

シールド工から発生する泥土の処理システムの開発

Development of the Excavated Soil Improvement System for Earth Pressure Balanced Shield

細川 勝己* 磯 陽夫*
 Katsumi Hosokawa Akio Iso
 渡辺 徹**
 Toru Watanabe

要 約

近年、建設汚泥の最終処分場の確保が困難となっており、また、環境負荷の軽減等を図る上からも建設リサイクルの推進が求められている。そこで、泥土圧シールドにおける建設汚泥の発生抑制を目指して、「泥土の処理システム」の開発を行った。本システムは、泥土圧シールドの泥状の掘削土に対して、シールド掘進時の排土過程で再利用できる改良土に連続的に処理することを目的としている。本文は、システムの概要を述べるとともに、東京都下水道局発注の「千代田区一番町、三番町付近再構築工事」のうち、本掘進約 350m の区間にて実証実験を行い、得られた結果について報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 泥土の処理システム
- § 3. 実証実験
- § 4. 泥土改良のコスト試算
- § 5. 今後の課題と展望

§ 1. はじめに

泥土圧シールドでは、チャンバー内の掘削土にベントナイトや粘土等の加泥材を添加し、混合攪拌して掘削土の塑性流動化を図っている。したがって、掘削土は、泥状を呈することになり、産業廃棄物（建設汚泥）として処理されている。しかしながら、近年、最終処分場の不足問題が顕在化しており、また、環境負荷の軽減等からも建設リサイクルの推進が求められている。さらに、東京都が策定した「東京都建設リサイクルガイドライン¹⁾」（平成 11 年 12 月）では、リサイクルの基本ルールが示され、建設泥土を含む建設廃棄物を直接最終処分場へ搬出することを禁止している。ただし、ここでいう建設泥土とは、国土交通省の指針等における建設汚泥のことである。

以上のような背景を踏まえ、東京都下水道局と民間 4 社（戸田建設、鹿島建設、大成建設、西松建設）では、建設泥土の発生抑制を目的として、泥土圧シールドを対象に、「泥土の処理システムの開発」の共同研究を行った。本文では、システムの概要を述べるとともに、実工事に適用し、その実用性や有効性について検証した結果を報告する。

§ 2. 泥土の処理システム

開発した泥土の処理システムの特徴は、以下の 4 つである。

- ①泥土の改良は、バッチ処理ではなく、連続的な処理が可能である。
- ②泥土の性状に応じて、改良材の添加量をリアルタイムに制御することができる。
- ③改良土は、所定の養生時間で目標の品質を得ることができる。
- ④改良装置は、地上設置だけでなく、スペースが確保できれば、立坑内、坑口あるいは坑内に設置可能である。

本システムは、図一に示すような装置・計器で構成されている。以下にその概要を述べる。

* 技術研究所技術研究部土木技術研究課

** 技術研究所技術研究部

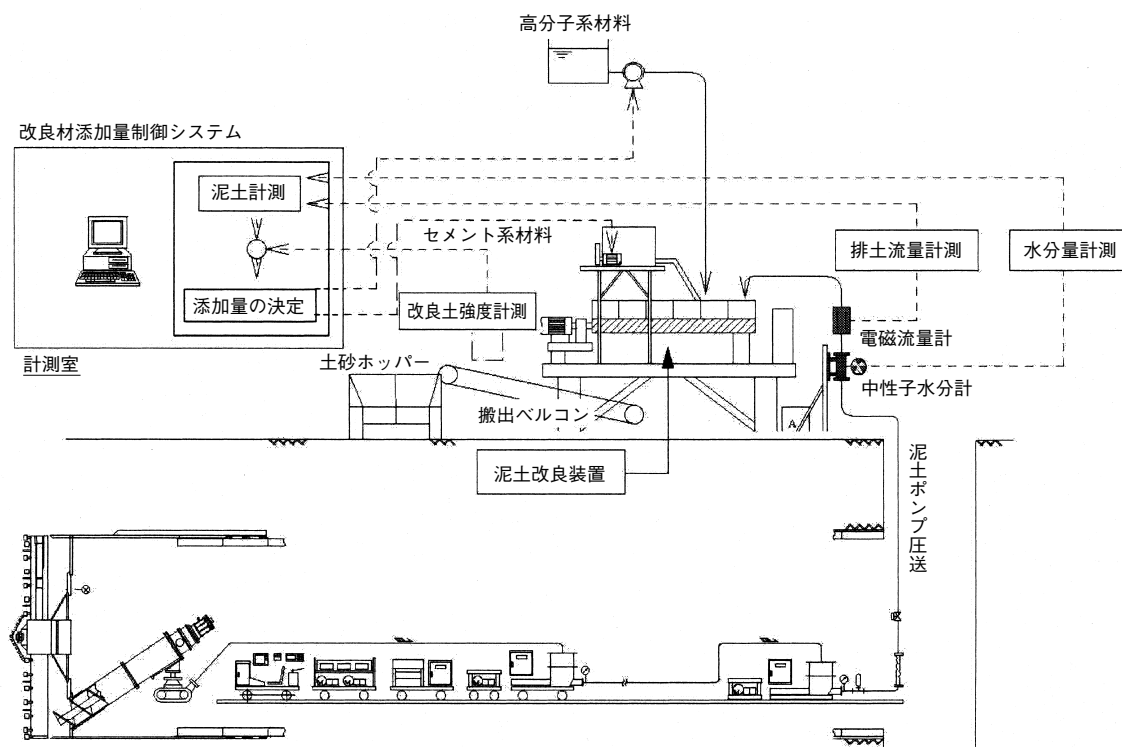


図-1 泥土の処理システムの概略図（地上型）

2-1 改良設備

改良設備は、①改良装置、②改良材の供給装置、貯蔵サイロ・タンク、③改良土のストック設備に分けられる。

改良装置は、泥土と改良材を混合攪拌するもので、可とう性ゴムケーシングにパドルミキサーを設置した構造である。処理能力は、小口径から大口径までのいずれにも適用できるように、 $30\text{m}^3/\text{hr}$ 以下、 $30\sim 50\text{m}^3/\text{hr}$ および $50\sim 80\text{m}^3/\text{hr}$ の3種類がある。

改良土のストック設備は、土砂ホッパー型と土砂ピット型の2つに大別される。本システムでは、土砂ホッパー型の使用を標準とするが、土砂ホッパーに貯留した場合、閉塞の問題が生じることもあるので、土砂ピットの使用を検討することも必要である。なお、ストック設備の設置数量と容量は、排土量、改良土の養生時間、改良土の搬出時間等を考慮して、選定することが必要である。

2-2 制御システム

制御システムは、泥土の水分量や排土量の変動に応じて、改良材の添加量をリアルタイムに制御するシステムである。制御システムの構成を図-2に示す。本システムは、泥土の水分量、排土量を計測する機器類（中性子水分計、電磁流量計）、データの取り込み、演算、出力制御を行うシーケンサ類、データの設定、記録を行うパソコン等で構成される。

泥土の水分量の変動に応じた改良材添加量の決定は、以下の手順で行われる。

①泥土の含水率を変化させて配合試験を行い、数種類の

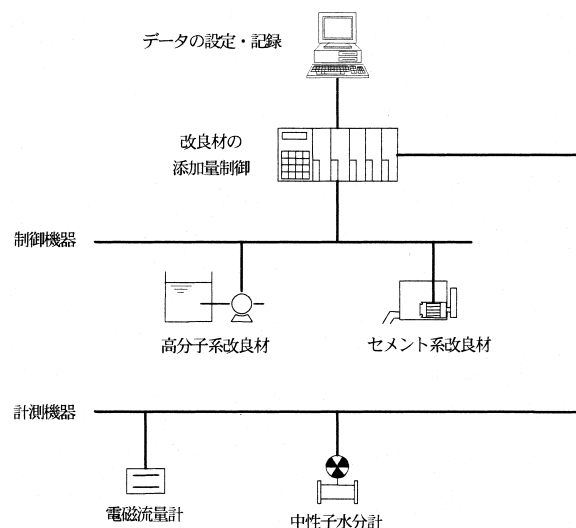


図-2 制御システムの構成

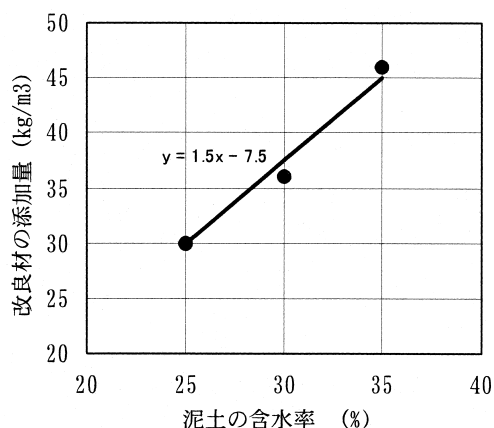


図-3 泥土の水分量と改良材添加量の関係（一例）

表一1 改良材の特徴と改良効果

改良材の種類	特 徴	改良効果
セメント系	軟弱地盤で即効性を発揮するセメント系良材をベースに無水石膏、高炉スラグなどのアルカリ刺激剤を混合し、早強性を高めている。六価クロム抑制型もある。 ・アルカリ～強アルカリ性を示す。	イオン交換反応による団粒化（粘性土の場合）
石 膏 系	活性度の高い半水石膏をベースに無水石膏、二水石膏、ボゾラン物質を混合してプレーン値を大きくした特殊混合物である。 ・砂～砂質土の改良に有効である。 ・中性を示す。	含水比低下
高 分 子 系 (アニオン系)	ポリアクリルアミド(高分子系凝集剤の主成分)とアクリル酸ソーダの共重合物をエマルジョン化したものである。粘土のコロイド分と土の水分を凝集させてフロックを形成する。 ・中性を示す。	フロック形成による団粒化
高 分 子 系 (カチオン系)	アニオン系にイオン交換性を持たせてカチオンとし、エマルジョン化したものである。アニオン系の高分子加泥材を使用した泥土の場合、アニオン系の高分子系改良材と同様の凝集効果が得られる。 ・中性を示す。	

含水率に対する改良材の最適添加量を求める。ただし、含水率の設定は3種類以上とし、掘削対象土の含水比、加泥材の注入率等から予想される含水率の変動範囲をカバーできるものとする。

- ②含水率と最適添加量との関係を、最小の含水率における改良材添加量の点を通る直線関係に近似する。（図一3 参照）

- ③上記②で求めた直線近似式の係数（勾配）から、任意の含水率に対する改良材の添加量を決定する。なお、直線近似式の係数（勾配）は、含水率0.1%当たりの変化量（改良材の添加量）として設定される。

本システムでは、泥土の水分量を測定するために、圧送管の外周部に中性子水分計を設置しているが、その特徴は、以下の3つである。

- ①金属を透過する中性子を利用しているため、鋼管内における泥土の水分量を測定することができる。
②1%以下の低水分から100%に近い高水分まで測定可能である。
③中性子の線源容量が小さいために、許認可が不要であり、設置場所を自由に選択できる。

測定原理は、線源から放出された高エネルギーの高速中性子（2.5MeV：数万キロ/秒）が、質量の最も小さい水素原子との衝突によりエネルギーを失い、低速の熱中性子（20meV：数千キロ/秒）に変化することを利用している。なお、中性子水分計より含水率の出力を行うには、事前に含水率と熱中性子数のカウンタ値との検量線を求めることが必要である。

2-3 改良材の開発

表一1は、新しく開発した改良材の特徴と改良効果を示したものである。ヘドロや建設汚泥など高含水土壤に対し、経済性に優れ、短時間で強度発現できる市販の改良材が無いことから、新たに、セメント系、石膏系および高分子系の改良材を開発した。なお、セメント系の改良材は、六価クロムの溶出量が、施工条件によっては土

表一2 改良土の品質区分

土質区分	コーン指数 (kN/m ²)	備 考
第1種改良土	—	礫、砂状を呈するもの
第2種改良土	800 以上	
第3種改良土	400 以上	
第4種改良土	200 以上	

壤環境基準を超える場合があるので、六価クロムの溶出量が低減できるタイプについても同時に開発している。

2-4 改良土の目標品質

改良土に求める品質については、建設省（現 国土交通省）が策定した「建設発生土利用技術マニュアル（第2版）²⁾」（平成9年10月）に定める基準を満足することが必要条件となる。この文献は、建設現場から発生する土の有効活用促進を目的としたもので、表一2に示すように、改良土の品質を第1種から第4種までの4つに区分している。

本システムでは、表一2の基準にもとづいて、改良土の品質をコーン指数によって評価し、泥土圧シールドの掘削土をダンプトラック積載時に、受け入れ先の要求に応じて、第3種あるいは第4種改良土にすることを目標とした。

§ 3. 実証実験

3-1 実験概要

実証実験は、東京都下水道局発注の千代田区一番町、三番町付近再構築その2工事・その3工事のうち、本掘進約350mの区間にて行った。

(1)土質概要

掘削対象土質は、N値35～50以上の砂質土であり、基本物性は以下のとおりである。

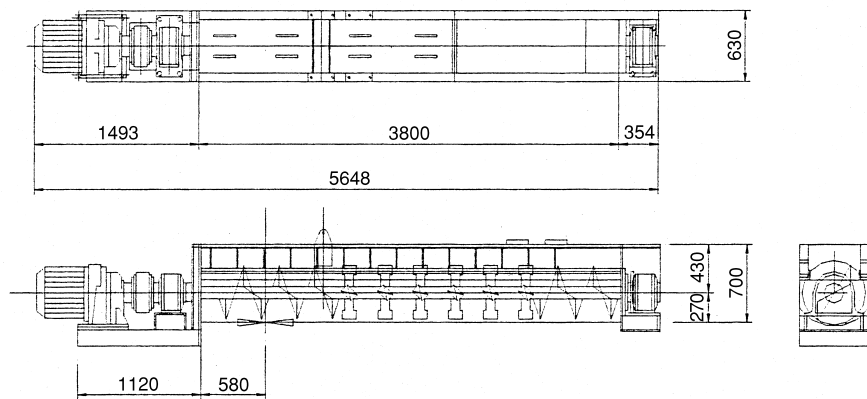


図-4 改良装置の概略図 (30m³/hr 仕様)

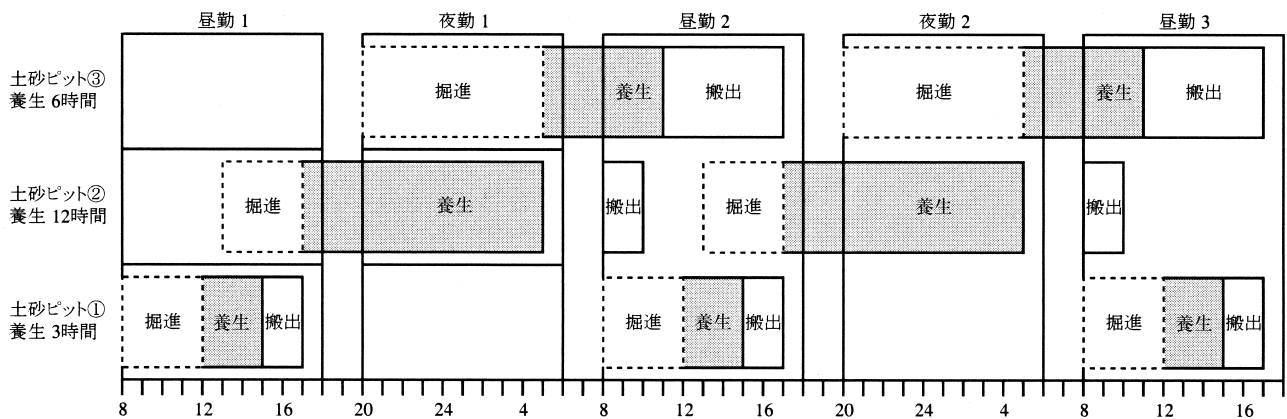


図-5 土砂ピットの使用方法

透 水 係 数： $2 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$

自然含水比：25.7～37.6%

最大粒径：4.75mm

平均粒径：0.25mm

細粒分含有率：15%

(2)改良材および改良土の目標品質

本実験では、事前に行った室内配合試験の結果より、表-1に示す改良材のうち、セメント系と高分子系（カチオン系）の2種類を使用した。また、改良土の品質は、第4種改良土（コーン指数 $qc \geq 200 \text{kN/m}^2$ ）を目標とした。

(3)処理システムの仕様

本実験における泥土の処理システムは、地上型（図-1参照）とし、改良装置の処理能力は、以下の施工条件によって $30 \text{m}^3/\text{hr}$ （以下）を採用した。

- ・シールド外径： $\phi 3,080 \text{mm}$
- ・時間掘削土砂量： 16.9m^3 （最大掘進速度 30mm/min ）

ここで、上記の時間掘削土砂量は、加泥材の添加を考慮した土量変化率を掘削土砂量（ 13.0m^3 ）の30%として算出している。図-4に改良装置の概略を示す。

また、改良土のストック設備は、土砂ピットを使用し、 100m^3 級のものを3つ設置した。これは、図-5の土砂ピットの使用方法に示すように、改良土の養生時間を3、6、12時間の3区分とし、改良土の養生時間を管

理するためである。本現場では、午前中に掘削した土砂を午後に搬出できるようにするため、3時間の養生時間を設定した。また、掘削土の搬出が、受け入れ場所や周辺環境の条件によって、月曜～金曜日の昼間に限定されるので、午後や夜間に掘削した土砂の養生時間をそれぞれ12時間と6時間に設定した。なお、養生時間が長いほど、改良材の必要添加量は小さくできるので、養生時間に応じて改良材の添加量を調整するようにした。

(4)実験内容

実験は、まず、立坑掘削土、初期掘進掘削土による改良材の配合試験から、泥土の含水率と養生時間に応じた改良材の最適添加量を確認した。次に、中性子水分計の測定精度を検証するとともに、改良土のコーン指数、ダンプトラック運搬時の再泥化の有無および六価クロムの溶出量について調査した。また、本システムの実工事への適用性を検証するために、改良装置の処理能力の確認を行っている。

3-2 実験結果

(1)改良材の最適添加量について

表-3は、改良材の配合試験により求めた泥土の含水率および養生時間ごとのセメント系改良材の最適添加量を示したものである。セメント系改良材の添加量は、この結果をもとに、2-2節で示したように、泥土の含水

率の変動に応じて、リアルタイムに制御される。ただし、高分子系改良材の添加量は、含水率の変動に関係なく、 $2\ell/\text{m}^3$ で固定した。なお、別途行った配合試験により、第3種改良土に対する最適添加量も確認している。

(2)中性子水分計の測定精度について

中性子水分計で計測する泥土の含水率は、セメント系改良材の添加量を決定する重要なパラメーターである。そこで、中性子水分計の測定精度を、土の含水比試験(JGS T 121)の含水率と比較することにより検証した。図-6は、中性子水分計と土の含水比試験による含水率を比較したものである。また、図中の直線は、中性子水分計と土の含水比試験の含水率が等しい場合に相当する。図より、中性水分計の測定値と土の含水比試験値の間には、若干のばらつきがあるものの、比較的近似しており、中性子水分計の測定精度は問題ないものと判断できる。

(3)改良土の品質について

図-7は、改良土のコーン指数を養生時間別に示したものである。各時間ともコーン指数には、ばらつきがあるものの第4種改良土の $q_c \geq 200\text{kN}/\text{m}^2$ を満足することができた。また、運搬時の再泥化については、養生時間3時間の改良土を対象に、ダンプトラックに積載し、3時間走行させているが、再泥化することはなかった。

表-4は、セメント系改良材による改良土の六価クロム溶出試験の結果を示したものである。表より、改良土の六価クロム溶出量は、セメント系改良材の添加量 $70\text{kg}/\text{m}^3$ までは、土壤環境基準以下であった。 $70\text{kg}/\text{m}^3$ の添加量は、実証実験の最大添加量 $45\text{kg}/\text{m}^3$ の約1.5倍であり、実証実験における改良土は、問題なかったと考えられる。

(4)改良装置の処理能力について

改良装置に求められる重要な機能のひとつは、連続して流入する泥土を滞留させることなく、改良して排出させることである。今回の排土量は、改良装置の処理能力($30\text{m}^3/\text{hr}$)に対して60%程度であり、十分に余裕を持ち連続処理することができた。また、改良装置の攪拌機能が劣っていると、改良土の品質は不均質になるが、1掘進長当たりでのコーン指数のばらつきは小さく、十分な攪拌機能を有することが確認できた。特に、ケーシングの材質として、可とう性のゴムを採用することにより、ケーシングの振動が土砂に動きを与え、土砂の滞留を防止するとともに、攪拌効果を非常に高めている。ただし、スクリーおよびパドルミキサーに改良土が付着している場合は、攪拌効果が低下するため、付着土を定期的に掻き落とすことが必要である。

§ 4. 泥土改良のコスト試算

実証実験を行ったシールド工事を対象に、今回の実証

表-3 セメント系改良材の最適添加量

泥土の含水率	養生時間毎の改良材添加量 (kg/m^3)		
	3 時間	6 時間	12 時間
高 含 水 率 (35%)	45	40	35
中 含 水 率 (30%)	35	35	30
基準含水率 (25%)	30	30	30
含水率0.1%当たりの変化量	0.15	0.1	0.05

備考：高分子系の改良材は、含水率、養生時間に関係なく、 $2\ell/\text{m}^3$ の添加量で固定した。

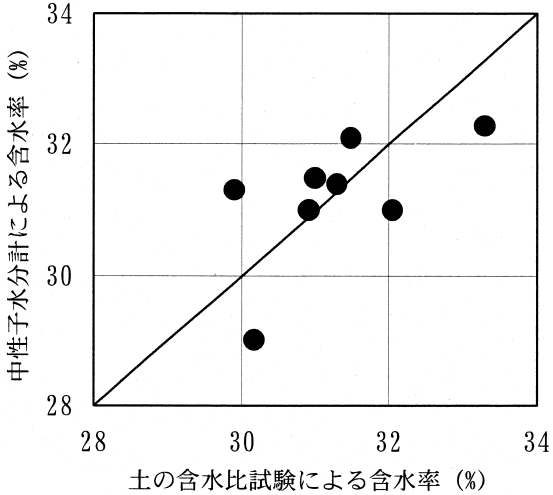


図-6 含水比試験と中性子水分計の含水率比較

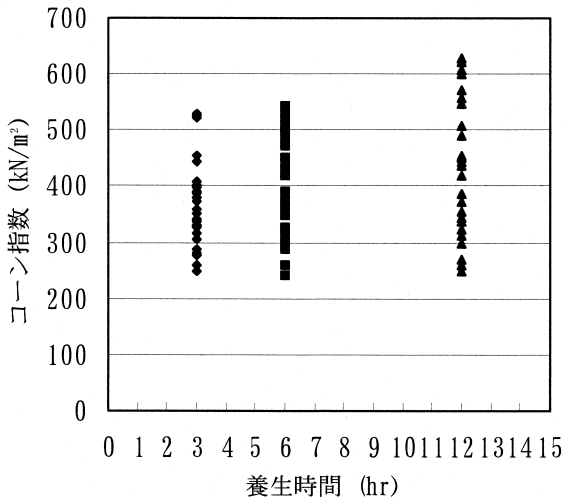


図-7 改良土のコーン指数（養生時間別）

表-4 六価クロム溶出量試験の結果

泥土の含水率 (%)	セメント系添加量 (kg/m^3)	基準値 (mg/ℓ)	測定結果 (mg/ℓ)	判定
25	30	0.05	0.02 未満	○
	50		0.02 未満	○
	60		0.02 未満	○
30	40		0.02 未満	○
	60		0.02 未満	○
	70		0.02 未満	○
35	35		0.02 未満	○
	45		0.02 未満	○
	50		0.02 未満	○

備考：試験方法はジフェニカルバジト吸光度法(JIS K0102.65.2.1)で、測定結果の0.02 未満とは、測定可能な定量下限値のことである。

表－5 第4種、第3種改良土の改良材費用

目 標 品 質		第4種改良土	第3種改良土
添 加 量	セメント系	30kg/m ³	60kg/m ³
	高分子系	2.0ℓ/m ³	2.0ℓ/m ³
改良材費 (円/m ³)	セメント系	570	1,140
	高分子系	1,700	1,700
	合 計	2,270	2,840

備考：改良材の添加量は、対象土質を砂質土とし、泥土の含水率を25%とした場合である。
改良材の単価：セメント系 19 円/kg，高分子系 850 円/ℓ

表－6 建設汚泥と改良土の処理・処分費の比較

目標品質	建設汚泥	第4種改良土	第3種改良土	備 考
処 分 費 (円/m ³)	5,400	0	0	中間処理工場（建設汚泥）
運 搬 費 (円/m ³)	2,780	1,046		建設汚泥：24km，改良土：10km（運搬距離）
改良材費 (円/m ³)	0	2,270	2,840	掘削対象土質：砂質土，泥土の含水率：25%
機械損料 (円/m ³)	0	1,375		機械損料=月当たりの損料/月当たりの排水量 =2,000,000円/1,454m ³ =1,375円/m ³
合 計 (円/m ³)	8,180 (1.0)	4,691 (0.57)	5,261 (0.64)	

実験の結果を用いて、建設汚泥として産業廃棄物処理する場合と、埋め戻し材や盛土材として再利用する場合のコスト試算結果を示す。現場の施工条件は、以下のとおりである。

シールド外径：φ3,080mm

掘 進 延 長：2,035m

時 間 排 土 量：17m³/hr

また、コストの試算は、以下の条件で行った。

掘 削 対 象 土：実証実験区間の砂質土

泥 土 含 水 率：25%

改良土の目標品質：第4種改良土，第3種改良土

改良土の養生時間：3時間

運搬距離（改 良 土）：10km

運搬車両（改 良 土）：ダンプトラック（10t）

運搬距離（建設汚泥）：24km

運搬車両（建設汚泥）：コンテナ車（10t）

表－5に第4種および第3種改良土の改良材費用を示す。また、従来の建設汚泥として産業廃棄物処理する場合と、本システムによる改良土の処理・処分費の比較を表－6に示す。表より、改良土として再利用すると、建設汚泥として処分する場合に比べ、大幅なコストダウンが図れることがわかる。ただし、第4種改良土については、再利用する際に施工上の工夫を要する²⁾とともに、受け入れ先における処分費等が発生することが考えられる。また、改良材の添加量は、掘削対象土質や含水率の変化によっては、増加する可能性がある。

§ 5. 今後の課題と展望

泥土圧シールドにおける建設汚泥の発生抑制を目指し

て、「泥土の処理システム」の開発を行い、実工事における実証実験の結果、実用性に対しては十分な能力を有していることを確認した。しかしながら、本システムの今後の課題としては、次の3つのものがある。

- ①改良土の養生、貯留の設備として、土砂ホッパー型を採用する場合、現状の設備では、閉塞の問題が生じる可能性がある。
- ②改良土の品質は、締固めた土のコーン指数試験（JGS T 716）により確認するが、現場で行うには、試験方法が煩雑であることから、試験の自動化・省力化を図ることが必要である。
- ③各種の泥土（土質，含水比）に対応できるように、改良材添加量のデータを蓄積する必要がある。

本システムによる泥土改良のコスト試算では、改良土として埋め戻し材や盛土材等に工事間利用すると、建設汚泥として処分する場合に比べ、明らかに経済的である。今後は、本システムの採用計画に当たり、上記の課題を改善していく予定である。なお、②の課題のコーン試験の自動化については、自動コーン試験装置を製作し、自動化の適用性を検証しており、機会があればその結果を報告したいと考えている。

最後になりますが、本システムの開発、実証実験の実施に当たり、御協力・御指導頂きました関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 東京都建設コスト縮減検討委員会編：東京都建設リサイクル・ガイドライン，1999。
- 2) 土木研究センター編：建設発生土利用技術マニュアル（第2版），1997。