

民地下の互層地盤を施工する 大断面併設シールドトンネルの掘進管理

高瀬隼人¹・高橋博威²・落合栄司³・松原健太⁴・林成卓⁵

¹正会員 首都高速道路（株） 神奈川建設局横浜工事事務所（〒222-0033 横浜市港北区新横浜3-20-8）

E-mail: h.takase118@shutoko.jp

²正会員 首都高速道路（株） 東京建設局改築推進グループ（〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-3）

E-mail: h.takahashi1182@shutoko.jp

³正会員 首都高速道路（株） 神奈川建設局設計グループ（〒221-0013 横浜市神奈川区新子安1-2-4）

E-mail: e.ochiai45@shutoko.jp

⁴正会員 大林・奥村・西武 横浜環状北線シールドトンネル特定建設工事共同企業体
（〒223-0059 横浜市港北区北新横浜2-7-3）

E-mail: matsubara.kenta@obayashi.co.jp

⁵正会員 大林・奥村・西武 横浜環状北線シールドトンネル特定建設工事共同企業体
（〒223-0059 横浜市港北区北新横浜2-7-3）

E-mail: hayashi.masataka@obayashi.co.jp

本工事は、延長約5.5kmの大断面併設トンネルを2台の泥土圧シールド機（外径φ12.49m）によって構築するものである。本シールドはほぼ全線にわたって民地の下を掘進し、また鉄道等の重要構造物にも近接して施工する。泥岩、被圧された砂層、軟弱な沖積層など多岐にわたる地盤の互層となっており、これらの施工条件に対して適切な掘進管理を行い、地表面や近接構造物への影響を抑制する必要がある。また、シールド相互の影響に配慮し、トンネルの健全性を確保しなければならない。

本稿では、地表面及び近接構造物への影響を抑制するための掘進管理手法について述べ、実施したトリアル計測の計測結果と近接構造物の変位計測結果について報告する。また、併設トンネルの影響を確認するために実施したセグメントの応力状態の変化を計測した結果について報告する。

Key Words : large cross section twin tunnels, EPB method, tunnelling nearby adjacent structures

1. 工事概要

現在、首都高速道路株式会社が整備を進めている横浜環状北線（以下、北線）は、横浜市の交通ネットワークの骨格を形成する横浜環状道路の北側区間であり、第三京浜道路「港北インターチェンジ」と首都高横羽線「生麦ジャンクション」をつなぐ延長約8.2kmの自動車専用道路である（図-1参照）。北線では、家屋の移転を少なくし、周辺環境を保全するために、全体の約7割をトンネル構造としている。北線のうち、横浜環状北線シールドトンネル工事では、新横浜発進立坑を起点に子安台換気所を終点とする延長約5.5kmの大断面併設トンネルを2台の泥土圧シールド機（外径φ12.49m）によって構築するものである。工事概要を表-1に、トンネル標準断面図を図-2に示す。

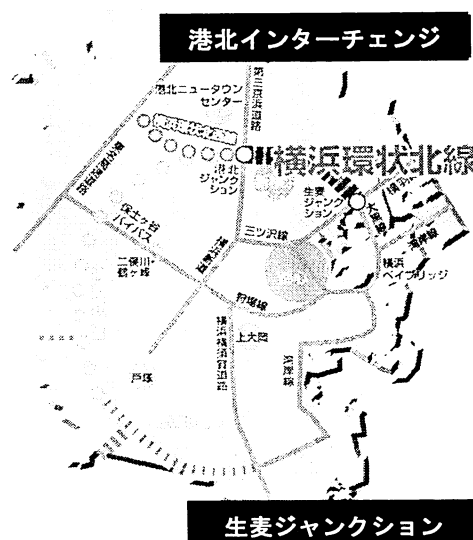


図-1 横浜環状北線の概要

表-1 工事概要

工事名		横浜環状北線シールドトンネル工事	
工事場所		神奈川県横浜市港北区新羽町から神奈川区子安台一丁目まで	
施工者		大林・奥村・西武 特定建設工事共同企業体	
シールド延長		(外回り) 5,517m (内回り) 5,513m	
シールド	外径	12,490mm	
	工法	泥土圧シールド (気泡シールド)	
セグメント外径		12,300mm	
RCセグメント	幅/桁高	2,000mm / 400mm	
	種類	耐火型 SFRCセグメント (ワンパスセグメント2)	
鋼製セグメント	幅/桁高	2,000, 1,500, 1,200, 1,000mm / 400mm	
床版	構造	プレキャスト PC 構造	
	幅	2,000mm	
	長さ/厚さ	8,150mm / 330mm	
	施工方法	シールド掘進と同時施工	

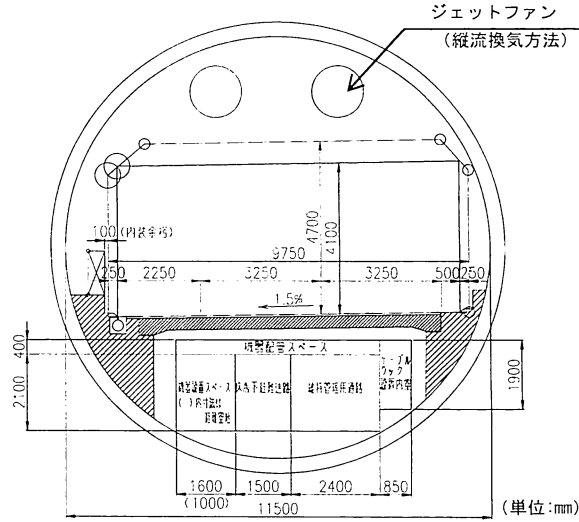


図-2 トンネル標準断面図

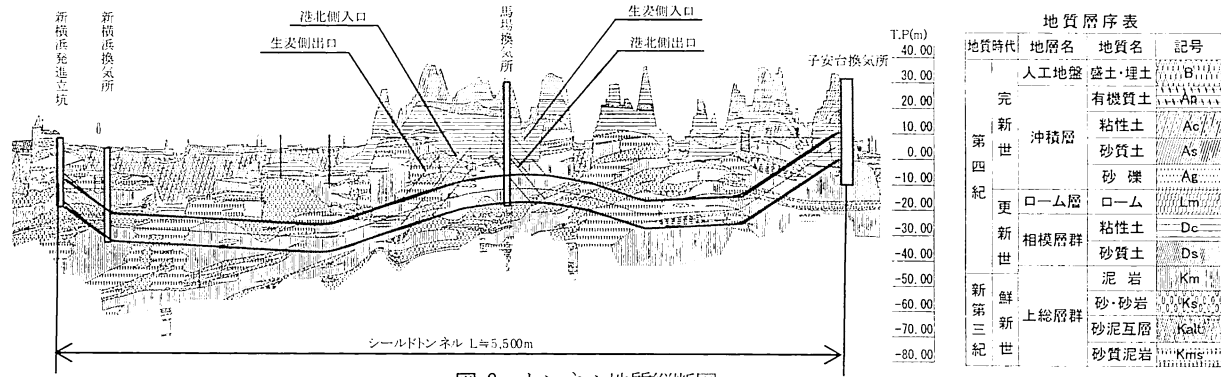


図-3 トンネル地質縦断面図

シールドトンネルの土被りは11m～57mで（図-3参照），併設トンネルの離隔は3.0～7.6mである。

掘進土質は泥岩（Km），砂質泥岩（Kms），砂・砂岩（Ks）の互層で，Km及びKmsは一軸圧縮強度が1000kN/m²以上，Ks層はN値が50以上といずれも硬質地盤であるが，Ks層については，被圧（最大0.5MPa程度）されており，均等係数が小さく地下水の流出があると流砂現象がみられる。地表面付近にはN値0～3程度の軟弱な沖積層が堆積している箇所もあり，一部の区間についてはシールド頂部に出現する。

2. 本工事における課題

本シールドの特徴を以下に示す。

- ①ほぼ全線にわたって民地の下を掘進し，また鉄道等の重要構造物にも近接して施工
- ②2台の大断面泥土圧シールド機を並行して掘進
- ③掘進地盤は，泥岩，被圧された砂層，軟弱な沖積層など多岐にわたる地盤の互層

上記の特徴から本工事における課題は以下のとおりで

ある。

- ①互層地盤に対して適切な掘進管理を行い，地表面や近接構造物への影響を最小限に抑制すること
- ②シールド相互の影響に配慮し，トンネルの健全性を確保すること

次章より，これらの課題に対して実施した対策と施工結果について述べる。

3. 地表面及び近接構造物への影響を抑制するための対策

(1) 掘進管理計画

泥土圧シールド工法において掘進に伴う地盤変状を抑制するためには，土圧管理，排土量管理，裏込注入管理，掘削土の塑性流動化管理が重要である。

土圧管理については，大断面併設シールドであることを考慮し，地山の緩みを極力抑制するために，より綿密に行うことにした。シールド機のチャンバー内に土圧計を7箇所装備して切羽の土圧分布を把握し，いずれの位置でも管理土圧を下回らないように管理した。管理土圧

については、静止土圧＋水圧＋予備圧（0.03MPa）を基本として、掘進土層に応じて静止土圧係数を変更することとした。また、土圧の考え方については、シールド頂部に沖積層が出現する区間は全土被り圧、その他の区間については緩み土圧（最小土圧は1 D、D＝シールド外径）とした。

本工事では、掘削土砂の坑内運搬を連続ベルトコンベアで行った。排土量管理については、レーザースキャンでベルトコンベア上の掘削土砂の体積を、ベルトスケールでベルトコンベア上の掘削土砂の重量を連続的に計測し、計測値を統計処理して管理した。

裏込注入はセグメントからの同時注入で行い、注入量よりも注入圧を優先した管理を行った。注入圧の上限を「地下水圧＋0.15Mpa」として上限圧に達するまで注入を行うこととした。

泥土圧シールドにおいて切羽を安定させて掘進を行うためには、チャンバー内の掘削土砂を塑性流動状態に保つことが重要である。本工事では、首都高速中央環状新宿線中落合シールド工区で実績のある「土砂流動管理技術」¹⁾を導入することとした。本技術は、チャンバー内を三次元にモデル化して土砂流動解析を行い、チャンバー内に設置した検知装置「フラッパー」（図-4参照）により計測されたトルク値とチャンバー内土砂のずり速度と流速をシミュレーションすることにより、塑性流動状態を評価するものである（図-4参照）。これにより、掘削添加剤（気泡）の注入管理にフィードバックすることが可能となる。

(2) トライアル計測

本工事では、上記で定めた掘進管理計画の妥当性を検証するために、図-5、表-2に示すように層別沈下計と間隙水圧計を設置して、掘進による影響を計測した。層別沈下計による計測断面は、全線にわたって互層地盤であることを考慮し、主たる掘進土層とシールド頂部の土層に着目して5断面設定した。また、断面③については地下鉄交差部の手前に設け、近接施工時の掘進管理計画の検証を行った。

(3) 近接構造物対策

近接構造物に対しては、掘進による影響をFEM解析で予測するとともに、構造物の変位計測を行い掘進による影響を把握しながら施工することにした。

地下鉄との近接施工にあたっては、FEM解析により、先行シールドの通過後と後行シールドの通過後における地下鉄の鉛直変位を算定した。解析断面を図-6に示す。解析に用いた応力解放率は、洪積層地盤を掘進した大断面泥土圧シールドの施工実績²⁾を参考にして、 $\alpha = 10\%$ に設定した。

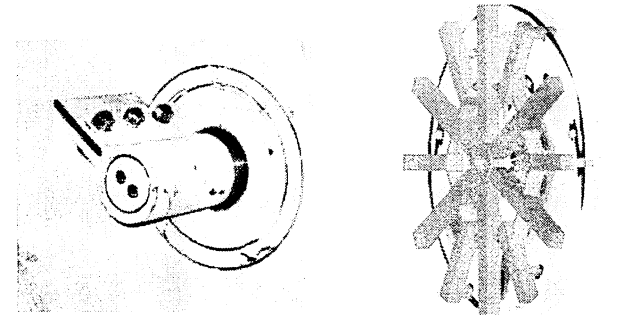


図-4 土砂流動管理技術

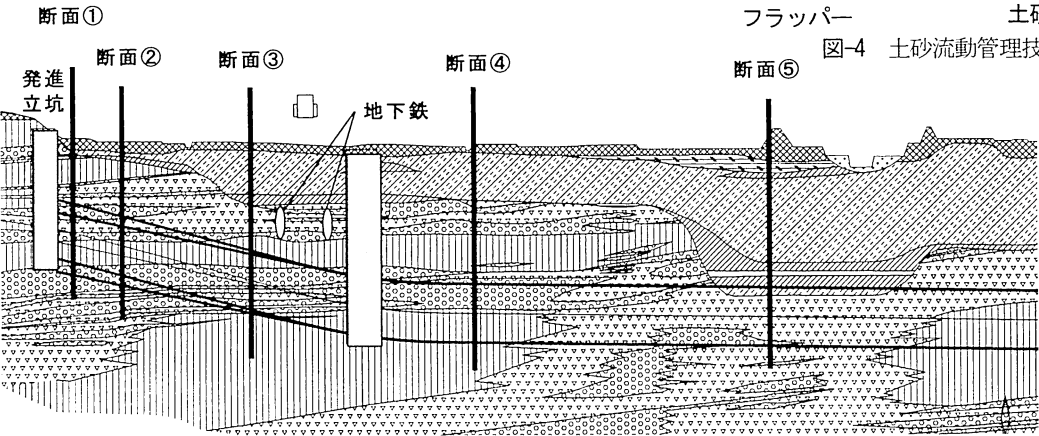


図-5 各種計測位置図

地質層序表			
地質時代	地層名	地質名	記号
完新世	人工地盤	盛土・埋土	B
	沖積層	有機質土	Ap
		粘性土	Ac
		砂質土	As
		砂 礫	Ag
	ローム層	ローム	Lm
	相模層群	粘性土	Dc
		砂質土	Ds
	上新世	泥 岩	Km
		砂・砂岩	Ks、O
第三紀	上総層群	砂泥互層	Kalt
	新 世	砂質泥岩	Kms

表-2 各種計測項目一覧表

計測位置	計測項目	計測方法	シールド頂部の土層	主たる掘進土層
断面①	地中変位	層別沈下計	先行シールド:Kms, 後行シールド:Ks	Km
断面②	地中変位	層別沈下計	先行シールド:Ks, 後行シールド:Kms	Km
断面③	地中変位	層別沈下計	Km	Ks
断面④	地中変位, 間隙水圧	層別沈下計, 間隙水圧計	Kms	Ks
断面⑤	地中変位, 間隙水圧	層別沈下計, 間隙水圧計	沖積層	Kms

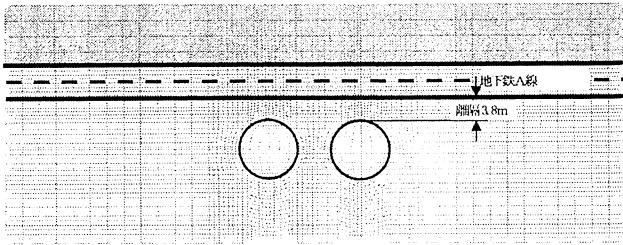


図-6 地下鉄近接部解析断面図

表-3 地下鉄近接部解析結果

STEP	施工内容	最大沈下量 (mm)	10m弦 相対沈下量 (mm)	許容値 ※	判定
STEP2	先行(外回り) シールド掘削	-2.1	-1.0	±7	OK
STEP3	先行(外回り) セグメント設置	-3.9	-2.6	±7	OK
STEP4	後行(内回り) シールド掘削	-4.3	-2.9	±7	OK
STEP5	後行(内回り) セグメント設置	-4.0	-2.6	±7	OK

※軌道整備基準値(静的)

解析結果を表-3に示す。両シールド通過後の地下鉄の変位は、沈下が先行の外回りシールド直上で4.0mm、後行の内回りシールド直上で3.9mmであった。また、10m弦の相対変位量は最大で2.6mmであった。これらの変位量は、許容値を下回る結果であったが、営業線の直下をシールドが掘進することを考慮して、図-7に示すように、地下鉄坑内に鉛直変位計を設置して自動計測を行い、掘進管理に反映させることにした。

(4) 施工結果

a) 掘進管理の実績

管理土圧の設定にあたっては、主たる掘進土層の変化に応じて静止土圧係数 K_0 を変更した。主たる掘進土層がKs層の場合は $K_0 = 1 - \sin \phi = 0.33$ (内部摩擦角 $\phi = 42^\circ$)とし、Km層の場合は $K_0 = 0.16$ とした。掘進土層の変化については、排土性状や排土量の変化等から判断した。断面⑤の区間については、主たる掘進土層はKmsであるが、沖積層がシールド頂部に出現しているため、沖積層を対象とした管理土圧に設定し、 $K_0 = 0.8$ とした。

裏込注入は、注入圧の上限を「地下水圧+0.15Mpa」として上限圧に達するまで注入を行い、目標注入量を「標準テールボイド量+ (オーバーカット量+コピーカッターによる余掘量) × 50%」として管理した。なお、50%とした理由は、本シールド機のカッターには外周リングを装備しているため、オーバーカッター及びコピーカッターによりほぐされた土砂が全てチャンバー内に取

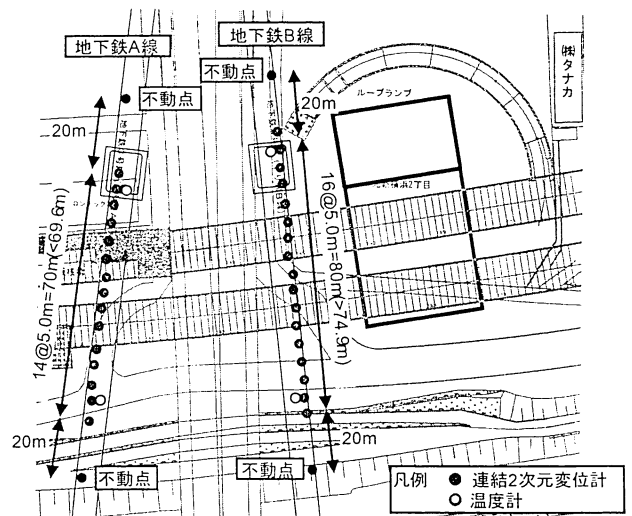


図-7 地下鉄計測概要図

り込まれるわけではないと考え、実績等を考慮して定めた。

b) トライアル計測結果

トライアル計測の結果を以下に示す。

- ・切羽通過前、シールド直上1mの素子では、いずれの断面も1~2mm程度の先行隆起
- ・切羽通過時、シールド直上1mの素子では、シールド頂部の土層がKs、Kmsの場合は2~4mm程度の沈下、Kmの場合は2mm程度の隆起。沖積層の場合は、両シールド間中央のシールド天端5mの素子で1mm程度の隆起
- ・裏込注入時、シールド直上1mの素子では、いずれの断面も0~3mm程度の隆起傾向
- ・間隙水圧は、切羽が近づくに伴って上昇傾向

以上より、先行隆起があったことから管理土圧は若干高めであったと考えられるが、掘進管理は適切と判断した。

c) 地下鉄変位の計測結果

トライアル計測断面③における地下鉄と同等位置の変位が小さかったことから、地下鉄交差部においても、計測断面③と同様の掘進管理を行った。地下鉄変位の解析結果と計測結果の比較を図-8に示す。両シールド通過後の最大変位量は、解析結果と同様に外回りシールド直上で発生したが、その値は0.9mmと解析結果の約1/4となった。相対変位量は解析値が2.6mmであったのに対し、計測値は0.8mmであった。この要因としては、①施工管理が良好であった、②掘進地盤が想定よりも良好であった、などが考えられる。

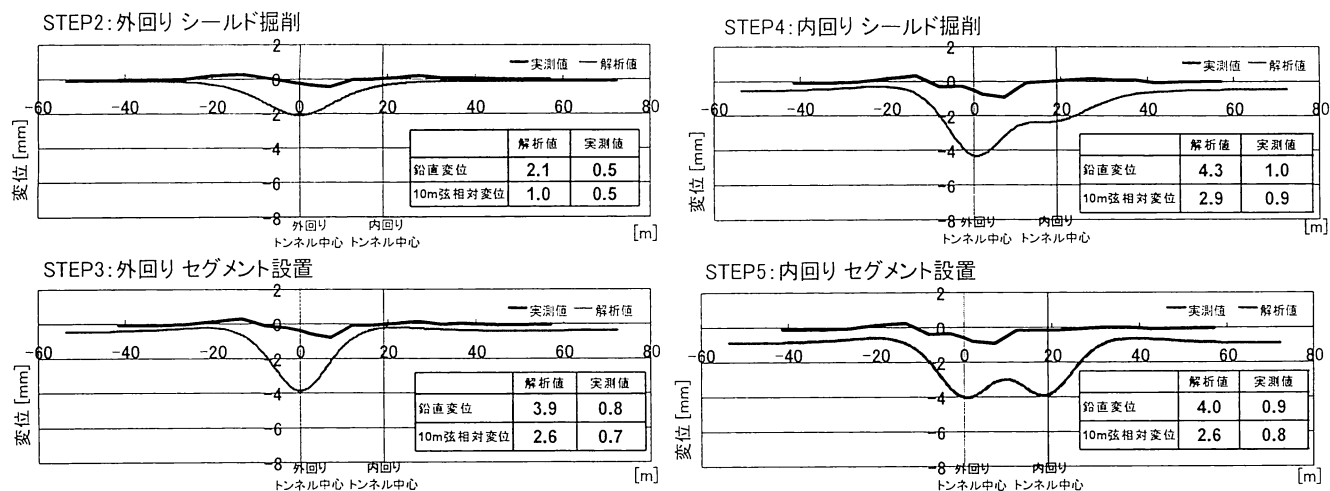


図-8 地下鉄鉛直変位計測結果とFEM解析値との比較

4. 併設トンネルの影響

(1) トンネル相互の干渉による長期的な影響への配慮

併設トンネルの場合、トンネル相互の干渉により土圧や地盤反力が単一トンネルとは異なったものになる可能性がある。本工事では、セグメントの設計において、併設トンネルの影響を考慮し、はりばねモデルによる単断面力に、FEM解析から求められる併設時の増分断面力を加算して設計断面力として、セグメント横断面の設計を行った。なお、FEM解析の応力解放率は、洪積層地盤を掘進した大断面泥土圧シールドの施工実績¹⁾を参考にして $\alpha = 10\%$ に設定した。

(2) 後行シールド通過時に生じる一時的な影響への配慮

後行シールド通過時に、先行トンネルには後行シールドの切羽圧や裏込注入の影響が生じると考えられる。しかし、これまで、本工事のように2台の大断面泥土圧シールド機を短期間のうちに並行して掘進した事例は少なく、また併設の影響を定量的に把握した事例も少ない。そこで本工事においては、シールド相互の影響

を定量的に評価するために、図-9に示すようにセグメントに鉄筋計を配置して併設シールドの施工に伴うセグメントの応力状態の変化を計測した。計測断面は、図-10に示すようにセグメントの設計土圧を緩み土圧としている断面（断面A）と全土被り圧としている断面（断面B）の2断面とした。なお、断面A、Bは、それぞれトライアル計測断面②、⑤と同様である。

(3) 施工結果

セグメント計測の結果を表-4に示す。セグメント組立後、ジャッキ推力、テールシールドの拘束、裏込注入による影響で鉄筋応力の変動が生じたが、最大発生応力は断

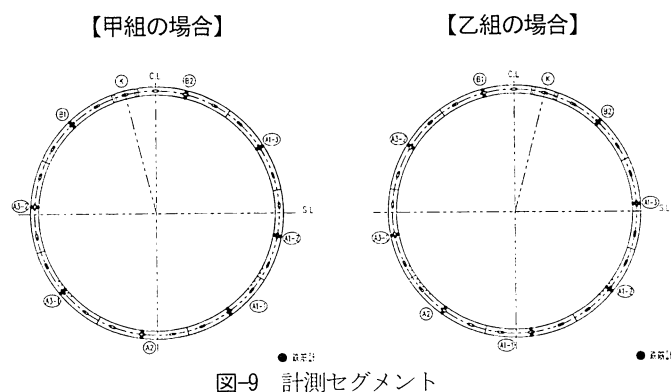


図-9 計測セグメント

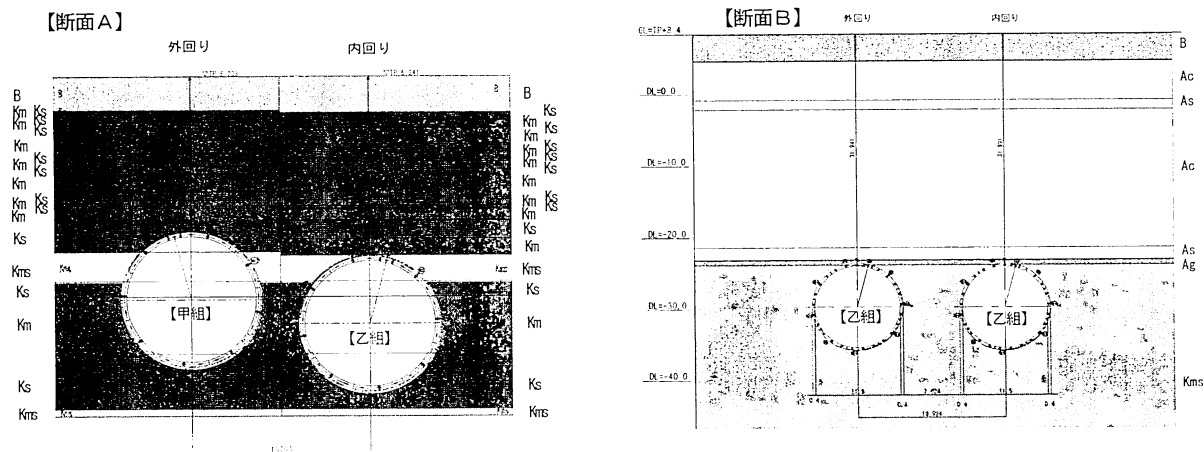


図-10 計測セグメント設置断面

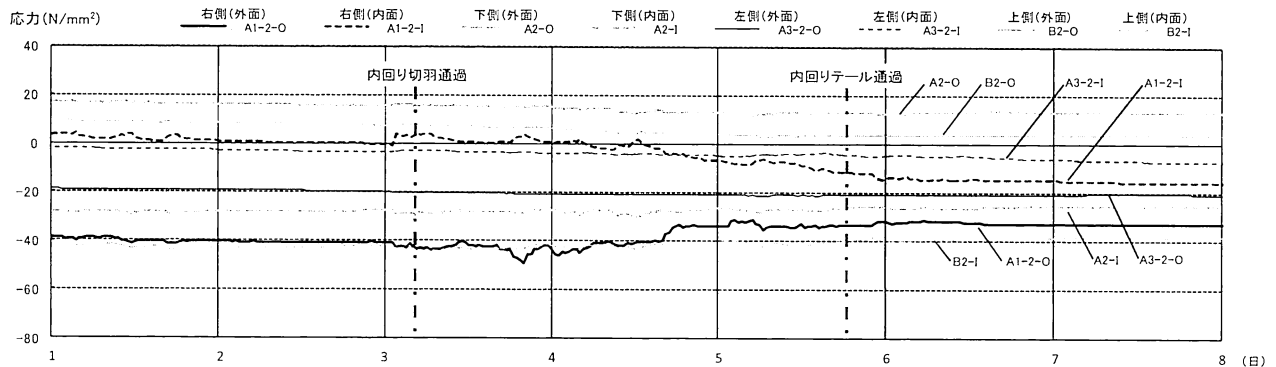
表-4 セグメント計測結果

	鉄筋最大応力	
	断面A	断面B
テール通過 裏込注入時	50N/mm ²	75N/mm ²
現在値	60N/mm ²	83N/mm ²
設計値	137N/mm ²	194N/mm ²

断面Aで50N/mm²、断面Bで75N/mm²と許容応力内であった。テール通過後に応力が増加する傾向が見られたが、その後安定している。鉄筋発生応力度は断面Aで60N/mm²、断面Bで83N/mm²であり、設計値（断面A：137N/mm²、断面B：194N/mm²）に比べて小さい値となった。設計値よりも計測値が小さい理由として、掘削により生じる緩み範囲が想定よりも少なかったことや、設計において考慮した上載荷重によって安全側の評価がなされているためと考えられる。

後行シールド通過時の先行トンネルのセグメント計測結果を図-11に示す。先行シールドと後行シールドの通過間隔は、断面Aでは1週間、断面Bでは2日程度であった。後行シールド通過に伴う鉄筋応力の変化は、設計上断面Aが4N/mm²、断面Bが21N/mm²と小さい値であり、計測値も、断面Aで10N/mm²程度、断面Bについてはほとんど発生しなかった。このことから、併設施工の影響は小さかったと考えられる。なお、断面Aは、発進から間もない位置にあり、シールドの進行が遅かったことが、僅かに応力変化が大きくなった一因と想定される。

【断面A】外回りセグメント鉄筋応力



【断面B】外回りセグメント鉄筋応力

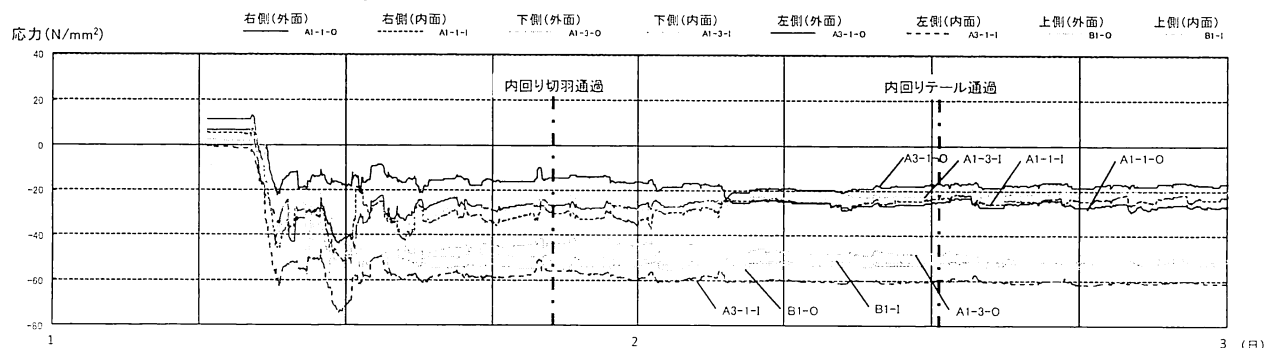


図-11 後行シールド通過時の計測セグメント測定結果（詳細）

5. おわりに

本稿では、地表面及び近接構造物への影響を抑制するための掘進管理手法について述べ、実施したトライアル計測の計測結果と近接構造物の変位計測結果について報告した。また、併設トンネルの影響を確認するために実施したセグメントの応力状態の変化を計測した結果について報告した。

地下鉄とは離隔3.8mの近接施工であったが、設定した掘進管理方法による地下鉄の最大沈下量は0.9mmであり、許容値を大きく下回った。

また、セグメント計測により、鉄筋の発生応力度は、併設を考慮して算定した設計値以下であり、併設トンネルの長期健全性について確認した。後行シールド通過に一時的な影響についても、当現場のように、硬質な地盤条件であればほとんど生じないことを定量的に確認した。本稿が、同様他工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 土橋浩，松田満，松原健太，山本影，近藤由也，日野義嗣，今田徹：泥土圧シールドにおけるチャンバー内の土砂流動管理技術の開発，土木学会論文集F，Vol.66，No.4，2010.6
- 2) 足立紀尚，小山幸則，加島豊，須賀武，高田正治，木村宏：土圧式シールド工法 その理論と応用

Construction of Mega Twin EPB Tunnels in Alternation of Strata Underneath a Residential Area

Hayato TAKASE, Hirotake TAKAHASHI, Eiji OCHIAI, Kenta MATSUBARA and
Masataka HAYASHI

This project builds approximately 5.5 km mega twin tunnels by two 12.49m diameter earth pressure balanced (hereafter EPM) tunnel boring machine (hereafter TBM). These tunnels are bored underneath a residential area for the entire stretch and also bored in the close proximity of sensitive structures such as operational railways. The ground condition is alteration of strata comprised of mudstone, pressurized sand layer, alluvium deposit and so forth. Tunnelling operations need to be controlled strictly to avoid any impact on ground surface and adjacent structures. It is also important to pay attention to mutual influence between twin tunnels built at the almost same time to secure the integrity of segments.

This paper details the tunnel construction procedure to prevent any influence to ground surface and adjacent structures, reports the actual movement of the subway structures together with the results of trial monitoring that was carried out just before the subway lines to establish the appropriate control values. It also describes the influence from the other tunnel assessed using the stress data of the reinforcements in the segments.