

今までに例のない地上発進・地上到達を 可能としたシールド技術

URUP (ULTRA RAPID UNDER PASS) METHOD - THE FIRST SHIELD TUNNELING METHOD FOR LAUNCHING AND ARRIVAL AT THE GROUND LEVEL

後藤 広治¹・赤崎 浩司²・中村 鉄也³・井澤 昌佳^{3*}

URUP (Ultra Rapid Under Pass) method is the first tunneling method in the world which enables to launch a shield machine from the ground level and to achieve its arrival at the ground level. The URUP method was selected for the construction of Oi Tunneling Section of the Central Circular Sinagawa Route planned by Tokyo Metropolitan Government Office.

Key Words : Road tunnels, Shield, Starting and ending shield tunneling at ground level, Rapid construction, Reduction in environmental loading

1. はじめに

首都高速道路中央環状線は、図-1に示すとおり首都圏3環状道路（首都圏中央連絡自動車道，東京外かく環状道路，首都高速中央環状線）において最も内側に位置している。3環状道路は首都圏だけでなく，日本の国際的な競争力へ寄与する重要な路線であり，現在鋭意整備中である。このうち中央環状品川線は，中央環状線（全長約47km）の南西側部分を形成し，高速湾岸線と供用中の中央環状新宿線および高速3号渋谷線を結ぶ路線である。

本路線は，都心部における慢性的な交通渋滞解消の切り札として，平成25年度の完成を目指し，東京都と首都高速道路株式会社との共同事業として施行しているものである。本路線建設に伴う渋滞解消による環境改善効果は，年間約9万トンのCO₂削減が予測されている。

中央環状品川線大井地区トンネル工事は，中央環状品川線のうち高速湾岸線から分岐する高架橋構造の大井ジャンクションとトンネル構造の中央環状品川線を接続する工事である。今回，地上からトンネルへのアプローチ区間に掘削土量の縮減を目的の1つとして国内で初めて地上発進・地上到達が可能なシールド工法を採用した。URUP (Ultra Rapid UnderPass) 工法と名づけられた本工法は，発進／到達立坑を必要とせずに，シールドマシンを地上から発進させて必要な地下構造を構築した後，

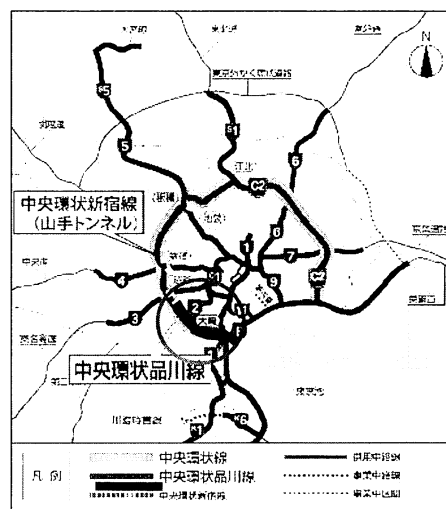


図-1 中央環状線の現状¹⁾

再び地上に到達させることを可能とした技術である。

本稿では，本工事で実施された地上発進・地上到達における種々の施工技術を紹介するとともに，重要構造物との近接施工や高水圧下の換気所立坑におけるシールドの到達方法などを紹介する。

キーワード：道路トンネル，シールド，地上発進・地上到達，急速施工，環境負荷の低減

¹正会員 東京都第二建設事務所

²正会員 東京都第二建設事務所 品川線建設事務所

³正会員 大林・西武・京急建設共同企業体（〒140-0003 東京都品川区八潮一丁目地内），E-mail:izawa.masayoshi@obayashi.co.jp

2. 本工法採用の背景²⁾

今回施工される本工事の周辺には、大規模放水路や電力洞道など重要構造物が存在している。当初の計画段階においては開削工法が想定され、軟弱地盤における大規模掘削に伴う地盤変状が、これら重要構造物に悪影響を与えてしまうという懸念があった。この解決のため、東京都では技術提案型総合評価方式による発注を選択し、開削区間を最小限に抑え、近接構造物に及ぼす影響を極力小さくする技術提案を広く求めた。

その結果、URUP工法が本路線の要求に最も適した工法として評価され、本工事に採用した。その理由は以下の通りである。

- ①地上構造とトンネル部分を接続するアプローチ区間の施工に適している。
- ②開削工法に比べて大幅に掘削土量の縮減が可能である。
- ③適切な切羽土圧管理により地盤変状を抑制できることから、近接地下構造物や小土被りに対しても有効な施工方法である。

3. 大井地区トンネル工事概要³⁾

中央環状品川線大井地区トンネル工事は、図-2に示すとおり品川区大井地区の京浜運河沿いに、大井北換気所と、大井方向および大橋方向の上下二車線の自動車専用道路を構築する工事である。表-1に工事概要を示す。

特に、トンネル区間は、総延長886m（先行トンネル

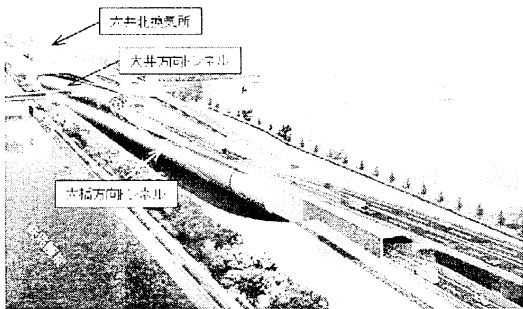


図-2 工事概要図

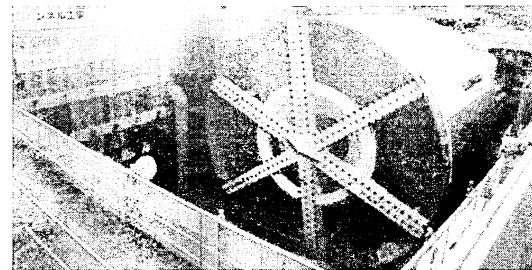


図-3 地上発進前

550m、後行トンネル336m）を世界最大級のシールドマシンで施工する難度の高い工事である。以下、本稿ではこのシールドトンネルに関する技術について詳述する。

4. シールド地上発進時の課題と対策⁴⁾

シールドマシンの地上発進時および小土被り掘進時に想定される課題やリスクを事前に抽出し、設計および施工における各種対策を以下のように講じた。

(1) 切羽土圧管理

シールドが地上から発進する場合、マシン上部が開放された状態となる（図-3、図-4）。その後、地山を掘削することで、チャンバー内に土砂を順次満たしながら掘進する。地上からの発進時や小土被り掘進時には、切羽土圧の過不足が周辺地盤に大きな影響を与えられ、適切な切羽土圧の設定と圧力状態の把握・管理が重要となる。このため、本工事における切羽の管理土圧は土圧（静止土圧）＋水圧（静水圧）以上に設定し、チャンバー内に複数設置した土圧計のうち掘削断面の最上段の土圧計を管理ポイントとし、常に設定圧力以上を確保するよう調整管理する（図-5）。

地上からの発進時はチャンバー内状況を地上から直接目視できるメリットがあり、同時にチャンバー内土砂の充満状況や塑性流動状態を監視することができる。小土被り掘進時は(株)大林組が開発したチャンバー内土砂流動管理技術を導入することで、掘削時のチャンバー内土

表-1 工事概要

工 事 概 要	
トンネル部：シールド工法	換気所：ケーソン工法
シールドマシン	躯体平面形状：39m×35m
形式：泥土圧シールド	掘削深度：44m
外径：φ13.6m	擁壁・カルバート部：開削工法
セグメント外径：13.4m	擁壁延長：274m
内径：12.5m	大橋方向：60m
幅：1,700mm	大井方向：214m
シールド延長：886m	カルバート延長：80m
大橋方向：550m	橋梁部：二径間 PC 橋梁
大井方向：336m	橋長：60m、橋脚：3基

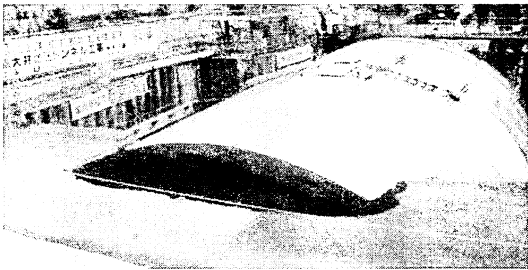


図-4 地上発進状況

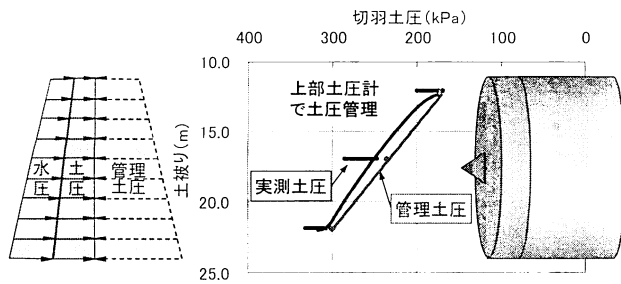


図-5 切羽土圧管理説明図

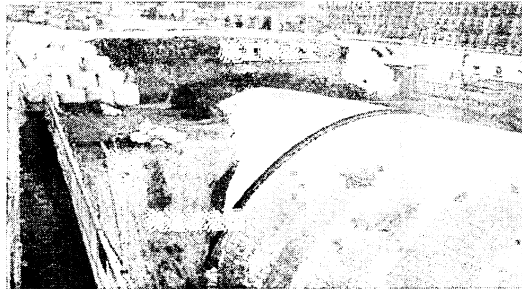


図-6 地上発進完了

砂の塑性流動状態を定量的かつ視覚的に評価・把握することが可能である。このため、加泥材添加量や切羽土圧をリアルタイムに調整でき、安全かつ確実な掘進管理が実施可能となる。このように切羽土圧の管理を確実に行うことにより、発進部の法面崩壊や周辺地盤の変状を引き起こすことなく、安全に地上発進することができた。

(2) 浮上り対策

地下水によるトンネルの浮上りに対して、通常は以下の対策が考えられる。

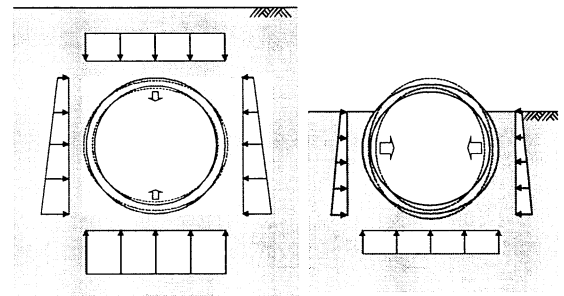
- ・盛土による上載荷重の載荷
- ・地下水低下工法による浮力低減
- ・トンネル内に支点を設置するグラウンドアンカーによる浮上り抑制

本工事の立地条件では、トンネル上部に盛土の施工が可能であったため、他工種で発生する残土を利用して盛土を実施した（図-6）。

なお、完成時にはトンネル内部の道路部分の埋戻し荷重が作用するので、重量バランスにより構造物の安定を図ることができる。

(3) セグメント補強工

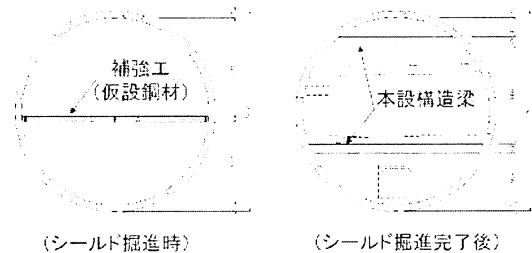
一般的な土被りのあるトンネルと比べると、地上発進部のセグメントは上部鉛直荷重が作用しない（あるいは小さい）ため、セグメントに発生する軸圧縮力が小さく、曲げモーメントが卓越して変位が大きくなる（図-7）。このため、本工事ではトンネル内空断面の中央水平方向に仮設鋼材により補強し、セグメントの変位抑制を図った。その後、掘進完了時に、トンネル内空断面の上部および下部に本設の構造梁を構築し、仮設鋼材を撤去するものとした（図-8）。



一般的な場合

地上発進

図-7 セグメント作用荷重概念図



(シールド掘進時)

(シールド掘進完了後)

図-8 セグメント補強工および補強梁

5. 重要構造物の近接施工³⁾

本工事における代表的な近接地下構造物として、電力洞道がある。電力洞道は外径2.4mのシールドトンネルで本工事のトンネル区間と直交しており、東京都内に電力を供給する重要幹線である。

本工法のシールドトンネルは、電力洞道とわずか400mmの離隔で通過させる必要があった（図-9）。

しかしながら、以下に示すような事前検討と情報化施工を駆使することにより、大橋方向シールドを電力洞道に影響を与えることなく通過させた。

(1) 地盤改良の必要性

有限要素法に基づくステップ解析を事前に実施し、シールド施工時の電力洞道への影響（洞道の変位や洞道セグメントに発生する応力度）を検討した。その結果、高圧噴射攪拌工法を用いた地盤改良による防護工の必要性が確認されたため、実施工に反映した（図-9）。

(2) 事前計測の実施

切羽土圧のわずかな管理誤差でも電力洞道に大きな影響を与えてしまう。このため、電力洞道の100mと200m手前にトライアル断面を設け、シールドマシン通過における管理土圧の上限値と下限値（許容幅）を変化させ、管理土圧と地盤変状との相関を定量的に把握することとした。さらに、トライアル断面ではシールド通過に伴う鉛直変位、水平変位を実測して、電力洞道位置の地盤変位から水平変位に対する洞道セグメントの健全性の確認を行った。図-10に計測結果を示す。

電力洞道位置の地盤変位量は水平・鉛直とも10mm以下に抑制でき、洞道セグメントの健全性を確認した。こ

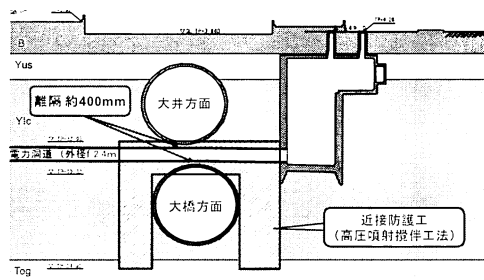


図-9 重要構造物近接状況図

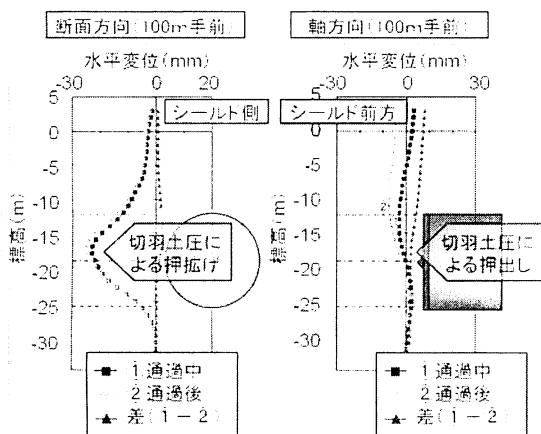


図-10 事前計測結果
(100m 手前の水平変位)

の結果に基づき、管理土圧の設定値を決定した。

(3) 近接施工の影響結果

事前計測に基づいた切羽土圧管理を行って、電力洞道の計測データをリアルタイムで施工にフィードバックす情報化施工を設備管理企業の協力を得て実施した結果、大橋方向シールド通過時の電力洞道の変位は、事前計測と同様に、切羽土圧の影響によるシールドマシンの外側（鉛直変位は上方、水平変位は前方）に押し出された形状となった。その変位量は、トライアル断面で行った事前計測に比べて小さな値であった。後行の大井方向シールド通過時についても、同様な管理を実施することで、影響を最小限に抑制した。

6. 高水圧下の換気所到達

換気所付近における地盤は、事前調査により地下水の豊富な砂礫層が卓越することがわかっており、シールドマシンとの接合部では0.4MPaの高水圧下となる。さらに、通常の地下水位低下工法の適用は、帯水層の上部に厚く堆積する軟弱な粘性土の排水を助長することになり、圧密沈下を促進させる懸念があった。

これを受けてシールド到達時の出水リスクを回避するため、以下の対策を講じた（図-11、図-12）。

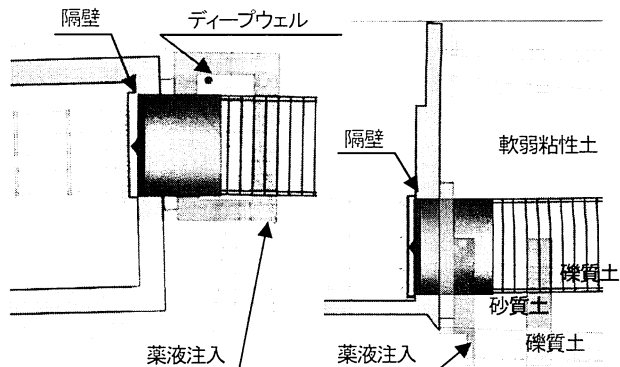


図-11 到達防護状況図

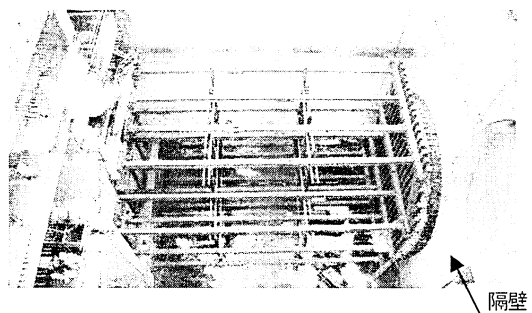


図-12 隔壁設置状況

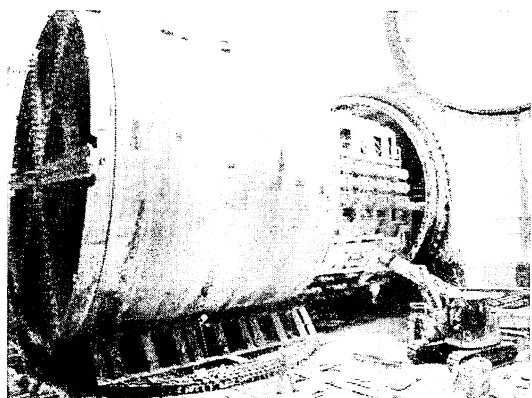


図-13 マシン引き抜き完了

- ・換気所到達部の壁に、シールドマシンのカッターで直接切削可能な NOMST 壁を採用
- ・到達防護工と局所的な地下水位低下を可能とする薬液注入を実施
- ・万が一の出水に備え、ディープウェルを事前配置
- ・換気所内への NOMST 壁の倒壊防止、出水確認をするための隔壁を設置

(1) 出水リスクを最小限とする到達対策

一般に、到達防護工の薬液注入はマシン+セグメント 2～3 リングの範囲に実施することが多い。ただし、その止水効果は、防護工に対する離散的なボーリングでしか事前確認できないため、しばしば出水事故が発生していた。これらの経験を生かして、本工事のシールドでは、出水リスクを最小限とする以下のような対策を実施した。

まず、マシンの外側を囲む壁状の薬液注入を透水層に実施し、その中にディープウェルを配置して揚水するこ

とで、リアルタイムで防護工の止水効果を確認することを可能とした。

a) マシン通過中

マシンが換気所に到着し、NOMST 壁を切削する前に揚水試験を実施し、裏込め注入と薬液注入の止水効果を確認する。万一、マシン内への地下水の浸入が著しい場合は、裏込め注入や薬液による追加止水注入を実施するものとした。

b) マシン到達後の確認

NOMST 壁を貫通する時の地下水の浸入状況を確認できるように、隔壁を設置した。

万全の準備と対策を実施した結果、無事にシールドマシンを立坑内に引き抜くことができた（図-13）。

7. 立坑内のUターン施工⁶⁾

本工事に採用したシールドマシンの総重量は 1,500 トンである。このマシンを換気所内で回転（Uターン）させ、約 10m 引き上げて再発進させなければならない。換気所内では、安全かつ早期に回転・引上げを完了するため、以下に示す計画とした。

(1) 後方台車一体型シールドマシン

マシンを駆動させるための油圧ユニットや運転席などの諸設備は、マシンと独立させた後方台車に配置することが一般的である。しかし、本工事に要求されるUターン施工および再発進時に後方台車の再設置を行わなければならないため、作業が複雑となり工期も長くなる。

本工事では、マシンと一体の後方作業台に諸設備を搭載することで、後方台車を省略した（図-14）。



図-14 後方台車一体型シールドマシン

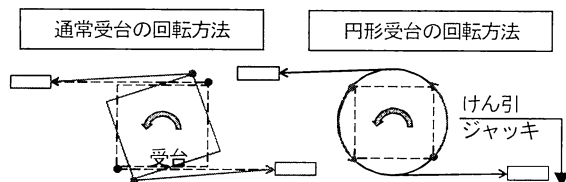


図-15 マシン受台回転方法概念図

すなわち、マシンの回転・引上げは後方作業台をつけたまま実施するため、後方台車再設置が不要となり、大幅な工期短縮を図ることができた。

(2) 回転床整備の省力化

通常、回転床面は全面鋼板を敷き、継手面を溶接して平滑な床面を整備し、その床面でマシン受台を回転させる。この方法では、鋼板の設置・撤去と継手面の溶接、溶接面の仕上げが必要であり工期が長くなる。

本工事では、回転・移動時の床面とマシン受台に発生する摩擦力を極力低減するため、換気所床面に設置する鋼板とマシン受台底面にモリブデン塗装を実施した。

さらに、マシン受台側の下面に全面鋼板を設置し、床面側は帯状の鋼板を配置することで、床面に敷設する鋼板の施工量を低減して工期を短縮することができた。

(3) けん引ジャッキ盛替え作業の低減

通常、方形のマシン受台を回転させる場合、けん引ジャッキおよび受台のPC鋼線把持部の角度が鋭角になるとPC鋼線が損傷するため、けん引ジャッキの盛替えが必要となる。そこで、マシン受台の外周部に円形のガイドを設置し、PC鋼線はガイドに沿ってけん引して把持部の鋭角化が発生しない配慮をした（図-15、図-16）。

(4) マシン引上げ方式による工期短縮

通常、マシンの設置高さを上方にする場合、油圧ジャッキでマシンを下方から押し上げ、マシン下部と床面の間に鋼材を挿入して、順次リフトアップすることが多い。この場合、油圧ジャッキのストローク量により押し上げ回数が決まり、その回数が多い場合は工期が長くなる。本工事では、マシン受台の下に挿入した引上げ桁とマシン側方に設置した支柱上のセンターホールジャッキをPC鋼棒で接続して引き上げる方法を採用した（図-17）。センターホールジャッキは連続的に引上げ・保持できるため、引上げ作業が1日で完了でき、大幅に工期を短縮することができた。

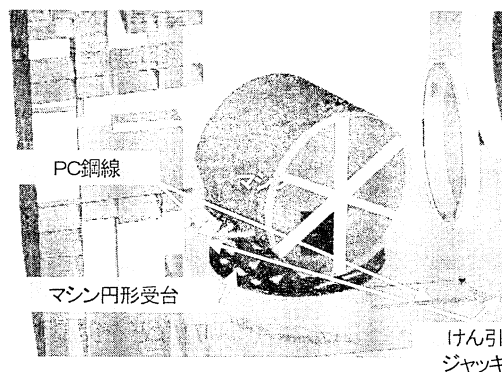


図-16 マシン回転

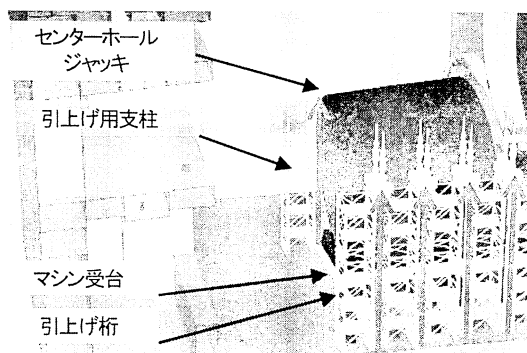


図-17 マシン引上げ

8. 地上到達の課題と対策

シールドマシンの地上到達時に想定される課題やリスクを地上発進の実績を踏まえて事前に抽出し、設計および施工における各種対策を以下のように講じた。

(1) 浮上り対策

地上発進時と同様に、トンネル上部に盛土の施工が可能であったため、他工種で発生する残土を利用して盛土を実施した。なお、到達位置が既設構造物の立体交差道路により盛土高さに制限があったため、換気所工事で掘削した砂礫土を利用して単位体積重量の大きな土砂により浮上りに抵抗する上載荷重を確保した(図-18)。

(2) 切羽土圧、裏込注入圧管理

地上発進と同様に、切羽の管理土圧は土圧(静止土圧)＋水圧(静水圧)以上に設定し、チャンバー内に複数設置した土圧計のうち掘削断面の最上段の土圧計を管理ポイントとして調整管理した。

盛土材が砂質土であるため、切羽からの加泥材や裏込注入材が、容易に流出することが予想されたため、予備圧を通常の 30kPa から小土被り区間では 20kPa に設定した。さらに、掘進中の土圧変動幅についてもマシン運転手と連絡を取りながら、最小となるよう管理した。

また、常時監視員を盛土上に配置して、流出が確認された場合は即座に圧力調整を実施した。

その結果、既設構造物である立体交差道路や周辺地盤の変状を引き起こすことなく、安全に地上到達することができた(図-19)。

9. おわりに

本工法は今回の施工を通し、重要構造物との超近接施工や、高水圧下における換気所到達などを実証するとともに、今までに例のない発進／到達立坑を必要としない

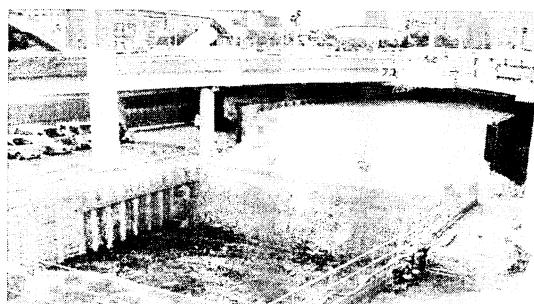


図-18 地上到達位置盛土



図-19 地上到達状況

URUP工法を実際の現場において実証したことにより、新しいシールド工法を確立できたと考えられる。

今後、重層的な土地利用が進む高密度な市街地においては、立体交差への適用など本工法が有効な工法であり、CO₂削減にも大きく寄与した。

また、品川線の整備工事では、今回紹介した地上発進・地上到達シールド工法の他に、本線シールド工事において約 100 万 m³の残土運搬に船を活用することでCO₂削減として約 70%削減(陸送比)を実現している。今後も、環境負荷の低減を図りつつ中央環状品川線の平成 25 年度の完成を目指していきたいと考えている。

謝辞：最後に、本工事にあたり、施工の主要段階において、種々の技術的アドバイスをいただいている施工監理委員会並びに関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 中央環状品川線工事概要パンフレット
- 2) Fujiki, Nakamura, Izawa : URUP method the first shield tunneling method for launching and arrival at the ground level, *ITA-AITES World Congress2009*, CD-ROM, 2009.
- 3) 藤本仁成, 井澤昌佳 : 都市高速品川線で採用した世界初のシールド工法(URUP 工法), 第 28 回日本道路会議, CD-ROM, 2009.
- 4) 後藤広治, 水内満寿美, 後藤義宜 : シールドの地上発進とその対策, 土木学会論文集, CD-ROM, 2011.
- 5) 後藤広治, 水内満寿美, 河口琢哉, 瀧本紅美 : 大断面泥土圧シールド掘進時の軟弱地盤の挙動について, 土木学会論文集, CD-ROM, 2011.
- 6) 五十嵐央, 潮田知史, 河口琢哉, 斎藤健司 : 大断面シールドのUターン施工における工期短縮, 土木学会論文集, CD-ROM, 2011.