

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○川崎大輔
 広島大学大学院工学研究科 国際会員 土田 孝
 広島大学大学院工学研究科 学生会員 松井章弘

1. 背景と目的

港湾はその機能を維持・整備するため、航路や泊地の浚渫が定常的に必要になる。しかし、浚渫によって発生する泥土（浚渫土）の処分場建設には多大な費用を要し、環境の観点からも処分のための海面埋め立ては難しくなっているため、多くの港湾管理者が浚渫土の処分に悩まされており、埋立以外の安定的な利活用方法の確立が大きな課題となっている。

わが国の港湾では、人工干潟の造成が 1980 年代から活発に進められ、シルトや粘土を多量に含む浚渫土も埋立材として用いられてきた。しかし、干潟はあらかじめ策定された計画にもとづいて潜堤を建設し、その内部に浚渫土を集中的に投入し覆砂を行って造成されており、干潟造成中は大量の浚渫土が材料として必要になるが、干潟が完成した後は浚渫土を受け入れることはできない。このため、港湾の維持・整備のために行われる浚渫事業と干潟造成事業との綿密な調整が必要になり、現状では浚渫土の安定的な利活用方法とはいえない。

本研究は、このような観点から、干潟造成後に浚渫土を覆砂層の下部に圧入する方式による干潟造成方法に関する検討を行った。具体的には、室内で 1/25 スケールの干潟模型土層を作成し、浚渫土の圧入実験を行った。圧入技術が実用的なレベルで確立できれば、圧密沈下で低下した地盤高を回復したり、いったん造成した干潟を使用しながら浚渫土を内部に圧入して拡張するなどの、新たな干潟の整備方法が考えられる。

2. 研究の内容

実験装置の構成を図-1 に示す。実験には大きさが幅 100cm×100cm、高さ 50cm のアクリル製模型土槽を用いた。粘土の強度は重力場での相似則により、実験は実スケールの 25 分の 1（寸法および粘土地盤、圧入する粘土の粘着力）に設定して行った。粘土試料は強度調整の比較的容易な木節粘土（液性限界 62.56%、塑性限界 39.46%）を用いた。圧入実験の方法と手順は以下のとおりである。

- ① 図-1 のように土槽の真ん中に圧入管を設置した状態で、強度を調整した粘土を所定の高さになるように敷き詰める。また粘土地盤の表層にはろ紙を敷き、その上に層厚 50cm の覆砂層（ $\gamma=18\text{kN/m}^3$ ）を想定して、ここでは同等の分布荷重となるように丸砂利を 1m^2 あたり 16.3kg 敷いた。
- ② 土槽の中心に設置しておいた図-2 に示すような圧入口から粘土地盤とは強度の低いス

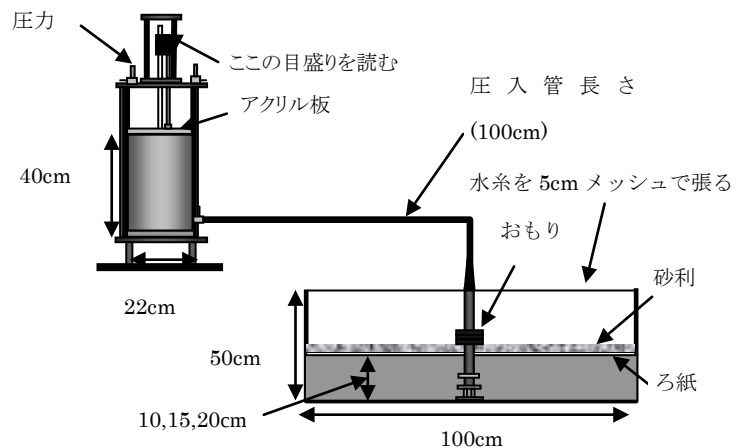


図-1 実験概要図

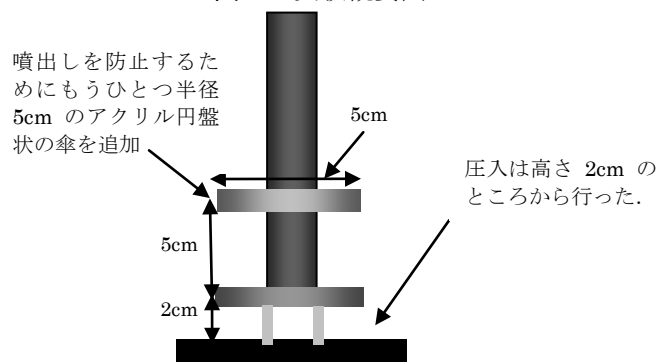


図-2 圧入口付近の形状

ラリー状の粘土を圧入する．圧入口の構造を図-2示すが,圧入口周面からの鉛直方向の噴出しを防止するため,直径5cmの傘を2箇所にした．同様の目的で,圧入管の直上には直径10cmのゴム製のおもり363gを載荷した．これは実地盤では1.2tf/m²で実際には圧入口の周囲に土のうによる押さえを行うことを想定している．

③ 圧入する粘土は，液性限界の強度(1.0～2.0kPa)よりも,やや大きい強度を想定し,0.05～0.16kPaなるように含水比を調整した．その後調整した粘土を図-1の左に示す圧入容器の中に入れ，圧入容器の上から空気圧をクリル板に加えて，圧入管を介して圧送し，圧入した．

④ 圧入量は圧入容器の目盛りを読み取ることにより算出した．圧入は表層の丸砂利層とその下のろ紙に亀裂が発生する直前まで実施し,その間模型土槽の上に 5cm メッシュで張った水糸から表層までを測ることで圧入による地盤高の変化を測定した．実験ケースを表-1 に示す.原地盤の層厚は 10cm,15cm,20cm の 3 パターンで,それぞれのケースにおいて圧入速度が速い場合と遅い場合の 2 パターンずつで計 6 パターン行った．

表-1 実験ケース

Case	層厚	せん断強度(kPa)		圧入速度 (cm ³ /sec)
		圧入側	原地盤側	
1	10cm	0.09	0.60	0.81
2		0.05	0.57	25.4
3	15cm	0.08	0.61	6.87
4		0.04	0.55	30.64
5	20cm	0.16	0.76	0.91
6		0.05	0.80	34.5

3. 圧入に必要な圧力

圧送管内の摩擦抵抗と管先端にかかる圧力の和から圧入に必要な圧力を推定した.送泥管の管内摩擦損失は式(1)のように与えられる．

$$p_L = \frac{c \times \pi RL}{A} \tag{1}$$

圧入粘土の粘着力c,管の径R,管の長さL，管の断面積によって決まる．圧入管の先端にかかる圧力は,Vesicによる圧入粘土の球空洞押し広げ理論¹⁾²⁾より以下の式を用いた．

$$\begin{aligned}
 p_u &= cF_c + qF_q \tag{2} \\
 F_q &= \frac{3(1+\sin\phi)}{3-\sin\phi} [I_r]^{ \frac{4\sin\phi}{3(1+\sin\phi)} } \quad F_c = \frac{4}{3} (\ln I_r + 1) \\
 I_r &= \frac{E}{2(1+\nu)(c+q\tan\phi)} = \frac{G}{S} = 50 \sim 100
 \end{aligned}$$

球空洞押し広げ理論は,真ん中を筒先として,弾塑性体をテニスボールが圧力によって膨らむイメージにより,押し広げるのに必要な圧力が杭先端の極限支持力に相当するとしている.先端での圧力 p_uは式(2)で求められ,原地盤粘土の粘着力cに無次元の球空洞押し広げ係数F_cをかけた項と圧入口における有効応力qに押し広げ係数F_qをかけた項によって表される． φはせん断抵抗角,I_rはせん断係数とせん断強度の比である．

式(1)と式(2)より,圧入に必要な圧力は,圧入管送り出しの圧力と管先端での圧力の和で表され则认为,実験で実際に圧入し始めた圧力を比較して図-3 に示した．図のように,圧入開始時の圧力は全体的に推定値よりも実測値のほうが大きくなっているが,この原因として,強度を測定してから圧入までの間にシキソトロピーにより,粘土の強度が増加したことが考えられる.また，管の摩擦損失以外にパイプ入口と出口付近での損失があることも推定値よりも実測値のほうが大きくなった原因と考えられる．しかし，Case1を除くとほぼ推定値と実測値は一致しており，上式による圧入に必要な圧力の推定は妥当と考えられる．

これより,実スケールで考えると,圧入する粘土の強度が液性限界の含水比での練り返し強度である 1.5kPa と想定し,圧入管径を 8cm、長さ 100m とすると 5.1MPa となる. これは現在,セメント処理土の圧送に用いられているポンプの容量を考えても実現可能な圧力と考えられる. ただし,実際の施工では,現地の施工箇所の潮汐の状況を考慮し,より長い圧送管が必要になる場合もあり,そのときは圧入する粘土の強度をより小さく調整することを考えられる.

4. 圧入時の地盤の変形

(1)各ケースにおける実験結果と考察

今回の各実験ケースにおける圧入量, 中心での変化量, 影響面積を表-2 に示す. なお圧入量については表層に亀裂が発生したとき, または実スケールで 100m³に相当する 6400cm³の圧入量に達したときとし, 影響面積は地盤高が 1cm以上上昇した範囲と定義した. 表-2 のように圧入量としては実スケールで 100m³に相当する 6482cm³の圧入が可能であった. また層厚が大きく, 圧入速度が遅いほど, 圧入できる粘土の量は増加した.

図-4 は圧入量と影響面積の関係である. 図のように圧入量は影響面積とほぼ正比例しており, 層厚が大きく, 圧入速度が遅いほど圧入できる粘土の量は増加した. 全実験ケースで一直線上における圧入後の地盤高の変化量を図-5 に示す. 影響面積は圧入管を中心に直径 50cm~80cm の範囲であるが, 実スケールでは 12.5m~20m に相当する.

(2) 圧入後の断面状況

写真-1 は Case6 における圧入後の圧入管から 5cm の位置の中詰め粘土層をアクリル板で切断した断面図である. 写真-1 のように圧入側の粘土とあらかじめ食紅で色をつけた原地盤側の粘土との色の違いにより, 圧入時の粘土の挙動を確認した. 圧入口は土槽底部から 2cm 離れた高さに固定した図のように圧入した粘土は, 上方へ広がるように球根状に入っている. また, 中詰め粘土の層厚が厚いほど圧入した粘土が広がる幅が広くなっており, 表層においても広範囲に嵩上げされた. 図より圧入粘土の幅は 30cm, 表層で嵩上げされた幅は 55cm であり, 圧入した粘土が広がっている幅より 20~25cm 程度広い範囲まで地盤高の変化に影響があった.

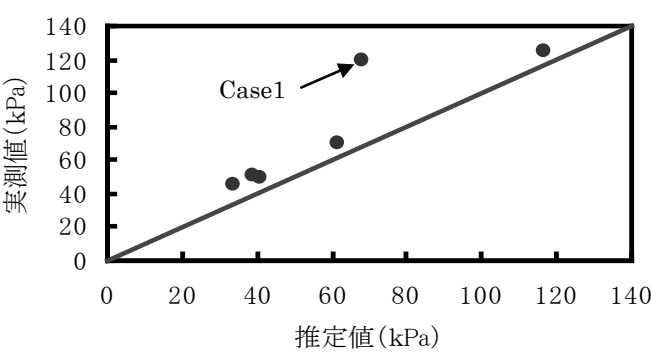


図-3 圧入に必要な圧力（実験値と理論値の比較）

表-2 実験結果

Case	1	2	3	4	5	6
圧入量 (cm ³)	1292	3041	6158	4410	6482	5778
変化量 (cm)	2.55	4.29	5.62	5.20	4.99	4.38
影響面積 (cm ²)	475	800	1213	1075	1638	1225

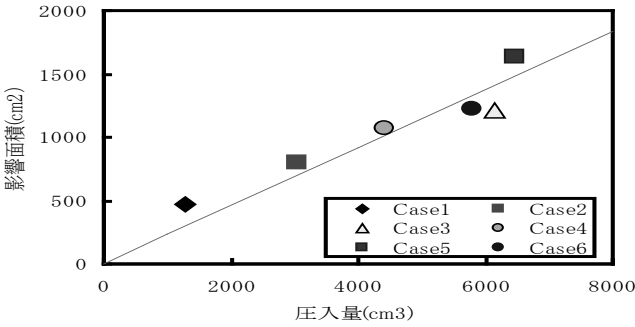


図-4 圧入量と影響面積の関係

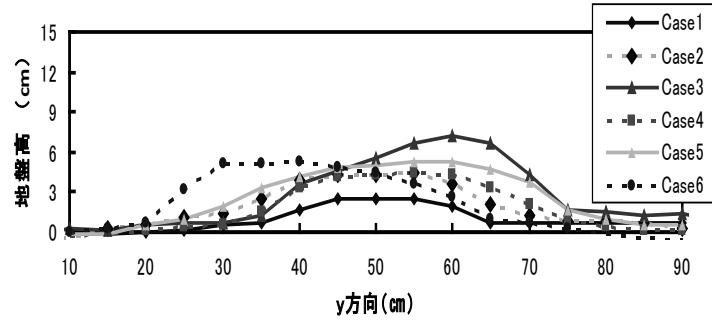


図-5 地盤高の変化量

5. 実際の干潟スケールでの適用可能性

実験結果を実スケールに換算した値を表-3に示す. 縮尺は強度, 寸法を模型の25倍に, 時間に関しては圧入速度を層流と考えて $25^{1.5}$ 倍とした.

まず, 圧入側と原地盤粘土の強度について考える. 圧入側粘土は, 海底地盤に堆積している土はおおよそ液性限界の0.9~1.1倍の範囲で堆積しているのので, 数値的に同程度の値になっている. また, 原地盤粘土は, 現地調査の結果より若干大きな値になったが³⁾, 現地調査の調査深度は深いところで3m以浅程度であり, 深い場所ではより硬くなっていると考えられるので, 実験はほぼ実スケールの強度の25分の1を再現できていると考えられる. つぎに, 圧入量についてCase4の結果で考える.

1haの干潟を考えると, 1回の圧入で中心付近で1m程度, 嵩上げされた面積で平均すると70cm程度嵩上げになる. また, 地盤高が25cm以上変化した影響面積は 67m^2 でこれは圧入口を中心に半径約5mである. したがって圧入管を10m間隔で設置し, 100箇所で圧入を行えば, 全面を平均70cm嵩上げすることができ, 1回の圧入量は 70m^3 程度なので, 7000m^3 処分できると考えられ, 以上のように, 本実験の結果が実スケールで適用できるとすれば, 浚渫土を有効利用する上で, 実現可能な工法であると考えられた. しかし, 今後は具体的にコスト面や時間的な効率性を考えていく必要があると考えられる.

6. 結論

- 1) 1/25スケールの室内模型実験の結果, 直径50~80cmの範囲に最大約 6482cm^3 の圧入が可能であった.
- 2) 圧入に必要な圧力の実験値と推定値はほぼ1対1で対応した.
- 3) 圧入量と圧入速度, 影響面積, 粘土層厚にはそれぞれ正の相関があり, 層厚が大きく圧入速度が遅いほど圧入量は多くなる傾向があった.
- 4) 圧入はおもに鉛直方向であり, 今後最初の段階で横に均等に広がるように, 圧入管の形状や圧入口の工夫が必要である.
- 5) 今後もう少し規模の大きな実験装置を用意して模型実験を行い, 適用性を検討していくことが必要である.

7. 参考文献

- 1) 日下部治, (1990)土質工学会, 16 支持力入門, 第2章, PP. 62~73
- 2) 土質工学ハンドブック(1982), 第16章, 杭基礎 pp. 552~555.
- 3) 松井章弘, 海洋開発論文集 Vol.26(2010), 浚渫土と覆砂で造成された人工干潟地盤における軽量動的コーン貫入試験の適用 (投稿中).

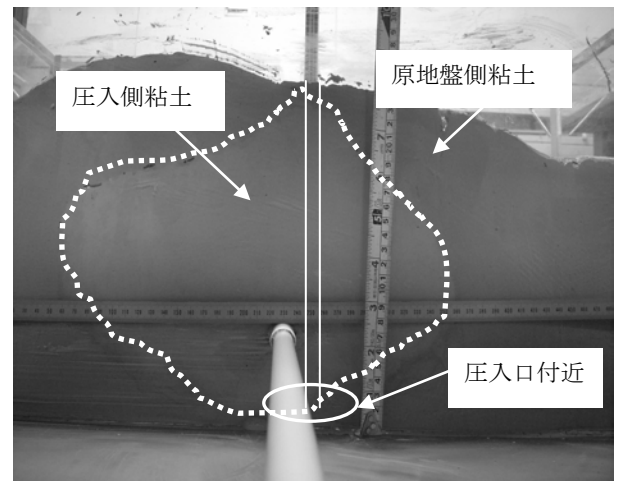


写真-1 圧入後の断面状況

表-3 Case4における実スケール換算結果

実験ケース		Case4
層厚		3.75m
せん断 強度	圧入側	1.04kPa
	原地盤側	13.8kPa
圧入量		69m^3
中心での盛り上がり高さ		1.3m
影響面積		67m^2
影響範囲		10m
圧入速度		$13.8\text{m}^3/\text{h}$