

フルサンドイッチ型合成セグメントの 構造特性と製造方法

湯田坂 幸彦・副島 直史・中川 雅由

首都高速道路中央環状品川線のほぼ中間に建設予定の五反田出入口部は、シールドトンネルを切開いて出入口躯体を構築する計画である。当該区間の一部において、高耐力・高剛性を有する合成セグメントを一部区間に採用する。本セグメントは、6面を全て鋼材で覆い、内部をコンクリートで充填した鋼・コンクリート複合構造である。本稿では、適用に向けて実施した性能確認試験の他、充填方法を中心とした合成セグメントの製作方法等について報告するものである。

キーワード：シールドトンネル、セグメント、性能試験、製作要領

1. はじめに

(1) 路線概要

首都高速道路中央環状品川線は、首都高速中央環状線（全線約47km）（図-1）の南側部分を形成し、高速湾岸線から大井付近で分岐したのち、目黒川及び環状6号線（山手通り）の地下をトンネルで北上し、大橋JCTで中央環状新宿線及び高速3号渋谷線に接続する全長9.4kmの路線である（図-2）。路線のほぼ中央に大橋方向アクセスとなる五反田出入口を構築する他、4つの換気所を構築する計画となっている。

本路線が開通することで、高速道路のネットワークが効率よく機能し、都心環状線などの渋滞が緩和されるとともに、一般道路の混雑解消に資する路線として平成25年度の開通を目指し鋭意建設中である。



※中央環状新宿線についてはH22.3.28全線開通

図-1 中央環状線概要図

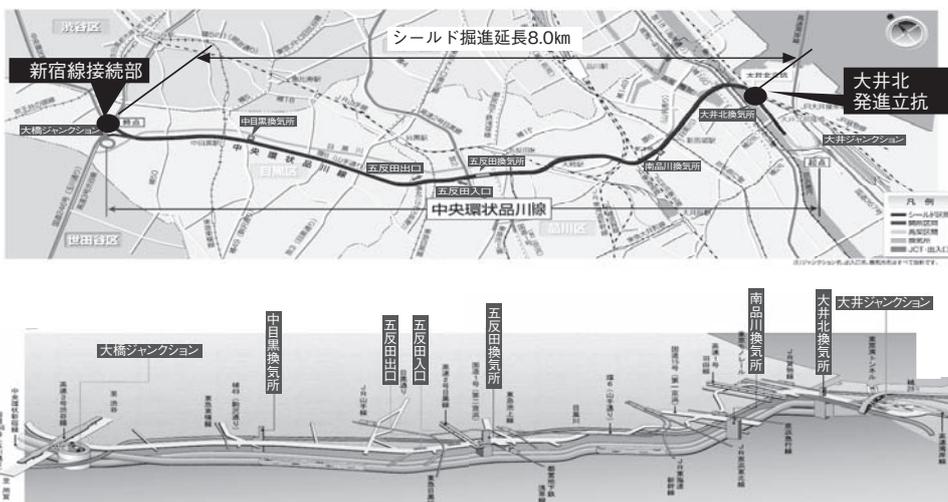
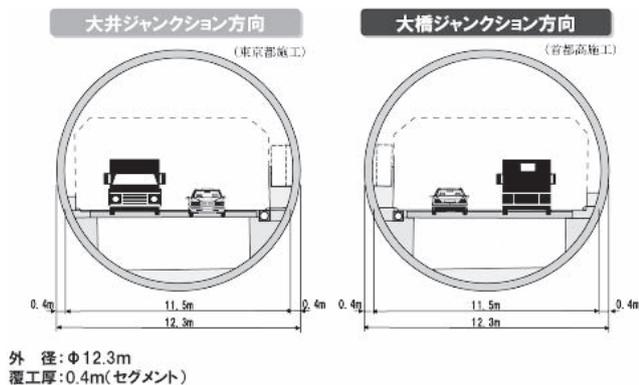


図-2 中央環状品川線路線概要図

(2) 工事概要

本路線のうち、首都高速道路株が施工する中央環状品川線シールドトンネル（北行）工事は、地下トンネル部のうち 8.0 km を 1 台のシールド機にて掘進し、トンネル覆工と同時に側壁や床版等の内部構築を施工する長距離シールドトンネル工事である。本工事における標準断面を図一 3 に示す。本工事区間は、完成後に北行トンネルとなる大橋方向トンネル（本工事）と約 3 m の離隔で大井方向トンネル（完成後の南行トンネル：東京都施工）が併設されることとなる。



図一 3 トンネル標準断面図

本工事では、高速湾岸線から分岐する大井地区に発進立坑を設け、そこから新宿線との接続部である国道 246 号大橋地区までをシールド機で掘削する。シールドトンネル一般部の内径は ϕ 11.5 m であり、一般部のセグメント厚さは 400 mm である。トンネルの土被りは、南品川地区付近で最大 46 m、五反田出入口付近で最小 14 m となっており、通過土層は発進部の一部を除いてほぼ全線にわたって上総層群泥岩層（土丹層）であり、非常に安定した地盤を掘削する。トンネルの最小曲線半径は 230 m、最大勾配は 3% となっている。環状 6 号線（山手通り）とのアクセスとなる五反田出入口は、分合流部におけるトンネル覆工を一部撤去した上で出入口躯体と一体化するトンネル切開き構造で構築する。切開き部における覆工構造は、首都高速中央環状新宿線の出入口構築において鋼製セグメントが採用されているが、本工事では、部材応力が厳しくなる一部の区間において、撤去ピースと躯体接合部のピースを従来構造の鋼製セグメントとし、それ以外の残置されるピースを内面が平滑で高強度・高剛性を有する「フルサンドイッチ型合成セグメント」（以下、合成セグメントと称す）とする構造を採用することとした。合成セグメントの採用にあたっては、構造性能確認、耐火性能確認のために行った各種実証試験の他、大断面シールドトンネルとしての施工性・組立精度等

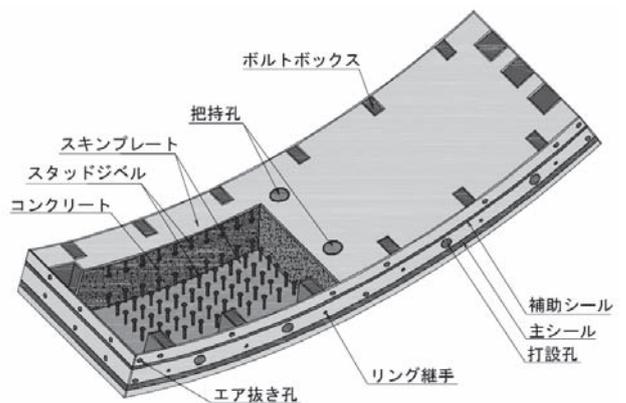
を検討した。本稿においては、これらの概要について報告するものである。

2. 合成セグメントの性能確認

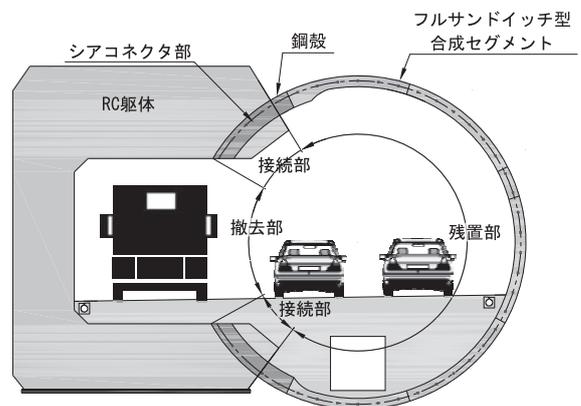
(1) 合成セグメントの概要と採用経緯

図一 4 に合成セグメントの概要図を示す。セグメントの外面となる 6 面全てを鋼板で覆い、その中にコンクリートを充填して一体構造とした“鋼・コンクリート複合構造”である。構造主部材である内外面のスキンプレートにはスタッドジベルを溶接してコンクリートとの確実な一体化を図っている。また継手構造は、ボルト構造のため鋼製セグメントとの接合も容易に行うことができる。

五反田出入口で採用するトンネル切開き構造部は、トンネル覆工に非常に大きな断面力と変形が発生する。当該箇所に鋼製セグメントを適用する場合、大きな強度と剛性を確保するため、主桁高さおよび主桁厚さをより大きくする必要があり。そこで、1 リングの中に鋼製セグメントと高耐力・高剛性を有する合成セグメントを併用することにより（図一 5）、従来の鋼製セグメントよりも覆工厚さを低減し、かつトンネル



図一 4 合成セグメント概要図



図一 5 切開き部トンネルイメージ図

覆工の変形量を抑制できる利点があると判断して本構造の採用を決定した。

(2) 性能確認

採用にあたっては、合成セグメントの本体構造性能、耐火性能の他、異種セグメント（鋼製セグメント）間における継手性能や部材設計手法の評価等の課題があったため、これらの課題を実大供試体による性能確認試験にて検証し、適用性を確認している。実施した主な実物大実証試験とその結果を表一に示す。

合成セグメント本体構造性能は主鋼材（内外面のスキンプレート）を鉄筋換算したRC計算にて部材照査を行っている。本体性能・構造計算の妥当性を確認するために行った単体曲げ試験においては耐力・剛性とも計算結果と同等もしくはそれ以上ということを確認した。

また、合成セグメント相互の継ぎ手性能、合成セグメントと鋼製セグメントとの継ぎ手性能確認のためにそれぞれ継ぎ手曲げ試験を行った。結果は継ぎ手の回転ばね値は計算値と同等であることを確認することができ、破壊モードはボルトの破断であり、計算上の曲げ耐力以上であることを確認した。

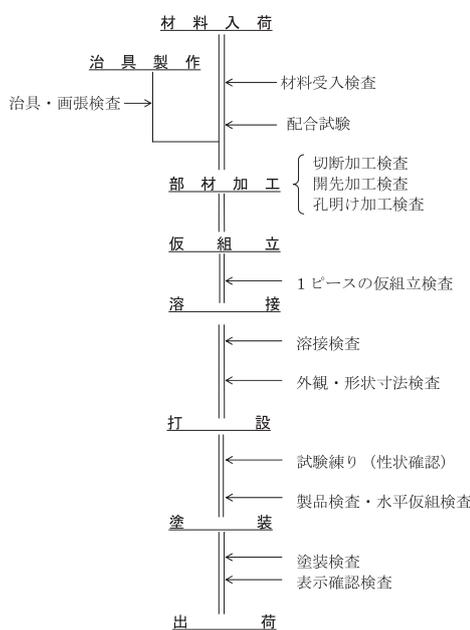
合成セグメントの耐火性能についても試験によって確認している。耐火試験は、耐火被覆材（耐火モルタル 35 mm）を被覆した試験体に、設計軸力を導入した状況下でRABT（60分 - 1200℃）加熱曲線により試験を行った。加熱によって有害な変形やひび割れ等は発生しなかった。また加熱後試験体について単体曲げ試験を実施し、加熱によって耐力・剛性低下がないかを確認した結果、耐力・剛性とも未加熱試験体と同等であることを確認している。

3. 合成セグメントの製造

(1) 製造概要

フルサンドイッチ型合成セグメントは、まず主鋼材である内外面のスキンプレート、継手板、ボルトボックスを加工し、把持金物、グラウト注入孔なども含めた鋼製部材を溶接して六面鋼殻ピースを組み立てる。その後、内部充填コンクリートを打設して主鋼材との構造一体化を図り、防食塗装を施して完成する。

合成セグメントの製造および品質確保のための検査フローを図一に、製作および品質確認検査状況を写真一にそれぞれ示す。



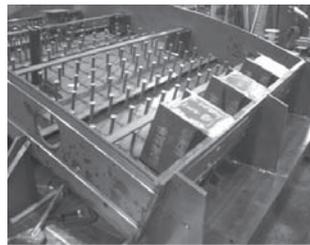
図一 合成セグメントの製作フロー

表一 実証試験一覧

確認すべき項目	検証方法		試験により得られた知見
	実施事項	実施概要	
本体および継手構造の部材評価	本体部の構造性能確認	合成セグメントの単体曲げ試験	・設計耐力以上の曲げ耐力を有している ・スキンプレートを鉄筋換算したRC計算による設計照査方法の妥当性を確認
	継手部の構造性能確認	合成セグメント間の継手曲げ試験 合成セグメント・鋼殻間の継手曲げ試験	・継手構造は設計耐力以上の曲げ耐力を有する ・回転ばね定数設計想定値（M-K法）と同等
合成セグメント～鋼殻の千鳥組構造の評価	セグメントの添接性能確認	合成セグメント（変断面）と鋼殻3リングを千鳥組みし、中央リングに載荷する添接曲げ試験	・弾性範囲内において、千鳥組みによる添接効果を実験により確認 ・梁ばねモデルによる構造評価の妥当性を確認
火災時の部材健全性	耐火材を被覆した加熱試験	合成セグメント加熱試験（RABT60加熱曲線）	・耐火不被覆厚35mmとすることで、部材の受熱温度は許容温度以下となることを確認 ・主鋼材のひずみも弾性範囲内であることを確認
	耐火材を被覆した加熱後曲げ試験	加熱後供試体の曲げ試験	・加熱後試験体は、曲げ耐力・剛性とも未加熱試験体と同等
耐火被覆の妥当性	加熱試験時および試験後の状況確認	試験時における耐火被覆材の状況確認 試験後の供試体内部の状況確認	・耐火材は加熱実験時にひび割れを生じたが剥離はない ・加熱後試験体の内部には有害なクラックは発生していない
出来形品質の確保	実大ピースの試作	合成セグメント実大ピースの製作 内部コンクリートの充填性確認試験	・内部充填する高流動コンクリートはリング継手板に空気孔を設けることにより均一な打設が可能



部材加工



仮組立



溶接（背面）



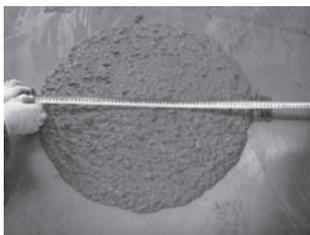
溶接（内面）



鋼殻の完成状況（背面 PL 撤去）



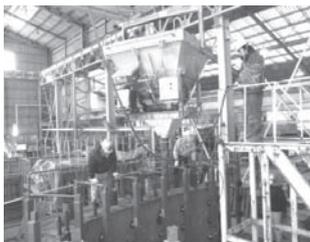
単体寸法・外観検査



コンクリートのスランプフロー試験



コンクリートの流動性確認試験



内部コンクリートの充填

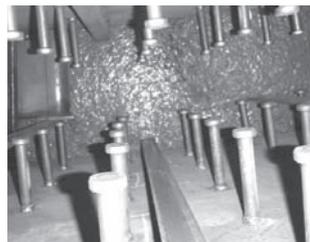


写真-1 合成セグメントの製作状況

(2) 外面鋼殻の製作と寸法精度の確保

合成セグメントの鋼製部材である外面鋼殻の製作においては、製作寸法精度の確保が重要であると判断した。外面鋼殻の製作寸法精度については、シールド工用鋼製セグメント^{1), 2)}に準じて、表-2のとおり製作寸法管理値を設定した。なお、合成セグメントは剛性が大きいので、コンクリートを充填する前の外面鋼殻のねじれに対する寸法精度確保が重要と判断し、鋼製セグメントでは規定がない「対角長差」を品質管

理項目として追加した。

また、製品寸法精度を確保するため、外面鋼殻組立時の溶接量を必要最小限に抑制することを目的に、部分溶け込み溶接が必要となるボルトボックスは予め部品として製作し、主鋼材、継手板、ボルトボックスなどの溶接は全て「すみ肉溶接」となるよう配慮した。

この結果、鋼殻は全て表-2に示す製品寸法精度を満足することができた。

表-2 ピース単体寸法精度試験における管理値

項目	基準寸法 (mm)	管理値 (mm)
桁高	400, 450	± 2.15 ^{※)}
	550, 650	
幅	2000, 1500	± 1.5
対角長差	-	± 2.6
ボルト孔ピッチ	設計値	± 1.0
ボルト孔径	M45 以下: + 3 mm	- 0
	M48 以下: + 4 mm	+ 1.0

※) 桁高の管理値はトンネル標準示方書によれば一般に± 1.5 mm であるが、内縁側主鋼材の板厚公差 (± 0.65 mm) を加味して設定している。

(3) コンクリートの充填性能の確保

合成セグメントは、外面鋼殻内部にコンクリートを充填することで主鋼材とコンクリートの一体化を図る構造であることから、コンクリートが六面鋼殻内部に確実に充填され、一体化された製品がトンネル覆工として必要な製作寸法精度を満足することが求められる。

コンクリートの配合選定は、事前に要素充填実験、実大モデル充填実験（セグメント幅 2.0 m）を行い、表-3に示すとおり自己充填性に優れた高流動コンクリート（粉体系）配合を選定した。

なお、コンクリートの設計基準強度は材齢 28 日における圧縮基準強度を基準として $f'_{ck}=48 \text{ N/mm}^2$ 、コンクリートに含まれる塩化物イオン量は 0.3 kg/m^3 以下とした。

また、コンクリート打設完了までのフレッシュ性状保持を考慮して混和剤には遅延型の高性能 AE 減水剤を使用し、充填性向上を図る目的で膨張材を使用することとした。膨張率は、収縮補償用コンクリートとして JIS A 6202 に規定された材齢 7 日の膨張率で 150×10^{-6} 以上 250×10^{-6} 以下の範囲内であることを試験にて確認した。

選定した高流動コンクリートによる実大モデル充填実験結果を写真-2に示す。実験は、厚さ 0.4 m、幅 2.0 m の外面鋼殻モデルを製作し、主鋼材にスタッドジベル、補剛材、ボルトボックスを設置した状態で上部に打設用孔 ($\phi 180 \text{ mm}$) とエア抜き孔 ($\phi 50 \text{ mm}$)

表—3 充填コンクリートの示方配合表

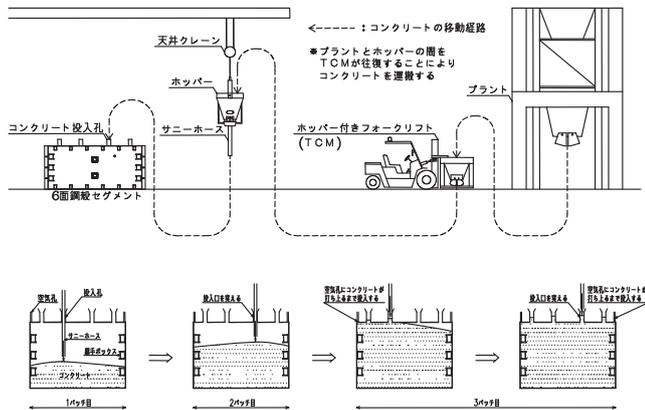
粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブフローの範囲 (mm)	空気量の範囲 (%)	水結合材比 W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材		混和剤
					W	C	S	G	フライアッシュ	膨張材	SP
20	625 ± 75	3 ± 1.5	29.4	47.8	175	406	733	816	169	20	5.06



写真—2 実大モデルによる充填性確認実験結果

を設け、ホッパーおよびホース付きシュートを用いて高流動コンクリートを打設した。なお、実験ではコンクリート充填後の充填性を確認する目的で、主鋼材、継手板を外せる構造とした。実験の結果、コンクリートはスタッドジベル、補剛材、ボルトボックスの廻りを含めて十分に充填されており、コンクリート配合および打設方法の妥当性が確認された。

これらの実験結果を基に、合成セグメント製作工場におけるコンクリート充填要領を図—7のとおり設定した。

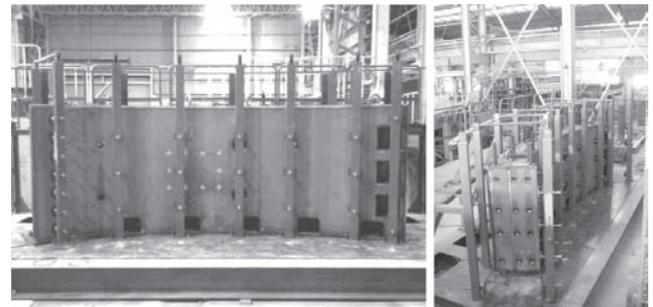


図—7 実プラントにおけるコンクリート充填要領

コンクリートの充填は、3バッチに分けて打設し、1ピース（弧長約4.7m）に4箇所設けた打設孔の位置および打設速度を管理しながら高流動コンクリートを充填し、上面（リング継手面）のエア抜き孔に設置した複数のエア抜きパイプ内で充填高さが約20cm程度になるのを確認して打設完了とした。

(4) 合成セグメント製作寸法精度の確保

外面鋼殻の内部にコンクリートを充填する際は、コンクリート打設圧により主鋼材が孕み出して合成セグメントの厚さ寸法を確保できなくなる懸念があったため、写真—3に示す形状保持構造（フレキシブル支保部材）を採用した。



写真—3 コンクリート充填時の形状保持構造

実製作ピースにおいて単体ピースの製作寸法精度を確認した結果、全ピースが表—2に示した管理値以内であることを確認した。

また、五反田出入口部では、トンネル切開き部の覆工として1リング内に合成セグメントと鋼製セグメントを併用した構造となるため、予め現場と同じ条件となるよう2リング水平仮組試験を実施し、複合リング構造として組み立てた状況での組立寸法確認試験を実施した（写真—4参照）。試験の結果、水平仮組寸法精度は、シールドトンネル用セグメントとして規定されている寸法管理値以内の精度であることが確認できた。

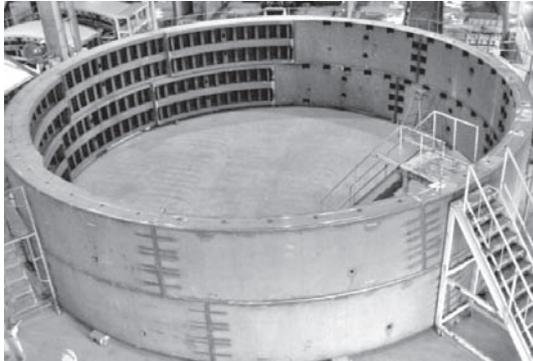
4. おわりに

本工事は、大断面の長距離シールドトンネルであり、構造物の品質を確保した上で工程遵守のために施工の高速化を目指した工夫を行いつつ鋭意施工中である。

本稿執筆現在、本線シールドトンネルは約1.7km地点を掘進中である。なお本工事は、シールド工事と合わせ、路線のほぼ中央に開削トンネルで施工される五反田出入口工事についても実施している。本掘進工における坑内の施工状況を写真—5に、五反田出入口部の完成イメージパースを図—8にそれぞれ示す。

合成セグメントは一連の性能試験並びに製作品質確

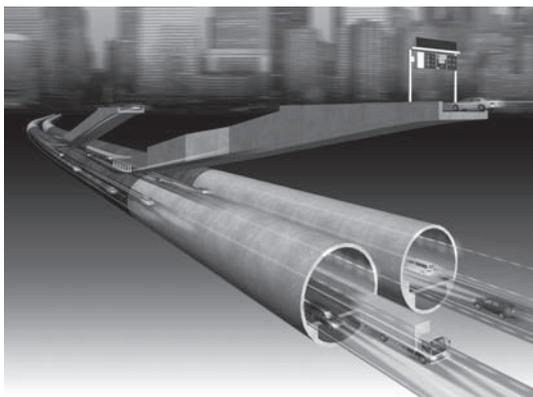
認検査結果から、トンネル覆工として優れた性能を有することを確認できた。今後は現場での組立、その後の耐火被覆工を含め、実施工の結果について別途報告したいと考えている。



写真一4 2リング水平仮組試験



写真一5 本掘進工における本線シールド坑内状況



図一8 五反田出入口部の完成イメージパース

《参考文献》

- 1) 土木学会：「トンネル標準示方書」(2006)
- 2) 土木学会・日本下水道協会：「シールド工専用標準セグメント」(2001)

【筆者紹介】



湯田坂 幸彦（ゆださか ゆきひこ）
首都高速道路(株)
東京建設局 品川線工事グループ
課長代理



副島 直史（そえじま なおふみ）
首都高速道路(株)
東京建設局 設計グループ
主任



中川 雅由（なかがわ まさよし）
中央環状品川線シールドトンネル（北行）工事
鹿島・熊谷・五洋特定建設工事共同企業体 統合事務所
副所長