

# 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3)

伊東 圭一\*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 (Part3)

Keiichi ITO, Shunji UE, Mitsunori OUCHI and Haruo FUJIWARA

### Abstract

CP(Sand Compaction Pile)method is a method of improving the soft ground by building dense sand pile and this method has spread wide globally. When casing pipes are put in the soft ground, the sand in the pipes prevent a soft soil by the plugging effect. On the other hand, when the sand is exhausted, it is necessary to solve the plugging effect. This is the most important subject for the construction process of sand pile. In order to clear the mechanism of the plugging effect of the sand in casing pipe, push-out tests were carried by using the visibilitization equipment which installs friction board in the both-sides. In the result, by the change of the friction of the wall surface, it is clear that there is a different the plugging effect.

**Key Words:**sand compacion pile method, casing pipe, plugging effect, friction board

### 1. まえがき

サンドコンパクションパイル(SCP)工法とは軟弱地盤中によく締まった砂杭を造成することにより地盤を改良する工法で、世界的に、陸上だけでなく、海上においても広く普及しており(写真-1)、日本においても戦後の土質工学のめざましい発展や高度の経済成長に支えられて急速に普及してきた。この工法が普及してきた背景には、東京を基点とした名古屋-阪神-瀬戸内海-大分の沿岸部を埋め立てた臨界工業地域建設計画によるものと、周辺に安価で良質な天然試料(砂)が採れたことにある。この建設計画の当初は、SCP工法よりも排水を目的とするサンドドレーン工法の方が広く普及していたが、地盤が所定の強度になるまで時間がかかること、管理が大変難しいことなどを理由に、施工後、すぐに構造物の立てることのできるSCP工法に移ってきた。その後、構造物の大型化により、さらに強度の高い地盤が要求されるようになり、最終的には、ほとんどの軟弱地盤を砂で置き換えるという状況に変わっていった。しかし、社会の環境問題への関心が強くなり品質を管理することが難しくなった。現在、SCP工法が残した多くの実績が社会に受け入れられ、SCP工法をベースとした新しい地盤改良工法が考えられている。

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た後、パイプ上部からエアーを負荷させながら砂を排出させてゆく方法がとられている<sup>1)</sup>。この砂杭造

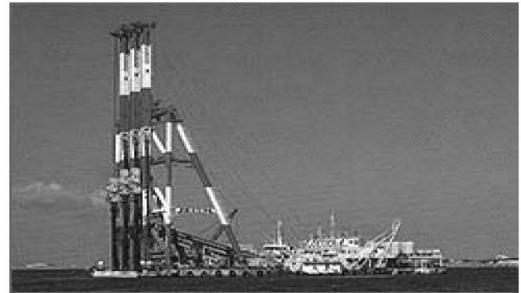


写真-1 SCP 船

成において、ケーシングパイプを貫入する際に軟弱地盤の侵入を防ぐために砂を閉塞させる必要がある。しかし、この砂を地盤中に排出する際には、閉塞させたことにより効率よく排出が行われない。このことが砂杭の造成過程における最も重要な課題とされている。

そこで、昨年、パイプ内の砂の動きを観察するため可視化実験が行われた。それによって、パイプ内の砂を押し上げられる際に、パイプ壁面に摩擦が生じていることが明らかとなった。その結果をもとに、本研究では、壁面の摩擦係数を変えることにより、壁面での砂の動きを見えやすくすると共に、摩擦の発生がパイプ内の砂に与える影響を3種類の材質を用いて比較をし、砂の閉塞メカニズムを明らかに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)

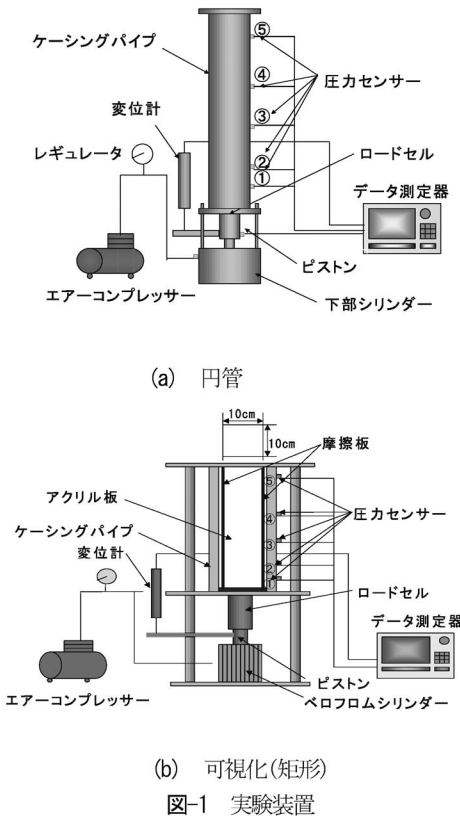


表-1 豊浦珪砂の物理的性質

土粒子の比重	2.663
最大空隙比 $e_{max}$	0.961
最小空隙比 $e_{min}$	0.590
最大粒径 $D_{max}(mm)$	0.900
均等係数 $U_c$	2.294
曲率係数 $U_c'$	1.268

表-2 実験条件

	管径 D(cm)	壁面の 材質	相対密度 Dr (%)	密度 $\rho_s (g/cm^3)$	投入砂高 H(cm)
円管	10.5	鋼板(鋳鉄)	30%	1.470	10~40
矩形	10×10	鋼板(鋳鉄)	50%	1.524	
		摩擦板 P320	80%	1.611	

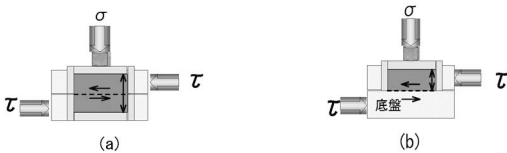


図-2 一面せん断試験箱

## 2. 実験概要

### 2.1 実験装置と試料

図-1 に実験装置の概要図を示す。図-1(a)は、実際に現場で用いられているパイプを縮小した円管である。図-1(b)は正方形断面で、ケーシングパイプの側面に鋼板と2種類の摩擦板 P320, P180 を取り付けた。ここで P320 と P180 という値は摩擦板の粗さを表し、値が低いほど粗い摩擦板である。そして、前面と後面にアクリル板が取り付けられており、アクリル面より砂のパイプ内での挙動を可視化することができる。図-1(a)の周面摩擦と図-1(b)の側面の周面摩擦とは相関性を持たせるために等しくなるように考慮されている。実験において、実際にケーシングパイプを貫入させることは難しい。そこで本研究では、ケーシングパイプを固定し、ベロフロムシリンダーにエアコンプレッサーで下部から圧力を負荷し、砂杭を押し上げる方法をとった(押し抜き試験)。そして、ピストンにかかる荷重をロードセルで、ピストンの変位を変位計で測定し、データ測定器で収録を行った。また、ケーシングパイプ壁面の側圧を調べるため、側面には5つの圧力センサーを取り付けた。圧力センサーはパイプ下端より、5cm, 10cm, 20cm, 30cm, 45cmの位置にあり、下端から側圧1~5とし、図-1 に示している。試料として豊浦標準砂を用い、物理的性質については、表-1 に示す。

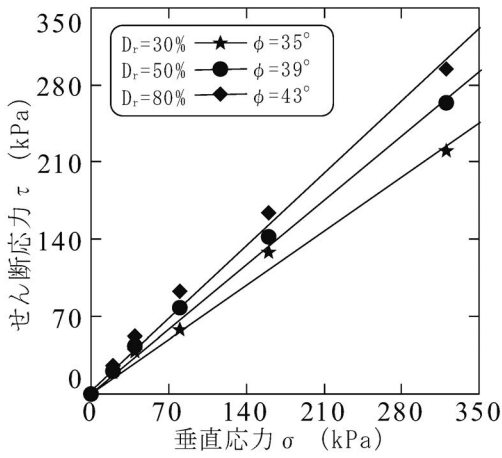
### 2.2 一面せん断試験

砂の内部摩擦角  $\phi$  を求めるために図-2(a) に示すせん断箱を用いた。また、砂と鋼板、摩擦板 P320, P180 の3種類の摩擦角  $\delta$  を調べるため、図-2(b) に示すせん断箱を用い、底盤をそれぞれの材質に変え、実験を行った。実験条件は供試体高さ 1cm、鉛直応力  $\sigma$  を 40~320kPa に変化させ、相対密度  $Dr=30, 50, 80\%$  の乾燥砂を用いた。

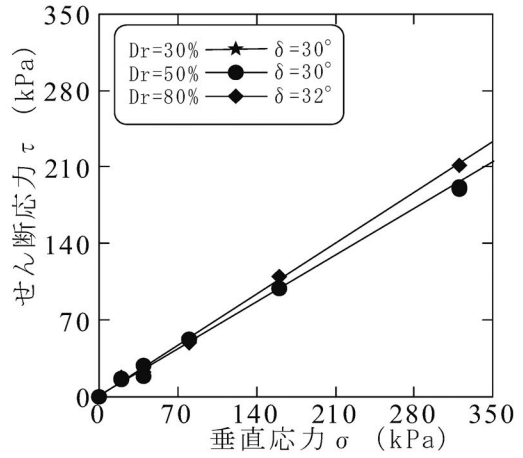
### 2.3 円管と可視化装置による押し抜き試験

実験条件は表-2 に示す。ケーシングパイプ貫入による砂の挙動を可視化するために砂の相対密度  $Dr$ 、投入砂高  $H$  を変え、押し抜き試験を行った。実験方法は以下の通りである。

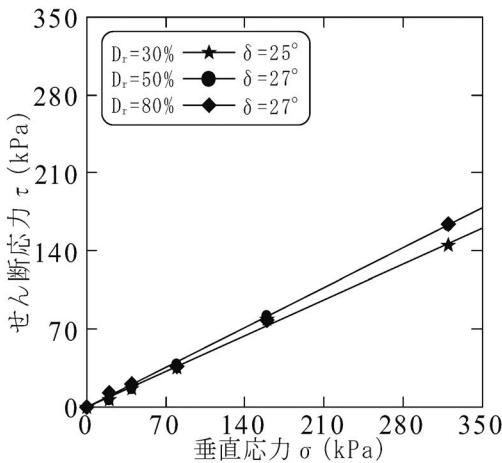
- 1) 所定の砂の相対密度で砂高分の試料を計る。
- 2) パイプ内に砂高 2cm ずつ砂を投入し、その度に色砂を敷く。また、所定の高さになるように締め固める。
- 3) 砂杭表面は平らにする。
- 4) 下部シリンダーからエアーを負荷させピストンを 20mm/sec の速度で上昇させ、砂杭を押し抜く。
- 5) 押し抜き時にかかる荷重とパイプ壁面の側圧と変位を測定する。可視化実験の場合は、同時にその様子をデジタルカメラで撮影する。



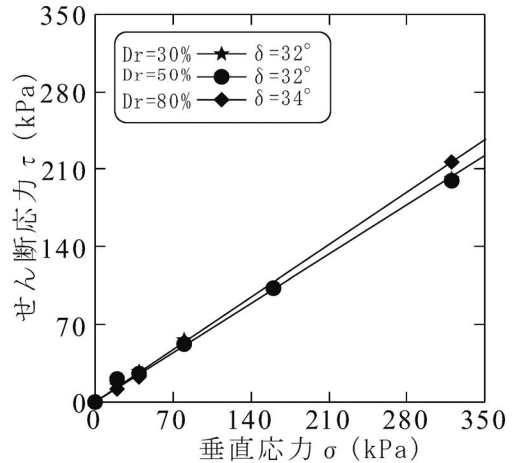
(a) 砂の内部摩擦角



(c) 砂と摩擦板P320



(b) 砂と鋼板



(d) 砂と摩擦板P180

図-3 一面せん断試験結果

表-3 摩擦係数 f

	Dr=30%	Dr=50%	Dr=80%
砂と砂	0.700	0.810	0.933
鋼板と砂	0.466	0.510	0.510
摩擦板P320と砂	0.577	0.577	0.625
摩擦板P180と砂	0.625	0.625	0.675

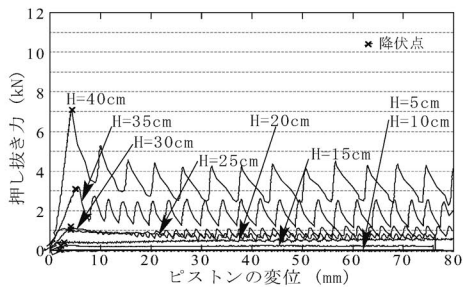
### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 一面せん断試験

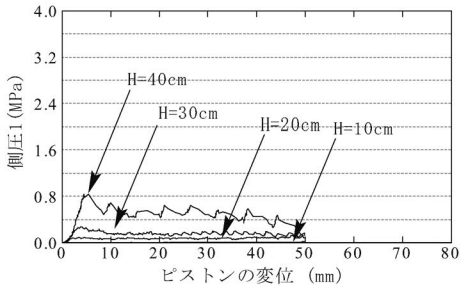
図-3は、一面せん断試験によって得られた垂直応力 $\sigma$ とせん断応力 $\tau$ との関係を示している。図-3のいずれにおいても相対密度 $D_r$ が大きくなるにつれて、砂の内部摩擦角 $\phi$ と摩擦角 $\delta$ が大きくなるという結果が得られた。図-3(b)(c)(d)より同じ相対密度 $D_r$ においては摩擦が大きくなるにつれて摩擦角 $\delta$ は大きくなっている。また、

砂の内部摩擦角 $\phi$ と摩擦角 $\delta$ を比較すると、いずれも摩擦角 $\delta$ よりも砂の内部摩擦角 $\phi$ が大きくなっていることがわかる。以上のことより、相対密度 $D_r$ が大きくなることですべりが生じにくくなり、壁面摩擦においては、壁面での摩擦が大きくなることですべりが生じにくくなるということが明らかとなった。また、すべり面は砂間よりも壁面上で大きく生じていることがわかる。

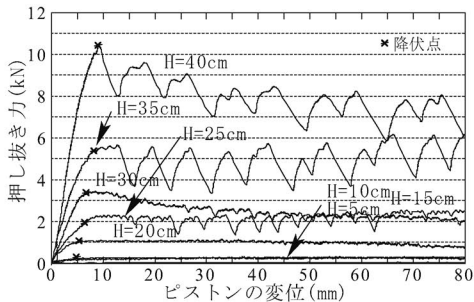
この試験によって得られた摩擦係数 $f = \tan \phi$ 、または、 $\tan \delta$ を表-3に表す。



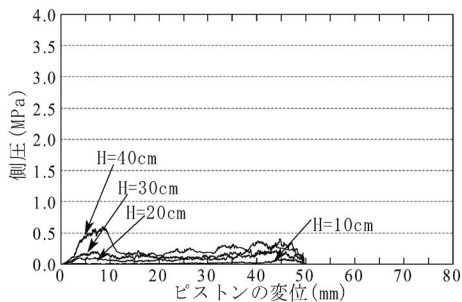
(a) 円管



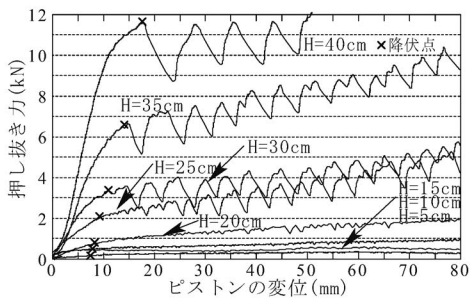
(a) 円管



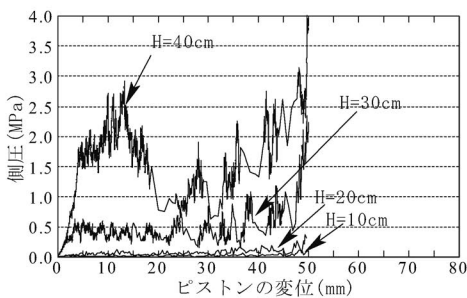
(b) 矩形(鋼板)



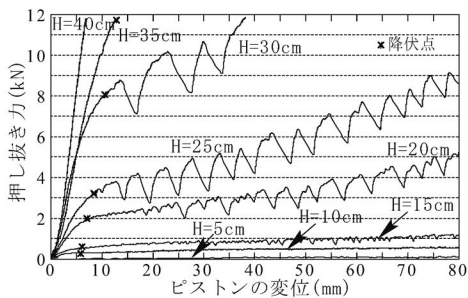
(b) 矩形(鋼板)



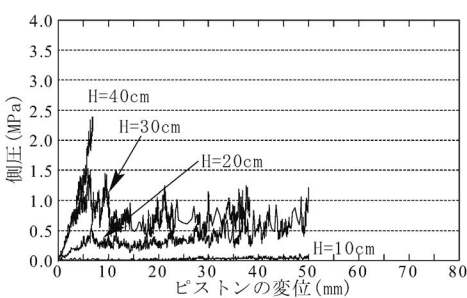
(c) 矩形(摩擦板 P320)



(c) 矩形(摩擦板 P320)



(d) 矩形(摩擦板 P180)



(d) 矩形(摩擦板 P180)

図-4 ピストンの変位と押し抜き力の関係 ( $D_r=30\%$ )

図-5 ピストンの変位と側圧 1 の関係 ( $D_r=30\%$ )

### 3.2 可視化装置, 円管を用いた押し抜き試験

図-4 は押し抜き試験の一例として, 相対密度  $D_r=30\%$  におけるピストンの変位と押し抜き力の関係を示したものである。押し抜き力が最大(ピーク)になる所を降伏

点と定め, 図中に×で表す。図-4 のいずれにおいても砂高  $H$  が低い場合は弱い力で押し上げられてしまうため, 押し抜き力が小さく, ピークがみられない。これは, 砂高  $H$  が低いために壁面と砂の摩擦が少ないためである。しかし, 砂高  $H$  が高くなると壁面と砂の摩擦が大きくな

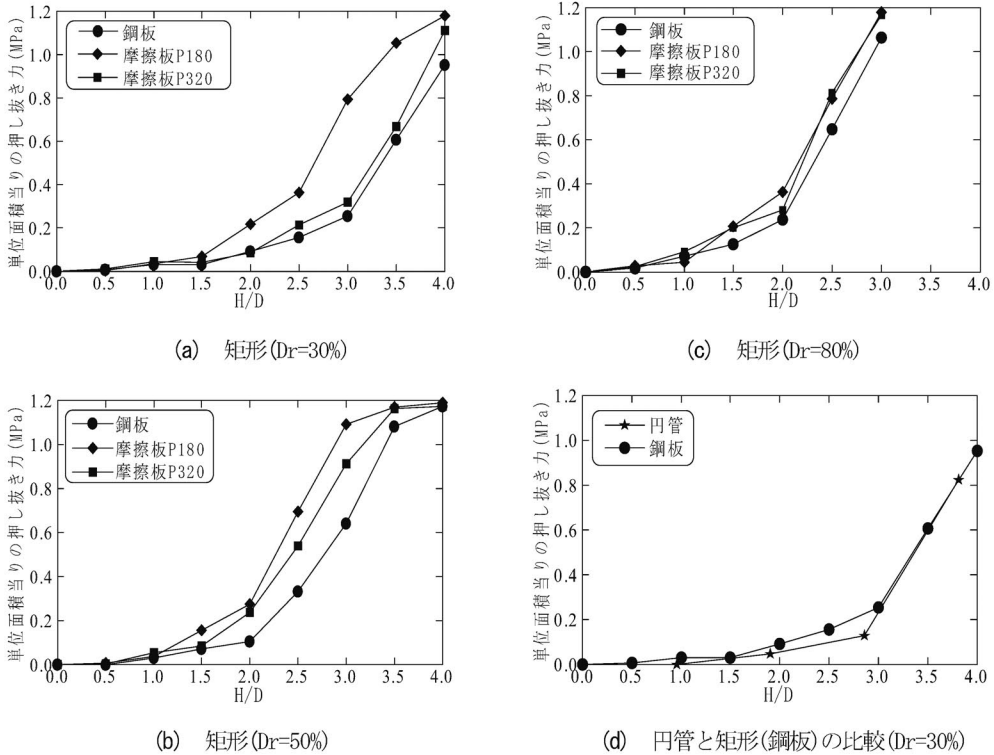


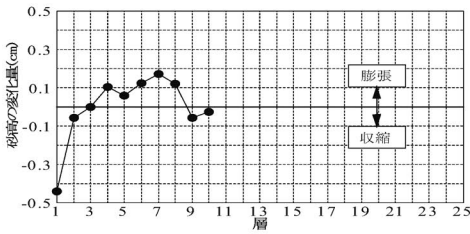
図-6 H/Dと単位面積当りの押し抜き力の関係

り、押し抜き力が急激に上昇し、ピークもみられるようになる。また、図-4(a), (b)においては、H=35cmのあたりからはっきりとしたピークが現れ、閉塞の傾向が見られる。図-4(c)では、H=30cmのあたりから、閉塞の傾向が伺える。また、図-4(d)にあたっては、H=25cmのあたりから、閉塞の傾向が見られる。以上のことから、壁面の摩擦が大きければ低い砂高Hで閉塞効果を得ることができる。また、図-4(a), (b), (c), (d)において、同じ砂高Hで押し抜き力を比較してみると、摩擦係数の大きい材質を取り付けたパイプの方が砂を押し抜くために大きな押し抜き力を必要としていることがわかる。相対密度Dr=50, 80%においても、同じ傾向を得ることができた。

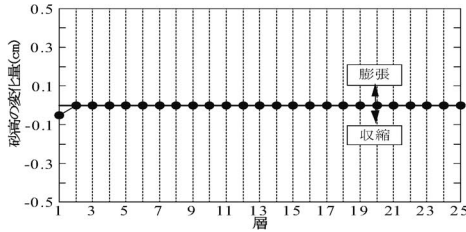
図-5は、ピストンの変位と側圧1の関係を表した図である。これは、図-4と同じ実験で得られたデータである。側圧においては投入砂高Hを10cmから40cmまでの10cm間隔となっている。どの図においても、砂高Hが高くなるにつれて側圧は大きくなっている。また、図-4において、押し抜き力がピークを示す変位量で側圧も大きくなっており、押し抜き力と同様に摩擦が大きい材質になるにつれて側圧は大きくなっている。このことから、パイプ内の砂は軸方向から加わる力により鉛直方向に進もうとするが、壁面摩擦の抵抗により砂がスムーズに押し上げ

られない。そのため、押し抜き力は大きくなり、摩擦の影響により定位置を保とうとする壁面の側圧も大きくなる。このことから、押し抜き力と側圧には相関関係があることがいえる。

図-6は、それぞれの実験における、砂高Hを管径Dで除した比(H/D)と、押し抜き力を管径の断面積で除した単位面積当りの押し抜き力の関係を示している。まず、図-6(a)では、H/Dが1.5以下の場合では3本の曲線がほぼ重なっており摩擦の影響はあまりみられない。しかし、H/Dが1.5以上になると、それぞれの曲線が独立し始め、このあたりから砂杭に壁面の摩擦が影響し始めると考えられる。また、図-4に示したとおり、閉塞の傾向を伺いはじめるあたりから単位面積当りの押し抜き力が急激に増加しはじめていることがわかる。次に、図-6(b)では、H/Dが1.0のあたりから、曲線が独立し始め、図-6(c)では、H/Dが0.5のあたりから、曲線が独立し始める。これは、相対密度が大きくなるにつれて、パイプ内の砂杭が低い砂高で閉塞の傾向を生じはじめていることがわかる。また、図-6(a), (b), (c)を、同じH/Dで比較してみると、いずれも壁面の摩擦が大きいほど単位面積当りの押し抜き力は大きくなっている。また、図-6(d)において、円管と同じ材質の鋼板との場合を比較してみると、両者とも



(a) 閉塞しない場合 (H=20cm)



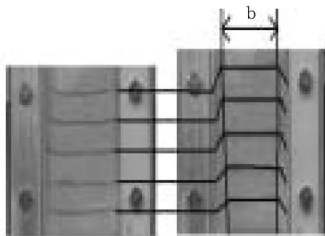
(b) 閉塞する場合 (H=40cm)

図-7 砂段と砂高変化の関係  
(摩擦板 P180,  $D_r=30\%$ )

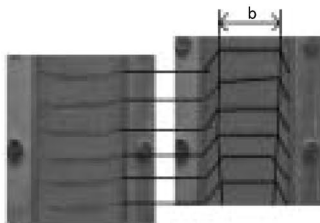
H/D が 2 のあたりから急激に押し抜き力が増加しはじめ、同じような変化を表している。曲線もほぼ一致しており、単位面積当りの押し抜き力もほぼ等しくなっていることがわかる。

図-7 は図-4 に示すような押し抜き力の降伏点においてパイプ内の砂の密度変化を調べるため、各層と砂高の変化量の関係を示したものである。紙面上、ここでは  $D_r=30\%$  時の摩擦板 P180、閉塞しない砂高として  $H=20\text{cm}$ 、閉塞しない砂高として  $H=40\text{cm}$  を取り上げることにする。また砂高の変化量とは、パイプ中の各砂層の左端、中央、右端の 3 点で押し抜く前の状態からの変化量を測り、その平均をとったものとする。図-7(a) で、1 層目から 3 層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あらわれた。また 4 層目以降の層は砂高変化がプラスとなり膨張の傾向はあらわれた。このことから砂杭は押し抜く際は、パイプ先端から密になっていくことがわかった。図-7(b) から、砂杭は閉塞しているのでわずかな変位しか得られず、密度変化を生じるのは 1 層目だけである。

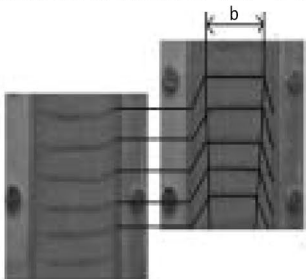
写真-2 はそれぞれ、図-4、図-5 に示した砂高  $H=20\text{cm}$ 、相対密度  $D_r=30\%$  の可視化実験装置による押し抜き実験の様子をデジタルカメラで撮影した様子である。パイプ内の砂が、壁面摩擦の影響によって、どのような動きを示すのかを調べるために、写真-2(a)、(b)、(c) それぞれの場合の色砂の動きを比較する。写真-2 のいずれにおいても、左側の写真は、エアにより、押し抜き力を载荷する前、右側の写真は、押し抜き力の降伏点、つまり、ピーク時の様子である。写真-2 のいずれにおいても押し抜き力が载荷された後では中央部が押し上げられていることがわかる。しかし、パイプ壁面部分の砂はもとの定位置を保とうとしている。写真-2 において押し抜き力のピーク時での写真を比較すると、壁面の摩擦が大きいほど、定位置を保とうとする砂の量が多く、その力が強いことがわかる。また、写真-2 より、押し上げられている中央部の砂杭の幅を  $b$  と表すと、壁面の摩擦が大きいほど、押し上げられている砂杭の幅  $b$  が狭いことがわかる。ここで、これは、押し上げる際に生じる、壁面にかかる水平方向の力の反力であり、摩擦が大きいほど大きくなっていることがわかる。特に砂層の下層部ではさらに中央部の幅  $b$  が狭くなっている。さらに、下層部においては、幅  $b$  だけでなく、色砂の間隔も狭くなっている。これは、押し上げられる際、パイプ内の砂杭では密度変化が生じているといえる。そのため、図-5 のいずれにおいても、低いセンサー位置での側圧のほうが、高い位置での側圧より大きいことがわかる。



(a) 鋼板 (相対密度  $D_r=30\%$  砂高  $H=20\text{cm}$ )



(b) 摩擦板 P320 (相対密度  $D_r=30\%$  砂高  $H=20\text{cm}$ )



(c) 摩擦板 P180 (相対密度  $D_r=30\%$  砂高  $H=20\text{cm}$ )

写真-2 砂杭の可視化

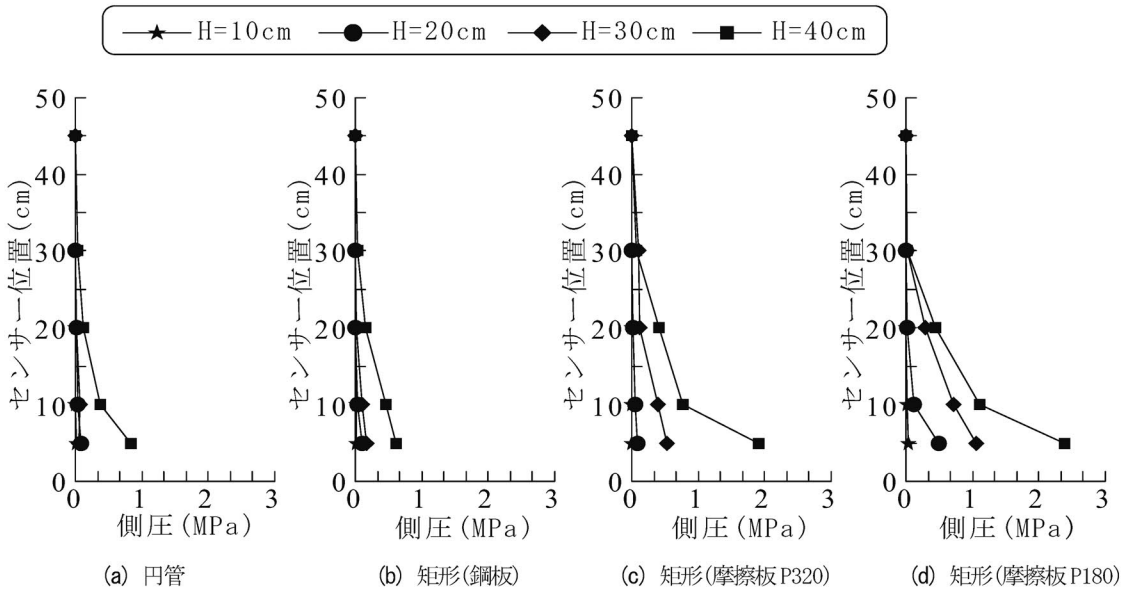


図-8 パイプ壁面の側圧分布

図-8 に  $D_r=30\%$ におけるパイプ壁面の側圧分布をあらわす。ここでの側圧とは、図-4 においての降伏点に達した時の変位を基準とし、得られた値のことである。まず、図-8 のいずれにおいても、砂高  $H$  が高いほど側圧は大きくなっており、同じ砂高  $H$  においてはセンサー位置が低いほど側圧は大きくなっていることがわかる。このことは、これまで記してきた結果と同じく、同じ砂高  $H$  に対しての側圧は、壁面の摩擦が大きいほど強くなっていると考えられる。これらのことは、相対密度  $D_r=50, 80\%$ でも同じ傾向を示している。図-8 (a), (b) の側圧分布を比較すると、分布図の傾向はよく似ており、値もほぼ等しいことがわかる。ゆえに、図-6 (d)、図-8 (a), (b) より円管と矩形(鋼板)では、パイプの形状が変化したにもかかわらず、相関関係がみられ、応力状態の変化はほとんどないことが考えられる。

#### 4. 結論

一面せん断試験、円管・可視化実験装置を用いた押し抜き試験の実験から次のような結果が得られた。

1) 一面せん断試験の結果より、砂の内部摩擦角  $\phi$  と摩擦角  $\delta$  を比較するといずれも砂の内部摩擦角  $\phi$  の方が大きくなった。また、同じ相対密度  $D_r$  において、摩擦が大きくなるにつれて大きな摩擦角  $\delta$  を得ることができた。以上の結果より、すべり面は砂間よりもパイプ壁面で生じている。すべりが生じにくくなる条件は、壁面の摩擦が大きくなることと、同摩擦においては、相対密度  $D_r$  が大きい時である。

- 2) 押し抜き試験において、砂杭は相対密度  $D_r$  が大きいほど閉塞の傾向が早くみえてくる。すべての押し抜き試験において、砂高  $H$  が高いほど押し抜き力は大きくなり、同じ砂高  $H$  で比較すると壁面摩擦が大きいほど大きな押し抜き力を必要とする。
- 3) 同試験での側圧については、押し抜き力と同様に砂高  $H$  が高くなれば、側圧も大きくなり、同じ砂高  $H$  で比較すると、壁面摩擦が大きいほど側圧が大きくなっている。また、砂杭の下層部分で密度変化が生じているため、パイプ先端の方が側圧は大きくなる。
- 4) パイプ内の側圧は押し抜き力と相関関係があり、押し抜き力の降伏点(ピーク)で側圧も大きくなっている。
- 5) 砂杭を押し抜く際、パイプ内の砂層は、パイプ壁面では定位置を保とうとしているが、中央部の砂層は押し上げられている。定位置を保とうとする力は壁面摩擦が大きいほど強く、その力は砂層の中央部にまで及ぶ。また、砂杭は、押し抜かれる際、下層部から密度変化が生じていく。
- 6) 単位面積当りの押し抜き力は同じ相対密度において、低い砂高  $H$  までは摩擦の大小に関わらず等しくなる。同じ  $H/D$  において比較すると、壁面摩擦が大きいほど単位面積当りの押し抜き力は大きくなる。
- 7) 実験装置において形状が円管から矩形(鋼板)に変わったが、 $H/D$  と単位面積当りの押し抜き力の関係、側圧分布の結果より相関関係が同え、応力状態の変化はほとんどみられない。

## 5. 参考文献

- 1) 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.
- 2) 大内光徳，中西和夫，兵頭正幸：軟弱地盤におけるサンドコンパクションパイル工法の施工上の問題点，土質工学セミナー報告会，1997.
- 3) 大内光徳，上 俊二，有井康洋，藤原東雄：SCP 工法におけるケーシングパイプ内の砂の閉塞効果に関する研究，徳山工業高等専門学校研究紀要第 24 号，pp21-28, 2000.
- 4) 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造成メカニズムに関する研究(その 2)，徳山工業高等専門学校研究紀要第 26 号，pp67-74, 2002.

(2003. 9. 5 受理)