

首都高速中央環状品川線 シールドトンネルセグメント・床版の設計施工

住吉英勝*1・青木敬幸*2・米沢 実*3・中村康彦*4

概要 本稿では、首都高速中央環状品川線の大橋行きシールドトンネルについて、大断面長距離シールドトンネルに求められる長距離・高速施工技术や耐久性・耐火性に配慮したセグメント設計概要を報告する。

キーワード：シールドトンネル、RCセグメント、合成セグメント、耐火、合成床版

1. はじめに

首都高速中央環状線は、首都圏の3環状9放射の高速道路ネットワークのうち、3環状道路の最も内側に計画されている総延長約47kmの自動車専用道路である。中央環状線は、現在、東側と北側の高架構造区間と西側のトンネル区間の一部（中央環状新宿線）が開通しており、残る中央環状品川線（以下、品川線）9.4kmの建設により全線が完成することとなる（図-1）。

本稿では、品川線の工事のうち、首都高速道路㈱が施工を行っている大橋行きシールドトンネル（総延長約8.0km）のセグメント、床版の設計施工について報告する。

2. 品川線の概要

2.1 路線概要

品川線は、起点の品川区八潮3丁目で湾岸線から分岐したのち、目黒川および都道環状第6号線（山手通り）の地下を通過し、目黒区青葉台4丁目で現在供用中の3号渋谷線と中央環状線（山手トンネル）に接続する路線である。

このうちシールドトンネルは、品川区八潮に位置する大井北立坑から京浜運河を横断、目黒川に沿って北上し、大崎駅付近から山手通りに沿って国道246号大橋付近までの約8km区間を2本の併設トンネルとして計画され、大橋行き（北行）トンネルを首都高速道路㈱、大井行き（南行）トンネルを東京都が事業を実施している（図-2）。

2.2 工事契約上の特徴

本トンネルは、延長8km、外径12.3mのシールドトンネルのクラスとして、世界的にも最大級の大断面長距



図-1 首都高速道路ネットワーク

離シールドトンネルである。その施工には大断面長距離施工を可能とする高度な技術とともに品川線の平成25年度完成に向けた高速施工の技術が求められた。本工事の発注では、首都高速道路㈱として初めて技術提案型総合評価方式を採用した。技術提案は、発注者側からの道路線形やシールド内径等の基本条件に基づき、受注希望者がセグメント等を含めたシールド構造までも選択できることとし、主な評価項目は、

①シールド工事における長距離、高速施工掘進に対応した施工

②耐久性、耐火性に配慮したセグメント

とした。これにより発注者は優れた技術を幅広く求めることが可能となり、また、受注希望者も発注者のニーズに適した構造および施工の採用、設計施工への反映により工事としての一層のコスト縮減が可能となった。

本契約方式により、大橋行きシールドトンネルおよび五反田出入口、併設する大井行きトンネルとの横連絡坑等の工事を平成19年2月に鹿島・熊谷・五洋JVが受注した。

*1 すみよし・ひでかつ／首都高速道路㈱ 東京建設局 設計グループ課長
 *2 あおき・たかゆき／首都高速道路㈱ 東京建設局 品川線工事グループ所長
 *3 よねざわ・みのる／鹿島・熊谷・五洋特定建設工事共同企業体 監理技術者
 *4 なかむら・やすひこ／鹿島・熊谷・五洋特定建設工事共同企業体 工事課長代理

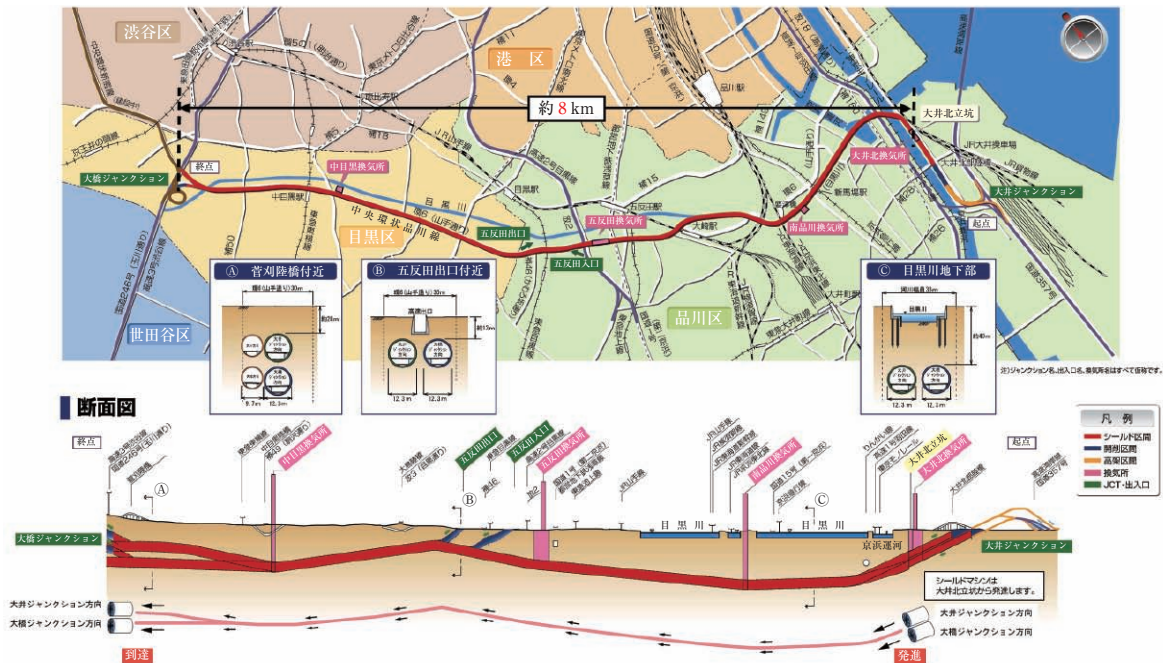


図-2 中央環状品川線の路線概要

- ①工事名
中央環状品川線シールドトンネル（北行）工事
- ②施工者
鹿島・熊谷・五洋中央環状品川線シールドトンネル（北行）工事特定建設工事共同企業体
- ③工期
2007. 2. 28～2013. 2. 28

3. トンネル構造

3.1 構造概要

本道路は、片側2車線の自動車専用道路として、トンネル構造は、セグメント外径12.3m、内径11.5mのシールドと床版により構成されている（図-3）。

3.2 セグメント構成

シールドトンネルの一次覆工には、耐火機能を備えた内面が平滑な二次覆工省略型のRCセグメントを全体の約8割で採用している。また、換気所接続部や出入口などシールド切開き箇所には鋼製セグメントを採用し、偏荷重および重荷重が作用する箇所には合成セグメント（SBL：Steel Beam Lining セグメント）を採用した。

1) RCセグメント

RCセグメントは、トンネル外径の縮小のために桁高を400mmと極力小さくし、曲線半径が600m以上の区間についてはセグメント幅が国内最大となる2.0mを採用、1リング9分割（8+K型）としている（図-4）。

2) SBLセグメント

RCセグメントでは対応できない重荷重区間には、今回新たに開発したSRC構造の合成セグメントであるSBLを使用している（図-5）。SBLは外面をスキンプレートで覆い、内面はRC構造となることが特徴であり、止



図-3 トンネル完成イメージ

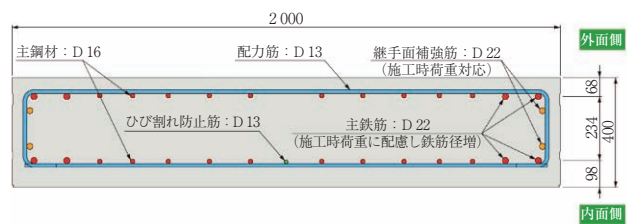


図-4 RCセグメント主断面

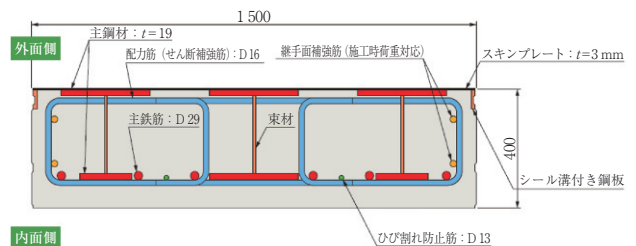


図-5 合成セグメント（SBL）主断面

水性と耐久性を高次元でバランスさせた合成セグメントである。使用する重荷重区間が曲線主体のため、セグメント幅は1.5mである。止水は、外側はガスケット、内側は水膨張性シールとなっている。国内初となる本格的なガスケットによる止水構造を採用したが、良好な止水性が確保されている。

3.3 継手構造

RCとSBLセグメントには、水平スライド式継手（ピース間）と新たに開発したピン式継手であるSP継手（リング間）のワンパス継手を採用し、施工の高速化を図っている（図-6）。この継手は、従来のものに比べて小さな力で挿入締結できるだけでなく、ピンの挿入後には大きな締結力を確保できることが特徴となっている。

3.4 耐火性

RCとSBLセグメントには、国内初となる耐火一体型セグメントを全線で導入した。トンネル内火災によるシールドセグメントの耐火性は、従来、トンネルの完成後にセグメント内面に耐火吹付けを行い確保していたが、施工期間の省略およびコスト削減のため、セグメント製作時にあらかじめ有機繊維（ポリプロピレン）をフレッシュコンクリートに混入させて、セグメント本体に耐火機能を確保している。トンネル火災時は、ポリプロ

ピレン繊維がセグメント表面で溶け、そこからコンクリート内の水蒸気を逃がすことで、セグメントコンクリートの爆裂を抑制するものである（図-7）。

3.5 耐久性

セグメントの耐久性に影響を及ぼす塩化物イオン濃度については、京浜運河に隣接する大井北立坑付近で塩化物イオン濃度の調査を実施した。RCセグメントは、コンクリートの塩害や中性化および鉄筋・継手部等の腐食性環境を評価し、鋼製セグメントではスキンプレート等の腐食性環境を評価して、セグメント本体の耐用年数100年を確保する仕様としている。

3.6 止水性

シールドトンネルの耐久性向上のために必要なセグメント間の止水性確保については、水膨張性シールをセグメント側面の内側と外側の2条設置に加えて、額縁加工を施すことでセグメント間の連続的な止水性を確保している。

4. セグメント施工

4.1 高速施工への対応

本工事では、シールドの高速掘進施工と側壁・床版の施工を同時に行うこととし、坑内の物流を上半部と下半部に区分している。

上半部は車両による生コンクリートその他資材の運搬と連続バルコンによる土砂運搬、下半部はタイヤ式搬送台車によるセグメントおよび鉄筋、床版パネル等の運搬としている（図-8）。

また、シールド後方のセグメント搬送設備は、最大日進量30mに対応できる仕様とし、土砂搬出設備は最大掘進速度40mm/minに対応できる設備とした。

4.2 セグメント搬送設備

高速施工に対応した搬送能力確保のため、1リング分を一括で高速運搬できるタイヤ式搬送台車も開発している。坑内への枕木設置を省略するため、搬送台車をタイヤ式にし、センター部のみに軌条を敷設するセンター

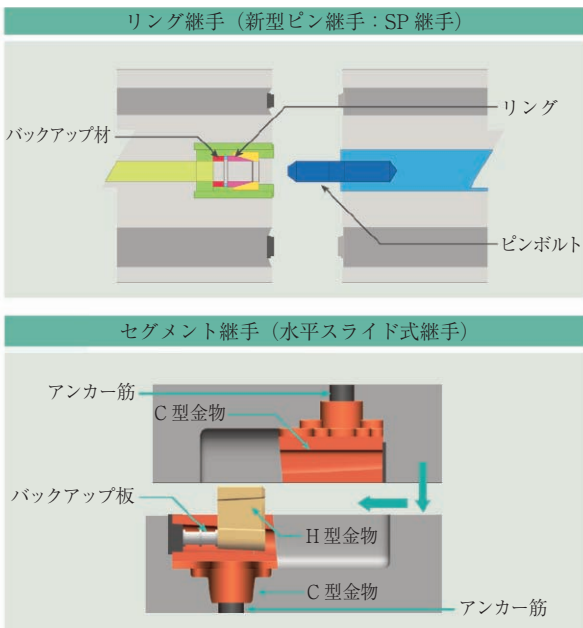


図-6 ワンパス継手構造

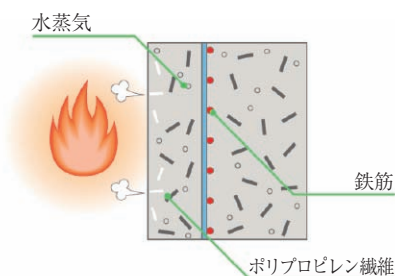


図-7 セグメント耐火機能概念

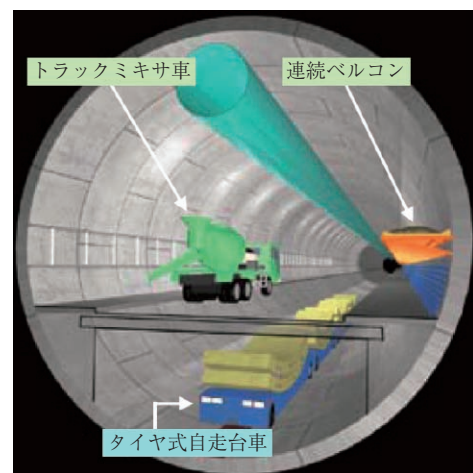


図-8 坑内運搬設備概要



写真-1 セグメント搬送台車 (タイヤ式)



写真-4 バキューム式エレクター



写真-2 セグメントドーリー



写真-5 シールドテール内エアバック



写真-3 セグメントセッター

レール方式を採用した (写真-1)。

本工事のタイヤ式搬送台車は、上り勾配区間を除き、76トンのセグメントを積載した状態で、時速15kmで走行することが可能であり、中間地点までは1編成、それ以降は坑内に離合箇所を設置して2編成でセグメント運搬を行っている。立坑部にはセグメントリフトを設置し、地上部および坑口に設置するセグメントセッターとそれらの間を運搬するセグメントドーリーにより、地上～立坑内～坑口間は、全自動でセグメント搬送を行っている (写真-2、写真-3)。

4.3 高品質確保への対応

本工事のRCセグメントは、桁高が小さく幅広で、弧長も大きいことから、ひび割れや欠け等のセグメント損傷対策を実施している。エレクターによるセグメント把持時のひび割れ防止対策として、バキューム式エレ

クター装置を導入した (写真-4)。

また、組立中のジャッキ押し込みおよび掘進中の損傷防止対策として、セグメントに偏心荷重を発生させないように、小径ダブルジャッキ方式を採用した。さらに、曲線施工時にセグメントリングに大きな偏荷重を作用させない全ジャッキ使用のシステム化施工により、従来施工で生じやすかった曲線区間掘進中のクラック発生を抑止している。

セグメントの真円度の確保は、従来の曲線施工時に不向きな内部支持方式でなく、シールドテール内にエアバックを装備して外側から締め付ける方式を採用し、補助的に設置した内部支持方式の真円保持装置を使用することなく、良好な真円度を確保しながらセグメントを組立てている (写真-5)。

5. 側壁・床版の施工

5.1 高速施工への対応

側壁は移動式型枠台車を使用した現場打ちコンクリートとし、床版はリブ付き鋼板パネルに現場で配筋・コンクリート打設を行うハーフプレキャスト方式としている。鋼板パネルの坑内運搬にはセグメント搬送設備を使用し、専用の床版設置台車により、側壁上に架設している。シールド掘進を行いながら、後方より側壁・床版の同時施工を行っており、側壁・床版の計画月進量を300m/月としている。現在、順調にシールド掘進と同時施工を行っている (図-9)。

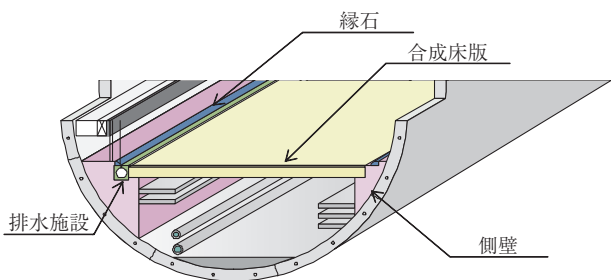


図-9 内部構築工構造図

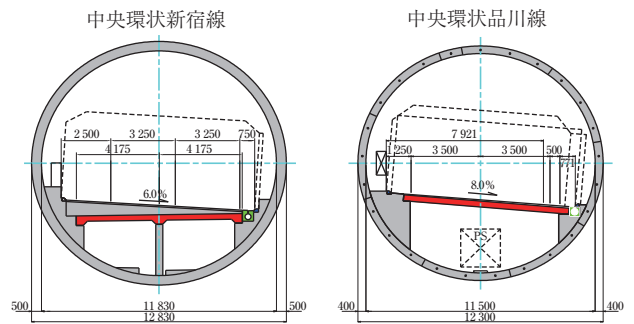


図-11 床版横断勾配

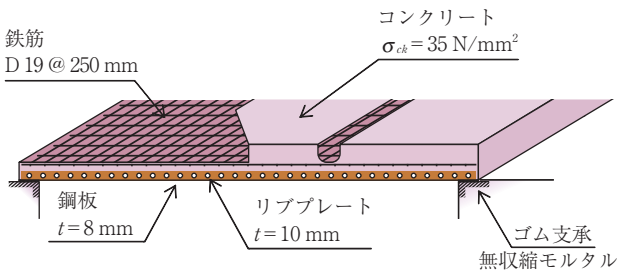


図-10 合成床版構造

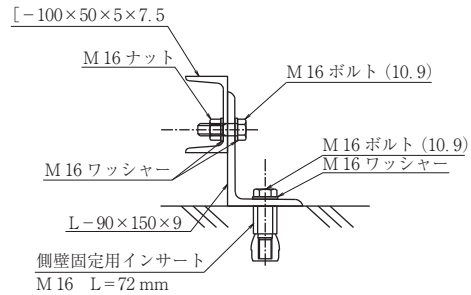


図-12 床版側壁定着構造

(工事数量)

①側壁工

- 付着鋼材 1 300 t (C-100, C-200)
- 鉄筋 1 100 t (D 13~D 19)
- コンクリート 25 300 m³ (24-15-20 H)

②床版工

- 鋼板パネル 62 700 m² (3 350 枚)
- 鉄筋 1 200 t (D 19)
- コンクリート 19 900 m³ (35-15-20 H)

5.2 床版構造

道路床版は、鋼板パネル（鉄板厚=8 mm）を側壁上に架設し、坑内にて鉄筋（縦横断とも D 19 @ 250 mm）を配置して現場打ちコンクリート（ $\sigma_{ck}=35 \text{ N/mm}^2$ ）で一体化するハーフプレキャストタイプの合成床版とした（図-10）。

設計支持スパンは 8.0 m、合成床版厚さは 320 mm（施工時の車両走行による摩耗・補修代を 10 mm 見込む）とし、施工（仮設）時、供用時に作用する自重、活荷重に対して部材の安全性、使用性に問題とならない変形量、十分な疲労耐久性を有した構造である。

鋼板パネル幅は、地上搬送時の幅員制限（2.5 m 未満）により、1 枚当たり 2.3 m とした。

鋼板パネル間の継手方法は、添接板とトルシア型高力ボルト（M 22、120 本/継手）にて締結する。

鋼板パネル下面は、無溶剤型変成エポキシ樹脂塗料（膜厚 360 μ ）を塗布することで防錆性能を確保する。継手部以外は工場塗装とし、継手部は、床版コンクリート養生後、専用台車を使用し現場で塗装する。

合成床版支承部には、補強繊維入りクロロプレンゴム支承とアンカーバー（ $\phi 25$ ）を設置する。合成床版設置

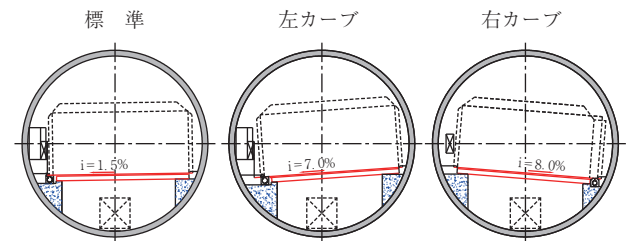


図-13 道路線形による側壁形状の相違

の高さ調整は、ライナープレートで調整後、間隙を無収縮モルタルで充填する。ゴム支承は、製作工場において、事前に鋼板パネルに接着させる。また、合成床版両端部裏面には、緩衝材（発泡樹脂系）を配置する。

合成床版の片勾配（横断勾配）は、排水勾配 1.5% を標準とし、トンネル線形（曲線）により最大 8% まで変化する。供用中の中央環状新宿線では、一部を除き合成床版を一律 1.5% で設置後、後施工となる調整コンクリートで必要横断勾配を確保した。品川線では、側壁コンクリート打設時に厳密な高さ管理を行い、合成床版自体に勾配を持たせることで、調整コンクリートを不用とする合理的な構造とした（図-11）。

5.3 側壁構造

側壁には、上載荷重である車両荷重等を内面平滑型 RC セグメントに定着・伝達する構造が必要である。本工事における定着構造は、セグメントに埋設してあるインサートに付着用鋼材（溝型鋼）をボルト固定し、この付着用鋼材（溝型鋼）と側壁コンクリートの付着力により定着させる構造とした（図-12）。

側壁定着部の検討は、付着用鋼材（溝型鋼）および固

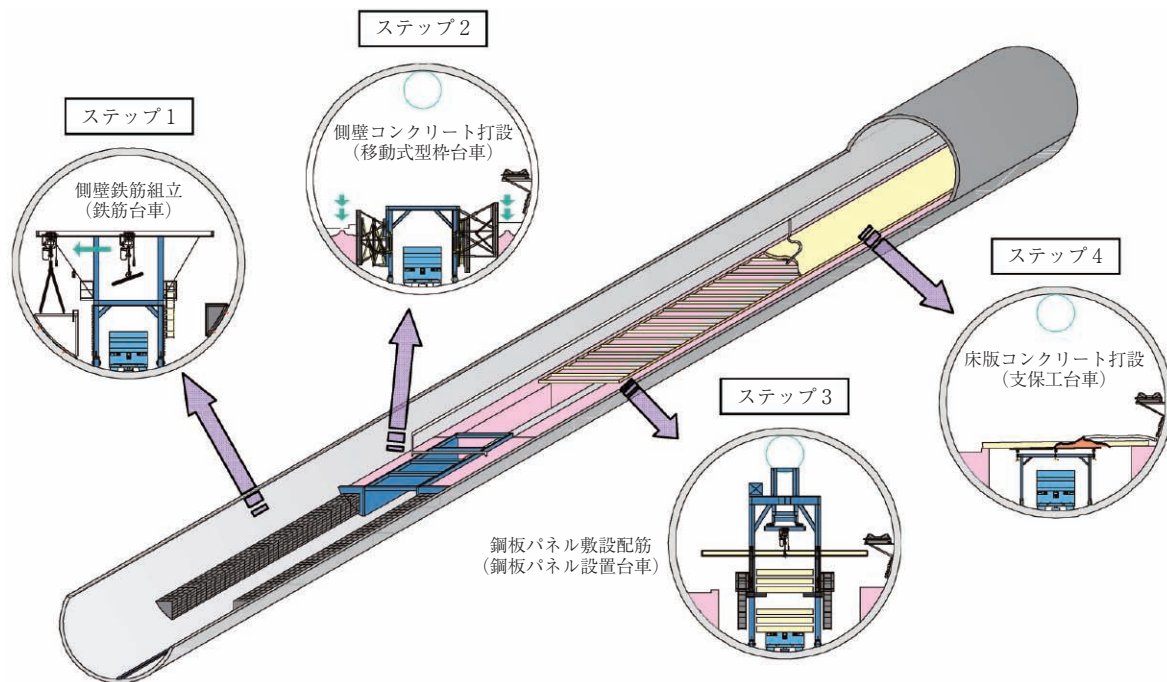


図-14 施工ステップ図

定鋼材（L型鋼，ボルト，インサート）に対して照査を実施し，仕様・寸法等を決定した。

側壁形状は，曲線・避難通路等を考慮した道路線形とシールド線形に相違があるため，左右非対称であり，断面の大きさも場所によって異なる（図-13）。

また，施設の電線・信号線用埋設配管位置が，径・管種等細かく設計されており，さらに，25 m ピッチで本線階と床版下とを防災用配管（水噴霧管・泡消火用配管）でつなぐ必要があるため，開口が設置された。

5.4 側壁・床版の施工

側壁・床版の施工は，以下のとおりとしており，図-14に施工ステップを示す。

- ①側壁工における付着鋼材設置および鉄筋組立は，専用の作業台車により施工する。材料は，シールド掘進に使用するバッテリーロコで運搬する。
- ②鋼板パネル設置は，側壁を打設した後，専用のストック機能付き作業台車を使用して行う。鋼製パネルは，側壁資材同様バッテリーロコで運搬する。
- ③コンクリート打設は，完成した床版上をミキサ車で坑内運搬後，定置式コンクリートポンプで打設する計画とし，シールド掘進工に影響を与えることなく床版施工を行う。使用するコンクリート配合は，移動式型枠台車の早期脱型移動および床版上へ車両・設備等の上載を早期に可能とするため，側壁・床版とも早強コンクリートを採用している。

5.5 コンクリート打設計画

本工事では，以下のような坑内条件等により，生コンの搬送～打設が大きな課題となった。

- ・シールド掘進時の坑内気温は，夏期で32～35℃，

冬期でも25℃以上ある。

- ・坑内の運搬距離が坑口受け場～坑内中継圧送ポンプまで最大7.5 kmとなり，坑内運搬時間が30分超（平均速度15 km/h）となる。

- ・坑内の圧送距離が合成床版施工区間および養生区間があるため250～400 mとなる。

- ・計画打設量が最大160 m³/日（生コン車36台）となる。

そこで，品質および工程を確保するために，以下の工夫を行った。

1) コンクリート配合の見直し

生コンの坑内長距離搬送，および長距離圧送に起因するスランプロス等のコンクリート性状劣化による配管閉塞等の問題が数回発生したため，スランプを15 cmから18 cmに変更して施工性および品質を確保した。

また，標準配合の他，修正配合（高性能AE減水剤遅延型の使用等）を事前に準備し，現場環境の変化に伴うコンクリート性状劣化に対応できる計画とした。さらに，夏期は早強コンクリートの性状維持が時間経過とともに困難となり，圧送距離にも限界が生じたため，普通コンクリート配合も準備し使用した。

2) コンクリート投入箇所の変更

当初，コンクリートは，発進立坑である大井北立坑から8 km先の坑内まで供給する計画で五反田出入口付近まで施工していた。ところが今後の施工では夏期において，90分以内での打設完了が困難であること，床版工の次工程として，排水施設工・縁石工・避難通路工等のコンクリート工事が予定されており，同一箇所からの投入では，双方を並行作業とする工程短縮が実現できな

表-1 1か月当たりの床版施工延長

	施工設備	打設回数	施工延長
側壁コンクリート (型枠台車)	15 m スパン×2 基 (70~100 m ³ /回)	11 回/月	330 m/月
床版コンクリート (支保工台車)	9 m スパン×7 基 (120~150 m ³ /回)	5.5 回/月	330 m/月

い。そのため、延長8 kmのうち、中間地点にあたる五反田出入口部に別途ライナー掘削により投入坑を設置し、その先4 km区間のコンクリート工を実施することとした。

3) 打設スパンの検討

300 m/月以上の進捗を可能とした側壁、および床版コンクリートの1か月当たりの施工延長を表-1に示す。

6. おわりに

品川線大橋行きシールドは、設計施工を一括した技術

提案方式を契約において採用したことで、前例のない大断面・長距離シールド施工に求められる高度な技術を設計段階から幅広く展開することが可能となった。また、将来に向けては、本工事の設計施工を通じて、高度・複雑化する都市部の大深度地下利用に関する多くの知見が得られるものと考えている。現在、シールドは、全長8 kmのうち平成23年10月末に6.1 kmの掘進を完了しており、品川線の平成25年度完成を目指し残る区間を安全・確実に施工できるよう発注者・受注者一丸となって邁進していきたい。

参 考 文 献

- 1) 田嶋ほか：中央環状品川線シールドトンネル工事概要，土木技術64巻12号，2009.12
- 2) 住吉ほか：大断面長距離シールドにおける月進400 m高速施工への挑戦，トンネルと地下，Vol.42，2011.10