

サンドコンパクションパイルの打設が砂杭 周辺地盤の強度特性に及ぼす影響

松田 博 (社会建設工学科)
来山 尚義 (設計工学専攻)

Effects of Sand Compaction Pile Driving on Geotechnical Properties of Clay Layer

Hiroshi MATSUDA (Department of Civil Engineering)
Naoyoshi KITAYAMA (Division of Design Engineering)

Abstract: In the SCP method, when sand piles are driven into the saturated clayey ground, clay is disturbed significantly accompanied by the excess pore water pressure built up, resulting in clay's shear strength decrease. Reports on shear strength characteristics in SCP method are few, hence some uncertain points are still remained. In the ground improvement at Tokuyama-Kudamatsu port, over 1,000 laboratory tests were performed to observe the effects of SCP with the low sand replacement ratio on the stability of the ground. Based on these results, the change in the density, natural water content, consolidation characteristics, shear strength were clarified.

Key Word: sand compaction pile, shear strength, clay, disturbance, consistency, consolidation

1. まえがき

粘性土地盤に対してサンドコンパクションパイル工法（SCP工法）を適用する場合、パイプロットを粘土中に貫入し、その後砂を締めつつ砂杭を形成していく。粘土層が飽和している場合においては、パイプロットの押し引きにともない、粘土は著しい攪乱を受け、そのために砂杭のまわりの粘土層内には過剰間隙水圧が発生し、施工直後は粘土のせん断強度が低下する^{1),2),3)}。一方、砂杭を粘土層内に打設すると、粘土地盤の一部は砂杭によって置き換えられるために、盛上りを生じるとともに、地盤改良域外の粘土層も受働土圧を受けて変形し、強度も低下する⁴⁾。粘土が攪乱を受けた場合の強度特性の変化についての報告は、サンプリング、波浪荷重、地震等を対象とした研究においてみられる^{たとえは5),6)}ものの、SCP工法を対象として、粘土の強度が砂杭打設によって受ける影響を実験によって調べた研究^{7),8),9)}および砂杭打設の影響が及ぶ範囲（乱れ範囲¹⁰⁾とも呼ぶ）に関する研究は数少なく^{3),10),11)}、明確にされていない点も多い。今回、徳山下松港において低置換率SCP（砂置換率=30%）

による地盤改良工事にともない、砂杭打設前後に採取した不攪乱試料について多くの土質試験が行われた。そこで、ここではそれらの結果にもとづき、SCP打設によって生じる粘土地盤の乱れが、粘土の湿潤密度、自然含水比、圧密定数、強度に及ぼす影響について調べた。

2. 現場の概要

今回SCP打設工事が行われた現場は、徳山下松港晴海埠頭の地先にある土砂処分場予定地であって、その平面図を示したものがFig. 1である。現場は水深約 - 10 mで、DL - 23 m付近までは、沖積世の軟弱粘土層、その下には洪積世の砂礫層が分布している。現場の代表的な土層断面を示したものがFig. 2である。SCP打設はFig. 1の太い線で示したように広範囲にわたって行われたが、改良域全体にわたって粘土層が比較的一様に分布している。また、護岸の標準断面を示したものがFig. 3である。施工にあたっては、サンドコンパクション打設船の特性により、最終天端付近の砂杭形成のためのケーシングパイプ引き抜き過程において、排出し

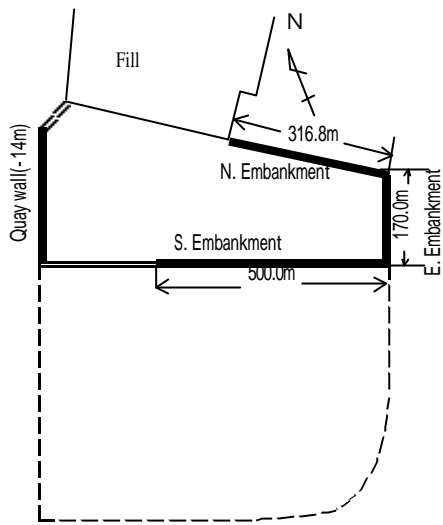


Fig. 1 Outline of the construction site.

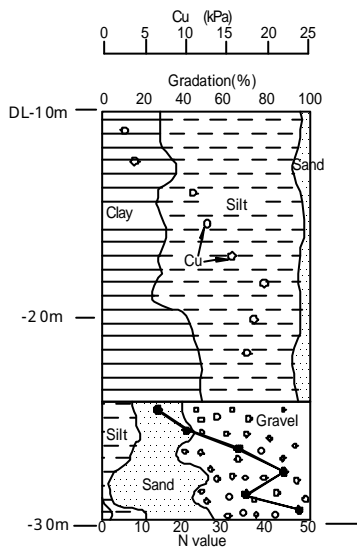


Fig. 2 Typical soil profiles.

た砂を自立させるため、事前に厚さ約 1.5m の敷砂施工が行われた。そして、支持層（水深-24.5m）から海底面（水深-10.0m）及びSCP打設に伴う盛上がり部を改良した。SCP打設は平成2年から平成5年まで行われ、打設本数は5,070本である。砂杭はFig. 3に示したように直径2.0m、砂杭の中心間隔は、横断方向に5.0m、縦断方向に4.2mの千鳥配列である。

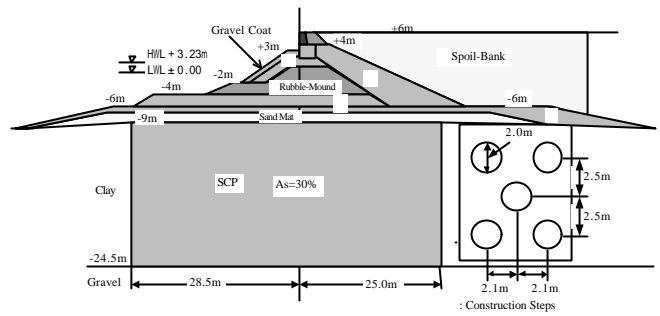


Fig. 3 Cross section of the embankment and the sand columns.

3. 砂杭打設に伴う地盤の攪乱が粘土の圧密・強度・変形特性に及ぼす影響

3. 1 SCP打設に伴う粘土層の湿潤密度、含水比の変化

地盤改良域の内外の各点でSCP打設前後に採取した試料について土質試験が行われた。ここでは、そのうちの約1400のデータをもとに検討を行った。なお、改良域内の試料採取にあたっては、測量によってポジション設定を行い、砂杭間の中心位置で不攪乱試料の採取を行った。

Fig. 4は、標高と粘土の自然含水比の関係を示したものであって、改良域内における杭間粘土についての結果である。図中の黒印は地盤改良前、白印は改良後の結果を示している。ここに、改良域内とはSCPによって改良された領域で、改良域中心から港外側28.5m以内の部分、港内側25.0m以内の部分を示す。また、後述する改良域外とはそれ以外の部分を示す。ただ、改良域近傍は攪乱の影響を著しく受けることから、護岸法線から40m以遠の部分の結

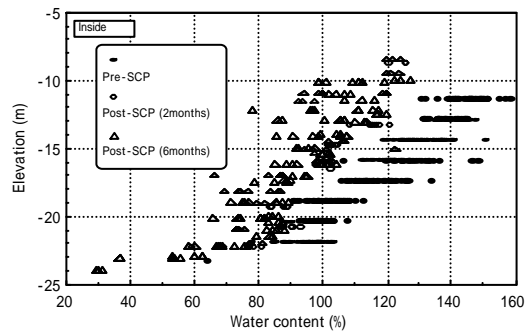


Fig. 4 Distribution of the natural water content in the ground.

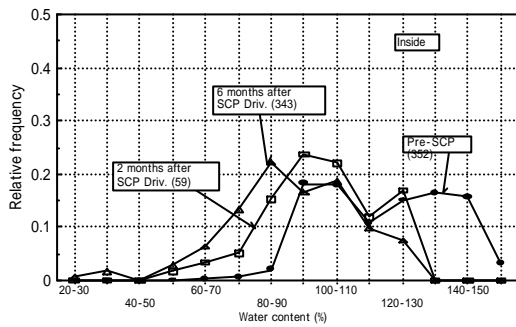


Fig. 5 Relative frequency of the natural water content.

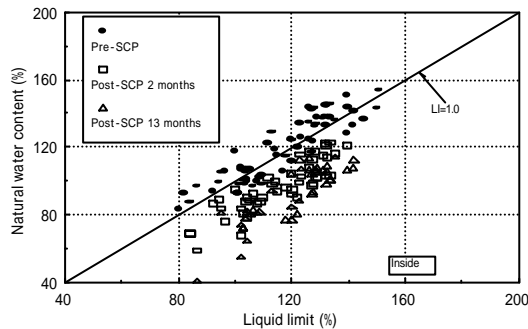


Fig. 6 Relationships between the liquid limit and the natural water content.

果について整理した。Fig. 4においてはSCP打設から6ヶ月後までの結果しか含まれていないが、時間経過とともに自然含水比は減少する傾向がみられ、SCPによる排水効果が現れている。また、SCP打設後2ヶ月、6ヶ月と時間経過とともに減少することがわかる。

Fig. 5は改良域内での自然含水比について相対頻度分布を示したものである。自然含水比はSCP打設後減少し、明らかに時間経過とともに自然含水比はさらに減少することがわかる。

液性限界と自然含水比の関係を示したものが、Fig. 6である。SCP打設前においては自然含水比と液性限界の値はほぼ一致しており、流動化しやすい不安定な状態にあるが、SCP打設後は、自然含水比は液性限界よりも著しく減少している。

図中の直線は液性指数 = 1を示したものであるが、改良域外においても、このように液性指数の低下が生じることがすでに示されており⁴⁾、改良域外においてもSCP打設によって粘土は攪乱の影響を受けることを意味している。特に改良域外においては、排水長が長くなることから、攪乱に伴う乱れの回復に対して明確にすべき要素が多く残されて

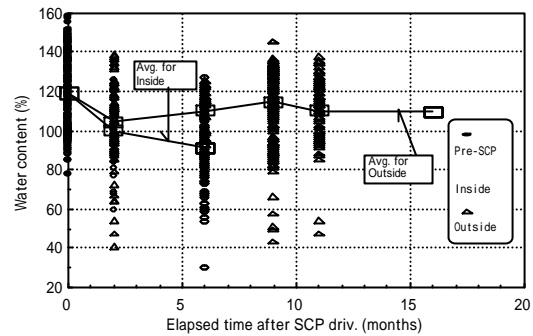


Fig. 7 Changes in the natural water content with the elapsed time.

いる。

そこで、改良域内外での粘土の自然含水比をSCP打設時からの経過時間に対してプロットしたものがFig. 7である。図中の実線は、経過時間ごとに自然含水比の平均値を求めて、その時間的变化を示したものである。同図より改良域内では自然含水比が時間経過とともに減少すること、また、改良域外ではばらつきが大きく明確ではないが、やはり減少する傾向にある。

Fig. 8は改良域内における標高と粘土の湿潤密度の関係を示したものであって、盛土の影響を除くためにSCP打設後6ヶ月までの結果しか含まれていないが、時間の経過とともに湿潤密度は増加する傾向が見られる。

Fig. 9は湿潤密度の経時変化を示したものであって、図中の実線はFig. 7と同様、改良域内と改良域外に対する結果に対して経過時間ごとに平均値を求め、その時間的变化を示したものである。改良域内ではFig. 8と同様に6ヶ月後までのデータのみではあるが、時間とともに増加していることがわ

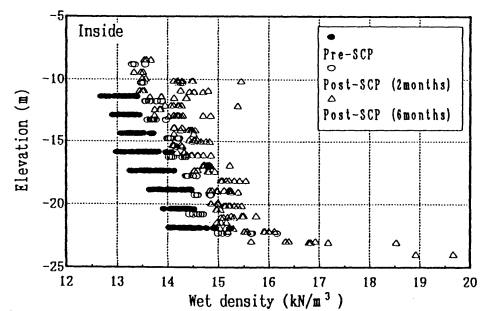


Fig. 8 Distributions of the wet density in the clay layer.

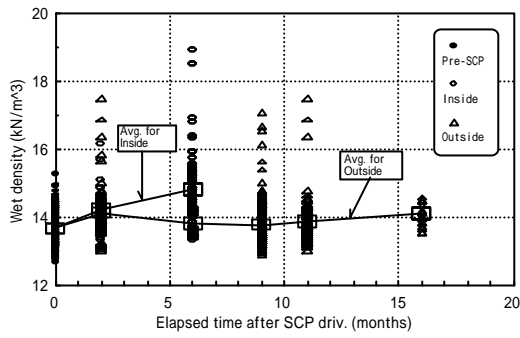


Fig. 9 Changes in the wet density with elapsed time.

かる。一方改良域外では、ばらつきが大きい、自然含水比についての結果と同様、SCP打設前に比べると増加傾向にあることがわかる。

3.2 SCP打設に伴う圧密特性の変化

改良域内において、SCP打設前および打設2ヶ月後に採取された不攪乱試料について圧密試験を行って得られたe-logP曲線をFig. 10に示す。SCP打設後に採取した試料のe-logP曲線はSCP打設前に採取した試料のそれより下方にあり、間隙比が低下していることを示している。しかし、圧密圧力が増加すると両曲線は漸近し、SCP打設の影響が見られなくなる。このような傾向は、いわゆる攪乱を受けた粘土のe-logP曲線の特性を表すものである。また、同図には改良域外(改良端から2m外側)で採取した試料の結果も示している。改良域内と同様の傾向が見られるが、改良域内の結果ほど間隙比は低下していない。

Fig. 11、12、13はそれぞれDL-10m、DL-16mおよびDL-22mにおけるe-logP曲線を

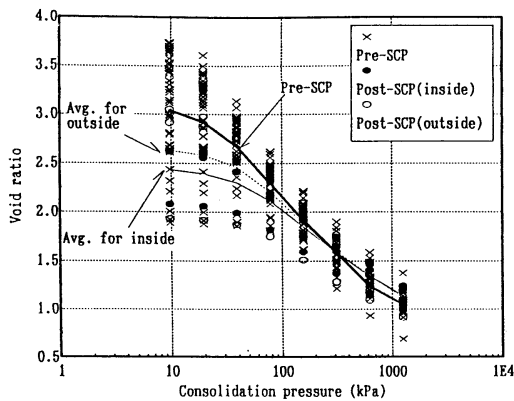


Fig. 10 e-logP curves.

示したものである。ここで、初期の土被り圧に相当する圧密圧力を P_0 、盛り上がり土・雑石等による応力増加分を P とする。また、 e_1 は土被り圧増加による間隙比 e の低下に相当し、SCP打設に起因した間隙比の減少を e_2 で表すと、 $e = e_1 + e_2$ が間隙比の総減少量になる。このような考

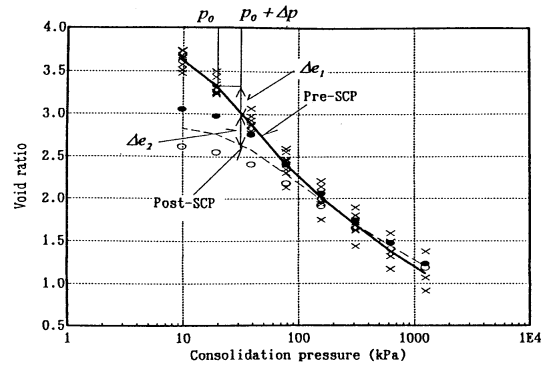


Fig. 11 e-logP curves.(DL-10m)

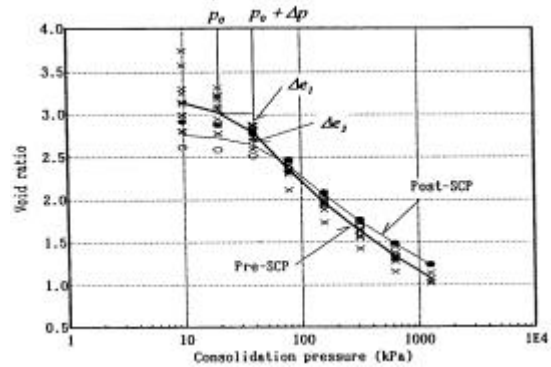


Fig. 12 e-logP curves.(DL-16m)

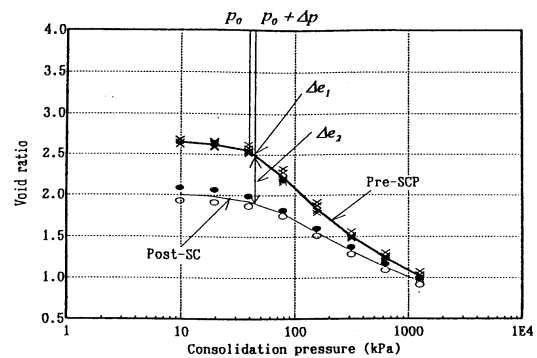


Fig. 13 e-logP curves.(DL-22m)

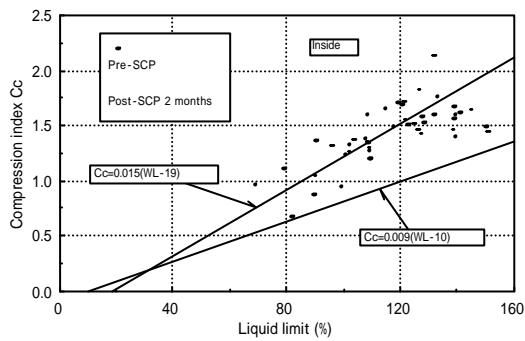


Fig.14 Relationships between the liquid limit and compression index.

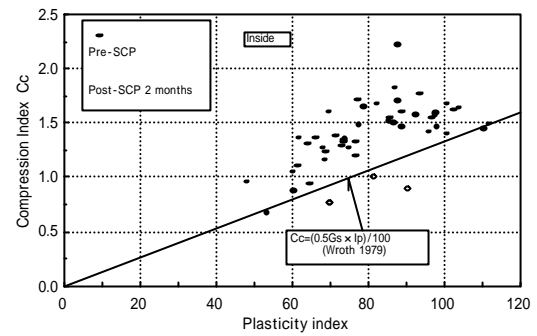


Fig.15 Relationships between the plasticity index and compression index.

え方から比較すると、下層の DL- 2 2 m 付近における粘土の方が攪乱の影響をより受けやすいことを示している。

そこで、SCP 打設が圧縮指数に及ぼす影響を調べるために、液性限界と圧縮指数の関係を示したものが Fig. 14 であって、改良域内の試料に対する結果である。

液性限界と圧縮指数の代表的な関係式としては、Skempton の式

$$C_c = 0.009(w_L - 10) \quad (1)$$

があるが、小川、松本ら¹²⁾は、地域性を考慮した次式を提案した。

$$C_c = 0.015(w_L - 19) \quad (2)$$

Fig. 14 において、SCP 打設前は式 (2) の直線とよく一致しているが、SCP 打設 2 ヶ月後では明確に圧縮指数が低下し、むしろ式 (1) の直線上にあることがわかる。

SCP 打設前後の塑性指数と圧縮指数の関係を示したのが、Fig. 15 である。Wroth¹³⁾は両者の関係式として次式を提案した。

$$C_c = (0.5 \times G_s \times I_p) / 100 \quad (3)$$

本施工区域の粘性土は SCP 打設前は式 (3) の直線よりも圧縮指数がやや大きいですが、SCP 打設により式 (3) の直線まで低下しており、ここでの結果と Wroth の提案式を比較すると、まず地域性の相違ということがあげられるが、粘土が攪乱を受けた場合には Wroth の提案式に近づくということを考えれば、地域性という以外に土の応力履歴についても無視することはできない。

SCP 打設前後の圧密係数 C_v と圧密圧力の関係を示したものが Fig. 16 である。SCP 打設後の圧密係数は、攪乱を受けることにより明らかに減少し

ているが、圧密圧力が増加すると SCP 打設による影響は見られなくなる。

体積圧縮係数 m_v と圧密圧力の関係を示したものが Fig. 17 である。体積圧縮係数は、SCP 打設により減少している。これは、攪乱を受けた粘土は圧

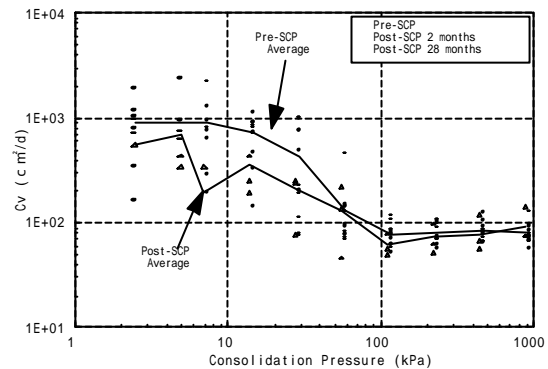


Fig.16 Relationships between the coefficient of consolidation and consolidation pressure.

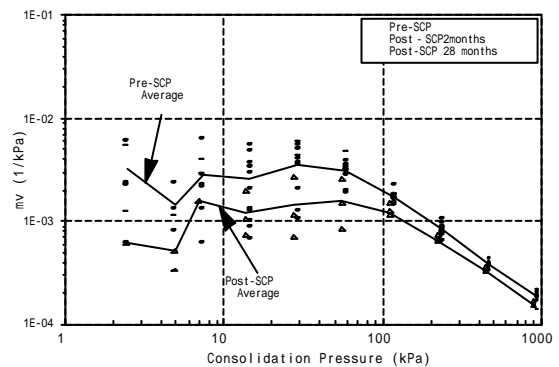


Fig.17 Relationships between the coefficient of volumetric compression and the consolidation pressure.

縮に対する抵抗が増加するためと考えられる。

3.3 SCP打設に伴う強度特性の変化

SCP打設前後の一軸圧縮強さ q_u の変化について検討する際は、各チェックボーリング地点によって盛上り高さが異なっているほか、敷砂や雑石の追加の有無など施工条件が異なるため、それらを考慮した検討が必要である。

Fig. 18はSCP打設前および打設後の q_u の深さ方向の分布を示したものである。図中の黒印はSCP打設前(データ数335)、白印は改良域内(データ数399)と改良域外(データ数324)それぞれについてSCP打設後の結果を示したものである。また、図中の直線は各プロットに対して最小2乗法によって得られる直線(原地盤: $q_u = 4.12 + 2.74Z$ (kPa)、SCP打設後<改良域内>: $q_u = -0.64 + 2.37Z$ 、SCP打設後<改良域外>: $q_u = 23.92 + 2.77Z$) および盛上りを3mとして得た

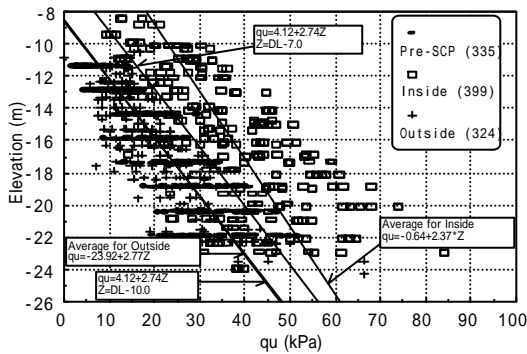


Fig.18 Distribution of the unconfined compressive strength.

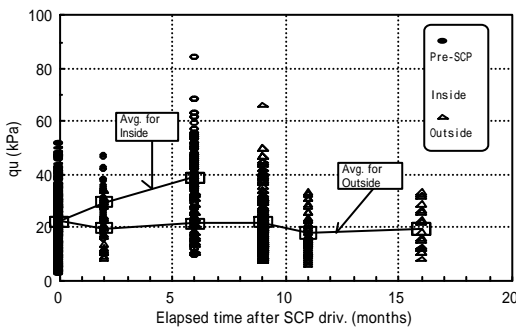


Fig.19 Changes in the unconfined compressive strength with elapsed time.

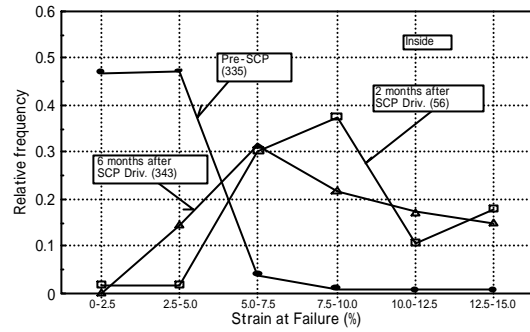


Fig.20 Relative frequency of the strain at failure.

q_u の推定直線である。改良域内の q_u は攪乱の影響を受けるが、SCP打設後強度は明らかに増加し推定値より大きくなっている。一方、改良域外では q_u の増加はほとんど見られない。

Fig. 19は q_u の経時変化を示したものであって、改良域内と改良域外に対する結果である。改良域内では、 q_u はSCP打設後0~6ヶ月の間に増加する傾向が見られる。また、改良域外ではやや減少することがわかる

Fig. 20はSCP打設前後の一軸圧縮試験における破壊ひずみの相対頻度分布を示したもので、改良域内での結果である。SCP打設によって破壊ひずみが増加しており、SCP打設による攪乱の影響としてとらえることができる。また、SCP打設直後に増加した破壊ひずみは、その後減少傾向にあることがわかる。また、同様の傾向は改良域外においてもみられる。

破壊ひずみの経時変化を示したものが Fig. 21

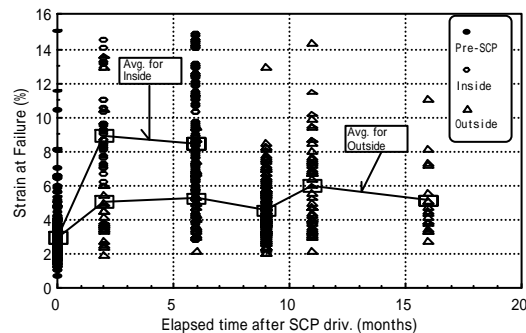


Fig.21 Changes in the strain at failure with elapsed time.

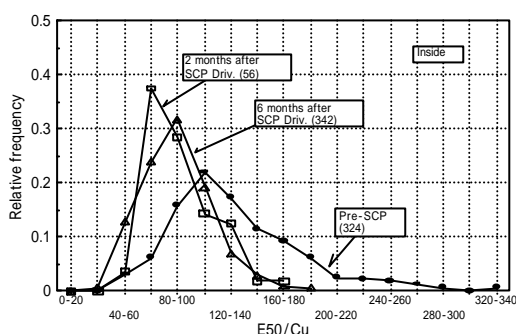


Fig.22 The relative frequency for E_{50}/C_u .

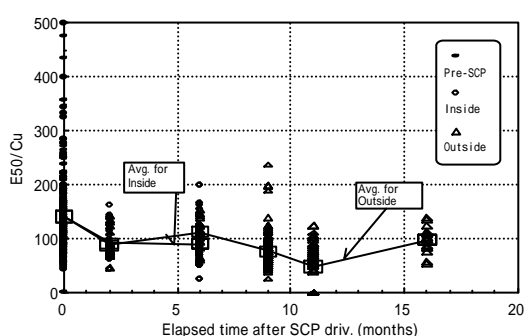


Fig.23 Changes in E_{50}/C_u with elapsed time.

である。図中には改領域内と改領域外の結果を示しているが、明らかに、改領域内では著しい破壊ひずみの増加が見られる。一方、改領域外でもSCP打設直後において破壊ひずみの増加がみられる。その後、徐々に回復の傾向が見られるが、顕著な変化はみられない。

一方、一軸圧縮試験において攪乱の程度が大きいほど E_{50}/C_u (ここに、 E_{50} : 変形係数、 C_u : 非排水強度) は小さくなることから、乱れを表す指標として破壊ひずみと同様に用いることがある¹⁴⁾。そこでSCP打設前後の E_{50}/C_u の相対頻度分布を改領域内について示したものがFig. 2 2である。SCP打設によって E_{50}/C_u が減少している。また、その経時変化を示したものがFig. 2 3である。同図より、 E_{50}/C_u は、改領域内外の違いによらず、減少傾向にあることがわかる。

4. まとめ

徳山下松港の土砂処分場において、低置換率(置換率30%)SCP工法による軟弱地盤改良工事に伴って行われた土質試験結果をもとに、SCP打設によって生じる粘土地盤の乱れが、粘土の湿潤密度、自然含水比、圧密定数、強度に及ぼす影響について調べた。

その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 改良域内においては、砂杭打設後、比較的短期間に自然含水比の減少、湿潤密度の増加、圧縮指数の低下が生じる。
- (2) 改良域内においては、砂杭打設後には間隙比、圧密係数とともに減少するが、圧密応力が増加すると、SCP打設の影響が見られなくなる。
- (3) 改良域内においては、一軸圧縮強度はSCP打設後急速に増加するが、破壊ひずみの低下および、 E_{50}/C_u の増加は6ヶ月の間ではみられない。
- (4) 改良域外においても、自然含水比の減少、湿潤密度の増加が生じる。
- (5) 改良域外においても、一軸圧縮強度は低下し、それは1年経過後でも回復しない。また、破壊ひずみの増加、 E_{50}/C_u の低下した状態が長期間継続する。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、運輸省第四港湾建設局宇部港湾工事事務所より、徳山下松港土砂処分場建設工事に際して行われた多くの土質試験結果の提供を受けました。ここに、深く感謝します。

参考文献

- 1) 網干寿夫、中村龍二、奥村樹郎、曾我部隆久、一本英三郎: 軟弱地盤におけるサンドコンパクション工法および深層混合工法の問題点、土木学会誌、増刊号、pp.22-32、1982。
- 2) Aboshi, H., Mizuno, Y. and Kuwabara M.: Present state of sand compaction pile in Japan, Deep Foundation Improvements; Design, Construction and Testing, ASTM, pp.32-46, 1990.
- 3) 平尾寿夫、松尾稔: 締固め砂杭の打設による海底隆起地盤の活用に関する研究、土木学会論文報告集、

- 集、第364号/ -4、pp.169-178、1985.
- 4) Matsuda H., Fujiwara K., Takahashi S. and Kitayama N. : Influence of SCP driving on the behavior of clay, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, pp.232-238, 1997.
 - 5) Matsui, T., Ohara, H. and Ito, T. :Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay, Journal of the Geotechnical Eng., Vol.106, No.GT10, pp.1101-1120, 1980.
 - 6) 奥村樹郎: 粘土のかく乱とサンプリング方法の改善に関する研究、港湾技研資料、No.193、pp.7-145、1974.
 - 7) Asaoka, A., Kodaka, T. and Nozu, M.: Undrained shear strength of clay improved with sand compaction piles, Soils and Foundations, Vol.34, No.4, pp.23-32, 1994.
 - 8) 藤原克久、松田博、高橋総一: S C P打設により攪乱を受けた飽和粘土のせん断強度について、土木学会第51回年次学術講演会、 -A79、pp.158-159、1996
 - 9) 松田博、中川義守、石井一郎: 粘性土の繰返しせん断後の再圧密・強度特性、粘性土の動的性質に関するシンポジウム発表論文集、II-2、pp.163-168、1995.
 - 10) 一本英三郎: サンドコンパクションパイル工法の実用設計と実施結果、第36回土木学会年次学術講演会研究討論会資料、pp.51-55、1981.
 - 11) 一本英三郎、末松直幹: サンドコンパクションパイル工法、土と基礎、Vol.29、No.5、pp.13-20、1989.
 - 12) 小川富美子、松本一明: 港湾地域における土の工学的諸係数の相関性、港湾技術研究所報告、17、3、pp.3-89、1977。
 - 13) Wroth C. P.: Correlations of some engineering properties of soils. Proc. 2nd Int. Conf. on Behavior of Offshore Structures, pp.121-132, 1979.
 - 14) 小林正樹: c と ϕ を考える、2. 粘土、土と基礎、Vol.22、No.12、pp.67-72、1974.

(1999.7.30 受理)