

大断面上下併設シールドトンネルの施工

蔵治 賢太郎¹・木ノ本 剛²・谷口 禎弘³・荒木 尚幸⁴

¹正会員 首都高速道路株式会社東東京管理局（〒103-0015東京都中央区日本橋箱崎町43-5）
E-mail:k.kuraji66@shutoko.jp

²正会員 首都高速道路株式会社建設事業部建設企画グループ（〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1）
E-mail: t.kinomoto86@shutoko.jp

³正会員 清水建設株式会社 土木横浜支店首都高横浜環状建設所（〒105-0022 東京都港区海岸2-1-23）
E-mail:y.taniguchi@shimz.co.jp

⁴正会員 清水建設株式会社 土木技術本部設計部第一部（〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3）
E-mail: araki_n@shimz.co.jp

首都高速道路の橋脚群，地下鉄などの重要構造物の下方に，セグメント外径φ 12.65m，延長 431.7m の上下併設大断面道路用のシールドトンネルを純分離 1.45～4.3m で施工した。将来のトンネルの分岐合流部に当る区間でのトンネル切開きに対応する特殊鋼製セグメントの施工，重要構造物下での急曲線施工，立坑内でのシールド機のジャッキダウン，Uターンなど，数々の技術的課題を克服した工事である。

また，トンネル貫通後には，ロングスパンのプレキャスト合成床版を採用するなどして，内部構築を合理的な構造とすることにより短工期での施工を実現した。

Key Words : parallel shield tunnel, steel segment for underground enlargement, jack-down, PC composite slab

1. はじめに

首都高速中央環状新宿線（以下山手トンネル）は，都道環状 6 号線（山手通り）の地下に建設された約11km の路線であり，平成19年12月に高速4号新宿線から5号池袋線までの区間が開通したのに続き，平成22年3月に高速3号渋谷線まで開通している（図ー1 首都高速中央環状

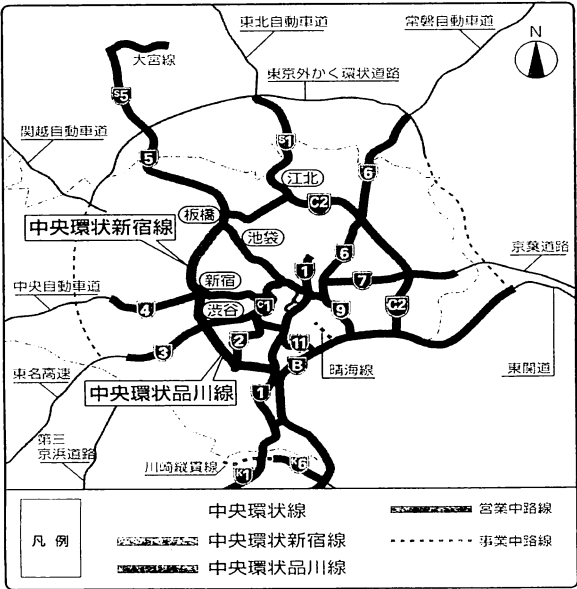
線位置図）。山手トンネルは，既設の路線とのジャンクション，出入口，換気所が設けられ，非常に複雑な構造となっていることに加え，鉄道や河川，ライフライン等と近接しており，難易度の高い施工が要求された¹⁾。本稿では，山手トンネルのうち，最も南に位置する大橋シールドの特徴とその施工について述べる。

2. 工事概要

(1)工事概要

大橋シールド工区は，大橋ジャンクションに接続するトンネルを施工する工区で，山手通りの松見坂交差点南側に位置する松見坂立坑から国道 246 号の直下を横断し，大橋ジャンクションの大橋立坑まで延長 431.7m のトンネルを上下並列 2 本，泥水式シールド工法で建設した。トンネルの平面線形は，上下トンネルともほぼ同一で，山手通りから国道246 号への移行部では曲線半径 123.5m の急曲線となっている。

山手通りの区間は，将来中央環状品川線と接続するため，セグメントの一部を撤去し切開く計画であり，特殊構造の鋼製セグメント（以下鋼殻）を採用している。急曲線部では，国道 246 号にある首都高速 3 号渋谷線橋脚群，東急田園都市線（地下鉄），渋谷共同溝，国道



図ー1 首都高速中央環状線位置図

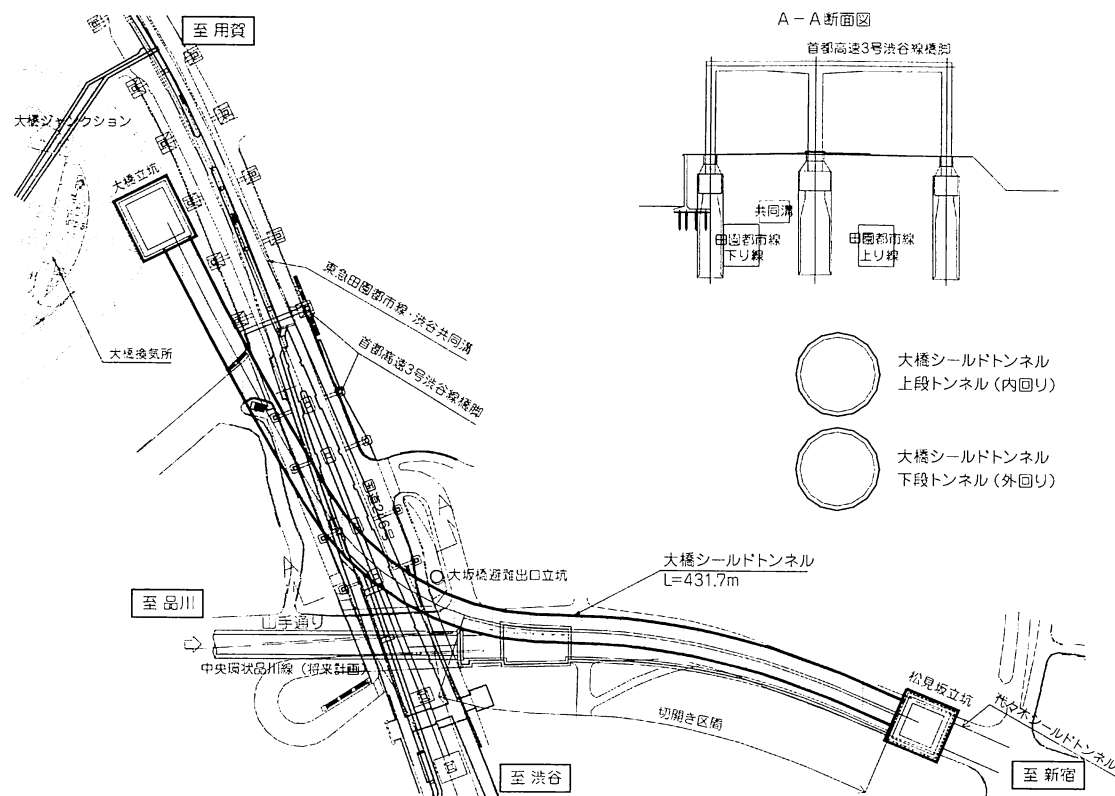


図-2 大橋シールド平面図・断面図

246 号の大坂橋橋台など重要構造物の直下を掘進した (図-2 トンネル平面図・断面図)。

また、上下並列トンネルを 1 台のシールド機で施工するため、到達立坑である大橋立坑では、シールド機のジャッキダウン・Uターンを行った。

トンネル貫通後には、セグメント防護用の耐火板、道路床版等の道路設備工事や換気ダクト等換気設備工事を短工期で施工した。

(2) 主な工事内容

- ・ シールド機形式及び外径：泥水式 ϕ 12.94m
- ・ 施工延長：L=431.7m (上下 2 本で計 863.4m)
- ・ セグメント外径： ϕ 12.65m
- ・ 鋼殻：681 リング
- ・ ダクタイルセグメント：345 リング
- ・ 上段トンネルの土かぶり：13.1 ～ 29.4m
- ・ 上下トンネルの純離隔：1.4 ～ 4.3m
- ・ 最小曲線半径：123.5m
- ・ シールド機のジャッキダウン、Uターン
- ・ プレキャスト合成床版の採用

(3) 工事の技術的課題

本工事の主な技術的課題には次のものがあつた。

- ①将来の切開きに対応する特殊セグメント
- ②急曲線部での重要構造物との近接施工
- ③全線上下併設トンネルの施工

④シールド機のジャッキダウンと U ターン

⑤内部構築工の急速施工

3. 地盤条件

トンネル位置の地盤は、大橋立坑近くで上段トンネルのクラウン部に東京礫層 (以下Tog層という) が出現する以外は、全線にわたり上総層群の固結シルト層 (以下Kc層という) である。下段トンネル下端は最深部で地表面下約56mの大深度となる。Kc層の粘着力は560kN/m²、内部摩擦角は24°で安定しているが、一部地下水を有する砂層を介在する。近接構造物の支持層はKc層の上位に位置するTog層である。このため、シールド掘進に伴う地盤沈下は、近接構造物の沈下につながる恐れがあつた。図-3にトンネル縦断方向の地質想定断面図を示す²⁾。

4. 作業基地

シールド発進基地として山手通り中央に幅約12m、長さ約230mの常設作業帯を設け、発進立坑の揚重設備および泥水処理プラントを設置した。立坑部および泥水プラントは防音ハウスで囲い騒音対策を行った。立坑部の防音ハウス内には、鋼殻4リング分の保管できるセグメント自動送出し装置、15tおよび30t吊り天井クレーンを設置した。図-4に発進基地の計画図を示す。

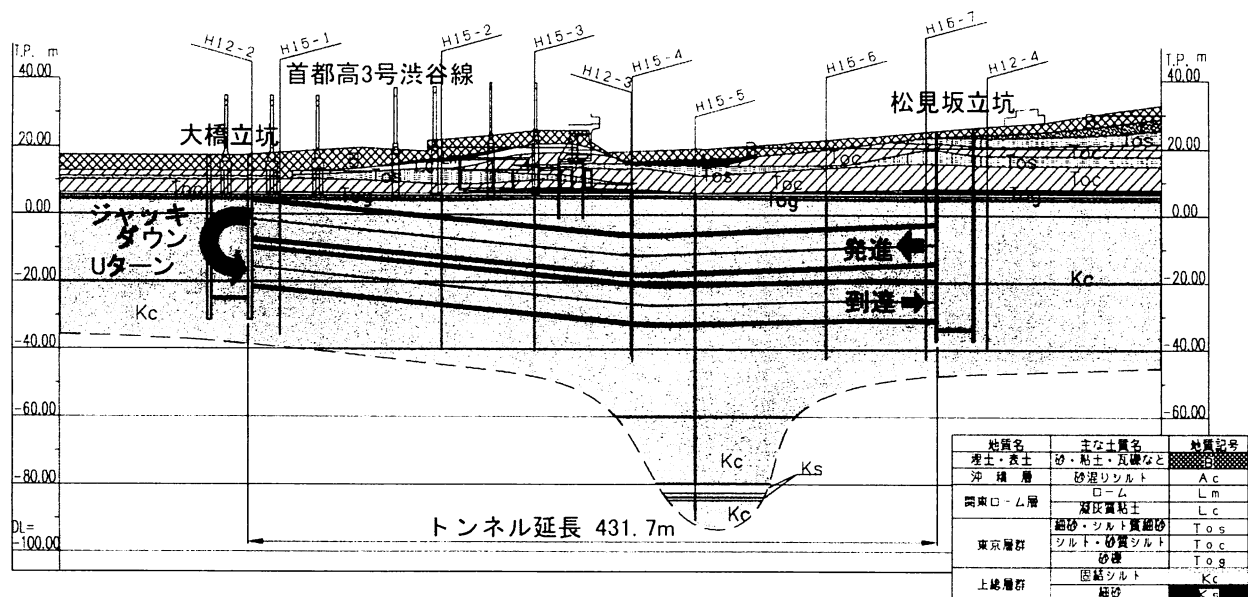


図-3 地質縦断面図

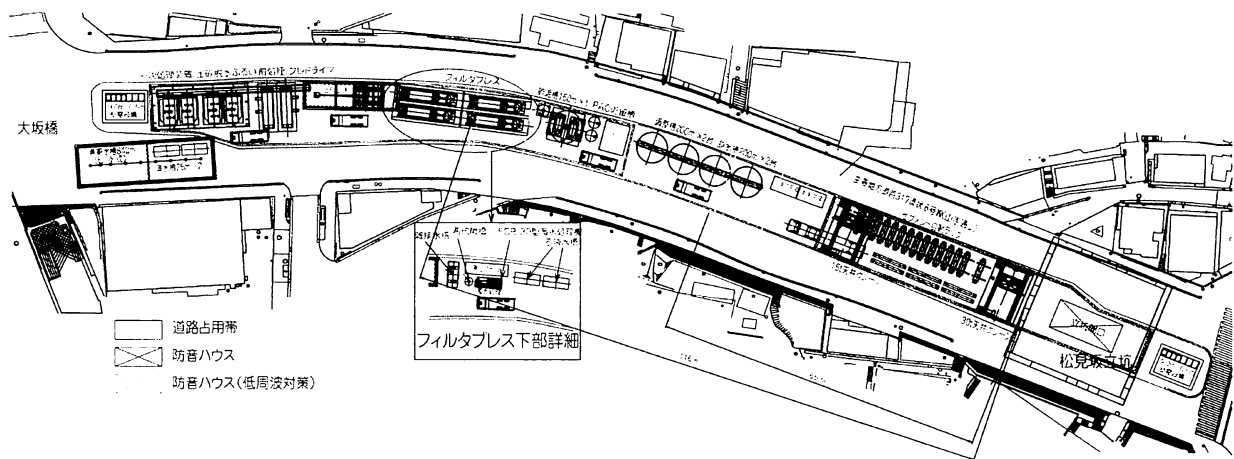


図-4 発進基地平面図

5. シールド機

シールド機は、掘削地盤、地下水圧を考慮し泥水式とした。シールド機は以下の特徴を有している。

- ①最小曲線半径123.5mの平面曲線および476.4mの縦断曲線に対応するための球面X型中折れ装置（左右3.2度、上下0.5度）およびストローク150mmのコピー4基
- ②固結シルトの固形回収を目指したカッタビット配置
- ③桁高 900mm, 700mm の鋼殻および桁高 450mm のダクトイルセグメントに対応した把持装置
- ④セグメント把持から粗位置決めまでを自動化したエレクトラ

図-5 にシールド機の構造図を示す。

6. セグメント

本工事で使用したセグメントを表-1に示す。

(I) 鋼殻(鋼製セグメント)

鋼殻は、品川線切開き部および路線中央部に位置する

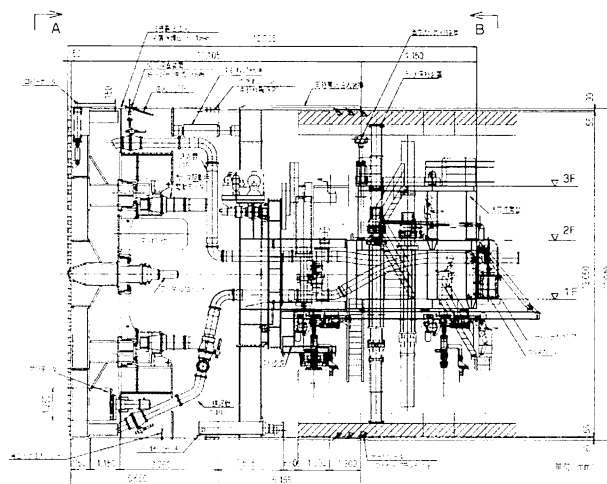


図-5 泥水式シールド機

表-1 使用セグメント一覧

用途	一般部	避難階段接続部	急曲線部	重荷重直線部	調整
種類	鉄製	鉄製	ダクタイト	ダクタイト	テーパープレートリング
外径 (mm)	12,650				
幅 (mm)	750	900	900	1,200	30~60
桁高 (mm)	900	700	450	450	900
分割数	8	10	10	10	10
最大ピース長さ (m)	約7.0	約4.0	約4.0	約4.0	約4.0
1ピース最大質量	8.40 t	2.75 t	2.90 t	3.70 t	1.48 t

避難出口立坑への通路部で採用した。切開き部の鋼殻は、将来RC躯体を接続する構造となっている。桁高が900mmと極めて高く、また、本線供用後にセグメントの外側から施工が可能なように、あらかじめRC躯体との接続用カプラーを内蔵している。図-6に切開き部鋼殻構造図を示す。

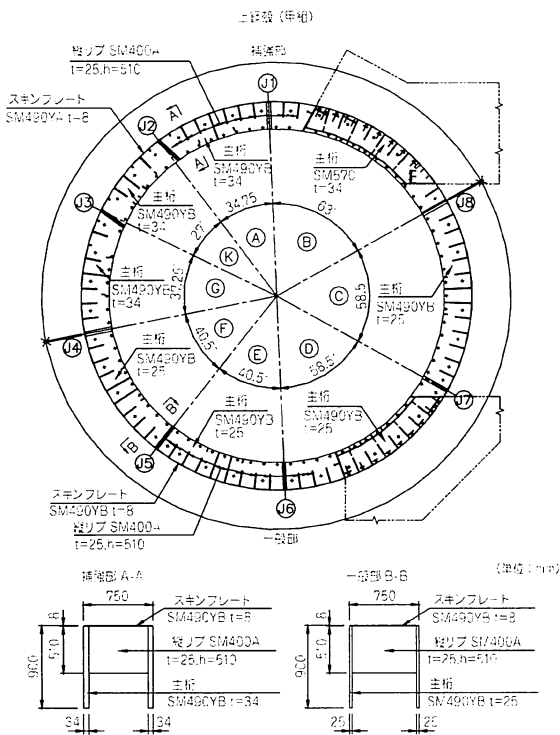


図-6 切り開き鋼殻構造図

切開き部で使用する鋼殻の最大ピースは、ピース長（弧長）7m、重量は8.4tである。

なお、切開き鋼殻の蛇行修正には、テーパープレートリング (TPR) を使用した。TPRは厚さ30~60mmのテーパーのついた外径12,650mm、桁高900mmの鋼殻と同じ断面サイズの鋼板で、鋼殻のリング間に挟み鋼殻の面角度を変化させることで蛇行修正を行う。図-7にTPRを示す。

(2) ダクタイトセグメント

切開き部以外の区間では、国道246号線を急曲線で横断し、首都高3号線橋脚等重要構造物直下に構築されることから、急曲線、重荷重を考慮してダクタイトセグメ

ントを採用した。セグメント幅は、急曲線部で900mm、直線部で1,200mmとした。

7. 施工順序の検討

2本のトンネルの施工順序は、工程上の関係から上段トンネルを先行した。すなわち、発進立坑（松見坂立坑）で上段シールドの発進ができる深さになった段階でシールド工事を開始し、シールド機が大橋立坑に到達した後、Uターンさせ、下段トンネルの掘進を行い、松見坂立坑まで戻ってくる間に、松見坂立坑の下段部の掘削、躯体築造を行なうことにより、松見坂立坑下段部の掘削、躯体工程を短縮することが可能となる。

上段トンネルを先行させるために、下段トンネル掘進に伴う、以下の検討を行った。

- ① 上段トンネルへの影響検討：FEM弾性解析を行い、横断面の完成時の断面力は、当初設計断面力以内であった。
- ② 上下トンネルに挟まれた地盤の安定検討：非線形弾性FEM解析を行い、全段階でトンネル周囲の地盤は線形領域内にあり、地盤の安定を確認した。

- ③ 近接構造物への影響度合いの差の把握：FEM弾性解析を行い、各近接構造物の予想最終沈下量はわずかであるが、上段トンネル先行の場合の方が少なくなった。

以上より、技術的に可能であると判明したので、工程上有利なように上段トンネルを先行させることとした。

8. シールド掘進工

シールド掘進の管理項目、施工結果について主なものを記す。

(1) 掘進管理

(a) 切羽水圧

切羽水圧は、掘進土層 (Kc層)、上部の重要構造物、地表面への逸水の影響を考慮して以下により管理した。主働土圧+間隙圧+変動圧 ≤ 切羽水圧 ≤ 土被り相当泥水圧
ここで変動圧=20~30 (kPa)

(b) 掘削土量管理

掘削土量は、泥水輸送システムの流量計、密度計の計測値から演算した掘削土量および乾砂量データを統計処理し、過去数リングの±2σ (σ：標準偏差) の範囲内であることを確認することで管理した。

(2) シールド掘進管理

シールド掘進管理の指標として、掘進速度、総推力、カットルクを、それぞれ以下のように管理した。

(a) 掘進速度

泥水処理プラントの設計条件 (25mm/分) より、標準の掘進速度を20mm/分とし、泥水処理設備での処理状況を

監視しながら掘進した。

(b) 総推力およびカッタトルク

シールド機の装備推力は160MNである。トンネルの深度増加に伴う切羽圧増加および勾配変化（下向き2%から上向き4.5%）、急曲線部の影響による増加を考慮して、初期掘進時の値から上限の管理値を設定し（上段80MN、下段100MN）、これより上昇する場合には何らかの異変があるものと注意するようにした。

常用カッタトルクは24.174MNmである。同種地盤の掘進実績を踏まえ50%で管理したが、到達部の置換えモルタル掘進部を除き、装備の30%程度以下であった。

(3) 裏込注入管理

裏込は、シールド機から行う同時注入方式とした。注入管理は、注入量、注入圧の併用とし、注入量の目標をテールボイドの120%、注入圧の上限を切羽水压+0.2MPaとして、上限になった場合、一時注入を停止して、圧力が下がると注入を再開した。

(4) 鋼殻の組立

切開き鋼殻（桁高900mm、8分割）では、ピースが大きく扱いに手間がかかり、また、太径ボルトが多いため組立時間が多大にかかることが予想された。このため、セグメントのエレクタへの受渡し、旋回位置決めまでの自動化やボルト締付機の台数を増やして対処したが、平均組立時間は105分であった。写真-1参照。

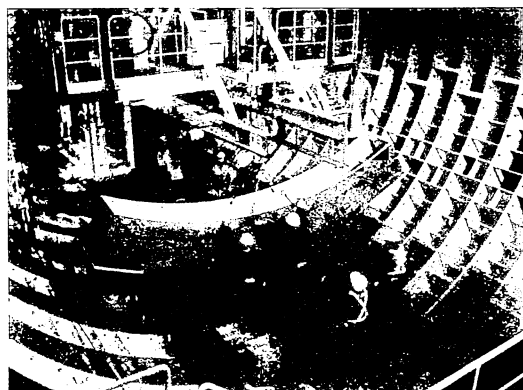


写真-1 切開き鋼殻組立状況

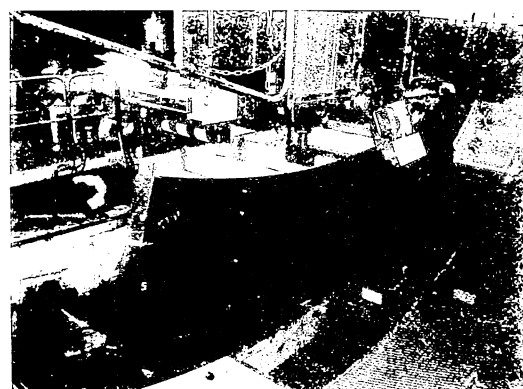


写真-2 テーパープレートリング組立状況

鋼殻の蛇行修正には、TPRを使用した。TPRは30～60mm厚であるため、エレクタで直接把持できない。そこで把持用ピースを製作し、把持ピースとTPRを仮留めボルトで接合しておいて、既設鋼殻に接続し、その後新設鋼殻を組立て、既設鋼殻-TPR-新設鋼殻間を本設ボルトで接合する手順とした。組立手順が煩雑でボルトの接合、分離が多いため、組立時間は新設鋼殻と合わせて平均9.2時間かかった。写真-2にTPR組立状況を示す。

(5) 急曲線部の施工

国道246号横断部では、R=123.5m、CL=124.1mの急曲線を施工した。急曲線施工では以下の点に留意した。

(a) シールド機の中折れ管理

急曲線の入口、出口では、リング毎に中折れジャッキ長を実測し、中折れ角度の管理精度を高めた。

(b) 余掘り量に対応した裏込注入管理

急曲線部では、コピーカッタによる余掘りを考慮してリングごとに注入量を算出し注入した。

(c) テールクリアランス管理

シールド機にテールクリアランス計を装備し、線形管理に支障をきたさない値を定め（20mm）、それより小さくなる場合にはセグメントのテーパ角を修正した。

(6) 重要構造物近接施工

重要構造物直下の急曲線横断区間、およびこれらの構造物とほぼ平行に掘進する区間は、企業者との協議により、速やかに掘進を行うため、昼夜休日なしで施工を行った。（平成18年5月～7月、19年6月～7月）

重要構造物の計測データは、中央制御室および事務所に表示され、異常値が出れば警報を発するようにした。また、発注者および施工者による検討会を毎日開催し、掘進状況や進捗、計測データの確認を行った。

(7) 計測結果

ここでは近接構造物のうち、首都高速3号渋谷線の橋脚について報告する。

橋脚は2径間ラーメン構造である。表-2に掘進完了後の変位と予測値を示す。

シールドは各橋脚を斜めに横切るので、トンネルとの位置関係で変位量が異なっている。最大沈下量はNP28渋谷-272の6.5mmであるが、ほぼ同条件のNP29渋谷-275では3.2mmの沈下であり、その差の原因は明らかでない。なお、NP28渋谷-272については応力検討および路面の走行性の検討を行い、問題ないことを確認している。

表一2 首都高橋脚鉛直変位量の実測と予測

(単位:mm)

橋脚番号 (計測位置は図-11 参照)		実測値	予測値
		①	②
NP26	渋 -266	+1.0	-2.0
	渋 -267	-5.0	-4.3
	渋 -268	-1.0	-2.1
NP27	渋 -269	-0.8	-4.6
	渋 -270	-5.8	-6.2
	渋 -271	-0.2	-2.5
NP28	渋 -272	-6.5	-6.9
	渋 -273	+1.5	-4.5
	渋 -274	+0.3	-2.0
NP29	渋 -275	-3.2	*****
	渋 -276	+0.5	*****
	渋 -277	+0.5	*****
P1	渋 -278	-1.0	-2.9
	渋 -279	+1.2	-1.3
	渋 -280	+1.2	-0.8
P2	渋 -281	-2.0	*****
	渋 -282	+0.3	*****
	渋 -283	+0.5	*****

－:沈下, +:隆起, *****:予測解析を行っていない橋脚

9 シールド機のジャッキダウン・Uターン

シールド機は大橋立坑に到達後、下段トンネルを掘進するために、立坑内に押出し、約14m降下させ、立坑下にて180度水平回転させた。

(1) ジャッキダウン工法の選定

シールド機を上段より下段に昇降する工法として、質量約2 100tのシールド機を解体せず施工が可能であること、立坑内の狭い空間での施工が可能であることなどの点から総合的に評価し、「センターホールジャッキ吊り下げ方式」を選定した。

センターホールジャッキはPCストランドを用いるタイプとし、盛換えなしに短時間で高揚程の上昇・下降を行えるようにストランド長を50mとした。また、前胴部偏重のシールド機を水平に保ちながら降下できるように、ストローク長制御方式とし、中央制御室で各ジャッキストロークを一元管理できるシステムとした。

(2) ジャッキダウン工の仮設

まず、立坑躯体上にジャッキ受梁としてH桁（BH-3 000×700×28×38，L=26.3m）を8本架設し、その受梁の上にジャッキ受材（H-900×300）を介して4MNセンターホールジャッキを14台設置した。

また、シールド機が載荷する吊架台として、H桁（BH-2 000×400×25×38，L=15.5m）を14本つなぎ合わせたものをベント構台上に設置し、ジャッキから下方に伸びているストランドを吊架台に定着させた。

(3) ジャッキダウン工

ジャッキダウンは、まずシールド機を架台ごと9m上昇させ、架台下部のベント構台を解体し、その後23m降下させた。平均下降速度は約 4.5m/時、1ストローク260mmを88回稼働させ、ジャッキ実稼働は5時間程度であった。

ジャッキ稼働時およびベント解体中には、ジャッキ受梁のたわみ、ジャッキ反力およびシールド機の水平性を計測した。たわみおよびジャッキ反力は規定値以内であり、水平性に関してもジャッキアップした後は20mm以内の傾きで収まった³⁾。図-8 にジャッキダウン工のフローを写真-3にジャッキダウン工状況を示す。

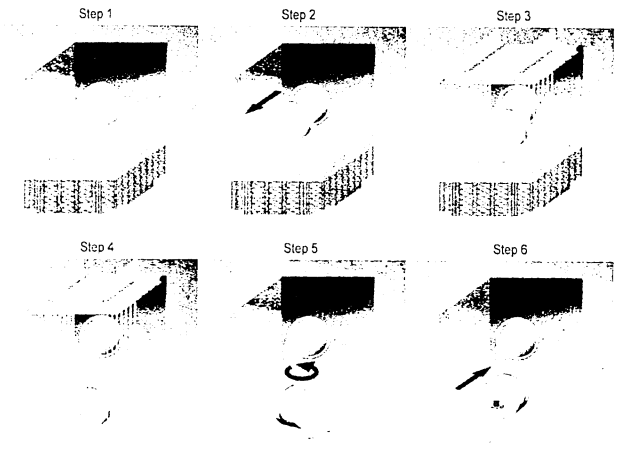


図-8 シールド機ジャッキダウンおよびUターン

(4) Uターン工

Uターン時は、シールド機架台下部に「ボールスライダー」を取り付け摩擦低減を図った。ボールスライダーは鋼製の箱内にφ90mmの鋼球を60個内蔵し、鋼球がキャタピラのように箱内を回転しながら箱全体が移動することで箱上の上載物を移動させる装置である。

立坑底面に鉄板を敷詰め、溶接固定したのち、シールド機が載ったボールスライダー上の架台端部にセンターホールジャッキ（100t×4台）を設置し、立坑壁から反力をとりながら牽引した⁴⁾。施工は、1ストローク長200mmを135回盛替えし、2日間を要した。

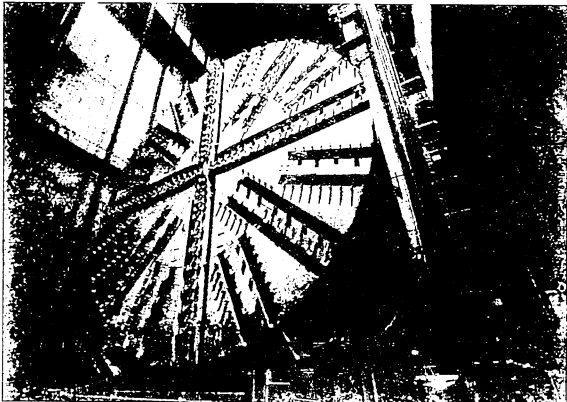


写真-3 シールド機ジャッキダウン状況

10. 内部構築工

内部構築では、セグメント内部に床版を支持する側壁および道路床版を構築する。床版下の空間は、中央に設けられた仕切り壁によって2分割され、送排気ダクトやパイプスペースとして使われる。床版上には車両走行時の安全確保を目的とした防護コンクリートや換気設備、路面排水設備等が設置される。また道路空間内に露出したセグメント表面には、火災時のセグメント損傷を防止する耐火板が取付けられる。図-9 に、大橋シールドの内部構築図を示す。

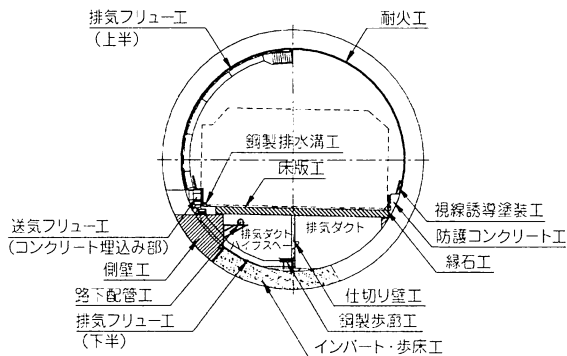


図-9 大橋シールド内部構築

本工事では、シールドの掘進完了後から道路供用開始時期までの期間が短く、短期間で施工が求められた。そこで、構造を合理化し工種を削減、部材のプレキャスト化を実施するなどして、短期間で完成を達成した。

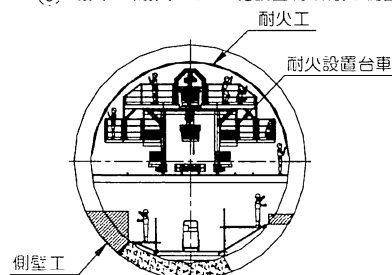
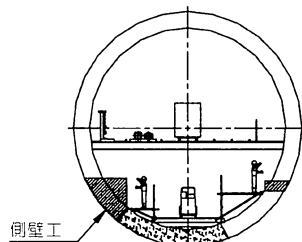
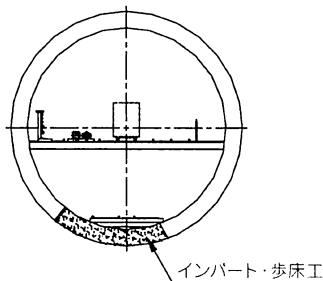
(I) 道路床版の設計

道路床版の設計は以下の事項を考慮し、プレキャスト合成床版構造を採用した。

① シールド設備解体、インバート工・歩床工

② 側壁工（鉄筋・施設物仕込み・コンクリート）

③ 耐火工（耐火パネル・施設金物取付）、側壁工



④ 床版支承工、床版設置工、床版間詰めコンクリート打込み

⑤ 上半・下半枕木撤去工、調整・防護コンクリート工、床版下排気フリー設置

⑥ 耐火工・排気フリー設置、視線誘導塗装工、仕切り壁工、路下配管工

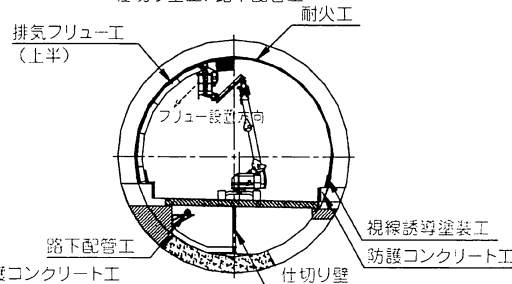
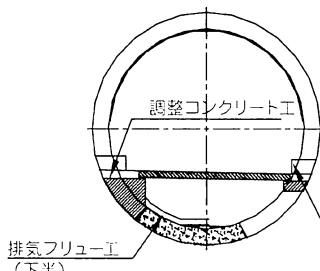
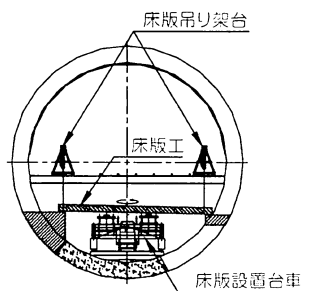


図-10 内部構築施工フロー

①床版用現場打ちコンクリートを削減

②ロングスパン (L=8m) が可能で床版下の構造中壁が不要

③床版下に送排気面積を確保でき、路面上の換気設備工事が削減可能

④カントに合わせて設置可能なため、道路勾配を確保するための調整コンクリートが不要

(2) 施工ステップ

内部構築は、シールド掘進時に使用した枕木を残した状態で上半、下半の施工を同時に行い、工程短縮を図った。図-10 に内部構築の施工ステップを示す。

上半ではシールド掘進直後にシールド工事設備の移動、解体を行い、その後、軌条設備を利用して耐火板設置台車により耐火板の取付けを行った。

一方、下半ではインバートコンクリート工、側壁の構築を行った後、合成床版の設置を行った。床版の施工では、設置箇所では床版を90度回転させる装置のついた床版設置台車を採用した（写真-4）。



写真-4 合成床版設置状況

床版設置後には、軌条設備の撤去を行い、上半では防護コンクリート、耐火板、排気フリー等を設置、下半では送排気スペースの区切りである仕切壁、排気フリー、歩廊および路下配管を設置した。

11. おわりに

本工事は、特殊切開き鋼殻の使用、急曲線での重要構造物近接施工、全線上下併設施工、到達立坑でのシールド機のジャッキダウン、Uターン工事、および短期間での内部構築工事と課題が山積していた。しかし、各課題に対し、設計段階からの対応を行い、詳細な計測等に基づいた細かな施工管理により、工事を完成させることができた。

特に、本工事特有である切開き用鋼殻は、その大きさやTPRによる蛇行修正と、関係者にとっては前例のないものであった。施工能率改善の余地は残るものの、今後の特殊セグメントの施工への貴重な経験となった。

また、シールド機のジャッキダウンについては、PCストランドを用いたセンターホールジャッキによる不等分布荷重の重量物揚重工の実績を残したといえよう。

本稿が、今後本報告が増々複雑化する都市土木工事をはじめ同種工事の計画で参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 森健太郎，他：縦2連鋼殻切開きトンネルの設計，土木学会第60回年次学術講演会講演概要集第6部
- 2) 小島直之，他：上総層粘性土層におけるシールド発進部の安定検討，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集 第6部
- 3) 小島直之，他：大断面シールド機のジャッキダウン工について，土木学会第63回年次学術講演会 講演概要集 第6部
- 4) 蔵治賢太郎，他：上下近接・大断面・急曲線シールド，基礎工 vol. 38, No. 3, 2010年3月号
- 5) 住吉 英勝：シールドトンネル内の特殊構造物，基礎工 vol. 38, No. 3, 2010年3月号

CONSTRUCTION WORK OF VERTICALLY PARALLEL TWIN SHIELD TUNNELS FOR HIGHWAY

Kentaro KURAJI, Tsuyoshi KINOMOTO, Yoshihiro TANIGUCHI
and Naoyuki ARAKI

Ohashi Tunnel Work is to build 430m-long, 12.65m outer diameter twin tunnels, which constitute the southernmost section of Yamate Tunnel, an 11km long highway tunnel constructed under the heavily developed Tokyo Area. Due to the area's surface configuration, subsurface buried structures and the highway alignment, the tunneling work has several technical difficulties to be overcome. This report describes the technical solutions as well as the records of the tunneling works including the followings.

- (1) Steel segments with 900mm thickness were used for the underground enlargement section, the work of which is planned at later stage. Tapered thin plates were used for alignment adjustment of the tunnels in this section.
- (2) The route of the tunnels was designed to be vertically parallel all the way. The minimum distance of the tunnels is 1.45m. Construction schedule required the upper tunnel construction first. Ground stability between the tunnels as well as adjacent ground was analyzed prior to the commencement of the work.
- (3) The TBM had to drive directly under the box culvert of subway and the foundations of highway viaduct at the 123.5m-radius sharp curve section. A careful control of TBM articulation, sufficient backfill grouting, as well as continuous-shift work minimized the effect of the tunneling work.
- (4) The 2100-ton TBM was to be lifted down vertically by 14m and to be made U-turn at the arrival shaft. The jackdown system using center-hole jacks with PC-strands held the front-weighting TBM horizontally during the jackdown work.
- (5) PC composite slabs were used in order to shorten the work period of internal structure of the tunnel.