

排水管桩沉桩后桩周土体固结解析解

陈俊博¹, 张 弦²

(1. 郑州信息科技职业学院 基建处, 河南 郑州 450046; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 排水管桩的概念渐渐被工程界熟知, 是软基处理的一种新思路. 结合排水管桩的特点, 推导出沉桩后桩周土体内的孔压和固结度解答. 并根据所得解答, 对沉桩后桩周土体内的超孔隙水压力的消散特性进行分析. 结果表明: 距桩体较近处的超孔隙水直接沿着排水桩排出, 而距离桩体较远处的超孔隙水先流向弹性低压区, 再转头流向排水桩排出. 随着开孔率 β 的增加, 孔压的消散变快. 当 β 超过 10^{-7} 时, 继续增大其值对加快孔压消散的效果不明显.

关键词: 排水管桩, 固结, 孔压, 固结度, 开孔率

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)05-0636-07

Analytical solution of soil consolidation around drainage pipe pile after pile driving

CHEN Junbo¹, ZHANG Xian²

(1. Zhengzhou Vocational University of Information and Technology, Zhengzhou 450046, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The concept of drainage pipe pile, which is a new idea of soft foundation treatment, is gradually known by the engineering field. By considering the characteristics of the drainage pipe pile, the solution of pore pressure and consolidation degree in the soil around the pile after pile driving is derived. According to the obtained solution, the dissipation characteristics of excess pore water pressure in the soil around the pile after pile driving are analyzed. The results show that the excess pore water near the pile is directly discharged along the drainage pile, while that far away from the pile first flows to the elastic low-pressure zone, and then turns to the drainage pile. With the increase of opening ratio β , the pore pressure dissipates faster, and when β exceeds 10^{-7} , the increase of the opening ratio has little impact on the dissipation of the excess pore-water pressure.

Key words: drainage pipe pile, consolidation, pore pressure, consolidation degree, opening ratio

复合地基是一种有效的软土地基处理手段, 其中预制刚性桩在沉桩过程中由于挤土效应, 会在桩周土体内产生不可忽视的超静孔隙水压力, 若此超孔隙水压力不能及时排出, 可能会造成土体的抗剪强度降低、邻桩的上浮或偏移、降低桩基承载力等有害影响^[1-6]. 为探究沉桩后桩周土体的孔压分布情况以及消散规律, Randolph 等^[7,8]基于圆孔扩张理论, 先后应用理想弹塑性模型和修正剑桥模型推导出沉桩后桩周土体内的初始孔压分布情况, 并根据径向固结理论求解得出超孔压的消散解答. 之后, 通过考虑不同的土体特性以及桩周土体的扰动特性等因素, 许多学者^[9-14]针对沉桩后桩周土的固结特性展开了大量研究.

随着桩基础使用的日益频繁, 加快沉桩后桩周

土体内由于挤土效应引起的超孔压的消散成为该领域一个重要问题. 针对此问题, 工程中常采用刚性桩与具有透水性的散体桩以及排水竖井联合使用, 用于加速沉桩后超孔隙水压力的排出^[15-19], 以加快地基承载力的发挥. 近年, 一种排水管桩的概念逐步被工程界熟知, 其集排水和承载于一体, 是软基处理的一种新方法. 史美东等^[20]提出一种砂衬混凝土桩, 并通过实例分析了这种桩型在提高承载力方面具有明显优势. 周小鹏和梅国雄^[21]提出一种桩身设有排水孔的主动式排水静压管桩, 并对其进行了有限元模拟. 基于此, 黄勇等^[22-23]先后开展了室内模型试验, 分别探究了单桩和群桩的孔压消散规律. Ni 等^[24-25]也对这种排水管桩开展了系列研究, 总结得出排水管桩的压缩特性和加固效果. 唐晓武等^[26]

收稿日期: 2020-08-02 修改稿日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51779183)

第一作者: 陈俊博(1979—), 女, 工学硕士, 讲师, 从事建筑工程施工管理和建筑工程施工技术研究. E-mail: t319796173@126.com

提出一种能排水并增大摩阻力的预制管桩, 并推导出相应复合地基在加载后的固结解析解。以上关于排水管桩的研究, 多是从数值模拟和室内模型试验两方面开展, 而关于沉桩后到施加上部荷载之前这段时间内, 桩周土体的消散解析解方面的研究却鲜有报道。

本文结合排水管桩的特点, 采用半透水边界条件模拟桩-土界面的边界排水特性, 基于径向固结理论, 针对沉桩后桩周土体的排水固结进行解答。并根据所得解答, 对沉桩后桩周土体内的超孔隙水压力的消散特性进行分析。

1 孔压消散模型的建立

1.1 排水管桩等效渗透系数

图1为排水管桩地基固结示意图, r_a 为管桩内半径, r_b 为管桩外半径, r_p 为由于沉桩引起的塑性区半径, r_e 为单桩排水影响区域半径, 本文用半透水边界模拟桩-土界面的透水特性。

相对于整个桩体而言, 桩体上设置的径向排水通道可以视为一微小圆管, 半径为 R 。根据 Hagen-Poiseuille 定律, 可假设微小圆管横截面上的流速 $v_w(r)$ 呈抛物线分布, 管流的水力梯度为 i , 如图2所示。

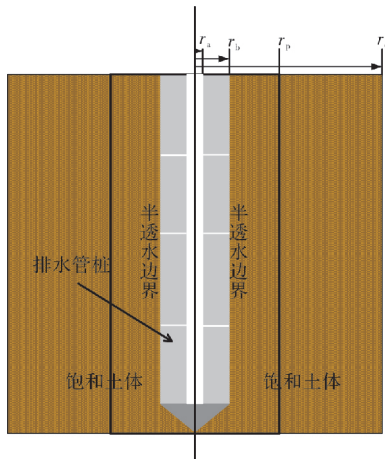


图1 排水管桩地基排水固结模型

Fig. 1 Drainage consolidation model of drainage pipe pile foundation

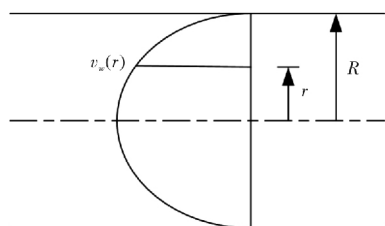


图2 排水孔内渗流示意图

Fig. 2 Diagram of seepage in drainage hole

根据能量守恒原理, 可得到管内平均流速为

$$\bar{v}_d = \frac{\gamma_w R^2}{8\eta} i \quad (1)$$

式中: R 为排水通道的半径, η 为孔隙水的动力粘滞系数。

若设桩体的平均径向渗流流速为 \bar{v} , 桩体的外表面积为 S , 排水孔在桩身开口的总面积为 S_d 。由于单位时间内通过桩体的总流量等于通过排水孔的总流量, 即 $\bar{v}_d S_d = \bar{v} S$, 故可得到桩体的平均渗流流速为

$$\bar{v} = \beta \frac{\gamma_w R^2}{8\eta} i \quad (2)$$

其中, $\beta = \frac{S_d}{S}$, 定义为排水桩的开孔率。

若将桩体等效为渗透系数为 k_p 的透水介质, 结合达西定律即可得到桩体的等效渗透系数为

$$k_p = \frac{\beta \gamma_w R^2}{8\eta} \quad (3)$$

在排水孔沿桩体纵向等间距均匀布置的情况下, 纵向布孔间距为 d , 布孔列数为 n_d , 排水孔半径为 R , 则对应的开孔率可表示为

$$\beta = \frac{n_d R^2}{(r_a + r_b) d} \quad (4)$$

1.2 控制方程的建立

基本假设:

- (1) 仅考虑径向渗流, 且满足达西定律;
- (2) 沉桩后土体固结看作是土骨架的弹性位移过程, 且总应力保持不变;
- (3) 假设排水管桩的排水孔在打设过程中处于关闭状态, 打设完成后打开。

根据平面应变问题的弹性应力应变关系得

$$\epsilon_r = -\frac{\partial \xi}{\partial r} = \frac{1}{2G} [(1-\mu)\delta\sigma'_r - \nu\delta\sigma'_\theta] \quad (5)$$

$$\epsilon_\theta = -\frac{\xi}{r} = \frac{1}{2G} [(1-\mu)\delta\sigma'_\theta - \nu\delta\sigma'_r] \quad (6)$$

$$\epsilon_z = 0 \quad (7)$$

式中: ξ 为桩周土中任意一点的位移, 以桩外侧为正; G 为土体的剪切模量; μ 为土体的泊松比; ϵ_r 、 ϵ_θ 和 ϵ_z 分别为土体的径向、环向和竖向的应变; $\delta\sigma'_r$ 、 $\delta\sigma'_\theta$ 分别为土体径向和环向的有效应力变化量。

土体的体积应变为

$$\epsilon_v = \epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z \quad (7)$$

根据有效应力原理, 可得土体中总应力的变化量为

$$\delta\sigma_r = \delta\sigma'_r + u \quad (8)$$

$$\delta\sigma_\theta = \delta\sigma'_\theta + u \quad (9)$$

土体径向平衡条件:

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\delta\sigma_r) - \delta\sigma_\theta = 0 \quad (10)$$

综上, 可得

$$\epsilon_v = -\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)G}u \quad (11)$$

由渗流连续性可得

$$\frac{\partial\epsilon_v}{\partial t} = -\frac{k_s}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (12)$$

所以, 可得到沉桩后桩周土体的固结控制方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (13)$$

$$\text{其中, } C_h = \frac{2k_s G(1-\mu)}{\gamma_w(1-2\mu)}.$$

1.3 初始条件

假设在沉桩过程中, 土体发生的是不排水剪切, 且服从 Tresca 屈服准则. 根据经典的圆柱形扩张理论, 并结合 Henkel 孔压公式可得出沉桩后桩周土体的超孔隙水压力的初始分布为^[7]

$$u_0(r) = \begin{cases} 2c_u \ln(r_p/r) + c_u(1.73A - 0.58) & r_b \leq r \leq r_p \\ c_u(1.73A - 0.58)(r_p/r)^2 & r_p \leq r \leq R_e \end{cases}$$

$$\text{其中, } r_p = r_b \sqrt{G/c_u}. \quad (14)$$

式中: c_u 为不排水剪切强度; G 为剪切模量; r_p 和 R_e 分别为沉桩所引起的塑性区和影响区的半径; A 为 Skempton 孔压系数.

1.4 边界条件

目前, 在单桩桩周土体的固结计算中, 都假设了 $r=R_e$ 处的外边界孔压始终为零, 即外边界为完全排水边界. 根据初始条件可以看出, 在距离桩体较远处的位置, 由沉桩引起的初始孔压趋近于零, 桩周土体内具有两条水平排水路径(分别向内或者向外). 所以, 对于单桩而言, 将外边界视为完全排水边界是合理的. 但对于群桩而言(如图3所示), 在邻桩的排水影响下, 桩周土体内的空隙水仅能通过桩体排出, 根据排水的对称性可将外边界视为不排水边界.

根据以上分析, 在如图所示的布桩形式下, 单桩沉桩的影响区域的半径为 R_e , 其排水区域的等效半径为 r_e . 当 r_e 小于 R_e 时, 桩周土体固结计算模型中的外边界条件为

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=r_e} = 0 \quad (15)$$

其中, 根据面积等效原理, 桩距为 D , 等效半径为

$$r_e = \frac{D}{\sqrt{\pi}} \quad (16)$$

当 r_e 大于 R_e 时, 桩周土体的外边界条件可

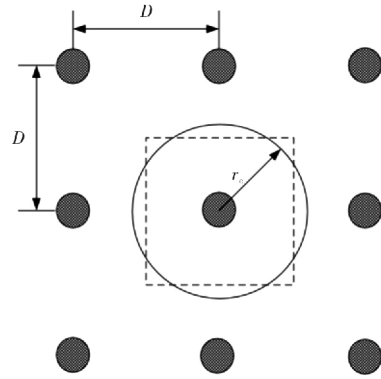


图3 排水管桩排布

Fig. 3 Installation pattern of the drainage pipe piles

视为

$$u(R_e) = 0 \quad (17)$$

其中, R_e 可取 $5 \sim 10r_p$ ^[7], 本文将初始孔压为 1 kPa 的位置视为完全排水边界, 根据初始条件可得

$$R_e = r_b \sqrt{G(1.73A - 0.58)} \quad (18)$$

对于刚性桩体而言, 在排水过程中桩体的体积不发生变化, 应变为零, 则

$$-\frac{k_p}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_p}{\partial r} \right) = 0 \quad r_a \leq r \leq r_b \quad (19)$$

其中, k_p 为桩体的等效径向渗透系数, u_p 为桩体内的孔压.

由于透水桩体内部设置的竖向排水通道无填充, 且与地面大气相通, 故可将其中的超孔隙水压力视为恒为零, 即

$$u_p(r_a) = 0 \quad (20)$$

结合以上两式, 积分可得

$$u_p(r) = \frac{\ln(r/r_a)}{\ln(r_b/r_a)} u_p(r_b) \quad (21)$$

在桩-土界面处($r=r_b$), 由渗流连续性可得

$$u_p(r_b) = u(r_b) \quad (22)$$

$$\left. \frac{k_p}{\gamma_w} \frac{\partial u_p}{\partial r} \right|_{r=r_b} = \left. \frac{k_s}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=r_b} \quad (23)$$

式中: k_s 为桩周土体的径向渗透系数.

进一步, 整理可得出桩-土界面处的边界条件:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + Hu = 0 \quad r=r_b \quad (24)$$

$$\text{其中, } H = -\frac{k_p}{k_s r_b \ln(r_b/r_a)}.$$

2 孔压解析解的推导

采用分离变量法, 令

$$u(r, t) = w(r)T(t) \quad (25)$$

则

$$\frac{T'(t)}{T(t)} = C_h \frac{r^2 w'''(r) + r w'(r)}{r^2 w(r)} = -\alpha_n^2 \quad (26)$$

令 $\lambda_n = \frac{\alpha_n^2}{C_h}$, 进而得

$$T'(t) = C_h \lambda_n^2 T(t) = 0 \quad (27)$$

$$r^2 w''(r) + r w'(r) + \lambda_n^2 r^2 w(r) = 0 \quad (28)$$

由此, 可得

$$T_n(t) = C_n e^{-C_h \lambda_n^2 t} \quad (29)$$

$$w_n(r) = A_n J_0(\lambda_n r) + B_n Y_0(\lambda_n r) \quad (30)$$

当 r_e 小于 R_e 时, 将式(30)代入外边界条件(式(15))中得

$$B_n = -\frac{J_1(\lambda_n r_e)}{Y_1(\lambda_n r_e)} A_n \quad (31)$$

若令

$$V_i(\lambda_n r) = J_i(\lambda_n r) - \frac{J_1(\lambda_n r_e)}{Y_1(\lambda_n r_e)} Y_i(\lambda_n r) \quad (32)$$

当 r_e 大于 R_e 时, 外边界为完全排水边界条件, 将式(30)代入外边界条件(式(17))中得

$$B_n = -\frac{J_0(\lambda_n R_e)}{Y_0(\lambda_n R_e)} A_n \quad (33)$$

$$V_i(\lambda_n r) = J_i(\lambda_n r) - \frac{J_0(\lambda_n R_e)}{Y_0(\lambda_n R_e)} Y_i(\lambda_n r) \quad (34)$$

则

$$w_n(r) = A_n V_0(\lambda_n r) \quad (35)$$

将桩-土界面($r=r_b$)处的半透水边界条件得

$$\lambda_n V_1(\lambda_n r_b) - H V_0(\lambda_n r_b) = 0 \quad (36)$$

$$U(t) = 1 - \frac{\int_0^L \int_{r_b}^{r_e} 2\pi r u \, dr \, dz}{\int_0^L \int_{r_b}^{r_e} 2\pi r u_0(r) \, dr \, dz} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\lambda_n} [r_e V_1(\lambda_n r_e) - r_b V_1(\lambda_n r_b)] e^{-C_h \lambda_n^2 t}}{c_u \left[\frac{1}{2} (r_p^2 - r_b^2) - r_b^2 \ln \frac{r_p}{r_b} \right] + c_u (1.73A - 0.58) \left[\frac{1}{2} (r_p^2 - r_b^2) - r_p^2 \ln \frac{r_e}{r_p} \right]} \quad (41)$$

3 桩周土孔压消散特性分析

根据上文解答, 探究沉桩后桩周土体内的孔隙水压力消散特性, 土体基准参数和透水管桩的基准参数分别如表1和表2所示. 在下文的参数分析过程中, 改变所分析参数的值, 其余参数保持基准取值不变.

表1 土体基准参数

Tab. 1 Basic parameters of soil

E/kPa	μ	c_u/kPa	$k_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A
2×10^3	0.35	25	10^{-9}	0.85

表2 透水管桩基准参数

Tab. 2 Basic parameters of the permeable pipe pile

r_a/cm	r_b/cm	D/m	β	R/cm
2	25	3	10^{-4}	0.1

3.1 收敛性验证

通过由本文所得解答计算的初始孔压(式

通过此方程(式(36)), 可解得对应的本征值 λ_n , 且有无数解.

综上, 可得

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} A_n V_0(\lambda_n r) e^{-C_h \lambda_n^2 t} \quad (37)$$

由此, 初始时刻桩周土内孔压为

$$u_0(r) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n V_0(\lambda_n r) \quad (38)$$

由于 Bessel 函数系 $\{V_0(\lambda_n r)\}$ 在 $[0, r_b]$ 和 $[0, r_e]$ 上满足带权重 r 的正交性, 可得

$$\int_{r_b}^{r_e} r u_0(r) V_0(\lambda_n r) \, dr = A_n \left[\frac{1}{2} r_e^2 V_0^2(\lambda_n r_e) - \frac{1}{2} \left(\frac{H^2}{\lambda_n^2} + 1 \right) r_b^2 V_b^2(\lambda_n r_b) \right] \quad (39)$$

将初始条件(式(14))以及求得的本征值 λ_n 代入上式中可得到相应的 A_n , 从而可计算出沉桩后桩周土体在任意位置、任意时刻的超孔隙水压力, 通过 MATLAB 编程实现计算.

定义桩周土体任意位置处的固结度为

$$U_r = 1 - \frac{u(r, t)}{u_0(r)} \quad (40)$$

为研究桩周土体的总体固结情况, 定义土体的固结度 $U(t)$ 为

(38))与由小孔扩张理论中所得的初始条件(式(14))中的初始孔压进行对比, 以验证级数项数 N 取到一定值时, 本文解答的计算结果能够收敛. 如图4所示, 当级数项数取不同值时, 计算所得初始孔压分布曲线的波动程度不同. 当 $N=10$ 时, 计算的初始孔压分布曲线波动十分明显, 随着级数项数逐渐增大, 波动逐渐集中在桩壁附近, 并且桩壁孔压与初始条件逐渐接近. 可以看出, 当 N 取 10^4 时, 计算所得初始孔压与初始条件给出的初始孔压基本吻合, 当 N 取 10^3 时, 仅在桩壁处存在微小波动. 所以, 在计算桩周土体孔压时, 当 $r > 1.5 r_b$ 时, 级数项数取到 10^3 左右即可.

图5为不同级数项数 N 下的平均固结度曲线, 从中可以看出, 当级数项数取1时, 计算所得固结度偏小, 当级数项数取10以上, 计算所得平均固结度曲线完全重合. 因此, 在计算平均固结度时, 级数项数取到10即可.

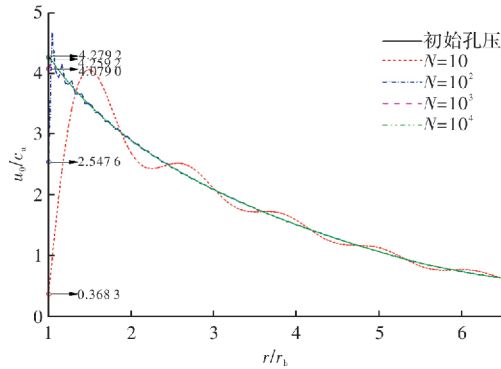


图4 不同级数项数下的初始孔压分布

Fig. 4 Distribution of the initial excess pore-water pressure for different numbers of the series term

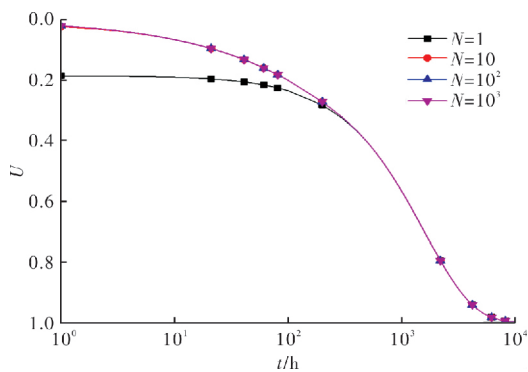


图5 不同级数项数下的平均固结度

Fig. 5 Average degree of consolidation for different numbers of the series term

3.2 桩周土内孔压随时间的变化

如图6所示,沉桩后某一时刻桩周土体内的孔压沿着径向呈现出先增后减的趋势.随着固结时间的增长,平均孔压逐渐减小.同时,在离桩体较远处,随着固结时间的增长,孔压较初始值先增大再减小.这是由于土体内的孔压在初始时刻就存在沿径向的梯度,开始排水后,离桩体较远处的孔隙水压力先进行平衡(从低压处向高压处流动),然后再向排水边界流动.图7为沉桩后桩周土内不同位置的固结度曲线,从其中可看出,在距离桩体较远处的固结度出现负值,说明此处的孔压会大于初始值,而在距离桩体较近处,这种现象较不明显.进一步分析可得,由于沉桩后的初始孔压分布存在一定梯度,且桩壁处的孔压最大,沿着径向逐渐减小,所以造成沉桩后桩周土体内的渗流路径是:距桩体较近处的超孔隙水直接沿着排水桩排出,而距离桩体较远处的超孔隙水先流向弹性低压区,再转头流向排水桩排出.

3.3 开孔率对桩周土体固结的影响

图8表示不同开口率下的平均固结度曲线,从

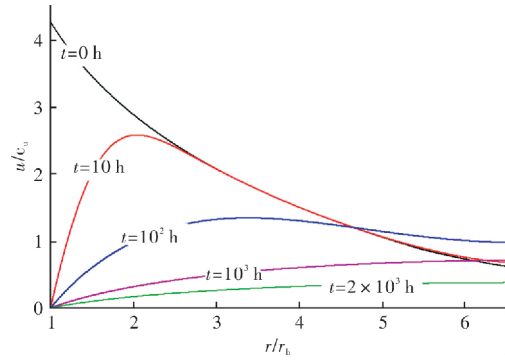


图6 不同固结时间下的孔压分布曲线

Fig. 6 Pore pressure distribution curve under different consolidation time

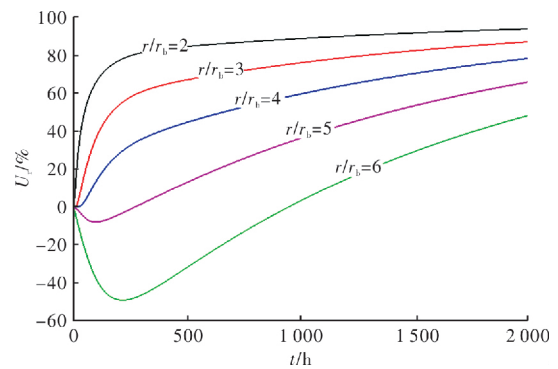


图7 不同位置处的固结度曲线

Fig. 7 Curve of degree of consolidation at different locations of drainage pipe pile

中可看出,随着开孔率\$\beta\$的增加,固结度的增长变快,孔压的消散变快.当\$\beta\$超过\$10^{-7}\$时,继续增大其值,固结度曲线的变化很小,说明此时增大开孔率对加快孔压消散的效果不明显.

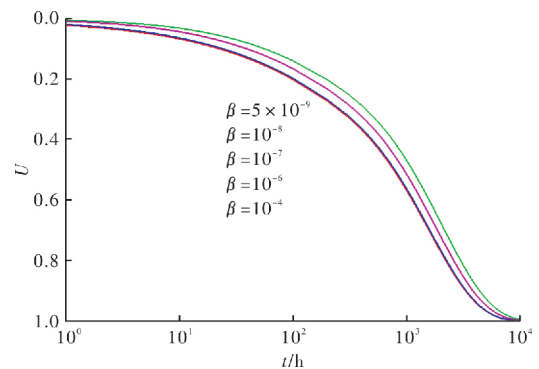


图8 不同开口率\$\beta\$下的平均固结度曲线

Fig. 8 Curve of average degree of consolidation under different opening ratios

3.4 桩距对桩周土体固结的影响

图9为不同桩距下的固结度曲线,其中当\$r_e\$小于\$R_e\$时,桩周土的外边界是不排水边界,桩距分别取3 m、4 m、5 m、6 m,可以看出,随着桩距的增大,桩周土的平均固结度减小.当桩距继

续增大到 r_e 等于 R_e 时, 桩周土的外边界可视为完全排水边界, 桩周土体的固结度的增长先减慢后加快, 平均固结度发展速率位于 $D=4\text{ m}$ 和 $D=5\text{ m}$ 两种情况之间。

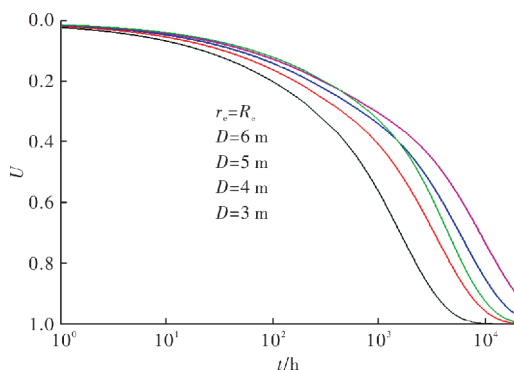


图9 不同桩距 D 下的平均固结度曲线

Fig.9 Curve of average degree of consolidation under different pile spacing D

4 结 论

本文针对排水管桩沉桩后桩周土体的固结问题进行解答, 推导出相应的孔压和固结度解析解, 并验证了解答的收敛性. 基于所得解答, 通过参数分析, 探究了沉桩后排水管桩桩周土体的固结特性. 总结得出以下结论:

(1)排水管桩沉桩后桩周土体内的孔隙水排水路径与普通管桩的不同, 距桩体较近处的超孔隙水直接沿着排水桩排出, 而距离桩体较远处的超孔隙水先流向弹性低压区, 再转头流向排水桩排出;

(2)随着开孔率 β 的增加, 孔压的消散变快. 当 β 超过 10^{-7} 时, 继续增大其值对加快孔压消散的效果不明显;

(3)当 r_e 小于 R_e 时, 随着桩距的增大, 桩周土的平均固结度减小. 当桩距继续增大到 r_e 等于 R_e 时, 桩周土体固结度的增长先减慢后加快.

参考文献 References

[1] 张忠苗, 辛公锋, 俞洪良, 等. 软土地基管桩挤土浮桩与处理方法研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 549-552.
ZHANG Zhong-miao, XIN Gong-feng, YU Hong-liang, et al. Study on floating pipe piles and disposal measures in soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 549-552.

[2] POULOS H G. Effect of pile driving on adjacent piles in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(6): 856-867.

[3] 徐美娟, 郭玉君, 黄广龙. 密排支护桩挤土位移简化计算方法[J]. 四川建筑科学, 2013, 39(6): 122-126.
XU Meijuan, GUO Yujun, HUANG Guanglong. Simplified calculation method for the soil compacting effect of the retaining pile while close-packing[J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(6): 122-126.

[4] ROY M. Development of pore pressure in quasi-static penetration test in sensitive clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(2): 99-110.

[5] 唐世栋, 何连生, 傅纵. 软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 725-729.
TANG Shidong, HE Liansheng, FU Zong. Excess pore water pressure caused by an installing pile in soft foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 725-729.

[6] 陈又麟, 齐云龙. 考虑透水性的管桩桩周土体固结特性计算[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(2): 74-77.
CHEN Youlin, QI Yunlong. Analysis on consolidation behavior of the soil around drainage pipe pile considering the permeability of pile[J]. 2016, 42(2): 74-77.

[7] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analytical solution for the consolidation around a driven pile [J]. 1979, 3(3): 217-229.

[8] RANDOLPH M F, CARTER J P, WROTH C P. Driven piles in clay: The effects of installation and subsequent consolidation[J]. Géotechnique, 1979, 29(4): 361-393.

[9] 王旭东, 王伟, 宰金珉. 沉桩引起的超孔隙水压力及其消散的三维解析解[J]. 南京工业大学学报(自然科学版) 2002, 24(6): 16-19.
WANG Xudong, WANG Wei, ZAI Jinmin. 3-dimension analytical formula for excess pore water pressure resulted from pile driving[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2002, 24(6): 16-19.

[10] 王伟, 宰金珉, 王旭东. 沉桩引起的三维超静孔隙水压力计算及其应用[J]. 岩土力学, 2004(5): 102-105, 125.
WANG Wei, ZAI Jin-min, WANG Xu-dong. 3D calculation of excess pore water pressure due to driving pile and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(5): 102-105, 125.

[11] 王伟, 卢廷浩, 宰金珉, 王旭东. 基于超静孔压消散的静压桩极限承载力研究[J]. 岩土力学, 2005(11): 154-157.
WANG Wei, LU Tinghao, ZAI Jinmin, WANG Xudong. Study on ultimate bearing capacity of static pressed pile based on excess pore water pressure dissipation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(11): 154-157.

- [12] 高子坤, 施建勇. 饱和黏土中单桩桩周土空间轴对称固结解[J]. 岩土力学, 2008(4):125-128,134.
GAO Zikun, SHI Jianyong. Consolidation solution of soil around single-pile after pile sinking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(4):125-128,134.
- [13] ZHENG JJ, LU YE, YIN JH, Guo J. Radial consolidation with variable compressibility and permeability following pile installation[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37: 408-412.
- [14] 赵明华, 占鑫杰, 邹新军, 等. 饱和软粘土中沉桩后桩周土体固结分析[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 91-97.
ZHAO Minghua, ZHAN Xinjie, ZHOU Xinjun, et al. Consolidation analysis around a driven pile in saturated clay[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 91-97.
- [15] 王松江. CFG 桩联合碎石桩长短桩结合的复合地基优化设计研究[D]. 南京:河海大学,2005.
WANG Songjiang. Study on the optimum design about the composite foundation integrated by long piles (CFG piles) and short piles (gravel piles)[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [16] 王伟. 塑料排水板联合 CFG 桩在处理公路软基中的应用[J]. 北方交通, 2015, 271(11):105-108.
WANG Wei. Application of CFG pile and plastic drainage board in highway soft soil foundation treatment[J]. Northern Transportation, 2015, 271(11): 105-108.
- [17] 陈兴培. 振动沉管碎石桩、PHC 桩联合处治软土地基的研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2008.
CHEN Xingpei. Study on soft ground treatment by joint methods of vibration crowded gravel pile and PHC pile[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [18] 刘孝江. 水泥搅拌桩和塑料排水板联合处理软基的试验研究和工程应用[D]. 南京:南京林业大学,2005.
The application and experiment research of cement deep mixing pile and plastic drainage well to improve soft-soil roadbed[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005.
- [19] 唐晓武, 俞悦, 周力沛, 等. 一种能排水并增大摩阻力的预制管桩及其施工方法:CN104846809A[P]. 2015-08-19.
TANG Xiaowu, YU Yue, ZHOU Lipai, et al. A pre-fabricated pipe pile capable of draining water and increasing friction resistance and construction method: CN104846809A[P]. 2015-08-19.
- [20] 史美东, 史美生. 砂衬透水混凝土桩设计与施工[J]. 土工基础, 2004, 18(6):35-37.
SHI Meidong, SHI Meisheng. Design and construction of sand lined permeable concrete pile[J]. Soil Engineering Foundation, 2004, 18(6):35-37.
- [21] 周小鹏, 梅国雄. 考虑固结的透水管桩沉桩全过程有限元模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(z2):676-682.
ZHOU Xiaopeng, MEI Guoxiong. Finite element simulation of permeable pipe pile driving considering consolidation process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(z2):676-682.
- [22] 黄勇, 王军, 梅国雄. 透水管桩加速超静孔压消散的单桩模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016(10): 2893-2898.
HUANG Yong, WANG Jun, MEI guoxiong. Model experimental study of accelerating dissipation of excess pore water pressure in soil around a permeable pipe pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(10): 2893-2898.
- [23] 黄勇, 梅国雄, 王钰轲. 透水管桩的群桩沉桩室内模型试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33(3):18-23.
HUANG Yong, MEI Guoxiong, WANG Yuke. Laboratory model experimental investigation of permeable pipe piles[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2016, 33(3): 18-23.
- [24] NI P P, MANGALATHU S, MEI GX, et al. Compressive and flexural behaviour of reinforced concrete permeable piles [J]. Engineering Structures, 2017, 147(S15):316-327.
- [25] NI P P, MANGALATHU S, MEI GX, et al. Permeable piles: An alternative to improve the performance of driven piles[J]. Computers & Geotechnics, 2017, 84:78-87.
- [26] 唐晓武, 杨晓秋, 俞悦. 开孔管桩复合地基排水固结解析解[J]. 岩土力学, 2019, 40(4):1248-1254.
TANG Xiaowu, YANG Xiaoqi, YU Yue. Analytical solutions to drained consolidation of porous pipe pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4):1248-1254.

(编辑 沈 波)