

泥水式シールド工事における 泥水処理システムの開発

伊藤隆広¹・蔵野彰夫²・井澤武史³

¹正会員 株式会社鴻池組 技術研究所（〒554-0002大阪市此花区伝法四丁目3-55）

²正会員 株式会社鴻池組 技術研究所（〒554-0002大阪市此花区伝法四丁目3-55）

³正会員 株式会社鴻池組 京都支店（〒604-8151京都市中京区蛸薬師通烏丸西入ル橋弁慶町227）

泥水式シールド工事において、建設汚泥の発生抑制とリサイクルを前提とした泥水処理システムを開発した。本システムは掘削用泥水に対して分散剤を添加することで泥水粘度の上昇を防止すること、泥水中の微細土粒子を遠心分離機（二次処理機）で分離除去することにより泥水比重の上昇を防止すること、さらに遠心分離機の処理泥水の一部を裏込め注入材料としてリサイクルすることを特徴とし、余剰泥水と二次処理土の発生抑制、泥水処理プラントのコンパクト化、泥水処理コストの縮減を可能にした。また、二次処理土についても効率よくリサイクルできる流動化処理技術を開発した。さらに泥水処理における省力化を図るため、泥水処理システム全体を自動化し、これを地下鉄工事に適用して、その有効性を確認した。

キーワード：リサイクル, 建設汚泥, 裏込め, 流動化処理, 分散剤

1. はじめに

5年毎に実施されている建設副産物実態調査結果によると、平成7年度の建設汚泥の排出量は1,000万tで、そのうちリサイクル率は減量化を含めてわずか14%にとどまっていた。その後、平成12年度の調査では建設汚泥のリサイクル率は41%に増加したが、建設省が策定・推進した「建設リサイクル推進計画'97」の平成12年度リサイクル目標率60%には及ばなかった。

こうした状況の中、泥水式シールド工事における建設汚泥（余剰泥水、二次処理土）の発生抑制とリサイクルを前提とした泥水処理システム「泥水クロードシステム¹⁾」を平成8年に開発した。

引き続き、平成11年から13年にかけて、社団法人近畿建設協会の技術開発支援制度の助成をうけ、本システムの高度化を行った。この高度化では泥水処理システム全体の自動化を図るとともに、余剰泥水、二次処理土について、実用性の高いリサイクル技術（余剰泥水の裏込め注入利用技術、二次処理土の流動化処理技術）の開発を目指した。また、高度化システムについて実証施工を行った。

2. 泥水処理システムの概要

(1) システムの特徴

開発した泥水処理システムの基本フローを図-1に

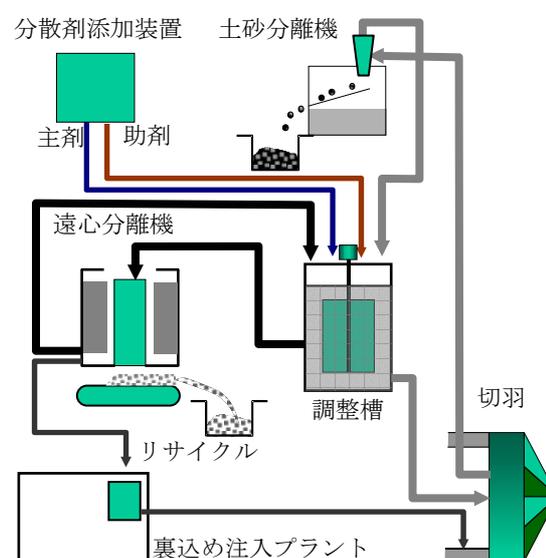


図-1 泥水処理システムの基本フロー

示す。本システムは土砂分離機、調整槽、分散剤添加装置、遠心分離機、裏込め注入プラントなどから構成される。一次処理は基本的に従来システムと同じである。本システムの特徴は、①掘削用泥水に分散剤を添加する、②二次処理機として遠心分離機を用いる、③遠心分離機の処理泥水の一部を裏込め注入材料にリサイクルすることである。

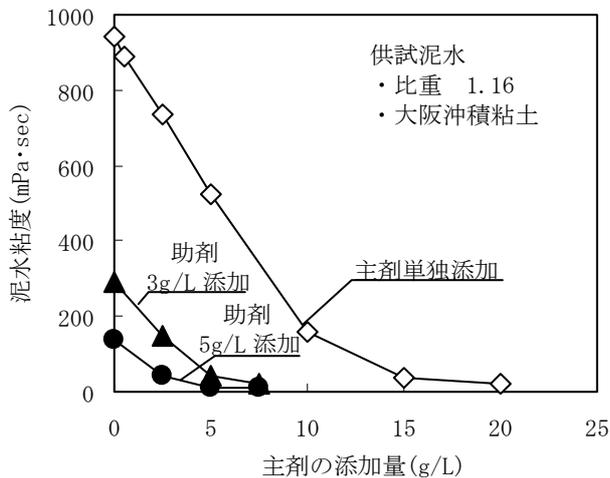


図-2 分散剤併用添加の効果

a) 分散剤添加装置

分散剤添加装置は、掘削用泥水に、掘削土砂や泥水粘度などに応じて分散剤を添加し、泥水粘度の上昇を防止する装置である。従来廃棄していた高比重の泥水でも粘性を低下させることにより、繰り返し使用が可能となる。

分散剤はポリカルボン酸系の主剤と無機系の助剤で構成される。砂質地盤では、主剤のみを用いる。粘性土地盤では助剤を併用添加する。併用添加の効果を図-2に示す。助剤の併用により、主剤の単独添加では多量の添加が必要な粘性土地盤の掘削用泥水においても、少量の添加量で効果が得られ、薬剤コストを削減できる。

b) 遠心分離機

遠心分離機は、一次処理機によって処理することができなかったシルトや粘土などの微細土粒子を除去して、泥水比重の上昇を防止する。回転しているバスケット内に調整槽の泥水が送られ、バスケット内に脱水土砂がたまり、処理泥水はオーバーフローして調整槽へ返される。バスケット内の土砂がいっぱいになると給泥が終了し、土砂が掻き出される。

遠心分離機の設置面積は、フィルタープレスの約半分であることから、プラント用地の削減が可能である。プラント用地が限定され、泥水処理工程がクリティカルパスになる場合には、処理能力の大きいシステムを設置でき、工期短縮が可能となる。

また、遠心分離機の処理土の含水率が約30%で、フィルタープレスの脱水ケーキに比べ約10%低いこと、および、処理泥水の一部が裏込め注入材料としてリサイクルされることから、二次処理土の発生量が抑制される。

さらに遠心分離機から排出される二次処理土は含水率や粒度構成などの変動が小さいこと、凝集剤を含んでいないこと、見かけがフィルタープレスの脱水ケーキ(写真-1)と異なり一次処理土のような状態(写真-2)であることなどから、流動化処理土としてのリサイクル材料に適している。また、遠心分離機の処理泥水は懸濁安定性に優れ、比重の変動が小さいことから、裏込め注入材料や他の泥水掘削工事の泥水または安定液に適している。これらの



写真-1 フィルタープレスの脱水ケーキ



写真-2 遠心分離機による二次処理土

リサイクルを実施すれば、さらに建設汚泥の減量化、及び材料の節約が可能である。

c) 裏込め注入

裏込め注入材料として遠心分離機の処理泥水をリサイクルする。掘削に伴う泥水循環を繰り返すと、遠心分離機では処理しきれない微細な土粒子が泥水中に蓄積してくる。遠心分離機の処理泥水を定期的に抜き取り、清水希釈を行うことは、泥水性状を良好に保つのに有効である。

(2) 泥水処理の自動化

泥水処理の各工程を中央制御コンピュータによって自動運転するシステムを開発した。本システムは①泥水性状の自動計測 ②計測データに基づく分散剤添加装置、遠心分離機などの自動制御 ③計測データおよび各装置の運転状況のモニタリングと異常が発生した場合の警報表示を行う。

泥水性状の自動計測は調整槽の泥水の比重と粘度、遠心分離機の処理泥水の比重について行う。比重計測はγ線透過式密度計を用い、粘性計測は専用のポンプによってサンプリングし回転粘度計により測定する。計測は連続して行われ、リアルタイムの値を把握できる。

分散剤の自動添加は、フィードフォワード制御とフィードバック制御からなる。掘削中、地山の土質によって設定した基本添加量を添加する。掘削終了後、自動計測された粘度に応じて、①基本添加量と同量または1/2の追添加、②追添加なし、③基本添加量の下方修正が行われる。分散剤を一定量追添加しても粘性が下がらない場合、または、調整槽の泥水比重が基準値を超え、かつ遠心分離機の処理泥水の比重も基準値を超える場合は、泥水の繰り返し使用の限界と判断され、泥水の廃棄警報が表示される。

遠心分離機は、シルト・粘土分が減少した良好な泥水を処理し続けると、バスケット内に土砂がたまるのに時間がかかるため、バスケット内の土砂の圧密が進み、土砂の排出工程でトラブルが発生しやすくなる。これを防止するため、運転起動比重と運転終了比重を設定できるようにして、運転状況に応じた調整を可能にした。

表-1 工事概要

工 法	泥水式シールド工法
シールド機外径	φ5,440mm
セグメント外径	φ5,300mm
延 長	L=330.0×2本 上下線2本単線並列

表-2 対象地盤の粒度構成

No. (区間距離)	含水比 %	粒度構成 %				
		レキ	砂	シルト	粘土	
ボーリング データ	No. 1 (83m)	27.4	3.2	81.7	15.1	0.0
	No. 2 (165m)	15.7	0.7	67.6	22.1	9.6
	No. 3 (82m)	19.8	0.9	64.2	24.1	10.8
処理土からの 推定値	—	1	65	20	14	

3. 地下鉄工事への適用

(1) 工事概要

本システムを地下鉄工事へ適用し、その効果を検証した。工事概要を表-1に示す。本工事は掘削外径φ5,440mmの泥水式シールド工事で、地下鉄を建設するものである。延長330mの単線並列で、1台のシールド機で往路、復路2本のトンネルを築造する。

掘削対象地盤はマサ土、強風化花崗岩、風化花崗岩で、N値50以上の砂質土層となっている。表-2にボーリング調査結果と、処理土から推定した掘削対象地盤の粒度構成を示す。掘削土の粒度構成はボーリング調査結果とは相違がみられ、発進直後からNo.3に近い傾向であり、比較的粘土分が多かった。掘削土砂の観察結果から、風化花崗岩は岩芯があまりみられず、こぶし大のものが一部区間でわずかにみられただけだった。礫分は大きいもので数ミリ程度であった。

泥水処理設備用地は道路と河川に挟まれた狭隘な用地で、泥水式シールドの日進量は設置した泥水処理設備の処理能力に依存する。当初設計のフィルタープレス方式で今回の用地に設備を配置した場合、日進量は6.7mであった。これに対し、本システムでは日進9.6mの処理が可能な設備となっている。

(2) 施工状況

調整槽の泥水の比重とファンネル粘度を図-3に、日進量を図-4に示す。また、処理土量を表-3に示す。往路では一次処理機の調整不良などの原因で砂分を十分に除去できなかった。このため、二次処理に計画値以上の負荷がかかり、泥水の比重、粘性の上昇を招いた。この結果、計画日進量を施工できない日が多数あった。また、往路の後半では日進量を優先したため、廃棄泥水も発生した。

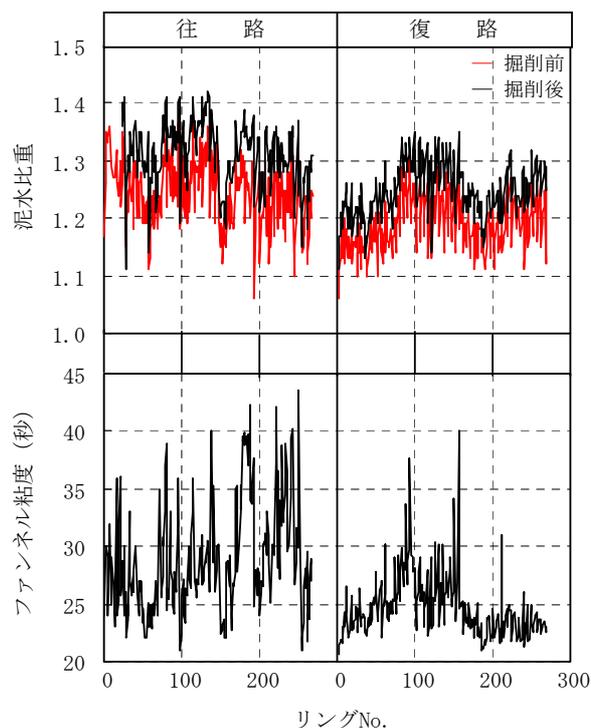


図-3 調整槽の泥水の比重と粘度

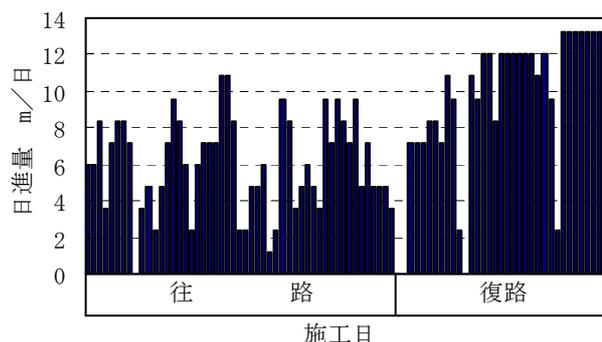


図-4 日進量

表-3 処理土量と含水率
掘削土量 7,670m³ (単線) × 2

		一次処理土	二次処理土	廃棄泥水
往路	処理量	4,683m ³	3,702m ³	698m ³
	含水率	15.2%	25.1%	
復路	処理量	6,146m ³	3,654m ³	93m ³
	含水率	16.3%	32.1%	

そこで往路到達後、一次処理機の改良、遠心分離機の増設などを行った。一次処理機に関しては、サイクロンポンプを55kw×2台で12台のサイクロンへ給泥していたものを30kw×4台にして分岐管によるサイクロンへのフィードロス軽減するとともに、サイクロンアンダー泥水の振動篩いの網目を細かくした。遠心分離機に関しては、雑排水処理用のミニ

表-4 二次処理土と二次処理泥水の土質試験結果及びその標準偏差 ()内の数値は標準偏差

	二次処理土	二次処理泥水
往路	含水率 25.1% (2.7%)	比重 1.20 (0.06)
	粒度構成	粒度構成
	砂 36.0% (6.4%)	砂 1.7% (2.8%)
	シルト 46.9% (5.4%)	シルト 22.0% (12.5%)
	粘土 17.2% (2.3%)	粘土 76.4% (14.7%)
復路	含水率 32.1% (0.9%)	比重 1.13 (0.02)
	粒度構成	粒度構成
	砂 16.4% (5.0%)	砂 0.0% (0.0%)
	シルト 60.2% (4.3%)	シルト 8.7% (3.0%)
	粘土 23.5% (3.5%)	粘土 91.3% (3.0%)

フィルタープレスを撤去し、雑排水の凝集脱水処理と掘削用泥水の比重低下処理の切り替えができるタイプのものを増設した。

これらの改善の結果、一次処理で砂分が計画通り分離除去され、泥水の比重、粘性が安定し、計画日進量を上回る12~13.2mを確保できた。廃棄泥水は掘削終了後の各タンクの清掃による廃棄のみであった。

(3) 二次処理土と二次処理泥水の性状

表-4に二次処理土と二次処理泥水の土質試験結果の平均値およびその標準偏差を示す。復路の二次処理土の含水率は32.1%だった。往路より含水率が増加しているのは一次処理の改良により、砂分が減少し、細粒分の割合が増加したためである。フィルタープレスの設計含水率が通常40%であることから、二次処理土容量が約20%削減されたことになる。

また、二次処理土、二次処理泥水ともに含水率、粒度構成の標準偏差が小さく、安定した性状を呈している。建設汚泥のリサイクルにおいて、汚泥の性状のばらつきが、深刻な課題の一つとなっている現状から、本システムで発生する二次処理土、および二次処理泥水はリサイクルに適したものといえる。

4. リサイクル技術の開発

(1) 二次処理土の流動化処理土へのリサイクル

一般に流動化処理土は流動性をもたせるために多量の水を添加する。このため、流動化処理土中に含まれる土の割合が少なくなり、二次処理土の有効利用という観点から好ましくない。

当社ではソイルセメント山留め壁工事において、流動化剤を用いることでソイルセメントを流動化させる技術²⁾を開発している。この技術を応用して、少量の添加水で所定の流動性を確保できる流動化処理工法を配合実験により検討した。

a) 実験方法

実験に使用する材料を表-5に示す。土は先に述べた地下鉄工事で発生した遠心分離機の二次処理土

を用いた。流動化剤は主剤と助剤から構成される。

表-5 流動化処理土の使用材料

固化材	高炉セメントB種
二次処理土	含水率 25.2%
	湿潤密度 1.874t/m ³
	土粒子の密度 2.65
	粒度構成 砂 28.2%, シルト 51.4%, 粘土 20.4%
流動化剤	主剤：ポリカルボン酸系 助剤：無機系 混合比率 主剤：助剤 = 1:3

表-6 流動化処理土の1m³当たりの配合

配合NO.	二次処理土 m ³	固化材 kg	水 kg	ベントナイト kg	流動化剤 kg	W/C %
1	0.455	409	409	5	0	100
2		234	467		0	200
3		163	490		0	300
4	0.690	232	232	7	10.4	100
5		132	264		8.6	200
6		92	277		6.9	300
7	0.625	281	281	6	9.4	100
8		160	320		6.3	200
9		112	336		4.7	300
10		321	321		8.6	100
11	0.571	183	366	6	5.7	200
12		128	384		4.3	300

主剤は土粒子の分散性に優れ、セメントに対して凝結遅延性を示す。助剤は単独で使用した場合には十分な流動性を発揮することはできないが、主剤に比べて単価が安く、流動化のためのランニングコストを大幅に削減できる。

これら2種の薬剤の混合率を変えることで流動性とその保持時間を調整することができる。本実験では助剤の混合率を75%とした。

実験配合を表-6に示す。配合No.1~3は流動化剤を用いない従来配合で、流動化処理土1m³中の二次処理土量を0.455m³とした。これに対し、流動化剤を用いた配合では二次処理土量を25~50%増加させた。

それぞれの配合で混練した直後にフロー値を、材齢7日、28日で一軸圧縮強さを測定した。

b) フロー試験結果

図-5に水セメント比と練りあがり直後のフロー値の関係を示す。流動化剤を添加しない配合では、水セメント比100% (配合No.1) ではフロー値の基準値である180mmを下回った。一方、流動化剤を添加した場合 (配合No.4~12)、二次処理土量が増加しているにもかかわらず、すべての配合でフロー値が180mmを上まわった。

二次処理土量
 ● 0.690³/m³ ▲ 0.625³/m³ ◆ 0.571³/m³
 □ 0.455³/m³ (流動化剤無添加)

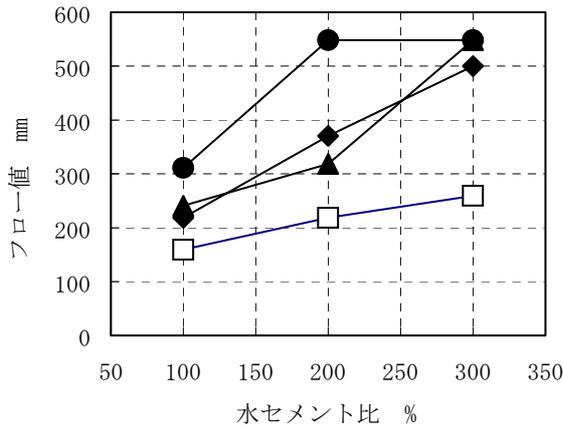


図-5 フロー試験結果

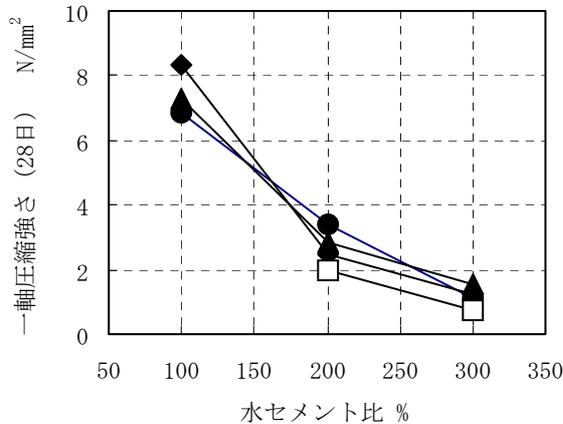


図-6 強度試験結果

表-7 流動化処理土の用途と目標強度の例

用途	目標一軸圧縮強さ
地中埋設管の埋戻し	0.29 N/mm ² (材齢3日)
共同溝の埋戻し	0.05~0.10 N/mm ² (材齢28日)
	0.03 N/mm ² (材齢1日)
シールドトンネルインバート材	5.88 N/mm ² (材齢28日)

c) 強度試験結果

図-6にフロー値が基準を満たした配合(配合No.2~12)について、水セメント比と一軸圧縮強さ(材齢28日)の関係を示す。水セメント比の調整により、低強度から高強度まで幅広い強度を発現させることができた。

表-7に流動化処理土の用途と目標強度の例³⁾を示す。目標強度としては現地盤と同程度の低強度が一般的であるが、シールドトンネルのインバート材のように高強度を必要とするものもある。今回、前述した地下鉄工事には適用できなかったものの、配合試験によって得られた流動化処理土はこれらの多様な品質に対応可能であることが確認された。

表-8 裏込め注入の使用材料

A液	固化材	セメント系
	泥水	二次処理泥水 比重1.25 土粒子の密度2.71 粒度構成 砂0.3%, シルト14.1%, 粘土85.6%
	分散剤	ポリカルボン酸系
	遅延剤	オキシカルボン酸系
B液	急硬剤	珪酸ソーダ

表-9 裏込め注入材1m³当たりの配合

配合No.	A液				B液
	固化材 kg	泥水 L	分散剤 kg	遅延剤 kg	急硬剤 L
1	250	820	6	2.50	100
2			8		
3			10		
4	225	828	10	2.25	
5	200	836	10	2.00	

表-10 A液の経時変化の観察結果

配合No.	流動性保持時間	沈殿分離
1	数十分	なし
2	約5日間	なし
3	7日以上	なし

(2) 二次処理泥水の裏込め注入材料へのリサイクル
 シールドの裏込注入に使用する代表的な材料は、水、粘土(ベントナイト等)、固化材(セメント等)、安定剤(遅延剤等)、急硬剤(珪酸ソーダ等)である。このうち水、粘土、固化材、安定剤を混合したものをA液、急硬剤をB液とし、それぞれをプラントより別系統で送液し、注入直前にA液とB液を混合し、固化させる。A液のうち水と粘土を、本システムより発生する二次処理泥水で置き換え、リサイクルする。この方法は泥水クローズドシステムの開発初期に行った実施工¹⁾において実績があるが、泥水比重1.2前後の処理泥水をそのまま用いると、A液が短時間でゲル化するため、泥水を清水で希釈して用いていた。

そこで、分散剤によってA液のゲル化を防止し、原液のまま、より多くの泥水を利用できるように配合実験を行い、その品質を確認した。

使用材料を表-8に示す。泥水は先に述べた地下鉄工事で発生した遠心分離機の処理泥水を用いた。実験配合を表-9に示す。

配合No.1~3は固化材量一定(250kg/m³)のもと、分散剤添加量を6~10kg/m³に変化させ、A液の流動性保持時間と沈殿分離の観察を行った。表-10にA液の観察結果を示す。分散剤の添加量が6kg/m³(配合No.1)の場合、数十分で流体としての性状を示さなくなった。よって分散剤は8kg/m³以上必要である。

表-11 試験結果

	フロー値 (A液) 秒	ゲルタイム 秒	可塑状時間 分	一軸圧縮強さ N/mm ²			
				1時間	1日	7日	28日
目標値	8.5~12	5~15	15~60	0.05	0.50	1.50	2.00
配合 No. 3	11.0	10.7	45	0.42	2.30	3.39	4.34
配合 No. 4	10.6	10.5	30	0.35	1.71	2.77	3.77
配合 No. 5	10.5	12.1	30	0.28	1.66	2.52	3.26

配合No. 3~5は分散剤添加量一定 (10kg/m³) のもと、固化材量を200~250kg/m³に変化させて、PロートによるA液のフロー値、カップ倒立法によるゲルタイム、静的貫入抵抗測定器による可塑状時間、材齢1時間、1, 7, 28日の一軸圧縮強さについて調べた。表-11に各試験の目標値と試験結果を示す。すべての配合で目標値を満足した。

今回、地下鉄工事には適用できなかったものの、以上の配合実験から、二次処理泥水を希釈せずに裏込め注入へリサイクルすることが可能であることが確認された。

5. おわりに

本開発ではシステム全体の自動化を図るとともに、実用性の高いリサイクル技術を開発することができた。今後は、今回開発したリサイクル技術の実証施工が必要である。

最後に、今回の技術開発の実施に当たって、開発の機会と助成支援を頂いた、社団法人 近畿建設協会の関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 蔵野他：泥水の劣化防止とリサイクルを特徴とする泥水クローズドシステムの開発，土木学会第52回年次学術講演会，VI-109，pp218-219，1997
- 2) 伊藤他：高流動ソイルセメントのソイルセメント柱列壁工法への適用，土木学会第55回年次学術講演会，III-B257，pp.512-513，2000
- 3) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル（第二版），pp193-199,1996