

シールド掘進に伴うシールド直上地盤の変形挙動 に関する考察

Behavior of Ground Deformation above Subway Tunnels due to Shield Excavation

太田 弘¹, 吉田 博², 長屋 淳一³, 譽田 孝宏³, 菅 茜 憐³

Hiromu Ota, Hiroshi Yosida, Junichi Nagaya, Takahiro Konda and Simon Kan

¹正会員 工修 大阪市交通局 鉄道技術本部 (〒550-8552 大阪府大阪市西区九条南1-12-62)

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

²正会員 大阪市交通局 鉄道技術本部 工務部 (〒550-8552 大阪府大阪市西区九条南1-12-62)

³正会員 工修 財団法人 地域 地盤 環境 研究所 地盤工学研究部門 (〒550-0012 大阪府大阪市西区立売堀4-3-2)

In the construction of Osaka Subway No.8 Line, there were many tunnel sections that were extremely close to some important existing structures. Therefore, trial measurements were conducted in the initial excavation stage. The main excavation was carried out based on such as the pressure on cutting face and the backfill grouting pressure. This subway constructions had finished safely under controlled the small ground deformation. In this paper, each observation results were got together uniformly, and after many observation results were cataloged according to the characteristic of excavated ground, some evaluation and discussion were made according to the these data.

Key Words : vertical ground deformation, shield tunnel, soft ground, stiff ground, succeeded settlement, construction management

1. はじめに

大阪市地下鉄8号線(以下, 8号線)建設工事では, 線路部構築においてシールド工法を採用した. シールド施工区間には, 河川横断, 既設構造物(地下鉄線, 橋脚等)や地下埋設物(下水道, 通信トンネル等)などの重要構造物に近接する箇所が多数あるため, 周辺地盤への影響を最小限に抑制する施工管理が求められた. そのため本工事では, 各工区におけるシールド掘進初期段階において, シールド直上地盤内に層別沈下計を設置し, シールド掘進に伴うトンネル直上地盤の変形挙動をトライアル計測結果から把握し, 切羽圧や裏込め注入圧などに関する適切な施工管理方法を確認した上で本掘進をおこなった.

ここでは, これら全工区のトライアル計測結果を統一的に整理し, シールド掘進に伴う周辺地盤の変形挙動について, 施工条件や地盤特性の違いに着目して考察した. また, 軟弱な粘土地盤掘進時に発生する後続沈下と, 砂・砂礫地盤掘進時における地盤内沈下モードについて検討したのであわせて紹介する.

2. 工事概要

大阪市東部地域では, 住宅系の土地利用を中心とした既成市街地が形成されているが, 鉄道サービスが不便な地域であり, バスも道路混雑が激しく円滑な運行が困難な状況にあった. そのため, 8号線は, 大阪市東部地域の井高野~今里間を南北に結び, 既設鉄道網と接続させることによって, この地域に鉄道サービスを提供する路線である. 工事は, 平成12年3月から開始され, 平成18年12月に開業した.

8号線工事では, 停留場および車庫については開削工法を, 線路部についてはシールド工法を採用しており, すべての現場において施工管理用の各種計測による情報化施工を進めた.

8号線の平面図と土質縦断図を図-1に示す. 本路線沿いの地盤は, 淀川を挟んだ北部地域, 洪積層が浅部にあつて他地域に比べると硬質な中部地域, 東大阪特有の軟弱な超鋭敏沖積粘土層が浅部に分厚く堆積した南部地域に大別でき, 上町台地より東側の大阪市東部地域については, 古代には内海であった.

シールド掘進土層は、軟弱で鋭敏な沖積粘土層(南部地域で、 N 値 $=0\sim2$ 、一軸圧縮強さ $q_u=50\sim100\text{kN/m}^2$ 、液性指数 $I_L=0.6\sim0.8$)から、高透水性の洪積砂礫層や硬質な大阪層群(Oc層:粘着力 $c=190\sim250\text{kN/m}^2$ 、Os層: N 値 >60)など様々であった。

各工区のシールドマシン仕様や主たる掘進土層を

表-1に示す。各工区では、シールド発進直後に計測断面を設けてトライアル計測を実施することにより、地盤条件や施工条件(切羽圧、裏込め注入圧や注入量、ピッチング等)と地盤変形の関係を把握し、これら現場計測結果に基づいて本掘進の施工管理方法を設定した。また、重要構造物に対して近接施工する区間については、影響領域に達する前に別途計測断面を設け、施工条件などを再確認するとともに、重要構造物およびその周辺地盤の変状計測を実施して、厳格な施工管理をおこなった。

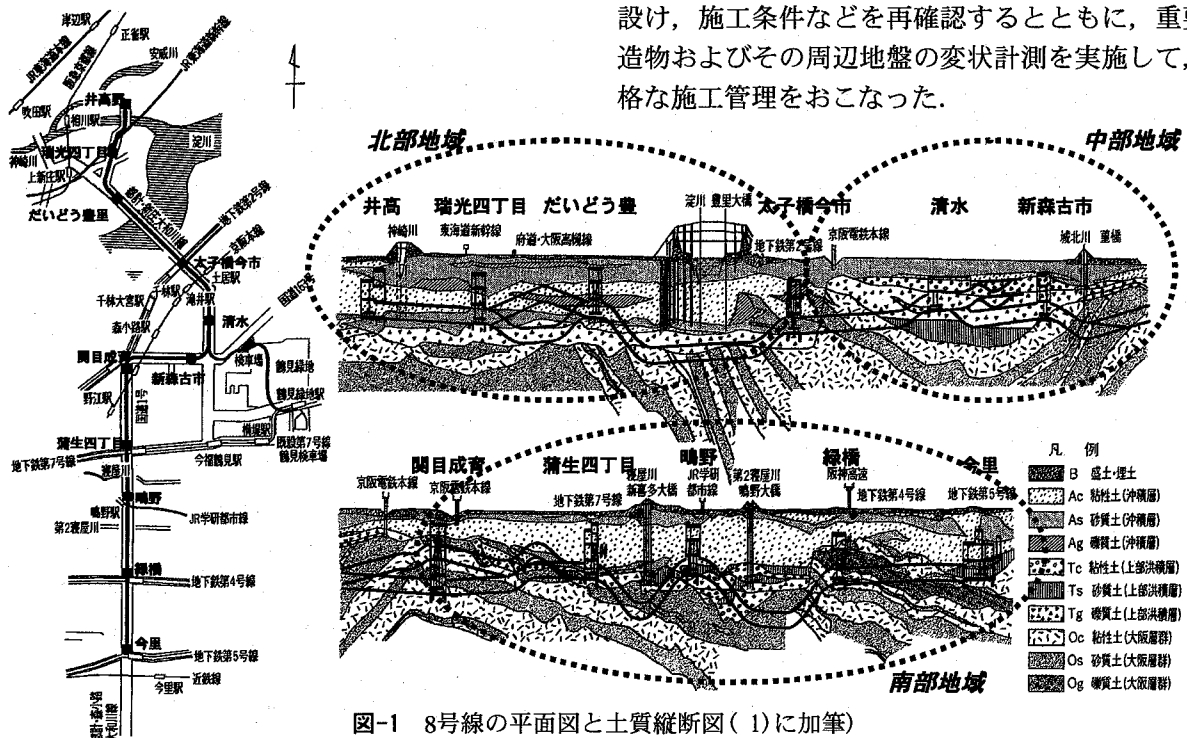


図-1 8号線の平面図と土質縦断面図(1)に加筆

3. 代表的な地盤変形挙動例

各工区で実施したトライアル計測のうち、主たる掘進土層が沖積粘性土層の事例(表-1に示す計測断面13T1)について以下に示す。

トライアル計測断面図を図-2に、トンネル直上地盤の鉛直変形量に関する経リング図を図-3に示す。本計測断面は、発進立坑から25m離れに位置する初期掘進段階に設定されており、トンネル直上地盤の変形挙動については、トンネル天端部から0.5m離れ、0.5D離れ(D:シールド外径)、1D離れに層別沈下計を設置して確認した。シールド掘削上部土層であるAmc層の特性は、 N 値 $=0\sim2$ 、 $q_u=130\text{kN/m}^2$ 程度、 $I_L=0.8$ 程度である。

経リング図からもわかるように、①切羽到達までの先行沈下量は3.7mm、②マシン通過中(切羽到達からテール通過まで)の沈下量は11.7mm、③テール通過7リング後の沈下量は12.9mmであった。本計測断面における最終沈下量は16.5mmであったことから、各掘削ステップで発生した沈下量が最終沈下量に対して占める割合は、それぞれ、①

約22.4%、②約48.5%、③以降で約29.1%であった。

①については、切羽圧力の変動量が小さく、先行沈下量の抑制効果が確認できた。また、②については、ピッチングが大きく変動した際に沈下量が連動して大きく変化していることが見受けられた。③については、テール通過直後からテールボイド部にマシンより裏込め材を投入する同時裏込め注入工法を採用していることから、テールボイド発生と連動して速やかに小さい圧力変動で裏込め材を注入しており、沈下量を抑制していることが確認できた。

4. 地盤特性の違いによる地盤変形量の差異

3. で例示したように、シールド掘進に伴って発生するトンネル直上近傍地盤(粘性土地盤:トンネル天端から0.5m上部の計測点、砂質および砂礫地盤:トンネル天端から1m上部の計測点)での鉛直変位量は、シールド掘進における施工管理状況によって挙動が異なる。ここでは、掘削対象地盤

表-1 各計測断面におけるシールドマシンの仕様および主たる掘進土層

現場名	シールドマシン		計測断面名	土被り厚 (m)	主たる掘削土層	N 値	粘着力 c (kN/m ²)	液性指数 I _L	
	形式	外径 (m)							
A	泥水	5.44	11T1	15.7	沖積粘土層 (Amc)	2～5	63	0.56	
			11T2	15.3					
B				1T1	15.0	沖積砂礫層 (Amg)	44～60	—	—
			1T2	15.5					
C	泥土圧		3T1	11.6	洪積砂礫層 (Tg)	>60	—	—	
			3T2	12.1					
			3M	20.7	大阪層群粘土層 (Oc8)	10～20	191	0.25	
D1	泥水	5.54	41T1	14.2	洪積砂礫層 (Tg)	>60	—	—	
		41T2	14.5						
D2	泥土圧	5.44	42T1	6.4	沖積粘土層 (Amc)	1～2	94	0.89	
			42T2	6.4					
E				5T1	14.3	洪積砂礫層 (Tg)	44～60	—	—
				5T2	14.7				
				5M	13.5	沖積粘土層 (Amc～Alc)	0～1	30	0.82
F		5.33	9T1	16.4	沖積粘土層 (Amc～Alc)	0～1	86	0.60	
			9T2	17.5					
			9T3	29.7	大阪層群砂層 (Os8)	50～60	—	—	
			9T4	30.4					
			9M	18.3	沖積粘土層 (Amc～Alc)	4	203	0.60	
G			6T1	10.2	大阪層群粘土層 (Oc9)	8～11	240	0.41	
			6T2	21.0					
			6M1	29.6	大阪層群砂層 (Os8)	>60	—	—	
			6M2	32.3					
H			5.44	13T1	15.9	沖積粘土層 (Amc～Alc)	0～2	65	0.81
		13T2		15.7					
		13M		19.0	大阪層群砂礫層 (Og10)	>60	—	—	
I		5.44		15T1	6.7	沖積砂層 (Ausc, 粘土含)	2～4	—	—
				15T2	9.3				
				15M	18.2	沖積粘土層 (Amc)	3～7	86	0.61

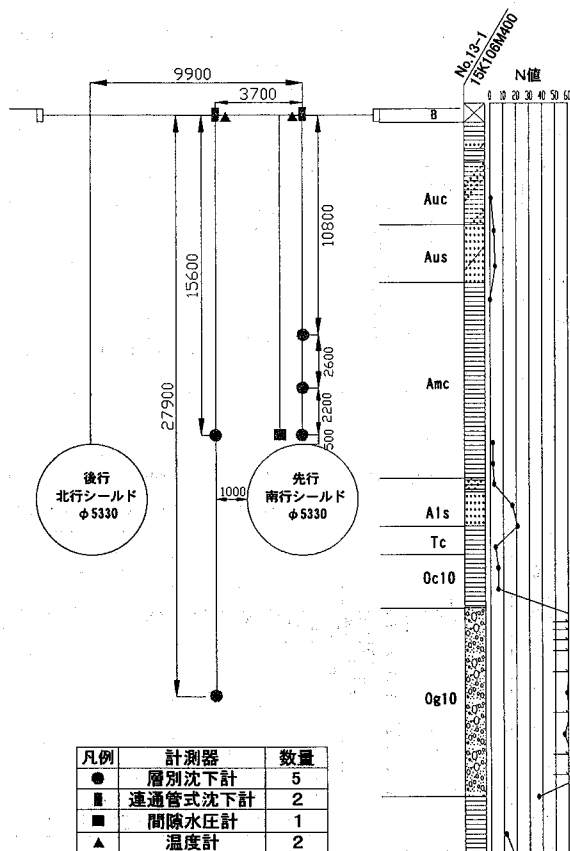


図-2 トライアル計測断面図 (13T1断面)

の特性の違いによって区分された発生パターンの差異について考察する。

沖積地盤と洪積地盤に大別した鉛直変位量を掘削ステップごとに区分した図を図-4に示す。なお、各掘削ステップの鉛直変位量については、表-1に示す計測現場ごとに、粘性土と砂質および砂礫土とに分類させて左から順番に表示させている。

一部、洪積礫質地盤を掘進中に10mmの沈下が発生している断面があるが、これは、ピッチングの変化および中折れジャッキ稼動に伴うマシンの姿勢変化が原因として考えられる。これを除外して考えると、これまでの知見と同様、概ね沖積地盤の方が洪積地盤に比べて沈下量が大きかった。

また、沖積粘性土地盤をシールド掘進したケースではマシン通過中の沈下量が最も大きく、次にテール通過～テール通過30日後の後続沈下量が大きく、その次に切羽到達1D前からの先行沈下量が大きかった。つまり、今回の計測結果からは、切羽到達1D前～テール通過30日後の間に発生した沈下量が、全体沈下量の大部分を占めており、それ以外の期間に発生した沈下量は微量であった。

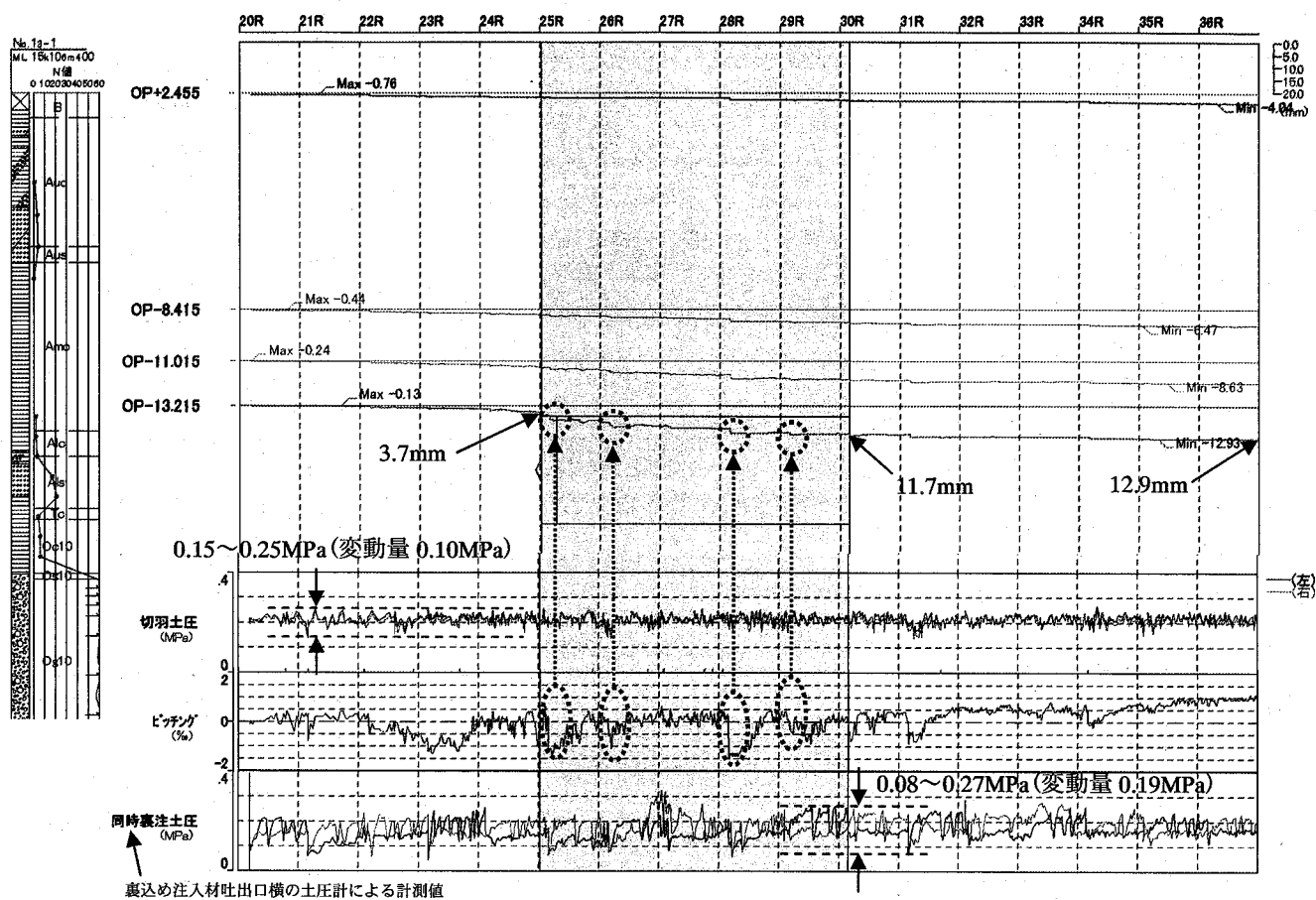


図-3 トンネル直上地盤の鉛直変形量とマシンデータに関する経リング図(13T1断面)

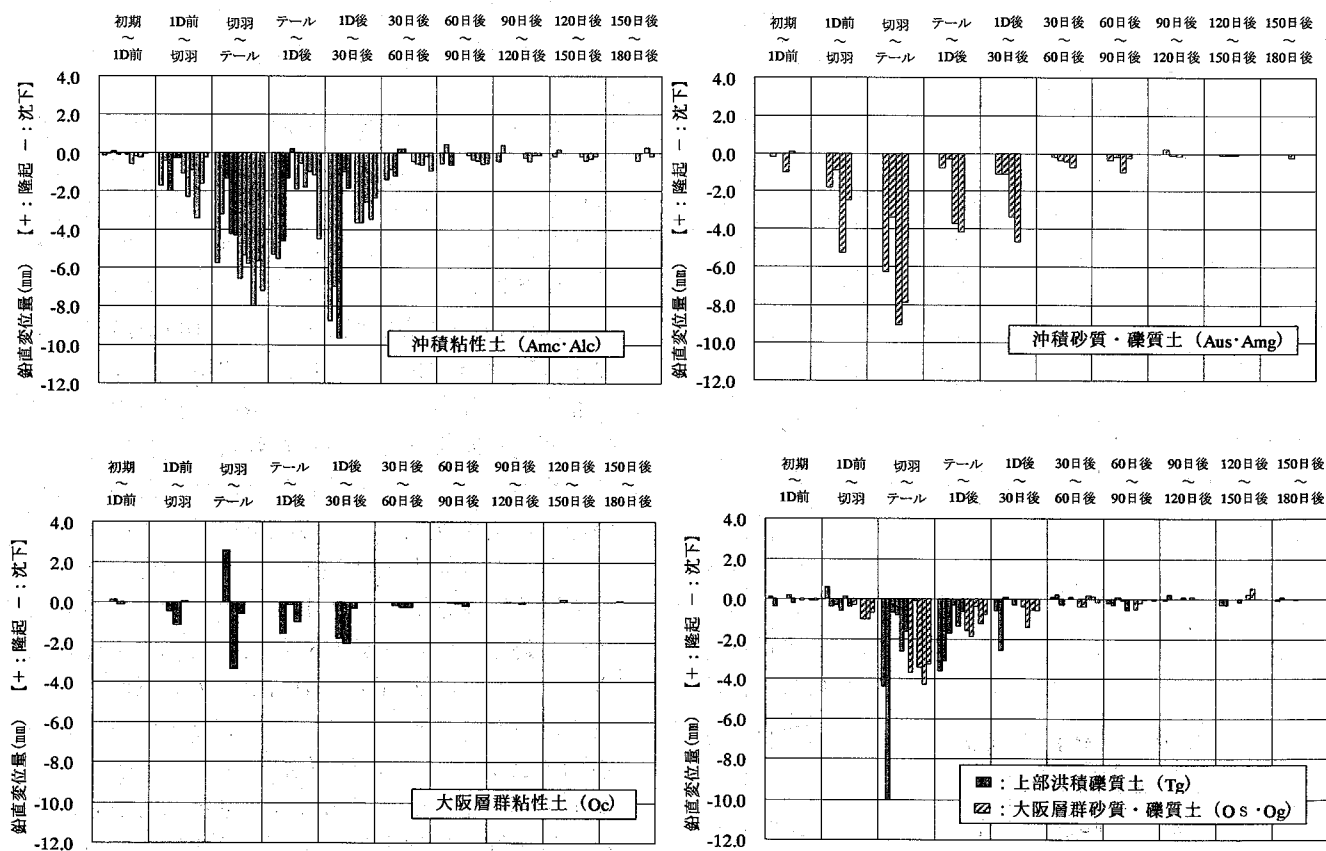


図-4 地盤特性の違いによるシールド直上近傍地盤での鉛直変位量の差異

一方、沖積砂質・礫質地盤や洪積地盤をシールド掘進したケースについては、マシン通過中の沈下量が他のステップに比べて集中的に大きいという特徴を有している。また、一部の洪積粘土地盤の事例については、テール通過後にわずかながら引き続き沈下が発生しているのが確認できた。

5. シールド掘進中およびマシン停止中に発生した鉛直変位量の差異

シールド掘進に伴って発生する地盤変形は、シールド掘進中のみに発生するのではなく、マシン停止中にも発生することが知られている。ここでは、各リングをトンネル掘削する際に発生する鉛直変位量について、シールド掘進中に発生する量とマシン停止中に発生する量に区分して整理し、考察した。

各掘削対象地盤の代表的な計測断面における、シールド掘進中とマシン停止中のトンネル直上近傍地盤での鉛直変位量に関する経リング図を図-5に示す。例えば、沖積粘土地盤をシールド掘進した11T1断面では、切羽前の先行沈下について、シールド掘進中の挙動は切羽直前に沈下しているのに対して、マシン停止中は徐々に沈下している。これは、マシン停止中における切羽泥水圧の低下が原因の一つとして考えられる。また、マシン通過中の沈下については、シールド掘進中についてはテール通過前に隆起へ転

じているのに対して、マシン停止中についてはほぼ線形的に沈下しており、その変化量はシールド掘進中よりも大きかった。これは、セグメント組立時のジャッキ引き抜き操作によるマシン姿勢の変化が原因の一つとして考えられる。一方、テール通過後の挙動については、シールド掘進中もマシン停止中も沈下傾向にあり、マシン停止中の沈下増分量の方が大きかった。以上のことから、11T1断面では、シールド掘進に伴って発生する地盤沈下は、シールド掘進中よりもマシン停止中の方が大きかった。このような傾向は、地盤特性の違いによらず、その他掘削地盤についても定性的に類似した傾向にあった。

各計測断面におけるシールド掘進中とマシン停止中の累積鉛直変位量を図-6に示す。シールド掘進中の挙動は、施工条件に依存して沈下傾向から隆起傾向まで変化しているが、マシン停止中の挙動については、地盤特性の違いによって大きさは異なるものの一貫して沈下傾向を示した。また、マシン停止中の方がシールド掘進中よりも沈下が大きかった。

このように、マシン停止中の沈下現象は、シールドマシン周辺地盤を攪乱する一つの要因になり、後続沈下量の増加につながる傾向にある。ここでは、マシン停止中の沈下を極力抑制した施工管理事例について紹介する。

軟弱な沖積粘土地盤をシールド掘進したE現場において、セグメント組立時においてマシン姿勢に変化が見られたことから、セグメント組立て時のジャ

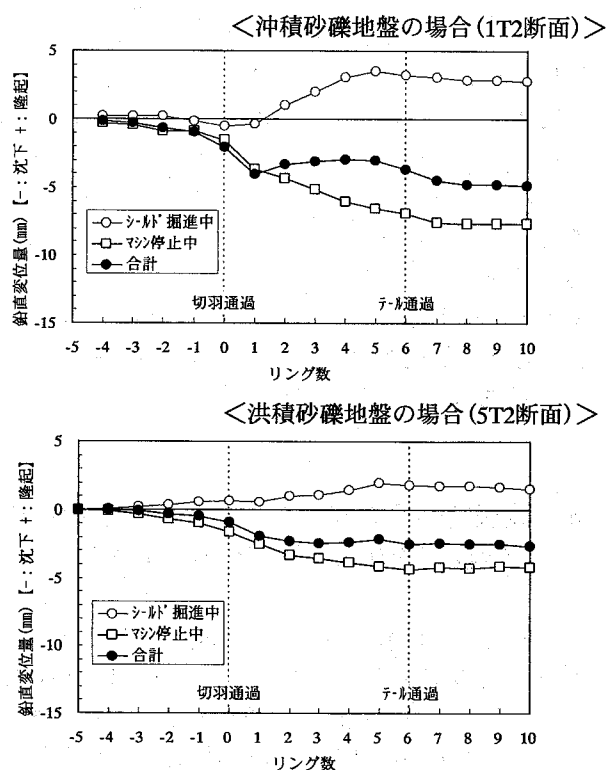
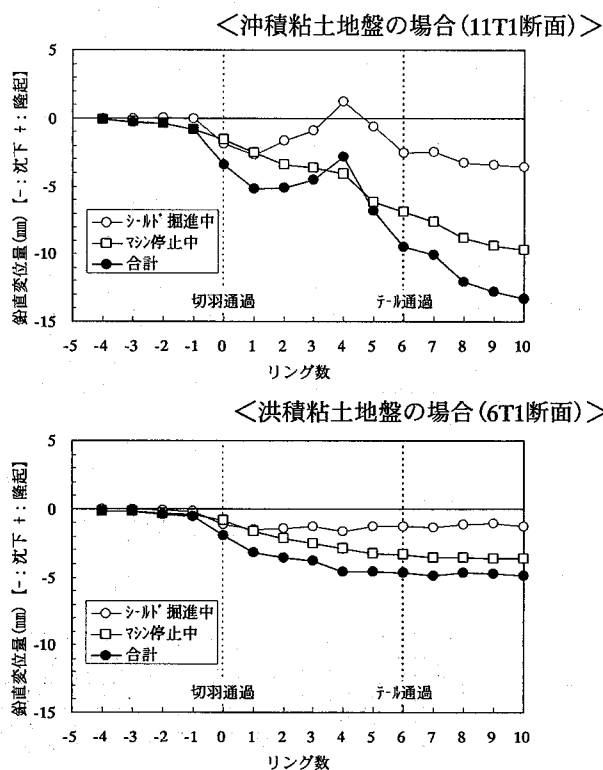


図-5 シールド掘進中およびマシン停止中に発生したトンネル直上近傍地盤での鉛直変位量に関する経リング図

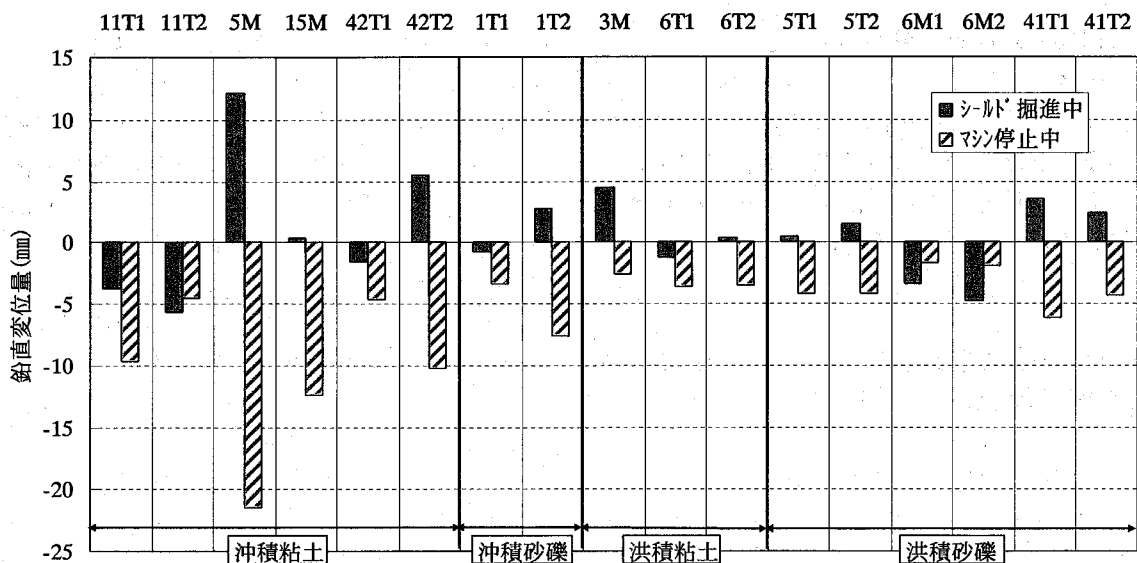


図-6 地盤特性の違いによるシールド掘進中およびマシン停止中に発生した累積鉛直変位量の差異

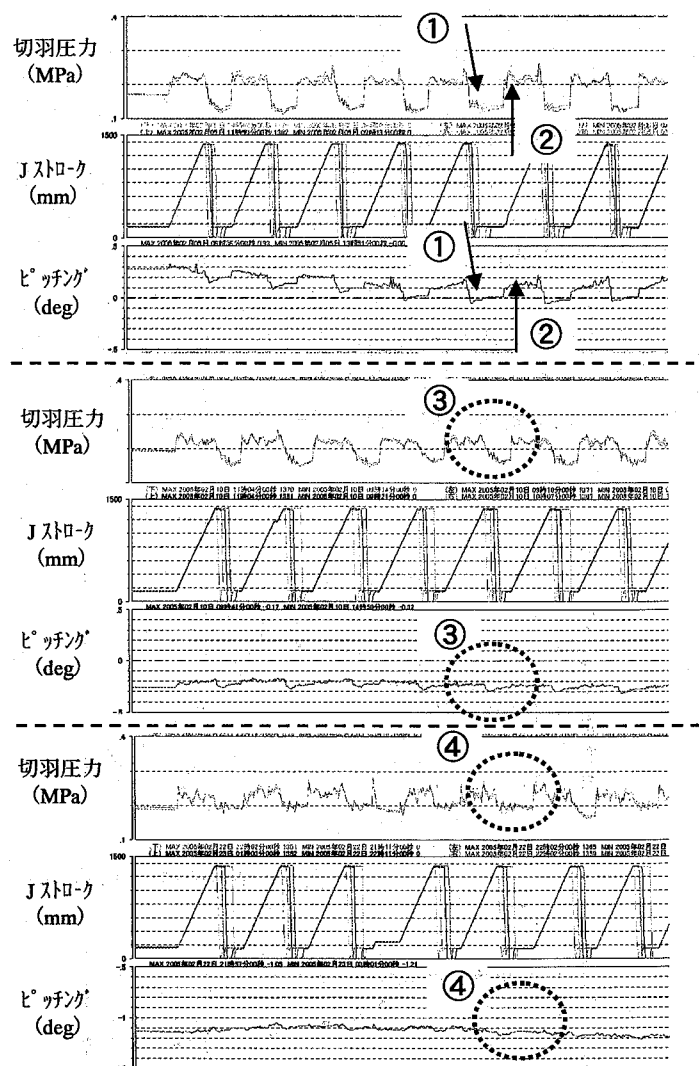
ツキ引抜き操作方法を確認した。その結果、全部で20本あるジャッキのうち、最大時にはその半分に相当する10本のジャッキを引き抜いており、これに伴って切羽押付け力の作用位置が変化し、マシン姿勢が変化したことが考えられた。

そこで、必要以上にジャッキを引き抜かないようにジャッキ引抜きパターンを変更した結果、セグメント組立て中の切羽圧力およびマシン姿勢の変動は改善された。改善前後における切羽圧力とジャッキストローク、ピッチングの経時変化図を図-7に示す。①や②のようなピッチングの変動に伴う切羽圧力の変動は、③のように改善された。

さらに、泥土圧式シールドの場合、切羽圧力が低下してもチャンバー内は土砂で充満しているため、周辺地山を呼び込むことはないと考えられるが、ジャッキ引抜きによって切羽圧力が低下する場合があります。その影響が周辺地山に伝播していることが考えられる。そこで、マシン停止中においても加泥材をチャンバー内に注入することによって切羽圧力の低下を極力抑制した。その結果、マシン姿勢の急激な変化が、なだらかな変化に抑制(③から④へ改善)することができた。

6. 軟弱粘性土地盤におけるシールド通過時の地盤変形挙動と後続沈下の関係

軟弱粘性土地盤をシールド掘進した際、テール通過以降、長期間にわたって発生する沈下については、シールドマシン周辺地盤の攪乱およびそれに伴う圧密沈下が主要因であることが指摘されている^{2), 3)}。



	切羽圧力 (Mpa)	ピッチング (deg)
①&②	0.11~0.26 (0.15)	-0.06~0.33 (0.39)
③	0.14~0.26 (0.12)	-0.32~0.17 (0.15)
④	0.16~0.28 (0.12)	-1.20~-1.05 (0.15)

*) 8リング平均変動域, カッコ内は平均変動幅

図-7 切羽圧力変動抑制に伴うマシン姿勢の改善

今回の8号線の事例においても、図-4に示すように、テール通過後の約1ヶ月間にわたって沈下が発生しており、それ以降もわずかに沈下傾向が継続していることが確認できた。

ここでは、シールド通過中に発生した地盤変形および粘性土地盤の特性の差異が、後続沈下に関与していることを指摘した文献⁴⁾を参考にして、8号線の事例を追加加筆することにより、考察をおこなった。なおここでは、シールド掘進に伴う沈下は、弾性体内の素掘り円形トンネル解析において、応力解放による変形の95%以上が終了する⁵⁾と考えられるテール通過1D(D:シールド外径)間までの変形最大値を「シールド通過時の最大変形量」とし、1D以降に発生した沈下量を「後続沈下量」と仮定した。

トンネル直上近傍地盤におけるシールド通過時の最大変形量と後続沈下量の関係を図-8に示す。過去の実績では、マシン通過中の変形量が大きいほど後続沈下量は大きくなる傾向にあり、液性指数 I_L が1に近い軟弱な粘土地盤ほどその傾向は顕著であった。今回の8号線の事例では、全体の変形量に占めるマシン通過中の変形量の割合が大きい傾向にあったものの、変形量そのものは過去の実績に比べて小さく、後続沈下量についても同様に小さかった。よって、8号線のデータは、太破線で示す領域内に局所的に分布する傾向を示した。ただし、これまでのような I_L の大きさの違いによる顕著な傾向の分類は確認できず、シールド通過時の地盤変形を抑制することによって、その効果が後続沈下量の抑制につながっていることが推測された。

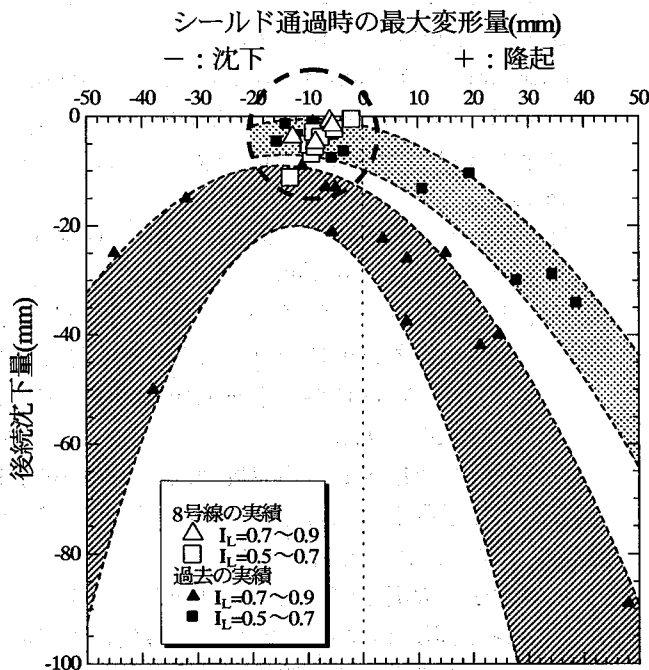


図-8 シールド通過時挙動と後続沈下の関係 (4)に加筆)

7. 砂・砂礫地盤におけるトンネル直上地盤の沈下挙動

過去の事例では、砂・砂礫地盤内をシールド掘進した際、シールド周辺地盤のみに局所的な沈下が発生し、地表面まで達するその影響度は小さいことが指摘されている⁶⁾。ここでは、主たる掘進土層が砂・砂礫地盤である数現場について、シールド直上地盤の沈下曲線を統計的に整理した文献⁵⁾を参考にして、今回の8号線の事例を追加加筆することにより、考察をおこなった。

シールド直上地盤の沈下曲線を図-9に示す。横軸は、各計測点での沈下量 S をトンネル天端部から1m離れの計測点での沈下量 S_c で除した無次元化量であり、縦軸は、トンネル中心から計測点までの距離 L をシールド半径 R で除した無次元化量である。つまり、横軸は、シールド周辺地盤に発生した沈下量に対する地盤内伝播率を表しており ($S/S_c=1$:トンネル直上地盤内で計測した沈下量が、トンネル天端部1m離れでの沈下量と同じ)、縦軸は、土被り比に類似した変数 ($(R+L)/2R=0.5$:トンネル天端部)を示している。過去の実績では、トンネル天端から1.5D離れぐらいまでの間で局所的に地盤沈下が発生している (S/S_c の変動量:大)ものの、それよりも上部の地盤への影響度は小さく、とも落ち現象 (S/S_c の変動量:小)を示す沈下分布傾向にあった。今回の8号線の事例についても、多少のバラツキはあるものの過去の実績とほぼ同様の傾向を示しており、局所的な地盤変形がトンネル周辺部のみに発生していることを確認した。

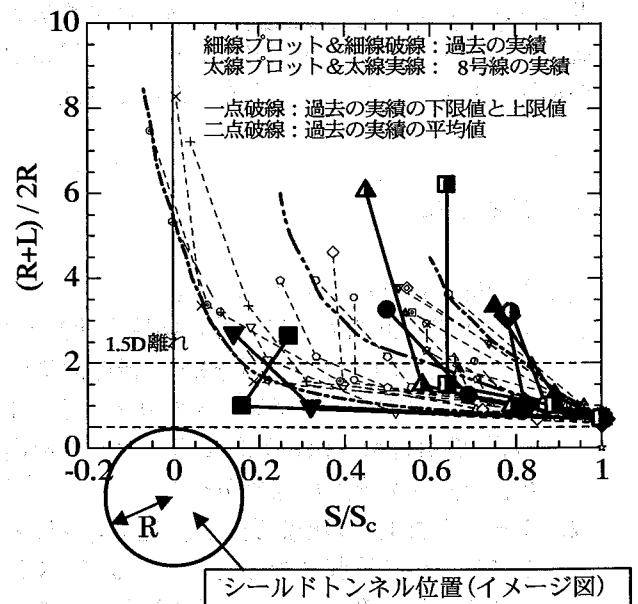


図-9 シールド直上地盤の沈下分布曲線 (6)に加筆)

8. 現場計測工法を用いたシールド施工管理

これまで、大阪地盤特有の軟弱粘性土地盤におけるシールド工事において、地盤変位をいかに制御するかをテーマに掲げ、種々の検討を積み重ねてきた。

密閉型シールド工法の発達により切羽圧力管理が容易になり、切羽前の沈下と隆起はある程度制御できるようになった。ただし、掘削能率を重視するあまり低い切羽圧力を設定したり、加泥材注入量を急激に増加させて土砂の流動抵抗を低下させ、過剰に土砂を取り込んだりすると、切羽前沈下を誘発する恐れがあることから、厳格な施工管理が必要である。

また、テールボイド部の沈下や隆起については、シールド掘進に連動してシールドマシンに装備した注入管から裏込め材をすみやかに注入する同時裏込め注入工法を開発して実用化し⁷⁾、改良を加えた⁸⁾ことから、テールボイド発生と同時に裏込め注入材を充填することで、シールド通過後の地盤変位を最小限に制御できる状態までになってきた。ただし、裏込め注入圧の変動が大きくなると周辺地山を乱すことになり、たとえテールボイド部の地盤変形がなくても、後続沈下が発生する場合があるので、厳格な施工管理が必要である。

つまり、最近のシールド工事では、切羽前沈下やテールボイド沈下は抑制することがある程度可能になり、全体沈下量に占めるシールド通過中の変形と後続沈下の割合がクローズアップされている。ただし、8号線工事では、これまでの知見を踏まえ、シールド初期掘進段階において、トライアル計測を実施して地盤変形状態を把握し、切羽圧や裏込め注入圧などに関する最適な施工管理方針を確認した上で本掘進をおこなった結果、シールド通過中の変形も後続沈下も小さく抑制でき、周辺地盤および構造物への影響を極力抑制して施工することができた。

9. おわりに

ここで得られた知見を以下に示す。

- (1) トライアル計測の結果、沖積粘性土地盤では、切羽到達1D前～テール通過30日後の間に発生した沈下量が全体沈下量の大部分を占め、沖積砂質・礫質地盤や洪積地盤では、マシン通過中の沈下量が局所的に大きかった。
- (2) シールド掘進中の地盤変形は、施工条件に依存して沈下から隆起まで変化しているが、マシン停止中の地盤変形は、地盤特性に依存して大きさは異なるものの、一貫して沈下傾向を示し、

地盤特性の違いによらず、沈下量が大きかった。

- (3) これまでは、軟弱粘土地盤をシールド掘進した場合、マシン通過中の変形量が大きいほど後続沈下量が大きくなる傾向にあり、液性指数 I_L が1に近い地盤ほどその傾向が顕著であったが、8号線の事例では、マシン通過中の変形量が全体変形量に対して占める割合が大きい傾向にあったが、その変形量も後続沈下量も小さかった。
- (4) 砂・砂礫地盤をシールド掘進した場合、トンネル周辺部で局所的な地盤変形が発生し、上部地盤への影響度は小さく、とも落ちな沈下分布にあったが、8号線の事例でもほぼ同様の傾向にあった。
- (5) 8号線工事では、トライアル計測結果に基づいて最適な施工管理方針を確認した上で本掘進をおこなった結果、シールド通過時の変形を極力抑制することができ、軟弱粘土地盤における後続沈下も小さく抑えることができた。

参考文献

- 1) 塩谷智弘，廣瀬秀男，山口博章：既成市街地下を縦横に縫って掘り進む 大阪市営地下鉄第 8 号線シールド工事，トンネルと地下，Vol.35，No.9，pp.27-38，2004。
- 2) 森麟，赤木寛一：シールド工事に伴う軟弱粘性土の乱れに基づく圧密沈下，トンネルと地下，Vol.11，No.8，pp.15-19，1980。
- 3) 葛野恒夫，鈴木通正，平田栄司，橋本正，早川清：鋭敏粘性土地盤における土圧シールドの掘進に伴う後続沈下について，第 25 回土質工学研究発表会講演集，pp.1765-1766，1990。
- 4) Hashimoto T., J. Nagaya and T. Konda : Prediction of Ground Deformation due to Shield Excavation in Clayey Soils, Soils and Foundations, Vol.39, No.3, pp.53-61, 1999。
- 5) 谷本親伯：土木特殊工法シリーズ 4 NATM_1，森北出版株式会社，pp.149-157，1984。
- 6) 橋本正，長屋淳一，水原勝由，譽田孝宏：砂・砂礫地盤のシールド掘進に伴う応力解放率と地盤変形について，第 35 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.2125-2126，2000。
- 7) 平田武弘：土圧式シールド掘削に伴う軟弱鋭敏粘土地盤の挙動と施工管理，土木学会論文集，第 355 号，IV-2，pp.114-123，1985。
- 8) 塩谷智弘：大阪ビジネスパーク駅とシールドトンネル(特に裏込め注入について)，現場技術者のための土質工学講習会-⑦地中構造物-，(社)地盤工学会関西支部，pp.63-77，1997。