

泥水クローズドシステムによる環境負荷低減の施工事例

An Application of Environmental Load Reduction by Slurry-Closed-System Shield

大村 英士*1 林 茂郎*2 日高 厚*2
Hideshi Ohmura Shigero Hayashi Atsushi Hidaka

要旨

本報告は、鴻池組の独自技術である「泥水クローズドシステム」を用いた泥水式シールドの施工事例である。今回紹介する現場は、大阪市南西部の安治川を横断する粘土・シルト・砂・礫分の洪積層複合地盤を仕上がり径：φ=3,000mm、施工延長：L=3,258m、最大土被り：h=45mという大深度・長距離施工の泥水式シールド工事であった。この工事で発生する建設汚泥は従来のフィルタープレスによる泥水処理で発生する33,600tの設計量であったが、「泥水クローズドシステム」の技術を適用した結果、23,200tと約30%の処分量削減を実現した。以下、「泥水クローズドシステム」の概要とその施工報告および大深度施工や二次覆工省略型シールドにおける特殊覆工の事例を紹介する。

キーワード：環境負荷 泥水式シールド 泥水処理 分散剤 遠心分離機 コーン指数

1. はじめに

最近の建設業では環境対策が重要視されるようになってきていることから、当工事においても環境負荷低減を図れる工法および設備の採用を行った。本報告においては、泥水式シールド工事での泥水処理方法に泥水クローズドシステムを採用した計画と施工実績を主体として報告する。

「施工者」 鴻池・三井住友・竹中土木・大鉄特定建設
工事共同企業体

「工事場所」 大阪市此花区西島5丁目～港区福崎1丁目

「工期」 平成16年3月24日～平成19年9月3日

「工事内容」 表1・図2に示す。

2. 工事概要

「工事名称」 千島下水処理場～此花下水処理場雨水滞
水池築造工事（その2）

「発注者」 大阪市建設局（旧：大阪市都市環境局）

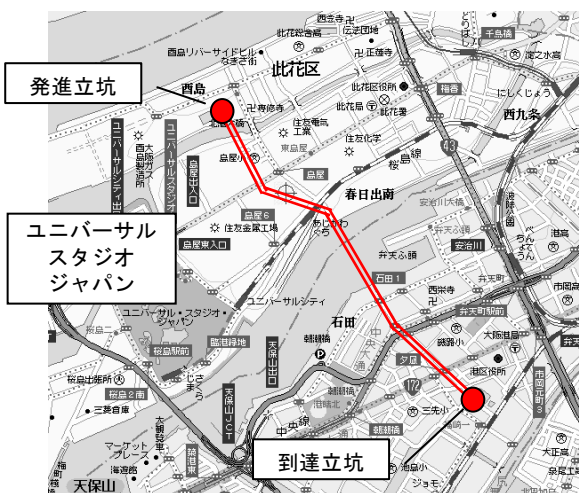


図1 現場位置図

3. 土質概要

3.1 周辺地域の土質

本工事地域は、大阪湾湾奥部で沿岸部の埋立地群に続き、大阪市街地東部で南北に延びた上町台地までに広がる大阪海岸低地に該当する。

この大阪海岸低地は、淀川系川の安治川、尻無川、木津川および旧中津川、神崎川などによって作られたデルタ地帯であり、これらの堆積地帯は歴史的にみても比較的新しいもので、淀川河口の堆積が進むに従って次第に陸化していったものである。

ここで、大阪海岸低地の地質構成をみると、以下の層序で堆積されている。

- 1) 沖積層（梅田砂層、梅田粘土層）
- 2) 上部洪積層（天満層を含む）
- 3) 大阪層群

3.2 シールド掘進部の土質

シールド掘進勾配は発進立坑から到達立坑に向かって上り勾配になっており、シールド掘進部の土層は下層より

*1 大阪本店 土木部 *2 大阪本店 土木技術部

上部洪積砂質土層 (Ds1)
 上部洪積粘土層 (Dc1)
 上部洪積砂礫層 (Dg1)
 沖積砂質土層 (As2)
 となっている。各々の土層の性状を以下に記す。(図3)

表1 主な工事内容

工種・項目	仕様・数量
シールド工	泥水式シールド
シールド機	外径φ3,590mm
	L=7,280mm
掘進延長	L=3,258m
掘進勾配	上がり5.462、7.396%
掘進土被り	45~27m
掘進最小曲率	R=30m
セグメント	RC系セグメント
	内径φ3,000mm
	二次覆工省略
	軸方向挿入型
RCセグメント	外径φ3,450mm
	幅1,200mm
	N=2,117リング
P&PCセグメント	外径φ3,450mm
	幅1,200mm
	N=500リング
コンクリート中詰め 鋼製セグメント	外径φ3,450~3,430mm
	幅300~1,200mm
	N=228リング
到達防護工	Superjet-Midi(坑口補強) ダブルハッカー(止水対策)
到達機内覆工	鋼製セグメント+パルテム・フローリング
汚泥圧送管設置工	ダクタイル鋳鉄管
	内径φ300mm×2列
	延べ延長L=6,528m
坑内インバート工	コンクリートV=3,434m ³
立坑工	中間立坑 2箇所
	PCウエル工法
No.1中間立坑	内径φ2,000mm
	外径φ2,500mm
	圧入掘削深H=40.4m
	PCウエル工法
No.2中間立坑	内径φ2,500mm
	外径φ3,000mm
	圧入掘削深H=36.7m
	PCウエル工法
接続工	ベビーモール推進工
	φ1,000mm
特殊マンホール	3箇所

①上部洪積砂質土層 (Ds1)
 本層は、発進立坑付近の掘削断面の一部に限りシールド掘進対象となっている。

この砂質土の砂分は、粒子均一な細砂にシルト分を混在するものおよびφ20mm位までの礫分を少混する中砂で構成され、暗青灰色系の色調を呈している。

そのN値は、シルト分を混入する部分でN=30程度で低下しているが、大半はN>50の「締まっている相対密度」~「非常に締まっている相対密度」で安定した土性である。

②上部洪積粘土層 (Dc1)

本層は、発進立坑から約1600m(安治川の途中)までの区間において、シールド掘進対象となっている。

この粘性土の土質は、細粒土分のみからなるシルト質粘土が主体で構成され、本層下限部で砂分を混入するとともに砂分がやや優勢な部分が存在する。また、ほぼ全体に貝殻片や腐植物が少量~多量混入しているが、比較的均質である。その色調は暗青緑色~暗青灰色を呈している。

本層のN値は、N=7~11の範囲にあり、平均N≒8の「硬い相対密度」を示す安定した土性を有するものと判定される。

③上部洪積砂礫土層 (Dg1)

本層は、延長約1600mから約2500mまでの区間において、シールド掘進対象となっている。

本層の土質は、砂礫を主体に礫混じり細砂、中砂ないしは細砂で構成され、暗青灰色系の色調を呈している。混入する礫分の礫径はφ50mm位までのものが主体であるが、砂礫中での最大礫径については不明な部分も多くボーリング時に確認された径の2~3倍程度のものを予想しておくのが安全である。また、砂礫のマトリックスを含めて砂分は、細砂~粗砂まで分布し一定していない。

そのN値は、礫分の混入状況によりN=20~60以上の広範囲に測定されているが、平均N≒50の「締まっている相対密度」にあると判定される。

④沖積砂質土層 (As2)

本層は、延長約2500mから到達立坑までの区間において、シールド掘進対象となっている。

本層の土質は、シルト分を不均質に混入する暗灰色の細砂で構成され、砂分は細砂からなる微粒状のものが主体である。

そのN値は、シルト分の含有量によりN=3~46の広範囲に測定されているが、「緩い相対密度」でルースな締り方にあるものが主体であると推定される。

4. シールド掘進実績

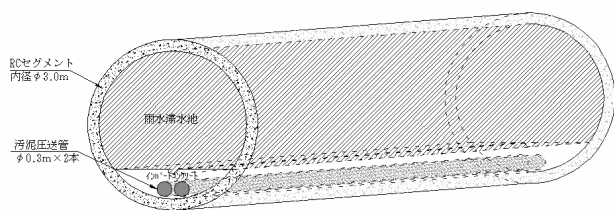


図2 トンネル内仕上がり図



図3 想定土質縦断面図

シールド掘進は平成17年2月下旬から初期掘進を開始し、その後段取り替えを経て、平成17年6月上旬から平成18年5月中旬までの期間で本掘進を実施した。施工体制は初期掘進当初から昼夜で実施し、進捗実績は初期掘進で38.3リング/月(46.0m/月)、本掘進で227.5リング/月(259.9m/月)、全体平均で189.7リング/月(217.1m/月)となった(図4、図5)。

平成17年11月の掘進進捗が83リングと小さいのは、安治川右岸手前で玉石混じり礫層(最大取り込み玉石径φ200mm)が予定外に出現し、クラッシャーを含めた流体設備変更等の対応を実施したためである。

図6~8に示す土質毎の掘進実績は、上部洪積粘土層の掘進平均速度が38.0mm/min、平均カッタートルクが35.0kN・m、シールドジャッキ平均推進力が1,450kN、上部洪積砂礫層の掘進平均速度が49.0mm/min、平均カッタートルクが105.9kN・m、シールドジャッキ平均推進力が6,970kN、沖積砂質土層の掘進平均速度が39.1mm/min、平均カッタートルクが175.0kN・m、シールドジャッキ平均推進力が6,670kNとなった。

上部洪積粘土層は、泥水処理設備(前処理機)の能力上限付近で掘進した結果、平均速度約40mm/minとなり、過去の実績と比較すると掘進時間の短縮が図れた。

上部洪積砂礫層は、当初想定していた地盤より緩く、カッタートルクに余裕があり、掘進平均速度約50mm/minを達成した。これはカッター面板の開口部(開口率26%)からスムーズに土砂を取り込めたためであり、掘進速度の上限としては排泥ポンプ能力(電流値)に左右される結果となった。

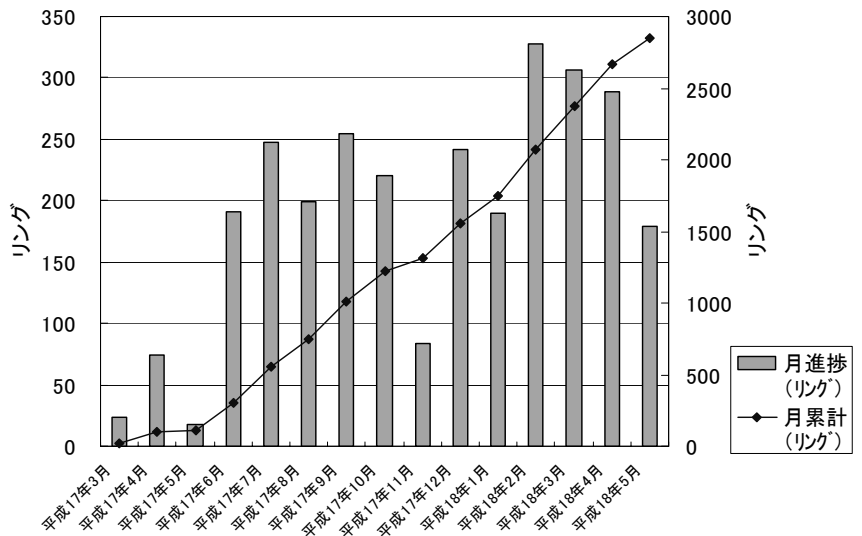


図4 一次覆工進捗実績No.1

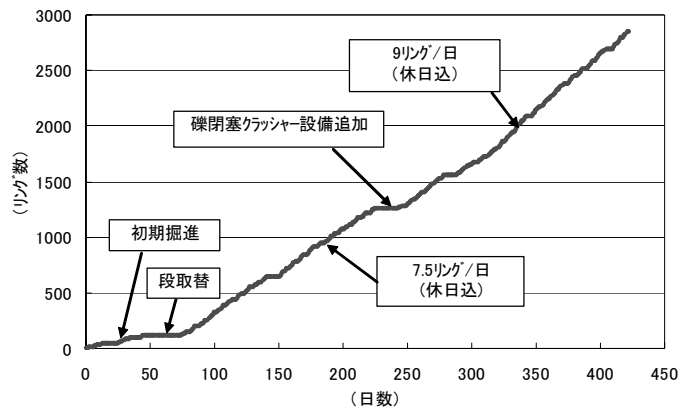


図5 一次覆工進捗実績No.2

沖積砂質土層は、当初想定していた地盤どおりであり、高カッタートルクにより、やや掘進速度が抑えられる結果となった。



写真1 泥水式シールド機

5. 泥水クローズドシステムの概要

5.1 通常の泥水処理方法

泥水式シールドでの通常の泥水処理方法を図9に示す。

5.2 泥水クローズドシステムの処理方法

建設汚泥に該当する廃棄泥水やシールド2次処理土の縮減を図るため、本工事で採用した泥水クローズドシステムの泥水処理方法を図10に示す。

泥水クローズドシステムとは、循環泥水への加水調整を最小限にして余剰泥水の増加を抑制することに着目して開発したシステムである。

加水調整を最小限にする手段としては、2種類の泥水分散剤（AK-2000とAK助剤）の自動添加による泥水の粘性調整と、超高速遠心分離機であるマッドセパマシンを用いた凝集剤無添加分級による泥水の比重調整を主体としている。

このAK-2000は無機化合物のAK助剤と共に急性毒性試験などで安全性が確認されている薬剤である。

また、凝集剤無添加脱水により分級された発生土は一般残土処分できること、および泥水を裏込め材料として現場内利用ができることから、泥水式シールド全体での建設汚泥発生量の縮減が期待できるシステムでもある。本工事で、凝集剤無添加分級による発生土を初期掘進完了後から一般残土処分とした。詳細については6章に記す。

5.3 泥水クローズドシステムでの処理設備

今回の泥水クローズドシステムで使用した土砂分級機械は、前処理機と一次ふるい機と比重調整機で構成され、前処理機としてプレドライマー、一次ふるい機としてサンドコレクターとサイクロン、比重調整機としてマッドセパマシンを採用した。また、泥水の粘性調整機械としては分散剤自動作液添加プラントを採用し、泥水処理設備の運転および管理を中央管理室にて自動的にできるシステムも構築して使用した。(図11)

6. 泥水クローズドシステムの実績

6.1 マッドセパマシンで分級された土砂の性状についての検討

この泥水クローズドシステムを用いて初期掘進を実施した結果、マッドセパマシンで分級された土（以降、マシン処理土と記す）が、一般残土として処理しているプレドライマーで分級された土（以降、前処理土と記す）と目視上同等の性状であることから、マシン処理土を一般残土処理することとした。前処理土とマシン処理土を比較した結果

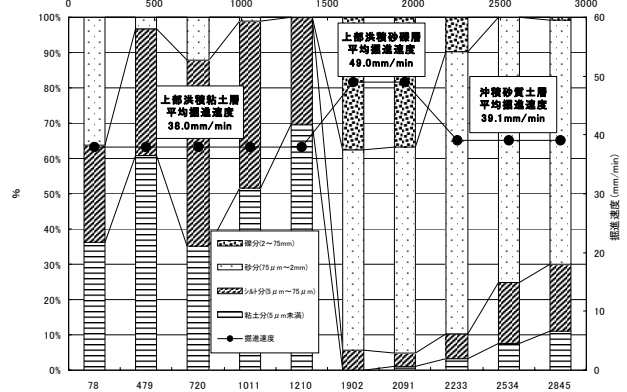


図6 土層毎の掘進速度

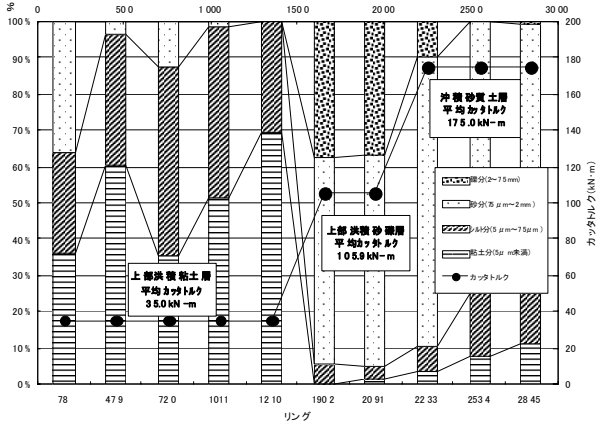


図7 土層毎のカッタートルク

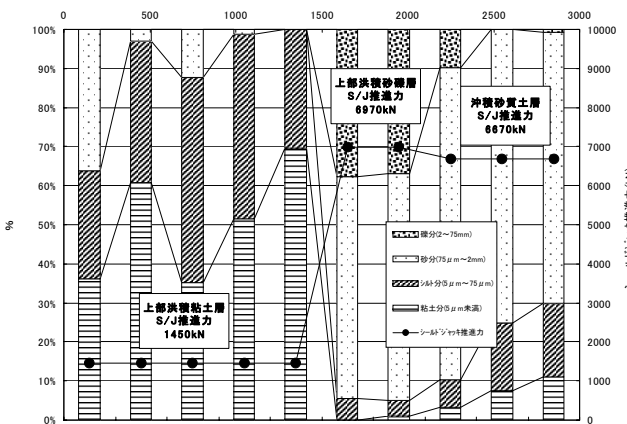


図8 土層毎のシールドジャッキ推進力

を表2に示す。

イ) 砂分の割合が試験①では前処理土：40.7%、マシン処理土：62.1%であり、試験②では前処理土：43.4%、マシン処理土：44.7%であり、前処理土よりマシン処理土の砂含有分が多い。

ロ) 粒径加積曲線の形状がほとんど同じである。

ハ) 含水比が試験①では前処理土が35.5%、マシン処理土が30.6%であり、試験②では前処理土が36.5%、マシン処理土が33.7%であり、前処理土よりマシン処理土の含水比が小さい。

産業廃棄物担当行政と調整した結果、コーン指数試験を追加実施するよう指示があった。この結果を表3に示す。この結果からの考察を簡単に以下に示す。

ニ)マシン処理土のコーン指数は、「建設廃棄物処理指針」において泥状であるかどうかの指標である200kN/m²を上回る結果であり、性状から判断される分類としては、建設汚泥ではなく、土砂および土砂に準ずるものと判断される。ちなみに土質区分基準（国土交通省令）に基づけば、第4種建設発生土に区分される品質となる。

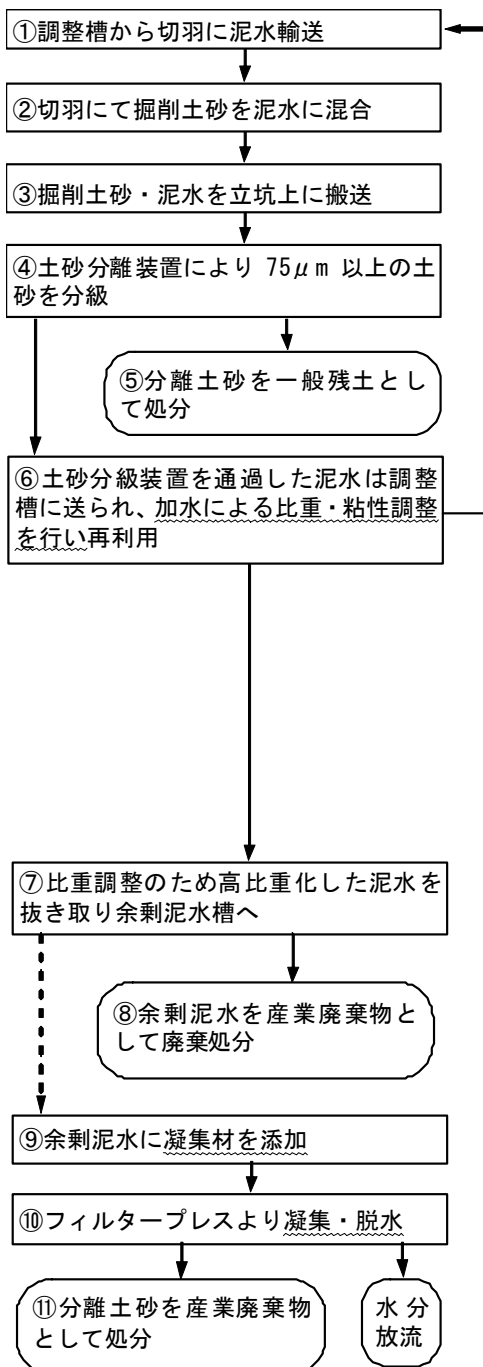
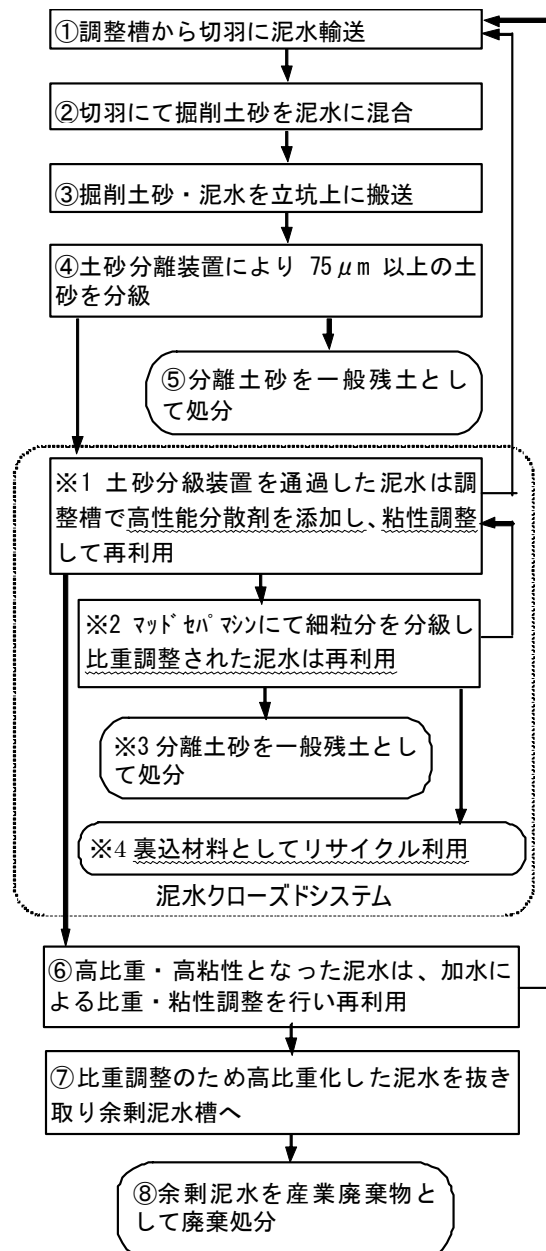


図9 通常の泥水処理フロー図



※3※4 は、産業廃棄物処理担当行政の判断によるものとする。

図10 泥水クローズドシステムフロー図（提案）

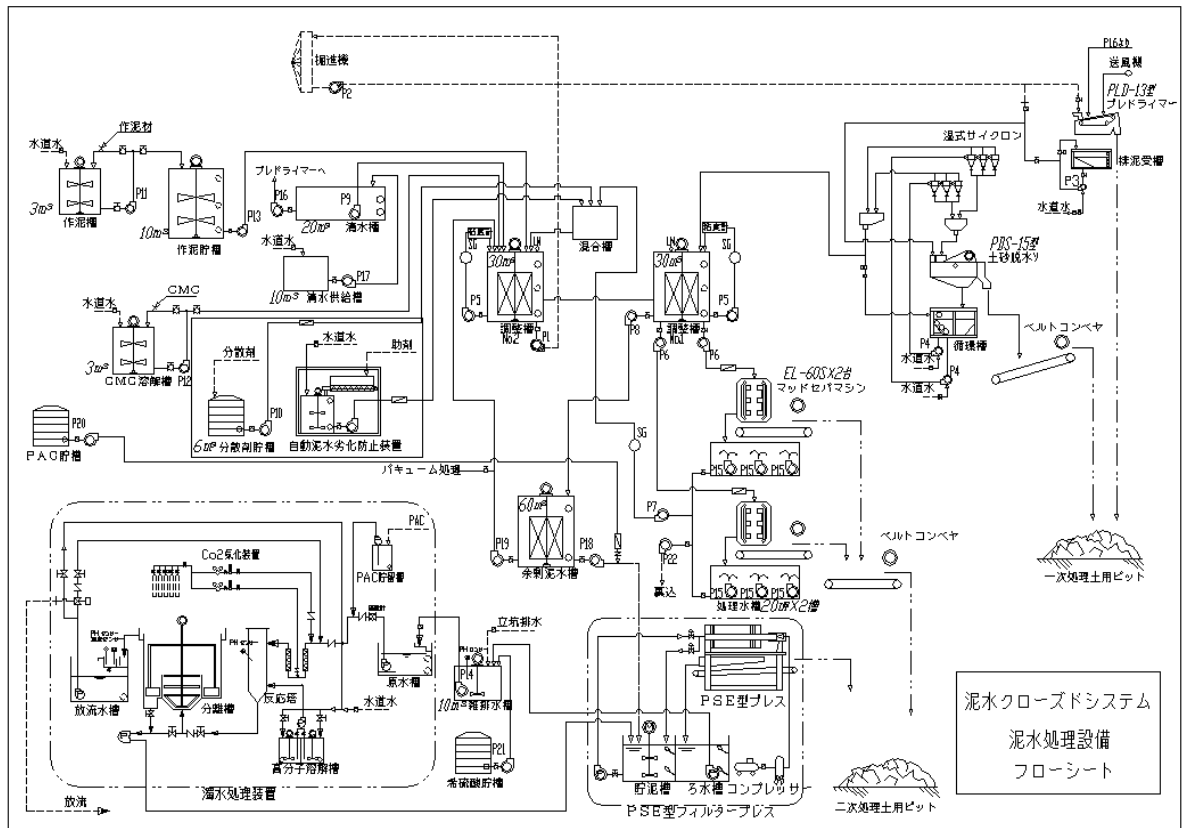


図 11 本工事での泥水クローズドシステム処理設備配置フローシート

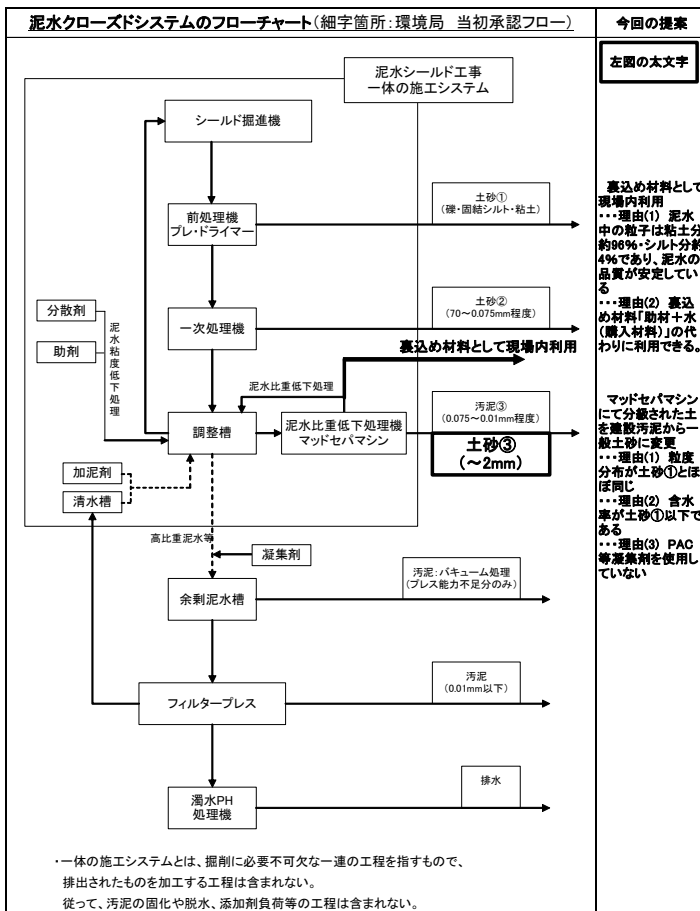


図 12 泥水処理変更提案内容

表 2 マシン処理土土質試験結果

資料採取場所	一次処理機 (ふるい上)	一次処理機 (ふるい下)	プレッドライマー	マッドセバマシン
土粒子の密度 g/cm^3	2.644		2.682	2.671
自然含水比 % (含水率 %)	20.6 (17.1)		35.5 (26.2)	30.6 (23.4)
粒度分布 (%)	礫分 2mm以上	0	0	0
	砂分 0.075 ~ 2mm	88	40.7	62.1
	シルト分 0.005 ~ 0.075mm	2.3	30.4	18.9
	粘土分 0.005mm 以下	9.7	28.9	19
土質分類	細粒分混り砂		粘性土	細粒分質砂

資料採取場所	一次処理機 (ふるい上)	一次処理機 (ふるい下)	プレッドライマー	マッドセバマシン
土粒子の密度 g/cm^3	2.647	2.663	2.693	2.729
自然含水比 % (含水率 %)	18.3 (15.5)	26.9 (21.2)	36.5 (26.7)	33.7 (25.2)
粒度分布 (%)	礫分 2mm以上	1.5	17.4	0
	砂分 0.075 ~ 2mm	87.8	45.6	43.4
	シルト分 0.005 ~ 0.075mm	5.5	18	27.8
	粘土分 0.005mm 以下	5.2	19	28.8
土質分類	細粒分混り砂	細粒分質礫質砂	粘性土	粘性土

表 3 コーン指数試験結果

試料採取場所	測定回数	測定値				コーン指数	
		5cm	7.5cm	10cm	平均	$q_c (kN/m^2)$	
マッドセバマシン	1	18	18	22	19.3	288	
	2	18	20	22	20	298	
	3	15	19	22	18.7	279	

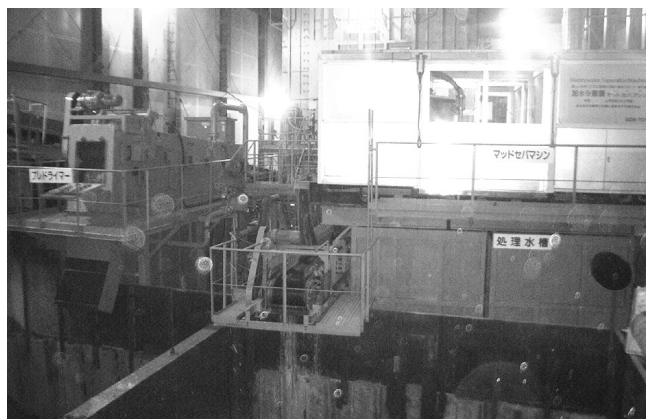


写真2 プレドライマーとマッドセパマシン

表4 裏込め品質確認試験項目

品質確認項目	品質確認試験	備考
流動性確保(A液)	Pポートフロー値測定試験	練り上がり直後、1H後、5H後
ゲルタイム(A+B液)	ゲルタイム測定試験	
強度(A+B液)	一軸圧縮強度試験	σ_{1H} 、 $\sigma_{7日}$ 、 $\sigma_{28日}$

上記イ) からニ) の結果から、マシン処理土は現在一般残土として処分できている前処理土と比較して、処分方法の決定要因である粒度分布と含水比が同条件であること、マシン処理土を分級する際に PAC などの凝集剤を使用していないことから、マシン処理土が一般残土と認められると判断し、産業廃棄物である建設汚泥発生量削減の観点から、マシン処理土を一般残土として処理することを提案し、承認された。(図12)

6.2 泥水の裏込め材料への利用についての検討

泥水に含まれる土粒子の構成を確認した結果、粘土分が約96%、シルト分が約4%、砂・礫分が0%であり裏込め助材と同等の微細粒子が多く懸濁安定性に優れている泥水であることが確認できたため、循環泥水を裏込め材料に利用できないか検討を行った。

裏込め材料として品質を確認する必要がある項目および確認試験を表4に示す。

なお、Pポートフロー値測定試験の練り上り1時間後は通常施工サイクルの裏込めA液配管内停滞予測時間、練り上り5時間後は昼夜施工班交替時の裏込めA液配管内停滞予測時間を想定して実施した。

A液の流動性確認を目的に、泥水比重を変えた配合選定試験および安定剤添加量を変えた配合選定試験を行った。

その後、ゲルタイム時間および圧縮強度値が所定の品質を満足しているか確認試験を行った。

品質確認試験フローおよび裏込め材料

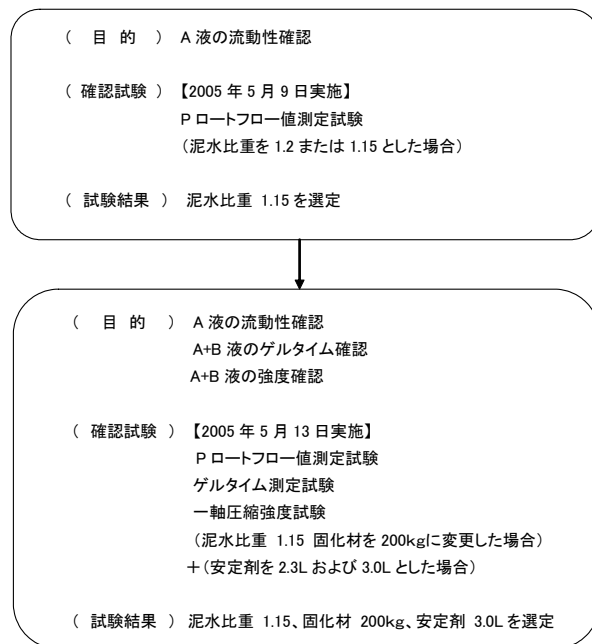


図13 裏込め材料試験結果

試験結果を図13に示す。

この結果から決定した裏込め注入施工にあたっての管理ポイントを以下に示すとともに、品質管理基準値を表5に示す。

（配合1m³当り）

- ①泥水比重は、1.15で使用する
- ②固化材配合は、200kgとする
- ③分散剤配合は、AK-2000 6kg、助剤 4kgとする
- ④安定剤配合は、3.0Lとする
- ⑤裏込め注入材料試験を定期的実施して品質管理を行う

超高速遠心分離機であるマッドセパマシンで処理された泥水は、裏込め助材と同等の微細粒子が多く懸濁安定性に優れており、裏込め材料として利用可能であることがわかった。泥水クローズドシステムでの循環泥水の裏込め材料への利用は、環境問題に配慮した建設汚泥の「発生抑制」「再利用」に該当すると判断できるため、今後は産業廃棄物処理担当行政との調整により、泥水の裏込め材料への利用が期待できる。

表5 裏込め品質管理基準値

A液比重	A液フロー値(秒)				ゲルタイム(秒)	一軸圧縮強度(N/mm ²)		
	練り上り直後	1H後	5H後*			1Hr	7日	28日
			1回目	2回目				
1.28±0.05	8.5~11	~13	~12	5~15	0.02以上	1.5以上	2.0以上	

*A液フロー値の5時間後の測定において、1回目は1時間後に測定したA液をその後静置した状態の試料を測定するものであり、2回目はその後すぐに再測定を行うものです。

6.3 泥水クローズドシステム使用の実績

送泥水の平均比重は図 14 のとおり洪積粘土層では 1.21 沖積砂質土層では 1.24 となり、また送泥水の平均ファンネル粘度は図 15 のとおり上部洪積粘土層では 34 秒、沖積砂質土層では 38 秒と、高比重・低粘度の泥水で掘進できた。

これは泥水クローズドシステムの分散剤等の効果であり、循環泥水への利用サイクルが長くなったことから、廃棄泥水の比重は 1.20~1.38 と高比重となり、廃棄泥水量の縮減が図れた。洪積粘土層および沖積砂質土層で分散剤として AK-2000 を 35kg、AK 助剤溶液を 300ℓ (AK 助剤=24kg)、1 リング掘進中の泥水内に自動添加した。また、泥水の粘性は調整槽に配置した回転粘度計(コンビスット TR 型浸液チューブ φ54mm)により常時監視し、高粘性になった場合は自動的に補足添加を実施した。

マッドセパマシンの 1 バッチ当りの処理土量は約 1m³ であり、掘進対象土質毎にまとめたグラフを図 16 に、上部洪積砂礫層と沖積砂質土層の粒度分布を表 6 に示す。

マッドセパマシンの土質毎の土質分類(表 2) やマッドセパマシンの土質毎のバッチ数(図 16) および上部洪積砂礫層と沖積砂質土層の粒度分布(表 6) の比較により、マッドセパマシンに打ち込まれた泥水の土粒子のうち、細砂分が最もドラムに付着し易く、一次ふるいを通過した細砂が最も多く分級できた土質と推定できる。

つまり、通常の泥水処理ではフィルタープレスにて 2 次処理土として産業廃棄物処分していた細砂を今回 1 次処理できたことが、環境・コスト面の大きな特徴であり、シルト質砂などの土層で細砂含有量がおよそ 30%以上であれば、泥水クローズドシステムがより有効であることが確認できた。

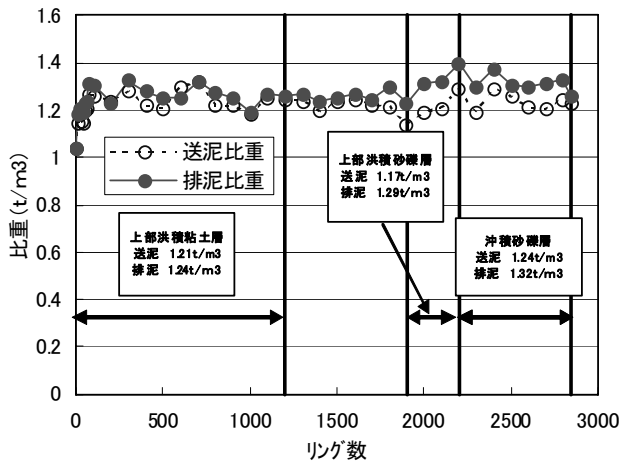


図 14 泥水の比重

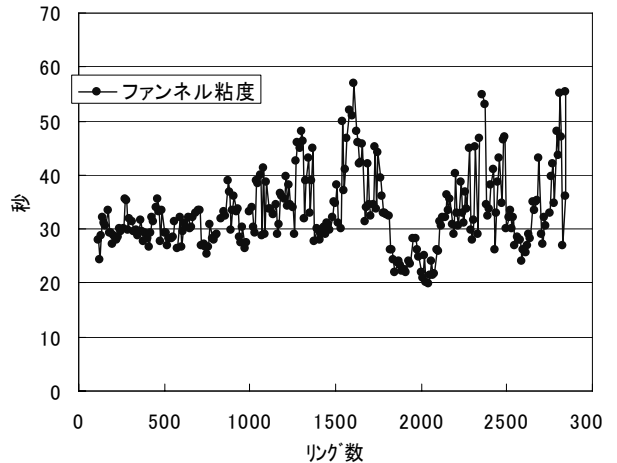


図 15 送泥水のファンネル粘度

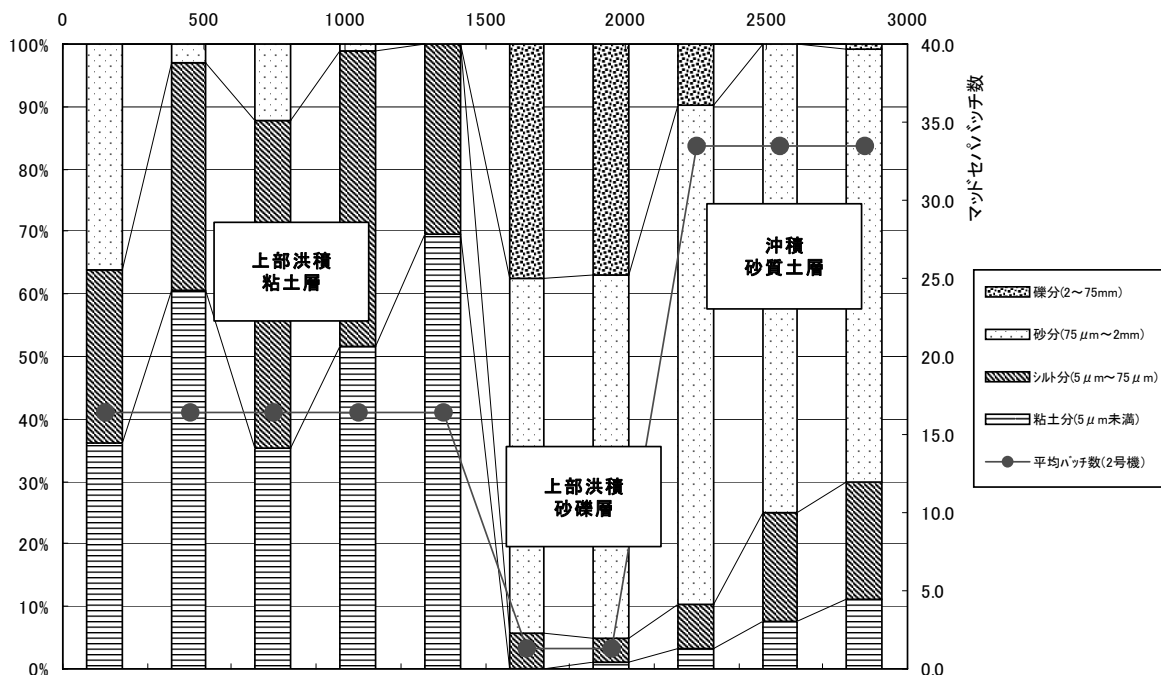


図 16 掘進土層毎のマッドセパマシン稼動バッチ数

表 6 上部洪積砂礫層と沖積砂質土層の粒度分布

ボーリングNo. (発進からの距離)	No.8-P29 (2110m)	No.7-P28 (2350m)	No.1-P28 (2520m)	No.6-P25 (2870m)	No.2-P25 到達立坑
土質	上部洪積砂礫層		沖積砂質土層		
粘土分 (5 μ m未満)	5.00%	3.10%	4.00%	7.50%	14.00%
シルト分 (5 μ m~75 μ m)			7.00%	17.40%	26.00%
細砂 (75 μ m~0.25mm)	7.40%	5.70%	29.00%	73.40%	32.00%
中砂 (0.25mm~0.85mm)	26.40%	10.00%	58.00%	1.70%	26.00%
粗砂 (0.85mm~2mm)	19.60%	42.10%	2.00%	0.00%	2.00%
細礫 (2mm~4.75mm)	20.30%	13.90%	0.00%	0.00%	0.00%
中礫 (4.75mm~19mm)	21.30%	14.80%	0.00%	0.00%	0.00%
粗礫 (19mm~75mm)	0.00%	10.40%	0.00%	0.00%	0.00%
SUM	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
砂分計	53.40%	57.80%	89.00%	75.10%	60.00%

また、今回の泥水クローズドシステムでの建設汚泥産業廃棄物処分量(23,200 t)は、通常の泥水処理方法による収支計算での処分量(33,600 t)に比較して約30%(10,400 t)縮減となった。また、①当初から泥水処理過程に発生する処理土の一般残土処分と②高品質泥水を裏込め材料への利用が実現できれば、泥水クローズドシステムによる建設汚泥産業廃棄物処分量は、通常の泥水処理方法による収支計算での処分量と比較すると約40%の縮減が期待できる結果となり、泥水クローズドシステムは大きな環境負荷低減工法であることが確認できた。

7. 大規模開削工事直下の横断掘進

発進から約700m地点で、阪神高速道路淀川左岸線築造工事が大規模開削工法で行われており、シールドはその直下を横断した。(図17)

シールド通過時の直上の大規模開削工事の状況は床付け完了直後であり、シールド横断部との離隔は、この床付け面から約20m、SMW土留め壁(止水壁部)下端から約3.7mでの計画であり、シールド横断部の土層は上部洪積粘土層(以下「Dc1」と記す)である。また、大規模開削工事では床付け面盤ぶくれ防止対策の1つとして、床付け面とシールド通過部間の土層である上部洪積砂礫層(以下「Dg1」と記す)と沖積砂質土層(以下「As2」と記す)を対象としたリリーフウェルが実施されていた。このため、シールド通過に伴うリリーフウェルへの影響を検討し、施工協議を実施した。以下にシールド掘進に伴う影響検討結果を示す。

7.1 地盤のゆるみに対する検討

まず、シールド掘進による影響が上下の洪積砂礫層に及ぼさないためには、シールド掘進地層がカバーロック層として信頼できる物性と厚みを有していることが要求される。

一般的にシールドの発進・到達時のシールド機切羽圧力は0~(間隙水圧+予備圧)まで圧力管理を行うが、その時の影響が周辺へ及ぼさないように、地盤改良等により防護工を実施する。当該地盤においても、シールド切羽圧力管理において上下の滞水砂礫層の影響を受けずに掘進できるカバーロック層の範囲を算定する。

シールド掘進地層の物性試験値は、一軸圧縮強度: $q_u=249\text{kN/m}^2$ ($C=q_u/2=125\text{kN/m}^2$)以上が確認されおり、シールド掘進により周辺に発生する付加応力(塑性領域)に基づく考え方で上部への影響範囲を求めると、 $t \approx 1.2\text{m}$ となる(下部の厚みは、1.0m程度)。

以上の結果とDc1の下部に砂分が混入しているボーリングデータから、シールドの縦断線形を2m上げるように変更した。これにより、シールドの上部に3mと下部に4mの粘性土の厚みが確保でき、シールド掘進時の切羽圧力は上下滞水層(Dg1層、Dg2層)の被圧の影響を受けずに、かつ掘削による地盤の緩みについてもDg1層まで及ぼさないと考えた。

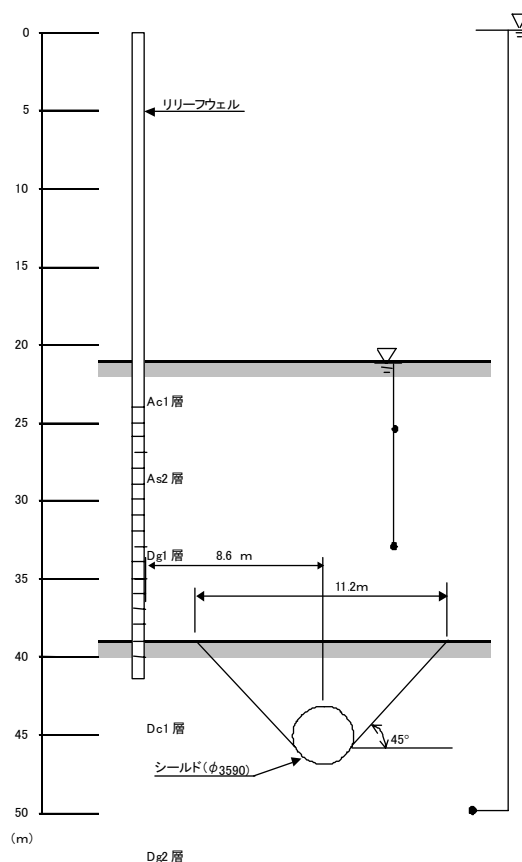


図 17 大規模開削工事直下のシールド横断図

7.2 粘土地盤の割裂現象に対する検討

次に、シールド上部に粘性土(Dc1層)がある場合に、当該粘性土が切羽泥水圧によりどのように影響を受けるか検討した。

「トンネルと地下」に記載されている研究文“シールドトンネルの裏込注入圧および切羽泥水圧による粘性土地盤の割裂現象”¹⁾には、均質な粘性土における割裂圧は以下のように設定されている。(図18)

$$Pf = \sigma + \alpha qu$$

Pf : 割裂圧

σ : 拘束圧

α : 係数

qu : 粘性土の一軸圧縮強度

土かぶり大きい場合で送泥水のフロー値が15秒程度の場合、上記式は $Pf = \sigma + 1.8qu$ となる。

拘束圧は、実際の場合シールド土被り圧 (γH) と考えられるため、阪神高速道路淀川左岸線掘削削底版部からの土被りを考慮して、算出する。

$$\gamma = 18\text{kN/m}^3$$

$$H = 22\text{m}$$

$$\sigma = 18 \times 22 = 396\text{kN/m}^2$$

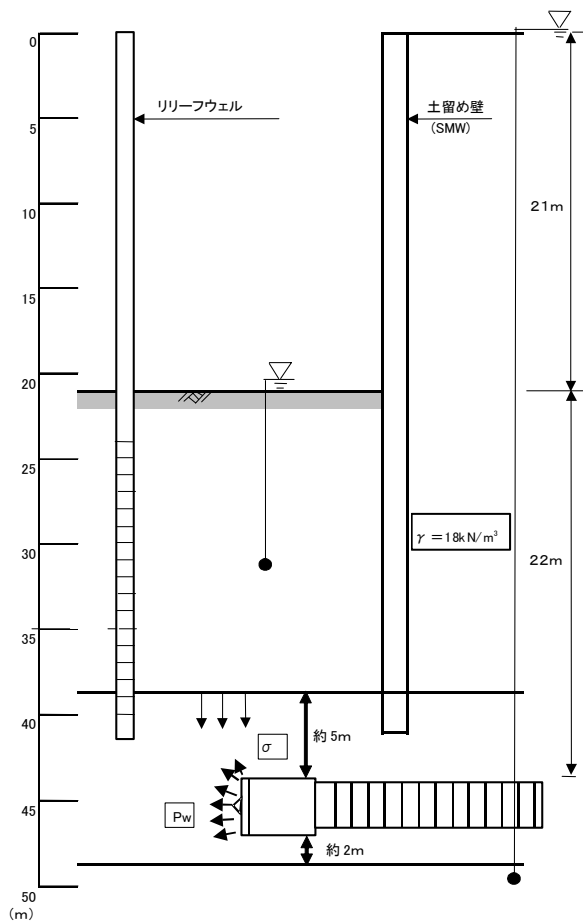


図18 拘束圧と割裂圧のモデル図

当該粘性土の一軸圧縮強度は、土質資料から、 $qu=249\text{kN/m}^2$ (No.1ボーリング物性試験結果より)

よって、割裂限界圧は、

$$Pf = 396 + 1.8 \times 249\text{kN/m}^2 = 844\text{kN/m}^2$$

となる。

割裂に対する安全率は、短期であること、実験式による極限の現象であることを考慮し、 $Sf=2.0$ とすると、

$$Pf1 = 844\text{kN/m}^2 / 2.0 = 422\text{kN/m}^2$$

また、特に粘性土が均質ではなく、薄い砂層が介在している場合や、潜在クラックが存在している今回の場合には、上記の $1.8qu$ の項はゼロと考えられるため、

$$Pf2 = 396\text{kN/m}^2 / 2.0 = 200\text{kN/m}^2$$

となる。したがって、切羽泥水圧は 200kN/m^2 以下にする必要がある。

7.3 泥水および裏込材の噴発および逸泥に対する検討

裏込注入については、掘進後のテールボイド充填により周辺地盤のゆるみを防止する上で確実な注入が必要である。

しかし、泥水や裏込材の噴発や逸泥は、トンネル径や掘進方法、土被りや地盤の性状、泥水圧や注入圧、泥水や裏込材の性状によって異なる。

これらの懸念される逸泥や噴発は、シールドの多くの実績と7.1および7.2の遵守、適切な泥水圧と裏込注入圧、掘進管理により防止できるものと判断される。

7.4 セグメントの変形や漏水に対する検討

今回使用するセグメントは剛性が高く止水性のよいRCセグメントであり、また、継手部には高水圧下での実績が最も多い水膨張性シール材を使用する。これより、組立後のセグメントの変形や漏水はほとんどなく、周辺地盤への影響はないと判断される。

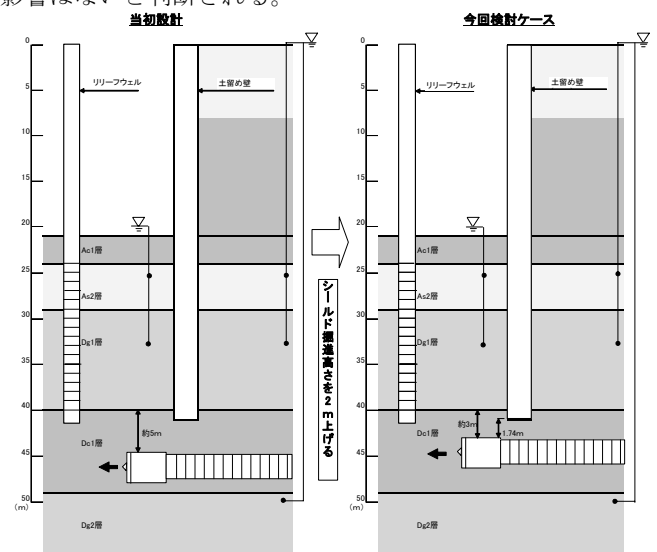


図19 シールド高さ変更

7.5 シールド横断掘進実績

以上の結果を踏まえ、当初計画からシールド高さを2m上げて、Dc1層のほぼ中央を通過するように変更し、シールド横断掘進を実施した。以下に実施した管理項目を示す。

(図19)

- ①掘進時の切羽水圧を200kPa以下とする
- ②掘進時の乾砂量をチェックして、土砂の取り込みが多い場合は裏込め注入量を増量する
- ③裏込め注入の施工は注入量および注入圧が過大にならないように管理する
- ④下記の状況が把握されれば、速やかに阪神高速道路工事施工会社に連絡する

ア) Dg1およびAs2層の水位が阪神高速工事施工会社の管理値(OP-17m)以上になった場合

イ) Dg1およびAs2層の水位に前日と大きく異なる動きがみられる場合

ウ) 1日の最大水位差がDg1で20cm、As2で16cm以上になった場合

エ) 満潮位時刻から2.5時間以降も水位が上昇する場合

オ) リリーフウェルの揚水が濁った場合

上記の管理を実施した結果、懸念していた事項の発生はなく、管理実施延長75m(土留め壁内35m+前後20m×2箇所)のシールド横断掘進を無事に終えることができた。

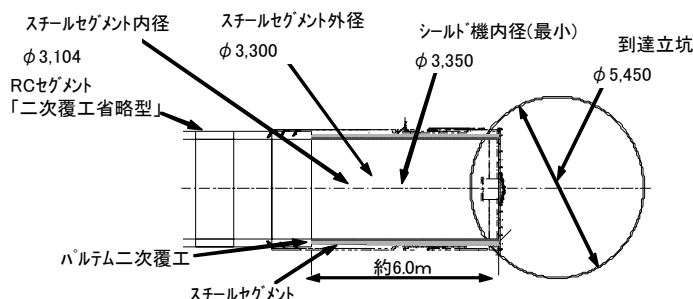


図20 シールド到達取り付け平面図

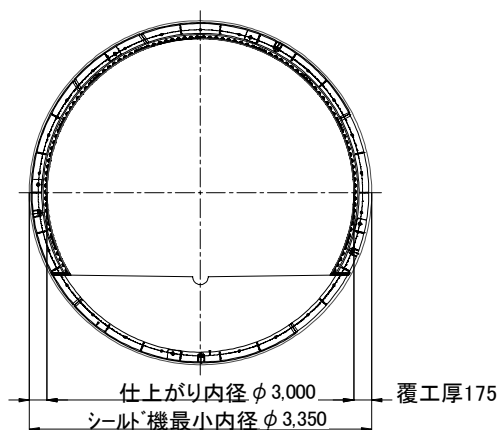


図21 シールド到達取り付け断面図

8. 到達後のシールド機内特殊覆工

本工事のシールド到達部を、シールド機外殻内にスチールセグメントを組み、パルテム・フローリング工法(以降FR工法と記す)を応用して適用したので、その概要を報告する。

8.1 到達部の構造概要

シールド到達部では、シールド機の外殻は残したままマシンの内部を撤去し覆工を構築する。覆工構造は、外圧構造部材としてスチールセグメント(桁高95mm)を設置し、被覆工で仕上げることとした。(図20、図21)

8.2 被覆工の選定

被覆工は以下のような条件を考慮して、FR工法を特殊部の覆工に応用し、施工した。

- ・インバートコンクリートがあるため、被覆工は上部約2/3の範囲で施工が可能なこと
- ・被覆工厚さが52mmと小さいこと
- ・被覆工施工時の材料投入開口部の大きさがφ600mmと狭く、かつ地上から施工場所まで深さが約30mあるため、大きな機械の搬入が困難であること
- ・施工延長が約6.0mと施工規模が小さくても施工単価の上昇を抑える工法であること

8.3 二次覆工用FR工法

FR工法は下水道等の管更生技術であり、管内に組立てた鋼製リングに高密度ポリエチレン製の表面部材を組み付け、表面部材とスチールセグメントとの間に特殊充填材を注入することにより内面を平滑に仕上げる工法である。人力施工のため大掛かりな仮設備が不要であり、また内側からの支保工が不要であるため坑内空間が広く安全な施工が可能となる。(図22、図23)

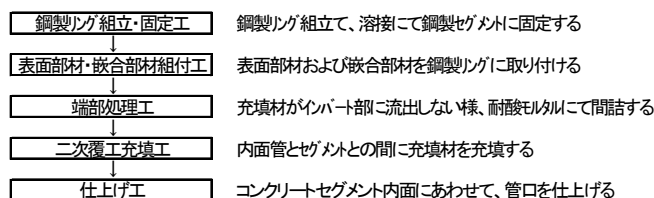


図22 二次覆工FR工法施工フロー

管更生用として適用する場合の充填材は、強度や水中不分離性、既設構造物との付着性が求められる。しかし、今回の場合、複雑な形状の部材の隅々まで充填できるように高流動性や無収縮およびノンブリージング性は求められるが、力学的な強度は外部のセグメント等が担うため、充填

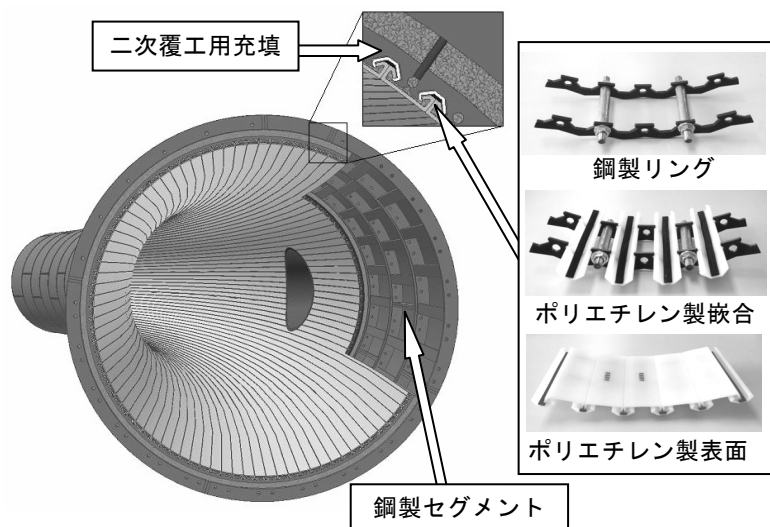


図 23 FR 覆工断面模式図

表 7 充填材の規格値

項目	規格値
圧縮強度(28日)	15.0N/mm ²
フロー値	250mm以上
ブリージング率	24時間 0.0%

表 8 充填材の示方配合

材料		重量 (kg/m ³)	重量比 %
セメント	高炉セメントB(比重3.02)	646.0	30.01
	水	365.0	16.95
砂	石灰石砕砂(比重2.56)	1068.0	49.61
	混和材A	石膏系収縮低減材	65.9
混和材B	減水剤(ポリカルボン酸系高性能減水剤)	8.0	0.37
	消泡剤(アルコール系消泡剤)		
	増粘剤(メチルセルロース系増粘剤)		

材の要求条件を緩めることができ、その結果コストが低減できる。表7と8に充填材の規格値および示方配合を示す。

充填材は場外の専用プラントで製造してミキサー車で運搬し、モルタル充填ポンプにより地上から圧送した。充填材の運搬時間は約40分であったが、スランブロスとはほとんどなく良質な品質を保持して充填することができた。また、本工法は支保工が無く、充填時の表面部材のたわみを抑えるため、1回の打ち上がり高さを500mm以下とした。

9. おわりに

地球環境保全のため、社会全般で様々な環境負荷低減活動が実施されており、建設業界においてもその目的に沿った施工方法の開発や工事適用が実施されている。

今回の工事では、泥水式シールドで発生する建設汚泥に着目して計画した。海底下を含む深度約30～50mまでの洪積粘土層から砂礫層に推移する地盤を約3,250mシールド



写真 3 FR 覆工施工状況



写真 4 FR 覆工完了

掘進し、産業廃棄物量削減という当初目的を達成することができた。

粘性土層における泥水シールド工事での環境負荷低減工法の1つである泥水クローズドシステムは本工事で5件目であるが、本工事の結果から今後同種工事における採用による更なる発展が期待できる。

また、工期・コストを縮減する二次覆工省略型シールドはもともと覆工厚が薄いため、今回のような終端部や急曲線部・流入部などの特殊断面部に内面が平滑なRCセグメントを適用することが困難となることが多い。このような場合に、今回用いた二次覆工用FR工法は適応性が高く、かつ経済的な工法だと判断できる。

最後に、本工事を計画・施工するにあたり、ご指導ご協力を頂いた関係各位にお礼を申し上げますとともに、本報告が今後施工される類似工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 森麟・江本佑橘・田村昌仁・福井義弘：シールドトンネルの裏込注入圧および切羽泥水圧による粘性土地盤の割裂現象，トンネルと地下，Vol. 22, No.1, pp. 41-46, 1991. 1.