

土圧式シールド掘削に伴う軟弱粘性土地盤の 挙動と施工管理

BEHAVIOR OF SOFT CLAY GROUND IN EARTH PRESSURE SHIELD WORK AND ITS APPLICATION TO EXCAVATION CONTROL

平 田 武 弘*

By Takehiro HIRATA

まえがき

最近の地下鉄建設工事においては、シールド工法が代表的工法といわれるほど多く採用されるようになってきている。このシールド工法は、初期の圧気手掘り式から泥水加圧式、土圧式等の密閉型機械化シールドへと発展し、その適用地盤や適用環境条件も大幅に拡大されている。このような技術的向上の結果、施工に伴う地盤沈下量は減少してきているが、輻輳する都市施設への影響から、最近ではその防止がさらに強く要請されるようになってきている。

本報告の軟弱地盤における地下鉄シールド工事の場合も同様で、過去の鉄道シールド工事の実績から想定すれば100mm以上の沈下が予想され、また沈下の予測に関する提案式¹⁾を今回のトンネル径、土被、双設純間隔に対して適用すると、80~100mmの沈下が予想される(図-1)にもかかわらず、路線全線にわたって各種重要構造物が近接するため地盤変状がほとんど許容されず、工法上の検討が要求された。

シールド工事において重要構造物が近接する場合は、地盤補強注入等各種補助工法を併用して防護対策を施すのが一般的であるが、本事例では全線に及ぶ高速道路橋脚基礎、大口径水道との近接、大断面下水道会所直下の横断等の条件があり、これらの防護について種々の補助工法を検討したが、いずれも信頼性、経済性に問題があった。しかし、シールド掘進に際して地盤変状を小さく制御できれば補助工法を必要としないので、この考え方を

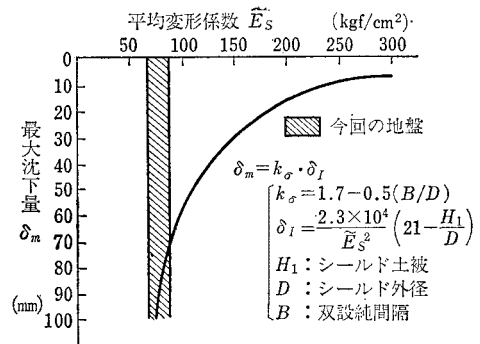


図-1 竹山の提案式¹⁾による沈下量の予測

基本方針としてシールド施工を行うこととした。今回は、軟弱地盤のシールド掘進に伴う地盤沈下の各種要因のうち、特に影響が大きいと考えた①切羽の安定、②テール部での沈下防止、に対して適切な対策を行うことにより地盤変状の防止を図った。

①については、面板で切羽を支持する土圧式シールドを採用する一方、シールド掘進による地盤変状は現場施工の巧拙が原因となる不確実性があるため、地盤挙動を詳細計測し、掘進条件と対比を行って、その結果を実施工に反映させる施工管理を行うことにした。なお、切羽の安定に対しては泥水加圧式も非常に有効と考えられるが、掘削地盤は粘土層が大部分で、排泥処理に問題があるため採用するには至らなかった²⁾。

②については、掘進に連動してシールド機械に装備

註: 本報告は、第18回土質工学研究発表会(1983年6月)、第6回トンネル技術シンポジウム(1984年9月)、第29回土質工学シンポジウム(1984年11月)などにて著者らが発表したものの一部修正し、まとめ直したものである。

* 正会員 大阪市交通局 高速鉄道建設本部建設部長
(〒550/大阪市西区九条南 1-11-53)

した注入管から施工する同時裏込注入工法を考案した。

その結果、軟弱地盤としては沈下量も少なく、当初の目的を達成することができている。本報告は2工区ある土圧式シールド（高井田シールド・長田シールド）の施工と掘削に伴う地盤挙動について考察を加え報告するものである。

1. 施工概要

(1) 地盤特性

地下鉄4号線延伸における今回のシールド工事は各工区間単線並列型で、延長が約1.2kmの高井田シールドと約1.5kmの長田シールドがある。シールドは大部分が沖積粘性土層を掘削し、後者は部分的にシールド下半部で下部沖積砂層および洪積砂礫層を掘進する（図-2）。また、全線で沿道家屋や高速道路橋脚基礎と近接（最小0.8m）し、大口径下水道（4.0×4.0m等）下および4本の下水道が合流する会所直下を5~8mの離隔で掘進する等、各種重要構造物との近接施工となるのが本工事の特徴のひとつである（図-3）。

この付近の地盤は層厚約20mの沖積層があり、沖積層上部は層厚6~10mの緩い砂質土と軟弱粘性土の互層で、その下に7~13mの粘性土と沖積の基底を構成する層厚1.5~5mのN値2~17の下部砂層が存在する。シールドが通過する沖積粘

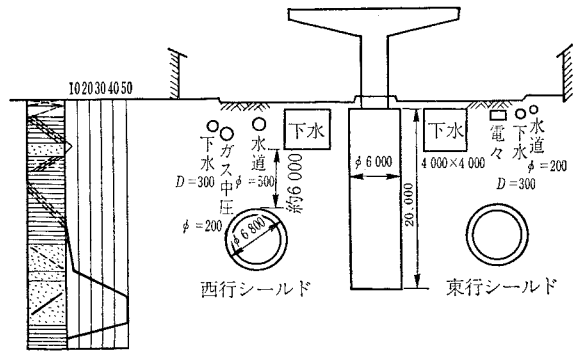


図-3 シールド標準断面

表-1 土質特性（長田付近）

	沖積層			洪積層			
	上部砂層	粘土層	下部砂層	砂れき層			
物理	粒度分布	砂分 (%) シルト分 (%) 粘土分 (%)	47.0~62.0 10.0~13.0 27.6~54.0	1.4~11.4 27.6~54.0 29.0~71.0	46.0~69.0 14.0~42.0 10.0~32.0		
	理	N	値	5~7	0~4	2~17	50以上
		間隙比 e		—	1.13~2.27	—	—
試験	コンシステンステン	w (%)	15.0~30	44.0~94.5	19.7~28.8	5.8~11.5	
		w _L (%)	—	57.0~97.3	—	—	
		w _p (%)	—	22.0~34.6	—	—	
		I _L	—	0.43~1.0	—	—	
		I _p	—	35.0~65.0	—	—	
力学試験	q _a (kg/cm ²)	—	0.63~1.74	—	—		
	φ (°)	—	0~1°45'	—	—		
	鋭敏比 S _r	—	10~40	—	—		

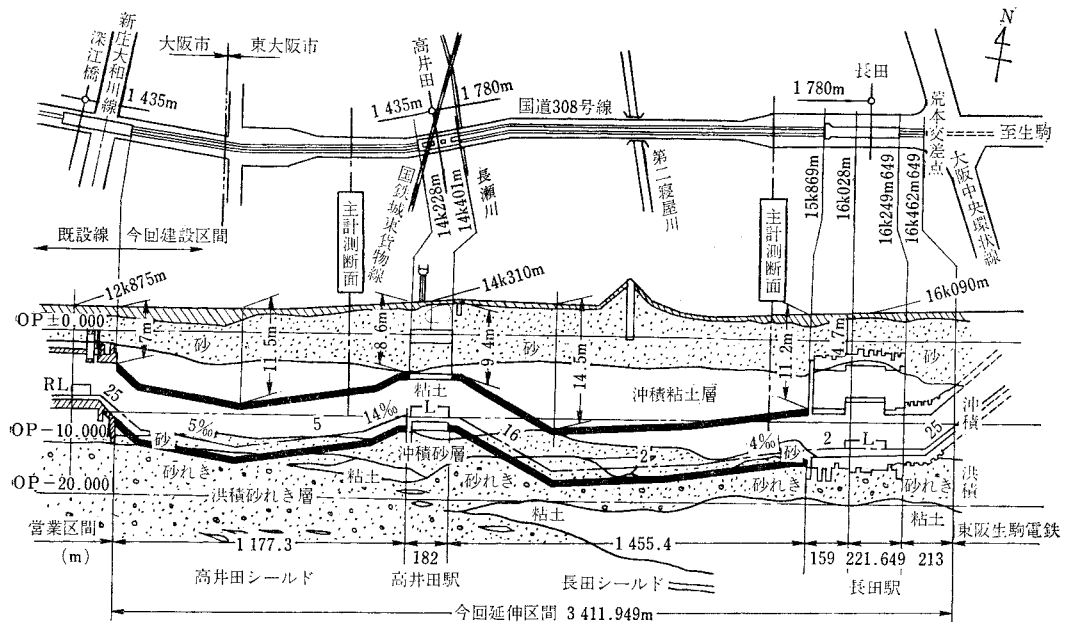


図-2 地下鉄4号線深江崎~長田間線路平面縦断面

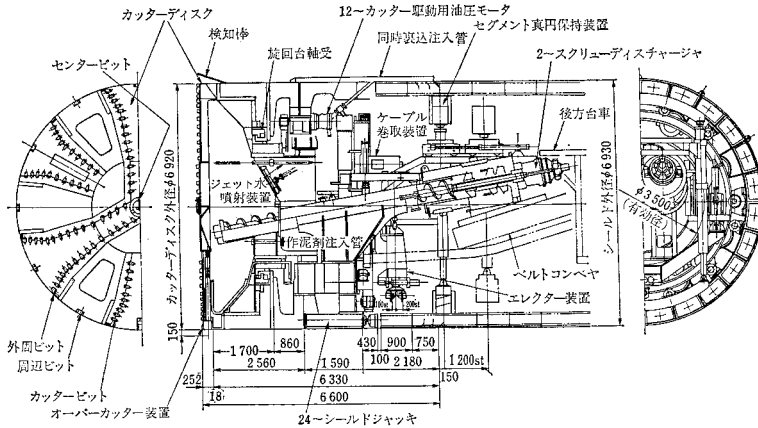


図-4 シールド機械 (長田シールド)

性土は自然含水比 40~90%, 液性限界 40~100%, 塑性限界 20~35% で、自然含水比が液性限界に極めて近く、プレート式土圧計で実測した全土圧から求めた土圧係数は 0.85~0.90 と大きく、自立性に乏しい(表-1)。

シールド天端から上部の粘土層の一軸圧縮強度はほぼ 0.6 kgf/cm² であり、長田シールドより高井田シールドの方が若干大きい。鋭敏比は 10~40 と超鋭敏であり、特に長田シールドにおける粘土層の中央部は繰り返すと自立しない状態となっている。また、圧密試験結果からもシールド掘進に伴う攪乱によって大きな圧密沈下が発生すると懸念される。

なお、工事区域では年間 20mm 程度の沖積層の自然沈下が生じている。

(2) シールド機械

シールド機械は、地質や施工環境を勘案して面板付の土圧式シールド(図-4)としたが、その際、土砂の取り込み易さと地山の呼び込み防止という相反する要件や同時裏込注入の確実な実施のために、次のような機械設計上の配慮を行っている。

- ① チャンバー内が充満度不足の場合、地山を呼び込む恐れがあり、これを防止するためカッタースリットの幅は最大でも 25cm と狭くし、開口率を 16~17% と従来の土圧式シールドより小さくした。
- ② 切削用ビットは切羽の攪乱を極力防止するため、高さを 50mm と低く抑えた。
- ③ チャンバー内の空間を大きくして土砂の流動性を良くするため、可能な限りスキンプレーットの補強部材の桁高を低くし、さらに後方へ控えた構造とし

た。

- ④ テールシールは 3 段とし、シール間にパテグリースを充填することによりシール性を向上させて、同時裏込注入効果を高めるとともに、シール交換時の安全を図った。
- ⑤ 同時裏込注入用のパイプはシールド機械の上半外周部に 3~5 本装備し、同時に 2 本から注入でき、清掃時には盛り替えができるようにした。

(3) 同時裏込注入

軟弱地盤における従来の裏込注入工法³⁾ の場合には、

- ① 2~3 リング遅れた後方注入のため、注入以前にテールボイド部地山が変形して不完全な充填となる。
- ② 注入時の流動性確保上、液状系注入材を使用するため、硬化までの間、加圧による地山の支持が必要であるが、テールシールからの漏洩等の問題により圧力保持が困難で地盤沈下を生ずる。

など種々問題点がある。特に今回の軟弱地盤は自立性に乏しいため、テールボイドの迅速かつ確実な充填は必須条件である。そのため、テールボイドの発生と同時に充填できる同時裏込注入システムとそれに適した注入材料を開発する必要があった。そこで、開発に際しては、

- ① 注入時の流動性が良く、充填性に優れていること
- ② 充填後すみやかに地山相当の強度を発現すること
- ③ 材料分離や凝結後の容積変化が無く、止水性が良好であること
- ④ 粘性が高く、テールシールや切羽への漏洩が少ないこと
- ⑤ 注入管内で硬化せず、洗浄時の作業性に富むこと

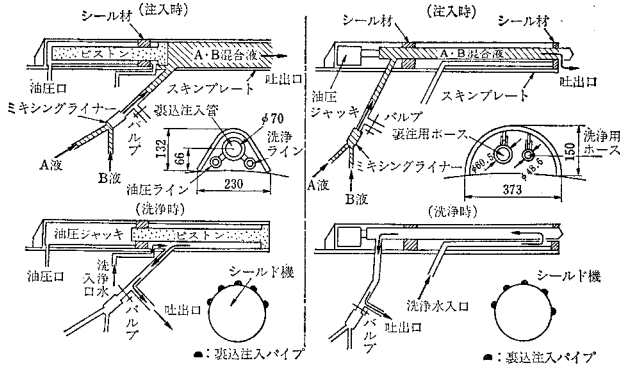
表-2 裏込注入材の配合

シリカフォーム (高井田シールド)						
A		液			B 液	圧縮強度
セメント	粘土	細目砂	SF-1 液	空気量	SF-2 液	σ 1 時間 σ 28 日
270 kg	80 kg	667 kg	420 l	20%	30~40 l	1 kg/cm ² 20 kg/cm ² ≦

ただし、SF-1 (シリカフォーム) : 凝結促進剤 3% 溶液
SF-2 (シリカフォーム) : 凝結促進剤原液
A, B 両液全体に対する空気量は 19%

TAC-II S (長田シールド)						
A		液			B 液	圧縮強度
セメント	TAC-IS	TAC-2 号	水	空気量	TAC-3 号	σ 1 時間 σ 28 日
273 kg	273 kg	1.82 kg	394 l	35%	91 l	2 kg/cm ² 20 kg/cm ² ≦

ただし、TAC-1S : クレーサンド
TAC-2 号 : 起泡剤
TAC-3 号 : 凝結促進剤 (特殊水ガラス)
A, B 両液全体に対する空気量は 31.8%



(a) ピストン型(長田シールド) (b) 並列型(高井田シールド)
 図-5 裏込注入パイプ

などに着目して各種実験を行い、シリカフォーム(高井田シールド)およびTACIIS(長田シールド)の2液瞬結性材料(表-2)を注入直前にミキシングライナーにより2液混合攪拌させて施工する同時裏込注入システムを開発した。

注入材料は両者共、2液混合により瞬間的にゲル化して擬固結状態となり、無圧力では流動しないが混合後10~20分程度までは加圧すると塑性流動するため充填性に優れる。また、粘性が高いためテールシールからの漏洩も少なく、30~60分で地山程度の強度に硬化し地山の変形を防止する。

シリカフォームのA液は比重が1.45と幾分大きく、凝結時間が比較的小さいため、長距離パイプ圧送には難点があり、アジテーター付台車で運搬するシステムを採用している。一方、TACIISのA液は比重が1.03と小さく材料分離を起こさず、また遅延剤を添加することによって可使時間を長くできるため、基地からの長距離パイプ圧送を行っている。

注入パイプは耐久性、洗浄性、作業性に優れたピストン型と並列型を考案した(図-5)。前者は、注入後了終ピストンで注入材を押し出し、ピストン背面で洗浄を行い、後者は、注入ノズルを引込めて注入口が洗浄管と連通して洗浄するものである。

施工管理としては、注入口における圧力が設定値以上になれば自動的に注入が停止する圧力管理を主体とし、注入量による管理も併用した。

(4) 掘進方法と施工実績

シールド掘進に伴う地盤変状は多くの要因に支配されるため、これを防止するための施工管理基準を事前に設定することは非常に困難である。そこで、地盤挙動の現場計測を行って掘進方法へフィードバックさせる施工管理手法を採用した。

a) 掘進管理指標および管理基準の設定
 掘進方法を確定するため、発進直後50~60mの区間において、掘進速度・チャンパー内土圧・総推力・スクリーコンベア回転数・裏込注入圧を変化させ、周辺地盤の変状計測結果との関連を把握した。

その結果、特に地盤変状と相関があり、制御が容易なチャンパー内土圧と裏込注入圧を主管理指標とした。チャンパー内土圧は土被圧の45~65%の範囲、裏込注入圧は土被相当圧程度とすれば地盤への影響が小さく、したがってこれらを管理基準値とした。また、他の管理指標として、推力、掘進速度、排土重量、カッタートルク、裏込注入率を採用し、表-3にこれらの管理基準値の設定例を示す。

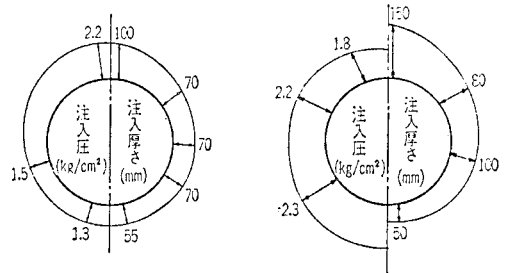
ひき続き、周辺地盤の変位、土圧、間隙水圧を詳細に計測して地盤変状の特性を把握し、当初設定した管理方法の再確認を行い、表-3に示すようにチャンパー内土圧の管理幅を土被圧の55~65%とする等、管理基準値の修正を行って掘進方法を確定した。

b) 掘進管理
 シールド施工に伴う地盤の変状は即時に地表面変位として表われることが計測結果から判明したので、本掘進では地表面変位の計測結果を先に確定した管理基準へフィードバックさせながら掘進管理を行った。

表-3 管理指標および管理基準値
 (長田シールド詳細計測位置付近の例)

管理指標	管理基準 当初設定値	管理基準 修正値
① チャンパー内土圧 (kgf/cm ²)	0.8~1.2	1.0~1.2
② 推力 (t)	1500 以下	1000~1500
③ 掘進速度 (mm/min)	25~30	25~30
④ 排土重量 (t)	58±1.2	58±1.2
⑤ カッタートルク (t·m)	300 以下	300 以下
⑥ 裏込注入圧 (kgf/cm ²)	2.8	2.8
⑦ 裏込注入率 (%)	130 以上	130 以上

注：①、⑥を主管理指標とし、その他は補助管理指標である。



長田シールド (TACIIS) 高井田シールド (シリカフォーム)
 注：①：注入圧：グラウトホールでブルトン管式圧力計にて測定
 ②：注入厚さ：グラウトホールからコア抜きにより測定。

図-6 裏込注入圧と注入厚さの分布

c) 施工実績

切羽接近に伴う地表面沈下 (+:沈下, -:隆起) は、高井田シールドで+4~5mm, 長田シールドで+17~12mmである。後者の変動が大きいのは、地層が変化に富み、粘土の鋭敏比が大きいためと考えられる。

同時裏込注入は、クラウン部1箇所からの注入であっても図-6に示すとおり圧力伝達や充填が十分行われている。注入管は洗浄が容易な機構としたので閉塞もなく、装備した5本のうち実際には盛替えのため2本を交互に使用するにとどまった。

また、注入時にシールド土被りに相当する圧力を与えて、その時点でセグメントの変形をほぼ終了させている。それによってセグメントの変形に伴う後続沈下を防止できたことは、今回の同時裏込注入の成果のひとつであったと考えている。

工事による影響がほぼ完了した約1年および1年半後の最終沈下は、地盤の自然沈下を除くと高井田シールドで最大16mm, 長田シールドで30mmである。なお、沈下の平均値は前者で約10mm, 後者で20mm程度であり、軟弱地盤の大断面シールドにおいては極めて小さな沈下量に留めることができた。

2. 地盤挙動

(1) 地盤挙動の概要

地盤挙動計測は、シールド横断方向に層別沈下計、傾斜計を配置して地中変位を測定し、さらにシールド周辺部の土圧と間隙水圧も測定した(図-7)。

計測結果としてシールド直上地盤の鉛直・水平変位を図-8~11, 側部地盤の土圧と間隙水圧を図-12, 各種

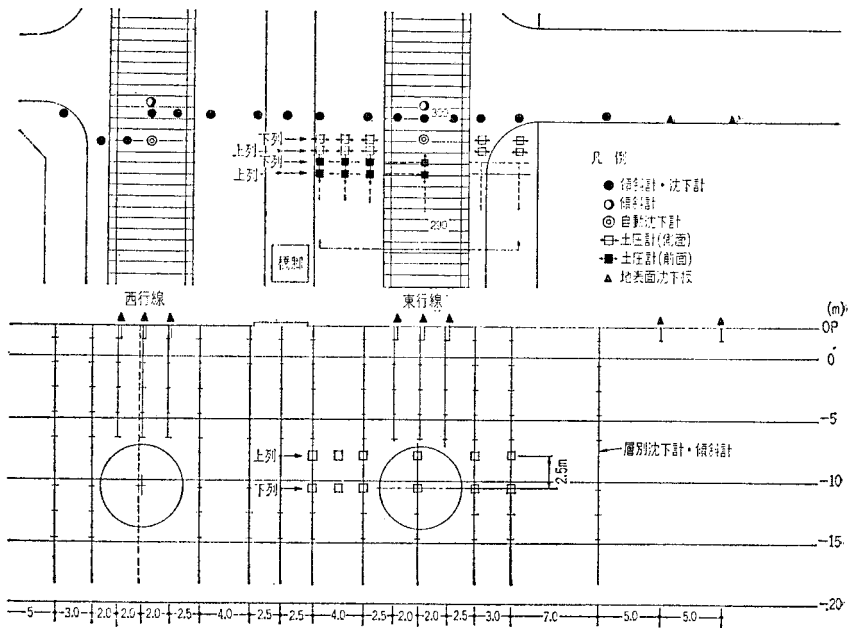


図-7 主計測断面における計器配置図(高井田シールド)

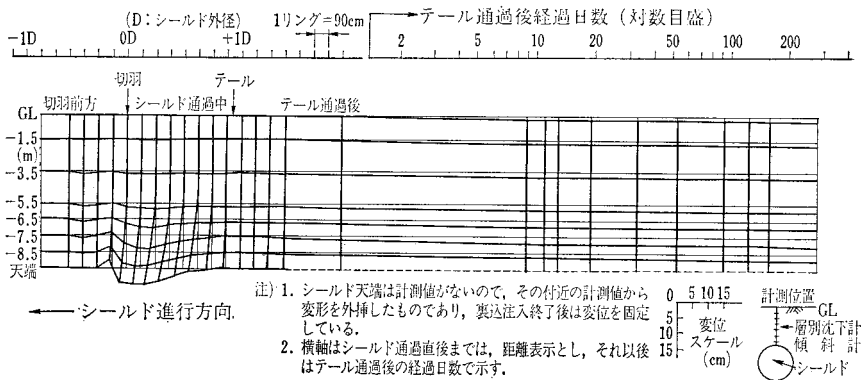


図-8 シールド直上地盤の鉛直・水平変位(高井田東行)

土圧と推力の関係を図-13に示す。以下、切羽接近時、シールド通過時、通過後の地盤挙動の概要を述べる。

a) 切羽接近に伴う影響は切羽前方1D(D:シールド外径)前後から現われ始め、先行沈下や隆起が生じている。後述するように、開口率が小さいにもかかわらず切羽接近時の地盤変形はチャンパー内土圧と密接に関連している。一方、長田東行と西行シールドで見られる先行沈下の差は排土量の計測値としては表われておらず、排土量を主体として精度の高い切羽の安定管理³⁾を行うことは困難であることがうかがえる。

b) シールド通過時、周辺地盤はシールド掘進に伴ってスキンプレートとの摩擦やシールド機上部に突出した裏込注入管の影響をうけて、進行方向にひきずられるとともに半径方向に押し広げられる(図-14)。高井田シ

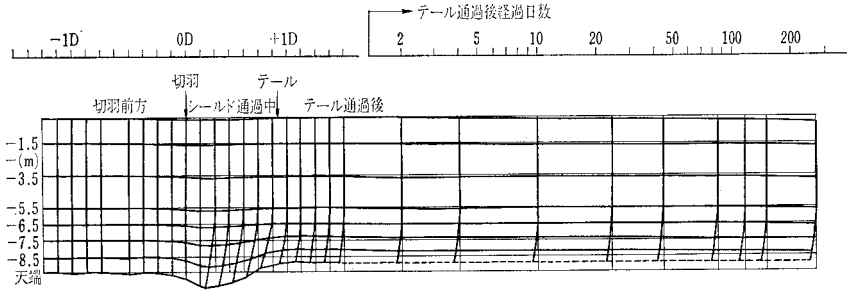


図-9 シールド直上地盤の鉛直・水平変位 (高井田西行)

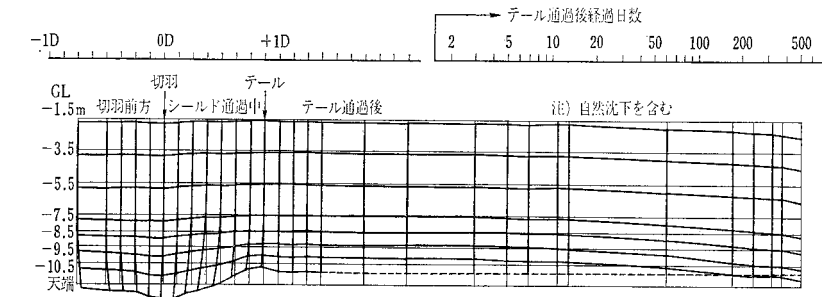


図-10 シールド直上地盤の鉛直・水平変位 (長田東行)

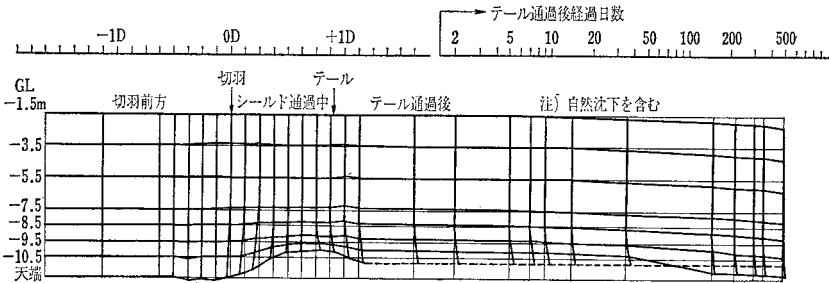


図-11 シールド直上地盤の鉛直・水平変位 (長田西行)

ールドでは長田シールドよりも変位量が大きく、切羽到達後も上部地盤の沈下が1~2リング継続するが、これは地盤特性の差によるものとも考えられる。

① 裏込注入時(テール通過時)に地盤の押し広がり量は最大となり、それまで進行方向にひきずられていた周辺地盤は裏込注入により逆方向(後方)へ変位する。

② 側部地盤の土圧、間隙水圧は切羽到達時から増大し、裏込注入時に最大となる。また、両者の挙動および増大量はほぼ等しく、有効応力は殆んど変化していない。

③ 土圧は側部1m離れの位置で最大、静止土圧+(1.0~1.2kgf/cm²)とほぼ受働土圧に等しく、シールド直近地盤では大きなせん断ひずみが発生していると考えられる。しかし、シールドから離れるにしたがって変位、土圧、間隙水圧とも急激に減少し、シールド通過時の影響範囲は外周から0.8~1.0Dで、顕著な影響がみられるのは直近地盤に限定されている(図-15)。また、高井

田シールドは長田シールドに比べ側部の水平変位が大きい、これは図-6に示した注入材料の性質に基づく圧力分布の違いが原因であると考えられる。

d) テール通過後、後続沈下が発生し、1~2週間後には沈下速度は減少し、間隙水圧が消散する約3か月後には、最終沈下量に対し高井田シールドで約70%、長田シールドで約50%が生じている。なお、最終地表面沈下量は、高井田シールド東行16mm、西行13mm、長田シールドでは自然沈下22mmを含めて東行54mm、西行38mmである。

(2) シールド掘進時の地盤挙動についての考察

切羽部の地盤挙動とチャンパー内土圧との関連性について定量的に考察する。

切羽到達時の地表面変

位とチャンパー内土圧 P_c の土被圧 P_v に対する比率 P_c/P_v との関係を示すと図-16のようになる。沈下量が小さい P_c の値は P_v の5~6割であり、これは今回の地盤の主働土圧にほぼ等しい。すなわち、チャンパー内土圧の管理基準値を土被圧の5~6割程度に設定すれば、シールド天端付近の地盤を除き、特に大きな変形は発生せず切羽を安定させることができた。さらに、地盤強度が低いほどチャンパー内土圧や地表面沈下が敏感に反応するため、地盤強度に応じて管理幅を適切に設定することが重要である。

次に、チャンパー内構造の違いによる切羽前面の地盤変位への影響について述べる。高井田シールドの東行機は西行機と違って隔壁がスリットのすぐ横のカッタースポークの位置にあるため、切削土砂の流入抵抗が大きく、面板に作用する土圧は外周部で異常に高くなっている(図-17~18)。このため切羽直前で急激な先行隆起が発生している。したがって、チャンパー内への土砂流

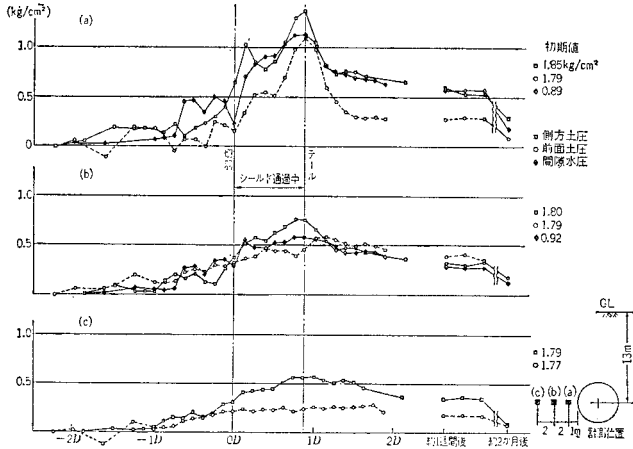


図-12 高井田シールド側部地盤の土圧および間隙水圧の経時変化 (初期値からの変化)

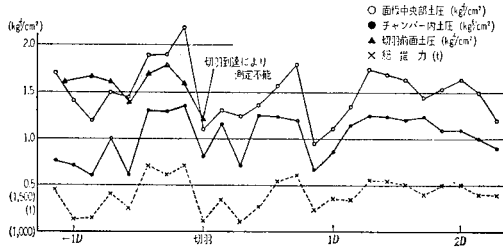


図-13 高井田シールドにおける土圧と総推力との応答性

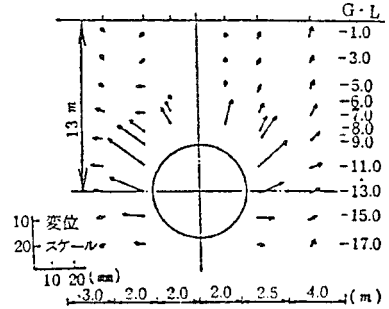
入機構が地盤の先行変位へ与える影響は大きく、機械設計面で十分配慮する必要がある。

今回の同時裏込注入は従来工法と異なり、テールボイド部地山の応力解放が無いため沈下は発生せず、逆に隆起させる作用があるのが特徴である。また、土圧と間隙水圧の挙動から判断すると地盤は同時裏込注入によって非排水状態で挙動し、注入による地盤の強制変位に基づく間隙水圧の発生が後続沈下の原因の1つと考えられる。

(3) 後続沈下についての考察

既述のとおり、シールド掘進に伴って地盤は、切羽部での攪乱、通過時の摩擦や注入管の影響、裏込注入等によってせん断変形をうけている。一般に、粘性土が大きなせん断変形をうけると構造が低位化し(乱れ)て、過剰間隙水圧が発生し、その消散に伴って圧密が生じる(6),(7)と言われている。したがって、テール通過時に発生した過剰間隙水圧は裏込注入時の加圧のみならず、地盤の乱れにも原因があり、後続沈下はその消散過程で生じた圧密現象であると考えられる。以下では、後続沈下の実績データに基づき、その特性について考察する。

地盤に発生したひずみ量を評価するため、図-19~22



注：層別沈下計、傾斜計により計測した変位を初期値を基準にしてベクトル表示している。

図-14 テール通過時の地盤の横断変位ベクトル

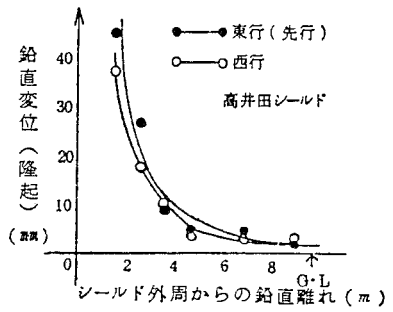


図-15 シールド鉛直離れと鉛直変位の関係(テール通過時)

に示すように地盤を層別沈下計、傾斜計の配置に基づいて要素分割し、シールド進行方向を1リング長(90cm)とする直六面体要素を考える。その格子点の変位計測結果から相直交する3方向の垂直ひずみ $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ およびせん断ひずみ $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ を求める。それらのひずみより算出したテール通過後から最終計測時までに発生した体積ひずみ $d(=\epsilon_x+\epsilon_y+\epsilon_z)$ を図-19~20に、裏込注入完了時までの最大正八面体せん断ひずみ $\tau_{oct(max)}$

$$\left(m \sqrt{\frac{2}{3} ((\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2))} \right)$$

を 図-21~22 に示す。

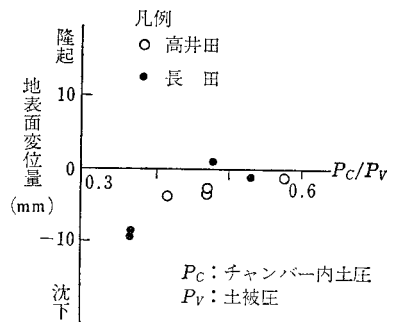


図-16 地表面変位量と P_c/P_v の関係

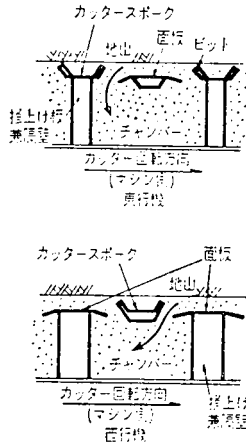


図-17 高井田シールドの土砂流入機構

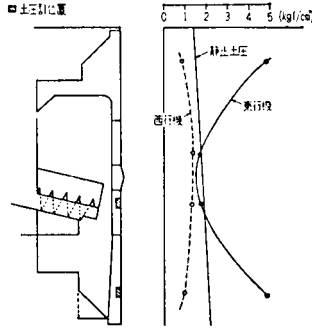


図-18 高井田シールドの面板土圧の比較

高井田シールドでは天端上部付近に限定されているのに対し、長田シールドでは側部へも広がっている。また、大きな圧縮領域の沈下により、その上方地盤は応力が解放されるため膨張領域となっている。しかし、体積変化は天端直上部以外は微小で、地表面ではほとんど発生していない。

以上の結果から、地表面での後続沈下の大部分を占めるのはシールド直近部地盤の局所的な圧縮であり、その上方地盤はそれに追従して沈下しているものと考えられる。したがって、シールド直近部地盤の変形を制御することが地表面沈下の抑制に効果的である。

シールド掘進に伴う天端付近の地盤変位の軌跡は図-23 のようになり、テール通過時までの水平・鉛直変位量やその履歴によって後続沈下量に

差が認められる。そこで裏込注入が完了するまでの最大正八面体せん断ひずみ $\tau_{oct(max)}$ の分布(図-21~22)と、テール通過後の体積ひずみ Δ 分布を比較したが、両者の間には必ずしも明瞭な関係があるとは言えない。例えば、高井田シールドの場合、 $\tau_{oct(max)}$ は天端直上で東行 11%、西行 6%で、他の地盤要素についても東行が西行の約 2 倍となっているのに対し、 Δ は天端直上で両行とも約 1%で、地表面沈下量としても既述のとおり大差ない。このことは、後続沈下量が単に周辺地盤がうけたせん断ひずみの最大値により一義的に決まらないことを示しており、今後、その履歴や時間的要素を加味して検討すべきであると考えている。

シールド掘進に伴う後続沈下は、自然沈下の影響を除くと、地盤内に発生した過剰間隙水圧がほぼ初期状態に戻る約 3 か月後までにその大部分が終了している。この初期の後続沈下は過剰間隙水圧の消散に起因した圧密現象であるのに対し、その後継続する微量の沈下は、地盤内の応力の再配分等

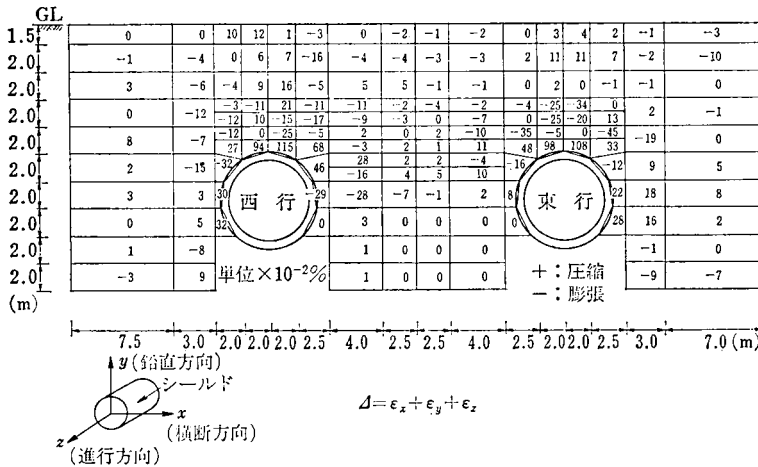


図-19 テール通過後の体積ひずみ Δ (高井田シールド)

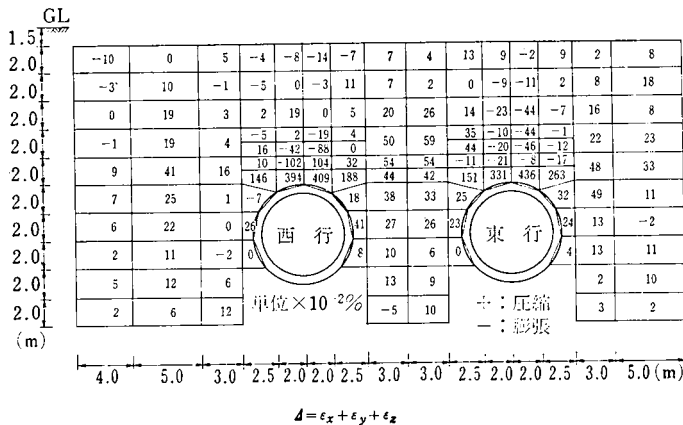


図-20 テール通過後の体積ひずみ Δ (長田シールド)

テール通過後から最終計測時までに発生した体積ひずみは、両シールド共、天端直上付近で 1~5% の圧縮ひずみとなっている(図-19~20)。この圧縮領域は、

がかなり長期的にわたって継続することによるものと考えられる。

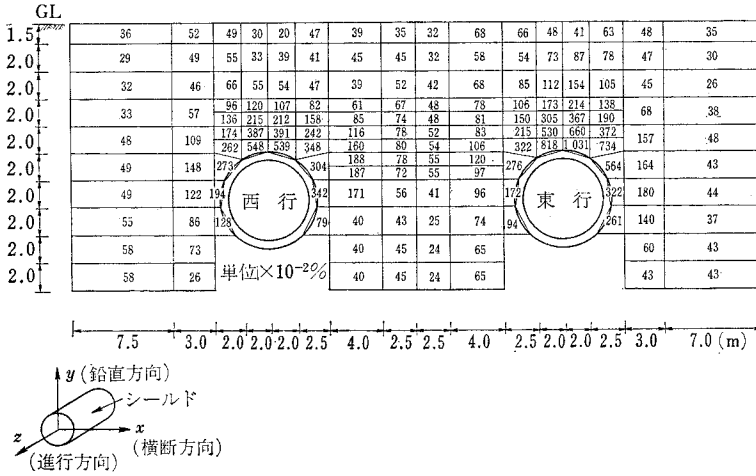


図-21 裏込注入完了時までの最大正八面体せん断ひずみ $\gamma_{oct(max)}$ (高井田シールド)

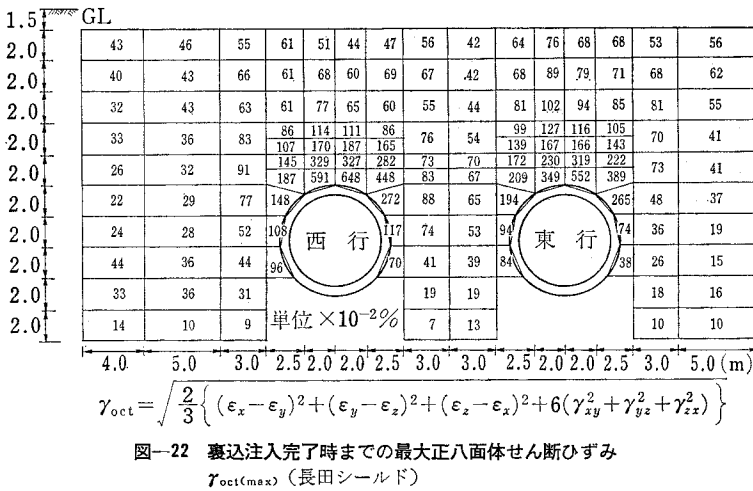


図-22 裏込注入完了時までの最大正八面体せん断ひずみ $\gamma_{oct(max)}$ (長田シールド)

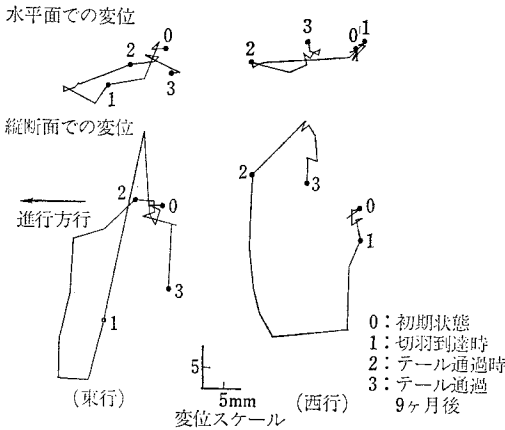


図-23 高井田シールド直上1mの地盤変位の軌跡

3. 施工管理への反映

現場計測によってシールド掘進に伴う地盤の挙動を把握し、それに基づいて切羽部の管理、テール部の裏込注入管理を行うことにより、施工の良否によって生じる地盤変状を抑制することが可能である。現時点では施工例も少なく、軟弱地盤の土圧式シールドの施工管理基準を一般化することは困難であるが、今回の施工結果から次のようなことが言える。

a) 今回のような軟弱粘性土地盤の場合、開口率が小さく面板付きであっても、チャンバー内土圧が前方の地山に比較的敏感に作用するので、チャンバー内土圧は切羽の安定に対して最も重要な管理指標となる。

b) チャンバー内土圧を土被圧の5~6割とすれば切羽は安定したが、地盤が軟弱になるほどチャンバー内土圧は地表面の沈下に敏感に作用するため、管理幅を小さくして厳密な施工を行う。

c) チャンバー内での流動性が悪い地盤では、チャンバー内土圧の管理だけでは対処できないため、掘進速度の調節による推力管理を併用する。

d) 面板に作用する土圧の分布形状によって土砂流入状況を推定し、カッター全体からの均一な土砂取り込みとなるよう対処する。

e) 排土量を主体とした切羽の安定管理では、微小な地表面沈下を制御することが困難で、カッタートルクと共に異常の有無を確認する補助管理指標として利用する。

同時裏込注入は注入圧と注入量により管理し、注入圧を土被相当圧とすれば地盤を押し広げて完全な充填ができる。そのため、先行沈下が発生した場合は、特に地盤の持ち上げ効果が発揮できるが、反面、それに起因して発生する後続沈下も無視できない。今後、これらを考慮して裏込注入時の適正な注入圧や注入量の設定方法を確立する必要がある。

また、地盤変状の防止に対しては、シールド掘進に伴

う地盤の乱れを最小にすることが究極的な問題として残っているため、シールド機械の構造や同時裏込注入システムの改善が必要であり、これらの点に関し、

- ① カッター全体から均一に土砂を取り込んで、切羽の安定管理が容易に行えるシールド機械の構造、
- ② 推力の増加や地山の乱れを極力小さくする注入パイプの構造や装備方法、
- ③ シールド通過時のスキンプレーットの摩擦を減少させる潤滑剤の注入等の方法、

などを検討することが今後の課題である。

あとがき

軟弱地盤でしかも重要構造物と近接するシールド工事のため、地盤変状がほとんど許容されないという厳しい施工条件において、切羽の安定掘削と同時裏込注入によるテールボイドの即時完全充填に着目して実施した土圧式シールドの施工について報告した。

工事の初期段階では計画通りの施工ができるだろうが、もし従来のような大きな沈下が発生したらどうすれば良いだろうかなど不安に悩まされた。しかし、各種計測によって地盤の挙動を知り、これを施工管理に反映できるようにしてこれらの不安は解消した。特に、裏込注入によって周辺地盤がむしろ外側に押し広がっている計測結果を得た時には、軟弱地盤でも地盤変状を非常に小さく抑えてシールド掘削が可能であるという自信を持つことができた。そして、当初計画どおり近接重要構造物に対して補助工法を用いることなく安全施工が行えた

ことは、経済性の面とともに今後のシールド工法の適用範囲をより拡大するものと考えている。

また、地盤計測により得た各種データの紹介も行ったが、シールド掘進に伴う軟弱地盤の挙動把握やその防止対策の一助ともなれば幸甚である。なお、現在シールドによる地盤変状発生機構やその制御方法について各種データを分析中であり、別途とりまとめて発表の予定である。

最後に、本工事に対して終始技術的指導を賜った村山朗郎京都大学名誉教授および足立紀尚京都大学教授をはじめ、工事を担当された大成建設、間組、各種計測に協力をいただいた大阪土質試験所の各位に深く感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 竹山 喬：シールド掘進による地盤沈下とその予測に関する研究，1983年12月。
- 2) 田中壬子也：最近のシールド工事における“機種選定”について，第13回シールドトンネル工法の施工技術講習会，日本プロジェクトリサーチ，1979年10月。
- 3) 三木五三郎・下田一雄：シールドトンネル裏込注入工法の問題点と今後の動向，第6回トンネル技術シンポジウム，pp. 1~8，1984年9月。
- 4) 竹山 喬ほか：シールド工法と土質・6. 地盤沈下(1)，土と基礎，Vol. 26, No. 4, pp. 67~72，1978年。
- 5) 小林健郎：シールド掘進に伴う地盤変位に関する研究，1982年9月。
- 6) 土質工学会：土質工学ハンドブック，pp. 151~152，1982年。
- 7) 森 麟・赤木寛一：非排水せん断変形で生じた乱れに基づく正規圧密粘土の圧密現象，土木学会論文報告集，第335号，pp. 117~125，1983年7月。

(1984.12.17・受付)