

営業中の地下鉄の直下を斜め横断する
大断面シールドトンネルの施工
CONSTRUCTION OF A LARGE SECTION SHIELD TUNNEL IN DIAGONAL CROSSING
RIGHT UNDER THE EXISTING SUBWAY

式部 陟^{*}・高橋 聡^{*}
Noboru SHIKIBU, Satoshi TAKAHASHI

This shield is of slurry type to be used for excavation of the double-track shield tunnel of 9.5m dia. and 858m length. Under the moat, it diagonally crosses over 155m right under the existing subway tunnel with an overburden of 3.75m.

Therefore, we have executed prediction of influences on the existing subway tunnel prior to excavation. Under construction, we measured the behaviors of the subway tunnel.

Keywords: slurry shield tunnel, prediction of influences, diagonal crossing

1. まえがき

営団地下鉄7号線は目黒を起点とし、東京都心部をほぼ南北に貫通し、北区岩淵町に至る延長21.4kmの路線である。

そのうち溜池～駒込間9.2kmでは、駅間を施工するシールド工事が重要都市施設との交差あるいは近接施工の連続となり、いずれも安全対策を立て施工を行った。この区間では営業中の地下鉄と交差する工事が6カ所と多いが、特に牛込濠シールドは、牛込濠下で営団地下鉄有楽町線の下を延長155mにわたって斜め横断することになった。このため、事前にシールド掘進に伴う有楽町線の影響予測解析を行い、工事は計測管理を行い安全を確認して進めることとした。

今回は、シールド掘進に伴う有楽町線の影響予測解析と構築変状計測結果などについて報告する。

2. 概要

2・1 工事概要(図-1、図-2)

牛込濠シールドは市ヶ谷駅を発進し、飯田橋駅に至る延長858m、外径9.5mの複線型シールドトンネルを泥水式工法で施工する。シールドは外堀通り下を進んだ後牛込濠下に入り、濠内で有楽町線のトンネル下を延長155mにわたって斜め横断する。平面線形はR=500m、R=800mの曲線が入っている。また縦断線形は、10‰、30.5‰の下り勾配及び24‰、33.5‰の上り勾配である。有楽町線との交差部での構築の離隔は3.75mである。

* 正会員 帝都高速度交通営団建設本部

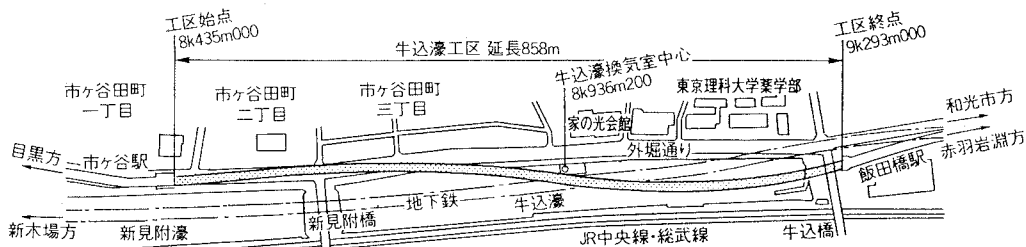


図-1 牛込濠工区平面図

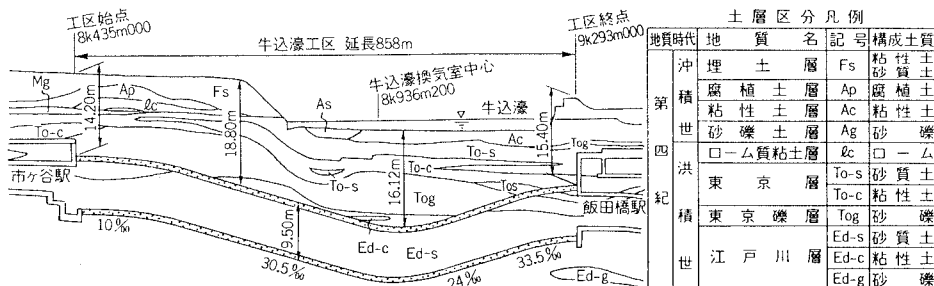


図-2 牛込濠工区縦断線形および地質図

2・2 地下鉄有楽町線の構造 (図-3)

当該部のトンネル断面は、電車走行部の間に留置線が設置されているため3線型断面で、幅16.5m、高さ7.6mの一層三径間のラーメン構造の幅広いトンネルとなっている。このトンネルには施工時に設置した土留めアンカーが残置されており、トンネルの浮力対策として考慮されている。

2・3 地質概要

当該地の地質は、濠の下にシルト質のガラ等が2.5m、その下に軟弱な細砂2.5m、シルト質砂が約3m、その下は東京砂礫層、牛込濠シールドが通過するN値50以上のよく締まった江戸川層砂質土となっている。江戸川層砂質土は透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ で、間隙水圧はトンネル中心部で $1.5 \sim 2.2 \text{kgf/cm}^2$ であり、地下水は非常に豊富である。

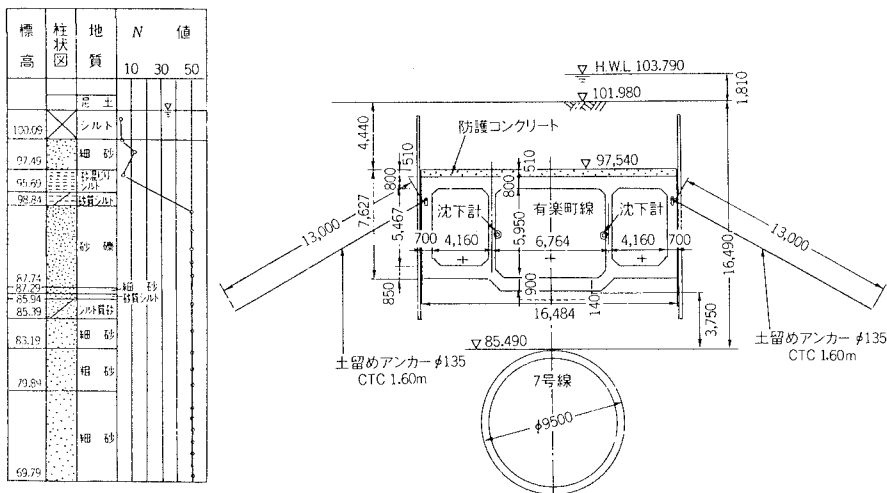


図-3 有楽町線交差部横断面図

2・4 シールド工事概要

(a) シールド機械 (図-4)

シールド機は周辺地盤および近接構造物への影響が少ない泥水式シールド機とし、特に濠内で有楽町線下を斜め横断するため、安全対策として次のような装備を配慮した。

①カッターディスク上半部にスリット遮蔽装置を設置し、万一交差部で掘進を停止するような事態が生じた場合にスリット部分の山留めをできるようにした。

②有楽町線下で地山の緩みを最小限に抑えるため、同時注入方式の裏込め注入装置を3基設置した。注入材は「可塑性固結材」を採用し、有楽町線下通過時には一般部より初期強度の高いものを使用した。

③万一、切羽前方の地山の地盤改良をする必要が生じたときに、シールド機内より切羽前方に注入を行えるように注入ロッドを通すガイドスリーブを設置した。

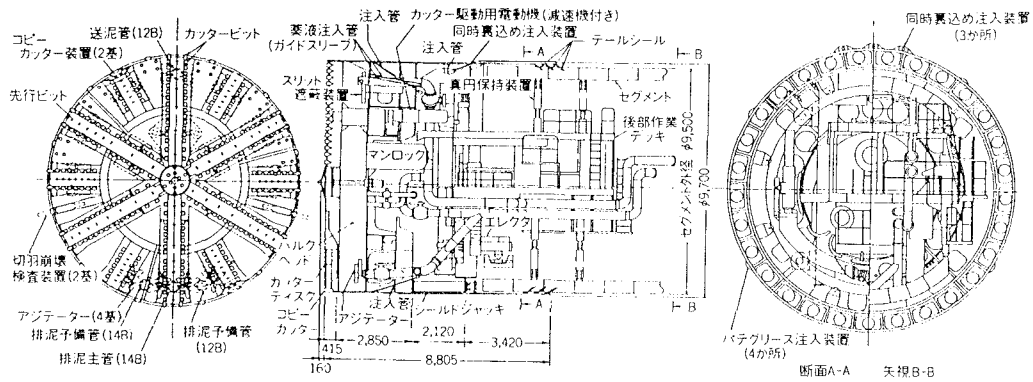


図-4 シールド機械構造図

(b) 泥水圧

計画泥水圧は「主働土圧+水圧+変動圧 (0.2kgf/cm²)」を基本としたが、濠内でこの泥水圧とすると噴発の恐れがあるため、濠内では計画泥水圧を「水圧+変動圧 (0.2kgf/cm²)」として施工することとした。このため、有楽町線交差部の施工は通常より低い泥水圧によることとなるので、このことから安全検討が必要となった。

3. シールド掘進に伴う有楽町線の安全検討

表-1 FEM入力土質定数

①横断方向断面での変形量と応力度

②縦断方向断面での変形量と応力度

これらの検討を行うためには、まずシールド掘進に伴う周辺地盤の変状を求め、地盤変状に伴う強制変位を荷重として作用させる手法を採用した。

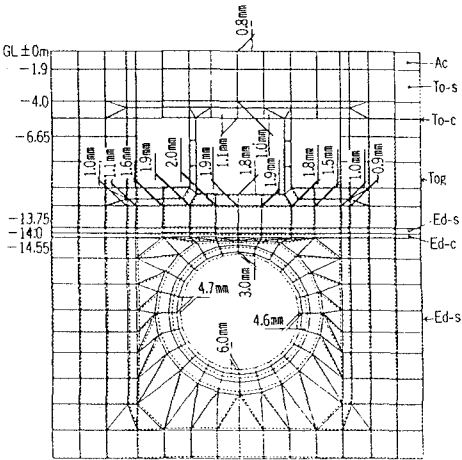
3・1 解析手法

シールド掘進に伴う周辺地盤の挙動は、横断方向二次元FEM解析により予測することとした。この手法は、硬質地盤の泥水シールド工法における地盤変状はテールボイド部における応力解放により発生するとし、この解放応力は泥水がテール部まで回り込むことにより、「地中圧+水圧」と泥水圧との差が応力解放されるとして解析を行うものである。なお、過去のシールド工事における結果から、応力解放に伴う補正率として0.35を採用した。表-1に入力土質定数を示す。

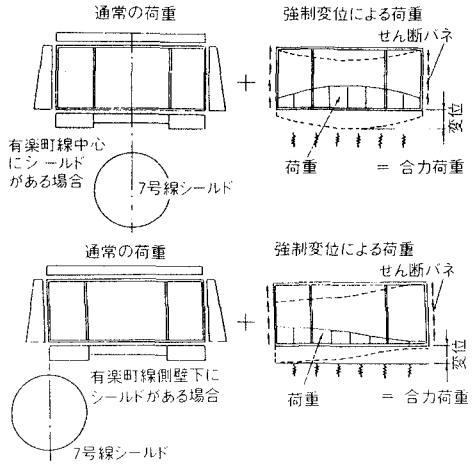
深さ (m)	層厚 (m)	N値	土質記号	土質名	γ (t/m ³)	C (tf/m ²)	ϕ (度)	E (kgf/cm ²)	ν
2.50	2.50	0.4	AC	シルト	1.39	0.25	0	3	0.45
5.10	2.60	19	To-s	細砂	1.82	-	34	135	0.30
7.75	2.65	11	To-c	砂質シルト	1.61	25.30	12	99	0.45
14.85	7.10	50以上	To-g	砂礫	2.16	-	40	369	0.30
15.30	0.45	50以上	Ed-s	細砂	1.91	-	40	592	0.30
15.65	0.35	46	Ed-c	砂質シルト	1.85	28.80	0	322	0.45
40.00	24.35	50以上	Ed-s	細砂	1.91	-	40	592	0.30

3・2 地盤変位解析結果（図－5）

シールドトンネル周辺の地盤変位解析の結果、鉛直地盤変位はシールド頂面で3mm、有楽町線下面で2mm、濠底で0.8mm の沈下となった。



図－5 地盤変位解析結果



図－6 横断面解析モデル

3・3 横断方向断面の検討（図－6、表－2）

表－2 通常荷重と合成荷重の応力比較

現在作用している外力荷重に、地盤変状に伴う強制変位荷重を加えて、トンネルの安全度を検討することとした。検討断面はシールドトンネルと有楽町線トンネルが斜め横断しているため、有楽町線とシールドが中心部で交差する位置と、有楽町線側壁

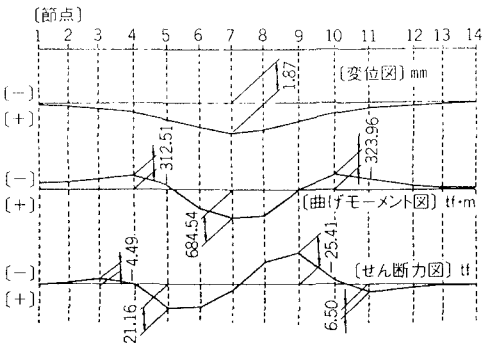
		曲 げ モー メ ン ト ば・m		せ ん 断 力 ば		応 力 度 (合成荷重による最大値) kgf/cm ²		
		通常荷重による最大値	合成荷重による最大値	通常荷重による最大値	合成荷重による最大値	コンクリート	鉄 筋	せん断力
上床	支床部	60.57	60.78	54.64	54.64	48.3	1213	6.99
	支間部	47.75	49.40	—	—	58.2	1289	—
側壁	支床部	36.52	30.64	38.94	36.44	41.1	1091	4.49
	支間部	24.00	24.46	—	—	46.5	1270	—
下床	支床部	59.02	60.78	58.11	54.81	49.4	1243	5.89
	支間部	56.18	49.40	—	—	51.2	1136	—

$\sigma_{ss}=70\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{ss}=1600\text{kgf/cm}^2$ $\tau_s=8.5\text{kgf/cm}^2$

下にシールド中心がくる位置の2断面で行った。前項で予測した下床の地盤変位量と同一変位が生じる荷重を求め、この荷重を強制的に与え発生する応力を求めた。その結果を表－2に示すが、シールド通過に伴う増加応力は小さく構築の補強なしで安全であることが判明した。

3・4 縦断方向断面の検討（図－7）

シールド掘進に伴う縦断方向の変位を求めるため、有楽町線に①～⑭の節点を設置し、各節点からシールド中心までの距離を算出する。そして、この距離と前項のFEM解析による地盤変位から有楽町線中心位置での変位量を算出する。次に、この変位量から増加荷重を算出し、弾性床土上の梁として構築の検討を行った。発生した応力をもとに応力度計算を行った結果、十分安全であることが確認された。



$\sigma_s=1.93\text{kgf/cm}^2 \leq \sigma_{ss}=70\text{kgf/cm}^2$
 $\sigma_s=329.5\text{kgf/cm}^2 \leq \sigma_{ss}=1800\text{kgf/cm}^2$
 $\tau=0.02\text{kgf/cm}^2 \leq \tau_s=4.2\text{kgf/cm}^2$

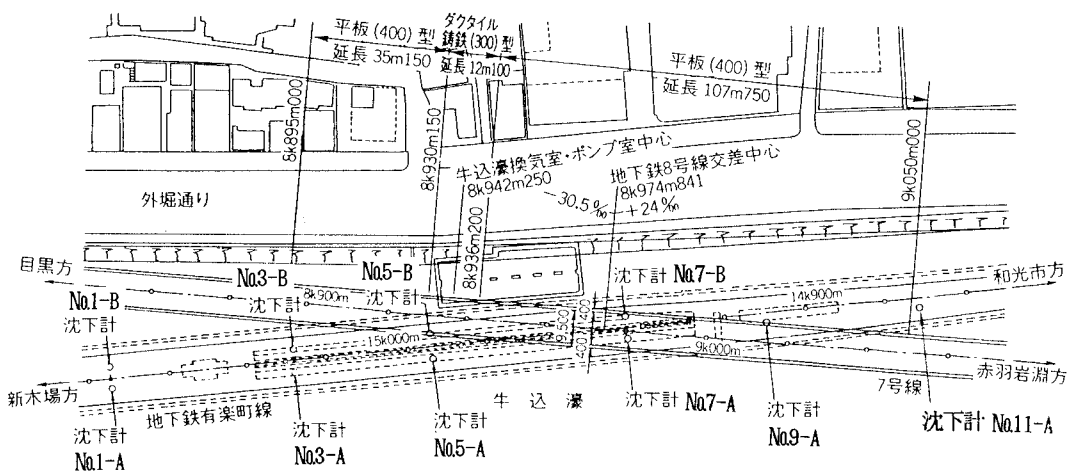
図－7 縦断面変位量および応力

4. 掘進及び計測管理

有楽町線の安全性について検討を行った結果、シールド掘進に伴う地盤の変状・有楽町線の変状は小さく、構築に生じる応力も十分安全であり、特別の対策工はいらないと判断した。しかしながら、シールドは複線断面で直径が9.5mと大きく有楽町線との離隔が3.75mと少ないこと、延長が155mに及ぶ斜め横断も前例がないことから、列車運行の万全をはかるため、計測管理による監視を行うこととした。

4・1 計測内容

有楽町線構築の挙動を監視するため、水盛式沈下計を20m おきに10カ所設置した。図－8に計測位置を示すが、シールドとの交差中心位置より前方に沈下計を多く設置し、交差中心部分への対応をはかりやすくした。管理基準値は、第1次を±3mm、第2次を±5mm とした。



図－8 計測位置図

4・2 掘進管理（表－3、表－4）

有楽町線下通過にあたっては、それまでのデータから掘進管理基準を表－3に示すよう定めた。シールドは有楽町線下を2月8日から2月22日まで15日間昼夜連続施工で通過した。表－4に掘進管理実績を示すが、推力、カッタートルクとも予想より低い値にとどまった。

4・2 計測結果（図－9、図－10）

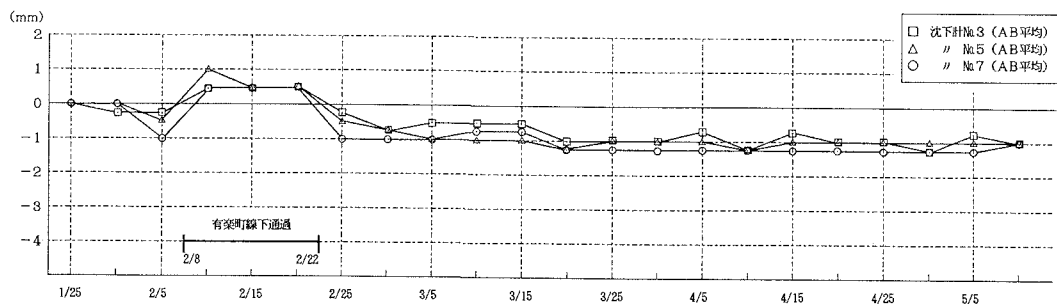
図－9は構築の変状の経時変化である。若干ではあるが掘進に伴う先行隆起とマシンテールが抜けた後の沈下がみられた。

表－3 有楽町線下掘進管理基準

泥水圧 kgf/cm ²	掘進速度 cm/min	推 力 tf	カッタートルク tf・m	裏込注入率 %	裏込注入圧 kgf/cm ²
1.5～1.7	2.0～2.5	3100～3500	270～450	140	3.5

表－4 掘進管理実績

掘進リング	場 所	泥水圧 kgf/cm ²	推力 tf	カッタートルク tf・m
101R～200R	外堀通り下	1.07～1.96 平均 1.34	2587～4306 平均 3538	194～284 平均 231
261R～360R	牛込濠下	1.51～2.15 平均 1.86	2442～3945 平均 3287	184～273 平均 219
401R～500R	有楽町線下	1.60～1.92 平均 1.72	1762～2658 平均 2376	133～291 平均 159



図－9 有楽町線構築変状の経時変化

図－10は縦断面変位量の予測値と計測値である。多少の差異は見られるものの予測値と計測値は符合を示しているといえる。

5. まとめ

以上の結果をまとめる。

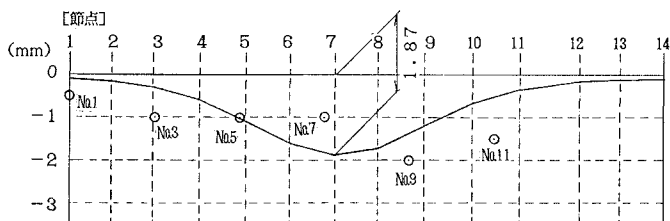
(a) 有楽町線構築の変状から、

他の硬質地盤における施工と同様、切羽通過前の先行隆起と通過後の沈下があった。

(b) シールド通過後の沈下を最小限に抑えることができたが、これは同時裏込注入・テールシール自動給脂を採用し、掘進を止めずに速やかに通過したことが最大の原因と考える。

(c) 有楽町線下通過時の推力とカッタートルクが予想より低い値となった。この理由としては、剛性が高く幅の広い構造物が濠の中に浮かんでいる状態にあり、その下にある地山は被りが少なく土圧がわずかだったためではないかと考える。

(d) 構築の最大沈下量は予測値とほぼ同じであり、硬質地盤における解析手法の妥当性がここでも確認できた。またこの解析手法を縦断面にも使用したが、予測値と計測値にある程度の符合が見られるので、使用は妥当であったと考える。



図－10 縦断面変位量の予測値と計測値（最終変位）

6. 参考文献

- 1) 中山 隆・中村信義・中島 信：泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について、土木学会論文報告集、第397号／VI-9、pp.133～141、1988.9
- 2) 式部 陟・河内汎友・中村信義：地下鉄直下を斜め横断する大断面シールド 営団地下鉄7号線牛込濠シールド、トンネルと地下、25-5(285)、pp.39～45、1994.5