

営業線直下を貫く併列シールドの直接発進・直接到達施工報告 (小田急小田原線連続立体交差事業および複々線化事業)

THE TWIN SHIELD TUNNEL CONSTRUCTION UNDERNEATH THE OPERATING RAILWAY: THE REPORT FOR UTILIZATION OF CUTTABLE WALL METHOD, AKA SEW, AT DEPARTURE AND ARRIVAL OF THE SHIELD ADVANCEMENT.
THE PROJECT FOR QUADRUPLE TRACKS AND CONTINUOUS UNDERPASS OF ODAKYU-ODAWARA LINE

村松 泰¹・長野敏彦²

Yasushi MURAMATSU・Toshihiko NAGANO

The project for quadruple tracks is being implemented by Odakyu to cope with increasing demand for train transportation. At the same time, project for continuous underpass is also being(simultaneously) carried out for improvement of train safety by eliminating the rail road crossings.

These 2 projects are being carried out by constructing a 1.6km underpass between Yoyog-uehara station and Umegaoka station. Shield tunneling method was adopted in the part of project. A length of 645m shield tunnel was first constructed. At the vertical shaft, the machine was extracted from the tunnel, then turn the machine in U-turn for adjacent tunnel construction.

In this article, the method of departure and arrival of shield machine and the steps of machine extraction are reported.

Key Words: SEW(Shield Earth Retaining Wall System), cuttable wall, shield method, FFU(Fiber reinforced Foamed Urethane), operating railway

1. はじめに

小田急電鉄は総延長約120km.にわたる路線をもち、1日に利用されるお客様は、196万人に及ぶ首都圏の重要路線として運行されている。このうち小田原線は、従来の複線設備では、輸送力に限界があることから、快適な輸送サービスを実現するため、東北沢～和泉多摩川間(10.4km)の複々線化事業を進めてきた。

(図-1参照)

また、本事業は、東京都の連続立体交差事業と一体的に進められ、鉄道を立体化することにより踏切は解消され、慢性化した交通渋滞が緩和され、鉄道と道路の安全性の向上や緊急時における消防・医療活動の円滑化が図られる。さらには、鉄道によって隔てられていた市街地の一体化や駅周辺の整備が進められることによって、より高度な住環境が実現される。

これら2つの事業は、小田急電鉄によって、新宿方面の代々木上原駅～梅ヶ丘駅間に残された1.6kmの区間を地下化方式により進めている。本稿は、泥水式シールド工法による併列トンネルの施工にあたり、安全な電車運行確保のため綿密なシールド発進・到達方法の計画と安全性の高い施工を行ってきたことについて報告するものである。



図-1 都市計画決定区間

キーワード: SEW 工法, 併列シールド, 直接発進・到達, FFU 部材, 営業線直下

¹ 正会員 小田急電鉄(株) 下北沢工事事務所 副所長

² 小田急電鉄(株) 下北沢工事事務所

2. シールド工事

(1) シールド概要

●工事件名:代々木上原駅～梅ヶ丘駅間
連続立体交差工事および複々線化工事
土木第3工区

●施工業者

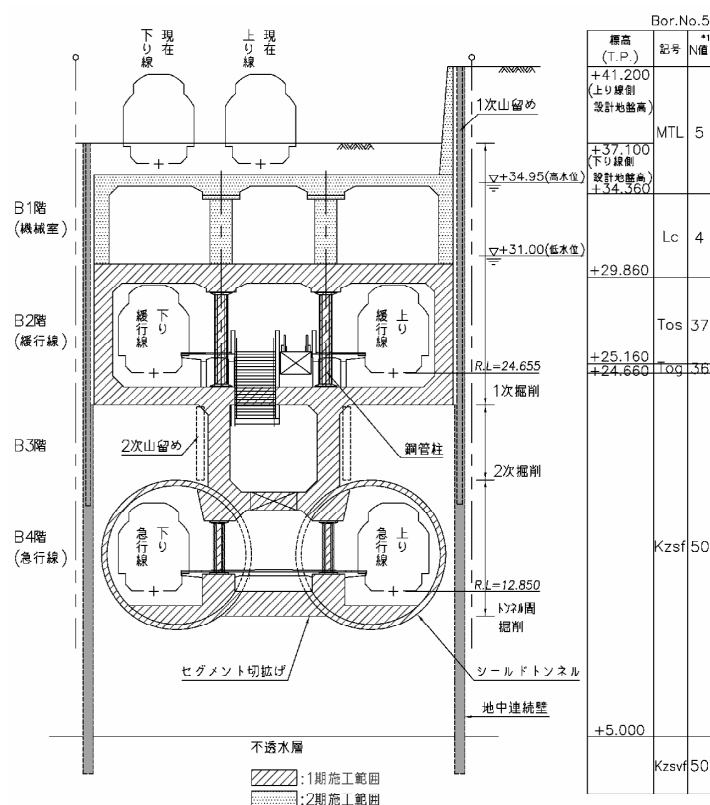
大成・前田・西松・銭高・
三井住友建設共同企業体

●工 期

2006. 4 ～ 2010. 3
(シールド関連工事)

●施工場所

世田谷区代田 2 丁目32番地先 ～
世田谷区北沢2丁目32番地先



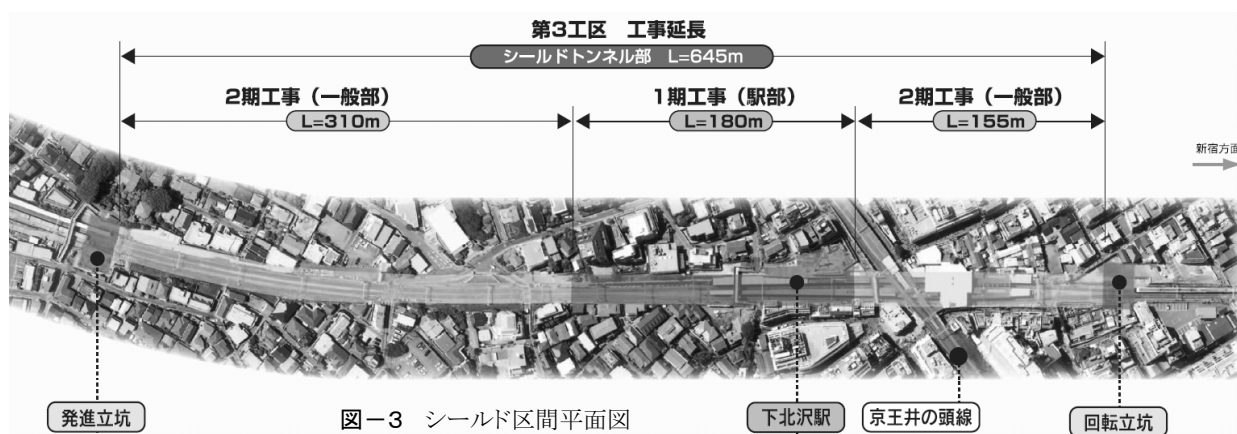
図－2 下北沢駅地下化完成図

本工事は泥水式シールド工法を採用して、図－3に示す平面図の世田谷代田駅付近にある発進立坑からシールドマシンを新宿方に発進させ、現在営業中の小田急小田原線の直下を延長645mにわたり掘進する。途中、下北沢駅直下を通過する際は、小田急線の上部を京王電鉄井の頭線下北沢駅が交差しているため、厳しい施工管理が要求されている。その後、下北沢駅の新宿方にある回転立坑に向けて掘進する。

新宿方に掘進したシールドマシンは、回転立坑に到達した後引き出され、180度回転（写真－1参照）させてふたたび小田原方に向い、復路の掘進を始め発進立坑に到達する。掘進総延長は1,290mにおよぶ工事である。

本シールド工事の大きな課題は、過密ダイヤで運行されている小田急小田原線の直下において、高地下水圧を有する地盤に対して発進と到達を4回行い、その中で回転立坑ではマシンの引抜き時の安全リスクの確保にある。

このため、発進立坑・回転立坑部は、土留め壁の芯材にFFUを用いたSEW工法と、高圧噴射攪拌工法によるセメント系地盤改良体を造成し、シールド直接発進・直接到達工を採用した。これによって、シールドマシン発進および到達時の安全施工を確保している。



図－3 シールド区間平面図

(2) 地質概要

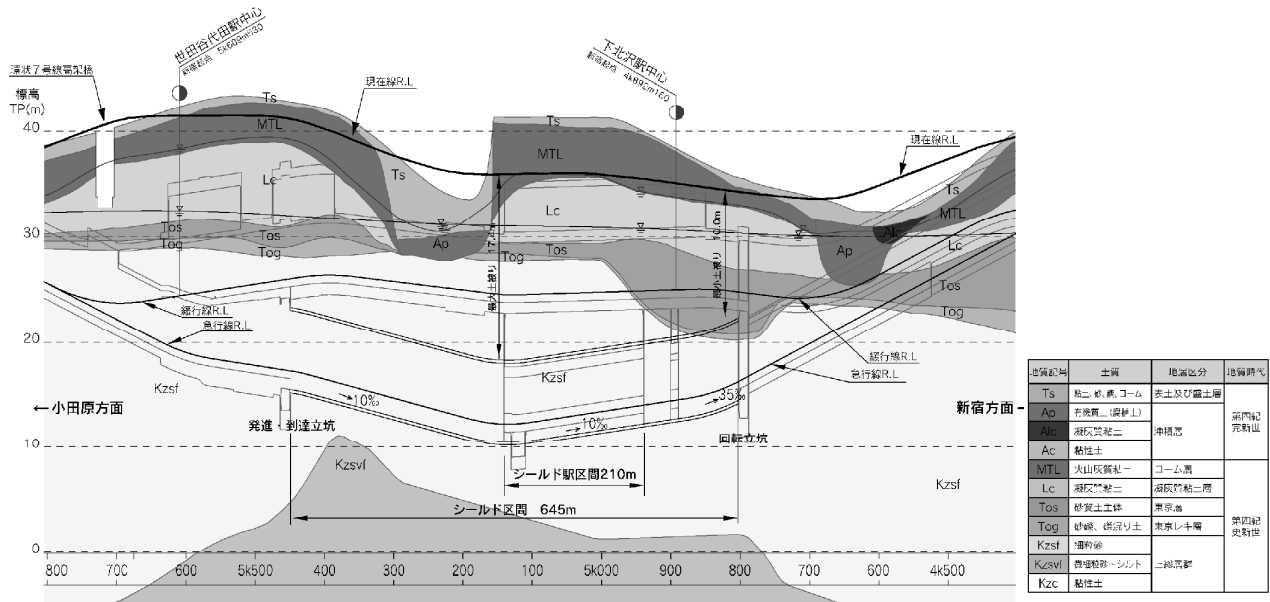
本シールド工事区間の地質は図－4に示すとおりである。

表土ならびに関東ローム層の下部に、東京層の砂層と礫層が分布し、さらにその下部には硬質な上総層群が分布している。トンネル中間地点は台地を浸食した溺れ谷が在り、薄く谷底堆積物の腐植土層が分布している。

東京層までの各地層は概ね地形に添った起伏の変化があり、さらに上総層群は概ね水平する形となっている。

シールドトンネルが通過する地盤の大部分は、洪積層の安定した上総層砂層部地盤であるが、回転立坑付近においては、東京層砂層並びに東京層礫層がトンネルクラウン部に分布している。

地下水は東京層の不圧滞水層と、東京層下部にある上総層群の数層に分かれた高い水頭をもつ滞水層に分布している。



図－4 地質縦断面図

3. シールドマシン発進・到達方法の計画

(1) シールドマシンの概要

シールドマシンの設計は、発進と到達を4回に渡り繰り返し施工することに加え、回転立坑のマシン引拔を行う際の安全性リスクを考慮した。また、全区間にわたる営業線直下にあつて、京王井の頭線との近接交差があること等を勘案して、シールドトンネル周辺の地盤挙動を希少化することが最大のポイントと考えた。このため、シールドスキンプレート外周の突起となる裏込め注入設備を、セグメント内から施工することとし、シールド発進・到達時のエントランスパッキンの止水性向上と、地山切削時の余掘りを排除した。

また、電車運行に支障を及ぼさない対策として、周辺地盤に対する安全性の高い泥水式シールド工法を選択して、掘進管理を綿密に計画し、施工時の管理基準値を厳しく設定した。

本工事のシールドマシンは、外径：8,260mm、機長：8,820mm、シールド総推力70,000KN、マシン総重量5500KNである。

(2) 発進・到達部土留め壁の検討

シールド発進・到達工において、シールドマシンによる土留め壁の直接切削は、土留め壁部を応力解放すること無く短期間に発進・到達が可能であることから、周辺地盤への影響が極めて少ない工法である。

本工事の施工条件は、営業線直下の路下



シールド到達を待つ回転立坑

施工となる土留め壁が2箇所と路上から直接施工できる土留め壁が2箇所である。このため、土留め壁の芯材は全強継ぎ手が容易に施工できる芯材を検討した結果、FFU 部材を用いた SEW 工法を採用した。

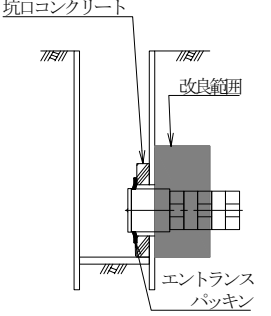
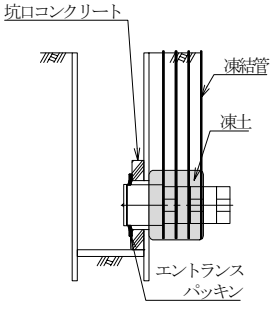
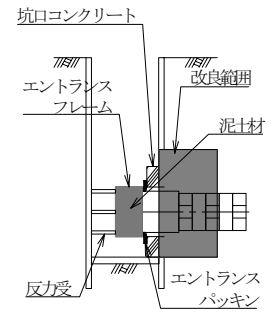
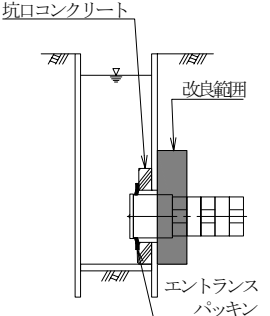
4. シールドマシン引き抜き計画と施工

(1) マシン引き抜き補助工法の検討

本シールド工事は発進立坑と到達立坑間延長645mにおいて、1台のシールドマシンを U ターンさせることにより併設シールドトンネルを構築する。このために、到達立坑(回転立坑)では、往路掘進を完了したシールドマシンの引き抜き工がある。

引き抜きにあたっては、マシンスキンプレートと地山との摩擦により止水効果が失われ地下水や土砂の流入を防止することが最も重要な課題となる。このため、営業線直下であることや高水圧を有する地盤であることを考慮して慎重な施工を行うための補助工法を表-1に示すとおり検討した。

表-1 マシン引き抜き補助工法比較表

	①地盤改良工	②凍結工法	③鋼製隔壁	④水中到達
工法概要図				
考察	<ul style="list-style-type: none"> ・テールボイド部からの出水リスク。 ・土留壁及び地盤改良の接継部からの出水リスク。 	<ul style="list-style-type: none"> ・凍土造成時の地盤隆起のリスク。 ・凍土溶解時の出水リスク。 	<ul style="list-style-type: none"> ・安全性は充分確保される。 ・設備費が高額となり、コスト面では劣る。 	<ul style="list-style-type: none"> ・背面地盤の水圧が高く、立坑内では対応出来ない。 ・土留壁切削時に、反力受けが取付けられない。
評価	×	×	○	△

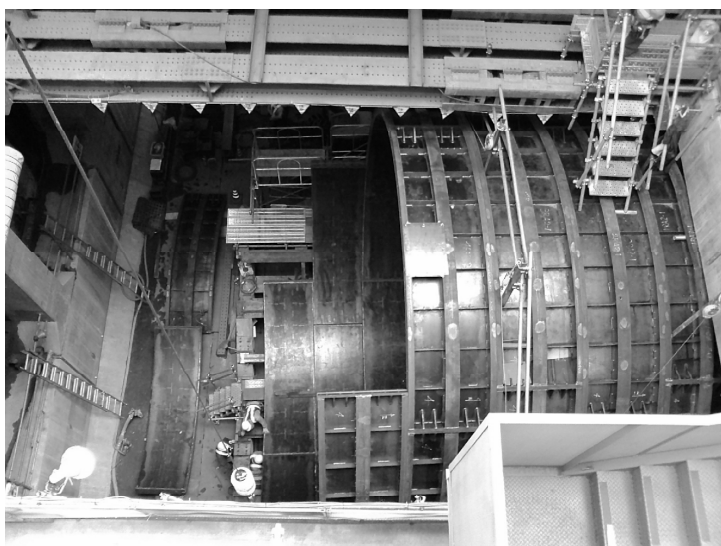


写真-1 マシン引き抜き鋼製隔壁組立て状況

(2) 施工概要

シールドマシン引抜きのため、内径8500mm、桁高120mm、延長10500mmの鋼製隔壁（写真参照）を立坑部に組み立てた。隔壁内部は流動化処理土を充填し、配合強度はマシン自重を受ける範囲に $q_u=3\text{N/mm}^2$ を使用し、その他の部分は $q_u=0.5\text{N/mm}^2$ を2層に分けて施工した。

シールド到達の施工ステップを図-5に示す。シールドは、地盤改良体まで20mm/minの通常速度で掘進し、そこから徐々に減速すると同時に切羽泥水圧も減少させ土留め壁の切削に到達していく。

◎マシン引抜き用鋼製隔壁の施工順序

- ① 鋼製隔壁架台の設置
- ② 鋼製隔壁リングの組立て
- ③ 棲部鋼製隔壁蓋設置
- ④ 耐圧切梁支保工設置
- ⑤ 流動化処理土充填

◎鋼製隔壁の設計

鋼製隔壁に作用する圧力について検討しシールドマシンからは推力＋泥水圧が、鋼製隔壁に作用するものと仮定して、耐圧切梁支保工および鋼製隔壁リングの設計を行った。

◎鋼製隔壁に発生する圧力

鋼製隔壁の設計の妥当性について各部材に計器を取付けて計測することによって安全確認を行った。

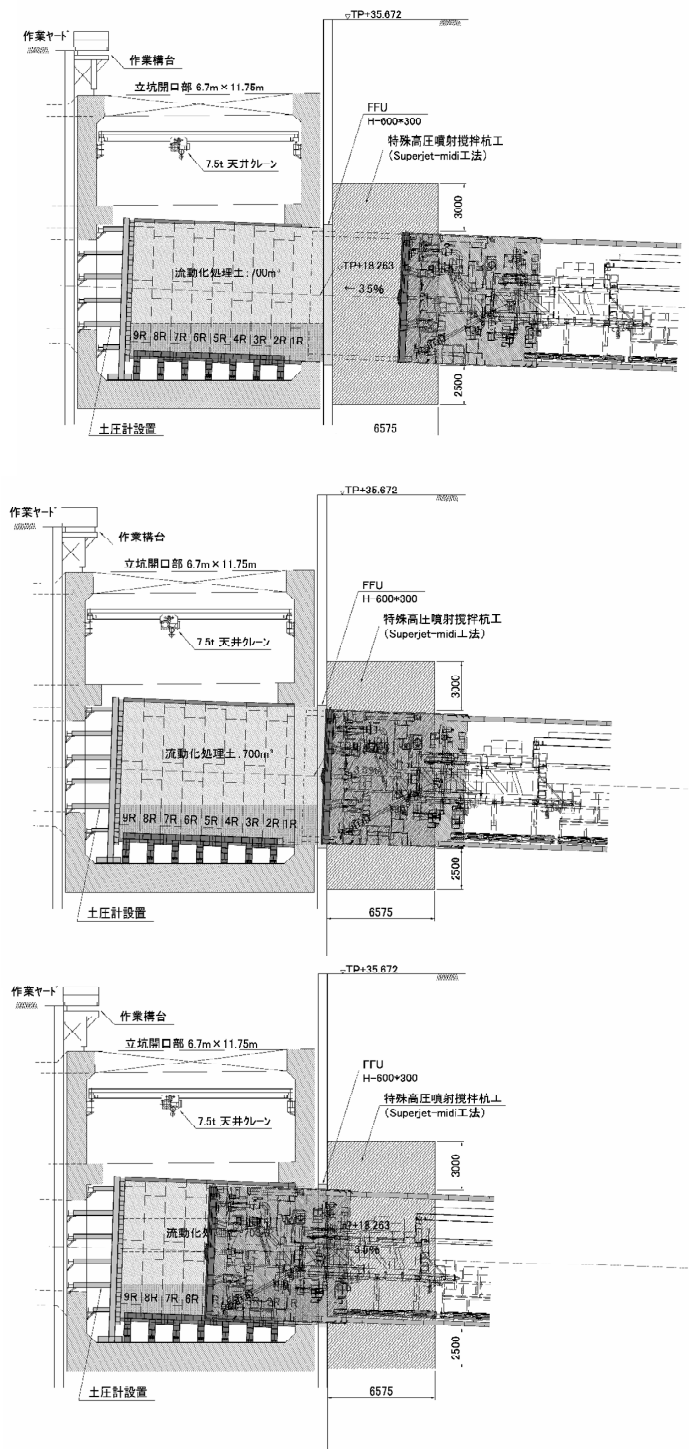


図-5 シールドマシン鋼製隔壁到達ステップ

(3)マシン引抜き施工結果

シールドマシン先端と回転立坑山留壁との隔壁の状況図を下図に示す。

また、隔壁反力受に作用する泥水圧、総ジャッキ推力、計測土圧値を下図のグラフに示し、相関関係を考察した。

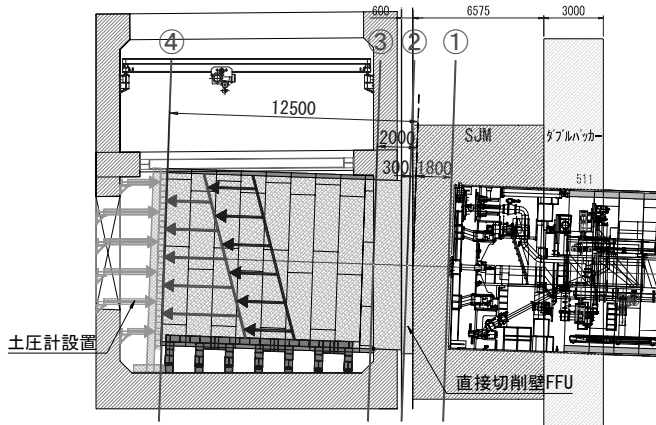
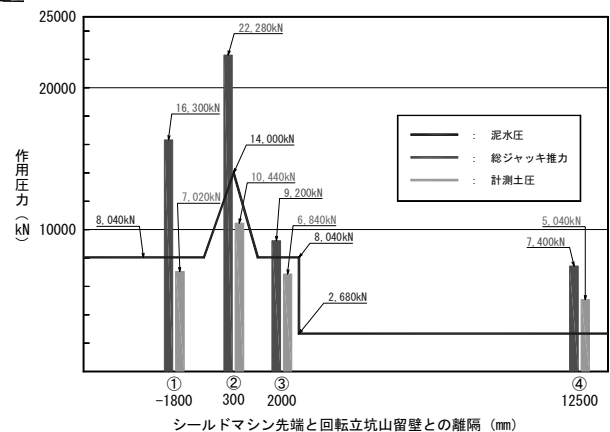


図-6 掘進位置図と土圧計設置位置図



初期値～到達掘進状況(隔壁反力)

このグラフより、隔壁反力に作用すると考察される 泥水圧 + 総ジャッキ推力 の和は、以下の様になった。

①の場合 $(8,040\text{kN} + 16,300\text{kN}) \times \alpha (\text{動摩擦係数}) = 7,020\text{kN} \rightarrow \alpha = \text{約 } 30\%$

②の場合 $(14,000\text{kN} + 22,280\text{kN}) \times \alpha (\text{動摩擦係数}) = 10,440\text{kN} \rightarrow \alpha = \text{約 } 30\%$

③の場合 $(8,040\text{kN} + 9,200\text{kN}) \times \alpha (\text{動摩擦係数}) = 6,840\text{kN} \rightarrow \alpha = \text{約 } 40\%$

④の場合 $(2,680\text{kN} + 7,400\text{kN}) \times \alpha (\text{動摩擦係数}) = 5,040\text{kN} \rightarrow \alpha = \text{約 } 50\%$

以上より、地盤改良及びFFU掘進時には、概ね α : 動摩擦係数が3割程度となり、流動化処理土内に入っていくにつれ徐々に摩擦力が約5割程度まで上がっていくと考察された。

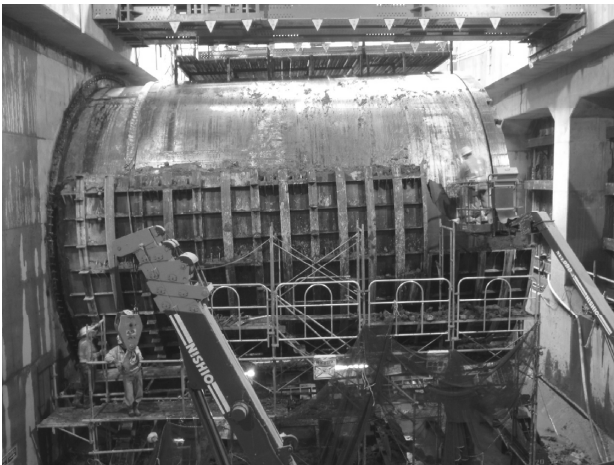


写真-2 シールドマシン到達鋼製隔壁解体状況

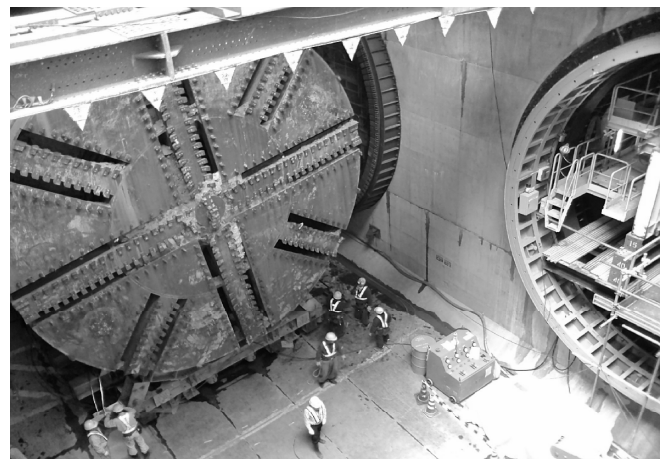


写真-3 シールドマシン回転状況

5. シールド直接発進・到達施工

(1) 土留め壁の切削結果

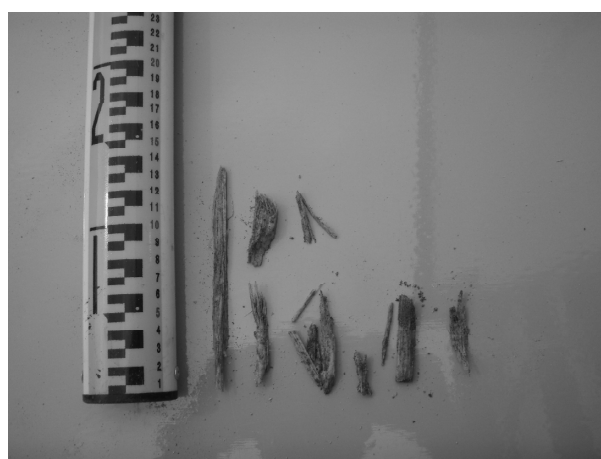
SEW 工法による土留め壁は、2回の発進と2回の到達において、1台のシールドマシンにより直接切削された。土留め壁の施工条件と土留め壁背面の補助工法の違い、またマシンの切削角度により FFU 部材の直接切削結果を表－2のとおりまとめた。

表－2 SEW 工法による土留め壁のシールド直接切削の施工結果

		発進立坑	回転立坑		発進立坑
		CASE1 発進部	CASE2 到達部	CASE3 発進部	CASE4 到達部
FFU 部材形状 継ぎ手箇所数(全断面)		幅 700 mm (入射角考慮 783 mm) 48 箇所	幅 588 mm (入射角考慮 1320 mm) 12 箇所	幅 588 mm (入射角考慮 1021 mm) 全箇所	幅 700 mm (入射角考慮 783 mm) 28 箇所
切削条件	泥水圧	120kpa	150kpa	120kpa	150kpa
	推進速度	3mm/min	1. 5mm/min	1. 5mm/min	1. 5mm/min
FFU 背面条件		SJM による地盤改良 $qu=3N/mm^2$	鋼製隔壁内流動化処理土 $qu=3N/mm^2$ (下部施工) $qu=0. 5N/mm^2$	SJM による地盤改良 $qu=3N/mm^2$	鋼製隔壁内流動化処理土 $qu=0. 5N/mm^2$
FFU 切削	掘進時間	4. 4 時間	14. 7 時間	11. 3 時間	8. 7 時間
	回収時間	223. 6 時間	165. 3 時間	60. 7 時間	75. 3 時間
	比 率	1:51	1:11	1:5	1:9

注) 掘進時間 = FFU 部材の切削に要した時間を示す

回収時間 = 礫箱内に堆積した FFU 部材の回収に要した時間を示す



写真－4 礫箱で回収した FFU 部材と形状寸法

(2) 土留め壁の切削結果の考察

◎FFU 部材の切削状況

- ・マシン速度が速い場合(CASE1)は FFU 部材が大割れて、礫箱に堆積する量が多い。
- ・マシン速度が遅い場合(CASE2～)は、FFU 部材は細かい屑となって削取ることができ、大割れする量が減少した。

◎FFU 部材の切削角度

FFU 部材を切削する角度は、トンネル勾配により10/1000および35/1000の2CASEあったが FFU 部材の切削に変化(問題)は見られなかった。

◎FFU 部材背面の耐圧性能

FFU 背面が地盤改良体と流動化処理土充填という一軸圧縮強度に違いがある断面を切削したが、FFU 部材の切削に変化(問題)は見られなかった。

6. まとめ

当該シールド工事は、平成 20 年 6 月 23 日に発進し、回転立坑に翌 21 年 2 月に到達しマシンの引出と 180 度回転を行った。

復路の工事は 4 月 20 日に立坑を発進し平成 21 年 10 月 14 日無事発進立坑に到達した。

この間 4 回にわたりシールドマシンによる土留め壁の直接切削を施工したことは、都市部において比較的大断面のシールド工事では希少な事例であった。

また、シールドマシンの引出においても安全性の高い施工法を選択し高地下水圧の坑内流出の防止を図り安全な施工を行った。施工方法の選択においてコスト面には異論があったが安全を最優先に確実な施工をできたことは特筆すべき点である。

今後のシールド工事において、同様の施工条件が課せられ、高い安全性が求められる場合において、本文で紹介した施工方法直接シールド発進到達、シールドマシン引抜き工における地下水の出水や土砂流出防止対策の参考となるものとする。