

地学クラブ講演要旨

東京湾横断道路及び外郭放水路建設における 高水圧下大口径長距離掘進のブレイクスルー

川 端 僚 二*

The Breakthrough of the Long and Large Diameter Shield-driven Tunnel under High Water Pressure in Constructing of the Trans-Tokyo Bay Highway and the Metropolitan Area Outer Discharge Channel

Ryoji KAWABATA *

シールドトンネル工法は現在、都市の過密化に伴い大深度、大口径、長距離化が図られており、さらにニーズの多様化により矩形断面及び複合円断面、分岐シールド等にみられるように断面や構造が複雑になり高度な技術が要求されている。このため、従来行われていた人力によるシールドトンネル工法の施工では制御及び管理が困難となり、各システムに効率化、省力化、品質の向上、安全の確保、工費の縮減等を目的として種々の高度な自動化シールド技術が開発、導入されている。

ここでは、東京湾横断道路（東京湾アクアライン）及び首都圏外郭放水路（洪水対策用「人工の地下の川」）の建設工事で行われたシールド工法の技術とその成果、施工時の苦勞、日本が世界に誇るシールド技術の目覚ましい進歩を紹介する。

1. 東京湾横断道路工事

東京湾横断道路は、東京湾の湾央部で川崎市と木更津市を結ぶ延長約 15 km の自動車専用道路である。この道路は、東京湾岸道路などと一体となって東京都市圏の環状道路の一部を構成し、都心部や周辺部の交通混雑の緩和に役立つことが期待されている。このうち、川崎側約 10 km の区間は、

川崎人工島を中心に 8 本のシールドトンネルに分割発注されており、海底下 4 カ所でほぼ同時に地中接合された。

本シールドトンネル工事の特徴は、以下の通りである（図 1、2）。

①大口径（シールド機外径約 14 m）

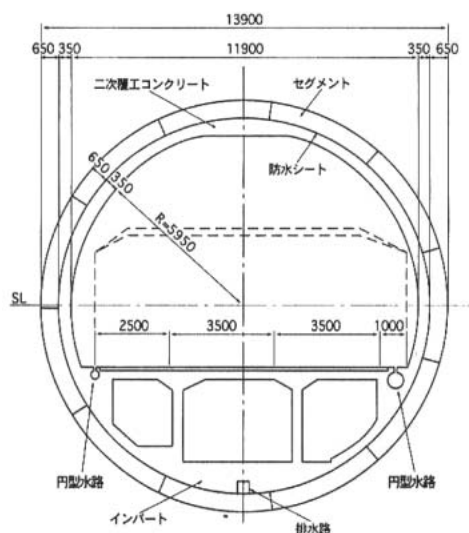


図 1 トンネル基本概要 (mm)。

* 鹿島建設株式会社関東支店首都圏外郭放水路第 4 工区トンネル新設工事所長

* The Project Manager of No.4 Underground Section of Tokyo Metropolitan Area Outer Flood Discharge Project
本稿は 2003 年 2 月 20 日に行われた講演をまとめたものである。

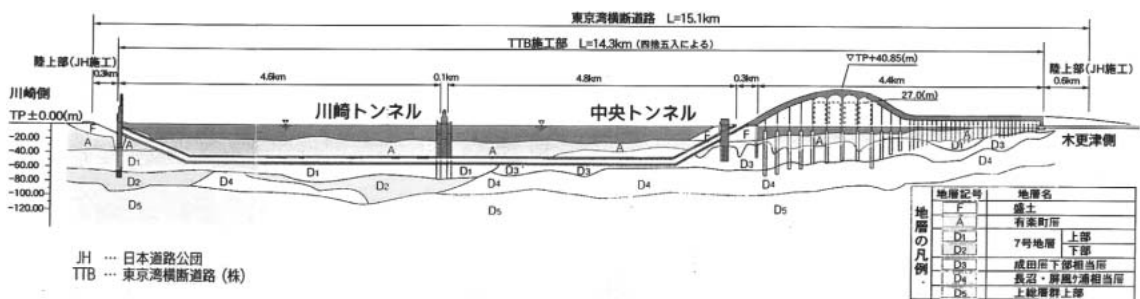


図 2 東京湾横断道路工事概要。

- ②高水圧（トンネル下端で 0.6 N/mm^2 ）
- ③長距離掘進（1800～2800 m）
- ④小土被り（約 20 m）
- ⑤海上発進立坑（川崎人工島の工区）
- ⑥競合施工（二次覆工，立坑構築工，施設工）

本工事は 1966 年から調査設計が開始され、1989 年に着工、1997 年に完成したが、施工条件及び環境条件の厳しさから数々の困難にぶつかり、その都度最新土木技術を適用して乗り越えてきた。これらの事例を挙げると以下になる。

(1) 川崎人工島連壁掘削時の出水

シールド工事前の川崎人工島連壁内掘削時に連壁根入れ部の不透水層である深さ 120 m の粘性土層から湧水が発生し、日最大 3000 m^3 となった。このため、工事をストップしてこれ以上の水みちの拡大を防ぐため、いったん海水を注水してその後止水注入することにした。注水後セメントベントナイトモルタルを注入し、水ガラス系の薬液で固め完全に止水を図った。その結果、止水費用が 20 億円かかり、工期がその後の手順変更も含めて 6 カ月間要し、川崎人工島からのシールド掘進が遅れ地中接合位置が川崎人工島よりになった。

(2) 浮島工区の超軟弱地盤掘進

川崎市の浮島側から発進したシールド機は超軟弱地盤の有楽町層 Ac1 層を通過したが、マヨネーズより少し硬い程度であり、N 値 0、自然含水比 120% と液性限界の 107% を上回っていた。このため、シールド機の泥水の噴発、切羽の崩壊、トンネルの浮上がり等のトラブルが懸念された。

その対策として、シールド機のカッタースリッ

トに開閉装置を設け、泥水の比重、粘性を通常より大きくした泥水管理により切羽の保持を図った。さらに地山を緩めないために掘進速度を低め、掘進を止めずに 1 カ月程度休日なしの 24 時間連続で作業を行った。また、トンネルの浮上がり防止に、鋼材、レール等を坑内に搬入し重しとして設置した。

これらの努力の結果、ほとんど問題もなく超軟弱地盤を掘削完了し、185 m 区間を 25 日程度で無事掘り抜いた。

(3) 制御発破工法による連壁壊し

シールド発進に際し 2.8 m の厚さの連壁をブレーカーにより壊す必要があったが、連壁強度が設計値の 36 N/mm^2 に対して、実際は圧密により海面下 60 m で 100 N/mm^2 以上の強度が発現していた。このため、施工能率を向上し工期を短縮する目的で、制御発破工法による連壁壊しを行った。

凍結工法により土水圧を保持させ、すぐその内側で連壁壊しを縁切りのコア抜き施工後、制御発破により実施した。一歩間違えば海の水が流れ込み人工島が水没するという危険性の中を、事前の解析、発破時のひずみ計測施工、凍土の測温管理を慎重に行い、施工を安全に完了することができた。

(4) セグメント自動組立

東京湾横断道路シールド工事に用いるセグメントは RC 構造であり、継手は通しボルトを用いた。さらに、大口径であるため 11 分割されており、1 ピースが厚さ 650 mm で約 10 t の重量物であった。

このため、組立はシールド機エレクター装置を



図 3 外郭放水路全体図。

用いたが、セグメントの供給、把持、旋回、押付、荒位置決め、微調整、ボルト引き出し、ナット供給、ボルト締結の各ステップを完全自動化で行った。しかしながら、セグメントの型枠精度、コンクリートの温度ひび割れ、組立精度（真円度、目違い、目開き）、組立方法、位置決めセンシング、ボルト締結の複雑さ等の問題点がいくつか発生して完全自動組立にはなにくかった。

その結果、セグメントの欠け、漏水が発生し、機械的トラブルも生じたため、シールド掘進は110～150 m/月の進捗に留まり、施工速度はそれほど向上しなかった。

(5) 川崎人工島工区の施工環境

川崎人工島工区のシールド工事は、立地条件から海工事の要素がかなり強く、時間的制約を含めて施工環境が厳しい状況にあった。

各工区の職員、作業員は陸上事務所で朝7時の朝礼後、7時20分400人乗りの船に乗船、7時50分に人工島到着、8時30分から持ち場で作業開始を行った。夕方まで仕事を行い、17時40分に乗船してようやく事務所解散が18時30分となり、実に12時間近い拘束のもとでの作業となった。

さらに、最盛期は人工島全体で総勢昼間1200人、夜間600人もの大人数が広い坑内に散らばって一次覆工、二次覆工工事に分かれ、土曜日もないまじしく突貫工事を行った。

その結果、過酷な労働条件、作業環境の悪化が原因と思われる労災事故が残念ながらいくつか発生した。

2. 外郭放水路工事

首都圏外郭放水路事業は、中川・綾瀬川流域の中流部における治水対策として、この地域内の各河川と江戸川を地下放水路で結び、これら河川の洪水を江戸川に排水する「人工の地下の川」である。総延長約6.3 kmのうち、第1工区から第4工区の約5.9 kmのトンネルは既に貫通しており、平成14年度から第3立坑～江戸川間の放水路が供用開始されている（図3）。

このうち第4工区トンネル新設工事は第4立坑から大落古利根川までの国道16号線の地下約50 mに延長1235 mのシールドトンネルを構築する。

本工事におけるシールドトンネル施工には、最新の技術が取り入れられた。特に、ボルトレスの新型セグメントの開発をはじめ、シールド機の掘進・方向制御・セグメント自動組立、セグメント搬送、泥水輸送設備、泥水処理設備等に、高度な自動機械化技術が導入された。

(1) 新型ボルトレスセグメント

本工事では、トンネルを構築するセグメントに強度・剛性が高く薄型化が可能であるハイブ

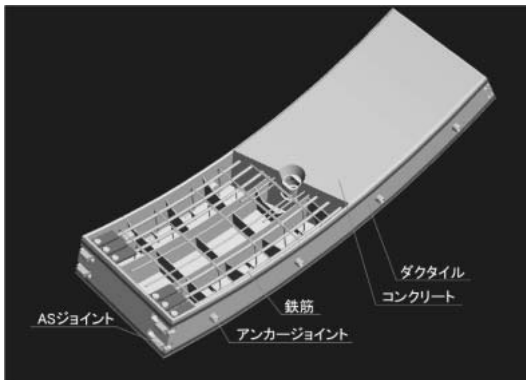


図 4 DRC セグメント概念図。

リッド構造の新型 DRC (Ductile and Reinforced Concrete) セグメントを開発し、採用した。本セグメントはダクトイル鉄とコンクリートを補強材や鉄筋リブを用いて一体化した合成セグメントである (図 4)。

本セグメントの採用により、トンネル内面側はボルトボックス等がなく平滑化され、エレクタを使用した 1 パス自動組立 (位置合わせ後シールドジャッキで押し込むだけで完了) による組立時間の短縮及び自動組立設備の簡素化が可能となった。セグメント継手に AS (Axial Slide) ジョイント (図 5) を、リング継手にアンカージョイント (図 6) を採用した。特に AS ジョイントのくさび効果で強い締結力が生まれるため、リング剛性が高く、組立精度 (真円度、目違い、目開き等) の向上が図れた。

(2) セグメント自動組立システム

セグメント組立は、自動組立装置 (エレクタ) による 1 パス組立方式を導入した。位置合せ後、シールドジャッキによって押し込むだけで完了 (1 パス組立) する。セグメントの位置合せ・姿勢保持機構の採用により、特別な締結装置を用いることなく安全で確実な高速自動組立を実現することができた。

セグメント位置調整は、接触型センサーによってコンクリート面をセンシングすることにより行った。1 パス組立方式で単純化された結果、エレクタの自動化が容易となり、また故障率の低減

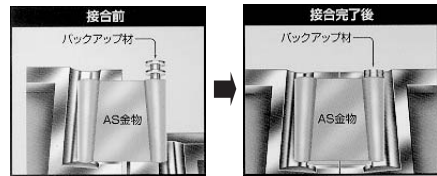


図 5 AS ジョイント。

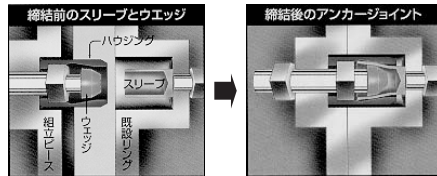


図 6 アンカージョイント。

も図ることができた。

この方式により、セグメントの真円度、目違い、目開き等の組立精度が向上し、漏水、クラックのない品質の高いトンネルを構築するとともに、人力での高所作業であるボルト締結がなくなり、安全の確保につながった。また、他工区の実績を上回るセグメント組立時間 35 分 / リング、日進量 8 ~ 10 リング、最大月進量 240 m の急速施工が可能となった。

(3) セグメント自動搬送システム

本シールドトンネルに用いるセグメントは、1 ピース 7t と重量が大きく、しかも 1 日最大 10 リング程度組立てを行うため地上から坑内シールド機までの搬送が煩雑となる。しかも、立坑が大深度であり、坑内が長距離であることを考慮すると、サイクルタイムを確保するためのスピードアップ化、搬送時の安全面の維持が工事の最重要課題である。このため、地上から立坑内を通して坑内シールド機先端まで、セグメントを自動搬送するシステムを開発した (図 7)。

本システムは、地上でスイッチを押すと、地上部の横方向搬送装置 (ドーリー設備)、立坑内リフトを通じて、自動的に無人でセグメントを 1 ピースずつ立坑下まで搬送し、立坑下の移載装置 (セッター)、移載ラックで 1 リング分 9 ピースをまとめて搬送車に積み替えて坑内先端まで運搬す

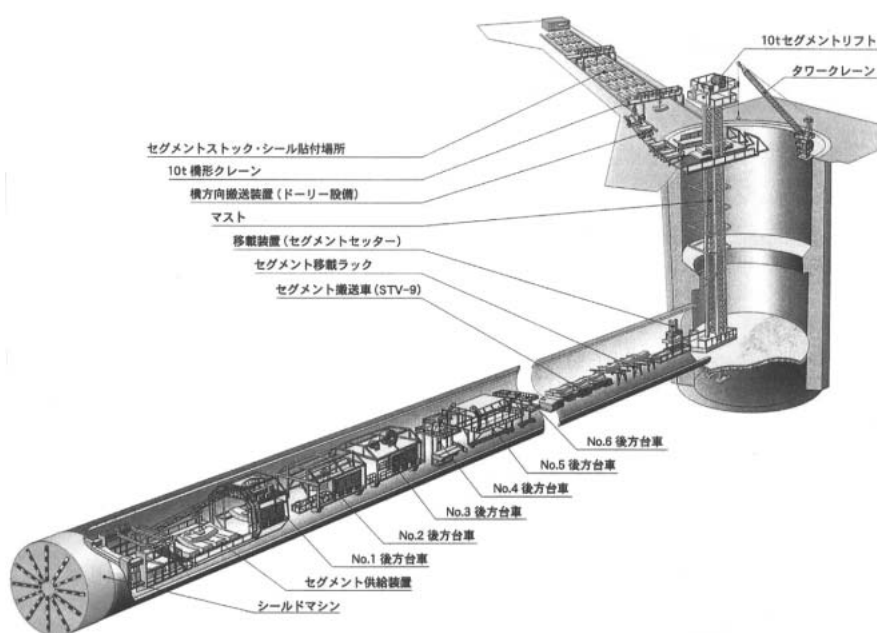


図 7 セグメントの自動搬送システム。

るシステムである。

特に、坑内のセグメント搬送車は、従来の枕木、レールの上をバッテリー機関車で運搬する方式に代わり、セグメントの内面を直接タイヤ式搬送車で走行するシステムを新しく開発した。このシステムは、セグメント上に貼った誘導用テープを CCD カメラを用いて画像処理することにより、自動ステアリング制御で無人走行するものであり、安全装置として障害物検知センサー等を装備した。このシステムを採用することにより、1 日最大 10 リング程度の組立サイクルタイムを十分に満足するとともに、重量物である枕木、レールの設置、撤去時の高所作業がなくなり安全で、しかも、坑内での騒音、振動の少ない坑内環境にやさしい施工が可能となった。

3. ま と め

首都圏外郭放水路第 4 工区トンネル新設工事においては、東京湾横断道路工事での実績を踏まえて、新型のボルトレス DRC セグメントを開発し、さらにシールド機、セグメント搬送設備等の自動化技術を採用した。その結果、トンネルの急速施工を可能にするとともに、高品質を保持することができ、将来のコストダウンにつながる技術確立した。

今後、さらに世界に誇る本シールド技術を発展させ、過密する都市部での高速道路、鉄道、地下河川等将来の都市再生に関連する大規模プロジェクトに対応していきたい。