

静的圧入による砂地盤の 締固め効果に関する基礎的研究

新坂孝志¹・善功企²・坂本一信³・山崎浩之⁴

¹正会員 三信建設工業株式会社技術開発本部 (〒112-0004 東京都文京区後楽1-2-7)

²正会員 博(工) 九州大学大学院工学研究院教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³修(工) 九州大学大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所土質部動土質研究室室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

砂地盤の液状化対策として用いられる静的締固め工法は、低流動性材料、砂、礫、建設発生土などを静的な圧力により杭状に地盤中に圧入するものである。本研究では、この工法の静的締固め機構を解明するために、地盤中の杭状体の膨張をモデル化した模型実験を行った。その結果、圧入に要する圧力は杭状体の膨張とともに増加するが、一定の圧力で膨張し続ける限界圧入圧力が存在し、その値は上載圧、密度に依存することを明らかにした。また、空洞膨張理論を用いることで、静的圧入締固めにおける周辺地盤の応力状態の変化を説明できることがわかった。

Key Words : compaction, static, liquefaction, model test, grouting

1. はじめに

液状化対策として用いられる密度増大工法¹⁾のひとつに、締固め工法がある。その中でも、近年、周辺環境への影響を少なくした、騒音や振動の少ない静的な力による締固め工法、いわゆる静的締固め工法が実用化されている。この静的締固め工法には、貫入管の上下運動、回転運動により砂、礫、建設発生土などを圧入する静的締固め杭工法²⁾³⁾や、ポンプにより低流動性材料を圧入する静的圧入締固め工法⁴⁾⁵⁾などがあり、地盤の「密度の増加」や「拘束圧の増加」等の改良効果が得られ、実施工においても十分な N 値の増加や液状化強度の増加が確認されている。

静的締固め杭工法の改良機構は、砂杭の貫入による押し広げ効果によるものと、貫入管の運動による応力履歴の効果によるものとが考えられている⁶⁾。一方、静的圧入締固め工法の改良機構は、低流動性材料の圧入による押し広げ効果によるものと、圧入圧力の繰返し载荷による地盤の応力履歴に起因するものと推察される。

静的締固め杭工法における施工時の応力履歴に関しては、貫入管の運動により周辺地盤の土要素にかかる地盤内応力履歴を中空ねじり試験で再現し、密度増加を求め

たもの⁹⁾や、数値解析による研究⁷⁾などが行われている。

押し広げ効果に関しては、三軸伸張試験により密度増加を評価した研究⁸⁾や、異方圧密履歴を再現し、液状化強度増加を評価した研究⁹⁾、数値解析による研究^{10) 11) 12)}などが行われている。これらは、密度の増加や液状化強度の増加に関する研究が多く、周辺地盤の拘束圧の増加に関しては、実施工での確認^{13) 14) 15)}はされているものの、その増加過程を求めている研究は少ない。

本論文では、この押し広げ効果に着目し、静的圧入締固め工法における杭状体が、円筒状に膨張することにより、周辺地盤の密度や拘束圧が増加するものと仮定し、これを再現した室内模型実験を行った。実験は、地盤の相対密度、上載圧を変化させた条件で、圧入圧力、周辺地盤の応力増加、変位量等の測定を行い、空洞膨張理論による理論解析結果との比較検討を行った。

2. 空洞膨張理論

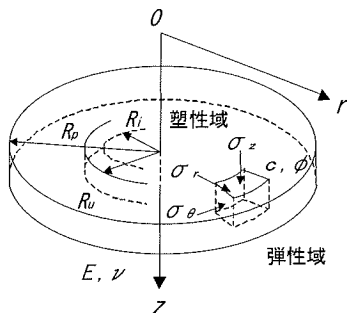
本実験では、静的圧入締固め工法における杭状体を、深度方向の一部分で切り取った状態を想定した。上下方向の z 方向は拘束された平面ひずみ状態とし、この状態

で杭状体が円筒状に膨張すると仮定することにより、Vesic¹⁶⁾による空洞膨張理論が適用できると考えた。図-1は、初期半径 R_i の円筒状の空洞に内圧を加えていき、極限内圧 P_u になったときの空洞膨張半径 R_u および塑性域 R_p の状態を示している。このとき、半径 R_p までは、モール・クーロンの破壊基準を満たす塑性領域となり、その外側は弾性領域に留まっている。このとき、半径 r 地点の水平応力 σ_r 、および、限界圧入圧力 P_u は、次式のように表される。

$$\sigma_r = P_u \left(\frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \quad (1)$$

$$P_u = q(1 + \sin \phi) \left(\frac{R_p}{R_u} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \quad (2)$$

ここに、 σ_r : 半径 r の地点の水平応力、 P_u : 圧入圧力 (空洞膨張圧)、 R_u : 空洞膨張半径、 R_p : 弾塑性境界の半径、 q : 等方的な初期有効応力、 ϕ : 地盤の内部摩擦角である。



R_u : 膨張円筒半径 R_i : 初期円筒半径
 R_p : 弾塑性境界半径 P_u : 圧入圧力

図-1 空洞膨張理論概念図

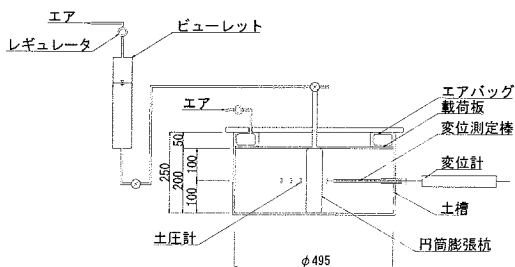


図-2 実験装置

3. 実験概要

図-2 に示すように、実験装置は、土槽、载荷装置、円筒膨張杭状体、圧入装置、計測機器で構成されている。土槽は、内径 495mm、深さ 250mm の円形のもので、模型地盤に上載圧をかけるための载荷装置 (载荷板およびエアバッグ) を上部に有する。土槽中心部に設置した円筒膨張杭状体は、円筒状に膨張するシリコンゴム製のものを使用し、初期状態が高さ 200mm、直径 20mm で、圧入することにより最大径 45mm まで膨張する。圧入装置は、圧縮空気により円筒膨張杭状体およびエアバッグへ圧力载荷を行うものである。ビューレット内に圧縮空気を送ることにより、水による円筒膨張杭状体への圧力载荷を行う。また、エアバッグへ圧縮空気を送ることにより、模型地盤に上載圧を加えるものである。いずれも、所定の圧力を载荷できるような圧力調節バルブを有する。計測機器は、地盤内応力を測定する土圧計および円筒膨張杭状体周辺地盤の水平変位を測定する変位計からなる。土圧計は、直径 6.5mm、厚さ 1mm のもので、30mm×30mm のメンブレンを両面に貼り付けて使用した。変位計は、周辺地盤との摩擦を低減させるため三重管構造とした。変位計のロッド先端部には 15mm×20mm のプレートを垂直に取り付けている。

模型地盤には豊浦砂 (土粒子の密度 = 2.64g/cm³, $e_{max} = 0.986$, $e_{min} = 0.607$) を用い、深さ 200mm の乾燥地盤を空中落下法にて作製した。なお、本研究は、特性を把握することを主目的とした基礎的研究であるため、実験の再現性、簡便性を考慮し、乾燥砂により実験を行った。実験に用いた豊浦砂の粒径加積曲線を図-3 に示す。

実験は以下の手順で行った。①土槽に円筒膨張杭状体を設置する。②所定の相対密度 ($D_r = 45\%$, 70%) の地盤を作製し、深さ 100mm の位置に、土圧計および変位計先端部のプレートを地盤に対して垂直に設置する。変位計は、土槽の外部に取り付け、地盤中に設置したプレー

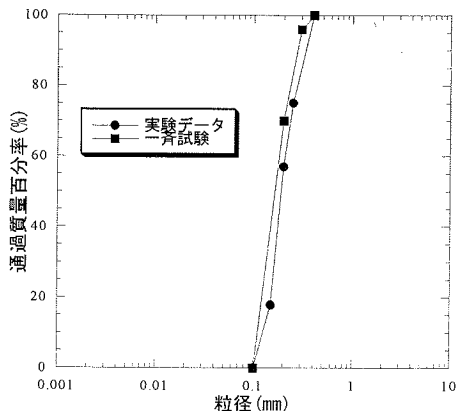


図-3 試料の粒径加積曲線

トと接続する。③模型地盤の上部に、載荷板、エアバッグ、中板、上蓋の順に設置し、固定する。④地盤上部からエアバッグにより、任意の深度を想定した上載荷重(30kPa, 60kPa, 90kPa)を加える。⑤上載圧の荷重により増加する水平応力と、円筒膨張杭状体とを平衡状態にするため、初期圧入を行う。本実験では、一般的な自然地盤の静止土圧係数よりも、若干高めの上載圧の0.6倍となった。⑥上載荷重、初期圧入圧力が十分に安定した後、円筒膨張杭状体に水を圧入することにより膨張させる。

測定項目は、圧入圧力と円筒表面および円筒中心から4cm, 7cm, 10cm 地点の応力増加および水平変位とし、圧入圧力は30秒ごとに10kPaの割合で増加させた。

実験ケースは、上載圧を30kPa, 60kPa, 90kPaに変化させたものと、地盤の相対密度 D_r を45%, 70%に変化させたもので行った。

4. 実験結果

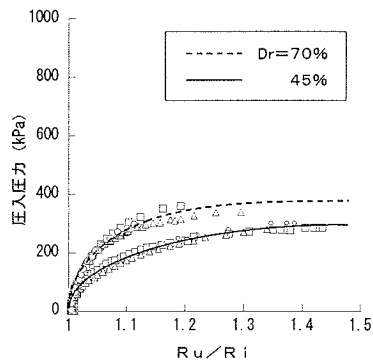
(1) 圧入圧力と円筒膨張径の関係

図-4に、上載圧30kPa, 60kPa, 90kPaのときの圧入圧力と膨張半径比 R_u/R_i (膨張半径/初期半径) の関係を示す。この結果から、地盤の相対密度の違いをみると、相対密度が高いほど、圧入圧力も高くなっている。また、同じ膨張半径比において、上載圧が高いものほど圧入圧力が高い結果となっている。これは、地盤の密度が低いほど、また、上載圧が小さいほど、低い圧入圧力で圧入できることを示している。なお、実験の再現性をみるため、同一の条件で行った結果を併せてプロットしているが、上述の結果とほぼ同じ結果が得られた。

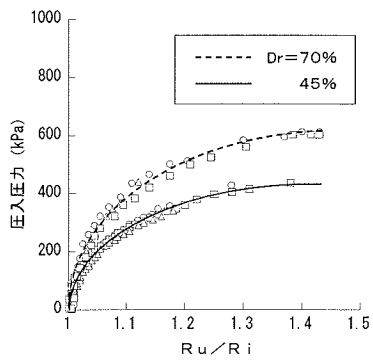
円筒の膨張に伴うそれぞれの圧入圧力の上昇傾向をみると、膨張の初期段階においては、圧入圧力が急激に上昇していき、その後、ある圧入圧力になったときに、ほぼ一定の圧入圧力で円筒の膨張が進行する限界圧入圧力の存在が確認された。図-5に上載圧と限界圧入圧力の関係を示す。限界圧入圧力は、図-4の膨張半径比 R_u/R_i の値が、いずれの場合も1.4付近でフラットになっているため、ここでは、 $R_u/R_i=1.4$ のときの値を採用した。限界圧入圧力は、上載圧に比例して上昇しており、相対密度45%の場合で8倍程度、相対密度70%の場合で10倍程度となっている。また、地盤の相対密度が高いほど、限界圧入圧力は高い値を示している。

(2) 周辺地盤の水平応力増加

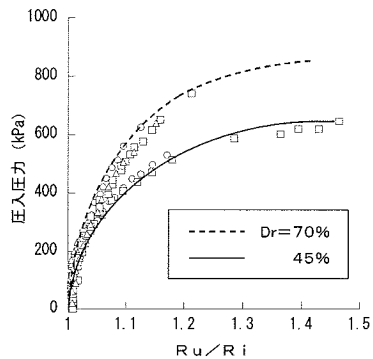
圧入圧力と周辺地盤の水平応力の関係を図-6に示す。図-6は、圧入圧力と円筒中心からの距離 $r=4\text{cm}, 7\text{cm}, 10\text{cm}$ の地点の応力増加の関係である。どの地点においても、圧入圧力の増加に伴い、水平応力は増加している



(a) 上載圧30kPa



(b) 上載圧60kPa



(c) 上載圧90kPa

図-4 圧入圧力と膨張半径比の関係

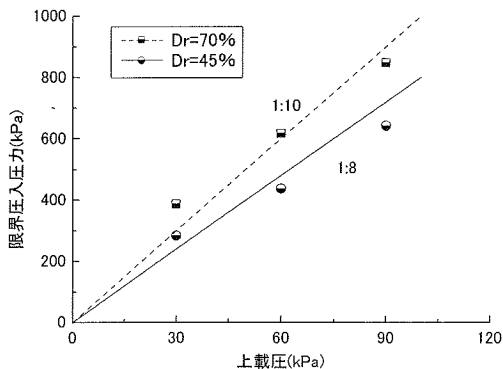
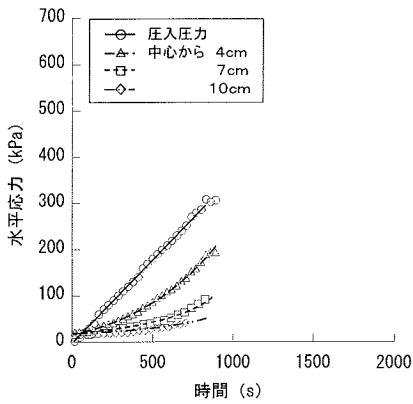
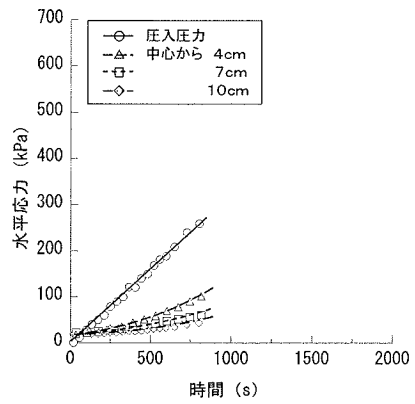


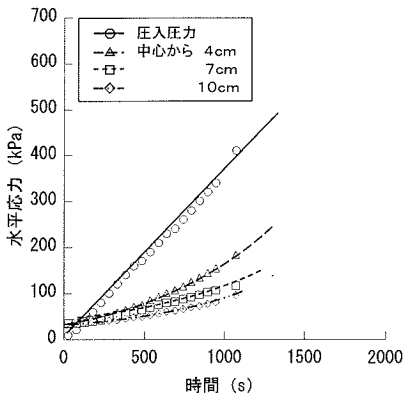
図-5 限界圧入圧力の比較



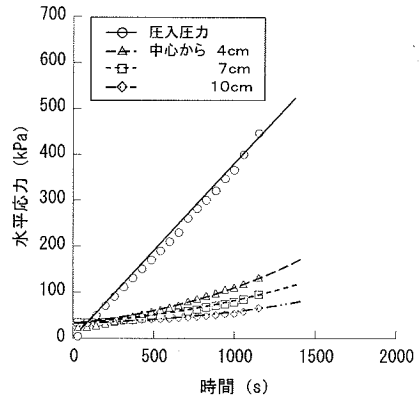
(a) 上載圧 30kPa $D_r=45\%$



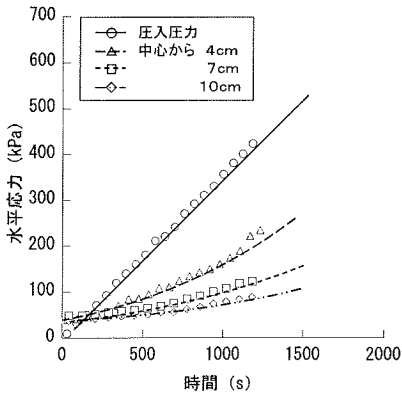
(b) 上載圧 30kPa $D_r=70\%$



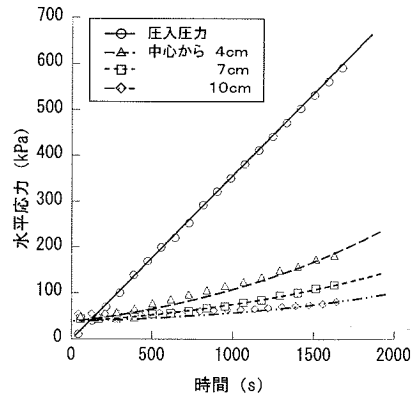
(c) 上載圧 60kPa $D_r=45\%$



(d) 上載圧 60kPa $D_r=70\%$



(e) 上載圧 90kPa $D_r=45\%$

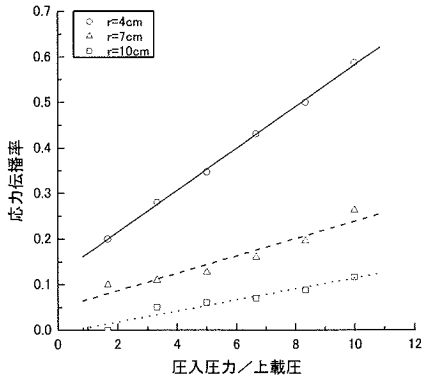


(f) 上載圧 90kPa $D_r=70\%$

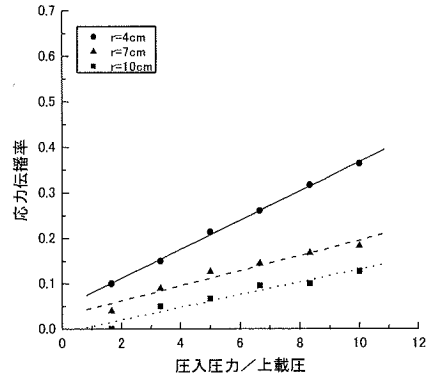
図-6 圧入圧力と周辺地盤の応力増加の関係

が、中心に近いほど、大きな水平応力の増加が発生している。地盤の密度の違いによる比較をすると、相対密度が小さいものほど、同じ圧入圧力に対する水平応力の増加が大きくなっている。

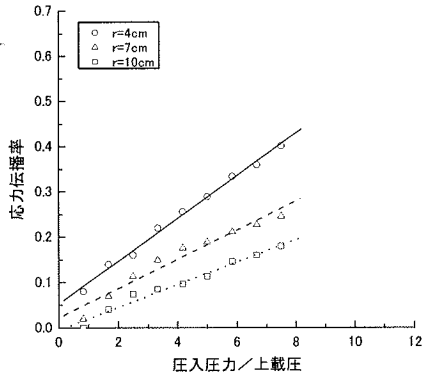
図-7 は、水平応力の伝播率と圧入圧力比の関係を示したものである。圧入圧力比とは、圧入圧力を上載圧で無次元化したものである。応力伝播率 α は、式 (3) により求めた。



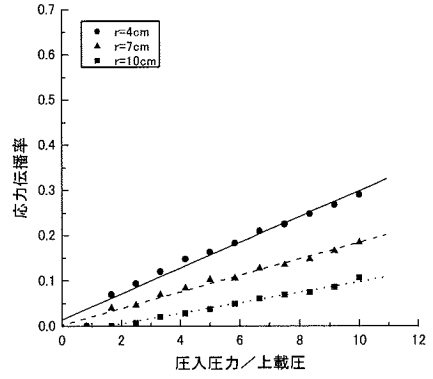
(a) 上載圧 30kPa $D_r=45\%$



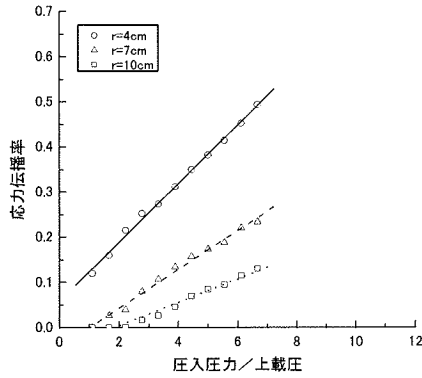
(b) 上載圧 30kPa $D_r=70\%$



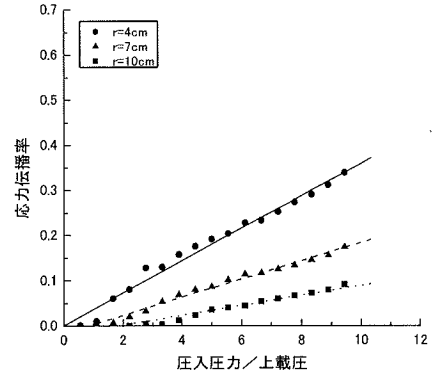
(c) 上載圧 60kPa $D_r=45\%$



(d) 上載圧 60kPa $D_r=70\%$



(e) 上載圧 90kPa $D_r=45\%$



(f) 上載圧 90kPa $D_r=70\%$

図-7 圧入圧力と応力伝播率の関係

$$\alpha = \frac{\sigma_r - \sigma_{r0}}{P_u} \quad (3)$$

ここに、 σ_r は各地点での水平応力、 σ_{r0} は初期水平応力、 P_u は圧入圧力である。ここで用いた各地点での水平応力

σ_r は、図-6より求めたものである。

図-7によると、圧入圧力比の増加に伴い、応力伝播率も増加しており、 r が小さいものほど、応力伝播率も大きくなっている。地盤の密度による比較をすると、相対密度が小さい地盤ほど、応力伝播率は、大きくなる。

(3) 静止土圧係数

圧力の圧入開始前に計測された水平応力と上載圧から、土圧計設置位置の鉛直土圧が上載圧に等しいと仮定して求めた静止土圧係数 K_0 を図-8 に示す。この際、自重による応力は、上載圧に比較して微小であるため無視している。この結果、相対密度 45%、70%のいずれの場合も、静止土圧係数の値は 0.5~0.7 となっている。また、上載圧が大きくなると静止土圧係数は小さくなる傾向がある。

(4) 周辺地盤の応力変化

図-9 は、 $r_0=4\text{cm}$ の地点での鉛直応力、水平応力および円周方向応力の測定結果を示したものである。円周方向応力の測定は、土圧計を円筒膨張杭状体に対して垂直に設置して行った。半径方向の水平応力は、圧入圧力の増加に伴い増加する傾向にある。しかし、垂直応力および円周方向の水平応力は、半径方向の水平応力の変化と比較して、小さなものであった。

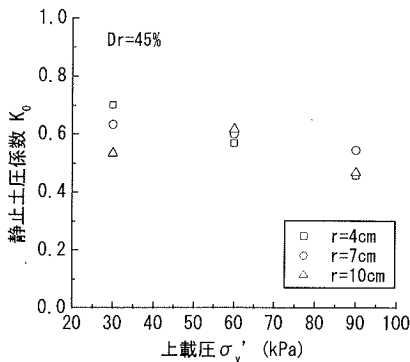
(5) 塑性域の体積ひずみ

地盤の密度の上昇を評価するために、 $r_0=10\text{cm}$ の地点が弾塑性境界となったときの平均体積ひずみを、次の手順によって算出した。なお、鉛直方向の変位は微小で

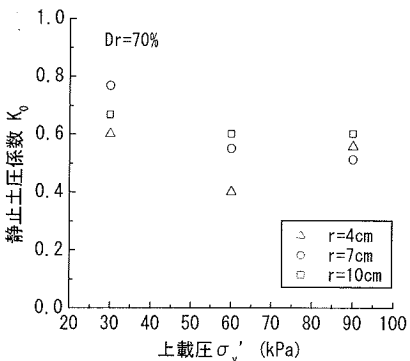
あったため、平均体積ひずみを算出する際には無視し、半径方向の変位量と円筒の膨張量から求めた。

① $r_0=10\text{cm}$ の地点の地盤が破壊する水平応力を、Mohr-Coulomb の破壊基準により算出する。② 円筒中心から 10cm の地点の水平応力が①で求めた値のときの圧入圧力を、図-6 の水平応力と時間の関係から求める。③ 得られた圧入圧力から円筒の膨張量を算定し、その地点での地盤内応力と変位量から塑性域の全体積を算出する。④ 塑性域の体積と初期状態の体積を用いることで、塑性域の平均体積ひずみ $\Delta\omega$ を算出する。⑤ 円筒からの距離による平均体積ひずみの変化をみるため、同様の手順で $r_0=4\text{cm}$ 、 $r_0=7\text{cm}$ までの平均体積ひずみを求める。

以上の手順によって求めた平均体積ひずみと距離の関係を図-10 に示す。この結果、相対密度が 45% の場合、平均体積ひずみは 0.6~0.8%、相対密度 70% の場合 0.2~0.3% となり、相対密度が小さいほど、正の体積ひずみ（圧縮を正とする）が生じやすいことがわかる。塑性域内の密度分布は、半径が小さくなるほど、変位量に対する誤差が大きくなるため、 $r_0=4\text{cm}$ 地点でのばらつきが大きく、一概にはいえないが、 $r_0=10\text{cm}$ と $r_0=7\text{cm}$ の地点までの平均体積ひずみを比較すると、塑性域内でも中心に近いほど、ひずみが大きくなる傾向がある。



(a) $D_r=45\%$



(b) $D_r=70\%$

図-8 圧入前の土圧係数

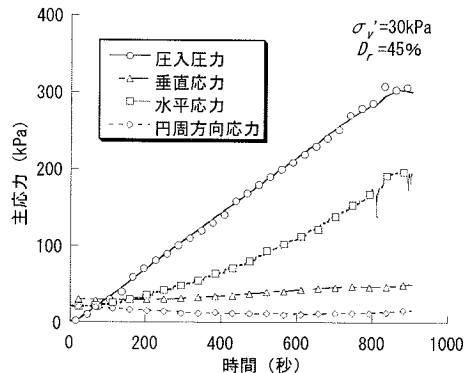


図-9 各主応力の変化

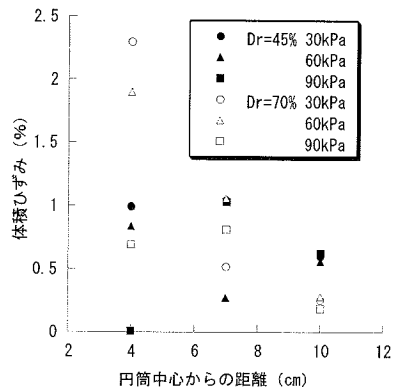


図-10 塑性域内の平均体積ひずみ

5. 空洞膨張理論による検証

(1) 異方応力状態への適応

Vesic の空洞膨張理論は等方応力状態のものであるため、実際の地盤に適応するには異方応力状態による条件を考慮する必要がある。空洞膨張理論に基づき、初期状態での静止土圧係数 K_0 を用いると、式 (2) は次式のように求めることができる。

$$P_u = K_0 \sigma_v' \left(1 + \sin \phi \right) \left(\frac{R_p}{R_u} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \quad (4)$$

ここに、 K_0 ：初期状態での静止土圧係数である。塑性領域の平均体積ひずみを Δ_{av} とした場合、円筒の膨張に伴う体積の収支は以下のようになる¹⁷⁾。

$$R_u^2 - R_i^2 = R_p^2 - (R_p - u_p)^2 + (R_p^2 - R_u^2) \Delta_{av} \quad (5)$$

ここに、 R_u ：円筒の膨張半径、 R_i ：円筒の初期半径、 R_p ：弾塑性境界、 u_p ：弾塑性境界の変位、 Δ_{av} ：塑性領域の平均体積ひずみである。また、弾性域での半径方向の変位に関しては、以下の関係式が成り立つ¹⁷⁾。

$$u_p = \frac{R_p (1 + \nu) (\sigma_r - \sigma_{r0})}{E} \quad (6)$$

ここに、 ν ：ポアソン比、 E ：弾性係数、 σ_{r0} ：初期水平応力である。そこで、

$$\beta = \frac{(1 + \nu) (\sigma_r - \sigma_{r0})}{E} \quad (7)$$

として、式 (6) を式 (5) に代入し、 R_p/R_u に関して整理すると、式 (4) は、

$$P_u = K_0 \sigma_v' \left(1 + \sin \phi \right) \left(\frac{1 + \Delta_{av} - (R_i/R_u)^2}{2\beta - \beta^2 + \Delta_{av}} \right)^{\frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi}} \quad (8)$$

となる。これにより、 Δ_{av} の値を決定することで、円筒の初期半径および膨張半径の比と注入圧の関係が得られる。なお、解析に用いた各条件を、表-1 に示す。

(2) 圧入圧力の比較

図-11 に理論的に求めた圧入圧力と、実験により得られた圧入圧力を示す。これは、実験結果による変位から

表-1 解析条件

| | |
|--------------|---|
| 静止土圧係数 K_0 | 0.6 |
| 内部摩擦角 ϕ | 38° ($D_r=45\%$), 41° ($D_r=70\%$) ¹⁸⁾ |
| ポアソン比 ν | 2.5 |
| 変形係数 E | 15,000 kPa |

求めた平均体積ひずみ Δ_{av} の平均が、相対密度 $D_r=45\%$ および $D_r=70\%$ に対して、それぞれ 0.56%、0.23% 程度であるのと比較すると、実験値の方が若干大きな圧入圧力を示している。圧入圧力が大きめの値を示している原因のひとつに、Vesic の空洞膨張理論では、半無限遠に均質な地盤を仮定しているのに対し、本実験では側面が土槽により拘束されているところにあると考えられる。しかし、体積ひずみの差が 0.3% 程度であることと、曲線の傾向が一致することから、今後、 Δ_{av} の同定方法について詳細に検討する必要があるが、空洞膨張理論を用いて圧入圧力を推定することは可能であると考えられる。

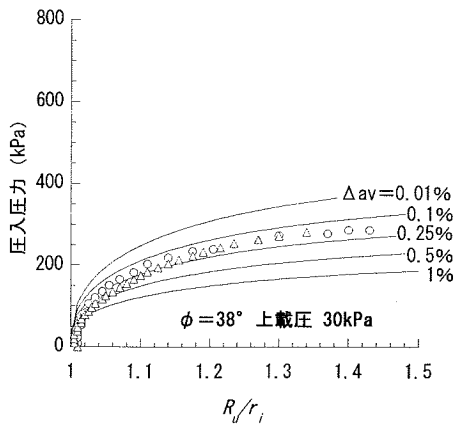
(3) 限界圧入圧力の決定

実験結果より得られた平均体積ひずみを用い、理論的な限界圧入圧力を求めた結果を図-12 に示す。相対密度 45%、70% のいずれの場合も、前述の図-10 で示した Δ_{av} の差によって、若干実験値の方が大きな圧入圧力を示しているものの、両者ともよい一致を示している。

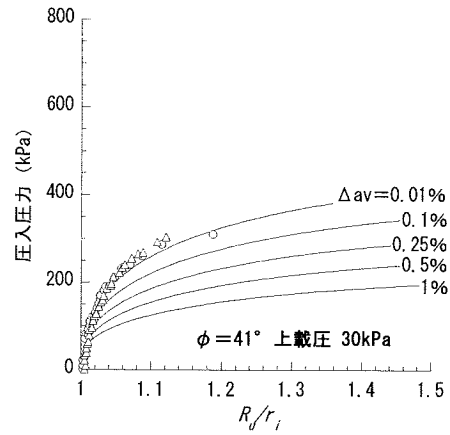
実施工においても、改良前N値が大きい地盤ほど圧入圧力が高い傾向にあり、今回の実験と同様の傾向を示している¹⁹⁾。しかし、実施工における圧入圧力が、計測値で上載圧の 20 倍～100 倍程度となっているのと比較すると、今回の室内実験の 8～10 倍程度という結果は、低い値となっている。実施工における圧入圧力の方が高い値を示している理由としては、①実施工における圧入圧力は、圧入管の途中で計測しており、管内での圧力損失がある、②低流動性材料を用いているため、地盤を押し広げている境界部の圧力よりも、圧入管吐出口の中心部付近の圧力の方が高い、などが考えられる。実施工における圧入圧力については、地盤と低流動性材料の境界部での圧力と、計測位置での圧力の関係を明確にすることにより、施工時の限界圧入圧力を推定することが可能になるものと思われる。

(4) 水平応力分布の比較

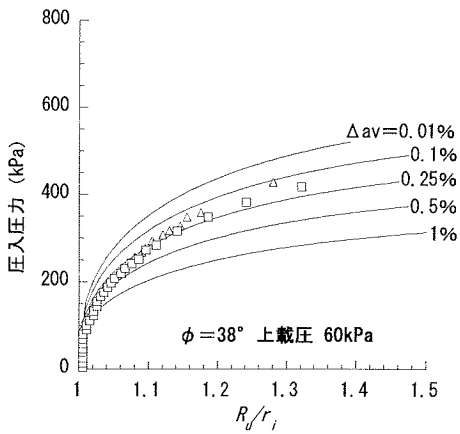
次に、式 (1) から、実験値より得られた圧入圧力とそのときの円筒半径を用いて、中心からの距離と水平応力との関係を求めた結果を図-13 に示す。これらの図から、実験値と理論値はよく一致しており、水平応力は、円筒から離れるにしたがって小さくなる。また、密度が高い地盤の方が周辺地盤への圧入圧力の伝播が少ない傾向を示している。これは、密度が大きい場合は、地盤の抵抗力が大きくなり、円筒の膨張をより近い範囲で支えることがで



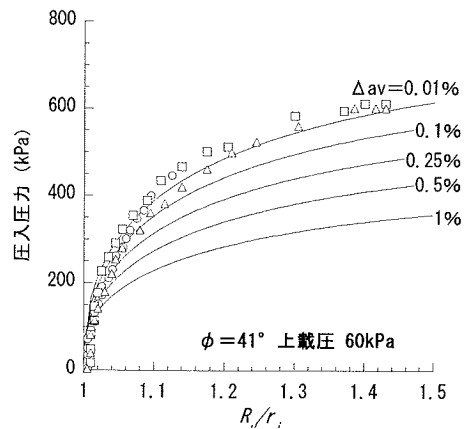
(a) 上載圧 30kPa $D_r=45\%$



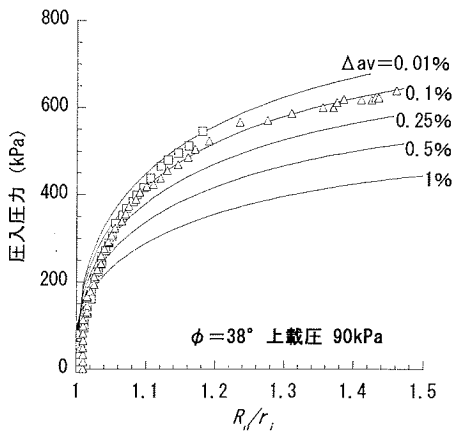
(b) 上載圧 30kPa $D_r=70\%$



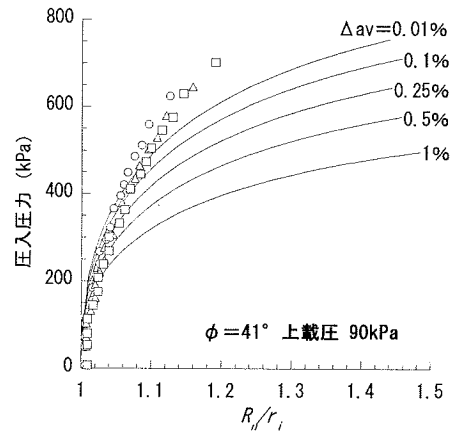
(c) 上載圧 60kPa $D_r=45\%$



(d) 上載圧 60kPa $D_r=70\%$



(e) 上載圧 90kPa $D_r=45\%$



(f) 上載圧 90kPa $D_r=70\%$

図-11 理論式と実験結果による圧入圧力の比較

きるためだと考えられる。このことから、密度の小さい地盤ほど、より遠くへ水平応力が伝播すると考えられる。

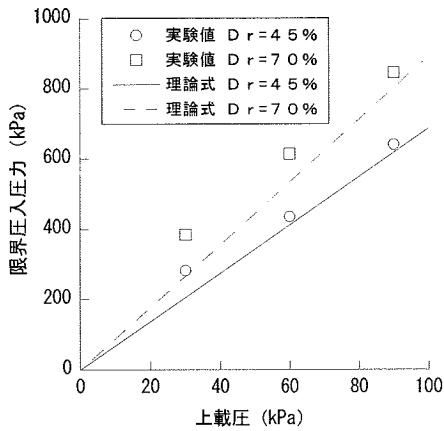


図-12 理論式と実験結果による限界圧入圧の比較

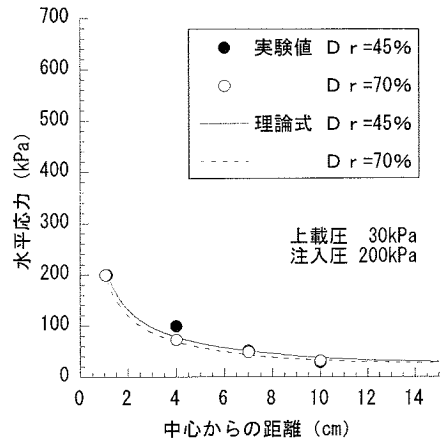
6. 結論

本論文では、静的縮固め機構の解明を目的として、室内模型実験を行った。室内模型実験は、地盤の相対密度、上載圧を変化させた条件で、圧入圧力、周辺地盤の応力増加、変位量等の測定を行い、空洞膨張理論による理論解析との比較を行った。

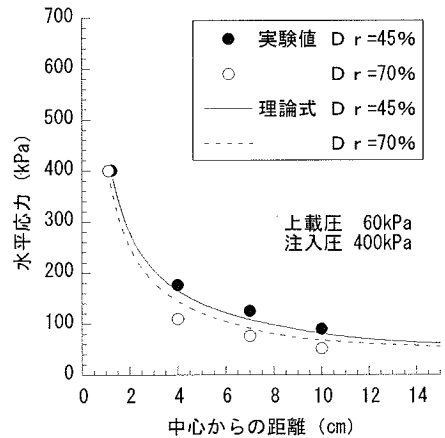
その結果、以下の結論を得た。

- 1) 限界圧入圧力は上載圧に比例して上昇し、また相対密度が高いほど、大きくなる。本実験の結果では、限界圧入圧力は、上載圧の8~10倍である。
- 2) 圧入圧力の増加に伴い、杭状体は膨張し、周辺地盤の水平応力は増加する。このとき、水平応力の増加は杭状体から離れるほど減少し、密度の小さな地盤の方が大きくなる。
- 3) 杭状体の膨張により、周辺地盤には正の体積ひずみ(圧縮)が生じ、縮固められる。正の体積ひずみは、相対密度が小さな地盤ほど生じやすく、また、杭状体に近いほど大きくなる。
- 4) 実験により得られた体積ひずみを用いて、空洞膨張理論による限界圧入圧と、実験値を比較すると、実験値の方がやや大きな値を示しているものの、比較的良好一致を示した。
- 5) 本実験において、入力定数を適切に決定すれば、空洞膨張理論を用いることにより、静的縮固めによる周辺地盤の応力状態の変化を説明できることがわかった。

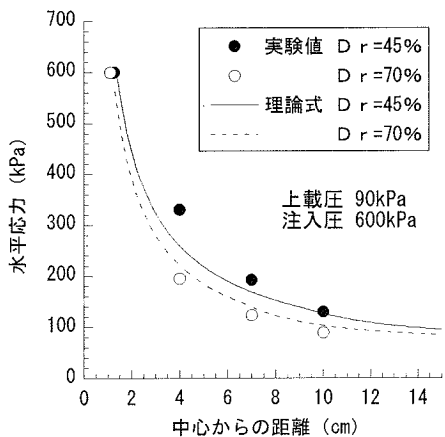
謝辞：本研究は、独立行政法人港湾空港技術研究所、みらい建設工業株式会社、三信建設工業株式会社との共同研究の一環として実施したものである。関係各位に謝意を表します。



(a) 上載圧 30kPa



(b) 上載圧 60kPa



(c) 上載圧 90kPa

図-13 理論式と実験結果による水平応力分布の比較

参考文献

- 1) 液状化対策の調査・設計から施工まで編集委員会：液状化対策の調査・設計から施工まで，地盤工学会，1993.
- 2) 山崎浩之，高橋邦夫，善功企，田居繁，中里高密：建設発生土を利用した静的締固め杭工法に関する現地実験，港湾技研資料，No.887，1997.
- 3) 原田健二，石田英毅：耐震補強としての締固め工法による液状化対策の現状，第4回耐震補強・耐震技術，耐震診断技術に関するシンポジウム，pp.71-78，2000.
- 4) 八木橋貢，松下信夫，山本良，菅野雄一，井上哲夫，小西武，足立雅樹，大沢一実：液状化対策としての施工事例，第4回地盤改良シンポジウム(大阪)，pp.149-154，2000.
- 5) Orence, R., Morita, Y. and Ide, M.: Compaction grouting of liquefiable soil under an existing structure - A case study, *Proc. Geo Eng. 2000, Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia*, paper No. GIGS-0329, 6 pp.(in CD ROM), 2000.
- 6) Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Yamamoto, M., Harada, K. and Yabe, H.: Soil Densification Due to Static Sand Pile Installation for Liquefaction Remediation, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 2, pp. 9-20, 2000.
- 7) 幸繁宜弘，本田周二，中村出，小澤良夫，軽部大蔵，飯塚敦：静的締固め砂杭の施工による周辺地盤変位に関する解析的検討，土木学会第56回年次学術講演会，pp.396-397，2001.
- 8) 安藤裕，山本実，原田健二，野津光夫：砂杭圧入による緩い砂質土の密度増大に関する一考察，第31回地盤工学研究発表会，pp.73-74，1996.
- 9) 大石富彦，福井芳樹，小澤和弘，遠藤信之，吉本憲正，前川太：砂礫の液状化特性における側方拘束圧依存性，第35回地盤工学研究発表会，pp.993-994，2000.
- 10) 菅沼史典，野津光夫，鶴野雅明：静的締固め砂杭工法施工時の変位予測，土木学会第52回年次学術講演会，pp.414-415，1997.
- 11) 浅岡颯，中野正樹，野田利弘，水野和憲，高稲敏浩，野津光夫，竹内秀克：水～土連成解析を用いた砂杭拡径による砂質地盤の締固め効果の解明，第34回地盤工学研究発表会，pp.1129-1130，1999.
- 12) Kovacevic, N., Potts, D. M. and Vaughan, P. R.: The effect of the development of undrained pore pressure on the efficiency of compaction grouting, *Geotechnique* 50, No.6, pp. 683-688, 2000.
- 13) 善功企，野上富治，松下信夫，山本良，滝昌和：コンパクショングラウチングの液状化対策効果，第35回地盤工学研究発表会，pp.2413-2414，2000.
- 14) 善功企，加藤久晶，宮間俊一，足立雅樹，大沢一実：コンパクショングラウチングの液状化対策効果(第2報)，第36回地盤工学研究発表会，pp.2223-2224，2001.
- 15) 原田健二，山本実，大林淳：静的締固め砂杭打設地盤の K_0 増加に関する一考察，土木学会第53回年次学術講演会，pp.544-545，1998.
- 16) Vesic, A. S.: Expansion of cavities in infinite soil mass, *J. Soil Mech. Fdn. Engrg. Am. Soc. Civ. Engrs* 98, SM3, pp. 265-290, 1972.
- 17) 支持力入門編集委員会：支持力入門，地盤工学会，1990.
- 18) 土の強さと地盤の破壊入門編集委員会：土の強さと地盤の破壊入門，地盤工学会，pp.64-70，1987.
- 19) 山崎浩之，新坂孝志，足立雅樹，大沢一実，善功企：コンパクショングラウチングのN値増加特性，第37回地盤工学研究発表会，pp.1123-1124，2002.

(2003.4.14 受付)

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE COMPACTION EFFECT OF STATIC GROUTING ON SAND

Takashi SHINSAKA, Kouki ZEN, Kazunobu SAKAMOTO
and Hiroyuki YAMAZAKI

This paper describes the compaction effect of static grouting. The static grouting is utilized as a countermeasure against liquefaction of sandy ground, in which columns of low flowability material, sand or gravel is installed into ground. In this study, a series of model tests on the static grouting was carried out in order to clarify mechanism of compaction by static grouting. Grouting pressure is needed to be increased for expansion of column. However, the results of model tests showed that grouting pressure has an upper limit and that columns expanded without increase of grouting pressure after the pressure had reached the upper limit. Furthermore, it was found that the value of the limit pressure depended on the overburden pressure and initial density of ground. These results and the change of stress state by installing columns are expressed by the theory of cavity expansion.