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

STUDY ON CONSTRUCTION METHOD OF ARTIFICIAL TIDAL FLAT BY PRESSURE INJECTION OF DREDGED SLURRY

川崎大輔[1]・土田孝[2]・松井章弘[3]
Daisuke KAWASAKI, Takashi TSUCHIDA, Akihiro MATSUI,

[1]学生会員　広島大学工学研究科（〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1）
[2]正会員　博(工)　広島大学大学院教授　工学研究科（〒739-8527　広島県東広島市鏡山1-4-1）
[3]学生会員　広島大学工学研究科（〒739-8527　広島県東広島市鏡山1-4-1）

For the purpose of reusing dredged slurry and reproducing natural coast environment , artificial tidal flats have been constructed in various places. The conventional construction method of artificial tidal flat is to build submerged embankment offshore , to reclaim the coastal area by dredged slurry , and to cap the slurry by sandy layer. However, this method has a probrem that the area of the tidal flat reduced with the time by the consolidation settlement of dredged slurry. In this study , the new construction method in which the pressure injection of dredged slurry is carried out into the reclaimed clay layer under the capping layer , is developed. The 1/25 scale laboratory model test has been carried out , where the pressure injection test of soft clay is made under the various conditions. As conclusions , the new construction method by the pressure injection of clay seems to be applicable for the actual artificial tidal flat.

Key Words : *Dredged slurry, pressure injection, consolidation settlement*

1．研究の背景と目的

港湾はその交通機能を維持するとともに時代のニーズに合わせた整備を行うため，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．このため，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，開発によって失われた沿岸環境の再生を目的として人工干潟の造成が1980年代から活発に進められており，シルト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，従来の干潟造成は通常の土地造成と同様の手法で行われてきた．すなわち，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干潟を造成してきた．

この造成方法では，干潟造成中は大量の浚渫土が材料として必要であるが，浚渫は港湾の維持・整備のために行われるので，干潟造成事業と港湾事業の綿密な調整が必要になる．さらに，完成後には干潟は浚渫土を受け入れることはできないので，現状では浚渫土の安定的な利活用方法とはいえない．

また，干潟の生態系を良好に育成するためには造成後にモニタリングを行って変動に合わせた適切な対応を図る順応的管理（アダプティブマネジメント）が必要とされている[1)]．しかし，現行の造成方法では，干潟完成後地元に管理を引き渡すため，維持管理が不十分となり，せっかく造成しても期待した生態系が形成されない例も報告されている[2)]．これらの問題を解決するには，港湾の維持や整備のための浚渫事業と長期間両立し，造成後も適応的管理による維持管理を続け，自然の生態系を再生できる技術としくみが強く求められる．

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幅するなどの，新たな干潟の整備方法

が考えられる.

2. 室内圧入実験

(1) 実験の概要

今回実施した室内圧入実験装置の構成を**図-1**に示す.実験には大きさが幅1m×1m,高さ0.5m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.

表-1に実験に用いた相似則を示すが,本実験は粘土の粘着力と重力が支配する現象と考え,$\phi=0$における支持力係数が一致するようにした.ただし,粘着力を1/25とするためには粘土の密度を実際の条件よりも小さくせざるを得ないため,密度に関する**表-1**の条件は満足されていない.なお,時間に関しては圧入が層流であると考えて$\lambda^{1.5}$と考えた.

図-2は尾道糸崎港海老地区の人工干潟における軽量動的コーン貫入試験の貫入抵抗値と深度の関係である.図より深度約1mまでが覆砂層であり,その下が浚渫粘土層(液性限界平均約90%)となっており,貫入抵抗値は深度とともに増加している.しかし,深度2m以深に着目するとほぼ貫入抵抗値はほぼ一定となっている.コーン係数26.9を用いて粘着力に換算すると13.0kPaである[1].

粘土試料は木節粘土(液性限界62.6%,塑性限界39.5%)を用い,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(中詰め粘土)を所定の高さになるように敷き詰める.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($\gamma'=8kN/m^3$)を想定して,1/25相当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土槽の中心にあらかじめ設置した圧入口から,ス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箇所に設けた.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.これは実地盤に換算すると$1.2tf/m^2$のサーチャージに相当し,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実際に圧入する粘土の強度は液性限界の強度(1.0～2.0kPa)よりも,やや大きい強度を想定した.実験ではその1/25の強度である0.05～0.16kPaとなるように圧入する粘土の含水比を調整した.調整した粘土を**図-1**の左に示す圧入用容器の中に入れ,空気圧をアクリル板に加えて,送泥管

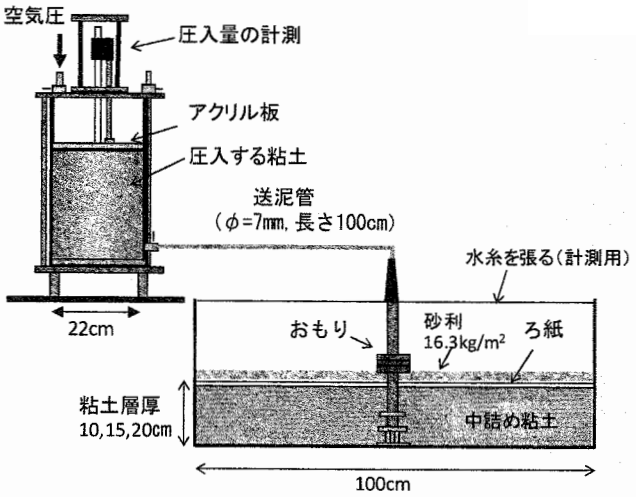

図-1 実験概要図

表-1 圧入実験に用いた相似則

パラメータ	実物/モデル	相似比
長さ	λ	25.0
密度	1	1.0
時間	$\lambda^{1.5}$	125.0
応力	λ	25.0
粘着力	λ	25.0
変位	λ	25.0

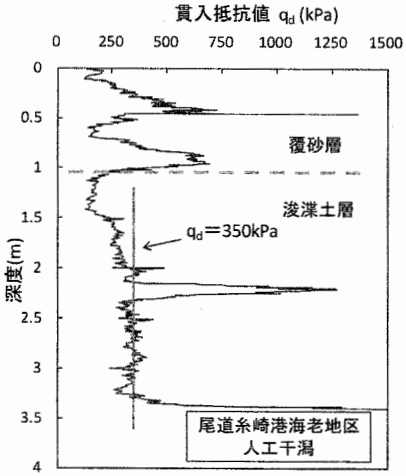

図-2 尾道糸崎港海老地区の貫入試験結果

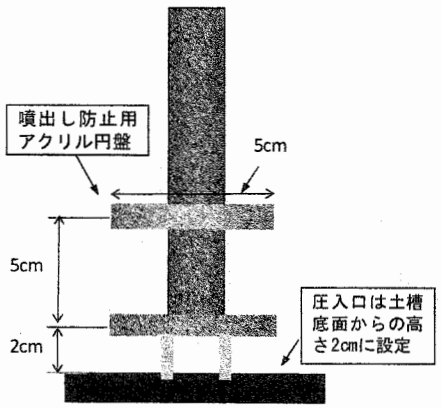

図-3 圧入口付近の形状

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り地盤高の変化を測定した．

実験ケースを**表-2**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パターンを行った．

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，圧入粘土の粘着力c, 管の径R, 管の長さLによって式(1)のように与えられる．

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

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[3),4)]を用いて検討した．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は以下の(2)式で求められ，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り，Δは塑性域内の体積ひずみを表している．

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

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ると考え，実験で実際に圧入し始めた圧力を比較して**図-4**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

表-2 各実験ケースの条件

Case	層厚	せん断強度(kPa)		圧入速度 (cm^3/sec)
		圧入側	中詰側	
1	10cm	0.09	0.60	0.81
2		0.05	0.57	25.40
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	34.50

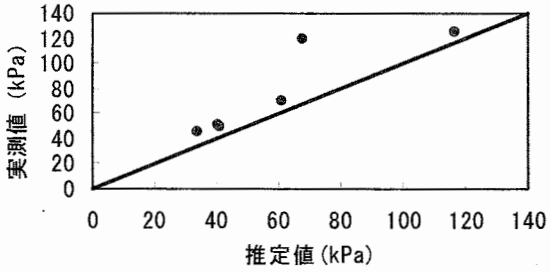

図-4 圧入に必要な圧力の推定値と実測値の比較

表-3 実験結果

Case	1	2	3	4	5	6
圧入量 (cm^3)	1,292	3,041	6,158	4,410	6,482	5,778
盛上がり高さ (cm)	2.6	4.3	5.6	5.2	5.0	4.4
影響面積(cm^2)	475	800	1,213	1,075	1,638	1,225

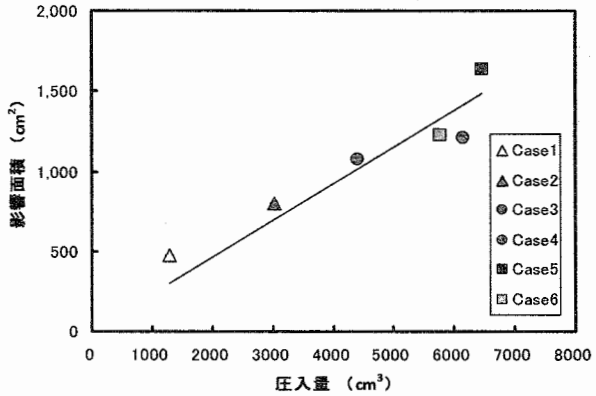

図-5 圧入量と影響面積の関係

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方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ほぼ一致しており，上式による圧入圧

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として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現実性のある圧力と考えられる.

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-3**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100m^{3}に相当する6,400cm^{3}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-3**に示すように圧入量としては実スケールで100m^{3}に相当する6,482cm^{3}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-5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.しかしCase1の場合はろ紙を1枚しか敷かなかったため,他のケースよりも破壊が早くなり,同じ傾向が見られなかった.

圧入後の地盤高の変化を**図-6**に示す.図のように,地盤高が1cm上昇する影響面積は圧入管を中心に直径50cm～80cmの範囲であるが,これは実スケールでは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．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の高さに固定しているが，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圧入されている．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.

5．地盤変形解析による模型実験結果の検討

(1) 解析の方法

室内での模型実験の結果，干潟模型地盤内にスラリー状の粘土を圧入することにより，比較的広い範

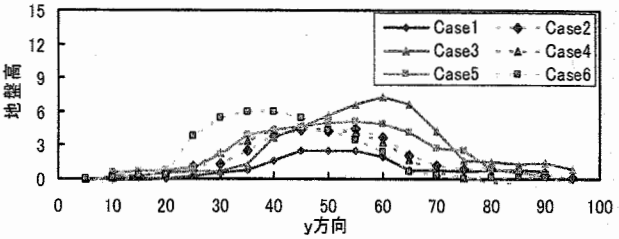

図-6 圧入後の地盤高の変化

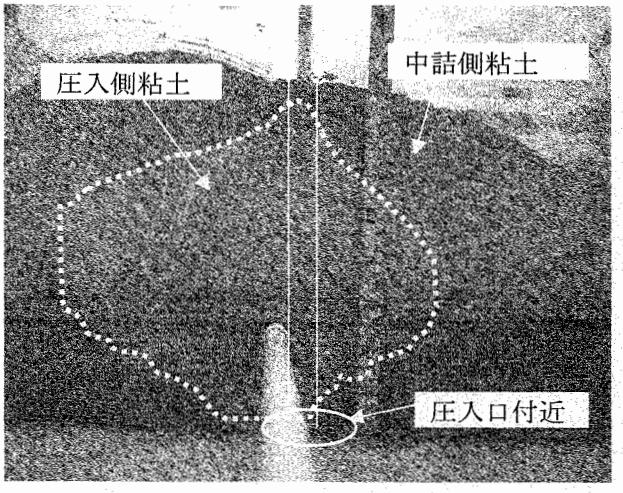

写真-1 圧入後の断面状況

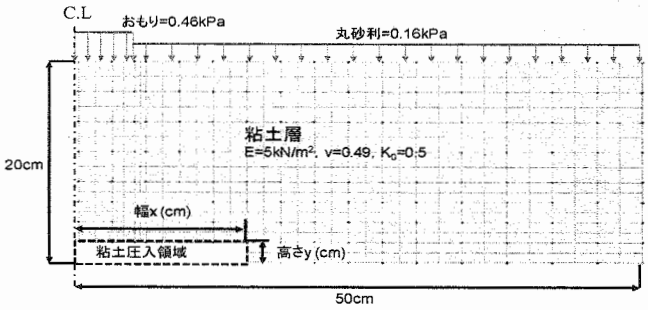

図-7 要素分割の例

囲の地盤高を嵩上げすることができた．ここでは，地盤解析汎用プログラム(GEOFEM)[5]を用いて，本実験の圧入後の表層での断面形状に関する検討を行った．なお，本実験は圧入口からスラリー状の粘土が地盤内に入っていく現状であるが，地盤解析プログラムではこのような土の動きを解析するのは困難であるため本解析は現象をかなり単純化している.

解析断面は実験土層の中央部からの軸対象断面でモデル化し，材料はすべて弾性体とした．丸砂利層の効果については，上載圧として0.163kPaを載荷した．実験時の中詰め粘土層の粘着力c_uは0.55～0.80kPaであった．一般に粘土の弾性係数としては50～200c_uを用いられるが，これはひずみレベル1～3%程度に相当している．本実験ではその10倍程度の大きなひずみレベルの現象であるので弾性係数と

しては5kN/m^{2}を用いることにした．ポアソン比は非排水挙動を考慮して0.49，静止土圧係数K_0を0.5と仮定した．

解析断面の要素分割の例を**図-7**に示す．粘土の層厚は20cmとし，粘土圧入の効果については図の左下部分に矩形の粘土圧入領域を設定し，この範囲の節点に，圧力を等分布荷重として作用させた．粘土圧入領域の面積及び幅と高さを変化させ，各パターンでの表層と圧入領域の形状の解析結果を比較した．解析パターンは大きく分けて圧入領域が大きな場合と，小さな場合で行った．

この粘土圧入領域の面積の違いは，解析を開始する時点での圧入量の違いを意味しており，領域が大きな場合は，ある程度粘土が入っている状態を，領域が小さい場合は，圧入開始直後を想定している．領域大の条件はC.Lを中心に円柱に粘土が入っていると想定して，約1,400cm^{3}の体積になるように幅，高さを決めている．圧入領域に載荷する圧力は，上方p_v・側方p_hともに同じ値を与え，解析断面の左側上端の変位が，模型実験でのCase5のy=50の中央部地盤高の変化量にフィッティングするように大きさを調整した．境界条件は両端のx方向を拘束，底面をy方向拘束とした．

(2) 解析の結果

図-8に解析結果，**表-4**にこのときの載荷圧力を示す．**図-8**は圧入粘土領域の範囲に圧力を載荷させた時の表層の変位を示しており，領域が大きい場合と，領域が小さい場合をそれぞれ示している．**図-7**より，領域が大きい場合は，模型実験の地盤高の変形を再現している．一方，領域が小さい場合は，圧力を載荷する範囲が小さいためか，表層まで圧力の影響が伝わっておらず，これ以上圧力を上げると，圧入領域付近の要素の変形が大きくなりすぎ，うまく実験結果を再現することができなかった．また，載荷圧力は，模型実験での管先端で加わっている圧力より小さな圧力で，変形が起こっている．

さらに，幅15cm×高さ2cmの結果が最も実測値と近似しており，幅が狭い領域になるほど，差が大きくなっており，幅が小さくなるほど，同じ変形量にするための圧力が大きくなっていることが載荷圧力から見てとれる．この結果からこの解析プログラムでは，圧入初期の状態からの変形は再現し難いが，ある程度粘土が入った状態からでの表層の地盤形状を解析により推定することは可能といえる．

次に領域15cm×2cmと領域10cm×4.5cmのケースで側方p_hの圧力を示す結果の倍にした状態で載荷した結果を**図-9**に示す．側方の圧を倍にした意図は，実現象で側方の方へ粘土が流入しやすい場合を想定している．

図-9より，p_hを大きくした場合の方が表層の左上端の変位が抑えられ，広い範囲で上方へ変化していることが分かる．この結果より，実施工の際に1度の圧入でできるだけ広い範囲を嵩上げするためには，圧入初期の段階で圧入側の粘土をいかに側方へ流入させることができるかが重要であるということが分かる．

以上のように，地盤解析汎用プログラム(GEOFEM)[5]を用いることで，粘土が圧入した状態からの，模型実験での圧入後の表層の断面形状を再

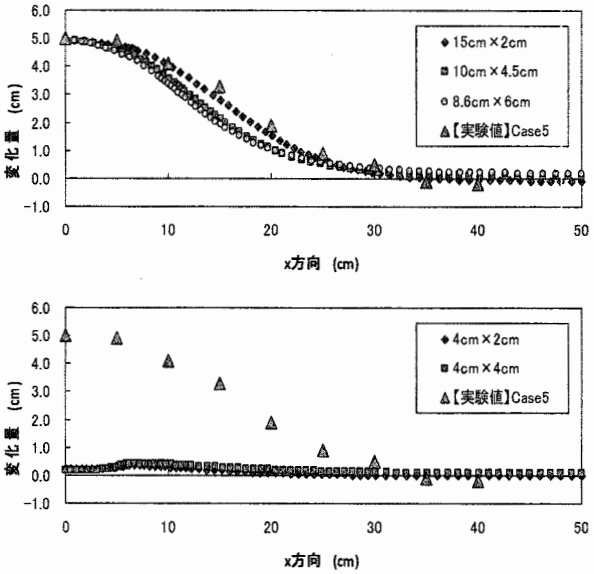

図-8 圧入領域が大小の場合の表層の変位

表-4 各パターンでの載荷圧力

圧入領域(cm^2)	載荷圧力(kPa)
15×2	2.3
10×4.5	5.1
4×4	10.0
4×2	10.0

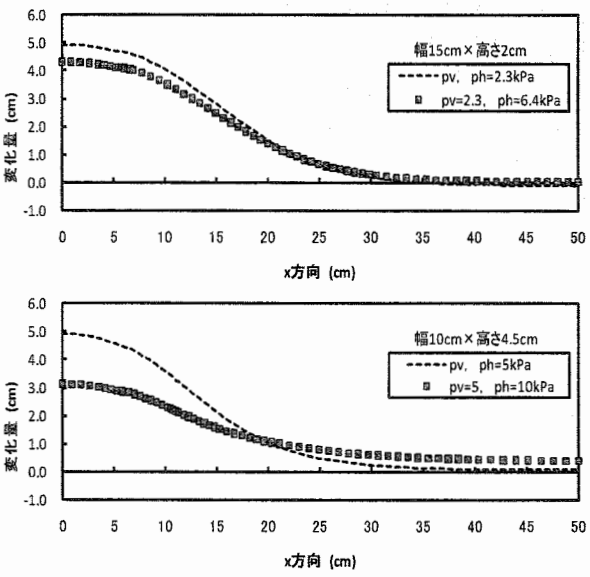

図-9 側方への圧力を変化させた場合の比

現することができた．しかし，今回行った解析方法は，中詰め粘土層を弾性体と仮定し，圧入する粘土については単に矩形断面に分布荷重を載荷したという大きな簡略化を行っている．これは，地盤中で風船を空気圧で膨らました場合に相当し，表層の形状の変化だけに着目し，他の要素は無視している．

実際の模型実験では，圧入管から新たに粘土が排出するので，解析ではある一部分から新たな要素があふれ出すような現象を再現しなくてはならず，粘土は非常に柔らかく，むしろ流体に近い挙動をする．今後，本実験の現象をより正確に表現するためには，解析法の変更や改良を行う必要があると考えられる．

6．圧入工法の適用可能性について

本工法を実スケールでの施工した場合の適用性について検討する．

表-5はCase4を例にとって，実験結果を**表-2**の相似則により実スケールに換算した結果を示している．

圧入側粘土は，海底地盤に堆積している土はおよそ液性限界の0.9~1.1倍の範囲で堆積していると考えられるので実験条件は同程度の値になっている．また，中詰粘土の粘着力は，**図-2**の結果より求めた13.0kPaとほぼ一致している．

圧入結果の換算をみると，圧入量69m^3，影響範囲（直径）10m，中心での盛り上がり高さ1.3mとなった．1haの広さの干潟を考えると，1回の圧入で中心付近を1m程度嵩上げができるが，嵩上げされた面積で平均すると約70cm程度嵩上げである．また，地盤高が25cm以上変化した影響面積は67m^{2}であるが，これは圧入口を中心に半径約5mであり，このことから圧入管を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回の圧入で70m^{3}程度であるので，7,000m^{3}処分できる．

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仮定すれば，浚渫土を有効利用する上で，実現可能性のある工法であると考えられる．しかし，今回は粘土の粘着力を1/25としたことで，密度が実スケールよりも小さくなっており，さらには応力ひずみ関係も異なっている．したがって今回用いた相似則の妥当性については，さらに検討する必要がある．

また，今回の実験では縮尺を粘土の強度，模型寸法を合わしており，実際の施工速度を参考にしたわけではないので今後圧入速度についてさらに検討する必要がある．干潟などの浅海域の工事は潮汐の影響があるため，どのように圧入管を設置し，圧入を行うか，施工上の工夫が必要である．

表-5 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		13.8m^3/h

7．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6,482cm^{3}の圧入が可能であった．
2) 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．
3) 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．
4) 圧入に必要な圧力は計算によって求められ，実験値と推定値はほぼ1対1で対応していた．またその圧力は管の長さに大きく影響されることがわかった．
5) 実スケールへの適応性への検討であるが，相似則は時間に関しては正確でないので実際に施工を行うときには注意が必要であり，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．

謝辞：本研究の実施にあたって文部科学省科学研究費補助金21241021「廃棄物リサイクルによる藻場干潟再生技術の開発（研究代表者：岡田光正）」の支援を得た．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 海の自然再生ワーキンググループ：順応的管理による海辺の自然再生，国土交通省港湾局,2007.
2) 花輪伸一・古南幸弘：人工干潟の問題点と課題，海洋開発論文集，第18巻，pp.43-48,2002.
3) 日下部治：土質工学会入門シリーズ 16,支持力入門，第2章，PP. 62～73,1990.
4) 土質工学ハンドブック，第16章，杭基礎，pp.552～555,1982.
5) 水野健太，土田　孝，小林正樹，渡部要一:水平変位の予測精度に着目した粘土の構成モデルと現地計測事例による検証，土木学会論文集 C，Vol.63，No4，936-953,2007.