

セメント混合処理作業船を用いた浚渫土の有効利用

宮崎良彦¹・湯 怡新²・落合英俊³・安福規之⁴・大嶺 聖⁴・土田 孝⁵

¹正会員 関門港湾建設株式会社 (〒750-0017 山口県下関市細江新町 3-54)

²正会員 工博 関門港湾建設株式会社 (〒750-0017 山口県下関市細江新町 3-54)

³フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

⁴正会員 工博 九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

⁵正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

埋立処分場が不足している中、港湾工事で発生する浚渫土の有効利用がますます求められてくる。このような社会的状況を背景として、セメント混合処理による浚渫土の有効利用が普及しつつある。

施工の確実性と品質確保を目標に、専用固化処理作業船が開発され国内の各港湾工事において実用されてきた。本文では、この専用作業船の構成と機能、及び施工実績を述べるとともに、名古屋港における実用事例を用いて施工上の技術課題と解決方法を明らかにし、浚渫土のセメント混合処理工法に関する新たな展望を示す。

Key Words: dredged soils, cement treatment, working ship, projects, long distance transportation

1. はじめに

循環型社会の構築に向けて、建設発生土を如何に有効に使うかは重要な課題となっている。浚渫土は建設発生土の1つと見なされるが¹⁾、その多くは含水比が高く(100~200%)、コーン指数が200kN/m²以下の泥土状態で発生する。このままでは地盤材料として使えないという問題があり、浚渫土を有効利用するためには何らかの処理を行う必要がある。

浚渫土の処理技術としては、脱水による減容化処理とセメント等による固化処理に大別される。減容化処理の代表例としてフィルタープレスなどの機械脱水工法が挙げられる。高压で脱水された浚渫粘土はそのまま地盤材料として使うことが可能になるが、脱水コストが高いため港湾工事での本格的な実施例は少ない。一方、セメント混合による固化処理工法は、海上の作業船において浚渫土を固化処理し所定の位置に打設する工法であり、港湾工事では現実的な方法となりつつある^{2),3),4),5)}。

施工の確実性と品質確保を最優先に、浚渫土をセメント混合処理するための本格的な専用作業船が既に開発され実用化されている。本文では専用作業船の主な構成、施工能力、作業工程および特徴を説明するとともに、名古屋港ポートアイランドにおける施工事例を示す。最後に施工上の課題および床掘置換工法への適用について展望する。

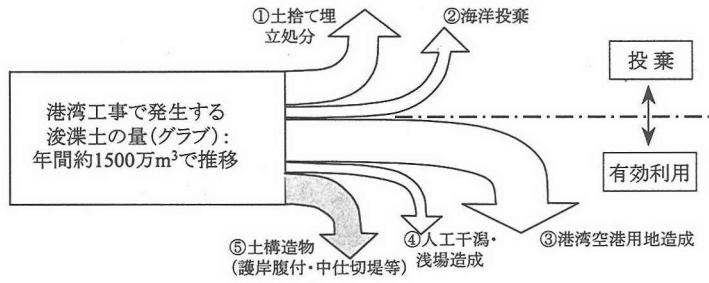
2. 浚渫土利用の現状

港湾整備や航路維持等に伴い大量の浚渫土砂が必然的に発生する。近年、わが国の港湾工事における浚渫土のうち、グラブ浚渫によるものは年間1500万m³程度で推移していることは、筆者らの調べで分かっている。浚渫土の発生と利用の現状を図-1(a)に示す。

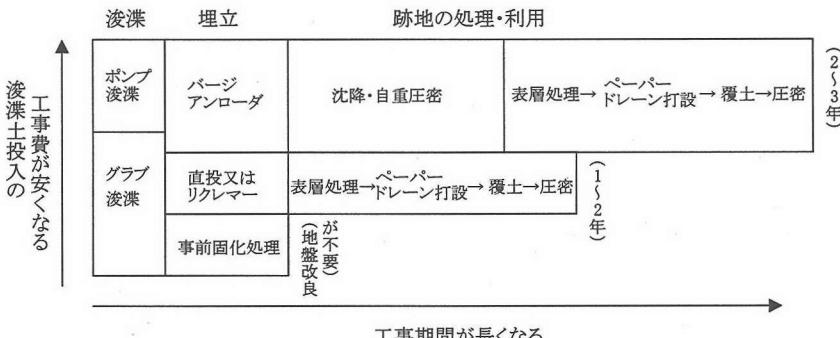
浚渫土は従来、①土捨て埋立処分や②海洋投棄される例が多い。しかし、近年は、海洋投棄処分に対する規制が厳しいうえ、浚渫土を受け入れるための土砂処分場を新たに建設することも難しくなった。このような背景から、③港湾・空港用地造成や④人工干潟・浅場造成等に積極的に有効利用しようとする事例が多くなってきた。

しかしながら、浚渫土砂は恒常的に発生する一方、海上空港のような大規模埋立は短期間に大量施工を行う性格がある。従って、発生側と利用側との需給ギャップは大きく、プロジェクトが無い時の浚渫土の利用が難しい。このため、需要が期間的に限定される③や④のほか、図-1(a)に示す⑤土構造物への有効利用を考える必要もある。例えば護岸腹付・裏込め、また築堤そのものにおいて、自然の石材・砂材の購入材料に替わる良質な地盤材料として、セメント混合浚渫土の新たな利用方法が期待される。

埋立利用方法の比較を図-1(b)に示す。ポンプ船を用いたスラリー方式の浚渫・埋立は安価であるメリットもあるが、最近では汚濁防止の観点からグラブによる浚渫と



(a) 滉渫土の発生と利用(処分を含む)の現状



(b) 滉渫土の埋立利用方法の比較

図-1 滉渫土の発生と利用の現状

圧送船や揚土船による埋立の事例が多く見られる。跡地利用を考えると、従来工法に必要とされる地盤改良工事を省くことができるから、工期短縮効果のあるセメント混合処理工法が普及しつつある。

港湾におけるセメント混合処理による浚渫土の固化処理工法には、専用船を必要とせずに既存の空気圧送船を活用する管中混合方式^⑨とプレミックス工法を始めとする専用作業船方式^{⑩, ⑪}がある。

管中混合方式は、一般に混合プラントを必要せず、大量施工・長距離運搬に対応できるメリットがある。ただし、空気圧送を行うため流動性を必要とし、概ね液性限界の1.3~1.5倍程度以上の含水比となるように加水が行われる。このため、流動性が高いことに起因する問題、例えば特定の勾配をもつ盛土法面が形成できることや、水中打設時の材料分離と汚濁発生の課題があり、⑤土構造物としての利用例はまだ少ない。

専用作業船方式としてのプレミックス工法は、セメント混合プラントおよび処理土を圧送するための専用装置を備えており、浚渫土に加水せずに一連の作業を行う特長がある。このため埋立造成工事のみならず⑤土構造物としての利用方法が数多く考えられ、その実施例も徐々に増えてきている。ただ、低含水比である故に処理土の粘着力が強く、長距離運搬となると圧送能力の問題は施工上の検討課題となる。

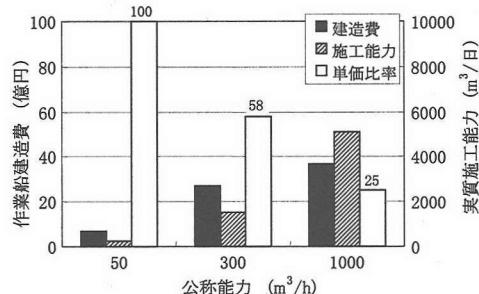


図-2 固化処理作業船の規模の検討

3. 専用作業船

(1) 専用作業船の開発

海上工事における施工条件は、海象条件に左右されやすく交通手段が限定されるなど、一般に陸上工事に比べ厳しい。他方、浚渫土は比較的均質な場合が多く発生土量も大きいといった特徴がある。このような事情を考慮して、品質の良い地盤材料を安く提供することを目標に、浚渫土の揚土からセメント混合処理、圧送、打設施工までの一連工程を同一船上で行える混合処理作業船を開発した。

図-2に作業船の規模について検討した結果を示す。処理能力を大きくするほど、設備投資(建造費)は増加す

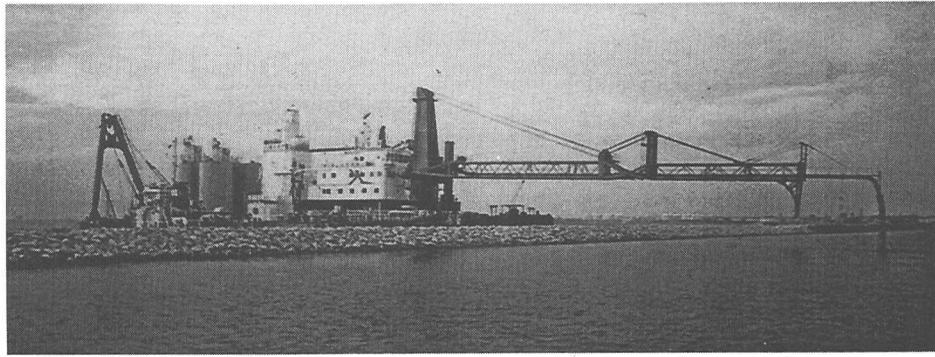


写真-1 セメント固化処理作業船の全景

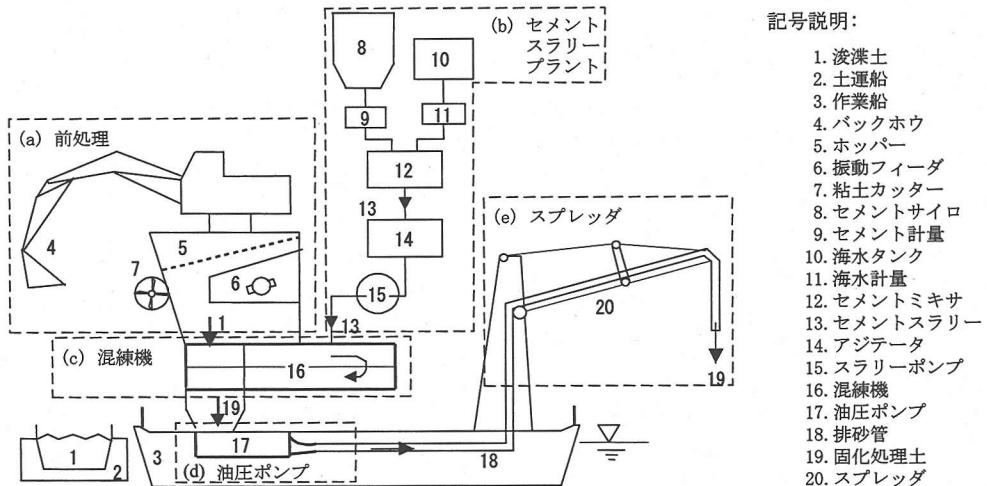


図-3 作業船の工程概要

る。しかし、1日あたりの実質施工能力は大幅に増加するので、結果的に大幅なコストダウンが図られる。図のように、例えば小規模の作業船($50\text{m}^3/\text{h}$)での単価比率を100とした場合、大型作業船($300\text{m}^3/\text{h}$)は58となる。更に大型化($1000\text{m}^3/\text{h}$)を進めると、施工単価を25に下げることが可能である。ただし、施工数量が100万 m^3 を超えるような大規模工事でなければ、大型船の年間稼働率と作業効率が低く、投資リスクが高くなると考えられる。

数10万 m^3 以下の中小規模の工事への適用性、稼働率と経済性を総合的に検討した結果、 $300\text{m}^3/\text{h}$ 級の浚渫土固化処理作業船を開発することにした。写真-1は開発した専用作業船の全景であり、その主な仕様を表-1に示す。専用作業船により浚渫土の揚土、土塊破碎、異物除去から、セメント混合処理、処理土の圧送、打設までの一連の作業工程を効率的に行えるようにした。図-3に本作業船の概要図を示すが、全体として(a)前処理、(b)セメントスラリー・プラント、(c)混練機、(d)油圧ポンプ、(e)スプレッダ（打設部）の5つの基本部分から構成されている。

表-1 固化処理作業船の主な仕様

施工能力	固化処理能力 最大圧送距離 打設深度	$300\text{m}^3/\text{h}$
		500m
-40 ~ +15 m		
処理工程	バックホウ ホッパー セメント消費量 水セメント比 混練機	4.5m^3 30m^3 50t/h $0.5\sim 5.0$ $0\sim 34\text{ rpm}$
圧送・打設	油圧ピストン 最大送泥圧 排砂管内径 排砂管材質 スプレッダ	$\Phi 500$, L3500(複列) 7 MPa 350 mm 鋼管／強化ゴムホース 56 m
位置管理	係船スパッド 打設位置 測深	850mm 角型×2本 RTK-GPS ソナー／レッド
船体寸法	長さ 幅 深さ 喫水	58.0 m 22.4 m 5.1 m 2.1 m

ここで、浚渫土の流れを追いながら各工程の作業内容について説明する。

(2) 浚渫土の固化処理工程

a) 浚渫土の前処理

まず、固化処理の対象となる浚渫土を海底より土運船に浚渫することとなるが、体積膨張の少ないよう、また有効利用に際して含水比に対する管理の必要性から、水中掘削に伴う水分増加の少ないグラブ船による浚渫が望ましい。浚渫土を積載した土運船は、専用作業船に接舷される。専用作業船による固化処理工程はここから始まる。

図-3に示す前処理工程では、浚渫土は大型バックホウ(容量 4.5m³)にて土運船からホッパーに投入される。ホッパーの上部にスクリーンが設置しており、250mm以上の土塊や異物(石塊、コンクリートブロック、ワイヤ、その他の粗大ゴミ等)が分別される。大きな土塊は粘土カッターによって碎かれ、スクリーンを通過した浚渫土と合流して混練機へ送られる。一方、異物はこのまま除去される。

b) セメントストラリーの製造と供給

セメントは専用のセメントサイロ船(600t 積み)により貯留される。1日のセメント消費量はセメント配合量と施工土量に左右されるが、およそ3~4日毎にセメントを供給することとなる。セメントストラリーを製造するため、セメントは自動的にスラリープラント側のサイロに移され、セメント計量器に供給される。スラリープラントにおいて、設定した水セメント比(W/C)に応じ、セメント量と海水量がバッチ毎に計量される。その後、セメントミキサにてセメントストラリーが製造され、アジデータに溜められる。セメントストラリーは、スクイズ式ポンプによってここから混練機へ定量的に供給される。

セメントストラリーの供給流量 $q(l/min)$ は、次の関係より決定される。

$$q = \frac{Q}{60} \left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{W}{C} \frac{1}{\rho_w} \right) C \quad (1)$$

ここに、

Q : 時間あたりの処理土の土量(m³/h)

C : セメント配合量(kg/m³)

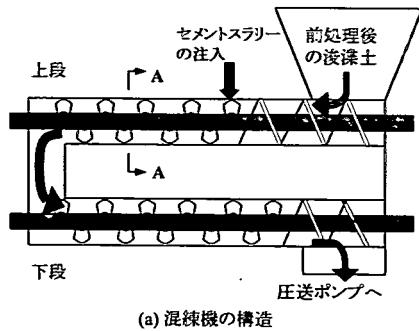
ρ_c : セメントの粒子密度、 $\rho_c=3.16 \text{ g/cm}^3$ (普通ポルトランド)、 $\rho_c=3.05 \text{ g/cm}^3$ (高炉B種)

ρ_w : 海水の密度、 $\rho_w=1.025 \text{ g/cm}^3$

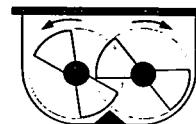
W/C : セメントストラリーの水セメント比

c) 浚渫土とセメントの混合

統いて、前処理された浚渫土とセメントストラリーは、混練機により混合され、固化処理土が製造される。図-4は混練設備の構造を示したものである。全体は上下二段



(a) 混練機の構造



(b) 2軸パドルの断面(A-A)

図-4 セメント混合設備の構造

から構成しており、攪拌羽根はスクリューとパドルの複合式を採用している。セメントストラリーは混練機の上段から注入される。上段のスクリューパートは混練とともに、浚渫土を供給する役割も果たし、施工速度に応じて回転速度を調節できる。下段は常に一定の回転速度(34rpm)で攪拌している。

浚渫土とセメントの混合がどの程度まで均一にこなせるかは混練機の性能から決まる。実工事における実測によると、処理土中のセメント含有量の変動係数は $V=0.15$ との結果が得られている^{9),10)}。しかし、時間あたりの混合処理土量をはじめ、浚渫土の性状やセメント配合量などの条件が変わったとき、混練精度はどう変動するかについて、今後実機における実測と評価を続けることが必要である。

d) 固化処理土の圧送と打設

① 処理土の圧送

セメント混合処理した浚渫土は、油圧ピストン式の圧送ポンプを用いて打設位置まで圧送する。圧送ポンプは、図-5に示すように、主に左右2本の油圧シリンダとロッドシーバから構成されている。運転中、一方のシリンダから処理土を送り出す間に、もう一方のシリンダに処理土を充填する。シリンダのストロークがなくなると、ロッドシーバの作動により、吸入と吐出の切り替えを行う。このように処理土を連続的に圧送するようになっている。

圧送ポンプの吐出圧力として、最大7MPaまで圧送可能であるが、機械的な条件により図-6のような性能曲線になる。時間当たりの圧送土量は、送泥圧力が一定値以下(約4MPa)の場合、油圧シリンダ等の機械動作に要する時間(サイクルタイム)によって決まり、本船の設計では500m³/hとなっている。しかし、圧送管の抵抗が

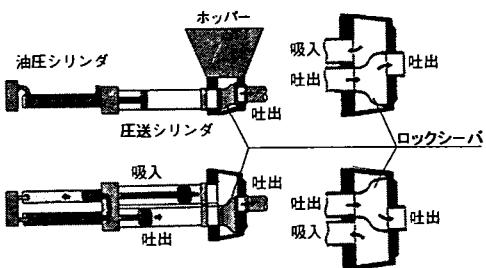


図-5 油圧ピストン式の圧送ポンプ

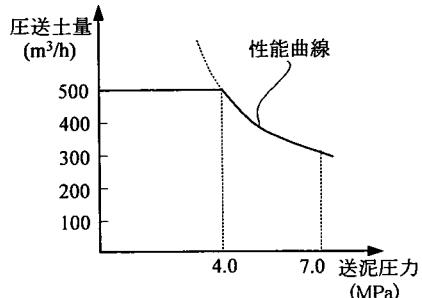


図-6 圧送ポンプの性能曲線

表-2 浚渫土を固化処理したプレミックス土の施工実績表

No.	工事名称	件数	施工数量 (m³)	浚渫土 ^{*1}		セメント 配合量 (kg/m³)	一軸圧縮 強さ $q_u(28)^{*2}$ (kN/m²)	使用目的	特記事項
				土質	含水比(%)				
1	磯崎漁港固化処理埋立工事	1	40,766	粘土	196.6	70	368	表層固化	
2	南本牧埋立土砂漏出防止工事	3	154,051	粘性土	97.2	90	1009	漏出防止	法勾配 1:3
3	石巻港埋立(固化処理)工事	3	97,645	粘性土	254.0	60	122	埋立	
4	六甲アイランド岸壁災害復旧工事	2	16,915	粘土	103.0	70	451	裏埋め	
5	新北九州空港地盤改良実験工	1	6,888	シルト	120.4	80	466	表層固化	
6	新海面処分場建設工事	8	376,288	粘性土	172.0	50	330	廃棄物護岸	$k < 10^{-6} \text{ cm/s}$
7	名古屋港第3PI埋立工事	3	153,619	粘性土	101.2	80	869	腹付,仕切堤	法勾配 1:3
8	大井埠頭桟橋裏込工事	1	34,677	粘土	102.2	70	409	埋め戻し	
9	岩国飛行場移設工事	2	673,000	シルト	110.3	50	301	根固め	法勾配 1:5
10	橘湾港湾環境整備工事	1	49,246	粘土	51.6	50	205	廃棄物護岸	法勾配 1:3
11	苅田港本港埠頭用地造成工事	1	20,330	粘土	200.0	80	456	腹付け	法勾配 1:3
工事合計		26	1,623,425						

*1 土運船から一定の頻度で採取した試料の平均値であり、含水比の変動係数は $V=0.08 \sim 0.28^9$ 。

*2 工事仕様書により現場採取した改良土の 28 日養生後の試験値、頻度は 1 回 / 1 日又は 1 回 / 2000m³ 程度。

大きくなると、圧送システムとしての圧送能力は、送泥圧力の増加につれて低下する。

② 处理土の打設

処理土の打設は、水中打設と気中打設との異なった施工条件に分けられる。水中打設を行う場合、処理土が打設に伴って材料分離を起こさないことが重要である。水中打設については 5 章で述べることとする。一方、気中部での施工においては、水中材料分離の恐れはなくなるものの、固化処理土を締固めしないで直接盛土や法面を施工するときには、せん断強度に関する施工管理が重要である。一般的に、せん断強度が大きいほど、より急な法勾配が形成でき、速やかに施工できる。具体的な管理办法については次章の施工事例において説明する。

4. 浚渫土固化処理の応用実例

専用のセメント混合処理作業船による施工事例は、表-2 に示す通り、工事件数で 26 件、施工総土量で約 162

万 m³ に達する。工事の内容は、単純な埋立から覆土工事、護岸腹付工事や築堤工事と多岐にわたる。専用作業船の特長は、一連の固化処理工程を同一船上で効率的に行うようになったこと、また低含水比の浚渫土に加水せずに混練と圧送ができる装置を搭載したところにある。このため、護岸腹付や築堤等いわゆる土構造物への応用に適している。

ここで、名古屋港第3ポートアイランドにおける、セメント混合処理した浚渫土を用いた護岸腹付け工と中仕切り堤の施工実例（表中 No.7 の事例）を取り上げる。この埋立地は港湾整備事業から発生する浚渫土砂の処分地として計画されたものである。浚渫土の土捨てに伴う護岸外への濁水の漏出を防止する必要が生じた。そこで、浚渫土を有効利用した固化処理土による腹付け施工及び築堤施工が行われた。

(1) 護岸腹付け工の施工事例

図-7 に腹付け工の概要図を示す¹¹⁾。法面の下部は水面下にあり、法肩部は気中に 1:3 の勾配となっている。セ

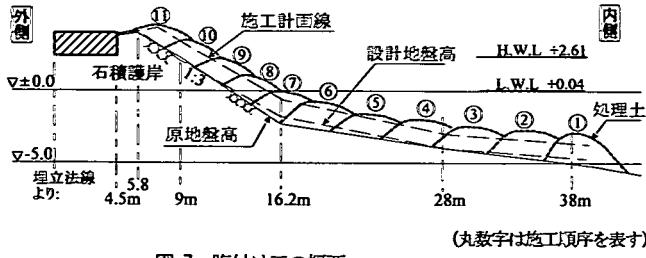


図-7 腹付け工の概要

メント混合直後の処理土は非常に軟弱なので、法面に沿って必要な法勾配を確保して施工できるかどうか、この現場は初めての施工事例であった。ここで、図-8(a)のような斜面において処理土打設時の安定性について考える。この斜面に沿い、すべり落ちる力 $\gamma_t h \sin \theta$ がある。これに対し、斜面で発揮しうるせん断抵抗力 IS_u がある。両者の釣り合いから式(2)の関係が得られる。

$$h = \frac{S_u}{\gamma_t \sin \theta} \quad (2)$$

ここに、

S_u は打設時のせん断強度、 $S_u=1.5 \text{ kN/m}^2$ 。

γ_t は処理土の単位体積重量、 $\gamma_t=15 \text{ kN/m}^3$ 。

θ は斜面の傾斜角度、 $\theta=\tan^{-1}(1/3)$ 。

以上のように、一度に盛れる処理土の厚さは、式(2)で試算すると $h=30 \text{ cm}$ 程度が限度である。

このようなせん断強度を得るには、浚渫土にセメント混合するほか、浚渫土の含水比に対する管理も重要である。実工事の経験では、含水比が液性限界の 1.3 倍以下の浚渫土なら、混合処理後のせん断強度はほぼ 1.5 kN/m^2 に達する。更に、施工効率を向上させるため、実施工では図-7 のように護岸の法尻より、一段ずつ積み上げていく方法で処理土を打設した。図-8(b)に示す施工条件に基づいて、円弧すべりによる安定解析を行った。その結果、下の層に約 4 kN/m^2 の非排水せん断強度が発現できれば、施工時の安定が確保できることが分かった。

そこで原位置において、幅 4cm、高さ 4cm のハンドペーンによるせん断強度測定を実施し、 $S_u > 5 \text{ kN/m}^2$ を確認してから次の層の打設を再開するよう、施工管理を行った。これにより、腹付け工の施工が順調に行われ、設計通りの形状を計画工期内に完成することができた。

(2) 遊水池仕切り堤の施工事例

当埋立地への浚渫土砂処分の進捗とともに、埋立地内において遊水池を設け、汚濁余水を沈殿させてから外部へ排出することが必要となった¹²⁾。本工事は、埋立護岸にある余水吐の周囲に幅 60m、長さ 195m の遊水池を築造することであった。

図-9 に仕切り堤の計画断面図を示す。原位置でのベ-

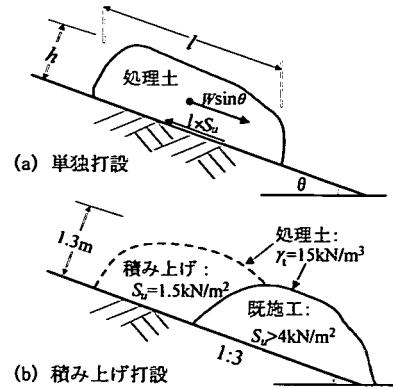


図-8 斜面上における処理土の安定

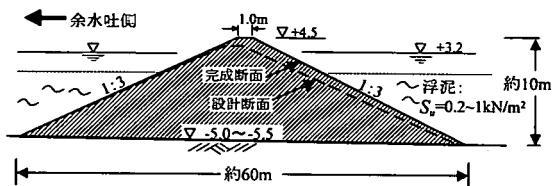


図-9 仕切り堤施工の計画断面

ンせん断試験 (JGS1411, 1995) より、既に堆積した浮泥のせん断強度は $S_u=0.2 \sim 1.0 \text{ kN/m}^2$ とのことが分かった。既往の地盤調査において在来地盤は、 $S_u=2.3+2.3z$ ($\text{kN/m}^2, z=0 \text{ at } -8.5 \text{ m}$) となっている。

今回の場合、護岸外係留の専用作業船と施工位置に 100~200m の距離があり、作業船固有のスプレッダでは打設位置まで届かない。そこで、作業船の処理土排出口から 220m の圧送管をつなぎ、先端台船による撒き出し方法を採用した。

このように、施工上、①セメント混合後の処理土は安定して圧送作業が行えるのか、②浮泥中に、どうすれば堤体が築き上げられるのか、との技術的課題があった。

長距離圧送について、浚渫土を加水処理する方法は取りやすい解決手段であるが、含水比が高すぎると処理土の固化強度に悪影響を及ぼす。更に処理土が流動状態となつた場合は、打設先端における盛土施工はできなくなる恐れもあるので、事前検討において次のような必要条件を把握した。

- ・長距離圧送(220m)； $S_u < 2 \text{ kN/m}^2$ が必要。

- ・盛土法面形成； $S_u > 1.5 \text{ kN/m}^2$ が望ましい。

両方の限界を考え、液性限界 77% の浚渫土に対し含水比の適切な範囲は 80~100% と経験的に判断した。工事中、土運船の配船による含水比管理を実施した結果、圧送運搬作業は正常に行われた。

原位置に既に 4m ほどの浮泥が堆積していたが、浮泥中の打設時には、打設管先端を所定深さに挿入し、圧送圧力をを利用して浮泥を押しのけながら改良土を打設する

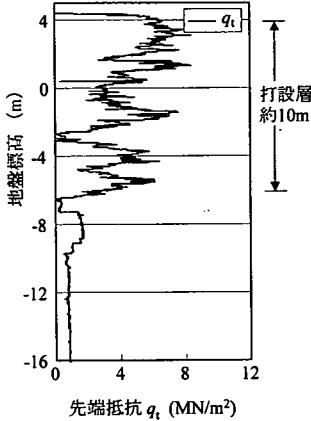


図-10 コーン貫入試験の結果

要領で施工した。処理土による浮泥の置換を確実にするため、常に以下の管理を徹底した。

- ・GPSによる打設管の位置管理
- ・レッド測深による打設層厚の管理
- ・打設点ごとの打設土量管理

仕切り堤の盛土施工が終了後、コーン貫入試験（先端角 60°、断面積 10cm²）による地盤調査を行った。図-10 の調査結果をみると、標高-3m 付近に若干浮泥の介在が認められるものの、ほぼ全面置換となっていることを確認できる。浮泥介在の原因は、本施工と平行して大量の浚渫土砂が埋立地内に投入されていたことによるものである。

5. 施工上の技術課題について

(1) 压送抵抗の検討

4 章の施工事例のように、現場条件により、作業船間近で打設できる場合と、作業船から打設位置まで圧送運搬しなければならない場合がある。

管内の圧力増加をもたらす送泥抵抗は、土質性状と運搬距離により算出できる。含水比が高くなるに従い浚渫土は固体から液体に変化する。管内の土砂は塑性体か流体かによって、計算方法が変わってくる。塑性体として圧力損失を算定する場合、図-11 に示すように、圧送管内において土砂はせん断変形せず全体が平行移動すると、ここで仮定する。圧送距離 Δl 間で発生する圧送抵抗 Δp は次のように求められる。

$$\Delta p \pi R^2 = 2\pi R \tau_0 \Delta l$$

$$\Delta p = \frac{2\tau_0}{R} \Delta l \quad (3)$$

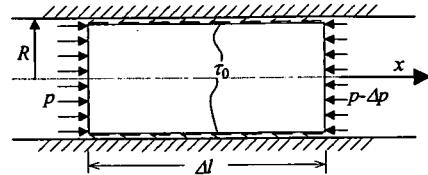


図-11 塑性体としての圧力損失計算

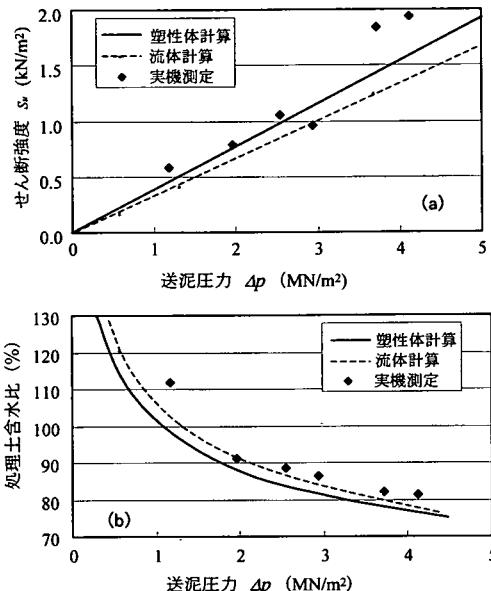


図-12 管内圧力の検討

ここに、 R は圧送管の半径、 τ_0 は管壁面のせん断強度である。 τ_0 は圧送土砂のせん断強度 S_u と等しいと見なす。完全に乱された粘性土の非排水せん断強度について、土田ら¹³⁾ は以下の関係式を提案している。

$$S_u = 1.5 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-5} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4)$$

ここに、 w_L は粘性土の液性限界である。

図-12 の実線で式(3)、(4)に基づいた計算結果を示す。ただし、 $R=0.167\text{m}$ 、 $\Delta l=220\text{m}$ 、 $w_L=77\%$ とし、セメント混合の影響を無視した。

含水比が非常に高く、浚渫土はスラリー化した場合流体として扱う必要がある。高含水比の浚渫土はビンガム流体と見なせる場合が多い¹⁴⁾。図-13 にビンガム流体¹⁵⁾ のモデルを示す。管内でせん断応力 τ が降伏応力 τ_0 を超えない芯の部分はせん断変形を生じず、平行移動で前進する。一方、芯と管壁の間の部分は、せん断応力 τ が降伏応力 τ_0 を超えており、式(5)によりこの間の流速分布が表され、また式(6)により管内を通過する土砂の流量が求められる。

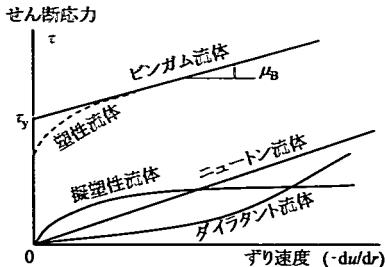


図-13 流体のモデル

$$\tau = \tau_y + \mu_B \left(-\frac{du}{dr} \right), \quad \tau = \frac{\Delta p}{2\Delta l} r \quad (5)$$

$$Q = \pi R^3 \frac{\tau_y}{\mu_B} \alpha, \quad \alpha = \frac{a^4 - 4a + 3}{12a} \quad (6)$$

式中、 μ_B はビンガム流体の粘性係数である。 a は比栓半径と呼ばれ、 $a=r_y/R=\mu_B/\tau_y$ となる。 r_y は降伏しない芯の部分の半径で、 τ_y は管壁面におけるせん断応力である。一般に、式(6)より逆算することによって比栓半径 a が求まる。比栓半径 a より、圧送抵抗 Δp は次のように求められる。

$$\Delta p = \frac{2\tau_y}{aR} \Delta l \quad (7)$$

式(7)により試算した結果を図-12 の破線で示した。この試算で $Q=175\text{m}^3/\text{h}$ とし、 $\tau_y=0.8\text{Pa}$ 、 $\mu_B=3\sim10\text{Pa}\cdot\text{s}$ と仮定した。この仮定は流体としては大きめのパラメータである。このように、土質条件や、圧送距離、圧送流量、圧送管の内径、耐圧の諸条件が明確になれば、長距離圧送について検討可能となる。

図-12 に吐出口でのせん断強度、含水比と圧送ポンプの送泥圧力を併せて示した。図-12 の検討と実測結果によると、含水比が 100%以上か $S_0 < 0.5\text{kN/m}^2$ の場合、圧送土量の低下を伴うような、大きな送泥圧力は発生していない。施工中の送泥圧力は常時 2~4.5MN/m² 程度であった。

(2) 処理土の水中打設

海上工事での固化処理浚渫土の施工では、処理土の水中打設が求められてくる。水中打設の施工管理は陸上打設よりも難しく、水中材料分離のないよう特に注意しなければならない。水中で材料分離すると固化処理の改良効果が期待できず、周辺海域に汚濁拡散をもたらす恐れが考えられる。材料分離するか否かは土質条件と打設方法による。粘着力の強い粘性土ならば材料分離の可能性はそれだけ小さいといえるが、粘着力の弱い砂質土の場合は分散防止剤などの混和剤を固化処理土に配合する対策が必要となる。一方、打設方法についてどうすれば水

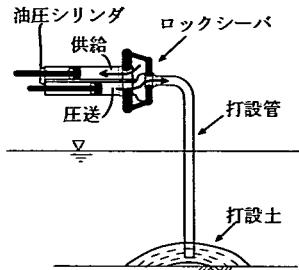


図-14 圧入方式による水中打設

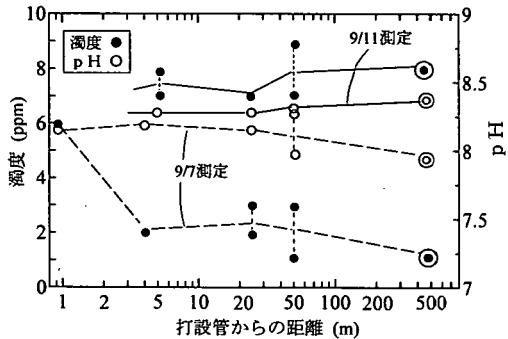


図-15 水中打設時の水質調査

中材料分離を起こしにくいのかを調べるための実験を実施している^{16), 17)}。それによると、水中で処理土の自由落下を避け、打設管を着底させて圧入方式による打設が有効である。そこで実施工では、図-14 に示すように、打設管の吐出口をつねに海底に着底させた状態で打設するように工夫している。つまり、打設土は単に上から落下して堆積していくのではなく、マグマが供給された火山の溶岩ドームが徐々に成長するように、打設土全体が膨れ上がって海底地盤が形成していくのである。圧入方式により水中打設時の材料分離が有効に抑えられると考えられる。確かにこの方式では圧送管内で閉塞しやすくなるが、表-1 に示す通り本作業船に最大送泥圧 7MPa の油圧式圧送ポンプを備えており、この強制的な送泥圧により閉塞することなく連続施工が可能である。

また、打設速度が 1m/s を超えると水中材料分離の可能性が大きくなるが^{18), 19)}、直径 0.35m の打設管で 300m³/h 程度の処理土を打設する場合、実質打設速度は 0.87m/s である。この工法では処理土は打設完了まで海水に触れず、水中材料分離の発生が有効に抑制されると考えられる。図-15 に腹付け施工の水中打設時に行った水質調査の結果を示す。浚渫土は表-2 の No.7 に示すように、粘性土であった。図中の 2 重丸は処理土の水中打設の影響を受けないとされる位置での測定値である。両者を比較して、水中打設に伴う海水への影響は小さいといえよう。

6. 今後の展望

(1) 低含水比の長距離圧送について

a) 低含水比処理の必要性

浚渫土（固化処理したものも含め）を長距離運搬する需要は必ずある。大量に加水を行い、浚渫土をスラリー化した上で、パイプ排送で埋立地内へ投入する方法は従来の安易な施工法である。スラリー化した場合は、次のような4つの問題が存在する。

①濁り水の発生

スラリー状の土砂を投入すると、埋立地内に大量の余水が発生する。このような濁り水が外部に流出すると環境問題に発展しかねないことから、実際様々な汚濁防止対策を講じる必要が出てくる。これらの対策には大きな費用を要し、また万全には至っていない。これに対し、浚渫土を無加水で、自然含水比に近い状態で埋立てた場合、埋立時の余水はそもそも発生しない。

②浚渫土の体積増加

建設発生土等の減量化・減容化を図るために、脱水処理による土質改良が行われている。浚渫土の加水処理は現在の社会的要請に背くものである。われわれは廃棄物処分場の不足に直面しており、浚渫土の体積を膨らませるようなことが避けたい。

③跡地利用の難しさ

埋立跡地の利用を考える上で、スラリー土砂を基に出来上がった埋立地盤は、土地として使えるには圧密等による地盤改良が必要であり、施工面・工程面での難しさがある。これに対し、浚渫土を自然含水比のままで埋立に用いた場合、図-1(b)に示したように跡地の地盤改良条件は明らかに改善される。

④固化強度の低下等

近年国内で、セメント混合処理して浚渫土を埋立材料として用いる傾向が強まっている。改良土の強度は、その含水比の2乗に反比例することが、筆者ら²⁰⁾の研究によって明らかにされており、含水比が高すぎると圧縮強度が大幅に低下することになる。また、処理土を用いて直接腹付けや仕切り堤を施工するケースも多く、この場合含水比を如何に低く管理するかは施工管理上重要な鍵となっている。

b) 現有圧送設備の限界

図-6に示すように、圧送ポンプの送泥圧力は最大7MPaに達するが、正常運転時には4MPa以下となる。また、湾曲部等の変形を吸収するためのゴム管の耐圧は3.5MPa程度にとどまっているので、正常運転時の管内圧力は3~4MPa以下が妥当である。

表-3に通常の施工条件および実験範囲を概略に示した。明らかに処理土の圧送条件が悪く、実験において250~300m程度が限界であることが分かっている。

表-3 現状の長距離圧送の限界

圧送土砂の種類	浚渫土	処理土
含水比の範囲 (w_g/w_t)	1.0~1.3	1.0~1.3
推定せん断強度 $S_u(kN/m^2)$	0.5~1	1~2
圧送管径 d (mm)	550	350
圧送流量 Q (m^3/h)	400~800	250~300
実績の最大圧送距離 (m)	500~800	250~300

これは、浚渫土にセメントを混合すると数分間という短時間でせん断強度が増え始め²¹⁾、表のように圧送管内のせん断強度は浚渫土に比べ2倍ぐらい大きいからである。

c) 長距離圧送の改善方法

わが国の海上埋立の実情を考えると、圧送距離が500m程度に到達すれば大抵の圧送需要には対応できよう。表-3の現状をみると、浚渫土についてはほぼ達成できたものの、処理土については必要圧送距離の半分程度にとどまっている。そこで、圧送条件の改善策として、次のような方法が考えられる。

①加水処理による方法

汎用的な手段であるが最善の方法とはいはず、6.(1)a)で述べた諸般の理由から、積極的に採用すべきものではない。

②ブースターによる中継

圧送ポンプ2台によるリレーを行うものであり、確実に運搬距離を伸ばせる方法である。ただし、圧送にかかる費用はほぼ2倍と高くなるなど、施工上の必要に応じた検討をしなければならない。

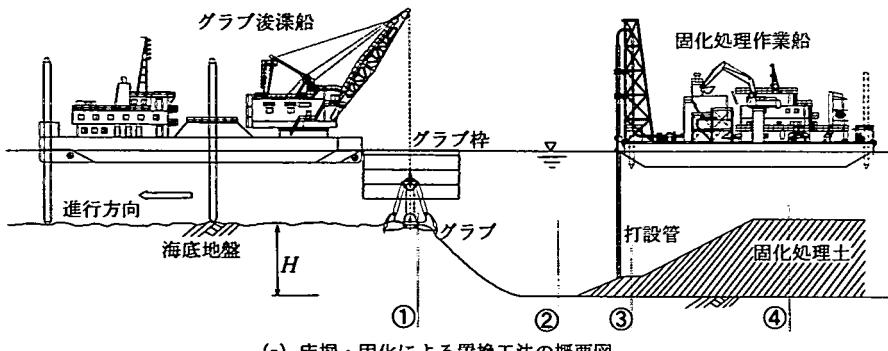
③圧送後のセメント混合

表-3に示すように、セメントを混合すると粘着力が大きく増加し、圧送条件は明らかに不利になる。そこで、先に無処理の浚渫土を先端まで圧送し、打設直前に混合を行う方法が考えられる。この場合、

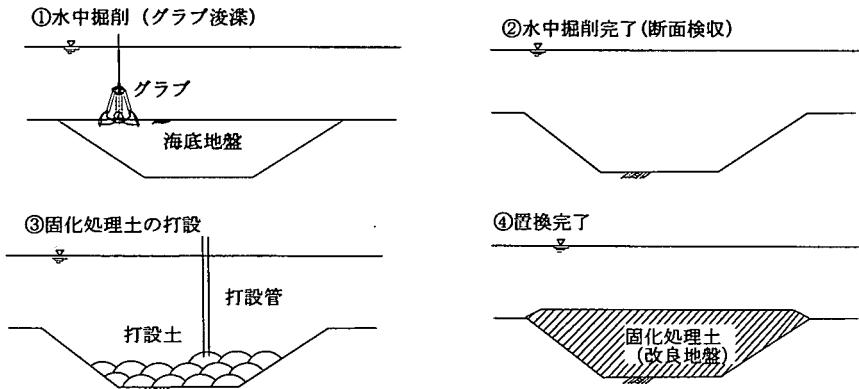
- ・浚渫土とセメントスラリーを別系統で先端に送り、先端で混合、打設を行う
 - ・浚渫土とセメントスラリーを一定の比率の下で、同じ圧送管で先端に送り、先端で混合、打設を行う
- 方法がある。このうち、前者の方法に関して、浚渫土とセメントスラリーが別々に500m以上送れることができれば既に実証済みで、先端の混練設備も開発されている。したがって、この方法は直ちに実用できる段階にある。一方、後者の方法について、いかに一定の比率で浚渫土とセメントスラリーを定量供給するか、圧送抵抗の低減効果は十分に得られるかは、今後の検討課題となる。

④圧送管のライニング

圧送管内壁の材質を変え、摩擦や付着性が小さく耐磨耗に優れた材料を採用することによって、圧送抵抗を減らす方法である。



(a) 床掘・固化による置換工法の概要図



(b) 各施工工程の状況

図-16 床掘固化置換による地盤改良工法の提案

この場合の課題として、高性能材料を選び、土砂の性状及び圧力を変えながら摩擦（又は粘着力）による抵抗を実験的に把握することと、該当材料をどうライニング加工するかは検討課題である。

(2) 床掘置換工法への適用

建設発生土の排出抑制を図るうえで、工事で残土を発生させないこと、発生した場合は場内において転用することが最も有効であるとされている。このような考え方に基づき、筆者らはここで床掘・固化処理・置換による地盤改良工法を提案したい。

海上・陸上を問わず、砂置換による地盤改良工法は最も古くから用いられてきた地盤改良技術である。即ち、軟弱な地盤層を掘削し取り除いた後、良質な砂質土を使って埋め戻し地盤の支持力を向上させる方法である。この場合、置換対象となる軟弱土は、浚渫後に場外へ搬出し適切な方法で処分する必要がある。同時に、置換用の砂を新たに調達し現場に搬入して、適切な方法で埋め戻さなければならない。また、地震時の液状化防止のため、置換砂の締固め状態について慎重に管理する必要がある。

しかし、発生浚渫土砂の処分問題に加え、良質な置換

砂の調達が困難になっている現状と相俟って、砂置換工法は極めて制約された状況に置かれている。そこで、発生浚渫土砂を現地で固化処理し利用することにより、この二つの問題を解決しようとする考え方があり得る。ここで提案する地盤改良工法は、砂置換と深層混合処理の両工法の原理を兼ねており、図-16を用いてその実施工工程を説明する。

設定した置換範囲において、原地盤の軟弱土をグラブ浚渫にて掘削を行う。浚渫土は土運船に一時的に貯留しておく。土運船は、専用固化処理船の作業能力を考えて 3000m^3 積み程度のものが適当である。浚渫土を積載した土運船を固化処理船に接舷し、浚渫土は固化処理船によって揚土・選別・固化処理・水中打設される。選別工程において土以外の異物は排除される。これらの過程において固化処理浚渫土が海中に落下・飛散しないよう注意し、水中打設に伴う汚濁発生を防ぎ固化処理土の品質確保が行われる。なお、セメントストラリーの添加によって、元の地山に比べ1割程度の体積膨張があるので注意を要する。

表-4に床掘固化置換工法と、一般に用いられている各地盤改良工法の比較を示した。ここで提案する新しい地

表-4 海底軟弱地盤の地盤改良工法の比較

地盤改良工法	砂置換工法	サンドコンパクション工法	深層混合処理工法	床掘固化置換工法
護岸・岸壁				
特徴の比較	余剰浚渫土 砂・石材 止水性 液状化	大量の浚渫土砂が発生する 置換砂とマウンド石材が必要 止水性はない 液状化のおそれがある	盛上りと基礎部の浚渫が必要 SCP砂とマウンド石材が必要 止水性能に問題あり 液状化の可能性はほとんど無い	僅かな盛上りと基礎部の浚渫が必要 マウンド石材が必要 マウンド部処理すれば止水可能 液状化することは無い
				浚渫土は完全に再利用 石材が少々必要 止水構造である 液状化することは無い

盤改良工法には次の特長が挙げられよう。

- ①浚渫土はほぼ完全に現地で利用される。
- ②新たな良質な砂の調達が不要となる。
- ③止水性構造となり得る。

近年、廃棄物護岸が数多く建設されるが、その場合、護岸構造物の止水性が特に要求される。床掘固化置換工法では構造物全体に止水性を持たせることが比較的容易であり、廃棄物護岸への適用が期待される。また、建設コストについて、筆者らの試算では、深層混合処理工法に比べて経済的に有利になる結果を得ている。

なお、本工法の設計手法がまだ確立されていない。原理的には深層混合処理工法と同じく固化による改良であるが、実施に当たって床掘りを行うことが前提となっている。したがって、現段階において従来の砂置換工法に準じて浚渫断面を設定し、改良地盤の強度については従来の置換砂地盤と同等またはそれ以上に設定すれば差し支えないであろう。今後実用化に向けて、設計面、施工面、経済面、環境面などにおいて検討課題が多く残されているが、将来性のある工法と考える。

床掘固化置換工法は旧運輸省港湾技術研究所、現(独)港湾空港技術研究所と関門港湾建設(株)が平成12年に共同出願した特許工法であるが、まだ施工事例はない。

7. まとめ

- (1) わが国の港湾工事における浚渫土の発生と有効利用の現状について述べた。
- (2) 品質の良い地盤材料をより安く提供することを目的

として、セメント混合処理から打設施工までの工程が効率的に行える専用作業船を開発した。本報告では、浚渫土の混合処理の作業工程を述べ、その特徴を説明した。

- (3) セメント混合処理した浚渫土を用いた護岸腹付け工と仕切り堤の施工事例を示した。法面形成を必要とする施工では、現場で含水比を液性限界の1.3倍以下に、またはせん断強度を 1.5 kN/m^2 に管理することが必要である。圧送については塑性体と流体としての検討方法を明らかにし、水中・浮泥中の打設については圧入による置換え打設が有効であることを示した。
- (4) 浚渫土を自然含水比のままで埋立できれば、余水処理などの必要がなくなり、総合的に利点が多い。セメント混合処理による有効利用の場合でも、なるべく加水処理は避けたい。しかし、処理土の圧送抵抗が大きく長距離圧送が難しいので、施工上の問題となっている。現状では圧送可能な距離は300m以下にとどまり、実際よくある500m程度までの圧送需要に応えられない。今後、長距離圧送に関する技術開発が必要である。
- (5) 浚渫土の現地利用を図る地盤改良工法として、床掘固化置換工法を提案した。これは、軟弱海底地盤を掘削し、直ちにセメント混合による土質改良を行い海底に埋め戻す工法である。この工法は、不用な浚渫土の発生が回避でき、良質な置換砂を必要としない特長がある。

参考文献

- 1) (財) 土木研究センター：建設発生土利用技術マニュアル(第2版), p.5, 1997.

- 2) (社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.360-361, 1999.
- 3) 善見政和, 笹田 彰, 土田 孝, 湯 怡新, 宮崎良彦: セメント固化処理による浚渫土の新しい有効利用法, 第 55 回土木学会年次発表会, VI, pp.467-468, 2000.
- 4) 善 功企: 液状化対策としての事前混合処理工法の開発, 土と基礎, 土質工学会, Vol.38, No.6, pp.27-32, 1990.
- 5) (財) 沿岸開発技術研究センター: 事前混合処理工法による処理地盤の設計について, pp.12-21, 1989.
- 6) (財) 沿岸開発技術研究センター: 管中混合固化処理工法技術マニュアル, p.127, 2001.
- 7) 運輸省港湾局技術課: 浚渫土のリサイクル技術に係る民間技術評価証, 浚渫軟泥土のプレミックス工法, 1998.
- 8) 宮崎良彦, 湯 怡新, 酒井能具, 中園嘉治: 海上埋立におけるセメント混合浚渫土の有効利用事例, 土木学会海洋開発論文集, 第 18 卷, pp.71-76, 2002.
- 9) 湯 怡新, 宮崎良彦: セメント混合浚渫土の固化強度と均一性評価, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.49, No.5, pp.4-6, 2001.
- 10) 湯 怡新, 宮崎良彦, 落合英俊, 安福規之, 大嶺 聖: 固化処理した浚渫土の固化強度に関する品質評価, 九州大学工学集報, 第 75 卷第 1 号, pp.1-8, 2002.
- 11) 卷渕正治, 土田 孝, 橋本文男, 湯 怡新, 浜福健二: セメント固化処理した浚渫土による護岸法面の腹付け, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.831-832, 1999.
- 12) 善見政和, 笹田 彰: 名古屋港第三ポートアイランドの遊水池仕切り築堤の施工, 土木技術, 第 55 卷 7 号, pp.75-80, 2000.
- 13) 土田 孝, 洪 振舜, 渡部要一, 小川富美子: 練り返し
- 粘性土の非排水強度と正規化含水比の関係, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.543-544, 1999.
- 14) 鶴屋広一: 回転粘度計による底泥の流動特性の検討, 港研資料, No.566, 1986.
- 15) 富田幸雄: 「水力学」流れ現象の基礎と構造, 第 10 章非ニュートン流体の流れ, 実教出版(株), pp.261-283, 1982.
- 16) 宮崎良彦, 湯 怡新, 落合英俊, 安福規之, 大嶺 聖: セメント混合処理土の水中打設強度と水中施工に伴う海域への影響, 九州大学工学集報, 第 74 卷第 2 号, pp.99-106, 2001.
- 17) 湯 怡新, 宮崎良彦, 落合英俊, 安福規之, 大嶺 聖: セメント混合処理土の水中打設における海水環境への影響, 土木学会論文集, No.708/III-59, pp.211-220, 2002.
- 18) 土田 孝, 松下弘志, 吉原正博, 輪湖建雄: 水中打設時における気泡混合処理土の材料分離抵抗性の評価, 土木学会論文集, No.644/VI-46, pp.1-12, 2000.
- 19) 今井五郎, 早矢仕雅弘, 佐藤幸孝: 高止水性を目的とした土質材料の流動特性と水中不分離性, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.1187-1188, 2000.
- 20) 宮崎良彦, 湯 怡新, 落合英俊, 安福規之, 大嶺 聖: 固化処理した浚渫土の一軸圧縮強度とセメント含有量及び含水比の相関関係, 九州大学工学集報, 第 74 卷第 1 号, pp.1-8, 2001.
- 21) 卷渕正治, 土田 孝, 山根信幸, 湯 怡新, 浜福健二: セメント固化処理した浚渫土の初期強度発現特性, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.829-830, 1999.

(2002. 8. 12 受付)

UTILIZATION OF CEMENT TREATED DREDGED SOIL WITH WORKING SHIP

Yoshihiko MIYAZAKI, Yi Xin TANG, Hidetoshi OCHIAI, Noriyuki YASUFUKU,
Kiyoshi OMINA and Takashi TSUCHIDA

Special working ships, on which cement soil mixing plant and conveying device are pre-installed, have been developed and found practical applications in coastal engineering. Two examples of widening a dyke and building an embankment inside the reclamation by use of soft dredged soil are presented. Long distance transportation of the cement treated soil is an urgent problem to be solved. Though the working ships are able to convey cement treated dredging of natural water content by 250~300 m, many projects require a transportation as long as 500 m. Some improving ideas are discussed. Finally, a ground improvement method by use of the introduced cement treatment technique is suggested, so as to eliminate the disposal of dredging.