

海上埋立におけるセメント混合浚渫土の有効利用事例

APPLICATIONS OF CEMENT TREATED DREDGING TO MARINE CONSTRUCTION PROJECTS

宮崎良彦¹・湯 怡新²・酒井能具³・中園嘉治³

Yoshihiko MIYAZAKI, Yi Xin TANG, Yoshitomo SAKAI and Yoshiharu NAKAZONO

¹正会員 関門港湾建設株式会社 京浜支店 (〒231-0803 神奈川県横浜市中区本牧十二天3-10)

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

³関門港湾建設株式会社 技術研究部 (同 上)

Practical reuses of soft dredging are presented in this paper. Other than disposal of the dredging into reclamation area, the dredging after proper treatment with cement shows fairly good characteristics, particularly suitable for leak-proof purposes.

An empirical and simple correlation among compressive strength, cement content and water content is proposed and the variance property of compressive strength is interpreted on the basis of this correlation. Aiming to provide a recycled geomaterial with high quality and to reduce construction cost, special working ships have been introduced in practical engineering. Improved dredgings have already found applications in various marine construction projects, and two examples in Nagoya Port are presented in detail. Finally, difficulties are mentioned concerning the reuse of dredging from a practical viewpoint.

Key Words : *dredging, cement treatment, strength property, quality control, special working ship, dike widening, embankment*

1. はじめに

航路維持等による浚渫土砂は今後も発生し続けると考えられる。従来これらの浚渫土を海上埋立地に投棄処分することが多かったが、近年処分場の用地確保が困難となり、浚渫土に対する減容化や再利用が一層強く求められるようになった。

専用プラントによるセメント混合を行い、油圧ポンプによる圧送及び打設を行うプレミックス工法は、含水比の低い浚渫土を処理して再利用できるため、良好な埋立地盤材料のほか、多くの特殊目的に応用可能である。すでにプレミックス工法による施工実績は160万m³を超える。

名古屋港ポートアイランドは、浚渫土砂を受け入れるために計画されたものである。本文はここでの有効利用事例を示すとともに、実務上の問題点と今後の展望について述べる。

2. 混合処理した浚渫土の工学的特性

(1) 一軸圧縮強度

固化処理土の一軸圧縮強度は、セメント配合量を

増加することによって大きくなるが、同時に含水比が大きくなるにつれ逆に低下することが知られている。また土の物理・化学的性質や、セメントと土の混合度合い、水中施工時の打設方法、養生期間および養生時の温度・拘束圧など、多くの要因が固化処理土の強度発現に影響を与える。浚渫土の場合、同じ区域ならば土の基本的性質がほぼ均一と見なせる。他の要因を同一条件と仮定すると、固化強度を実質的に支配するものは混合浚渫土中のセメント含有量と浚渫土の含水比となる。筆者ら^{1), 2)}は、28種類の土に対する室内配合試験に基づいて含水比の影響を調べた。その結果、一軸圧縮強度は含水比のほぼ2乗に反比例することが分かった。すなわち、

$$q_u = \frac{K(C - C_0)}{(G_s w / 100 + 1)^2} \quad (1)$$

ここに、 K は一軸圧縮強度の比例係数、 C はセメント含有量 (kg/m³)、 C_0 は最低セメント含有量である。 w (%)は浚渫土の含水比(セメントスラリーで混合するときはスラリー中の水分も含む)であり、 G_s は土粒子の比重である。式中の定数 K と C_0 は土の性質ごとに大きく変わるが、通常の浚渫粘性土に限定していれば、以下に示す参考値を用いて一軸圧縮

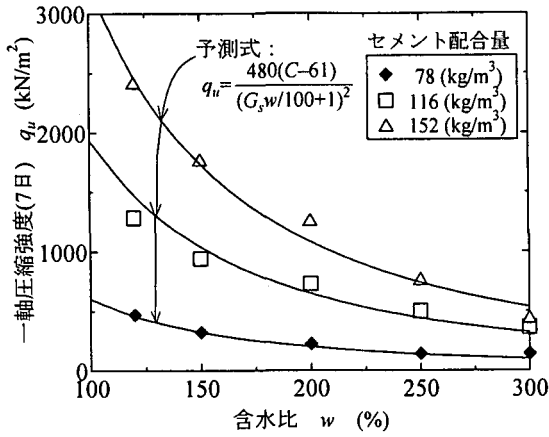


図-1 山口粘土の配合実験

表-1 各工事における浚渫土の含水比と一軸圧縮強度のばらつき特性

| 工事事例 | 名古屋港 | 横浜港 | 東京港1 | 東京港2 | 四国 |
|-------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| \bar{w} (%) | 102 | 82 | 180 | 133 | 71 |
| V_w | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.28 | 0.08 |
| \bar{C} (kg/m³) | 76 | 110 ^{*1} | 50 ^{*1} | 50 ^{*1} | 50 ^{*1} |
| V_c | 0.15 | 0.15 ^{*2} | 0.15 ^{*2} | 0.15 ^{*2} | 0.15 ^{*2} |
| C_0 (kg/m³) | 30 | 25 | 20 | 20 | 25 |
| G_s | 2.68 | 2.68 | 2.68 | 2.68 | 2.71 |
| V_{qu}^* | 0.33 | 0.29 | 0.38 | 0.50 | 0.32 |
| $V_{qu(7)}$ | 0.36 | -- | 0.29 | 0.46 | 0.30 |
| $V_{qu(28)}$ | 0.32 | 0.24 | 0.27 | 0.41 | 0.32 |
| $V_{qu(core)}$ | -- | -- | 0.42 | 0.55 | 0.30 |

*1 セメント配合設計量の数値

*2 名古屋港工事における実測値を採用

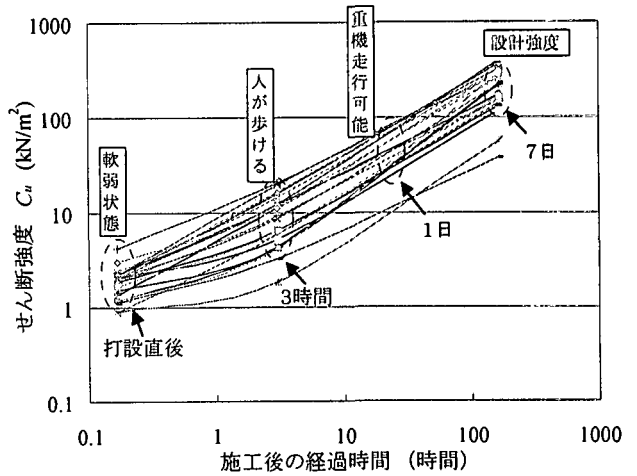


図-2 浚渫土混合処理土の強度発現

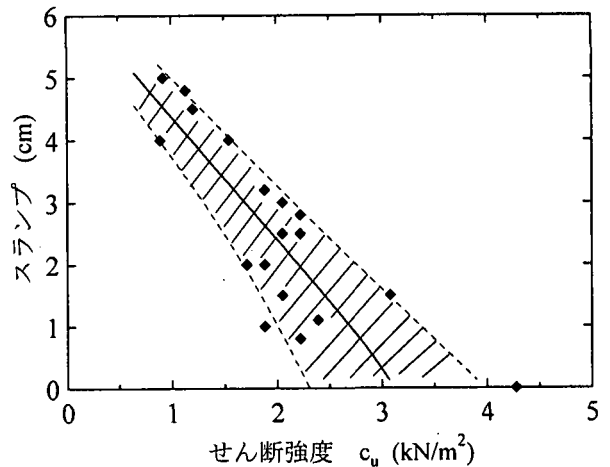


図-3 スランプとせん断強度の関係

強度をおおよそ推定することが可能である。

$$K=150\sim 400 \text{ kN/kg}\cdot\text{m} \quad (7\text{日強度})$$

$$K=250\sim 600 \text{ kN/kg}\cdot\text{m} \quad (28\text{日強度})$$

$$C_0=30 \text{ kg/m}^3$$

図-1は山口粘土を用いた配合実験の一軸圧縮強度と式(1)による予測値を比較した例である。自然含水比が大きく変動する浚渫土に対して、上式によりセメント配合量Cを随時調整し、より均一な固化強度が得られる。

(2) 浚渫土のばらつき

海上工事で発生する浚渫土は、その基本的性質が均一な場合が多いとはいえ、海底から掘削したものであるため含水比のばらつきの影響が大きい。表-1に幾つかの現場における含水比の平均値と変動係数 (V =標準偏差/平均値)を示した。例えば、名古屋港の場合 $w=80\sim 134\%$ 、東京港の場合 $w=90\sim 230\%$ の範囲で変動した。式(1)で提示した経験式の有効性があれば、含水比及びセメント含有量のばらつきより、一軸圧縮強度のばらつきを評価できると考えられる。式(1)より誘導した結果式(2)の評価式が得られた³⁾。

$$V_{qu} = \frac{\sigma_{qu}}{\bar{q}_u} = \left\{ \left[\frac{\bar{C}}{\bar{C}-C_0} V_c \right]^2 + \left[\frac{2G_s \bar{w}/100}{(G_s \bar{w}/100+1)} V_w \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここに、 V_{qu} 、 V_c 、 V_w はそれぞれ一軸圧縮強度、セメント含有量、浚渫土含水比の変動係数である。

表-1において、 V_{qu}^* は式(2)による推定値、 $V_{qu(7)}$ 、 $V_{qu(28)}$ 、 $V_{qu(core)}$ はそれぞれ7日、28日後のモールド養生試料、コアサンプルから得られた一軸圧縮強度の変動係数である。表-1のデータから判断すると、一軸圧縮強度の変動係数が0.3程度ならば比較的均一と評価してよい⁴⁾。

(3) 施工上の物性について

自然浚渫土に加水せずにセメント混合処理を行うと、処理土のせん断強度は直ちに、元の浚渫土より大幅に増加する。図-2に処理土の初期せん断強度の変化を示す。これは工事現場で実測したものであり、測定結果にはばらつきが現れている。しかし、セメント混合処理及び現地打設後に、強度が急速に増加し早期に設計強度が得られることが明らかである。このような初期せん断強度特性を利用することで、ポンプの圧送圧力による法面施工が可能である。

図-3にスランプとせん断強度の関係を示す。ただし、スランプ試験は高さ15cmの小型スランプコーンを用いて実施した。実際の施工経験によると、せん断強度1.5~2kN/m²を境に、スランプ3cm以下の処理

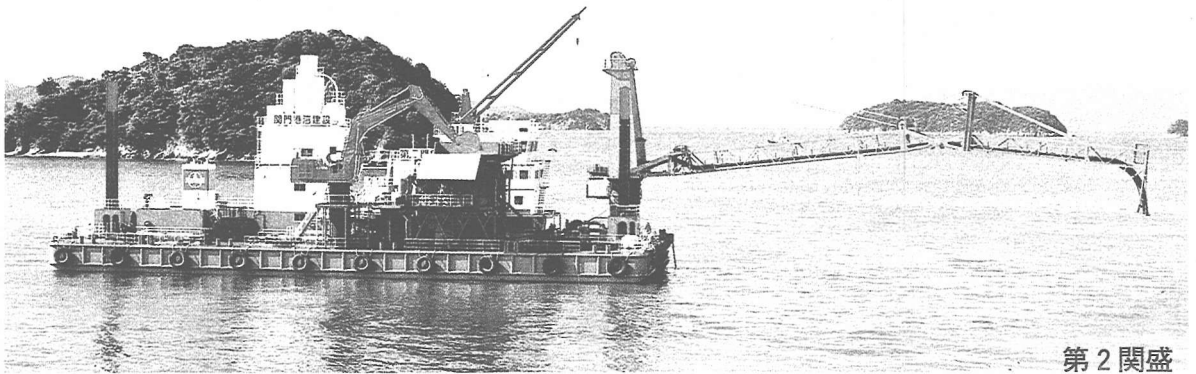


写真-1 セメント混合処理作業船の全景

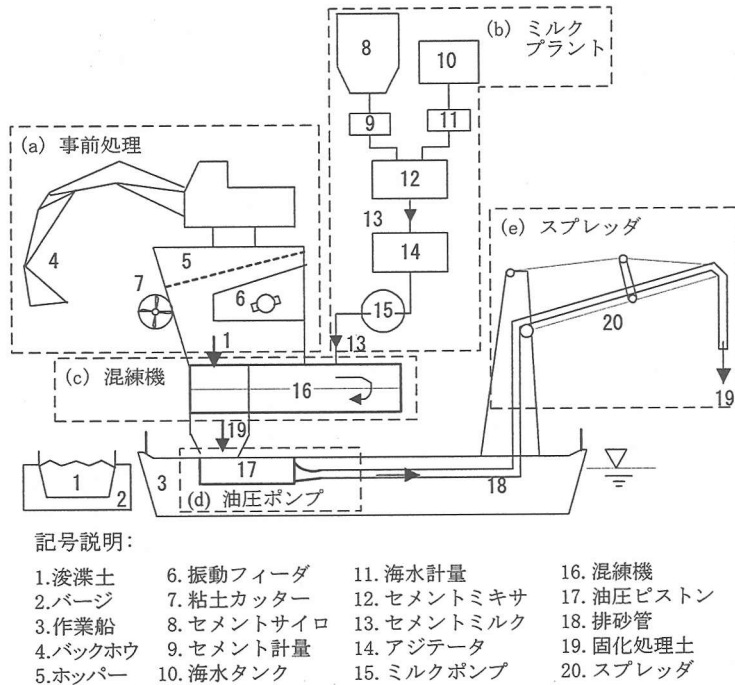


図-4 作業船の工程概要

土は法勾配(1:3)の施工に適しており、スランプ3~4cm以上になると法勾配の施工にやや不適となる。反対に300mを超えるような長距離圧送の場合、スランプの大きいほうが望まれる。

3. セメント混合処理作業船

海上工事は施工条件、海象条件などの特殊性がある一方、発生土が比較的均質な場合が多く施工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より安く提供するために、セメント混合処理から打設施工までの工程をコンパクトにした専用作業船を導入し実用化した^{5), 6)}。

写真-1は導入した作業船第2 関盛の全景であり、その主な仕様を表-2に示す。専用作業船により浚渫土の揚土、解泥、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コンパクト化し、施工の効率化を図ることができた。図-4

表-2 固化処理作業船の主な仕様

| | | |
|-------|---------------|-----------------------|
| 施工能力 | 固化処理能力 | 300 m ³ /h |
| | 最大圧送距離 | 500 m |
| | 打設深度 | -10 ~ +15 m |
| 処理工程 | バックホウ | 4.5 m ³ |
| | ホッパー | 30 m ³ |
| | セメント消費量 | 50 t/h |
| | 水セメント比 混練機 | 0.5~5.0 0~34 rpm |
| 圧送・打設 | 油圧ピストン | Φ500, L3500(複列) |
| | 最大送泥圧 | 7 MPa |
| | 排砂管内径 | 350 mm |
| | 排砂管材質 | 鋼管/強化ゴムホース |
| | スプレッダ | 56 m |
| 位置管理 | 係船スパッド | 850mm角型×2本 |
| | 打設位置 | RTK-GPS |
| | 測深 | ソナー/レッド |
| 船体寸法 | 長さ | 58.0 m |
| | 幅 | 22.4 m |
| | 深さ | 5.1 m |
| | 喫水 | 2.1 m |

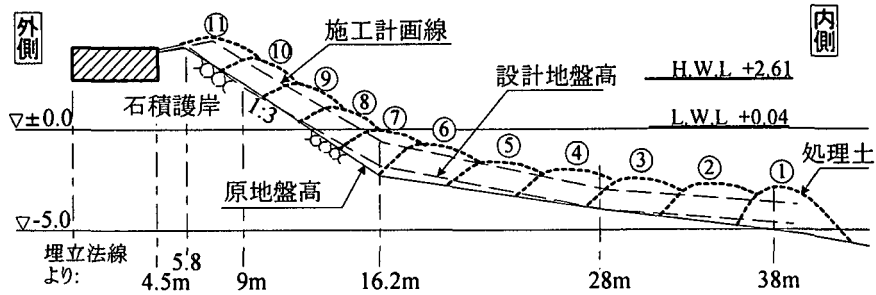


図-5 腹付け施工の概要

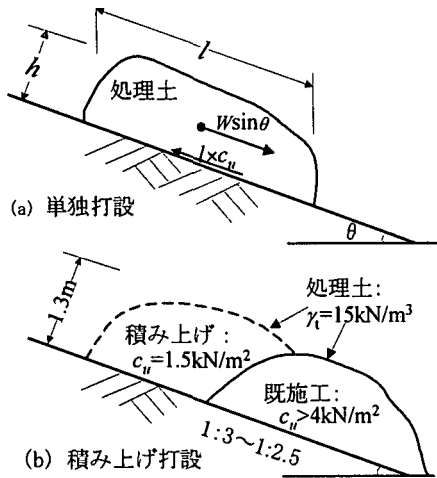


図-6 斜面上における処理土の安定

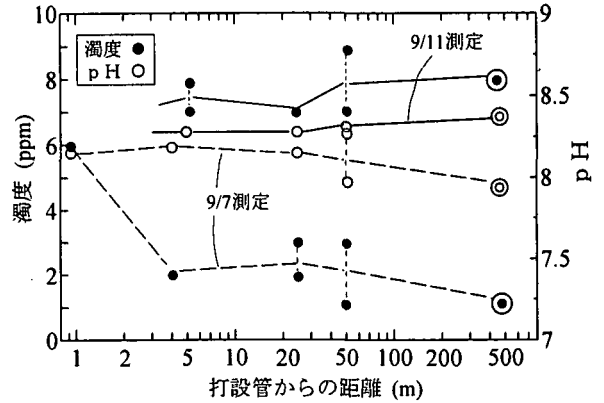


図-7 水中打設時の水質調査の結果

に本作業船の概要図を示すが、全体として(a)異物除去等の前処理、(b)セメントミルクプラント、(c)混練設備、(d)圧送ポンプ、(e)打設部（スプレッダ）の5つの基本部分から構成している。

このように、専用の混合プラント、最大圧力7MPaの圧送ポンプならび長さ56mのスプレッダを搭載することにより、固化処理による一般埋立はもとより、排砂管による長距離運搬や、法面勾配部の直接施工が可能となった。

4. 浚渫土の有効利用事例

ここで、名古屋港第3ポートアイランドにおいて、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い、護岸外への濁り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混合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⁷⁾

図-5に腹付け施工の概要図を示す。法面の下部は水面下にあり、法肩部は空中で1:3の勾配となっている。本工事は捨石法面に沿い厚さ1.3m以上の固化処理土を腹付け工として施工したものである。腹付

け工により海水の出入りが遮断されるので、潮位差の水圧を受ける腹付け部の安定性について検討する必要がある。この海域において潮位差が最大2.0m超え、この厚さでは腹付け工の長期的な安定性を十分に確保できたといえない。しかし、埋立地内に浚渫土砂を同時に投入するため内部の水位が高くなるから、腹付け部における安定性の問題はなかった。

セメント混合直後の処理土は非常に軟弱なので、捨石法面に沿ってスムーズに施工できるかどうか、この現場は初めての経験であった。図-6(a)のような勾配1:3の斜面において処理土を打設しようとすると、一度に盛れる処理土の厚さは、式(3)で試算すると $h=32\text{cm}$ 程度が限度である。

$$h = \frac{c_u}{\gamma_t \sin \theta} \quad (3)$$

ここに、

c_u は処理土のせん断強度、 $c_u=1.5 \text{ kN/m}^2$ 。

γ_t は処理土の湿潤密度、 $\gamma_t=15 \text{ kN/m}^3$ 。

θ は法面の傾斜角度、 $\theta=\tan^{-1}(1/3)$ 。

施工効率を向上させるため、実施工では図-5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-6(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 4kN/m^2 の非排水せん断強度が発現できれば、安定した施工が可能であることが分かった。工事中随時、ハンドベーンによるせん断強度測

定を実施し、 $c_u > 5 \text{ kN/m}^2$ 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、計画通りの腹付け施工が完成できた。

なお、水中打設時に打設管の近傍、及びその他離れた地点から、水面付近の海水を採取し水質調査を行った。図-7に測定結果を示す。水質調査は二日間にわたって二回行った。二回の調査結果をみると、pHの変動が小さく、濁度はやや上昇した。本工事中は、他工法による浚渫土砂の投入が平行して行われており、また潮位差によって一日に二回護岸堤体を通じる海水の出入りがあった。これらの影響を考慮すると、濁度とpHの測定値に一定の変動があると推測できる。処理土水中打設の影響を受けない500m地点（バックグラウンド、図-7中の2重丸）に参考すると、濁度とpHの変動は処理土の水中打設に伴ったものとは認められない。また、他現場での水質調査と筆者らが実施した水中打設実験からも同様な傾向が確認されている^{8),9)}。

(2) 遊水池仕切り堤の施工事例¹⁰⁾

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。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-8に仕切り堤の計画断面図を示す。原位置でのベンセン断試験より、浮泥層のせん断強度は $c_u = 0.2 \sim 1.0 \text{ kN/m}^2$ となっており、在来地盤は、 $c_{u0} = 2.3 \text{ kN/m}^2$ より深度方向に増加している。今回の場合、護岸外係留の作業船と施工位置に100~200mの距離があり、第2関盛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。

このような施工において、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浚渫土浮泥から、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、浚渫土を加水解泥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った場合は、打設先端における法勾配の管理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)； $c_u < 2 \text{ kN/m}^2$ が必要。
- ・盛土のり面形成； $c_u > 1.5 \text{ kN/m}^2$ が望ましい。

両方の限界を考えると、含水比の適正な範囲は80~100%となることが分かった。現場の含水比管理により、施工中の圧送運搬作業は概ね正常に行われた。図-9に実地で計測した非排水せん断強度、含水比と送泥圧力の関係を示す。図-9の実測結果によると、 $c_u < 0.5 \text{ kN/m}^2$ もしくは含水比が110%以上の場合、送泥管内に大きな圧力は発生しない。通常施工中の送泥圧は2~4.5MPaの範囲になっていた。

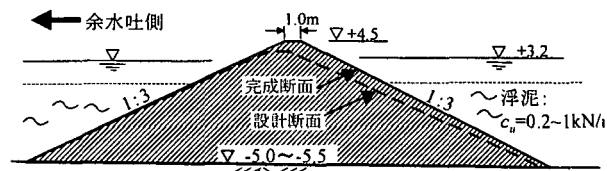


図-8 仕切り堤施工の概要図

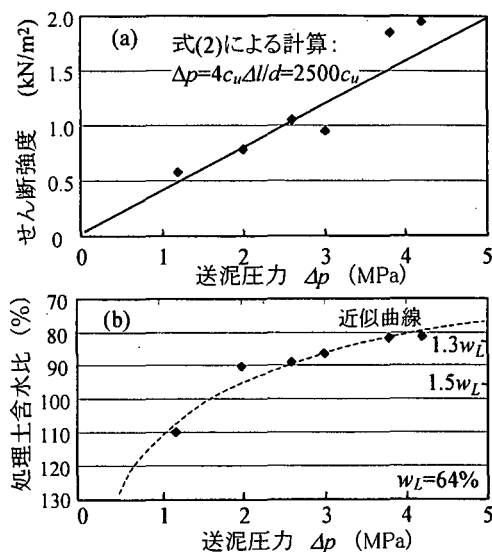


図-9 実機計測の結果

以上のような適正含水比は、比較的厳しい範囲であるので、実際含水比が更に低く圧送困難な場合、適宜加水して対応した。また含水比が高すぎて盛土施工に明らかに不適なものについては、一般浚渫土砂として埋立地へ投棄処分した。

5. 結論と今後の課題と展望

自然浚渫土を加水せずに混合処理すると、次の特長があることが実証された。

- ①早期に必要な地盤強度が得られる。
- ②法面や盛土の施工（勾配1:3）ができる。
- ③止水性があり、土砂の漏出防止や汚濁対策には有効である。

昨今、わが国における廃棄物処分場の不足は緊迫の度合いを増しており、沿岸域に行われている埋立事業の主目的はもはや土地造成そのものよりも、廃棄物処分場としての役割を果たさなければならないようになってきた。浚渫土を固化処理して埋立地盤材料として用いる事例が多いが、護岸腹付け工、更には築堤本体に用いることは、より進んだ活用方法であり、この場合の利用価値は単なる埋立材料よりも高いといえる。ただし、下記の問題点があり今後の検討課題となる。

- ①従来の自然地盤材料より割高な問題。
- ②発生浚渫土の時期、場所、量、質等が安定しないこと。

他の資源リサイクルへの取り組みと同様に、浚渫

土を改良して再利用しようとするコスト的に自然地盤材料を用いる方法よりも割高になる場合が多い。しかし、山土や石材の採掘に伴い自然環境を破壊し景観を損なったりすること、土砂運搬による道路公害や土取り場の二次災害の恐れがあることなど、生活社会に及ぼす負の影響を評価することが必要である。また浚渫土再利用により埋立処分場に対する圧迫を軽減する効果があり、これもコスト比較に反映させるべきであろう。

一方、発生する浚渫土の不安定性について、発生側と利用しようとする側がそれぞれ、浚渫土の発生と利用に関する時期、場所、量、質等の情報を、例えばインターネット上に公開し情報を共有することで、浚渫土に対する有効利用が一層活発になることが期待される。

参考文献

- 1) 湯 怡新, 藤村浩幸, 土田 孝: 固化処理土の一軸圧縮強度とセメント量と含水比の相関関係, 第34回地盤工学研究発表会, pp.829-830, 1999.
- 2) 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巻第1号, pp.1-8, 2001.
- 3) 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巻第1号, pp.1-8, 2002.
- 4) 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, 地盤工学会誌, 土と基礎, 第49巻第5号, pp.4-6, 2001.
- 5) 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.
- 6) Tang, Y. X, Miyazaki, Y. and Tsuchida, T.: Practices of reused dredgings by cement treatment, Soils and Foundations, JGS, Vol.41. No.5, pp.129-143, 2001.
- 7) 卷淵正治, 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施工, 第34回地盤工学研究発表会, pp.831-832, 1999.
- 8) 宮崎良彦, 湯 怡新, 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖: セメント固化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巻第2号, pp.99-106, 2001.
- 9) 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, 第III部門6月号, 2002.
- 10) 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巻7号, pp.75-80, 2000.