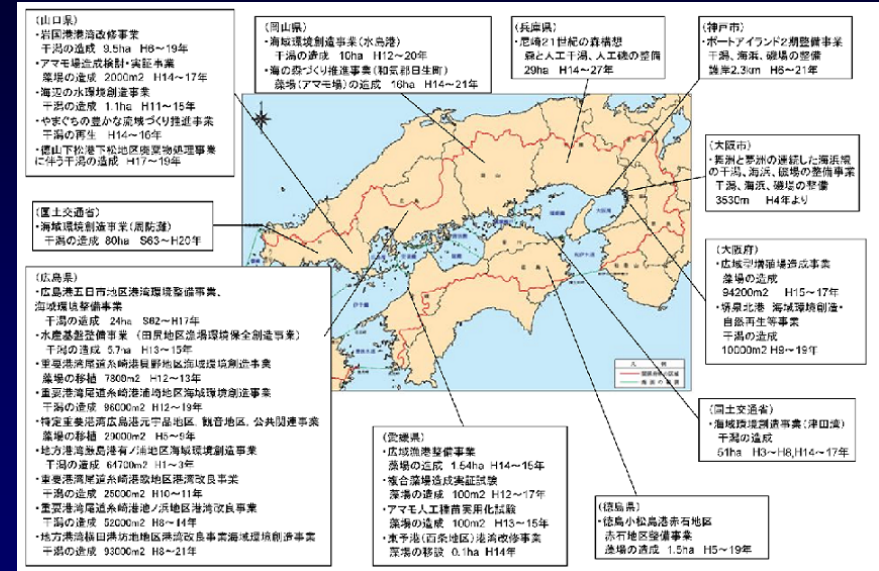


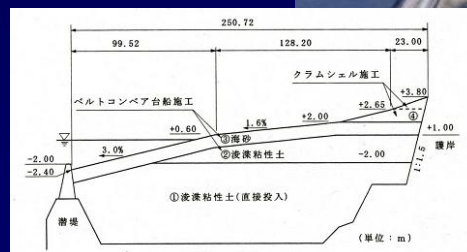
地盤内浚渫土圧入による 港湾・航路の維持管理と両立する 人工干潟造成技術に関する研究

広島大学大学院工学研究科
土田 孝

瀬戸内海における藻場・干潟の造成事業例



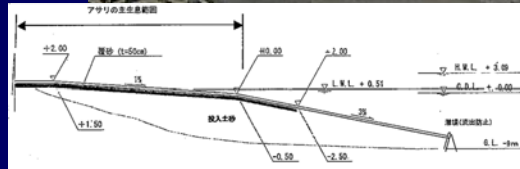
五日市人工干潟



尾道系崎港海老地区人工干潟



山口県徳山港大島人工干潟



背景

開発によって失われた沿岸環境の再生を目的として、浚渫土を材料として用いた干潟造成が各地で実施されている。

従来の干潟造成は通常の土地造成事業と同様の手法で実施されるため、あらかじめ策定された計画にしたがって浚渫土を集中的に投入し、干潟を造成・供用する必要がある。

浚渫土は工事期間中は材料として必要とされるが、完成後は不要。港湾整備や航路の維持にともなって発生する浚渫土は定常的に発生する。

干潟造成事業と浚渫土の発生は時間的なずれが生じやすく、調整が難しい！

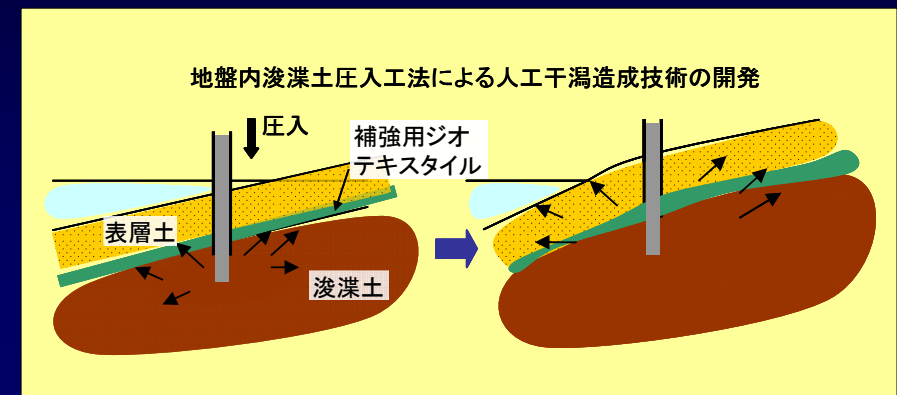
港湾の維持浚渫と両立し、建設費用を低減できる新たな干潟造成技術

新たな干潟構造

- ・港湾の維持・整備によって発生する浚渫土を長期間にわたり受け入れることができる
- ・造成が完了した部分から随時干潟の機能を発揮し、市民に開放できる
- ・リサイクル材料のみで干潟を造成する。

地盤内浚渫土圧入工法

- ・表層土を施工後に浚渫土を地盤内に圧入して地盤を盛り上げる工法



特徴

従来工法のように短期間で干潟を完成させるのではない。

浚渫土発生タイミングに合わせ、干潟の機能を逐次発揮させながら、ゆっくりと造成していく。

人工干潟は、モニタリングを行いながらその結果に合わせて適切な対応を図るアダプティブマネジメント(適応的管理)が求められる。

利用しながらゆっくり作る本工法は、人工干潟のこのような特性に適合した工法である。

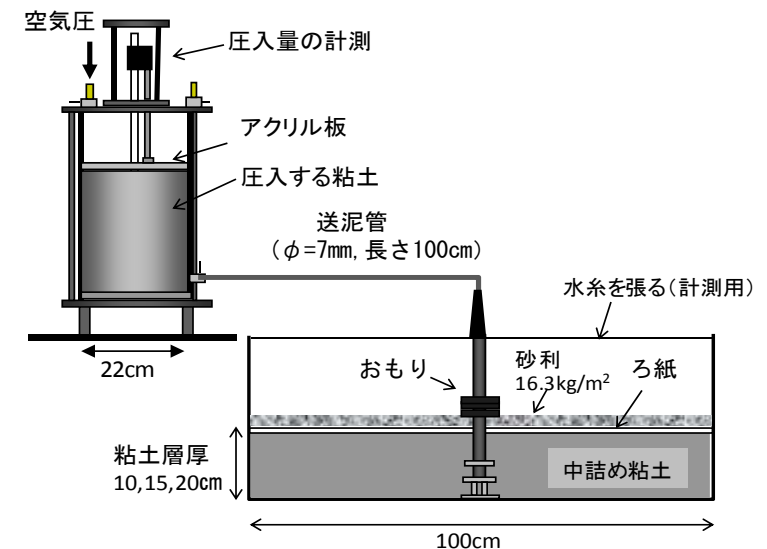
地盤内圧入方式による人工干潟造成技術

- 浚渫土を多数の圧入口から圧入して表層土の標高を徐々に均等に上昇させるので、施工とともに干潟が拡大し、干潟の機能を発現させながら浚渫土のリサイクルが可能になる。
- 表層土を施工した以降は浚渫土を地盤内に圧入して造成を行うため、海面の水質汚濁がなく、海浜の利用を妨げない。
- 浚渫土量が計画から変化した場合でも面積が変動するものの、干潟機能には大きな影響はない。浚渫時期の変化にも容易に対応で、浚渫で発生した土を随時干潟造成に利用することができる。
- 圧密沈下した干潟内の地盤に圧入を行うことで標高を回復させることができる。

粘土圧入による模型実験 (シリーズ1)

1/25スケールの模型土層を用いた圧入実験による検討

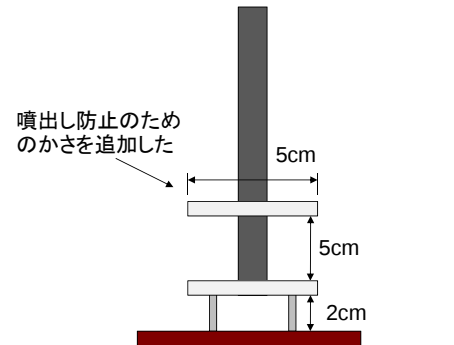
圧入実験装置



木節粘土のコンシステンシー試験結果

液性限界 ω_L	塑性限界 ω_p	塑性指数 I
62.56	39.46	23.11

圧入管先端の構造



■相似則について

粘土層の強度・・・実海底地盤の強度6kPaの1/25

圧入粘土の強度・・・液性限界における粘土の強度1～2kPaの1/25

砂利・・・16.3kg敷いたが、これは砂層50cm、水中有効単位体積重量8kN/m³ に相当。

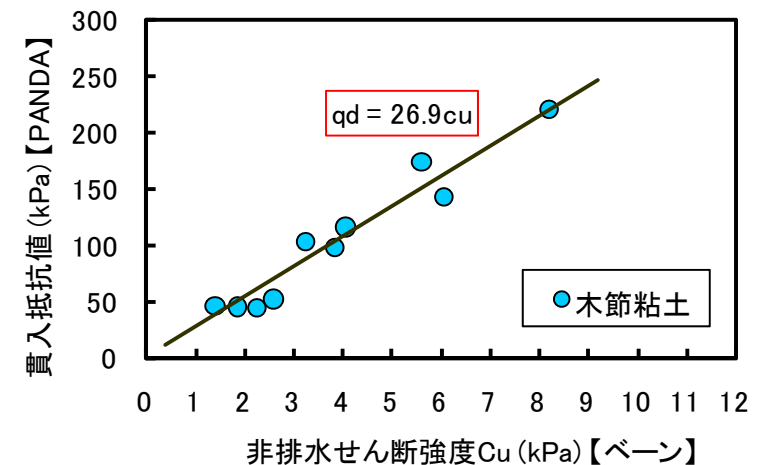
ゴム製のおもり・・・336g载荷したが、これは土囊220kgに相当する。

*ろ紙・・・表層からの圧密脱水のため表層にろ紙をしいた。

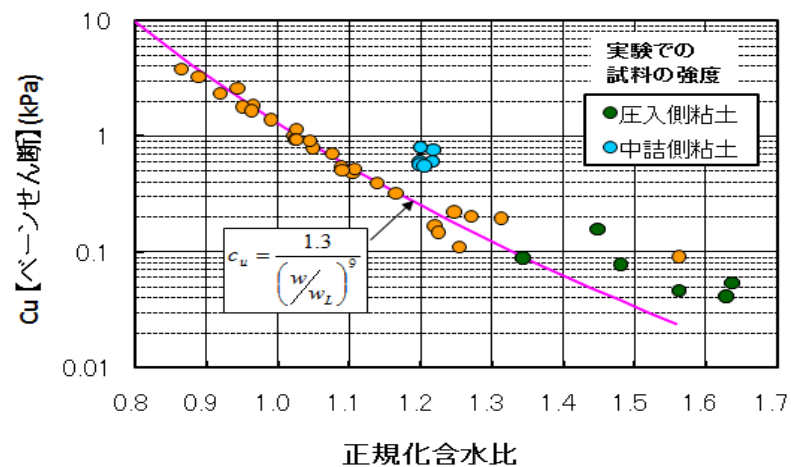
軽量動的コーン貫入試験による干潟の地盤調査



軽量動的コーン貫入試験の 貫入抵抗値とベーンせん断強度の関係



各ケースの粘土の強度と含水比の関係

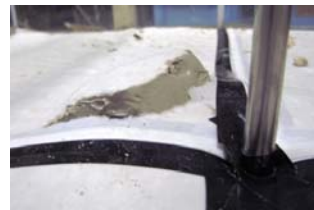


実験結果一覧 (シリーズ1)

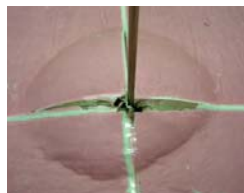
Case.No	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
層厚(cm)	10		15		20	
せん断強度(kPa)	圧入側	0.09	0.05	0.08	0.04	0.16
	中詰	0.60	0.57	0.61	0.55	0.76
載荷圧力(kPa)	130	129	117	117	130	120
圧入速度(cm ³ /sec)	0.81	25.4	6.87	30.6	0.91	34.5
圧入量(cm ³)	1292	3041	6158	4410	6462	5778
中心での変化量(cm)	2.55	4.29	5.62	5.20	4.99	4.38
影響面積(cm ²)	475	800	1213	1075	1638	1225
備考	ろ紙が1枚					

圧入後の状況

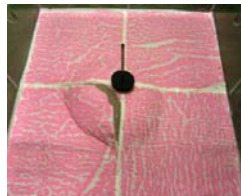
(a) Case1



(b) Case3



(c) Case6



圧入後の中詰粘土層表層の様子
(Case5, 層厚20cm、ゆっくり圧入)



圧入中の側方からの様子 (Case5)

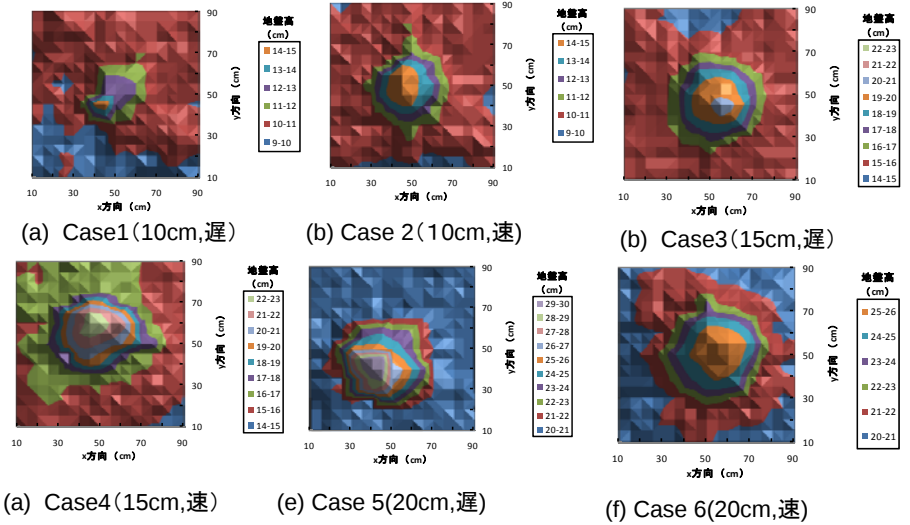
圧入前



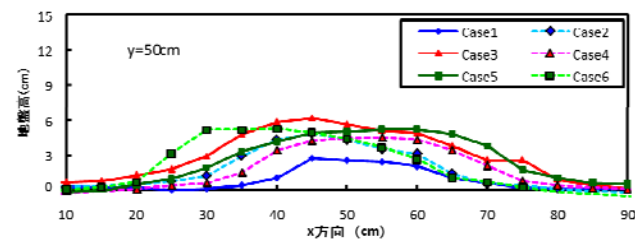
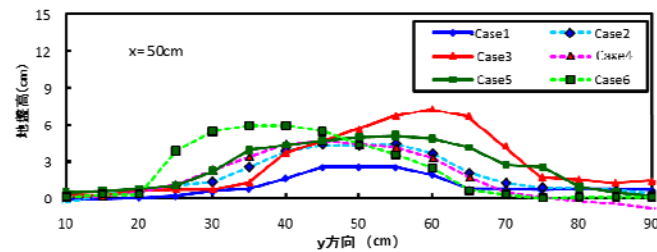
圧入後



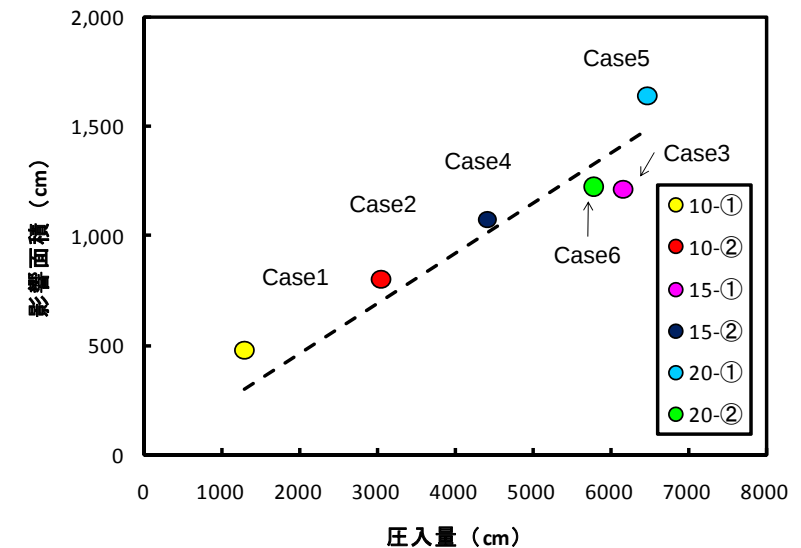
各ケースの圧入後の地盤高変化



X=50, y=50断面での圧入後の地盤高の変化

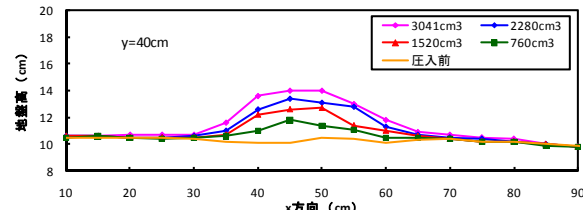


圧入量と影響面積の関係

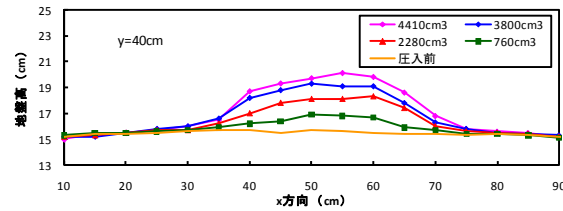


一定圧入量ごとの地盤高変化(b=40cm)

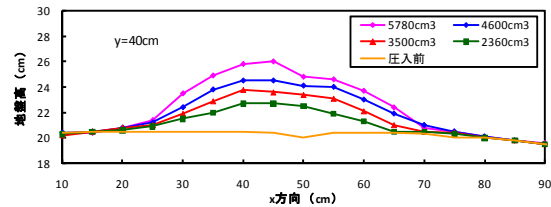
(a) Case2



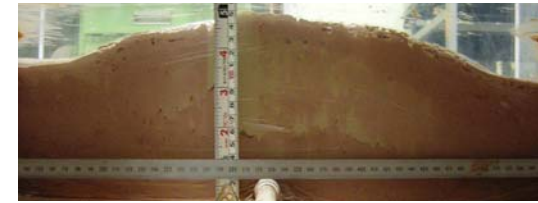
(b) Case4



(c) Case6



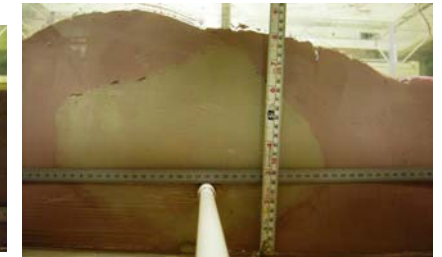
圧入後の断面状況



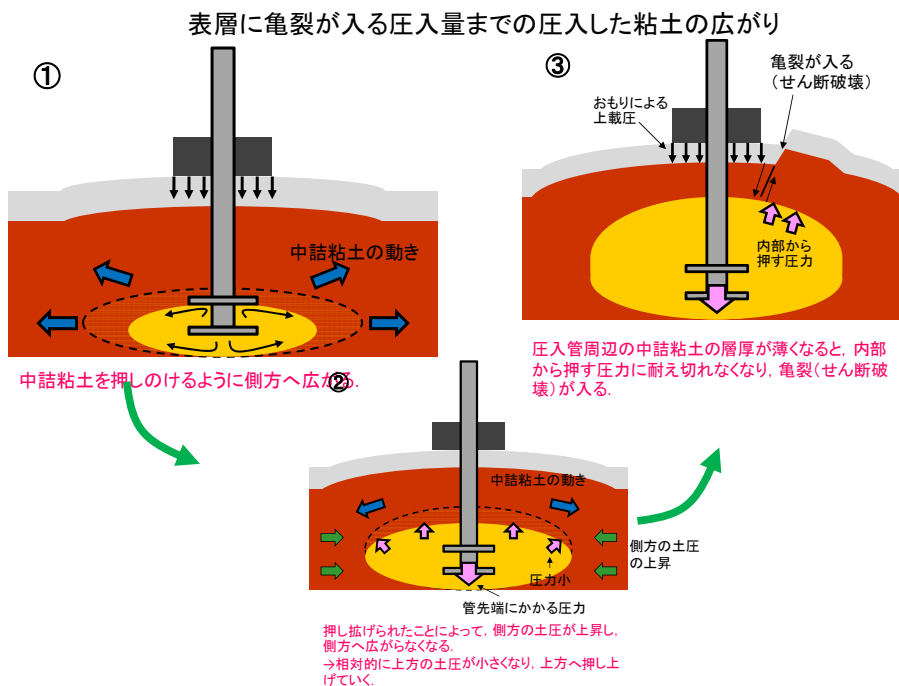
(a) Case2 (粘土の広がり幅22cm)



(b) Case4 (圧入側粘土の広がり幅24cm)



(c) Case6 (圧入粘土の広がり幅30cm)



●先端付近にかかる圧力について

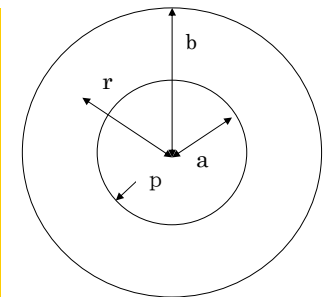
●球空洞押し広げ理論

$$p_u = cF_c + qF_q$$

$$F_q = \frac{3(1 + \sin \phi)}{3 - \sin \phi} [I_{rr}]^{\frac{4 \sin \phi}{3(1 + \sin \phi)}}$$

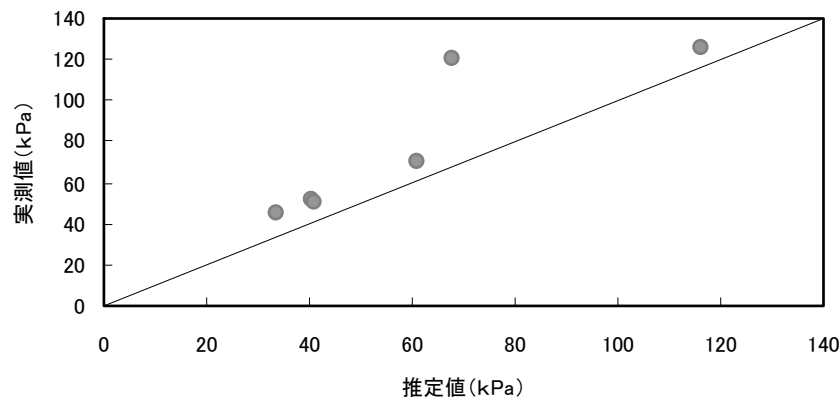
$$F_c = \frac{4}{3} (\ln I_r + 1)$$

$$I_r = \frac{E}{2(1 + \nu)(c + q \tan \phi)} = \frac{G}{S} = 50 \sim 100$$



空洞押し広げ理論は、上に示すような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である。原地盤の粘着力と筒先付近での有効応力によって決まる支持力のことである。

■ 圧入圧の算定と実験値の比較

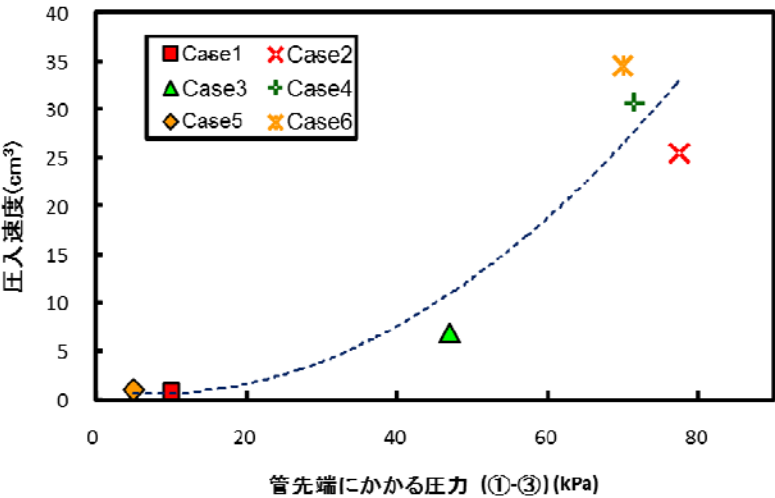


圧入に必要な圧力は主として送泥管内の摩擦。先端抵抗は相対的に小さい。摩擦抵抗としてベーンせん断強度を用いた。

管先端での圧力の算定

Case.No	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
層厚(cm)	10		15		20	
せん断強度(kPa)	圧入側	0.09	0.05	0.08	0.04	0.16
	中詰	0.60	0.57	0.61	0.55	0.76
① 載荷圧力 p_0 (kPa)		130	129	117	117	130
上載圧(kN/m ²)	砂利層	0.16				
	中詰粘土	1.73		2.43		3.13
圧入パイプの長さ(cm)		160	120	120	120	130
粘土圧入に必要な圧入管先端での圧力 p_a (kPa)		5.66	5.47	6.44	6.06	8.12
管内摩擦抵抗 p_f (kPa)		81.0	32.1	53.8	28.4	116.2
② 圧入に必要な圧入圧力(kPa)		86.6	37.6	60.3	34.5	124.3
③ 実際に排出し始めた圧力(kPa)		120	51	70	45	125
管先端での圧力【計算値】①-② (kPa)		43.4	90.9	56.7	82.1	5.7
管先端での圧力【実験値】①-③ (kPa)		10.0	77.5	47.0	71.6	5.0
圧入速度(cm ³ /sec)		0.81	25.4	6.87	30.6	0.91

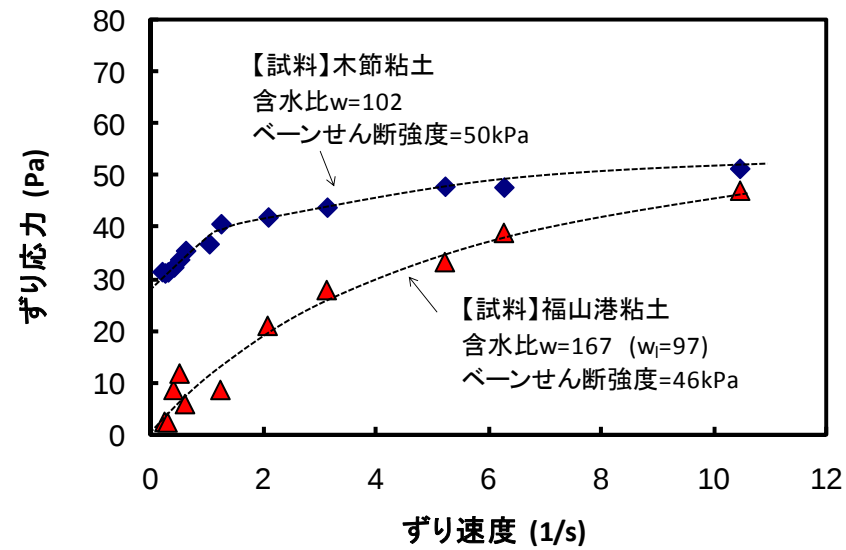
実験から逆算した管先端圧力と圧入速度の関係
(管内摩擦はベーン強度で算定)



回転式粘度計



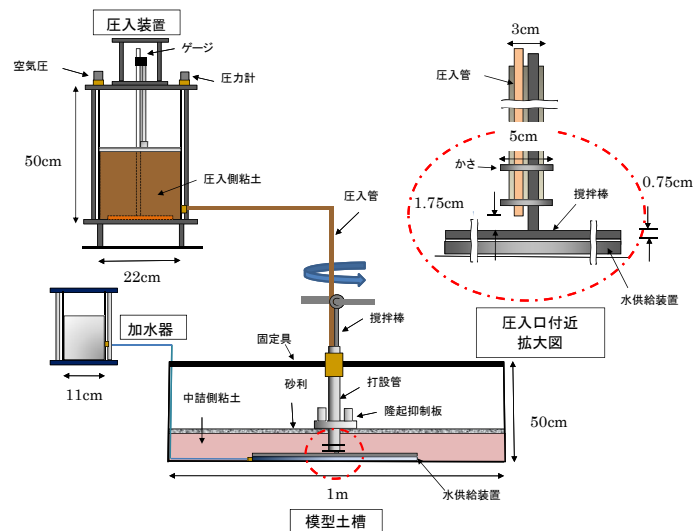
ずり速度とずり応力の関係



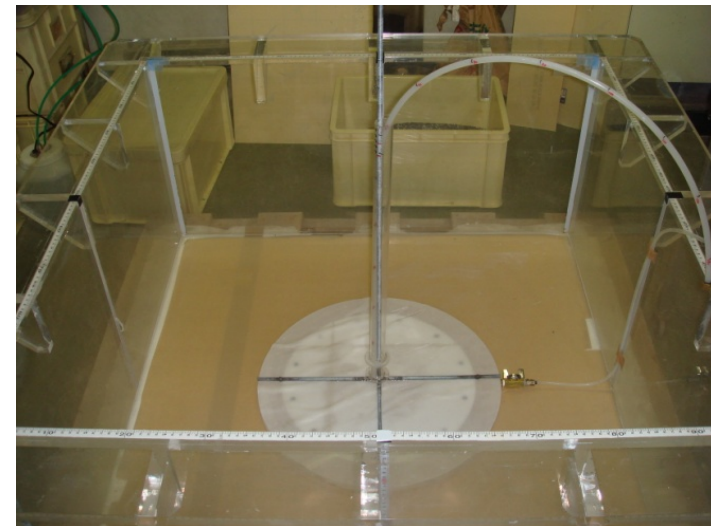
粘土圧入による模型実験 (シリーズ2)

圧入管周りへの補助工法の適用

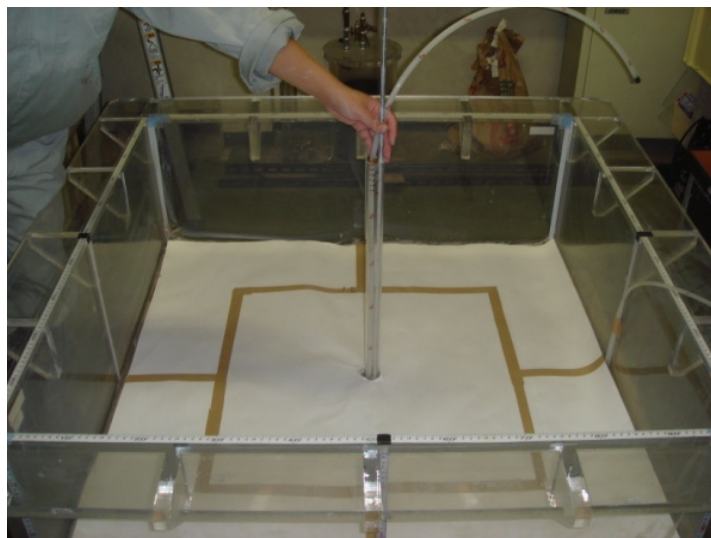
実験装置概要図



水供給装置と攪拌棒を設置



粘土を投入し、ろ紙を敷く



砂利を敷く



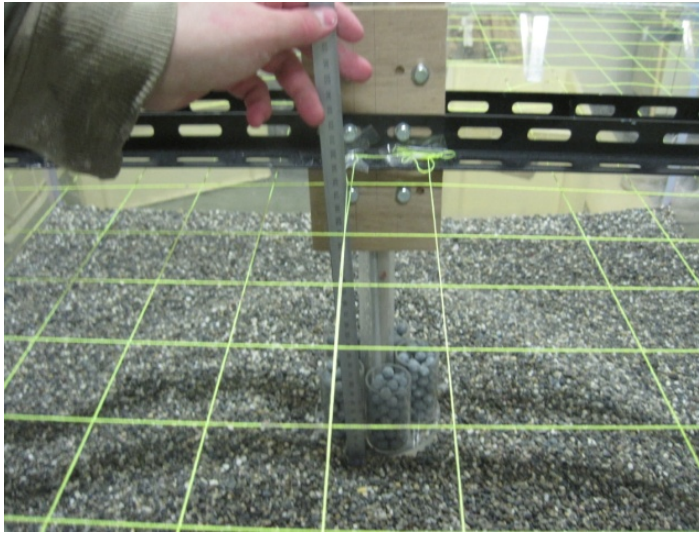
固定具設置・水系を張る



圧入装置



地盤高測定



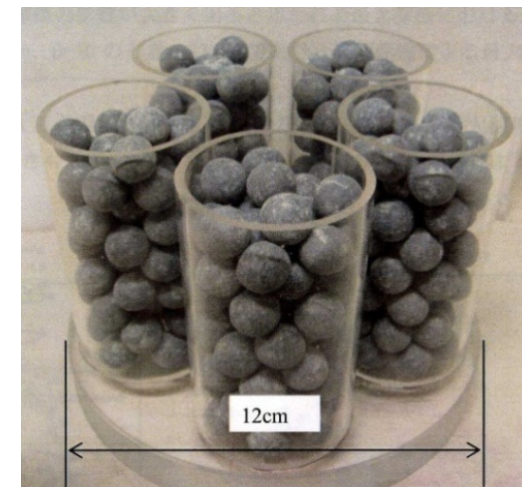
改良前地盤高の様子(重さ360g 載荷圧0.45kN/m²)



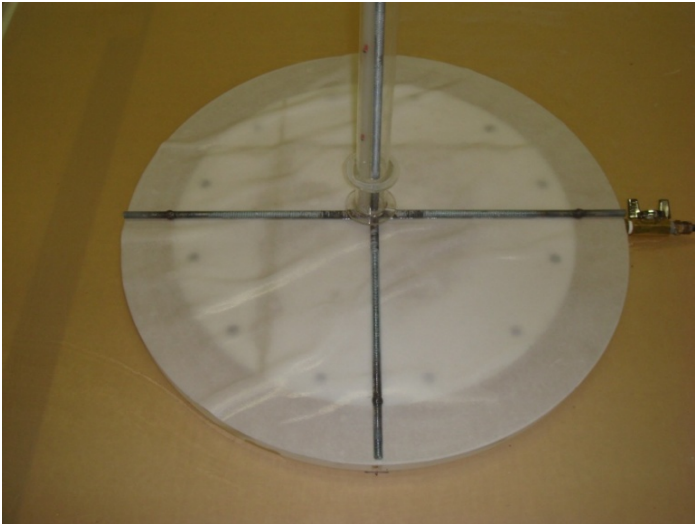
改良後地盤高の様子(重さ2.18kg, 載荷圧1.89kN/m²)



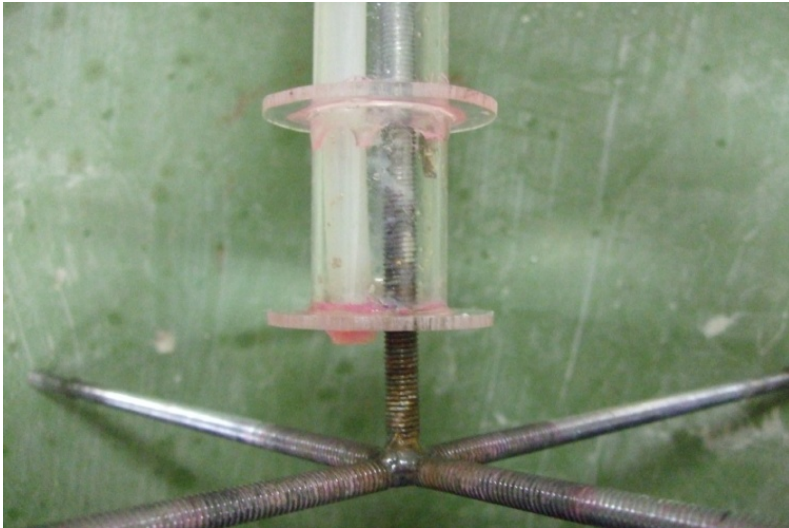
隆起抑制板全体図



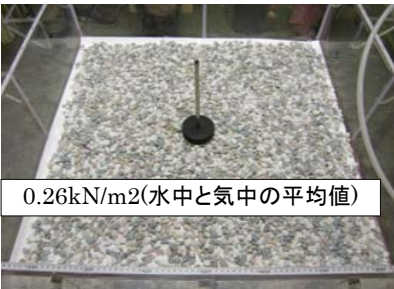
水供給装置拡大図



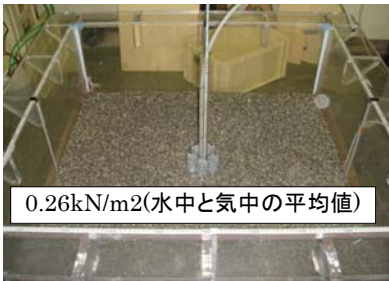
圧入口に設置した攪拌棒



覆砂層



改良前



改良後

改良圧入実験条件

	Case7	Case8	Case3
水流攪拌の有無 (高含水比層範囲)	有 (40cm)	有 (50cm)	無
隆起抑制板(kN/m ²)	1.89	1.89	0.45
せん断強度(kPa) (正規化含水比)			
※w _L =62.56%			
圧入側	0.05 (1.5w _L)	0.05 (1.64w _L)	0.08 (1.48w _L)
中詰側	0.62 (1.13w _L)	0.61 (1.15w _L)	0.61 (1.22w _L)
圧入速度(cm ³ /sec)	6.92	4.61	6.87

昨年度の実験と比較するため、木節粘土を使用

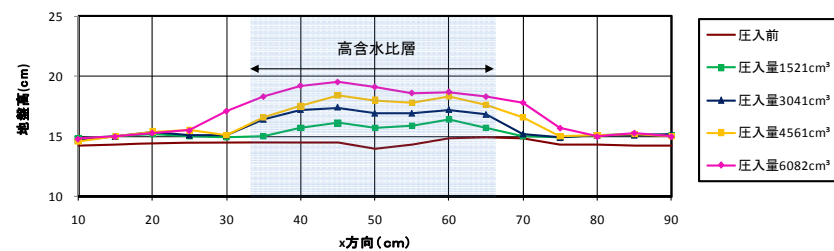
高含水比層の範囲を変えた2ケースを過去実験ケースCase3の実験条件に近づけて改良実験を追加で2ケース実施

圧入を終了したタイミング

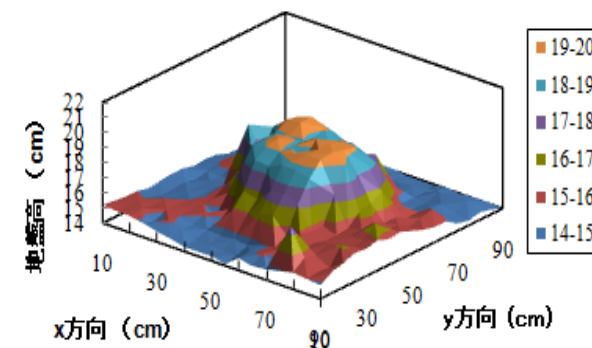
Case7 Case3と同量の圧入量に達したとき

Case8 地盤表層に亀裂が入ったとき

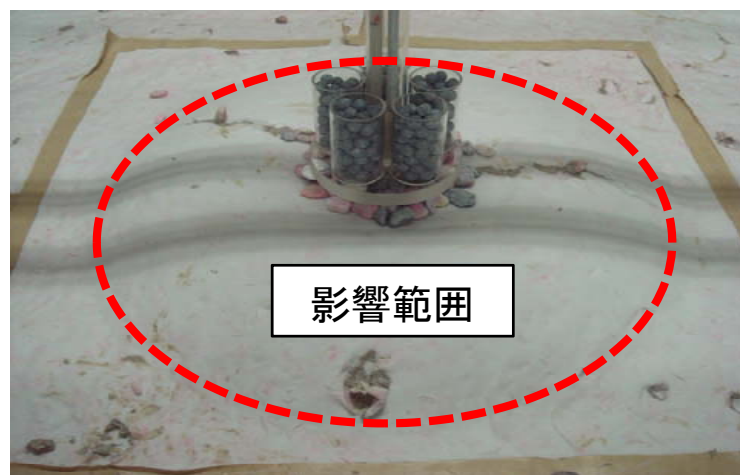
圧入口付近における地盤高の経時変化 (攪拌棒が40cm)



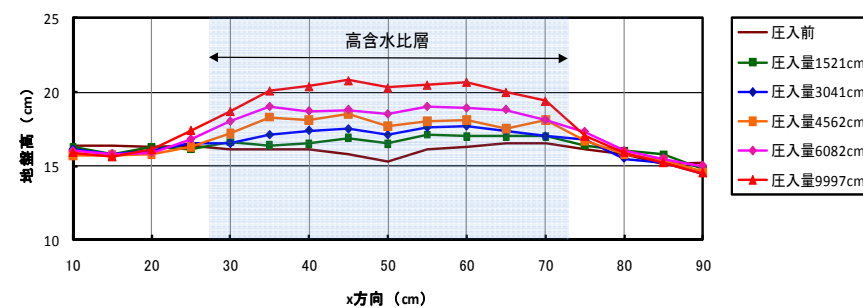
圧入量6,082cm³における地盤高



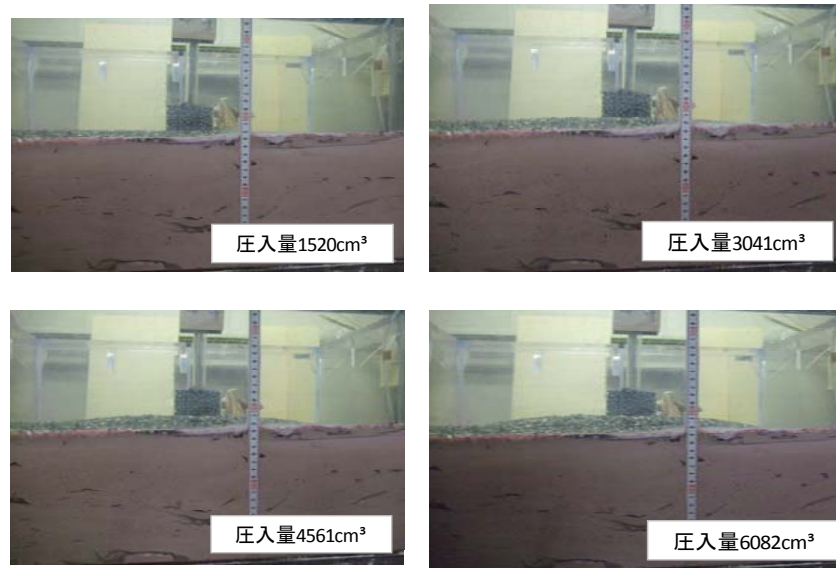
圧入後表層の様子



圧入口付近における地盤高の経時変化(攪拌棒が50cm)



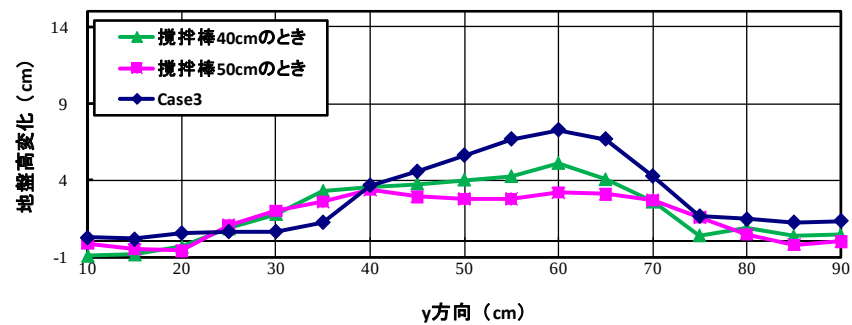
各圧入量ごとの地盤高経時変化



同圧入量における実験結果比較

Case.No	Case7	Case8	Case3
層厚(cm)	15		
圧入量(cm ³)	6,082	6,082	6,158
中心での変化量(cm)	4.0	2.8	5.6
影響面積(cm ²)	1,475	1,875	1,213

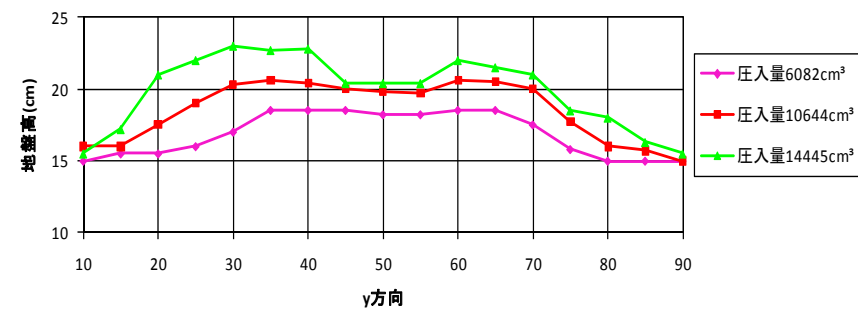
圧入量約6000cm³における3ケースの地盤高変化の比較



圧入後地盤形状表



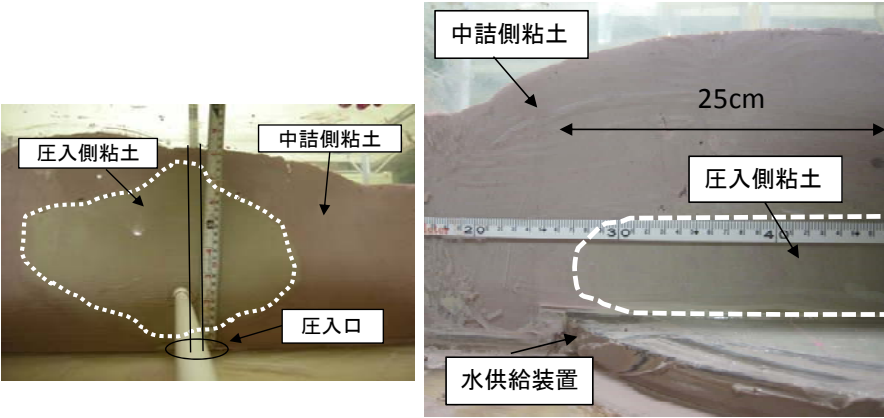
圧入口付近における地盤高経時変化



実験条件と実験結果

Case.No		Case8
攪拌範囲		有 (50cm)
せん断強度(kPa)	圧入側	0.05
	中詰め	0.61
圧入速度(cm³/sec)		4.61
圧入量(cm³)		14,445
影響面積(cm²)		2,380

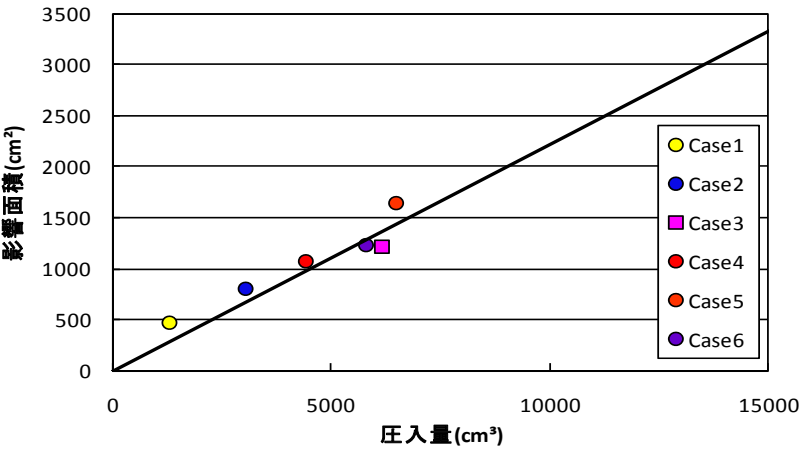
圧入後の断面形状比較



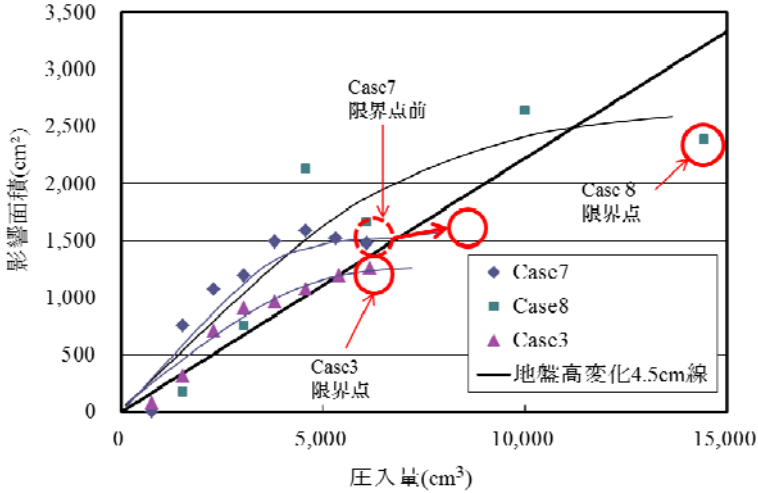
圧入方法改良前

圧入方法改良後

圧入量と影響面積の関係



圧入量と影響面積の関係



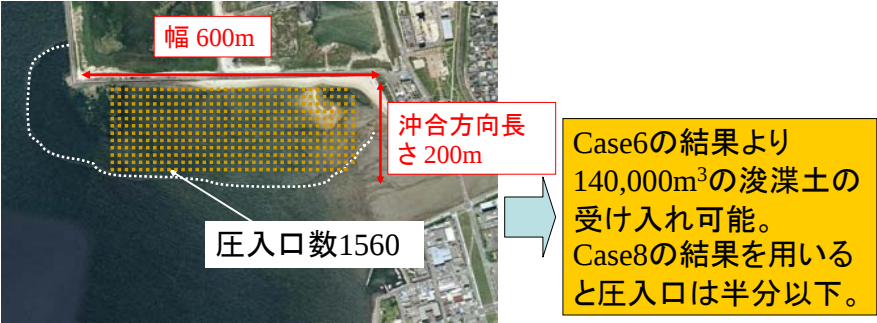
実験結果の実スケールでの換算値

Case.No	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8
層厚(m)	2.5		3.75		5.0		3.75	
せん断強度(kPa)	圧入側	2.21	1.17	1.96	1.04	3.91	1.35	1.25
	中詰	15.0	14.3	15.3	13.8	19.0	20.1	15.5
圧入量(m³)	20	48	96	69	101	90	95**	225
中心での変化量(m)	0.64	1.07	1.41	1.30	1.25	1.09	100	1.13
影響面積(m²)	30	50	76	67	102	77	92	149
圧入速度(m³/h)	0.37	11.5	3.09	13.8	0.41	15.5	0.36	2.10

※影響面積は25cm以上嵩上げされた面積 **限界圧入量前に圧入終了

■ 実施工のイメージ (Case6の場合)

Case	Layer thickness (m)	Clay strength (kPa)		Injected velocity (m³/h)	Total volume of Injected clay (m³)	Influence area(m²)
		Injected clay	Ground clay			
6	5	1.4	20.1	15.5	90.3	77
8	5	1.3	15.3	2.1	225	149



例：広島港五日市人工干潟

結 論 1

本研究で開発する地盤内圧入方式による干潟造成技術は、最初に浚渫土の埋立と表層土の撒布を行い、その後は浚渫土をポンプにより表層土の下の浚渫土層の中に圧入することで、地盤全体を下から盛り上げる方式で施工するものである。

本研究で開発する地盤内圧入方式による人工干潟造成技術従来工法と比べ、浚渫土を多数の圧入口から圧入することで、表層土の標高を徐々に均等に上昇させるので、施工とともに干潟が拡大し、**干潟の機能を発現させながら浚渫土のリサイクルが可能**になる。

また、浚渫土量が計画から変化した場合でも面積が変動するものの、干潟機能には大きな影響はない。**浚渫時期の変化にも容易に対応でき、浚渫で発生した土を随時干潟造成に利用できる。**

さらに、圧密沈下した干潟内の地盤に圧入を行うことで標高を回復させることにも利用できる。加えて、目標年次を定めて干潟を完成させるのではなく、浚渫土の発生するタイミングに合わせて干潟をゆっくりと拡幅・造成していくことができるため、**モニタリングを行いながらその結果に合わせて適切な対応を図るアダプティブマネジメント(適応的管理)が可能**となる。

結 論 2

圧入による干潟造成工法の実現可能性を検討するため、実験室内で1/25スケールの模型土層実験を実施した結果、以下のことがわかった。

- 1) 1/25スケールの室内模型実験の結果、圧入管を中心に直径50～80cmの範囲に粘土は圧入され、**最大約14,000cm³(実スケール換算約218m³)の粘土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。
- 3) 圧入において特に補助的な手段を用いない場合、圧入の形状は圧入管の先端を下端とする球の形状になる。**一つの圧入孔からより多くの粘土を圧入するためには、圧入直後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、地盤内の空洞拡張理論から誘導した式によって求められることが、実験値と計算値の関係から明らかになった。実際的には、地盤内の圧入に要する圧力よりも、粘土を圧入口まで送るときの管内摩擦に消費される圧力の方が支配的であると考えられる。

結 論 3

- 5) 圧入管の先端付近を水供給装置と攪拌棒によって**水平に攪乱すること**、圧入パイプの地表面周辺に一定の重量を持つ**隆起抑制板を設置すること**により、水平方向により広範囲に圧入した粘土が広がり左右均等に圧入を行うことができることがわかった。しかし、各装置が圧入の影響面積に与える効果を今後詳細に追及していくこと、**実際の地盤でこのような効果を与える方法**について検討する必要がある。
- 6) 地盤を弾性と仮定し、圧入口付近の粘土の広がりを所定の広さを持つ空洞と仮定して圧入圧力を加える有限要素解析により、圧入後の地盤の変形挙動をある程度再現することができた。より詳しく解析を行うためには、**粘土地盤の塑性変形、圧入粘土の力学特性を考慮できる解析モデルを検討する必要がある。**
- 7) 実験の結果を実際の人工干潟のスケールに換算すると、**1haの人工干潟において本工法を採用すると約10,000m³の浚渫土の圧入が可能になる。**この結果は、浚渫土のリサイクルによる本工法による干潟造成の実現可能性を示すものである。しかし、本工法を実用化するにはさらに大きなスケールでの模型実験など検討が必要と考えられる。