

繰返し载荷の応力伝播による静的締固め機構に関する研究

九州大学大学院

学生会員 ○坂本 一信

正會員 善 功企

正會員 陳 光齊

正會員 等間 清伸

1. 背景および目的

現在、砂地盤の液状化対策として用いられる地盤の密度増大工法の一つに静的締固め杭工法がある。この工法は地盤中に砂やグラウト材の杭を形成し内側からの静的な載荷によって地盤を締固めるもので、実施工においても十分な施工地盤のN値の増加があると報告されている¹⁾。しかし、その締固め機構には未解明な点が多く、施工には動的な打設による工法である締固め砂杭工法（SCP工法）の設計法を用いているのが実状である。よって、本研究では砂地盤の静的締固めメカニズムの解明を目的とし、空洞膨張理論²⁾による応力解析と繰返し三軸圧縮試験を行い、静的締固め杭工法による地盤改良効果の主要な原因を考察した。

2. 地盤改良メカニズムのモデル化

研究では、静的締固め杭工法による地盤改良のメカニズムを次のようにモデル化した。①静的締固め杭工法では砂杭の圧入が単純な載荷ではなく繰返し載荷として作用している。②この繰返し載荷により地盤には過剰間隙水圧が発生する。③載荷終了後、過剰間隙水圧の消散に起因した排水により、地盤に体積減少が発生し地盤が締固められる。

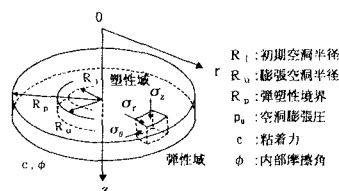
これらの想定に基づき、静的締固め杭工法の施工時における周辺地盤を実験的に再現するため、施工時に発生する応力を解析し、算定された応力を繰返し荷重とした繰返し三軸圧縮試験を行った。

3. 研究内容

a) 空洞膨張理論による応力解析：繰返し三軸圧縮試験に用いる繰返し荷重および拘束圧を決定するため、解析により静的締固め杭工法の施工における砂杭周辺の応力状態を算定した。解析に用いた空洞膨張理論²⁾では、図-1のように地盤を塑性域と弾性域に分け、それぞれ弾塑性論を用いて応力の算定を行っている。解析条件を表-1に示した。

解析結果として砂杭が円柱状に膨張する場合の、杭芯からの距離とせん断応力の関係を図-2に記した。せん断応力は杭芯からの距離によって指数関数的に減少しており、杭から遠距離になるほど地盤の改良効果は低減する。ここで、静的締固め杭工法の砂杭が図-3のように三角形型に施工される場合には、3つの砂杭の中心点（各杭より約1mの地点）が一つの砂杭から最も影響を受けにくいと考えられる。これらから、最も施工効果の低い地点を想定するため、実験には200～500kPa程度の小さな空洞膨張圧により杭から1m地点に発生する応力状態を用いるとした。ここで、繰返しせん断応力には、解析によるせん断応力を最大値とした正弦波を用いるとした。

b) 実験方法：実験は繰返し三軸圧縮試験機を用いて行った。実験方法は過剰間隙水圧比と体積変化の関係を求めるため、繰返し载荷により発生する過剰間隙水圧の値により载荷を停止し、排水量の測定を行った。実験条件を表-2に記す。また、繰返し载荷時の排水条件の違いによる締固め効果を検証するため、排水条件での同試験を行った。排水条件での実験は繰返し载荷による排水が終了するまで行い、排水量の測定を行った。



図・1 水平方向への空洞膨張理

表-1 応力解析条件

初期地盤内応力	100kPa
空洞膨張圧 p_e	200, 500, 1000kPa
初期空洞半径 R_i	10cm
膨張空洞半径 R_e	20cm
内部摩擦角 ϕ	30°
粘着力 c	0

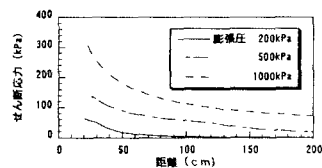


図-2 距離-せん断応力の関係

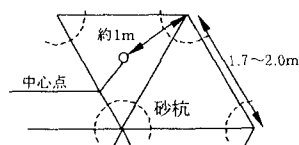


図-3 砂杭の施工間隔

表-2 実験条件

供試体試料	専用標準砂
相対密度	45%
初期地盤内拘束圧	49, 98, 196kPa
繰返し周期	0.1Hz
繰返しせん断応力比	0.1~0.3
停止間隙水圧比	0.0, 0.5, 0.6, 0.7, 1.0

4. 実験結果および考察

図-3に繰返し载荷により発生する過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係を記した。結果によると、繰返し载荷によって発生する過剰間隙水圧が大きくなるほど载荷停止後の体積ひずみが増加している。ここで、過剰間隙水圧比1.0以下で载荷を停止し排水を行った場合の体積ひずみが0.5~1.0%であるのに対して、液状化の発生後は液状化破壊による地盤再構成の影響により、体積ひずみ5~10%と遥かに大きな値を示している。

図-4は、排水条件での実験結果である。排水条件の供試体は、繰返し载荷により排水と吸水を繰返し徐々に体積が減少して行く。しかし载荷回数が増加と共に排水と吸水が同量となっていくため締固め効果は減少して行き、最終的な体積ひずみは0.2%とわずかであった。

5. 実験結果と改良地盤の比較

次に実験結果と実際の静的締固め杭工法で締固めを行った地盤の改良効果の比較を行った。比較には標準貫入試験のN値を用いとし、変換には石原³⁾により提案されている以下の変換式を用いた。

$$N = \left(a + b \sigma'_v \left(\frac{D_r}{100} \right)^2 \right), \quad N_1 = \left(a + b \left(\frac{D_r}{100} \right)^2 \right) \quad (a, b \text{ は定数})$$

今回の変換には、石原の提案する $\sigma'_v = 1 \text{ kgf/cm}^2$ で $a + b \approx 70$ が成り立つ場合の N_1 値を採用し、室内実験結果の体積ひずみより算定した相対密度、 D_r を N_1 値へ変換した。

図-5に実験による N_1 値と施工前後のN値¹⁾の関係を示した。ここで、静的締固め杭工法等の密度増大工法では、細粒分 F_c により施工効果が低減するため、施工の結果は $F_c = 10$ の値で分割して表記した。まず、実験結果の比較を行うと液状化が発生していない過剰間隙水圧比0.5~0.7までの载荷、および排水条件における载荷後のN値増加が1~2程度であるのに対し、液状化発生後は30~50と非常に大きなN値の上昇が見られた。次に静的締固め杭工法施工によるN値の増加を見ると、実験のように細粒分の少ない場合は約15程度、地盤全体では平均10程度の上昇となっている。これらから、静的締固め杭工法による地盤改良の効果を得るには、地盤に十分な過剰間隙水圧を引起こすことが重要であると考えられる。

6. まとめ

本文をまとめて以下に示す。

- ・ 静的締固め杭工法の締固めメカニズムを、空洞膨張論による応力解析と解析結果を用いた繰返し三軸圧縮試験により考察した。
- ・ 繰返し三軸圧縮試験の結果、繰返し载荷後の N_1 値の変化は、液状化が発生しない場合1~2程度の上昇であるのに対し、液状化が発生した場合には30~50と大幅な増加が見られた。
- ・ 実験結果と施工地盤を比較した結果、静的締固め杭工法によりN値の上昇を得るには、砂杭周辺の地盤に十分な過剰間隙水圧を発生させることが重要であると考えられる。

《参考文献》 1) 沿岸開発技術研究センター：第七回東京国際空港液状化対策工法検討委員会検討書

2) Vasic, A.S (1972): expansion of cavities in infinite soil mass, ASCE Vol.98, SM3, pp.265-290

3) Ishihara, K (1993): Liquefaction and flow failure during earth quakes, Geotechnique, Vol.43, No.3, pp.351-415

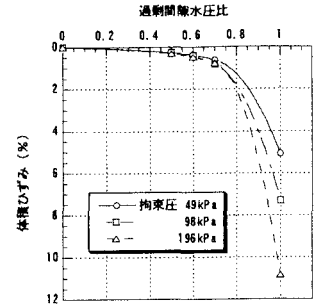


図-3 間隙水圧と体積ひずみの関係

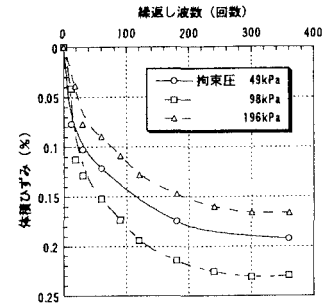


図-4 排水条件での体積ひずみ

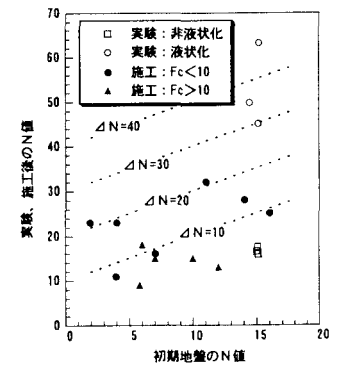


図-5 実験と施工によるN値の変化