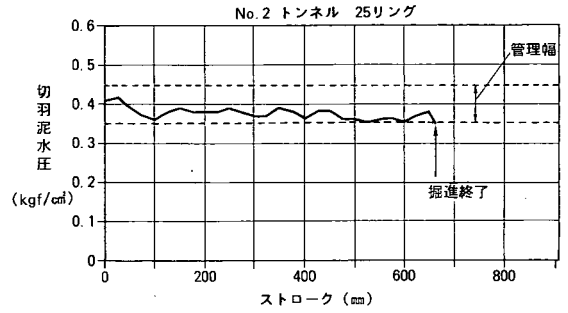


図-9 リング内の切羽泥水圧の変化

d) 姿勢制御

ローリング修正用にシールドジャッキ12本の内、8本を偏向可能（一端をヒンジとし、他端を移動して推進ジャッキの軸を偏心させる）とした。

e) エレクター

矩形セグメント組立て用にネジジャッキを利用したエレクターを製作した。旋回、昇降、水平のセグメント移動を可能としている。

f) 裏込め注入

施工結果は既に報告⁵⁾したが、シールド機隅角部のスペースを利用して裏込め注入管を設置し、掘削範囲内からの同時裏込め注入を可能としている。

g) 推力

泥水式シールドの一般的な値⁶⁾100~130 tf/m²を参考にして80 tfのジャッキを12本配置し、1 m²あたり119 tf/m²とした。

h) その他

非常時の切羽への出入り方法として、バルクヘッドにマンホールを設置すると共にリングカッターの一部を内部から取り外して開口部を作成できる機構とした。

(3) 矩形セグメント

本実証施工ではトンネル貫通後に2本のトンネルを連結する計画があり、解体しやすさを考えてセグメントはスチール製とした。図-8にセグメントの分割を示す。

4. 施工結果

実証施工の目的である切羽の安定他の諸項目について以下に考察する。

(1) 切羽の安定

□1.04 mの実験機による砂層掘進では切羽の安定を保持できる事を確認したが、このような小断面では地山のせん断抵抗力が相対的に大きくなり切羽が自立した可能性もある。シールドにおける切羽の安定性を実物大寸

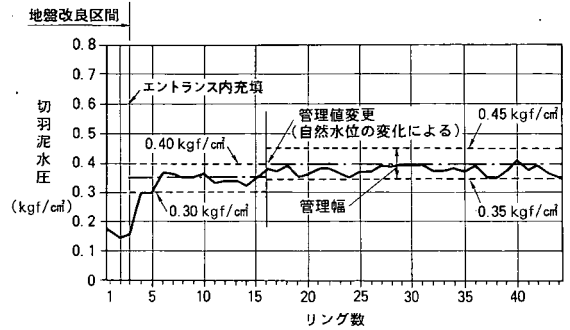


図-10 リング毎の切羽泥水圧の変化

法で確認しておく事が重要であると考えた。本工法は泥水式であり、基本的に切羽泥水圧の保持によって地山を抑える。この泥水圧の変動状況と共に、後述する掘削乾砂量の測定によって余掘りや土砂の取り込み性を判定し、周辺地山の変状測定と合わせて切羽の安定を評価した。

a) 切羽泥水圧

切羽水圧計の取り付け位置における自然水圧が0.3 kgf/cm²であり、余裕裕として一般的な値⁷⁾である0.2 kgf/cm²をとると、地上への噴出が管理幅の中で生ずる恐れがある(土被り圧0.54 kgf/cm²)ため、初期設定値を0.35 kgf/cm²として管理幅を0.3~0.4 kgf/cm²とした。リング内の切羽泥水圧の変動データの代表例を図-9に、リング間の切羽泥水圧記録を図-10に示す。図-9は泥水圧の変動をストロークの25 mmピッチで示しているが、管理幅を飛び出した特異点はなく切羽崩壊のような異常現象は生じていないと判断できる。図-10は各リング毎の泥水圧(リング内平均値)をプロットして掘進全体における泥水圧の変動を見たものであるが、管理幅の中にほぼ落ちついており、切羽泥水圧の維持が可能である事が示されている。図中の16リング以降は地下水位の上昇により切羽における水圧が0.35 kgf/cm²になった事が測定できたので泥水圧の管理値を

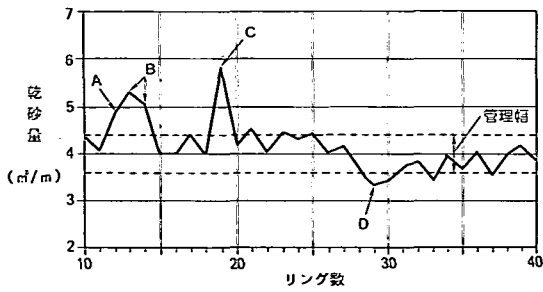


図-11 掘削乾砂量の変化 (No.1トンネル)

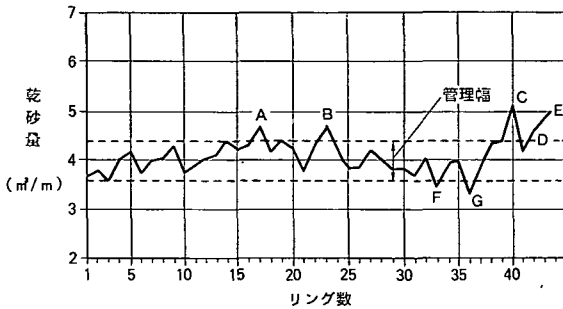


図-12 掘削乾砂量の変化 (No.2トンネル)

0.35~0.45 kgf/cm²に変更した。

b) 掘削乾砂量

通常のシールド工事では、地盤調査結果による掘削土質ならびに初期掘進時の諸データを吟味して設計掘削乾砂量を決定し、計測値と対比して管理している。掘削土質が変化したときは修正を加える。実測乾砂量が100%より大きいときは必要以上に土砂を取り込んだ事すなわち余掘りを意味し、100%より少ないときは必要量の掘削を行わず、その分周囲の地山への押し込みにより所定の空間を形成したものと判断される。

設計乾砂量は次式で求められる。

$$(\text{設計乾砂量}) = A \times L \times (1 - n)$$

A : 掘削断面積 = 8.12 m², L : 単位掘削長 = 1 m

n : 地山の間隙率 = 50.6% (平均)

$$= 4.0 \text{ m}^3$$

実測乾砂量は送排泥密度と流量から次の式で演算し掘削時間中の値を累計したものである。

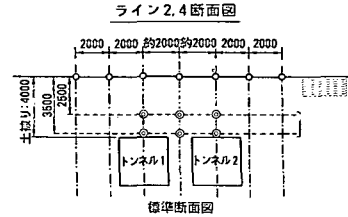
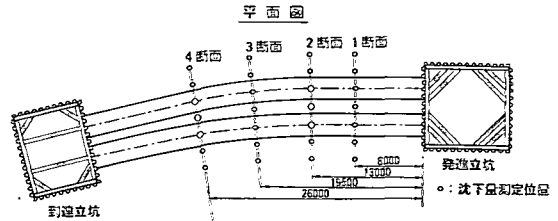
(実測乾砂量)

$$= \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(\delta_2 - 1) \times Q_2}{G_{s2} - 1} - \frac{(\delta_1 - 1) \times Q_1}{G_{s1} - 1} \right\}$$

δ_2 : 排泥密度 (t/m³)

δ_1 : 送泥密度 (t/m³)

Q_2 : 排泥流量 (m³/min)



種別	測点数	方法	記号
地表面沈下	28	レベル測量	○
層別沈下	12	レベル測量	◎

図-13 計測位置図

- Q_1 : 送泥流量 (m³/min)
- G_{s2} : 排泥側土粒子真比重
- G_{s1} : 送泥側土粒子真比重
- C : 2秒毎のカウント数

No.1, No.2トンネルの掘削乾砂量の変化を図-11~12に示す。設計乾砂量4 m³(掘削長1 m換算)と管理限界(±10%)を図中に示している。管理限界を越えている箇所が何点かあるが、以下にその理由を示すように原因は明確であり、掘削乾砂量はほぼ設計値通りと言える。

No.1トンネル

- A : セグメント土圧計設置のため、掘進時間が長くなっている。バイパス運転時には送排泥管内の密度、流量のわずかな差が生ずるが、その差を累計した。
- B : 排泥管が閉塞気味であり、切羽バイパス(掘削を止めた状態でチャンバー、排泥管を洗浄する作業)を再三にわたって実施したので、バイパス時の送排泥管内の密度、流量のわずかな差を累計した。
- C : Bに同じ
- D : 土質の変化と思われる、粘性土の増加(泥水粘性が上昇)が見られた。

No.2トンネル

- A~E : 排泥管閉塞気味、切羽バイパスを再三にわたって実施したのでバイパス時の送排泥管内の密度、流量のわずかな差を累計した。
- F, G : 土質の変化と思われる、粘性土の増加(泥水粘性が上昇)が見られた。

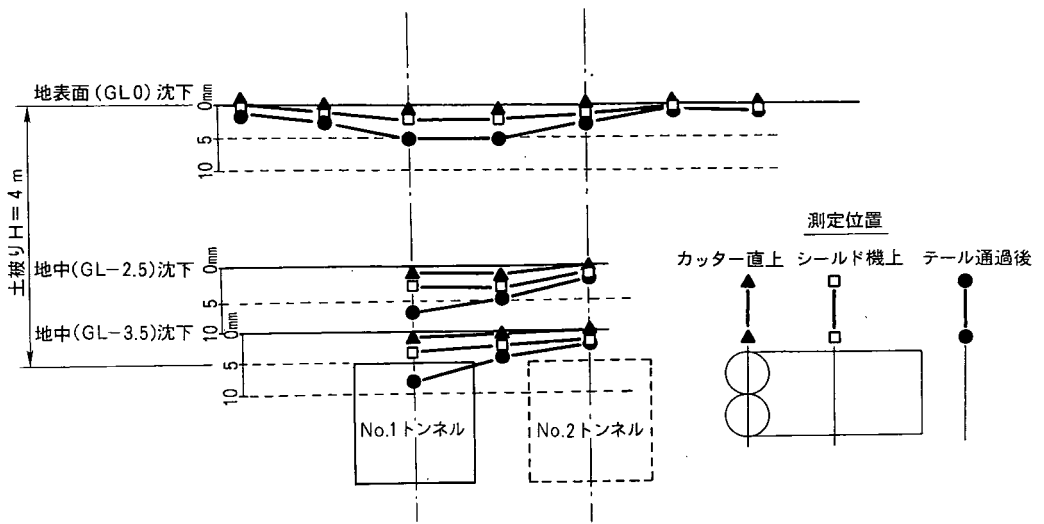
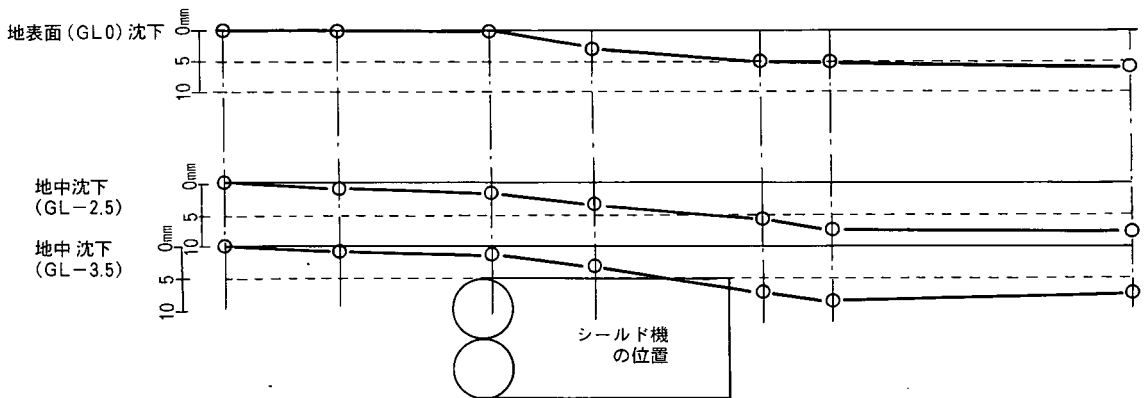


図-14 横断面沈下分布図



注1 シールド機の図は先行沈下の経時変化に対する相対的な位置を示す。

注2 沈下量はトンネルセンターにおける値である。

図-15 沈下量の経時変化

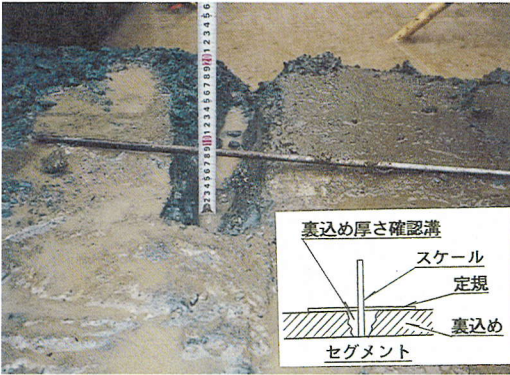
No.1トンネルでは粘土塊で閉塞気味の時の処理の不慣れ等があり、乾砂量が大きく出ているところもあるが、対処にやや習熟したNo.2トンネルではほぼ管理幅に入っている。以上より、掘削乾砂量から見て切羽崩壊や余掘り等は発生しなかったものと判断できる。

c) 地盤変状測定結果

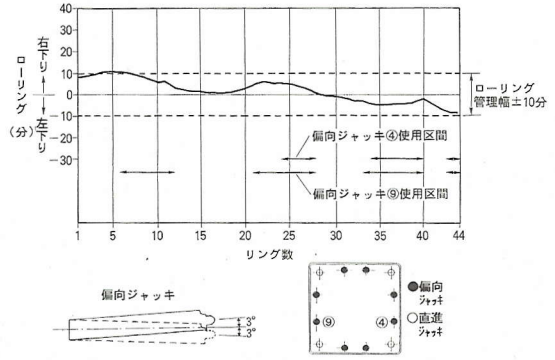
シールド工法では周辺地盤へ与える影響をいかに少なくするかが重要なポイントである。実証施工では土被りが少ないため、緩みや崩壊が生ずると直ちに沈下が発生すると考えられる。これを明らかにするために測定点を図-13のように配置した。地表面沈下に加えて地中沈下も測点を設けてレベルで測定している。

代表例としてNo.1トンネル掘進時の16リング断面(図-13の2断面)の沈下を図-14に示す。トンネル直上で最大沈下を示し、6m(トンネル幅の約2倍)離れた点でゼロとなっている。地表面の最終沈下量は6mm、地中沈下の最大量は8mmである。シールド進行に伴う経時変化でこの図を書き直すと図-15の通りである。一番鋭敏に反応しやすい地中沈下(シールド機上方50cm)について述べると、先行沈下は1mmであり、シールド機通過時に5mm、テール通過後に1~2mmといった傾向となっている。掘削時の沈下はほとんどないと言える。

地表面沈下量はNo.1, No.2トンネルいずれも5~6



写真一 裏込め上部充填状況



図一 16 ローリング制御記録

mm となっている。シールド機本体通過時に最も大きい沈下を示すが、掘削外形を本体外形より幅、高さとも 5 mm ずつ大きくしている事が影響したと考えられる。掘削外形を本体外形より大きくしたのはシールド機周面の摩擦低減ならびにカッターの製作精度を考慮したもので円形シールドでも同じ考え方がとられている。掘削外形を本体外形と仮に同一にしたとしてもシールド機で地中を推進していく以上、シールド機周面で最低数ミリ範囲は地山をせん断する事が避けられず、若干の沈下が発生するのはやむを得ないと考えられる。

d) まとめ

切羽泥水圧、掘削乾砂量、地盤変状の 3 項目から切羽の安定を検討した。その結果は次の通りである。

- 1) 切羽泥水圧については変動が少なく、安定した管理が可能である。
- 2) 掘削乾砂量はほぼ管理幅に入っており、取り込み土砂量は適正である。
- 3) 先行沈下量はほとんどない。

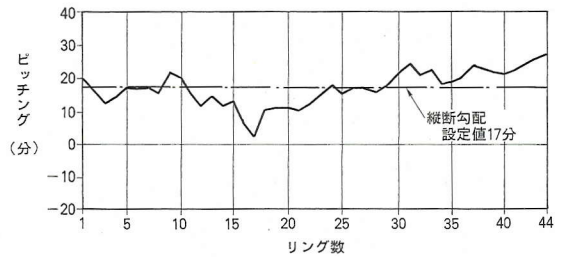
□ 1.04 m の実験から約 8 倍の断面積に拡張したわけであるが、切羽の崩壊、余掘り、押し込み等は発生せず、安定を保った掘進ができたものと判断される。

(2) 裏込め注入

裏込め注入については既に報告した通り⁵⁾であるが、その後、上部裏込め充填の確認作業を行ったので写真一 2 に示す。No. 2 トンネル 15 リング上部を掘削して裏込めを露出させたものである。80~90 mm の厚さとなっており、かつ欠損部はなく均等に充填されていた。先に測定した側部だけでなく、上部にも裏込めが十分廻っており、同時注入によるテールボイドの充填性が良好である事が認められた。

(3) シールド機姿勢制御

シールド工事で円滑な掘進を可能にするためにはシ-



図一 17 ピッチング制御記録 (No. 2 トンネル)

ールド機の姿勢制御機能が重要である。円形シールドにおいても過度のローリングが生じた時にスタビライザー等を使用して苦勞して修正しているのが実情であり、矩形断面におけるローリング制御の重要性は言を待たない。

まず最初に施工した No. 1 トンネル結果について述べる。このトンネルではボックスシールド機の癖を見るため、ローリング修正は行っていない。図には示していないが、次の事が言える。

- 1) 発進時にピッチングがやや下がり傾向になる。
- 2) ピッチングはシールドジャッキで任意に制御できる。
- 3) カッター回転方向がピッチングに影響する。逆に回転方向でピッチングを修正する事も可能である。
- 4) ローリングは発生しにくい機構であるが、特にカーブ施工時の使用ジャッキの偏りによって生じる事がある。
- 5) ローリングは最大 19' であり、数値としては小さいが、円形シールドと異なり、セグメントの組立に影響が直結するため、細心の管理が必要である。この結果を踏まえ、ローリング制御を含めて No. 2 トンネルを施工した。その結果を考察する。

a) ローリング

図一 16 にリング毎のローリング記録を示す。本機のテールクリアランスは 25 mm であり、ローリングが 32'

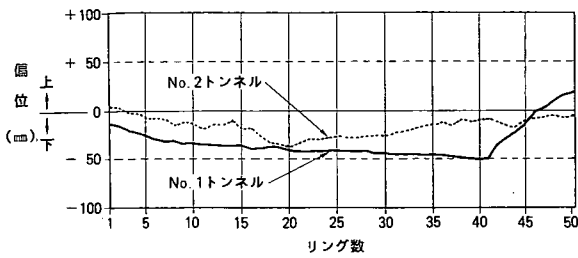


図-18 上下方向の出来形

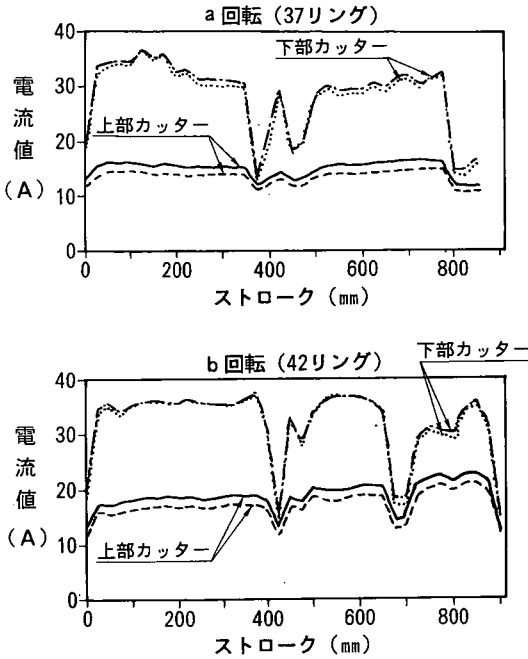


図-19 カッター回転方向による電流値の変化

生ずると、セグメントとシールド機内面のセリが生ずる。管理値を $10'$ として修正を試みた。偏向ジャッキの使用状況は図中に示すように④、⑨のジャッキを使用した。ローリングが $10'$ に近づくにつれ、偏向ジャッキを使用して修正できている傾向が図から読みとれる。円形シールドのように掘削反力によってローリングが生ずるわけではないので、発生する値も小さいし、制御も容易であると考えられる。

b) ピッチング

円形シールドと同様にシールドジャッキの選択を基本としてピッチング制御を行った。

図-17にリング毎のピッチング記録を示す。設定縦断勾配は5%であり、角度に直すと約 $17'$ である。記録は多少の上下はあるものの、概ね17前後である。17リングで異常に小さい値を示しているが、これは設定曲線半径

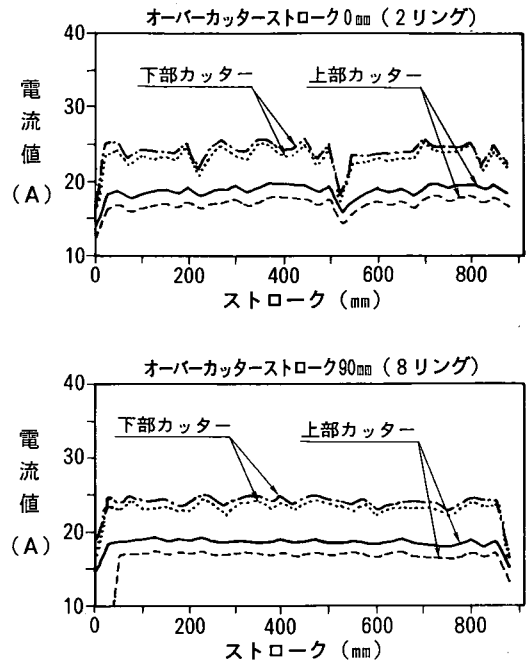


図-20 オーバーカッター使用時の電流値 (No. 2トンネル)

$R=80$ mに加えて $R=60$ mのカーブを試験的に行うために、ピッチングを無視して施工した結果である。図-18に示す上下の出来形図と併せて考えると、シールドジャッキの選択によってピッチングを制御することが可能である事が認められる。カッターの回転方向の選択によるピッチング制御は切削反力を利用したものであり定性的には利用できるが、土質の差異による傾向等、今後検討すべき項目が残っている。

c) 姿勢制御結果のまとめ

カッター回転反力でローリングが生ずる機構ではなく、 $10'$ という小さい値でローリングを管理できる事が実証できた。ピッチングはカッター反力で生じ得る機構であるが、シールドジャッキで修正可能であり、またカッター回転方向の選択を利用して修正できる傾向が得られている。

矩形断面でのローリングがしばしば心配されるが、このような正方形に近い断面では何ら問題なく施工できると言える。しかし細長比の大きい長方形断面では管理値がさらに厳しくなるため、偏向ジャッキの機能アップと共にテールクリアランス量の拡大等も検討する必要があると考えられる。

(4) 機械負荷

掘削時に発生する負荷を測定し、シールド機械として適当であるかどうかを判定した。カッタートルクならば

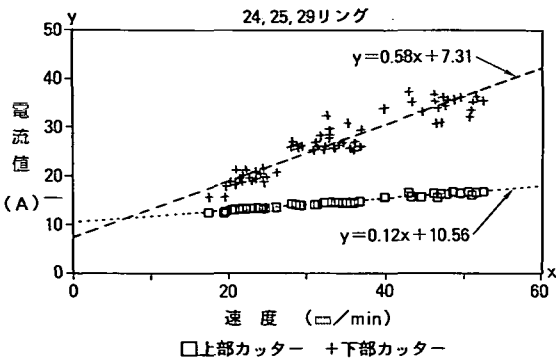


図-21 掘進速度によるカッター電流の変化

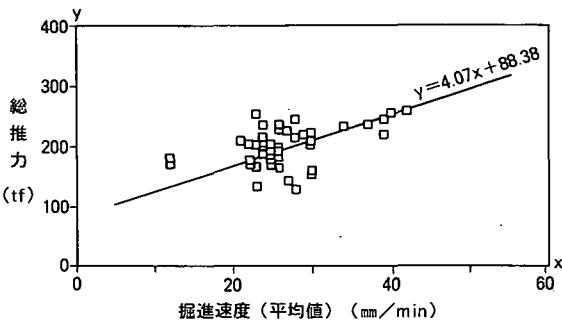


図-22 総推力の変化

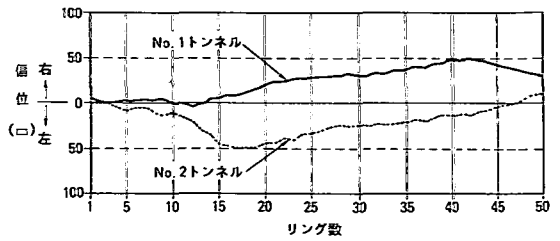


図-23 左右方向の出来型

工程	時間									
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
始業点検		○								
裏込材作成		○					○			
裏込管取付撤去			○				○			○
シールド掘進			0.75H				1.25H	管延伸合む		
セグメント組立				1.5H				1.5H		

図-24 掘進サイクル

加は上部、下部とも発生するため、下部の場合が大きいのは取り込み土量の増大によるものと考えられる。

b) 推力

推力はシールド機を掘進させる力であると同時に、切羽での切削状態、土砂の滞留状態が如実に反映される因子である。

総推力の記録を図-22に示す。1リング内の平均掘進速度を横軸にとって各リングの総推力をプロットしたものである。最大290tfであり(装備推力960tfの1/3程度)、泥水式シールドの一般的な実績値にほぼ等しい事から掘削土砂の取り込み不良やカッターの切削不良による推力の増大は生じていないと言える。

また掘進速度は40mm/min(実測最大50mm/min)を確保できており、円形シールドと同等である。

(5) 曲線施工

左右方向の出来形を図-23に示す。ボックスシールド機による初めての施工であったため、姿勢制御や掘進効率の向上に注意を払い、平面線形の精度は通常言われる ± 50 mmに入れば良いという考え方をとった。施工条件によるボックスシールド機の癖など手探りで行わざるを得ない面もあったが、 ± 50 mmを達成できている。

(6) 矩形セグメントの組立性能

ネジジャッキを利用したエレクターで全ピースの組立が可能であった。しかし図-24に平均的な掘進サイクル(初期掘進状態)を示すようにセグメント組立時間が1.5時間程度かかり、最も長い作業時間となっている。本掘進になればセグメント搬送装置の設置や掘進中のセグメント運搬作業の慣れ等によって作業効率を上げる事は可能であるが、機械的にもネジジャッキの速度を上昇させるなどの対策を施しておく必要がある。

(7) 施工結果のまとめ

以上の結果をまとめると次の通りである。

- ①ドラムカッターとリングカッターの組合わせによるカッター機構は $2.85\text{m} \times 2.85\text{m}$ という実機寸法においても切羽の安定を保持できる。
 - ②掘削範囲内からの裏込め注入によってテールボイドの完全充填が可能であり、周辺地盤の変状を抑制する事ができる。
 - ③ピッチングはシールドジャッキの選択、ローリングは偏向ジャッキの使用によって修正可能である。またピッチングはカッター回転方向によっても修正できる可能性がある。
 - ④中折れ、オーバーカッターの使用によって半径80m、100mの曲線施工が許容蛇行誤差の範囲内で施工できた。
 - ⑤機械負荷については下部カッターのトルクが大きいのが特徴である。推力、推進速度は円形シールドと変わらない。
 - ⑥矩形セグメントの組立はネジジャッキを使用した機構によって可能であるが、さらにスピードアップを図る工夫を施した方がよい。
- 以上の諸点より、本工法がシールドトンネル工法として成立することを実証できた。

5. あとがき

泥水式で矩形断面を掘削できるシールド工法の開発の最終段階として実証施工を実施した。実証項目の確認以外にも、実物大の機械による実験的施工からは種々の経験を得る事ができた。シルト・砂地盤1例のみの結果であり、今後の実際の施工においては新たな課題が現れてくるかもしれないが、この実証施工のデータを基礎として対処していきたいと考える。現時点で想定される課題は次の通りである。

(1) 礫対策

本機では $\phi 150\text{mm}$ 程度の大きさの礫であれば、チャンパーに取り込んで機内処理する事ができる。これ以上

の礫でも、転石のように出現頻度が低いものはカッター間にはさんで破碎できる事を確認している。しかし、河川下のように連続して礫が出現する場合はツースピットでの破碎はカッター負荷が大きくなるため困難である。ディスクカッターを装備すれば、破碎可能であろうと推測できるが小径ディスクカッターの破碎性能や耐久性などの確認を必要とする。

(2) 姿勢制御

正方形に近い断面であれば、ピッチング、ローリングとも制御できる事を実証した。しかし細長比が大きい断面の場合はローリング制御が苦しくなるのは言うまでもなく、今回のデータを基にしてクリアランス量や可動ジャッキの装備等を検討する必要がある。

(3) 土砂の堆積対策

今回の実証施工では円滑な掘進が可能であったが、チャンパー底面にはやはり土砂の堆積が認められた。到達立坑の土留杭手前の約1.5m区間は泥水の循環を止めて空押ししているため、その大部分は空押し時に発生したものと推定されるが、礫地盤等への展開を考えると非常時用の対策をとっておく必要がある。排泥管を増設し、バイパス運転時に排泥管を切り替えて切羽バイパスをかけチャンパー内の土砂を排出する方法が有効であろうと考えられる。これは従来技術の延長上にある方法であり、既に機械設計は終わっている。

(4) セグメント

実証施工ではトンネル間の切り拡げを実施するため、スチールセグメントを使用した。RCセグメントの使用も可能であり、既に隅角部に円弧形状を取り入れたセグメントを開発済みである。しかし、RCセグメントは工場設備等の関係でコストが高く、全体工事費に大きな影響を与えるため、より安価なセグメントが必要である。その対策として型鋼を利用したスチールセグメントを考案し、載荷試験を実施中である。

なお本ボックスシールド工法の実証施工はM-M-B(マイクロ・マルチ・ボックス)工法研究会で実施した。共同開発メンバーである大成建設(株)、(株)利根、三井造船(株)のご協力に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 大阪市交通局、鹿島・竹中土木・大豊特定建設工事共同企業体：大阪市地下鉄第7号線大阪ビジネスパーク停留所工事パンフレット、1995。
- 2) 石川旭：縦楕円シールドの施工、トンネルと地下第25巻5号、pp.47~55、1994.5。
- 3) 大迫健一、成田愛世、田野八郎：矩形土圧シールド工法

- の施工計画, トンネルと地下, 第 25 卷, 9 号, pp.17~20, 1994. 9.
- 4) 多田幸司, 谷口徹, 古川浩平, 中川浩二: ボックスシールド機の開発と施工性に関する実験的検討, 土木学会論文集, No. 480/VI-21, pp.157~166, 1993.12.
 - 5) 多田幸司, 中川雅弘, 古川浩平, 中川浩二: ボックスシールド工法における裏込め注入に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 504/VI-25, pp.51~60, 1994.12.
 - 6) 土木学会編: トンネル標準示方書(シールド編), 同解説, pp.90~92, 1987. 6.
 - 7) 栗原和夫: 泥水加圧式シールド工法, pp.11~12, 鹿島出版会, 1987.
 - 8) 佐々木道雄: わかりやすいシールド技術入門, pp.139, 土木工学社, 1983.

(1995.12.27 受付)

STUDY ON BOX SHIELD TUNNELING METHOD IN TRIAL FIELD OPERATION

Koji TADA, Toru TANIGUCHI, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

Recently, non-circular tunneling shields are being developed, and part of the research has focused on rectangular shields. After preliminary testing involving excavation and simultaneous grouting, a full-scale prototype fabrication and tunneling tests in actual ground were conducted. This trial operation was designed to solve the problems such as cutting face stability, steering, bearing load, curve tunneling, and assembling rectangular segments. This research confirmed the viability of the technique, and produced some interesting results concerning, for example, controlling rolling using deflection jacks, loads on the cutting heads, curve tunneling, and good flexibility to ground deformations.