

文章编号: 1000-7598-(2014) 06-1607-10

考虑涂抹区压缩及渗透系数变化的堆载预压固结解

许 波^{1,2,3}, 雷国辉^{1,2}, 郑 强^{1,2}, 刘加才⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098;
3. 香港华艺设计顾问(深圳)有限公司南京分公司, 南京 210037; 4. 南京工业大学 交通科学与工程学院, 南京 210009)

摘 要: 为评估涂抹区土体压缩和渗透系数变化对含竖向排水体地基固结的影响, 采用等体积应变假设, 考虑涂抹区土体的压缩变形及其水平向渗透系数沿径向分别呈线性和抛物线分布, 并考虑井阻作用以及地基附加球应力沿深度任意分布, 推导了随时间线性堆载预压条件下固结微分方程的显式解析解答, 分析了涂抹区半径、水平向渗透系数的分布模式、以及体积压缩系数对地基整体平均固结度的影响。结果表明, 涂抹区土体采用均匀折减的水平向渗透系数明显低估了地基的固结速率, 而当涂抹区半径较大时, 不考虑涂抹区土体的压缩变形将会高估地基的固结速率。在含竖向排水体地基固结问题的分析中, 这些影响不可忽视。

关 键 词: 竖向排水体; 随时间线性加载; 涂抹; 井阻; 超静孔压; 固结度

中图分类号: TU 472.3+3

文献标识码: A

Solution of consolidation by surcharge preloading considering compressibility and varying hydraulic conductivities in smear zone

XU Bo^{1,2,3}, LEI Guo-hui^{1,2}, ZHENG Qiang^{1,2}, LIU Jia-cai⁴

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Nanjing Branch of Hong Kong Huayi Design Consultants (Shenzhen) Company, Nanjing 210037, China;

4. College of Transportation Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: An explicit analytical solution of the partial differential equations of consolidation by vertical drains is derived to assess the effects of compressibility and varying hydraulic conductivities of soils in the smear zone on ground consolidation. Equal volumetric strain assumption is adopted. The compressive deformation of soils in the smear zone is considered, together with a linear and a parabolic distribution of the horizontal hydraulic conductivity along the radial direction. Well resistance is also considered, together with an arbitrarily distributed mean stress increasing along the depth of ground. The solution is derived for the consolidation under a linearly time-varied surcharge preloading. The proposed solution is used to analyze the influences of the radius of smear zone, the distribution of horizontal hydraulic conductivity and the coefficient of volumetric compressibility of smeared soils on the global average degree of consolidation. It is found that the rate of ground consolidation is underestimated by the solution derived by applying a uniformly reduced horizontal hydraulic conductivity to the smeared soils. When the radius of smear zone is relatively large, the rate of ground consolidation is overestimated by the solution derived without consideration of the compressive deformation of the smeared soils. These effects should not be overlooked in the analysis of consolidation by vertical drains.

Key words: vertical drain; linear loading with time; smear; well resistance; excess pore water pressure; consolidation degree

1 引 言

图 1 所示的含竖向排水体(砂井或塑料排水板)地基的轴对称固结问题是土力学中的经典课题之一。在该类问题求解时, 通常都将竖向排水体有效影响范围内的土体分为涂抹区和未扰动区, 以考虑

施工扰动效应对土体固结参数的影响。比较常见的解答是假定涂抹区土体水平向渗透系数按未扰动区土体水平向渗透系数折减后为常数而推求得到, 雷国辉等^[1]对此类解答进行了总结和分析。Onoue 等^[2]将涂抹区分为完全涂抹区和部分涂抹区, 以反映土体扰动的程度。显然, 扰动程度会随着水平距离的

收稿日期: 2013-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No.51278171); 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助 (No.2011B02814); 2010 年度江苏省高校青蓝工程项目资助。

第一作者简介: 许波, 男, 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要从事软土地基处理方面的研究与设计工作。E-mail: xb32268024@163.com

通讯作者: 雷国辉, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 主要从事土力学与地基基础工程教学与科研工作。E-mail: leiguohui@hhu.edu.cn

增加而减弱。为此,国内外学者针对涂抹区水平向渗透系数沿径向变化的情况,也提出了不同的解答^[3-11]。

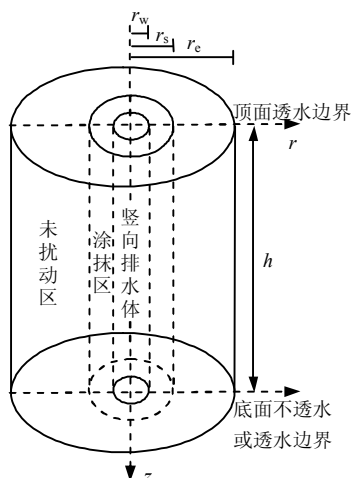


图1 轴对称固结问题示意图

Fig.1 Sketch of axisymmetric consolidation problem

当未扰动区和涂抹区土体为饱和土体,渗流服从 Darcy 定律,且其物理参数、水力参数和力学参数不随固结过程而变化,并假定未扰动区土体为均质材料、涂抹区土体竖向渗透系数沿深度不变、但考虑涂抹区水平向渗透系数沿径向变化以反映施工扰动的程度时,未扰动区和涂抹区土体的径、竖向固结基本微分方程分别为

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = - \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}, r_s \leq r \leq r_e \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{k_{sh}(r)}{\gamma_w} r \frac{\partial u_s}{\partial r} \right] + \frac{k_{sv}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_s}{\partial z^2} = - \frac{\partial \varepsilon_{sv}}{\partial t}, r_w \leq r \leq r_s \quad (2)$$

式中: r 和 z 分别表示径向和竖向坐标; t 表示时间; γ_w 为水的重度; r_w 、 r_e 、 r_s 分别表示竖向排水体半

径(井径)和其有效影响半径、以及涂抹区半径; u 、 ε_v 、 k_h 和 k_v 分别为未扰动区土体的超静孔压、体积应变、以及径向和竖向渗透系数; u_s 、 ε_{sv} 、 $k_{sh}(r)$ 和 k_{sv} 分别为涂抹区土体的超静孔压、体积应变、径向和竖向渗透系数。

考虑井阻作用时竖向排水体与涂抹区边界面孔压和流量连续性条件的微分方程为

$$2k_{sh}(r) \left(\frac{\partial u_s}{\partial r} \right) + r_w k_w \left(\frac{\partial^2 u_s}{\partial z^2} \right) = 0, r = r_w \quad (3)$$

式中: k_w 为竖向排水体的渗透系数。

涂抹区与未扰动区边界面超静孔压和流量连续性条件的方程分别为

$$u = u_s, r = r_s \quad (4)$$

$$k_h \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) = k_{sh}(r) \left(\frac{\partial u_s}{\partial r} \right), r = r_s \quad (5)$$

顶面透水、底面不透水或透水、以及外侧面不透水边界条件分别为

$$\text{顶面透水: } u = u_s = 0, z = 0 \quad (6)$$

$$\text{底面透水: } u = u_s = 0, z = h \quad (7)$$

$$\text{底面不透水: } \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial u_s}{\partial z} = 0, z = h \quad (8)$$

$$\text{外侧面不透水: } \frac{\partial u}{\partial r} = 0, r = r_e \quad (9)$$

式中: h 为竖向排水体完全打穿所加固地基的深度。

针对上述轴对称固结问题,为考虑涂抹区土体水平向渗透系数沿径向的变化,国内外学者假定了不同的分布模式(如图2所示),考虑不同的作用因素,尝试推求了相应的解析解答^[3-11]。表1、2分别列出了现有解答中所求解的固结微分方程和考虑的因素。

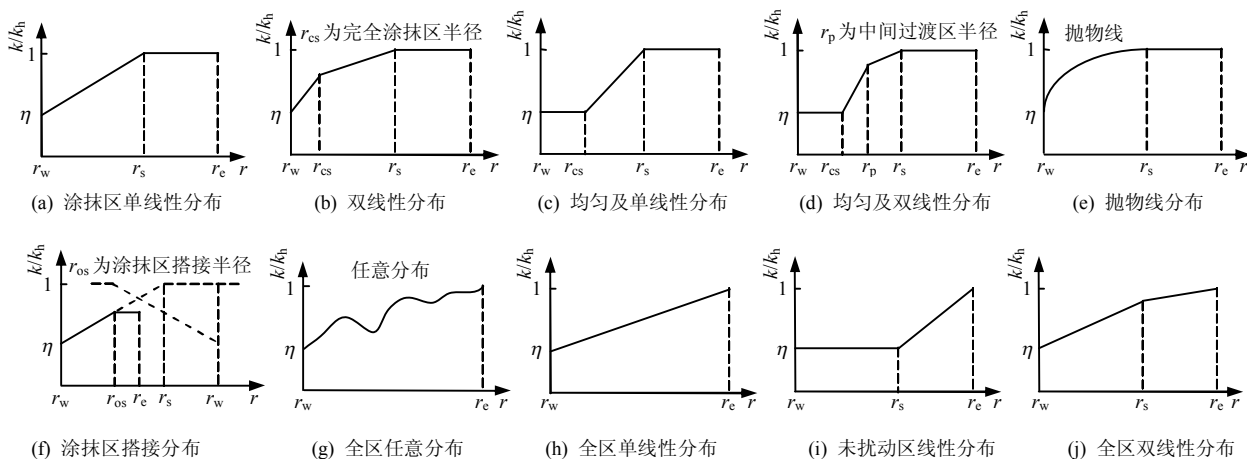


图2 有效加固区内土体水平向渗透系数沿径向变化的分布模式

Fig.2 Distribution patterns of variations of horizontal permeability of soil in effective consolidating zone along radial direction

Chai 等^[3]、Basu 等^[4-5]、以及 Walker 等^[6-7]采用类似于 Hansbo^[12]基于整体连续性条件而非微单元体连续性条件建立的近似求解方法（注：其求解过程中隐含了应变与深度无关的假设），推求了径向固结解析解答。其中，Chai 等^[3]针对图 2(a)和(b)所示扰动区土体渗透系数沿径向分布的 2 种线性模式，推求了相应的瞬时加载条件下的径向固结解析解答。Basu 等^[4-5]分析了待固结土体受到塑料排水板施工扰动影响的范围、以及涂抹区土体渗透系数变化方面的物理试验研究成果，总结出涂抹区土体渗透系数变化的 4 种分段线性分布模式（如图 2(a)~(d)所示），推求了相应的瞬时加载^[4]和线性加载^[5]条件下的径向固结解析解答。Walker 等^[6-7]针对扰动区土体渗透系数沿径向呈图 2(e)所示抛物线变化的分布模式^[6]、以及图 2(a)所示线性分布和(f)所示存在涂抹区搭接（考虑搭接范围内土体水平向渗透系数为常数，但假设竖井有效影响区范围内土体的水平向固结系数为同一常数）的模式^[7]，推求了相应的瞬时加载条件下的径向固结解析解答。不过，上述解答均为径向固结解答，径、竖向固结的解答则需要采用 Carrillo 方法^[13-14]将其与 Terzaghi 竖向固结解答进行组合而确定。Chai 等^[3]和 Basu 等^[4-5]的解答未考虑井阻作用，而 Walker 与 Indraratna^[6-7]的解答则考虑了井阻作用。

表 1 现有考虑扰动区水平向渗透系数变化时轴对称固结解析解答求解的偏微分方程

Table 1 Partial differential equations in existing analytical solutions of axisymmetric consolidation considering variable permeability coefficients in disturbed zone

作者及文献	固结微分方程
Chai 等 ^[3]	$\frac{\partial u_{rz}}{\partial r} = -\frac{\gamma_w}{2k(r)} \left(\frac{r_c^2}{r} - r \right) m_{v1} \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial t}$ u_{rz} 为竖向排水体有效影响范围（从 $r_w \sim r_c$）内待固结土体任意点的孔压；$\bar{u}_{rz}$ 为同一深度 z 处从 $r_w \sim r_c$ 范围内土体孔压的平均值；m_{v1} 为单向压缩试验的体积压缩系数
Basu 等 ^[4-5]	$\frac{\partial u_{rz}}{\partial r} = -\frac{\gamma_w}{2k(r)} \left(\frac{r_c^2}{r} - r \right) m_{v1} \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial t}$
Walker 等 ^[6-7]	$\frac{\partial u_{rz}}{\partial r} = -\frac{\gamma_w}{2k(r)} \left(\frac{r_c^2}{r} - r \right) m_{v1} \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial t}$
Wang 等 ^[8]	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{k(r)}{\gamma_w} r \frac{\partial u_{rz}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial z} \right) = m_{v1} \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial t}$
蔡新等 ^[9]	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{k(r)}{\gamma_w} r \frac{\partial u_{rz}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial z} \right) = m_{v1} \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial t}$
郭彪等 ^[10]	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{k(r)}{\gamma_w} r \frac{\partial u_{rz}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial z} \right) = -m_{v1} \left[\frac{d\sigma_z(t)}{dt} - \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial t} \right]$
Lu 等 ^[11]	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{k(r)}{\gamma_w} r \frac{\partial u_{rz}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial z} \right) = -m_{v1} \left[\frac{\partial \sigma_z(z,t)}{\partial t} - \frac{\partial \bar{u}_{rz}}{\partial t} \right]$
本文解答	$\frac{k_h}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -m_{v3} \left[\frac{\partial p(z,t)}{\partial t} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \right]$ u 和 u_s 分别为未扰动区（从 $r_s \sim r_c$）和涂抹区（从 $r_w \sim r_s$）内待固结土体的孔压；$\bar{u}$ 和 $\bar{u}_s$ 分别为同一深度 z 处未扰动区和涂抹区内土体孔压的平均值

表 2 现有考虑扰动区水平向渗透系数变化时轴对称固结解析解答考虑的因素

Table 2 Factors being considered in existing analytical solutions of axisymmetric consolidation considering variable permeability coefficients in disturbed zone

作者及文献	固结类型		涂抹区渗透系数变化	井阻作用	预压荷载		附加应力沿深度		
	径+竖向固结	径、竖向固结			瞬时加载	线性加载	均匀分布	线性分布	任意分布
Chai ^[3]	√		图 2(a)~(b)		√		√		
Basu 等 ^[4-5]	√		图 2(a)~(d)		√	√	√		
Walker 等 ^[6-7]	√		图 2(a)、(e)~(f)	√	√		√		
Wang 等 ^[8]		O	图 2(g)	√	√		√		
蔡新等 ^[9]		O	图 2(a)、(h)~(j)	√	√		√	√	
郭彪等 ^[10]		O	图 2(a)	√		√	√		
Lu 等 ^[11]		O	图 2(a)、(e)	√		√	√	√	
本文解答		√	图 2(a)、(e)	√		√	√	√	√

注：O 表示针对谢康和^[15-16]采用与 Carrillo^[13-14]类似但相逆的方法将径向固结微分方程和竖向固结微分方程组合而成的径、竖向固结。

谢康和^[15-16]采用与 Carrillo^[13]、段宗泽^[14]类似但相逆的方法，运用 $u_{rz} = u_r u_z / u_0$ ， $\bar{u}_{rz} = \bar{u}_r u_z / u_0$ ，其中， u_0 为初始孔压，将竖向固结微分方程

$$\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = m_{v1} \frac{\partial u_z}{\partial t} \quad (10)$$

和径向固结微分方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{k(r)}{\gamma_w} r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right] = m_{v1} \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial t} \quad (11)$$

进行组合，得到一种近似的径、竖向固结微分方程（参见表 1 第 5 至 8 行，注意其等式左边第 2 项中的孔压为平均孔压 $\bar{u}_{rz}$ ，而非像式 (1) 和 (2) 等式左边第 2 项中所表达的实际孔压 u 和 u_s ；另外，当

考虑随时间或沿深度变化的加载工况时,式(10)和式(11)如何改写?以及如何得到表1第7、8行中的固结微分方程?值得商榷)。Wang等^[8]、蔡新等^[9]、郭彪等^[10]、以及Lu等^[11]针对这类径、竖向固结微分方程,推求了解析解答。其中,Wang等^[8]考虑整个竖向排水体有效影响区范围内水平向渗透系数沿径向任意分布(如图2(g)所示)、井阻作用、以及沿深度均匀分布的瞬时荷载作用,建立了一种推求径、竖向固结解答的求解方法,但未给出渗透系数沿径向变化的具体分布模式下的显式解答。蔡新等^[9]考虑渗透系数沿径向分布的4种分布模式(如图2(a)、(h)~(j)所示)、井阻作用、以及初始孔压沿深度均匀分布、正三角形、倒三角形、以及梯形分布模式,推求了瞬时荷载作用下的径、竖向固结解析解答。郭彪等^[10]考虑扰动区土体渗透系数沿径向线性分布的模式(如图2(a)所示)、井阻作用、以及地基附加应力沿深度均匀分布模式,推求了随时间任意变化荷载作用下的径、竖向固结解答。Lu等^[11]考虑渗透系数沿径向分布的线性和抛物线分布模式(如图2(a)和(e)所示)、井阻作用、以及地基附加应力沿深度均匀分布、正三角形、倒三角形、以及梯形分布模式,推求了多级线性加载作用下的径、竖向固结解析解答。

前述文献[3~7]基于Carrillo方法的径、竖向组合固结的解答对于地基附加应力沿深度均匀分布的瞬时加载工况是适用的^[13~14],而对于随时间和沿深度变化的加载工况,固结微分方程是非齐次的,基于Carrillo方法得到的计算结果虽误差不算太大^[17~18],但在理论上却并不适用^[15, 17~20]。与此类似,对于随时间和沿深度变化的加载工况,文献[8~11]基于谢康和^[15~16]提出的近似径、竖向固结微分方程的解答,在理论上也是欠完备的。

此外,现有的解析解都习惯性地将近向应变取代式(1)、(2)中等式右边的体积应变,采用竖向应力 σ_z 和单向压缩试验的体积压缩系数 m_{v1} 进行固结计算,而实际上,对于轴对称固结问题,采用球应力 p 和三维体积压缩系数

$$m_{v3} = m_{v1} \frac{3(1-\nu')}{1+\nu'} \quad (12)$$

计算体积应变(ν' 为排水条件下的泊松比),无论是在理论上还是在计算精度上都将更合理^[14, 19~20]。这是因为,三维体积压缩系数 m_{v3} 和一维体积压缩系数 m_{v1} 之间的关系类似于弹性模量 E 和单向压缩模量 E_s 之间的关系, m_{v3} 和 E 均为材料的本征参数,而 m_{v1} 和 E_s 却是人为特定的侧向边界受到约束条件

下导出的参数。应用 m_{v3} 时,球应力 p 沿深度的变化可以采用地基附加应力的计算公式确定。

针对严格的径、竖向同时固结微分方程,Leo^[21]、雷国辉等^[22]分别推求了沿深度均匀分布和任意分布的瞬时荷载以及随时间线性变化荷载作用下的径、竖向同时固结等竖向应变解答,考虑了涂抹和井阻作用,但均未考虑涂抹区土体的压缩和竖向渗流(即,式(2)中等式右边等于0且 $k_{sv}=0$)。最近,雷国辉等^[1]考虑了涂抹区土体的压缩和竖向渗流,推求了线性加载条件下的径、竖向同时固结的等体积应变解答。但这些解答均是在假定涂抹区土体水平向渗透系数按未扰动区土体水平向渗透系数折减后为常数而推求得到。为此,本文在这些解答的基础之上,进一步综合考虑涂抹区土体水平向渗透系数沿径向变化、井阻作用和涂抹区土体的压缩,推求得到了对应于如图2(a)、(e)的变化模式以及沿深度任意分布的线性加载条件下的径、竖向同时固结的解答,并分析了涂抹区水平向渗透系数的分布模式对固结的影响。

2 解答的推导过程

2.1 未扰动区土体固结微分方程解答

采用等体积应变假设,未扰动区土体的径、竖向固结微分方程为

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left[\frac{\partial^2 u(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u(r, z, t)}{\partial z^2} = -m_{v3} \left[\frac{\partial p(z, t)}{\partial t} - \frac{\partial \bar{u}(z, t)}{\partial t} \right], \quad r_s \leq r \leq r_e \quad (13)$$

式中: p 为堆载引起的地基附加球应力; m_{v3} 为未扰动区土体的三维体积压缩系数; $\bar{u}$ 为未扰动区土体在同一深度的孔压平均值。

为得到式(13)的解答,且同时满足顶面和底面的透水边界条件即式(6)~(8),采用Fourier正弦级数表示为

$$u(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(r, t) \sin \omega_n z \quad (14)$$

$$\bar{u}(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{u}_n(t) \sin \omega_n z \quad (15)$$

式中: $u_n(r, t)$ 、 $\bar{u}_n(t)$ 为相应的Fourier系数; $\omega_n = [(2n-1)\pi]/(Dh)$,对于顶面透水、底面不透水边界, $D=2$,对于顶面和底面均为透水边界, $D=1$ 。

考虑线性加载工况,则堆载引起的地基附加球应力可表示为

$$p(z, t) = \left[\frac{t}{t_0} + \left(1 - \frac{t}{t_0} \right) H \langle t - t_0 \rangle \right] \sum_{n=1}^{\infty} p_n \sin \omega_n z \quad (16)$$

式中: p_n 为相应的 Fourier 系数, t_0 为线性加载的历时, H 为阶跃函数可表示为

$$H\langle t-t_0 \rangle = \begin{cases} 0, & (t-t_0) < 0 \\ 1, & (t-t_0) \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

将式 (14)~(16) 代入式 (13) 并化简可得

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left[\frac{\partial^2 u_n(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_n(r,t)}{\partial r} \right] - \frac{k_v}{\gamma_w} \omega_n^2 u_n(r,t) = -m_{v3} \left[\frac{1-H\langle t-t_0 \rangle}{t_0} p_n - \frac{\partial \bar{u}_n(t)}{\partial t} \right] \quad (18)$$

采用分离变量法, 令

$$u_n(r,t) = A_n(r) B_n(t) \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (18) 得

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left[\frac{\partial^2 A_n(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_n(r)}{\partial r} \right] - \frac{k_v}{\gamma_w} \omega_n^2 A_n(r) = -\frac{m_{v3}}{B_n(t)} \left[\frac{1-H\langle t-t_0 \rangle}{t_0} p_n - \frac{\partial \bar{u}_n(t)}{\partial t} \right] = -\lambda_n \quad (20)$$

式中左边等式两端分别为 r 和 t 的偏微分。若该等式成立, λ_n 必然为常数。

式 (20) 左边等式的解答为

$$A_n(r) = \lambda_n [c_{1n} I_0(\mu_n r) + c_{2n} K_0(\mu_n r) + \phi_n] \quad (21)$$

式中: I_0 和 K_0 分别为零阶第 1 类和第 2 类虚宗量 Bessel 函数; $\phi_n = \gamma_w / (k_v \omega_n^2)$; $\mu_n^2 = k_v \omega_n^2 / k_h$; c_{1n} 和 c_{2n} 为待定积分常数。

由式 (14) 和 (19) 可得式 (13) 中任一深度的平均孔压为

$$\bar{u}(z,t) = \frac{1}{\pi(r_e^2 - r_s^2)} \int_{r_s}^{r_e} u(r,z,t) 2\pi r dr = \frac{1}{\pi(r_e^2 - r_s^2)} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_{r_s}^{r_e} A_n(r) 2\pi r dr \right] B_n(t) \sin \omega_n z \quad (22)$$

根据式 (15)、(22) 可得

$$\bar{u}_n(t) = \frac{B_n(t)}{\pi(r_e^2 - r_s^2)} \int_{r_s}^{r_e} A_n(r) 2\pi r dr \quad (23)$$

将式 (21) 代入式 (23) 并化简可得

$$\bar{u}_n(t) = \lambda_n \Omega_n B_n(t) \quad (24)$$

其中

$$\Omega_n = \phi_n + \left\{ 2c_{1n} [\mu_n r_e I_1(\mu_n r_e) - \mu_n r_s I_1(\mu_n r_s)] - 2c_{2n} [\mu_n r_e K_1(\mu_n r_e) - \mu_n r_s K_1(\mu_n r_s)] \right\} / [(\mu_n r_e)^2 - (\mu_n r_s)^2] \quad (25)$$

式中: I_1 和 K_1 分别为一阶第 1 类和第 2 类虚宗量 Bessel 函数。

将式 (24) 代入式 (20) 右边等式可得

$$m_{v3} \left[\frac{1-H\langle t-t_0 \rangle}{t_0} p_n - \lambda_n \Omega_n \frac{\partial B_n(t)}{\partial t} \right] = \lambda_n B_n(t) \quad (26)$$

式 (26) 的解为

$$B_n(t) = \frac{1}{\lambda_n} \left[a_n e^{-8(T_h/v_n)} + m_{v3} \frac{1-H\langle t-t_0 \rangle}{t_0} p_n \right] \quad (27)$$

式中: a_n 为待定积分常数; $T_h = k_h t / (m_{v3} \gamma_w) / (4r_e^2)$ 为无量纲时间因素; $v_n = 2\Omega_n / \phi_n / (\mu_n r_e)^2$ 。

2.2 涂抹区土体固结微分方程解答

针对涂抹区土体的固结微分方程式 (2), 本文尝试推求其解答, 但告失败。雷国辉等^[1]考虑涂抹区水平向渗透系数为常数得到了式 (2) 的解答, 计算结果表明, 涂抹区土体竖向渗透系数 k_{sv} 对于地基固结的影响几乎可以忽略不计。因此, 本文忽略涂抹区土体的竖向渗流, 推求得到了其解答。采用等体积应变假设, 不考虑涂抹区土体竖向渗流, 且令

$$k_{sh}(r) = k_h f(r), r_w \leq r \leq r_s \quad (28)$$

则其固结微分方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{k_h f(r)}{\gamma_w} r \frac{\partial u_s(r,z,t)}{\partial r} \right] = -m_{sv3} \left[\frac{\partial p(z,t)}{\partial t} - \frac{\partial \bar{u}_s(z,t)}{\partial t} \right], r_w \leq r \leq r_s \quad (29)$$

式中: $f(r)$ 为涂抹区土体水平向渗透系数沿径向的分布函数; m_{sv3} 为涂抹区土体的三维体积压缩系数; $\bar{u}_s$ 为涂抹区土体在同一深度的孔压平均值。

为得到式 (29) 的解答, 且同时满足顶面和底面的透水边界条件即式 (6)~(8), 采用 Fourier 正弦级数表示

$$u_s(r,z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_{sn}(r,t) \sin \omega_n z \quad (30)$$

$$\bar{u}_s(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{u}_{sn}(t) \sin \omega_n z \quad (31)$$

式中: $u_{sn}(r,t)$ 、 $\bar{u}_{sn}(t)$ 为相应的 Fourier 系数。

采用分离变量法, 令

$$u_{sn}(r,t) = A_{sn}(r) B_{sn}(t) \quad (32)$$

参照未扰动区土体固结微分方程的推导过程式 (20)~(27), 可以得到式 (32) 的解答为

$$A_{sn}(r) = \frac{-\lambda_{sn} \gamma_w}{2k_h} [A_0(r) + c_{3n} B_0(r) + c_{4n}] \quad (33)$$

$$B_{sn}(t) = \frac{1}{\lambda_{sn}} \left[a_{sn} e^{-8(T_{sh}/\gamma_{sn})} + m_{sv3} \frac{1-H\langle t-t_0 \rangle}{t_0} p_n \right] \quad (34)$$

其中:

$$A_0(r) = \int_{r_w}^r \frac{\xi}{f(\xi)} d\xi, B_0(r) = \int_{r_w}^r \frac{1}{\xi f(\xi)} d\xi \quad (35)$$

式中: λ_{sn} 为常数; c_{3n} 、 c_{4n} 和 a_{sn} 为待定积分常数;
 $T_{sh} = k_{sh} t / (m_{sv3} \gamma_w) / (4r_s^2)$ 为无量纲时间因素;
 $v_{sn} = 2\Omega_{sn} k_{sh} / (r_s^2 \gamma_w)$, 其中,

$$\Omega_{sn} = \frac{-\gamma_w}{k_h (r_s^2 - r_w^2)} \int_{r_w}^{r_s} [A_0(r) + c_{3n} B_0(r) + c_{4n}] r dr \quad (36)$$

2.3 解答中待定系数的求解

2.3.1 初始条件

设任意深度的初始平均孔压为 p_0 , 则

$$\bar{u}(z, t=0) = \frac{1}{\pi(r_s^2 - r_w^2)} \int_{r_w}^{r_s} u(r, z, t=0) 2\pi r dr = p_0 \quad (37)$$

$$\bar{u}_s(z, t=0) = \frac{1}{\pi(r_s^2 - r_w^2)} \int_{r_w}^{r_s} u_s(r, z, t=0) 2\pi r dr = p_0 \quad (38)$$

取 $t=0$, 将式 (21) 和 (27) 代入式 (19)、(14) 再代入式 (37), 将式 (33)、(34) 代入式 (32)、(30) 再代入式 (38), 化简后可得

$$a_n = \frac{p_{n0}}{\Omega_n} - m_{v3} \frac{p_n}{t_0} \quad (39)$$

$$a_{sn} = \frac{p_{n0}}{\Omega_{sn}} - m_{sv3} \frac{p_n}{t_0} \quad (40)$$

式中: p_{n0} 为初始平均孔压 p_0 按深度 z 的 Fourier 系数。

为保证任意时刻未扰动区和涂抹区土体边界面超静孔压的连续性条件, 时间函数应为同一函数, 即

$$B_n(t) = B_{sn}(t) \quad (41)$$

将式 (27)、(34) 代入式 (40) 可得

$$\frac{a_n}{a_{sn}} = \frac{\lambda_n}{\lambda_{sn}} \quad (42)$$

$$\frac{\lambda_n}{\lambda_{sn}} = \frac{m_{v3}}{m_{sv3}} \quad (43)$$

根据线性加载阶段 ($t \leq t_0$) 初始平均孔压 $p_0 = 0$, 则 $p_{n0} = 0$, 由式 (39) 可得

$$a_n = -m_{v3} \frac{p_n}{t_0} \quad (44)$$

因此, 线性加载阶段 ($t \leq t_0$) 的时间函数式 (27) 为

$$B_n(t \leq t_0) = \frac{m_{v3}}{\lambda_n} \frac{p_n}{t_0} [1 - e^{-8(T_h/v_n)}] \quad (45)$$

而恒载阶段 ($t \geq t_0$) 的时间函数式 (27) 为

$$B_n(t \geq t_0) = \frac{1}{\lambda_n} a_n e^{-8(T_h/v_n)} \quad (46)$$

根据 t_0 时刻孔压连续条件, 时间函数在 t_0 时刻也应保持连续, 因此, 由式 (45)、(46) 可得恒载阶段 ($t \geq t_0$) 情况下

$$a_n = -m_{v3} \frac{p_n}{t_0} [1 - e^{-8(T_{h0}/v_n)}] \quad (47)$$

式中: $T_{h0} = k_h t_0 / (m_{v3} \gamma_w) / (4r_s^2)$ 为 t_0 时刻的无量纲时间因素。

对于任意时刻 t , 根据式 (44)、(47), 可以将未扰动区土体固结的时间函数式 (27) 统一表示为

$$B_n(t) = \frac{m_{v3}}{\lambda_n} \frac{p_n}{t_0} [e^{-8[(T_h - T_{h0})/v_n]H(T_h - T_{h0})} - e^{-8(T_h/v_n)}] \quad (48)$$

2.3.2 考虑井阻的竖向排水体与涂抹区边界条件

将式 (33)、(34) 依次代入式 (32)、(30)、(3), 化简后可得

$$c_{4n} = \frac{2k_h f(r_w)}{r_w k_w \omega_n^2} \left[\frac{\partial A_0(r)}{\partial r} + c_{3n} \frac{\partial B_0(r)}{\partial r} \right] \Big|_{r=r_w} \quad (49)$$

2.3.3 未扰动区与涂抹区边界条件

将式 (21)、(27) 代入式 (19)、(14), 将式 (33)、(34) 代入式 (32)、(30), 再分别代入式 (4)、(5), 考虑式 (41) 化简后可得

$$\lambda_n [c_{1n} I_0(\mu_n r_s) + c_{2n} K_0(\mu_n r_s) + \phi_n] = \frac{-\lambda_{sn} \gamma_w}{2k_h} [A_0(r_s) + c_{3n} B_0(r_s) + c_{4n}] \quad (50)$$

$$\frac{-2k_h \mu_n}{f(r_s) \gamma_w} \frac{m_{v3}}{m_{sv3}} [c_{1n} I_1(\mu_n r_s) - c_{2n} K_1(\mu_n r_s)] = \left[\frac{\partial A_0(r)}{\partial r} + c_{3n} \frac{\partial B_0(r)}{\partial r} \right] \Big|_{r=r_s} \quad (51)$$

2.3.4 涂抹土体水平向渗透系数沿径向变化模式

考虑涂抹区土体水平向渗透系数沿径向呈图 2(a)、(e) 所示的线性和抛物线分布模式, 则对于线性分布模式, 式 (28) 中的 $f(r)$ 可表示为

$$f(r) = \frac{r - r_w}{r_s - r_w} (1 - \eta) + \eta \quad (52)$$

对于抛物线分布模式^[6],

$$f(r) = (1 - \eta) \left(a - bs + b \frac{r}{r_w} \right) \left(a + bs - b \frac{r}{r_w} \right) \quad (53)$$

式中: η 为 $r=r_w$ 处水平向渗透系数相对于未扰动区土体水平向渗透系数的折减系数; $a = (1 - \eta)^{-1/2}$; $b = (s - 1)^{-1}$; $s = r_s/r_w$ 。

将式 (52)、(53) 分别代入式 (35) 则可求出其对 r 的微分。将其代入式 (49) 可得

$$c_{4n} = \frac{2k_h}{r_w^2 \omega_n^2 k_w} (r_w^2 + c_{3n}) \quad (54)$$

将其代入式 (51) 可得

$$c_{3n} = \frac{-2k_h \mu_n r_s}{\gamma_w} \frac{m_{v3}}{m_{sv3}} [c_{1n} I_1(\mu_n r_s) - c_{2n} K_1(\mu_n r_s)] - r_s^2 \quad (55)$$

将式 (54)、(55) 代入式 (50) 化简可得

$$c_{1n}\alpha_n + c_{2n}\beta_n + \Delta = 0 \quad (56)$$

其中

$$\alpha_n = [I_0(\mu_n r_s) - \Phi_n I_1(\mu_n r_s)] \quad (57)$$

$$\beta_n = [K_0(\mu_n r_s) + \Phi_n K_1(\mu_n r_s)] \quad (58)$$

对于涂抹区土体水平向渗透系数沿径向呈如图 2(a) 所示的线性分布模式为

$$\Delta = \phi_n \left\{ 1 + \frac{k_v \omega_n^2}{2k_h} \frac{m_{sv3}}{m_{v3}} \left[\frac{(r_s - r_w)^2}{1 - \eta} + \right. \right. \quad (59)$$

$$\left. \frac{(\eta r_s - r_w)(r_s - r_w)}{(1 - \eta)^2} \ln \eta + \frac{2k_h}{k_w \omega_n^2} - r_s^2 \Phi_n' \right\}$$

$$\Phi_n = \mu_n r_s \Phi_n' \quad (60)$$

$$\Phi_n' = \frac{s-1}{\eta s-1} \ln(\eta s) + \frac{2k_h}{r_w^2 k_w \omega_n^2} \quad (61)$$

对于涂抹区土体水平向渗透系数沿径向呈如图 2(e) 所示的抛物线分布模式为

$$\Delta = \phi_n \left\{ 1 + \frac{k_v \omega_n^2}{2k_h} \frac{m_{sv3}}{m_{v3}} \left[(a + bs) \ln \frac{a}{a+1} + \right. \quad (62)$$

$$\left. (a - bs) \ln \frac{a}{a-1} + \frac{2k_h}{k_w \omega_n^2} - r_s^2 \Phi_n' \right\}$$

$$\Phi_n = \mu_n r_s \Phi_n' \quad (63)$$

$$\Phi_n' = \frac{a^2}{a^2 - b^2 s^2} \left\{ \ln s - \frac{1}{2a} \left[(a - bs) \ln \frac{a}{a+1} + \right. \quad (64)$$

$$\left. (a + bs) \ln \frac{a}{a-1} \right\} + \frac{2k_h}{r_w^2 k_w \omega_n^2}$$

2.3.5 外侧面不透水边界条件

将式 (21)、(27) 依次代入式 (19)、(14)、(9)，化简后可得

$$c_{1n} I_1(\mu_n r_e) - c_{2n} K_1(\mu_n r_e) = 0 \quad (65)$$

联立式 (56)、(65) 可解得

$$c_{1n} = \frac{\Delta K_1(\mu_n r_e)}{\Delta_n} \quad (66)$$

$$c_{2n} = \frac{\Delta I_1(\mu_n r_e)}{\Delta_n} \quad (67)$$

其中

$$\Delta_n = -\alpha_n K_1(\mu_n r_e) - \beta_n I_1(\mu_n r_e) \quad (68)$$

至此，固结微分方程解答中的待定系数 c_{1n} 、 c_{2n} 、 c_{3n} 和 c_{4n} 均已求出，分别为式 (66)、(67)、(55) 和 (54)。

2.4 超静孔隙水压力解答

将式 (48)、(21) 依次代入式 (19)、(14)，可以得到未扰动区土体的超静孔隙水压力为

$$u(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{m_{v3} p_n}{t_0} \right) \left[c_{1n} I_0(\mu_n r) + c_{2n} K_0(\mu_n r) + \phi_n \right] \cdot \left[e^{-8[(T_h - T_{h0})/v_n]H(T_h - T_{h0})} - e^{-8(T_h/v_n)} \right] \sin \omega_n z \quad (69)$$

考虑式 (41)、(43)，将式 (48)、(33) 依次代入式 (32)、(30)，可以得到涂抹区土体的超静孔隙水压力为

$$u_s(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{m_{sv3} p_n}{t_0} \right) \left(\frac{-\gamma_w}{2k_h} \right) \left[A_0(r) + c_{3n} B_0(r) + c_{4n} \right] \cdot \left[e^{-8[(T_h - T_{h0})/v_n]H(T_h - T_{h0})} - e^{-8(T_h/v_n)} \right] \sin \omega_n z \quad (70)$$

2.5 地基整体平均超静孔隙水压力

将式 (69)、(70) 对径向和竖向积分并除以体积，可以得到竖向排水体影响区域内地基的整体平均超静孔隙水压力为

$$\bar{u}_g(T_h) = \frac{\int_0^h \left[\int_{r_e}^{r_c} u(r, z, t) 2\pi r dr + \int_{r_w}^{r_s} u_s(r, z, t) 2\pi r dr \right] dz}{\pi(r_e^2 - r_w^2)h} = \frac{2m_{v3}}{Dht_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{p_n}{\omega_n} \right) \left\{ e^{-8[(T_h - T_{h0})/v_n]H(T_h - T_{h0})} - e^{-8(T_h/v_n)} \right\} \cdot (\bar{\Omega}_n + \bar{\Omega}_{sn}) \quad (71)$$

将式 (52)、(53) 分别代入式 (35)，并依次代入式 (70) 以及式 (71) 中第 1 个等式的右边，可以得到 $\bar{\Omega}_n$ 和 $\bar{\Omega}_{sn}$ 为

$$\bar{\Omega}_n = \phi_n \frac{(r_e^2 - r_s^2)}{(r_e^2 - r_w^2)} + \left\{ 2c_{1n} [\mu_n r_e I_1(\mu_n r_e) - \mu_n r_s I_1(\mu_n r_s)] - 2c_{2n} [\mu_n r_e K_1(\mu_n r_e) - \mu_n r_s K_1(\mu_n r_s)] \right\} / \left[(\mu_n r_e)^2 - (\mu_n r_w)^2 \right] \quad (72)$$

对于涂抹区土体水平向渗透系数沿径向呈如图 2(a) 所示的线性分布模式，

$$\bar{\Omega}_{sn} = \frac{-\gamma_w}{k_h(r_e^2 - r_w^2)} \frac{m_{sv3}}{m_{v3}} \left\{ \frac{(r_s - r_w)^3 (2r_s + r_w)}{6(1 - \eta)} - \frac{(\eta r_s - r_w)(r_s - r_w)}{(1 - \eta)^2} \left[r_s^2 \ln \frac{1}{\eta} - \frac{\psi}{(1 - \eta)^2} \right] + c_{3n} \frac{s-1}{\eta s-1} \left[\frac{r_s^2}{2} \ln \frac{(1 - \eta)s}{s-1} - \frac{r_w^2}{2} \ln \frac{(1 - \eta)}{\eta(s-1)} - \frac{r_s^2 - r_w^2}{4} - \frac{\psi}{2(1 - \eta)^2} - \frac{r_s^2 - r_w^2}{2} \ln \frac{1 - \eta}{\eta(s-1)} \right] + c_{4n} \frac{r_s^2 - r_w^2}{2} \right\} \quad (73)$$

其中:

$$\psi = \frac{1-\eta^2}{2}(r_s-r_w)^2 - 2(\eta r_s-r_w)(r_s-r_w)(1-\eta) + (\eta r_s-r_w)^2 \ln \frac{1}{\eta} \quad (74)$$

对于涂抹区土体水平向渗透系数沿径向呈如图 2(e) 所示的抛物线分布模式,

$$\bar{Q}_n = \frac{-\gamma_w}{k_h(r_e^2-r_w^2)} \frac{m_{sv3}}{m_{v3}} \left\{ -\frac{ar_w^2}{2b^2} \left[\frac{a+bs}{2} \left(r_s^2 \ln \frac{a}{a+1} - \zeta_1 \right) + \frac{a-bs}{2} \left(r_s^2 \ln \frac{a}{a-1} - \zeta_2 \right) \right] + c_{3n} \frac{a^2}{a^2-b^2s^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \left(r_s^2 \ln s - \frac{r_s^2-r_w^2}{2} \right) - \frac{a-bs}{4a} \left(r_s^2 \ln \frac{a}{a+1} - \zeta_1 \right) + \frac{a+bs}{4a} \left(r_s^2 \ln \frac{a}{a-1} - \zeta_2 \right) \right] + c_{4n} \frac{r_s^2-r_w^2}{2} \right\} \quad (75)$$

其中:

$$\zeta_1 = \frac{r_w^2}{b^2} \left[-a - \frac{1}{2} + 2(a+bs) + (a+bs)^2 \ln \frac{a}{a+1} \right] \quad (76)$$

$$\zeta_2 = \frac{r_w^2}{b^2} \left[a - \frac{1}{2} - 2(a-bs) + (a-bs)^2 \ln \frac{a}{a-1} \right] \quad (77)$$

2.6 地基整体平均固结度

地基的整体平均固结度可以根据超静孔隙水压力的消散定义为

$$U(T_h) = \frac{\frac{1}{h} \int_0^h p(z,t) dz}{\frac{1}{h} \int_0^h p(z,t_0) dz} - \frac{\frac{1}{h} \int_0^h \bar{u}(z,t) dz}{\frac{1}{h} \int_0^h p(z,t_0) dz} \quad (78)$$

将式 (16) 代入式 (78) 并考虑式 (71) 可得

$$U(T_h) = \left[\frac{t}{t_0} + \left(1 - \frac{t}{t_0} \right) H \langle t - t_0 \rangle \right] - \frac{\bar{u}_s(T_h)}{\frac{1}{h} \int_0^h p(z,t_0) dz} \quad (79)$$

考虑地基附加球应力沿深度任意分布, 将地基附加球应力表示为如下的一般形式:

$$p(z,t) = \left[\frac{t}{t_0} + \left(1 - \frac{t}{t_0} \right) H \langle t - t_0 \rangle \right] (p_a z^2 + p_b z + p_c) \quad (80)$$

则式 (79) 中

$$\frac{1}{h} \int_0^h p(z,t_0) dz = \frac{p_a}{3} h^2 + \frac{p_b}{2} h + p_c \quad (81)$$

式中: p_a 、 p_b 和 p_c 为描述地基附加球应力分布的系数。由 (16) 可得

$$p_n = \frac{2}{h} \int_0^h (p_a z^2 + p_b z + p_c) \sin \omega_n z dz \quad (82)$$

双面排水即 $D=1$ 时,

$$p_n = \frac{2}{\omega_n^3 h} [-4p_a + p_a \omega_n^2 h^2 + p_b \omega_n^2 h + 2p_c \omega_n^2] \quad (83)$$

单面排水即 $D=2$ 时,

$$p_n = \frac{2}{\omega_n^3 h} [-2p_a + 2p_a \omega_n h (-1)^{n-1} + p_b \omega_n (-1)^{n-1} + p_c \omega_n^2] \quad (84)$$

将式 (81) 代入式 (79), 将式 (83)、(84) 依次代入式 (71)、(79), 则可以得到线性加载工况任意分布的地基附加球应力下地基的整体平均固结度。

3 计算结果分析

利用所提出的解答, 本文对地基固结的一些影响因素进行了计算分析, 基本计算参数为: $h=15$ m, $D=2$, $r_w=35$ mm, $r_e=0.7$ m, $p_a=0$, $p_c=100$ kPa, $p_b=-p_c/(2h)$ (即, 由式 (80) 可知, 地基附加球应力沿深度假设为线性分布, 顶部为 100 kPa, 底部为 50 kPa), $t_0=0.5$ a, $k_w=2 \times 10^{-5}$ m/s, $k_h=2 \times 10^{-9}$ m/s, $k_v=1 \times 10^{-9}$ m/s, $m_{v3}=10^{-3}$ kPa⁻¹, $m_{sv3}/m_{v3}=1$ 。雷国辉等^[1,22]分析了地基附加应力分布、线性加载速率、井阻作用、以及泊松比效应对固结速率的影响, 本文则利用上节所推导的解答, 与现有等竖向应变解答的分析类似, 考虑侧向变形受到约束, 取 $\nu'=0.5$, 进一步分析涂抹区渗透系数的变化模式对固结速率的影响。根据 Basu 等^[5,23]对涂抹区半径和水平向渗透系数变化的试验研究的统计分析, 取与式 (28) 对应的式 (52)、(53) 中的 $\eta=0.2$, 并分别令涂抹比 $s=r_s/r_w=4$ 和 10, 以及 $m_{sv3}/m_{v3}=0$ 和 0.5, 进行了计算分析。

图 3、4 为涂抹比分别为 4 和 10 的情况下涂抹区水平向渗透系数沿径向分布的变化模式对固结速率的影响。为消除不同计算参数情况下无量纲化时间因素 T_h 的不同对计算结果可比性的影响^[24], 横坐标均采用实际时间 t 表示。图中涂抹区水平向渗透系数沿径向均匀分布的结果系采用雷国辉等^[1]的公式计算得到。显然, 其计算结果明显低估了地基土体的固结速率。图 2(e) 所示抛物线分布的计算结果与图 2(a) 所示线性分布的计算结果则相差不大。分布模式对地基固结速率的影响主要取决于涂抹区内土体的整体渗透系数的大小, 整体渗透系数越大, 则固结速率越快, 比如, 图中抛物线分布对应的地基固结速率就比线性分布对应的地基固结速率快。

与现有的解答相比, 本文的解答考虑了涂抹区的土体的体积压缩系数 m_{sv3} , 如表 1 所示。这为评估其对地基固结的影响奠定了基础。图 5-6 为采用

图 2(a)所示涂抹区水平向渗透系数沿径向线性分布的模式,在涂抹比分别为 4 和 10 的情况下,得到的涂抹区体积压缩系数对固结速率影响的计算结果。可以看出,当涂抹区半径不大时,涂抹区体积压缩系数对地基固结的影响并不明显。而当扰动区半径较大时,涂抹区土体的体积压缩系数对地基固结的影响不宜忽略,不考虑其影响即 $m_{sv3}/m_{v3} = 0$ 将会高估地基的固结速率。

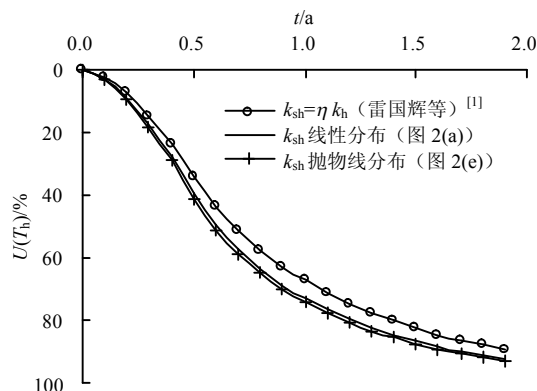


图 3 涂抹区水平向渗透系数变化对固结的影响 ($s = 4$)

Fig.3 Effects of distribution pattern of horizontal permeability of smeared soil on consolidation ($s = 4$)

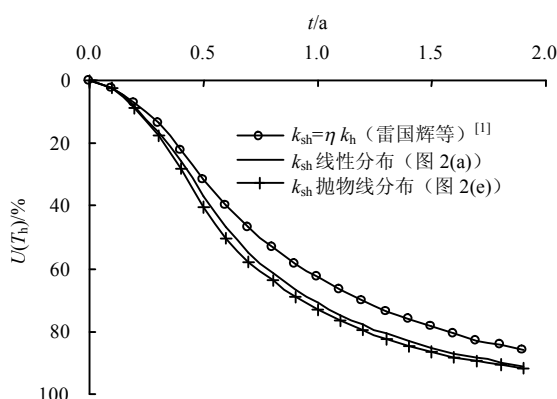


图 4 涂抹区水平向渗透系数变化对固结的影响 ($s = 10$)

Fig.4 Effects of distribution pattern of horizontal permeability of smeared soil on consolidation ($s = 10$)

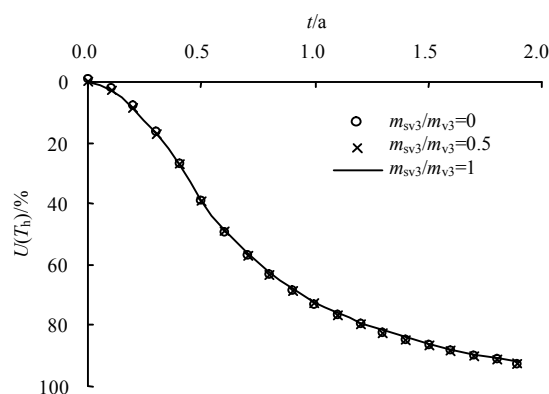


图 5 涂抹区体积压缩系数对固结的影响 ($s = 4$)

Fig.5 Effects of volumetric compressibility coefficient of smeared soil on consolidation ($s = 4$)

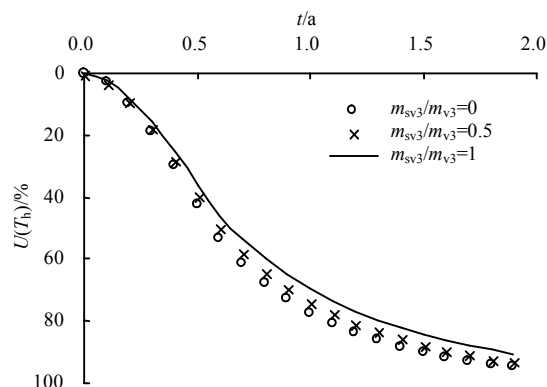


图 6 涂抹区体积压缩系数对固结的影响 ($s = 10$)

Fig.6 Effects of volumetric compressibility coefficient of smeared soil on consolidation ($s = 10$)

4 结 论

(1) 涂抹区土体水平向渗透系数沿径向分布模式对地基固结的影响主要取决于涂抹区内土体整体水平向渗透系数的大小,整体水平向渗透系数越大,固结速率越快。将涂抹区土体水平向渗透系数假设为均匀分布得到的计算结果明显低估了地基的固结速率。

(2) 线性分布和抛物线分布得到的计算结果相差不大。

(3) 不考虑涂抹区土体的压缩会高估地基的固结速率,当涂抹区半径较大时,需要考虑涂抹区土体的压缩对地基固结的影响。涂抹区土体的压缩性越高,地基固结越慢。

参 考 文 献

- [1] 雷国辉, 许波, 张旭东. 堆载预压径向竖向固结等体积应变解答[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 76—84, 勘误, 35(2): 400.
LEI Guo-hui, XU Bo, ZHANG Xu-dong. Equal volumetric strain solution for radial and vertical consolidation under surcharge loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(1): 76—84, Corrigendum, 35(2): 400.
- [2] 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 No. 27. [S.l.]: [s.n.], 1991: 879—890.
- [3] CHAI J C, MIURA N, SAKAJO S. A theoretical study on smear effect around vertical drain[C]// Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: A A Balkema, 1997, 3: 1581—1584.

- [4] BASU D, BASU P, PREZZI M. Analytical solutions for consolidation aided by vertical drains[J]. **Geomechanics and Geoengineering: An International Journal**, 2006, 1(1): 63—71.
- [5] BASU P, BASU D, PREZZI M. Analysis of PVD-enhanced consolidation with soil disturbance[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement**, 2010, 163(4): 237—249.
- [6] WALKER R, INDRARATNA B. Vertical drain consolidation with parabolic distribution of permeability in smear zone[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 2006, 132(7): 937—941.
- [7] WALKER R, INDRARATNA B. Vertical drain consolidation with overlapping smear zones[J]. **Géotechnique**, 2007, 57(5): 463—467.
- [8] WANG X S, JIAO J J. Analysis of soil consolidation by vertical drains with double porosity model[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2004, 28(14): 1385—1400.
- [9] 蔡新, 谢康和, 徐妍, 等. 初始孔压非均布条件下涂抹区渗透系数变化的砂井地基固结解[J]. **岩土工程学报**, 2010, 32(1): 104—108.
CAI Xin, XIE Kang-he, XU Yan, et al. Analytical solution for consolidation of sand-drained ground under non-uniform distribution of initial excess pore water pressure and variation of permeability coefficient in smear zone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 104—108.
- [10] 郭彪, 韩颖, 龚晓南, 等. 随时间任意变化荷载下砂井地基固结分析[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2012, 43(6): 2369—2377.
GUO Biao, HAN Ying, GONG Xiao-nan, et al. Consolidation analysis with vertical drains and general time-dependent loading[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(6): 2369—2377.
- [11] LU M M, XIE K H, WANG S Y. Consolidation of vertical drain with depth-varying stress induced by multi-stage loading[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(8): 1096—1101.
- [12] HANSBO S. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: A A Balkema, 1981, 3: 677—682.
- [13] CARRILLO N. Simple two- and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soils[J]. **Journal of Mathematics and Physics**, 1942, 21(1): 1—5.
- [14] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007, 327—330.
- [15] 谢康和. 砂井地基: 固结理论、数值分析与优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 1987.
- [16] 谢康和. 等应变条件下的双层理想井地基固结理论[J]. **浙江大学学报(自然科学版)**, 1995, 29(5): 529—540.
XIE Kang-he. Consolidation theory of double-layered ground with vertical ideal drains under equal strain condition[J]. **Journal of Zhejiang University (Natural Science)**, 1995, 29(5): 529—540.
- [17] TANG X W, ONITSUKA K. Consolidation by vertical drains under time-dependent loading[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2000, 24(9): 739—751.
- [18] ZHU G, YIN J H. Accuracy of Carrillo's formula for consolidation of soil with vertical and horizontal drainage under time-dependent loading[J]. **Communications in Numerical Methods in Engineering**, 2004, 20(9): 721—735.
- [19] 赵维炳. 广义 Voigt 模型模拟的饱水土体固结理论及其应用[D]. 南京: 河海大学出版社, 1987.
- [20] 赵维炳, 施建勇. 软土固结与流变[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996.
- [21] LEO C J. Equal strain consolidation by vertical drains[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 2004, 130(3): 316—327.
- [22] 雷国辉, 蒋春霞, 施建勇. 任意附加应力下竖井径竖向耦合固结等应变解[J]. **岩土力学**, 2006, 27(2): 173—178.
LEI Guo-hui, JIANG Chun-xia, SHI Jian-yong. Equal strain solutions of radial and vertical coupled consolidation by vertical drains under arbitrarily distributed ground soil stress increase[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 173—178.
- [23] BASU D, PREZZI M, MADHAV M R. Effect of soil disturbance on consolidation by prefabricated vertical drains installed in a rectangular pattern[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2010, 28(1): 61—77.
- [24] LOVISA J, READ W, SIVAKUGAN N. Time factor in consolidation: Critical review[J]. **International Journal of Geomechanics**, ASCE, 2013, 13(1): 83—86.