浚渫土圧入による 人工干潟修復方法の実規模実験

高 将真¹・杉原 広晃²・土田 孝³・熊谷 隆宏⁴・山田 耕一⁵

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Chanjin.Ko@mail.penta-ocean.co.jp

²五洋建設株式会社 中国支店 土木営業部 (〒730-8542 広島県広島市中区上八丁堀4-1)

E-mail: Hiroaki.Sugihara@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 広島大学大学院教授 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail: ttuchida@hiroshima-u.ac.jp

⁴正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Takahiro.Kumagai@mail.penta-ocean.co.jp

⁵正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Koichi.A.Yamada@mail.penta-ocean.co.jp

スラリー化した浚渫土を圧入して圧密沈下した干潟地盤を隆起させる圧入工法は、既往の研究において有効な工法として提案されてきた干潟の修復方法である。表層の生物相に影響を与えず、さらには定常的に発生する港湾航路の維持浚渫と干潟造成・維持を両立出来る工法である。本研究では、圧入工法の実用化に向けて実規模実験を実施し、補助工法としての隆起抑制板の設置や高圧噴射攪拌による圧入地盤の事前軟化の有効性を確認した。また、S波速度分布より圧入した浚渫土の内部形状を推定し、圧入土量との整合を確認した。さらに2次元FEM解析を行い本工法の再現検証を行った。本工法を用いると、浚渫土を活用した人工干潟の造成から修復までの一連の施工システムを構築できると考えられる。

Key Words : artificial tidal flats, slurry clay, pressure injection, repair of ground height

1. はじめに

港湾整備に関しては、航路・泊地の整備事業において発生する浚渫土に加えて、国際コンテナ、バルク戦略港湾の大水深化に伴う浚渫土の処分が喫緊の課題である。従来、浚渫土の多くは処分場に投入されてきたが、近年処分場の残余容量も逼迫してきており、新たに処分場を建設するにも多額の費用を必要とする。

一方、失われた沿岸域の自然環境再生の観点から各地で人工干潟の造成が行われている。自然環境への負荷をかけることのないよう、大量の海砂や山砂を用いることなく、人工干潟の造成を可能にする方法の一つとして浚渫土を中詰材とする方法¹⁾²⁾が挙げられる。この造成方法では、環境への負荷が低減されると同時に、浚渫粘土を中詰材に使用することで大量の浚渫粘土を活用することができる利点がある。しかし、造成後の原地盤や中詰材に使用した浚渫粘土が圧密沈下し、干潟の干出域が減少することで干潟機能の低下が懸念される。

従来、沈下した人工干潟に関しては、再度覆砂を行う

ことにより修復する方法が一般的であると考えられる。そのうち、施工方法として底開バージ等による直投式工法を用いる場合は、工費は安価であるが、薄層で均一な覆砂の施工が困難であるうえに、施工時の濁りの発生も多い。最近では、濁りの発生が少なく薄層覆砂が可能な工法もあるが、両工法とも施工時に覆砂表層の生物の生息環境がリセットされ、干潟の生物機能が失われる。また、覆砂を追加する方法では、その荷重によりさらに圧密沈下が助長されてしまう欠点がある。従って、人工干潟の修復方法には、表層の生物相を攪乱することや圧密沈下を助長することのない方法が求められる。

既往の研究³⁾⁴⁾⁵⁾において有効な工法として提案されてきた干潟の修復方法は、スラリー化した浚渫土を圧入して、圧密沈下した干潟地盤を隆起させる方法である。この圧入工法は、表層の覆砂層を攪乱せずに直接中詰材として浚渫土を圧入するため、従来の覆砂工法に比べ表層の生物相に与える影響は小さく、また、単位体積重量の大きい覆砂を追加する方法に比べて圧密沈下量は小さいと考えられる。さらには定常的に発生する港湾航路の維

図-1 実験平面図・断面図

持浚渫と干潟造成・維持を両立出来る工法であると言える。本研究では、圧入工法の実用化に向けて実規模での実験を実施した。

2. 実験方法

実験場所は浚渫土置場で、近隣からの浚渫土の受け入れ地である。このうち縦18m×横18mのエリアを人工干潟を模擬した地盤を作成し圧入実験を行った。図-1に実験平面図及び断面図を、図-2に実験フローを示す。

(1) 実験地盤作成

対象地盤は、浚渫粘土を投入後数年が経過し圧密が進行しており、表層は天日乾燥による亀裂が生じているため、実際の干潟地盤と同程度の強度²⁾(非排水せん断強さ $c_u=1.4\sim4.1\text{kN/m}^2$)となるように加水調整を行った。実験地盤を加水しながら、攪拌機付泥上作業車にて攪拌した。写真-1に泥上作業車に取り付けた攪拌機を、写真-2に実験地盤の加水調整状況を示す。

加水調整後、1孔式RI密度水分計で測定した含水比 w は98.8%である。液性限界 w_L は106%であることから、非排水せん断強さ c_u に換算⁶⁾すると 1.99kN/m^2 であり、想定通りの地盤強度が得られたと考えられる。さらに写真-3

写真-1 攪拌機

写真-2 加水調整状況

写真-3 覆砂状況

写真-4 気中噴射状況

のように解泥した地盤の表層に覆砂材として水砕スラグを50cmの厚さで撒き出した。

(2) 高圧噴射工法による事前攪拌

圧入対象地盤を事前に軟化させると、後に圧入する浚渫土が側方に広がり、緩やかに地盤を隆起させる効果が高いことが既往の研究⁴⁾で確認されている。地盤の軟化方法として、地盤改良分野で広く利用されている高圧噴射攪拌工法⁷⁾の高圧噴流を用いて地盤を切削、軟化させた。

図-1に示す直径15mの範囲を1箇所当たりの攪拌直径を1.8mとして計61箇所について高圧噴射を行った。ボーリングマシンによって攪拌ロッドを深さ-2.75mまで貫入させ、-2.25mまで引き上げる間に40MPaの高圧ジェット水によって地盤を切削、軟化させた。高圧ジェット水の気中噴射状況を写真-4に示す。目標含水比は、圧入浚渫土と同程度の125%とし、それを実現するために流量80L/minで3分半にわたり噴射・攪拌を行った。

高圧噴射工法施工後、1孔式RI密度水分計を用いて高圧噴射層の含水比を測定した結果は126%であり、目標値と同程度であった。また、電気式静的コーン貫入試験を実施し高圧噴射による地盤の軟化状況を確認した。図-3に示す実験エリア中央部におけるコーン貫入抵抗 q_c の深度分布より、高圧噴射による地盤の軟化が確認できる。

図-2 実験フロー

(3) 浚渫土圧入

圧入する浚渫土はグラブバケットにて浚渫したものを使用することを想定し、 $1.2w_L(=125\%)$ に調整した。また、圧入した浚渫土の地盤内部における形状を表面波探査で把握するために、圧入土にセメントスラリーを添加した。圧入した浚渫土は、一定時間経過後に固化体として把握される。添加後の気中フロー値が、 $1.2w_L$ に調整した浚渫土と同程度であることを、さらに原地盤とS波速度の違いを確認できることを勘案し、セメント添加量を 60kg/m^3 に設定した。

写真-5に浚渫土圧入時の施工状況を示す。事前に含水比を調整しておいた圧入浚渫土を運搬し、バックホウでコンクリートポンプに投入した。同時にセメントスラリーを添加し、コンクリートポンプにて1時間当たり 45m^3 で圧送した。セメントスラリーが添加された圧入浚渫土を、あらかじめ地盤中に挿入しておいたトレミー管を通じて地盤内へ圧入した。トレミー管は、先端の吐出口中心が覆砂上面から 2.5m の深さとなるように地盤中に挿入した。さらに、トレミー管周辺部における局所的な隆起及び圧入浚渫土の噴出しを防止するため、直径 3m の載荷板を設け、その上部に 20kN/m^2 の載荷圧となるように敷鉄板を敷設した。

浚渫土圧入時は、3次元レーザースキャナーを用いて地盤の隆起形状を測定した。また、圧入した浚渫土の形状を把握するために、表面波探査を実施した。

3. 実験結果

(1) 地表面隆起形状

浚渫土圧入後の地表面の隆起形状を3次元レーザースキャナーを用いて10分間隔で計測し画像解析を行った。

図-4に浚渫土圧入による地表面隆起の推移を隆起量のコンター図で示す。誌面上部から徐々に隆起し始め、下部側に隆起範囲が広がり、その後全体的に隆起する様子

図-3 コーン貫入抵抗 q_c の深度分布

写真-5 浚渫土圧入状況

が確認できる。最大隆起箇所は誌面下部側に表れており、最大隆起量は 0.66m である。圧入による影響範囲が高圧噴射を施工した直径 15m の範囲に及ぶとすると、隆起勾配は 11.6% となる。これは既往の文献⁴⁾に示されている値と一致しており、地盤全体がほぼ均等に隆起していることが確認できる。つまり、隆起抑制板の設置や高圧噴射工法による地盤の事前軟化といった補助工法の有効性が確認できたと言える。また、最終的な圧入土量は 85.6m^3 であり、圧入による影響範囲を直径 15m とすると、 1ha の人工干潟では約56箇所の圧入箇所から約 $4,800\text{m}^3$ の浚

図-4 地表面隆起形状の推移

渾土を利用できると試算される。

(2) 圧入浚渾土内部形状

圧入した浚渾土の地盤内部における形状を把握するために表面波探査を行った。表面波探査は、地球物理学的手法の一つであり、地表で与えた鉛直振動を多チャンネルで受信し、表面波(レイリー波)を抽出、逆解析することにより、S波速度分布を推定する手法である。S波速度分布は地盤の硬軟の分布を表しており、干潟土砂の堆積構造の把握に有効であるとされている⁸⁾。表面波探査状況を写真-6に、表面波探査測定箇所を図-5に示す。

浚渾土圧入後に、実験エリアを4.5m間隔で縦方向3測線、横方向3測線の計6測線において表面波探査を実施した。圧入した浚渾土の地盤内部における形状をS波速度分布から推定する。図-6に横方向の中央測線におけるS波速度分布を示す。圧入した浚渾土にはあらかじめセメントスラリーを添加しており、その部分のS波速度が大きく表れている。圧入範囲を推定するうえで、圧入した浚渾土と高圧噴射によって軟化された原地盤粘土との境界を把握することが重要である。高圧噴射によって軟化された原地盤粘土の一軸圧縮強さ q_u は、図-3の高圧噴射層におけるコーン貫入抵抗 q_c から 2kN/m^2 程度と推定される。また、事前の室内配合試験結果によると、セメントを添加した圧入浚渾土の一軸圧縮強さ q_u は 434kN/m^2 である。セメント改良が均一である場合の現場発現強度は、室内強度の0.7倍⁹⁾である 304kN/m^2 と推定される。この2つの条件から、境界部では平均して $q_u=153\text{kN/m}^2$ 程度の強度が発現していると考えられる。既往の研究¹⁰⁾では、粘性土におけるS波速度 V_s と一軸圧縮強さ q_u の関係は以下の式が提案されている。

$$q_u = 1.0 \times 10^{-3} \times V_s^{2.31} \quad (1)$$

固化した圧入浚渾土と高圧噴射によって軟化された原地盤粘土の境界部における一軸圧縮強さ q_u を 153kN/m^2 と仮定し、(1)式を用いると、S波速度 V_s は 176m/sec となるので、破線で囲った部分が圧入範囲と推定される。また、圧入範囲は楕円形状であり、高圧噴射による事前攪拌によって地盤が軟化され、圧入粘土の側方への進行が確認できる。

次にS波速度分布から推定された圧入範囲から圧入土量を確認する。S波速度分布から断面的に推定された圧入範囲を6測線すべてにおいて平面的につなぎ合わせると、図-7のようになり、この部分の平面積は 116m^2 である。圧入範囲の深さは6測線の平均で 1.1m であるので、圧入範囲を楕円球体であると仮定すると体積は 85.1m^3 である。実際の圧入土量は 85.6m^3 であるので、表面波探査から得られるS波速度分布から推定した圧入範囲は妥当であると考えられる。

図-5 表面波測線図

写真-6 表面波探査状況

図-6 S波速度分布図

図-7 推定圧入範囲(平面)

4. 解析による圧入工法の再現

(1) 解析概要

静的地盤変形解析プログラムを用いて、実規模圧入実験の2次元FEMによる再現解析を行った。圧入工法の解析における再現性を検証する。

解析に用いた地盤定数を表-1に示す。地盤はすべて線形弾性体とし、地盤の変形係数 E については、電気式静的コーン貫入試験から得られたコーン貫入抵抗 q_c より、式(2)及び式(3)を用いて算出した。

$$c_u = q_c / 20 \quad (2)$$

表1 解析に用いた地盤定数

	非排水せん断強さ c_u (kN/m^2)	変形係数 E (kN/m^2)
覆砂層	-	1.00×10^3
解泥層	2.25	4.50×10^2
高压噴射層	1.00	2.00×10^2
原地盤層	9.38	1.88×10^3

図-8 解析メッシュ図

$$E = 200c_u \quad (3)$$

図-8に解析に用いたメッシュ図を示す。解析は軸対称条件で行い、下端部は水平及び鉛直変位固定境界とした。

次に、補助工法の解析上での表現方法について示す。隆起抑制板については、覆砂層の上面(圧入点から上方に2.5mの位置)に設置した。隆起抑制板は、実験と同じ諸元の直径3m、载荷圧 20kN/m^2 となるように設定した。高压噴射による地盤の軟化は、図-3の高压噴射層のコーン貫入抵抗 q_c から式(2)及び式(3)を用いて変形係数を算出し入力することで表現した。

解析上での浚渫土の圧入は、覆砂上面から2.5m下の圧入位置における地盤要素を非排水境界で閉じておき、内部に圧力を与え地盤要素を膨張させることで圧入を表現した。膨張させる範囲は、図-8に示す赤斜線の範囲とした。与える圧力は、圧入前後における体積増分が圧入土量と等しくなるように圧力値を調節した。

また、補助工法の有効性を解析においても確認するため、隆起抑制板を設置せず、地盤を軟化させないケースについても解析を行った。

(2) 解析結果

図-9に圧入範囲中央部の覆砂面における鉛直変位分布を示す。実験で計測された実測値と解析値の補助工法を採用したケースは、圧入点直上部の隆起が抑制されている効果で、滑らかな隆起形状であるのに対し、解析値の補助工法なしのケースはそのような傾向は確認できない。最大隆起量の発生箇所については1.3m程度の違いが見られるが、大きさは実測値が0.66mに対し0.64mとほぼ一致

図-9 覆砂面における鉛直変位分布

していた。以上より、圧入工法はFEM解析による再現が可能であることが確認された。また、FEM解析からも補助工法の有効性が再確認された。

5. まとめ

本研究では、圧密沈下した干潟地盤を隆起させる圧入工法の実用化に向けて実規模での実験を実施した。さらに、2次元FEM解析を行い圧入工法の解析による再現性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 含水比測定結果より、圧入前の浚渫土の加水調整及び高压噴射による地盤の軟化状況は良好であった。また、コーン貫入抵抗の深度分布より、高压噴射層が軟化されている状況が確認できた。
- 2) 圧入による最大隆起量は0.66mであり、影響範囲を直径15mとすると隆起勾配は11.6%となり、地盤全体がほぼ均等に隆起していることが確認された。隆起抑制板の設置や高压噴射工法による地盤の事前軟化といった補助工法の有効性が確認できた。
- 3) 最終的な圧入土量は 85.6m^3 であり、圧入による影響範囲を直径15mとすると、1haの人工干潟では約56箇所の圧入箇所から約 $4,800\text{m}^3$ の浚渫土を利用できると試算された。
- 4) 圧入浚渫土の内部形状を把握するために、圧入浚渫土にセメントを添加し、表面波探査による推定を行ったが、概ね内部形状を把握することができた。
- 5) S波速度分布から推定された圧入範囲より圧入浚渫土の側方への進行が確認できた。このことから、原地盤の事前軟化方法としての高压噴流、および隆起抑制板の有効性を確認できたと言える。
- 6) 推定された圧入範囲から算出した土量と、実際の圧入土量との整合が確認された。推定された圧入範囲は妥当であったと言える。
- 7) 2次元FEM解析によって圧入工法が再現可能であることがわかった。

8) 圧入工法は、覆砂による修復方法と比べ1回当たりの建設コストは高くなると考えられるが、圧密沈下量が小さいため、修復回数が少なくなる利点がある。また、覆砂工法に比べ表層の生物相に与える影響が小さいため、環境面でも優れている。

9) 圧入工法を用いると、人工干潟造成(沖合に土留潜堤の築堤、浚渫土等の中詰材の投入、浅場造成、覆砂による仕上げ)⇒圧密沈下による干出域の減少⇒圧入工法の実施⇒地盤の隆起による干出域の再生 といった一連の施工システムを構築でき、一度に大量の浚渫土が発生する泊地浚渫や断続的に浚渫土が発生する維持浚渫の浚渫土を活用した干潟の造成が可能であると考えられる。

今後は、実際の浚渫工事に対応すべく、1箇所当たりの圧入土量に関して200m³以上を目標とし、施工能力の増大といった課題を解決していきたいと考える。

謝辞：本研究は(財)鉄道・運輸機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」の平成22年度採択研究「港湾・航路の維持管理と長期的に両立する新しい干潟造成技術の開発(総括研究代表者：土田孝広島大学大学院教授)」の分担研究として実施した。また、実験を行うにあたり、JFEスチール(株)の方々には多大なご協力・ご支援を頂きました。ここに記し、関係各位に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, 2002.
- 2) 上野一彦, 菊原紀子, 山田耕一, 渡部要一: 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, 土木学会論文集 B3(海洋開発), vol.68, No.2, pp.705-710, 2012.
- 3) 川崎大輔, 土田孝, 松井章弘: 浚渫粘土の圧入による人工干潟の造成と修復に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), vol.26, pp.705-710, 2010.
- 4) 菊原紀子, 熊谷隆宏, 土田孝, 杉原広晃: スラリー粘土圧入による人工干潟修復方法に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), vol.68, No.2, pp.1073-1078, 2012.
- 5) 川崎大輔, 土田孝, 森宏美: 浚渫土の地盤内圧入による人工干潟造成技術の開発, 土木学会論文集 B3(海洋開発), vol.68, No.2, pp.1085-1090, 2012.
- 6) 土田孝, 洪振舜, 渡部要一, 小川富美子: 練り返した粘性土の非排水せん断強度と正規化含水比の関係, 第34回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.543-544, 1999.
- 7) 資源・素材学会: ウォータージェット掘削・応用百科, pp.123-140, 丸善, 1996.
- 8) 渡部要一, 佐々真志, 桑江朝比呂, 梁順普, 田中政典: 多チャンネル型表面波探査に基づいた干潟土砂堆積構造の評価～せん断波速度構造の考察と人工干潟安全管理手法の提案～, 港湾空港技術研究所報告, 第49巻, 第3号, pp.157-196, 2010.
- 9) (財)沿岸技術研究センター: 管中混合固化処理工法技術マニュアル, pp.18, 2008.
- 10) 地盤工学会: 地盤工学への物理探査技術の適用と事例, pp.210, 丸善, 2001.

FIELD EXPERIMENT ON THE RESTORATION METHOD OF ARTIFICIAL TIDAL FLAT USING DREDGED SLURRY CLAY

Changjin KO, Hiroaki SUGIHARA, Takashi TSUCHIDA, Takahiro KUMAGAI, and Koichi YAMADA

Uplifting the ground by pressure injection of slurry soil is effective as a restoration method of tidal flat subject to consolidation settlement. This method ensures compatibility between maintenance dredging in ports and maintenance of tidal flats. In this study, we have made a field experiment to examine the applicability of the proposed method and confirmed the auxiliary methods to uplift the ground smoothly. By use of the distribution of S-wave velocity obtained by a surface-wave exploration, the shape of slurry soil injected in the ground has been estimated. It is confirmed that the estimated result agrees well with the volume of injected soil. In addition, the uplifting shape of ground surface in the field experiment has been reproduced by FEM analysis.