

砂地盤の静的締固め改良効果に関する円筒膨張実験

九州大学大学院

学生会員 ○坂本 一信

正会員 善 功企

正会員 陳 光育

正会員 笠間 清伸

1. 背景および目的

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、静的な繰返し圧により地盤中に砂杭等を増設し改良を行う。しかし、静的圧入による改良過程には不明な点が多く、合理的な施工を行うためには静的締固め機構の解明が必要である。本報告では静的締固めによる地盤中での杭の膨張を模型実験により再現し、注入圧、周辺地盤の増加応力および変位量の測定を行い、空洞膨張理論による理論解との比較を行った。

2. 実験方法

静的締固めにおいて注入した杭は円柱状に膨張すると仮定し模型実験を行った。実験装置を図-1 に示す。実験は以下の手順で行った。①実験装置に初期 $\phi 20\text{mm}$ の円筒膨張杭を設置する。②相対密度 40%の地盤を作成し、途中深さ 10cm 地点に土圧計、変位計を設置する。③地盤上部からエアバックにより 30kPa の上載圧をかける。④円筒杭上部から水压によって円筒を膨張させる。測定項目は、注入圧と円筒中心から円筒表面、4cm、7cm、10cm 地点の水平応力および変位とした。また、注入圧には 10kPa 毎 30 秒の定圧注入と、15 秒周期の繰返し圧注入（振幅 0～150、50～150、100～150kPa）を用いた。これは、実施工時の砂の注入がポンプにより繰返し注入となっている影響を考察するためである。

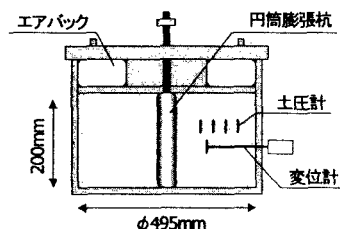


図-1 円筒膨張実験装置

3. 実験結果

図-2 に定圧注入時の初期半径と変位後の半径の比 r/r_0 と水平応力の関係を示した。円筒の膨張により周辺地盤の水平応力は同様の応力-ひずみ経路を通して増加していき、円筒からの距離の増加と共に増加する応力が小さくなる。また、地盤降伏後も地盤の密度が増加することによって支え得る応力が増加するため注入圧は徐々に増加していく。

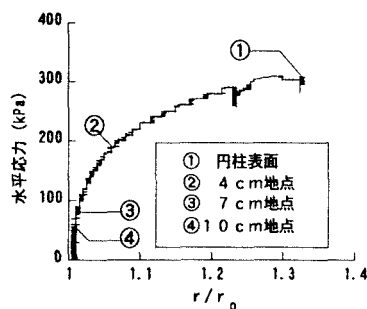


図-2 注入圧と r/r_0 の関係

図-3 に繰返し圧の最大値 (150kPa) と r/r_0 の関係を定圧注入の結果と共に示した。繰返し圧による円筒半径の増加は 0～150kPa の場合が突出して大きな値となり、注入圧 50～150、100～150kPa の場合は定圧注入時とほぼ同じで非常に小さい値となった。また、図-6 の繰返し圧の振幅と円筒半径の増加比の関係をみると、繰返し圧の最低値が 0 の時は繰返し回数に応じて大きな円筒膨張が発生しているのに対して、振幅 0、50、100kPa の場合は繰返し回数増加後も半径の変化が殆ど無かった。このことから繰返し圧による注入の影響は、最大圧ではなく除荷時に発生する最低圧によって決定されると言える。理由として繰返し圧の下限が小さい場合には、除荷の際に地盤が円筒側に崩れる主動破壊が発生するためだと考えられる。

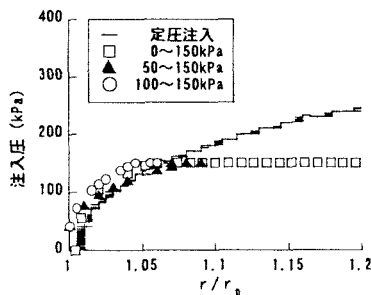


図-3 繰返し圧と r/r_0 の関係

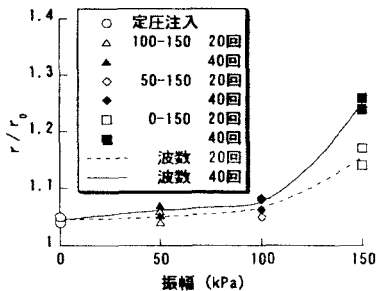


図-4 振幅と r/r_0 の関係

4. 理論的な考察

次に注入圧と地盤の応力増分および体積変化の関係を理論的に考察する。Vasic の空洞膨張理論¹⁾では円筒状の空洞膨張問題において以下のような関連付けがされている。

①円筒半径増加の比 R_u/R_i と注入圧 p_u に関して

$$\text{塑性域} \quad p_u = K_0 \sigma_v' (1 + \sin \phi) \left(\frac{R_p}{R_u} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}}, \quad p_u > K_0 \sigma_v' (1 + \sin \phi) \quad (a)$$

$$\text{弾性域} \quad p_u = \frac{E(1 - R_i/R_u)}{1 + \nu} + \sigma_v, \quad p_u < K_0 \sigma_v' (1 + \sin \phi) \quad (b)$$

$$\therefore R_u^2 - R_i^2 = R_p^2 - (R_p - u_p)^2 + (R_p^2 - R_u^2) \Delta_{av} \quad \therefore u_p = R_p (1 + \nu) (\sigma_v - \sigma_r) / E \quad (c)$$

②任意点 r と注入圧 p_u に関して

$$\text{塑性域} \quad \sigma_r = p_u \left(\frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \quad (d)$$

$$\text{弾性域} \quad \sigma_r = \sigma_0 + (\sigma_p - \sigma_0) \left(\frac{R_p}{r} \right)^2 \quad (e)$$

R_u : 円筒半径 R_i : 初期円筒半径 R_p : 弾塑性境界 u_p : 弾塑性境界の変位

σ_p : R_p での水平応力 E : 弾性係数 K_0 : 静止土圧係数 Δ_{av} : 塑性域平均体積ひずみ

式(a)(b)(c)を用いると、塑性域の体積ひずみ Δ_{av} の値によって R_u/R_i と注入圧 p_u の関係が得られ、実験結果と共に図-5に示した。定圧注入の場合は $\Delta_{av} = 0.1 \sim 0.25\%$ 付近の理論式と傾向が一致していることから、定圧注入では Δ_{av} が一定の値を保って円筒の膨張が進むと予想される。しかし、繰返し圧注入 $0 \sim 150\text{kPa}$ の場合は、定圧注入より低い注入圧で円筒半径が増加するため理論線には沿わず、 Δ_{av} が増加しながら注入が進み、図では最終的に $\Delta_{av} = 3\%$ 程度と一致した。よって繰返し圧による注入では定圧時より高い体積ひずみの発生が可能であり、逆にその分塑性化される範囲は小さいと考えられる。

次に、式(d)(e)から、実験値より得られた注入圧 150kPa とその時の円筒半径（繰返し圧では繰返し波数 20、40 回時の半径）を用いて距離と水平応力の関係を求め図-6に示した。この図に、理論と同条件での実験結果をプロットし比較すると、定圧注入の結果は理論線と良く一致した。これに対して、繰返し圧 $0 \sim 150\text{kPa}$ の結果は中心に近いほど理論線より大きな水平応力となりその誤差も大きくなっている。これは、空洞膨張理論が地盤材料を一様としていることに起因していると考えられ、繰返し注入による地盤改良では、円筒近傍の地盤の体積ひずみが非常に大きく発生していることが分かる。また、図-5 から得られた Δ_{av} と式(c)から求めた R_p から繰返し圧の方が定圧よりも小さな塑性域半径となると言える。この注入方法の違いによる体積ひずみと影響区間の違いを利用することによって、施工でより均質に体積ひずみを発生させる理想的な杭ピッチおよび注入方法が決定できる可能性がある。

5. 結論

- ・ 繰返し圧の影響は最低圧が十分に低い場合に現れ、最大圧が同じ定圧注入より非常に高い注入量となる。
- ・ 定圧注入と繰返し圧注入の効果を比較すると、繰返し圧の方が円筒近くの体積ひずみが大きく影響範囲は狭いと考えられる。
- ・ 注入圧による改良範囲の違いを利用して、より均質な体積ひずみを発生させる理想的な杭ピッチおよび注入方法が決定できる可能性がある。

《参考文献》 1) Vesic, A.S (1972): expansion of cavities in infinite soil mass; ASCE Vol. 98, SM3, pp. 265-290.

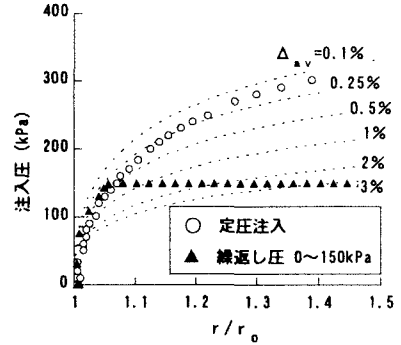


図-5 Δ_{av} の違いによる
注入圧 - r/r_0 の関係

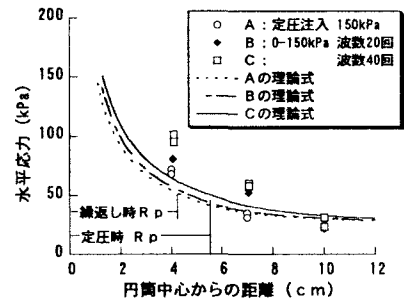


図-6 理論と実験値の
応力分布の比較