

スクリーュー・プレス工法による液状化対策効果の現場実証試験

長岡技術科学大学院 非会員 ○白井佑季 金子 大
長岡技術科学大学 正会員 大塚 悟
(株)グランテック 折戸清治

1. はじめに

2011年3月11日に東北から関東地方にわたり甚大な被害をもたらした東日本大震災では、内陸部や沿岸部において、液状化による宅地地盤での液状化被害が多数発生した。マンションやビル等は、杭基礎等により建物本体の被害はほとんど無いのに対し、戸建住宅は埋立地等を中心に液状化被害が多発した。そのため、液状化対策が今まで十分施されてこなかった小規模な土地が対象となる戸建住宅においても、信頼性の高い液状化対策技術が求められている。

2. 研究背景

現在、宅地の地盤改良では、セメント系固化材を用いた表層改良や柱状改良が大半であるが、セメント系固化材と土を混ぜ合わせるにより、有害物質六価クロムが発生することや、固化不良の土質があることなど、施工品質の問題がある。これを解決すべく、砕石パイルによる軟弱粘性土の地盤改良であるスクリーュー・プレス工法が開発された。スクリーュー・プレス工法による液状化対策は自然材料を用いるために、地盤固化材を用いた地盤改良工法に対して環境面の負荷が少ない工法である。また、宅地地盤のように転売が行われる土地の場合には固化材による地盤改良は転売時に多額の費用を要する撤去が求められる可能性があり、スクリーュー・プレス工法の有用性が期待される。

スクリーュー・プレス工法による砕石パイルの打設は杭間地盤の密度増大と地盤の間隙水圧消散効果を生み出すものであるため、単一効果の工法よりは経済的で大きな効果を見込める。液状化層における健全な砕石パイル打設技術の開発と品質を確保できる施工間隔、砕石粒度等の設計技術を整備するため、設計の指針を確立することが重要である。そこで、本研究では、スクリーュー・プレス工法の現場試験、並びに分析を実施した。

3. スクリーュー・プレス工法の概要

スクリーュー・プレス施工機(図-1)は本来、宅地地盤の改良機であるため、住宅地向きのコンパクトな機体であり、無振動、低騒音施工が可能である。図-2に本工法の施工順序を示す。以下に施工順序の内容の説明を示す。

- ① 特殊形状のスクリーューを地中に回転挿入する。排土しないため、周囲の土は圧密固化される。
- ② 引き上げ時には先端からエア送気されているため、地盤は不飽和化により粘着力を有して、健全な孔ができる。
- ③ 砕石を投入して押圧パイプで転圧するため、更に周辺の土は圧密固化され、砕石も締め固められる。
- ④ これを何回も繰り返して、G.Lまで砕石を転圧する。
- ⑤ 砕石パイルはグラベルドレーンとして間隙水圧消散効果があり、周囲の地盤は圧密により密度が上昇している。

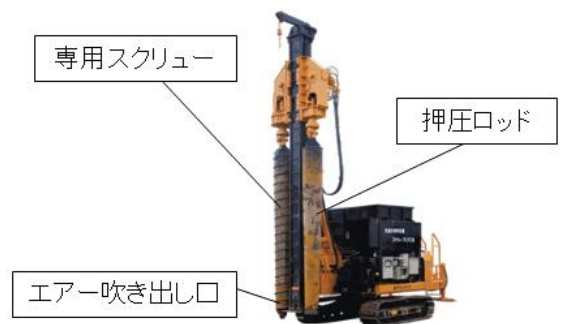


図-1 スクリーュー・プレス施工機

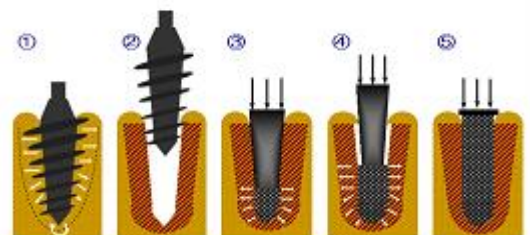


図-2 スクリーュー・プレス工法の施工順序

4. 実験方法

4. 1. 現地試験

富山県高岡市伏木万葉ふ頭にて、スクリー・プレス工法の液状化対策効果を検討するために、砕石パイルを打設した地盤の強制振動試験を図-4のように実施した。用いるスクリー・プレス工法の砕石パイルは直径0.4m、長さ4mである。実験は、施工法の差異による砂質地盤の液状化対策効果の検討を目的に、起振機を中心に表-1に示す4つの条件のもと実施した。エリア①は、杭間距離1.5mで砕石の投入のみを行い、締固めをせずに施工した。エリア②は、杭間距離が1.5mで、サンドコンパクションパイルと同様に砕石パイルを締固めしながら打設した。エリア③は、杭間距離1.0mでエリア②と同様に施工した。エリア④は無改良地盤である。

間隙水圧計を各エリアの砕石パイルの中央、深さ2m、4m、6mの位置に設置し、継時変化を計測することによって、砕石パイルの水圧消散の効果を検証した。また、施工前後の地盤で液状化判断を行うことを目的として、施工前後の各エリアの地盤でスウェーデン式サウンディング(SWS)試験を行った。

4. 2. 不攪乱試料の物理的力学特性の調査方法

富山県高岡市伏木万葉ふ頭より採取した土試料を用いて物理試験を行った。試料の物理的力学特性を求める試験方法を表-2に示す。表-2の規格番号は日本工業規格もしくは地盤工学会の基準を示している。

4. 3. 地盤改良による杭間地盤の締固め効果の検討方法

スクリー・プレス工法の施工による杭間地盤の締固め原理は、サンドコンパクションパイル(SCP)工法と同様の施工原理である。そのため、SCP工法で確立されている設計手法を用いて、スクリー・プレス工法による杭間地盤の締固め効果の評価について考察することが可能であると考へた。本来の砂質地盤に対するSCP工法の設計手法では、SCP改良地盤の要求性能に対して、具体的な施工仕様(使用材料、改良ピッチ)を決定する。本研究では、現場実験の液状化対策効果の実証を目的とするため、施工仕様のパラメータである改良ピッチを用いることによって地盤改良後に期待されるN値の算出を試みた。N値と間隙比の関係の評価方法として、細粒分含有率を考慮した設計法²⁾と細粒分含有率と体積変化を考慮した設計法³⁾の経験式を用いた。この算出過程で必要とされるパラメータは、地盤の初期N値、全応力、有効応力であり、地盤の初期N値は現地試験のSWS試験の結果、全応力、有効応力は三成分コーン貫入試験の結果を用いる。また、細粒分含有率 F_c は、現地試料の物理実験より得られたパラメータを用いる。

また、現地実験の結果と改良後の期待されるN値を比較することにより、液状化判定式による液状化抵抗力の算出から現地実験の効果を評価する。また、改良後の期待されるN値と施工前後のSWS試験の結果である換算N値を用い、液状化係数 P_L を求め、比較検討を行う。



図-3 現地試験概要図

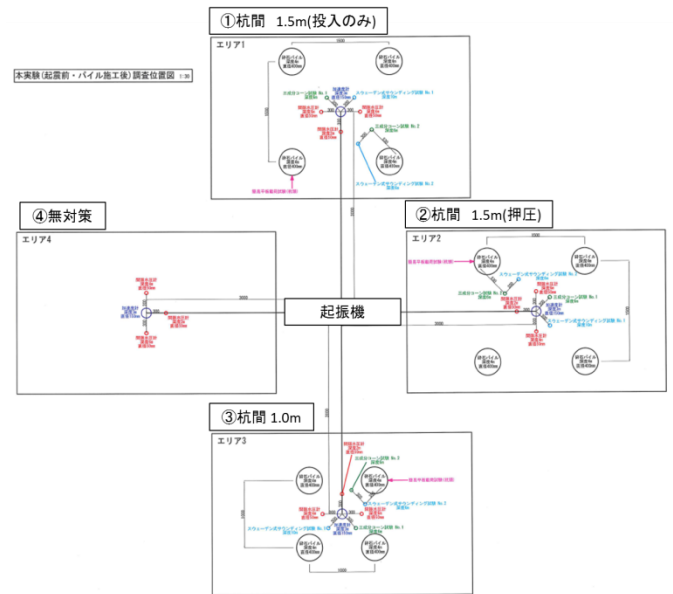


図-4 原位置振動試験の配置

表-1 現地試験の実験条件

エリア	杭長	杭間距離	締固め
①	4m	1.5m	なし
②	4m	1.5m	あり
③	4m	1.0m	あり
④	—	—	—

表-2 試験方法

試験	規格番号	基準名
物理試験	JIS A 1202	土粒子の密度試験
	JIS A 1204	土の粒度試験
	JIS A 1224	土の湿潤密度試験(ノギス法)
	JIS A 1225	砂の最小密度・最大密度試験
せん断試験	JGS 0523	土の圧密非排水三軸圧縮試験
	JGS 0541	土の繰返し非排水三軸圧縮試験

5. 結果

5.1. 現場試験結果

図-5に現地地盤のボーリング図を示す。杭の施工を行った4mの深さでは、主に細砂、微細砂で構成されていた。図-6に深さ2mにおける間隙水圧の継時的変化を示す。起振開始から11分後、15分後に振動数を変化させている。起振開始22分~23分後に過剰間隙水圧が増加している。無改良地盤であるエリア④において、最も過剰間隙水圧が増加しており、最も密な施工であるエリア③と比較すると対策効果が顕著にみられる。間隙水圧の発生は、無対策、杭間距離1.5m(砕石投入のみ)、1.5m(押圧)、1.0m(押圧)の順であった。これらのことから砕石パイルの打設により、水圧消散効果を発揮していることがわかる。図-7に深さ6mにおける間隙水圧の継時的変化を示す。エリア②、③では、深さ6mの地点においても間隙水圧がエリア①よりも小さい結果となった。砕石パイル長は4mであるが、砕石パイル長より以深の深さ6mの地点で間隙水圧の抑制効果があることがわかった。よって、砕石パイル長以深でも、若干の地盤改良効果があるといえる。スクリー・プレス工法では、砕石パイルの打設と同時に締固めを行うために、砕石パイル長以深でも締固め効果が期待できる。

5.2. 不攪乱試料の物理的力学特性の調査結果

試験試料の物理実験を行った結果、伏木現地採取試料の大部分は現地のボーリング試験の結果と同様に砂質土で、粒径0.106~0.25mmの細砂で構成されていることがわかった。試料の内訳は、粘土・シルト分が12.5%、砂が87.5%であった。

表-3に圧密非排水三軸圧縮試験の実施ケースを示す。図-8は圧密非排水三軸圧縮試験における静的試験の有効応力経路である。軸差応力の増加に伴い、平均有効主応力が減少し、限界状態線に沿っていることがわかる。図-9は軸差応力と軸ひずみ関係である。軸差応力の増加に伴い、軸ひずみが増加していることがわかる。図-10は間隙水圧と軸ひずみの関

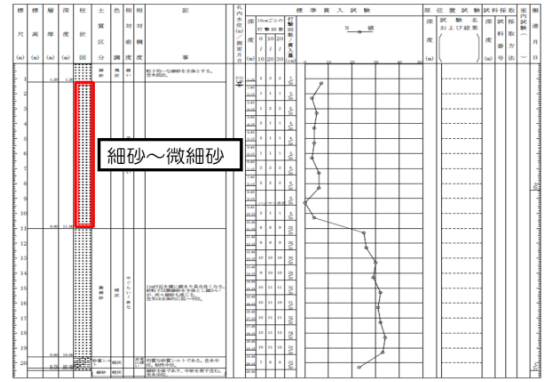


図-5 ボーリングによる柱状図

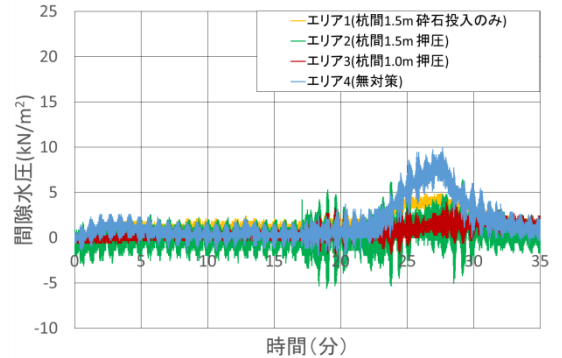


図-6 間隙水圧の継時的変化(G.L.-2m)

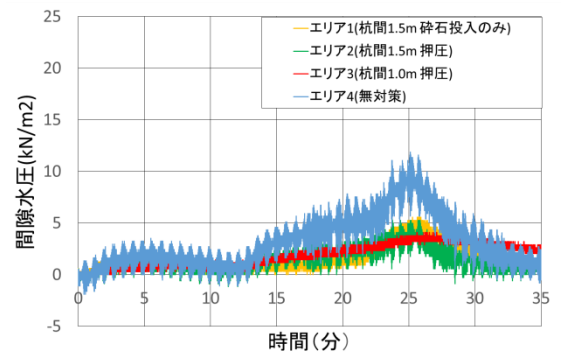


図-7 間隙水圧の継時的変化(G.L.-6m)

表-3 圧密非排水三軸圧縮試験の実施ケース

有効拘束圧(kPa)	背圧(kPa)	载荷速度(%/min)
50	100	0.1
70		
100		

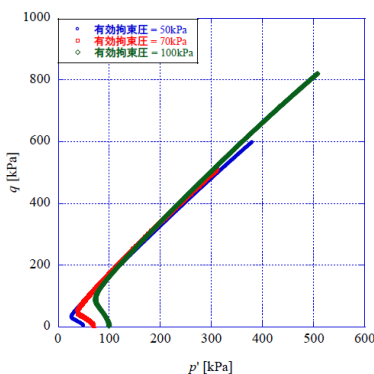


図-8 有効応力経路

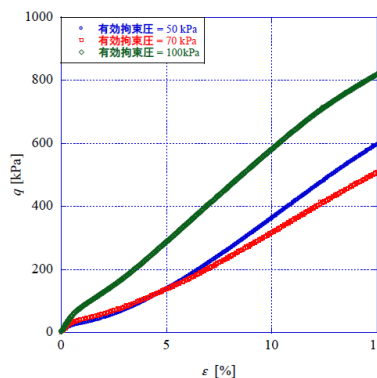


図-9 軸差応力 q -軸ひずみ ϵ 関係

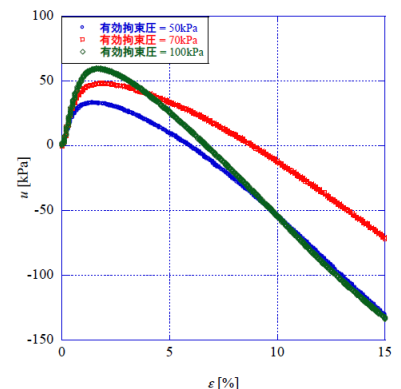


図-10 間隙水圧 u -軸ひずみ ϵ 関係

係である。試験初期は、試料が圧縮され間隙水圧が増加しているが、ピークを迎えると膨張状態になり間隙水圧が減少した。これより、伏木現地採取試料は一般的な砂質土の傾向を示した。

表-4 非排水繰返し三軸圧縮試験の実施ケース

有効拘束圧(kPa)	背圧(kPa)	周波数(Hz)	繰返し応力振幅比
100	100	0.1	0.179
			0.219
			0.275

表-4 に非排水繰返し三軸圧縮試験の実施ケースを示す。図-11 は両振幅ひずみ $DA = 5\%$ における、繰返し応力振幅比と繰返し回数との関係である。試験結果より、液状化強度は $\sigma_d/2\sigma'_0 = 0.225$ となった。

5.3. 地盤改良による杭間地盤の締固め効果の検討結果

表-5 に改良後の期待される N 値と施工前後の SWS 試験の結果である換算 N 値を用い、液状化係数 P_L を算出した結果を示す。細粒分含有率を考慮した設計法を用いた場合を設計法 A、細粒分含有率と体積変化を考慮した設計法を用いた場合を設計法 B としている。設計法から求めた地盤改良後に期待される N 値から判定された施工前後の液状化係数 P_L 値は、大きく改善されており、砕石パイルの打設による杭間地盤の締固め効果のみでも、地盤の液状化対策効果を確認することができた。実際には、砕石パイルの剛性や排水機能が加わるために、液状化対策効果は更に大きくなるものと思われる。しかし、設計法から算出された地盤改良後に期待される N 値より求めた液状化係数は、現地試験の SWS 試験の結果に対して過大に評価された。

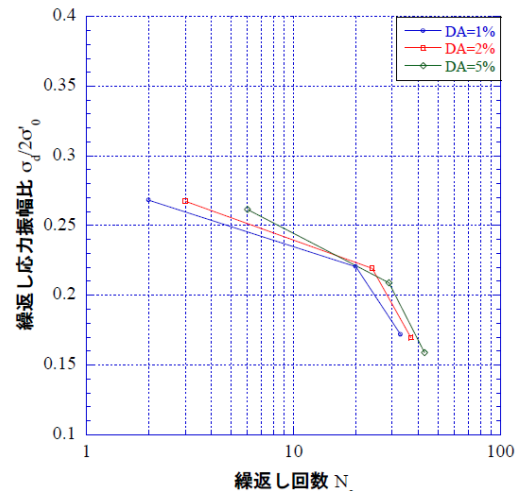


図-11 液状化強度曲線

表-5 液状化係数 P_L

改良ピッチ	施工前	施工後		
	sws試験	sws試験	設計法A	設計法B
1.0m	10.366	5.502	0.201	0.527
1.5m	9.980	6.043	4.447	5.355

6. まとめ

スクリー・プレス工法の現地試験を行い、実施した現地地盤から採取された試料の物理的力学特性の調査を試みた。また、施工前後の調査結果をもとに、杭間地盤の締固め効果を検討し、液状化対策効果の現場実証試験を行った。

現地試験の結果より、砕石パイルの打設による間隙水圧の抑制効果を確認することができた。杭間地盤の締固め効果による液状化対策効果を検討した結果、パイル長 4m であるが、地表面から 5m ほどの領域で地盤の N 値が上昇する効果が得られた。算出された液状化係数より、液状化対策効果を確認することができたが、実際には、砕石パイルの剛性や排水機能が加わるために、液状化対策効果は更に大きくなるものと思われる。その検討には有限要素法を用いた数値解析が必要となるため、圧密非排水三軸圧縮試験により得られた地盤定数を有限要素解析に適用し、砕石パイルの剛性や排水機能を考慮した液状化対策効果の検討を行うことを今後の課題としたい。

(参考文献)

- 金子 大, 西山洋輔, 大塚 悟, 磯部公一, 折戸清治: グラベルパイルによる宅地地盤改良の液状化抑制効果に関する数値解析的検討, 第 49 回地盤工学会研究発表会講演集(DVD-R), 2014-7.
- 水野恭男, 末松直幹, 奥山一典: 細粒分を含む砂質地盤におけるサンドコンパクションパイル工法の設計法, 土と基礎, Vol.35, No.5, pp.21~26, 1987.
- 山本 実, 原田健二, 野津光夫: 締固め工法を用いた緩い砂質地盤の液状化対策の新しい設計法, 土と基礎, Vol.48, No.11, pp.17~20, 2000.