

SCP 工法における砂杭の造成メカニズム に関する研究（その2）

佐伯 晴香*¹ 上 俊二*² 大内光徳*³ 藤原東雄*²

A Study on Construction Mechanism of the Sand Pile by SCP Method (Part2)

Haruka SAEKI, Shunji UE, Mitsunori OUCHI and Haruo FUJIWARA

Abstract

SCP(Sand Compaction Pile) method is one of the methods of improving the soft ground by building dense sand column. The casing pipes filled with sand are put in the soft ground. Since the sand plays as a stopper at the tip of the pipe, it has plugging effect. On the other hand, it is difficult to discharge the sand from the casing pipes because of the friction between the sand and wall. In order to investigate the mechanisms of the plugging effect of the sand in casing pipe, a series of penetration tests were carried out the height of the sand column, and the density of the sand by using the equipment which can be visualized.

Key Words: sand compaction pile, casing pipe, plugging effect

1. まえがき

SCP 工法は、ケーシングパイプを使用し、軟弱地盤中によく締め固められた砂杭を造成することで地盤を改良する工法である。この工法は複雑な地層条件にも対応できる極めて汎用性の高い軟弱地盤改良工法として位置づけられており、多くの実績を残している¹⁾。阪神・淡路大震災においても SCP 工法で改良した地盤は沈下が小さく、軟弱地盤改良工法として有効であったとされている²⁾。

一般に砂杭の造成方法として、ケーシングパイプ内に砂を投入し、パイプ上部からエアを負荷させながら、砂を乾いた状態で排出させてゆく方法がとられている³⁾。しかし、負荷するエアと砂の排出関係ははまだ明らかになっておらず、オペレーターの経験に頼る所が多い。

図-1 に示す砂杭の造成過程の理想は、砂杭1本分の砂を事前にケーシングパイプ内につめ、連続的に軟弱地盤中に排出することである。しかし、現状としては1回の排出量に見合う量をパイプ上部から投入している。したがって砂

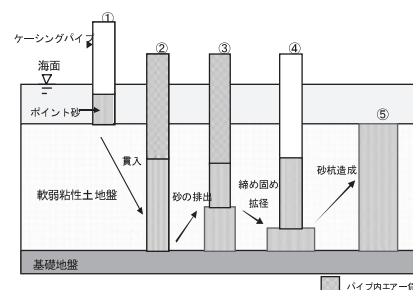


図-1 砂杭の造成過程

を投入するための待ち時間が発生することになり、この待ち時間は砂杭造成時間の約10%を占める⁴⁾⁵⁾。

本研究ではケーシングパイプ貫入時の砂の閉塞メカニズムを明らかにするため、可視化可能な実験装置を用い、パイプ内の砂の挙動を観察し、パイプ内に投入する砂高、砂の密度を変化させた実験を行い、以前から行ってきた実験結果⁶⁾と比較することを目的とする。

*¹ 環境建設工学専攻

*² 土木建築工学科

*³ 井森工業(株)

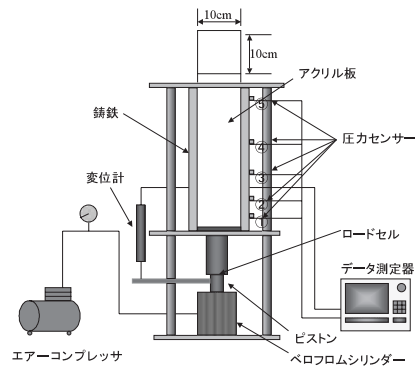


図-2 可視化実験装置

表-1 豊浦珪砂の物理的性質

土粒子の密度(g/cm^3)	2.663
最大間隙比 e_{max}	0.961
最小間隙比 e_{min}	0.590
最大粒径 $D_{\text{max}}(\text{mm})$	0.900
均等係数 U_c	2.294
曲率係数 U_c'	1.268

2. 実験概要

2.1 実験装置と試料

図-2 に実験装置の概要図を示す。この実験装置は幅 10cm、奥行き 10cm の正方形断面で、両側面には鋳鉄を取り付け、前面と背面にはアクリル板を取り付けたもので、地盤に貫入する際の砂杭先端に及ぼす荷重と変位、パイプ壁面の側圧を測定し、パイプ内の砂の挙動を可視化することができる。実験において実際にケーシングパイプを貫入することは難しい。そこで本研究では、ケーシングパイプを固定し、ペロフロムシリンダーにエアークンプレッサーにより圧力を負荷させピストンを上昇させることにより砂杭を押し抜く方法をとった(押し抜き試験)。そしてピストンに作用する荷重(押し抜き力)はロードセル、ピストンの変位は変位計、パイプ壁面の側圧は圧力センサーによって測定し、データ測定器により測定値を収録する。

試料は豊浦珪砂を用い、物理的性質は表-1 に示す。また、要素試験として行った一面せん断試験の結果は以前行ったものと同じである⁶⁾。

2.2 可視化実験装置を用いた押し抜き試験

ケーシングパイプ貫入による砂の閉塞時の

表-2 実験条件

	相対密度 D_r	投入砂高 $H(\text{cm})$
乾燥砂	30%	10,20,30,40
	50%	10,20,30,40
	80%	10,20,30
湿潤砂 ($\omega=7\%$)	50%	10,20,30,40
	80%	10,20,30

挙動を可視化するため、砂の相対密度 D_r 、砂高 H を変え、押し抜き試験を行った。また、パイプ内の砂杭には 2cm 間隔で色砂を敷き、パイプ下段から 1 層目、2 層目・・・と数える。

表-2 に実験条件を示す。実験方法は以下の通りである。

- 1) 所定の砂の相対密度で砂高分の試料を計る。
(乾燥砂: $D_{r30\%}=1.470\text{g}/\text{cm}^3$, $D_{r50\%}=1.524\text{g}/\text{cm}^3$, $D_{r80\%}=1.611\text{g}/\text{cm}^3$)
(湿潤砂: $D_{r50\%}=1.544\text{g}/\text{cm}^3$, $D_{r80\%}=1.712\text{g}/\text{cm}^3$)
- 2) 可視化パイプ内に試料を入れ、所定の高さになるように締め固める。
- 3) 砂杭表面を平らにする。
- 4) 下部シリンダーからエアークンプレッサーを負荷させ、ピストンを上昇させ砂杭を押し抜く。ピストンの荷重速度は(20mm/sec)である。
- 5) 押し抜き時にかかる荷重とパイプ壁面の側圧と変位を一定の間隔で測定し、同時にデジタルカメラでパイプ内の砂の挙動を撮影する。

3. 実験結果と考察

3.1 可視化実験装置を用いた押し抜き試験

図-3 は可視化実験装置を用いた押し抜き試験結果の一例として、乾燥砂の相対密度 $D_r=50\%$, 80% における、ピストンの変位と押し抜き力の関係を示した図である。

図-3(a) から砂高が高くなるにつれ、押し抜き力が大きくなっていることがわかる。これは砂高が高くなるとパイプ壁面との摩擦が大きくなるからと考えられる。また、 $H=30\text{cm}$ 以降では砂杭がパイプ内に詰まった状態(閉塞)となるので、押し抜き力は増加し続ける。

図-3(b) も同様、砂高が高くなるにつれて、大きい押し抜き力が必要となる。また、 $H=30\text{cm}$ で閉塞が生じた。

図-3(a)(b) で比較すると、同じ砂高において相対密度の大きい図-3(b)の方が押し抜き力が大きくなっていることがわかる。

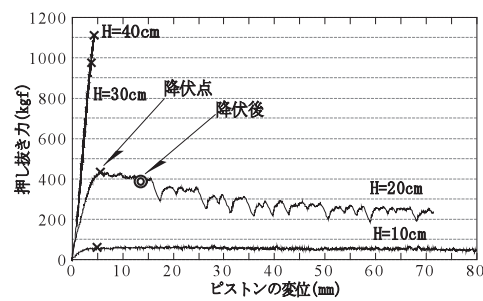
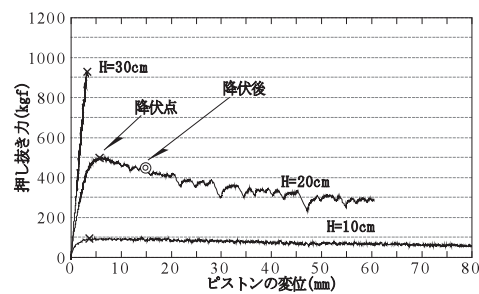
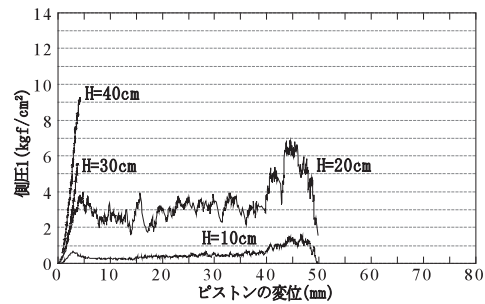
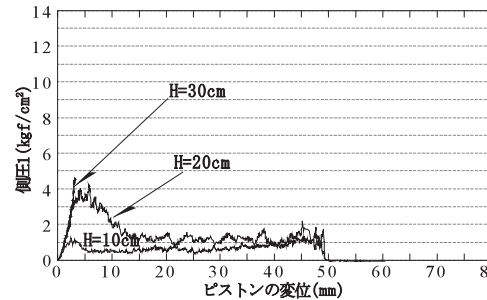
(a) $Dr=50\%$ (b) $Dr=80\%$ 図-3 ピストンの変位と押し抜き力の関係
(乾燥砂)

図-4は、可視化実験装置を用いた押し抜き試験の一例として、乾燥砂の相対密度 $Dr=50\%$, 80% における、ピストンの変位と側圧1の関係を示した図である。ここで側圧1とは、図-2に示すセンサー①での側圧のことである。また、図-4は図-3の実験時に、測定したものである。

図-4(a)から、砂高が高くなるにつれ、側圧が大きくなっている事が分かる。これは、押し抜き力と同様、砂高が高くなるとパイプ壁面との摩擦が大きくなるからと考えられる。また、 $H=30\text{cm}$ 以降では砂杭がパイプ内に詰まった状態(閉塞)となるので、側圧は増加し続ける。図-3(a)と比較すると、閉塞を生じた $H=30\text{cm}$ 以降、側圧も急激に大きくなる傾向が見られ、押し抜き力との相関関係も伺える。

図-4(b)も同様、砂高が高くなるにつれて、側圧は大きくなっている。図-3(b)と比較すると、やはり、押し抜き力と側圧の傾向は似ており相関関係があると推測できる。

図-4(a)(b)で比較すると、同じ砂高において相対密度の大きい図-4(b)の方が側圧が大

(a) $Dr=50\%$ (b) $Dr=80\%$ 図-4 ピストンの変位と側圧1の関係
(乾燥砂)

きくなっていることがわかる。

図-5は可視化実験装置を用いた押し抜き試験結果の一例として、湿潤砂の相対密度 $Dr=50\%$, 80% における、ピストンの変位と押し抜き力の関係を示した図である。

図-5(a)から砂高が高くなるにつれ、押し抜き力が大きくなっていることがわかる。これは図-3と同様、砂高が高くなるとパイプ壁面との摩擦が大きくなるからと考えられる。また $H=40\text{cm}$ で砂杭に閉塞が生じた。

図-5(b)も同様、砂高が高くなるにつれて、大きい押し抜き力が必要となる。 $H=30\text{cm}$ で閉塞が生じた。

図-5(a)(b)で比較すると、同じ砂高において相対密度の大きい図-5(b)の方が押し抜き力が大きくなっていることがわかる。

ここで、同じ相対密度ごとに図-3と図-5で比較してみると、同じ砂高において乾燥砂のほうが大きい押し抜き力が必要となっており、これは一面せん断試験の結果より、砂の内部摩擦角 ϕ 、砂とパイプ壁面の摩擦角 δ ともに乾燥砂の方が大きく、湿潤砂に比べ滑りにく

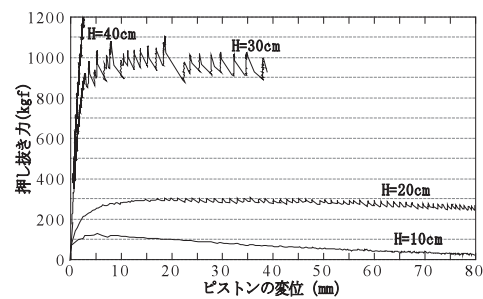
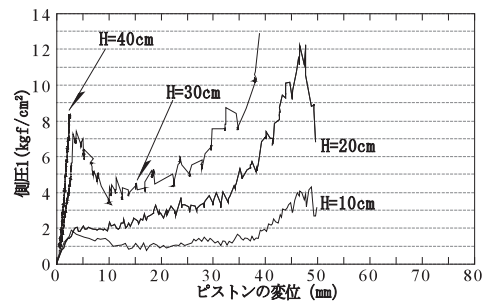
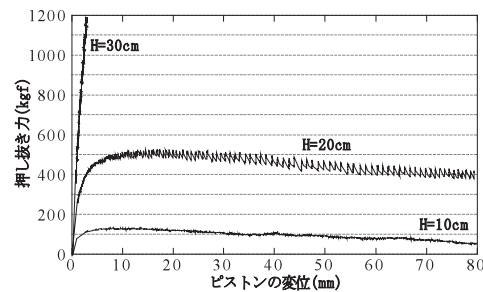
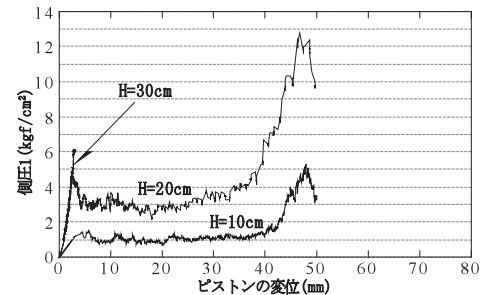
(a) $Dr=50\%$ (a) $Dr=50\%$ (b) $Dr=80\%$ (b) $Dr=80\%$

図-5 ピストンの変位と押し抜き力の関係
(湿潤砂)

図-6 ピストンの変位と側圧 I の関係
(湿潤砂)

いからと考えられる。

図-6 は可視化実験装置を用いた押し抜き試験結果の一例として、湿潤砂の相対密度 $Dr=50\%$, 80% における、ピストンの変位と側圧 I の関係を示した図である。これは図-5 の実験時に、測定したものである。

図-6 (a) から、砂高が高くなるにつれ、側圧が大きくなっている事が分かる。これは、砂高が高くなるにつれて、パイプ壁面との摩擦が大きくなるからと考えられる。また、 $H=40\text{cm}$ で砂杭は閉塞したので押し抜かれず、側圧は増加し続ける。図-5 (a) と比較すると、閉塞を生じた $H=40\text{cm}$ で側圧も大きくなり続ける傾向が見られ、押し抜き力との相関関係も伺える。

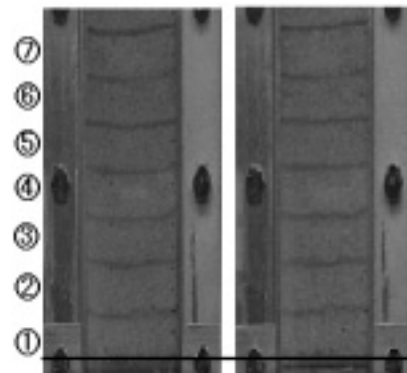
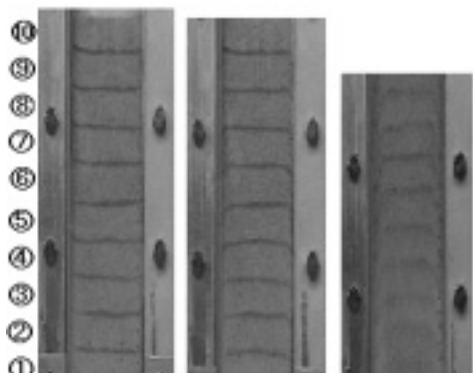
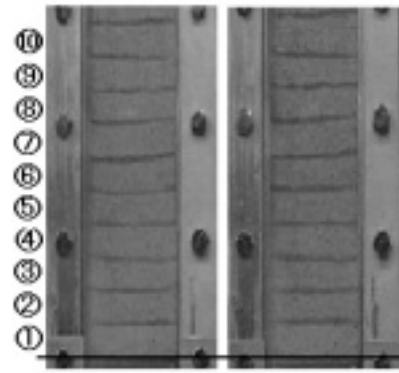
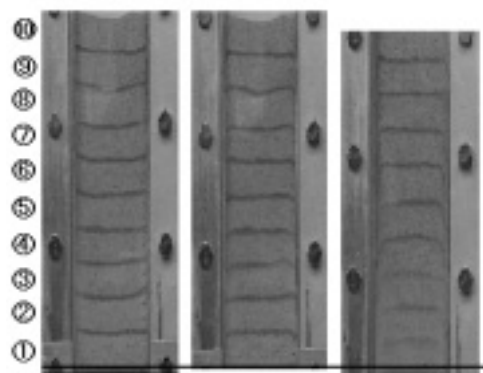
図-6 (b) も同様、砂高が高くなるにつれて、側圧は大きくなっている。図-5 (b) と比較すると、やはり、押し抜き力と側圧の傾向は似ており相関関係があると推測できる。

図-6 (a) (b) で比較すると、同じ砂高において相対密度の大きい図-6 (b) の方が側圧が大きくなっていることがわかる。

ここで、同じ相対密ごとに図-4 と図-6 で比較してみると、同じ砂高において乾燥砂のほうが若干側圧が大きくなっている。

写真 1, 写真 2 は可視化画像の一例として $H=20\text{cm}$ の相対密度の異なる ($Dr=50\%$, $Dr=80\%$) 乾燥砂の押し抜き試験の様子を示したものである。ここで、初期状態とは砂杭を押し抜く直前の状態を表わす。降伏点とは図-3 (a) (b) で押し抜き力がピーク、および定常状態になったときと定め(図中に×で示す)、また降伏後の押し抜き力の一例として図中に◎で示した。まず砂杭を押し抜く際、降伏点に達すると色砂の挙動が変わり始めることが確認できる。そしてパイプ下段の層ほど間隔が狭くなっており、密になっていることもわかる。また降伏後、パイプ壁面の砂は壁面との摩擦によって初期状態の位置をほぼ保っているのに対して、砂杭中央部は層の形を変えずに押し抜かれている。

写真 3, 写真 4 は $H=30\text{cm}$ の相対密度の異なる ($Dr=50\%$, $Dr=80\%$) 乾燥砂の押し抜き試験の様子を示している。初期状態、降伏点の定義



は写真1, 写真2と同じである。砂杭がパイプ内で閉塞した状態にあるので砂杭は押し抜かれず、どの層にも砂の動きが見られない。以上のことは、試料を湿潤砂に変えても同様なことがいえ、閉塞したものと閉塞しない砂杭で押し抜き時の砂の挙動は異なった。

図-7は写真1~写真4の降伏点におけるパイプ内の砂の密度変化を調べるため、各層の砂高の変化量を示したものである。ここでは、パイプ中の各砂層の左端、中央、右端の3点で初期状態から変化量を測り、その平均をとったものを砂高の変化量と定義する。

図-7(a)でDr=50%, Dr=80%ともにほぼ1段目か3段目まで砂高変化がマイナスとなり、これらの層は密になる傾向が現れた。また4段目以降の層は砂高変化がプラスとなり、これらの層は緩くなったことがわかる。このことから砂杭を押し抜くと砂杭先端から密にな

ってゆくことが明らかとなった。

図-7(b)から、砂杭は閉塞すると密度変化が生じないことがわかる。これらのことは試料を湿潤砂に変えても同様なことがいえる。

図-8は図-3の投入砂高と押し抜き力を管径Dで正規化したもので、単位面積当りの押し抜き力とH/Dの関係を示している。また、円型パイプのデータは以前行った実験から得たものである⁶⁾。

図-8(a)はDr=50%を示している。円型パイプはH/Dが約1.8で、可視化パイプはH/Dが約1.0で単位面積当りの押し抜き力が急激に増加していることがみられる。

図-8(b)はDr=80%を示しており、図-8(a)と同様、円型パイプはH/Dが約1.8で、可視化パイプはH/Dが約1.0で単位面積当りの押し抜き力が急激に増加している。これらはケーシングパイプ貫入によりパイプ内の砂が閉塞したためと考えられる。

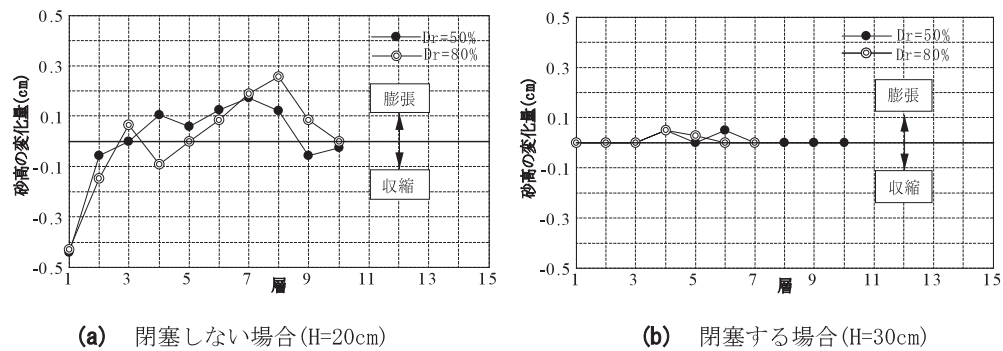


図-7 砂段と砂高変化の関係 (乾燥砂)

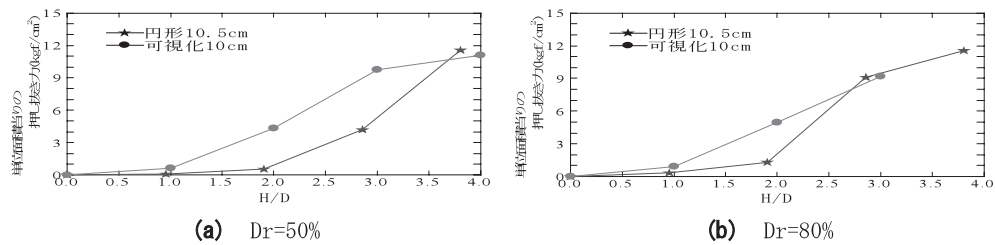


図-8 単位面積当りの押し抜き力と H/D の関係 (乾燥砂)

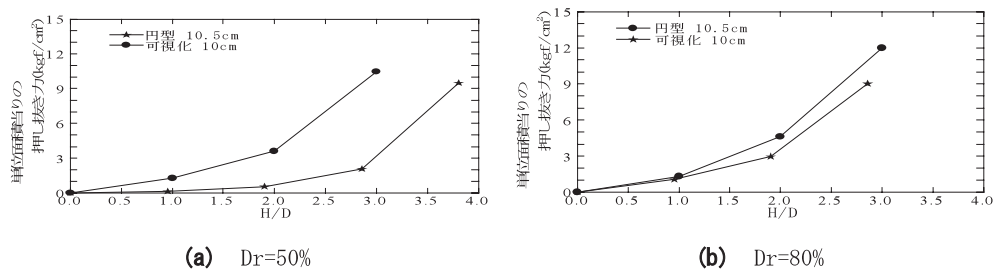


図-9 単位面積当りの押し抜き力と H/D の関係 (湿潤砂)

図-9 は図-5 の投入砂高と押し抜き力を管径 D で正規化したもので、単位面積当りの押し抜き力と H/D の関係を示している。また、円型パイプのデータは以前行った実験から得たものである⁶⁾。

図-9(a) は $Dr=50\%$ を示している。円型パイプは H/D が約 2.8 で、可視化パイプは H/D が約 2.0 で単位面積当りの押し抜き力が急激に増加していることがわかる。

図-9(b) は $Dr=80\%$ を示しており、円型パイプは H/D が約 1.8 で、可視化パイプは H/D が約 1.0 で単位面積当りの押し抜き力が急激に増加している。

図-9(a)(b) より、相対密度が大きくなるに

つれ、単位面積当りの押し抜き力の挙動が変わりはじめる H/D 値が小さくなっていることがわかる。このことから相対密度が大きくなると閉塞が早くなることがわかる。

図-8 と図-9 で比較してみると、同じ相対密度において、若干、湿潤砂の方が単位面積当りの押し抜き力が小さくなっている。また、可視化パイプを用いた方が、円型パイプを用いた時より単位面積当りの押し抜き力が小さくなる傾向を示した。

図-10 に乾燥砂におけるパイプ壁面の側圧分布を示す。

図-10(a) から、同じ相対密度において投入砂高が高い方が側圧は大きくなっており、ま

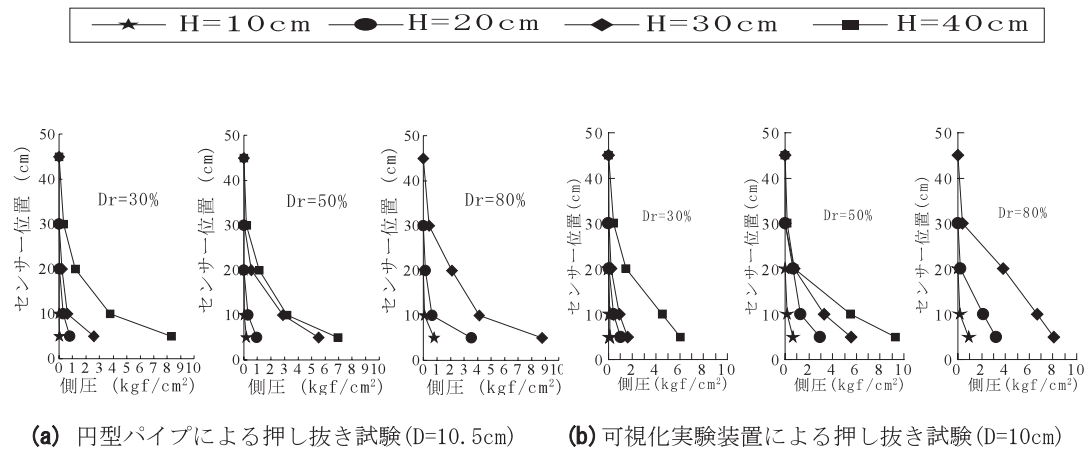


図-10 パイプ壁面の側圧分布 (乾燥砂)

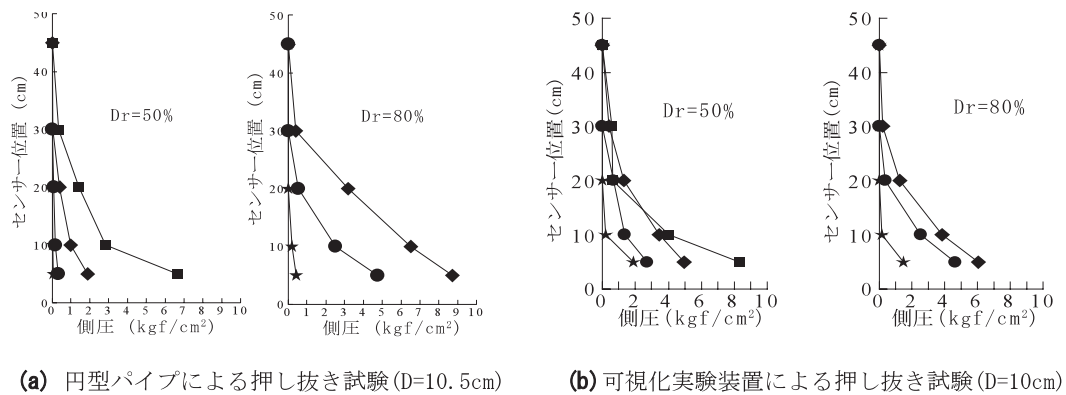


図-11 パイプ壁面の側圧分布 (湿潤砂)

た、相対密度 Dr が大きくなるにつれ同じ投入砂高においても側圧は大きくなる。センサー位置が低いほど側圧が大きくなることも明らかである。

図-10 (b) においても同様な傾向が見られた。

図-10 (a) (b) で比較してみると、可視化実験装置を用いた方が若干、円型パイプを使用した場合よりも側圧が小さくなっているが、側圧分布の傾向は似ていることがわかる。

図-11 に湿潤砂におけるパイプ壁面の側圧分布を示す。

図-11 (a) から、同じ相対密度において投入砂高が高くなるにつれ、側圧は大きくなっており、また、相対密度が大きくなると、同じ投入砂高において側圧は大きくなることわかる。センサー位置が低いほど側圧は大きく

なることも明らかである。

図-11 (b) においてもほぼ同様な傾向が見られたが、50%の側圧分布は予想していた傾向と少し異なるものとなった。

図-11 (a) (b) で比較してみると、全体的に可視化実験装置を用いた方が、円型パイプを使用した場合よりも側圧が小さくなっていることがわかるが、側圧分布の傾向は似ている。

ここで、図-10 と図-11 で同じ条件において比較してみると、湿潤砂を用いた図-11 のほうが若干、側圧は小さくなっていることがわかる。これは押し抜き力の場合と同様、一面せん断試験の結果より、砂の内部摩擦角 ϕ 、パイプ壁面との摩擦角 δ とともに、乾燥砂より湿潤砂の方が小さいからであると考えられる。

4. 実験結果と考察

可視化装置を用いた押し抜き試験の実験結果から以下の結果が得られた。

- 1) パイプ貫入の際、乾燥砂、湿潤砂において投入砂高Hが高く、相対密度Drが大きくなるほど大きい押し抜き力が必要となる。同様の条件下において、側圧でも同じことがいえる。このことから、押し抜き力と側圧には相関関係があると伺える。
- 2) 砂杭を押し抜く際、パイプ内の砂が閉塞しない場合は降伏点に達すると砂の挙動に変化が見られ始める。一方閉塞する砂杭は、どの層にも砂の挙動が見られない。また閉塞しない場合はパイプ下端の層から密になる傾向が見られる。一方、閉塞する場合はどの層においても密度に変化は見られない。
- 3) 円型パイプ、可視化パイプともに単位面積当たりの押し抜き力にあまり変化は見られなかった。また正規化することにより、相対密度が高くなるにつれて早く閉塞が生じることを形式的に表わすことができた。
- 4) パイプ内の側圧は、相対密度が大きく投入砂高が高いほど大きくなり、パイプ下端に行くにつれ大きくなる。また、乾燥砂と湿潤砂で比較すると、湿潤砂の方が側圧が小さくなっている事が分かる。円型パイプ、可視化パイプの側圧分布はともに似た傾向を示し、円筒の応力分布と、矩形の応力分布の違いはあまり見られなかった。

5. 参考文献

- 1) 大内光徳，中西和夫，兵動正幸：軟弱地盤におけるサンドコンパクション工法の施工上の問題点，土質工学セミナー報告会資料，1997
- 2) 石原研而，安田 進，原田健二，新川直利：兵庫県南部地震により液状化した地盤の沈下量と改良工法の関係；土木学会第50回年次学術講演会概集Ⅲ-760, 1995.
- 3) 榎 明潔：軟弱地盤中における砂杭の造成機構に関する研究，京都大学学位請求論文，pp36-59, 1982.
- 4) 駒田敬一，大志万和也，森山清治：開端鋼管くいの先端閉塞効果について（第1報），第10回土質工学研究発表会，pp497-500, 1973
- 5) 西田義親，太田秀樹，松本樹典，栗原勝美：開端杭の内周面摩擦による支持力，土木学会論文第364号/Ⅲ-4, pp. 219-227, 1985
- 6) 佐伯晴香，上 俊二，大内光徳，藤原東雄：SCP工法における砂杭の閉塞メカニズムに関する研究，徳山工業高等専門学校研究紀要第25号，pp43-50, 2001
(2002. 9. 5 受理)