

シールド掘進時の施工時荷重による地盤変形 に関する計測結果とその分析

Measurement and Consideration of Ground Deformation due to Shield Tunnel
Construction Loads

太田 拡¹・橋本昭雄²・長屋淳一³・菅 茜檬⁴
Hiromu Oota, Akio Hashimoto, Junichi Nagaya and Shimon Kan

¹正会員 工修 大阪市交通局建設技術本部 (〒550-8552 大阪市西区九条南一丁目12-62)

E-mail:ota@kotsu.city.osaka.jp

²正会員 工修 財団法人 大阪市交通事業振興公社 (〒550-0025 大阪市西区九条二丁目34-3)

³正会員 工修 財団法人 地域地盤環境研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀四丁目3-2)

⁴正会員 工修 財団法人 地域地盤環境研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀四丁目3-2)

In this report, the site measurement was carried out at the shield construction site of 8th Osaka municipal subway line. The measurements such as the loads, the ground deformations and the earth pressure acting on the adjacent structures were performed. As a result, the measured behavior of ground deformation was found to be different from the analysis based on common stress lease method. Related to the prediction in the construction of shield tunnel, it is necessary to consider various deformation factors such as the backfill grouting pressure, machine weight and machine posture in each construction stage.

Key Words : *shield tunnel, Construction Loads, in-site measurement*

1. はじめに

都市部におけるシールドトンネルの施工においては、道路幅員や地下埋設物等の制約条件から、既設構造物と離隔1m程度の近接施工を強いられることが多くなっている。このような近接施工においては、シールド掘進に伴う既設構造物への影響を評価し構造物の安全性を確認するとともに、シールド掘進時の施工条件と周辺地盤の変形および近接構造物への作用荷重との関連を把握する必要がある。本論文では、大阪市営地下鉄8号線のシールド工事において、シールド掘進に伴う周辺地盤の変形および後行シールド掘進による先行シールドセグメントへの作用土圧・応力を計測した。計測結果より、シールド通過時の施工時荷重と周辺地盤の変形および近接構造物への影響評価を行い、シールド掘進に伴う地盤変形予測解析における荷重モデルの考え方について考察を行った。

2. 現場計測概要

シールド掘進に伴う地盤変形要因を分析するために大阪市営地下鉄8号線のシールド工事の内、井高野～瑞光シールド、瑞光～豊里シールド、清水南シールドの3現場において地盤変形および後行シールド掘進に伴う先行セグメントへの作用土圧・応力の計測を行った。以下の3現場の地盤および計測概要を示す。

(1) 井高野～瑞光シールド (井高野シールド)

井高野シールドは、先行・後行シールドの離隔は5.65mであり比較的大きいが、軟弱な沖積粘土層を掘進する位置として計測断面を設けた。図2.1に計測断面の土質柱状図と計測位置図、表2.1に計測断面通過位置におけるシールド掘進条件を示す。

(2) 瑞光～豊里シールド (瑞光シールド)

瑞光シールドでは、後行シールドが先行シールドの斜め上を近接して掘進する区間において計測断面を設置し、シールド周辺地盤の鉛直・水平変位および先行シールドのセグメントに作用する土圧・応力の計測を行った。2本のシールドの内、下側が先行シールド、上側が後行シールドである。先行シールドの掘進土層は、上半は沖積粘土層(Ac)、沖積砂層(As)、洪積粘土層(Oc)、下半はN値>50の洪積砂礫層である。後行シールドは上半が沖積砂礫層(Ag)、下半が沖積粘土層(Ac)である。

図 2.2 に計測断面の土質柱状図と計測位置図、表 2.2 に計測断面通過位置におけるシールド掘進の施工条件を示す。

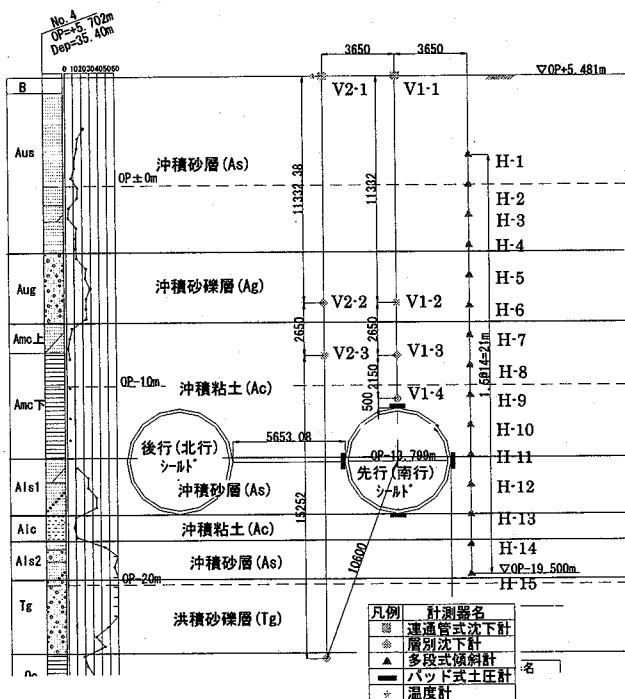


図 2.1 計測器設置位置図 (井高野シールド)

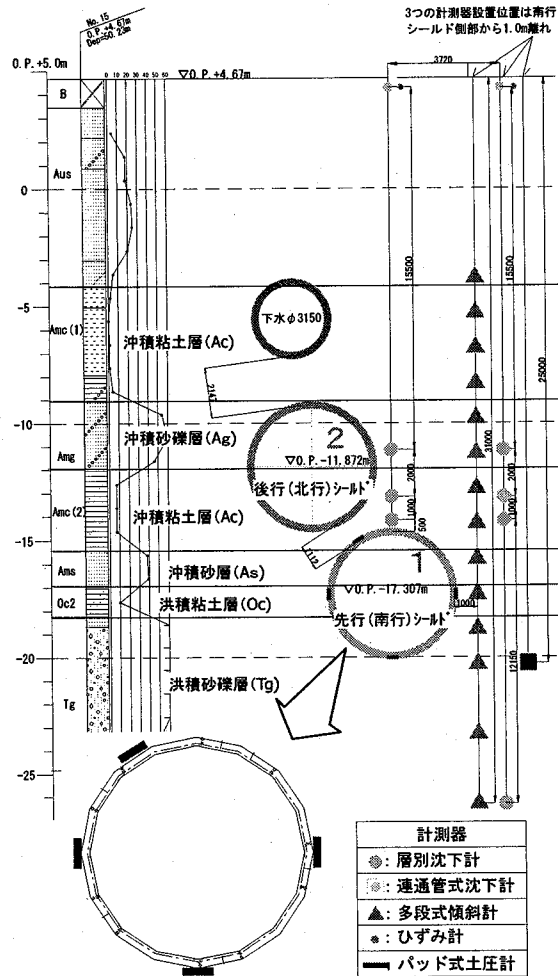


図 2.2 計測器設置位置図 (瑞光シールド)

表 2.1 シールド掘進条件 (井高野シールド)

		先行(南行)	後行(北行)	
シールド工法		泥水式		
シールド外径 (m)		5.44		
セグメント外径 (m)		5.30		
セグメントタイプ		DC (1リングの幅 90cm)		
土被圧 (kN/m ²)		295	295	
切羽泥水圧 (kN/m ²)	設定値	240	240	
	実施工値	220~250	220~260	
裏込注入圧 (kN/m ²)	設定値	420	420	
	実施工値	掘進中	300~450	300~500
		停止後	200~260	—
ヒッチング (%)	切羽からテールまでばらつき範囲	0.87~4.36	1.92~2.62	
		平均値	2.18	2.27
	掘進線形(上下) (%)	4.45	0.84	
余掘り量 (mm)		5.0		

表 2.2 シールド掘進条件 (瑞光シールド)

		先行(南行)	後行(北行)	
シールド工法		泥水式		
シールド外径 (m)		5.44		
セグメント外径 (m)		5.30		
セグメントタイプ		DC (1リングの幅 90cm)		
土被圧 (kN/m ²)		340	240	
切羽泥水圧 (kN/m ²)	設定値	245	185	
	実施工値	190~280	170~190	
裏込注入圧 (kN/m ²)	設定値	360	280	
	実施工値	掘進中	100~360	100~300
		停止後	280~310	—
ヒッチング (%)	切羽からテールまでばらつき範囲	-40.0~	-8.0~-6.8	
		-35.0	-7.5	
	平均値	-35.5	-7.5	
掘進線形(上下) (%)		-33.0	-10.0	
余掘り量 (mm)		15		

(3) 清水南シールド

清水南シールドは本線の上下線と車庫線の上下線の計4本が近接して施工される区間に計測断面を設置し、シールド周辺地盤の鉛直・水平変位および先行シールドのセグメントに作用する土圧・応力の計測を行った。図2.3に計測断面の土質柱状図と計測位置図を示す。4本のシールドの位置関係は図2.3に示すように本線先行・後行シールドが車庫線シールドの下側に位置し、本線先行、本線後行、車庫線先行、車庫線後行の順番(図2.3の数字の順)に施工される。本線シールドと車庫線先行シールドの掘進土層は、N値>50の洪積砂礫層である。車庫線後行シールドの掘進土層は、上半が洪積粘土(N=5~8)、下半が洪積砂礫層である。表2.3に計測断面通過位置におけるシールド掘進条件を示す。

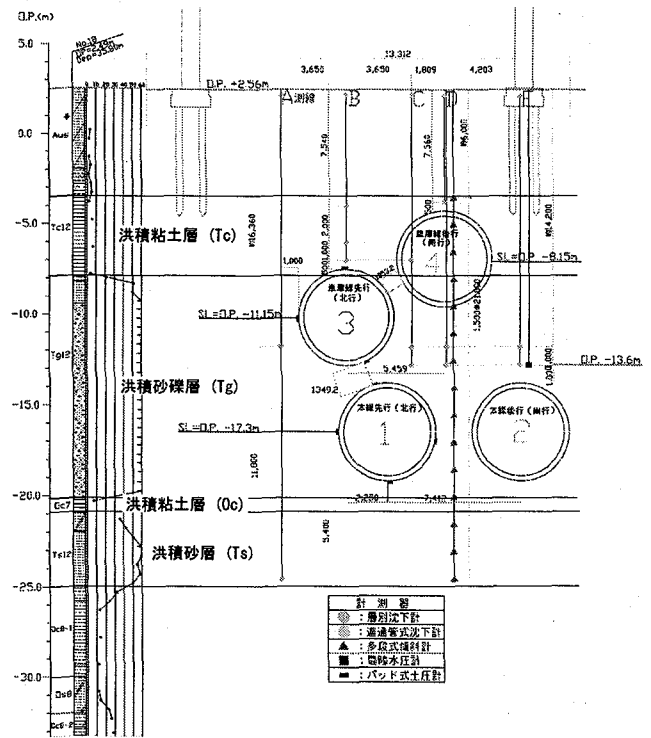


図2.3 計測器設置位置図(清水南シールド)

表2.3 シールド掘進条件(清水南シールド)

		本線先行	本線後行	車庫線先行	車庫線後行	
シールド工法		泥水式		泥土式		
シールド外径(m)		5.54		5.44		
セグメント外径(m)		5.40		5.30		
セグメントタイプ		RC (1リングの幅1.2m)		RC (1リングの幅1.2m)		
土被圧(kN/m ²)		310	310	186	135	
切羽泥水圧(kN/m ²)	設定値	230	230	140	110	
	実施工値	210~260	210~240	150~200	150~200	
裏込注入圧(kN/m ²)	設定値	450	450	360	300	
	実施工値	掘進中	400~460	400~450	270~350	200~250
		停止後	200~250	—	130~170	—
ピッチング(%)	切羽からテールまでばらつき範囲	-5.24~-3.49	0.52~3.49	-1.75~1.75	-29.16~-21.82	
	平均値	-3.49	0.87	-0.35	-25.57	
掘進線形(上下) (%)		-2.50	2.13	-2.09	-26.10	
余掘り量(mm)		7.5		10		

3. 現場計測結果

(1) シールド通過時における地盤変形

図3.1にシールド通過に伴う直上地盤の鉛直変位を示す。シールド上半の掘進土層が軟弱な沖積粘土層である井高野シールド、瑞光シールドは、以下のような挙動がみられた。

- ①切羽到達時までの変位は殆どない。
- ②切羽通過後、シールド掘進時に生じる余掘りの

影響による2~5mm程度の沈下が生じた。

- ③マシン後半部において隆起が生じた。
- ④テール通過前後において再度沈下が生じた。

これに対して、掘進土層がN値>50の洪積砂礫層である清水南本線シールドではシールド通過時全般を通して沈下傾向であるが、沈下量は2mm程度の微小な沈下である。クラウン部が洪積粘土層である清水南車庫線先行シールドでは、2mm程度の隆起と沈下が生じた。

図 3.2 にシールド通過に伴う側部地盤の水平変位分布を示す。水平変位量に違いはあるが、いずれの計測結果もシールド通過とともに側部地盤を押し広げる方向に変位し、テール通過時に若干シ

ールド側へ引き戻すような変位傾向を示している。また、井高野シールド、瑞光シールドでは、シールドのスプリングラインより上方の深度で水平変位のピークが生じている。

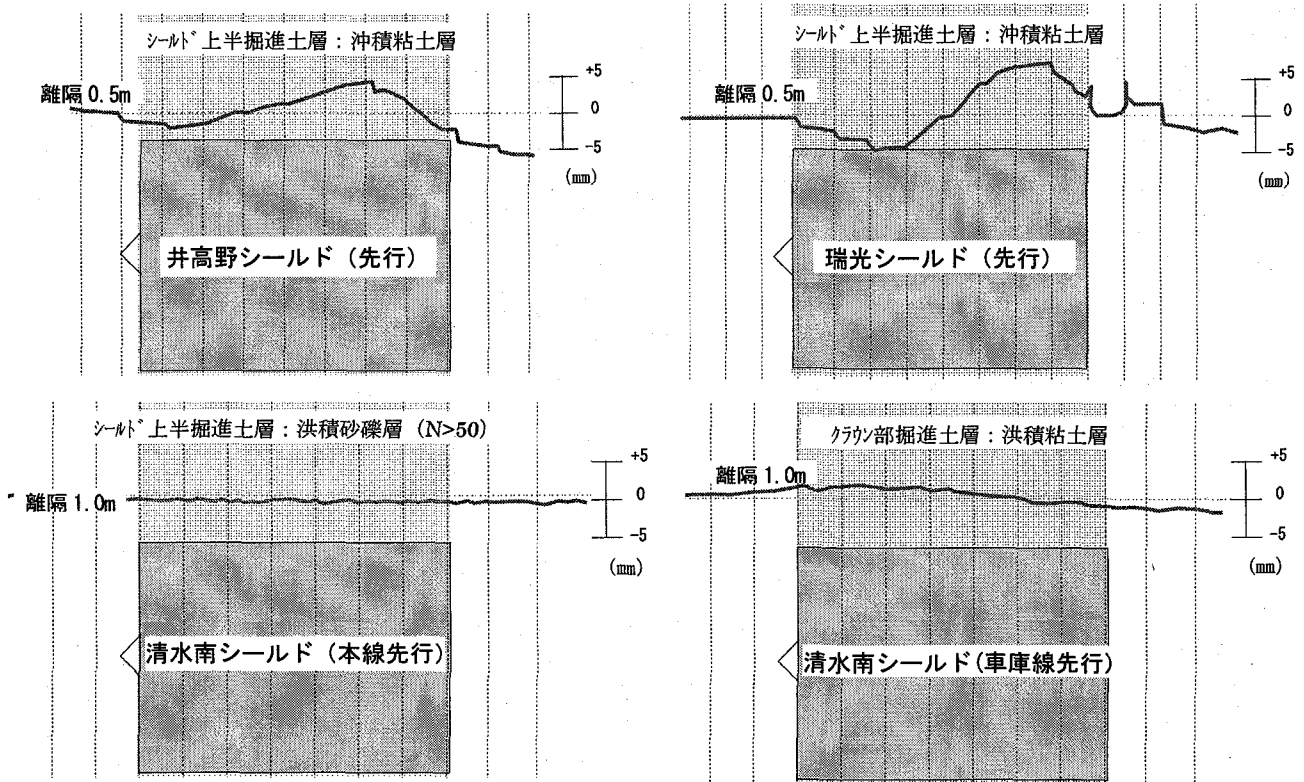


図 3.1 シールド通過に伴う直上地盤の鉛直変位（経リング図）

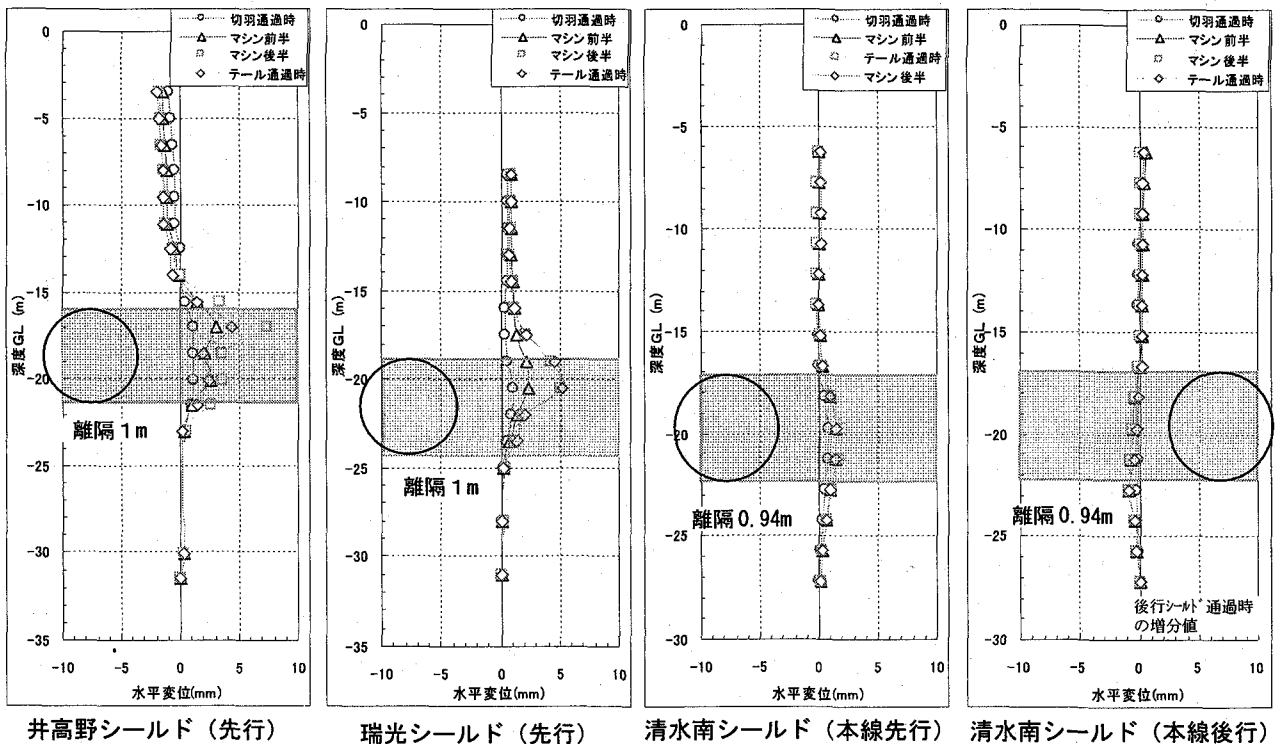


図 3.2 シールド掘進に伴う側部地盤の水平変位分布図

(2)セグメントの土圧・応力挙動

図 3.3 に瑞光シールドにおける後行シールド通過に伴う先行セグメントの土圧・応力の経時変化、図 3.4 に土圧・断面力の増分分布図を示す。瑞光シールドでは、後行シールドは先行セグメントの斜め上を掘進しており、後行シールド通過時に先行セグメントの後行シールド近接部分において掘進時に土圧上昇、停止時に若干の土圧減少を繰り返しながら、土圧が累積して増加する傾向にある。また、掘進中に増加した土圧は、テール通過時に大きく減少し、テール通過後には切羽通過以前の土圧まで減少している。但し、このような土圧の変化は、後行シールドと近接する部分だけであり、反対側の計測点では見られない。先行セグメント

の断面力は、後行シールド近接部計測点(応力 10)において正曲げ(内側引張, 外側圧縮), その側部(応力 9)では負曲げが発生しており、後行シールド通過に伴う下部方向への押し付け荷重に呼応した変化を示している。図 3.5, 3.6 に清水南シールドの車庫線先行シールド掘進時における本線先行セグメントの土圧・応力の経時変化および土圧・断面力の増分分布図を示す。車庫線先行シールドは本線先行セグメントの斜め上を掘進しており、土圧・応力の変化挙動は、瑞光シールドにおける計測結果と同様な挙動を示し、後行シールド掘進時においてシールド下部方向には、下向きに地盤を押し付けるような荷重が作用している。

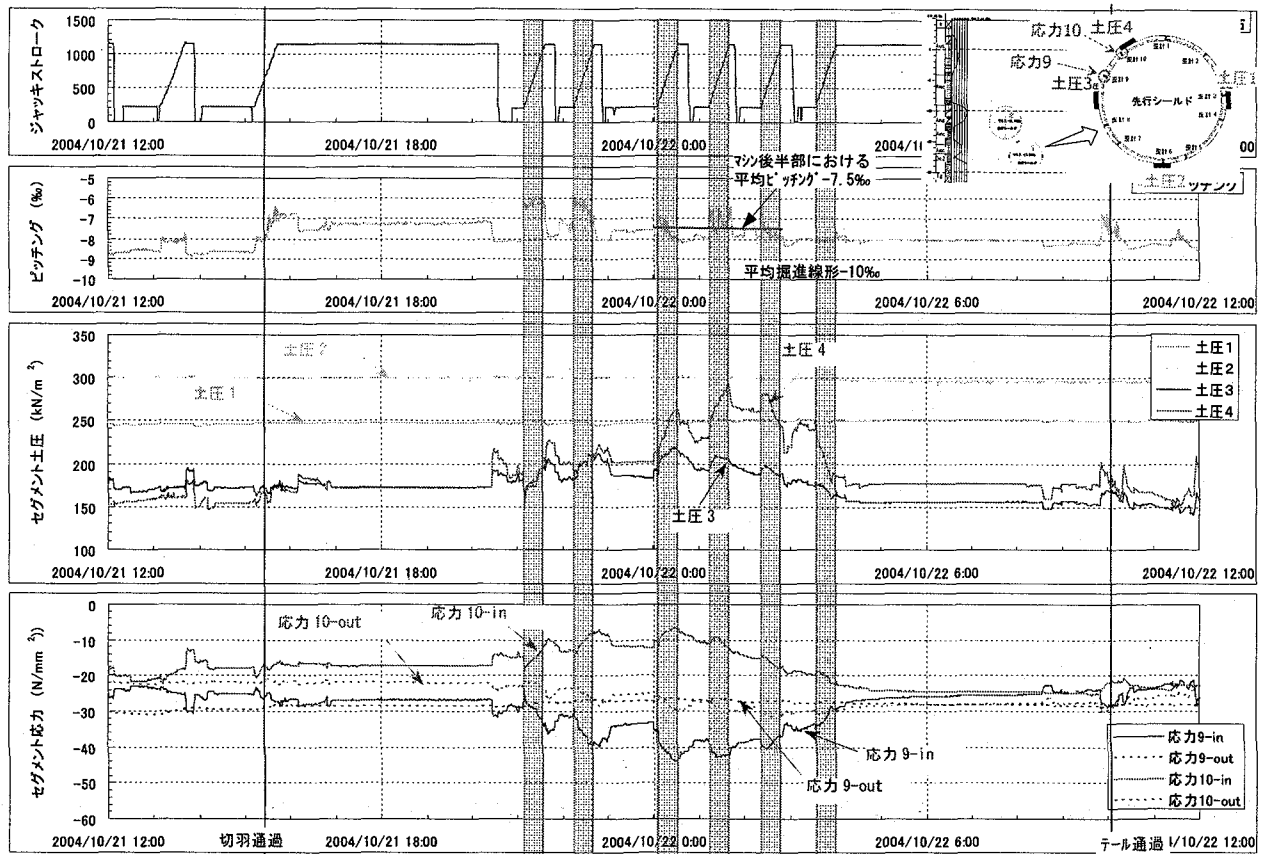


図 3.3 後行シールド通過時における先行セグメントの土圧と応力の経時変化(瑞光シールド)

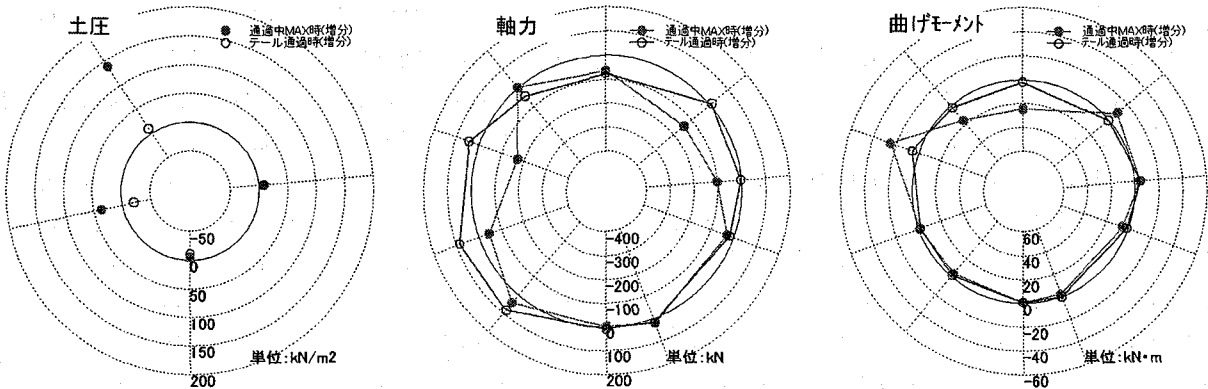


図 3.4 後行シールド通過時における先行セグメントの土圧および断面力の増分(瑞光シールド)

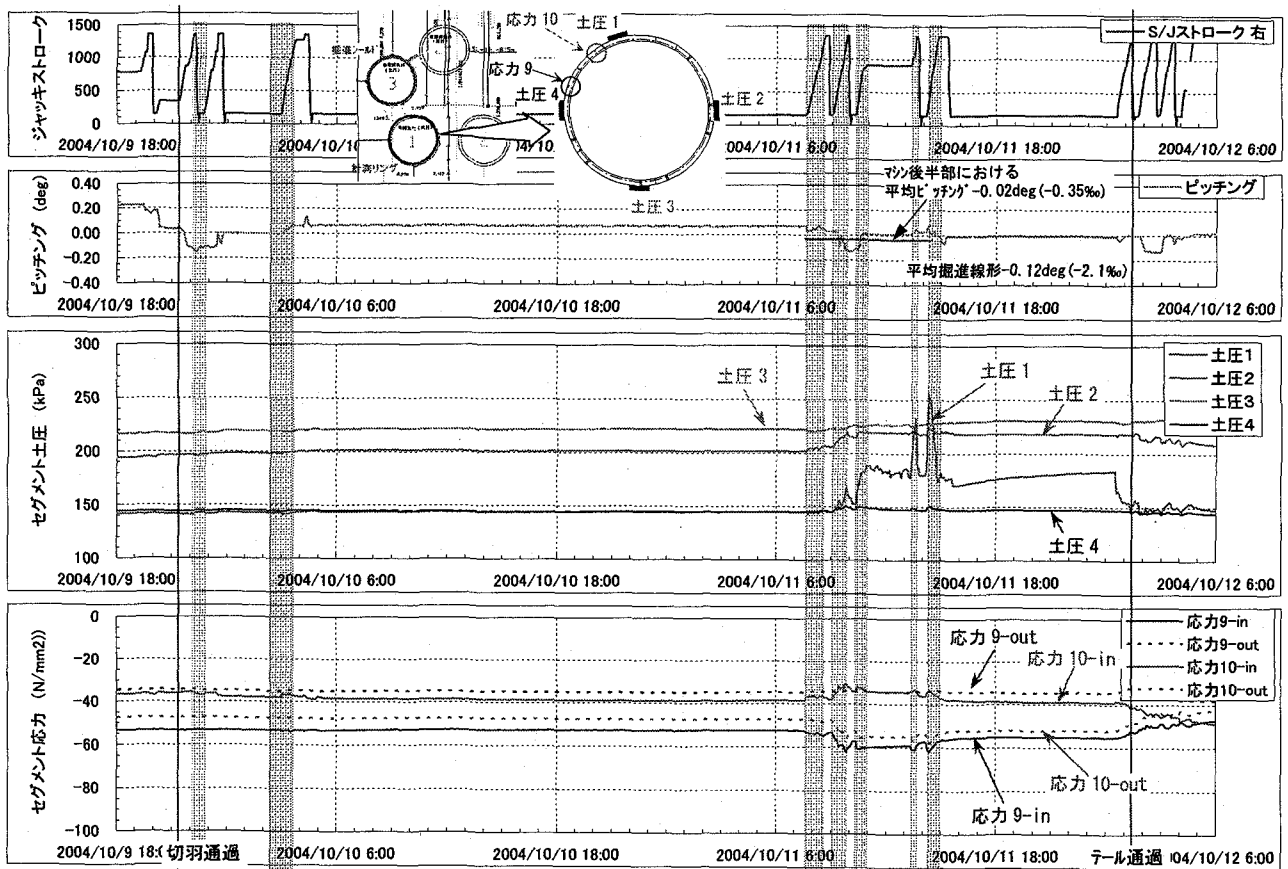


図 3.5 車庫線先行シールド通過時における本線先行セグメントの土圧と応力の経時変化(清水南シールド)

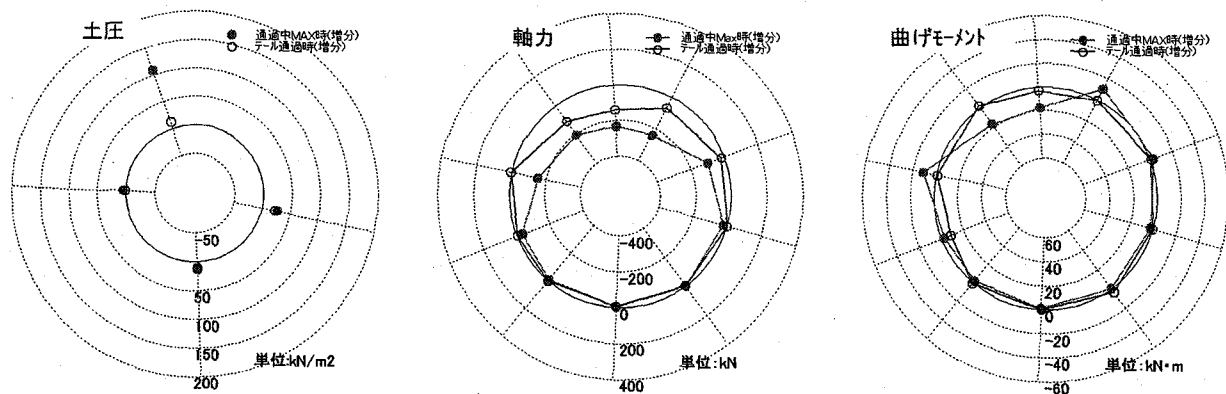


図 3.6 車庫線先行シールド通過に伴う本線先行セグメントの土圧および断面力の増分(清水南シールド)

4. シールド掘進に伴う荷重モデル

今回のシールド現場計測結果より清水南シールドは N 値 > 50 の砂礫地盤であり、微少な変形量に抑制されたが、井高野シールドおよび瑞光シールドでは、シールド直上地盤の変位はマシン前半部で沈下、後半部で隆起、テール通過時に沈下がみられ、シールド掘進段階によって異なる変形挙動を示した。また、後行シールド通過時の先行セグメントの土圧・応力の計測結果よりシールドの下部方向に押し付け荷重が生じることも確認された。図 4.1 に井高野・瑞光

シールド計測結果を模式図に示す。これに対し、シールド掘進に伴う地盤変形予測あるいは周辺構造物への影響解析において従来から用いられてきた応力解放力による解析では、図 4.2 のような地盤の掘削に伴う解放応力によりトンネル中心に向かって変位する結果となり、現場計測データにみられるような変形モードを表現できない。これは、実現場におけるシールド掘進においては、掘削による応力解放のみでなく、切羽圧や裏込注入圧、ピッチングなどシールドマシンの姿勢制御状態によって地盤への押し付け荷重が生じることが考えられる。従って、シ-

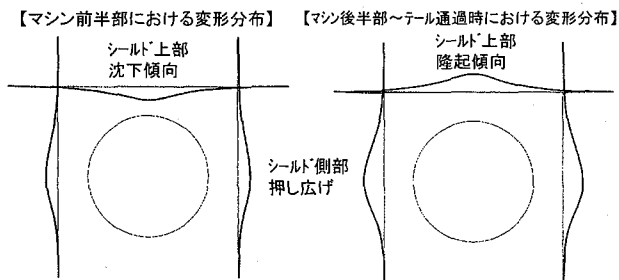


図 4.1 井高野シールド・瑞光シールド計測結果における地盤変形の模式図

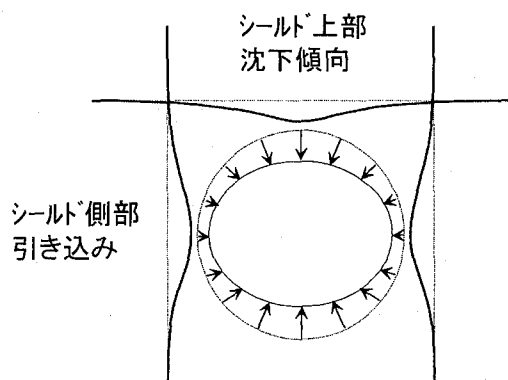


図 4.2 従来の解析手法における地盤変形の模式図

ルド掘進に伴う地盤変形解析を定性的かつ定量的に予測するには、これらの施工状態を考慮した荷重により解析を行う必要がある。ここでは、シールド掘進に伴う地盤変形予測解析を行う上で、各施工段階において考慮すべき荷重要因とその荷重の考え方を考察する。

(1) 切羽到達時

切羽前方における地盤変形は、シールド掘進地盤の側方土圧と切羽圧の圧力差が生じることによって、発生すると考えられる。側方土圧 > 切羽圧であれば沈下、側方土圧 < 切羽圧であれば隆起が生じることとなる。しかし、現場計測結果では、切羽到達時の地盤変形は、殆ど発生していない。これは、現在のシールド工事においては切羽圧を適正に管理することが可能であり、現在のシールド施工技術では、切羽到達時までの地盤変位は十分制御可能であると考えられる。

(2) マシン前半部

井高野・瑞光シールドでは、マシン前半部では、切羽通過後、直上地盤では沈下する傾向がみられ、側部地盤では押し広げる変位が見られた。マシン前半部における変形の要因としては、切羽通過後に生じるシールドマシン周辺の余掘

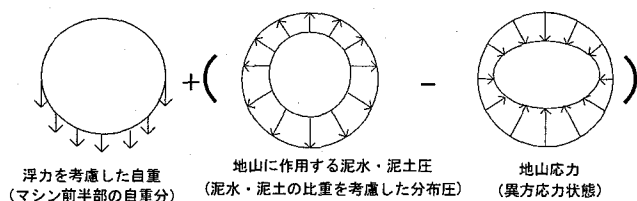


図 4.3 マシン前半部における荷重

り部の応力解放による変形が考えられる。しかし、余掘りによる地盤変形は、シールド側部においてもシールド内側へ変位する変形が生じるはずであるが、計測結果は逆に押し広げる変形が生じている。これは、スキンプレート背面の余掘り部分には切羽から泥水・泥土が回り込み、泥水圧・泥土圧が余掘りの応力解放による変形を抑制するか、泥水圧・泥土圧の制御によっては側部を押し広げるような場合が生じると考えられる。従って、マシン前半部の荷重として地山応力と泥水圧あるいは泥土圧の差圧を考慮した荷重設定を行う必要がある。また、切羽通過後のシールドマシンの下方地盤には、掘削とともにシールドマシンが地山の上に載ることとなり、マシンの自重が作用することとなる。但し、シールドマシンには浮力が作用するため、マシンの自重から浮力分を差し引いた重量が下部地盤に作用することとなり、載荷荷重として考慮する必要がある。図 4.3 にマシン前半部において考慮すべき荷重を示す。

(3) マシン後半部

シールド上半掘進土層が軟弱な沖積粘土層である井高野・瑞光シールドでは、マシン後半部で、直上地盤を隆起させ、側方地盤を押し広げるような変位挙動であった。このような変位傾向は、過去の計測結果においてもみられた挙動であり、これらの要因としてはテール部分で施工される裏込注入の影響であると考えられた¹⁾。しかし、今回の計測結果では、テール通過時に直上地盤は沈下傾向でマシン後半部とテール通過時で変形挙動が異なっていること、セグメントに取り付けた土圧計の計測データから裏込注入圧は土被り圧よりも小さく、裏込注入により直上地盤を隆起させるような施工条件ではなかったことから、マシン後半部においては裏込注入以外の地盤変形要因が考えられる。裏込注入以外の地盤変形の要因としては、掘進線形とマシンのピッチングの差に伴うマシンによる地盤への押し付け荷重が考えられる。図 4.4 にマシ

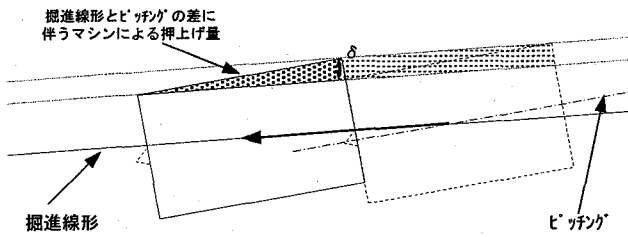


図 4.4 掘進線形とピッチの差に伴うマシンによる地盤の押し上げ（マシン下向き時）

表 4.1 掘進線形とピッチの差

現場名	ピッチ (%)	掘進線形 (%)	線形差
井高野シールド	2.18	4.45	-2.27 (下向き)
瑞光シールド (先行)	-35.5	-33.0	-2.5 (下向き)
瑞光シールド (後行)	-7.5	-10.0	2.5 (上向き)
清水南シールド 車庫線先行	-0.35	-2.10	1.75 (上向き)

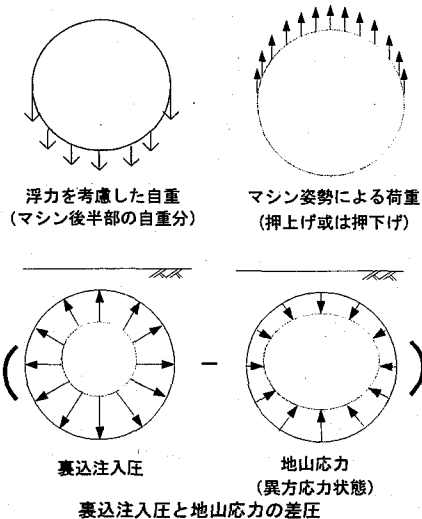


図 4.5 マシン後半部における荷重

ンによる地盤への押し付け荷重の模式図を示す。表 4.1 に今回の現場計測断面通過時における掘進線形とピッチ（マシン通過時の平均値）を示す。今回の現場計測においてマシン後半部で直上地盤を隆起させた井高野・瑞光シールド（先行）では、掘進線形に対してマシンは下向きの姿勢にあり、下部に位置する先行シールドに押し付け荷重が生じた瑞光シールド（後行）、清水南シールド（車庫線先行）では、掘進線形に対してマシンは上向きの姿勢にあり、マシンの姿勢により地盤に押し上げ（下げ）荷重が作用す

る姿勢状態にあったことが分かる。なお、今回の計測では裏込注入の影響は小さかったと思われるが、大きな裏込注入が作用した場合には、地盤変形に大きな影響を与えると考えられるため、マシン後半部における荷重として考慮すべきである。図 4.5 にマシン後半部において考慮すべき荷重を示す。

(4) テール通過時

裏込注入圧が適正に管理されており、テール通過時の地盤変形はよく抑制されているが、全般に沈下傾向であった。今回の計測断面における裏込注入圧は、一時的に大きな注入圧が作用している部分もあるがテール通過後の裏込注入圧が安定した時点の圧力は土被り圧よりも小さな圧力であり、テール通過時に沈下傾向となる現象は裏込注入圧と地山応力の差圧を考慮することにより説明できると思われる。

5. おわりに

大阪市営地下鉄 8 号線のシールド工事において実施した現場計測結果より、シールド通過に伴う地盤変形およびその変形要因となる荷重について以下のような知見を得た。

- ①シールド通過時における直上地盤の変形挙動は、マシン前半部、マシン後半部、テール通過時のシールド掘進段階によって異なることがある。
- ②シールド側部地盤の水平変位は、シールド通過時に押し広げ、テール通過後に若干シールド側に引き戻される傾向であった。
- ③後行シールド通過時において下部方向にある先行セグメントに押し付け荷重が計測された。
- ④これらの地盤変形挙動は、従来の応力解放による解析手法では表すことができない。
- ⑤シールド通過時の地盤変形は、地山応力、泥水圧・泥土圧、マシン重量、裏込注入圧、掘進線形とピッチの差に伴うマシンによる地山への押し付け荷重等が要因として考えられる。解析においては、これらの施工条件を掘進段階毎に考慮した荷重モデルが必要である。

参考文献

- 1) 沢田充弘, 太田 拓, 橋本 正, 長屋淳一: 施工過程を考慮したシールド掘進に伴う近接構造物の影響予測, 施工過程を考慮した地盤変形・破壊予測に関するシンポジウム発表論文集, pp.175-182, 2002.