

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0525

考虑井周水泥土渗透系数变化的竖井地基固结研究

张晨豪^{1,2}, 邓岳保^{1,2*}, 周靓凤^{1,2}

(1. 宁波大学 滨海城市轨道交通协同创新中心, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波市能源地下结构重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 水泥土渗透特性对滨海软土地区植入式排水桩排水固结效果影响显著. 本文首先开展水泥土抽排水固结试验, 研究水泥土渗透系数随时间变化的性质; 然后假定水泥土为竖井地基涂抹区, 建立涂抹区渗透系数随时间呈指数衰减的固结方程, 得到真空负压下竖井固结解析解. 在此基础上, 分析水泥土固化影响因子 θ 、涂抹区径长 r_s 和涂抹区的初始渗透系数 k_{s0} 对软土地基固结性状的影响. 结果表明: 水泥土固化作用对固结速率影响显著, 水泥土的渗透性对桩周土体的固结效果起着控制作用; 随着 θ 变大, 桩侧土体固结效果逐渐减弱; r_s 越小, k_{s0} 越大, 桩周土体固结速率越快.

关键词: 渗透系数; 水泥土; 涂抹区; 固结; 超静孔压

中图分类号: TU470

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 06-0093-07

在竖井地基固结理论中, 通常将竖向排水井(塑料排水板)影响范围内的土体分为涂抹区和原状土区, 以考虑土体扰动对渗透系数的影响. Onoue等^[1]通过试验发现, 土体的渗透性随着远离排水体的径向距离而连续变化. 为此, 国内外学者围绕涂抹区渗透系数随径向变化的竖井地基固结理论开展了研究. Walker等^[2-3]基于试验假定涂抹区渗透系数呈抛物线衰减变化的非线性模型, 给出了相应的径向竖井固结解答; 同时还推导了涂抹区渗透系数沿径向呈线形变化, 并考虑涂抹区重叠的固结解答. 陈国红等^[4]推导了5种涂抹区渗透系数变化模式的竖井固结解答, 揭示了涂抹区渗透系数对竖井地基固结的影响. 江文豪等^[5]考虑渗透系数呈指数形式衰减的模式, 推导了考虑土体非线性固结特性和真空负压线形衰减的固结解析解. Kim等^[6]考虑涂抹区渗透系数随径向变化的3种模式, 推导了考虑井阻、非线性固结及时变附加荷载的固结解析解.

上述竖井地基固结理论都是考虑涂抹区渗透

系数随径向的变化, 而在实际工程中发现植入式排水桩桩周的水泥土类似于扰动后的土体, 水泥土的固化作用会使其渗透系数随时间变化^[7], 为此有必要开展相关的理论研究.

植入式排水桩技术是一种在东南沿海地区正在探索示范的新型桩基技术, 该技术先用螺旋喷浆搅拌形成水泥土桩孔, 然后在预制桩桩侧绑扎塑料排水板, 并通过桩身自重植入桩孔, 最后通过真空负压进行排水固结, 使桩周土体孔压下降, 提高软土强度以及桩侧摩阻力^[8-11]. 植入式排水桩的竖井排水固结加固效果与水泥土的渗透性密切相关, 水泥土可视为涂抹区土体. 对水泥土的渗透性研究发现, 水泥土渗透性会随时间快速下降, 呈现显著的非线性^[12-13]. 因此, 为分析塑料排水板的排水加固效果, 有必要考虑涂抹区渗透系数随时间变化对固结过程的影响.

本文首先基于真空负压抽排水试验, 研究水泥土渗透性随时间变化的性质; 然后将水泥土视为涂抹区, 考虑涂抹区渗透系数随时间变化的渗

收稿日期: 2023-05-26.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journallg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省基础公益研究计划(LGG21E080005); 宁波市“科技创新2025”重大专项(2023J004).

第一作者: 张晨豪(1999-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 主要研究方向: 软土地基与固结理论. E-mail: 780503443@qq.com

*通信作者: 邓岳保(1983-), 男, 湖南岳阳人, 博士/教授, 主要研究方向: 软土地基处理. E-mail: dengyuebao@nbu.edu.cn

透函数模型, 推导建立真空负压下的竖井固结理论解答; 最后通过研究解析解中水泥土固化影响因素、涂抹区径长和初始涂抹区渗透系数等因素的变化, 探讨涂抹区渗透性对地基固结特性变化规律的影响. 旨在为植入式排水桩工程应用提供理论指导, 丰富竖井地基排水固结理论.

1 水泥土抽排水试验

滨海软土地区的植入式排水桩如图 1 所示. 从图 1 可见, 在预制桩两侧对称绑扎塑料排水带作为排水通道, 随后利用桩体自重植入桩孔内, 然后通过真空泵抽排水产生的真空压力 p_0 对桩周土体进行固结, 从而达到地基改良的效果. 在植桩和排水固结过程中, 水泥土的固化作用与真空负压作用降低了水泥土的孔隙率和含水率, 使得桩侧水泥土的渗透系数相比临近土体要小, 类似受到扰动后土体的渗透性, 因此本文将水泥土区域视为涂抹区. 为了研究水泥土固化作用与真空负压作用对水泥土渗透性的影响, 开展了抽水水泥土和不抽水水泥土的对比试验.

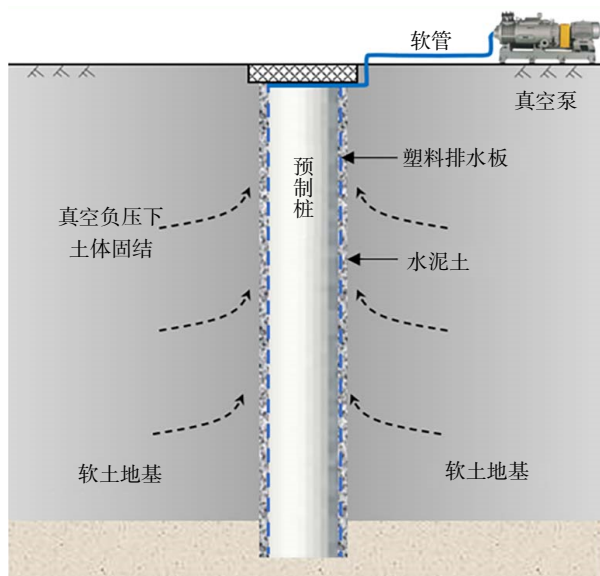
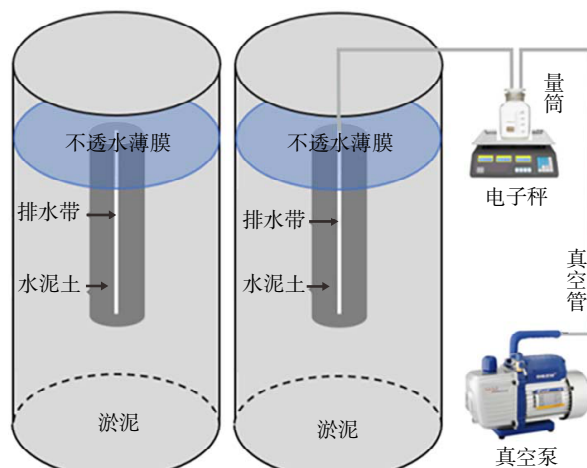


图1 植入式排水桩示意图

1.1 试验方案

图2为水泥土抽排水试验模型. 试验用土为宁波本地的淤泥质黏土(含水率 43.2%, 密度 $1.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 孔隙比 1.26, 压缩系数 0.82 MPa^{-1} , 液限 45.8%, 塑限 23.6%). 试验所用的水泥为普通硅酸盐水泥, 强度等级 32.5 MPa. 试验主要仪器为模型

桶、电子秤、量筒、真空泵和四轴变水头渗透仪(晟泰克智能仪器有限公司). 模型桶内径 0.5 m, 高 1.2 m. 塑料排水板选用 SPB-B 型号.



(a) 试验示意图



(b) 试验现场

图2 模型试验

1.2 试验步骤

(1)模型地基填筑. 黏土采用分层填筑压实方式进行填筑, 分3次填筑, 每次填筑深度 40 cm, 每层预压约 5 kPa, 至沉降稳定后再继续下一层填筑, 最后在地基顶部预压 5 kPa, 固结至沉降稳定.

(2)钻孔. 地基填筑完成后, 在模型地基中央插入 PVC 管(直径 0.11 m, 深 0.8 m)进行护壁, 以防止钻孔塌陷, 然后使用取土器将 PVC 管中的土体从中取出.

(3)水泥土制备. 取模型地基土烘干, 按照水泥、水、土质量比为 1:4:5 进行搅拌混合, 其间再加入一定比例的水; 然后将搅拌充分的水泥注入 PVC 孔洞, 在注入水泥土的同时将 PVC 套管缓慢

拔出。

(4)真空抽排水. 将真空泵、玻璃桶和排水板通过真空管密封连接, 然后把 0.8 m 长的塑料排水板插入抽排水组水泥土中, 最后在模型地基上部铺设密封膜, 保证整个系统的密闭性. 启动真空泵, 抽真空时长为 8 h, 抽真空完成后关闭真空泵。

(5)渗透试验. 试验仪器采用四轴变水头渗透仪, 试验步骤依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[14]. 渗透试验在抽排水过程完成后进行, 试样从水泥土中央向下 0.4 m 处选取。

1.3 试验结果

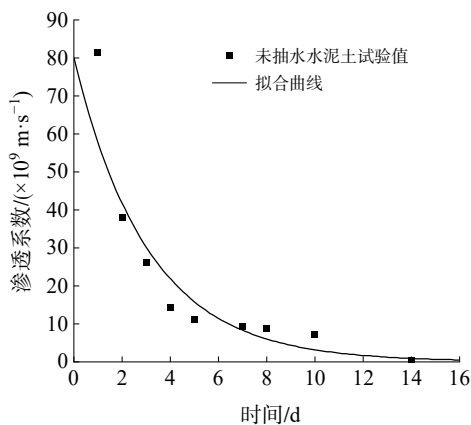
图 3 为水泥土渗透系数随龄期的变化曲线. 从图 3 可见, 水泥土的渗透系数随着水泥土的固化作用呈现下降趋势, 主要表现为未抽水的水泥土和抽水的水泥土渗透系数随着龄期的下降趋势基本一致, 呈现为前期下降显著, 中后期下降缓和的趋势. 此外, 真空抽排水对渗透系数的变化影响明显, 具体表现为: 未抽水水泥土的渗透系数在前 5 d 大幅下降, 第 7 d 后降低一个数量级; 抽水水泥土渗透系数在抽水前 2 d 大幅下降, 3 d 后降低一个数量级。

从试验结果可见, 水泥土的渗透性随龄期呈大幅变化, 这主要与水泥土本身的固化作用有关. 因此, 本文提出渗透系数随时间呈指数衰减的渗透函数, 其表达式为:

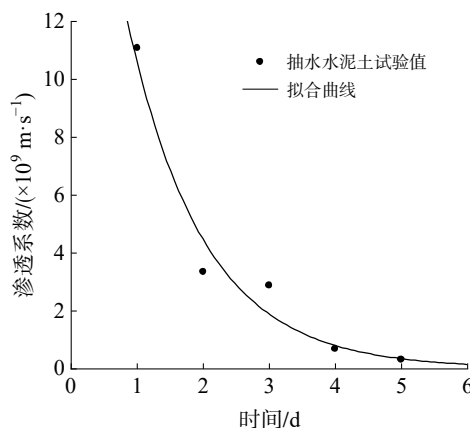
$$k_s(t) = k_{s0} e^{-\theta t}, \quad (1)$$

式中: $k_s(t)$ 为水泥土的渗透系数; k_{s0} 为水泥土初始渗透系数; θ 为水泥土固化影响因子(大于 0 常数)。

将本文提出的指数渗透函数与模型试验的渗透系数实测值进行拟合, 结果如图 3 所示。



(a) 未抽水水泥土



(b) 抽排水水泥土

图 3 水泥土渗透系数随龄期的变化

拟合得出未抽水水泥土的水泥土固化影响因子为 0.324 d^{-1} , R^2 为 0.892, 水泥土初始渗透系数为 $80.602 \times 10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 抽排水水泥土的水泥土固化影响因子为 0.863 d^{-1} , R^2 为 0.968, 水泥土初始渗透系数为 $20.52 \times 10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 由此可见真空抽排水会使影响因子变大. 从图 3 还可见, 实测结果与本文提出的指数渗透函数拟合较好, 验证了本文提出的指数渗透函数模型合理。

2 问题描述

2.1 物理模型与假设

竖向排水体沿着预制桩周对称布置, 取单侧塑料排水板作为单井地基进行分析. 单井地基固结模型主要包括塑料排水板、涂抹区(水泥土)以及原状土区 3 个部分. 假定原状土区的固结渗透为线性过程, 土体的渗透系数、压缩系数为常数. 水泥土的压缩性假设与土体一致, 但是渗透性随时间变化显著。

引入指数渗透函数 $k_s(t)$. 假定:

(1)土层均质、饱和, 满足等应变条件, 即水泥土和临近土体在同一水平面上的竖向变形相等。

(2)地基土(含水泥土)仅考虑径向排水。

(3)地基中的孔隙水渗流服从 Darcy 定律。

(4)不考虑塑料排水板的井阻效应。

单个塑料排水板排水固结模型如图 4 所示. 其中 l 为塑料排水板的长度, r_w 为排水体半径, r_s 为涂抹区半径, r_e 为影响区半径, r 和 z 分别为径向及竖向坐标, $k_s(t)$ 和 k_h 分别为涂抹区和原状土区的水平渗透系数。

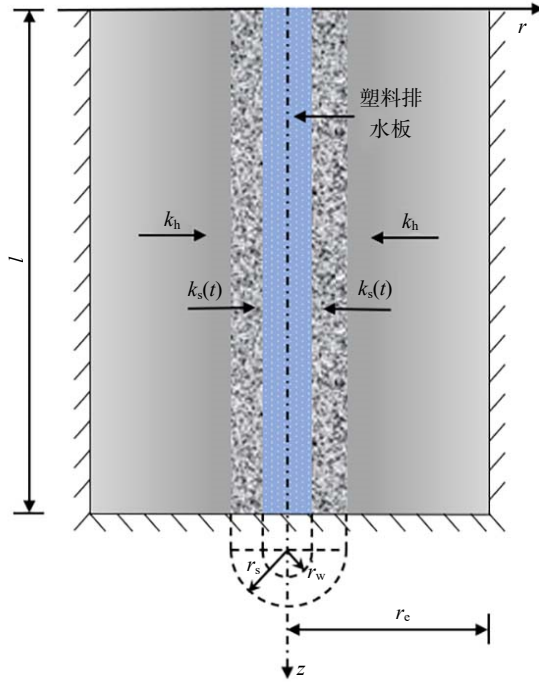


图4 竖井地基固结模型

2.2 固结基本方程及求解条件

根据文献[15]的等应变固结方程, 结合式(1)可以得到考虑涂抹区为指数渗透函数的径向地基固结方程为:

$$\begin{cases} \frac{k_{s0}e^{-\theta t}}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_s}{\partial r} \right) = -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}, & r_w \leq r \leq r_s, \\ \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_d}{\partial r} \right) = -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}, & r_s < r \leq r_e, \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -m_v \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}, \quad (3)$$

式中: γ_w 为水的容重; ε_v 为地基任一深度处的体积应变; m_v 为地基的体积压缩系数; t 为固结时间; $\bar{u}$ 为地基的平均超静孔隙水压力; u_s 和 u_d 分别为涂抹区和原状土区的超静孔隙水压力。

求解条件包括初始条件和边界条件, 具体为:

- (1) 当 $r = r_w$ 时, $u_s = -p_0$;
- (2) 当 $r = r_e$ 时, $\partial u_d / \partial r = 0$;
- (3) 当 $r = r_s$ 时, $u_d = u_s$;
- (4) 当 $t = 0$ 时, $\bar{u} = 0$ 。

3 固结微分方程及求解

对式(2)两边关于 r 求积分, 然后结合求解条件(2), 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_s}{\partial r} = \frac{\gamma_w}{2k_{s0}e^{-\theta t}} \left(\frac{r_e^2}{r} - r \right) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}, & r_w \leq r \leq r_s, \\ \frac{\partial u_d}{\partial r} = \frac{\gamma_w}{2k_h} \left(\frac{r_e^2}{r} - r \right) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}, & r_s < r \leq r_e. \end{cases} \quad (4)$$

地基任一深度处的平均孔压 $\bar{u}$ 可表示为:

$$\bar{u} = \frac{\int_{r_w}^{r_s} 2\pi r u_s dr + \int_{r_s}^{r_e} 2\pi r u_d dr}{\pi(r_e^2 - r_w^2)}. \quad (5)$$

对式(4)关于 r 积分, 并利用求解条件(1)和(3), 可得:

$$u_s = \frac{\gamma_w}{2k_{s0}e^{-\theta t}} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \left(r_e^2 \ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right) - p_0, \quad (6a)$$

$$u_d = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \left[\frac{\gamma_w}{2k_h} \left(r_e^2 \ln \frac{r}{r_s} - \frac{r^2 - r_s^2}{2} \right) + \frac{\gamma_w}{2k_{s0}e^{-\theta t}} \left(r_e^2 \ln \frac{r_s}{r_w} - \frac{r_s^2 - r_w^2}{2} \right) \right] - p_0. \quad (6b)$$

再将式(6a)和(6b)代入式(5), 积分可得:

$$\bar{u} = \frac{\gamma_w r_e^2 F_a}{2k_{s0}e^{-\theta t}} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} - p_0, \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} F_a = & \left(\frac{k_{s0}}{k_h} \ln \frac{n}{s} + \ln s - \frac{3}{4} \frac{k_{s0}}{k_h} \right) \frac{n^2}{n^2 - 1} + \\ & \frac{s^2}{n^2 - 1} \left(\frac{k_{s0}}{k_h} - 1 \right) \left(1 - \frac{s^2}{4n^2} \right) + \\ & \frac{1}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

计算中 k_h 取初始值 k_{h0} , n 为井阻比。其中

$$n = \frac{r_e}{r_w}, \quad s = \frac{r_s}{r_w}.$$

将式(3)代入式(7)得:

$$\bar{u} = -\frac{\gamma_w r_e^2 F_a m_v}{2k_{s0}} \frac{1}{e^{-\theta t}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - p_0. \quad (9)$$

结合求解条件(4)进行求解, 可得地基中平均超静孔压的表达式为:

$$\bar{u} = p_0 \left(e^{-(\lambda/\theta)(1-e^{-\theta t})} - 1 \right), \quad (10)$$

式中:

$$\lambda = \frac{2k_{s0}}{\gamma_w r_e^2 F_a m_v}. \quad (11)$$

将式(10)代入式(7)可得:

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{2k_{s0}e^{-\theta t}}{\gamma_w r_c^2 F_a} p_0 e^{-(\lambda/\theta)(1-e^{-\theta t})}. \quad (12)$$

将式(12)代入式(6),可得地基内任一点超静孔压的表达式.

涂抹区超静孔压为:

$$u_s = \frac{p_0}{F_a} \left(\ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2r_c^2} \right) e^{-(\lambda/\theta)(1-e^{-\theta t})} - p_0, \quad (13a)$$

原状土区超静孔压为:

$$u_d = \frac{p_0}{F_a} \left[\frac{k_{s0}e^{-\theta t}}{k_h} \left(\ln \frac{r}{r_s} - \frac{r^2 - r_s^2}{2r_c^2} \right) + \left(\ln \frac{r_s}{r_w} - \frac{r_s^2 - r_w^2}{2r_c^2} \right) \right] e^{-(\lambda/\theta)(1-e^{-\theta t})} - p_0, \quad (13b)$$

进而得到地基任一深度的径向固结度 U (按有效应力定义)为:

$$U = \frac{\bar{u}|_{t=0} - \bar{u}}{\bar{u}|_{t=0} - \bar{u}|_{t=\infty}} = 1 - e^{-(\lambda/\theta)(1-e^{-\theta t})}. \quad (14)$$

当不考虑水泥土的固化作用,即 $\theta \rightarrow 0$, $(1-e^{-\theta t})/\theta \rightarrow t$ 时,式(14)可以退化为无井阻真空负压情况下径向固结度的解答式,即文献[16]中的解答.

$$U = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (15)$$

4 计算分析

为了研究涂抹区相关参数对固结性状的影响,对水泥土固化影响因子、涂抹区径长和涂抹区初始渗透系数进行计算分析.利用本文提出的固结解答计算得到:真空压力为 90 kPa,塑料排水板尺寸宽度为 100 mm,厚度为 4 mm,采用 Hansbo 等效模型^[17],即 $r_w = (b + \delta)/\pi$, r_c 为 1.0 m, k_h 为 $1.0 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, k_{s0} 为 $5.0 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; m_v 为 0.5 MPa^{-1} , γ_w 为 $10 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$.

4.1 水泥土固化影响因子的影响

水泥土固化影响因子对涂抹区渗透系数的影响机理为水泥土的固化作用会降低水泥土的含水率和孔隙率,其主要作用是水泥和水之间的水化反应,其次是土和水泥水化物之间的物理化学反应.随着水泥土的固化作用,水泥土的渗透系数将显著降低,会影响桩周土体真空负压的传递,从而影响塑料排水带的排水固结效果.水泥土固化影响土体的固结速率,但桩侧水泥土强度会提高,临

近土体的排水固结会不断发展.

图 5 为不同水泥土固化影响因子相应的固结度变化曲线.从图 5 可见,水泥土固化影响因子对固结效果影响显著,主要表现在:(1)随着水泥土固化作用的增大(θ 值增大),水泥土的渗透性明显减弱,从而影响桩周土体的固结效果.(2)当固结时间在 1 d 内,地基固结速率的趋势较为接近,但当固结时间为 2 d 后,不同水泥土固化影响因子之间的固结速率差异明显.主要原因是:水泥土固化作用对固结速率影响敏感,当水泥土固化影响因子值足够大时,即涂抹区的渗透性极小时,真空负压不能及时从涂抹区传递到原状土区,此时涂抹区的渗透性对临近土体的固结效果起控制性作用.从图 5 还可见,当水泥土固化影响因子足够小时,计算得到的曲线规律与董志良^[16]解答的曲线规律一致,这进一步验证了本文固结解析解的正确性.

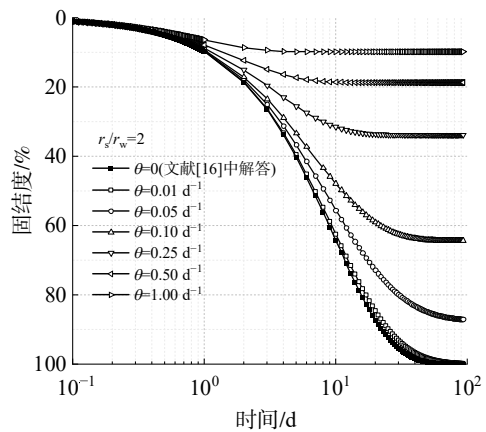


图 5 不同水泥土固化影响因子对固结度的影响

图 6 为固结时间 2 d 时,水泥土固化影响因子与径向超静孔压水力的关系($\kappa = (r - r_w)/r_c$).

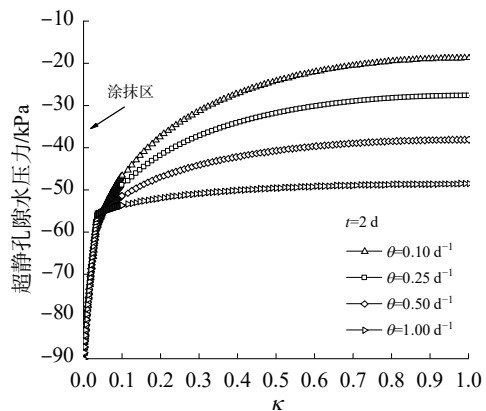


图 6 $t=2 \text{ d}$ 时孔压沿径向的传递曲线

从图6可见,涂抹区超静孔压的变化尤为显著,其变化速率随水泥土固化影响因子的增大而增大;而原状土区超静孔压的变化相对缓和,其变化速率随水泥土固化影响因子的增大而减小.主要原因是水泥土渗透系数小于土体渗透系数,使得真空负压传递过程受阻;随着水泥土固化影响因子值的增大,真空负压传递衰减更加明显,这也从侧面体现了涂抹区渗透性对固结的重要性.

4.2 涂抹区径长的影响

本文涂抹区径长取决于水泥土的壁厚,这主要与植入桩施工的工法有关,不同的植入桩施工工法对应不同的水泥土壁厚.图7为不同涂抹区径长相应的固结度变化曲线.

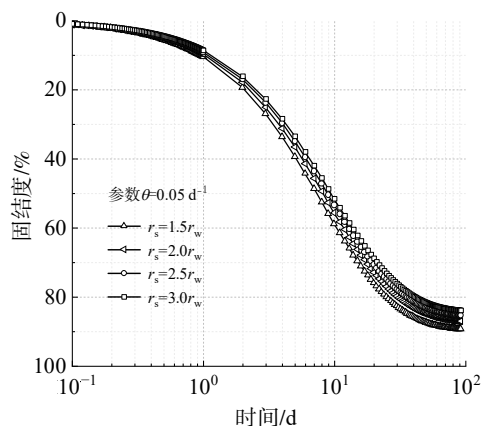


图7 不同涂抹区径长的固结度曲线

从图7可见,涂抹区径长的大小会对地基的固结速率产生影响,涂抹区径长越小,固结速率越大,从而桩周土体达到的固结效果也越显著.由此可见,在注浆搅拌过程中形成的水泥浆护壁厚度会对地基固结速率产生影响.

4.3 初始渗透系数的影响

在多数情况下,涂抹区的初始渗透系数与地基土的渗透特性相关^[7].地基土的渗透性越好,涂抹区的初始渗透系数越大.以东南沿海地区广泛分布的深厚软黏土为例,其渗透性与砂土和淤泥土相比较差,一般在 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间.因此,软黏土与水泥搅拌而成的水泥土的渗透性也将低于砂土和淤泥土搅拌而成的水泥土的渗透性.

图8为不同涂抹区初始渗透系数的固结度曲线.从图8可见,涂抹区的初始渗透系数减小会显著降低地基的固结速率,且随着初始渗透系数的

减小,地基的固结速率也会逐渐减弱,最后使得地基达到预期固结效果的时间变长.

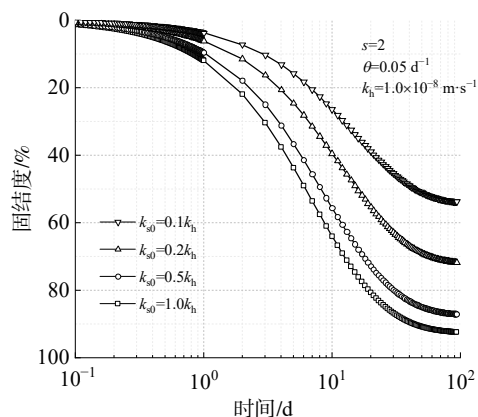


图8 不同初始渗透系数的固结度曲线

5 结语

(1)针对水泥土固化作用对竖井地基排水固结的影响,开展水泥土抽排水试验,研究水泥土的渗透性随时间的变化规律.将水泥土视为涂抹区,推导出考虑涂抹区渗透系数随时间呈指数变化的竖井地基固结控制方程,且获得了相应的解析解答.

(2)计算结果表明,随着水泥土固化影响因子的增大,竖井地基的固结速率变慢,水泥土固化影响因子的大小对桩周土体的固结效果起控制性作用.涂抹区初始渗透系数的减小会显著降低固结速率,而涂抹区径长的减小会提高固结速率.

(3)不考虑涂抹区水泥土的固化作用会高估竖井地基的固结速率.植入式排水桩的水泥土在固化作用下,其渗透系数快速下降,对塑料排水板排水固结影响显著.理论与试验测试结果均表明,真空负压抽排水时间控制在5d内较合适.

参考文献:

- [1] Onoue A, Ting N H, Germaine J T, et al. Permeability of disturbed zone around vertical drains[C]//Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Congress, ASCE Geotechnical Special Publication, 1991:879-890.
- [2] Walker R, Indraratna B. Vertical drain consolidation with parabolic distribution of permeability in smear zone[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(7):937-941.
- [3] Walker R, Indraratna B. Vertical drain consolidation with overlapping smear zones[J]. Géotechnique, 2007, 57(5): 937-941.

- 463-467.
- [4] 陈国红, 谢康和, 程永峰, 等. 考虑涂抹区渗透系数变化的砂井地基固结解[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(4):665-670.
- [5] 江文豪, 詹良通. 真空联合堆载预压下基于指数形式渗流的砂井地基非线性固结解[J]. 工程力学, 2021, 38(2):69-76; 133.
- [6] Kim P, Kim T C, Kim Y G, et al. Nonlinear consolidation analysis of soft soil with vertical drains considering well resistance and smear effect under cyclic loadings[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(5):1440-1446.
- [7] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5):549-554.
- [8] 张日红, 吴磊磊, 孔清华. 静钻根植桩基础研究与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2):1200-1203.
- [9] 邓岳保, 张日红, 孙嘉烽, 等. 静钻根植排水桩技术及模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8):293-302.
- [10] 孙嘉烽, 邓岳保, 邵飞瑜, 等. 静钻根植排水桩承载特性数值分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2023, 36(2): 67-72.
- [11] 陈紫强, 邓岳保, 孙嘉烽, 等. 抽排水时间对静钻根植排水桩承载特性的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3):112-116.
- [12] 朱崇辉, 王增红. 水泥土渗透系数变化规律试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(7):59-63.
- [13] 焦德才, 杨俊杰, 董猛荣, 等. 水泥土的长期渗透特性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(2): 112-118.
- [14] GB/T 50123—2019. 土工试验方法标准[S].
- [15] 谢康和, 曾国熙. 等应变条件下的砂井地基固结解析理论[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(2):3-17.
- [16] 董志良. 堆载及真空预压砂井地基固结解析理论[J]. 水运工程, 1992(9):1-7.
- [17] Hansbo S. Consolidation of clay by bandshaped prefabricated drains[J]. Ground Engineering, 1979, 12(5): 16-18.

Consolidation research of vertical drains foundation considering the variation of permeability coefficient of cemented soil around the well

ZHANG Chenhao^{1,2}, DENG Yuebao^{1,2}, ZHOU Liangfeng^{1,2}

(1.Collaborative Innovation Center of Coastal Urban Rail Transit, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Key Laboratory of Energy Geostructure, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The influence of cement soil permeability characteristics on the drainage consolidation effect of implanted drainage piles in coastal soft soil areas is significant. Firstly, a hydraulic soil pumping and drainage consolidation test was carried out to study the nature of the hydraulic soil permeability coefficient with time. Then the hydraulic soil was assumed to be the coated area of the vertical drain foundation, and the consolidation equation with exponential decay of the permeability coefficient in the coated area with time was established to obtain the analytical solution of vertical drains consolidation under negative vacuum pressure. On this basis, the effects of the cementing influence factor θ , the diameter length r_s of the smear zone and the initial permeability coefficient k_{s0} of the smear zone on the consolidation properties of the soft ground foundation were analyzed. The results show that the cementation effect on consolidation rate is significant, and the permeability of the cement plays a controlling role in the consolidation effect of the soil around the pile; as θ becomes larger, the consolidation effect of the soil on the pile side gradually decreases; the smaller the diameter length r_s of the smear zone and the larger the initial permeability coefficient k_{s0} , the faster the consolidation rate of the soil around the pile.

Key words: permeability coefficient; cement soil; smear zone; consolidation; excess pore water pressure

(责任编辑 史小丽)