## 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

永井 政伸1・島越 貴之1・田原 徹也2・小倉 靖之3・清水 真人3

<sup>1</sup>首都高速道路㈱ 東京建設局設計課(〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-3) E-mail: m.nagai1310@shutoko.jp E-mail: t.shimakoshi87@shutoko.jp

<sup>2</sup>首都高速道路㈱ 東京建設局大橋工事事務所 (〒153-0042 東京都目黒区青葉台3-6-16) E-mail: t.tahara88@shutoko.jp

<sup>3</sup>正会員 (㈱安藤・間 関東土木支店土木部大橋出張所 (〒153-0042 東京都目黒区青葉台3-17-13) E-mail: ogura.yasuyuki@ad-hzm.co.jp E-mail: shimizu.masato@ad-hzm.co.jp

本工事は、外径12.3mの本線シールドトンネルと外径9.5m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、トンネル間を非開削で切開いて分岐合流部を構築する.施工箇所の地質は、均質な上総層 群の泥岩層であり、自立性の高い地山であることから、切開きの施工方法として山岳工法を採用している. 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を採用している. 本稿では、鋼製拡幅セグメントを用いた非開削切開き工法による分岐合流部構築の設計と施工方法、計 測から得られた覆工や周辺地盤等の挙動について報告する.

Key Words : shield tunnel, junction, underground enlargement, widening segment

### 1. はじめに

首都高速中央環状品川線大橋連結路は,首都高速3号 渋谷線と中央環状線とを接続する大橋ジャンクション (図-1)の一部で,中央環状品川線本線トンネルと分岐

本工事は、密集市街地の幹線道路である都道環状第6 号線(山手通り)の支線下にシールド発進立坑を開削工

合流部を形成する連結路トンネルである.



図-1 大橋ジャンクション概要図

法で設けたのち,シールド工法により外径9.5mの上下2 層の連結路トンネルを構築するものである.さらに,こ の連結路シールドトンネルに0.5mの離隔で併設する外径



12.3mの本線シールドトンネルを切開いて分岐合流部を 構築する.分岐合流部の構築は、沿道の交通等への影響 を抑えるために非開削工法を採用している.

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,上下トンネル間の離隔は1.3mの大 断面超近接トンネルである(図-2).

本稿では、この非開削切開き工法による分岐合流部の 構築に関して、その設計と施工方法、計測から得られた 覆工や周辺地盤等の挙動について報告する.

### 2. 分岐合流部の概要

### (1) 地質

対象地盤の地質は、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)が分布する.とくに、GL-9m以深に はKc層が厚く堆積している.このKc層は概ね均質であ り、一軸圧縮強度は2000kN/m<sup>2</sup>程度で自立性が高い.ま た、介在砂層が存在するものの薄層であり、湧水量がほ とんど認められない地層である.本線分合流部はトンネ ル全体がKc層に位置する.

### (2) 覆工構造

分岐合流部は、掘削断面積が約250m<sup>2</sup>の大断面、かつ、 大深度トンネルである.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る.従来、切開き部の 覆工構造には、場所打ち覆エコンクリートが採用されて いたが、本工事では、本線と連結路の間をアーチ状の鋼 製拡幅セグメント(以下、アーチ鋼殻)で接合する覆工 構造を採用している.鋼殻主体の覆工とすることにより、 高い止水性と耐久性の確保、プレキャスト化による狭隘 空間での施工性向上と工程の短縮を図っている.また、 アーチ鋼殻とシールド鋼殻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 ため、接合部に補強梁を設けることで部材厚を低減し、 鋼殻の軽量化を図っている(図-3).

### (3) 施工手順

地中に残置される連結路シールドマシンの胴体部に開 ロを設置して切開き工の発進基地とし、上半部から鋼ア ーチ支保工と吹付モルタルを用いた山岳工法による掘削 を行う(STEP1). 掘削完了後、本工事のために製作し たセグメント組立装置(写真-1)で上半部のアーチ鋼殻



図-3 覆工構造 (アーチ鋼殻)



写真-1 セグメント組立装置



写真-2 アーチ鋼殻組立

を組み立てる(STEP2)(写真-2).その後,下半も同様にシールドマシンを発進基地として掘削を行い(STEP3),下半部のアーチ鋼殻を組み立てる(STEP4).アーチ鋼殻が全て組み立てられた後,連結路と本線の間の中間部を掘削し、シールドトンネルの仮セグメントを撤去する(STEP5).セグメント撤去後,下半部に底版コンクリートを打設して本体構造物が完成する.その後,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-4).

### 3. 施工方法の検証および安定対策

### (1) 中間地山の安定性

上半および下半掘削時のトンネルの寄りや変形等に対 する支持機構はトンネル間の中間地山のみとなる.した がって、中間地山はトンネル全体の安定性を確保する上 で極めて重要な箇所である.そのため、切開き施工に先 立ち、三次元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<sup>1)</sup>.解析に用いた地盤条件を表-1, 解析モデルを図-5に示す.また、連結路シールド内か 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.

表─1 地盤条件						
	単位体積	粘着力	内部	ポアソン比	変形係数	
	重量 v(kN/m <sup>3</sup> )	$c(kN/m^2)$	摩擦角 す(deg)	υ	E (kN/m <sup>2</sup> )	
В	20.0	0.0	<u></u> (acg) 30.0	0.35	72,800	
Aoc	20.0	20.0	0.0	0.45	4,200	
Toc	19.0	122.0	14.0	0.45	11,200	
Tog	20.0	0.0	42.0	0.30	140,000	
Kc	19.0	710.0	14.0	0.35	527,000	



図-5 三次元 FDM 解析モデル

STEP1 上半掘削



STEP4 下半アーチ鋼殻組立

# STEP2 上半アーチ鋼殻組立 セグメント組立装置

### STEP5 中間部撤去



図-4 切開き施工手順

### (2) 下半掘削時のトンネル安定対策

### a) 2段階掘削およびブロック施工

下半掘削時には、図-6 に示すように連結路および本 線トンネルの下部を広範囲で掘削することとなる.特に 連結路側はトンネル断面の約半分を掘削するため、掘削 開放に伴うトンネルの変形や移動が懸念される.そこで、 安定対策として下半掘削を2段階で行うこととした.ま ずは、1次掘削(写真-3)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、アーチ鋼殻を組み立てる範囲に限定す ることで、変形等の抑制を図っている.

### b) 並行作業の制限

上層トンネルの下半と下層トンネルの上半の離隔は 図-6に示すように1.3mとなる.そのため、下半掘削時の 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、下層上半部のアーチ鋼殻組立が完了 した後に行うこととした.



STEP3 下半掘削



STEP6 底版構築 → 内部支保工撤去



また,上下層トンネルともに,下半掘削は,それぞれ のトンネル上半部のアーチ鋼殻組立が完了し,覆工構造 が完成した後に着手する手順とした.

### 4. 覆工構造の設計概要

### (1) 設計手法

本体構造物である鋼殻は、鋼殻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施工過程の影響を受 けて完成構造物となる.そのため、施工過程を考慮した 逐次解析により鋼殻の設計を行う.

### (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-2 に示す.また,施工時(上半掘削時)の荷重図を 図-7 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る. そのため、施工時の鉛直土圧は、最小土圧としてID γ

(D=22.3m, y=19.0kN/m<sup>3</sup>)を考慮する. また,水平土 圧は,鉛直荷重によるトンネルの横つぶれを抑制し,危 険側の荷重設定と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を考慮しない. 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に設定する.

### c) 鋼アーチ支保工荷重

鋼アーチ支保工に発生する軸力を施工手順を反映した 2次元FEM解析により算出し、その軸力を施工時の荷重 として鋼殻の載荷面に考慮する.

### 5. 施工結果

### (1) 覆工(鋼殻および補強梁)の挙動

下層トンネルの鋼殻および補強梁の断面力分布(曲げ モーメント,軸力)を図-8,9に示す.

a) 上下半掘削時

掘削に伴いトンネル全体の軸力が抜けるとともに,

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









図-8 断面力分布(曲げモーメント)



図-9 断面力分布(軸力)

掘削開放面にトンネルが変形する挙動が確認された. 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とが確認できる.下半 掘削後の中間地山の状況を **写真-4** に示す.中間地山に 変状はなく,健全な状態が保たれている.

また、図-10 に示す本線側下半掘削部(計測点⑥)の 鋼殻応力の経時変化からも、上半掘削で軸力が抜け、下 半の1次掘削、2次掘削と段階的に負の曲げモーメント が進行する挙動が確認できる.中間部の撤去時には応力 が開放されている.図-11 に計測機器の配置図を示す.

### b) 中間部撤去時

中間部撤去時の状況を 写真-5 に示す.中間部撤去に 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る.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る.

### c) 内部支保工撤去時

内部支保工の撤去に伴い補強梁および鋼殻に荷重が伝達,分散されることが確認された.内部支保工撤去ステップと補強梁軸力の関係を図-12,13に示す.補強梁軸力の収束状況から,内部支保工撤去の縦断的な影響範囲は,着目リングを中心に前後6リング(7.2m)程度であることが確認できる.

補強梁軸力は,設計値に対してやや大きい値を示して おり,補強梁に荷重が流れやすい傾向にあったと思われ るが,増加した軸力を将来的な荷重に加えた場合でも, 構造の安全性を確保できる範囲である.

### (2) 土圧および水圧

下層トンネルの土水圧分布を図-14に示す.上下半掘 削,中間部撤去に伴い土水圧が徐々に減少している.内 部支保工撤去時の変動は見られない.本体構造物が完成 した現段階の土水圧は,地下水位が回復していないため, 設計で考慮している完成時の土水圧に対して10~50%の 値である.今後,地下水位がGL-3.0mまで回復したと仮 定した場合の土水圧は,ほぼ設計どおりの値になると推 定される.





写真-4 中間地山



図-10 測点⑥ 鋼殻応力の経時変化(下層トンネル)











### (3) 地盤の変位

図-15 に層別沈下計による内部支保工撤去後の地中変 位の深度分布を示す.

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 ている.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ため、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い.

### 6. おわりに

本工事は、密集市街地での山岳工法を用いた大断面超 近接トンネルの切開き施工という前例のない厳しい条件 下の施工であったが、施工段階ごとの検討を重ね、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 (写真-6).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も実現でき、工程の短縮にも寄与で きた.本工事で実証した施工方法や得られた計測結果は 貴重なデータであり、今後計画されている同様のプロジ ェクトの参考となれば幸いである.

### 参考文献

- (2) 薮本篤,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, 2013.
- 2) 牛越裕幸,中西禎之,井上隆広,小倉靖之,花島常雄:道路トンネル分岐合流部における超近接併設シ ールドの設計・施工,トンネル工学報告集,トンネ ル工学報告集,第22巻,pp.419-426,2012.
- 3) 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.257-262,2009.

(2014.9.15受付)





写真-5 中間部撤去



**写真-6** 構築完了

# DESIGN AND CONSTRUCTION FOR THE JUNCTION OF ROAD TUNNELS BY NON-OPEN-CUT UNDERGROUND ENLARGEMENT METHOD USING SEGMENT

### Masanobu NAGAI, Takayuki SHIMAKOSHI, Tetsuya TAHARA Yasuyuki OGURA and Masato SHIMIZU

This project was to construct branch and confluence part of two shield tunnels (12.3m diameter main shield tunnel and 9.5m diameter connecting shield tunnel) which separation 0.5m by non-excavation underground enlargement method. The construction ground was stable homogeneous mudstone layer (KAZUSASOUGUNN), mountain tunneling method was adopted to enlarge the ground between the two shield tunnels. And for the lining structure, high advantage against durability, watertight and process shortening, STEEL WIDENING SEGMENT was adopted. This report describes analysis and study of ground behavior and stress against lining caused by construction of aforementioned method.