

2本のシールドトンネルを用いた地中拡幅工法による道路トンネル分岐・合流部の設計・施工

小倉 靖之¹・名倉 浩²

¹株式会社安藤・間 土木事業本部 技術第一部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

²株式会社安藤・間 土木事業本部 技術第一部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

本工事は、外径φ12.3mの本線シールドトンネルと外径φ9.5mの連結路シールドトンネルをセグメント離隔0.5mで併設し、トンネル間を地中拡幅して分岐・合流部を構築するものである。施工箇所の地質は、均質な上総層群の泥岩層であり、地中拡幅の施工法として山岳工法を採用した。また、覆工構造は、耐久性や止水性に優れ、工程の短縮が図れる鋼製拡幅セグメント（アーチ鋼殻）を採用した。本稿では、本工法による分岐・合流部の設計と施工方法、覆工や周辺地盤等の挙動について報告する。

キーワード シールドトンネル、地中拡幅、分岐・合流部、山岳工法、鋼製拡幅セグメント

1. はじめに

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分岐して、中央環状新宿線および首都高速3号渋谷線に大橋ジャンクションで接続する全長約9.4kmの路線である。沿道への影響を低減するため、路線の約9割でシールドトンネル構造を採用している。このうち大橋連結路は、大橋ジャンクション（図-1）の一部として品川線本線トンネルと分岐・合流部を形成する連結路トンネルである。

この分岐・合流部の計画にあたり、外径φ12.3mの2車線断面の本線シールドトンネルを上下2層に配置し、GL-20～50mの深度で本線シールドトンネルを切開いて3車線断面を確保する必要があった。しかしながら、地上は日交通量4万台の幹線道路であり、その沿道にはビルが林立し、陸橋や河川などの重要構造物があることから、

中央環状新宿線で採用した地上からの開削工法による切開き施工は困難であった。

そこで、沿道の交通等への影響を抑えるために、並走する2本のシールドトンネルを利用した新たな地中拡幅工法を開発・適用した。その施工法の概要は以下のとおりである。

最初に、大橋ジャンクション側から1車線断面の連結路トンネル（外径φ9.5m）をシールド工法で施工し、分岐・合流部区間では0.5mの非常に近接した離隔で本線トンネルを並走させる。次に連結路トンネル先端でシールド機内部を解体したのち、シールド機外筒を起点と



図-1 大橋ジャンクションの概要¹⁾

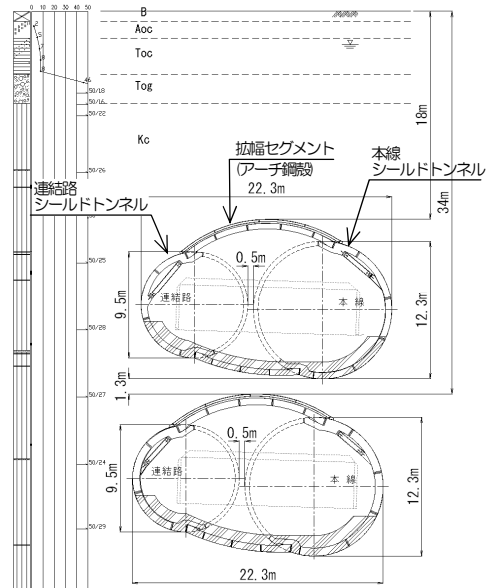


図-2 分岐・合流部断面³⁾⁵⁾

して、左右の本線、連結路トンネルの間の扁平な空間を上層、下半の順で山岳工法により掘削し、両トンネル間をアーチ状の鋼製拡幅セグメント（以下、アーチ鋼殻）で接合する。そののち、本線・連結路トンネル間の地山ならびにセグメントを撤去することで、幅22.3m×高さ14.0mのほぼ楕円形状となる3車線断面に対応したセグメントによる覆工構造が完成する。上層トンネルは延長210mの合流部、下層トンネルは延長180mの分流部となる。トンネルの土被りはそれぞれ18m、34mであり、上下層のトンネル間の離隔は1.3mの大断面かつ超近接したトンネルである（図-2）。

2. 分岐・合流部の概要

(1) 地質

対象箇所の地盤は、新第三紀鮮新世～第四紀更新世の上総層群の泥岩（Kc）を基盤岩とし、その上位に第四紀更新世の東京層砂質土（Tos）、東京層粘性土（Toc）、東京礫層（Tog）および埋土、ローム層、凝灰質粘性土などの地表層（B）が分布した地盤である。とくに、GL-9m以深にはKc層が厚く堆積している。このKc層はおおむね均質であり、一軸圧縮強度は2000kN/m²程度で自立性が高い。また、介在する砂層が存在するものの、数cmの薄い層であり湧水量がほとんど認められない。分岐・合流部はトンネル全体がこのKc層に位置している（図-2）。

(2) 覆工構造

分岐・合流部は、大断面、大深度かつ超近接した上下2層のトンネル構造となる。そのため、周辺環境へ配慮した施工方法を選定するとともに、耐力、耐久性や止水性に優れた覆工構造を選定することが課題であった。従来、切開き部の覆工構造には、場所打ちコンクリート躯体が採用されていたが、本工事では、本線と連結路の間をアーチ鋼殻で接合する新しい覆工構造（TYPE-C：本線・連結路一体型）を採用した（図-3）。

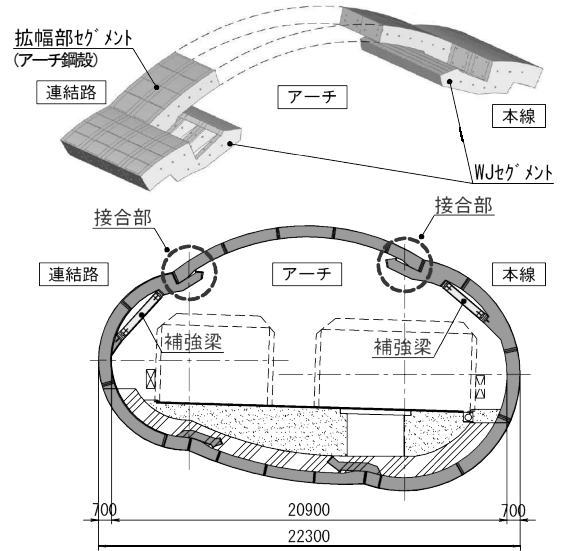


図-3 覆工構造（アーチ鋼殻）²⁾⁴⁾⁵⁾

構造の特長は、以下のとおりである。

- ① 複数のアーチから構成される合理的かつコンパクトな楕円形状（断面積約250m²）をしており、ボックスと円形断面を組み合わせた従来の開削切開き構造に比べ、断面力を大幅に低減することができる。
- ② 鋼製セグメントから構成されたトンネル覆工とすることにより、高い耐力と止水性、耐久性の確保ができる。また、狭隘空間での施工性が向上し、覆工コンクリートに比べて工程の短縮が可能である。
- ③ アーチ鋼殻と本線または連結路トンネルのセグメントが折れ角をもって交わる接合部は、応力が集中しやすく、部材厚が厚くなる傾向にある。そのため、接合部に補強梁を設けることで部材厚を低減し、鋼製セグメントの軽量化を図っている。

なお、図-4に示すように左右のトンネルの離隔が連続的に変化する分岐・合流部の付け根付近ではコンクリート躯体で2本のトンネルを接合・支持する1本柱構造（TYPE-D：一本柱型）、拡幅量が小さい分岐・合流部の先端では本線トンネル側部を掘削し、拡幅セグメントにより閉合する卵型をした地中拡幅工法（TYPE-B：本線拡幅型）を併せて開発・適用した。

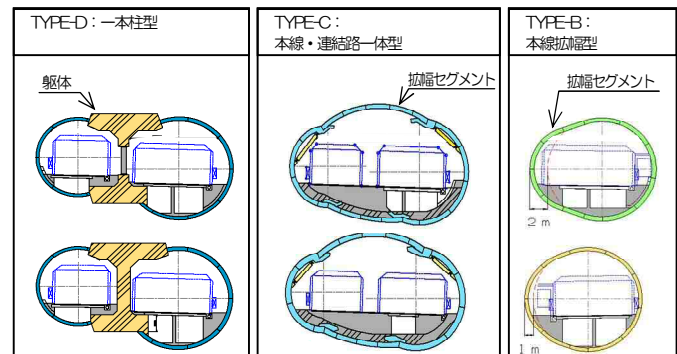
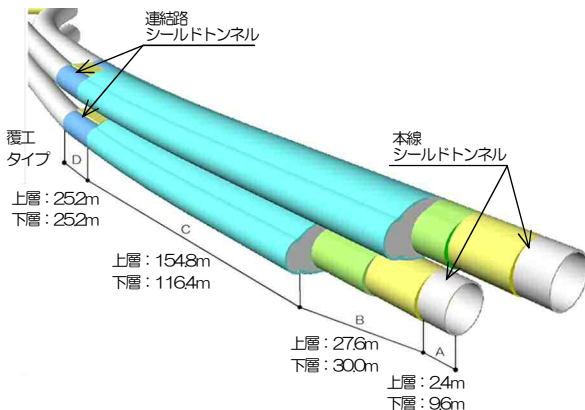


図-4 分岐・合流部の覆工構造⁴⁾

(3) 施工手順

地中掘削の施工手順を図-5に示す。また、施工状況を写真-1に示す。

地中に残置される連結路シールド機の外筒部に開口を設置して地中掘削の地中発進基地とし、上半部から鋼アーチ支保工と吹付モルタルによる一次覆工を用いた山岳工法による掘削を行う (STEP1)。上半部の掘削完了後、専用のセグメント組立装置で上半部のアーチ鋼殻を組み立てる (STEP2)。その後、下半部も同様にシールド機を地中発進基地として掘削を行い (STEP3)、下半部のアーチ鋼殻を主として人力で組み立てる (STEP4)。上下のアーチ鋼殻を全て組み立てて構造的に安定した後、連結路と本線の間の中間地山を掘削し、シールドトンネルの仮設用セグメントを撤去する (STEP5)。その後、下半部に底版コンクリートを打設して覆工が完成する。最後に内部支保工を撤去し、道路床版などの内部構造物を構築して分岐・合流部が完成する (STEP6)。

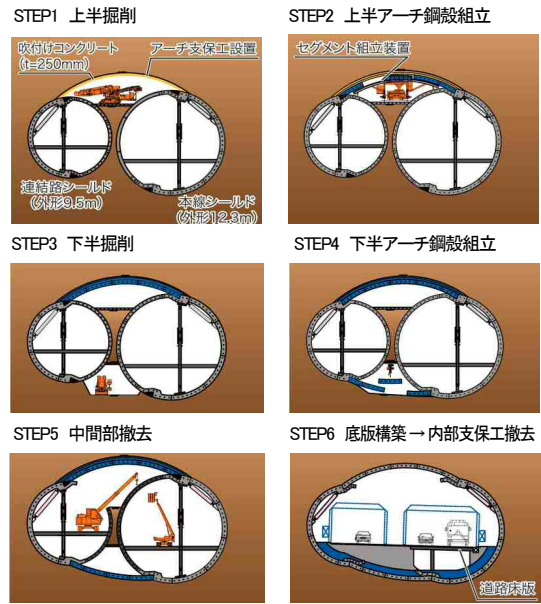


図-5 施工手順³⁾⁴⁾

3. 覆工構造の設計概要

(1) 設計手法

本体構造物である鋼製セグメントは、組立後にシールドの近接施工や切開き掘削等のさまざまな構造の変化と施工過程の影響を受けて完成構造物となる。そのため、セグメント設計はこれらを考慮した逐次解析を実施した。

(2) 荷重条件

逐次解析で考慮する施工時および完成時の荷重条件を表-1に示す。また、施工時 (上半掘削時) の荷重分布図を図-6に示す。

a) 土圧

粘着力が卓越する当該地盤では、テルツァギーの緩み土圧式を適用した場合、鉛直土圧が生じない結果とな

表-1 荷重条件⁵⁾

	土 圧		水 圧
	鉛直土圧	水平土圧	
施工時	最小土圧(1D γ)	$\lambda = 0$	考慮しない
完成時	上層: 全土被り荷重 下層: 最小土圧(1D γ)	$\lambda = 0.35$	地下水位 GL-3.0m

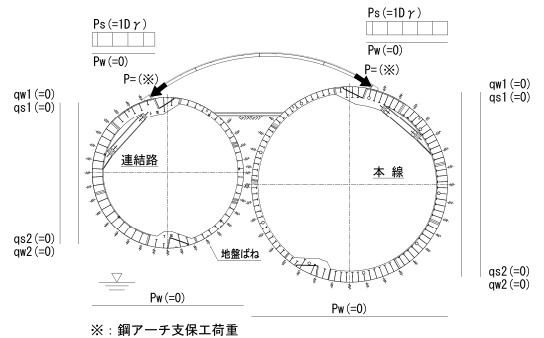


図-6 荷重分布図 (上半掘削時)⁵⁾



写真-1 施工状況

る。そのため、施工時の鉛直土圧は、最小土圧として $1D\gamma$ ($D=22.3\text{m}$, $\gamma=19.0\text{kN/m}^3$) を考慮した。また、施工時の水平土圧は、自立性の高い地盤であることと、鉛直荷重によるトンネルの横つぶれを抑制する危険側の荷重設定になると判断し考慮していない。

b) 水圧

施工時は山岳工法を適用するため水圧は考慮しない。完成時は、ボーリング調査の孔内水位を用いて、地下水位をGL-3.0mに設定した。

c) 鋼アーチ支保工荷重

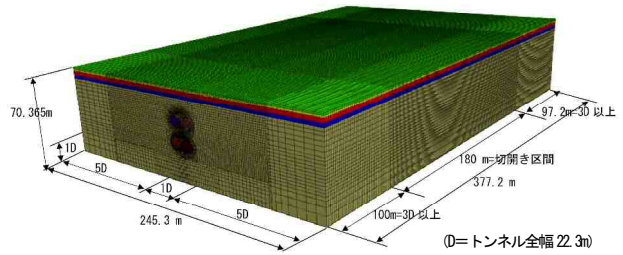
施工手順を反映した2次元FEM解析により鋼アーチ支保工に発生する軸力を算出し、その軸力を施工時の荷重として鋼製セグメントの載荷面に作用させた。

(3) 実証試験

新しい覆工構造を採用するにあたり、写真2に示す上半1/2スケールの載荷試験を行い、接合部を含めた覆工全体の力学的挙動や設計手法、補強梁の有効性を確認し、覆工構造の成立性を検証したうえで工事に適用した²⁾。



写真2 1/2スケール載荷試験



4. 施工方法の検証および安定対策

(1) 中間地山の安定性

当該地盤の切開き施工に山岳工法を適用するにあたり、安全性を確認するためのさまざまな検討を行った³⁾。

上半および下半掘削時のトンネルの変形や移動、回転等に対する支持はトンネル間の中間地山のみであり、トンネル全体の安定性を確保するうえで中間地山は極めて重要な箇所である。そのため、3次元FDM解析(有限差分法)による掘削時の中間地山の評価を行い、破壊安全率が1.0以上を確保できることを確認した。また、連結路トンネル内からの地山探査を事前に行い、中間地山に空洞や顕著な緩みなどの不良箇所がないことを確認した(図-7)。

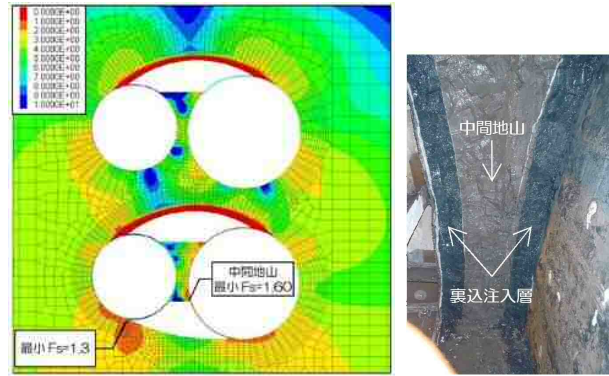


図-7 3次元FDM解析モデルと地山の破壊安全率³⁾

(2) トンネル安定対策

a) 下半掘削時の安定対策

下半掘削時には、図-8に示すように連結路および本線トンネルの下部を大きく掘削することとなる。とくに連結路側はトンネル断面の約半分を掘削するため、掘削に伴うトンネルの変形や移動が懸念された。そこで、安定対策として下半掘削を二段階で行うこととした。まず、1次掘削で充填ピース先端までの掘削を行い、2次掘削はブロック施工とした。2次掘削の掘削延長を区切り、掘削範囲をアーチ鋼殻を組み立てる箇所限定することで、変形等の抑制を図った。

b) 並行作業の制限

上層トンネルの下半部と下層トンネルの上半部の離隔は図-8に示すように1.3mとなる。そのため、下半掘削時

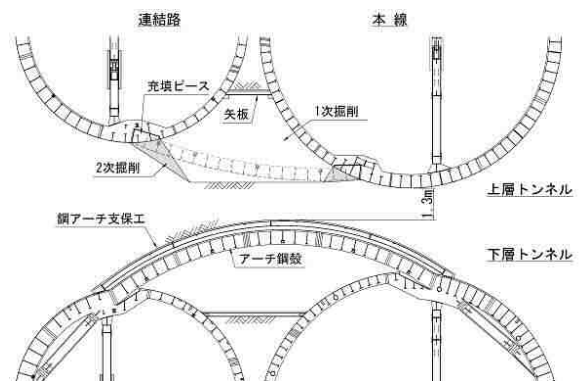


図-8 下半の掘削方法⁵⁾

のトンネルおよび周辺地盤への影響を抑制する手順として、上層の下半掘削は、下層上半のアーチ鋼殻組立が完了した後に行うこととした。また、上・下層トンネルともに、下半掘削は、それぞれのトンネルの上半アーチ鋼殻組立が完了し、覆工構造の安定度が高まった後に着手する手順とした。

5. 施工

(1) アーチ鋼殻の施工

a) アーチ鋼殻の製作

本線・連結路のシールドトンネルは、それぞれ調整セグメント等を利用して設計で保証する施工精度を満足するように施工を完了した。しかしながら、2本のトンネルをつなぐアーチ鋼殻はプレキャスト部材であり、現地合わせの寸法調整ができないため、施工が完了したトンネルの出来形を製作に反映する必要があった。

そこで、複数のピースからなるアーチ鋼殻のうち、既存の2本のトンネルと接続する両端部の2ピースを、出来形を反映した寸法で製作した。具体的には、既設トンネルに対する精密な測量結果にもとづき、端部ピースに対してローリング、ピッチング、弧長等の修正を行い、アーチ鋼殻の全体の出来形を確認しながら、個々の端部ピースの形状と継手板のボルト穴の位置を決めたうえで、製作を行った。このような複雑かつ精密なプロセスに対応するため、ピースどうしの立体的な干渉の確認、寸法調整および原寸図作成を自動化できる3次元の作図プログラムを活用し、一連の製作工程を短縮した(図-9)。

b) 上半部のアーチ鋼殻の組立

上半部のアーチ鋼殻の組立は、狭隘な坑内でセグメントを上向きに組む必要があることから、専用のセグメント組立装置を開発・製作した⁴⁾。装置は、セグメント運搬を行うターンテーブル付のトラバースと、セグメントを揚重するセグメントリフト、セグメント形状保持装置、セグメントを把持して所定の場所に組み立てるエレクターで構成される。本線側の端部ピースの接続を先行させ、連結路側の端部ピースは、既設連結路トンネルにあわせ現地で継手板に孔あけ加工を行って接合した。

アーチ鋼殻の組立後、山岳工法による一次覆工とアーチ鋼殻との隙間に裏込め注入を行い、アーチ鋼殻を地山に密着させた。これらの作業をセグメントリングごとに繰り返し、上半部の覆工を完了させた。

(2) 計測結果

シールド施工時および切開き施工過程における構造安全性・設計妥当性の確認、掘削地山や支保工の安定性等の把握を目的として、天端や内空変位、鋼殻に発生する応力、支保工の応力等の計測を行った。以下に施工状況と合わせて代表的な計測結果を示す。

a) 覆工の挙動

下層トンネルのセグメントおよび補強梁の断面力分布(曲げモーメント図、軸力図)を図-10に示す。

上下半部掘削時には、掘削に伴いトンネル全体の軸力が抜けるとともに、掘削開放面にトンネルが変形する挙動が確認された[①]。上下半の掘削開放面は負の曲げモーメント、中間地山は正の曲げモーメント分布となることから、中間地山が確実に両トンネルを支持しているこ

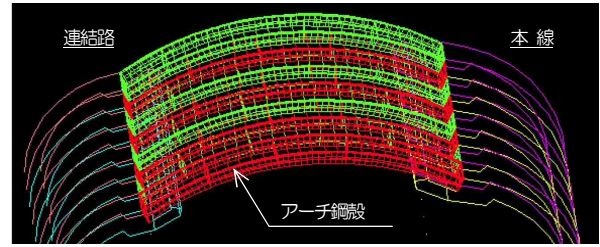


図-9 3次元作図プログラム⁴⁾

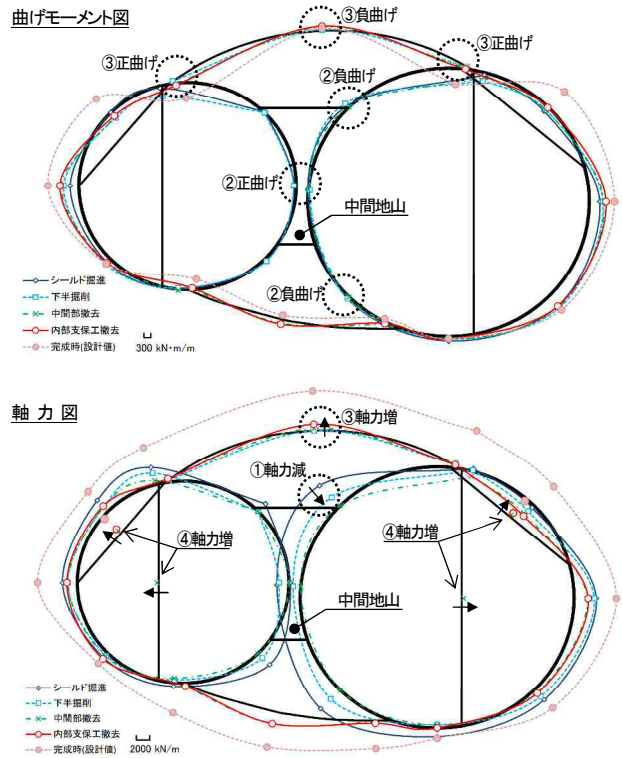


図-10 断面力分布(下層トンネル)⁵⁾

とが確認できる[②]。

中間部撤去時には、撤去に伴いアーチ鋼殻に軸力が導入され、頂部は負の曲げモーメント、端部は正の曲げモーメント分布となった[③]。内部支保工と補強梁にも軸力が伝達し、荷重の受け替え挙動を確認することができた[④]。

b) 地盤の挙動

図-11に内部支保工撤去後の層別沈下計による地中変位の深度分布を示す。前述の3次元FDM解析による解析値と比べて、計測位置①～③は比較的一致し、計測位置④～⑥は小さい値を示した。計測位置③と④の間で変位分布が変化しているが、ボーリング調査からGL-14m付近に厚さ10cm程度の介在砂層が確認されていることから、変位分布の変化はその影響と推察される。地中変位は下半掘削までに収束し、中間部撤去、内部支保工撤去による進行は見られなかった。なお、地表面変位は最終数mm程度で、地下水位の変動も見られなかった。

6. おわりに

本工事は、密集市街地において山岳工法を用いたシールドトンネルの地中拡幅工法を適用し、大断面・大深度および超近接上下2層の分岐・合流部をつくる前例のない厳しい条件下の施工であった。しかし、施工段階ごとの検討を積み重ね、慎重に工事を進めることで無事完成を迎えることができた。また、トンネル間をアーチ鋼殻で接合するといった新しい試みにより工程短縮を実現し、かつ、地表面沈下など周辺環境への影響も最小限に抑えるなど、安全に工事を完了することができた。

大都市圏における高速道路等の建設にあたっては、環境対策からシールド工法によるトンネル構造を適用する事例が増えている。その際、断面変化をとまなう地中における分岐・合流部の施工法が技術面の最大の課題である。今後、大深度地下利用の進展に伴い、民地下かつ高水圧下というように大都市圏の道路トンネルの施工条件はますます厳しくなるものと予想される。

本工事では、対象地盤が自立性が高く均質なKc層であったために拡幅部の掘削に山岳工法を採用したが、砂層や礫層などの滞水地盤においても、その条件に応じた補助工法等を選定することで本工法を適用することは可能である。東京外かく環状道路（関越～東名）地中拡幅部における技術開発業務では、滞水地盤を対象とし、図-12に示すような小口径シールドによる先受けと止水を目的とした凍結工法を併用することで本工法の成立性が検証できている。

今後、環境保全をふまえたうえでの建設工事のコスト縮減、工期短縮といった社会的ニーズの高まりの中で、本工事で開発・実現した地中拡幅工法は、道路トンネル分岐・合流部の建設だけでなく、更なる大深度・大断面地下空間の建設に大きく貢献できる技術であると考えている。本工事の実績が、今後の同様のプロジェクトの参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 首都高速中央環状線 大橋ジャンクション, パンフレット, 首都高速道路株式会社
- 2) 石田高啓, 齋藤亮, 長田光正, 井上隆広, 小倉靖之: 道路シールドトンネル分合流部における覆工構造の合理化に関する研究, トンネル工学報告集, 第19巻, pp.257-262, 土木学会,

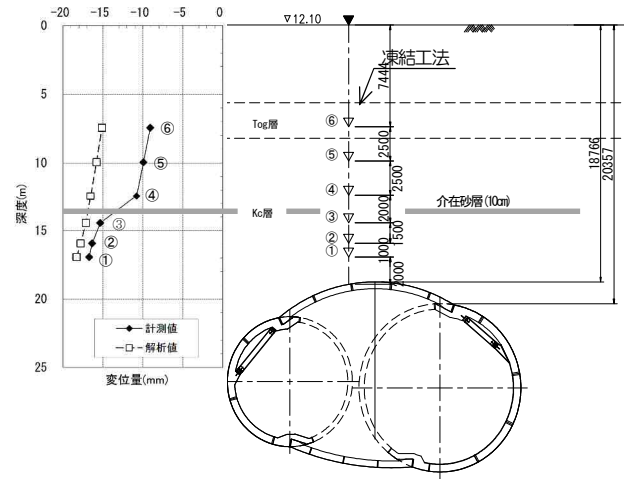


図-11 地中変位の深度分布⁵⁾

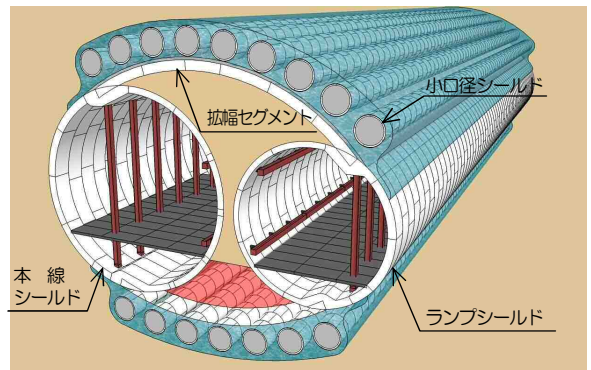


図-12 滞水地盤における本工法の適用例⁶⁾

2009.

- 3) 藪本篤, 深山大介, 井上隆広, 小倉靖之, 清水真人: 都市部山岳工法による道路トンネル分岐・合流部の設計・施工, トンネル工学報告集, 第23巻, pp.143-148, 土木学会, 2013.
- 4) 鈴木康洋, 佐々木順一, 越田健: 並走するシールドトンネルを非開削で一本化: 大橋連絡路, 建設機械施工, vol.65, No.10, pp.66-70, 日本建設機械化協会, 2013
- 5) 永井政伸, 島越貴之, 田原徹也, 小倉靖之, 清水真人: セグメントを用いた非開削切開き工法による道路トンネル分岐・合流部の設計・施工, トンネル工学報告集, トンネル工学報告集, 第24巻, 土木学会, 2014
- 6) 記者発表資料: 東京外かく環状道路（関越～東名）地中拡幅部における技術開発業務の業務成果, 国土交通省関東地方整備局ホームページ, 2015.12.22



合流部 (TYPE-D:一本柱型)



分岐部 (TYPE-C:本線・連絡路一体型)



テーパ先端 (TYPE-B:本線拡幅型)

写真-3 分岐・合流部完成状況