海上サンドコンパクションパイル工法の砂杭出来形に関する模型実験について

若築建設(株)　　正会員　○水野　健太　　原　稔
(株)ジオデザイン　　海老澤　伸二

１．はじめに

軟弱粘性土地盤に対する地盤改良工法として，海上サンドコンパクションパイル工法（以下，海上 SCP）は実績も数多く，設計・施工技術としてはほぼ確立した工法と言える．しかしながら，地盤改良は総じて地中不可視部に工事目的物を構築することから，施工中あるいは検査・引き渡しの段階で出来形（径，厚さ，深さ等）や品質（強度等）を詳細に確認したいという要請は多い[1)]．そこで，著者らは海上 SCP 工法における砂杭の出来形に関する実験的検証に取り組んでいる[2)]．本稿では，鋼製模型土槽を用いて実施した砂杭打設実験結果について報告する．

２．実験概要

2.1 実験装置

実験に用いた鋼製模型土槽の外観を**写真-1** に示す．土槽本体の寸法（内寸）は，幅 75cm×奥行 35cm×高さ 55cm で，圧密前の粘土スラリーの投入厚さは 40cm 程度，圧密後の粘土層厚は 25cm 程であり，実規模の 1/20 程度の縮尺を想定している．投入した粘土スラリーは２台のベロフラムシリンダー（藤倉ゴム工業）を用いて，ロードセルにより載荷重を計測しながら両面排水（下部は 5 号硅砂，上部は有孔板）を行って圧密させる．本実験では軟弱粘性土は市販のカオリン粘土（カナヤ興産，MC クレーおよび AX カオリン）を乾燥重量比 1:1 で混合したもの，中詰砂は豊浦硅砂（豊浦硅石鉱業）を用いた．カオリン粘土の物性値を**表-1** に示す．1 回の実験に使用するスラリー量は約 105L で，既往の研究事例に基づき，液性限界の 1.9 倍の含水比（w=120%）に調整し，ボウル容量 60L のミキサーを用いて 3 バッチに分けて作成した．圧密沈下量はダイヤルゲージ式変位計により計測し，最終圧密段階（**写真-2**）における圧密終了判断は 3t 法により行った．

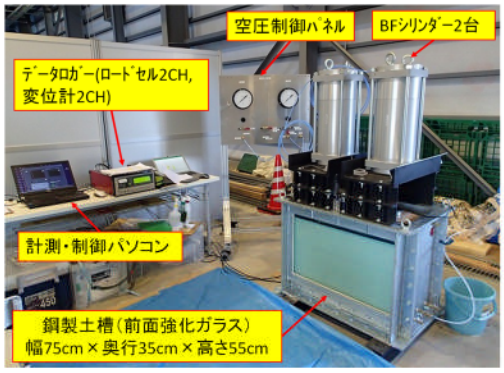

写真-1　鋼製模型土槽の外観（圧密前）

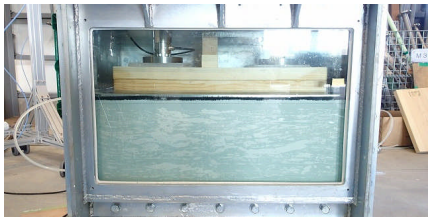

写真-2　最終圧密終了時

表-1　カオリン粘土の物性値

名　称	単位	MC クレー	AX カオリン	MC+AX 混合
土粒子の密度	(g/cm^3)	2.730	2.745	2.728
自然含水比	(%)	0.8	0.4	0.7
液性限界	(%)	66.4	49.9	63.2
塑性限界	(%)	26.5	26.1	27.3

2.2 砂杭打設装置

本実験で考案した砂杭の打設手順を**図-1** に示す．予備実験の結果，実際の海上 SCP 工法のように，ケーシング貫入→中詰砂投入→ケーシング引き抜き→打ち戻しの手順では，周面摩擦による貫入・引抜力不足や投入した中詰砂がケーシング先端部から良好に排出できない問題があったため，**図-1** に示すように，先行削孔（φ57.5）によりオーガーを用いて粘土を中掘りした後，打設外管（先端部φ57）を挿入して周面摩擦を除去し，内管（φ38）を打ち戻すことで砂杭を拡径造成する二重管方式を採用した．1 サイクル分の造成に必要な中詰砂は乾燥状態（相対密度 80%）で計量し，含水比 10%に調整して投入した．なお，1 サイクル毎の造成出来形を計測するために，墨汁で色づけした砂を交互に使用した．

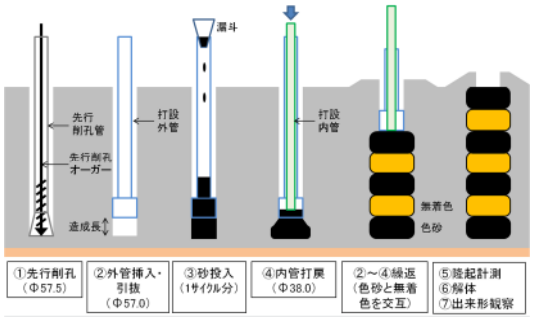

図-1　砂杭の打設手順

キーワード：サンドコンパクションパイル工法，出来形，模型実験
連絡先　　：〒299-0268　千葉県袖ヶ浦市南袖 31 番地　若築建設(株)技術研究所　(Tel)0438-38-4601

2.3 実験ケース

本稿で報告する実験ケースを**表-2**に示す. ここで, 造成径75.5mmは実規模で1,850mm, 造成径81.6mmは同2,000mm, 造成長50mmは同2.0m引き抜き1.0m打ち戻し，造成長25mmは同1.0m引き抜き0.5m打ち戻しに相当する．実験シリーズAは，1サイクルの造成長および打設の傾斜が出来形に及ぼす影響に着目したもので，A-3（1,2サイクルはt=25mm）が実規模で採用している改良諸元に近い標準ケースに相当する．実験シリーズBは，砂杭の最下端部の造成方法が出来形に及ぼす影響に着目したものであり，B-1を比較対象ケースとして．B-2が最下端1サイクルを2回に分けて（造成長を半分に短縮）造成したケース，B-3が最下端1サイクルの下に1サイクル分の砂を追加投入したケースである．

３．実験結果

実験終了後に土槽を解体し，砂杭周囲の粘土を慎重に除去して砂杭を露呈させた状況を**写真-3**および**写真-4**に示す．また，砂杭の造成径（サイクル境界と中央部の平均値）と造成長（中央と左右の3箇所の平均値）を整理した結果を**表-3**および**表-4**に示す．

標準ケースのA-3と造成長を1/2に短縮したA-1を比較すると，**写真-3**に示すように造成長を短縮したA-1の方が理想的な円柱形状で造成できることがわかった．A-3はやや団子状の積み重ねになっており，サイクル境界の造成径が小さいため，平均造成径がA-1よりも小さく評価された．造成角度を3度傾斜させたA-2と鉛直施工したA-1を比較すると, 出来形に大きな差異はなかった．ただし，実験後に計測した盛り上がり量は両者で異なり，A-2は傾斜方向に盛り上がりが偏る傾向を確認できた．

一連の実験は基盤層に着底させない浮き杭で造成しているため，1サイクル目の投入砂は拡径されず下部に押し込まれる傾向が見られた，その改善策としてB-2とB-3を比較する．目標造成長を標準ケース（A-3，50mm）の1/4（12.5mm）としたB-2は，1サイクル目の拡径不足を解消できなかった．1サイクル目の下端に反力受けとして追加投入したB-3は，平均的な出来形はB-1と変化なかったが, 1サイクル目の拡径は改善されることがわかった．

４．おわりに

実工事で使用する中詰砂による比較実験や造成砂杭の品質の評価について，検討を進めていく予定である．

参考文献

1)竹内秀克ら:間隙水圧測定を伴う動的コーン貫入試験を用いた海上SCP出来形調査，第14回地盤工学会関東支部発表会，pp.432-435，2017.11.

2)水野健太ら：サンドコンパクションパイル工法に用いる様々な材料砂の物理・化・力学特性，第53回地盤工学研究発表会，2018.7（投稿中）．

表-2　実験ケース

Case No.	砂杭の改良諸元			粘土地盤
	造成径 (mm)	造成長 (mm)	角度 (°)	圧密圧力 (kN/m^2)
A-1	81.6	25.0	0	100 圧密後 w_n=56.4%
A-2	81.6	25.0	3	
A-3	81.6	50.0	0	
B-1	75.5	25.0	0	50 圧密後 w_n=53.2%
B-2	75.5	12.5	0	
B-3	75.5	25.0	0	

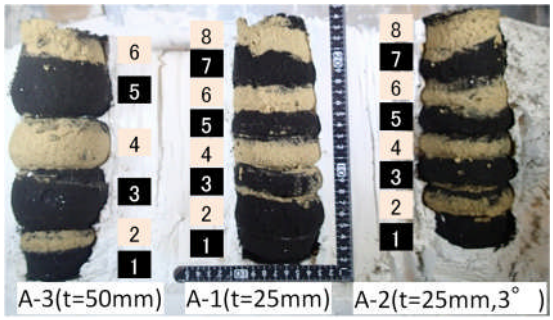

写真-3　砂杭露呈状況（実験シリーズA）

表-3　砂杭の出来形（実験シリーズA）

Case	A-3		A-1		A-2	
	造成径 (mm)	造成径 (mm)	造成径 (mm)	造成長 (mm)	造成径 (mm)	造成長 (mm)
8	—	—	73.4	25.0	76.2	23.3
7	—	—	79.8	29.0	79.2	28.3
6	(74.0)	(24.3)	80.2	24.0	80.0	23.3
5	76.8	53.0	82.6	24.3	83.1	27.7
4	76.1	51.7	81.6	25.7	81.4	24.7
3	71.7	54.0	81.4	25.3	80.8	25.3
2	(61.7)	(18.7)	79.9	35.0	77.7	28.0
1	(55.4)	(25.0)	68.1	20.3	68.5	31.0
Ave.	**76.4**	**52.9**	**78.3**	**26.1**	**78.5**	**26.5**
目標	81.6	50.0	81.6	25.0	81.6	25.0

注)A-3で評価するサイクルは3～5サイクルで, その他は参考値として（ ）で表記した.

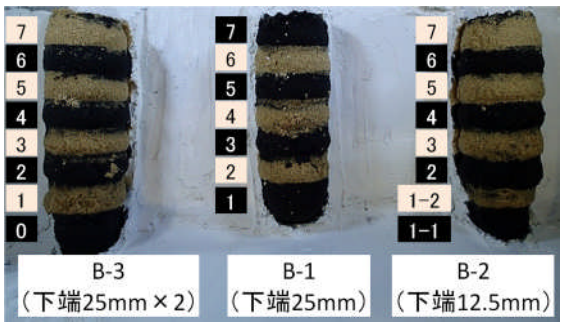

写真-4　砂杭露呈状況（実験シリーズB）

表-4　砂杭の出来形（実験シリーズB）

Case	B-3		B-1		B-2	
	造成径 (mm)	造成長 (mm)	造成径 (mm)	造成長 (mm)	造成径 (mm)	造成長 (mm)
7	66.7	30.7	72.1	31.7	71.2	28.3
6	76.7	27.7	75.3	28.3	77.1	24.0
5	74.3	26.7	75.7	23.3	76.6	29.3
4	73.4	25.0	75.1	31.7	75.0	28.3
3	74.6	25.0	74.0	26.7	73.0	24.0
2	73.0	30.0	72.3	26.7	70.1	29.3
1	67.7	25.0	61.0	45.0	60.0	(20.0)
					51.6	(35.0)
Ave.	**72.0**	**27.1**	**71.9**	**30.5**	**69.1**	**27.2**
目標	75.5	25.0	75.5	25.0	75.5	25.0

注)B-2の1-1サイクル, 1-2サイクルの造成長は平均値から除外し，参考値として（ ）で表記した.