

(14) 都市開削トンネルにおける複合構造による プレキャスト部材の適用

西嶋 宏介¹・島越 貴之²・森田 大介³・橋本 勇⁴
平 陽兵⁵・山野辺 慎一⁶

¹正会員 首都高速道路株式会社 保全・交通部 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)
E-mail: k.nishijima610@shutoko.jp

² 首都高速道路株式会社 神奈川管理局 (〒221-0044 神奈川県横浜市神奈川区東神奈川1-3-4)
E-mail: t.shimakoshi87@shutoko.jp

³正会員 鹿島建設 (株) 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)
E-mail: moritad@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設 (株) 東京土木支店 (〒107-0052 東京都港区赤坂2-14-27)
E-mail: hassy25@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設 (株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail: ytaira@kajima.com

⁶フェロー 鹿島建設 (株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail: yamanobe@kajima.com

中央環状品川線五反田出入口は、品川線全線(約9.4km)のほぼ中間に位置するセンターランプ式トンネルである。環状6号線直下に中央環状品川線本線となる併設シールドトンネル2条を構築した後、開削工法および非開削工法を用いてシールドトンネルを切開き、出入口ランプ躯体を接続する。さらに環状6号線街路までのランプ躯体を開削工法にて構築するものである。このうち、ランプ躯体の構築に当りハーフプレキャストSC部材を適用し、工程短縮を図った。また、ボックスカルバート部の一部を防護コンクリートを有する鋼製セグメント構造として工程短縮を図った。本稿ではハーフプレキャストSC部材および鋼製セグメント構造の構造概要および施工実績について報告する。

Key Words : steel-concrete composite beam, precast member, steel segment, open cut method

1. はじめに

首都高速道路中央環状品川線は、中央環状線(全線約47km)の南側部分を形成する、延長約9.4kmの自動車専用道路である。起点の大井ジャンクションで高速湾岸線から分岐したのち、目黒川および環状6号線(山手通り)の地下をトンネルで北上して、終点の大橋ジャンクションですでに供用中の中央環状新宿線(山手トンネル)および高速3号渋谷線に接続する。なお、品川線は周辺環境に配慮し、ほぼ全線においてトンネル構造を採用している。

五反田出入口は、品川線のほぼ中間に位置するセンターランプ式トンネルであり、環状6号線直下に構築された本線シールドトンネル2条を、開削工法および非開削

工法を用いて切開き、出入口ランプとなるトンネル切開き躯体から地上街路までの出入口ランプ単独構造躯体を構築するものである(図-1、図-2)。

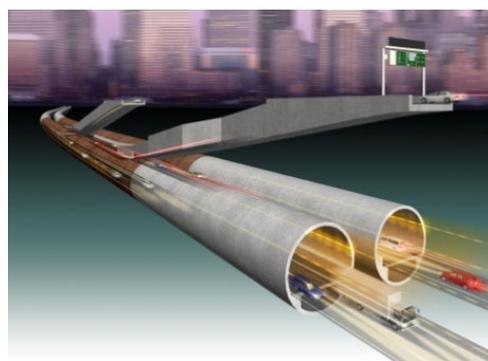


図-1 五反田出入口イメージ

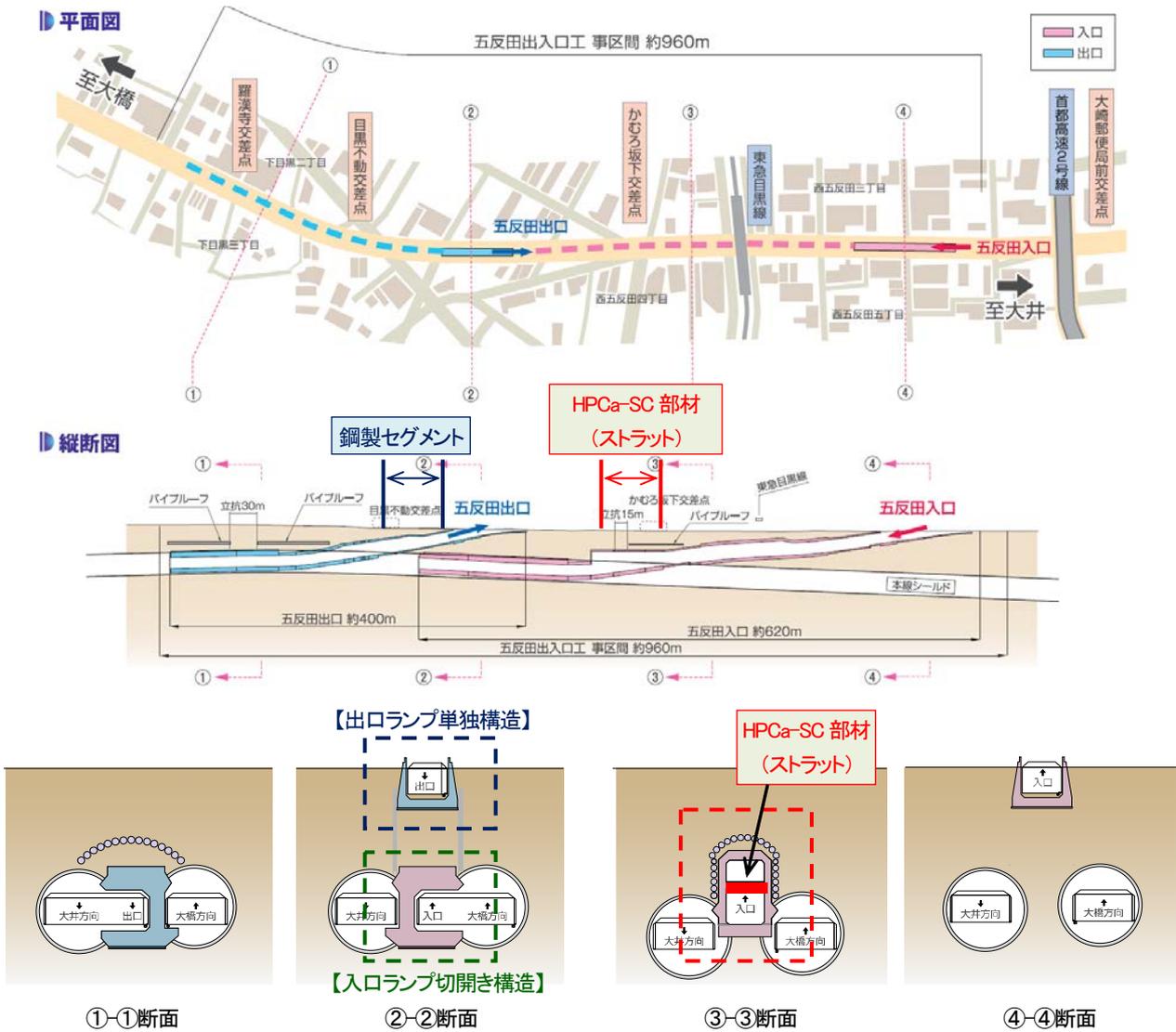


図-2 五反田出入口の構造概要

五反田出入口の中で、入口ランプの切開き構造躯体の一部では、ボックス断面の内空が高く、高さの中間にストラット（梁構造）が設置される。この区間の躯体はRC構造であるが、今回、工程短縮を目的としてストラットにハーフプレキャストの鉄骨コンクリート（SC）構造を適用した。

一方、出口ランプの単独構造躯体は入口ランプ切開き構造躯体の上部に構築される。そのため、この躯体の構築は、入口ランプ躯体の構築・埋戻しを経てからとなり、全体工程の中の最後の施工となる。また、出口ランプ単独構造躯体が構築される区間は、交通量が非常に多く、地下埋設物が複雑に交差している「目黒不動交差点」を含む区間であり、施工条件が厳しいことから、本工事のクリティカルパスの一つであった。そのため、当該区間の工程短縮を目的として、出口ランプ単独構造の躯体構築方法に関する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構造を適用し、施工性の向上を図ることとした。なお、鋼製セグメントの内部には防護

コンクリートとしてコンクリートを打ち込み、鋼製セグメントに自動車衝突に対する衝突防護機能と耐火性を付与した。

本稿では、工程短縮を目的に採用した複合構造として、ストラット部に適用したハーフプレキャストSC部材（以下、HPCa-SC部材）、および防護コンクリートを有する鋼製セグメントについて、構造および施工実績について報告する。

2. ハーフプレキャストSC部材によるストラット

(1) 適用に至る検討経緯

図-3にハーフプレキャストSC部材の適用範囲における施工状況図を示す。入口ランプ躯体の一部は、ボックス断面の内空が高いため、側壁高さの中間に1.0m×1.0mの正方形断面を有するストラット部材が配置された。ストラットの構築は側壁や底版・頂版と同様に場所打ちコン

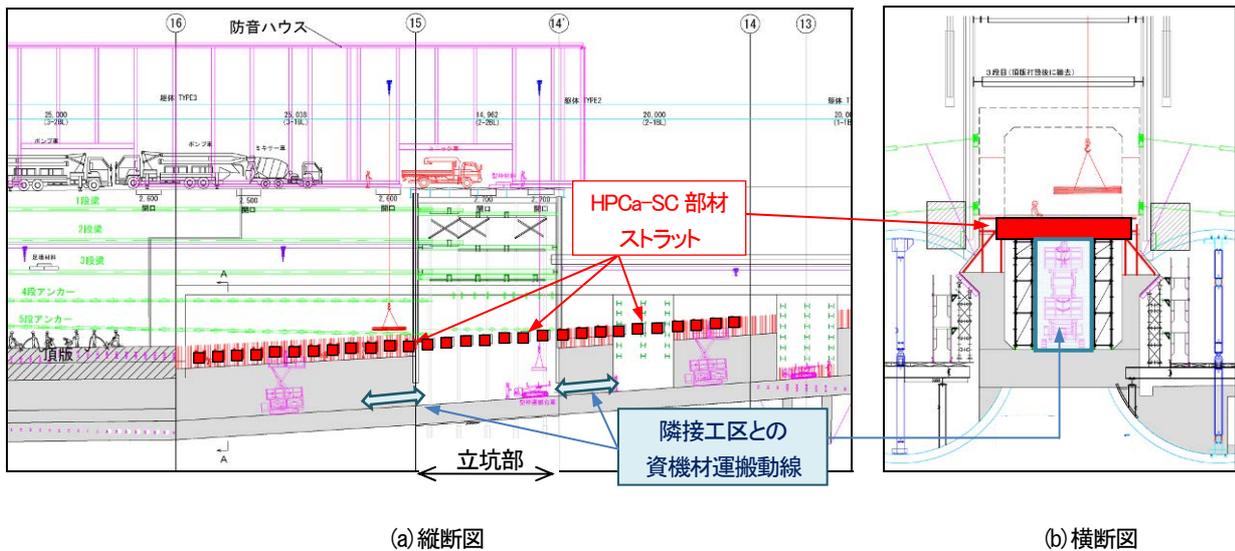


図-3 ハーフプレキャストSC部材適用範囲の施工状況図

クリートによるRC構造で計画されていたが、この区間は非開削区間の施工基地となる立坑部を含む範囲であり、立坑は隣接工区への資機材投入基地にもなるため、全体工程でのクリティカルパスの一つであった。そのため、工程短縮を実現するためには隣接工区との同時躯体構築を可能とする必要があり、資機材運搬のための導線を確保することが重要であった。そこで、躯体構築時の支保工数量を減らすことで隣接工区への資機材運搬導線を確保し、且つ、現場での作業を削減することで全体工程の短縮に繋がられるよう、ストラット部材のプレキャスト化を検討した。

プレキャスト化の検討に当たっては、2つの課題があった。一つはプレキャスト部材の重量についてで、もう一つはプレキャスト部材の断面剛性の確保に関するものであった。

プレキャスト部材の重量について、ストラット部材を全断面プレキャスト化したフルプレキャストの場合、部材重量は約16tとなった。一方、現地の揚重設備は10t天井クレーンが1基であったことから、プレキャスト部材をこの天井クレーンで吊上げ可能な重量に抑える必要があった。そこで、ストラット部材には、断面の内、底面と側面をプレキャストとしたU形構造のハーフプレキャスト（以下、HPCa）部材を採用した。その結果、部材重量を約8tに抑えることができた。

HPCa部材の断面剛性については、現地の部材搬入や架設条件によってある程度の大きさを確保する必要があった。本工事では、HPCa部材を地下へ投入することになるが、そのための施工開口の大きさが限定されていた。また、土留めのための切梁支保工の間に投入して設置することになるため、HPCa部材を一時的に縦吊りにして架設する必要があった。そのため、架設時においても

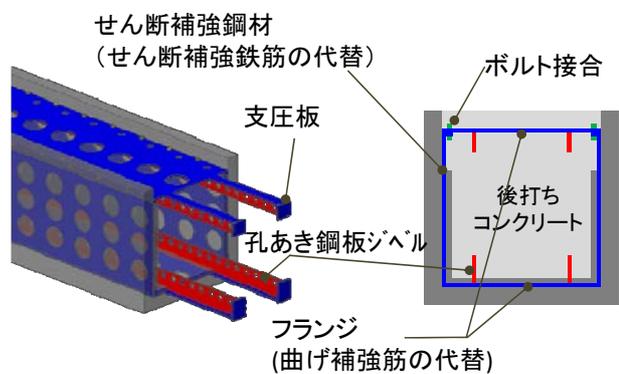


図-4 HPCa-SC 部材構造概要図

HPCa部材には断面剛性が必要とされた。また、現場での後打ちコンクリートの施工時において、HPCa部材に生じる曲げ応力度を低減する必要があった。これらより、HPCa部材としての断面剛性を確保するために、架設時には上フランジをHPCa部材にボルト接合できるSC構造とした。

以上から、現地での鉄筋工および型枠工が不要となり、且つ、現場での施工時においても必要な断面剛性を確保できる、ハーフプレキャストSC構造を採用した。

(2) ハーフプレキャストSC部材の構造概要

a) 一般部

図-4にHPCa-SC部材の構造概要を示す。本工事で適用したHPCa-SC部材は、鉄筋を用いずに鋼材とコンクリートから構成されている。鋼材は、曲げ補強鋼材となる上下フランジとせん断補強鋼材となる側面鋼材によってロの字形の断面を構成し、これをコンクリートに埋設している。これらの鋼材はコンクリートの充填性や鋼板とコンクリートの一体性を確保するために孔を設けている。

特に、曲げ補強鋼材とコンクリートの一体化は上下フランジに取り付けた孔あき鋼板ジベル (PBL) に期待する構造とした。また、ストラットの軸方向には継手を設けない構造とした。

図-5にHPCa部材の工場製作後とストラット部材の完成後の断面比較を示す。また、写真-1に工場製作後の状況を示す。工場製作において、コンクリート部分の製作時には上フランジは取り外しておき、後から上フランジと側面鋼材とをボルト接合する構造とした。これにより、HPCa部材の製作性が向上するとともに、現場での架設や場所打ちコンクリート施工時には上フランジを取り付けることで断面剛性が向上し、施工時荷重に対してHPCa部材に発生する応力度を小さくすることが可能となった。

上下フランジにはPBLを取り付けたが、特に下フランジに取り付けたPBLは、HPCa部材と後打ちコンクリートとの一体性を高めるためにHPCa部材のコンクリートから突出させた。

側壁との接合部となるHPCa部材の端部は、フランジと連続した鋼材をコンクリート表面から突出させ、鋼材の先端に支圧板を設けた。この支圧板を側壁部に埋め込むことによって側壁への定着を図った。

鋼材の接合は工場製作部分は溶接接合とし、HPCa部材のコンクリート施工後に必要となる上フランジと側面のせん断補強鋼材との接合などはボルト接合とすることで、現場での施工合理化を図った。

b) 中間杭巻込み部

本構造の適用区間の一部には、写真-2に示すようにストラットと仮設の中間杭とが干渉する箇所があった。これに対しては、HPCa部材の断面中心を部材軸方向に沿って2分割できるようにしてL形の部材とした(図-6)。現地では中間杭を挟み込むようにL形の部材を設置して、その後、上下のフランジをそれぞれボルト接合する構造とした。これにより、現場における施工が容易となり、SC構造の特徴を活かした施工と言える。

(3) ハーフプレキャストSC部材の設計

本HPCa-SC部材の曲げ補強鋼材である上下フランジはPBLでフランジとの付着を確保することとしており、同様の構造を有する試験体を用いた荷重実験により、曲げ特性がRC部材と考えた時の解析値と一致することを確認している⁹⁾。よって、HPCa-SC部材の設計は、基本的にRC部材と同様に行った。つまり、完成系においては全体構造フレーム解析結果からストラット部材に発生する断面力を算出し、部材の応力度照査は鋼材を鉄筋に置き換えたRC計算によって求めた発生応力度が許容応力度以下であることとした。なお、鋼材にはコンクリート打込み時の充填性確保に必要な開孔を設けており、応力度

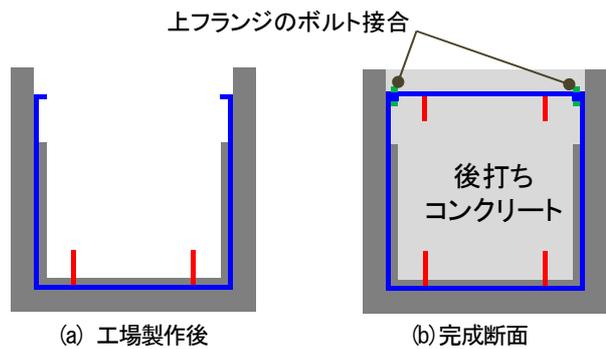


図-5 HPCa-SC 部材断面図



写真-1 HPCa-SC 部材 (工場製作後)



写真-2 中間杭巻込み部

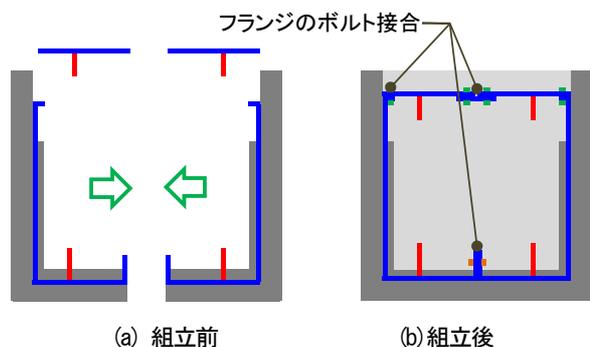


図-6 中間杭巻込み部

照査に用いる鋼材量としては開孔部分を控除して部材方向に連続した鋼材だけを考慮した。

PBLの設計は複合構造標準示方書²⁾に従い、せん断耐力を算出し、鋼コンクリートサンドイッチ合成版と同様の考えで孔数を検討した。その結果、本部材の形状では部材全長（約6m）に対し必要なPBLの孔数はPBL1枚当たり約10個であったが、鋼材とコンクリートの付着をできるだけ確保するために、最終的にPBLを100mm間隔で配置した。

施工時の検討は、部材軸方向についてHPCa-SC部材を架設した状態で死荷重および後打ちコンクリートの荷重が作用するものとして、コンクリート下縁の引張応力度が曲げひび割れ強度以下であることを照査した。部材横断方向については、後打ちコンクリートの荷重および側圧に対して同様に照査した。

ハーフプレキャスト部材と後打ちコンクリートとは、外力に対して一体となって挙動することが求められる。そのため、HPCa部材と後打ちコンクリートとの打継面にはコンクリートに凹凸を設けてせん断伝達を行うようにした。また、そのせん断伝達性能については、凹凸のある打継面のせん断伝達耐力を岡田式³⁾にて算定して、一体性が確保できることを確認した。

(4) ハーフプレキャストSC部材の製作

鋼材の製作は、鋼板を切断・孔明け加工した後に下フランジと側面鋼板を溶接して組み立てた。溶接によって生じた部材の変形はひずみとりを行い矯正し、最終的な出来形を道路橋示方書⁴⁾の仮組立ての精度に従い管理した。

コンクリートの施工は、組み立てた鋼材を鋼製型枠内に設置し、コンクリートを打込んだ。後打ちコンクリートとの打継ぎとなる面には、市販のシートを型枠に貼付けて凹凸を設けた。

型枠からの脱型後に寸法検査を行い、出来形管理値はJISの「プレキャストコンクリート製品」に従った。

(5) 施工（架設、コンクリート打込み）

写真-3、4に投入状況と架設状況を示す。HPCa-SC部材の架設は、現場に設置された10t天井クレーンにて行った。部材を投入する開口部が狭く、非常に狭隘な施工空間での架設となり、また、側壁定着部（支圧板）が側壁主筋と干渉しないように設置する精度が必要であったが、平均2本/日の設置であった。

HPCa-SC部材の後打ちコンクリートの施工時は部材の上部が上フランジで塞がれた状態であることから、上フランジに設けた打込み用の孔を利用して高流動コンクリートを部材端部から一方向に打ちこんだ。コンクリートの充填の確認は、上フランジに設けた空気抜き孔からコ

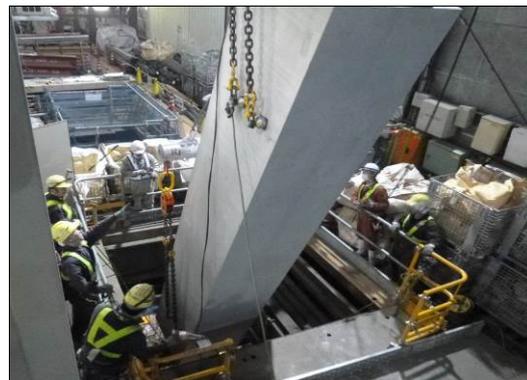


写真-3 開口部からの投入状況

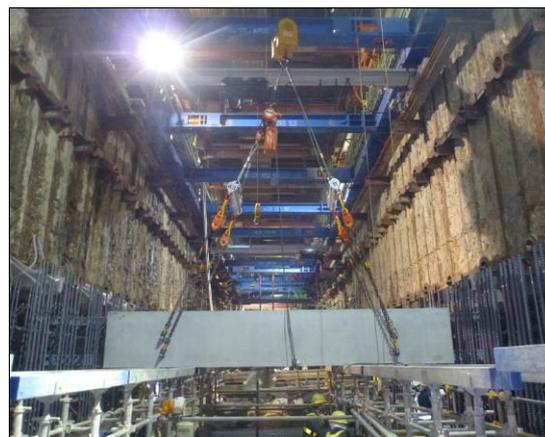


写真-4 架設状況

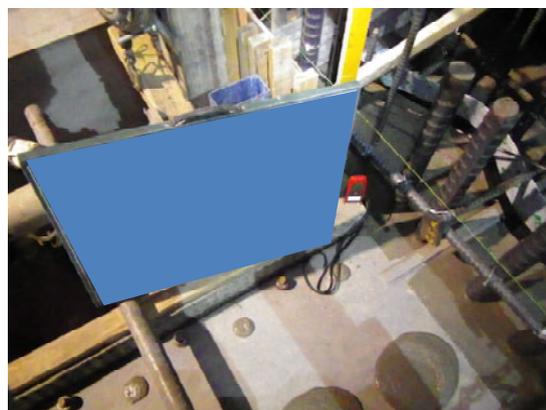


写真-5 コンクリート打込み状況



写真-6 完成状況

ンクリートをオーバーフローさせることにより行った
(写真-5)。

HPCa-SC部材の施工後に側壁および頂版の施工を行った。写真-6にストラット（HPCa-SC部材）の完成状況を示す。

3. 鋼製セグメント

(1) 鋼製セグメントの構造概要

出口ランプの躯体には工程短縮を目的として現場作業の削減が図れる鋼製セグメント構造を採用した。本構造は外力に対して鋼製セグメントのみで抵抗するものであるが、鋼製セグメントに車両衝突防護機能と耐火性能を確保する目的で合成短繊維を混入した防護コンクリートを充填した。

図-7に鋼製セグメントの基本横断面図を、写真-7に組立て完了状況を示す。本工事で適用した鋼製セグメントは、全75リングあり、リング幅1.0m、1リング当り6ピースに分割されたセグメントを工場から現場搬入・投入し、路面覆工下で1リングごとに現地組立てを行うことで構築するものである。重量は、揚重機的能力から1リングで13.7t、1ピースの最大重量を2.6tとした。

図-8に鋼製セグメントの構造図を示す。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るセグメントと同様に、主桁、縦リブ、およびスキムプレートから構成される構造とし、防護コンクリートの充填性および剥落防止性を考慮して縦リブの形状は側部をL形、頂部を逆T形とした。また、縦リブと継手板には空気孔（φ30mm）とスカーラップ（R=30mm）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。

(2) 鋼製セグメントの設置

鋼製セグメントは1リング（6ピース）ごとに工場から搬入し、これを地上部のクレーンで路下に投入した後、組立箇所まで重量物運搬台車を用いて運搬した。

鋼製セグメントの組立は、移動式クレーン（4.9t吊り）と高所作業車（12m）にて行った。組立順序は、高さ調整用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立て、隣接リングとボルト固定した。次に側部ピースと頂版部ピースを底版部ピースと同様に隣接リングとボルト固定しながら組立てた。

組立管理は、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、各リングのピースごとに製作誤差と施工誤差を考慮して行い、据付精度を確保した。実際の施工においても、許容値に収まる精度が確保された。

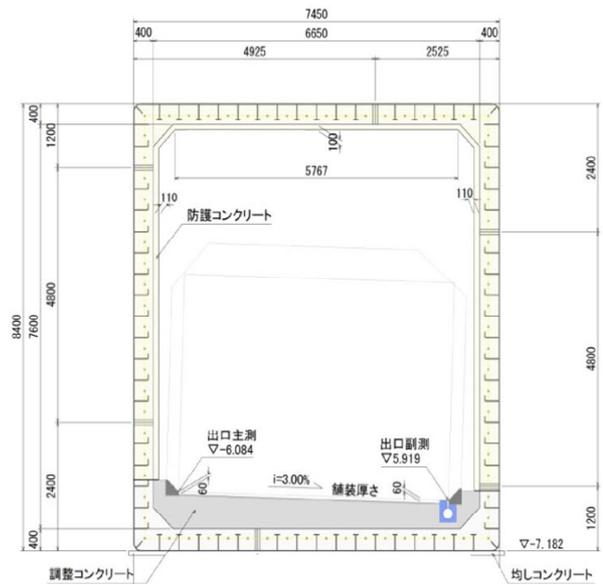


図-7 鋼製セグメント基本横断面図

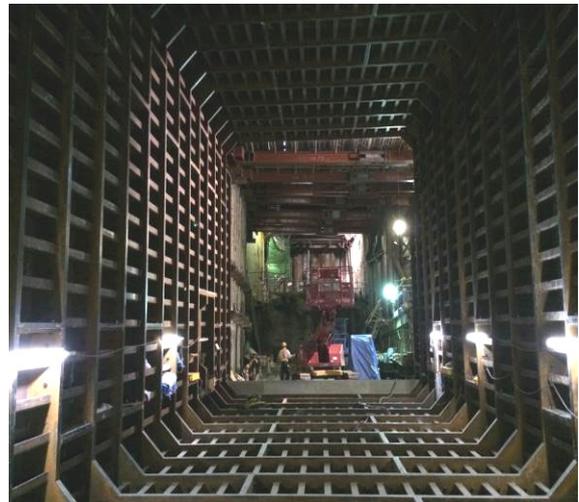


写真-7 組立て完了状況

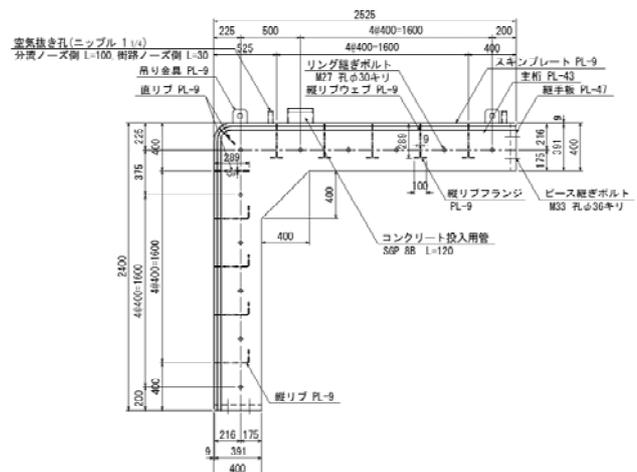


図-8 鋼製セグメント構造図

(3) 防護コンクリート

防護コンクリートの仕様は、図-9に示すように鋼製セグメントの内面に施工するコンクリートとして求められる要求性能から決定した。主たる要求性能は以下のとおりである。

- ① 鋼殻防護のための耐火性
- ② 剥落、飛散防止のための剥離抵抗性
- ③ 鋼殻内の複雑なセル構造への確実な充填性

以上から、本工事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合成短繊維バルチップPw-Jrを適用する配合とした。

防護コンクリートの施工に先立ち、その流動性と充填性を確認する目的で、鋼製セグメントの一部を実物大で切り出した試験体を用いた施工試験を行い、配合の妥当性を確認した。写真-8に施工試験状況を示す。

施工試験では、アクリル製の型枠を設置してコンクリートの充填状況を確認した結果、懸念された側部の縦リブ下面に空気溜りは生じることはなく、頂版部については水平に打ち上がる様子が確認できた。また、天端に設置した空気抜き孔から空気が抜けて、最終的にコンクリートが排出された。コンクリート硬化後には頂版部分を切断し、頂版上部までコンクリートが充填されていたことを確認した。

(4) 防護コンクリートの打込み

防護コンクリートは鋼製セグメントの組立完了後、内空側にセントル型の移動式型枠を設置して、鋼製セグメントの頂版上の側壁上部2か所に設置した打込み用の孔より、長尺の特殊ホースを用いて鋼製ボックス6リング分を一度に打ち込む計画とした。図-10に防護コンクリートの打込み状況図を示す。

型枠にはカルバートスライドセントル（移動式型枠）を使用し、カルバートスライドセントルの設置完了後、鋼製セグメント側部および頂部に防護コンクリートの打込みを6リングごとに行った。地上部にコンクリートポンプ車を配置して、開口部より路下を經由して打込み箇所まで配管し、鋼製セグメント頂部にコンクリート投入用管を1リングごとに左右1か所ずつ設けて、配管の筒先にはトレミー管用ゴムチューブを接続した。トレミー管用ゴムチューブを上部に引き上げながら左右を同時に均等に打ち上げた。打込み速度は、カルバートスライドセントルへの側圧を考慮して1.0m/hrとした。充填確認は、施工試験と同様に天端部に設置した空気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。

写真-9に完成状況を示す。コンクリートは確実に充填できており、無事に施工を完了した。

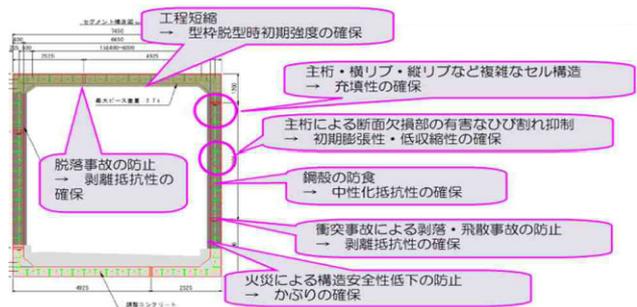


図-9 防護コンクリートの要求性能と対応手段

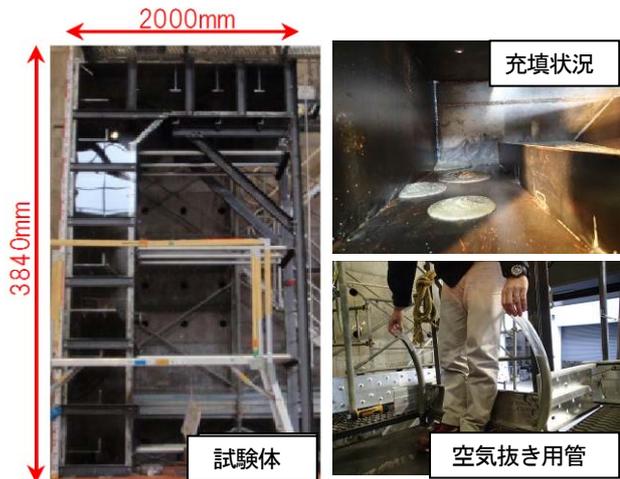


写真-8 施工試験
横断面図

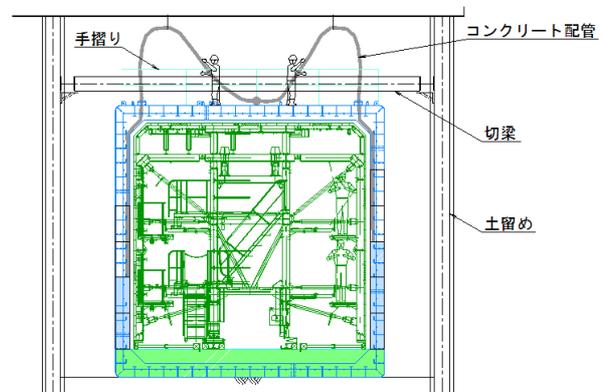


図-10 防護コンクリートの打込み状況（横断面図）



写真-9 完成状況

4. おわりに

本工事では様々な工程短縮策を図ったが、その中で複合構造の適用として、ハーフプレキャストとしたSC部材の適用と防護コンクリートにより耐火性などの機能を付加した鋼製セグメントについて報告した。本稿で報告した構造は、いずれも工程短縮を目的に工事途中での構造変更で採用したものである。そのため、施工済みの仮設構造（切梁支保工など）が設置されているという制約を受ける中で、実現可能な構造検討を行い採用に至ったものである。

これらの構造の採用により、従来構造による施工と比較して工程短縮が図られ、無事に竣工を迎えることがで

きた。本工事で得られた知見が同種工事の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 平陽兵, 山野辺慎一, 内藤英樹, 鈴木基行: ハーフプレキャスト SC 部材の曲げ挙動に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, 2015.
- 2) 土木学会: 複合構造標準示方書, 2009.
- 3) 岡田武二: コンクリート接合面のせん断伝達に関する研究, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.73~82, 1994.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編, 2012.

APPLICATION OF THE HYBRID PRECAST MEMBERS IN THE OPEN CUT METHOD TUNNEL

Kosuke NISHIJIMA, Takayuki SHIMAKOSHI, Daisuke MORITA,
Isamu HASHIMOTO, Yohei TAIRA and Shinichi YAMANOE

The Gotanda on/off ramp structure of the Central Circular Shinagawa Route, Tokyo Metropolitan Expressway Co. Ltd., Tokyo is under construction. Most of the structure of Gotanda on/off ramp is constructed by open cut methods, while the part of them is required to be constructed by non-open cut methods due to traffic restrictions.

In order to shorten the construction schedule, two patterns of design change were applied to the on/off ramp structure. Half precast beams of steel-concrete structure were applied to strut members of the on ramp structure. The steel segment structure was used instead of the reinforced concrete box culvert.

This paper introduces the design/construction methods and the construction records of these structures.