

機械攪拌と真空吸水を併用した砂の締固めに関する基礎実験

五洋建設(株) 正○新舎 博 正 海野寿康
 日本大学 正 仙頭紀明

1. はじめに

液状化対策として、ゆるい砂を締め固めるためには砂の骨格構造を破壊する必要がある、構造破壊時に真空吸水すると、締固め効果を増加させることが可能である¹⁾。砂の構造を破壊する方法としては地盤内で攪拌翼を回転させる機械攪拌が考えられ、深層混合処理工法は機械攪拌の一種であると考えられる。この工法は攪拌翼を取り付けたロッドを地盤内に挿入し、攪拌翼近辺のロッド部分からセメントスラリーを噴出させ、攪拌翼を回転させて、土とセメントスラリーを混合するものである。本研究では、セメントスラリーの噴出の代わりに、攪拌翼の部分から真空吸水することで、砂の締固め効果を把握した。

2. 砂の締固め実験

2.1 実験用の砂

実験に用いた砂は珪砂 5 号であり、土粒子密度 ρ_s は 2.645g/cm^3 、砂分は 98%、最大間隙比 $e_{\max}$ が 0.799、最小間隙比 $e_{\min}$ が 0.474、相対密度 D_r が 70%における透水係数 k は $5.32 \times 10^{-4}\text{m/s}$ である。

2.2 実験方法

実験装置を図 1 に示す。実験には攪拌棒の回転・昇降装置を用いた。回転速度 R は 0～50 回/min および引き抜き速度 V は 0～4 m/min の範囲で調整可能である。真空吸水装置は真空ポンプと排水タンクなどからなり、真空ポンプ、排水ホース、挿入・引き上げ芯棒（中空）、攪拌棒（中空）を通じて砂層に負圧を作用させ、あわせて吸水できる構造である。

実験では直径 30cm×高さ 1m の円筒容器を用いた。実験手順は次のとおりである。容器の底部から 5cm 上に攪拌棒をセットした。水中落下方式で、相対密度が $D_r = 50 \sim 60\%$ になる砂層を層厚 $H_0 = 80\text{cm}$ で作製した。砂層の上部に、厚さ 10cm の粘土層（海成粘土、 $k = 10^{-9}\text{m/s}$ 以下）を置き、負圧シール層とした。真空吸水なしの状態では、攪拌翼を所定の回転数 R まで回転させた。回転数が一定になった 1 分後に真空吸水しながら、攪拌翼を所定の引き抜き速度 V で引き上げた。

攪拌翼が砂層の上部に達すると、実験を終了した。

攪拌棒には穴の開いたステンレス棒を用いた。開口率（＝穴の面積×100/棒の表面積）は 35.8%であり、攪拌棒を水槽内に入れて -60kN/m^2 の負圧を作用させた際の吸引水量は約 25l/min であった。攪拌棒には、砂が入らないように、不織布土木シート（TWINGUARD, TS-210）をフィルターとして 3 重で巻き付けた。実験後にフィルターを観察すると、砂が張り付いた形跡はなく、吸水能力は十分であったと考えられる。

2.3 実験条件

締固め効果に関しては、深層混合処理工法で採用している羽切り回数 T を考慮した。 T は(1)式で表され、砂の構造破壊を表す指標になると考えられる。

$$T = M \times (R/V) \quad (1)$$

ここに、 M ：攪拌棒の個数、 R ：回転速度(回/min)、 V ：引き抜き速度(m/min)である。

実験条件を表 1 に示す。実験は羽切り回数 T を 4 条件とし、同じ T でも、引き抜き速度 V と回転数 R を変化させたもの（ケース 3 とケース 4）と、負圧作用の有無のケース（ケース 5 とケース 6）を実施した。計測項目は砂層上面での沈下と、真空ポンプ室（元圧）および底面から 30cm 高の土槽容器周面で測定した間隙水圧である。

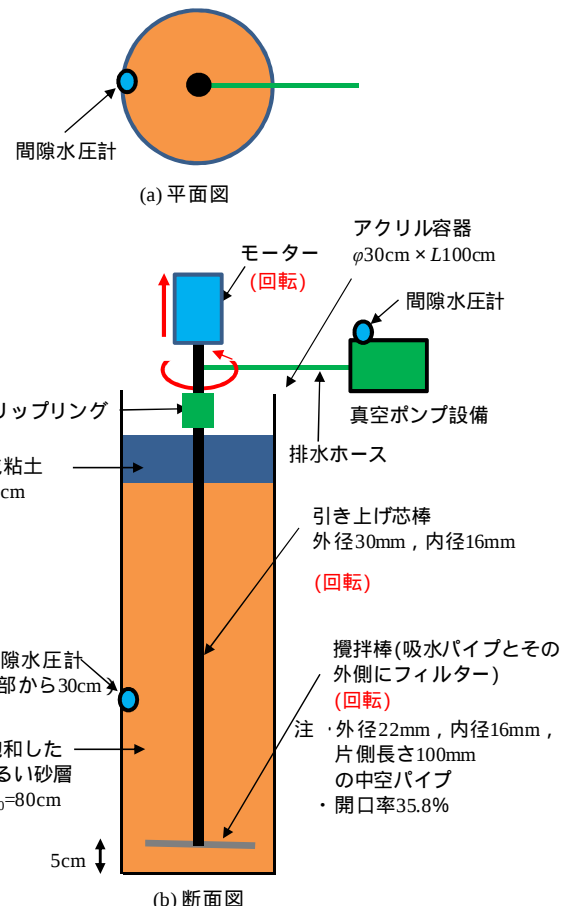


図 1 実験装置

表 1 実験条件

	羽切り回数	攪拌棒本数	引き抜き速度	回転数	負圧の有無
	T (回/m)	M	V (m/min)	R (回/min)	
ケース1	20	2	0.6	6	負圧有り
ケース2	50	2	0.6	15	負圧有り
ケース3	100	2	0.3	15	負圧有り
ケース4	100	2	0.6	30	負圧有り
ケース5	200	2	0.15	15	負圧有り
ケース6	200	2	0.15	15	負圧無し(排水)

キーワード：締固め、機械攪拌、真空吸水

連絡先：〒320-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1 五洋建設(株)技術研究所 TEL0287-39-2116

2.4 実験結果と考察

(1) 沈下挙動

最初に、間隙比 e の減少状況を示す。ケース 5 は、羽切り回数が 200 回の実験ケースである。実験での経過時間と e の変化を図 2 に示す。攪拌棒を容器の底部から 5cm の位置で、非排水状態で回転させると、砂が部分的に締められ、負圧シール層としての粘土層の下面（沈下なし）と砂層上面との間に分離水が生じ、間隙比 e が 0.635 から 0.590 に低下した。その後、真空吸水しながら攪拌棒を引き上げると、分離水は直ちになくなり、 e が引き上げ速度にほぼ比例して減少し、最終的に 0.486 まで低下した。攪拌翼を回転するだけで沈下し、 e が引き上げ速度にほぼ比例して低下する傾向は、すべての実験ケースにおいて観察されたものである。

(2) 負圧測定結果

図 3 は、ケース 5 において測定した間隙水圧の測定結果を示している。元圧は $-60 \sim -65 \text{ kN/m}^2$ であり、攪拌棒が接触している砂層には、開口部を通じて負圧が常に作用していると考えられる。砂層に負圧を作用させると、容器側面の間隙水圧は急に低下して -55 kN/m^2 になったが、その後は次第に上昇し、約 3 分後には -5 kN/m^2 程度でほぼ一定となった。負圧载荷直後に間隙水圧が急に減少したのは、負圧が短時間で容器全体に伝達したためであり、その後の間隙水圧の上昇は、攪拌棒と負圧シール層との隙間で、攪拌棒の上昇過程に気密の漏れがあったためと考えられる。この気密の漏れにより 3 分後には、容器内はほぼ大気圧状態になったが、図 2 の 3～5 分後では間隙比が一定割合で低下していることから、砂層の締め固めに、負圧効果は継続していたと考えられる。

(3) 羽切り回数と締め固め効果

図 4 は、羽切り回数 T と締め固め後の e_f の関係をまとめたものである。この図より、 T が増加するほど、 e_f が低下することがわかる。機械攪拌の場合、攪拌棒が砂をせん断し（骨格構造の破壊）、かつ吸水している場所においてのみ、砂の締め固めが生じているため、攪拌棒の移動軌跡が密であるほど、砂の締め固め効果が増加するものと考えられる。また、 T は同じであるが、引き抜き速度 V と回転数 R を変化させたケース 3 とケース 4 を比較すると、ほぼ同じ e_f となっており、 V と R の変化は e_f に大きな相違をもたらさないことがわかる。このことは砂の透水係数が大きいためと考えられる。

一方、負圧の有無によるケース 5 とケース 6 を比較すると、 e_f はそれぞれ 0.492 と 0.523 となり、負圧を作用させると、間隙比の減少量が大きく、締め固め効果が大きいことがわかる。

(4) 締め固め後の相対密度

締め固め後の相対密度 D_r の結果を図 5 に示す。 D_r は羽切り回数 T とともに増加し、ケース 5 において、 $D_r=94\%$ となった。

3. まとめ

ゆるい砂を機械攪拌と真空吸水により締め固める実験を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 羽切り回数が増加するほど、大きな締め固め効果が得られた。
- (2) 珪砂 5 号の場合、羽切り回数が 200 回で、真空吸水しながら締め固めると、相対密度 D_r は 94% となった。

本方法は液状化対策として有効であると考えられる。今後、粒度分布の異なる砂での適用性を調べる必要があると考えられる。

参考文献： 1) 新舎博，海野寿康：真空吸水と振動源を分離した砂の振動締め固め工法に関する基礎実験，第 68 回土木学会年次学術講演会，pp.427-428，2013。

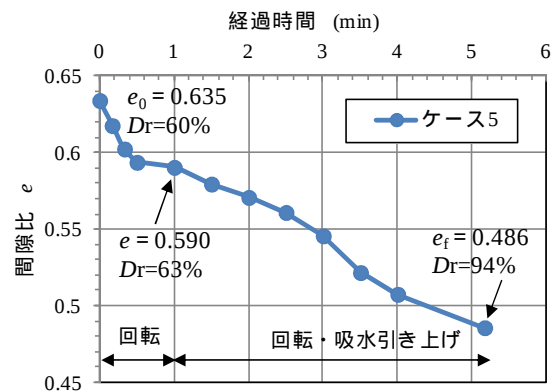


図 2 経過時間と e の関係(ケース 5)

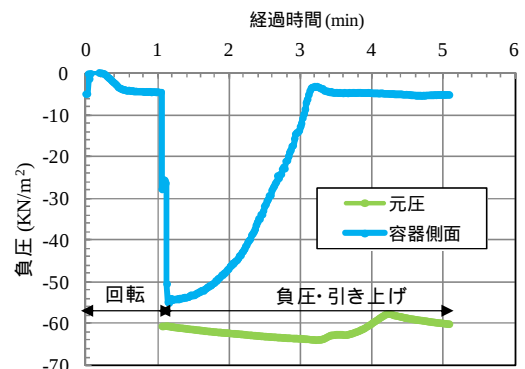


図 3 間隙水圧の測定結果(ケース 5)

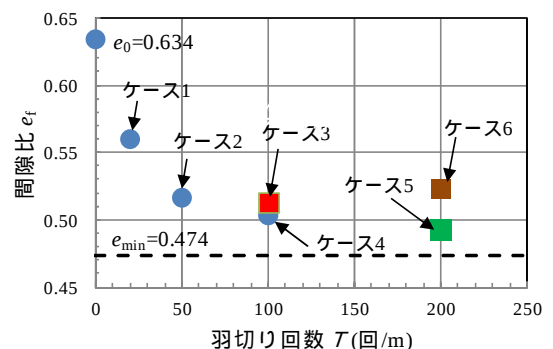


図 4 羽切り回数と e_f の関係

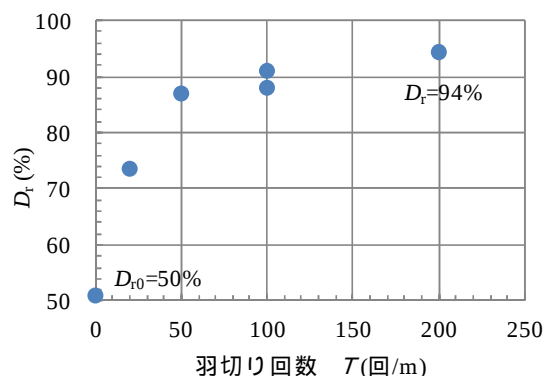


図 5 締め固め後の相対密度