

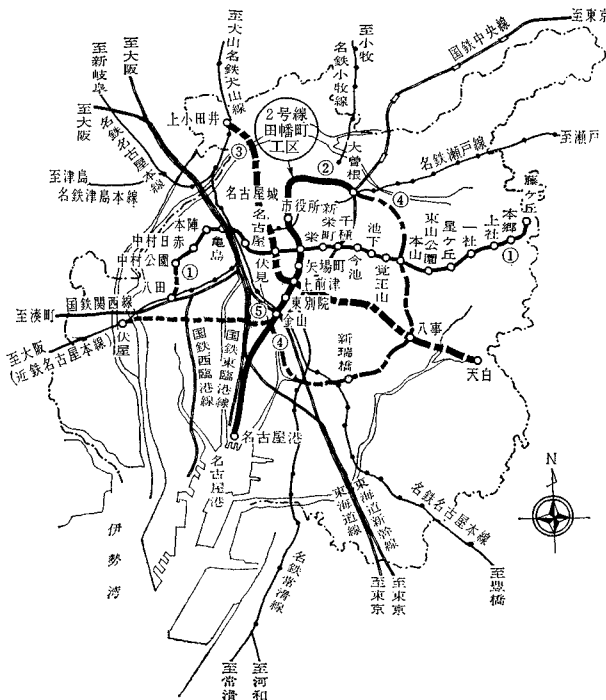
名古屋市における地下鉄曲線シールド工事

三 浦 侃*
 原 隆 男**
 奥 菌 清***

1 まえがき

大都市の過密化現象に伴う種々の問題は大きな社会問題となっているが、名古屋市においても、交通機関はも

とより、道路交通もますますその混雑さが激化している。そのため、従来から都市交通機関の近代化が検討され、地下鉄建設による交通体系の整備が進められてきている。すなわち、名古屋市交通局においても、地下鉄1号線のうち名古屋一栄間を昭和32年11月に開通させて以来、路線の延長を進めてきたが、図-1に示すように、昭和46年12月に2号線(名古屋港一大曾根間 15.1 km)の全線開通をみた。このうち、市役所一大曾根間の路線は、図-2に示すように、田幡町においてほぼ直角に曲がり、しかもその部分で小学校をはじめ密集した民家や交通頻繁な現道路下をとることとなった。そのため、曲線シールド工法を採用して安全かつ迅速に掘削するためのシールド機械を開発使用することとした。この工法による施工上の問題やセグメントリングの変形、地表沈下の特性などについて慎重に検討しつつ工事を進めた。ここでは、曲線シールド工事におけるシールド機械として、とくに考慮を払った点や施工実績などについて報告する。



線名	起点	終点	延長(km)	線種
第1号線	藤ヶ丘	八田	20.0	第1号線営業区間
第2号線	大曾根	名古屋港	15.1	同上計画区間
第3号線	上小田井	天白	18.2	第2号線営業区間
第4号線	大曾根	金山	16.8	第3号線計画区間
第5号線	伏屋	金山	7.3	第4号線計画区間
計			77.4	第5号線計画区間

図-1 地下鉄路線図

2. 現地地盤の諸特性

この路線のシールド工事は、図-2に示すように、黒川発進立坑から進められ、田幡中間立坑までは22%の下り勾配であり、それより名城到達立坑までは13%の上り勾配であって、それらのシールド区間での土かぶり厚は12~17mである。

1番線の曲線半径は $R=400\text{ m}$ 、シールド区間延長は $l=462.4\text{ m}$ 、2番線のそれらは $R=380\text{ m}$ 、 $l=425.4\text{ m}$ である。シールド工法によって掘削されるトンネル断面直径(すなわち、一次覆工外径)は $6\text{ m } 400$ の円形である(図-3参照)。

当工区の地質は図-4に示すように、地表から沖積層(粘性土および中~粗砂)、その下部に発達する洪積層よりなり、さらに、洪積層は上部の大曾根層(小礫・シルト分を含む、 N 値 20~30

* 正会員 名古屋市交通局高速鉄道建設部長
 ** 名古屋市交通局高速鉄道建設部第二工事事務所長
 *** 正会員 (株)奥村組名城田幡出張所長

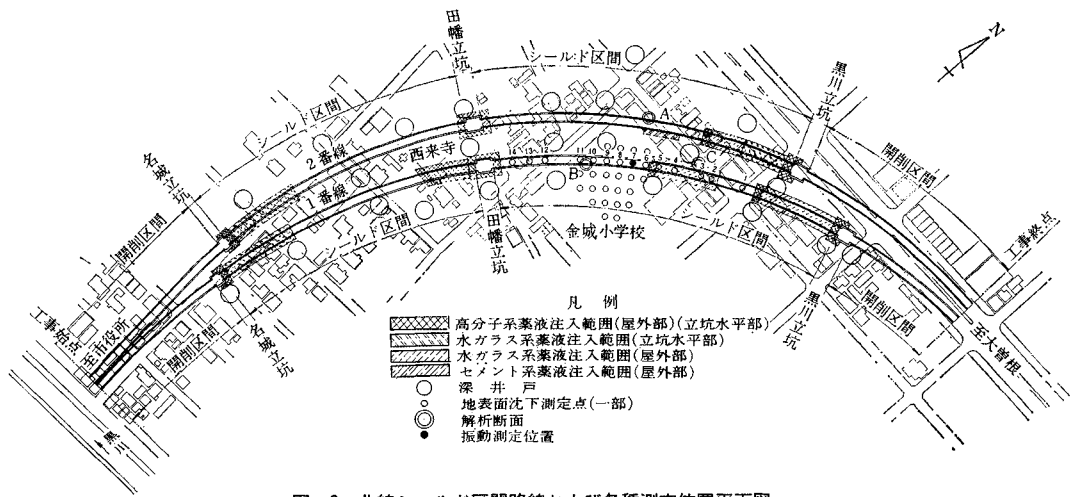


図-2 曲線シールド区間路線および各種測定位置平面図

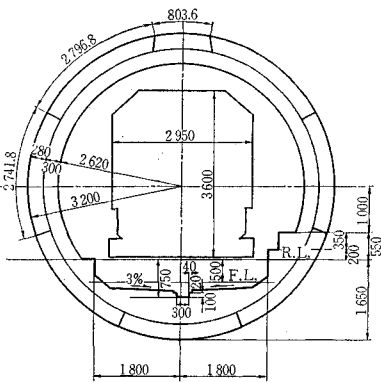


図-3 トンネル断面図

程度の中～細砂の砂層と2~6 cm φの円および角のチャート礫からなる砂礫層と、下部の熱田層(N値10~20程度の粘性土層およびN値40以上の砂層)に分けられる。なお、調査ボーリング中にボーリング孔の崩壊・漏水が多く認められ、シールド切羽の崩壊や地表陥没などの起こる可能性が予想された。

径500 mm、深さGL-30 mの井戸6本を用いて行なった揚水試験の結果、平均透水係数として 1.0×10^{-4} cm/secの値が得られた。揚水量は、揚水開始から1日目800 l/min、2~5日目までは500 l/min、6日目以後は300 l/minとなり、影響半径は1640 mとなった。また、地下水位はGL-12 m程度であった。

圧気工法のために行なわれた地盤の漏気試験の結果、圧気圧0.6~0.8 kg/cm²で切羽面積34.0 m²に対して

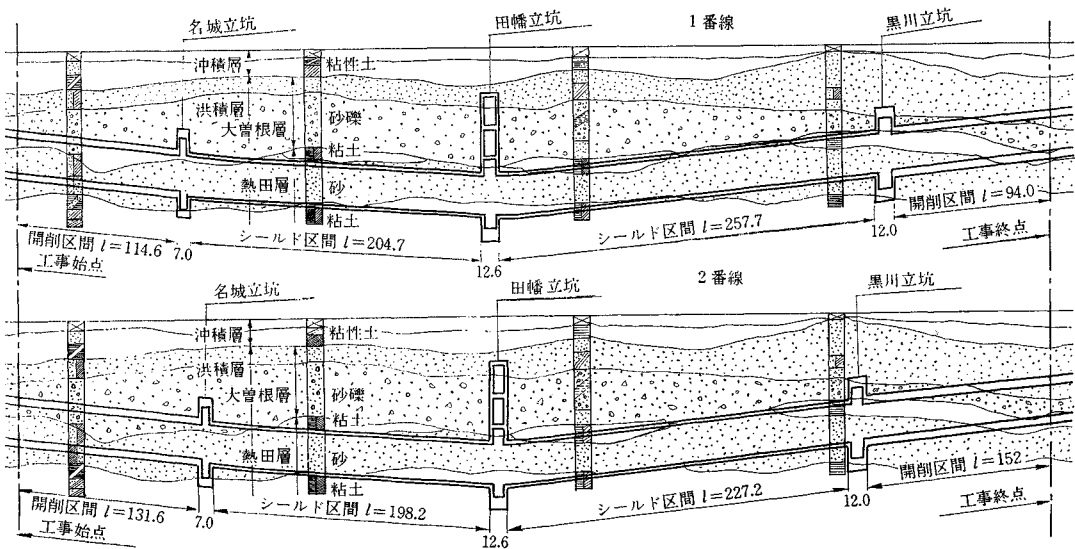


図-4 路線縦断面および地質図

140~180 m³/min の空気消費量にあたるような非常に大きい透気係数が求められたが、エアロスを見込むと多量の送気を行なう必要があり、そのために、エアプロ現象を起こすことが心配された。

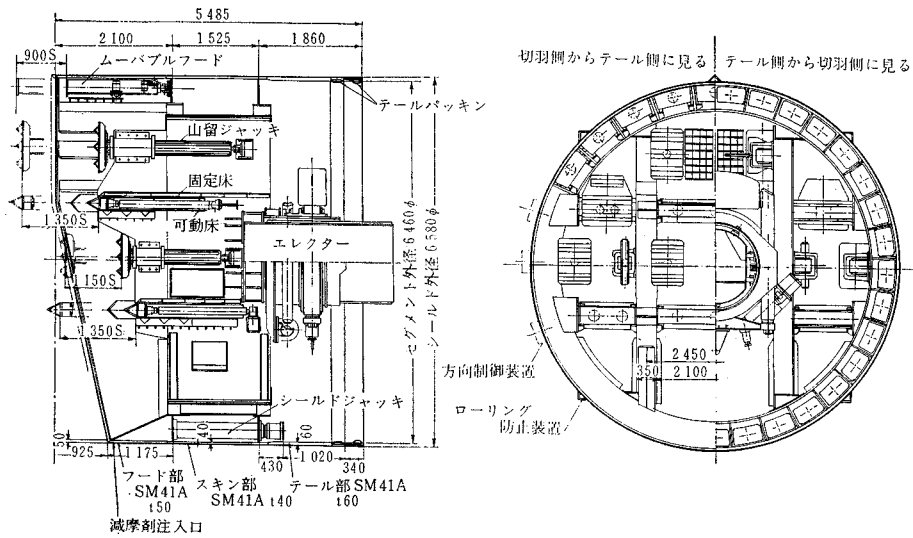
トンネル掘削に伴う地表沈下の解析に必要な地盤の変形特性を求めるために、田幡立坑掘削時に立坑を利用して各地層ごとに地盤変形試験（平板載荷試験・載荷板直径 30 cm）を行なった。土のポアソン比を 0.3 として各荷重—変形曲線のほぼ直線部分に対する変形係数 E_s を、弾性理論式から計算した結果を各深度において示すと、表—1 のようである。同時に、標準貫入試験から得られた N 値と、 $E_s=7N$ なる関係を用いて求めた変形係数の値を示したが、これらの値にかなりよく合っていることがわかる。

表—1 各土層の変形係数

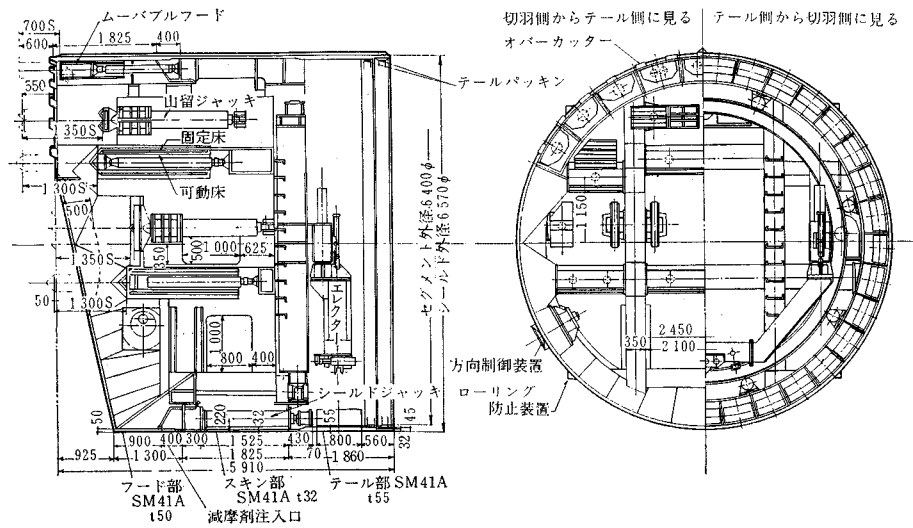
深度 (m)	土質	N 値	変形係数 E_s (kg/cm ²)	
			N 値による値	載荷試験による値
- 6.0	シルト質砂	22	154	160
- 9.0	砂 礫	50	350	336
-11.3	シルト質砂	50	350	385
-15.1	砂質シルト	27	189	243
-19.0	シルト質砂	20	140	141

3. シールド機械の特徴

シールド機械の構造はトンネルの構造と路線の地形的および地質的条件により種々異なるものであるが、当工区で用いたシールド機械（1号機・2号機ともに総重量 160 t）を示すと、図—5, 6 のようである。いずれも曲線



図—5 1号機シールド一般図



図—6 2号機シールド一般図

半径の比較的小さい曲線部におけるトンネル掘削のために、直線施工の場合に比べて振動、余掘りないしは地盤のゆるみなどが多くなることが予想され、また、施工上にも、いろいろな問題が出てくることが考えられたので、シールド機械の製作にあたっては、とくに次のような点に考慮を払った。

① シールド機のフード部をカーブ方向に曲げるとともに、スタビライザーを両側に取り付けて方向制御を行なう（図-7.8 参照）。

② シールド機が方向を変える場合、本体にかなりの側面土圧を受けるため、シールド機の縦ばりはもちろんのこと、横ばりを取り付けることにより剛性の高い構造にする。

③ シールド機械の推進ジャッキの容量については、曲線施工による貫入式片推工法における曲線部での抵抗の増加を考慮して、直線施工に対して一般的にとられている推力 $50\sim 60\text{ t/m}^2$ に対し、約 50% 増の推力 $100\sim$

120 t/m^2 を考え、切羽面積に対して 4000 t とする。

④ テール長は、直線用では通常、セグメント幅の 2 倍程度であるが、ここでは曲線部での方向制御に対する抵抗を減少させるために、セグメント幅 800 mm の 1.25 倍に余裕 70 mm を加えた 1070 mm を確保するように 1370 mm と短くする。

⑤ 山留め構造については、自立性があまり望めない砂礫層で、かつ、切羽付近に偏圧を生じさせるような曲線施工を行なうため、各部が完全な山押えができる頑丈な構造とし、コラムジャッキには地山を一定の力で押えることのできる同時後退油圧回路を設け、上段コラムジャッキは観音開き構造とする（図-5.6 参照）。

⑥ 貫入式片推工法のためにフード部に相当大きい土圧がかかることを考えて、フード部の補強として先端を特殊加工し、全周にオーバークッターを設けた。したがって、シールド機械貫入時には、オーバークッターでまず地山を荒らすことにより、直接フード部に大きい土圧がかからないようにする。

⑦ 全線曲線施工のために、直線施工と比べて、シールド推進時に地上に伝わる振動がかなり大きくなると考えられる。地山との摩擦抵抗を減少させ、推進時の機械および地上振動を小さくするために、フード先端部外周に直径 10 mm の潤滑剤流出口（1号機 60 か所、2号機 56 か所）を設け、集中潤滑装置によってシールド推進と同時に全孔から一定量の潤滑剤を給出する。なお、

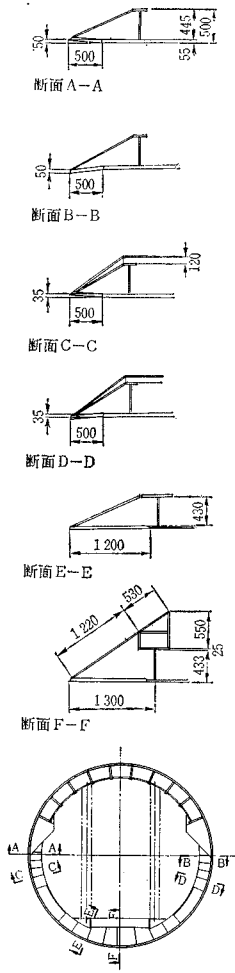


図-7 フード先端部詳細
(2号機シールド)

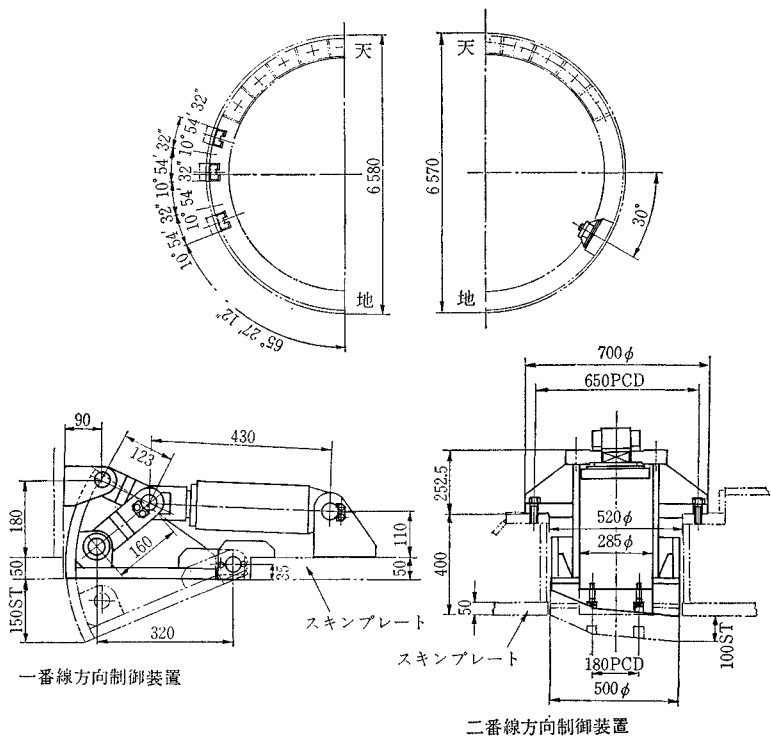
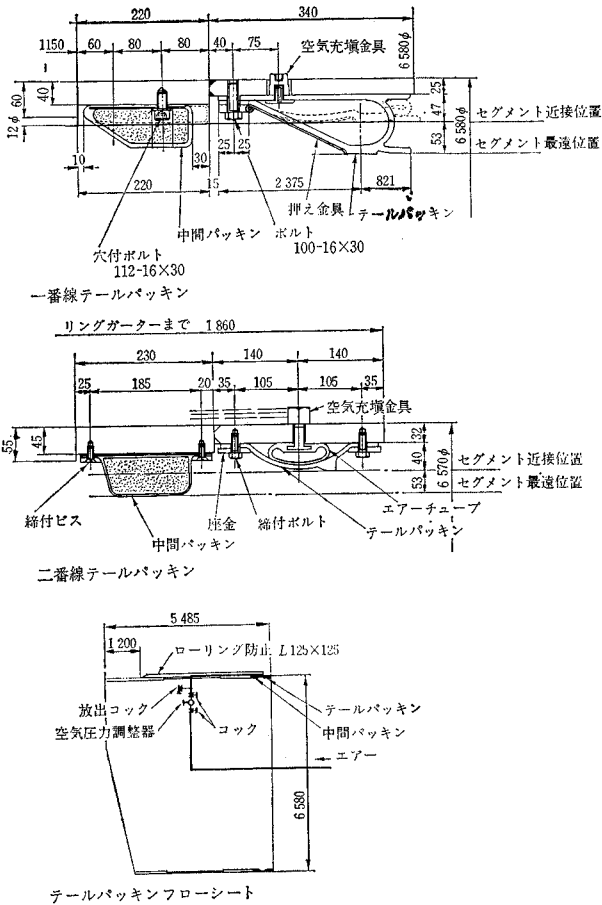


図-8 方向制御装置



図—9 テールパッキング一般図

1号シールド機の油圧系統内にアキュムレーターを取り付け、油圧の変動によるシールド機械の振動を減少させることを考える。

⑧ 裏込剤注入作業時の注入能率の向上をはかるためエアモルタル剤を使用するとともに、シールドテール部に設けたテールパッキングの構造は二重構造とする。すなわち、一段目のパッキングは、いつでも取替えができるスポンジ構造とし、二段目のパッキングは、空気注入式のチューブ式構造として、裏込注入剤の漏出を徹底的に防ぐとともに、曲線施工により荒されたシールド機械外周の地山との空隙の早期充てんをはかる(図—9 参照)。

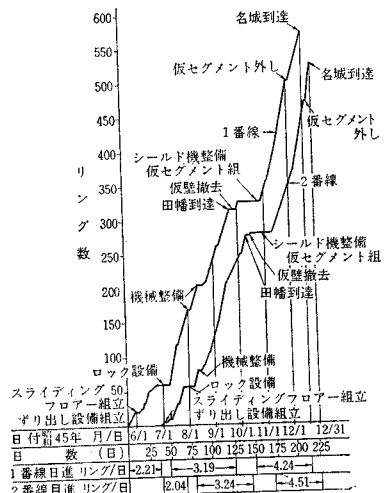
⑨ セグメントの構造は、シールド推力 4000 t に耐えうる平板鉄筋コンクリートセグメントを使用し、このセグメントの坑内での組立てに使用するエレクターの操作に対しては、従来の有線操作方式における故障の多発、および作業中操作線の移動の困難さなどによって、間接的に起こる切羽の崩壊や裏込注入の充てん不良などを防ぐために、無線操作(テレコントロール)と有線操作の

二段がまえとする。

4. 施工実績と地表沈下、セグメント変形の実測値

曲線シールド工事のために特別な施工法がとられたわけではなく、直線シールド工事の場合と同様に、地下水水位低下工、圧気工、薬液注入工、掘削およびシールド推進、セグメント組立て、裏込注入工、止水工などが逐次行なわれた。しかし、曲線シールド施工をスムーズに行なうためにシールド機械に対して種々の考慮が払われたため、その構造上および操作上の問題に関連して、とくに掘進時にいろいろな施工上の問題点が生じた。これらについては後述するが、ここでは、掘進実績および掘進に伴って起こった地表沈下およびセグメントの変形の実測値だけを示しておく。

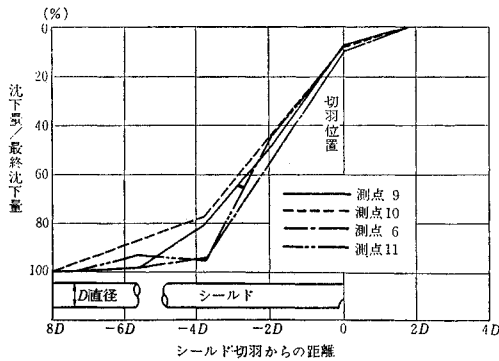
掘進実績を示すと 図—10 のようである。シールド発進よりロック設備を設置するまでは無圧気掘削であるため、山留に時間を要し、ずり出し設備が不完全で作業能率が落ち、また、スライディングフロアー、ずり出し設備の組立てに要した日数も含まれているため、日進 2.0~2.2 リング/日と非常に遅かった。ロック設備設置には 12 日程度を要し、設置後から田幡到達までは平均 3.2 リング/日の進行であった。田幡立坑発進後 50 リング程度は下段の粘土が堅く、また、粘土の表層の湧水が多くて掘削は困難をきわめたが、粘土が



図—10 掘進実績図

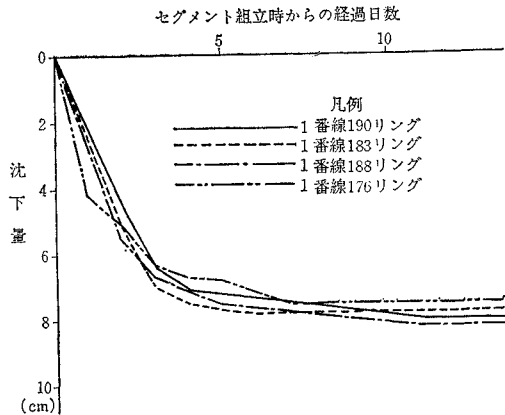
なくなるとともに作業が進んだ。名城立坑到達前 50 リング程度から、上端に礫が出てきたが、山留を完全に行なったため、ずり出しが容易に行なわれ、掘進速度を増

し、結局、田幡一名城間では平均 4.2~4.5 リング/日の掘進実績となった。黒川立坑発進より名城立坑到達までの平均日進は、1 番線 2.68 リング、2 番線 2.84 リングであった。当工事では、全線が曲線であるため、同じ条件のもとでの直線シールド掘削による地表沈下やトンネルの変形と比較することはできないが、地表沈下やセグメントの変形は曲線シールドでも直線シールドの場合と同じ傾向を持つことが考えられる。しかし、曲線施工のために余掘量が多くなり、また、掘削面や切羽における土の乱し方や支保の状態が変わり、偏圧を生じさせ、その結果、地表沈下量やセグメントの変形量が多くなる恐れがあると考えられたので、地上構造物に与える影響の監視、施工管理や安全性のチェックなどのために、地表沈下とセグメント変形の実測を行なった。



図一10 切羽進行に伴うトンネル直上地表沈下量の変化

シールドの前進による地表沈下の進行状態を、シールド中心直上にあるいくつかの測点(図一2 参照)について、それぞれの最終沈下量に対する割合で示すと、図一11 のようである。この図によると、切羽後方 2D の点(切羽通過後 2D だけ離れた点)で約 50%、4D の点で 90%、6D の点で約 95% の沈下が終了しており、また、切羽が 2D ほど手前に接近した時点から沈下が



図一12 セグメント天端の沈下状態

始まっていると考えられる。なお、最終沈下量の 95% 程度が終了するのは、シールド切羽通過後約 2 週間であり、最終沈下量は大きい所で 60 mm 程度、立坑周辺および薬液注入域では 25~30 mm 程度、全線にわたって平均 40 mm 前後の沈下量を示している。一方、セグメント天端の沈下(図一12 参照)は、セグメント組立時からほぼ 2 週間で終わっており、地表沈下の特性と、よく一致している。最終的にはセグメントリングの沈下量はトンネル全体にわたって平均しており、セグメント天端で 8 cm 程度、下端で約 1 cm であって、セグメントとしては上下方向に 7 cm 程度の直径変化を生じた。この量は、リング外径 6.40 m の約 1.1% にあたる。

5. シールド機械の問題点

3. で説明したように、当工区に使用したシールド機械は、曲線施工に適するように種々考慮されて製作されたが、実際に使用して構造上および操作上の問題点がでてきた。これらの問題点は後述の施工上の問題点と相互に関連して、それらすべての点から今後この種の工事に対する配慮や対策が検討されるべきであるが、ここでは使用実績に基づいて曲線用シールド機械として今後考慮すべき問題点を述べる。当然、直線トンネルに対するシールド機械と共通する構造上および操作上の問題点もいくつかでてきたが、それらについては割愛する。

(1) 推進との関連

推力としては当初切羽面積 1 m² あたり 110~120 t が適当と思われたが、推力の配置については十分な考慮をしなかった。当工区のように曲線半径が小さく、常に左カーブするような場合には、ジャッキの推力を右下方を大きく、左下方を小さく製作するほうがよいのである。フード部を曲げ構造とするだけでは、曲線施工に十分対処できるとはいえないが、多少有効に働いたと思われ、曲線半径の小さい場合には、曲げ構造としたほうがよい。

方向制御装置は曲線施工に対して有効であると考えていたが、当初の予想より有効に働かなかった。その理由としては、方向制御装置に粘土が付着して抵抗が小さくなったためと思われる。この対策としては、方向制御装置の出し入れを容易にし、装置に付着した粘土を取り落せるようにするとともに、装置の抵抗面積をもう少し大きくするほうがよいと考えられる。一方、潤滑剤給出装置については、製作時に流出孔が詰らないように十分考慮されたが、田幡中間立坑到達時には、かなりの孔が詰っていた。今後、推力を有効に使うためには、この孔詰りを完全になくすのが一つの課題であろう。

(2) 山留との関連

1号機, 2号機ともに上段左右の切羽面積がかなり大きく, かつ, 地質の変動と曲線施工に伴う偏圧状態によって余揺量もかなり変動し, 山留がむずかしかった。これに対しては, この部分に可動床(デッキ)を設ければよいように思われる。上段中央の観音開き構造は非常に有効に働いた。

全般に, コラムジャッキの取付部分が弱かったために大きい偏心荷重が作用して, 推進時に同時後退油圧回路が有効に働かなかった場合には, ほとんどコラムジャッキの取付部分に破損が生じた。その対策としては, 偏心荷重が作用した場合でも, ジャッキが偏心しないようなガイドを取り付けることが考えられる。

(3) 振動防止装置との関連

シールド機械の推進に伴うシールド機上と, その直上地表面での振動測定(測定位置は図-2参照)の結果は表-2のようであって, 推進時の油圧の変動からくるシールド機の振動はかなり大きい。地表面における振動はシールド機械の振動に比べて, A, A' タイプの振動では1/6, B タイプの振動では1/9~1/10に減少するが, とくに振動防止装置を取り付けていない2号機では振動が大きく, 地表面では公害防止条令に基づく振動基準値を多少オーバーすることがあった。このことから判断してこの種の地盤で曲線施工をする場合には, 必ず振動防止のためのアキュムレーターを取り付けるべきであり, また, 地山とシールドとの摩擦を少なくする潤滑剤給出装置も取り付けるべきであると考えられる。

表-2 振動測定結果

区 分		(mm/sec)					
		1号機		2号機			
		タイプA	タイプB	タイプA'	タイプB'		
機械振動	鉛直	V	0.59	0.25	1.11	0.78	
	水平	T	0.32	0.16	1.78	1.34	
	水	L	0.64	1.05	3.18	3.64	
機械振動ノイズ		V=0.05, T=0.04, L=0.04		V=0.15, T=0.14, L=0.06			
地表地盤振動	シールド上	鉛直	V	0.14	0.09	0.18	0.14
		水	T	0.01	0.05	0.34	0.27
		水平	L	0.10	0.11	0.55	0.39
	シールド後方20m	L	0.11	0.10	—	—	
		L	0.19	0.08	—	—	
地盤雑微動		V, T, Lともに0.02		V, T, Lともに0.04			

注: L: シールド推進方向, T: Lに直角方向, タイプA: 周期約0.04~0.05 sec, タイプA': パルス幅約0.05 sec, 繰返し周期約0.1 sec, タイプB: パルス幅約0.05 sec, 繰返し周期0.2~0.6 sec.

(4) その他

直接には曲線施工とは関係ないが, 余揺りの増大や地

山をゆるめることによる地圧や地表沈下量の増大をおさえるために, スムーズな施工を目的として考えられた各装置にも, いろいろな障害を生じた。当機械に用いられた空気調圧式の特種パッキングは有効に働いたが, 繰返し使用のために, ひとたび破損すると裏込剤の漏出が激しく, とくにエアーモルタルの場合にはテール部に溜り, 排水ポンプや排水管が詰り, その処置に労力を要した。今後, この特種パッキングの材質を変えるか, 破損防止装置を取り付けることを考えるべきであろう。油圧の配管はシンフレックスホースでなく, すべて鉄あるいは銅パイプとしたほうが破損が少ない。ジャッキの開閉はバルブよりもハンドルのほうが作業性にすぐれている。中段コラムジャッキは, 作業性を重視して4本としたほうがよい。下段の掘削は手掘りとせず, 半機械式とするのがよい。

6. 曲線シールド工事施工上の問題点とその対策

地山の地質やシールド機械の特性との関連において施工上の問題点が論じられるべきであり, この場合にもとくに曲線施工のみに対して云々される問題点というものはそれほど多くなく, いずれの問題点も直線施工の場合とも関係している。施工上の問題点として当工区で考えられる項目は, 振動, 余掘りまたは切羽の肌落ちと山留方法, 推進ジャッキとセグメント構造, ローリング防止, セグメント組立作業の能率化, 蛇行の修正, セグメント組立て後の漏水, 裏込剤注入剤とテールパッキング, などであるが, これらのうち, 曲線施工に関係深いものについて, いくつか述べることにする。

(1) 振 動

シールド推進時に地上に振動を伝えることはさきに説明したが, とくに曲線シールド施工の場合には, 直線シールド施工に比べて, かなり増加する傾向にある。地盤構成によって, その増加比率はかなり違ってくるが, 大体30~50% ぐらい振動の増加がみられる。この地上への振動を減少させることが曲線シールド工事の大きな課題の一つと思われるが, 当現場で用いたようなシールド機の配管ルートに取り付けられたアキュムレーターやフード外周からの潤滑剤の注出は, かなりの効果を示した。しかし, これらにもなお未解決の問題が残されている。すなわち, アキュムレーターの構造からして油圧ポンプの最大圧が350 kg/cm²程度に限定されることや, より有効な潤滑作用が期待できる潤滑剤の質と量および注出場所などについて, さらに検討する必要があるとともに, 推進ごとの注出施工の管理が十分にできる方法, たとえ

ば、推進との連働方式などの研究が必要である。

(2) 余掘りまたは切羽の肌落ちと山留

切羽の地盤構成によって山留方法についてはかなり考え方が変わってくるが、一般的にいて、曲線シールド施工の場合、振動の増大、フード部の貫入推進や方向転換による片押し、推進ジャッキの増大などのために、切羽の肌落ちが一般より多く、山留装置の構造をそれらに合せて考える必要がある。とくに、ムーバブルフードの構造については、切羽の土質からのみ考慮するのではなく、シールド推力とバランスのとれた構造にする必要がある。

(3) ローリング防止と蛇行修正

一方向のみの曲線シールド施工の場合、シールド機械のローリングはやむを得ないことと思われるが、ローリングが非常に大きくなってくると、坑内でのシールド機械の軌跡の測量に困難をきたすことはもちろんのこと、トンネルセンターの割出しに誤差を生じるようになる。さらに、これらは蛇行修正にまで影響を及ぼすので、ローリングを極力小さくする必要がある。当現場では、1

番線シールド機で、黒川一田幡立坑間で曲線の外側(右側)に $13^{\circ}28'$ 、田幡一名城間で $10^{\circ}38'$ ローリングを起こした。また、蛇行は上下方向にそれぞれ10cm弱、左右方向に10cm強であったが、これをいかに小さく施工するかは、測量方法はもちろんのこと、機械の構造や各部の装置などにも今後かなりの検討を加える必要があると思われる。

7. おわりに

曲線シールドトンネル工事におけるシールド機械でとくに考慮が払われた点および施工実績について述べ、機械の使用実績に基づくシールド機械の評価と今後の改良点、施工実績に基づく施工上の問題点とその対策について検討した結果を報告した。本報告が今後この種の工事に際して参考になればさいわいである。

終りに、本報告をまとめるにあたり、種々ご討議・ご教示いただいた名古屋大学土木工学教室の川本眺万助教授をはじめ、名古屋市交通局 近藤真澄、横井汎両氏に心から感謝の意を表する次第である。

(1971.7.22・受付/1972.1.25・再受付)

鋼橋設計資料

橋梁研究会編

B5・¥1,500

新設計標準に基づく改訂版/新幹線等の新資料を豊富に採り入れ、使用上便宜をはかる解説をさらに充実した。

建設機械●土木工学叢書

土木学会 監修 加藤三重次 著

B5・¥4,000

建設機械の性能、構造、施工法から作動原理の解説に至るまで、最新の技術を盛りこみ平易かつ系統的に解説した最高権威書。

集成クロソイド表

星埜 和/春日屋伸昌 著

B4・特価¥15,000

クロソイド曲線の設置と設計に必要な数値表を電算機による計算結果をオフセット印刷して提供。例題と図面により解説。

コンクリート工学演習

村田二郎 監修

A5・¥1,200

五択択一の問題形式で示し、詳細な解説を加え、当然記憶しておくべき、データ、法則を記載、コンクリート技士受験参考書。

講義と演習 ●近刊

コンクリート工学

堺 毅 著

A5・予価1,500円

本書は主としてコンクリートの基礎的事項に重点をおき、大学教科書向けに体系づけたもので標準示方書に基づき、その理解と適切な運用を詳述した。また演習問題を豊富にもりこみ、解説および解答を付して講義の効果を高め、最新の文献と数多くの図表をとり入れ学習の便をはかった。

全改訂版/ ●3月下旬刊

土木材料実験

同編集委員会編 委員長 国分正胤

A5・1,500円

「土木材料実験」の実験項目のすべてを網羅、各試験項目ごとに試験の目的、試験方法、参考資料からなり、試験方法は実験の操作の順を追って詳細に記され、適切な注意事項を与え、容易に実験を完遂することができる。本書は全面的に改訂した最新版。

東京都港区赤坂1-3-6

技報堂

(電)585-0166 振替 東京10