

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0127

双层地基水平排水砂垫层位置优化研究

李红坡^{1,2,3}, 陈 征⁴, 冯健雪^{1,2,3}, 蒙宇涵^{1,2,3}, 梅国雄^{1,2,3}

(1. 广西大学 工程防灾与结构安全教育重点实验室, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004;
3. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 4. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对吹填土地基内水平排水砂垫层位置的优化问题, 考虑双层地基内设置单一砂垫层的情况, 采用分离变量法求出了地基超静孔压和平均固结度的解析解答, 通过解答退化和有限元方法验证了解答的正确性, 并讨论了下层与上层地基的渗透系数之比 a 、体积压缩系数之比 b 和厚度之比 c 对砂垫层最优位置的影响, 最后通过算例对比了砂垫层设置在不同位置时地基的固结效率。结果表明: 同一时间因数下, 下层与上层地基的渗透系数之比 $a < 1$ 时, 砂垫层的最优位置随着 a 的增大逐渐向下移动, $a > 1$ 时, 则相反; 下层与上层地基的体积压缩系数之比 $b < 1$ 时, 砂垫层的最优位置随着 b 的增大逐渐向下移动, $b > 1$ 时, 则相反; 下层地基的固结系数较大时, 在固结前期, 砂垫层的最优位置随着下层与上层地基厚度之比 c 的增大逐渐向上移动, 在固结后期则相反。算例计算结果显示: 地基固结度达到 90% 时, 砂垫层设置在最优位置相比未铺设砂垫层能节省大量时间。

关 键 词: 双层地基; 水平排水砂垫层; 渗透系数; 砂垫层最优位置

中图分类号: TU 449

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 02-0437-08

Study on position optimization of horizontal drainage sand blanket of double-layer foundation

LI Hong-po^{1,2,3}, CHEN Zheng⁴, FENG Jian-xue^{1,2,3}, MENG Yu-han^{1,2,3}, MEI Guo-xiong^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

4. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: To analyze the optimal position of horizontal drainage sand blanket in reclaimed foundation, the case that a double-layer foundation with placement of a single sand blanket is considered, using the method of separation of variables, and the analytical solution of excess pore-water pressure and average degree of consolidation is obtained. Their validity is verified by degeneration and finite element method. The effects of the lower foundation permeability coefficient to the upper foundation permeability coefficient ratio (a), the lower foundation volumetric compression coefficient to the upper foundation volumetric compression coefficient ratio (b) and the lower foundation thickness to upper foundation thickness ratio (c) on the optimal position of the sand blanket are discussed. Finally, an example is given to demonstrate different consolidation efficiencies of the foundation when the sand blanket is placed at different positions. The results show that at the same time factor, when $a < 1$, the optimal position of the sand blanket moves downward with the increase of a , but when $a > 1$, the opposite becomes the case. The optimal position of the sand blanket moves downward with the increase of b when $b < 1$, and when $b > 1$, the opposite becomes the case. When the consolidation coefficient of the lower foundation is greater than that of the upper foundation, the optimal position of the sand blanket moves upward with the increase of c in the early stage of consolidation, and the opposite becomes the case in the later stage of consolidation. The calculation results show that when the average degree of consolidation of foundation reaches 90%, the sand blanket is placed at the optimal position, which saves a lot of time compared with the unpaved sand blanket.

Keywords: double-layer foundation; horizontal drainage sand blanket; permeability coefficient; optimal position of sand blanket

收稿日期: 2019-03-11

修回日期: 2019-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51578164, No. 41672296, No. 51878185); 广西自然科学基金创新研究团队项目 (No. 2016GXNSFGA380008); 中国国家留学基金 (No. 201906660001)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51578164, 41672296, 51878185), the Innovation Research Team Program of Guangxi Natural Science Foundation (2016GXNSFGA380008) and the China Scholarship Council (CSC) (201906660001).

第一作者简介: 李红坡, 男, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事软土地基固结理论方面的研究工作。E-mail: li1994813@126.com

通讯作者: 梅国雄, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 从事固结理论和土体基本性质等研究。E-mail: meiguox@163.com

1 引言

随着我国经济建设的不断发展,我国对海洋权益越加重视。南海是中央提出的“一带一路”倡议的重要节点,是海上丝绸之路的中继站。南海的海洋工程建设在国土资源和海洋环境保护、油气资源开采以及海洋科学研究的发展等各方面都具有重要的战略意义。近年来,国家在南海开展了大规模吹填造岛工程^[1-2]。理想的吹填材料是中粗砂,由于砂源日益紧缺和价格的不断上涨,采用近海新近沉积的海底软土(黏性土)作为吹填材料成为了新的发展方向^[3]。对于软土吹填形成的地基,由于吹填土含水率高、强度低、孔隙比大、地基承载力低、压缩性高以及固结时间长等特性^[4],必须对其进行处理才能满足工程建设的需求。

对于吹填土地基的处理,逐渐发展出了动力排水固结法^[5]、高真空击密法^[6-7]、静动联合排水固结法^[8]、真空预压法^[9]等方法,并在许多工程中取得了良好的效果。同时,也有许多学者从不同方面,如颗粒级配^[10]、真空作用面位置及排水板间距^[11-12]等对这些方法进行了研究。

在上述工法基础之上,为了更为有效地提高吹填土地基固结效率, Lee 等^[13]在新加坡的围垦工程中通过交互吹填黏土层和砂土层的方法,减小地基土渗流路径,从而达到加速地基整体固结速率的效果。在对含砂垫层地基的理论研究方面, Gibson 等^[14]通过建立水平向排水边界条件,求得了地基固结一维解析解,研究了堤身的固结过程; Tan 等^[15]则通过有限元法研究了地基中砂垫层和黏土层的几何及物理参数对地基固结效率的影响;雷国辉等^[16]则通过分离变量法求出了含砂垫层地基的二维自由应变固结解析解,研究了砂垫层渗透系数、厚度及宽度对地基固结的影响;在前人的研究成果上, Nogami 等^[17-18]又提出了含多层水平薄砂层的吹填土地基超静孔压和固结度的解析解,并给出了含多层薄砂层的吹填土地基的设计方法。

上述对于吹填土地基内砂垫层的研究中,只是等间距地设置多层砂垫层,并未考虑砂垫层位置的优化。为此,本文针对双层地基内砂垫层位置的优化问题,给出双层地基内设置水平排水砂垫层的最优位置,并对地基的渗透系数之比、体积压缩系数之比和厚度之比对砂垫层最优位置产生的影响进行讨论,最后通过算例对比砂垫层设置在不同位置时地基的固结效率。

2 问题的数学模型

2.1 计算简图及基本假定

图 1 为设置水平排水砂垫层的双层地基固结计算简图,双层地基顶面透水、底面不透水、初始孔压均布。图中,各层地基的厚度、竖向渗透系数、体积压缩系数、压缩模量和固结系数分别为 H_i 、 k_{vi} 、 m_{vi} 、 E_{si} 和 C_{vi} ($i=1, 2$); 双层地基的总厚度为 H , $H=H_1+H_2$; h 为地基顶面到水平排水砂垫层的距离, $h=\xi H$; 在地基顶面上作用着连续均布荷载 p 。在地基中设置水平排水砂垫层后,地基被分为 3 层,地表向下各层土体的超静孔隙水压力和固结系数分别为 u_j 、 C_{vj} ($j=1, 2, 3$)。

针对双层地基内砂垫层的优化问题,除采用太沙基一维固结理论的基本假定外,还采用以下假定:①排水砂垫层为完全排水边界;②排水砂垫层的厚度相对地基土忽略不计。

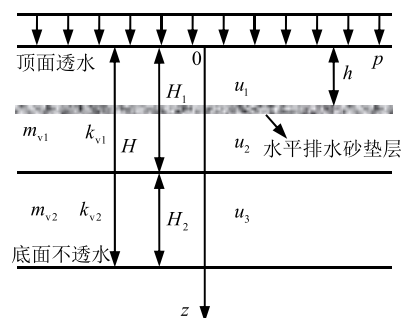


图 1 铺设砂垫层的双层地基计算简图

Fig.1 Calculation diagram of double-layer foundation with horizontal drainage sand blanket

2.2 固结控制方程和求解条件

由固结理论可知,各层土体的控制方程为

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} = C_{vj} \frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2}, \quad j=1, 2, 3 \quad (1)$$

边界条件为

$$u_1|_{z=0} = \frac{\partial u_3}{\partial z}|_{z=H} = 0 \quad (2)$$

初始条件为

$$u_j|_{t=0} = p, \quad j=1, 2, 3 \quad (3)$$

层间连续条件为

$h < H_1$ 时, 有

$$u_1|_{z=h} = u_2|_{z=h} = 0 \quad (4)$$

$$u_2|_{z=H_1} = u_3|_{z=H_1}, \quad k_{v1} \frac{\partial u_2}{\partial z}|_{z=H_1} = k_{v2} \frac{\partial u_3}{\partial z}|_{z=H_1} \quad (5)$$

$H_1 < h < H_2$ 时, 有

$$u_2|_{z=h} = u_3|_{z=h} = 0 \quad (6)$$

$$u_1|_{z=H_1} = u_2|_{z=H_1}, \quad k_{v1} \frac{\partial u_1}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = k_{v2} \frac{\partial u_2}{\partial z} \Big|_{z=H_1} \quad (7)$$

3 地基固结问题的解答

3.1 固结方程的求解

为了求解方便, 定义如下无量纲参数:

地基厚度之比 $c = H_2/H_1$; 地基竖向渗透系数之比 $a = k_{v2}/k_{v1}$; 地基固结系数之比 $\mu = \sqrt{C_{v1}/C_{v2}} = \sqrt{b/a}$; 地基体积压缩系数之比 $b = m_{v2}/m_{v1} = E_{s1}/E_{s2}$; $c_1 = H_2/(H_1 - h) = c/[1 - \xi(1 + c)]$; $c_2 = (h - H_1)/H_1 = \xi(1 + c) - 1$ 。

当 $h < H_1$ 时, 根据求解条件 (2)、(3)、(4), 采用分离变量法, 解得水平排水砂垫层之上土体的超静孔隙水压力为

$$u_1 = \frac{4p}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin \left[\frac{(2n-1)\pi z}{h} \right] e^{-C_{v1} \left[\frac{(2n-1)\pi}{h} \right]^2 t} \quad (8)$$

根据求解条件 (2)、(4), 采用分离变量法, 将砂垫层之下双层土体的超静孔隙水压力设为^[19]

$$u_j = \sum_{m=1}^{\infty} B_m g_{mi}(z) e^{-\beta_{m1} t}, \quad j=2,3 \quad (9)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} g_{m2}(z) &= \sin \left(\lambda_{m1} \frac{z-h}{H_1-h} \right) \\ g_{m3}(z) &= A_m \cos \left(\mu \lambda_{m1} \frac{H-z}{H_1-h} \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式 (9)、(10) 代入层间连续条件 (5), 解得

$$\sqrt{ab} \tan(\lambda_{m1}) \tan(\mu c_1 \lambda_{m1}) = 1 \quad (11)$$

$$A_m = \frac{\sin(\lambda_{m1})}{\cos(\mu c_1 \lambda_{m1})} \quad (12)$$

$$\beta_{m1} = \frac{C_{v1} \lambda_{m1}^2}{(H_1 - h)^2} \quad (13)$$

式中: λ_{m1} 为超越方程式 (11) 的正根, 可由二分法求得。

由正交关系可以求得

$$B_m = \frac{2 \left[\int_0^{H_1-h} p g_{m2}(z) dz + b \int_{H_1-h}^{H_2} p g_{m3}(z) dz \right]}{(H_1 - h)(1 + bc_1 A_m^2)} = \frac{2p}{\lambda_{m1} (1 + bc_1 A_m^2)} \quad (14)$$

则砂垫层之下双层土体的超静孔隙水压力为

$$u_2 = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin \left(\lambda_{m1} \frac{z-h}{H_1-h} \right) e^{-\beta_{m1} t} \quad (15)$$

$$u_3 = \sum_{m=1}^{\infty} A_m B_m \cos \left(\mu \lambda_{m1} \frac{H-z}{H_1-h} \right) e^{-\beta_{m1} t} \quad (16)$$

当 $H_1 < h < H_2$ 时, 根据求解条件 (2)、(6), 采用分离变量法, 将砂垫层之上双层土体的超静孔隙水压力设为

$$u_j = \sum_{m=1}^{\infty} D_m g_{mi}(z) e^{-\beta_{m2} t}, \quad j=1,2 \quad (17)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} g_{m1}(z) &= \sin \left(\lambda_{m2} \frac{z}{H_1} \right) \\ g_{m2}(z) &= C_m \sin \left(\mu \lambda_{m2} \frac{h-z}{H_1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

将式 (17)、(18) 代入层间连续条件 (7), 解得

$$\sqrt{ab} \tan(\lambda_{m2}) \cot(\mu c_2 \lambda_{m2}) = -1 \quad (19)$$

$$C_m = \frac{\sin(\lambda_{m2})}{\sin(\mu c_2 \lambda_{m2})} \quad (20)$$

$$\beta_{m2} = \frac{C_{v1} \lambda_{m2}^2}{H_1^2} \quad (21)$$

式中: λ_{m2} 为超越方程式 (19) 的正根, 可由二分法求得。

由正交关系可以求得

$$D_m = \frac{2 \left[\int_0^{H_1} p g_{m1}(z) dz + b \int_{H_1}^h p g_{m2}(z) dz \right]}{H_1 (1 + c_2 b C_m^2)} = \frac{2p(1 + \sqrt{ab} C_m)}{\lambda_{m2} (1 + bc_2 C_m^2)} \quad (22)$$

则砂垫层之上双层土体的超静孔隙水压力为

$$u_1 = \sum_{m=1}^{\infty} D_m \sin \left(\lambda_{m2} \frac{z}{H_1} \right) e^{-\beta_{m2} t} \quad (23)$$

$$u_2 = \sum_{m=1}^{\infty} C_m D_m \cos \left(\mu \lambda_{m2} \frac{h-z}{H_1} \right) e^{-\beta_{m2} t} \quad (24)$$

根据求解条件 (2)、(3)、(6), 采用分离变量法, 解得水平排水砂垫层之下土体的超静孔隙水压力为

$$u_3 = \frac{4p}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin \left[\frac{\pi(2n-1)(z-h)}{2(H-h)} \right] e^{-C_{v2} \left[\frac{(2n-1)\pi}{2(H-h)} \right]^2 t} \quad (25)$$

3.2 地基固结度的解答

地基平均固结度 U 即地基固结过程中某一时刻孔隙水压力平均消散值与初始孔隙水压力的比值, 其表达式为

$$U = \frac{\sum_{i=1}^3 \int_{h_{i-1}}^{h_i} [p - u(z)] dz}{\sum_{i=1}^3 \int_{h_{i-1}}^{h_i} p dz} \quad (26)$$

将式 (8)、(15)、(16) 和 (23) ~ (25) 分别代入式 (26), 解得地基平均固结度 U 为

$$U = \begin{cases} U_1, & h \leq H_1 \\ U_2, & h > H_1 \end{cases} \quad (27)$$

式中:

$$U_1 = 1 - \frac{8\xi}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{N^2} e^{-\eta_1 T_v} - \frac{1-\xi d}{d} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{E_m H_m}{d} e^{-\mu_1 T_v};$$

$$U_2 = 1 - \frac{8(1-\xi)}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{N^2} e^{-\eta_2 T_v} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F_m J_m}{d} e^{-\mu_2 T_v};$$

$$\eta_1 = \left[(2n-1)\pi/\xi \right]^2; \quad \eta_2 = \pi^2 a (2n-1)^2 / 4b(1-\xi)^2;$$

$$\mu_1 = (1+c)^2 \lambda_{m1}^2 / [1-\xi(1+c)]^2; \quad \mu_2 = \lambda_{m2}^2 (1+c)^2;$$

$$T_v = C_{v1} t / H^2; \quad E_m = B_m / p; \quad F_m = D_m / p;$$

$$H_m = [b + (1-b)\cos(\lambda_{m1})] / (b\lambda_{m1});$$

$$J_m = [b + (1-b)\cos(\lambda_{m2}) + \sqrt{ab}C_m] / (b\lambda_{m2});$$

$$d = 1 + c; \quad N = 2n - 1.$$

4 解答的验证

4.1 退化验证

当 $a = b = 1$ 时 $C_{v1} = C_{v2}$, $\mu = 1$, 铺设了水平排水砂垫层的双层地基变成了铺设水平排水砂垫层的均质地基, 此时, 根据式 (11)、(19) 可求得特征值为

$$\lambda_{m1} = \frac{(2m-1)\pi}{2(1+bc_1)}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (28)$$

$$\lambda_{m2} = \frac{m\pi}{1+bc_2}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (29)$$

将式 (28) 代入式 (14), 可解得

$$B_m = \frac{4p}{(2m-1)\pi}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (30)$$

将式 (29) 代入式 (22), 当 m 为偶数时 $D_m = 0$, 可解得

$$D_m = \frac{4p}{(2m-1)\pi}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (31)$$

将式 (30)、(31) 代入式 (27), 解得

$$U_1 = U_2 = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8h}{(2n-1)^2 \pi^2 H} e^{-C_{v1} \left(\frac{2n-1}{h} \right)^2 \pi^2 t} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{8(H-h)}{(2n-1)^2 \pi^2 H} e^{-C_{v1} \left(\frac{2n-1}{H-h} \right)^2 \frac{\pi^2 t}{4}} \quad (32)$$

$a = b = 1$ 时, 在双层地基的不同位置铺设水平排水砂垫层时所解得的地基平均固结度应该形式一致, 式 (32) 验证了这一点, U_1 和 U_2 仅有的差别在于砂垫层位置 h 取值的不同。

当砂垫层铺设在距地基底面十分近的位置时, 双层地基与双面排水的均质地基很相似, 取式 (32) 中 $h = 0.99H$, 即 $\xi = 0.99$, 将其计算结果与太沙基双面排水解答对比, 结果如图 2 所示。可见, 两条固结曲线基本重合, 这验证了本文解答的正确性。

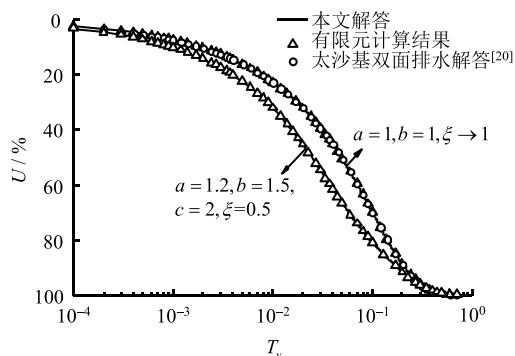


图 2 平均固结度计算结果对比

Fig.2 Results of average degree of consolidation calculated by different approaches

4.2 有限元对比验证

为了进一步验证解答的正确性, 采用有限元软件对如图 1 所示的固结模型进行了计算, 并与本文解答进行了对比。取参数 $a = 1.2$, $b = 1.5$, $c = 2$, $\xi = 0.5$ 进行计算, 计算结果如图 2 所示。可以看出, 本文解答和有限元计算结果是吻合的, 这进一步验证了本文解答的正确性。

5 砂垫层最优位置的参数分析

水平排水砂垫层可以放置在地基中的任意位

置, 则地基平均固结度 U 应该是铺设砂垫层位置 ξ 的连续函数。当参数 a 、 b 、 c 和时间因数 T_v 确定后, 地基平均固结度 U 只是砂垫层位置 ξ 的单值连续函数, 则必定存在某个位置使得固结度 U 最大, 该位置就是砂垫层的最优位置, 求式 (27) 对于 ξ 的导数, 令 $dU/d\xi = 0$, 再通过编程求出设置水平排水砂垫层的最优位置。从固结度表达式可以看出, 地基平均固结度 U 不仅是砂垫层位置 ξ 的函数, 还是下层与上层地基渗透系数之比 a 、体积压缩系数之比 b 、厚度之比 c 的函数, 参数 a 、 b 、 c 影响着地基的固结性状, 从而影响铺设砂垫层的最优位置。

5.1 渗透系数之比 a 对砂垫层最优位置的影响

图3所示为定时间因数 T_v 下, 地基固结度达到最大值时对应的砂垫层最优位置 ξ_b 与下层、上层地基渗透系数之比 a 的关系。图中分别给出了 $a = 0.2$ 、 0.5 、 0.8 、 1 、 2 、 5 、 8 时砂垫层最优位置 ξ_b 随时间因数 T_v 的变化曲线。在固结初期, 孔隙水渗流速度较快, 砂垫层最优位置应在渗透性较强的土层中, 以加快超静孔隙水压力的消散; 随着地基固结的发展, 到了固结后期, 孔隙水渗流速度逐渐减缓, 砂垫层最优位置应在超静孔压未及时消散的土中, 以加速固结后期土体内残余超静孔压的消散。当 $T_v = 0.02$ 时, $a = 0.2$ 、 0.5 、 0.8 、 2 、 5 、 8 所对应的砂垫层最优位置分别为 0.366 、 0.394 、 0.438 、 0.694 、 0.673 、 0.646 ; 当 $T_v = 0.2$ 时, $a = 0.2$ 、 0.5 、 0.8 、 2 、 5 、 8 所对应的砂垫层最优位置分别为 0.763 、 0.705 、 0.679 、 0.62 、 0.5 、 0.486 。可以看出: 当 $a < 1$ 时, 随着时间的发展, 砂垫层的最优位置由上层地基逐渐向下移动到下层地基, 在固结前期, a 越大砂垫层的最优位置越接近地基地面, 在固结后期, a 越大砂垫层的最优位置越接近地基顶面; $a > 1$ 时, 随着时间的发展砂垫层的最优位置由下层地基逐渐向上层地基移动, 且 a 越大, 砂垫层的最优位置越接近地基顶面。值得一提的是, 当 $a = 1$ 时, 地基为均质土体, 砂垫层放在土体 $2/3$ 厚度的位置后, 砂垫层之上为双面排水的土层, 砂垫层之下为单面排水的土层, 且前者的厚度是后者的 2 倍, 两者固结速率相等, 地基固结达到最快。

5.2 体积压缩系数之比 b 对砂垫层最优位置的影响

图4给出了定时间因数 T_v 条件下, 地基固结度最大时所对应的砂垫层最优位置 ξ_b 与下层、上层地基体积压缩系数之比 b 的关系。图中共有 $b = 0.2$ 、 0.5 、 0.8 、 1 、 2 、 5 、 8 所对应的砂垫层最优位置 ξ_b 随时间因数 T_v 的变化曲线。地基的体积压缩系数越小, 则固结能力越强, 在固结初期, 砂垫层最优位

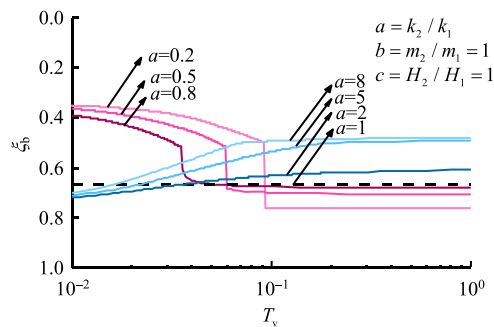


图3 渗透系数之比 a 对砂垫层最优位置的影响
Fig.3 Effect of the lower foundation permeability coefficient to the upper foundation permeability coefficient ratio (a) on the optimal position of sand blanket

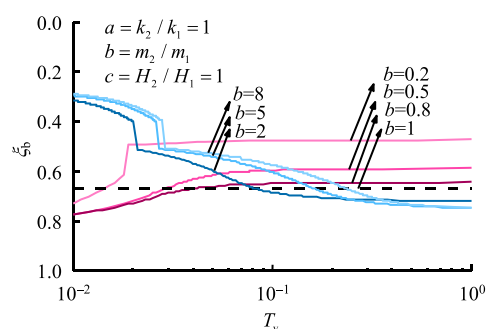


图4 体积压缩系数之比 b 对砂垫层最优位置的影响
Fig.4 Effect of the lower foundation volumetric compression coefficient to the upper foundation volumetric compression coefficient ratio (b) on the optimal position of sand blanket

置应在压缩性较小的土层中, 以加快土体的固结效率; 随着地基固结的发展, 到了固结后期, 压缩系数较小的土层的固结程度较高, 砂垫层最优位置应在固结程度较低的土中, 以加速固结能力较弱的土体固结。当 $T_v = 0.02$ 时, $b = 0.2$ 、 0.5 、 0.8 、 2 、 5 、 8 所对应的砂垫层最优位置分别为 0.492 、 0.718 、 0.727 、 0.398 、 0.348 、 0.338 ; 当 $T_v = 0.2$ 时, $b = 0.2$ 、 0.5 、 0.8 、 2 、 5 、 8 所对应的砂垫层最优位置分别为 0.473 、 0.59 、 0.645 、 0.708 、 0.695 、 0.647 。可以看出: 当 $b < 1$ 时, 随着时间的发展砂垫层的最优位置逐渐由下层地基向上层地基移动, 且 b 越大, 砂垫层的最优位置越接近地基地面; $b > 1$ 时, 则相反。当 $b = 1$ 时, 地基为均质土体, 砂垫层的最优位置在地基 $2/3$ 厚度的位置。

5.3 厚度之比 c 对砂垫层最优位置的影响

图5所示为给定时间因数 T_v 条件下, 使得地基固结度最大的砂垫层最优位置 ξ_b 与下层、上层地基厚度之比 c 的关系。图中分别给出了 $c = 0.8$ 、 1 、 1.2 、 1.4 、 1.6 、 1.8 、 2 时砂垫层最优位置 ξ_b 随时间因数 T_v 的变化曲线。当 $T_v = 0.02$ 时, $c = 0.8$ 、 1 、 1.2 、 1.4 、

1.6、1.8、2 所对应的砂垫层最优位置分别为 0.715、0.693、0.676、0.662、0.652、0.642、0.638；当 $T_v = 0.2$ 时， $c = 0.8、1、1.2、1.4、1.6、1.8、2$ 所对应的砂垫层最优位置分别为 0.611、0.62、0.625、0.628、0.629、0.63、0.631。可以看出，固结前期，砂垫层的最优位置随着 c 的增大逐渐向地基顶面移动，固结后期则完全相反。由于下层地基的固结能力较上层强，砂垫层的最优位置随着时间的发展逐渐向上移动，且随厚度比 c 的增大，双层地基逐渐向均质地基发展， c 对砂垫层最优位置的影响越来越弱，具体表现为随着 c 的增大，砂垫层最优位置的变化范围在缩小。

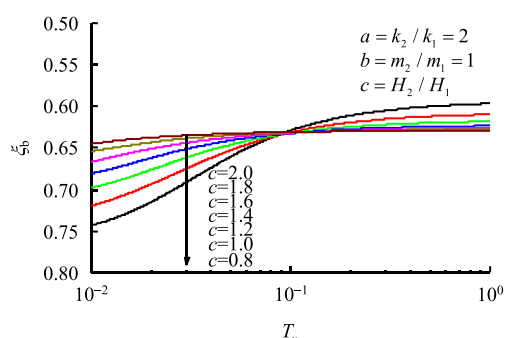


图5 地基厚度之比 c 对砂垫层最优位置的影响
Fig.5 Effect of the lower foundation thickness ratio (c) on the optimal position of sand blanket

6 算例计算结果

在实际工程中常以地基固结度达到 90% 时作为堆载卸载的标准，因此，将地基平均固结度达到 90% 作为标准来比较砂垫层设置在不同位置时地基的固结效率。图 6 给出了砂垫层分别设置在 $0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、0.72H$ 和不设砂垫层时双层地基平均固结度与时间因数 T_v 的关系曲线，其中 H 为双层地基厚度， $0.72H$ 为地基固结度达到 90% 时对应的砂垫层最优位置。可以看出：土体内部设置砂垫层地基的固结效率相比未设砂垫层地基有较大的提高；地基固结度达到 50% 之前，将砂垫层设置在 $0.4H$ 的位置时（即 $\xi = 0.4$ ），地基固结最快；地基固结度大于 50% 后，将砂垫层设置在最优位置处（即 $\xi = 0.72$ ），地基固结速率达到最快。地基固结度达到 90% 时，地基不设砂垫层和砂垫层分别设置在 $0.2H、0.4H、0.6H、0.8H$ 与最优位置处所对应的时间因数分别为 1.61、1.03、0.578、0.218、0.198、0.168，砂垫层设置在最优位置所需时间分别为不设砂垫层和砂垫层分别设置在 $0.2H、0.4H、0.6H、0.8H$ 时所

需时间的 10.43%、16.31%、29.07%、77.06%、84.85%。由此可见，将砂垫层设置在最优位置能极大缩短地基固结时间。

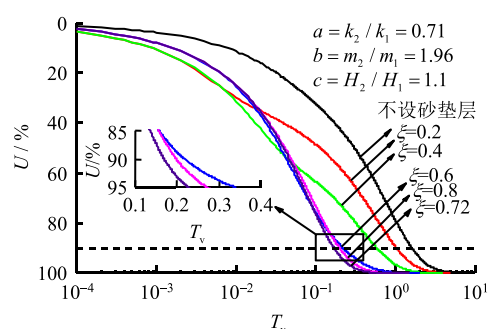


图6 砂垫层设置在不同位置时的固结度曲线
Fig.6 Consolidation curves of ground when the sand blanket placed at different positions

7 结 论

(1) 获得了在任意位置设置水平排水砂垫层时地基的超静孔压和平均固结度的解析解，为含水平排水砂垫层双层地基固结分析提供了计算方法。

(2) 当下层与上层地基渗透系数之比 $a < 1$ 时，砂垫层的最优位置随着时间的发展逐渐向下移动并趋于稳定，在固结前期， a 越大砂垫层的最优位置越接近地基地面，在固结后期， a 越大砂垫层的最优位置越接近地基顶面；当 $a > 1$ 时，砂垫层的最优位置随着时间的发展逐渐向上移动并趋于稳定，且 a 越大，砂垫层的最优位置越接近地基顶面。

(3) 当下层与上层地基体积压缩系数之比 $b < 1$ 时，砂垫层的最优位置随着时间的发展逐渐向上移动，且 b 越大，砂垫层的最优位置越接近地基地面；当 $b > 1$ 时，则相反。

(4) 下层地基的固结系数较大时，砂垫层的最优位置随着时间的发展逐渐向上移动。在固结前期，砂垫层的最优位置随着 c 的增大逐渐向地基顶面移动，在固结后期则相反。

(5) 算例计算结果显示：地基固结度达到 90% 时砂垫层设置在最优位置相比未铺设砂垫层能节省大量时间。

参 考 文 献

- [1] 黄云, 胡其高, 张硕云. 吹填岛礁地基稳定性问题研究综述[C]//第 27 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册). 西安: [出版社不详], 2018.
HUANG Yun, HU Qi-gao, ZHANG Shuo-yun. Research on stability of filling sea island foundation[C]//Papers

- Collection of the 27th National Academic Conference on Structural Engineering(Volume II). Xi'an: [s. n.], 2018.
- [2] 王新志, 王星, 胡明鉴, 等. 吹填人工岛地基钙质粉土夹层的渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 54-62.
- WANG Xin-zhi, WANG Xing, HU Ming-jian, et al. Study of permeability of calcareous silty layer of foundation at an artificial reclamation island[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 54-62.
- [3] 王清, 肖树芳. 海积软土的工程地质研究现状[J]. 世界地质, 2000, 19(3): 253-257.
- WANG Qing, XIAO Shu-fang. A review on the engineering geology of marine soft soil[J]. **World Geology**, 2000, 19(3): 253-257.
- [4] 王芳, 郭进京, 郑忠成. 吹填土地基处理方法的讨论[J]. 矿产勘查, 2009, 12(6): 15-17.
- WANG Fang, GUO Jin-jing, ZHENG Zhong-cheng. Discussion on treatment method of drainage filling foundation[J]. **Mineral Exploration**, 2009, 12(6): 15-17.
- [5] 刘勇健, 李彰明, 张丽娟. 动力排水固结法在面积深厚淤泥软基加固处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4000-4007.
- LIU Yong-jian, LI Zhang-ming, ZHANG Li-juan. Application of dynamic drainage consolidation method to reinforcement and treatment of deep and thick silt foundation of large area[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Suppl.2): 4000-4007.
- [6] 高有斌, 刘汉龙, 曹建建. 吹填土高真空击密法与常规强夯法对比试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(10): 100-104.
- GAO You-bin, LIU Han-long, CAO Jian-jian. Comparative experiment of high vacuum densification method and routine dynamic consolidation method in dredger fill soil[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)**, 2009, 37(10): 100-104.
- [7] 郝志超, 沈宇鹏, 张尧禹. 吹填土地区路基处理新方法效果对比研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 579-583.
- HAO Zhi-chao, SHEN Yu-peng, ZHANG Yao-yu. Comparative studies on treatment effects of new methods for dredger fill foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Suppl.2): 579-583.
- [8] 张丽娟, 李彰明, 韩江. 动静力排水固结法在淤泥质地基处理工程中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 567-571.
- ZHANG Li-juan, LI Zhang-ming, HAN Jiang. The application of dynamic-static drainage consolidation method on a silt ground disposal project of Guangzhou[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 567-571.
- [9] 曹杰, 郑建国, 刘智. 真空预压法处理软土地基的工程应用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 2): 124-127.
- CAO Jie, ZHENG Jian-guo, LIU Zhi. Application of vacuum preloading method in consolidating soft soil foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(Suppl.2): 124-127.
- [10] 颜永国, 董志良, 杨昌斌. 颗粒级配对真空预压法处理吹填土效果影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1775-1779.
- YAN Yong-guo, DONG Zhi-liang, YANG Chang-bin. Experimental study on effect of grain size distribution on improvement of dredger fill[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(11): 1775-1779.
- [11] 胡珩, 王保田. 真空作用面位置对加固效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1287-1290.
- HU Heng, WANG Bao-tian. Experimental study of effect of vacuum location on improvement of subsoil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1287-1290.
- [12] 张诚厚, 王伯衍. 真空作用面位置及排水管间距对预压效果的影响[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 45-52.
- ZHANG Cheng-hou, WANG Bo-yan. The influence of vacuum location and the spacing of drain well on the effect of preloading improvement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 12(1): 45-52.
- [13] LEE S L, KARUNARATNE G P, YONG K Y, et al. Layered clay-sand scheme of land reclamation[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(9): 984-995.
- [14] GIBSON R E, SHEFFORD G C. The efficiency of horizontal drainage layers for accelerating consolidation of clay embankments[J]. **Geotechnique**, 1968, 18(3): 327-335.
- [15] TAN S A, LIANG K M, YONG K Y, et al. Drainage

- efficiency of sand layer in layered clay-sand reclamation[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 118(2): 209-228.
- [16] 雷国辉, 李赞, 徐梨丹. 含砂垫层地基二维固结自由应变解[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 193-201.
LEI Guo-hui, LI Zan, XU Li-dan. Free-strain solutions for two-dimensional consolidation with sand blankets[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(2): 193-201.
- [17] NOGAMI T, MAOXIN L. Consolidation of system of clay and thin sand layers[J]. **Soils and Foundations**, 2002, 42(4): 1-11.
- [18] NOGAMI T, LI M. Consolidation of clay with a system of vertical and horizontal drains[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(9): 838-848.
- [19] 谢康和. 双层地基一维固结理论与应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(5): 24-35.
XIE Kang-he. Theory and application of one-dimensional consolidation of double layered foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(5): 24-35.
- [20] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1943.

(接第 427 页)

《岩土力学》2018 年第 10 期被 EI 收录论文 (45 篇, 收录率 100 %) (2)

序号	论文题名	作者	页码
24	我国大型岩土工程施工安全风险研究进展	熊自明, 卢 浩, 王明洋, 等	3703—3716
25	地震作用下高堆尾矿坝永久变形与稳定性分析	尹光志, 王文松, 魏作安, 等	3717—3726
26	裂隙岩体块体化程度评价方法的若干问题修正	陈庆发, 牛文静, 郑文师, 等	3727—3734
27	衬砌隧道中移动轴向激励作用下两相多孔介质动力响应	包汉营, 陈文化	3735—3742
28	高边坡坝基柱状节理玄武岩开挖卸荷时效松弛特性	裴书锋, 冯夏庭, 张建聪, 等	3743—3754
29	厚垫层-砂桩复合地基现场试验研究	王正振, 龚维明, 戴国亮, 等	3755—3762
30	天津滨海地区深部黏土层弹塑性变形特征与地面沉降关系研究	杨吉龙, 袁海帆, 胡云壮, 等	3763—3772
31	上海黏土压缩指数和回弹指数经验关系	何 平, 王卫东, 徐中华	3773—3782
32	运营期水下盾构隧道管片接缝张开度变化规律	李长俊, 陈卫忠, 杨建平, 等	3783—3793
33	乌东德水电站地下厂房层状岩体稳定性及变形机制	胡中华, 徐奴文, 戴 峰, 等	3794—3802
34	沉积河谷-建筑群地震动力相互作用的二维 IBEM 模拟	刘中宪, 齐 欣, 王 冬, 等	3803—3811
35	临近边坡的条形基础地基极限承载力数值分析	郑 刚, 于晓旋, 杜 娟, 等	3812—3820
36	植被发育斜坡土体大孔隙三维重构模型渗流场的 LBM 数值模拟	王志良, 年玉泽, 申林方, 等	3821—3829
37	裂隙岩体等效力学参数结构效应的计算机模拟试验研究	崔 臻, 盛 谦	3830—3840
38	基于 MeshPy 的 3D GIS 与三维有限元数值计算无缝耦合方法	刘振平, 杜根明, 蔡 洁, 等	3841—3852
39	考虑物理性质参数变化的膨润土缓冲材料水-热耦合 SPH 数值解	许 韬, 白 冰	3853—3862
40	二维接触问题的互补算法及工程应用	林 珊, 李春光, 孙冠华, 等	3863—3874
41	改进的数值流形法在水力劈裂中的应用	杨石扣, 任旭华, 张继勋	3875—3881
42	条形药包爆破预制贯通裂纹动态断裂过程研究	郭 洋, 李 清, 徐文龙, 等	3882—3890
43	光纤光栅传感技术在 GFRP 抗浮锚杆现场拉拔试验中的应用	白晓宇, 张明义, 匡 政, 等	3891—3899
44	黄河冲积层静止土压力系数原位测定与分析	王国富, 曹正龙, 路林海, 等	3900—3906
45	组装式变尺寸直剪仪的研制	薛 晨, 符文熹, 何思明	3907—3914