浅海域における薄層覆砂の堆積特性

SAND DEPOSITION CHARACTERISTICS OF THIN SAND CAPPING IN SHALLOW WATER

武田将英¹・山田良平²・中澤慎一²・五明美智男³・篠原邦彦⁴・上野雅明⁵
Masahide TAKEDA, Ryohei YAMADA, Shin-ichi NAKAZAWA, Michio GOMYO,
Kunihiko SHINOHARA and Masaaki UENO

¹正会員 東亜建設工業(株)技術研究開発センター(〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

²東亜建設工業(株)千葉支店工事室(〒260-0024 千葉市中央区中央港1-12-3)

³フェロー 博(工) 東亜建設工業(株)技術研究開発センター(〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

⁴国土交通省 関東地方整備局 千葉港湾事務所長(〒260-0024 千葉市中央区中央港1-11-2)

⁵前 国土交通省 関東地方整備局 千葉港湾事務所副所長(〒260-0024 千葉市中央区中央港1-11-2)

There are terrible problems that the organic sediments on the sea bed destroy the ecosystem all around the closed water. Generally, the two improving methods for the bottom sediments which target such the organic sediments are executed. The one is a dredging method which removes them outside, and the other is a capping sand method which covers the sea bed with the sand. This paper describes the sand deposition characteristics of thin sand capping when the sand was dumped by either a backhoe or a grab bucket into shallow water, because the construction demands the sand piled up as thinly and uniformly as possible. They were clarified through the field research at our construction site. Finally, the average layer thicknesses were almost equal to the planned layer thicknesses in any case of the dumping either the dredged sand or the pit sand. The coefficient of variation of the layer thickness became larger as the planned layer thickness decreased. Thus in the thin sand capping, it found that we have to set more surcharge for the quantity of sands, because the error of layer thickness would grow.

Key Words : Sand capping, shallow water, backhoe, grab bucket, dredged sand, pit sand

1. はじめに

東京湾・大阪湾・伊勢湾など多くの閉鎖性内湾では、過去に堆積した有機汚泥による底質環境の悪化により、生物相が貧困化し、最悪の場合には湾全体の生態系に悪影響を及ぼしていることが問題となっている。このような有機汚泥を対象とした底質改善策としては、汚泥を系外へ除去する浚渫工法と汚泥を良質な砂で覆う覆砂工法が広く採用されている。干山¹⁾は、底質環境の改善ならびに経済性の観点からみた理想的な覆砂工法の要件として、「必要最小限の薄さで汚泥を舞い上げることなく、短時間に広くまくこと」と整理し、項目毎の必要覆砂厚を表-1に取りまとめた。その上で、環境改善効果の発現・維持のために必要と考えられる覆砂厚30cmに、施工性への対応としての20cmを加えた50cm程度が適正覆砂厚の目安であると示した。

一方、干山の報告から10年以上経過した現在においては、公共事業コスト縮減や建設材料の省資源化といった観点から、更なる薄層覆砂の実現が求めら

れるようになってきている。海域における土砂投入に関する沈降・堆積特性に関する研究は、古くは1960年代の箭内²⁾³⁾から始まり、2000年以降も荒井ほか⁴⁾⁵⁾、重松ほか⁶⁾、矢内ほか⁷⁾、原田ほか⁸⁾など多くの研究者によって精力的に実施されてきている。しかし、これらの研究の多くは、比較的水深の大きい場所における全開式もしくは底開式土運船での直投を対象としており、浅海域の工事で一般的なバックホウやグラブによる投入を対象にしたものはない。そのため、浅海域において薄層覆砂を施工する際は、施工管理が可能な覆砂厚の設定と出来形の許容精度

表-1 必要覆砂厚等の検討¹⁾

区 分	項 目	必要厚等
環境改善効果	溶出削減効果	30cm以上
	溶出削減効果(持続性)	30cmで20年 50cmで30年
	底生生物相	10cm以上
覆砂形状の維持	海域利用(漁業の影響)	10cm以上
施工性	施工精度	±10-20cm
	めり込み厚	2-10cm

などがいつも問題となる．そこで，本研究では，覆砂厚への主要な支配要因と考えられる投入材料，投入方式，投入時の水面衝撃の有無，1投あたりの投入時間を変えることにより，薄層覆砂施工における堆積特性の把握を目的とした現地調査を実施した．

2．現地調査の概要

(1) 覆砂工の概要

現地調査の対象となった覆砂工は，国土交通省関東地方整備局発注の「平成21年度東京湾浚渫土砂有効活用試験工事」において実施された．覆砂工の施工場所は，図-1に示す千葉県富津岬北側の水深4m～5mの静穏な浅海域で，図-2に示す覆砂工の総面積

図-1 覆砂工位置図

図-2 覆砂平面図及び断面図

図-3 覆砂平面図及び断面図

は，18.8万 m^2 （延長580m×幅324m）であった，これを27m幅の施工レーン毎に，覆砂材料（下層：浚渫砂，上層：山砂），施工機械（バックホウ船，グラブ船），投入方法，計画覆砂厚（10cm，20cm，30cm）を変化させて覆砂工を実施した．

なお，施工海域での海底上2～3mにおける流速は，大潮期で最大0.35m/s，小潮期で最大0.20m/s程度であった．例として，工事期間中の2010年6月29日に測定した大潮期の流向流速図を図-3に示す．また，覆砂工の施工期間中には，関東地方に台風の接近はなく，外力による大幅な地形変化は見られなかった．

(2) 覆砂材料の諸元

覆砂工に使用した浚渫砂，山砂の粒径加積曲線を図-4に示す．それぞれの材料の土質試験結果の概要は以下の通りである．

a) 浚渫砂

浚渫砂は，富津市小久保地区から土取りしたものを使用した．中央粒径 $D_{50}=0.12\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$ ，細粒分含有率 $FC=8.0 \sim 14.6\%$ ，土粒子の密度 $\rho_s=2.72 \sim 2.74\text{g}/\text{m}^3$ とほぼ均質な細砂であった．図-5(a)に示すように浚渫砂の含水状態は飽和であった．また，よく締まった砂であったため，浚渫砂投入時には，土砂塊状で落下した．

b) 山砂

山砂は，千葉県君津市の五行台産と吉野産を使用した．中央粒径 $D_{50}=0.22 \sim 0.28\text{mm}$ ，細粒分含有率 $FC=1.3 \sim 3.2\%$ ，均等係数 $U_c=1.88 \sim 2.52$ ，土粒子の密度 $\rho_s=2.72 \sim 2.74\text{g}/\text{m}^3$ と，両者ともにほぼ均質な細砂であった．図-5(b)に示すように山砂の含水状態は表乾状態であった．乾いたゆりい砂であったため，山砂投入時には粒子群として落下した．

図-4 粒径加積曲線

(a) 浚渫砂 (b) 山砂

図-5 覆砂材料の含水状態

(3) 施工機械の諸元及び土砂投入方法

a) 施工機械の諸元

覆砂工には、図-6に示すバックホウ船（山積 2.4m^3 ）とグラブ船（山積 5.5m^3 ）を使用し、汚濁防止枠内へ土砂投入を行った。汚濁防止枠の寸法は、内寸法 $13.5\text{m} \times 13.5\text{m}$ 、膜の垂下長は 2m であった。

b) 土砂の投入方法

土砂の投入方法は、図-7(a)に示す覆砂材を水面から直接投入する方法（直接投入）と、覆砂材の水面への衝突速度を抑制する目的で、汚濁防止枠内に図-7(b)に示すスリットを設置して投入する方法（スリット投入）の2種類を実施した。図-7(b)に示すように、湿潤な土砂をスリット投入する場合には、スリット上に土砂が一旦堆積する。堆積した土砂は、汚濁防止枠が動揺することにより生じた波によって、徐々に侵食されながら水中に落下する。図-8に示すスリットは、隙間間隔が 10cm となるよう山型鋼を用いて製作されており、静水面よりやや高い位置に設置することで適度な侵食が起こり、 $1 \sim 2$ 分程度で投入を終えることができた。

c) 土砂の投入回数

計画覆砂厚（ 10cm 、 20cm 、 30cm ）に応じて一定量の覆砂材料を投入できるよう、表-1に示す回数の覆砂材料をバケット山積みで投入した。投入回数を決定するにあたり、覆砂材料の締まり具合を考慮して、割増係数を浚渫砂 1.1 、山砂 1.3 と設定した。なお、覆砂材料の投入に当たっては、表-2に示す覆砂厚と投入割付の例のように、できるだけ汚濁防止枠内に均等に投入できるよう配慮した。

d) 土砂の投入時間

バックホウ船では、ブーム操作により投入時間（バケット内の土砂を投入し始めてから投入し終わるまでに要する時間）をオペレータが任意に変更できる。そこで、今回の覆砂工では、投入時間を 5s 、 10s 、 20s の3種類とした。また、グラブ船は、投入時間に変化を持たせず、バケットを一気に開放するだけのケースを実施した。

(4) 覆砂材料の堆積厚

a) 汚濁防止枠直下における堆積厚の確認

様々な投入条件での堆積特性の把握を行うため、汚濁防止枠1個分への投入を実施した後に枠直下に堆積した覆砂材料の堆積厚を確認した。堆積厚の確認は、各施工レーンの施工水深 5m 及び 6m の位置で実施した。ここで、施工水深とは、深浅図での水深に平均潮位 1m を加えた施工時の平均的な水深を指す。今回の施工場所における底質は砂質土であったため、コア抜きによる堆積厚の確認ができなかった。そこで、覆砂材料の投入直後に、標尺（設置個数：浚渫砂施工時9-16個、山砂施工時9個）を海底に予め設置し、投入完了後に、堆積した覆砂材の厚さを潜水土により読み取った。

(a) バックホウ船 (b) グラブ船

図-6 施工機械

(a) 直接投入 (b) スリット投入

図-7 施工機械

図-8 スリット

表-1 汚濁防止枠1個分への投入回数

覆砂材	割増係数	計画覆砂厚	バックホウ (山積 2.4m^3)	グラブ (山積 5.5m^3)
浚渫砂	1.1	30cm	25回	11回
		20cm	17回	7回
		10cm	8回	4回
山砂	1.3	30cm	30回	13回
		20cm	20回	9回
		10cm	10回	4回

表-2 覆砂厚と投入割付の例（バックホウ船・浚渫砂）

覆砂厚	10cm	20cm	30cm
投入回数及び割付	8回 	17回 	25回

b) 深浅測量結果による覆砂厚の確認

本工事における出来形確認は、音響測深機（PDR-1300型、1素子）を用いた深浅測量により行った。深浅測量では、覆砂材料の拡散の影響を考慮して、施工範囲の周囲を 50m 外側に拡張した延長 $680\text{m} \times$ 幅 430m の範囲を測量した。また、深浅測量の測線は、

延長・幅共に10m間隔であったため、27m幅の各施工レーンにおける覆砂厚の確認には、深浅測量結果をそのまま用いることができなかった。そこで、図-9に示すような各施工レーンを2分割する汚濁防止枠の中央線上（図中の桃色矢印）での値となるよう線形補間を実施した。そして、覆砂工実施の事前後の差をとって覆砂厚の確認を行なった。

図-9 施工レーンと汚濁防止枠の関係

3．現地調査結果

(1) 含水状態が異なる覆砂材料の堆積特性

a) 直接投入の場合

計画覆砂厚30cmにおける直接投入の平均堆積厚とその変動係数（標準偏差を平均堆積厚で割ったもので相対的なばらつきを表す）をそれぞれ図-10、図-11に示す。図中の水平軸における「BH(5s)」は投入時間5sでのバックホウ船による投入であることを指す。バックホウに着目すると、湿潤状態の浚渫砂では、投入時間が長いほど、汚濁防止枠内に堆積しやすく、かつ変動係数が小さくなる（相対的にばらつきが小さくなる）傾向が見られた。一方、表乾状態の山砂では、投入時間の長短に関わらず、平均堆積厚及び変動係数はほぼ同じ値を示した。次に、グラブに着目すると、平均堆積厚・変動係数共に、投入時間の短いBH(5s)と似たような傾向であった。

覆砂材料の違いによって、平均堆積厚の傾向に差が見られたのは、次のような状況であったと推察される。湿潤な浚渫砂の場合は、バケットから放出される土砂は、土砂塊となって水面に衝突する。そのため、投入時間が短いケースでは、寸法の大きな土砂塊が運動量のある程度保持したまま海底に衝突して、周囲に散ったと考えられる。一方、表乾状態の山砂の場合には、砂粒子が、気泡を巻き込みながら個々に水面に衝突する。そのため、砂粒子の運動量が大幅に消失し、ゆっくりと水中を落下したと考えられる。

b) スリット投入の場合

計画覆砂厚30cmにおけるスリット投入の平均堆積厚とその変動係数をそれぞれ図-12、図-13に示す。バックホウやグラブに関係なく、いずれのケースでもほぼ一定の平均堆積厚となった。山砂の場合は、直接投入とスリット投入に大きな差は見られなかった。これは表乾状態の土砂投入の場合には、土砂が

図-10 直接投入における平均堆積厚

図-11 直接投入における変動係数

図-12 スリット投入における平均堆積厚

図-13 スリット投入における変動係数

スリット上に堆積することなく直接水中に落下するため、スリット設置が堆積厚等に与える影響が極めて少なかったことによると考えられる。一方、湿潤な浚渫砂の場合には、スリット上に土砂が一旦堆積することにより、土砂の水中への落下形態がいずれのケースでもほぼ同じようになったと考えられる。そのため、湿潤な浚渫砂を投入する際は、適切な隙間間隔のスリットを用いることで、サイクルタイムを落とすことなく、均質に土砂を堆積することが分かった。

(2) 計画覆砂厚が異なる場合の堆積特性

計画覆砂厚が10cm, 20cm, 30cmのときの湿潤な浚渫砂におけるバックホウ船での直接投入、グラブ船での直接投入、グラブ船でのスリット投入を図-14、図-15、図-16に示す。この図から、グラブ船の直接投入では、堆積厚に傾向がなく、ばらつきが大きいことが分かる。また、バックホウの直接投入やグラブ船のスリット投入では、計画覆砂厚が薄くなるに従って、ばらつきが大きくなることが分かった。なお、表乾状態の山砂の直接投入でも、バックホウ船、グラブ船ともに計画覆砂厚が薄くなるに従って、ばらつきが大きくなった。

(3) 薄層覆砂の施工精度

最終出来形を、覆砂材料と覆砂厚毎に整理した結果を表-3に示す。最終的に、浚渫砂・山砂ともに、平均覆砂厚は計画覆砂厚に近い値を得ることができた。しかし、計画覆砂厚が小さくなるほど、平均覆砂厚の変動係数が大きくなる傾向が顕著に見られた。このことから、薄層覆砂では出来形にばらつきが大きくなることが分かった。

覆砂工事における一般的な出来形管理では、計画覆砂厚より小さい(薄い)ことを許容しない場合が

図-14 バックホウの直接投入における堆積特性

図-15 グラブ船の直接投入における堆積特性

図-16 グラブ船のスリット投入における堆積特性

多い．そのため，薄層覆砂の場合には，覆砂材の割増係数を多く設定する必要があることが示唆された．そこで，表-3に示す結果から，計画覆砂厚と割増しすべき覆砂厚の関係を示したものを図-17，図-18に示す．ここでは，覆砂厚分布は，図-19に示す正規分布に従うものとし，2次関数の近似曲線を描いた．例えば，図-17の場合は，計画覆砂厚を $\mu-3\sigma=10\text{cm}$ にした場合，割増しを考慮した覆砂厚は $t=30\text{cm}$ となり，同じく $\mu-3\sigma=20\text{cm}$ にした場合には $t=40\text{cm}$ ，同じく $\mu-3\sigma=30\text{cm}$ にした場合には $t=50\text{cm}$ という結果を得る．その結果，割増率はそれぞれ3.0，2.0，1.7となり，薄層覆砂の場合には覆砂材の割増係数を多く設定する必要があることが理解できる．

4．おわりに

本研究で得られた成果は以下の通りである．

バックホウによる直接投入では，湿潤状態にある浚渫砂は，投入時間が長いほど，投入直下に堆積しやすく，ばらつきも小さくなる傾向が見られた．一方，表乾状態の山砂では，投入時間の長短に関わらず，堆積厚及び変動係数はほぼ同じであった．

計画覆砂厚が薄くなるほど，堆積厚の変動係数が大きくなる傾向が顕著に見られ，薄層覆砂では出来形のばらつきが大きくなることが分かった．また，覆砂工事での出来形管理では，計画覆砂厚より薄いことを許容しない場合が多く，薄層覆砂の場合には，覆砂材料の割増を多く設定する必要があることが分かった．なお，投入回数を変化させずに1回当たりの投入量を減じるなどの工夫をした場合には，変動係数は多少抑制できると予想されるが，アーム長の短い小型の機械を使用すると，土運船からの揚土が困難になる等の施工上の課題がある．

参考文献

- 1) 干山善幸：沿岸の環境圏，フジ・テクノシステム，pp.1147-1158，1998．
- 2) 箭内寛治：砂および礫の水中落下の散らばりに関する研究 - 静水中における場合 - ，土木学会論文集，第69号，pp.51-57，1960．
- 3) 箭内寛治：砂の集団投下および波を受けるときの平面的な散らばりについて，土木学会論文集，第71号，pp.28-34，1960．
- 4) 荒井清，矢内栄二，五明美智男，坂井彰，阪井田茂，松見吉晴：底開式バージによる投入土砂堆積形状に関する予測モデルの現地適用性について，海岸工学論文集，第47巻，pp.986-990，2000．
- 5) 荒井清，門田充史，宗田修，出口一郎：誘起流速を考慮した直投土砂堆積形状予測係数設定方法に関する研究，海岸工学論文集，第50巻，pp.836-839，2003．
- 6) 重松孝昌，錦織陽一，廣瀬真由，小田一紀：水中沈降粒子群の三次元分散挙動に関するパラメトリック解析，海岸工学論文集，第48巻，pp.1031-1035，2001．
- 7) 矢内栄治，松見吉晴，伊東剛，住谷圭一：土運船による土砂投入堆積形状に関する簡易予測図表の提案，海岸工学論文集，第52巻，pp.861-865，2005．

8) 原田英治，青木伸一，後藤仁志，細田尚：水中投入粒子群挙動および誘起流動過程，海岸工学論文集，第53巻，pp.861-865，2006．

表-3 覆砂工の最終出来形

覆砂材料	計画覆砂厚	平均覆砂厚 μ	標準偏差 σ	変動係数 V
浚渫砂	30cm	27.3cm	5.7cm	21%
	20cm	19.6cm	5.2cm	26%
	10cm	12.3cm	3.9cm	39%
山砂	30cm	29.7cm	6.1cm	21%
	20cm	20.6cm	5.5cm	27%
	10cm	9.1cm	3.8cm	44%

図-17 割増しを考慮した覆砂厚と計画覆砂厚（浚渫砂）

図-18 割増しを考慮した覆砂厚と計画覆砂厚（山砂）

図-19 正規分布