

首都高中央環状線五反田出入口トンネル構造の概要

THE STRUCTURE SUMMARY OF GOTANDA ENTRANCE/EXIT IN CENTRAL CIRCULAR SHINAGAWA ROUTE

深山 大介^{1*}・石橋 正博²・島越 貴之³

Daisuke MIYAMA^{1*}, Masahiro ISHIBASHI², Takayuki SHIMAKOSHI³

Central Circular Shinagawa Route is 9.4 km long, which consists of 8.4 km tunnel structure. While the main line was constructed by Shield-tunnel method with 12.3m outside diameter, the Gotanda entrance/exit tunnel which connects the main line and trunk road on the ground, was constructed by the Shield Tunnel Expansion Methods(STEMs). In constructing the Gotanda entrance/exit structure, various countermeasures were carried out for shortening the construction period. This document reports the summary of each structure.

Key Words : road tunnels, STEMs, pipe-roof, prefabrication, shortening construction period

1. はじめに

首都高速中央環状線は、都心から約8kmに位置する総延長約47kmの自動車専用道路であり、「首都圏中央連絡自動車道（圏央道）」および「東京外かく環状道路（外環道）」とともに、「首都圏3環状道路」を形成している。首都高速中央環状線は、渋谷・新宿・池袋などの副都心や羽田空港や東京港などの国際旅客・物流施設などを環状に接続する、都心の高速道路ネットワークの機能強化と首都圏の国際競争力強化にも必要不可欠な道路である。中央環状線の東側、北側及び西側区間を形成する約38kmは、1982（昭和57）年から段階的に開通し、東側と北側区間は主に高架構造として建設され、熊野町JCT(5号線)から大橋JCT(3号線)までの西側区間（中央環状新宿線）は、トンネル構造で建設しておりシールド工法が多く区間で採用された。最初の開通から約33年を経た2015（平成27）年3月に、最後区間の大橋JCT（3号線）から大井JCT(湾岸線)までの約9.4kmが開通したことにより、中央環状線は3環状道路で最初の全線開通となった（図-1）。

大橋JCT（3号線）から大井JCT(湾岸線)までの区間（約9.4km）である中央環状品川線は、東京都による街



図-1 首都高速中央環状線

路事業と首都高速道路株式会社による有料道路事業との合併施工方式で整備を行った。路線延長約9.4kmのうち8.4kmは、環状6号線（山手通り）及び目黒川の地下などをトンネル構造で建設して立坑部を除いてシールド工法が採用された。中央環状品川線の開通により中央環状新宿線と接続するトンネル「山手トンネル」の総延長は約

キーワード：道路トンネル，切抜げ，パイプルーフ，プレファブ化，工程短縮

¹正会員 首都高速道路株式会社技術部 Engineering division, Metropolitan Expressway Company Limited (E-mail: d.miyama2013@shutoko.jp)

²正会員 首都高速道路株式会社東京西局 West Tokyo Bureau, Metropolitan Expressway Company Limited

³正会員 首都高速道路株式会社神奈川管理局 Kanagawa Bureau of Maintenance, Metropolitan Expressway Company Limited



図-2 首都高速中央品川線

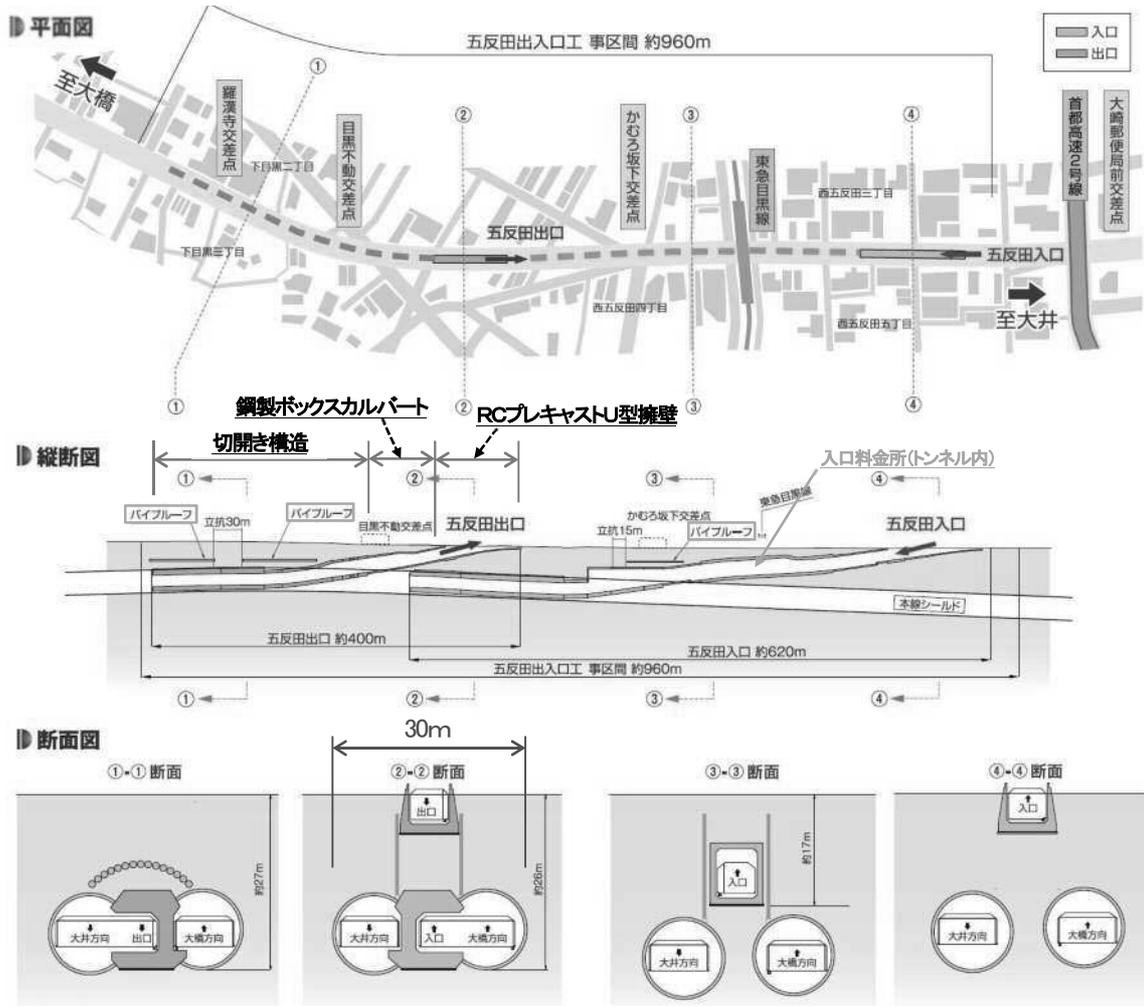


図-3 五反田出入口構造概要図

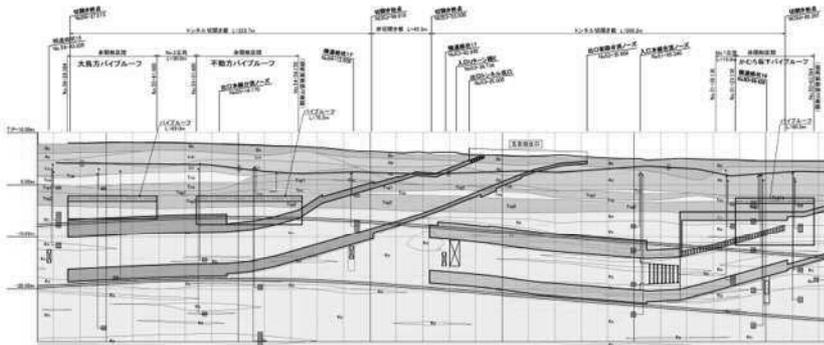


図-4 五反田出入口付近土質縦断面図

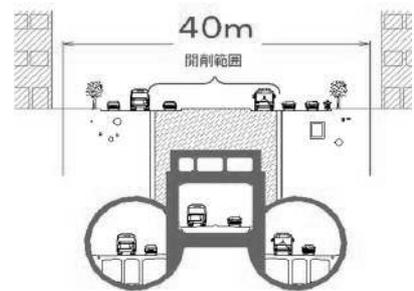


図-5 中央環状新宿線の切開き構造

18.2kmとなり、関越トンネル（約11km）を大きく超えて道路トンネルとしては日本一の長さとなった。

シールド工法により道路トンネルを建設する場合の大きな技術的課題となるのは、地上へのアクセスとなる出入路や連結路と本線トンネルの接続部である分岐合流部の拡幅構造形式とその構築工法である。首都高速道路中央環状新宿線のシールドトンネル区間には7箇所分岐合流部（中央環状品川線には2箇所）が存在しており、それらの箇所は切開き工法により構築した。切開き工法とは、併設シールドトンネル完成後に、トンネル周辺の地山を外部から掘削してセグメントと一体化される拡幅部躯体を構築した後に、道路トンネルとして支障となる箇所のセグメントを撤去して道路拡幅構造とする工法である。この切開き工法には、シールドトンネル間および上部に位置する分合流部躯体を地上から開削工法により構築する工法（開削切開き工法）と、隣接する立坑から上部の地山を支保しながら併設されたシールドトンネル間の地山を掘削して躯体を構築する非開削工法（非開削切開き工法）がある。開削切開き工法は、地表面からの土留め壁施工と開削工事を伴うものであるが、道路トンネル全幅を開削工法により構築することと比較して、掘削規模が最小限になり街路交通や地下埋設物への影響を抑えられる、断面変化に応じた合理的なトンネル断面の構築が比較的容易である、という利点がある。しかし、都市内では、地表面付近の状況により地上から土留め壁の施工等が大変困難な場合があり、そのような場所は、非開削切開き工法を採用して分岐合流部を構築する必要がある。

五反田出入口は、中央環状品川線のほぼ中間に位置する本線シールドトンネルと地上部の山手通りをアクセスする出入口である（図-2）。五反田出入口の建設工事は、交通量が非常に多い山手通りの直下において、大型地下埋設物（下水幹線）、歩道橋、交差点（かむろ坂下、羅漢寺）を含む区間において、地上の交通を確保しながらトンネル工事を行うことから、施工条件が厳しく、工事工程を短縮する必要が生じた。そこで、出入口工事の工程短縮について多種多様な検討を実施して数多くの工程短縮策を現場で採用した。本稿では、五反田出入口の構造概要とともに、非開削切開き区間の工程短縮策として採用した「パイプルーフアーチ工法」、開削区間の工程短縮策として採用した「出口躯体のプレファブ化」を報告する。

2. 五反田出入口の構造

(1) 五反田出入口の構造

五反田出入口の平面図、断面図・縦断図を図-3に、土

質縦断図を図-4に示す。五反田出入口の本線分岐合流拡幅部では、併設して構築された本線シールドトンネルを開削工法および非開削工法を用いて、シールドトンネルと一体化した切開き躯体を構築した。この切開き躯体から地上部の間は、カルバート構造もしくは擁壁構造となる。工事区間の延長は約960m、本区間のセグメント外径は12.3mである。工事区間の地質は、表層から約5mは沖積層、その下が洪積層である東京礫層(Tog層)および上総層群(Kc層、Ks層が堆積している)。シールドトンネルおよび切開き躯体の深度は15~30mであり、上総層群に位置する。

図-5に示した中央環状新宿線の切開き構造は幅40mの山手通りに片側2車線本線と往復2車線の分拡幅部躯体を構築した。しかし、図-3に示した品川線五反田出入口区間の山手通りの幅は30mであることから、拡幅部躯体は1車線分になる。そこで、工区北側に出口躯体、南側に入口躯体をそれぞれ構築した。入口料金所も地上部の用地幅の制限により、入口部のボックスカルバートの一部を2車線に拡幅して構築した。

(2) パイプルーフアーチ工法

a) 構造概要

五反田出入口では地上交通や地下埋設物などの周辺環境への影響を考慮して、3箇所（合計延長208m）で非開削切開き工法を採用した（図-6）。非開削工法により地下構造物を構築する場合、従来はパイプルーフ鋼管などのルーフ（屋根）を形成する部材を支持杭や受桁などの仮設支保部材で支持する。しかし、支持杭等により作業空間が狭隘となり、掘削や躯体構築などの施工制約条件が厳しくなるため、多大な労力と工程を要する。また、仮設支保部材が構造物躯体に埋設されるため、当該箇所は品質確保や止水性確保の観点から弱部となる可能性がある（図-7）。

これらの課題を解決する工法として「直線パイプルーフのアーチ状配置+パイプルーフ鋼管内・鋼管間モルタル充填+止水凍土造成」による新たな非開削工法である「パイプルーフアーチ工法¹⁰⁾」を開発して本工事に適用した（図-8）。パイプルーフアーチ工法は、パイプルーフ鋼管と鋼管間モルタルにより形成されたアーチシェル構造体により、上部の荷重をアーチ脚部に伝達することで、支持杭や受桁などの仮設支保部材を省略し、広い施工空間を確保することができる。そのため、掘削工や躯体構築工での作業性が向上し、工程短縮効果及び作業安全性の向上のほか、躯体を貫通する支持杭などの支保工が無い場合躯体品質の向上にも寄与すると考えている。

b) 施工

パイプルーフアーチ工法の施工手順は、まず、3カ所の立坑部の発進基地内からφ1,016mmのパイプルーフ

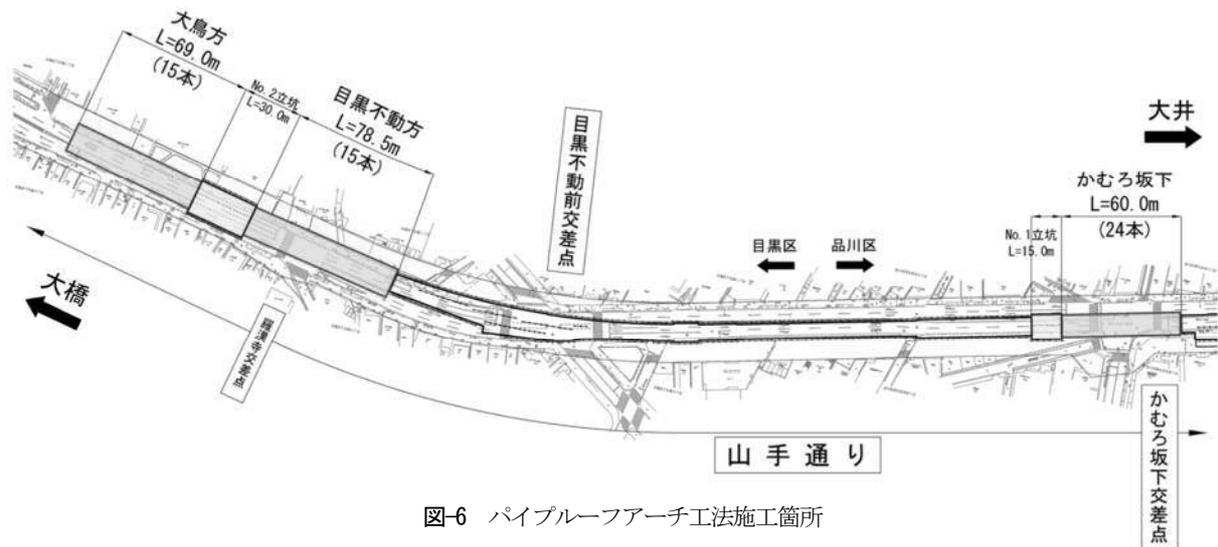


図-6 パイプルーフアーチ工法施工箇所

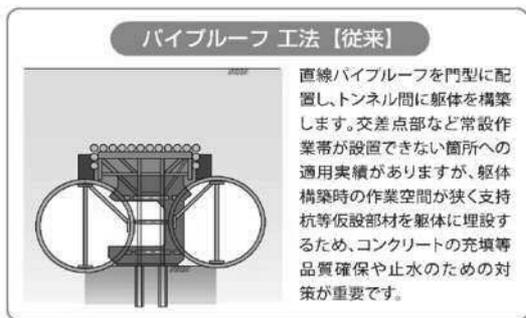


図-7 パイプルーフ（従来）工法の特徴

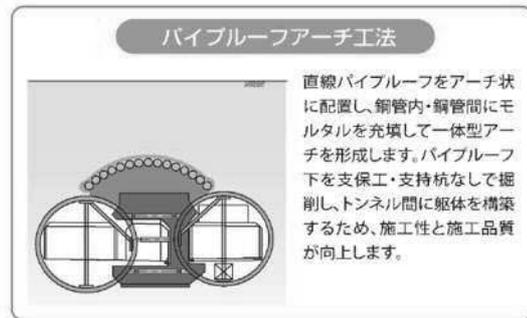


図-8 アーチパイプルーフ工法の特徴

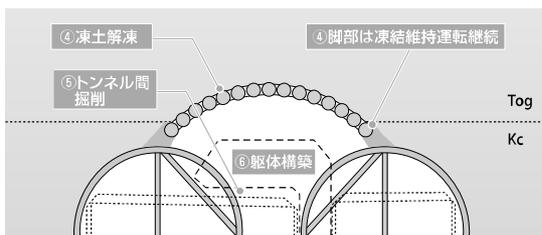
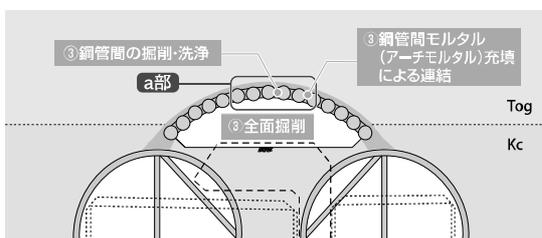
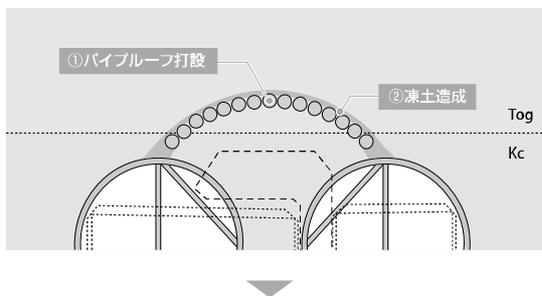


図-10 パイプルーフアーチ施工手順

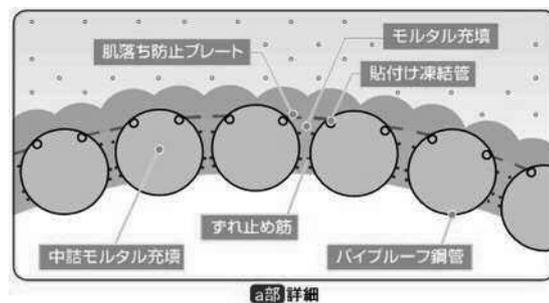


図-9 パイプルーフアーチ構造の詳細

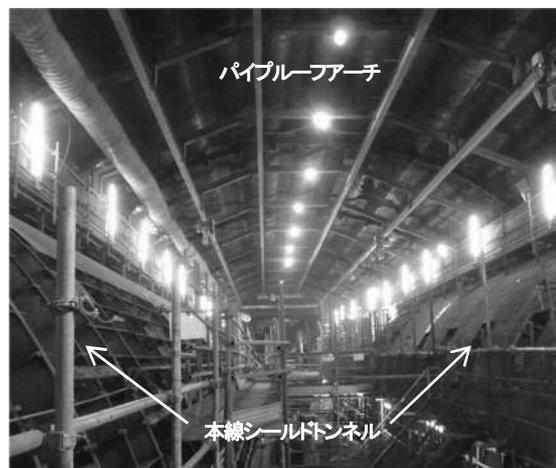


写真-1 パイプルーフアーチ完成状況

をアーチ状に配置してルーフ（屋根）を構築し、鋼管内に配置した貼付け凍結管にてアーチ背面（上部）に止水凍土を造成する。砂礫層であるパイプルーフ施工地盤でのパイプルーフ鋼管間と、シールド界面との止水は凍結工法を採用した（**図-9**）。次に、アーチ下部を1スパン（3.0m/スパン）ずつ全断面掘削し、パイプルーフ鋼管間の凍土及び土砂を自動移動装置に取り付けられた超高压洗浄機にて除去する。その後、パイプルーフ鋼管間に寒冷地仕様超速硬無収縮モルタルを充填することで、当該スパンのアーチシェル構造体が形成される。この施工サイクルを繰り返すことでアーチ構造が連続して形成され、パイプルーフアーチ構造が完成する（**図-10**）。パイプルーフアーチ工法採用により、支持杭がない地下大空間の構築が実現して、掘削と躯体構築をスムーズに施工することが可能となった（**写真-1**）。なお、アーチパイプルーフの採用による工程短縮は最大6.0ヶ月と算定している。本工法は、地下の大空間を安全かつ合理的に短期間で掘削・構築できる技術として、地下道路トンネルの分岐合流部等の構築に広く活用されるものと期待される。

(3) 出口躯体のプレファブ化

出口部のボックスカルバートおよびU型擁壁は、入口拡張躯体の上方を一部分を埋戻したあと構築される二層構造であることから、その他の区間と比較して施工数量が多く施工期間を要する（**図-3**、**②-②断面**）。さらに、出口躯体構築箇所には、交通量が多く地下埋設物が複雑に交差している目黒不動交差点を含む箇所であることから工事が難航し、工程短縮のための方策が必要となった。そこで、当該工区間の工程短縮を目的として、出口躯体構造のプレファブ化を検討し、ボックスカルバート部に鋼製セグメント³⁾、U型擁壁部にRCプレキャスト構造⁴⁾を採用し、現場作業を大幅に軽減することにより工程短縮を図った。

(4) 鋼製ボックスカルバート

a) 構造概要

出口躯体のプレファブ化の採用範囲を**図-11**に示す。ボックスカルバート構造である区間は、直上が目黒不動交差点であり、RCプレキャスト部材は交差点から離れた作業開口から横引き運搬して架設することから重量制限がある。また、掘削幅の制約から部材厚を薄くする必要があったことから鋼製セグメントを用いたプレファブ構造を採用した。今回採用した鋼製セグメントは、セグメント幅1.0m、1リングあたり6ピースに分割されたセグメントを現場搬入・投入し、路面覆工下で現地組み立てを行い延長75mの鋼製ボックスカルバート区間を構築する。重量は1リングで約13.7t、鋼製セグメント1ピース

最大重量で2.6 t（揚重機の最大吊上げ荷重、作業半径、施工性などを総合的に考慮して決定）であり、全75リングを接合し、ボックス状のトンネル躯体を構築する。鋼製セグメントの基本構造は、シールドトンネル覆工に用いられているセグメントと同様に主桁、縦リブ、スキンプレートから構成され、ボルト締結によりボックス構造が完成する（**図-12**）。鋼製セグメント内部の防護コンクリートは、下記に示すの性能を満足する必要がある。

- i) 鋼製部材防護のための耐火性を有すること
- ii) 剥落や飛散を防止の剥離抵抗性を有すること
- iii) セグメント内への確実な充填性を有すること

そこで、今回の防護コンクリートでは、耐火性能確保とコンクリート剥落防止対策として実績のあるPP繊維を混入した。また、鋼製セグメント内部にはコンクリートが確実に充填されることに配慮して高流動コンクリートを採用した。採用を決定するにあたり、現地条件を模擬した実物大模型を用いた充填性確認試験により、配合の妥当性を確認している。また、防護コンクリートの充填性及び剥落防止を考慮して、縦リブの形状は側部をL型、頂部を逆T型とした。また、縦リブと継手板には空気抜き孔とスカーラップを設けることで防護コンクリートの充填性に配慮した構造とした（**図-13**）。また、止水性に配慮してセグメント間には止水シールを2重に配置した。

b) 施工

鋼製セグメントの施工手順を**図-14**に示す。鋼製セグメントは1リング（6ピース）毎に現地に搬入し、覆工板下にクレーンで投入した後、路下で据付位置まで横移動させ、組み立て作業を行う。組立作業は、移動式クレーン（4.9 t 吊）と高所作業車（12m）にて行った（**写真-2**）。

組立手順は、まず、高さ調整のプレートにて事前に高さを調整した後、その上で底版部ピースを組み立て、隣接リングとボルト固定する。次に側部ピースを底版部ピース上で組み立て、同様にボルト固定する。最後に頂版部ピースを側部ピース上で組み立ててボルト固定する。この組立作業を深い方から順に75リング分繰り返し行う。なお、止水シール材許容値（目開き3mm、目違い3mm）を満足するように、各リングの各ピースごとに製作誤差と施工誤差の両者を加味した組立管理を行い、据付精度を確保した（**写真-3**）。

防護コンクリートの打設は、スライドセントル（移動式型枠）を型枠とし、鋼製セグメント上部2箇所を設置したコンクリート打設孔よりトレミー管用ゴムチューブを鋼製セグメント内に挿入し、側部・頂部への充填を行った。打設は6リング6mごとに行い、セントルを盛替えて繰り返し打設した。コンクリート打設孔は1リングごとに左右1か所ずつ設け、左右同時に打設部に設置して

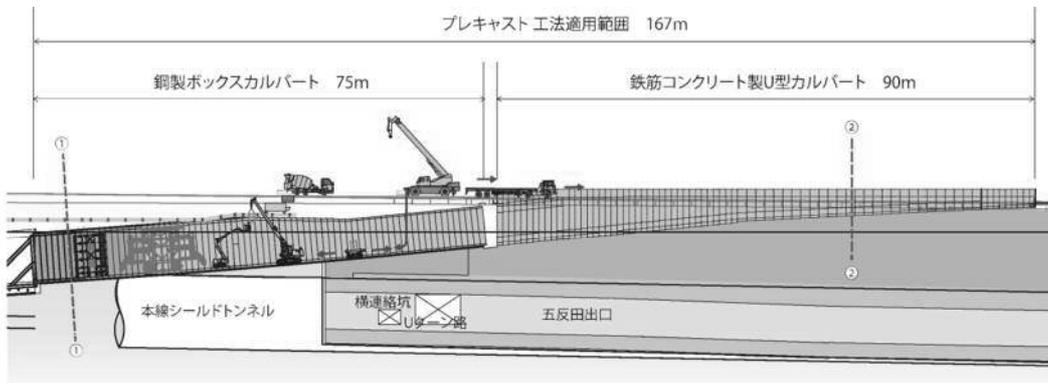


図-11 鋼製ボックスカルバート範囲 (75m)

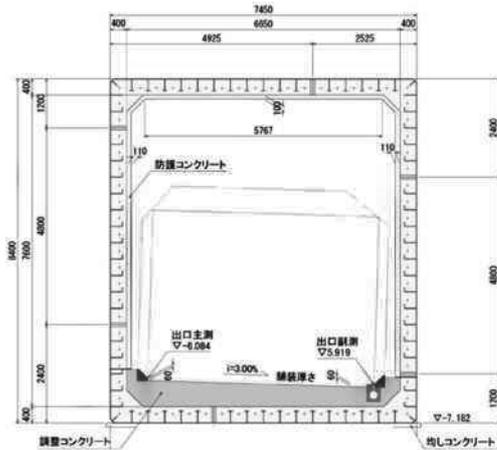


図-12 鋼製ボックスカルバート構造図

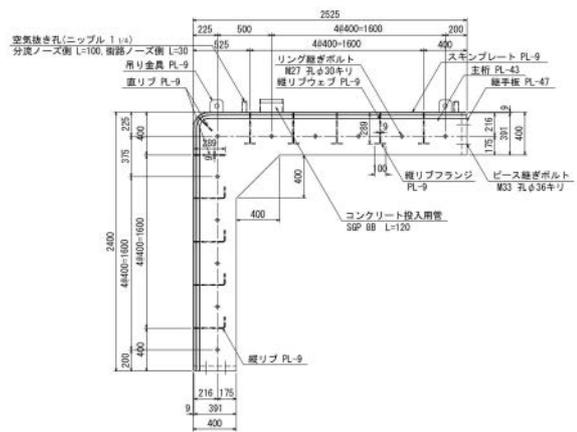


図-13 鋼製ボックスカルバート詳細図

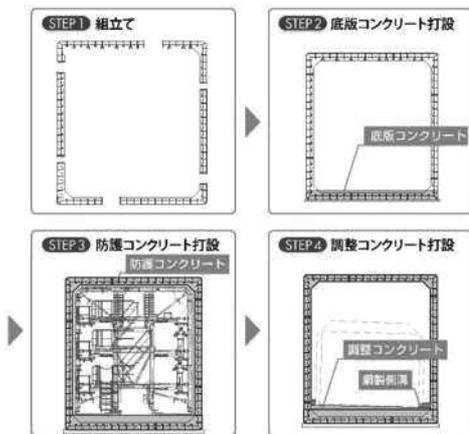


図-14 鋼製ボックスカルバート施工手順



写真-2 セグメント組立て状況

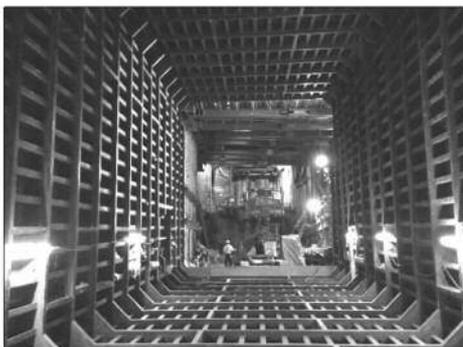


写真-3 セグメント組立て完了



写真-4 完成状況

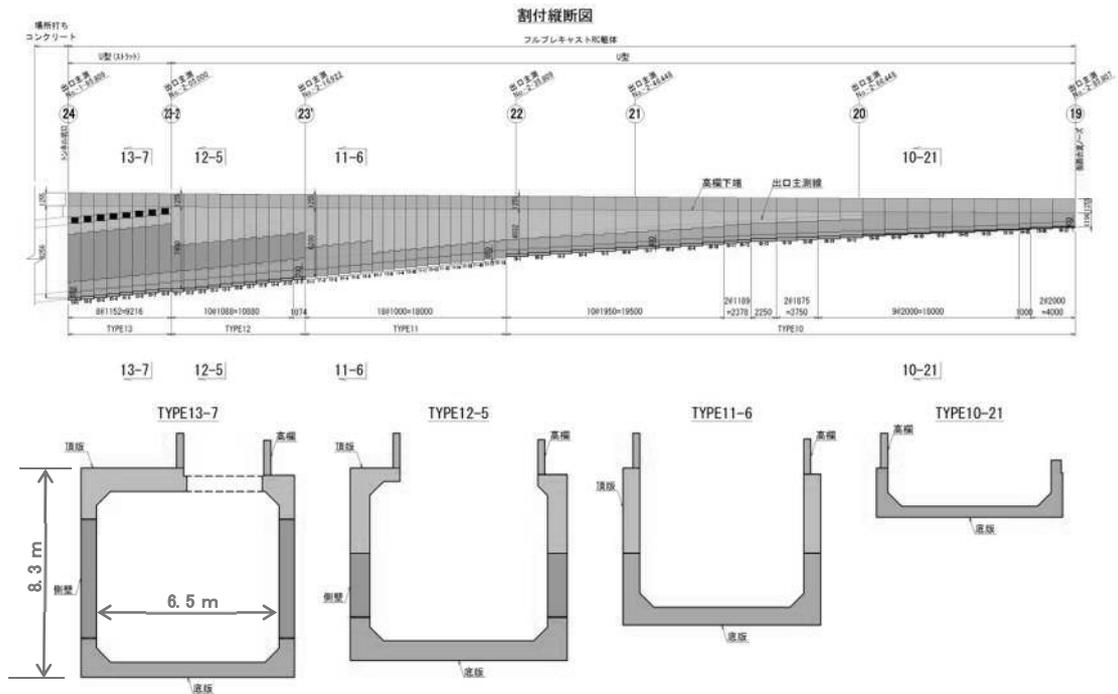


図-15 RCプレキャストU型擁壁ピース割付け(側面図と断面図)

表-1 ピース配置形状の比較

		勾配に沿って斜めに設置	段差により垂直に設置
特徴	長所	<ul style="list-style-type: none"> ・内空を最小にできる ・躯体内面を平滑に設置可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・天地水平に設置できる ・滑動防止架台が不要
	短所	<ul style="list-style-type: none"> ・滑動防止架台が必要 ・縦断勾配を合わせる吊り道具が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・均しコンを階段状に構築する必要がある ・頂版、底盤の内面に段差が生じる

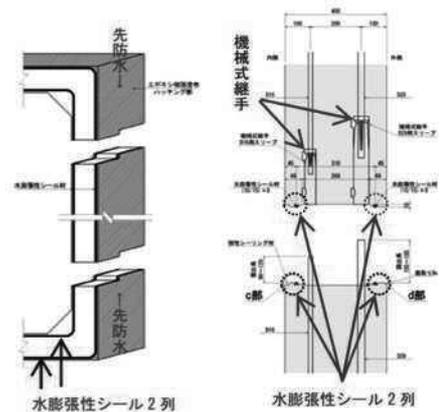


図-16 防水構造

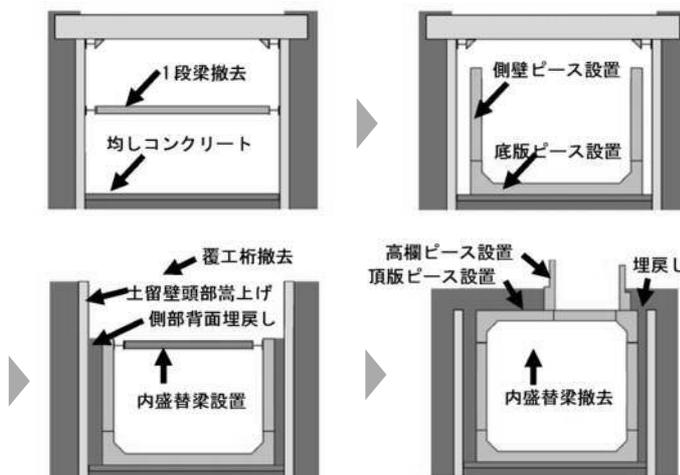


図-17 施工手順



写真-5 完成状況

いるエア―抜き管にコンクリートが回ってきたことにより確認した。鋼製ボックスカルバートの採用により、鉄筋工などを省略することが可能となり、ボックスカルバートの現場急速施工を実現した（写真-4）。鋼製セグメントの採用による工程短縮は約2.5か月と算定している。

(4) RCプレキャストU型擁壁

a) 構造概要

鋼製カルバート区間よりも地表面側に位置するU型擁壁構造部は、鋼製セグメントと比較して作用荷重が小さく部材が小さくできることから、コストが縮減できるRCプレキャスト構造を延長90mに採用した（図-15）。本工区のような断面変化が大きい切梁支保工による開削区間にRCプレキャスト構造を適用した事例はほとんどないことから、部材形状と接手構造は特に慎重に検討した。プレキャスト部材は、ゼロ段切梁（覆工桁）を残置した状態で地上からクレーンで架設することから、部材はクレーン能力と作業開口の大きさを満たす重量からピース重量を最大2tとした。また、現地での組立て作業に配慮して構造タイプ毎にピース割り付けを検討し、横断方向は最大6分割とし、縦断方向は部材厚保に応じて1.0m、2.0mとした。プレキャスト部材の設置区間の道路勾配は7～10%であり、勾配に沿った斜めの形状とすると内空を最小とすることができるが、ピース形状が複雑になること、滑動防止架台が必要となることなどから、本工事においては、底版設置面を階段形状として、部材を垂直に設置した（表-1）。

また、本工事のRCプレキャストU型擁壁は地下水位以下に設置されることから防水性能にも配慮した構造とした。リング間、ピース間継手面の止水性能は水膨張性シーリング材により確保し、接手の十字交点をさけるためにピース形状を工夫した。また、部材背面と土留壁との隔離が小さく、部材設置後の外防水が困難であることから、エポキシ樹脂塗装を工場にて予め塗布する先防水を採用した（図-16）。なお、この止水構造は、止水性能の弱部である接手部をモデル化した供試体を作成して止水試験を実施し、0.15Mpaの長期水圧を保持した状態において、躯体内側への漏水がないことを確認している。

b) 施工

RCプレキャストU型擁壁の施工手順は、均しコンクリートを打設後に1段梁を撤去して底版ピースと側壁ピースを設置する。内盛替梁設置後に側部背面を埋戻しして覆工桁を撤去する。頂版・高欄ピースを設置後に背面と上部を埋戻しして、土留壁の頭部引抜きと内盛替梁を撤去する（図-17）。プレキャスト部材の設置は、街路路の1車線規制が必要なため、夜間施工とした。部材は、その都度、工場からトレーラーにより搬入し、90tクロ

ークレーンにより、日当たり2ピースのペースで設置した。底版部材の設置位置を微調整するため、段差均しコンクリート上に予め鋼材によるレール溝を設置し、その溝にベアリング（鉄球）を敷きつめて、部材横移動した。側壁設置後、リング間ボルト締結により先行ピースと一体化する。底版とのピース間継手は、継手に設けた充填孔から高強度モルタルを機械式継手内部・継手面に充填して構造の一体化を図る。充填完了は、充填孔の蓋として入れるゴムキャップのピンが飛び出すことで確認した。RCプレキャストU型擁壁の採用により、U型擁壁の現場急速施工が可能となり、高欄上の遮音壁設置などの後工程へスムーズな引き渡しが可能となった（写真-5）。このRCプレキャストの採用による工程短縮は約1.5か月と算定している。

3. おわりに

中央環状品川線五反田出入口で適用した工程短縮策のうち「パイプルーフアーチ工法」、「出口躯体のプレファブ化」について報告した。これらの構造は、工程短縮策を適用する以前の計画で工事が進捗しているという制約条件の下に、現場条件に適合した実現可能な構造を検討し、設計施工上の数多くの課題を克服することで本工事へ適用した。類似の現場においても、施工の進捗などが異なると制約条件が異なり、効果的な工程短縮策も異なると考えられるが、本工事の事例が、今後の道路トンネル工事の工程短縮策の検討の一助となれば幸いである。

謝辞：本工事の工程短縮策の検討においては、工事請負者である鹿島・熊谷・五洋JVの皆様にご多大なご協力とお力添えを頂いた。厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) 橋本勇，中川雅由，石橋正博：仮設支保工を省略する非開削工法（パイプルーフアーチ工法）の開発，第50回地盤工学研究発表会講演集，No774，2015.9
- 2) 三室恵史，岩下善一郎，野網孝之：パイプルーフアーチ工法の計画と施工実績―中央環状品川線五反田出入口工事―，第50回地盤工学研究発表会講演集，No775，2015.9
- 3) 西嶋宏介，橋本勇，三室恵史：鋼製セグメントボックス構造の施工実績，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集CS3-022，pp.43-44，2015.9
- 4) 島越貴之，小林弘茂，森田大介：都市開削トンネル工事における躯体のプレキャスト化，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集VI-730，pp.1459-1460，2015.9