

深層混合処理の液状化防止効果

小宮一仁¹・渡邊勉²・清水英治²

¹正会員 工博 千葉工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒275-8588千葉県習志野市津田沼2-17-1)

²正会員 工博 千葉工業大学教授 工学部土木工学科 (〒275-8588千葉県習志野市津田沼2-17-1)

The effectiveness of deep mixing improvement construction to prevent the liquefaction during earthquake in sandy ground is investigated by laboratory tests. The preventive efficiency of deep mixing method increased with increasing improvement volume ratio. A better deep mixing effect can be achieved in more than 12% of volume of the liquefaction area.

Key Words: deep mixing method, liquefaction, earthquake, sandy soil, strength

1. まえがき

兵庫県南部地震等において深層混合処理された地盤の液状化防止効果が報告され、液状化防止工法として深層混合処理が注目されている。深層混合処理工法が液状化防止に効果を発揮する力学的な要因として、攪拌杭を造成することによる地盤の密度増加、攪拌杭が地盤を拘束するために地盤のせん断抵抗が増加すること等が考えられる。しかしながら、深層混合改良杭の設置密度と液状化防止効果の関係や、深層混合処理による砂地盤の拘束性の変化については未解明な点が多い。

本研究では、深層混合処理の改良杭（以下攪拌杭）の設置密度および改良深度と液状化防止効果の関係を室内振動台実験によって調査した。また攪拌杭打設による砂地盤の拘束性の変化を攪拌杭打設前後の孔内水平載荷試験結果の比較から検討し、液状化防止効果との関連について考察した。

2. 振動台実験の概要⁽¹⁾⁽²⁾

水平振動台 (1.5m × 1.5m) 上に図-1のような鋼製の土槽 (奥行き 95cm × 幅 130cm × 高さ 100cm) を設置し、水中落下によって緩く (相対密度 $D_r =$ 約 40%) 砂を堆積させ、層厚 80cm の模型砂地盤を作製した。この時、振動方向の土槽壁面には砂層のせん断変形を少しでも拘束しないようにフォームラバーを配置した。試料には、君津市小糸産の洗い砂 (土粒子の密度 2.719g/cm^3) を砂分の粒

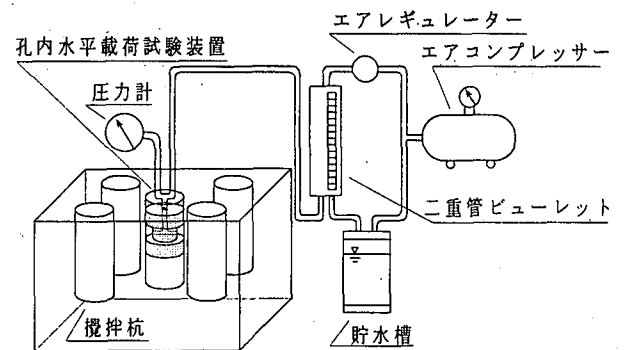


図-1 実験装置の概要

径範囲 (0.075mm ~ 2mm) に粒度調整したものを使用した。模型砂地盤作製後混合攪拌杭打設装置を用いて、図-2に示すように普通ポルトランドセメントのセメントミルク (水セメント比 $w/c = 100\%$) の攪拌杭を千鳥型に実際に打設した。攪拌杭の直径は約 10cm である。攪拌杭の改良深さは地表面から 40cm と 55cm の 2通りとした。また、攪拌杭の打設本数を変化させることによって、攪拌杭による改良密度を変えた実験を行い、攪拌杭の密度と液状化防止効果の関係を調べた。

攪拌杭打設完了後1週間の養生期間を経て、土槽に振動周波数 4Hz の水平正弦波振動加速度を与えて砂地盤を液状化させた。土槽には加速度計を、砂地盤内には間隙水圧計を設置して、振動実験中の地盤の加速度および過剰間隙水圧を測定した。実験では、地盤内の過剰間隙水圧が振動実験前の平均有効応力以上に上昇した場合に液状化発生と判断した。

3. 攪拌杭の面積置換率および長さ と液状化防止効果の関係

図-3は攪拌杭を深さ 55cm まで打設した場合の模型地盤の地表面積に対する置換面積の比（以下面積置換率）と液状化が発生加速度との関係を示したものである。図中の実線は液状化が全く発生しなかった最大加速度を結んだものである。この図より面積置換率が增加する、すなわち単位面積あたりに打設する攪拌杭の本数を増やすと、液状化が全く発生しない加速度は大きくなり、深層混合処理による液状化防止効果が上がることがわかる。特に置換率が概ね 20%を超えると、液状化発生加速度は大きく増加し、液状化防止効果は大きいと判断できた。

一方、図-4は攪拌杭を深さ 40cm まで打設した時の面積置換率と液状化発生加速度との関係を示したものである。図-4から明らかなように、攪拌杭による改良深さが浅い場合には、面積置換率が增大しても液状化が全く発生しない最大加速度にあまり大きな変化は見られず、攪拌杭の打設本数を増やしても液状化防止効果は上がらないことが明らかになった。

ここで、攪拌杭の長さの違いが液状化防止効果に及ぼす影響を調査するために、40cm と 55cm の攪拌杭を打設した場合の液状化防止効果を改良範囲の体積（打設面積×杭長）の違いをもとに比較した。図-5は模型地盤の体積に対する改良杭体積の比（以下体積置換率）と液状化発生加速度との関係を示したものである。この図より、同じ体積置換率では攪拌杭の根入れを深くした場合の方が液状化が全く発生しない最大加速度が上昇している。この結果から、攪拌杭の根入れ深さを大きくすることが地盤の液状化防止に有効であると言える。実験土槽全体を液状化層と考えると、体積置換率が液状化層の体積の 12%を越えると液状化が全く発生しない最大加速度の増加が大きくなる。

4. 深層混合杭打設に伴う砂地盤の 拘束性の変化⁽³⁾⁽⁴⁾

続いて、深層混合処理の攪拌杭打設に伴う地盤の拘束性の変化を、孔内水平載荷試験によって測定した。ここでは、図-1に示すように、土層中央部付近の2.の実験で攪拌杭を打設した位置に、予め攪拌杭とみなした塩化ビニール製の孔内水平載荷試験装置（φ 8.9cm × 69cm : 2本, φ 8.9cm × 65cm : 1本）を計3本埋設して、攪拌杭打設前後の地盤

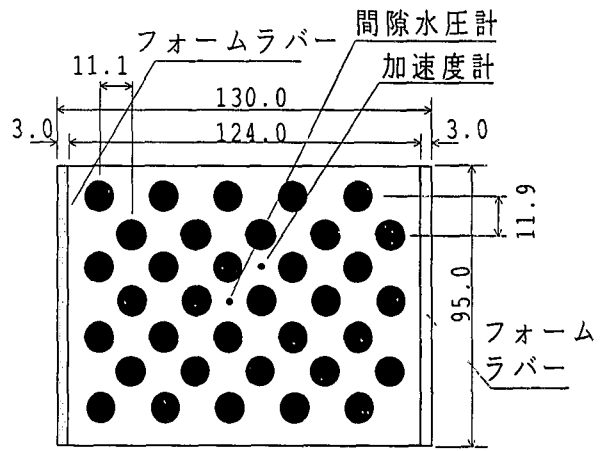


図-2 攪拌杭の配置

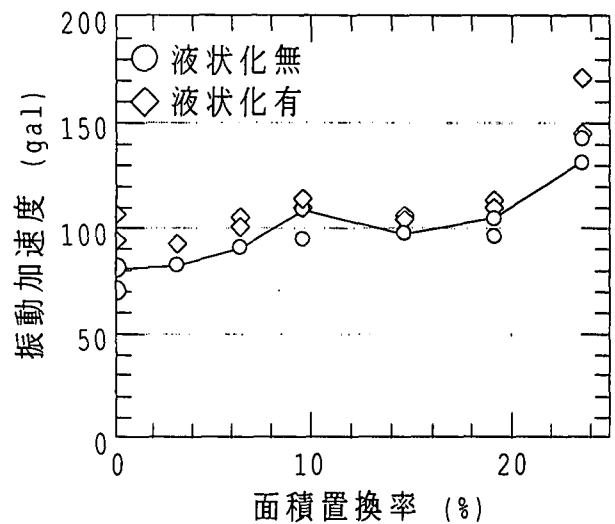


図-3 面積置換率と液状化発生
加速度の関係 (55cm杭)

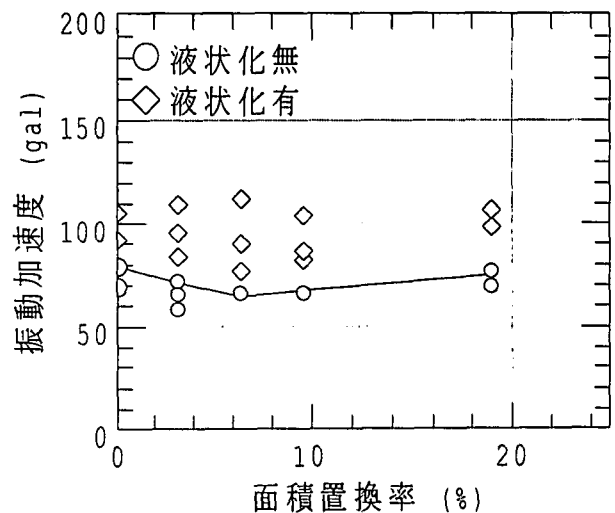


図-4 面積置換率と液状化発生
加速度の関係 (40cm杭)

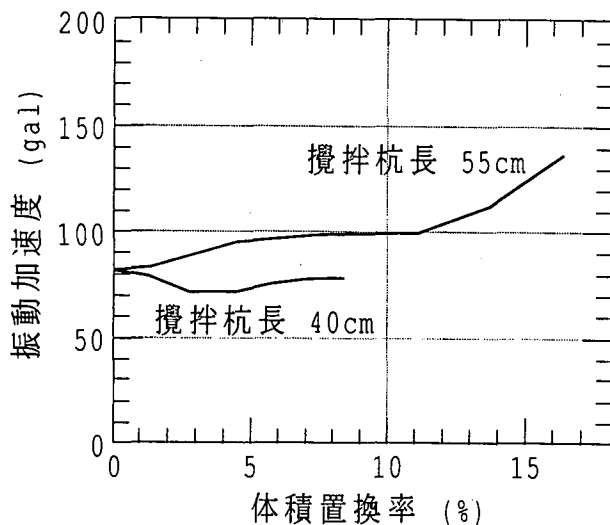


図-5 体積置換率と液状化発生
加速度的関係

の強度を測定した。孔内水平載荷装置は、埋設時に砂地盤に乱れが生じないようにするため、砂をふるい落とす前に設置を完了した。孔内水平載荷試験の概略は図-1に示すとおりである。

最初に、攪拌杭造成前の模型砂地盤の拘束圧を測定するため孔内水平載荷試験を行った。測定深度は模型砂地盤の表面から20cm, 40cm, 60cmとした。

次に、孔内水平載荷試験装置と攪拌杭を設置した模型砂地盤を新たに作製し、攪拌杭を1週間養生した後に地盤の強度を測定した。攪拌杭の直径は2.の実験と同じく約10cm, 造成深さは55cmである。

孔内水平載荷試験の測定深度は、攪拌杭打設前と同じく20cm, 40cm, 60cmであり、60cmの測定点は攪拌杭が届かない改良範囲よりも下部の地盤にあたる。打設の密度の違いによる拘束性の変化を調べるため、攪拌杭の本数を23本, 30本, 35本と3通りに違えて実験を行った。これらの本数はそれぞれ、面積置換率14.6%, 19.1%, 23.6%改良に対応している。

表-1は、孔内水平載荷試験で測定された圧力～変位量関係から求めた変形係数 E の値の一覧を示したものである。変形係数の計算にあたりポアソン比 $\nu=0.333$ とした。表から、攪拌杭を打設すると、攪拌杭の打設深さよりも浅い地盤では攪拌杭が水平方向の変形を拘束するために、変形係数は大きく増加した。また攪拌杭が届いていない地表面から60cmの地点においても、攪拌杭打設に伴い変形係数の増加が見られた。これは、攪拌杭で拘束された地盤が下方の地盤の変形を拘束しているためと考えられ

表-1 変形係数の変化

置換率 深度	杭なし	14.6%	19.1%	23.6%
20cm	350kPa	776kPa	2491kPa	2846kPa
40cm	1473kPa	1933kPa	4057kPa	4745kPa
60cm	551kPa	987kPa	1534kPa	1224kPa

る。攪拌杭を設置しない状態で、地表面から40cmの地点の変形係数が60cm地点よりも大きくなっているのは、孔内水平載荷試験装置が地盤を拘束したためと考えられる。攪拌杭打設に伴う変形係数の増加は、攪拌杭の本数を増やす（面積置換率が増す）と大きくなるが、面積置換率14.6%から19.1%の間の増加が特に大きくなった。このことは、3.に示した、面積置換率が概ね20%を越えると液状化防止効果が上がる結果と対応しており、深層混合処理による液状化防止効果と地盤の拘束性とを関連づけることができたと考える。

5. 結論

本研究は、深層混合処理の液状化防止効果について、振動台実験と孔内水平載荷試験の結果をもとに基礎的な考察を行ったものである。本研究の成果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 深層混合処理の攪拌杭の根入れが深い場合には、面積置換率が概ね20%以上になると大きな液状化防止効果が得られる。
- (2) 深層混合処理の攪拌杭の根入れが浅い場合には、面積置換率を大きくしても液状化防止効果は変化しない。
- (3) 同じ体積置換率では、攪拌杭を密に浅く配置するよりも、粗く根入れを深く配置した方が大きな液状化防止効果が得られる。
- (4) 体積置換率が12%を越えると液状化防止効果はより大きくなる。

- (5) 深層混合処理の攪拌杭打設は地盤の拘束力を増加させる。
- (6) 攪拌杭の根入れが深い場合には、面積置換率の増加に伴い地盤の拘束性は増加する。面積置換率が 20% (体積置換率に換算すると 12%) に近くなると地盤の拘束性は特に大きくなり、液状化防止効果と地盤の拘束性上昇の関係が明らかになった。
- (7) 攪拌杭は地盤を水平方向に拘束するだけでなく、攪拌杭打設範囲よりも下部地盤の拘束力を増す効果がある。

参考文献

- (1) 菅井・角原他：深層混合処理工法の液状化防止効果に関する基礎的研究，第 23 回関東支部技術研究発表会講演概要集，土木学会，p.516～517，1996
- (2) 菅井・小宮他：深層混合処理工法の液状化防止効果について，土木学会第 51 回年次学術講演会講演集第 3 部 B，p.566-567，1996
- (3) 池田・石田他：深層地盤改良による地盤の拘束性の変化と液状化防止効果，第 24 回関東支部技術研究発表会講演概要集，土木学会，p.412-413，1997
- (4) 菅井・渡邊他：深層混合処理された砂地盤の拘束性，第 32 回地盤工学研究発表会講演集，地盤工学会，p.2349-2350，1997
- (1) 菅井・角原他：深層混合処理工法の液状化防止