

シールド工事から発生する泥土改良システムの開発

伊東憲・栄毅熾・河本武士*¹

Keywords: shield tunneling, construction soil, improved soil, recycle, cone index

シールド, 建設発生土, 改良土, 再利用, コーン指数

1. はじめに

昨今, 環境基準法の制定等により地球環境問題に関する関心が高まっているなか, 年々増加する産業廃棄物の処分量の問題などを背景に, 建設事業においても建設汚泥等の建設副産物の発生抑制およびリサイクル化が急務である。

当社と東京都下水道局, 戸田建設(株), 鹿島建設(株), 西松建設(株)の共同研究グループは, 泥土圧シールド工事から発生する泥土(建設汚泥)を再利用可能な改良土にすることを目的に共同開発を行った。

泥土処理方法は, シールド掘進時の排土過程において, 泥土の性状に合わせた連続改良システムとした。改良目標としては, 第4種改良土 qc 200kN/m²と第3種改良土 qc 400kN/m²を想定しているが, 本報では, 泥土の土質と含水率に対して, 改良後3時間で第4種改良土の基準を満足するための改良材の選定と必要添加量を決定し, 実証実験を行った結果についての報告である。

2. 開発の目的

本開発の目的は, 掘削泥土の含水率の変化に応じて, 土質改良材の添加量をコントロールし, 安定した品質の改良土をつくることである。改良土は, 所定の時間が経過した時点で第4種改良土の基準を満たすこととした。

3. 開発の内容

3.1 開発の内容

研究内容として以下の項目を主たる課題とした。

- 1) 掘削泥土の含水率と流量を連続的に測定する装置の開発。

- 2) 掘削泥土の供給量と性状に合わせて, 改良材の添加量を最適制御するシステムの開発。

- 3) 安全かつ経済的に所定の改良目標を満たす改良材の開発。

3.2 研究工程

主な項目についての実施工程を表-1に示す。

室内配合実験では, 粘性土, 砂質土, 砂の3種類を実験対象土としてスランブを15・20・25cmの3段階に変化させた泥土を作成し, 高分子, セメント系, 石膏系及び石灰系の各種改良材による改良土の材令とコーン指数の関係を把握した。この結果から所定の強度になる時の改良コストを比較して, 土質別に最適改良材を選定した。

屋外要素実験では, 改良装置の基本性能を確認するために, 実機による泥土の改良試験を行った。

実証実験では, シールド工事にこのシステムを適用させ掘削泥土を第4種改良土に改良し, 埋立地へ運搬した。

表-1 研究工程表

Schedule of the research

項 目	平成11年度			平成12年度				平成13年度	
	9	12	3	6	9	12	3	6	9
現状把握・課題整理	■								
装置仕様の方針	■	■							
室内配合試験		■	■						
屋外要素実験		■	■						
改良装置システム改良				■	■	■			
実証実験(実験計画)				■	■				
(室内事前試験)						■	■		
(現場予備試験)								■	
(本実験・報告書)									■

4. 泥土改良システム

4.1 改良システムの構造

図-1にシステムの概要図を示す。

* 1 東京支店

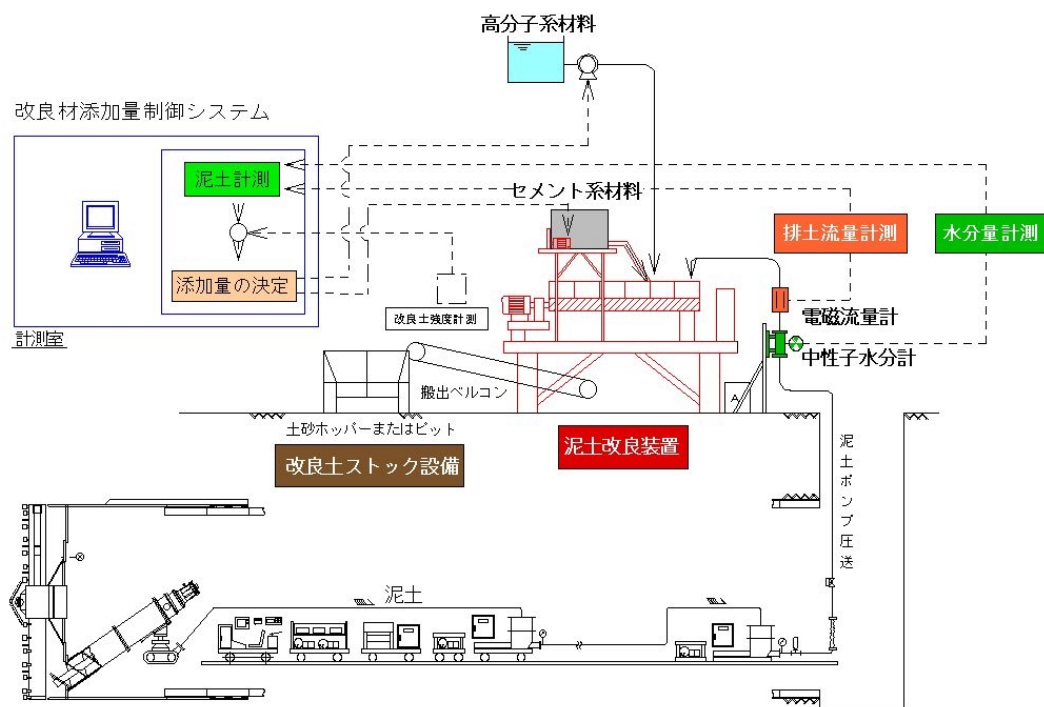


図-1 泥土改良システム概要図

Schematic diagram of the mud improvement system

本システムは泥土に対して改良材を供給，攪拌する改良装置を中心に，電磁流量計，中性子水分計と改良材のストック設備，改良土の搬出装置，改良土ストック設備，そして改良装置の運転を制御するシステムから構成される．

- ・改良装置：改良材の添加，掘削土と改良材の攪拌混合（可撓性ゴムケーシング＋一軸のパドルミキサー使用）
- ・電磁流量計：排土配管内の流量測定
- ・中性子水分計：掘削土の含水比の判定

泥土改良システムの種類として，改良装置の設置位置により以下の４種類に分類される．

- 1)地上型改良システム
- 2)坑口型改良システム
- 3)立坑型改良システム
- 4)坑内型改良システム

地上型のものを写真-1 に示す。



写真-1 地上型改良システム
The ground type system

4.2 改良システムの能力とストック設備

4.2.1 改良システムの適用範囲

システムの適用範囲は，掘削土の必要処理能力を $30\text{m}^3/\text{h}$ 以下， $30\sim 50\text{m}^3/\text{h}$ 及び $50\sim 80\text{m}^3/\text{h}$ の３段階に分けている．

4.2.2 改良土のストック設備と必要容量

改良土のストック設備は，仮置き場所としての役割と同様に，改良材添加後の養生場所としての役割を持っている．各種改良土に要求される強度に達する迄の時間を管理する必要があることから，改良後の経過時間に応じて，土砂ピットに仕切りを設けて区別することとした．

標準的な施工条件（搬出は昼間のみ）におけるストック設備の使用例を図-2 に示す．

改良土ストック設備の容量は，夜間の場外搬出ができないことと，加泥材添加率 25%，土量変化率 30%，改良材添加率 5%，ストック設備作業効率 80%を考慮し，昼夜分改良土をストックできるものにした．

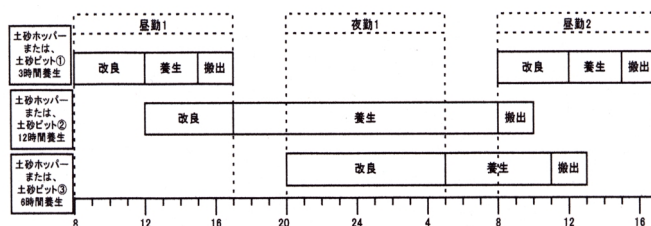


図-2 改良土ストック設備の使用計画例

Typical application plan for an improved soil stock facility

4.3 制御システムの構成と配合データベース活用

4.3.1 制御システムの構成

泥土の含水率に合わせて、改良材の添加量を最適制御するシステムを構築する。基本配合となるデータベースを搭載し、排土流量や水分量の変動分に対応し、自動補正できるようになっている。

4.3.2 改良材配合データベースの活用

泥土改良システムでは、配合試験の結果に基づいた配合データベースを使用している。データベースは、土質変化に対応する配合、掘削土の含水率変化に対応する配合、そして改良目標時間に対応した配合があげられる。

このシステムは、含水率を計算し、計測データから掘削土の配合データベースに基づき目標改良効果に対応した最適配合を選択し、改良材の添加量をリアルタイムに制御するためのものである。

5. 改良材

5.1 改良材の必要性能

本システムは、排土過程において掘削土を建設発生土として扱うことが可能な品質まで改良することを目的としている。

したがって、本システムで使用する改良材としては、以下のような必要性能を満足する必要がある。

- 1) 短い時間（最低 3 時間）で、第 4 種改良土 qc 200kN/m^2 以上の強度を有する。
- 2) 改良土が土質材料として施工性に優れている。
- 3) 改良土の安定性が優れている。
- 4) 改良土からの六価クロム等の溶出量が土壤環境基準以下である。

5.2 改良材の新規開発

一般に改良材は、一般軟弱土の安定処理に用いられるものと、ヘドロや汚泥など高含水土壌の安定処理に用いられるものに大別される。

前者には石灰系およびセメント系があり、後者には石灰系、セメント系に加えて、短時間で土質性状を改善することを目的とした高分子系がある。

本システムで使用する改良材は、従来の高含水土壌安定処理用の改良材をベースに、他の材料を混合して開発した特殊品（リプロソイル）である。

開発した改良材の目標材令の概念図を図-3 に、改良材の特徴と改良効果を表-2 に示す。

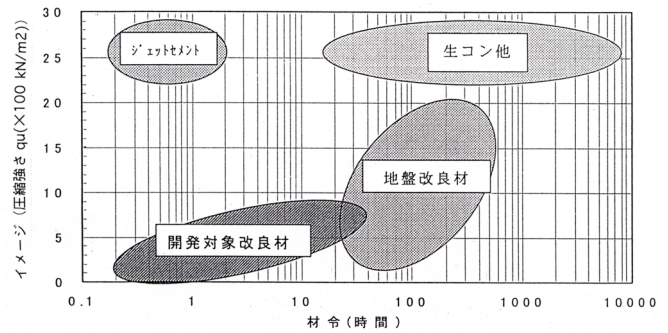


図-3 改良材の材令モデル概念図

The aging model of improved soil

表-2 開発した改良材の特徴と改良効果

Features and effects of improved soil

改良材	特徴	効果
セメント系	セメント系改良材をベースにアルカリ刺激剤を混合。 粘性土、砂質土の改良に有効。	早強性、団粒化
石膏系	半水石膏をベースにボゾラン物質を混合した特殊混合物。 砂～砂質土の改良に有効。	含水比低下 二水石膏水和物生成 結晶化
高分子系 〔アニオン系〕 〔カチオン系〕	粘土のコロイド分と土の水分を凝集してフロックを形成。	団粒化 塑性向上による コーン指数の増大

5.3 配合選定試験例

新規に開発した改良材の改良効果を調査するために、室内の配合選定試験を行った。試験は従来の改良材との改良効果を比較するために、石灰系の改良材についても調査した。表-3 と表-4 は、粘性土と砂質土に対して行った配合試験結果である。コーン指数 qc 200kN/m^2 を満足する必要添加量（養生 3 時間）制御の容易さ、経済性および施工性について評価したものである。

この結果、粘性土に対しては「高分子系＋セメント系」、砂質土に対しては「高分子系＋セメント系＋石膏系」の改良材が有利であることがわかった。

しかし、別途実施した実証実験機による配合試験では、砂質土に対しても「高分子系＋セメント系」の改良効果が認められた。これは、実証実験機の攪拌能力が室内配合試験のミキサーに比べ高いためと考えられる。

以上のような結果を踏まえ、本システムでは「高分子系＋セメント系」または「高分子系＋セメント系＋石膏系」の改良材を使用することを標準とした。

5.4 改良土の養生時間

本システムでは、改良材の添加・混合から改良土搬出までの最短の養生時間を 3 時間としている。この時の改良土のコーン指数は、第 4 種改良土に相当する qc 200kN/m^2 であることが必要である。

表-3 室内配合選定試験の結果（粘性土）

Results of a laboratory mix proportion test (cohesive soil)

改良材の種類	必要添加量（3時間後、 $q_c \geq 200 \text{ kN/m}^2$ ）				制御の容易さ	経済性	施工性	総合評価
	高分子系	石灰系	セメント系	半水石膏				
	(L/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)				
高分子系+石灰系	2	220	—	—	△	△	◎	△
	4	200	—	—	△	△	◎	△
	6	150	—	—	◎	△	◎	○
高分子系+セメント系	4	—	150	—	◎	△	◎	○
	6	—	50	—	◎	△	◎	○
高分子系+石灰系+石膏系	4	50	—	50	◎	△	◎	○
高分子系+セメント系+石膏系	2	—	65	65	◎	○	◎	◎

凡例：◎非常に優れている。○：優れている。△：検討を要する。

表-4 室内配合選定試験の結果（砂質土）

Results of a laboratory mix proportion test (sandy soil)

改良材の種類	必要添加量（3時間後、 $q_c \geq 200 \text{ kN/m}^2$ ）				制御の容易さ	経済性	施工性	総合評価
	高分子系	石灰系	セメント系	半水石膏				
	(L/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)				
高分子系+石灰系	1	120	—	—	○	△	◎	○
	2	100	—	—	○	△	◎	○
	3	60	—	—	◎	△	◎	○
高分子系+セメント系	1	—	50	—	◎	○	◎	◎
	2	—	40	—	◎	○	◎	◎
高分子系+石灰系+石膏系	2	—	40	40	◎	△	◎	○
高分子系+セメント系+石膏系	2	—	25	25	◎	△	◎	○

凡例：◎非常に優れている。○：優れている。△：検討を要する。

一方、シールド工事が通常昼夜連続で行われるのに対し、改良土の搬出は通常昼間のみに限定される。したがって、夜間に掘削・改良した土砂は翌日まで、さらに休前日の夜間に改良した土砂は翌々日まで、現場内に貯留・仮置きすることになる。このため、搬出時における改良土のコーン指数は、 200 kN/m^2 を大きく上回ることが予想される。

このような場合、固結の進行により改良土の施工性（ハンドリング）が極度に低下するため、改良材の添加量を通常時よりも低減する必要がある。

本システムでは、泥土の改良から改良土搬出までの養生時間を表-5 のように設定することを標準とし、ケース毎に改良材の添加量を調整するものとした。

表-5 改良土の養生時間

Curing time of improved soil

ケース	養生時間	泥土の掘削・改良	改良土の搬出	
1	3時間	8:00~12:00	当日	15:00~17:00
2	12時間	13:00~17:00	翌日	8:00~11:00
3	6時間	20:00~5:00	翌日	11:00~15:00

表-6 基本物性

Basic physical properties

N値	35~50以上	最大粒径	4.75mm
透水係数	$2 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$	平均粒径	0.25mm
単位体積質量	$1.8 \sim 1.9 \text{ t/m}^3$	均等係数	17
自然含水比	25.7~37.6%	細粒分含有率	15%

6. 実証実験

6.1 実験概要

実証施工は、路線延長 2,056m のうちの約 350m について実施した。

表-6 に対象土質の基本物性を示す。

発注者：東京都下水道局

工事名：千代田区一番町、三番町付近再構築工事

シールド外径： $\phi 3,080 \text{ mm}$ 泥土圧式

土被り：14m~15m（実験区間）

実証実験期間：平成 13 年 3 月 26 日～

平成 13 年 6 月 30 日

実証実験対象土質：砂質土

使用加泥材：鉍物系 + 高分子

6.2 実験内容

初期掘進時に予備実験として、所定の養生時間（3，6，12 時間）で第 4 種改良土 q_c 200kN/m² 以上の強度を有する配合データベースの作成と改良材の選定を行った。

また本掘進時では実証実験として、予備実験で選定した改良材の配合データベースで実際に改良を行い、その時の各養生時間での改良強度の確認ならびに中性子水分計と電磁流量計を用いたシステムの検証を行った。

なお、再泥化試験として改良土を実際にダンプに積み込み走行させた実験も行った。

6.3 実験装置

実験装置は、地上型改良システムのタイプとし、日進量の関係により処理能力 30m³/hr の改良装置を使用した。

改良土のストック設備はピット方式で養生時間の関係より 3 つのピットを設置した。

6.4 実験結果

室内実験の結果を参考に、①高分子系 + セメント系（六価クロム対応型）+ 石膏系（LC + CE・GY）、②高分子系 + セメント系（六価クロム対応型）（LC + CE）、③高分子系 + セメント系（LC + C）の 3 種類をベースに実験を行った。

その結果、最も経済的に改良可能であった③の高分子系 + セメント系（LC + C）を実証実験に使用した。このときの配合結果を表-7 に示す。

また、この配合での六価クロム溶出は基準値 0.05mg/L 以下であった。

なお、pH の変化は改良前 pH7.3～8.5 に対し、改良後は pH10.8～12.1 であった。

表-7 配合結果

A result of mix proportion

含水率	第 4 種改良土（砂質土）LC+C				備考
	高分子系改良材 添加量（ℓ/m ³ ）	養生時間別のセメント系改良材添加量 （kg/m ³ ）			
		3, 6, 12時間共	3時間	6時間	
高含水率（35%）	2	45	40	35	5kg単位 表示
中含水率（30%）		35	35	30	
基準含水率（25%）		30	30	30	

6.5 泥土の実測含水率と中性子水分計の関係

今回のシステムにおいては、改良材添加量を決定する重要なパラメータである泥土の含水率を、中性子水分計を用いて、排土過程でリアルタイムに計測している。

この水分計と炉乾燥で求めた含水率の関係を図-4 に示す。

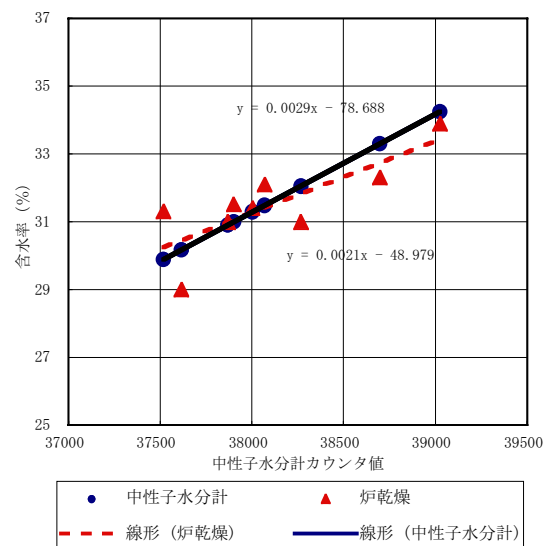


図-4 水分計と炉乾燥で求めた含水率
Relations among water contents

この結果から、両者の関係はほぼ一致し、先に行ったキャリブレーションが適切であったことが検証できた。

6.6 中性子水分計及び電磁流量計の検証

中性子水分計の検証結果を図-5 に示す。

この図は含水率の変化によるセメント系の添加量の関係を表わしたもので、ほぼ計画線と同じ添加がされているがわかる。

図-6、図-7 は電磁流量計で計測した排土流量と改良材添加量の関係を示したものである。排土流量の変化に追従して、セメント系および高分子系の両改良材の添加量も変化している。

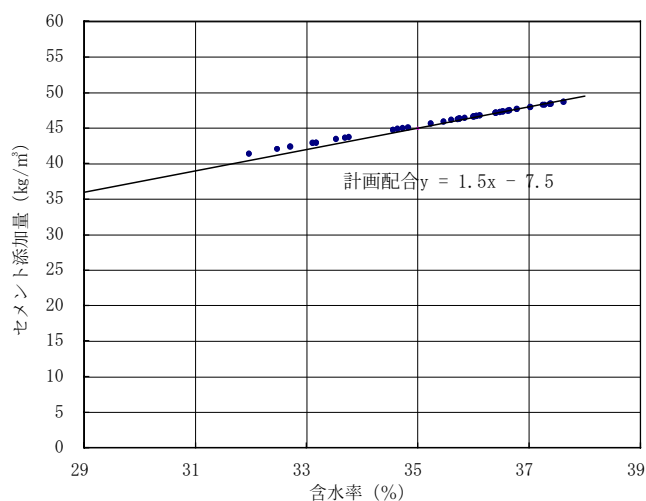


図-5 含水率の変化とセメント系添加量
Change in water content and the amount of
a cement-based improver added

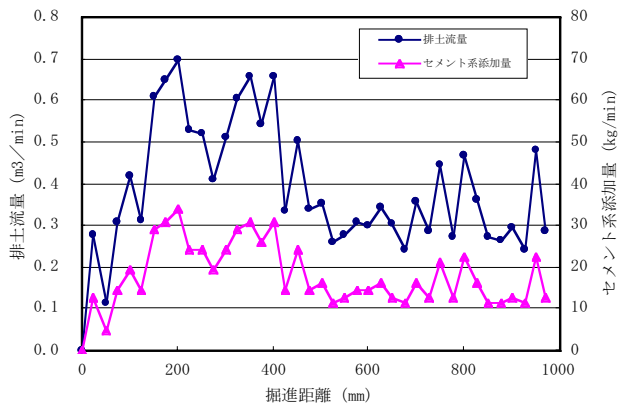


図-6 排土流量の変化とセメント系添加量
Change in mud flow rate and the amount of a cement-based improver added

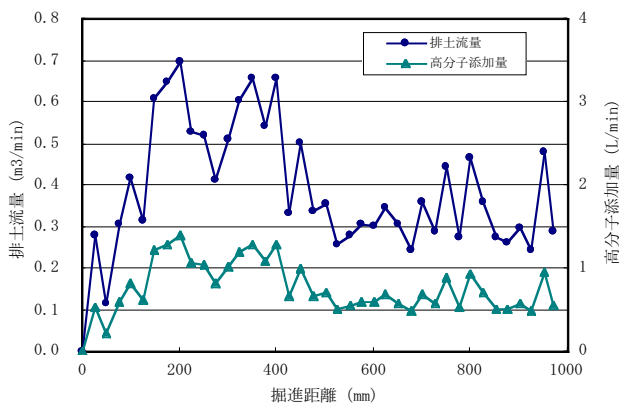


図-7 排土流量の変化と高分子系添加量
Change in mud flow rate and the amount of high polymer-based improver added

6.7 改良土の特製

各養生時間後に測定したコーン指数を図-8 に示す。

各時間ともコーン指数にばらつきがあるものの第 4 種改良土 qc 200kN/m² を満足している。

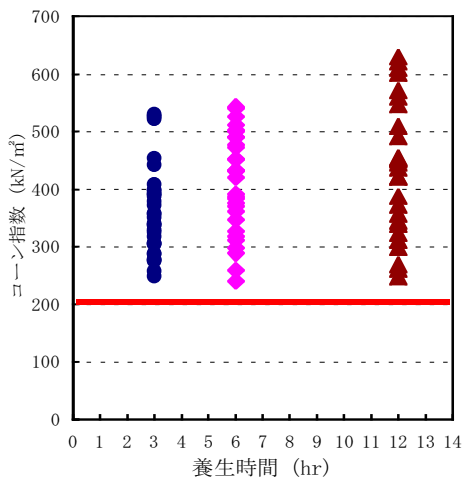


図-8 各養生時間のコーン指数
Curing time vs. cone index

このコーン指数のばらつきは、同一ピット内の改良土の養生時間のばらつき、地山の変化による影響やコーン試験時の誤差である。

また今回、養生時間 3 時間で第 4 種に改良された土を実際にダンプトラックに積み、運搬した時の改良土のコーン指数の変化を計測した結果、コーン指数は時間の経過により強度を増し、改良された泥土が再泥化することはない。

7. 従来工法との経済性比較

泥土を産廃処分する従来工法と、本システムによる改良土（第 4 種）を再利用する場合の経済性比較を表-8 に示す。後者については、受入れ先及び仮置きの有無を考慮して 3 ケースの試算をおこなった。工事間利用の 2 ケースでは、仮置きの有無に関係なく従来工法より安価であり、特に仮置きをしないで直接受入れ先に搬出する場合は、従来工法に比べて約 34% の大幅なコスト低減が図れる試算結果である。

表-8 従来工法との経済性比較（参考）

So far, economic comparison with the method of construction

	従来工法（泥土搬出）		システム採用（泥土を改良して搬出）				
	処分費	運搬費	機械損料	材料費	運搬費	受入費	積込費等
中間処理工場（民間）	6,200	2,600	—	—	—	—	—
	8,800		—				
新海面埋立地	—	—	1,400	2,500	1,940	3,800	—
	—		9,640				
工事間利用（直接受入）	—	—	1,400	2,500	1,940	—	—
	—		5840				
工事間利用（仮置き）	—	—	1,400	2,500	3,880	—	500
	—		8,280				

(円/m³)

運搬費：従来工法：平成12年度の平均距離（2.3km）コンテナ車。
システム採用：従来工法と同一距離。ダンプトラック

積込費：積込・ストックヤード費として下記を計上

8. おわりに

今回の研究では、システムの開発、改良材の開発を行い、現場実証実験では砂質土の第 4 種改良土への改良を確認した。また実証実験時に行った配合データベース作成により、第 3 種改良土への改良の目処も立っている。

我々はこの開発の成功により環境負荷の軽減のために建設リサイクルの推進に寄与していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 柴田靖他：シールド工から発生する泥土の処理システムの開発，第 55 回土木学会年次学術講演会，pp.488-489，2000。