

シールド工法による大阪市営地下鉄谷町線阿倍野駅の建設

Construction of shield tunnel at Abeno station, Tanimachi
Line of the Osaka subway systemたけ やま たかし いし だ よし はる
竹 山 橋* 石 田 良 治**

1. はじめに

我が国の地下鉄建設は50有余年の歴史を有し、その建設工法としては初期には開削工法が多用されてきたが、シールド工法は約20年前から使用され始め、以来急速に増加してきた。これは過密化の著しい大都市においては既設地下鉄道との立体交差や地下埋設物等の都市施設との関連などから地下鉄トンネルは深層化の傾向にあり、また路面交通の確保の必要性や騒音振動の防止対策上からもシールド工法の採用が要請される社会情勢となってきたためである。

大阪市営地下鉄においても現在86.1kmの営業路線を有しているが、そのうちシールド工法による施工延長は12.8kmであり、昭和39年に初めてシールド工法を採用して以来21の工区で実施している。昭和55年11月に開通した谷町線天王寺～八尾南間のうちで施工した阿倍野シールドは路上の厳しい制約条件から延長582mの区間を駅を含めてのシールド工法により施工した。以下にその計画から施工までの概要について述べる。

2. 工法の選択

当工事区間は道路幅員が23.6mと狭いうえに車道部の中央には路面電車が運行されており、両側の歩道部にはアーケードが設置されている。また、沿道には百貨店、銀行あるいは中小規模の店舗が軒を連ね、自動車および歩行者の通行量も多い。したがって、当区間を開削工法で施工する場合には次のような問題点がある。

① 現場周辺には適当な迂回道がないため、工事中の道路占用は路面交通への影響が大きい。

② 交通量の多い時間帯を避けると作業は自ずと夜間、特に深夜に限られてくるが、この時間帯の工事騒音や振動の発生は沿道住民への影響が大きく、住民の理解と協力を得ることは難しい。

③ 駅部の構築幅は16.5mとなり車道幅員より大きく、杭打ち作業は歩道部分にかかるため、アーケードの一時撤去や商店に対する営業補償の問題が生じる。

④ 沿道には土砂搬出や材料搬入の作業基地となる空地が皆無である。

⑤ 路線の線形上、発進立坑付近において延長約60mにわたり民家下を通過しなければならないが、開削工法による場合には一時立退きを必要とする。

このように開削工法による地下鉄建設には難問が山積している。これらの問題点を解消するためにはシールド工法の採用が適当と考えられるが、その採用決定にあたっては特に次の事項を十分検討しておかなければならない。

- ① シールド工法に適した地盤であるか。
- ② 駅を含めてのシールドをどのような型式にするか。
- ③ シールド工事の作業基地の確保は可能か。
- ④ 工事費や工程はどうか。

これらのうち③のシールド作業基地については、シールドマシン搬入口以東の地下鉄建設と同時施工される阪神高速道路大阪松原線の建設用地を使用することが可能である。また、④の工事費用は開削工法に比べてやや割高となるが工程的には約7ヶ月の短縮が見込まれ、当区間が天王寺～八尾南間の全体工程のあい路となっていることから、この工期短縮の価値は大きい。①および②の検討内容については次章以下で述べる。

3. 地質概要

地盤条件は工法選定上最も基本となる要素であり、地盤条件によってはシールド施工が困難となることもあるので、事前調査は十分に行わなければならない。

当工事施工地点の地盤は大阪平野の中央を南北に走る中位段丘の一部で、いわゆる上町台地の洪積層である。地盤高はOP+17～18mで地層は砂質土層と粘性土層とが互層をなしており、各層とも比較的良好に締まって安定した土質である。

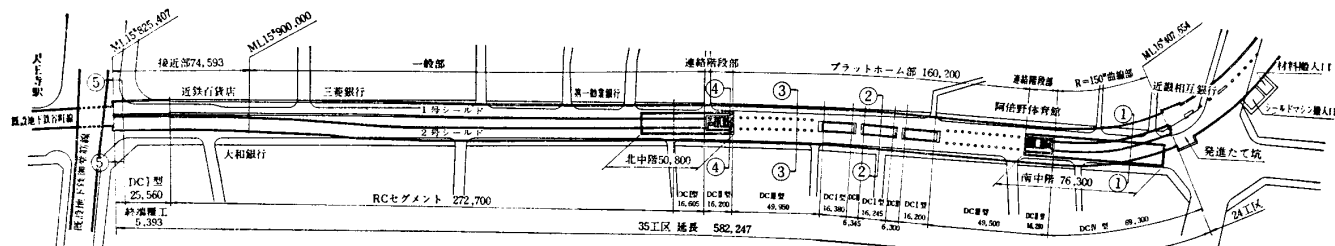
図一1の縦断面図に示すように単線型シールドで土かぶりを12mとすると全体を通じて、切羽断面の上部2/3に第1粘性土層、下部1/3に第2砂質土層が露出する。この場合、シールドクラウン上部に粘性土層を3m程度かぶるため、これがカバーロックの役目をし、圧気効果も高く、また、下部の砂質土層はシールドや切込部の支持層として適している。各層の土質試験結果を表一1に、粒度分布を図一2に示す。

第2砂質土層は4～5mの被圧水を有しているが、透気試験により有効送気圧0.55 kgf/cm²、限界圧気圧0.73

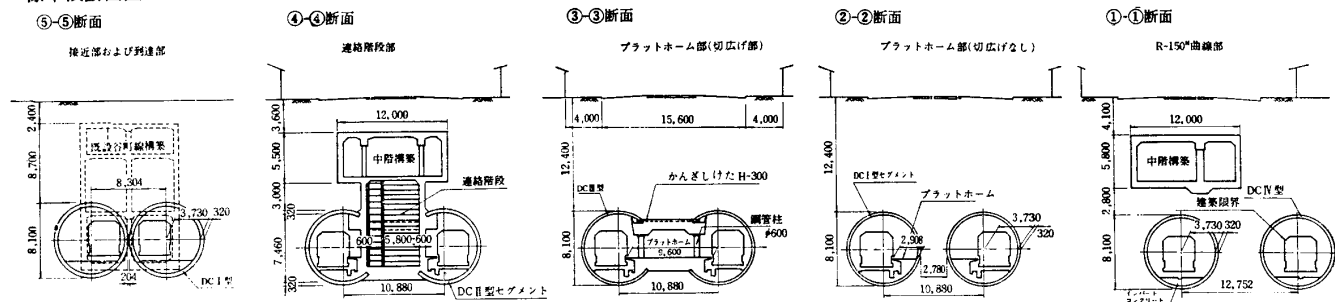
*大阪市交通局高速鉄道建設本部計画部長

**大阪市交通局高速鉄道建設本部計画部改良課

路線平面図



標準横断面図



縦断面図

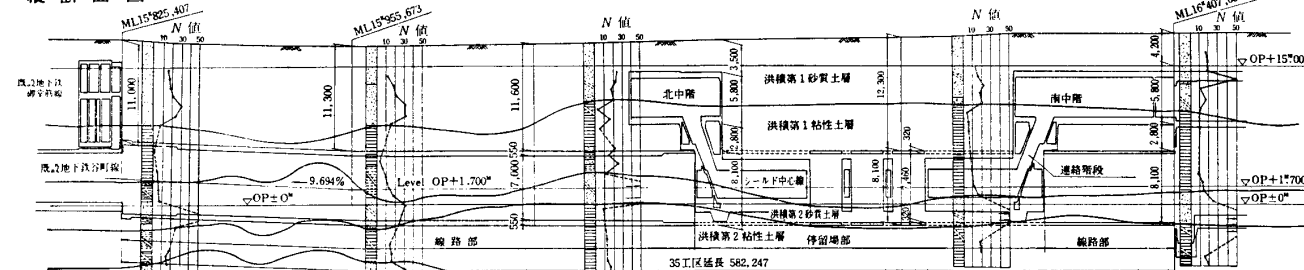


図-1 線路平面、標準横断面、縦断面図

kgf/cm²という値を得た（図-3、4参照）。この結果から、シールド掘進時の坑内圧気圧を0.6 kgf/cm²前後に設定した。

4. シールド型式の選定

シールドを複線または単線並列のいずれにするか、ある

いはその断面寸法をどうするかにより、次のような案がえられる（図-5参照）。

4.1 複線シールド案

シールド径10m程度の複線シールドにより全区間を施工し、駅部ではこの両側に径5mのシールドを併設してシールド間を地下で切り広げてプラットフォームを造る案である。

表-1 土質試験結果一覧表

層区分	層位置 GL(m)	層厚 (m)	土質そのほか	粒度分析 %				貫入試験 N値	自然含水比 w_n (%)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	密度 ρ_t (t/m ³)	間隙比 e	一軸圧縮強度 q_u (kgf/cm ²)	粘着力 c_u (kgf/cm ²)	鋭敏比 S_t	圧密降伏荷重 p_c (tf/m ²)	水位 (m)	透水係数 k (cm/s)
				礫	砂	シルト	粘土												
第1砂質土層	0 └ -7~10	7~10	褐色または黄灰色、中~粗粒砂まじり砂質土	15 └ 20	60 └ 70	15 └ 20		20	16 └ 20			1.8						GL-3~4	1×10 ⁻³ └ 5×10 ⁻³
第1粘性土層	-7~10 └ -15~19	7~9	暗青灰色、砂まじりシルト、シルト質粘土	北中階部以北（砂分の混入多い）										1.0 └ 3.0	0.6 └ 1.0	4 └ 8	27~40 (10tf/m ² の過圧密)		
					10 └ 20	30 └ 40	50 └ 70	5 └ 10	60	80 └ 90	20 └ 40	1.8 └ 1.9	1.0 └ 1.3						
				北中階部以南															
					10 以下	40 └ 50	50 └ 60	5	80	100 └ 120	40 └ 60	1.6 └ 1.7	1.5 └ 2.8						
第2砂質土層	-15~19 └ -17~20	2~4	青灰~暗青灰色シルトまじり砂質土	20	50 └ 60	10 └ 20		50 以上	20			1.9						4~5 (被圧)	3.6 ×10 ⁻²
第2粘性土層	-17~20 └	4~10	暗灰~暗青灰色シルト質粘土、粘土質シルト		10 以下	50	50	15 └ 20	60 └ 80	110 └ 130	40 └ 50	1.5 └ 1.6	1.5 └ 2.0	3.0 └ 5.0	1.4 └ 1.6	6 └ 10	60~80 (40tf/m ² の過圧密)		

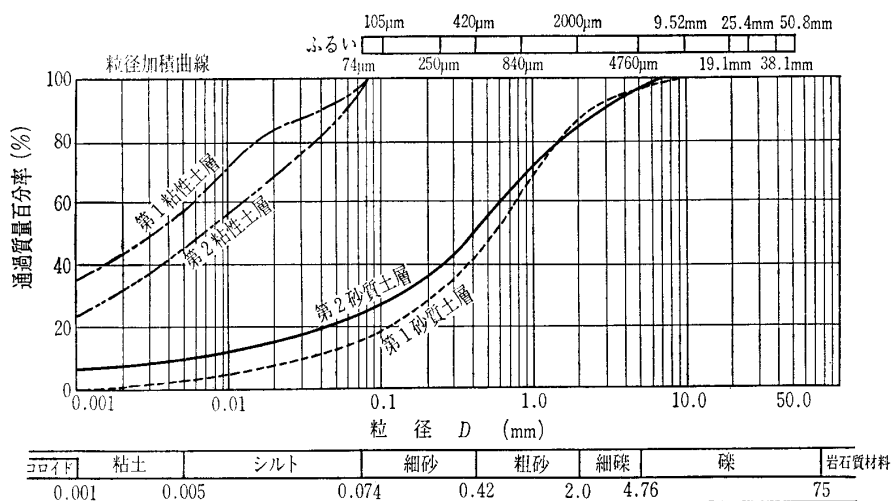


図-2 各層の標準的な粒度分布

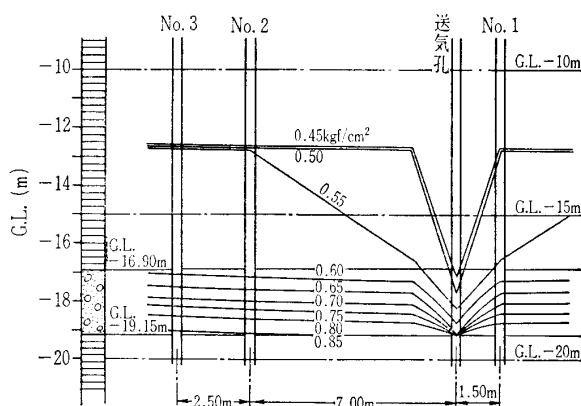


図-3 透気試験結果に基づく送気圧～水位降下状況図

この場合、両側のシールドを掘進するときに複線シールドの側部スプリングを緩めることやホームと中階を結ぶ階段部では沿道建物に接近しすぎるため施工が難しい。

4.2 単線シールド案

曲線部および駅部は径8.1mの単線シールドを並列させ、プラットフォームを各シールド内に設けるか、または両シールド間を切り広げて設置する。この場合には曲線部では軌道曲線半径120mに対し、大断面シールドの内空余裕を活

用してシールド曲線半径を150mにまで緩和できる。次に一般線路部では駅部断面のシールドでそのまま施工するA案と、径6.8mの線路部断面に縮小して施工するB案とが考えられた。しかし、B案では①駅部通過後シールド径を変更することは、新たなマシン製作や段取り替え等が生じ、工費、工程上得策でない、②到達部では既設構造物が一般的なほこ型トンネルであるため列車の通過を可能にするには、両シールドを相接する状態にしても、径6.8mのシールドでは切広げの必要がある、などの問題点がある。このため、径

8.1mの駅部断面シールドで全区間を施工するA案に決定した。

5. 駅の型式

5.1 プラットホームの型式

我が国のシールド駅の施工は現在まで既に十数例を数えるがこれらはすべて単線並列シールドであり、そのプラッ

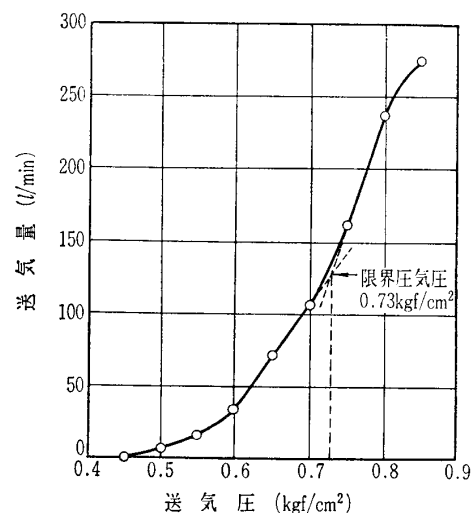


図-4 送気量～送気圧関係図

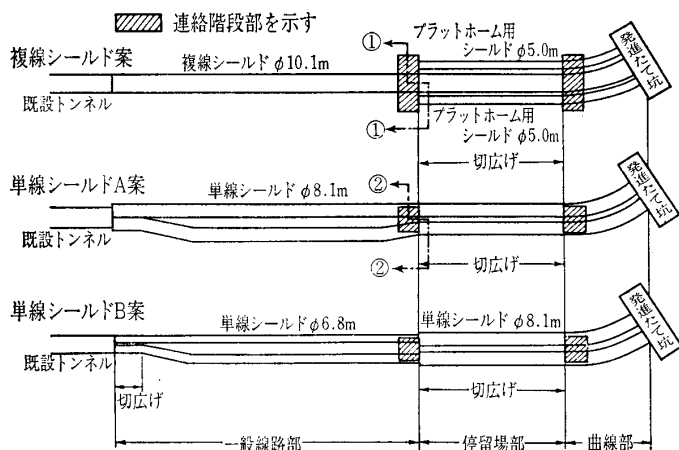
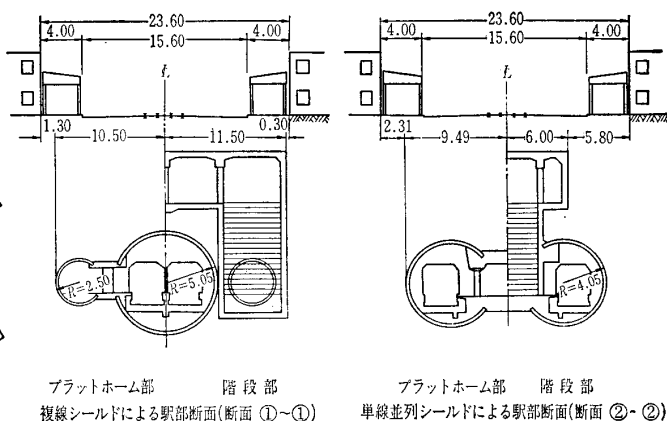


図-5 シールド型式の比較



No. 1292

トホームは各シールド内にサイドホームを設置する型式と、並列シールド間を切り広げて島ホームを造る型式とがある。一般的に大規模駅では島ホーム式、小規模駅ではサイドホーム式となるが、中間規模の駅では島ホームとサイドホームを組み合わせた複合式のホーム型式も用いられている¹⁾。

当阿倍野駅のプラットホームは8両編成の列車長を考慮して延長160mとし、ホーム型式は将来の乗降客数から判断して複合式とした。すなわち、両端階段付近の各延長48mは島ホームとし、中央部64mはサイドホームでその途中2か所に上下ホームを連絡する通路を設ける。

5.2 連絡階段の設置方法

我が国のシールド駅ではホーム両端末に立坑を設けて階段、改札口等の駅施設を設置するのが一般的であるが、この方法では深い立坑の施工となり、必然的に大規模な開削工事を伴う。一方、当シールドにおいては単線並列シールドを包含する大きさの立坑設置は狭い道路幅員との関係から不可能である。そのため、中階部に駅施設を収容し、この中階部とホーム部は別途につなぐ方法をとった。この方法によれば立坑とは関係なく浅い位置に中階部を造るため、開削工事の規模は大幅に縮小されるとともに、随意の位置で中階とシールドを取り付けることができる。この中階部は両側歩道上のアーケードに支障しない車道部分での施工とするため、構築幅を12mとした。

6. セグメントの設計

6.1 使用セグメントの種類

使用セグメントの材質は大きなジャッキ推力がかかると予想される急曲線部、切広げ工事を行う駅部、両シールドの接近により偏土圧がかかるとされる接近部においてはダクタイル鉄製セグメントを使用し、その他の一般線路部においては経済性の面から鉄筋コンクリート製セグメントを使用した。

セグメント外径を可能な限り縮小することは工費、工程、施工の安全性等あらゆる面から望ましいが、当シールドでは駅部断面を線路部にも使用するためなおさらである。駅部断面により決定されたセグメント外径は8100mm、セグメント高さは320mmである。

セグメント幅は900mmを標準とするが急曲線部ではこれを700mmまで縮小し、1リングおきにセグメント幅660~740mm(テーパ量80mm)のテーパセグメントを用いた。これに対し比較的曲線の緩やかな駅部では曲線用および蛇行修正用としての異型リングは板厚25~45mm(テーパ量20mm)のテーパプレートを使用した。また、駅切広げ部では頂部続けたへのスムーズな荷重伝達を考慮した突起部を有する特殊形状のセグメントを用いた(図-6参照)。

6.2 将来荷重に対する検討

当地下鉄建設区間の道路には将来計画としての地下街や

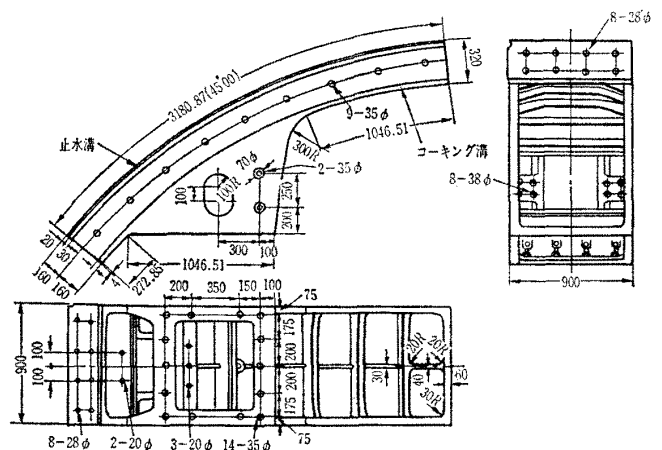


図-6 D型セグメント

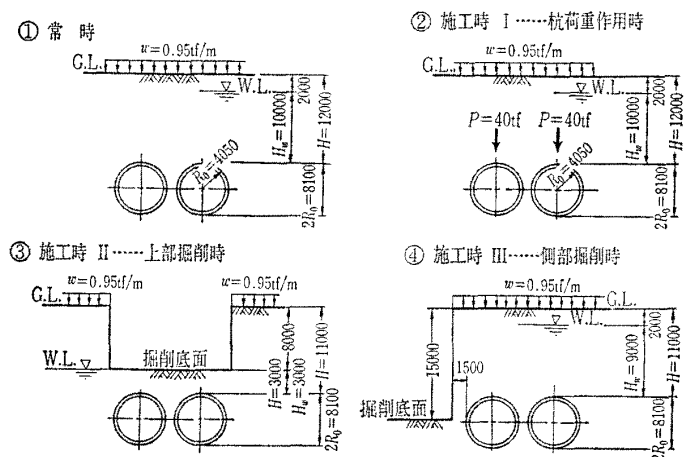


図-7 荷重状態図

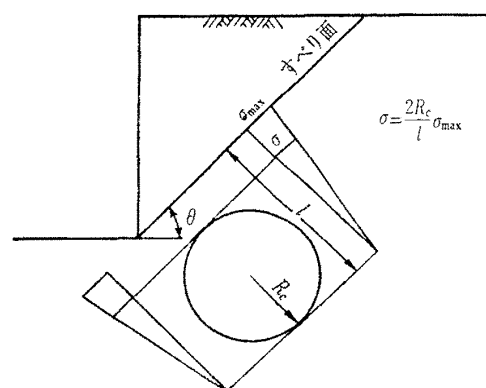


図-8 側部掘削時の想定付加荷重

地下広場の構想があり、これらの施工時には地下鉄シールドの上部が掘削される。また、沿道のビル建設時には地下鉄シールドの側部が掘削された状態となる。そのためシールドセグメントに対してはこれらの施工時の荷重状態を図-7のように仮定して設計を行った。施工時Ⅲの側部掘削時には図-8に示すようなすべり面と、これによりセグメ

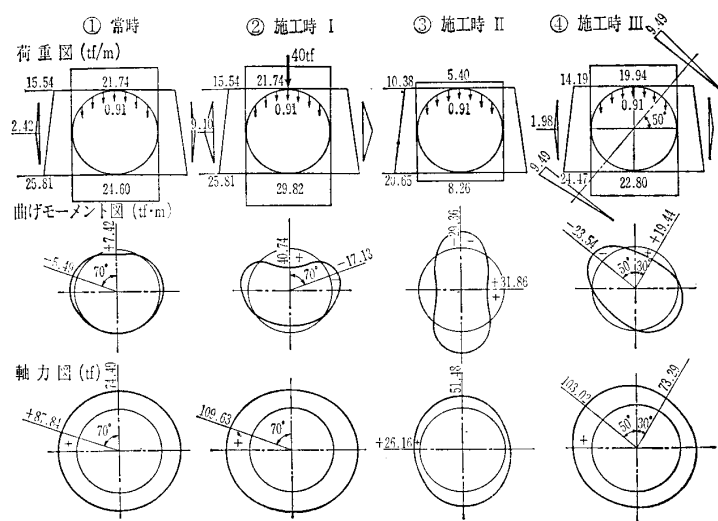


図-9 荷重図, 応力図

ントに付加されるせん断荷重の分布を仮想した。各ケースの荷重図, 応力図は図-9のとおりである。これらの施工時荷重は一時的なものとみなされるが, 構造物の重要性を考慮して許容応力度の割増しは30%にとどめた。

7. シールド掘進

7.1 施工計画

地盤調査の結果, 切羽の自立性は良好であると判断されたのでシールドマシンは開放型の半機械掘りとした。シールド掘進上の特徴を列記すると次のとおりである。

① 施工条件の厳しい阿倍野筋での開削工事を極力少なくするために立坑位置を交差点隅角部の民地下に選びシールドを発進させる。このため, 発進直後約70m区間は曲線

表-2 シールド掘進上の問題点と対策

問題点	対策	備考
急曲線部の掘進	シールドマシンの旋回性	マシン長の短縮($L/D=6000\text{ mm}/8240\text{ mm}=0.728$) 補助装置(そり板および刃口抵抗板)の設置, 推進ジャッキ推力の増強 ($150\text{ t} \times 36\text{ 本}=5400\text{ t}$)
	推進方法と線形の保持	余掘りおよび先掘りの実施, ジャッキの片押し, 1リング推進ごとの測量と早期の蛇行修正
	テールボイド増大による地盤沈下	高張力鋼使用によるテールプレート厚の縮小(テールプレート厚36mm) 地盤補強注入の実施, 豆砂利の吹込みによる即時裏込め注入の実施
駅部中階下の掘進	中階構築側部からの漏気	貧配合コンクリートによる側部埋戻し, 土留め背面への凍液注入
	中階構築の沈下	中階下地盤への沈下観測盤の設置, 中階底床版に注入孔を設置※
接近部の掘進	偏土圧による1号シールドセグメントの変形	変形防止支保工材の架設, 計器による変形および応力測定
	両シールド間隔保持	桎木によるブロックガイドの挿入※
	地盤沈下	地盤補強注入の実施

注: ※印については実施工において必要性がなく使用しなかった。

半径150mの急曲線施工となる。

② 全体工程を短縮するために開削工法により施工する駅部中階構築をシールド掘進に先行して完成させた。シールドはこの中階部の2.8m下を通過させる。なお, シールド通過時点には中階上部の土砂の埋戻しは以後に行う連絡階段部の施工時上載荷重軽減のために未施工の状態である。

③ シールド到達部の既設構築物は一般のはこ型トンネルであるため, 車両の建築限界を確保して列車の通過を可能にするためには2号シールドは到達手前約70m付近から1号シールドに徐々に接近させ, 最終的にはセグメント純間隔を200mmにまで接近させなければならない。

これらの特殊箇所におけるシールド掘進については施工計画の段階で対策を検討したが, その主な内容は表-2のとおりである。

7.2 施工結果

シールド掘進は $0.5 \sim 0.7\text{ kgf/cm}^2$ の圧気圧で施工した。発進直後は第2砂質土層からのゆう水により掘削は難渋したが, その後は圧気が次第に効果を現し, ゆう水も減少した。切羽上半部に露出する第1粘性土層は自立性が良く,

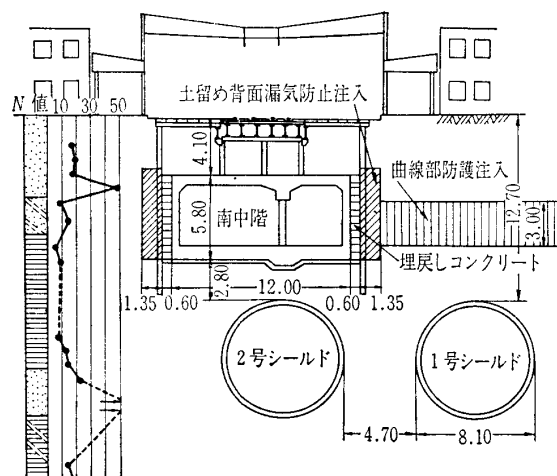


図-10 急曲線部および駅部防護工

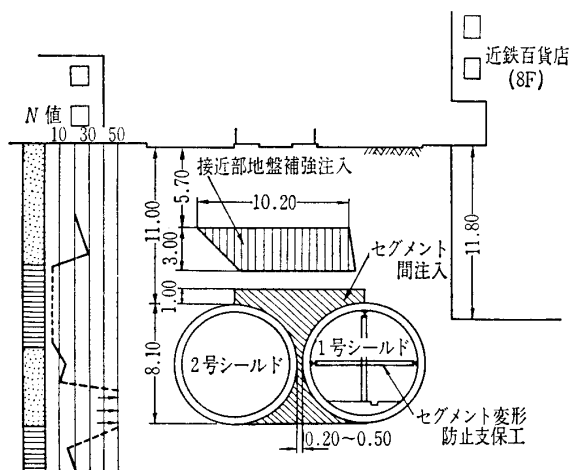


図-11 接近部防護工

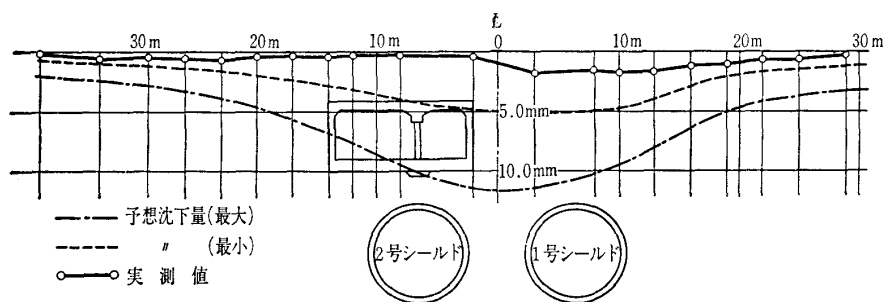


図-12 急曲線部における路面沈下

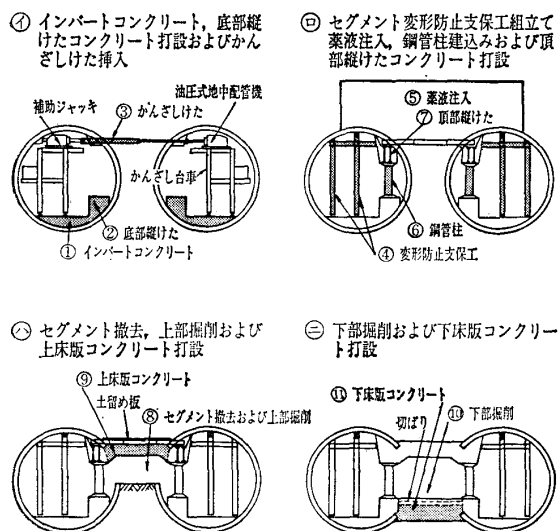


図-13 切広げ工事施工順序図

したがって急曲線部における余掘り、先掘り等の掘削は容易であった。また、テール通過後のテールボイド部分への土砂の崩壊も少なく、裏込め注入を確実に実施することができた。図-12に有限要素法による想定路面沈下量²⁾と実測値との比較を示すが、急曲線部における実測沈下量は予想よりはるかに小さい値であった。

接近部においては2号シールドの接近施工による影響を調べるため、1号シールドのセグメントおよび変形防止支保工材に計器を設置して応力度測定を行った。セグメント応力度の変化についてはリングの上半部が下半部に比べて大きいようであるが大部分は100 kgf/cm² 以下の変化であり、接近施工による影響は小さかったといえる。また、変形防止支保工材についても鉛直部材が圧縮、水平部材が引張り方向の変化を示したが、いずれも50 kgf/cm² 程度で設計値の1割にも満たない値であった。

このように、シールド掘進については恵まれた地山条件と各種の防護対策により、地盤沈下や施工精度に好成績を収めることができた。

8. 駅プラットホーム部の施工

8.1 施工計画

駅プラットホーム部の切広げ工法としては縫地工法、かんざしけた圧入工法、ルーフシールド工法およびパイプ

ーフ工法等の施工法が考えられたが、当駅の地盤条件やホーム型式から施工の安全性、経済性あるいは施工実績を勘案してかんざしけた圧入工法の採用を決定した。

切広げ工事の施工順序は図-13のとおりであるが、これの施工上の問題点と対策を表-3に示す。

8.2 施工結果

切広げ施工による周辺地盤への影響は前記の諸対策と良好な地盤条件により極めて少なかった。また、切広げ施工中のシールドセグメントそのほかの構造物の安全性を確認するために図-14の位置に計器を設置し測定を行った。測定箇所の施工状況を表-4に、主な測定結果を表-5に示

表-3 切広げ施工上の問題点と対策

問 題 点	対 策	備考
かんざしけたの挿入	両シールドのかんざしけた挿入用窓の間隔は5.50mと距離があるうえにかんざしけたの断面300×305mmに対して窓の大きさは400×400mmと余裕は少なく高い施工精度が要求される。	油圧式中配管機によるパイロットボーリングの実施 パイロットボーリングの精度向上のためにロッド先端へのスタビライザーの取付け パイロットボーリング孔を修正するための金具の使用 引込みを主としたかんざしけた挿入方法の採用 出口側の窓へのかんざしけたの誘導を容易にするためテーパ角度を緩くしたつかみ金具を使用
かんざしけた挿入後の土の乱れや上部土の緩み	モルタルによる空隙充てんおよび薬液による補強注入	
セグメントリングの変位・変形	セグメント切断撤去によるリングの変形	変形防止支保工材の架設
切広げ掘削時のセグメントリングの掘削側への変位	切広げ掘削時のセグメントリングの掘削側への変位	切ばりの架設と上下あるいは縦断方向の分割施工
頂部縦けたの施工	頂部縦けたはSRC構造であるがセグメント、鋼管柱および上床版との連結のため鉄筋等の組立てが複雑である。また、コンクリート打設においては上部のセグメント取合部まで完全充填しなければならぬ。	鉄骨や鉄筋の組立て順序およびコンクリートの打設方法の検討
切広げ掘削時の被圧水	エスカレーター基礎部ではシールド下端近くまで掘削する。この時、第2砂層の被圧水(水頭約8m)によるボーリングまたはパイピングが懸念される。	地盤改良のための砂層への薬液注入 地下水位低下のためのウエルポイントの実施
上床版コンクリートの打設	上床版コンクリートの上部空隙の充てん	モルタル注入および薬液注入

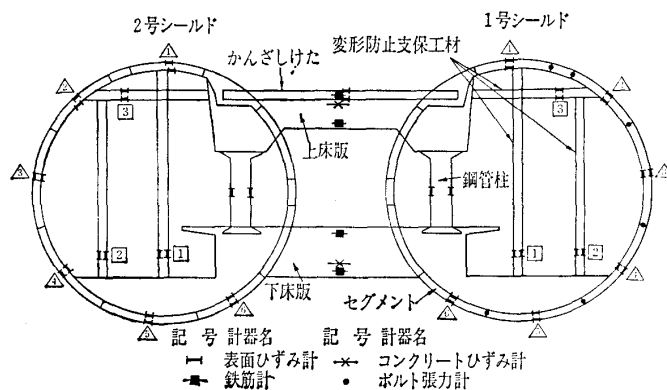
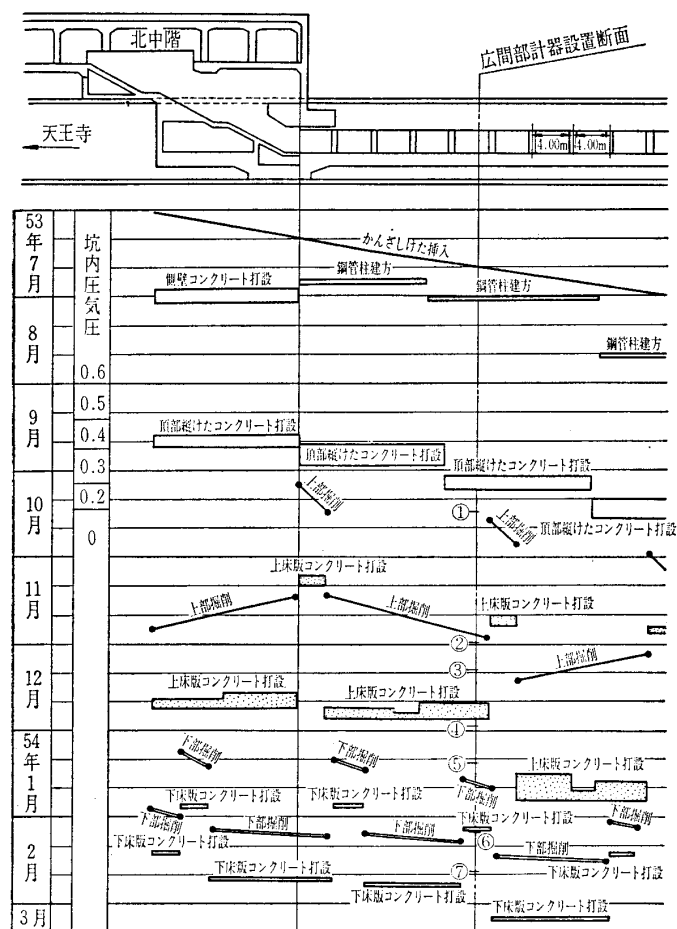


図-14 広間部計器設置図

表-4 切広げ部実施工程表



す。

① セグメント

セグメント切断およびかんざしけた裏止水注入による影響が最も顕著であり、それぞれ 100 kgf/cm^2 程度の応力度の変化を示している。切広げ全工程を通しての応力度の変化は 300 kgf/cm^2 以下で比較的小さい値であった。

② セグメント継ぎボルト

ボルトは $6000 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ のトルク値で本締めを行ったが、その直後の測定値は $N=9\sim 20 \text{ tf}$ (平均 11 tf) の軸力であった。10日後にはグラメットあるいはボルト自体のリラクゼーションのため1～2割の張力低下がみられたが、その後の切広げ施工によるボルト張力の変化は非常に少ないものであり、最終的にボルト張力は $N=3\sim 20 \text{ tf}$ で平均 7.8 tf であった。

③ かんざしけた

切広げ上部掘削によりかんざしけたにかかる曲げモーメント、軸力ともに急激に増大し、それぞれ $6.2 \text{ tf}\cdot\text{m}$ /本および 30.6 tf /本となった。これは両シールド間の地山を掘削することにより上部土圧および側部土圧が直接にかんざしけたに働いてきたためと考えられる。上部掘削完了後の坑内からのかんざしけた裏への漏水防止注入により曲げモーメントは $9.6 \text{ tf}\cdot\text{m}$ /本と増加した。この時点にはシールド

間掘削による側方土圧の影響が更に増大し、軸力は 55.8 tf /本となった。しかし、それ以後の下部掘削等によってほとんど変化を示さなかった。発生軸力は設計値の80%、発生曲げモーメントは設計値の37%であった。発生曲げモーメントが設計値より小さいのは、設計時には全土かぶり荷重がかんざしけたに作用するとしていたが、土のアーチング効果により上載荷重が軽減したためと考えられる。

④ 鋼管柱

セグメント切断後急激な増加を示し 289 tf /本の軸力となった。その後、軸力は徐々に増加し最終値は 352 tf /本となったが、これは鋼管柱の設計軸力の50%の値である。

⑤ 変形防止支保工材

切広げ施工の進行に伴い支保工材に 50 kgf/cm^2 程度の圧縮応力度が生じたが、前述の接近部の場合と同様に設計値の1割にも満たない値であった。これはセグメント、縦けたおよび鋼管柱で構成される構造系の剛性が高く、変形防止支保工材への荷重伝達が少なかったためと考えられる。

⑥ 上床版コンクリート

コンクリート打設直後には硬化熱による影響と思われる軸力が発生していたが、その後漸次減少している。曲げモーメントについてはわずかではあるが負の値を示しており、上部土荷重はほとんど作用していないようである。これは上部土荷重をかんざしけたで受け持たせた後に上床版コンクリートを打設するためであろう。

なお、上床版の設計に用いた軸力は $N=50.1 \text{ tf}$ 、曲げモーメントは $M=169 \text{ tf}\cdot\text{m}$ である。

⑦ 下床版コンクリート

測定箇所の下床版コンクリート打設後に隣接部の下部掘削を行ったため、掘削の進行に伴い軸力が増加し、最大 231 tf となった。今回の測定箇所が下部掘削の口付部であったため、隣接部の掘削時にはストラットとして働き、軸力が増大したのと考えられる。一方、曲げモーメントについては切広げ施工中ほとんど0に近い状態のままであった。これは支持地盤が良好なために下方地盤反力は主にセグメントの部分で生じ、下床版部分での反力が小さいものと推察される。

下床版の設計軸力は $N=57.2 \text{ tf}$ 、設計曲げモーメントは $M=166 \text{ tf}\cdot\text{m}$ であり、発生軸力が設計値の約4倍にもなっているが発生曲げモーメントが小さいためコンクリートの発生応力度は $\sigma_c=40 \text{ kgf/cm}^2$ 程度で許容値以下である。

9. 駅階段部の施工

9.1 施工計画

駅階段部の施工順序としては、①立坑の施工、②シールド掘進、③ホーム部の切広げ施工、④階段部の施工、⑤中階部の施工、という下方から上方へ順次施工する方法では工程的に長期間を要する。このため、シールド掘進に先行

させて、立坑施工と同時期中階構築を完了させる次のような施工方法により工期の短縮を図った。①立坑および中階部の施工、②シールド掘進、③ホーム部の切広げ施工、④階段部の施工

この場合の階段部の施工は中階構築内よりトレンチ杭を打設し、トレンチ掘削により施工する。その施工順序を図一15に示す。

9.2 施工結果

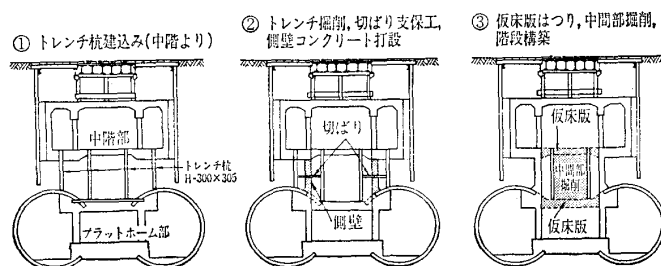
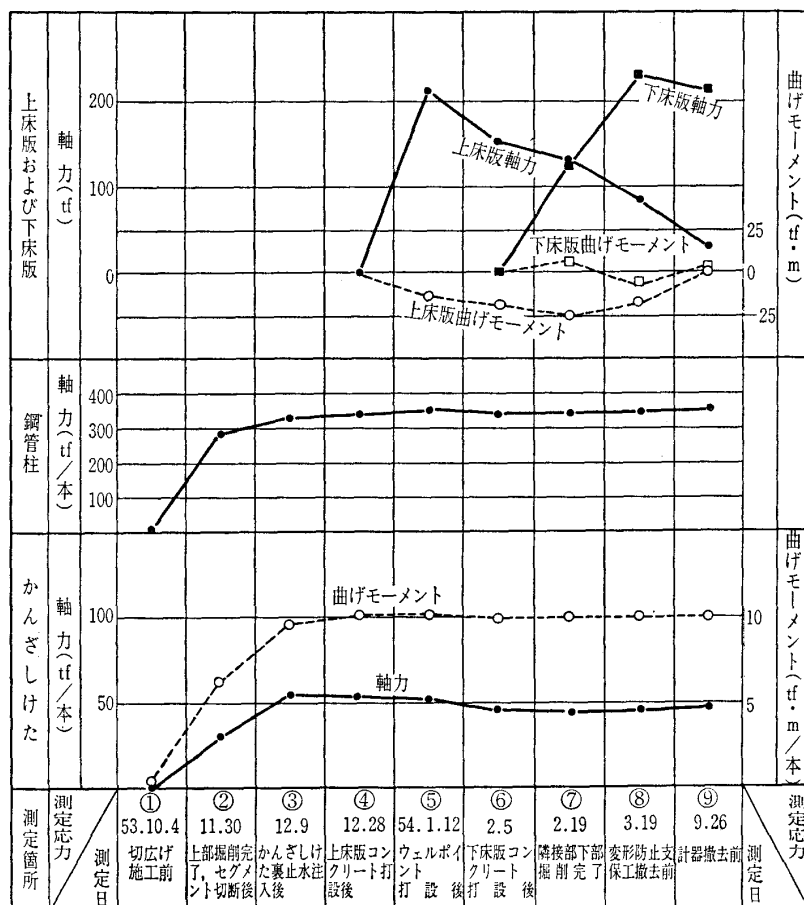
中階部の荷重を支持するためには横断方向だけでなく縦断方向にも分割した施工をしなければならない。したがって、作業場所が狭く、人力によらなければならない部分が多く、作業環境や省力化という面では問題を残した。しかし、トレンチ掘削を行った地盤は洪積粘性土層で自立性も良く、またゆう水もほとんどなく施工できたので路面沈下への影響は生じなかった。

10. おわりに

シールド工法は路上の制約や環境問題等からますますその採用を要請され、また技術的にも高度な施工を要求されてきている。当シールドでは急曲線、中階構築直下の掘進あるいは両シールドの接近施工等のシールド掘進上の特徴とともに、立坑とは無関係に浅い位置に中階部を先行して設け、切広げ施工したプラットホームとをトレンチ工法により連絡するという、シールド駅型式としての新しい試みに意義があると思われる。今後これが技術開発の促進が期待されるシールド駅の構造および施設の設置工法の前進への一歩となれればと考える。

最後ではあるが当工事についてご助言、ご指導をいただいた関係各位に対し、心から謝意を表したい。

表一5 切広げ施工時の応力変化



図一15 連絡階段工事施工順序図

参考文献

- 1) 渡辺 健・塚田 章・和田一郎・猪瀬二郎：地下鉄道施工法(下)，山海堂，pp. 156-159，1975。
- 2) 斉藤二郎・藤原紀夫・吉岡尚也：有限要素法によるシールド外周地盤の挙動解析，土と基礎，Vol. 25，No. 3，pp. 21-26，1977。

(原稿受理 1981.8.21)