

営業線直下における小土被り 泥土圧シールドの施工

EPB SHIELD TUNNELING WITH SHALLOW EARTH COVER UNDER RAILWAY IN OPERATION

寺田 雄一郎^{1*}・岩村 忠之²・櫛谷 洋史³・森 理人⁴

“The shield tunneling work in the project for construction of continuous multilevel crossings near Chofu Station” is to construct two parallel tunnels and underground station for railway of Keio Line. The tunnels were constructed by one EPB TBM (6.85m diameter) under the following conditions, 1) TBM driving beneath existing railway with shallow earth cover, 2) small clearance between tunnels, 3) rotation and lift-up of the TBM in narrow space of the shaft beneath existing railway. Fuda station at midpoint of the tunnel section was constructed after TBM driving through. The tunnel linings were partially cut and removed for the platform construction. This paper summarizes the overall project and reports the technical points of the construction

Key Words : TBM driving beneath existing railway in operation, shallow earth cover, small clearance between tunnels, rotation and lift-up of TBM, cutting tunnel linings for station construction

1. 概要

(1) 事業概要

現在，東京都，調布市および京王電鉄株式会社は，京王電鉄の連続立体交差事業を進めている。踏切による慢性的な道路渋滞などの交通諸問題の抜本的な解決と，分断化されていた市街地を一体化して地域を活性化させる目的で，2002年2月に都市計画決定を受け，2003年3月より調布駅付近で施工を行っている。この事業は，京王線の柴崎駅～西調布駅間約2.8kmの区間と相模原線の調布

駅～京王多摩川駅間約0.9kmの区間を地下化することにより，18箇所のいわゆる“開かずの踏切”を解消すると

表-1 事業概要

事業名称	調布駅付近連続立体交差工事
事業者	東京都・調布市・京王電鉄株式会社
発注者	京王電鉄株式会社
事業区間	京王線 2.8km (柴崎駅～西調布駅間) 相模原線 0.9km (調布駅～京王多摩川駅間) 合計 :3.7km
構造形式	地下方式 駅施設 (国領駅・布田駅・調布駅)
事業期間	2003年3月～2013年3月

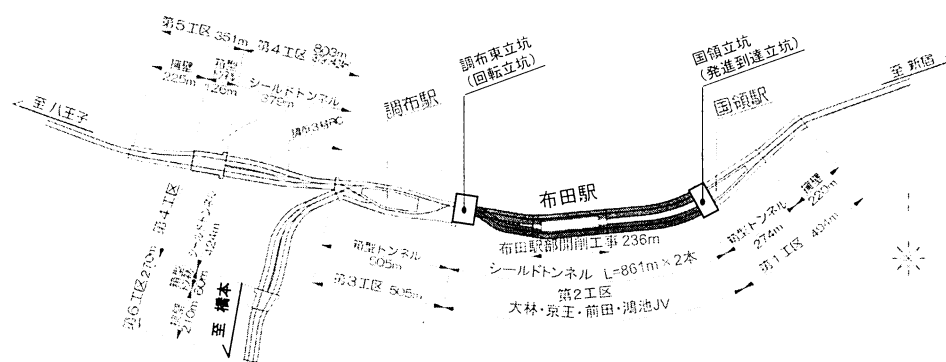


図-1 事業全体平面図

キーワード：営業線直下，小土被り，近接施工，シールド回転・扛上，セグメント切開き

¹正会員 京王電鉄株式会社 鉄道事業本部 (〒206-8502 東京都多摩市関戸 1-9-1)，E-mail: yuichiro.terada@keio.co.jp

²非会員 京王電鉄株式会社 鉄道事業本部 工務部 (〒182-0026 東京都調布市小島町 2-30-16)

³正会員 株式会社大林組 東京本店 京王布田JV工事事務所 (〒182-0022 東京都調布市国領町5-11-10)

⁴正会員 株式会社大林組 生産技術本部 シールド技術部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

ともに8箇所の都市計画道路を立体化するもので、駅部および掘削部は開削工法、駅間はシールド工法を採用し、早期供用に向けて現在工事を進めている。

表-1に事業概要、図-1に事業全体平面図を示す。

(2) 工事概要

今回報告する「調布駅付近連続立体交差工事第2工区」は、国領駅～調布駅間（861m）の鉄道上下線2本のシールドトンネルおよび中間駅の布田駅を造成するもので、そのうちシールド工事は、先行トンネル（上り線）、後続トンネル（下り線）の順に総延長1,722m（L=861m×2本）を1台の泥土圧（気泡）シールド機で施工する。またUターン施工となるため、調布東立坑においてシールド機の回転・扛上作業がある。2本のシールドトンネルの線形は、図-2に示すように、国領駅～布田駅間は並列配置であるが、布田駅～調布駅間は、将来調布駅に増設される急行線との乗換えの利便性を考慮し、調布駅手前で並列配置から徐々に縦列配置に移行し、調布東立坑では完全な縦列配置となる。第2工区シールド工事概要を表-2に示す。

図-3に土質縦断面図を示す。シールド掘削対象地盤の大半を占める立川礫層（Tag）は、玉石状の砂礫を含む砂礫層（最大径300mm）で、いずれの深度においても径200mm程度の玉石が3～10個/m³程度混入し、バインダー分は5%以下と少ない。また、透水係数はおおむね10⁻²～10⁻¹cm/secである。上総層群砂質土層（Ks1）は、比較的均質な細砂～粗砂が互層状をなしており、所々に粘性土薄層が介在するN値が概ね50以上のよく締まった地層である。上総層群砂・粘性土互層（Ksc）は、固結シルトと砂の互層で、多くはN値50以上の硬い地層である。また、地下水位はGL-5.5～-7.3mで、トンネル断面の上半部から天端付近の間で季節変動する。

シールド工事の具体的な特徴は以下の通りである。

- ① 営業線の直下を小土被りで掘進
最小土被り4.7m=0.7D（D：トンネル外径6.7m）
- ② 礫層でのシールド掘進
- ③ 超近接併設トンネル(最小離隔400mm)
- ④ 営業線直下の狭隘な立坑にてシールド機の回転・扛上

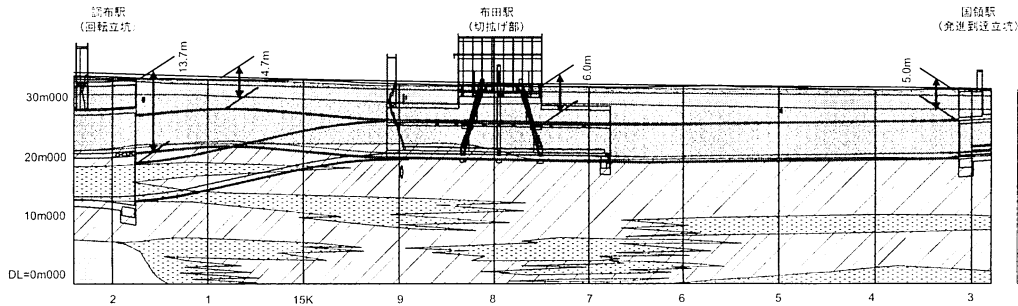


図-3 土質縦断面図

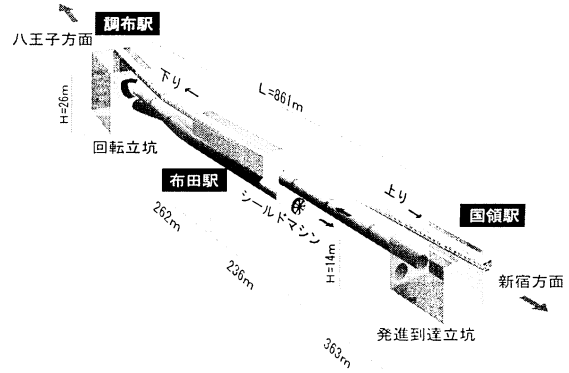


図-2 工事概要図

表-2 工事概要

工事名称	調布駅付近連続立体交差工事（土木）第2工区 その4の3工事（シールド工事）
施 工 者	大林・京王・前田・鴻池建設共同企業体
工 期	平成20年3月～平成22年9月
トンネル 延長	L=1,722m（上り線L=861m 下り線L=861m）
掘削外径	φ6,850mm
セグメント	RC（EXP）セグメント 外径6,700×幅1,400×桁高300 697リング SFRセグメント 外径6,700×幅1,400×桁高300 185リング ダクタイルセグメント（布田駅部） 外径6,700×幅1,250×桁高250 387リング
線 形	平面：最小500R、縦断：2～35‰
土被り	【上り線】5.0～13.7m 【下り線】4.7～6.0m

⑤ 中間駅部でのセグメント切開き

このように、本工事はこれまで国内でも例を見ない極めて厳しい条件下でのシールド工事であった。これらについて実施した対策・施工方法等を以下に詳述する。

2. 小土被り対策

シールドの掘進管理における重要な課題は、営業線直下、小土被り、礫層条件下で地表面および直上の営業線に影響を与えることのないように切羽を安定させること

であった。

(1) 計測結果を用いた最適な掘進管理

地上の列車運行の安全確保を目的として、トライアル計測ならびに軌道・地盤変状の24時間自動計測を行った。これらの計測結果を切羽土圧、裏込め注入圧、注入量等の掘進管理値にフィードバックすることで、最適な掘進管理方法を設定しながら掘進することができた。

a) トライアル計測

先行シールドが営業線の直下に位置する前の発進立坑から約90mまでの区間に3箇所のトライアル掘進断面を設置した。各断面には層別沈下計および傾斜計を設置し、シールド掘進通過時の鉛直及び水平変位を計測した（図-4 参照）。

このトライアル計測結果に基づいて、営業線直下の掘進へと入る前に、最適な管理土圧、裏込め注入圧、注入量を設定することができた。

b) 本掘進区間における軌道・地盤計測

営業線直下でのシールド掘進時の軌道・地盤変状を計測するため、トータルステーションによる自動計測を軌道内にて実施した。測定箇所は、上下線の内軌側レールとシールド直上地盤とし、測定ピッチは10mとした（図-5 参照）。さらに、列車運行の安全確保のため、自動計測に加えて、シールド掘進の進捗に合わせて軌道の変状および列車の運行を軌道保安員に監視させた。

(2) シールド掘進結果

発進直後のトライアル断面Tr①におけるシールド直上の層別沈下計の地表面変位量（+を隆起，-を沈下）は、シールド機切羽通過時で-2mm，シールド機テール通過時で-6mmであった（図-6 参照）。

この時の設定切羽土圧は、

下限値：静止土圧+水圧+予備圧 (20kPa)

上限値：土破り圧

と設定した。トライアル断面Tr①での計測結果から地表面の沈下を最小限にし、列車運行の安全性を確保するためには、地盤が硬質であっても小土破りにおける掘進においては、切羽土圧を上げるべきであることがわかった。そこで下限値の予備圧を当初よりも10kPa上げて30kPaとし、以降のトライアル断面において設定切羽土圧の妥当性を検証した。図-7にトライアル断面Tr②のシールド直上の層別沈下計の計測結果を示す。地表面の変状はシールド機切羽通過時で-1mm，シールド機テール通過時で-3mmとなった。以上から、設定した切羽土圧は適切であると確認され、この切羽土圧を使用して、営業線直下のトンネルを掘削することにした。トライアル断面

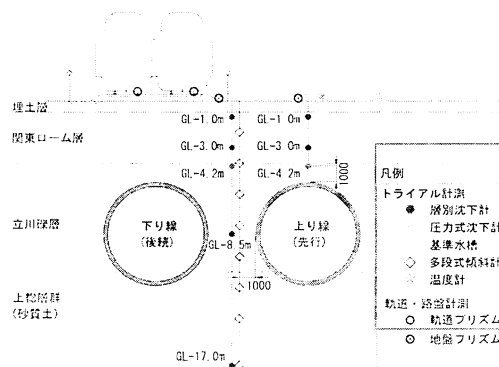


図-4 トライアル断面計測機器配置図

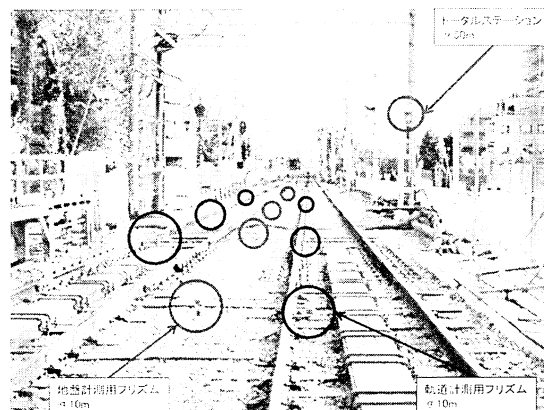


図-5 軌道・路盤計測図

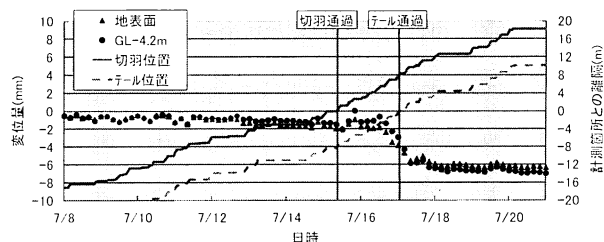


図-6 トライアル断面 Tr①計測結果

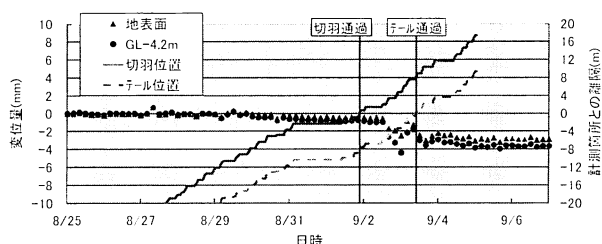


図-7 トライアル断面 Tr②計測結果

Tr③の地表面においてもシールド機切羽通過時で+1mm，シールド機テール通過時で-1mmの地盤変状となり良好な結果となった。

上記のように、トライアル掘進によって掘進管理方法を模索し、軌道、地盤計測結果を反映しながら切羽土圧の管理の結果、営業線直下でのシールド掘進全線において地盤変位量を概ね管理目標値の±5mm以内に抑制できた（図-8 参照）。

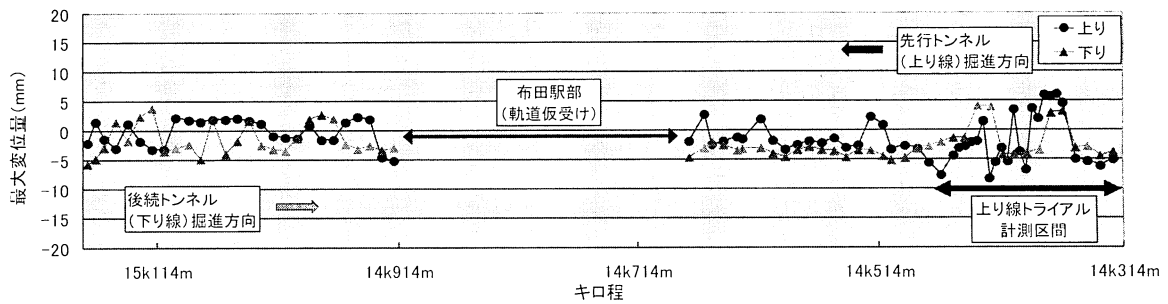


図-8 地盤変状管理結果

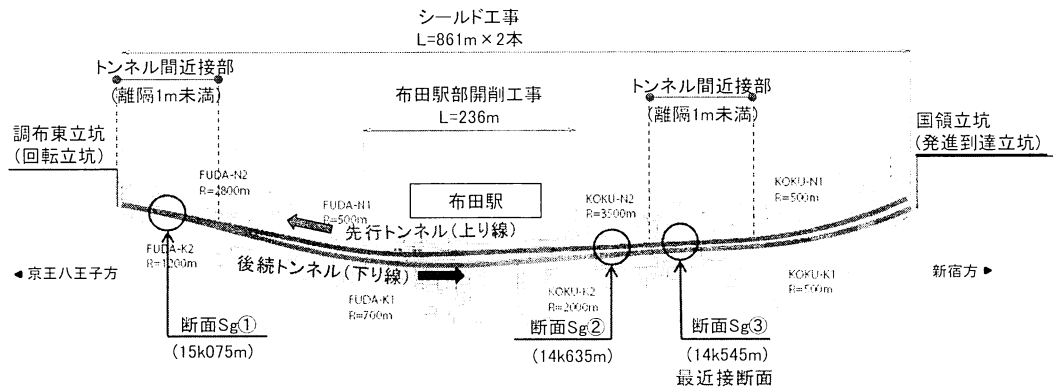


図-9 セグメント計測平面図

3. 近接施工対策

最小離隔400mmでの超近接併設トンネルの施工では、すでに構築された先行トンネルに影響を与えずに後続トンネルを掘進することが重要な課題であった。

(1) セグメント計測

先行・後続トンネル間の離隔が極めて小さいため、後続トンネル掘進時の切羽土圧や裏込め注入圧などの施工時荷重が、先行トンネルに悪影響を及ぼすことが懸念された。そこで図-9、図-10に示す位置（断面Sg①～Sg③）の先行トンネルのセグメントに予め鉄筋計（各断面 計11箇所）を設置し、その計測値から先行トンネルに作用する断面力を推定した。3つの断面で計測することで、施工時荷重の影響や、先行セグメントに発生する応力を把握し、セグメントの安全性および追加対策の要否を確認した。

(2) 近接施工結果

図-11の施工フロー図に従って、近接施工の影響度の判定・評価を行うこととした。後続シールドが断面Sg①を通過した際の計測値から先行セグメントの発生断面力を算出し、その断面力をもとに二次元弾性FEMによる逆解析を実施して後続シールド施工による応力解放率や切羽土圧や裏込め注入圧等の施工時荷重の見直しを行なった（設計時：応力解放率20%，施工時荷重0kN/m²）。

見直し後の解析条件（応力解放率10%，施工時荷重

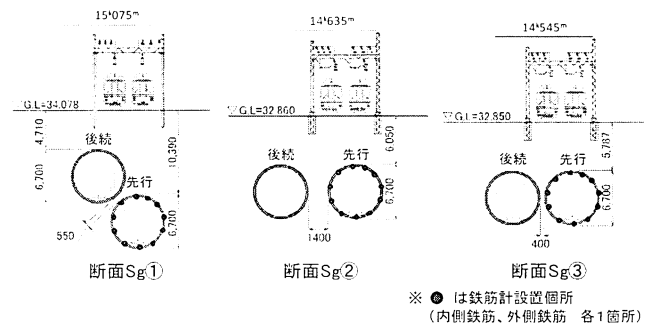


図-10 セグメント計測横断面図

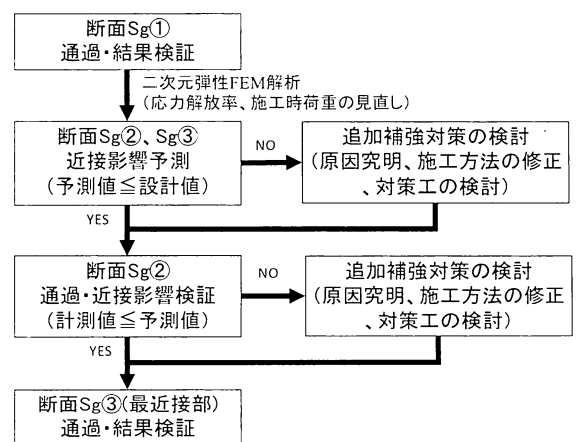


図-11 施工フロー図

35kN/m²)を用いて、後続トンネルが最も近接する断面Sg③での先行セグメントの応力状態（予測値）を予測し、当初設計の発生断面力（設計値）と比較した（図-12 参照）。その結果、軸力は予測値と設計値では概ね一致し、

予測値の最大曲げモーメントは設計値に対して小さいため、最接近部においても先行セグメントは健全であり特別な対策は必要ないと判断した。さらに断面Sg②の計測結果を用いて検討した結果からも、同様の判断が可能であった。これらの検討後、断面Sg③を通過した際の測定値においても、先行トンネルへの影響がほとんどなかった。また、図-12に示す通り、断面Sg③通過時の測定結果から算出した断面力（計測値）の最大曲げモーメントは予測値よりさらに小さく、設計値の曲げモーメントに比べて安全側であった。

(3) トンネル相互作用の考察

本工事での結果を、今後の近接施工条件下でのシールド工事の設計・施工に活用することを目的として、後続トンネルが先行トンネルに及ぼす影響を考察した。具体的には、併設条件の異なる断面Sg①～Sg③において、後続シールド通過前後の施工時荷重による断面力の増分を比較し、併設トンネルの離隔によって先行トンネルに与える影響の差異を検討した。

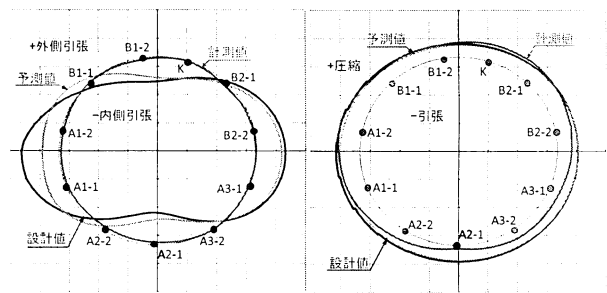
図-13に断面Sg①、Sg②、Sg③における施工時の断面力の増分を比較した結果を示す。曲げモーメントの変化は、断面Sg①では左上側、断面Sg②、Sg③では左側に正曲げの増加が生じており、後続シールドに最も近接した位置において先行トンネルの受ける影響が大きいことがわかる。先行トンネルで正曲げが増加した理由は、後続シールドの施工時荷重が通過前に作用していた土水圧よりも大きく、後続シールドと併設する方向と反対側へ押されたためと考えられた。また、各計測断面において同じ掘進管理（切羽圧、裏込注入圧、余掘り量など）で施工したが、正曲げの増分が断面Sg①では+10.5kN・m/Ring、断面Sg②では+2.6kN・m/Ring、断面Sg③では+18.6kN・m/Ringという結果となった。このことから離隔の増加に応じて、後続シールドの施工時荷重は周辺地盤に分散し、低減していくことと推定された。

以上の結果から、後続シールド通過による先行トンネルへの影響は、従来考えられている土圧の減少に加えて、施工時荷重にも影響することが分かった。しかもその影響は離隔によって異なるため、個別に適切に評価していく必要があることが分かった。

4. シールド機の回転・扛上

(1) シールド機の回転

立坑内でシールド機を回転させる工法として、乾性摩擦低減材を使用したグリス塗布工法を採用した。具体的には二硫化モリブデン（摩擦係数0.04）を主剤とした乾性被膜潤滑材を摩擦低減材として使用し、必要な回転力を



【曲げモーメント (kN・m)】

【軸力 (kN)】

ケース	M (kN・m)	N (kN)	σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)	σ_s' (N/mm ²)
設計値					
M-max	113.846	574.097	7.3	95.0	-63.2
M-min	-128.335	804.184	8.2	85.1	-76.2
予測値					
M-max	85.569	723.183	5.5	34.2	-55.9
M-min	-89.423	542.611	5.7	61.7	-52.5
計測値					
M-max	5.086	620.113	1.4	-16.5	-20.2
M-min	-20.344	163.461	1.3	9.1	-13.1
許容応力度			18.0	200.0	-200.0

図-12 セグメント計測結果（断面Sg③）

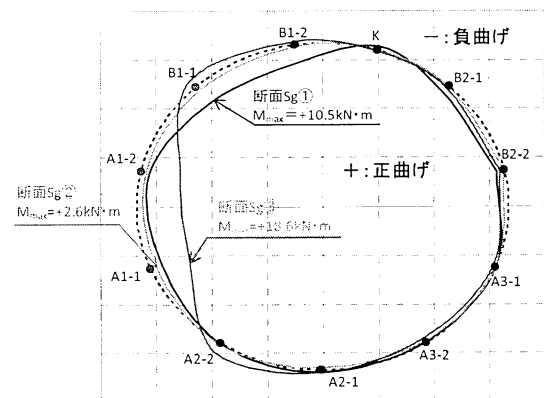


図-13 断面力増分比較図（リング当り）

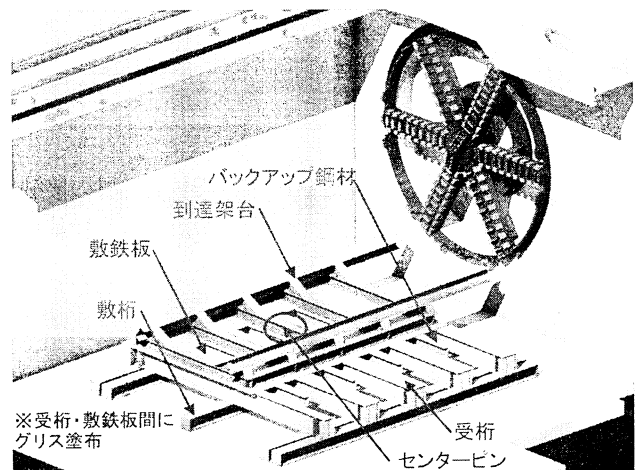
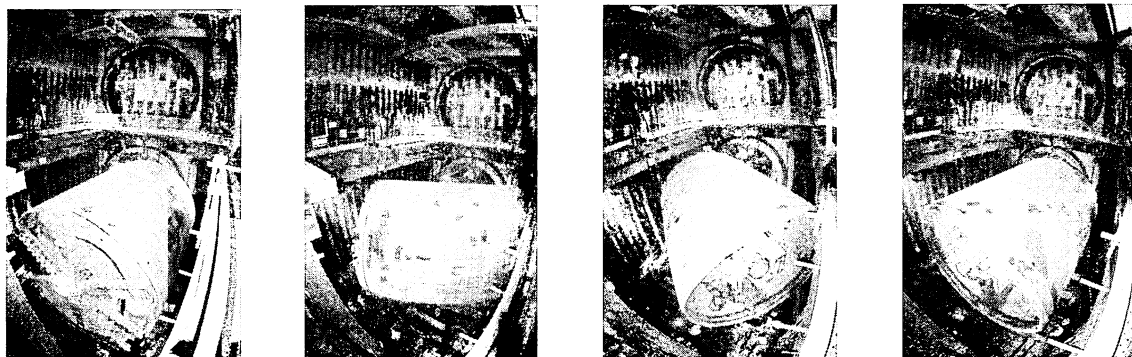


図-14 シールド機回転設備

小さく抑えた。回転架台は、下部より敷桁、受桁、敷鉄板、到達架台から構成され、受桁と敷鉄板の間に設けた回転面の回転中心に移動式センターピンを設け、マシンが所定位置で回転するように工夫した（図-14 参照）。架台を含むシールド機の重量は約300tであり、回転作業に必要な牽引力はおよそ15tであったことから、摩擦係



【STEP1】回転前

【STEP2】45° 回転

【STEP3】135° 回転

【STEP4】回転完了

写真-1 シールド機回転状況

数は0.05程度と推測された。これは二硫化モリブデンの摩擦係数とほぼ一致し、計画通りにスムーズに回転することができた。写真-1に施工状況写真を示す。

(2) シールド機の扛上

回転立坑は、営業線直下に位置するため、空頭が小さく、シールド機上部に吊り桁を設置できない。このため、シールド機の側面に支柱とジャッキ反力梁を設置し、センターホールジャッキを用いた「吊上げ方式」を採用して、シールド機を約8m扛上させた（図-15 参照）。センターホールジャッキの揚重能力は700kN、ストロークは200mmで、各ジャッキにストローク計を装備し、PC鋼より線（φ28.6mm）10セットを用いて、シールド機を載せた受桁を吊り上げた。安全性を高めるため、補助ストランドにより、ジャッキトラブルやPC鋼より線の破断による万一の落下に備えた。1サイクルの扛上量は200mm、上昇速度は100mm/分で、吊り上げ量の相対差が5mm以内に収まるようジャッキの自動制御を行い、ジャッキ重量を各部材に均等に作用させることで、受桁・支柱の変形を抑制し、シールド機の横ぶれを抑えた。

結果として、懸念されたシールド機と支柱材の接触もなく、安全に扛上作業を完了することができた。約8mの扛上に要した時間は、6.5時間程度であった。当初計画

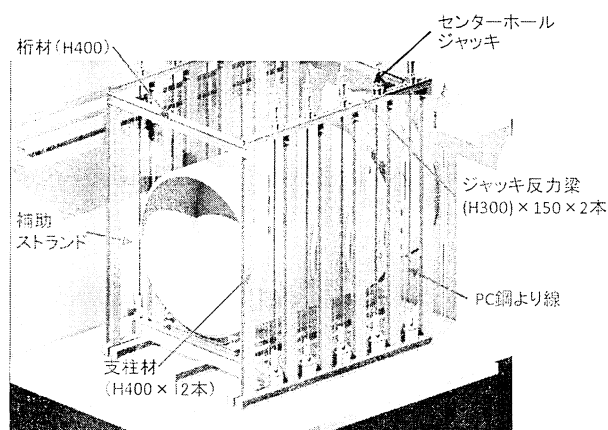


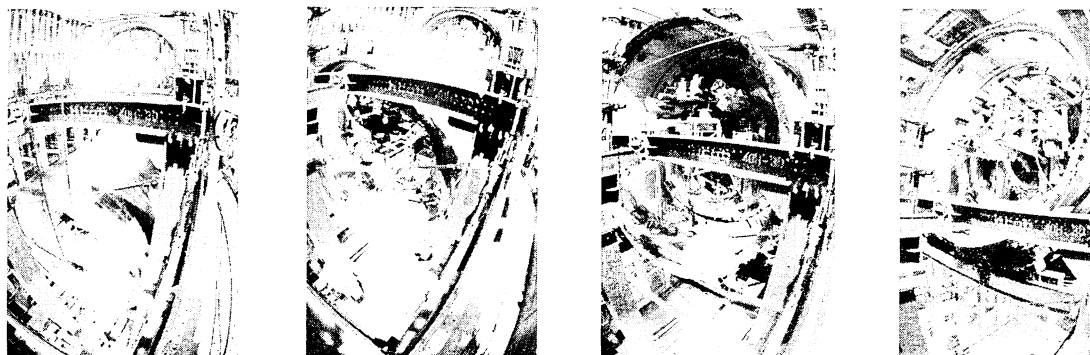
図-15 シールド機扛上設備

としていた押上げ方式から吊上げ方式への変更によって、9日間の短縮となり、かつ鋼材使用量は約3割削減できた。写真-2に施工状況写真を示す。

5. 並列シールドのダクトイルセグメント切開き工事

(1) 切開き工事の概要

新設される布田駅では、上下線2本のシールドトンネルに挟まれた部分を削削し、島式ホームを構築する。図



【STEP1】扛上前

【STEP2】3m 扛上

【STEP3】6m 扛上

【STEP4】扛上完了

写真-2 シールド機扛上状況

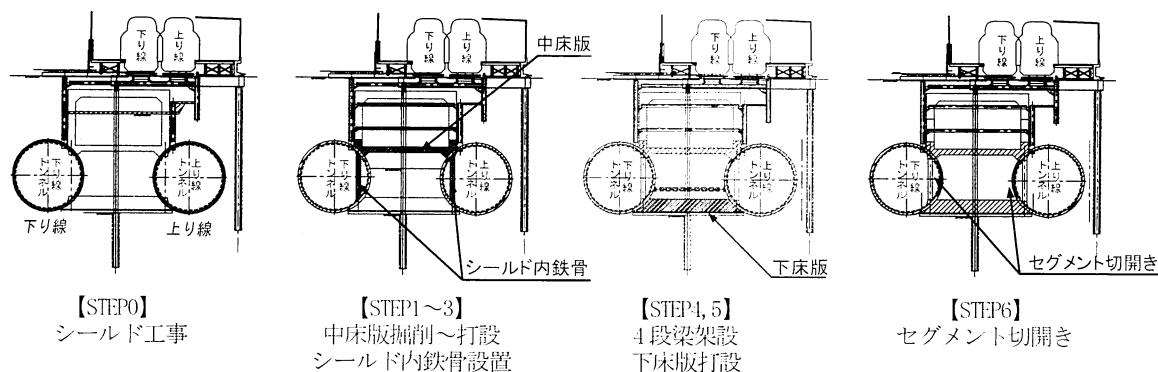


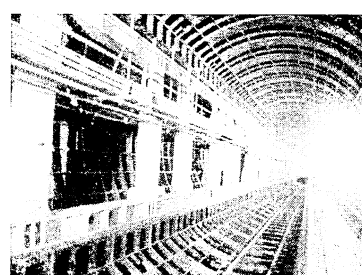
図-16 セグメント切開き施工順序図



【STEP1】 中床版掘削完了



【STEP2】 中床版打設完了



【STEP3】 シールド内鉄骨設置



【STEP4】 4段梁架設完了



【STEP5】 下床版打設完了



【STEP6】 切開き前状況

写真-3 布田駅部開削工事施工状況

-16に示すように2本のシールドトンネル構築後、セグメント上部の中床版、シールド内鉄骨、下部の下床版を施工し、その後並列シールドの切り開きを行った。切り開き延長 $L=236\text{m}$ （上下線）、セグメント幅 $W=1250\text{mm}$ 、切断するスキンプレートの厚さは $11\sim 21\text{mm}$ 、主桁高さは 225mm 、主桁板厚さは 20mm である。施工状況を写真-3に示す。

(2) 切開きの施工方法の選定

営業線直下で、延長 236m のダクトイルセグメントの切断にあたっては、①鉄道営業線の運行や②トンネル内で既に開始されている軌道敷設工事に支障するような煙を発生させない、という条件を考慮した結果、火気・煙の発生がない「ウォールソーによる切断」を採用した。また、切断したダクトイルセグメントの撤去、搬出方法については、工事桁や支持杭があり狭隘な施工箇所では、フォークリフト等の運搬機械が使用できないため、チェーンブロック、レバーブロック、台車等を使用した人力による方法を選定した。その際、効率的に作業を進める

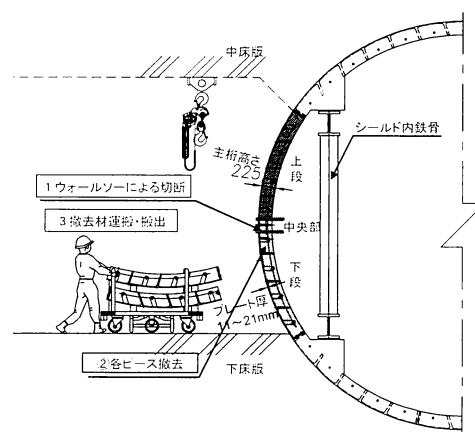
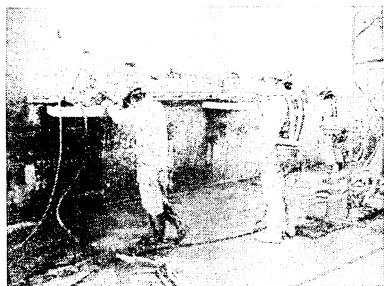


図-17 セグメント切開き作業手順図

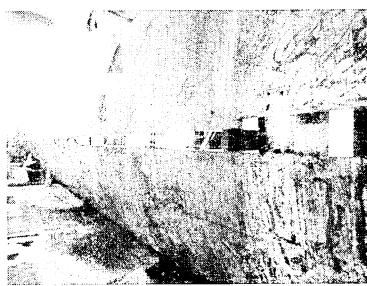
ため、中床版下側に予め仮設のインサートアンカー（ $\phi 12\text{mm}@1250$ ）を設置した。具体的な作業手順を以下に示す（図-17、写真-4参照）。

- ・STEP1 ウォールソーによる切断

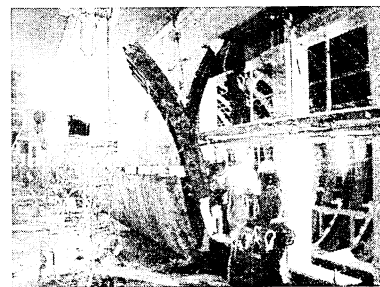
セグメント中央部を $15\sim 20\text{cm}$ の幅で切断し、撤去部の



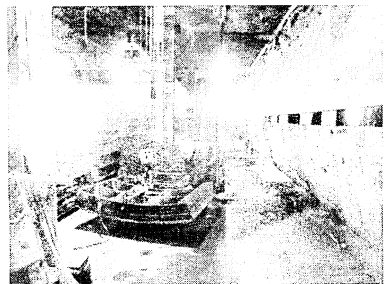
【STEP1】ウォールソー切断



【STEP2】中央部ピース撤去



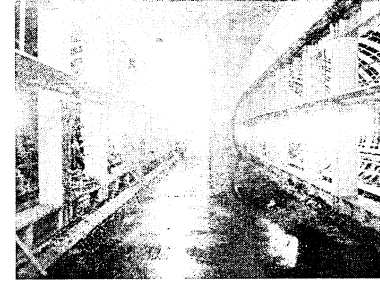
【STEP3】上下段ピース撤去



【STEP4】撤去材運搬



【STEP5-1】切開き完了（坑内側）



【STEP5-2】切開き完了（ホーム側）

写真-4 セグメント切開き状況

セグメントを中央部、下段、上段の3つのピースに分割する。これにより、ダクトイルセグメントに作用していた軸力を開放し、シールド内鉄骨に伝達させる。

・STEP2,3 各ピース撤去

撤去は、中央部、下段、上段の順に行う。各ピースは、チェンブロックで仮吊りし、セグメントボルト（リング間M27、ピース間M36）をナットランナー、エアリーンパクトレンチにて撤去し、ピースを下へ仮置する。

・STEP4 撤去材運搬・搬出

手押し台車を使用して人力により運搬後、天井クレーン等にて荷揚げ、搬出する。

上記のような施工手順で、ダクトイルセグメント切開き工事を行い、直上の営業線に支障することや、セグメントの変形等もなく施工を完了することができた（STEP5-1,5-2 参照）。今回のダクトイルセグメント切開き工事において使用したウォールソーによる切断は、火気による切断と比較して工費が高くなった。しかし、今回のように直上の営業線への煙の排出を確実に避けなければならない施工条件では、火気使用時の換気、煙の吸引、間仕切り等の養生設備が必要となり、工程の遅延や工事のさらなる輻輳を招くことが考えられた。総合的に考えると効率的に施工ができたと考えられる。

6. おわりに

本シールド工事は、先行シールドを平成20年6月20日に発進し、回転立坑での回転・扛上の後、後続シールドが

平成21年10月9日に到達した。

本工事は、小土被り、営業線直下、掘削対象地盤の大部分が礫層、トンネル相互が超近接という条件に示されるように、シールド工事としては難工事であった。しかし、シールド機や切羽への添加材の適切な選定、排土量の管理、切羽土圧の管理手法、計測管理方法などを取り入れた慎重な施工によって、無事にシールド工事を完成させることができた。

また、セグメントの計測を有効に活用することで、併設トンネル同士の近接施工において、後続トンネルの施工時荷重と離隔が先行トンネルに大きく影響することが分かった。

シールド機の回転、扛上は、営業線直下の狭隘な空間の中での難しい作業であったが、施工方法の綿密な計画を行い、十分な監視、管理体制の中で施工を実施した結果、計画通りかつ安全に施工することができた。

さらに、並列シールドのダクトイルセグメントの切開き工事では、火気・煙の発生を抑え、また狭隘な空間での作業のため運搬機械・揚重機械等の使用が制限された条件の中での施工であったが、施工方法を工夫することにより、安全かつ円滑に作業を進めることができた。平成23年3月にダクトイルセグメントの切開き工事を完了し、現在駅舎の建築工事、線路下でのホームの構築工事、電気・設備工事を施工中である。

本稿が同様な施工条件下での施工計画および施工管理の一助となれば幸いである。