

都市部河川直下におけるNATMによる接続トンネル施工

東京都第二建設事務所 品川線建設事務所 非会員 後藤 広治 五十嵐 央 磯島 磨
 大林・新館建設共同企業体 正会員 ○柴田 勝央 大浦 道哉 伊藤 憲男
 (株)大林組 生産技術本部 正会員 高橋 正登

1. はじめに

近年、コスト削減、周辺環境への配慮を目的に長距離シールド工法の開発が著しい。それにとともに、シールドトンネルとの接続を大深度で造る工事も増えている。首都高速中央環状品川線は、高速湾岸線大井ジャンクションから中央環状新宿線および高速3号渋谷線大橋ジャンクションに接続する延長約9.4kmの自動車専用道路である。同路線は都心部の慢性的な交通渋滞緩和、沿道の環境改善のため平成26年3月の開通を目指して工事が進められている(図-1)。

本工事は、既に構築が完了している南品川換気所と本線シールドトンネルを接続する2段2列の4連併設換気ダクトトンネルを大深度で非開削工法のNATMにより構築するものである(図-2,3)。施工位置が目黒川直下かつ高被圧水下での施工のため、万一羽が崩壊した場合にはトンネルの水没や河川へ甚大な影響を及ぼすことが懸念された。また、現場周辺は、工場、寺院、オフィスビル、住宅などが複合した区画であり、施工に伴う変状防止など周辺環境に配慮した施工が求められた(写真-1)。

本報では、都市部の河川直下でNATMによる接続工の本体構造の変更経緯、補助工法の検討および施工結果について報告する。



写真-1 工事箇所周辺環境

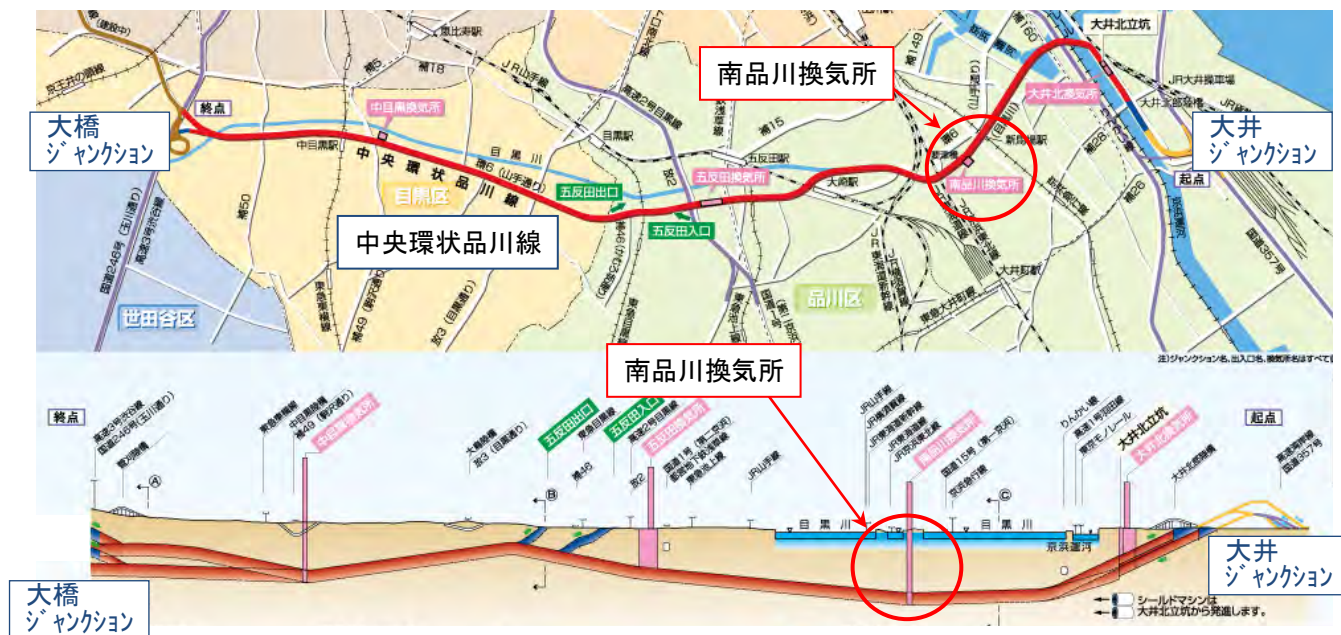


図-1 中央環状品川線 路線概要図

キーワード NATM, 薬液注入工法, 高圧噴射攪伴工法

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南2丁目15-2 品川インターシティB棟 (株)大林組 TEL 03-5769-1846

2. 工事概要

- ① 工事名称：中央環状品川線南品川換気所ダクト接続工事
- ② 発注者：東京都
- ③ 施工場所：東京都品川区南品川四丁目地内
- ④ 工期：平成22年11月12日～平成24年3月27日
- ⑤ 主要工事数量：表-1 参照

表-1 接続部 主要工事数量

項 目	仕 様	数 量
高圧噴射攪拌工法	側壁部 Superjet 工法 $\phi 3.15\text{m}$, $L=8.609\text{m}$	32 本
	底版部 Superjet 工法 $\phi 3.15\text{m}$, $L=3.400\text{m}$	20 本
薬液注入工法	二重管ダブルパッカー工法 溶液型有機系	1,087 本 2,123k ℓ
	低圧浸透注入工法 溶液型有機系	644 本 190k ℓ
トンネル掘削工	上部トンネル $\phi 4.40\text{m}$	東側 10.6m 西側 10.6m
	下部トンネル $\phi 4.40\text{m}$, $\phi 5.90\text{m}$	東側 34.5m 西側 33.8m
鉛直ダクト工	上・下部トンネル接続部 鋼製セグメント $3.0\text{m} \times 5.6\text{m}$	$L=8.5\text{m}$ 2 箇所
	本線接続部 鋼製セグメント $3.0\text{m} \times 3.5\text{m}$	$L=1.0\text{m}$ 2 箇所 $L=0.8\text{m}$ 2 箇所

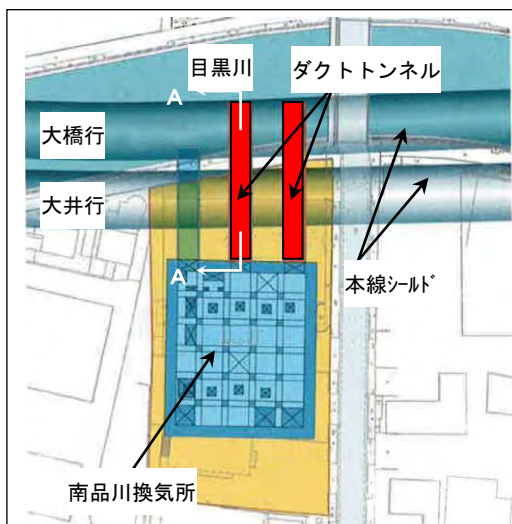


図-2 全体平面図

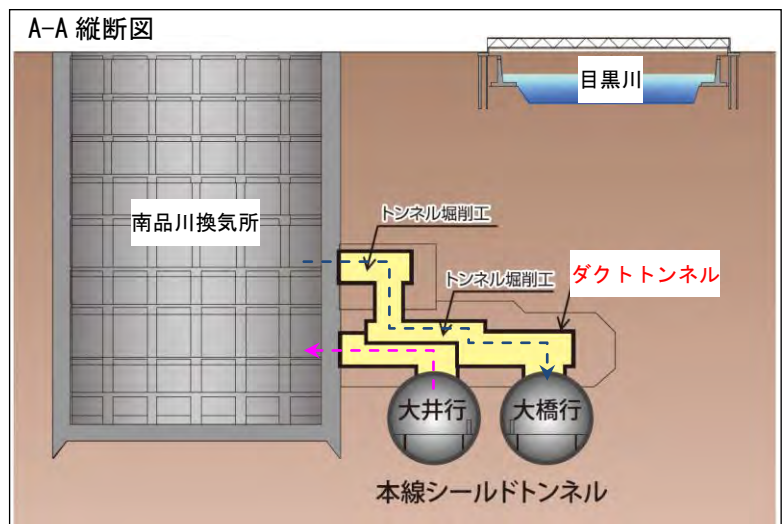


図-3 縦断面図

3. 補助工法の検討

(1) 地質概要

本トンネルの地質縦断面図を図-4に示す。土層構成は上部から埋土、沖積砂層、沖積粘性土層、東京礫層となっており、トンネル掘削深度は上総層群の砂質土層(Ks)と泥岩層(Kc)の互層である。

上部トンネルの地質は、砂質土層が主体であり、下部トンネルの地質は泥岩層が主体だが、不連続な介在砂層が縦亀裂で繋がっているため、透水性が高い地盤である。なお、介在砂層の透水係数は 10^{-3}cm/sec オーダーの値を示している。

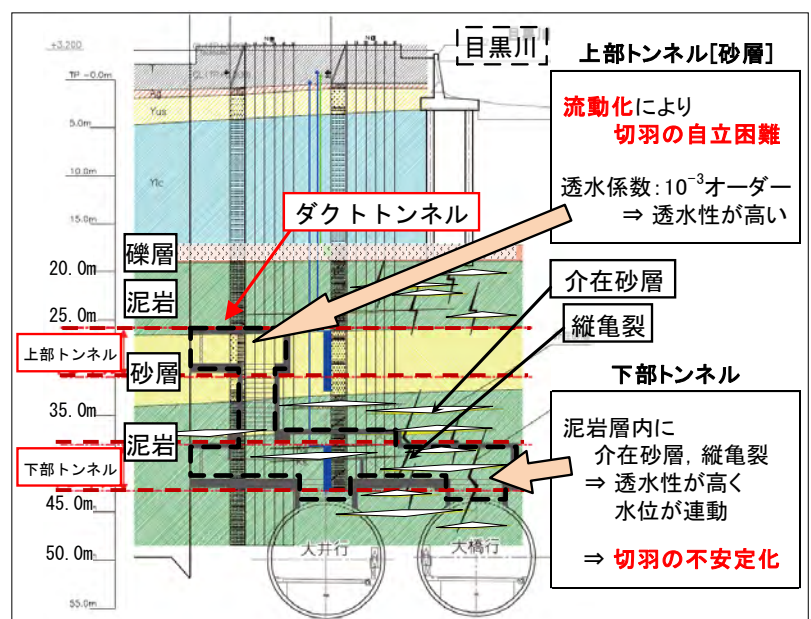


図-4 地質縦断面図

追加土質調査の結果、介在砂層は均等係数 2.8(4 以下)*¹、細粒分含有率 6.8%(10%以下)*¹、間隙比 1.031(0.45 以上)*¹、乾燥密度 1.327(1.75 未満)*¹であり、自立性に乏しいことが判明した。

被圧地下水位はT P +0.4m付近となっており、トンネル掘削位置での水圧は $P_w=0.3\sim0.4\text{MPa}$ の高水圧条件下での施工となる。また、泥岩層には縦亀裂があり、介在砂層の水位が連動しているものと想定される。

*1:()流動化指数 流動化の有無に関する判定指標

(2) 補助工法

高被圧水下でのトンネル掘削であり、介在砂層が自立性に乏しいことから、補助工法として止水と切羽安定および地山の緩み抑止の強度増加が必要であった。特に上部トンネルは砂層が主体であり、掘削に伴い湧水があった場合には地山が流動化し、切羽崩壊が生じる恐れがあった。

当初設計は、介在砂層部分に止水目的の薬液注入工法を行う計画だったが、地山安定化対策として、上部トンネル砂層の止水と強度増加を目的とした高圧噴射攪拌工法と、泥岩層と介在砂層の止水を目的とした薬液注入工で切羽の安定化を図った。

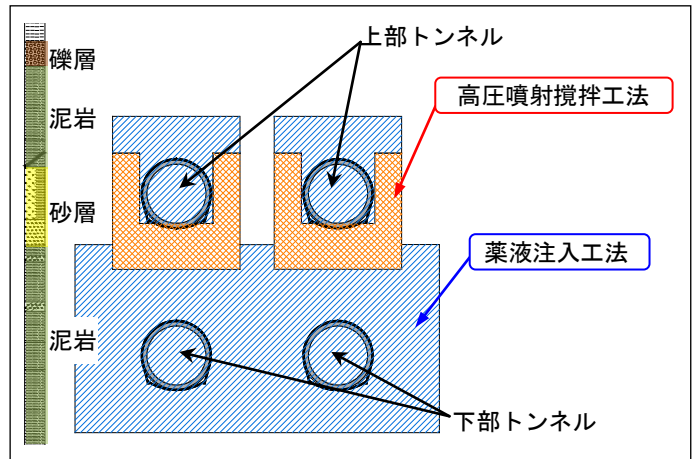


図-5 地盤改良横断面図

高圧噴射攪拌工法は、改良径が大きいため必要本数が少なく経済的な Superjet 工法とした (図-5)。

薬液注入工は、地上から 48m の削孔深度に対して二重管削孔により精度が確保でき、細かいステップで浸透性が高い緩結ゲルタイムの注入材のみを使用して確実な注入改良ができるダブルパッカ工法を採用した。河川下の改良は鉛直削孔部終了後、支障物を避けるように斜め削孔で対応した。また、本線シールド周囲はシールドトンネル内からの低圧浸透注入工法を併用した。

なお、薬液注入材は注入直後から長期にわたり固結強度が高く、大きな改良効果が得られる有機系薬液を使用し、注入率は砂質土層 31.5%、泥岩層 10.0%と設定した。

4. 換気用ダクトトンネルの計画概要

(1) 接続構造

換気所と本線シールドトンネルは、2段2列の4連併設換気ダクトトンネルで接続する構造となっている。大橋行は換気所のB6F、大井行はB8Fへの送気・排気ルートである (図-6)。

道路トンネルとは大橋行、大井行ともシールドトンネルの上部と鉛直ダクトで接続することとなる。

当初の接続構造は、必要換気容量よりトンネルの断面は 15.2m^2 となっており、送気ダクトと排気ダクトを別々のトンネルで接続させる計画となっていた。

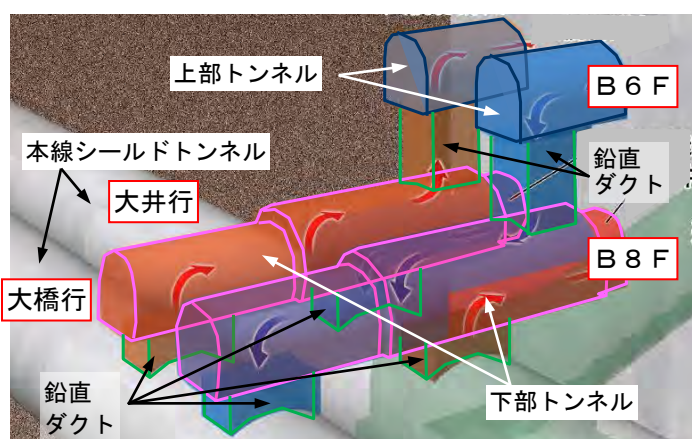


図-6 トンネル部 構造概要図

(2) 鉛直ダクト構造

上部・下部トンネルおよび本線シールドと接続する鉛直ダクト工は矩形の鋼製セグメント構造である。これにより、鉛直部の覆工コンクリートが不要であるとともに必要換気断面に対して掘削面積を縮小できる。

(3) ダクトトンネル形状変更

当初計画のトンネル形状では、補助工法の薬液注入施工時に目黒川護岸が支障し、上部トンネル先端部に未改良範囲が残ることとなった。

そこで、上部トンネルを縮小し換気断面を確保できる形状に本体構造を変更した。必要換気断面の 9m^2 を確保するために送排気が重なる箇所は仕切りの床板を設けて2段構造とした(図-7、表-2)。

これはシールド工法や推進工法のように同一断面しか掘削できない工法ではなく、NATMのように掘削途中での断面形状の変更が容易であったためできた構造変更である。

また、ダクトトンネル形状変更にともない、大橋行シールド本線と接続する鉛直ダクトが短縮されたことと上部トンネル延長が短縮されたことにより、掘削にともなうリスクが低減した。なお、変更形状における上部・下部トンネルを接続する鉛直ダクトにも矩形の鋼製セグメント構造を採用した。

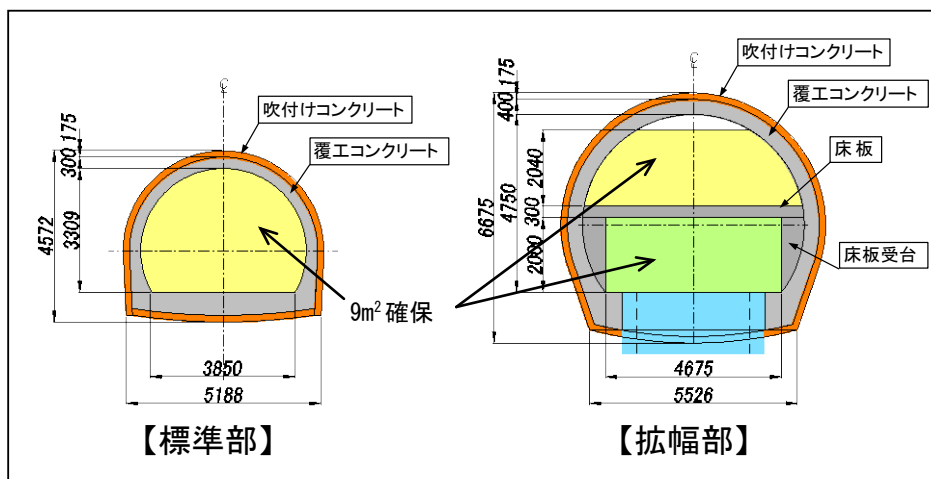


図-7 トンネル部 構造断面図

表-2 構造縦断面図・横断面図(新旧対比)

	当初計画	変更後
構造図		
地盤改良計画図		

5. 施工結果

(1) 全体施工順序

全体施工フローを図-8 に、全体施工順序図を図-9 に示す。

トンネル延長方向に2ブロックに分け、換気所側の地盤改良（高圧噴射攪拌工、薬液注入工）終了後、河川下斜め薬液注入工と並行してトンネル掘削を開始することにより工期短縮を図った。

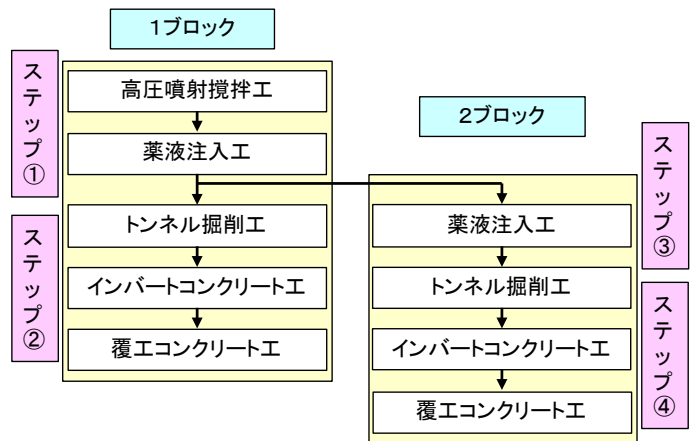


図-8 全体施工フロー

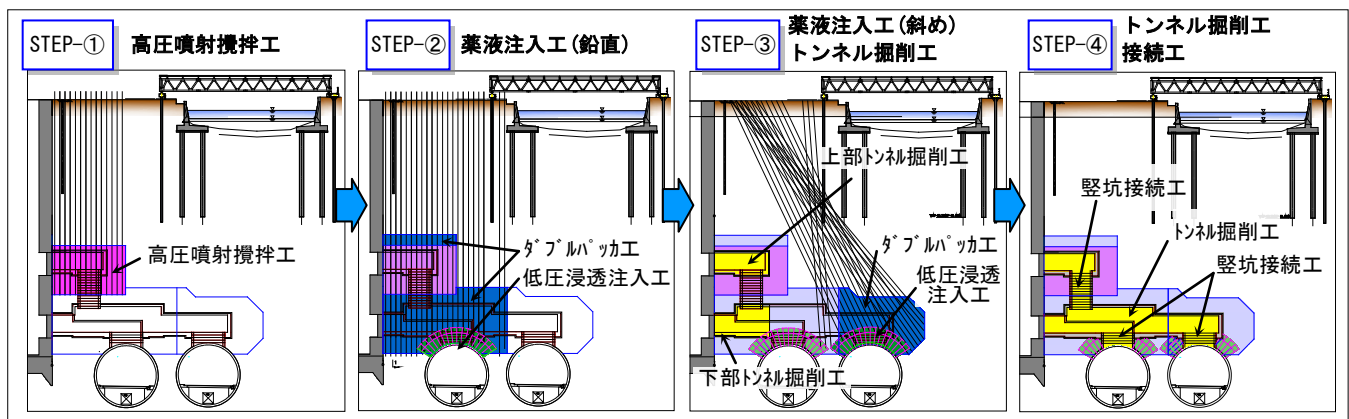


図-9 全体施工順序図

(2) 計測管理

河川護岸・周辺道路に近接した位置での地盤改良およびトンネル掘削による影響を監視するため、地表面沈下計測を実施した。計測位置を図-10 に示す。トンネル直上の護岸は水盛式沈下計で自動計測し、沈下の状態を直接監視できるように、LED 色で表示した（写真-1）。

また、本線シールドセグメントには計測器を設置し、セグメント主桁の応力、内空変位および鉛直変位を自動計測により把握し、健全性を確認しながら施工した。

坑内は5 m毎のA計測（内空変位、天端沈下測定）と湧水量測定によりトンネルの安定性を確認した。

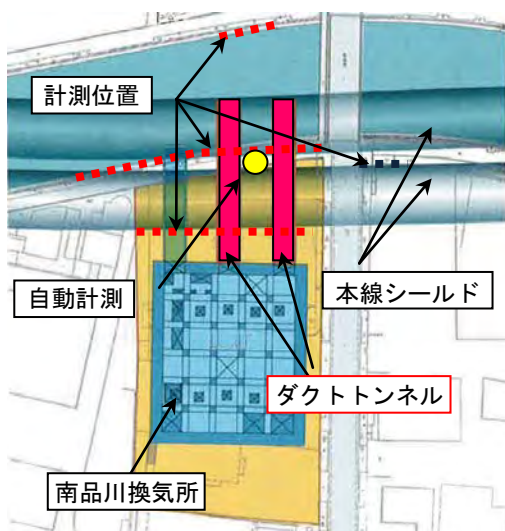


図-10 地表面沈下計測位置図



写真-1 管理レベル LED 表示状況

(3) 地盤改良

a) 高圧噴射攪拌工法

換算N値 100～150 の地盤かつ造成深度が 30m 以上の礫を含む砂質土のため設計造成径は $\phi 3.15\text{m}$ に設定した。施工管理として、改良体の出来形管理を以下の手法で行った。

・排泥量管理

計画量に対して 90%以上になるよう管理した。

・コアボーリングによる出来形確認

造成体の外周部（ $\phi 3.0\text{m}$ 箇所）においてチェックボーリングにてコアを採取し、フェノール反応にて出来形の確認を行った（写真-2）。

泥岩層と砂層の互層になっているが、改良対象範囲である砂層部分で所定の造成が確認された。

b) 薬液注入工法

薬液注入は注入量管理ではなく注入圧力管理とした。目標透水係数を $K=5.0 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ とし、管理注入圧が 1.2MPaになるまで注入を続けた。ケーソン側はニューマチックケーソン工法による沈設時の緩みの影響からか、設計量の約 1.5 倍の注入量となった。管理は圧力マップ図を作成し、追加注入の要否および範囲を判断する指標とした（写真-3、図-11）。

シールドトンネル内からの低圧浸透注入は、施工範囲全面に足場を設置して実施した（写真-4）。シールド掘進中である他工区の施工に支障を与えないとともに、広範囲を継続して注入することも可能となった。

河川下の斜め削孔管理として、ジャイロセンサを用いた孔曲がり計測を行った。削孔本数 100 本に 1 回測定し、1/100 以内の精度を確保できた。

注入効果の確認は、トンネル掘削前に水平ボーリング

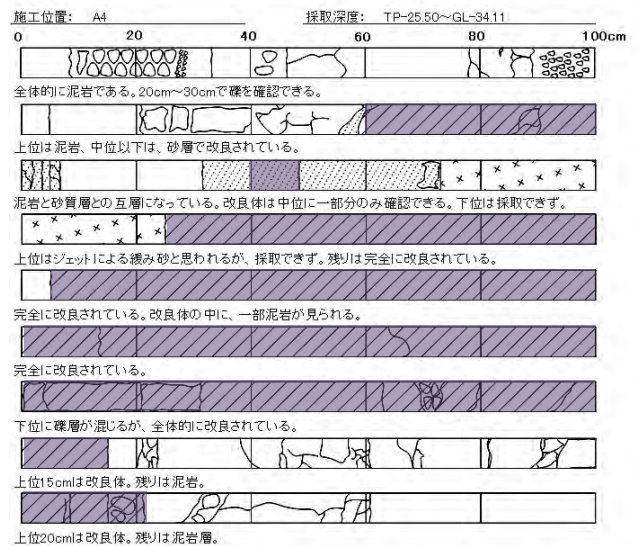


写真-2 コアボーリング調査結果

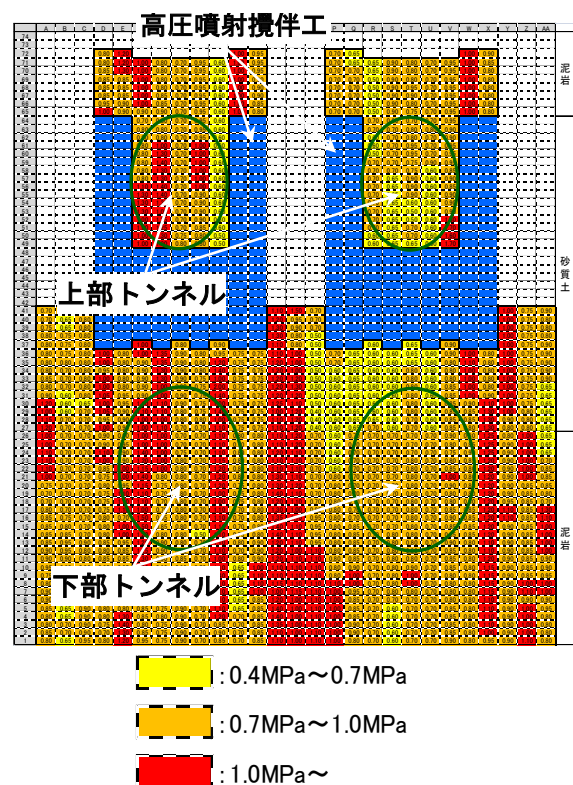


図-11 薬液注入 圧力マップ図



写真-3 薬液注入施工状況-1
(路上ダブルパッカ工法)

を行い、湧水量の測定を行った。削孔長 10m のボーリング孔からの湧水量が 1ℓ/min 以下であることを確認した。また、現場透水試験を行い注入後透水係数が目標値以上であることを確認できた。

低圧浸透注入範囲では、シールド本線からチェックボーリングを行い、湧水量が 1ℓ/min 以下を確認した。

(4) トンネル掘削

トンネル掘削は、注入効果が確認でき、切羽前方の薬液注入施工の影響が及ばない範囲（薬液注入施工箇所 6m 後方）を順次進めた。地盤改良の効果により、透水係数が 10^{-5} cm/sec オーダーに改良でき、掘削完了後の湧水量は 0.2ℓ/min/m 程度であった。

上部トンネルの切羽状況を写真-5 に示す。切羽は自立し、安全にトンネル掘削を行うことができた。内空変位、天端沈下とも最大 5mm 程度で A 計測の管理レベル I 以内だった（図-11）。

また、地表面沈下に関しても、全施工期間を通して許容変位量 10mm 以内の 3mm（管理レベル II）で施工を進めることができた（図-12）。



写真-5 トンネル切羽状況



写真-4 薬液注入施工状況-2
(シールド内 低圧浸透注入工法)

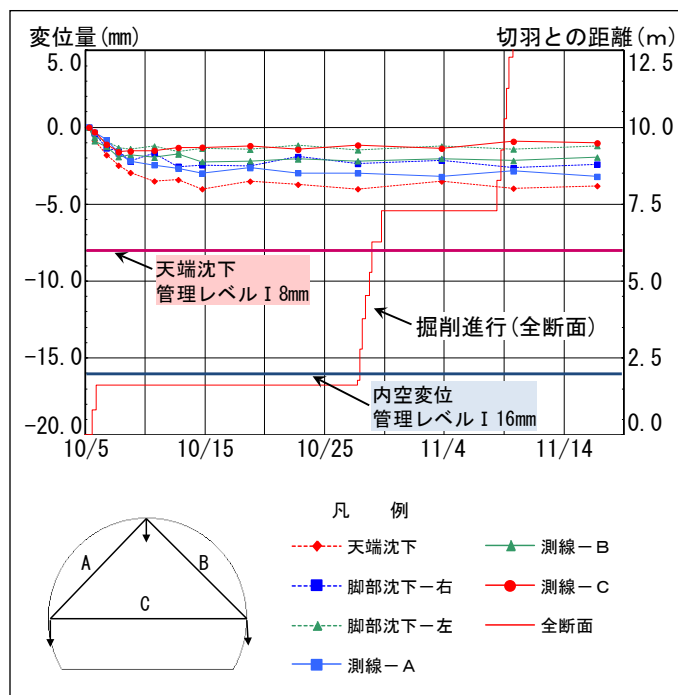


図-11 内空変位、天端沈下計測結果
(下段トンネル東側 23 基目)



写真-6 鉛直ダクト施工状況

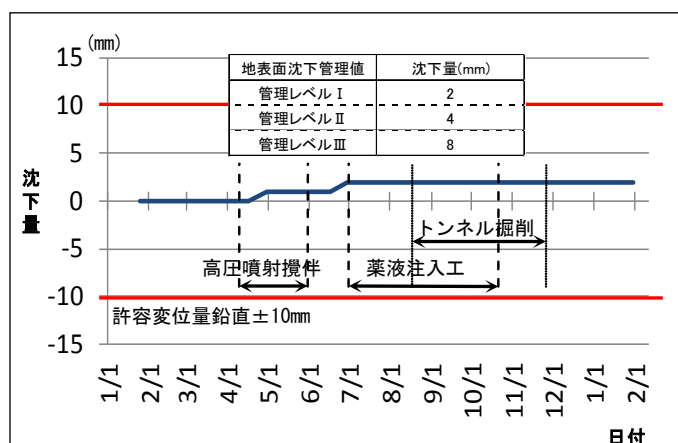


図-12 河川護岸沈下計測結果

(5) 鉛直ダクト，本線セグメント接続

鉛直ダクトの施工は，ダクトトンネルの覆工コンクリートを構築後，上部から下方へ掘削，組立を行った．鉛直ダクトと本線の接合部は，止水鋼板の溶接で閉塞した．薬液注入による地盤改良効果により，安定した掘削を行うことができた（写真-6）．本線シールドの変位も管理値以内であった．

6. おわりに

補助工法の地盤改良では，高圧噴射攪拌工法と薬液注入工法の代表的な2工法を採用したが，地盤改良工法は地中深くの目視できない箇所での施工のため，施工管理および出来形確認が非常に重要であることを再認識した．

また，都市部での施工のため計測管理による影響把握は勿論であるが，不測の事態を想定したリスク管理も重要であると考ええる．

本事例が，今後の都市部における大深度接続工事を行う際の一助となれば幸いである．



写真-7 覆工完了状況



写真-8 本線接続状況