

招 待 論 文

軟弱地盤における上下隣接シールド施工の 実態と計測結果について

RESULTS OF SHIELD TUNNELLING IN VERTICAL CLOSE TO EXISTING SHIELD TUNNELS

橋本定雄*

By Sadao HASHIMOTO

1. ま え が き

著者が所属する東京都下水道局は、昭和37年に本邦初の下水道シールド工事を実施してから今日までの約20年間に総延長約450kmに及ぶシールド工事をやってきた。

初期のシールド機は、圧気工法を併用した開放型手掘り式とブラインド式のもが主力であり、いかに作業員の安全を確保しながらシールド掘削を効率的に行うかというところに腐心した。この当時はシールド掘削に伴って生じる地盤沈下に特に注意を払うこともなく、また、さほど問題とされてもいなかった。

しかし、昭和40年代なかばに入ると、シールド掘削に伴って生じる地盤変状（沈下および隆起）が、注目された。特に地盤沈下によって管渠工事沿線の周辺家屋に被害が発生することが問題となってきた。ちょうど、この時期は東京都における下水道の建設が爆発的に伸び、施工場所もしだいに地盤の悪い地域に移行していった時期である。したがって、この家屋被害に対して配慮することなくシールド工事をを行うことは許されなくなった。この対策として、泥水加圧式、土圧式等々多機能なシールド機が開発され、薬液注入工法をはじめとする各種の補助工法を採用し施工を行ってきた。しかしながら、シールド掘削に伴う地盤沈下発生メカニズムが明確でなかったこともあり、必ずしも家屋被害を的確に避けられたとはいいがたく、また被害が発生しない場合でも過大な対策費をかけてしまったのではないかと疑問が残った。

そこでこれらのことを明らかにすべく、東京都における代表的な軟弱地盤である葛飾、江戸川両区で施工された篠崎幹線シールド工事において、数年にわたり詳細な現場計測を実施した^{1)~3)}。また、これと同時に地盤沈下と家屋被害の相関性についても調査を行った。その結果、シールド掘削による地盤沈下発生メカニズムと地盤沈下と家屋被害との関係を定量的に把握することができた⁵⁾。そして、最適なシールド機種を選定手順、裏込め注入工法の考え方、動態計測施工（管理）の有効性等をある程度明らかにすることができた^{6)~9)}。

一方、ここ数年来、下水道シールド工事の施工環境は技術的に一段と厳しくなっている。それは、下水道事業が他の公共事業と比べて後発であるため、すでに地下に埋設されている電気・通信、水道、地下鉄等の大型トンネルと上下方向にきわめて接近して施工せざるを得ないことである。この傾向は、今後ますます増大するものと考えている。

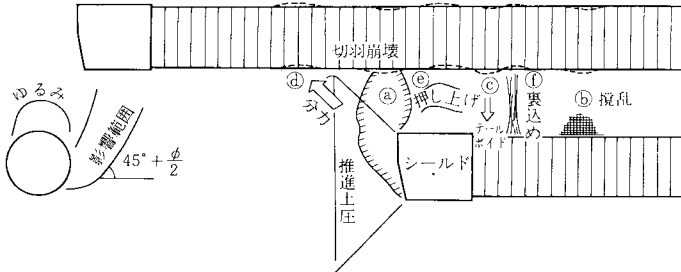
この既設トンネルに対し、上方もしくは下方に隣接してシールド工事をを行う場合、特に地盤がどのように挙動し、それに伴い既設トンネルがどのように応答するものが注目される場所である。しかし、現在のところ、この点が明確ではない。著者は、従来から現場計測によって、この点を明らかにし、今後数多く予想されるこの種の工事を安全に、経済的に行いたいと願っていた。幸いなことに、ここ3~4年の間に上下に隣接するシールド工事をを行う機会に恵まれ、詳細な現場計測を行うことができた。その結果、上下隣接シールド施工における地盤の挙動と既設トンネルに対する影響についてこの実態をかなり、把握できたと考えている。以下にその詳細について述べる。

* 正会員 工博 東京都下水道局技監
(〒100 千代田区丸ノ内3-8-1)

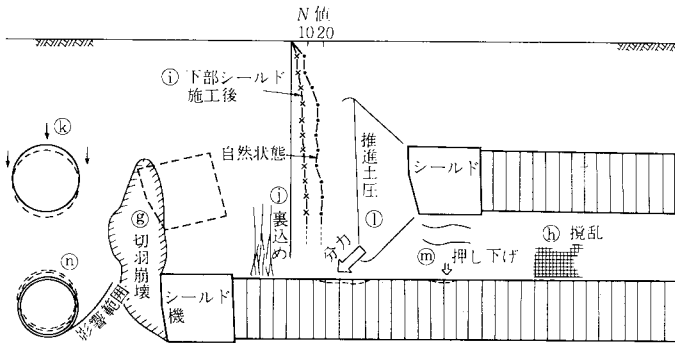
2. 上下隣接シールド工事における技術的問題点と研究課題

過去に実施した著者らの単管シールドに関する施工お

よび調査の経験^{10),11)}から、シールド掘進に伴って生じる地盤変状は、シールド掘進管理などの施工の良否によって左右されることがわかっている。施工と地盤変状の関連のうち、注目すべき事項を挙げると以下のようなものがある。



図一 上下隣接シールドの問題点・模式図（上部シールド先行の場合）



図二 上下隣接シールドの問題点・模式図（下部シールド先行の場合）

① シールド掘進に伴って生じる地盤沈下は、切羽における過大な取り込み、テールボイドの発生など地盤中に空隙が生まれることによって起こるものである。したがって、この空隙の大小によって沈下量が左右されるとともに、地盤によっても変動する。砂地盤の場合は数日程度で沈下は終了するが、粘性土地盤の場合は数か月にわたって継続することがある。

② ジャッキ推力および速度が大きすぎたり、掘削土の排土率が過少の場合は、シールド切羽における推力が地山土圧よりも過大となり、地盤が局部的に隆起する。この場合地盤には過推力分に見合った応力が分布して作用することになる。

③ また、テールボイドに対する裏込め注入時の注入圧力が過大な場合にも局部的に地盤を押し上げる。

④ シールド掘進後、周辺地盤の地山の強度は著しく低下することがある。

表一 上下隣接シールドの想定される技術的問題点

施工順序	原因と考えられる現象	上下シールド施工・覆工への影響			
		上部シールド		下部シールド	
		施工への影響	覆工への影響	施工への影響	覆工への影響
上部シールド先行の場合	沈下現象を伴うもの	㉔ 切羽崩壊による空隙の発生		沈下による応力発生	上部管の落ち込み
		㉕ 上下の中間地盤の攪乱		〃	
		㉖ テールボイド発生		〃	
上部シールド先行の場合	隆起現象を伴うもの	㉗ シールド過推力		隆起による応力発生	
		㉘ シールド機通過		〃	
		㉙ 過大な裏込め注入圧力		線形の乱れ応力発生	
下部シールド先行の場合	地山の自然状態からの変化	㉚ 切羽崩壊による局部的空隙の残存	切羽崩壊		シールド機が覆工に直接のりあげる
		㉛ 上下の中間地盤の攪乱	〃		〃
		㉜ ゆるみ影響範囲内の地山強度の低下と不均一化	〃		
		㉝ 裏込め注入材の固結・残存	掘進困難 推進土圧の負荷		応力集中
		㉞ 地山残留沈下		線形の乱れ	
下部シールド先行の場合	沈下現象（押し下げ）を伴うもの	㉟ シールド過推力			沈下による応力発生
		㊱ シールド機通過			〃
	隆起現象（浮き上がり）を伴うもの	㊲ 上部トンネル構築による鉛直土圧の減少			応力発生 線形の乱れ

以上の事項を念頭において、上下隣接シールド工事において問題となると想定した事項は、図-1、図-2の④~⑩の14項目の現象である。これらを上記の①~④と対応させて整理すると、表-1のようになる。

上部シールドが先行施工され、この既設シールドトンネルの直下をごく接近した状態で新設シールドが掘進される場合は、図中の④~⑥の現象によって、既設シールドトンネルが変位、変形し、下水道管渠として所定の縦断線形が保てなくなること、さらに、セグメントや継手ボルトが破損するのではないかということが懸念された。

一方、下部シールドが先行施工され、この既設シールドトンネルの直上をごく接近した状態で新設シールドが掘進される場合は図中の⑦~⑩の現象によって、既設シールドトンネルが前述と同様の影響を受けることが懸念された。なお⑧と⑩は切羽崩壊による局部的空隙の残存および、固結した裏込め注入材によって、新設シールドの施工が難しくなると想定したものである。また、⑨は新設シールドの通過によって、土かぶり圧が減じられ、既設トンネルが浮き上ることを心配したものである。

以上述べたことは著者が本研究に取り組む前に問題として想定したものである。したがって、研究課題として次の3項目を挙げ、明らかにすることにした。

- ① 想定した技術的問題点の発生の有無とその程度の把握
- ② 新設シールド切羽周辺地盤、既設・新設シールド間の地盤(中間地盤)の挙動およびそれに対応する既設シールドトンネルの挙動の実態
- ③ 上下隣接シールド工事に対する設計・施工の取り組み方

3. 現場計測

(1) 調査方法

調査対象として、①砂地盤で上下同時期施工(柴又幹線シールド)、②粘性土地盤で既設シールドトンネル直下の施工(青井幹線シールド)、③粘性土地盤

で上下同時期施工(梅田幹線シールド)、④砂と粘性土の互層地盤で既設シールドトンネル直上の施工(江戸川幹線シールド)の4現場を選定した。各現場の隣接施工断面および地盤条件を図-3にまとめて示す。なお、これらの4工事は柴又幹線、青井幹線、梅田幹線、江戸川幹線の順で施工されたものである。

調査方針としては、各現場でそれぞれの現場特有の問題点を明らかにするとともに、すべての調査を比較することにより、上下隣接シールド施工の取り組み方を明確にできるように配慮することにした。

まず柴又、青井幹線では、当時上下隣接シールド工事の実態を調査している事例がほとんどなかったことから、当初想定された技術的問題点の有無とその程度を探りあててを調査の主眼とし、同時に工事自体を無事

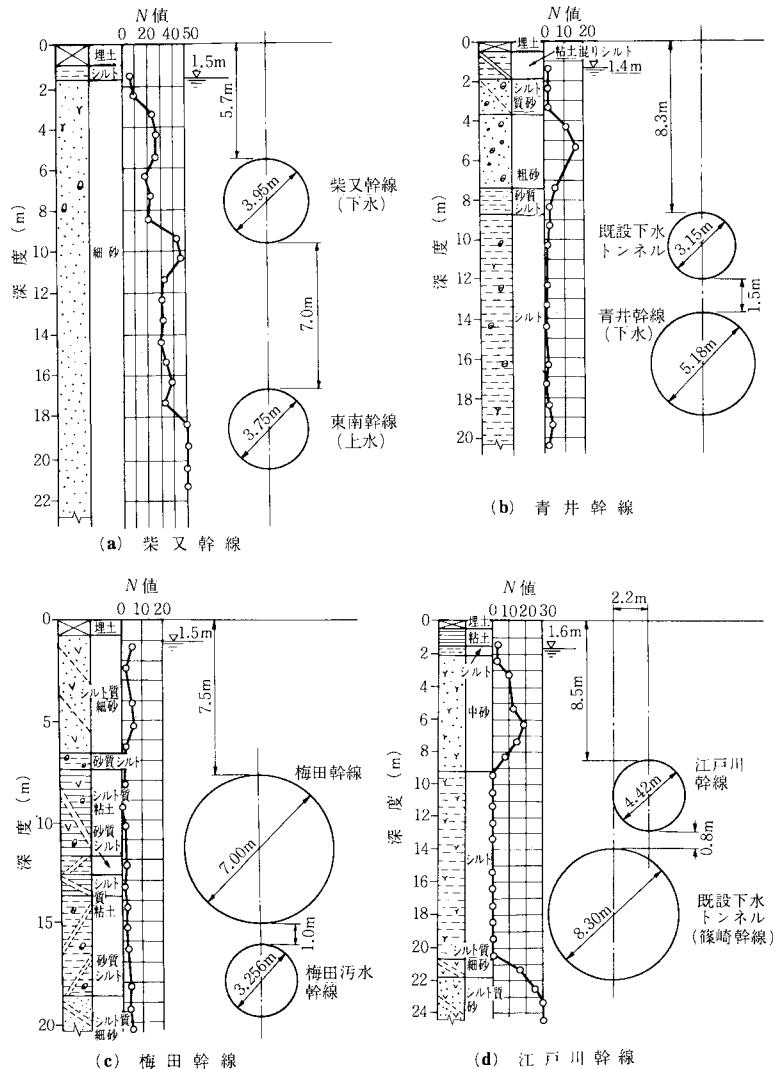


図-3 各工事の施工断面

表—2 調査計測項目、計器、計測方法一覧表

計測項目		計器			計測方法	計測対象幹線別・計器および調査数量				
		名称	構造	精度		柴又	青井	梅田	江戸川	
地盤の変状	変位	地表面沈下	地表面沈下杭	木杭, コノエ銀	±1 mm	測量	222点	106点	127点	45点
		地中鉛直変位	地中沈下計	ロッド式	±1 mm	測量	34本	14本	28本	11本
		中間地盤鉛直変位	中間地盤沈下計	ロッド式	±1 mm	測量	—	9本	6本	—
		地中水平変位	地中変位計	電気式傾斜計	±0.5 %	計器測定	2本	2本	7本	4本
	応力	鉛直土圧	地中土圧計	電気式	±0.5 %	計器測定	—	—	—	—
		水平土圧	地中土圧計	電気式	±0.5 %	計器測定	—	—	4本	4本
	水圧	地下水水位	地下水水位計	ストレーナー加工, 塩ビ管	±1.0 cm	手動測定	9本	3本	3本	1本
		間隙水圧	間隙水圧計	電気式	±0.5 %	計器測定	—	—	6本	6本
	土性の変化	N 値	—	—	—	標準貫入試験	97回	30回	30回	44回
		弾性係数	—	—	—	横方向載荷試験	17回	—	—	—
強度		—	—	—	一軸, 三軸圧縮試験 ダッチコン試験	6 試料	4 試料	8 試料 8回	4 試料	
既設シールドトンネルの挙動	外力	作用土圧	土圧計	電気式	±0.5 %	計器測定	2リング	—	1リング	—
		作用水圧	間隙水圧計	電気式	±0.5 %	計器測定	—	—	1リング	—
	変位	鉛直変位	測定 銀 水盛式沈下計	銀, マーキング 電気式	±1 mm ±0.5 %	測量 計器測定	1点/3リ ング	25点	28点	60点
		水平変位	測定 銀	銀, マーキング	±1 mm	測量	〃	25点	28点	60点
	断面変形	鉛直たわみ	変位計 ダイヤルゲージ	電気式 電動	±0.5 % 1/100 mm	計器測定 目視	8リング	3リング	3リング	4リング
		水平変形量	変位計 ダイヤルゲージ	電気式 電動	±0.5 %	計器測定	8リング	3リング	3リング	4リング
	ひずみ(応力)	セグメント発生ひずみ (鉄筋, コンクリート)	ひずみゲージ 鉄筋計, コンク リートひずみ計	— 電気式	— ±0.5 %	計器測定	4リング	1リング	1リング	—
		ボルト発生ひずみ	ひずみゲージ	—	—	計器測定	2リング	—	1リング	—
		二次覆工表面ひずみ	ひずみ計	電気式	±0.5 %	計器測定	—	1リング	—	4リング

に終了させるにはどのような方針で設計, 施工を行うべきかに総力を注ぐことにした。次に, 梅田幹線は柴又, 青井幹線の調査により, ある程度検討すべき事項を絞ることができたので, 特に, 地盤の変位と応力伝播についての的を絞って, 詳細調査を行うことにした。最後に江戸川幹線はそれまでに施工された3つの幹線工事でも得られた成果をもとに導かれた上下隣接シールド工事のあるべきフローチャートに従って実際に施工を行い, これ以前で習得した施工管理技術の検証を試みた事例でもある。

(2) 調査項目と測定方法

当初想定した技術的問題点の発生の有無, およびその原因等の実態を明らかにするため, シールド掘進に伴う地盤変状, 先行(既設)シールドトンネルの挙動, について詳細な計測を行った。調査(計測)項目, 使用計器, 調査(計測)方法, およびその規模をまとめて表—2に示す。これらの計器の標準的な配置を図—4に示す。

また, 計測と並行して, シールド施工状況に関して表—3に示す調査を行った。

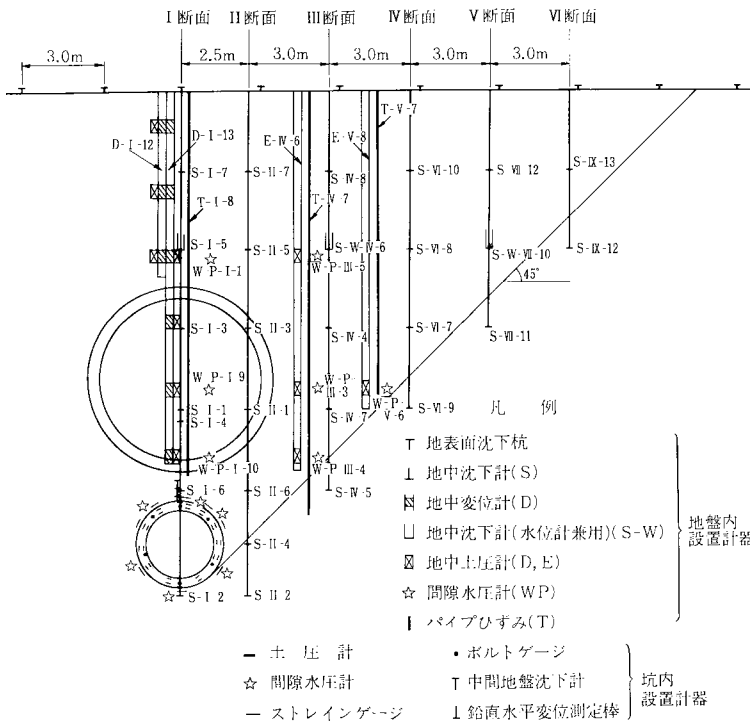
(3) 上下同時施工の事例¹²⁾(柴又幹線シールド)

a) 現場状況と施工概要: 柴又幹線シールド工事は, 計測調査を実施した4現場のうち, 上下シールドとも砂地盤において掘進する唯一のものであることから, まず砂地盤における上下隣接施工の問題点をつかむことを調査のねらいとした。

図—3(a)の中で, 上部に位置するものが下水道用の柴又幹線であり, 下部が水道用の東南幹線(都水道局より受託)である。柴又幹線は, シールド外径が3950—

表—3 シールド施工状況調査項目

調査項目	調査方法
切羽管理	ジャッキ推力, スピード, 開口率, 排泥率, 泥水圧, 圧気圧, カッタートルク 掘進記録
推進管理	鉛直水平蛇行 測量
覆工管理	セグメントの変形, 湧水状況 隧道スケールによる測値
裏込め注入管理	セグメント外周乱れ範囲, 注入量, 注入時期, 注入状態 コーン貫入試験 注入記録 コアサンプリング



図—4 計器設置横断面図 (梅田幹線)

4 950 mm で、土かぶりは約 6~9 m、東南幹線はシールド外径が 3 750 mm で、上下シールドの離間は 5~7 m である。

本路線の地盤は主に上部約 2~3 m が N 値 2~10 程度の比較的ゆるい砂層で、それ以深は N 値 20~50 の締まった砂層である。地下水位は、G.L.-1~2 m の深度にある。シールド機種としては、地盤が砂層であり、しかも地下水位が高いことから、高水圧下の施工となるので、上下シールドとも切羽における水圧のバランス機能が優れているという理由で、泥水加圧式を採用した。施工順序については、上部シールドを先行させると、下部シールドの施工に伴う沈下によりすでにできあがっている上部シールドの線形を変化させる危険性があること、および万が一崩壊が生じた場合上部シールドの切羽で作業中の作業員の安

表—4 柴又幹線における技術的問題点の有無と程度

問題点の原因と考えられる現象	調査地点における発生の有無	施工・覆工への影響の有無				備 考
		上部シールド		下部シールド		
		施工	覆工	施工	覆工	
地山の自然状態からの変化	㊸ 切羽崩壊等による局部的空隙の残存	無	無	—	無	●機種が地盤に適していた。 ●掘進管理が適正であった。
	㊹ シールド外周地盤の攪乱	有. シールド外径の 5~7 %程度. 空洞部と崩落部とがある。	無	—	—	●上下シールドの離間が 5~7 m と大きかった。
	㊺ ゆるみ範囲の地山強度の変化、不均一化	無. N 値、 K 値とも変化なし。	無	—	—	●機種が地盤に適していた。 ●掘進管理が適正であった。 ●ゆえに、地盤の変状がわずかであった。
	㊻ 裏込め材の固結、残存	有.	無	—	無	●地下水によって 希釈され固結度はかなり低い。
沈下 (押し下げ) を伴うもの	㊼ シールド過推力	有. やや押し気味に施工した。	—	—	無	●推力が過大でなかった。 ●上下シールドの離間が 5~7 m と大きかった。 ●中間地盤が N 値 30~50 と良質だった。
	㊽ シールド機の通過	有.	—	—	無	●掘進管理が適正であった。 ●上下シールドの離間が 5~7 m と大きかった。
隆起現象 (浮き上り) を伴うもの	㊾ トンネル構築による鉛直土圧の減少	無.	—	—	無	

全性に問題があるなどの理由で、下部シールドの施工を先行させることにした。さらに下部シールド掘進による地盤沈下によって上部シールドの縦断線形(勾配)が変化することを懸念して、下部シールドによる地盤沈下が終了した時点で上部シールドの掘進を行うものとした。この待機時間は過去の実績をもとに1か月と設定した。なお、本工事における、上下隣接区間は約4.8kmである。

b) 計測結果：施工の結果を要約すると表-4に示すようである。この現場で当初問題となると考えた㊸～㊿の現象について以下に述べる。

まず、下部シールド先行による問題点㊸～㊿について述べると、㊸の切羽の崩壊、㊹のゆるみ範囲内の地山強度の変化、不均一化はみられなかった。これはシールド機種が地山に適しており、また地表面沈下をモニターしながら掘進管理を行ったことが最大の要因といえる。また㊺のシールド外周地盤の攪乱はシールド径の5～7%と上下の離間と比較しわずかであり、㊻の裏込め材は地山内で希釈され固結度が低く、シールドの進行妨害となる可能性は少ないことが確認された。また㊼の下部シールドによる残留沈下は2週間程度で終了し、上部シールドの施工時期が適切であったことが裏付けられた。

次に、上部シールド掘進中の問題点である㊽シールド過進力、㊾シールド機通過による周辺地盤の動きについて述べると、地盤は図-5に示すようにシールド進行方向に変位することがわかった。しかもその変位は、シールド機から鉛直上方に4.5mの範囲まで及んでいることが計測された。下方向への影響について述べると、下部シールドセグメントに設置した土圧計によって、上部シールドの推力が下部シールドトンネルまで及んでいないことが確認された。これは、上下シールドの離間5～7mは、影響範囲よりも十分に大きいこと、および中間地盤がよく締まっていたことを示すものである。㊿のト

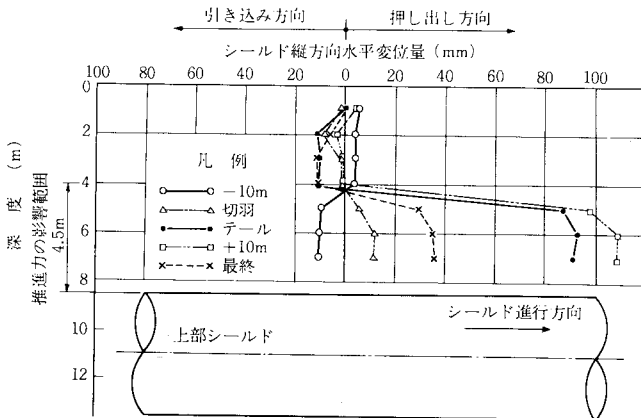


図-5 縦断方向水平変位分布

ネル構築により下部シールドにかかる鉛直土圧が減少し、下部シールドが逆に浮き上るといった現象は、まったくみられなかった。

また、当初軽く考えたことであるが、テールパッキンの交換時に、図-6に示すように土砂がシールド内に流入し地上に陥没が生じた。ただし、モルタル系薬液を地中の空隙部に充填したので、大事には至らずまた後続上部シールドの施工にも支障とならなかったが、砂地盤における下部シールド施工は高水圧となる場合が多いので、通常の水圧下とは事情が異なることを認識し、機種選定、テールパッキンの選定および交換に関して十分な検討が必要といえる。

(4) 既設シールドトンネル直下での施工事例³⁾

(青井幹線シールド工事)

a) 現場状況と施工概要：青井幹線シールド工事は、図-3(b)に示したように、すでに二次覆工のなされている既設シールドトンネル(既設下水道管)の下を1.5mの離間で新設シールドが平面的にクロスするように掘進されたものである。柴又幹線のように施工順序を選択する余地はなく、しかも既設トンネルがシールド上部に位置するので、単管シールドの経験からシールド上方には必ず何らかの地盤変状が生じることが予想されたため、慎重に施工することにした。具体的には、隣接区間において図-7に示す配置で地表面および既設トンネル内に測点を設置し、計測結果を判断しながら次の施工方法を決めていく、いわゆる動態計測管理を実施し、既設トンネルの安全確保を行うことにした。

既設トンネルと新設シールドとの隣接区間は、約50mである。図-3(b)中、上部に位置する既設下水道トンネルは、土かぶり8.3mの深度に布設されている。

外径は3150mm、覆工厚さは375mmであり、コンクリートセグメントは二次覆工された状態にある。

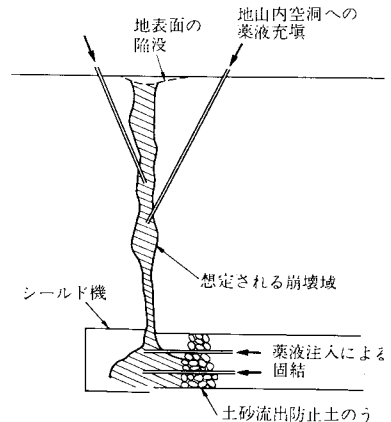


図-6 テールパッキン交換時に生じた砂地盤の崩壊の想定図

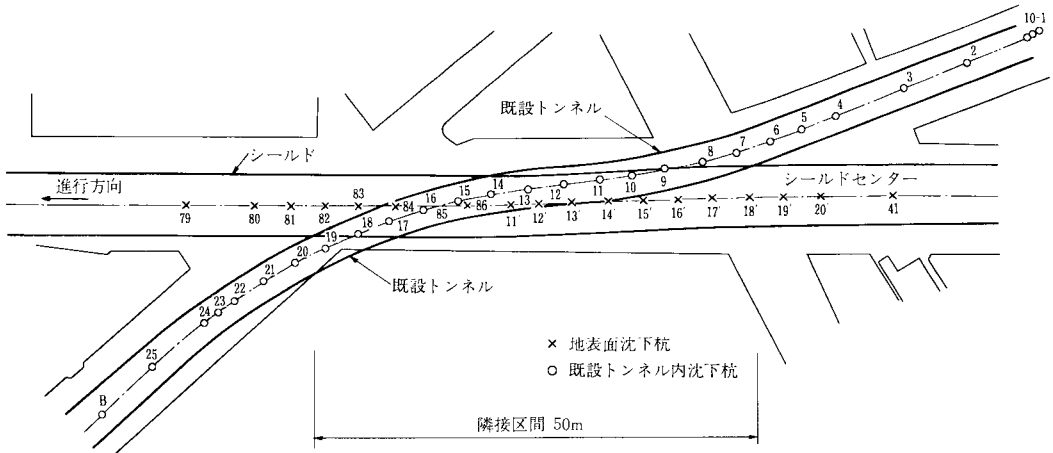


図-7 動態計測管理用計器配置図

表-5 青井幹線シールドにおける技術的問題点の有無と程度

原因と想定される現象		調査地点における 発生の有無	影響の有無				要因と考えられる事項
			上部シールド		下部シールド		
			施工	覆工	施工	覆工	
沈下を伴うもの	㉑ 切羽崩壊による空隙の発生	無	—	無	無	—	●掘進管理が適正であり、地山土圧に対し、推力が不足しなかった。
	㉒ 中間地盤の攪乱による強度低下	有. 48 cm (シールド径の9%)で中間地盤の1/3程度であった。	—	無	—	—	●掘進管理が適正であり余掘り、蛇行が少なかった。 ●土塊が既設トンネル外周をすりぬけて移動した。
	㉓ テールボイドの発生	有. ただし、急激な沈下はみられなかった。	—	無	—	—	●裏込め注入が十分なされた。
隆起を伴うもの	㉔ シールド過推力	有. 鉛直・水平方向に伝播していることが、沈下計、水平変位計の測定結果よりわかった。	—	有	—	—	●中間地盤厚が1.5 mときわめて少ない。 ●ブラインドシールドで押し気味の施工。
	㉕ シールド機通過	有.	—	有	—	—	●中間地盤厚が1.5 mときわめて少ない。
	㉖ 裏込め注入圧	有.	—	有	—	—	●中間地盤厚が1.5 mときわめて少ない。

下部に位置する青井幹線シールドは、外径5180 mm、土かぶり13 mである。したがって両者の離間は1.5 mときわめて小さい。地盤は、深度1.9 mまでが埋土、1.9~3.7 mが砂質シルト、3.7~7.4 mがシルト質砂、7.4 m以深が砂質シルトで構成されている。シルト層、砂層のN値は7~15とゆるく、砂質シルト層の自然含水比は60~70%でほぼ液性限界に近く、一軸圧縮強度も0.5 kgf/cm²と低い。地下水位はG.L. -1.4 mの位置にある。

シールド機種としてはブラインド式を採用した。その理由は隔壁を有する閉塞タイプのこの機種が自立性の乏しい粘性土地盤に適していること、および推進力の調整が、ジャッキ推力、開口率、ジャッキスピードのみで制御でき切羽の支持機構が単純明解であり、したがって人

為的に施工の調整が行いやすいと考えたためである。

シールド掘進を行った結果、既設トンネルに被害を与えることなく無事その直下を通過することができた。

この理由は、シールド機通過中、地表面沈下、既設トンネル変位を測定しながら、それぞれの測定値が管理値を上回らないように、1リング通過するごとにジャッキ推力、開口率などの調整を的確に行ったためであると考えている。なお、管理値は、地上家屋や既設トンネルに被害を及ぼさない限界値より決定したものである。

b) 計測結果：施工の結果を要約すると表-5に示すとおりである。

計測結果について述べると、既設トンネルに被害は生じなかったが、シールド機通過により、既設トンネルへ影響があることがわかるとともに、上部シールドが先行

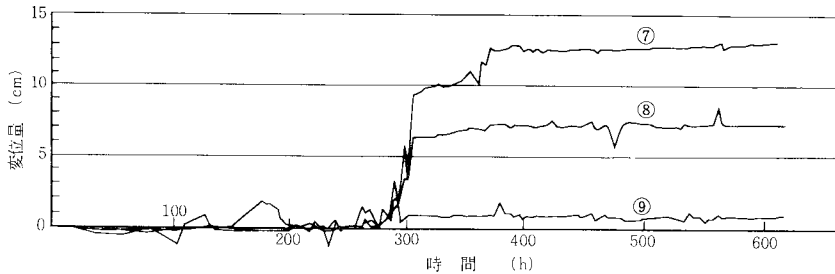


図-8 中間地盤変位（既設トンネルとの相対変位）の経時変化

した場合に想定された問題点に関していくつかの点を明らかにすることができた。特に表-1中④～⑥の地盤沈下よりも、④～⑦の地盤隆起の方が既設トンネルへの影響が予想以上に大きいことが確認された。

まず、④～⑥の地盤沈下の原因のうち、④の切羽の崩壊、⑤のテールボイドの発生による急激な沈下はともに認められなかった。これは、シールド機種選定、掘進管理が適切であり、テール脱出時に裏込め注入を十分に行うことができたためといえる。また、⑥の中間地盤の変位は図-8に示すようであった。

なお、これは既設トンネルと地盤との相対変位を示すものである。この図から地盤の変位は既設トンネルから39 cmの範囲ではほとんどなく、新設シールドに近づくほど大きいことが読み取れる。これは中間地盤の土塊はシールド機通過中は、既設トンネルの周りをすり抜けるように上方に移動することを示すものである。このように中間地盤の土塊が既設管の周りをすり抜けることは、シールドの推進土圧による既設トンネルに対する負荷土圧が低減される効果が期待できることでもある。したがって、既設トンネル防護を目的として中間地盤を固結するような補助工法を採用すると、地盤が塑性流動を起こしやすくなり、過大な負荷土圧を直接既設トンネルに作用させてしまう危険性が考えられる。故に中間地盤の改良を行う際には十分な検討をすることが要求される。図-9は、既設および新設シールド内部から行ったコーン貫入試験結果を示すものである。中間地盤のほぼ1/3程度の範囲が乱されており、これはシールド径の10%に相当するものである。

次に④～⑥の現象について述べると、これらの現象によって地盤隆起が生じ、既設トンネルが変位することがわかった。図-10にシールド掘進位置と既設トンネルの縦断方向変位の関係を示す。

既設トンネルの変位挙動は、鉛直と水平とで異なる。鉛直変位の場合は、分布が裾幅70～100 mの凸形となり、変位を生じる範囲とそのピーク位置はシールドの進行とともに移動する。シールド機通過後は、地盤挙動が隆起から沈下に移行するのに伴い、逆に凹の沈下形状と

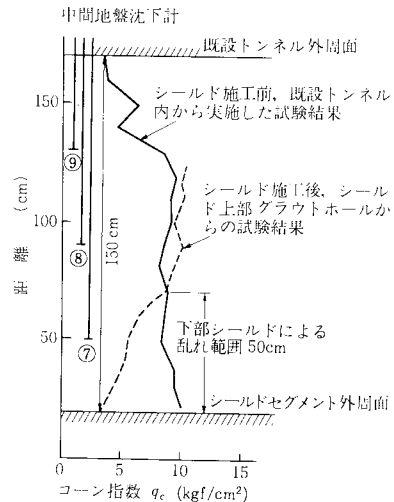


図-9 シールド掘削による中間地盤の乱れ範囲

なる。一方、水平変位は、新設シールドが既設トンネルにクロスし遠ざかっていったために、シールド機が隣接区間始点に到達したとき、隣接区間中央を境にして、隣接区間始点側が進行方向右方、終点側が左方に移動し、既設トンネルがS字形に動いたことがわかった。

この変位分布は、最終段階まで大きな変化はみられなかった。鉛直と水平方向の変位の戻りの有無は、既設トンネルが局部的に負荷土圧を受けた場合の周辺地盤の拘束状態の違いを反映しているものである。

(5) 上下同時施工の事例¹⁴⁾ (梅田幹線シールド)

a) 現場状況と施工概要：梅田幹線シールド工事は、青井幹線の経験から、最終的な沈下分布よりもむしろ、シールド機通過時の一時的な地盤隆起の方が既設トンネルへの影響が大きく、それを重視すべきであることがわかったので、①シールド掘進中に生じるシールド外周地盤の変位と地中の応力伝播がシールド推力によってどのように変化するのか、さらに、②発生する地盤変位、応力によって既設トンネルにどのような外力が作用し、変位、変形が生じるか、③セグメントリング構成部品にはどのような応力が発生するのか、等を把握することを主

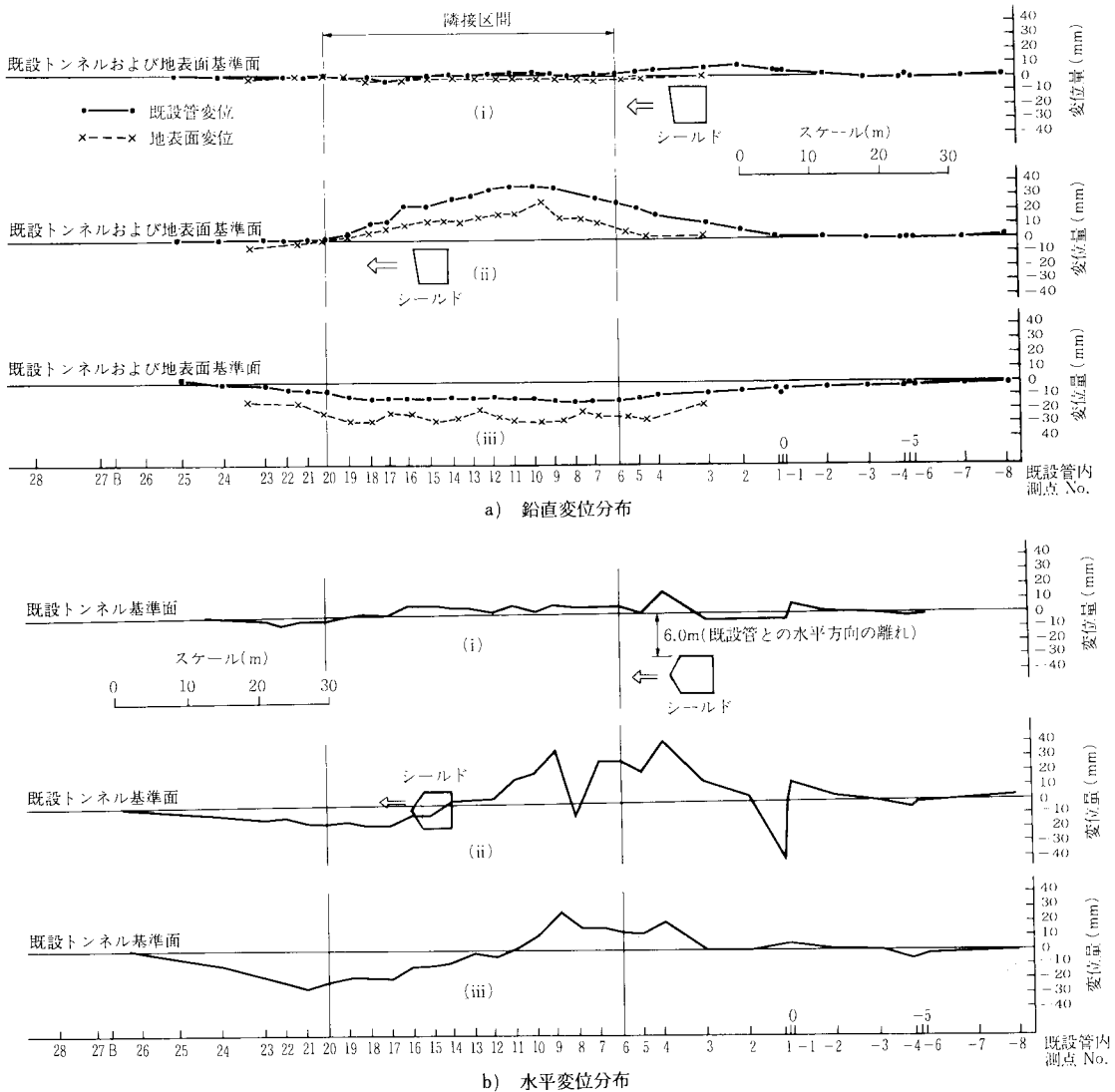


図-10 シールド掘進位置と縦断変位分布

目的として、詳細な計測を実施した。

図-3(c)中、上部に位置するのが梅田雨水幹線であり、シールド外径7000mm、土かぶり7.5mである。下部に位置するのが梅田污水幹線であり、シールド外径3256mm、土かぶり18~19mである。両者の断面比は2.1と大きく、また離間は1.0mと非常に小さく、上下の隣接区間は約400mである。

調査位置における地盤は深度0.8mまでが埋土、深度0.8~6.5mまでが自然含水比49%、 N 値=2のゆるいシルト質細砂、深度6.5~13.0mが N 値=1、1軸圧縮強度0.4~0.5 kgf/cm²、自然含水比が75%と液性限界78.5%にほぼ等しいシルト、13m以深は同じシルトであるが N 値=4~5、一軸圧縮強度1.1 kgf/cm²と自

立性の高いシルトで構成されている。地下水位はG.L.-1.5mのシルト質細砂層内にある。

シールド機種は、上部の雨水幹線では途中基礎松杭の切断箇所があること、および地盤が自立性の乏しいシルトなので、プラインド併用手掘り式、下部の污水幹線では、地山が自立性が高いこと、および路線途中 $R=20$ mの曲線施工区間があるため手掘り式を採用した。

施工順序は、青井幹線の経験からシールド掘進時の影響は上方よりも下方の方が少ないと予想されること、また柴又幹線の経験から、下部シールドを先行させた場合の残留沈下に関しては、上部シールドの施工時期を調整することにより避け得る見通しが得られていたので、下部シールドを先行させるものとした。

表-6 梅田幹線における技術的問題点の有無と程度

問題点の原因と考えられる現象		調査地点における発生の有無	施工・覆工への影響の有無				備考
			上部シールド		下部シールド		
			施工	覆工	施工	覆工	
地山の自然状態からの変化	㊸ 切羽崩壊等による局部的空隙の残存	無	無	-	-	無	●機種が地盤に適していた。 ●掘進管理が適正であった。
	㊹ シールド外周地盤の攪乱	有. シールド外径の5%程度.	無	-	-	-	●上下シールドの離間(1m)の方が乱れ範囲(平均16cm)より大きかった。
	㊺ ゆるみ範囲内の地山強度の変化, 不均一化	有. コーン指数が先行シールド施工により元の60~80%に低減する.	無	-	-	-	●上部シールドの機種が適しており, 掘進管理が適正であった。
	㊻ 裏込め材の固結, 残存	無	無	-	-	無	
	㊼ 地山の残留沈下	有.	-	無	-	-	●上部シールドの施工時期が適正であった。 (下部通過1か月以上後)
沈下(押し下げ)を伴うもの	㊽ シールド過推力	有.	-	-	-	有	●離間が1.0mときわめて小さい。 ●地表面沈下防止のため, 押し気味の施工を行った。
	㊾ シールド機の通過	有.	-	-	-	有	●離間が1.0mときわめて小さい。
隆起現象(浮き上り)を伴うもの	㊿ トンネル構築による鉛直土圧の減少	無	-	-	-	無	

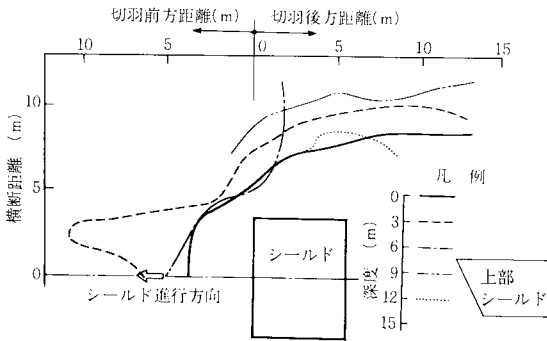


図-11 地中鉛直変位コンターの深度別比較 (+10mmコンター)

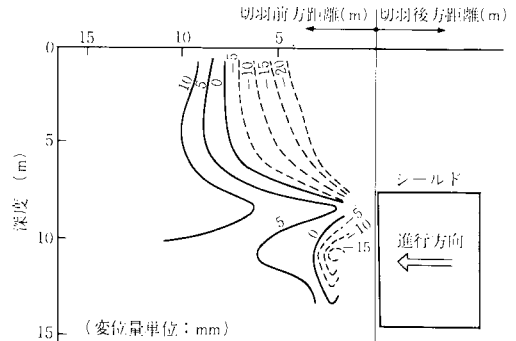


図-12 地中水平変位の縦断分布 (単位: kgf/cm²)

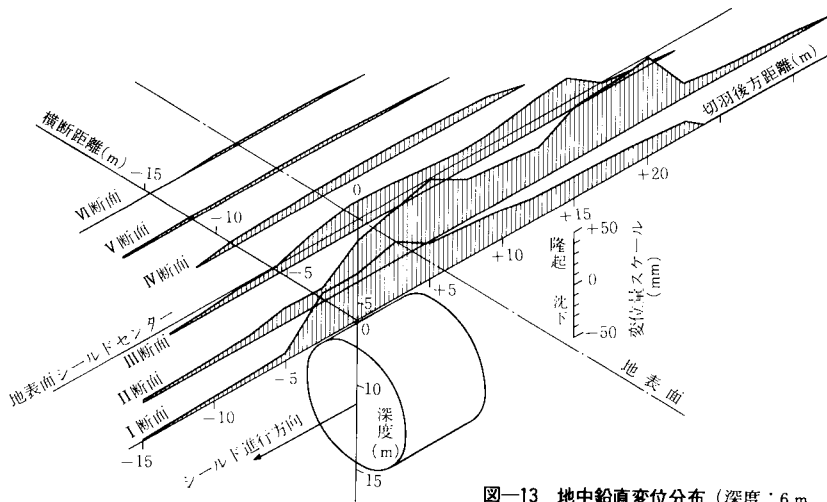


図-13 地中鉛直変位分布 (深度: 6m, 上部シールド)

b) 計測結果：当現場で確認できた技術的問題点を表一6にまとめて示す。

まず、⑥~⑩の先行下部シールド掘進による地山状態の変化に関しては、上下シールドの施工、覆工への影響が少ないことが確認され、むしろ①、②のシールド過推力、シールド機通過時の地盤隆起が下部シールド先行の場合にも、最も既設トンネルへ与える影響が大きいことがわかった。

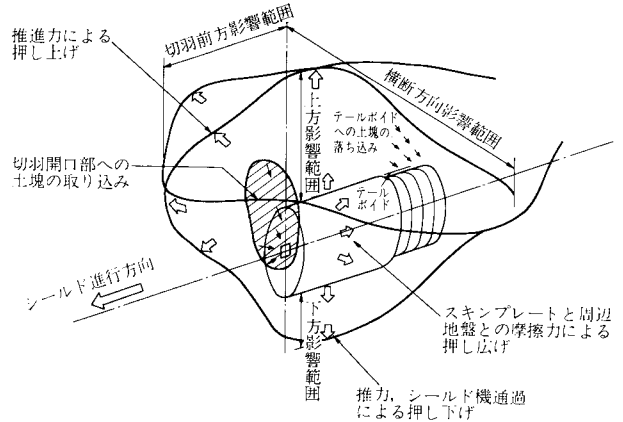
次に、シールド外周の地盤変位について述べると、深度別の地中鉛直変位は図一11、縦断水平変位は図一12、およびシールド直上1mの深度における地中鉛直変位は図一13に示すようである。理解しやすいように、これらを三次元的に合成すると図一14に示す模式図のようになる。

これらの図は、切羽で地盤をやや押し気味にシールド機を掘進させた場合には、切羽周辺の地盤が、ジャッキ推力およびシールド機通過時のスキンプレートと地盤との摩擦力により、シールド機から遠ざかる方向に、ほぼ等方的に押し出されることを示すものである。押し出される範囲の形状は、全体として球根状を形づくっている。ただし、切羽前面の近傍では逆に、切羽開口部に向かって土塊が移動する取り込み域が認められる。図一13に示す変位分布から見ると、ほぼシールド外径の2倍(2D)まで影響が及び1Dの範囲で特に変位が著しかった。

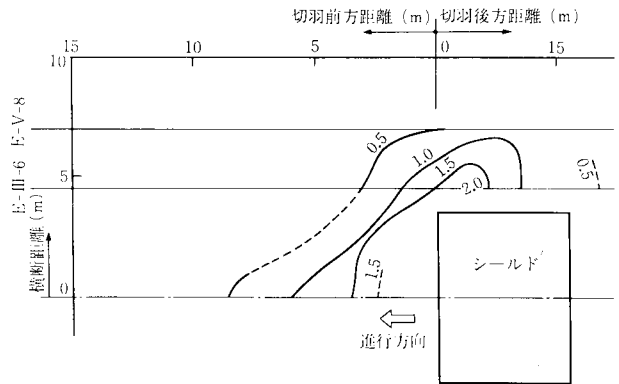
次にシールド外周の負荷土圧について述べる。負荷土圧の平面分布および縦断分布は図一15、16に示すようである。これらの図をもとに負荷土圧の分布を三次元的に合成すると、図

一17に示す模式図のようになる。

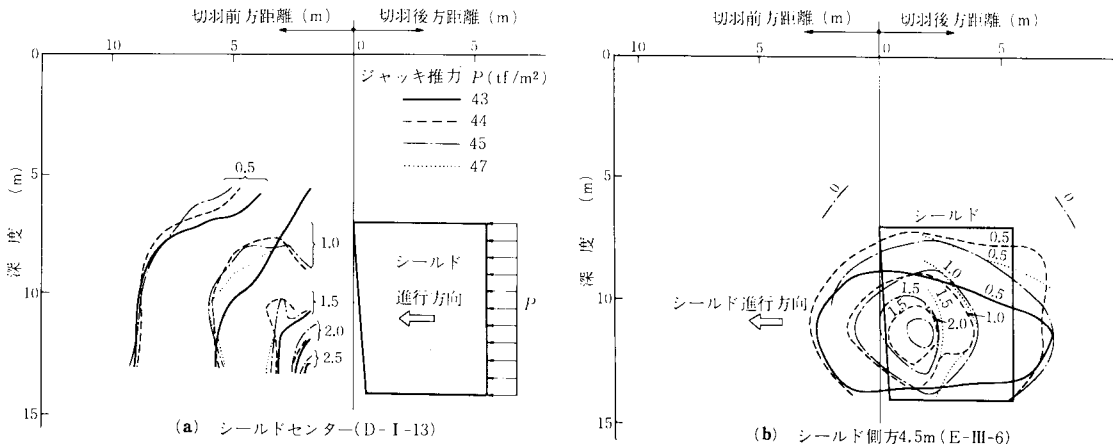
負荷土圧の分布は、シールド機を中心にしたくさび状で、前方、上方、下方、側方に広がっている。また、最大値は、図一16(a)に示すように深度的には切羽の下



図一14 シールド切羽周辺の地盤の変位挙動模式図



図一15 地中水平土圧の平面分布 (深度：11.5m, 単位：kgf/cm²)



図一16 地中水平土圧の縦断分布 (単位：kgf/cm²)

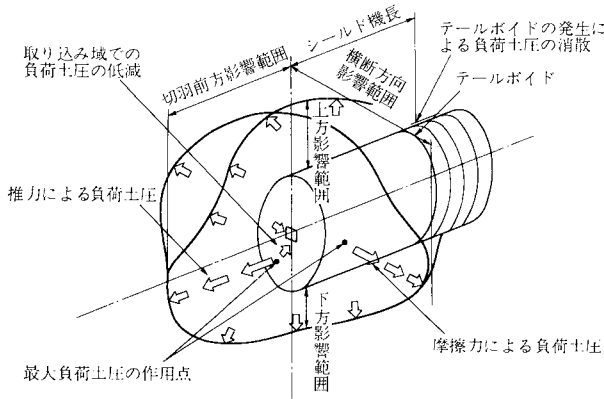


図-17 シールド周辺負荷土圧分布模式図

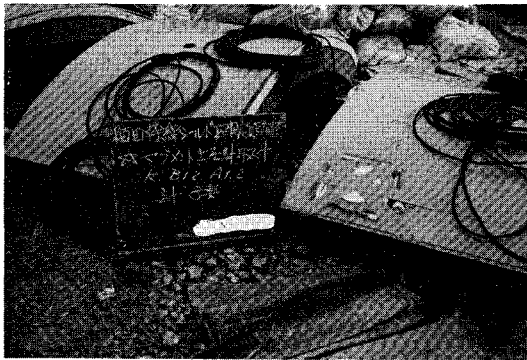


写真-1 土圧計設置図

部（つま先部）、縦断方向で見ると、シールド機側部で生じている。また図-16 (b) に土圧の平面コンターを示すが、最大土圧の発生位置付近では、特にコンターが密集して応力が集中している状態を示し、遠ざかるに従いコンターの間隔が広くなる傾向がみられる。したがっ

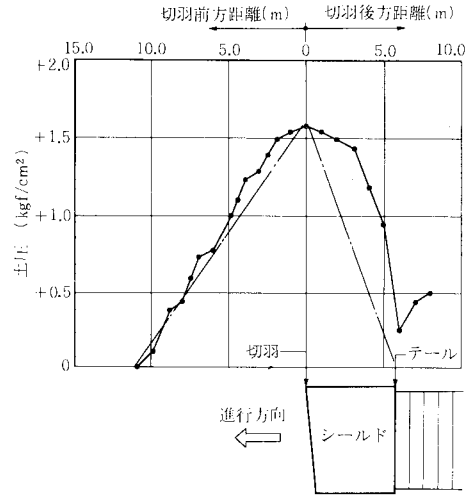


図-19 既設トンネルに作用する負荷土圧分布

て、既設シールドトンネルの近傍を隣接施工する際には、シールド機のこの部分が通過するときが最もトンネルに作用する負荷土圧が大きく、危険といえ、このときに慎重な施工が望まれる。

図-18 は 1 リング掘進中の間の詳細なジャッキ推力の大きさと地盤内の水平土圧を測定した結果を示すものである。地盤内の土圧とジャッキ推力の大きさはよく対応し、掘進の開始、停止に従い、地盤内の土圧もまるで息づくように挙動していることがわかる。このことから隣接施工においては掘進管理がいかに重要であり、また、きめ細かな掘進管理を行うことにより、かなりの精度で地盤内に生じる負荷土圧の大きさを制御できることが裏付けられる。

次に、セグメントリングに写真-1 に示す要領で設置

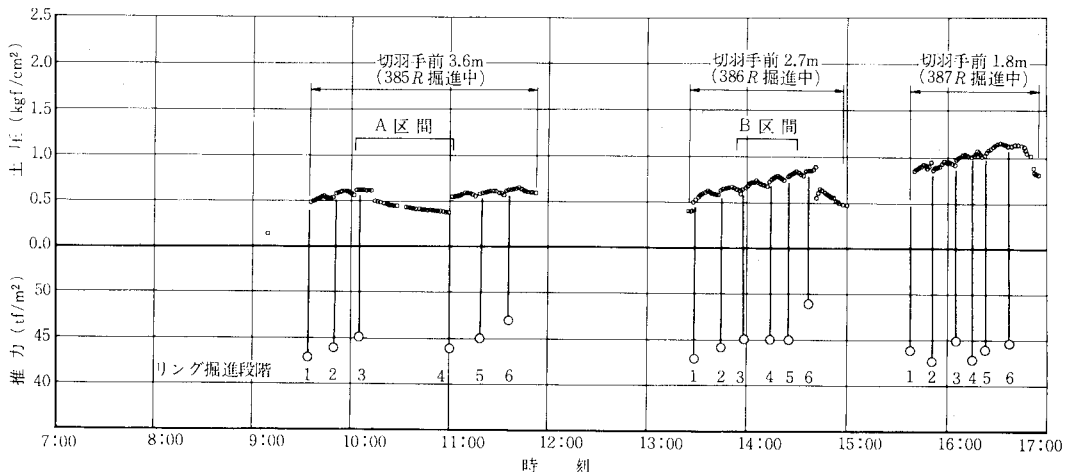


図-18 シールド掘進状況と水平土圧

した土圧計によって測定された作用土圧の分布をみると、作用土圧は図-19に示すようにシールド切羽を頂点とする三角形分布で、前方の影響範囲は、シールド径の1.5~2.0倍、後方はテールの位置までである。また既設トンネルセグメントリングは、この負荷土圧を受け、表-7に示すように、変位、変形することが確かめられた。この中で、セグメントリング構成部材(主桁、縦リブ、セグメント継ぎボルト、リング継ぎボルト)に最も大きい応力の発生するのは、表-7中⑤に示すように、シールドが直上に到達した際にセグメントリングが断面変形と同時に引き離される場合で、セグメントリング上部のリング継ぎボルトに、図-20に示すような大きい引張

り応力(ひずみ)が発生することが確認された。

(6) 既設トンネル直上での施工事例¹⁴⁾(江戸川幹線シールド)

a) 現場状況：江戸川幹線シールド工事における現場計測は、前述した柴又、青井、梅田幹線の成果を踏まえて、後述する図-29に示すような上下隣接シールド工事の設計、施工管理の手順を決めておき、これに沿って工事を行うことにした。これは上下隣接シールド施工では動態計測が重要であり、著者らが工夫した管理方法の妥当性を検証しようと思図したためでもある。

図-3(d)中、上部に位置するのが江戸川幹線であり、シールド外径4420mm、土かぶり8.5mである。下部に位置するのが篠崎幹線であり、外径8300mm、土かぶり12.7mですでに二次覆工がなされている。両者の離間は0.8mと調査工事の中で最も小さい。上下の隣接区間は約250mである。

調査地点の地盤は深度0.3mまでが埋土、深度0.3~2.1mまでがN=3のシルト、深度2.1~9.3mまではN=9~20、自然含水比 $W_n=29\%$ 、内部摩擦角 $\phi_{cb}=43.5^\circ$ の中砂、深度9.3m~20.7mまではN=0~1、自然含水比 $W_n=69\%$ 、一軸圧縮強度 $q_u=1.1\text{ kgf/cm}^2$ のシルトで構成されている。地下水位は-1.6mの位置にある。

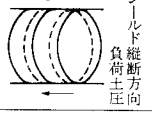
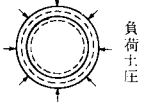
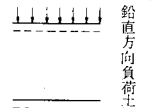
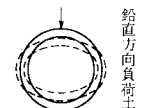
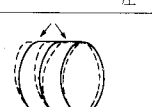
なお、シールド機種は、上記の地盤条件、および路線の途中にR=11mの超急曲線区間があるので、ブラインド併用の手掘り式とした。また、掘削断面上部に透水性の高い砂層があるので、切羽からの湧水を防止するため圧気工法を併用するものとした。なお、下部シールドは土圧式シールドで施工されたものである。

b) 施工概要と計測結果：施工の経緯について述べる。まず、図-29の作業手順に示すように、既設トンネルへの影響を把握するために、後述する図-30、31に示す要領でシールド縦断と横断方向の解析を行い地盤変位、水平土圧分布、既設トンネルに作用する負荷土圧

の算定を行った。そして、これらの値を用いて、既設トンネルの構造解析を行い、その結果から、表-8に示す数値を管理目標値とすることにした。

次に、隣接箇所に入る前に、通過前計測を行い、図-21に示すようなシールド推進力と地盤の変位関係を測定した。その結果43tf/m²を

表-7 負荷土圧と既設トンネルの挙動

時期	負荷土圧の作用の仕方	既設トンネルの挙動	理由
シールド通過中	① 	シールド縦断方向にセグメントリングが圧着される。	・縦リブ発生ひずみが圧縮。 ・リング継ぎボルトの緊張力が緩和。
	② 	締めつけられセグメントどうしが圧着される。	・主桁発生ひずみが圧縮。 ・セグメント継ぎボルトの緊張力が緩和。
	③ 	鉛直方向負荷土圧	・既設トンネル鉛直変位測定結果より3~26mm鉛直下方に変位。
直上通過時	④ 	鉛直方向負荷土圧	・変形測定結果より鉛直が3.5mm短く、水平が5.0mm長くなるように変位。
	⑤ 	セグメントリングが引き離される。リング上部が著しい。	・Bセグメントリング継ぎボルトに大きな引張りひずみ発生。

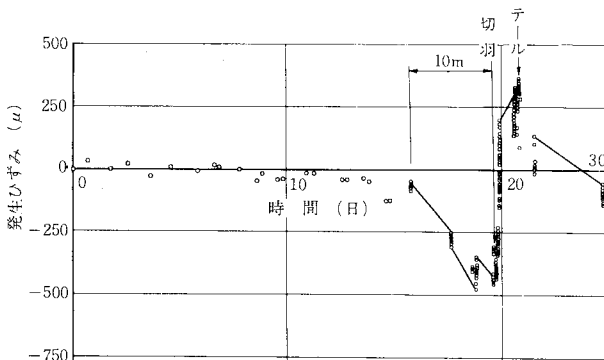


図-20 リング継ぎボルト発生ひずみの経時変化

表-8 管理基準値一覧表

既設トンネル変位量(mm)	±3
管径変化量(mm)	±4
二次覆工発生ひずみ(μ)	150
ジャッキ推力(tf/m ²)	62

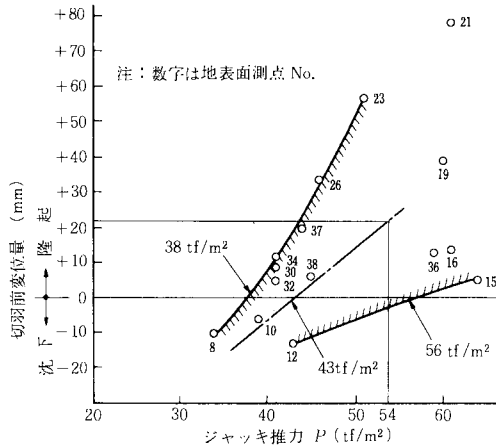


図-21 ジャッキ推力と切羽前沈下量

目安にジャッキ推力を調整すれば、切羽地盤の土圧バランスを過不足なく保つことができ、表-8に示す管理目標を余裕をもって満足できるものと判断した。しかし、隣接箇所直前で切羽前面の上半部分の地盤が、シルトから砂に変わってきた。このため、43 tf/m²の推力では掘削土砂を切羽開口部から取り込むことが困難であり、土砂を取り込むには推力を50 tf/m²以上に高める必要があることがわかった。ゆえに推力を50~60 tf/m²として掘進した結果、負荷土圧の最大値は20 tf/m²で、事前予測時の算定値30 tf/m²よりも小さかったので、既設トンネルの被害は発生しないと判断した。

また、このときのシールドセンターの地盤の隆起量は22 mmとなったが、横断方向への影響範囲は、シールドセンターから5 m前後であり、最寄りの家屋はシールドセンターからの距離が7 m以上あるので、家屋被

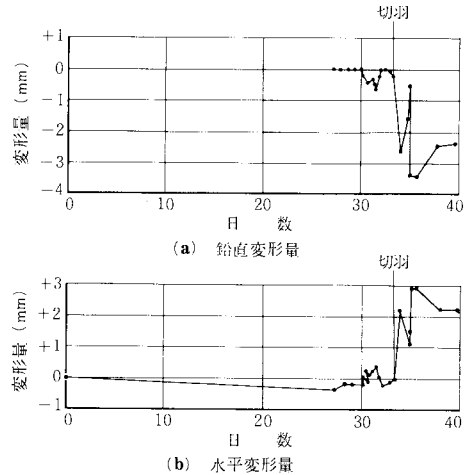


図-22 既設トンネル変形量の経時変化

害の問題もないと判断した。したがって、隣接箇所の推力の管理値は、地表面隆起22 mm以下を目標とすることにし、図-21に示す結果から、54 tf/m²を推力として採用することにした。

推力をこの値に保ち、現場計測を行いながらシールド掘進を行った結果、既設トンネルに何ら異常を与えることなく施工することができた。

また、当初既設トンネル断面が新設シールド断面の約2倍と大きく、また既設トンネル施工時に大きな沈下が見られたことから、かなり地山が乱され、ゆるんでいるために、上部に位置する新設シールドの施工の安全性が懸念されたが、何ら問題がなかった。

次に、計測結果について述べると、当現場で確認された技術的問題点は表-9に示すようである。この中で、

表-9 江戸川幹線における技術的問題点の有無と程度

問題点の原因と考えられる現象		調査地点における発生の有無	施工・覆工への影響の有無				備考
			上部シールド		下部シールド		
			施工	覆工	施工	覆工	
地山の自然状態からの変化	㉔ 切羽崩壊等による局部的空隙の残存	無	無	—	—	無	●機種、掘進管理が適正であった。
	㉕ シールド外周地盤の攪乱	有. シールド外径の5%程度(篠崎幹線調査) ²⁾	無	—	—	—	●乱れ範囲は34 cmで、上下の離間(80 cm)よりも小さかった。
	㉖ ゆるみ範囲内の地山強度の変化、不均一化	有. N値、弾性係数元の約半分に低下。	無	—	—	—	●上部シールドの機種が地盤に適しており、掘進管理が適正であった。
	㉗ 裏込め材の固結、残存	無	無	—	—	無	
沈下(押し下げ)を伴うもの	㉘ 地山の残留沈下	無	—	無	—	—	●施工後4~5年経過しており、沈下は終了していた。
	① シールド過推力	有	—	—	—	有	●離間が0.8 mときわめて小さい。
隆起現象(浮き上り)を伴うもの	㉙ シールド機の通過	有	—	—	—	有	●離間が0.8 mときわめて小さい。
	㉚ トンネル構築による鉛直土圧の減少	無	—	—	—	無	

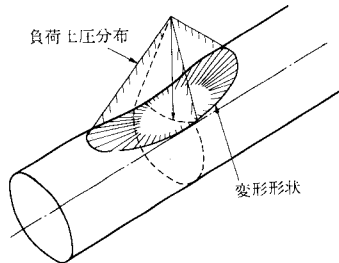


図-23 負荷土圧による断面変形模式図

特に注目すべきことは、㉑シールド過推力、㉒シールド機通過により既設トンネルが影響を受けることがわかったことである。ただし、梅田幹線と異なる点は、既設トンネルの方が、新設シールドよりも剛性が大きかったために、既設トンネルは鉛直変位により縦断方向に変形することはなく、断面変形のみ生じたことである。図-22

は既設トンネル変形量の経時変化を表わすものである。切羽到達時に横長に最大3~4mm程度変形していることがわかる。これは、既設トンネルが負荷土圧を受け図-23に示すように変形したためと考えられる。

4. 実態調査結果のまとめ

4つの上下隣接シールドの実態調査結果をもとに、2.で述べた研究課題について、判明した事項を述べる。

(1) 想定した現象の発生の有無とその解釈

実態調査を行った結果、当初想定した図-1, 2, 表-1に示す現象が実際に起こるかどうかが、また発生した場合にどの程度後続シールドの施工あるいは、既設シールドトンネルに影響を与えるものかどうか実測値から確認することができた。当初想定した㉑~㉒の問題点について、その影響の程度とその理由、およびそれを支配する主な要因をまとめて表-10に示す。㉑~㉒の現象を分

表-10 想定した問題点の影響の程度

施工順序	原因と考えられる現象	影響の程度	ポイントとする要因	理由
上部シールド先行の場合	③ 切羽崩壊による空隙の発生	中	切羽における土圧、水圧バランス	地盤に適した機種を用いて、良好な掘進管理を行っていれば発生しない。ただし、砂地盤で著しく崩壊させると既設トンネルに影響有。
	④ 中間地盤の攪乱	小	中間地盤の乱れやすさ、余掘り、蛇行。	中間地盤の乱れ範囲は30~50cm(シールド径の5~6%)で攪乱域の土が塑性流動することにより既設管へ作用する土圧が低減されている。
	⑤ テールボイド発生	小	上下の離間、断面比裏込め注入。	影響はあるが、一時的で既設トンネルの剛性が大きく、問題とならない。ただし、小口径管など管の剛性が小さい場合は問題となる。
隆起現象を伴うもの	⑥ シールド過推力	大	切羽における土圧バランス。	推力による負荷土圧をゼロにすることは、シールドの掘進においては不可能に近い。上部に既設トンネルがある場合は離間がかなりないと影響をゼロにすることは難しい。
	⑦ シールド機通過	大	上下の離間、推力の大きさ	シールド通過時のスキンプレートと土との摩擦により地盤が押し出される。このときの既設トンネルの受ける影響の程度は上下の離間、推力が大きいに異なる。
	⑧ 過大な裏込め注入圧力	中	上下の離間、注入圧力	注入孔の位置、注入量を調整することにより既設管への影響を回避できる。
下部シールド先行の場合	⑨ 切羽崩壊による局部的空隙の残存	小	切羽における土圧、水圧バランス	局部的空隙の充填、掘進管理、推進制御を慎重に行えば問題ない。
	⑩ 中間地盤の攪乱	小	中間地盤の乱れやすさ、余掘り、蛇行。	同上
	⑪ ゆるみ範囲の地山強度の低下と不均一化	小	地盤の乱れやすさ、崩壊現象の有無。	同上
	⑫ 裏込め注入材の固結、残存	小	注入材の固結度	地盤内に残存していても、地下水で希釈され、固結度が低いので問題とならない。
	⑬ 地山の残留沈下	小	地盤のクリープ特性	実測値をみながら施工時期を調整することにより影響は回避できる。
沈下現象(押し下げ)を伴うもの	⑭ シールド過推力	大	切羽における土圧、バランス、上下の離間	上部先行の場合とは、負荷土圧の影響程度は異なるが、上下の離間がかなりないと影響をゼロにすることは難しい。
	⑮ シールド機通過	大	上下の離間、推力の大きさ	上部先行の場合とは、影響の程度が異なるが、シールド機の通過時に周辺地盤を押しつけることにより既設トンネルに負荷土圧が作用する。
隆起現象(浮き上り)を伴うもの	⑯ トンネル構築による鉛直土圧の減少	無	—	鉛直荷重は低減しない。

類すると、必ず生じ必ず何らかの影響を既設トンネルに与えるもの（以下影響大とよぶ）、必ず生じ条件次第で既設トンネルに影響するものあるいは、条件次第で生じるがその場合は必ず何らかの影響を既設トンネルに与えるもの（以下影響中とよぶ）、必ず生じるが既設トンネルへの影響はほとんどない、あるいは条件次第で生じるが既設トンネルへの影響は少ないもの（以下影響小とよぶ）、発生する可能性のないもの（影響無）に分けることができる。

影響大に分類できるのは、上部シールド先行、下部シールド先行の場合ともシールド過推力、シールド機通過による地盤隆起(㉔, ㉕)、あるいは押し下げ現象(㉑, ㉒)である。シールド過推力、シールド機通過による隆起現象あるいは押し下げ現象は、自立性の乏しい地山を掘進する際には、切羽崩壊、沈下防止のため地山を押し気味の施工を余儀なくされる場合が多いので、既設トンネルへの影響を完全になくすことは難しい。既設トンネルへの影響の程度を左右する主な因子は、上下シールドの離間、中間地盤の強度と推力の大きさである。したがって、切羽において地山とのバランスをいかに図るかが影響を最小限におさえるカギである。

影響中に分類できるのは、上部シールドを先行させた場合の㉑切羽崩壊に伴う空隙の発生による沈下、および㉑過大な裏込め注入圧力による隆起現象である。㉑の切羽崩壊は地盤に適した機種を採用し、切羽において、地山との土圧、水圧バランスが保たれるように、良好な掘進管理を行えば発生しない現象である。ただし、図—6に示したように崩壊が生じた場合は既設トンネルに何らかの影響をもたらすものと考えられる。㉑の過大な裏込め注入圧力の場合は、注入孔の位置、注入量を調整することにより影響をなくすことが可能である。

影響小に分類できるのは、上部シールドを先行させた場合の㉒中間地盤の攪乱、㉓テールボイドの発生による沈下現象、および㉑～㉒の下部シールドを先行させた場合に切羽崩壊、攪乱、裏込め注入等により地山状態が自然状態から変化する現象である。㉒の中間地盤の攪乱域はセグメント外周からシールド径の5～10%の範囲まで及び、シールド掘進を行う場合、大なり小なり発生する現象である。しかし図—9に示したように中間地盤の約1/3が攪乱、強度低下し、既設トンネルの外周を土塊がすり抜けるように塑性流動するので、既設トンネルに作用する土圧が低減されていることが確認されており、この意味では、既設トンネルへの影響を低減しているといえる。したがって、中間地盤の厚さが乱れ範囲よりも少なく、既設トンネルが完全に乱れ範囲に入り既設トンネルの支持力が極端に低減しない限り既設トンネルへの影響は少ないと考えられる。ただし、シールド機通過後の中

間地盤の攪乱、残留沈下を防止するため、高充填率で裏込めを注入する必要がある。㉓のテールボイドの発生による沈下は必ず生じるが、シールド機通過時の地盤隆起に比較し、変化が急激でなく、徐々に生じるので、既設トンネルへの影響は少ないと考えられる。ただし、後続シールド径に比較し、既設トンネル径が小さく、剛性に差がある場合にはシールドテール通過時に既設トンネルは相対的に大きい変位を受け、地盤とはほぼ同じ挙動を示すので、既設トンネルへの影響も大きいと考えられる。

次に㉑～㉒の各現象について述べると、㉑の崩壊による局部的空隙の残存は、空隙を薬液注入などにより充填し、掘進制御を慎重に行えば問題ない。㉑は㉑と同様乱れ範囲内の中間地盤が塑性流動し、かえって既設トンネルに好結果をもたらしている面がある。㉑の裏込め注入は、地下水で希釈されるので地山内で固結していても、その固結度は非常に低く、掘進妨害となるような強度はない。㉒の地山の残留沈下は沈下計測結果より双曲線法などで残留沈下量を予測¹⁴⁾し得るので、上部シールドの施工時期を調整することにより対処が可能である。

なお、㉑の上部トンネル構築により下部シールドトンネルにかかる鉛直土圧が低減し、下部シールドトンネルが浮き上がる現象は発生する可能性が少ないと考えられる。これは、下部シールド上部の土圧が最終段階までほとんど低減がみられなかったことから裏づけられる。

以上の結果より、上下隣接シールド工事においても最も問題となるのは上部先行、下部先行の場合とも表—10㉑㉒、㉑㉒のように、シールド掘進時の過推力、シールド機通過による隆起現象といえる。

したがって、既設トンネル防護の観点からは、どの程度の推力で掘進したとき、地山内のどの範囲まで負荷土圧が発生し、その大きさがシールドからの距離によってどのように異なるかを把握することが非常に重要といえる。そして、隣接施工時には、これらのことを予め把握したうえで適正な推力で掘進制御を行う必要がある。

(2) 地盤と既設シールドトンネルの挙動

(1)で述べたように、上下隣接シールド工事を行ううえで、過進力、シールド機通過により、シールド周辺地盤がどの程度隆起し、その影響範囲がどこまでなのか、中間地盤はどのように挙動するのか、また負荷土圧を受けた既設シールドトンネルは、どのような挙動を示すのかを事前に把握しておくことは非常に重要である。

以下に実態調査から得られた事項を述べる。

a) 地盤隆起、負荷土圧の影響域：地盤変位、負荷土圧に関する詳細な計測を行った梅田・江戸川幹線のデータをもとにシールド掘進時の切羽周辺の地盤隆起、負荷土圧の影響域を検討した結果を述べる。なお、梅田幹線は、粘性土地盤、江戸川幹線は砂と粘性土の互層地

盤である。

切羽前方の地盤隆起の発生状況を図-24に示す。縦軸は切羽前方距離の異なる各位置での隆起量を切羽位置での最大隆起量で除し、それぞれ無次元化してある。なお、図中には、シールド直上(0.2D離れ)と、1D離れた深度における計測値が記入してある。切羽前方の隆起の影響範囲は、1.7D~2.3Dでおおむね切羽前方2Dの範囲は、隆起が生じると判断される。隆起量は切羽に近いほど大きく、遠ざかるほど小さくなるが、 S_d/S は一樣に低下するわけではない。 d/D が0.3~1.0の範囲では、 d/D の増加に対し S_d/S の低下が大きいが、 d/D が1.0を越えると S_d/S の大きな低下はみられない。

図-24(b)は、シールドからの鉛直方向の距離の相違による地盤隆起の発生状況の差異を把握するため、両幹線のデータを平均したものである。これより、シールド天端から0.2D離れた位置では、 d/D が0.5~1.0の範囲で d/D に対する S_d/S の低下する割合が大きく変化しているが、シールド天端から1.0D離れた位置では、なだらかな曲線となり、このような変化はみられない。これは、推力、シールド機通過により生じた負荷土圧がシールドから遠ざかるに従い、分散されることを示している。

また図-24(a)において、同一深度(0.2D)における梅田と江戸川の計測結果を比較すると、 d/D が

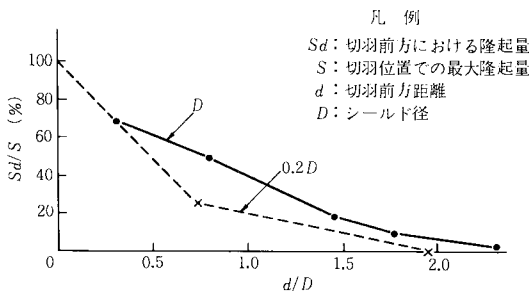
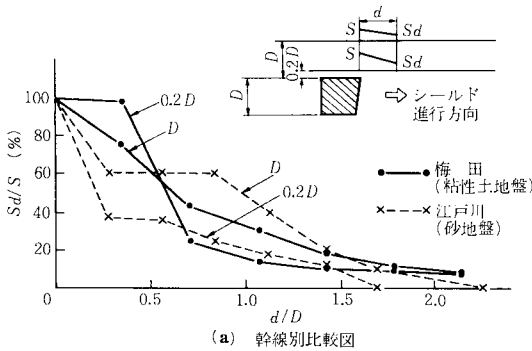


図-24 切羽前方地盤隆起の発生状況

0.7以上では両者の大きな相違はみられないが、0.7以下では曲線の形状が異なっている。すなわち、梅田の場合は、 d/D が0.3~0.7の範囲で勾配が大きく変化しているのに対し、江戸川の場合は $d/D=0.3$ で、勾配が変化している。 $d/D=0.3$ のときの S_d/S は梅田100%、江戸川37%と大きな差がある。これは両者の地盤の相違によるものと考えられる。つまり、粘性土地盤(梅田)に比較し、砂地盤(江戸川)の方が、シールド近傍に応力が集中しやすい傾向があるためと考えられる。

次に、負荷土圧について述べる。

図-25(a)は、切羽前方の負荷土圧の詳細な分布状態を把握するため、横軸に地盤変位と同様 d/D を取り、縦軸に推力に対する切羽前方距離の異なる各位置での負荷土圧の比を取った図である。

これより、切羽前方の負荷土圧の影響は、1.35D~1.6Dの範囲まで及んでいると判断される。負荷土圧の最大値は、推力の約30%で、 $d/D=0.35\sim0.6$ のとき発生しており、 d/D がそれより小さくなると p/P は低下している。これは、この範囲が切羽開口部への土塊の取り込み域であることによる。また図-25(b)は両者を平均したものであるが、 d/D が0.5でピークが生じ、 $d/D=1.0$ を境にして曲線の勾配が異なっている。これより、シールドと既設管との距離が1Dあるか否かで、既設トンネルの受ける影響がかなり異なることがわかる。なお、負荷土圧と同時に計測した過剰間隙水圧も負荷土圧と同様の挙動をすることが確かめられた。

b) 中間地盤の挙動：青井，梅田幹線の調査結果よ

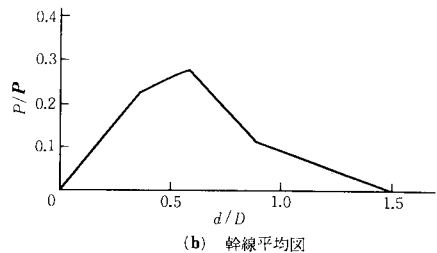
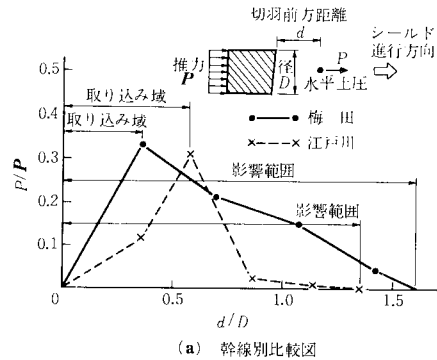


図-25 切羽前方負荷土圧の発生状況

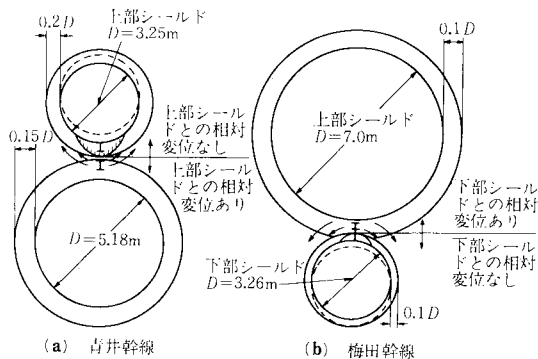


図-26 中間地盤の挙動模式図

り得られた中間地盤の挙動を模式的に図-26に示す。青井は上部先行、梅田は下部先行の場合の中間地盤の挙動である。

これより、上部先行、下部先行の場合とも、中間地盤は推力、シールド機通過時の押し出し力により押し上げられ、あるいは、押し下げられていることがわかる。

中間地盤の土塊の動きは一樣でなく、既設トンネルに近いほど小さいことがわかった。これは、地盤変位が既設トンネルの剛性により抑制されているためである。これより、シールド近傍の土塊は図中矢印で示すように、既設トンネル側面をすり抜けるように移動しているものと推定される。

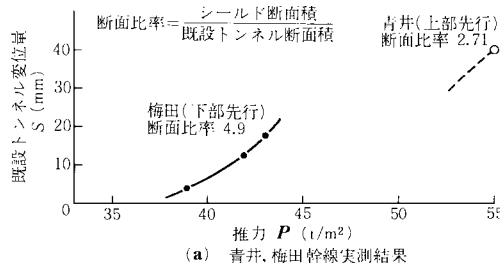
測定結果より土塊が移動しており、既設トンネルとの相対変位の生じる範囲はシールド径の10~15%で、逆に土塊が移動しておらず、既設トンネルとの相対変位の生じない範囲は既設トンネル径の10~20%であった。

シールド掘進による外周の乱れ範囲はシールド径の5~10%であるから、乱れ範囲内の土塊は確実に既設トンネルをすり抜けるように挙動するものと考えられる。

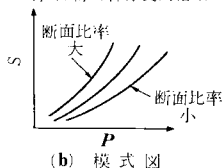
c) 既設シールドトンネルの挙動：実態調査結果より、既設トンネルは後続シールドトンネル掘進による負荷土圧を受け、鉛直・水平変位を生じるとともに、断面変形することも確認された。

梅田、青井幹線の調査結果より、梅田幹線のように上下が並行している場合は、鉛直変位のみ生じるが、青井幹線のように上下が交差している場合は、水平変位も生じ、水平変位の方が最終段階になっても変位が残留しやすいことがわかった。

図-27 (a) は推力と既設トンネル変位量の関係であるが、推力が大きいくほど既設トンネル変位量も大きいことがわかる。これより、既設トンネルに対するシールドの断面比率をパラメーターにすると、推力と既設トンネル変位量との関係は、模式的に図-27 (b) に示す関係があると推察される。つまり、推力が増せば変位量も増



(a) 青井、梅田幹線実測結果



(b) 模式図

図-27 推力と既設トンネル変位量の関係

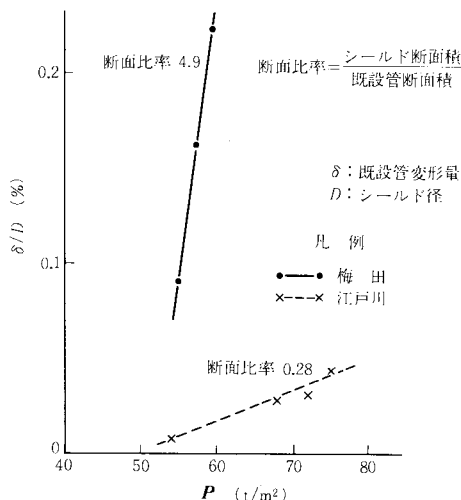


図-28 推力と既設トンネル変形量の関係

加するが、その変位量の大小は、断面比率によって決まるといえる。

断面変形形状は、鉛直・水平方向の負荷土圧の大きさによって異なり、比較的的水平方向負荷土圧の大きかった青井の場合は、縦長、鉛直方向の負荷土圧が卓越していた梅田、江戸川の場合は横長の変形形状となった。

推力と変形量の関係を図-28に示す。変形量は既設トンネル直径に対する比率で表示してある。これより、推力と δ/D はほぼ比例関係にあるが、その大小は断面比率によって異なるといえる。断面比率が大きいくほど、同一推力でも δ/D は大きくなる傾向がある。

(3) 上下隣接シールド工事に関する設計・施工の取り組み方

実態調査結果より、上下隣接シールド工事において、上下シールドの施工、既設トンネルの被害を未然に防ぐ

ためのキーポイントは、以下の4点と考えられる。

① 現場の計画、地盤、施工条件からシールド掘進により予期される地盤の変状、既設（先行施工）トンネルへの影響をあらかじめ想定する。

② 予想される現象に即したモデルで、事前予測を行い、数値解析結果から施工の目安となる管理値を設定する。

③ 隣接施工区間手前で地盤挙動に関する通過前計測を行い、数値解析結果の妥当性（既設トンネルへの外力条件、変位挙動など）のチェックとジャッキ推力、開口率などのシールド施工諸元を設定する。

④ 通過時には、既設トンネルへの影響をいち早く察知できる計測項目、計器、計測方法を選定し、シールドの進行に合わせ計測を行うとともに、計測結果を次の施工にフィードバックできる管理体制を確立する。

上記の4つの事項を基本に上下隣接シールドにおける設計・施工の取り組み方をフローチャートで表わすと図-29に示すとおりである。なお、江戸川幹線は前述したように、このフローチャートに沿って実施した施工例である。

a) 上下シールドの離間、施工順序、施工時期：上下の布設位置を選択できる場合、また上下同時期に施工する場合には、上下シールドの離間をどの程度とるべきか、また、上下どちらを先行させて施工すべきか計画段階で十分検討すべきである。

上下シールドの離間については、シールド掘削による推進力の影響域、沈下によるゆるみ範囲、シールド周辺地山の乱れ範囲等の観点から検討する必要がある。

(2)で述べたように、上下の離間が後続シールドの径よりも大きいかわりで既設トンネルへの影響はかなり異なるものと推察される。沈下によるゆるみ範囲はシールド下端から仰角 $45^\circ + (\phi/2)$ の範囲³⁾まで及ぶが、後続シールドの径の約3倍以上離れば、ほとんどゆるみによる地盤強度の低下はないことが確認¹⁴⁾されている。また乱れ範囲はシールド径の約5~10%程度である。

実態調査を行った工事の中で、柴又・梅田・江戸川幹線は下部シールド先行、青井幹線は上部シールド先行であった。

このうち、上下の離間、地盤が同様で既設トンネルよりも後続シールドの径が大きかった梅田・青井幹線の場合を比較すると、いずれの場合も被害は生じなかったが、既設トンネルに影響があり、変位、変形が確認された。

両幹線とも既設トンネル変位の原因は地盤沈下でなく地盤隆起に伴う荷重土圧であった。上部シールド先行の青井幹線の場合も既設トンネルの最終的な沈下量は10mm程度で地盤沈下によるひびわれは発生しなかった。

以上の結果より、既設トンネルとの離間が少なく、既

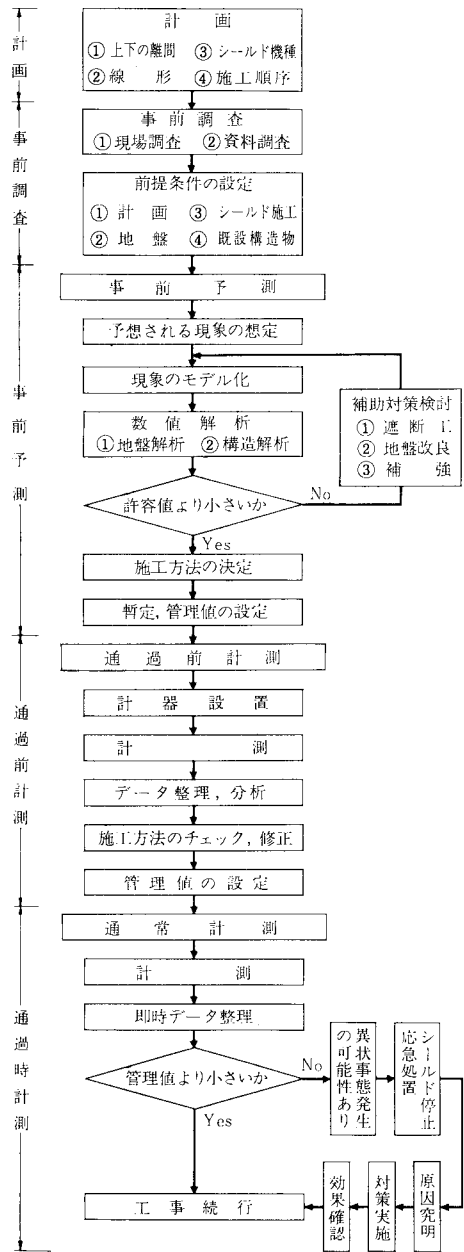


図-29 上下隣接シールド工事設計・施工フローチャート

設トンネルへの影響の原因が地盤隆起の場合は、上部先行でも下部先行でも同様に問題といえる。上下の離間があり、地盤隆起だけではなく地盤沈下も問題となるような場合は、原則として下部シールド先行の方が有利と考えられる。しかし、どちらを先行すべきかの決定は、上下の離間、断面比、線形、地盤条件などを考慮し、現場ごとにケースバイケースで決めるべきである。

なお、下部シールドが先行した場合の上部シールドの

施工時期は、実績より、砂地盤1か月以上、粘性土地盤3か月以上ずらせば、残留沈下による上部シールドの線形の変化はないと考えられる。

b) 地盤隆起量の予測：施工に入る前に、あらかじめ推力に応じた地盤隆起量を予測し、既設トンネルへの影響、適正な推力の大きさ、計測管理に用いる管理値を設定する必要がある。

従来、シールド掘削に伴う地盤沈下については種々の

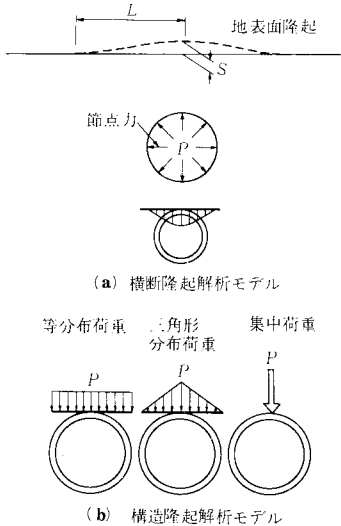
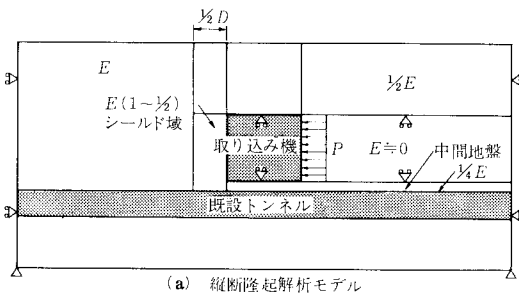
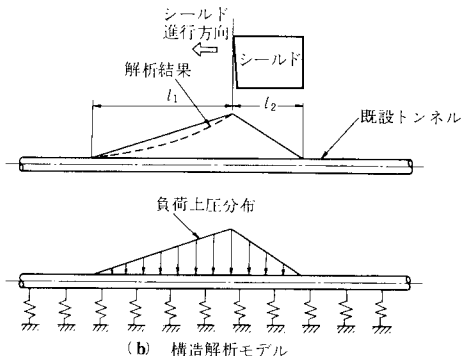


図-30 横断隆起解析モデル



(a) 縦断隆起解析モデル



(b) 構造解析モデル

図-31 縦断隆起解析モデル

解析例^{15),16)}が報告されているが、地盤隆起を対象にした解析法に関する研究はほとんどなされていない。しかし、今回の調査結果では、上下隣接シールド工事においては、地盤沈下よりも、むしろ隣接施工時の地盤隆起とこれに伴う負荷土圧の発生の方が既設トンネルへの影響が大きく、したがって、既設トンネル防護の観点からは、地盤隆起の予測法を確立することが是非とも必要と考えられる。そこで著者は、詳細な計測データの得られた梅田および青井幹線を取り上げ、地盤隆起および負荷土圧に関する解析法の検討を行った。その結果、適切な解析モデルによれば、有限要素法弾性解析によって、地盤隆起量、既設管応力度のチェックが可能との見通しが得られた。

横断方向、および縦断方向解析モデルを図-30、図-31に示す。横断方向解析は、押し上げ(下げ)力を後続シールド断面内より外向きに節点力として作用させるモデルで行った。その結果、図-32、表-11に示すように、仮想外力としてジャッキ推力の6~8%を仮定すれば、地盤隆起の計算値は実測値とよく対応することがわかった。

縦断方向の解析モデルとしては、実態調査結果から、シールド機、推進力を組み込み、中間地盤、取り込み域、ゆるみ範囲内の地盤強度はシールド掘削による強度低下を考慮したものとした。その結果、図-33、34に示す

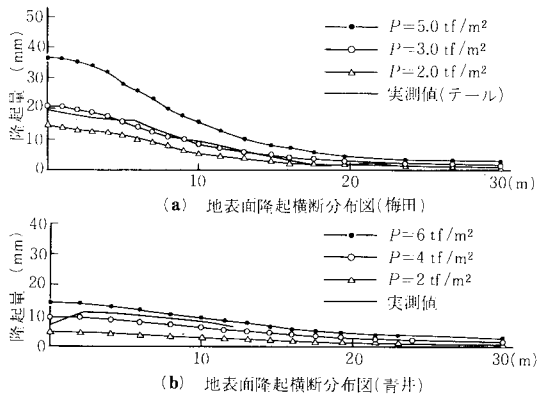


図-32 横断隆起解析結果

表-11 仮想外力とジャッキ推力

	梅田幹線	青井幹線
地表面隆起量 (mm)	19	11
隆起に必要な仮想外力(A)(tf/m ²)	2.7	4.6
ジャッキ推力計測値(B) (tf/m ²)	43	56
A/B (%)	6.3	8.2
その他	粘性土地盤 下部先行	粘性土地盤 上部先行

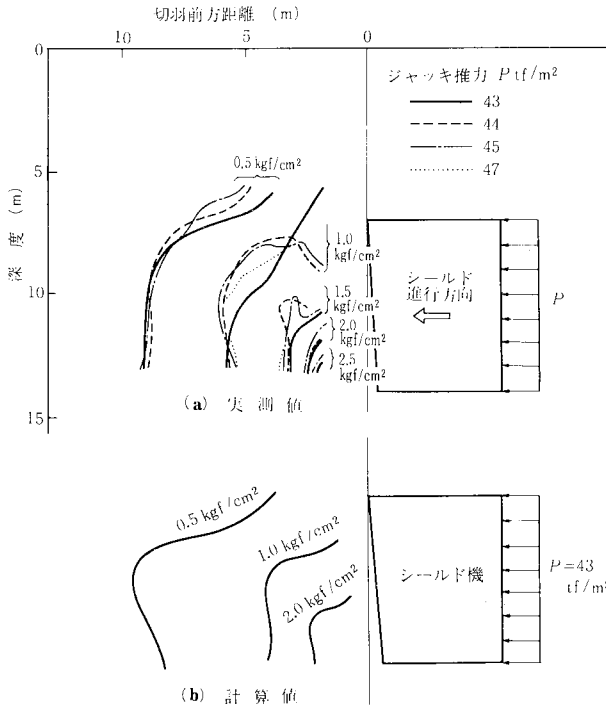


図-33 地中水平土圧の計算値と実測値の比較

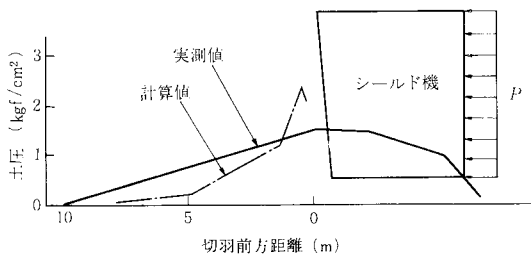


図-34 既設トンネルに作用する負荷土圧分布の計算値と実測値の比較

ように、地盤内負荷土圧および既設トンネルに作用する負荷土圧の算定値と実測値はよく対応することがわかった。

また既設トンネルの応力度のチェックは、図-30、31 (a) に示すモデルで求めた地盤内応力分布から既設トンネルに作用する土圧を図-30、31 (b) に示す手順で求め、求められた三角形の分布荷重を既設トンネルに作用させ、弾性バネ支承上のはりとして構造解析することにより可能である。

c) 対策および計測管理：対策としては、既設トンネルの直接補強、地盤改良などが、挙げられる。通常、隣接施工の場合に採用されている応力遮断工法は、上下隣接シールドの場合、上下に線形が重なっているので施工が難しい。

まず、既設トンネルの補強について述べる。実測結果から、負荷土圧による影響を最も大きく受けるのは、リング継ぎボルトであるから、一次覆工の場合は、まずリング継ぎボルトを補強するなどの方法が効果的といえる。また二次覆工については、配筋などで剛性を高めることによりある程度効果があることが確かめられた。また上下同時期の施工の場合は、ひびわれ防止の観点から二次覆工は、後続シールド通過後に行うべきである。

次に中間地盤の改良について述べる。この方法は、設計通り地盤が改良されれば、沈下に関しては効果があると考えられる。ただし、必要以上に固めることは、逆効果の場合がある。それは、シールド通過時の中間地盤の土塊は図-26 に示すように、既設トンネルの周りをすり抜けるように挙動するのでこれにより、既設トンネルにかかる負荷土圧が低減されているためである。もしも、中間地盤を必要以上に固めたならば、推力が直接、トンネルに作用することになり危険である。中間地盤の改良は、むしろシールド機通過後に、攪乱により生じた空隙等に裏込め注入などを十分に施す方が効果的と考える。ただし、裏込め注入圧力が高すぎると地盤を隆起させる場合があるので高压で注入してはならない。

しかしながら、以上述べた2方法も、既設トンネルがすでに供用を開始している場合は、直接補強が難しい。また上部先行の場合、中間地盤を対象に改良を行うのも難しいなどの欠点がある。したがって、既設トンネル防護の観点からは、計測管理を徹底することがより一層重要となる。計測管理を実施する際には、隣接施工区間の手前で、地盤内に計器設置が可能な場所を選んで、通過前計測を行う必要がある。これは次の3点を意図して行うものである。

① 事前予測段階では推定が困難なシールド機の特徴、癖、オペレーターの熟練度、地盤のばらつき等の不確定要素を補い、施工方法の修正を行い適正な施工方法を見出す。

② シールド掘進に伴う地盤挙動を定量的に把握し、沈下、隆起の影響範囲、シールド外周の乱れ範囲、既設トンネルに加わる外力等について、事前予測結果と対比し、既設トンネルの安全性を再チェックする。

③ 通過時計測の計測項目、計測方法、データ処理の方法をできるだけ容易にするため、計測項目ごとの相関性を把握し、必要にして最小限の通過時計測管理方法を見出す。

また、通過時計測は、地表面沈下計測を原則とするが

既設トンネルに計器を設置することが可能な場合は、以下の点に留意する必要がある。

① 測量などの簡易で、しかも計測点の多くとれる方法で、既設トンネルの全体挙動を把握し、最も変状の現われやすい場所、あるいは、最重点地点にスポット的に計器を設置する。

② 計器の変状の現われやすい立坑とのジョイント部、すでにある亀裂部、断面変化部に設置し、緊急度に応じて自動計測・警報器付き装置などを設置する。

③ 上下シールドの施工位置にもよるが、多くの場合、既設トンネルは一方向に挙動せず、三次元的にねじれるように挙動する。したがって、計器配置も一方向のみとせず、必要に応じ、 X 、 Y 、 Z の3方向の挙動が把握できる配置とする。

5. あとがき

本文中で述べたように、上下隣接シールド施工は確かに種々の問題点を内在しているが、正しい取り組み方をすれば、ほとんどの問題には対応できるとの確信を得た。そのために留意すべきことは、まず問題となる現象の事前解析(予測)を行うこと、次に、事前計測を行い、解析結果を検証するとともに施工管理方法の調整を行うこと、そして最後に動態計測管理を行いながら隣接箇所での施工を行うことなどである。すなわち、この研究においては、シールド機種、補助工法などのハードウェアの整備を行うとともに、それを上手に生かして施工を行うソフトウェアの確立が最も重要であるというごく常識的な結論に至った。

なお、本テーマの研究にあたって、東京大学の石原研而教授には、たびたび現場に来て頂きご指導を受けるとともに、とりまとめに際しては多くの助言をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 間片博之・曾我部博：シールド掘削に伴う地盤沈下測定結果，第15回土質工学研究発表会。
- 2) 間片博之・山田孝治：シールド機種と掘削に伴う沈下挙動について，第16回土質工学研究発表会。
- 3) 間片博之・高橋良文：シールド切羽周辺の地盤の変位挙動，第16回土質工学研究発表会。
- 4) 間片博之：下水道シールド工事における地盤沈下対策(その1)，下水道協会誌，1980-4。
- 5) 間片博之・山田孝治：シールド掘削に伴う地盤沈下と家屋被害について，土と基礎，Vol. 28, No. 6, 1980。
- 6) 間片博之：下水道シールド工事における地盤沈下対策(その2)，下水道協会誌，1980-5。
- 7) 間片博之：下水道シールド工事における地盤沈下対策(その3)，下水道協会誌，1980-6。
- 8) 間片博之：下水道シールド工事における地盤沈下対策(その4)，下水道協会誌，1980-8。
- 9) 橋本定雄・吉田 保：シールド掘削による地盤の変位挙動と動態計測について，現場計測シンポジウム，土質工学会関西支部，1981。
- 10) 藤田圭一：基礎工からみたシールド工法—地山の沈下とゆるみ—，基礎工，1983-9。
- 11) Hashimoto, S. and Yoshida, T. : Shield tunnelling in close vicinity to an existing tunnel in soft ground, Int'. Tunnelling Sym. '84.
- 12) 橋本定雄：上下隣接シールドの施工と追跡調査(1)—上下同時施工の場合—，トンネルと地下，1982-5。
- 13) 橋本定雄：上下隣接シールドの施工と追跡調査(2)—既設管直下での施工の場合—，トンネルと地下，1982-7。
- 14) 橋本定雄：軟弱地盤における上下隣接シールド掘削の現場計測と施工に関する研究，学位論文，1984-6。
- 15) 斉藤二郎：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, 1977。
- 16) 久武勝保・伊藤富雄：トンネル掘削によって生じる地表面沈下の境界要素法による三次元解析，土木学会論文報告集，1982-11。

(1984. 10. 25・受付)