浚渫粘性土による人工干潟の造成方法と 圧密沈下挙動に関する研究

上野 一彦¹・菊原 紀子²・山田 耕一³・渡部 要一⁴

¹正会員 五洋建設 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:kazuhiko.ueno@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設 技術研究所 (〒329-2746 那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:noriko.iyoda@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 五洋建設 技術研究所 (〒329-2746 那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:koichi.a.yamada@mail.penta-ocean.co.jp

⁴正会員 港湾空港技術研究所 地盤研究領域 土質研究チーム (〒239-0326 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:watabe@ipc.pari.go.jp

近年、浚渫粘性土を利用した人工干潟の造成が各地で試みられている。軟弱な浚渫粘性土を揚土し、表層を覆砂する構造であり、地盤改良も施さないことから、干潟造成時には地盤の安定性に配慮した施工技術が要求される。また、施工後においては圧密沈下が生じる。

本研究では徳山下松港内に整備が進められている大島人工干潟を対象に施工方法を紹介するとともに、干潟造成後から約3年間にわたり人工干潟の地盤環境の変化について調査した結果について、圧密沈下解析結果と合わせて報告する。

Key Words :tidal flat, consolidation, marine clay, cone penetration test, sand capping

1. はじめに

近年、沿岸域の環境修復事業の一環として、浚渫粘性土を利用した人工干潟の造成が各地で試みられている^{1,2)}。潜堤や護岸で干潟造成予定地を囲み、その内側に近隣海域で浚渫した海底粘土を干潟材料として揚土し、最後に表層を覆砂することにより造成される。その際、干潟材料である海底粘土は浚渫から投入までの施工過程を経ることで乱され、強度が低下した軟弱粘性土として揚土することになる。その上、人工干潟造成後の生態環境を考慮して、あえて地盤改良を施さないことが多い。そのため、干潟造成時には地盤の支持力不足による干潟材料の流出、覆砂撒き出しによるめり込みやすべり破壊など、地盤の安定性に配慮した施工技術が要求される。また、干潟造成後においては、圧密沈下に伴う強度増加により、人工干潟は長期的に安定した地盤を形成していくため、より精度の高い圧密沈下管理・予測が要求される。

上記の現状を踏まえ、筆者らは人工干潟の設計・施工技術の開発を目的として、徳山下松港の大島地区で整備が進められている人工干潟（大島干潟）において、造成直後から干潟地盤に関する現地調査を実施している³⁾。

本論文では、大島干潟の造成方法を紹介するとともに、造成後の現地調査結果および調査結果を用いた圧密計算結果について報告する。

2. 人工干潟の造成

(1) 大島干潟造成工事の概要

図-1に大島干潟の全景を示す。大島干潟は第1期整備区（約17.8ha）と第2期整備区（約11.5ha）に分けられ、平成17年度から第1期整備区の造成に着手している。第2期整備区については平成24年3月現在も施工中であり、本研究では第1期整備区を対象とした。

図-2に第1期整備区の計画平面図、図-3に計画断面図を示す。干潟材として徳山下松港内の泊地浚渫土を揚土し、干潟表層には海砂（北九州沖産、平均粒径 $D_{50}=0.1\sim 1.0\text{mm}$ 、細粒分含有率 $F_{50}=5.0\%$ 以下）を用いて50cm層厚の覆砂を施す構造となっている。表-1に干潟材の物理特性を示す。干潟造成地の海底地盤高はD.L.-8.0m付近であったが、筆者らが研究を開始する時点では既に平均D.L.-0.4m付近まで開閉式土運船による直投方式で干潟材の揚

図-1 大島干潟の全景

図-2 計画平面図 (第1期)

図-3 計画断面図 (第1期)

土が完了している状態であった(図-3参照)。なお、図-3に示した計画断面では覆砂範囲は沖陸方向に $L=154\text{m}$ とあるが、実際には干潟材料の揚土法尻まで投入している。

(2) 干潟材料の揚土

図-3に示す $DL-0.4\text{m}$ から $DL+2.0\text{m}$ までの二次揚土の際、既に揚土が完了した一次揚土地盤の支持力不足が懸念された。そこで、施工前に一次揚土地盤の表層 20m 層厚について平面的に $50\text{m} \times 50\text{m}$ 間隔で軟弱地盤用に特化した電気式静的コーン貫入試験(CPT)⁴⁾により非排水せん断強さ c_0 を調べ、次に示す許容支持力算定のための実用式⁵⁾により、安定して揚土できる層厚を簡易的に求めて施工管理を行うこととした。

$$\gamma \cdot h < 5.14 \cdot c_0 / F \quad (1)$$

表-1 干潟材の物理特性

項目	値	単位
土粒子密度 ρ_s	2.605	g/cm^3
液性限界 w_L	110.0	%
塑性限界 w_p	37.3	%
粒度組成		
砂分	8.6	%
シルト分	40.2	%
粘土分	51.2	%
強熱減量 L_i	9.24	%
揚土時の平均含水比 w_0	120	%

図-4 スプレッダー先端部の改良状況

ここに、 γ : 干潟材の湿潤単位体積重量($=14\text{kN/m}^3$)、 h : 揚土層厚(m)、 F : 安全率($=1.0$)である。

CPTの結果より c_0 は $1.4 \sim 4.1\text{kN/m}^2$ と求まり、 c_0 の値に応じて1回あたりの揚土層厚 h を $0.5 \sim 1.5\text{m}$ として揚土管理を行った。なお、1回の揚土で計画天端高に達しない箇所については、揚土後に再度CPTを実施して c_0 を求めて h を算定し、複数層に分けて施工する計画を立てた。

二次揚土は浅海域での施工に加えて、所定の干潟断面がより高精度で仕上げられるように、リクレーマ船による施工が計画された。本工事ではさらに揚土精度を上げるために、図-4に示すようにスプレッダー先端部に短冊形のゴム製スカートを取り付け、揚土時の土砂の飛散を防止しながら施工を行った。

本工事における揚土工の施工実績は、平均施工時間 3.8h/日 、平均施工量 $1,900\text{m}^3/\text{日}$ であった。

(3) 覆砂の施工

覆砂施工前に干潟材の揚土時と同様の方法により、二次揚土地盤の支持力検討を行った。その結果、二次揚土地盤表層の c_0 は $1.8 \sim 3.3\text{kN/m}^2$ であり、前出の(1)式(ここでは、 γ : 覆砂材の湿潤単位体積重量($=18\text{kN/m}^3$)とした)による覆砂層厚 h は $0.5 \sim 0.9\text{m}$ と求まった。したがって、計画覆砂厚 $h_f=0.5\text{m}$ に対して1層撒き出しで覆砂が施工可能と判断できるが、補強材(シート、ネット)を併用しないため、安全性を考慮して2層撒き出しで施工することにした。

図-5に覆砂施工状況を示す。干潟材の揚土により場内

図-5 覆砂施工状況の全景

(a) 散らし管全景

(b) 吐出状況

図-6 散らし管

の地盤高は最も高い地点でDL+1.5mであり、潮間施工となることから、場内に喫水の浅い撒布台船を、場外にバージアンローダ船を配置し、バージアンローダ船のポンプで砂貯蔵船から砂を吸い上げ、撒布台船までは海上配管により水搬し、撒布台船上に設けた散らし管により撒き出した。散らし管の写真を図-6に示す。散らし管は $\phi 600\text{mm}$ 、 $L=8.0\text{m}$ の鋼管に 150mm 四方の吐出孔を26箇所設けており、各孔は鉄板蓋をスライドさせることにより、砂の吐出量を調整できる構造としている。

撒布台船の位置決めはD-GPSにより行った。また、砂撒布中の層厚管理については、目盛を付けたアルミ製突き棒を船外機船上から覆砂層に突き刺し、層厚を計測した。必要層厚が確認された後は、撒布台船をアンカーリングにより次の投入位置に移動させた。1回当たりの移動距離は横方向には散らし管の長さ(=8m)、縦方向には5~7mとした。

本工事における覆砂工の施工実績は、平均施工時間3.3h/日、平均施工数量700 m^3 /日であった。なお、覆砂完了後には、泥上掘削機を覆砂上に入れて最終的な不陸整正を行った。

3. 人工干潟の地盤調査

(1) 地盤調査の概要

大島干潟は在来地盤の上に浚渫粘性土を干潟材として揚土し、地盤改良も施さないことから、計画段階より干潟造成後に圧密沈下することが予測されていた。このよ

図-7 調査位置図

表-2 地盤調査項目

項 目	目 的
GPS測量	干潟の形状、沈下量の把握
電気式静的コーン貫入試験	地盤構成、強度分布の把握
ピストンサンプラーによる試料採取	含水比分布の把握
シワールサンプラーによる試料採取	物性試験、標準圧密試験

図-8 大島干潟 (2009年)

うな人工干潟に限らず施工後に圧密が予測される粘性土地盤については、事前の圧密沈下予測に加えて、事後の動態観測を実施することが望ましい。そこで、本研究では、造成された大島干潟の地盤環境の経時変化を調べるため、覆砂施工の約半年後である平成21年4月から平成24年3月までに約1回/年の頻度で地盤調査を実施した。調査位置を図-7に示す。干潟を平面的に捉えられるように4本の測線を設定し、各測線には概ね20m毎に測点を設けた。この測線に沿って表-2に示す調査項目を大潮時の最干時刻に合わせて実施した。図-8に2009年の調査開始時における大島干潟の状況を示す。

(2) 地盤調査の結果

a) 地盤高の測量

干潟周辺の基準点にRTK-GPS基準局受信機を設置し、測量者が移動局受信機を取り付けたスタッフを持って歩き、各測点における座標、標高を同時に測量した。なお、測量を開始する前に基準点において本方式による測量精度を計測したところ、3~4cmの誤差が生じることを確

図-9 干潟の地盤高 (B測線)

図-10 干潟の地盤高 (C測線)

図-11 干潟の覆砂厚 (C測線)

認している。

図-9に沖陸平行方向のB測線における干潟地盤高の計測結果を示す。2009年の測量結果からB-20とB-120の間の平均勾配を求めると1.15%であり、計画勾配(=1.0%)にほぼ等しい。その後、時間の経過とともに各測点において沈下が生じているが、各測点で沈下量を比較すると沖側の方が大きくなる傾向にある。干潟材の層厚が厚い沖側の方が圧密沈下量は大きくなったと推測する。2009年から2011年にかけて測点B-20とB-100で沈下量を比較すると、陸側のB-20ではほぼ誤差の範囲と判断できるが、沖側のB-100では約37cmであり、この時点で平均勾配は1.52%であった。

図-10に沖陸直角方向のC測線における干潟地盤高を示す。また、図-11に、目盛を付けたアルミ棒をC測線上の覆砂層に突き刺し、簡易的に覆砂層厚を計測した結果を示す。図-10より干潟天端はほぼ均一の高さを保っており、時間が経過しても概ね等沈下をしていると判断できるが、図-11を見ると、覆砂層厚は40~90cmの範囲でばらついている。干潟を踏査した際に、極端に地盤が緩い場所が何カ所か見受けられたが、そのような地点は、覆

(a) B-60

(b) B-100

図-12 貫入抵抗 q_c の深度分布 (B測線)

(a) B-60

(b) B-100

図-13 含水比 w の深度分布 (B測線)

砂層厚が薄くなっていると想定される。

b) 電気式静的コーン貫入試験 (CPT)

調査で使用した電気式静的コーン貫入試験機は2章で使用したのと同じもので、粘性土を対象として開発されたものである。そのため、まず、 $\phi 50\text{cm}$ の塩ビ管を覆砂表面から地盤に立て込み、その中の覆砂材を取り除いて、干潟材の表面が現れた状態からコーンの貫入を開始した。

図-12にCPTの結果として測線B上のB-60とB-100における結果を示す。なお、図中の地盤深度は干潟材表層をGL-0.5mとして整理をしている。B-60とB-100ともに時間の経過に応じてコーン貫入抵抗 q_c の深度分布は大きくなる傾向にあり、圧密が進行している様子がうかがえる。B-60とB-100を比較すると、B-60の方が全体的に q_c の値が大きい。これは、沖側(B-100)は干潟材の揚土や覆砂材の巻き出し時期が陸側(B-60)より遅いことに加えて、干潮時の有効応力の増加も見込めないことが影響していると推測する。干潟全体で均一な圧密を期待するには、沖側に比較的含水比の低い干潟材を揚土する、または、

表-3 解析モデルおよび使用した土質パラメータ

土層	深度 D.L. (m)		層厚 (m)	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	初期含水比 w_0 (%)	初期間隙比 e_0	e -log p 関係			e -log k 関係	
	上端	下端					C_c	C_s	Γ	C_k	Γ_k
覆砂層	+1.0	+0.5	0.5	覆砂は10kN/m ³ ×0.5m=5kN/m ² の様な上載荷重として再現							
干潟材層	+0.5	-9.5	10.0	2.605	120	3.035	0.782	0.078	2.638	1.375	7.557

図-14 圧密沈下曲線

(a) 片面排水 (b) 両面排水

図-15 含水比の深度分布

沖側の覆砂厚を増すなど圧密（強度増加）を促進させるような工夫が必要と考える。

c) シンウォールサンプラーおよびピストンサンプラーによる試料採取

CPTと同様に干潟材表面を露出させてからサンプラーを挿入した。シンウォールサンプラーは人力で貫入採取し、物性試験用として供し、その結果は後述する圧密解析で使用した。ピストンサンプラーはφ25mmと小径であり、3.0m程度の深度まで人力で採取が可能である。採取した試料から含水比の深度分布を求めた。

図-13に含水比 w の深度分布として、測線B上のB-60とB-100における結果を示す。B-60とB-100ともに、ばらつきが大きく、サンプリング精度に課題は残すものの、CPTで得られた結果のように深度変化に対応した傾向は見られない。また、経時変化についてはB-60で含水比が若干低下する傾向が見られるが、B-100では有意義な差は確認できない。CPTでは強度増加が確認できるものの、含水比の低下が見られないことを考慮すると、強度増加の原因として圧密の促進以外に、干潟材のシキソトロピーによる強度回復も一因と推測する。

4. 人工干潟の圧密沈下解析

(1) 概要

干潟材料のサンプリング試料を用いて物性試験を行い、この結果を用いて圧密沈下解析を実施した。この解析結果と地盤調査結果を比較することで、現時点での圧密進

捗状況を調べた。

圧密沈下計算には軟弱粘性土の自重圧密を考慮した一次元圧密解析コードconan[®]を用いた。

(2) 解析条件

解析モデルおよび解析に用いた土質パラメータを表-3に示す。解析地点は測線B上の測点B-100とした。干潟材の土質パラメータはB-100においてシンウォールサンプラーにより試料を採取し、段階載荷圧密試験を実施して求めた。覆砂材は層厚50cm、水中単位体積重量 $\gamma_{sat}=10\text{kN/m}^3$ の様な等分布荷重として、干潟材の天端面に与えた。在来地盤については物理特性が不確かなため、解析対象から除外した。なお、在来地盤と干潟材の境界条件は非排水（片面排水）と排水（両面排水）の2ケースを設定した。

施工手順は、先ず干潟材料を連続的に2カ月で揚土、続けて2カ月で覆砂を施工し、その後6カ月間放置させた。この状態を造成半年後として、ここから圧密度 $U=100\%$ になるまで放置させる解析を行った。

(3) 解析結果

図-14に圧密沈下曲線を示す。本解析では最終沈下量は1.62mと計算され、 $U=100\%$ に至るには両面排水条件の場合、造成半年後から約40年、片面排水条件の場合には約80年である。図-14から現在（造成半年後から約3年）の沈下量を読み取ると両面排水では0.82m（ $U=49\%$ ）、片面排水では0.32m（ $U=19\%$ ）である。図-9の測点B-100における天端沈下量の実測値は0.4m前後であることから、

計算ではシキソトロピーの影響を考慮していないため、見かけ上は片面排水条件における計算結果が実測値に近いと言える。

図-15に含水比の深度分布を示す。圧密沈下に伴い、排水境界に近い深度から含水比が低下していき、最終的に土被り圧に応じた含水比分布に落ち着く様子が分かる。ここで、表層付近(D.L.±0.0～2.0m)の含水比分布に着目すると、干潟造成後から5年程度では鉛直方向に大きな差が生じない結果となっている。これは、図-13(b)に示した測点B-100における含水比の深度分布とほぼ整合する。

上記の結果より、B-100の一地点だけではあるが、干潟造成から3年後の地盤調査結果と片面排水条件による解析結果は概ね一致する結果となった。今後、干潟地盤の圧密の進捗状況を把握するための有効な手法の一つであると考え。

5. まとめ

本研究では大島人工干潟の施工方法を紹介するとともに、干潟造成後から約3年間にわたり各種の地盤調査を行い、人工干潟の地盤環境の変化について調べた。さらに、圧密沈下解析を実施することで、以下の知見を得た。

- 1) 軟弱な浚渫粘性土を干潟材料として揚土する際に、CPTにより地盤の強度を調べて、許容支持力を算定し、揚土層厚を簡易的に定めて段階施工を行うことで、安定的に揚土が行えることが確認された。
- 2) 干潟材の揚土にはリクレーマ船を使用した、スプレッダー先端部に短冊形のゴム製スカートを取り付けることで、土砂の飛散を防止し、揚土精度が向上することが確認された。
- 3) 覆砂施工時もCPTを用いて地盤の強度を求め、地盤強度に応じた覆砂施工層厚を設定し、段階施工をすることにより、ネットなどの補助材を併用しなくても安定して覆砂が行えることが確認された。

- 4) 薄層覆砂の施工時には、吐出量が調整可能な散らし管を併用した水搬撒き出しが有効であることが確認された。
- 5) 干潟造成後の約3年間にわたり現地調査を行い、干潟材の圧密進行に伴い地盤強度が発現していることを確認した。
- 6) 現地調査結果と圧密沈下解析の結果を比較し、解析により干潟地盤の圧密進捗状況が把握できることが確認された。

謝辞：本研究は、独立行政法人港湾空港技術研究所と五洋建設株式会社の共同研究成果の一部である。また、大島干潟における現地調査の実施にあたり、国土交通省中国地方整備局 宇部港湾・空港整備事務所には多大なご協力をいただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 車田佳範，小久保裕：浚渫土を利用した人工干潟の造成工事，粘土地盤における最新の研究と実際—微視的構造の観察から超軟弱埋立て地盤対策技術まで—に関するシンポジウム，pp.291-296，2002。
- 2) 大石富彦，原口和靖，間所義孝，吉田淳，岡田純治：人工干潟造成の基礎地盤材として用いた浚渫粘土の強度特性，第39回地盤工学研究発表会講演集，pp.607-608，2004。
- 3) 渡部要一，佐々真志，林宏一，山田耕一：人工干潟の安全性評価におけるMASWの適用性の検討，土木学会論文集B2，Vol.66，No.1，pp.1406-1410，2010。
- 4) 室町忠彦：静的コーンペネトロメーターの軟弱地盤調査への適用に関する実験的研究，鉄道技術研究所報告，No.757，1971。
- 5) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（下巻），pp.570-571，2007。
- 6) 谷和夫，大向直樹編：今井五郎の圧密理論，横浜国立大学地盤研究室，2008。

RESEARCH ON THE RECLAMATION AND CONSOLIDATION OF AN ARTIFICIAL TIDAL FLAT FILLED WITH DREDGED CLAY

Kazuhiko UENO, Noriko KIKUHARA, Koichi YAMADA and Yoichi WATABE

An artificial tidal flat has been reclaimed with dredged marine clay in Port of Tokuyamakudamatsu. The artificial tidal flat was soft clay ground, so that reclamation and sand capping works were difficulty. Then, the ground will have consolidated for a long time after the construction. Therefore, we have been investigating into grounds of the artificial tidal flat from immediately after the construction at 2009. This research paper reports the reclaiming and sand capping cases and results of the field examination on the artificial tidal flat grounds and the consolidation analysis.