

粒状固化工法による泥土（建設汚泥等）の再資源化（土質材料）

Resource Recovery of Sludge Using the E-cube System

永松郁生^{*1} 野口真一^{*2}

Ikuo Nagamatsu Shinichi Noguchi

高橋工^{*3} 村上清基^{*3} 工藤均一^{*4}

Koh Takahashi Seiki Murakami Kinichi Kudoh

【要旨】

建設副産物の再資源化（リサイクル）については、行政による種々の施策や民間の技術開発によりかなりリサイクル率が向上してきている。その中で建設汚泥（泥土）の再資源化は、取り残された状況にあり、建設副産物全体のリサイクル率向上の面からも喫緊の課題となっている。このような状況に鑑み、環境省は平成17年7月に「建設汚泥処理物の廃棄物該当性の判断指針について」を通知し、これを受け土工協は平成18年1月に同通知の解説を作成し、理解促進を図っている。一方、国土交通省は平成18年6月に「建設汚泥の再生利用に関するガイドライン」を策定し、『建設汚泥リサイクル向上』を目指す等、行政においても一層の取り組み・環境整備が行われ始めている。

本技術（イーキューブシステム）は、建設汚泥や浚渫土等の流動性を呈する高含水比の泥土に、高分子凝集剤及び要求品質に適合した固化材を添加・混練し、数十秒で粒状の土質材料として再資源化する技術である。

【キーワード】 建設汚泥 浚渫土 高含水 粒状固化 再資源化 リサイクル 泥土

1. はじめに

建設汚泥は、産業廃棄物に位置付けされ、定義及び法令の解釈・運用も自治体毎に異なり、リサイクル促進が難しい建設副産物の品目の一つとなっている。背景には、産業廃棄物の不法投棄、泥土（建設汚泥等）を安価に安定して高品質で再資源化できる技術がなかったことが上げられる。

「粒状固化工法：イーキューブシステム」は発生した泥土（建設汚泥等）に対し、その流動程度に応じて固化材や高分子凝集剤を添加し、これを新たに開発した連続ミキサーに投入して20～50秒間程度攪拌することにより固化した改質土を粒状に生成し、生成された改質土は、埋め戻し材や盛土材等の土質材料として幅広く使用できる。

この工法は、①固化材として石炭フライアッシュ（これも産業廃棄物）を有効利用すること、②処理装置がコンパクトで可動式のため現場環境の制約が少ないこと、

③多様な泥土に対応でき使用目的に応じた強度の粒状体が生産できるので改質土の用途範囲が広いこと等、他の類似工法には見られない特徴を有している。

本論文は、地盤改良時に生起する自硬性汚泥、土圧式シールドで排出される泥土、港湾・河川の浚渫土等の非自硬性汚泥を経済的に処理し、有効利用するための方法を提案するとともに、改質土の品質性能と実務への適用性について報告するものである。

2. 本技術の概要

2.1 システムの概要

本システムの主装置は、泥土ホッパー、泥土定量供給装置、固化材定量添加装置、混合攪拌装置（特殊連続ミキサー）等から構成される移動式粒状固化プラントで、ユニット型とセパレート型があり、それぞれ10tトラック等で運搬が可能である。特殊連続ミキサーは移動翼と攪拌翼からなり、泥土は2種類の固化材と混練されながら搬送され、この過程で、処理土は粉碎・分散されるので

1. 一般会社出向 2. 名古屋支店 稲沢作業所 3. 防災R&Dセンター 事業推進部 4. 土木本部 機電部

処理効率と混練の均質性が向上し連続的な処理が可能である。

2.2 固化材のバリエーション

類似技術では、ミキサーの欠陥（処理効率が低く、均質性に欠けること）により、往々にして固化材（セメント系）を必要以上に投入することとなる。固化材の経済性は添加量と効果の関係により評価される。従って、材料費自体が廉価であっても効果が希薄であれば添加量を増す必要があり、必ずしも安価な固化材を選定することが有利になる訳ではない。

本技術では、石炭灰、製紙スラッジ焼却灰等の産業副産物を主成分とする固化材に着目している。これは普通ポルトランドセメントよりも価格が高いものの、軟弱地盤用の土質改良材よりは安価であり、循環型社会構築の観点からも意義の高いものである。

また、農地土壌などに配慮した土質改良材に改質する場合は中性化固化材を使用するなど、要求品質に対し、フレキシブルに対応できる汎用性の高い技術である。

2.3 ハンドリング性

改質された泥土が改良直後に流動性を呈している改良土では、その運搬が直ちに行えず、所定の期間を待ってから流用することとなる。また、その場合、塊状で固化しているため破碎作業等が必要となる。

本技術で改質された泥土は、粒状を呈しているため比表面積が大きくなることから、その乾燥速度が速く、短時間（2～3時間）に発生土と同様に普通ダンプに積み込み、運搬できる状態となる。

2.4 再泥化

機械脱水であるフィルタープレス工法の最終工程から排出されるマッドケーキは脱水処理の方法によりかなりの強度を持ったものとなる。しかし、このマッドケーキに再び水分が補給されると元の状態、つまり、泥土・泥水に戻ってしまう。同様の現象例として、土層の中から掘り起こされる固結シルトや泥岩等も、水が存在しないときは相当の強度を有するが、ひとたび水が浸透していくと極端な強度低下を起し、この

品質が低下していくことは周知のことである。この現象を「再泥化」と呼んでおり、本技術での改質土は再泥化しないことを確認している。

3. 施工方法

施工手順を図-1に示す。また、各工程の概要は次の通りである。

- ①貯泥：発生した汚泥をピット等に貯留して固液分離を行う。
- ②調泥：沈殿した汚泥を再攪拌してスラリー状にする（混練の均質化を図る）。
- ③泥土投入：調泥した汚泥を、バックホウ等により泥土定量供給装置に投入する。
- ④固化材等添加：スクリーコンベア内を搬送されている汚泥に、高分子凝集剤と固化材を添加する。
- ⑤混練：移動翼と攪拌翼を兼ね備えた特殊連続ミキサーにより、汚泥と固化材等を混練しながら搬送する。
- ⑥積込・運搬：装置端末に備え付けたベルコンから排出された改質土をバックホウ等でダンプトラックに積み込み、使用場所に運搬する。

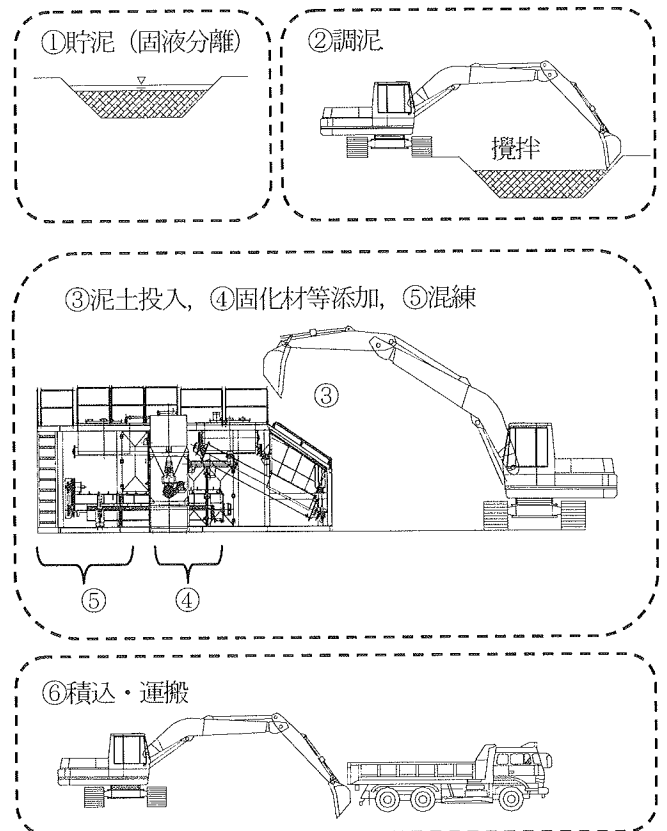


図-1 施工フロー

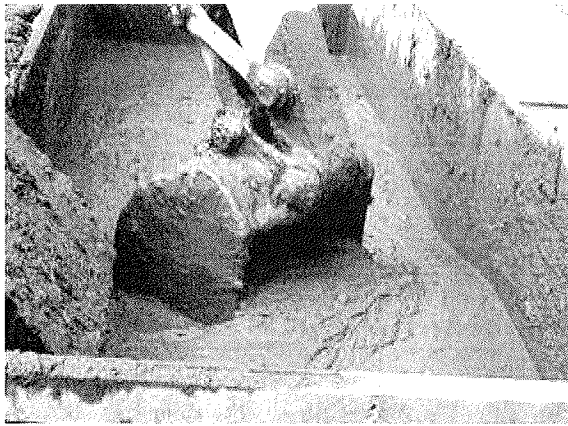


写真-1 貯泥状況（泥土圧シールド）



写真-2 泥土投入状況



写真-3 搬出状況



写真-4 改質土の積込状況

4. 実務への適用

4.1 発生泥土の物理的特性

表-1は、本工法を実務で適用した泥土の物理的性質を示したもので、発生泥土の含水比は液性限界より高く、スラリー状～泥水状態にあり、細粒分が7割以上占めるもの、水素イオン濃度pHが高いもの、有機分が多い（強熱減量が高い）もの等、性状の異なる泥土・泥水に対して本技術の適用性評価を実施した。同表に示すフロー値及びスランプは、日本道路公団規格（JHSA 313:1992）エアモルタル及びエアミルクの試験方法（シリンダー法）、コンクリートのスランプ試験法（JISA1101:1998）により測定した値で、それぞれの測定状況を写真-5、写真-6に示す。



写真-5 スランプ試験



写真-6 シリンダー法によるフロー値の測定試験

a) 粒度特性

発生泥土・泥水の粒度組成は表-1及び図-2（三角座標）に示すとおりであり、粒度曲線を図-3示す。図-2には改質土の粒度組成も併記したが、いずれも日本統一分類のSF～SGに属する砂質土に改質されていることが読み取れる。

表-1 泥土の物理特性¹⁾

分類	非自硬性汚泥					自硬性汚泥		
	泥土圧 シールド工法 排泥	採石場 沈砂池 堆積土	造成地 沈砂池 堆積土	港湾 浚渫土	河川 浚渫土	RJP工法 排泥	SJM工法 排泥	TRD工法 排泥
土粒子密度(g/cm ³)	2.704	2.669	2.652	2.627	2.671	2.687	2.651	2.804
湿潤密度 (g/cm ³)	1.611	1.558	1.742	1.385	1.868	1.300	1.307	1.893
含水比 (%)	60.6	75.2	49.8	102	33.7	167	160	29.5
フロー値 (mm)	—	—	90	90	85	205	180	120
スランプ (cm)	21.0	16.5	—	16.5	12.0	—	—	—
液性限界 (%)	37.9	60.1	44.1	41.3	NP	—	—	—
塑性限界 (%)	26.1	26.1	33.1	28.4	NP	—	—	—
塑性指数	11.8	34.0	11.0	12.9	—	—	—	—
液性指数	2.9	1.4	1.5	5.7	—	—	—	—
礫分 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
砂分 (%)	30.3	43.9	30.0	28.6	57.9	33.0	33.1	84.7
シルト分 (%)	50.0	20.5	40.9	51.6	22.5	36.5	40.8	10.3
粘土分 (%)	19.7	35.6	29.1	19.8	16.9	30.5	26.1	5.0
細粒分 (%)	69.7	56.1	70.0	71.4	39.4	67.0	66.9	15.3
均等係数	31.3	—	—	—	—	—	—	15.9
曲率係数	1.9	—	—	—	—	—	—	1.3
分類名	シルト	粘土	シルト	シルト	細粒分質砂	シルト	シルト	細粒分質砂
分類記号	ML	CH	ML	ML	SF	M	M	SF
強熱減量 (%)	—	5.2	6.9	10.2	2.5	—	—	—
pH	9.7	7.2	6.8	7.5	10.8	11.1	11.8	11.4

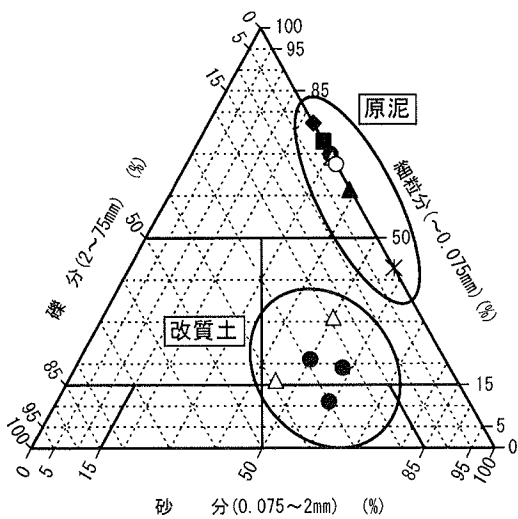


図-2 三角座標¹⁾

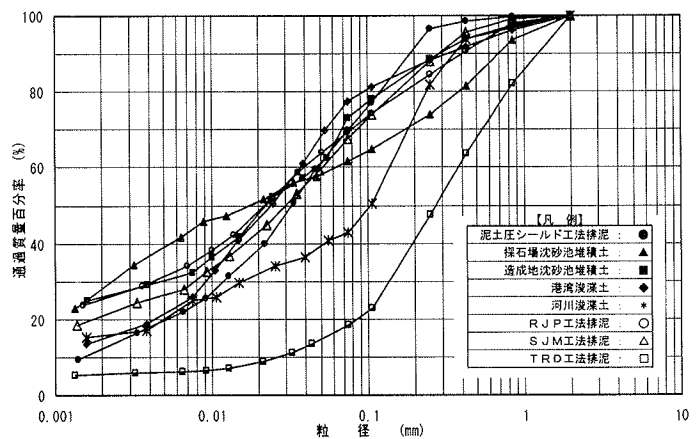


図-3 泥土の粒度曲線¹⁾

b) 含水比とフロー値、スランプの関係

図-5、-6は含水比とフロー値及びスランプの関係を示したもので、含水比とフロー値及びスランプの間には、有意な線形関係（相関係数 $r \geq 0.96$ ）が認められる。直線の勾配は細粒分の多い泥土ほど小さく、逆に細粒分の少ない泥土ほど大きい。細粒分の少ない泥土の流動性は含水比の変化に対し鋭敏に反応する。

泥土の改質に必要とされる固化材の添加量の多少が、細粒分含有量に支配され、含水比の変化に鋭敏に反応する細粒分の少ない泥土が、細粒分の多い泥土に比べ固化材が少なく済むことは、流動性と含水比の関係から判読できる。

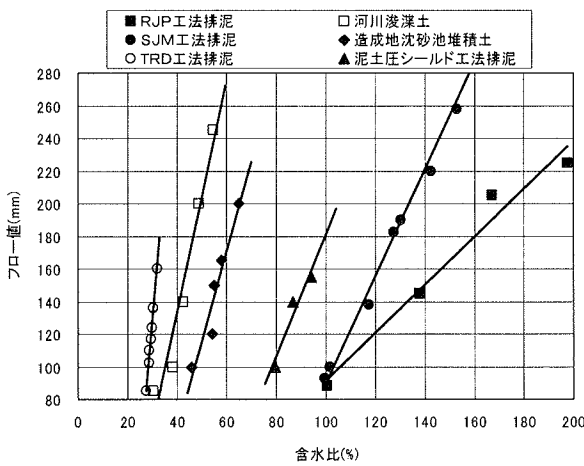


図-5 含水比とフロー値の関係¹⁾

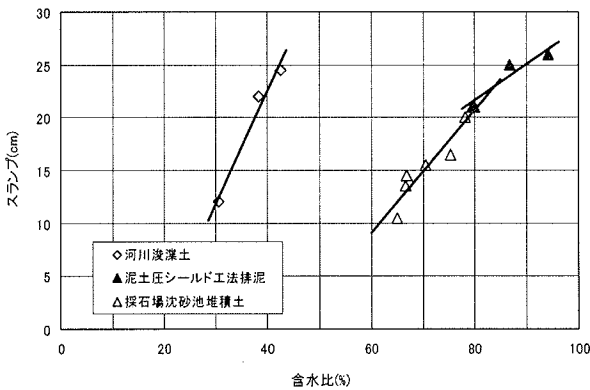


図-6 含水比とスランプの関係¹⁾

c) 室内配合試験

泥土の改質は、汚泥の性状・要求品質等を考慮し適切な配合設計を行う必要がある。

一般的な品質判定のための試験項目は、コーン指数 (JIS T 716)、一軸圧縮強さ (JIS A 1216) 及び CBR (JIS A1211) 等が用いられ、改質土の品質区分はコーン指数を

指標とすることが多くことから、本工法の配合試験でもこの方法を採用した。

固化材の添加量は、含水比が高く流動性に富む状態にあるほど多く必要とし、流動性と含水比は高い相関関係を示し、泥土の状態はフロー値もしくはスランプを指標として判断できると考えられる。

図-6は、河川浚渫土の室内配合試験結果を示したものである。この工事では改質土を河川堤防の築堤用土として流用する計画であり、要求品質は第3種処理土 ($qc \geq 400 \text{ kN/m}^2$)⁴⁾ 以上とされた。現地から採取した泥土の含水比を $W=30, 40, 50\%$ に調整して、それぞれのフロー値、スランプを測定した。1m³あたり10kgの高分子凝集剤と固化材 (80, 100, 120kg/m³) を添加し、コーン指数を計測した。

要求品質を満足する固化材の添加量は、含水比（フロー値、スランプ）と指数的な関係にある。含水比50%の泥土では、固化材の添加量の多少により生じるコーン指数の差は小さい。

これは、経済的な改質には、3. 施工方法で記述した貯泥・固液分離による含水比低減が、コスト的に重要であることを意味している。

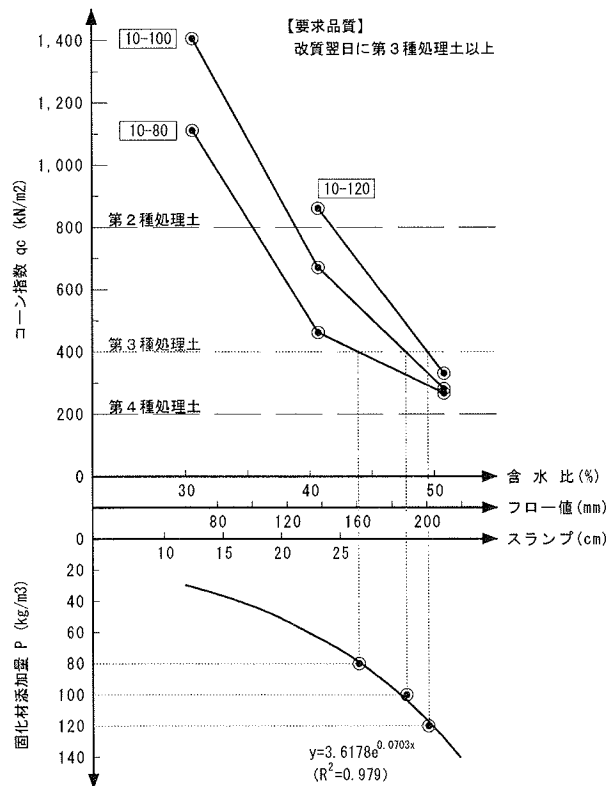


図-6 室内配合試験例（河川浚渫土）¹⁾

4.2 改質土の物理的特性

a) 現場強度と室内強度の比較

一般的にバックホウやスタビライザー等を使用したいわゆる地盤改良等（本技術とは対象物の含水比が大きく異なる）では、現場と室内で得られる強度比（現場/室内）は、差違があり平均的に0.5程度であるとしている。これは、攪拌性能による混合程度の相違、温度の相違に起因する強度の差、改良区域での土質のバラツキ、含水比の相違による現場強さの変動等から生じるものと考えられている。

したがって室内配合試験時には、（現場/室内）強度比の逆数を割り増し係数とし、添加量を決定するよう規定されている。

図-7は、河川浚渫土の改質土におけるコーン指数の経時変化を、実機による結果（実線）と室内配合試験の結果（破線）を対比したものである。

本工法における（現場/室内）強度比は、ほぼ1.0に近い結果が得られており、混練性能の高いミキサー、調泥作業による土質性状（含水比等）のバラツキの抑制、フロー管理による固化材添加量の適正化等によるものと考えられる。

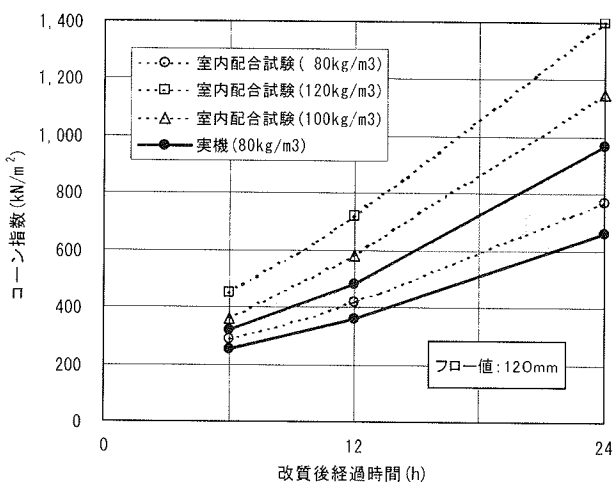


図-7 河川浚渫土における改質土のqcの経時変化¹⁾

4.3 泥土の運搬

本技術の実務において、泥土・泥水の発生箇所の近くで改質を行うことは、運搬・搬送費を押さえコストを低下する上において課題の一つとして上げられる。

システムと泥土・泥水の発生箇所にある程度の距離が生じることは避けられないが、運搬方法としては①箱ダンプによる運搬方法、②他に泥水ポンプ等による送泥方法が上げられる。今回、泥水ポンプ等による送泥方法による実証試験を行ったので合わせて報告する。

a) 仙台地下鉄調査工事に於ける実証試験

1) 工事概要

- ①工事件名：「平成 17 年度東西線遮水性土留調査工事」のうち、イーキューブシステムによる底盤改良排泥の粒状固化及び改質土の再生利用
- ②工事場所：仙台市若林区六丁の目中町1番地内
- ③発注者：仙台市交通局
- ④施工者：飛鳥建設・佐藤工業・高工共同企業体
- ⑤施工期間：平成 18 年 5 月 12 日～平成 18 年 6 月 24 日まで
- ⑥イーキューブ対象工種：

高圧噴射攪拌工 (Superjet)

径 4,000mm H=4.3m×6本 H=5.3m×1本

自硬性汚泥 約 500m³

⑦試験目的

本試験は仙台市地下鉄東西線試験施工の一環として、当社から交通局への技術提案の形で実施した。高圧噴射攪拌工から発生する泥土の有効利用を図った。

2) 実証試験上の留意点

本実証試験施工においては、生産される改質土の土質特性の把握もさることながら、本工事で予測される狭隘な都市型土木工事環境下での、泥土発生地点から貯泥ピットまでの泥土の移送方法について、検証を試みた。

3) 施工条件

- 1) 泥土移送距離 40m～60m
- 2) 揚程高 3m～4m
- 3) 泥土性状 フロー値 20cm～25cm
- 4) ポンプ仕様 6インチ 9kw

4) 施工状況

写真-5及び写真-6に施工状況を示す。

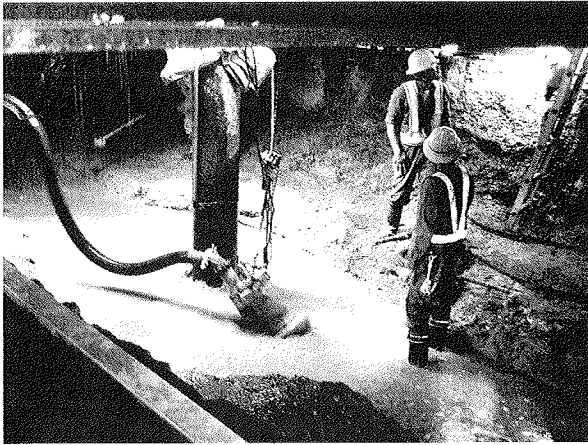


写真-5 泥土発生地点での吸引状況



写真-6 泥土受け入れ側の吐出状況

5) 実証試験結果

- ① ポンプ1台・時間当たり $60\text{m}^3\sim 80\text{m}^3$ の送泥実績を確保出来た。
- ② 泥土に混在するレキ径 25mm 程度までは、送泥可能である。

以上の結果より、泥土の運搬については、6インチサンドポンプで十分対応可能である。

5. 泥土改良技術を比較検討する場合の留意点

本技術及び類似技術は「安定処理」に区分されており、バックホウやスタビライザー等を使用し原位置土と固化材を混合攪拌する地盤改良等、地盤改良工法の安定処理と混同を招き易い。同一工法として、単純にコスト比較された場合、評価は著しく低いものとされ、採用されにくい。

一般的に掘削発生土のうち軟弱な土砂（高含水の泥土ではない）を地盤材料等として再利用するため

には、第1～3種建設発生土相当の品質要求性能を満足する改良土に改質することとされている。この改良土を生成する技術として、土質改良：セメント系固化剤添加（スタビライザーor 自走式土質改良機）が想定される場合が多いが、この工法は発生土の含水状態が塑性限界～液性限界にあり、多少なりとも土の骨格構造を有する地盤の改良に適用される技術（以下地盤改良技術と呼ぶ）であり、浚渫工事により液性限界を越えた場合や掘削に伴い骨格が乱され流動を伴う材料（泥土）を改良（以下泥土改良技術と呼ぶ）するには以下の点で適さない。

- ① 攪拌機の構造上、固化剤と泥土を均質に混合することは困難である。
- ② このため、生成された改良土は不均質な大塊状になり、地盤材料として流用するには解砕等の作業が別途必要となる。
- ③ 塊状改良土は、不均質で有るが故、解砕された粒子の品質はバラツキが多く、強度不足や浸水による再泥化を招来する。

このように本技術は、地盤改良技術とはまったく異なる技術であり、建設汚泥等を改良するための技術として比較検討する場合は、対象土の状態（軟弱な土砂か高含水の泥土か）に特に留意されたい。

6. おわりに

「改良したものを何に使うのか（使えるのか）」という質問がよく寄せられるが、改質土は適用用途に応じた要求品質を満足できれば幅広く土質材料として利用できるものである。必要なのは、「何に使用するか？」であり、建設汚泥のリサイクルは、利用したい目的とその利用用途に応じた要求品質を満す技術があつて初めて可能となる。

また、利用に当たっては、建設汚泥は産業廃棄物であり、関係法令の正しい解釈・運用に対する知識が必要である。利用する方法には、「自ら利用」「有償売却」「再生利用制度の活用」などがあり、これに従って利用しなければならないが、建設業では発注形態が複雑であることから、これらの制度に適合しない場合が多い。

このような課題に対し、建設汚泥のリサイクルを促進するには、本技術の活用もさることながら、行政の建設側及

び規制側並びに排出事業者が一体なって、具体的な再生利用計画を策定し実行していくことが不可欠であること最後に記述したい。

【参考文献】

1) 永松郁生他：土木学会「土木建設技術シンポジウム2005」, 『循環型社会形成を目指した泥土(建設汚泥)の再生利用技術について』, 2005

2) (財)土木研究センター：発生土改良促進のための改良工法マニュアル, 1997

3) 野口真一：粒状固化工法による建設汚泥の再資源化, 建設機械 2004 Vol. 40. No. 1

4) 建設省土木研究所：建設汚泥再生利用技術暫定マニュアル(案), 1996

5) (社)セメント協会：地盤改良マニュアル(第3版 p46-4)

Summary The recycling rates of construction byproducts have been significantly improved owing to various government measures and private technical development. In these circumstances, the recycling rate of construction sludge has remained low, posing a pressing problem to be solved in view of the need for improving the recycling rate of total construction byproducts. With this as a background, the authorities have recently stepped up their efforts to promote sludge recycling. The Ministry of the Environment issued a notification on the guidelines for judgment of the relevance of treated construction sludge to waste in July 2005. In response to this notification, the Japan Civil Engineering Contractors' Association issued commentary on the notification on January 2006 to promote understanding of its concept. Meanwhile, the Ministry of Land, Infrastructure and Transport formulated guidelines for recycling of construction sludge in June 2006, aiming for improvement in its recycling rate. This paper reports on a technology whereby fluid sludge with a high water content, such as construction sludge and dredged soil, can be recycled into a granular earth material by adding a polymer coagulant and solidification material suitable for the required quality and mixing for less than a minute.

【Keywords】 construction sludge, dredged soil, high water content, solidification into pellets, recycling, mud