

東京湾横断道路におけるシールド工事の施工報告 —川崎トンネル浮島南工事—

REPORT OF SHIELD TUNNEL CONSTRUCTION IN TRANS-TOKYO BAY HIGHWAY —KAWASAKI TUNNEL UKISHIMA SOUTH—

増田 隆¹⁾・若月 豊²⁾・岡崎雅好³⁾・四方弘章⁴⁾

Takashi MASUDA, Yutaka WAKATUKI, Masayoshi OKAZAKI, Hiroaki SHIKATA

Trans-Tokyo Bay Highway (TOKYO WAN AQUA-LINE) consists of two 10-km tunnels, a 5-km bridge and two man-made islands. Our project started from Ukishima Work Base and advanced 2,853m using a slurry shield method. Features of this project are 1) large-diameter, 2) high water pressure, 3) long distance, 4) 4% gradient excavation, 5) work in extremely soft soils, 6) undersea tunnel connection, and so forth. This report describes the construction plan and results in Kawasaki Tunnel Ukishima South Work.

Key Words: TOKYO WAN AQUA-LINE, Ukishima South, large-diameter, high water pressure, Acl

1. はじめに

東京湾横断道路（平成9年2月より東京湾アクアラインと命名）は東京湾の中央部において川崎市と木更津市とを結ぶ延長約15kmの一般有料道路である。この道路は橋梁部とトンネル部とで構成され、2つの人工島を間に挟んで川崎側の約10kmがシールドトンネル、木更津側の約5kmが橋梁となる。トンネルに関しては、川崎市浮島・川崎人工島・木更津人工島を発進基地としてそれぞれ上り下り2本（計8本）が施工され、海底下4箇所において地中接合工が行われた。本報告は、その内の浮島から川崎人工島に向けて延長2,853mを施工した浮島南工区の掘進工を中心とした施工概要と結果についてポイントを絞って述べるものである。

2. 工事概要

本工事は、掘削外径14.14m（セグメント外径13.90m）の泥水加圧式シールド工事であり、発進からの900mが下り勾配4%の斜路部、残りの1,953mが勾配0.2%の平坦部となっており、初めの約650mに半径1,650mの曲線を含むほかは直線になっている。平坦部での水深は約25m、土被りは約15mであり、トンネル底部には約6kgf/cm²の高水圧がかかっている。

地質の概要は、海底下に沖積世の軟弱な粘性土層（有楽町層）が層厚20～30mで堆積しており、それが更

-
- 1) 正会員 東京湾横断道路㈱工務部工事課長
 - 2) 東京湾横断道路㈱川崎事務所工事課長
 - 3) 正会員 清水建設・佐藤工業・竹中土木建設共同企業体所長
 - 4) 正会員 清水建設㈱神戸支店工事長

に上部の特に軟弱なAcl層とその下のAc2層とに区分される。その下には比較的堅固な洪積世の砂質土と粘性土が互層を成している（七号地層）。また発進からの約720mの区間は深層混合処理による地盤改良工及び混合処理盛土が施された地盤となっている。

本工事の施工に当たっての特徴及び問題点としては、1)大口径（φ14.14m）、2)高水圧（約6kgf/cm²）、3)長距離（延長2,853m）、4)急勾配部（4%）からの発進、5)超軟弱層（Acl層）の掘進、6)海底下での地中接合工等が挙げられ、多くの検討が必要であった。

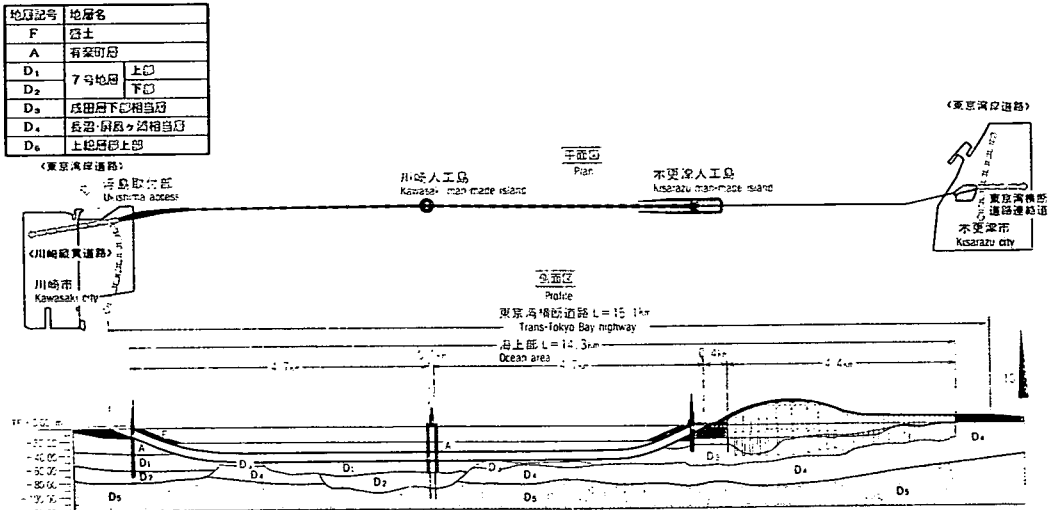


図-1 概要図

3. 施工計画

(1)大口径（φ14.14m）への対応

セグメントの大型化（外径13.9m、11分割、1ピース10t、1リング110t）に伴い、人力による取扱いの困難さ・自重による真円確保の難しさが生じてくる。

- ① セグメント自動組立ロボットの採用：確実なハンドリング・位置決め・ボルト締結のため、セグメント搬入から搬送・供給・センシング・組立・ナット供給・ボルト締結までの一連の作業を自動化することにより、安全で組立精度の高いシステムを目指した。

- ② 真円保持装置の装備：セグメントの自重による変形を防止するために真円保持装置を装備した。また盛替え時の保持解除による変形を考慮し、可動式と固定式の2段階構えとした。

- ③ 仮組セグメントでの工夫：仮組セグメントの組立

基面の寸法精度と平面性を高めるため、反力受け前面に「真円保持リング」と称する真円精度の高い製作鋼材を設置した。また仮組セグメントの初めの2リングは軽量かつ修正の容易な「鋼製プレスリング」を設置した。更に仮組セグメントがマシンテール部から抜け出た段階で側方からサポート材（300H）にて拘束し、横ズレと撓みを防止した。

- ④ 調芯ピンの採用：セグメントリング間にあらかじめほぞ穴を成形しておき、そこに鋼鉄の調芯ピンを取り付けて、位置合せを機械的にかつ確実にに行えるようにした。

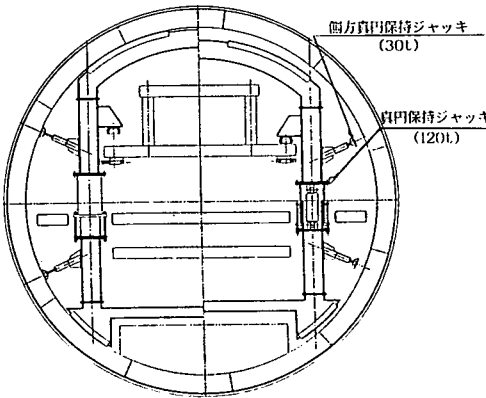


図-2 真円保持装置（可動式）

(2)高水圧（約6kgf/cm²）への対応

基本的には密閉状態下での作業となるが、回転・移動・組立に伴い発生する稼働部及び接合部に対しては、止水性と耐久性を確保するための工夫を行った。

- ① テールシール（4段）と自動給脂システム：テールシールとしては耐海水性を考慮してステンレス製ワイヤーブラシを4段設置した。またワイヤーブラシの間を埋め止水性確保とブラシ保護の役目を果たすテールグリスに対しては、注入口を17個×3列（51）設置し均等・確実な給脂を目指した。また切羽側2段目と3段目との間に液圧ラバー方式の緊急止水装置を装備した。
- ② カッターシール：耐圧10kgf/cm²の単一リップ方式（4段）とし、リップ間にグリス材を充填する。またリップシールとディスクシールとの間では圧力管理ができるようにして耐圧・耐磨耗性を高めた。
- ③ セグメントシール：組立時のシール材損傷防止のため、シールドジャッキのスプレッダーに溝を付け、シール材には滑剤を塗布した。またシール材に沿った漏水防止のためシール材脇に水膨張性コーキング材を盛りつけた。

(3)長距離掘進（延長2,853m）への対応

- ① 高速施工：シールドの施工速度は主に掘進速度とセグメント組立速度とに依存する。掘進速度は施工条件による部分が大きく、また長距離に対しては無理をせず安定掘進が望ましいと考え、セグメント組立の高速化を確保することとした。そのためにはセグメント運搬からストック・搬送そして組立までを自動化すると共に、セグメント搬送装置を1リング分のセグメントストックが可能でかつ前部と後部とで分離稼働が可能な構造とし、常に余裕のあるセグメント供給が行えるようにした。
- ② カッタービットの磨耗：カッターチップの材質としては掘進距離3,000mを想定して、シンターヒップ処理したE3種超硬チップ（タングステンカーバイド焼結金属）を採用。また同一パス内に高さ100mmと80mmの高低差ビットを配置すると共に、先行ビット（高さ120mm）を装備した。また緊急事態に備えて、ビット交換が可能な構造にしておいた。更にカッタービットの磨耗状況を確認できるように、超音波式4箇所・油圧式4箇所の磨耗検知装置を装備した。

(4)勾配部（4%）からの発進

分割搬入されたシールド機械は立坑内で組立てられたが、組立精度の確保及び施工の安全性への配慮から、発進勾配4%に対して水平状態で組立

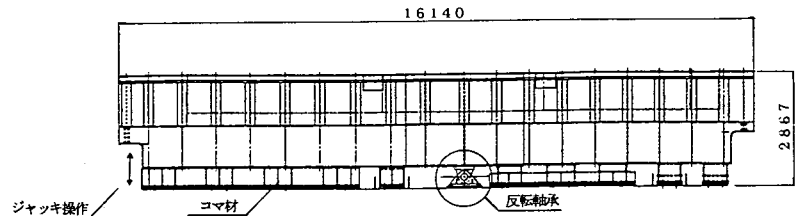


図-3 可変勾配型発進架台

て、その後勾配を持たせるシーソー式の発進架台とした。そのため受台の中央部に反転軸承を装備し、前後のジャッキ操作及びコマ材の設置と撤去とで勾配を調整することとした。

(5)超軟弱層（Acl層）の掘進

斜路部先端付近、改良土を抜けてからの約150mは、上半部に超軟弱地盤Acl層（別名マヨネーズ層）を抱え、今回のシールド掘進中最も困難な工区とされていた。Acl層の特徴は、 $N=0$ 、 $\gamma_s=1.40\text{tf/m}^3$ 、 $E=15\text{kgf/cm}^2$ であり、自然含水比（120%）が液性限界（107%）より高く容易に流動化が予想される上、地盤強度が低く主動土圧と受動土圧の差が小さいことであった。そのため泥水圧力の管理幅が 0.4kgf/cm^2 （ ± 0.2 ）と非常に狭く、過度な圧力で割裂、過小な圧力で土砂流入を起こして切羽崩壊につながる危険性が高かった。更に土被りも非常に小さく（0.81～1.06D）トンネルが浮上がる恐れもあった。

この層への対応としては、以下のことを実施した。

- ① 高濃度泥水の使用：高比重(1.25)・高粘度(ファンネル粘性40秒)の泥水を使用。
- ② 変動幅の少ない切羽圧力の管理。
- ③ カッタースリット開閉装置の装備：掘進停止時の土砂流入を防止するための機構。(スリット開口率31%)
- ④ 海底面の変状計測：特殊間隙水压計を設置し、海底面の沈下と隆起を計測して、掘進管理に反映させた。
- ⑤ 浮力対策：浮力と上載荷重とのバランスを安全率1.0に対して検討し、不足荷重については坑内に極厚H鋼やレール等を仮置きして、坑内荷重の増加を図った。

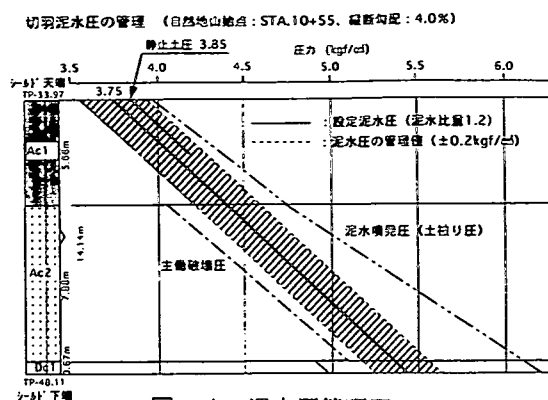


図-4 泥水圧管理図

(6) 海底下での地中接合工について

約6kgf/cm²の高水圧のもと、海底下での接合工に関しては主に2つの問題点があった。1つは接合する2台のシールド機をいかに正確にドッキングさせるか。もう1つは東京湾の土水圧に対しいかに安全で確実な施工環境を確保してマシン解体及び接合工を施工するか、である。

前者に対しては、両機の間隔が50m(及び30m)まで近づいた時点で先着機から水平探査ボーリングを実施し、その先端に取り付けたR Iセンサーで

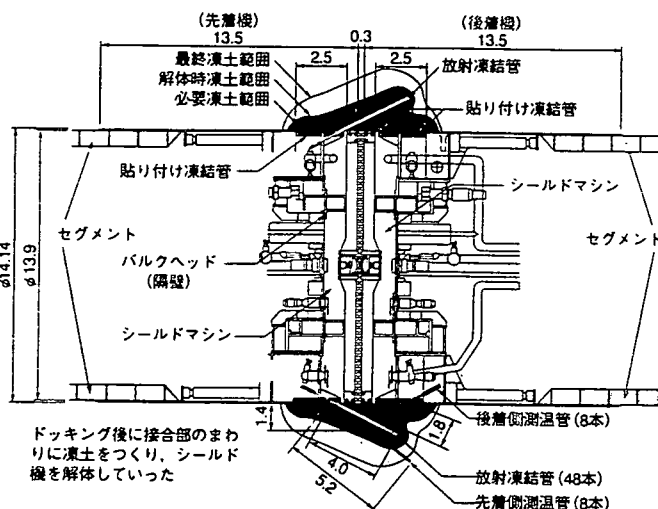


図-5 凍結状況図

お互いの位置関係を確認した。後者に対しては、補助工法として凍結工法を採用し、先着機内から打設の放射凍結管とマシンスキンプレートに埋め込まれた貼付凍結管とを用い、必要凍土厚1.4m・スキンプレートとの凍着長2.5mの凍土を造成した。解体に際してはもしもの時を考慮し、両機面板間をつなぐ一次止水鉄板取付までは隔壁を存置しておいた。一次止水鉄板については狭隘な空間での取扱いの容易さと凍上(予測値132mm)に伴う頂部面板間の離れ(50mm)への追従性を考慮し、同雰囲気内での室内実験の結果から板厚6mmのフレキシブルなΩ型鉄板(低温用鋼材SLA235を使用)を採用した(図-6の3))。

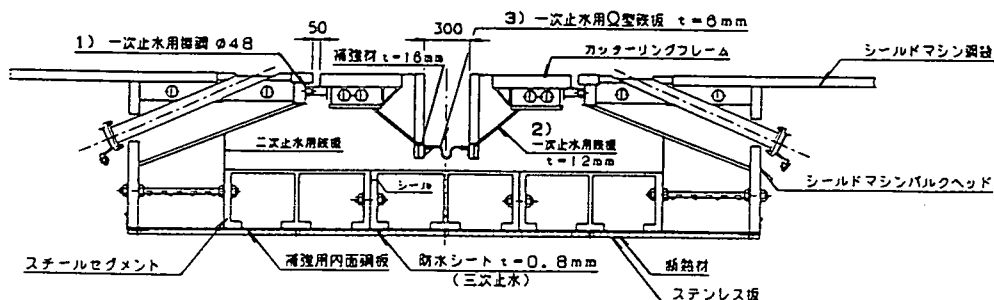


図-6 接合部構造図

4. 実績工程表

[illegible]

5. 施工実績

・工区全体に渡る主要な掘進データを表-1に示す。掘進推力の最大値は装備推力24,000 t (単位面積当たり122 t/m²) に対して瞬時的な値を除けば12,014 t、カッタートルクの最大値は装備常用トルク3,101 tf-m ($\alpha=1.10$ 、最大値はその120%) に対して3,201 tf-mを示し、それはいずれも改良地盤内であった。

表-1 主要掘進データ

	推 力 (tf)	掘進速度 (mm/分)	カッタートルク (tf・m)	切羽水圧 (kgf/cm ²)	送泥比重	排泥比重
初期掘進 改良盛土	3,900～4,900	11～14	1,100～1,400	1.4～1.9	1.10～1.18	1.20～1.25
本 掘 進 改良盛土	4,900～11,000	15～20	1,600～2,700	1.9～4.1	1.08～1.18	1.15～1.20
本 掘 進 AC 1層	7,200～8,500	10～15	960～1,000	4.1～4.8	1.24～1.26	1.27～1.29
本 掘 進 自然地盤	9,500～9,700	28～30	710～730	4.8～5.2	1.18～1.24	1.30～1.37

・セグメント自動組立に関してはメーカーの技術者を常時配置したこともあり、小さなトラブルはあったものの全体としては順調で、当初予定110分/リングに対し約88%のリングが60分台の後半から80分台で組立が行われた。自動組立ロボットの実用性の点で実績を残したものと考えている。

・掘進の実績は、掘進開始から到達まで約19カ月かかっており平均月進151mであった。尚、本掘進に入ってから月進260mを越える月もあり平均で194mであった。

・セグメントの真円度に関しては、真円保持リングの組立精度が $\pm 8\text{mm}$ 程度であったが、当初500リング位は15～25mm程度の撓みで推移し、その後真円保持ジャッキと調芯ピンを使い続ける中で徐々に矯正され10mm程度の撓みとなった。（当初自動組立が要求した組立精度は $\pm 30\text{mm}$ であった。）

・ テールシールに関しては、当初よりその磨耗と損傷が最も懸念された部分であり、充分なグリス材の供給によりシール材を磨耗から保護するという基本的考えに立ち、コンスタントな給脂に努めた。使用量はリング当りドラム缶で1〜1.3缶となったが、大きなトラブルもなく終了した。

・セグメントからの漏水に関しては、ピース間からの漏水は皆無であり、組立精度の確保とともに水膨潤のシール材が有効に機能したものと思われる。但し自動組立の際にナットランナーを挿入するボルトボックス部については、一部にクラックの発生が見られ再考の必要があるように感じられた。

・カッタービットについてもテールシール同様その磨耗が心配されたが、掘削地盤のほとんどが軟弱な粘性土であったことが幸いし大きな磨耗は見られなかった。解体時の実測によると最大10mmの磨耗であった。

また相対的には先行ピットの磨耗が大きくその有効性は実証されていた。

- ・反転軸承を用いた可変勾配型の発進架台はうまく作動をした。発進架台に関しては掘進開始直後の施工精度に与える影響が大きいため、その製作精度や据付精度には細心の注意を払う必要がある。

- ・Acl層の掘進に対しては途切れることのない安定掘進を目指し、24時間連続の掘進管理体制をしいて臨んだ。全体としては日進約5.5リング（8.3m）で進み比較的順調であった。ただ自然地盤突入から約120mに渡り予想を超える貝化石が大量に出現し各種機械トラブルを引き起こしたが、大径塊用として事前に設置しておいた破砕ポンプが有効であった。

- ・Acl層での泥水圧管理に関しては、当初はシールド天端に対し主動土水圧 $+0.2\text{kgf/cm}^2$ を想定していたが、貝化石層への逸泥が大きかったため主動土水圧 $+0.1\text{kgf/cm}^2$ とした上で、圧力変動の生じるセグメント組立時は更に $+0.1\text{kgf/cm}^2$ として設定を行った。心配された圧力変動については、閉塞気味であった前半は $\pm 0.15\text{kgf/cm}^2$ 、後半は $\pm 0.10\text{kgf/cm}^2$ で管理された。送泥比重については設定よりやや高めの1.25から1.28を維持した。粘性に関しては排泥水の上限が39秒程度であり、それに伴い送泥水の粘性は28～30秒となった。

- ・シールド負荷値に関しては、改良地盤から自然地山（Acl層）に移った時点でカッタートルクと推力に大幅な減少が見られた（カッタートルク:2,720tf-mから850tf-mへ、推力:11,420tfから7,670tfへ）。このカッタートルク値はほぼ工場での無負荷運転時の値である。

- ・海底面の変状計測に関しては、全体としてシールド機の中央部が測点下を通過すると共に隆起が始まりテール部通過直後にそれが完了する傾向にあったが、その値は3～4cm程度であり良好な掘進管理がなされたものと考ええる。この隆起の原因については裏込注入によるものと想定された。

- ・Acl層でのセグメントの浮上がりについては、セグメントがテール部から出ると同時に浮き始め、最大10mmで後方台車付近で落ち着くというのが全体としての傾向であったが、大きな問題とはならなかった。

- ・地中接合は、先着シールド（当工区）の接合地点到着から接合部付近の二次覆工も含めると約16カ月を要した。探査ボーリングにより得られた50m手前での両機のズレは77mm、接合時の誤差は5mmであった。海底下での接合作業にとってこの水平ボーリング及びR Iセンサーによる事前探査は極めて有効であった。

- ・凍結に関してはほぼ計画通りの造成・維持がなされ大きな問題はなかった。心配された凍上量は当初予測値132mmに対し28mmであった。これは一様に粘性土と考えていた土層が実際には砂質土と粘性土の互層であったこと等に原因する。また一次止水用Q型鉄板については検討結果通りの施工性と効果が得られ、隔壁を存置した施工手順と合わせ有効であった。

6. おわりに

東京湾アクアラインも開通がこの12月18日に決まり、最後の仕上げを行っているところである。浮島南工区も平成4年の着工から約5年半、多くの難問を抱えてのスタートであったが、掘進から二次覆工そして地中接合と無事作業を終了しようとしている。その間、東京湾横断道路網をはじめ多くの方々との事前検討や細心の注意を払っての施工管理が続いたが、本文はそこから得られた結果のいくつかについての報告である。紙面の関係で説明の十分でない点等あろうかと思われるが、今後の参考にいただければ幸いである。

【参考文献】

- 1) 四方・増田・若月・岡崎(1997)：海底大断面シールドの地中接合の施工、土木学会第52回年次学術講演会
- 2) 中西・山田・田中・石井(1997)：シールドトンネル地中接合部止水継手の耐荷力、土木学会第52回年次学術講演会
- 3) 後藤・岡崎(1996)：掘進工（Acl層の掘進）、土木学会東京湾横断道路の施工技術（その3）
- 4) 鈴木・増田・若月・岡崎・桑原(1997)：セグメント自動組立システムの特徴と実績、土木学会第7回トンネル工学研究発表会投稿中