

現場計測結果を利用した シールド掘進管理方針の検討

Evaluation of Control Policy for Shield Excavation based on Monitoring Information

中野道夫¹, 久ノ坪宏司², 長屋淳一³, 譽田孝宏³, 菅茜椽³

Michio Nakano, Hiroshi Kunotsubo, Junichi Nagaya, Takahiro Konda and Simon Kan

¹正会員 中之島高速鉄道株式会社(〒540-6591 大阪府大阪市中央区大手町1-7-31)

²正会員 京阪電気鉄道株式会社 中之島新線建設室(〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手町1-7-24)

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)

E-mail : kan@geor.or.jp

In the construction of Nakanoshima Line, there were eight tunnel sections that were extremely close to some important existing structures. Therefore, experimental measurements were conducted in the initial excavation stage. The main excavation was carried out based on field monitoring data and construction information such as the pressure on cutting face and the back-grouting pressure. These constructions finished safely with the controlled small ground deformation. In this paper, each observation results were got together uniformly, and the evaluation of reasonable control policy for shield excavation was carried out based on some monitoring information.

Key Words : *shield excavation, neighboring construction, construction control, ground deformation, soft and stiff ground*

1. はじめに

中之島線整備事業は、大阪の都心部である中之島地区の再開発進展に伴って発生する交通需要増加への対応と、東西方向の交通軸整備によるネットワーク充実のため、中之島西部の玉江橋付近から京阪本線天満橋駅に至る2.9kmの間に全線地下式で新線を建設するものである。

中之島線建設工事では、4つの駅部で開削工法を、中間部でシールド工法を採用し、天満橋駅で京阪電鉄京阪本線に接続する。このうちシールド工事については、既設構造物や地下埋設物に近接施工する機会が多いことから、シールド掘進に伴う周辺環境への影響について十分配慮する必要がある。よって本工事では、各シールド工事の初期掘進段階において、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地盤変形挙動を掘進管理データも含めて的確に把握し、適切な掘進管理方法を設定した上で本掘進をおこなった。

ここでは、全工区のトライアル計測結果を統一的に整理し、現場計測結果に基づいて適切なシールド掘進管理方針を検討したので、その結果について報告する。

2. 全体工事概要¹⁾

中之島線の路線概要図を図-1 上段に示す。既存の大阪市営地下鉄 3 路線(四つ橋線, 御堂筋線, 堺筋線)の直下を直交下越し横断するため、中之島駅以外の駅は深く、最深部のなにわ橋駅では約 GL-30m の掘削深さになっている。また、土佐堀川横過部付近では、河床からの離隔を確保するため、同区間で40%の最急勾配としている。

シールド工事では、中之島、渡辺橋、大江橋の各駅部から東行シールドを先行発進させて単線トンネルを構築し、隣駅でUターン後、後行シールドを再発進してトンネルを築造した。なお、なにわ橋駅~京阪本線切替部間では、天満橋側で土被り厚が薄く、施工延長や工程を検討した結果、なにわ橋駅から2機の東行シールドを並列発進させた。シールド工事全工区において、泥土圧式シールド工法(シールド掘削外径: φ6 850mm またはφ6 950mm, トンネル内径: φ6 200mm またはφ6 300mm)を採用し、セグメントには地盤条件などに応じて RC セグメントあるいはDCセグメント(セグメント幅:1 200mm, セグメント桁高: 250mm(RCは300mm))を使用した。

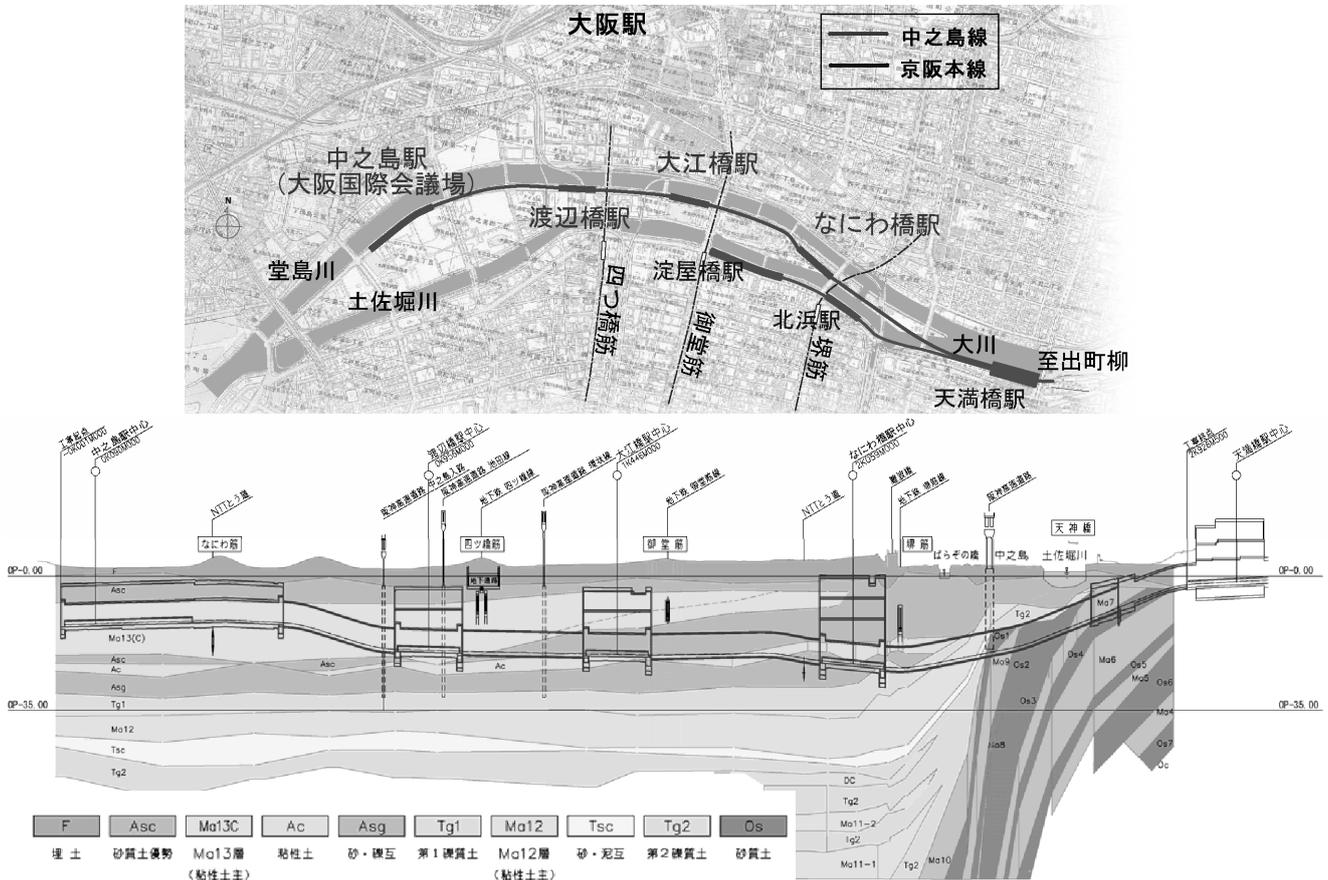


図-1 中之島線の路線概要図および土質縦断面図¹⁾

中之島線沿いの地盤概要を図-1 下段に示す。中之島駅部からなにわ橋駅部については、OP-35m 付近に海成粘土層(Ma12 層、粘着力 $c = 160 \sim 250 \text{kPa}$)が存在しており、その上に第1 天満層である洪積礫質土層(Tg1 層、N 値 60 以上)、沖積砂礫層(Asg 層、N 値 = 15 ~ 28)、薄い沖積粘土層(Ac 層、 $c = 120 \sim 180 \text{kPa}$)、軟弱な海成粘土層(Ma13 層、 $c = 25 \sim 110 \text{kPa}$)の順に各土層がほぼ水平方向に堆積している。特に、Ma13 層は中之島駅から渡辺橋駅間で 13 ~ 15m と厚く分布しているのに対して、東側に向かって徐々に薄くなり、なにわ橋駅で消滅している。なお、なにわ橋駅部から天満橋駅部については、上町台地の西側を平行に南北方向に延びる上町断層が横断しており、付近は断層による撓曲構造の一部と考えられる複雑な地盤構成を呈している¹⁾。

3. シールド掘進に伴う鉛直方向の地盤変形挙動の分析

中之島線建設工事では、軟弱な沖積粘性土地盤からやや密詰め沖積砂質土地盤など、幅広い特性を有した地盤をシールド掘進している。また、近接施工としては、大阪市営地下鉄構造物直下を狭い間隔で直交掘進するケース、阪神高速道路高架橋ピア側部を近接して掘進するケース、堂島川や付随した護岸に並列掘進するケースが

あり、大部分のシールド工事において近接施工が余儀なくされることから、厳格な掘進管理が必要であった。

厳しい施工条件を満足する最適な掘進管理方法を確立するため、基本思想に基づいた掘進管理方針を施工前に設定し、初期掘進段階におけるトライアル計測結果からその検証をおこない、最適な掘進管理方法の設定をおこなった上で各近接施工を実施した。なお、近接構造物に対する管理値については、各管理機関から提供された値に基づいて設定した。例えば、大阪市営地下鉄構造物については、列車走行上の安全性を確保するため、相対変位角 $\pm 1.4 \times 10^{-3} \text{rad}$ 、10m 弦中央部で $\pm 7 \text{mm}$ を管理限界値とした。また、これら各工区の情報を互いに共有化する「中之島線建設工事情報統合システム」を利用することによって、有益な情報を速やかに把握し、後行シールドの掘進管理に活用した。

ここでは、トライアル計測において着目した以下の項目を中心に詳細な分析結果を示す。

- ①切羽通過前の地盤変形挙動と切羽土圧管理の関係
- ②シールド掘進中およびセグメント組立中(マシン停止中)における地盤変形量の差異に注目したマシン通過中の挙動管理に関する整理
- ③テール通過前後の地盤変形挙動と裏込め注入管理の関係
- ④主たる掘進対象土層が軟弱な沖積粘性土地盤(Ma13 層)である現場における後続沈下挙動の整理

(1) 切羽通過前の挙動分析

切羽通過前の地盤内鉛直変位(先行沈下/先行隆起)を極力制御するためには、厳格な切羽土圧管理が必要である。ここでは、切羽土圧管理に関する基本思想を以下に示し、近接施工区間を掘進する前に実施したトライアル計測の結果から、最適な切羽土圧管理に関する検討をおこなった。

- 1) 切羽土圧管理は、シールド中央高さの土圧計(左右のどちらかで対応)で実施する。
- 2) チャンバー内の土圧分布については、中央制御室にてその分布状況(主として直線性)をリアルタイム表示させて、常時確認をおこなう。
- 3) トライアル計測断面における切羽土圧については、以下を基本にして設定した。
 - ① 上限値：静止土圧+水圧+予備圧(20kPa)
 - ② 中央値：上限値～下限値の平均値
 - ③ 下限値：主働土圧+水圧+予備圧(20kPa)

切羽通過前の挙動分析事例として、トライアル計測を実施した3B'断面と3B断面での最適な切羽土圧管理設定の検討内容について示す。

対象となるトライアル計測断面は、渡辺橋発進立坑から大阪市営地下鉄四つ橋線直下を下越しするまでの区間に位置しており、軟弱な沖積粘土層Ma13(N 値=3~5, 粘着力 $c=72\sim111$ kPa, 液性指数 $I_L=0.65\sim0.8$)が主たる掘進土層である。3B断面における計測器配置を図-2に示す。

3B'断面では、「切羽土圧管理値=主働土圧+水圧+予備圧(20kPa)=210kPa」(管理幅： ± 20 kPa)とし、基本思想での「③下限値」を設定した。なお、加泥材について

は、「浸透材(0.2%濃度)+分散材(0.4%濃度)+水」で構成しており、添加率は15%であった。3B'断面におけるトンネル直上地盤の鉛直変位量に関する経リング図を図-3に示す。図には、切羽土圧データも示しているが、平均実績切羽土圧210kPaは、切羽土圧管理値に相当している。なお、3B'断面における先行沈下量は、約9.7mmであった。

次に3B断面では、3B'断面よりも高めの切羽土圧として、「②中央値」である「切羽土圧管理値=(主働土圧と静止土圧の平均値)+水圧+予備圧(20kPa)=250kPa」(管理幅： ± 20 kPa)を採用した。切羽土圧以外、加泥材他については3B'断面と同じ施工条件である。3B断面におけるトンネル直上地盤の鉛直変位量に関する経リング図も図3.2に示しているが、先行沈下量は約3.7mmであり、3B'断面よりも抑制された効果が得られた。なお、この際の実績切羽土圧は250kPaであり、切羽土圧管理値に相当している。

掘進対象土層が軟弱な沖積粘性土Ma13層であることから、極力地山を乱さず、また極力先行沈下量の抑制を最優先に考え、トライアル計測結果を踏まえた結果、「切羽土圧管理値=②中間値」が最も適切な切羽土圧管理値であると判断し、以降の掘進管理をおこなった。

なお、ここでは3B'断面と3B断面の結果しか例示していないが、その他トライアル断面においても同様の切羽土圧管理の検討を実施した上で、最適切羽土圧の設定をおこなった²⁾。その結果、今回の検討では対象掘削土層に違いがあるものの、すべてのシールド施工において、「切羽土圧管理値=②中間値」が最も適切であると判断し、以降の切羽土圧管理に反映させた。

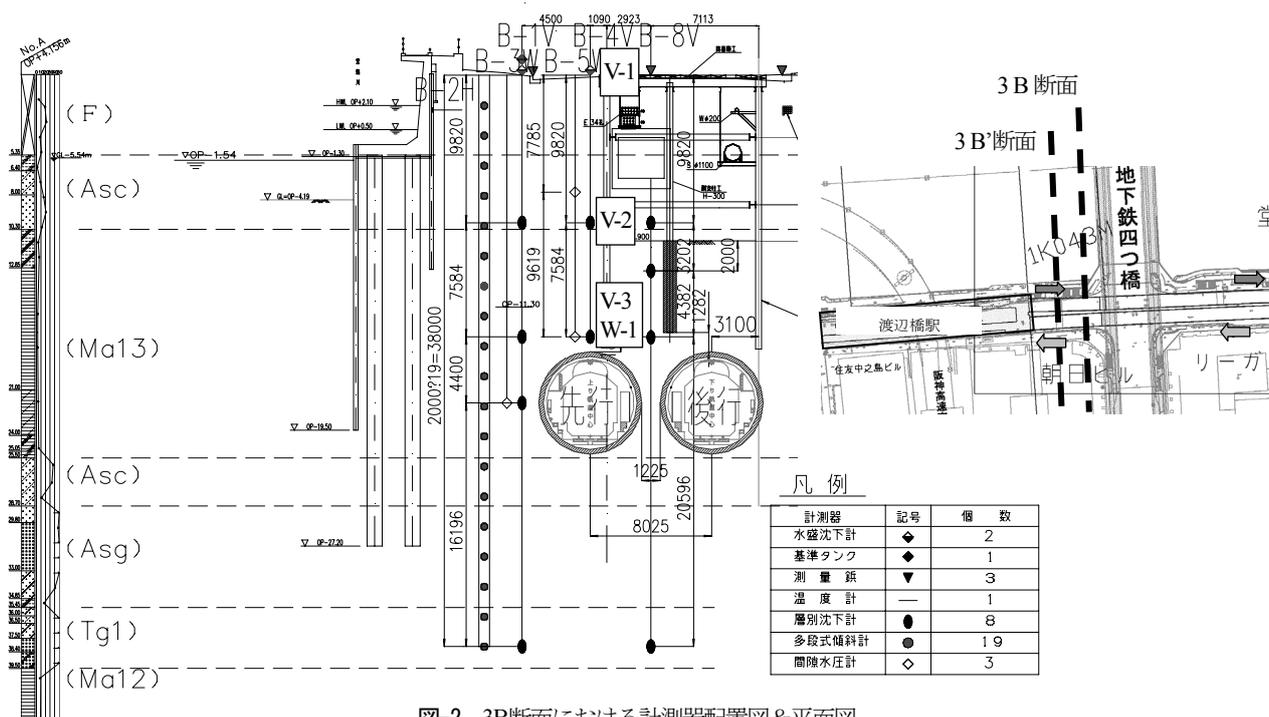


図-2 3B断面における計測器配置図&平面図

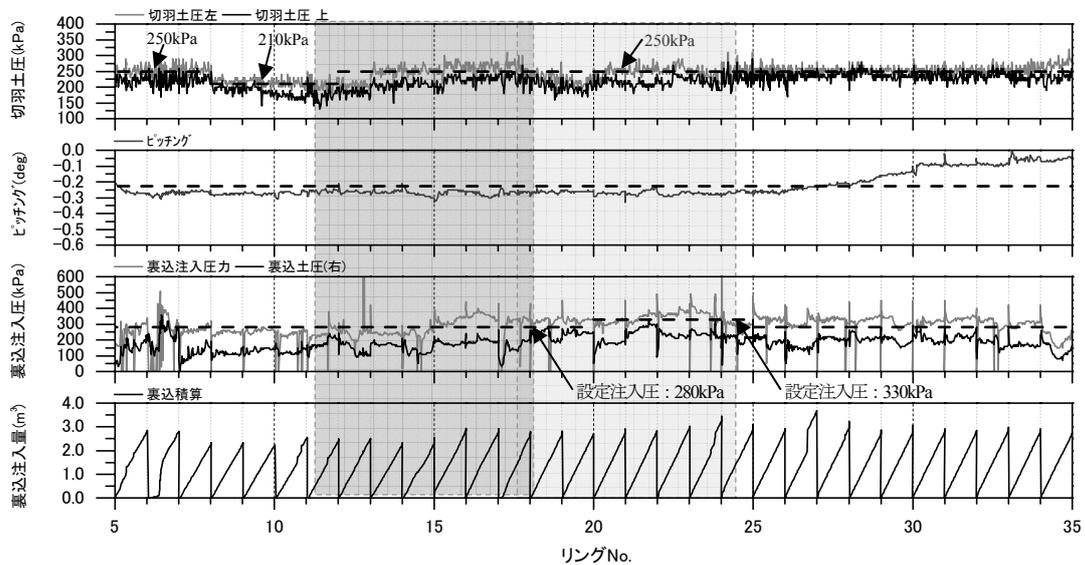
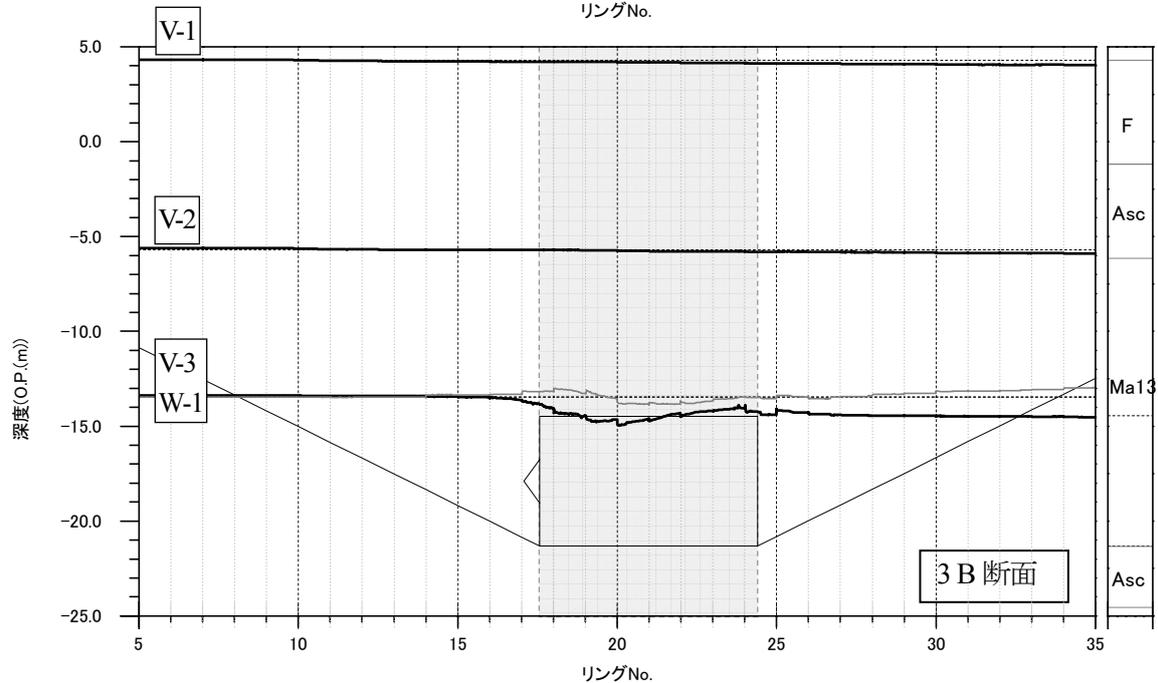
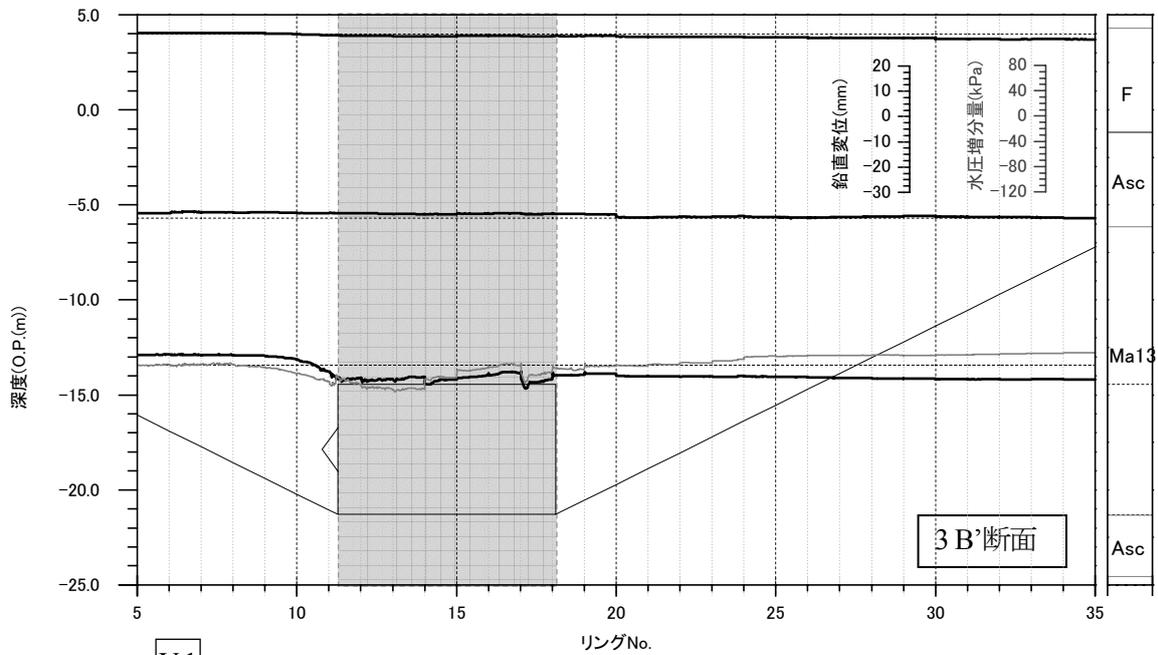


図-3 シールド掘進時における直上地盤の鉛直変位量に関する経リング図(3B'断面および3B断面)

(2) マシン通過中の挙動分析

各シールド区間の掘進開始当初において、セグメント組立中(マシン停止中)に切羽土圧が20~50kPa程度低下する現象が発生した。これは、セグメント組立時に引き抜くジャッキ本数が、最低限の本数になっていなかったことなどから、シールドがバックリングしたことが原因として考えられた。それに伴ってシールドの姿勢が変動し、連動してトンネル直上地盤の鉛直変位が沈下傾向を示した。特に、本工事では泥土圧式シールド工法を採用していることから、切羽で余掘りしたマシン~周辺地盤間の空隙に対して、周辺地盤からの水や加泥材の一部、切羽部での掘削土(削りカス)が入り込む程度で、上載荷重を支持する機構はないのが実状である。よって、セグメント組立中は、マシン姿勢の変動に連動した地盤変形が特に発生しやすい環境下にあると言える。

今回、掘削初期段階から表-1に示すような適切な対応を講じたため、以降の掘削時においてセグメント組立時における切羽土圧の低下幅は小さくなり、切羽土圧が下限値を下回ることにはなくなった。ただし、どうしても避けられない切羽土圧変動やマシン姿勢変動はあるため、セグメント組立時の沈下はわずかに発生した。

切羽通過1D前~テール通過後1D後におけるシールド掘進中とセグメント組立中の累積鉛直変位量について、代表的なトライアル計測断面として3B断面(主たる掘削

土層：軟弱な沖積粘性土層)と4C断面(主たる掘削土層：沖積砂層, N 値=15~45程度)での比較を図-4に示す。シールド掘進中については、3B断面では沈下傾向から隆起傾向に転じたり、4C断面でほとんど変化がなかったりするなど、種々の変動が発生している。一方、セグメント組立中についてはほぼ線形的に、また一貫して沈下傾向にあるのが特徴的である。このようにセグメント組立中の沈下はゼロにはなっていないものの、表-1に示す沈下抑制効果を今回の工事中で明らかにすることができた。

(3) テール通過前後の挙動分析

テール通過前後に発生するテールボイド沈下(または隆起)を極力制御するためには、適切な裏込め注入管理が必要である。本工事では、全工区においてシールドテール部においてマシンからの同時裏込め注入方式を採用しており、エア一系の2液可塑性材料を用いた。

ここでは、以下に示す裏込め注入管理に関する基本思想に基づいて、近接施工区間の掘進前に実施したトライアル計測の結果から、地盤変形とシールド掘進データの相関性を分析し、最適な裏込め注入圧(設定上限値)の設定に関して検討をおこなった。

1) 裏込め注入時において、裏込め注入圧管理を主眼におき、裏込め注入率を確認する。

表-1 切羽土圧の低下に対する対応

セグメント組立時の操作	①	セグメント組立時において、ジャッキを必要以上に引き抜かないように、最適なジャッキパターンを事前に検討し、その工程を厳守して作業を進めた。
	②	ジャッキ操作を複数本同時におこなうのではなく、1本ずつ操作することにした。
	③	セグメント組立モード時に入る前にジャッキ圧を若干上昇させた。
	④	掘進モードからセグメント組立モードへ切り替える前に、一度全ジャッキをセグメントに押し当てる操作をおこなない、ジャッキ圧の確認をおこなった。
	⑤	セグメントを挿入して再度押し当てる際には、ジャッキモータが2~3秒程度唸るまで押し当てる操作をおこなった。
切羽土圧	⑥	切羽土圧が設定土圧の下限値以下にならないように、加泥材を速やかに自動注入できるよう、加泥材注入開始時の切羽土圧を下限値より高めに設定した。
	⑦	掘進終了時において、ジャッキ引き抜き時の切羽土圧低下を考慮して、土圧上限値よりも若干高い切羽土圧で終了するようにした。

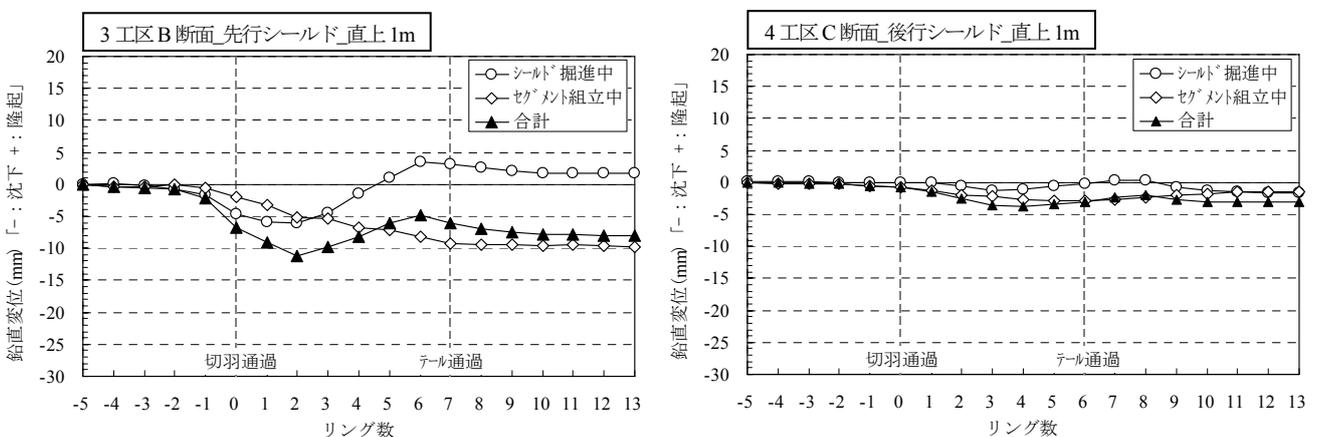


図-4 シールド掘進中とセグメント組立中(マシン停止中)の累積鉛直変位量

- 2) 裏込め注入圧に関しては、初期掘進段階において裏込め注入圧力(ポンプ圧)と裏込め注入土圧(吐出圧)の関係から圧力損失の程度を確認した。ここでは、すべて裏込め注入土圧(吐出圧)との関係で整理する。
- 3) 裏込め注入率は、オーバーカット分を考慮した掘削外径に着目して統一して整理する。なお、設定裏込め注入率については、掘削外径と掘進速度に基づいて、裏込め注入圧の変動を適切に制御できる値とした。

テール通過前後の挙動分析として、トライアル計測を実施した3B'断面と3B断面(軟弱粘性土卓越地盤)および4A断面(やや密詰めの沖積砂層卓越地盤)での最適な裏込め注入管理設定の検討結果事例を示す。

3B'断面における計測器配置は前述の図-2に、3B'断面および3B断面におけるトンネル直上地盤の鉛直変位量に関する経リング図も同じく前述の図-3に示している。

3B'断面では、「裏込め注入圧(設定上限値) = 全土被り圧 - 50kPa = 280kPa」と設定したが、実績裏込め注入圧は平均290kPa(最大310kPa)となり、ほぼ想定内の施工実績であった。なお、地下水圧は160kPa程度であった。一方、3B断面では3B'断面よりも少し高めに設定し、「裏込め注入圧(設定上限値) = 全土被り圧 = 330kPa」と設定した。実績裏込め注入圧については、平均300kPa(最大330kPa)であった。なお、裏込め注入圧に関する圧力損失は、裏込め注入圧力(ポンプ圧)の36%程度であった。

テール通過前後におけるトンネル直上地盤の鉛直変位については、地盤を持ち上げることなく両者とも若干の沈下傾向にある程度であった。これらトライアル計測の結果から、トンネル直上のMa13層への影響を極力抑制することを最優先に考え、また裏込め注入圧を高めに設定

すると注入しにくくなる傾向にあることも考慮し、地盤変形量がより小さい3B'断面の事例を参考にして、「裏込め注入圧(設定上限値) = 全土被り圧 - 50kPa(全土被り圧よりも若干小さめの注入圧、本計測断面では全土被り圧 × 85%程度)」が最も適切な裏込め注入圧管理値であると判断し、以降の掘進管理をおこなった。

4A断面における計測器配置を図-5に、トンネル直上地盤の鉛直変位量に関する経リング図を図-6に示す。対象となるトライアル計測断面は、なにわ橋発進立坑から大阪市営地下鉄御堂筋線直下を下越りするまでの区間に位置しており、やや密詰めの沖積砂層Asc層(N値=7~45)が主たる掘進土層である。

4A断面では、トンネル直上地盤が3B'断面のような軟弱粘土層ではなく、やや密詰めの砂層であったことから、ゆるみ土圧に基づいて裏込め注入圧の設定を検討した。つまり、「裏込め注入圧(設定上限値) = ゆるみ土圧 + 50kPa = 280kPa」と設定したが、実績裏込め注入圧は平均329kPa(最大360kPa)となり、設定以上の裏込め注入施工がなされた。なお、地下水圧は155kPa程度であった。テール通過前後におけるトンネル直上地盤の鉛直変位については、ほとんど変動がなかった。隣接したトライアル断面において、4A断面よりもさらに高めの裏込め注入圧で掘進管理をおこなったが、地盤変形量については4A断面の方がより小さい状態にあった。以上のことから、トンネル周辺地盤への影響度を極力抑制することを最優先に考え、「裏込め注入圧(設定上限値) = ゆるみ土圧 + 50kPa(ゆるみ土圧よりも若干高めの注入圧、本計測断面では全土被り圧 × 120%程度)」が最も適切な裏込め注入圧管理値であると判断し、以降の掘進管理をおこなった。

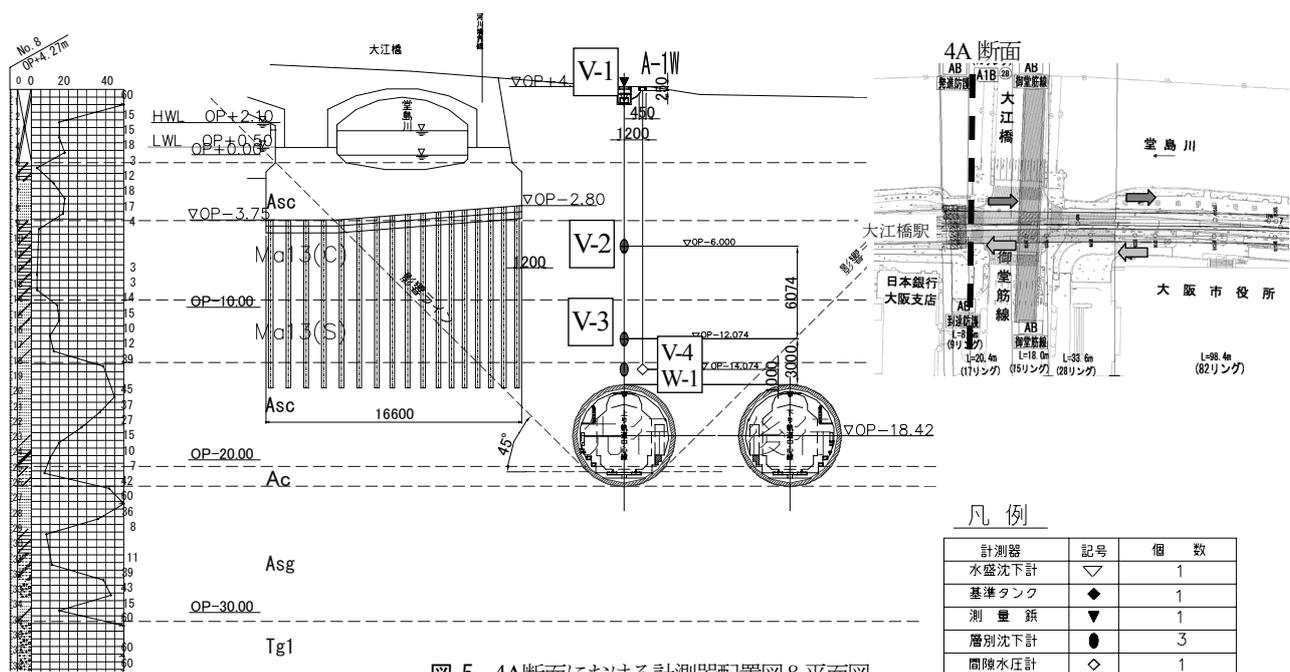


図-5 4A断面における計測器配置図&平面図

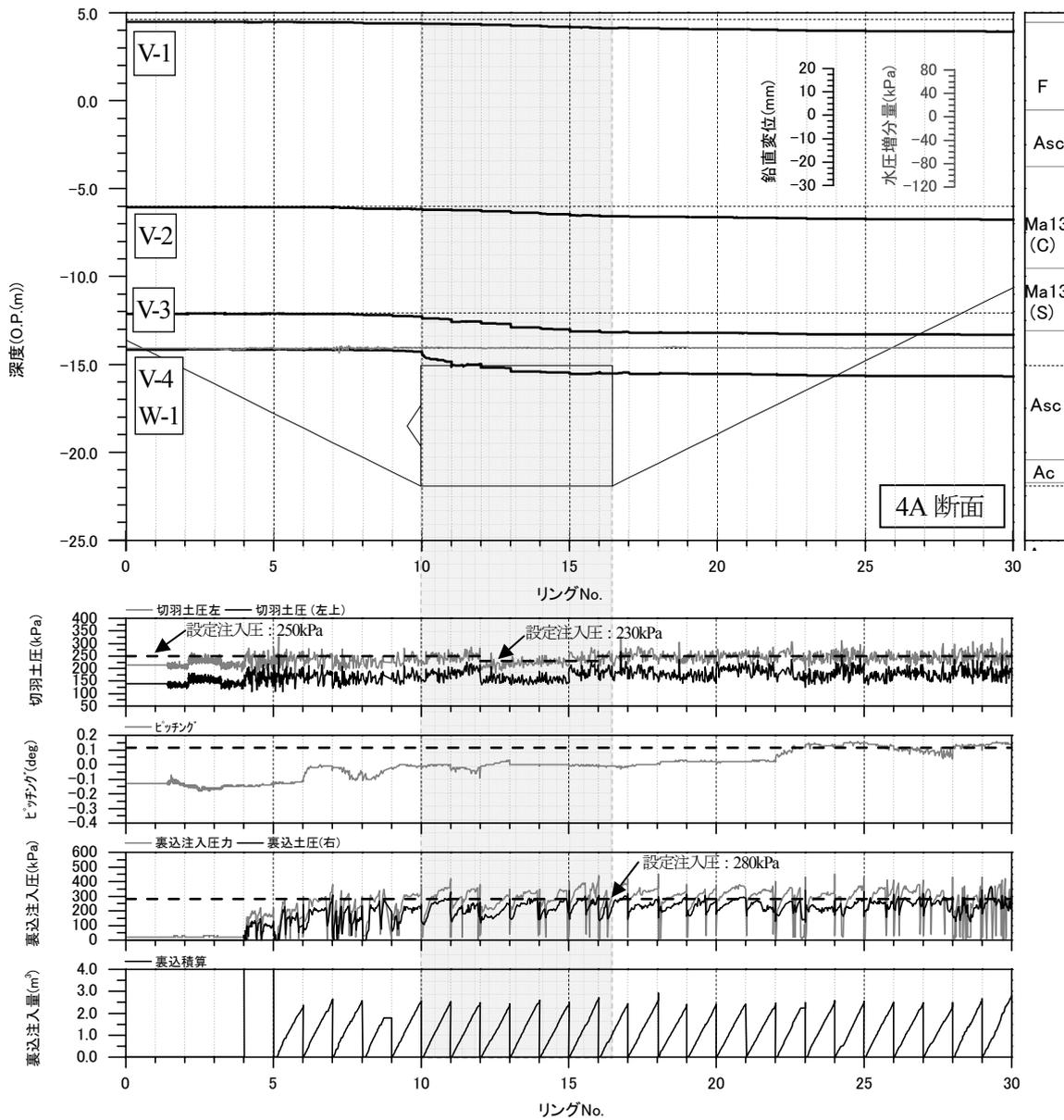


図-6 シールド掘進時における直上地盤の鉛直変位量に関する経リング図(4A断面)

ここでは、3B'断面および3B断面と4A断面の結果しか例示していないが、その他トライアル断面においても類似した裏込め注入管理の検討を実施した上で、最適裏込め注入圧の設定をおこなった²⁾。その結果、トンネル直上地盤が軟弱粘性土地盤である場合には「裏込め注入圧(設定上限値) = 全土被り圧 - 50kPa(全土被り圧よりも若干小さめの注入圧、3B'断面および3B断面では全土被り圧 × 85%程度)」が、やや密詰め砂層が卓越している場合には「裏込め注入圧(設定上限値) = ゆるみ土圧 + 50kPa(ゆるみ土圧よりも若干高めの注入圧、4A断面では全土被り圧 × 120%程度)」が最も適切であるという結果が、今回の検討結果から得られた。

(4) 施工段階ごとの挙動分析

今回のトライアル計測で得られたトンネル直上地盤の鉛直変位について、図-7に示されている各施工段階に分

類³⁾して整理をおこなった。各シールド施工段階におけるトンネル直上1m(6A~6C断面のみ3m)上部および地表面における鉛直変位量を表-2に示す。なお、シールド掘進に伴う影響のみを整理するため、図-7に示す第1段階で

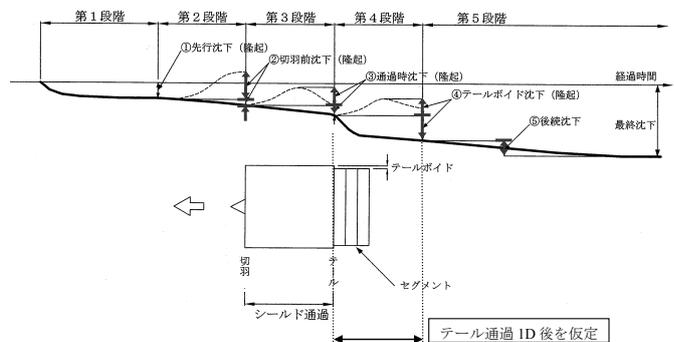


図-7 シールド掘進の各施工段階における地盤鉛直変位の分類³⁾に加筆

表-2 トンネル直上および地表面における鉛直変位量(上段：地表面，下段：トンネル直上)

	第2段階 ②切羽前	第3段階 ③通過時	第4段階 ④テールポイド	第5段階 ⑤後続沈下	最終 鉛直変位量
2D1	-2.5 (25%)	-1.9 (19%)	-1.5 (14%)	-4.3 (42%) (91日後)	-10.1
2D2	-2.6 (18%)	-5.2 (34%)	-2.2 (15%)	-5.0 (33%) (200日後)	-15.0
2D'	-2.3 (23%)	-1.8 (18%)	-1.6 (16%)	-4.3 (43%) (92日後)	-10.0
2F1	-1.0 (15%)	-1.4 (21%)	-1.3 (18%)	-3.2 (46%) (26日後)	-6.8
2F2	-1.8 (9%)	-2.6 (13%)	-2.7 (14%)	-12.3 (64%) (228日後)	-19.3
3B'	-1.4 (15%)	-0.2 (2%)	-0.4 (4%)	-7.1 (79%) (21日後)	-9.0
3B	-1.1 (21%)	-0.6 (10%)	-0.5 (9%)	-3.2 (60%) (20日後)	-5.3
3D1	-0.4 (16%)	-0.8 (31%)	-0.3 (9%)	-1.2 (44%) (57日後)	-2.7
3D2	-1.5 (32%)	-1.9 (40%)	-0.9 (18%)	-0.5 (10%) (121日後)	-4.7
4A	-0.7 (12%)	-2.1 (35%)	-0.6 (10%)	-2.6 (43%) (218日後)	-6.0
4B	-1.5 (34%)	-1.5 (34%)	-1.0 (23%)	-0.4 (9%) (215日後)	-4.4
4C1	-0.7 (19%)	-0.9 (24%)	-0.4 (11%)	-1.7 (46%) (64日後)	-3.7
4C2	-0.5 (8%)	-1.5 (24%)	-0.4 (7%)	-3.8 (61%) (167日後)	-6.2

計測位置 での土層	第2段階 ②切羽前	第3段階 ③通過時	第4段階 ④テールポイド	第5段階 ⑤後続沈下	最終 鉛直変位量
2D1 Asc	-2.5 (24%)	-2.1 (21%)	-1.2 (12%)	-4.4 (43%) (91日後)	-10.2
2D2 ~	-2.6 (16%)	-8.2 (51%)	-1.1 (7%)	-4.2 (26%) (200日後)	-16.1
2D' Ma13(c)	-2.5 (30%)	1.0 —	-2.2 (26%)	-4.7 (56%) (92日後)	-8.4
2F1 Ma13(c)	-4.8 (40%)	2.4 —	-7.2 (60%)	-2.3 (20%) (26日後)	-11.9
2F2 Ma13(c)	-1.8 (6%)	-0.3 (1%)	-14.0 (50%)	-11.9 (43%) (228日後)	-28.0
3B' Ma13(c)	-9.7 (72%)	1.3 —	-0.3 (2%)	-4.8 (36%) (21日後)	-13.5
3B Ma13(c)	-3.7 (29%)	-2.9 (23%)	-1.7 (13%)	-4.4 (35%) (20日後)	-12.7
3D1 Ma13(c)	0.3 —	-4.2 (79%)	-0.1 (2%)	-1.3 (25%) (57日後)	-5.3
3D2 Ma13(c)	-5.3 (41%)	-6.8 (52%)	-0.2 (1%)	-0.8 (6%) (121日後)	-13.1
4A Asc	-1.1 (9%)	-9.2 (75%)	-0.4 (3%)	-1.6 (13%) (218日後)	-12.3
4B Asc	-3.1 —	17.8 —	1.8 —	0.5 — (215日後)	17.0
4C1 Asc	-1.9 (41%)	-1.1 (24%)	0.0 —	-1.6 (35%) (64日後)	-4.6
4C2 Asc	-0.7 (9%)	-3.5 (47%)	-1.1 (15%)	-2.2 (29%) (167日後)	-7.5
6A1 Asc	-1.8 (32%)	-1.6 (28%)	-1.9 (32%)	-0.4 (8%) (20日後)	-5.7
6A2 Asc	-1.9 (24%)	-4.4 (56%)	-0.7 (9%)	-0.9 (11%) (134日後)	-7.9
6B1 Asc	-1.0 (16%)	-2.7 (46%)	-1.1 (18%)	-1.2 (20%) (20日後)	-6.0
6B2 Asc	-2.3 (33%)	-3.0 (41%)	-1.6 (23%)	-0.3 (4%) (131日後)	-7.2
6C1 Asc	-0.6 (10%)	-2.7 (42%)	-0.5 (7%)	-2.6 (41%) (16日後)	-6.4
6C2 Asc	-1.4 (29%)	-3.8 (80%)	-0.1 (2%)	0.5 — (131日後)	-4.8

*1：鉛直変位量(mm)，－；沈下，＋；隆起，例えば2D1；2D断面先行シールド，2D2；2D断面後行シールド

*2：第4段階と第5段階の境界については，シールド掘進に伴う沈下が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³⁾と考えられるテール通過ID(D：シールド外径)を採用した。

*3：第5段階のカッコ内については，テール通過ID後(D：掘削外径)からの日数を表示している。

*4：カッコ内に%表示しているのは，最終鉛直変位量に対する各施工段階の変位量の割合であり，40%以上をハッチングしている。

の鉛直変位量を除外し，第1段階と第2段階の境界を切羽前20リングに仮定して初期値設定をおこなった。

一覧表からもわかるように，トンネル直上での鉛直変位量は，おおよそ第3段階のマシン通過中に集中して発生している。これは，切羽通過前の挙動やテール通過前後の挙動を極力小さく抑制できたのに対して，マシン通過中の変動が逆に目立った結果と思われる。ただ，トンネル直上地盤が軟弱な粘性土である場合については，第5段階の後続沈下量も比較的大きな割合を有しているのが特徴的である。一方，地表面における鉛直変位量については，テール通過ID後に発生した沈下量が全体沈下量の大部分を占めている。これは，シールド掘削前後においては，トンネル周辺部のみの地盤変形に限定されていたのが，時間経過とともに地表面までその影響が伝播して拡大したものと考えられる。

各トライアル断面で得られたシールド掘進中およびセグメント組立中(マシン停止中)に発生した累積鉛直変位量(図-4に示した経リング図の積算量)の比較を図-8に示す。図からもわかるように，セグメント組立中の挙動については，掘削対象地盤の違いや施工条件によって鉛直変位量の大きさは異なるものの，一貫して沈下傾向にあった。また，軟弱な沖積粘性土層Ma13層をシールド掘進した場合の方が，沖積砂層Asc層を掘進した場合に比べて沈下量が大きく(4B1除く)，例えば，2D1(先行)と2D2(後行)を比較すればわかるが，後行シールド掘進時の地盤沈下が，先行シールド掘進時よりも大きくなる傾向にあった。これは，先行シールド掘進に伴ってトンネル周辺地盤がある程度乱されて剛性低下した後，さらに後行シールド掘進によって地盤の乱れが進行することによる影響が原因として考えられる。

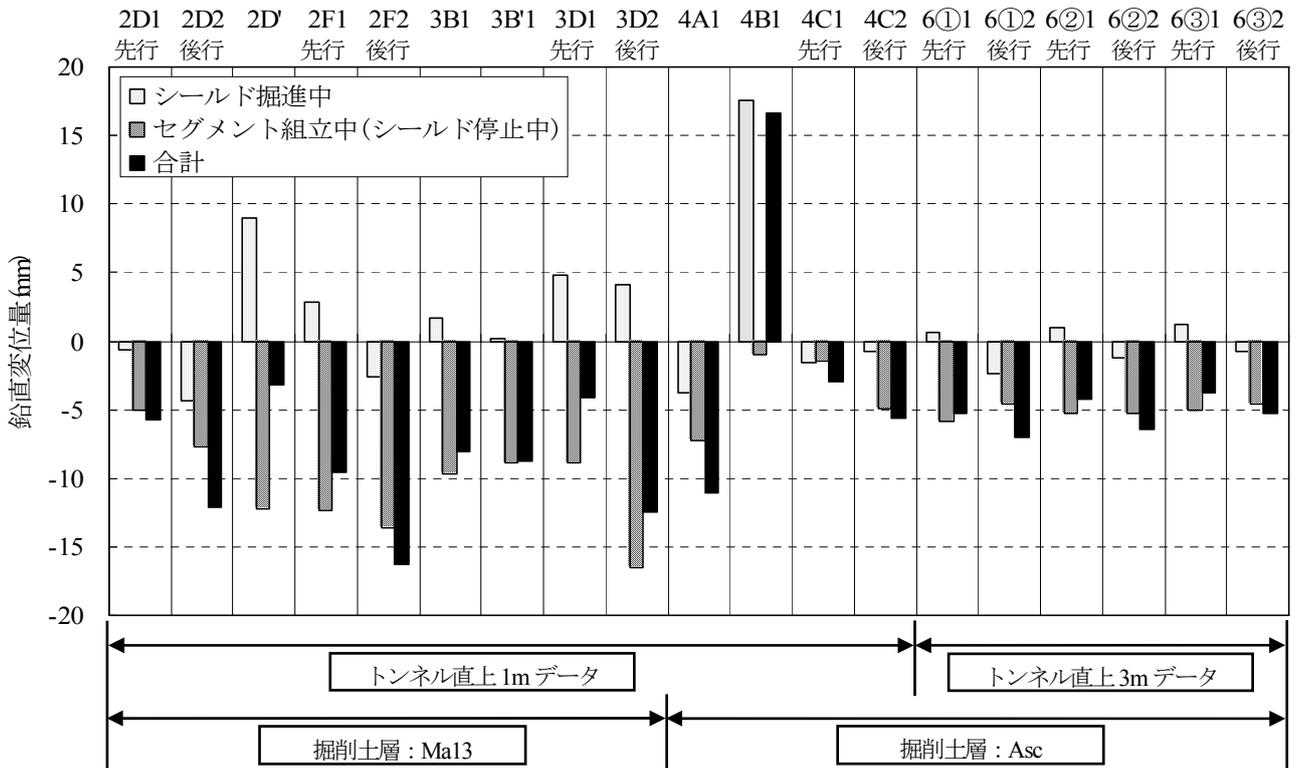


図-8 各トライアル断面でのシールド掘進中およびとセグメント組立中(マシン停止中)の累積鉛直変位量の比較図

(5) 後続沈下量の分析

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、トンネル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^{5), 6)}。今回の中之島線シールド工事においても、表-2に示すように、テール通過後から長期にわたって沈下が継続して発生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⁷⁾を参考にして、今回のトライアル計測結果を追加加筆することにより、考察をおこなう。

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-9に示す。横軸は、テール通過1D後までの最大鉛直変形量を、縦軸は、テール通過1D以降の鉛直変位量(後続沈下量)を示している。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。今回の中之島線の事例では、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、追加データは、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。以上の傾向は、大阪市地下鉄8号線シールド工事での実績⁸⁾と類似している。

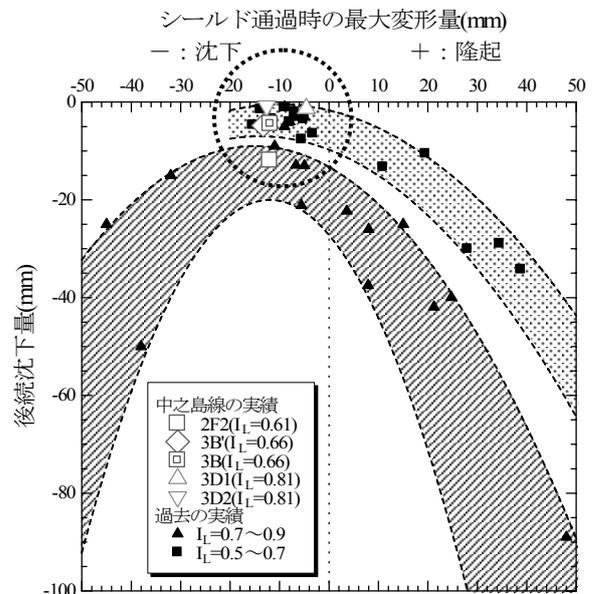


図-9 軟弱粘土地盤におけるシールド通過時の地盤変形挙動と後続沈下の関係^{7)に加筆}

4. おわりに

ここで得られた知見を以下に示す。

- 1) 切羽通過前の地盤内鉛直変位を極力制御するため、トライアル計測を実施し、適切な切羽土圧管理に関する検討をおこなった。その結果、今回の検討では対象掘削土層に違いによらず、すべてのシールド施工において、「切羽土圧管理値＝中間値」が最も適切であり、本施工での切羽土圧管理に反映させた。
- 2) 各シールド区間の掘進開始当初において、セグメント組立中(マシン停止中)に切羽土圧が低下し、それに連動してマシン姿勢が変動し、トンネル直上地盤において沈下が発生する傾向にあった。原因を想定し、適切な対応を講じたため、切羽土圧の低下幅は小さくなったが、どうしても避けられない土圧変動やマシン姿勢変動はあるため、セグメント組立時の沈下はゼロにはならず、わずかに沈下が発生した。
- 3) テール通過前後に発生するテールボイド変形を極力制御するため、トライアル計測を実施して適切な裏込め注入管理に関する検討をおこなった。その結果、今回の検討では、裏込め注入圧(設定上限値)について、トンネル直上地盤が軟弱粘性土地盤である場合には、全土被り圧よりも若干小さめの裏込め注入圧(今回の検討断面では全土被り圧×85%程度)が、やや密詰め砂層が卓越している場合にはゆるみ土圧よりも若干高めの裏込め注入圧(今回の検討断面では全土被り圧×120%程度)が最も適切であるという結果が得られ、本施工での裏込め注入圧管理に反映させた。
- 4) 各施工段階におけるトンネル鉛直変位量については、切羽通過前の挙動やテール通過前後の挙動を極力小さく抑制したことから、マシン通過中の変形が目立つ傾向にあった。ただし、トンネル直上地盤が軟弱粘性土である場合については、後続沈下量も比較的大きな割合を有している。
- 5) 各トライアル断面で得られたセグメント組立中の挙動については、掘削対象地盤の違いや施工条件によって大きさは異なるものの、一貫して沈下傾向にあった。また、後行シールド掘進時の地盤沈下が、先行シールド掘進時よりも大きくなる傾向にあったが、これは、先行シールド掘進に伴ってトンネル周辺地盤がある程度乱されて剛性低下した後、さらに後行シールド掘進によって地盤の乱れが進行することによる影響が原因として考えられる。
- 6) これまでの事例では、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、中之島線の事例では、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。

今回の中の島線建設工事では、上記の通り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、最適なシールド掘進管理方針を決定した上で本掘進をおこなった結果、周辺地盤および構造物への影響を極力抑制して種々の管理値内で無事施工することができた。

今回の検討結果から、貴重な現場計測結果と掘進管理データを十分に活用することによって、適切なシールド掘進管理方針を決定できることを説明できたのは、有益であった。今後、これら貴重なデータを逸散させることなくデータベース化して蓄積することはもちろん、検討方法の事例集として活用されることが望まれる。

参考文献

- 1) 長瀧元紀，泉谷透：中之島新線建設工事の概要，トンネルと地下，Vol.36，No.4，No.4，pp.41-48，2005。
- 2) たとえば，中野道夫，久ノ坪宏司，難波正和，堀内民夫，譽田孝宏，長屋淳一：圧力式沈下計を用いたシールド掘進管理用のトライアル計測事例，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集VI，6-024，pp.47-48，2008。
- 3) トンネル標準示方書[シールド工法]・同解説：(社)土木学会，pp.187，2006。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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.
- 8) 太田拓，吉田博，長屋淳一，譽田孝宏，管茜椽：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，トンネル工学報告集第17巻，II-10，pp.299-306，2007。