

357号東京港トンネル ～安全施工の取り組み～

畦地 拓也¹

¹関東地方整備局 川崎国道事務所 湾岸建設監督官詰所 (〒140-0003 東京都品川区八潮1-1-3)

2012年2月7日、岡山県倉敷市でJX日鉱日石エネルギー水島製油所の海底シールドトンネルを施工中に海水が流入し、作業員5名が死亡する事故が発生した。国道357号東京港トンネルでは、2011年9月よりシールドの発進準備に向けて整備を進めており、トンネル標準示方書をはじめとする関係諸規定を遵守し遺漏ない設計を仕上げているところであるが、倉敷市での事故を受けて、追加の地質調査を行い、それを基に、シールドマシン・セグメントの再照査を行うなど東京港トンネルの現場に応じた検証を済ませ、11月21日にシールドを発進させたところである。安全施工にかかる具体的方策とそれに至ったプロセスを現場の観点から取りまとめた。

キーワード 海底トンネル, シールド工, 安全

1. まえがき

国道357号東京港トンネルは、現在慢性的な渋滞が発生している首都高速湾岸線の東京港トンネルと並行して整備することで、当該区間の渋滞緩和、羽田空港、湾岸地域のアクセス向上を図る事業である。(図-1)

本工事は、東京都品川区八潮2丁目(大井側)から品川区東八潮(台場側)を結ぶ第3種1級の道路トンネルを構築する工事で、先行して海側(西行き)羽田空港方面への外径φ12mシールドトンネルで車道2車線を整備する。工期は、2010年12月23日から2014年3月31日までとなっている。

(3)本工事で、使用するシールドマシンは、泥土圧方式、シールド断面直径約12m、長さ約11mとなっている。また、シールド掘削土量は約172,000m³となっている。

(4)本工事の特徴としては、①小土被りのため、施工時のトンネル浮き上がり安全率が小さい。②海面下の高水圧、海面変動、塩害、沖積粘性土主体の軟弱粘性土層。③首都高速道路湾岸線や、東京ガスの海底導管等が近接。等が揚げられる。

2. 357号東京港トンネルの設計・施工の概要

(1)トンネルの全体延長は、L=1,880m、シールドトンネル部の延長は、L=1,470mである。(前後に発進立坑掘削区間230m、到達立坑掘削区間180mがある)(図-2)

(2)大井側の発進立坑(長さ約30m、幅約18m、深さ約17m)を構築し、シールドマシン本体をおろし、セッティングする。後ろにU型擁壁を連続して構築しており、シールド掘削に必要な廃土用ベルトコンベア、電源設備等、後続台車として一緒に連結して掘進していく構造になっている。



図-1 東京港トンネル位置図

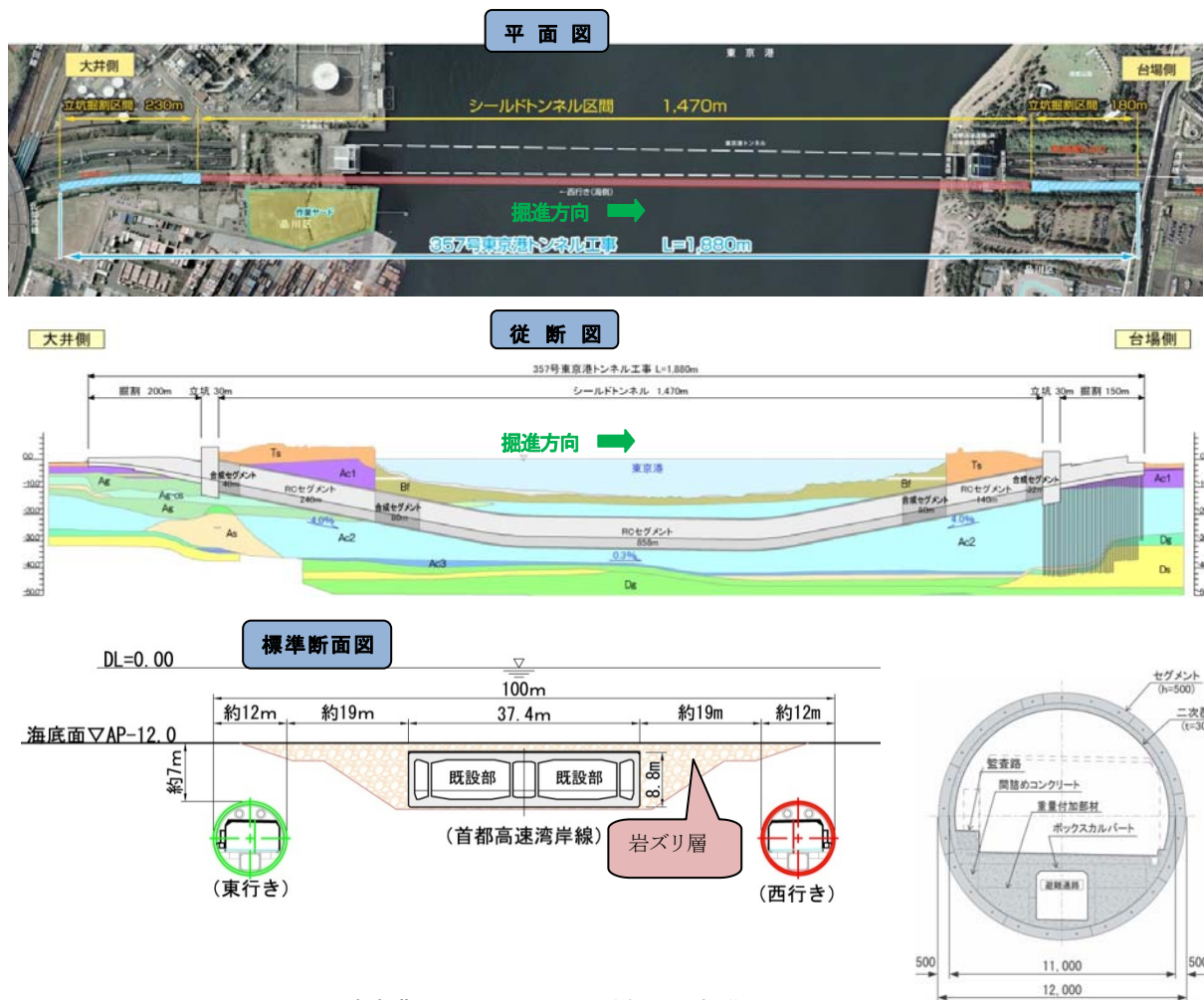


図-2 東京港トンネル 平面図・縦断面図・標準断面図

3. 東京港トンネルの安全施工にかかる具体的方策

JX水島港トンネル事故の原因について、情報が少ない中、357号東京港トンネル工事では、水島の事故でこれまで報じられている懸念、今後シールド発進までに出てくる懸念、その他考えられる懸念も想定して全てを払拭させ万全を期してシールドを発進させる。

<マスコミ報道されている主な懸念>

- ・電気システムのトラブル、活用した地質調査の有効性、セグメント・マシンの耐力など。

安全施工にかかる具体的方策について、次の事項について再照査・検証を行うこととした。

① 現地追加調査

【海底状況の再確認、岩ズリ部の平面・横断分布の把握】

②設計の再照査

【現地追加調査結果に基づき、セグメント、マシンの耐力を再照査】

③施工計画の検証

【現地追加調査結果に基づき、施工計画検討項目の見直し、充実】

④安全対策の検証

【想定されるトラブルを考慮し安全管理の見直し、充実】

また、今回のトンネル事故を受け、事故の再発防止に向けて専門家が検証する国土交通省(本省)の「シールドトンネル施工技术安全向上協議会」での審議内容をも取り込む形で網羅していくこととした。

(1) 現地追加調査結果

海底地質調査結果

- ・海底面調査（マルチビーム測量、サイドスキャンソナー、底質探査）

既往土質調査の水深コンターと比較して海底の深さは概ね等しことが確認された。

- ・海底面磁気探査結果（曳船式磁気探査、東京港トンネルを中心として幅20m、長さ950mの範囲により海底面の磁気異常物探査）

磁気異常反応（金属片）のあった34箇所は、表土（海底面）に分布しておりシールド掘削で支障となる障害物（不発弾等）の存在はないと判断された。

- ・海上ボーリング調査結果（海上からの12箇所のボーリング調査により地質の変化の有無を確認）

既往ボーリング調査の結果と概ね等しい結果となっていることが確認されたため、設計・施工計画図に使用する土質縦断図の変更はない。

(2) 設計の再照査結果

- ・シールドマシンの耐久性の検証結果（鋼殻（後胴）、隔壁、スクリュウコンベア）
- ・セグメント形状寸法、構造の検証結果（RCセグメント桁高・幅、耐力、裏込注入時の単リングモデル、複数リングモデル）
- ・津波に対する検討（潮位変動、トンネル内冠水）

いずれも、設計の限界値を把握し、施工計画に反映した。

結果を（表-1～3）に示す。

また、テール部の止水構造について、テールブラシは3段で問題がないことを確認したが、テール部の止水性の安全を高めるために4段に変更した。（表-4）

(3) 施工計画の検証結果

- ・シールド掘進管理方法の検証結果

泥土圧シールドの掘進管理は、直接目視できないチャンパー内の状態を土圧計、掘進速度、総推力、カッタートルク、排土の性状、掘進量と排土量のバランス等の情報をもとにしてシールドマシンの操作方針を決定していく。今回、本工事の地質条件に対して基準となる掘進管理値を整理した。（表-5）

- ・セグメント組立て時の安定性の検証結果

（セグメントピース単体、欠円リングの状態における各部材の検討、Kセグメントの抜けだしに対する検討を行い問題ない） 結果を（表-6）に示す。

表-5 シールド掘進管理値の一例

管理項目		管理値
シールド掘進管理	切羽土圧	設計土圧+予備圧 20kPa (設計土圧:停止時全面土圧~静止土圧)
	掘削土量	設計土量±α (α:前 20R 掘削土量の標準偏差)
	裏込注入圧	切羽圧+100kPa
	裏込注入量	設計ポイド量 100~130%
セグメント組立管理	セグメント平面位置	±40mm(許容量±50mm)
	セグメント縦断位置	±40mm(許容量±50mm)
	欠け、ひび割れ	ひび割れ 0.2mm 以下
	目開き	2mm 以下
	目違い	3mm 以下

- ・シールドトンネル通過土層の検証結果

発進となる大井側は、礫層（Ag）を多く含むが、渡海部から到達にかけては殆ど粘性土層（Ac）の掘削となる。今回の追加調査を含めて岩ズリ層が掘進断面に占める割合は少ないことが確認された。

- ・マシン装備能力の検証結果

掘削断面毎の地盤条件に対して、厳しい条件を想定し、必要なマシン能力と実機装備能力を検証した結果、ジャッキ推進能力、カッター装備、スクリュウ回転能力、ベルトコンベア輸送能力、ジャッキストローク余裕、など、いずれも装備能力を満足していることを確認した。

- ・岩ズリ部掘削の施工方法の検証結果

追加調査結果でも掘削断面に岩ズリ層がかかる可能性があり、ボーリング等で採取できた岩ズリの大きさは、50cm程度まで確認している。想定外の岩ズリに対する対応としてスクリュウ取り込み口に設置した2インチ管からウォータージェット等により粉碎〜取り込みを可能にする対策を講じた。

- ・セグメントピース毎の組立て方法の検証結果

セグメント組立て時は、ピースを設置する位置のシールドジャッキを引き抜く必要があるため、総ジャッキ（50本）より少ない本数で切羽を保持しなければならない。組立て時に引くシールドジャッキの最大本数はBセグメント組立て時の8本である。シールドに作用する切り羽全面反力は、渡海部での最大値 P=43,309kNに対して、ジャッキ1本推進力 2,150kN×42本=90,300kN

$$90,300\text{kN} > P=43,309\text{kN}$$

ゆえにセグメント組立て時においても切羽圧を保持することができる。また、引き抜き時のマシンの安定性（バランス）についても検証し、安定することを確認した。

表-1 シールドマシンの耐久性の検証結果

	概要図	検証内容	検証結果
鋼殻（後胴）		追加調査結果を踏まえて、シールドマシンに作用する最大土水圧を作用させても、シールドマシン（後胴）が健全性を保つことを検証する	想定される最大荷重に対して、シールドマシン（後胴）に発生する応力度が部材の許容応力度以下であることを確認した なお、検討モデルは テールブラシを4段に変更した機長にて実施
隔壁		切羽圧およびシールドジャッキによる総推力が作用した場合に隔壁が健全であることを検証する	切羽圧およびジャッキ総推力に対して隔壁に発生する応力度をFEM解析により算定し、部材の許容応力度以下であることを確認した
スクリュウコンベヤ		スクリュウコンベヤのケーシングおよびゲートの健全性を検証する	スクリュウコンベヤのケーシングおよびゲートに対して切羽圧等を作用させたときに発生する応力度をFEM解析により算定し、部材の許容応力度以下であることを確認した

表-2 セグメント形状寸法、構造の検証結果

検証項目	概要図	検証内容	検証結果
セグメント桁高・幅【2-3-1】 RCセグメント鉄筋量【2-3-2】		セグメントの形状寸法仕様について類似工事実績や示方書との比較検証	実績及び示方書範囲であることを確認 ・桁高比 4.2% > 4%・・・OK ・幅厚比 4 < 7・・・OK ・鉄筋比 0.8% < 1.2%・・・OK
RCセグメントの耐力【2-3-3】		セグメントの製品検査により設計耐力をしていることを検証	実験により耐力を確認 【単体曲げ試験】 破壊荷重 1710kN > 設計値 1137kN
裏込め注入圧 に対する検証 【2-4-2】	単リングモデル 	裏込め注入圧によるセグメント健全性を検証	裏込め注入圧: 水圧+120kN/m ² までの健全性を確認した
	複数リングモデル 形状保持装置の効果 	複数リングでの健全性および形状保持装置の効果を検証	形状保持装置により裏込め注入圧は水圧+280kN/m ² までの健全性を確認した

表-3 津波に対する検討結果

津波に対する 検討 【2-4-4】	潮位変動 	津波による潮位変動がトンネルへ与える影響を検証	津波による潮位変動に対してはセグメントに発生する応力度が短期許容応力度以下であることを確認した
	トンネル内冠水 	津波等でトンネルが冠水する可能性について検証	東京港の最大津波高は、TP+2.61mであり、立坑周辺の地盤高はTP+4.2m以上であるため、津波によりトンネルが冠水しないことを確認した

表-4 マシンテール部の止水構造の検証結果

	概要図	検証内容	検証結果	対応
テール部の止水構造		シールドマシンのテール部の止水構造について、当シールドトンネルの施工条件において問題が無いことを再検証する	当シールドトンネルの施工条件（作用水圧 0.47MPa・掘進延長 1500m）では、既往の実績からテールブラシは3段で問題がないことを確認した	既海底シールドである東京湾アクアラインのシールド機のテールブラシが4段であることを考慮して、テール部の止水性の安全性を高めるために3段→4段に変更する

表-6 セグメント組立て時の安定性の検証結果

検証項目	概要図	検証内容	検証結果
組立時の安定性 【2-5-1】 セグメントピース単体 (検討モデルA)		組立中のセグメントについて、シールドジャッキを抜いた場合の安定性を検証	自重によってリング間継手に作用する荷重は短期許容引張力以下でありシールドジャッキを抜いても組立中のセグメントピースが安定することを確認した
欠円リングの状態 (検討モデルB)		欠円リング状態において組立中ジャッキを抜いた場合でのセグメントの安定性を検証	組立状況毎にて本体、継手とも短期許容応力度以下でありシールドジャッキを抜いても組立中のセグメントピースが安定することを確認した
Kセグメントの抜出し (検討モデルC)		組立中に既設リングのKセグメントのジャッキを抜いた際の安定性を検証	Kセグメントは軸力や水圧等により発生する抜け出し力に対して、継手の引張強度で抵抗できることを確認した

(4)安全対策の検証結果

- ・ 通話装置、警報設備の配置場所、設置数
- ・ 避難袋、救急設備、照明（携帯用含む）の配置場所
- ・ 停電時にバックアップ機能が必要な設備（通話装置、警報装置、照明）

の妥当性を検証した。

その結果、追加対策として下記の追加対策を実施することとした。

- 1) 可燃性ガスは存在しないが、坑内@300mピッチに定置式ガス検知器を設置し、自動警報装置を設置した。
- 2) 通信設備として、PHS電話システムを構築。坑内200mピッチに一斉放送用スピーカーを設置し、PHS電話より一斉放送が可能な設備とした。
- 3) 停電発生時の対策として30分以上電源供給可能なUPS（無停電電源装置）と切羽、地上事務所、立坑に非常用発電機を設置し、停電時に電力供給を行うこととした。
- 4) 停電時に異常出水の可能性があり、スクリュウゲートの開閉装置及び、縮んでいるシールドジャッキをのばす装置を非常用発電機を使用して操作ができる機構を設置した。

- ・ 安全管理体制（職員の配置、連絡体制、カメラ映像の監視方法）
 - ・ 避難ルール（想定事象の抽出、避難基準、等）
 - ・ 安全教育（教育方法、訓練時期）
- の妥当性を検証した。

その結果、シールド内（切羽、スクリュウゲート等）に監視カメラを設置し、24時間以上録画可能な装置を設置した。また、出水時を想定して避難訓練を実施している。

4. 東京港トンネル施工技術検討委員会

東京港トンネルを安全に施工するために独自に設立し、安全施工にかかる検証結果について委員会形式で審議いただいた。

経緯を下記に示す。

2012年5月11日

第一回東京港トンネル施工技術検討委員会開催
（設立趣意・規約等、検討の進め方、追加調査項目、検証内容について審議・承認いただいた）

<審議事項>

- ・ 裏込注入圧の検討結果の詳細を提示
- ・ セグメントを複数リングで検討し、限界値を抽出
- ・ 想定トラブル一覧に重み付けをし、致命的なトラブルを把握
- ・ 設計の限界を把握して施工計画に反映

2012年5月～7月 現地追加調査を実施、検証作業を実施。

2012年7月23日

事故の再発防止に向けて専門家が検証する国土交通省（本省）の「シールドトンネル施工技術安全向上協議会」から「中間報告」5分野26項目の注意事項が公表。内容を取り込む形で網羅。

2012年8月6日

厚生労働省労働基準局より「シールドトンネル施工に当たっての留意事項について」3分野21項目が公表。内容を取り込む形で網羅。

2012年8月6日

第二回東京港トンネル施工技術検討委員会開催
（追加調査結果、検証結果、対策内容について審議・承認いただいた）

<審議事項>追加調査・検証項目

想定される事故・トラブルの発生原因とその対応について（55項目）

<現場で設置対応した事項>

- テールシールド3段→4段
- カメラを設置し、24時間監視
- 停電対策として、停電時でも電気が供給できる装置を設ける

2012年11月1日

第三回東京港トンネル施工技術検討委員会開催
シールドマシンが概成したので、委員に見ていただき概ね了解をいただいた（現地視察）

2012年11月21日

東京港トンネルシールド発進

2013年1月17日

第四回東京港トンネル施工技術検討委員会開催
シールド陸上部掘進視察
施工管理データ、掘進データを見ていただいた。

2013年5月10日

第五回東京港トンネル施工技術検討委員会開催
シールド海底部掘進視察
施工管理データ、掘進データを見ていただいた。

5. まとめ

2012年7月23日、国土交通省が事務局となっている「シールドトンネル施工技術安全向上協議会」において全国シールド工法を用いた設計・施工中の現場に対して、設計・施工における注意事項が「中間報告」として出された。また、8月6日には、厚生労働省労働基準局より「シールドトンネル施工に当たっての留意事項について」が日本建設業連合会、全国建設業協会、建設業労働災害防止協会の3団体へ送られた。

この「中間報告」「留意事項」にとりまとめられた注意事項についても東京港トンネルでは、「東京港トンネル施工技術検討委員会」で審議いただき、対応が図られていることを確認している。

JX日鉱日石エネルギー水島製油所で発生したシールド事故を受け、東京港トンネルの安全施工について述べてきた。今回、検証・照査したことで、いち早い検知、状況の把握を行いながら施工管理を着実に進めている。現在は、事故、大きなトラブルもなく順調に進んでいる。

非常設備など本来使用されないことが最も望ましいが、トンネル工事において事故が発生した場合には、人命を最優先にした系統かつ統合的な措置が確実にとれるよう体制を整えている。