

连续排水边界下一维固结不排水对称面的有限元分析

蔡 烽¹, 何利军², 周小鹏¹, 徐美娟¹, 梅国雄^{1, 2}

(1. 南京工业大学交通学院, 江苏 南京 210009; 2. 南昌航空大学土木建筑学院, 江西 南昌 330063)

摘 要: 连续排水边界可以修正边界透水与不透水这两种极端理想化的边界问题。在 Terzaghi 一维固结理论的基础上, 结合连续排水边界给出了连续排水边界下不排水对称面一维固结的解析解答。基于 ABAQUS 有限元软件开发了一维连续排水边界条件的子程序, 对不排水对称面位置变化的影响因素包括边界透水性能、排水时间和渗透系数进行研究, 得到了不排水对称面的变化规律。最后将该数值分析方法引入饱和软黏土中不同深度设置排水砂层进行比较, 结果表明在不排水对称面位置处设置排水砂层时土体的固结速度是最快的。连续排水边界的引入有利于确定不排水对称面的位置, 所得的结论和文中的有限元分析过程对促进固结理论的发展具有重要的实际价值和意义。

关键词: 连续排水边界; 一维固结; 不排水对称面; 有限元分析

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)11-2141-07

作者简介: 蔡 烽(1987-), 男, 浙江温州人, 硕士, 主要从事固结理论方面的研究。E-mail: caifengtougao@sina.com。

Finite element analysis of one-dimensional consolidation of undrained symmetry plane under continuous drainage boundary

CAI Feng¹, HE Li-jun², ZHOU Xiao-peng¹, XU Mei-juan¹, MEI Guo-xiong^{1, 2}

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. College of Civil Engineering and

Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The continuous drainage boundary can correct the pervious and impervious boundaries which are extremely idealized. Based on the Terzaghi's one-dimensional consolidation theory and the continuous drainage boundary, an analytical solution of one-dimensional consolidation of undrained symmetry plane under continuous drainage boundary is given. One-dimensional subroutine of continuous drainage boundary is written based on the finite element analysis of ABAQUS. The influence factors of undrained symmetry plane is studied, including boundary permeability, drainage time and permeability coefficient. The variation of the undrained symmetry plane is obtained. Finally, the location of setting sand layers at different depths in saturated soft clay is compared by the method of finite element analysis. The results show that the rate of consolidation is the fastest when the sand layer is set at the location of undrained symmetry plane. The continuous drainage boundary can help to determine the location of undrained symmetry plane. The results and the process of finite element analysis are of practical and important value and significance for the development of soil consolidation theory.

Key words: continuous drainage boundary; one-dimensional consolidation; undrained symmetry plane; finite element analysis

0 引 言

在实际工程中对淤泥、淤质土、冲填土等饱和黏性土的处理常常在土层顶面铺设砂垫层以加速软基排水固结, 从而大大缩短软基的固结时间。一般求解时, 常将该垫层作为透水边界, 然而当垫层透水性不良时, 在紧紧相邻的土层顶面会形成不同程度的透水边界, 在计算这种地基的沉降时往往造成了计算不准确而导致沉降预测不准确。如何计算这种不同程度的透水边界已经成为需要解决的实际问题。

目前对于一维固结问题的研究如 Terzaghi^[1]经典固结理论主要针对透水与不透水这两种理想化的边界

条件, 但实际工程中土层的边界条件多是介于透水与不透水之间的, 且透水边界条件应该是和时间相关联的。虽然 Terzaghi 经典固结理论对于固结现象的描述是合理的, 不少学者在经典 Terzaghi 理论的基础上进行了研究^[2-6], 所得的相关解析解也为实际工况和室内试验所验证, 但对于经典理论的修正和补充, 也一直是土力学理论研究的一个方向。黄文熙^[7]曾经提出过一种半透水边界, 但由于解答太深奥和复杂, 在实际

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50608038)

收稿日期: 2012-02-05

中使用相对较少。梅国雄等^[8]、郑昱等^[9]基于上述认识提出了连续排水边界且已对相应的连续排水边界下一维固结方程给出了初步的解析解答,验证了连续排水边界理论的正确性。所谓的连续排水边界条件,是基于使边界条件更符合实际工况这一目的所做的研究。

吹填土在吹填过程中,泥砂结构遭到破坏,以细小颗粒的形式缓慢沉积,因而具有塑性指数大、天然含水率和孔隙比大,重度小,压缩性高,渗透性小等特点。由吹填土构成的地基,强度很差,一般不能直接用于工程建设,需要进行地基处理。在进行吹填土的软基处理时,假如让吹填土在吹填过程中就能在重力作用下快速固结,比如在吹填过程中土层内部预先加入一层排水砂层,而计算排水砂层在何种深度位置才能达到最佳排水面的问题,也是解决诸如吹填土软基快速固结的实际工程问题之一。本文研究所谓不排水对称面的目的是为了在饱和软黏土中找到竖向深度最佳排水砂层的位置,进而将此引入实际工程。

本文在 Terzaghi 一维固结理论的基础上,结合连续排水边界对不排水对称面一维固结的解析解进行了推导,并利用 ABAQUS 有限元分析平台与自主开发的连续排水边界子程序,分析比较不同排水边界参数比值、排水时间和渗透系数的变化对不排水对称面的影响,进而讨论在排水边界对称和不对称两种情况下,不排水对称面与在饱和软黏土中不同深度设置最佳排水砂层的关系。

1 连续排水边界的提出

文献[8]提出如下从透水到不透水的连续排水边界条件:

$$u(t, 0) = p \exp(-bt) \quad (1)$$

$$u(t, 2h) = p \exp(-ct) \quad (2)$$

式中 $u(t, 0)$ 为顶部边界 t 时刻的孔压; $u(t, 2h)$ 为底部边界 t 时刻的孔压,任意深度的土层孔压是关于时间的指数函数,其孔压在顶部和底部边界与时间的指数关系能大体反映土体固结过程的总体趋势; p 为边界的初始条件即外荷载条件; b, c 是反映边界排水性状的参数,和边界上下土体材料性质有关,其值可通过试验模拟或工程实测反演得出,且 $b \geq 0, c \geq 0$ 。

由式(1)、(2)可知该边界条件具有如下特点:以其中顶部边界条件为例,当 $t=0$ 时, $u(0, 0)=p$,符合边界的初始条件既外荷载刚加载的情况;随着固结时间 t 的增长, $u(t, 0)$ 逐渐减小,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $u(\infty, 0) \rightarrow 0$,满足时间无限长,孔压消散完成的基本规律;在式(1)或(2)中,当反映边界排水性状的参数 b

或者 c 取值较小时,可近似描述不排水边界条件;当 $b \rightarrow \infty$ 或者 $c \rightarrow \infty$ 时, $u(0, 0) \rightarrow 0$,可描述典型的排水边界条件。

从上面的分析可以看出,典型的排水边界条件和近似描述的不排水边界条件是式(1)或式(2)的上、下限,而介于此上下限之间的不同程度的透水边界条件,也可由式(1)或式(2)来较好地描述,通过调整边界参数 b, c 的值可模拟实际土层从透水到不透水的不同透水性边界的排水特性。

2 不排水对称面的概念

黄文熙^[10]对经典的 Terzaghi 固结理论曾提到过这样一个问题,认为双面排水中孔压的分布可以看做是由 2 个单面排水组成,但其前提是在对称荷载的作用下,如图 1(a)。笔者将理想状态下双面排水中间流速为 0 的平面定义为不排水对称面。需要说明的是,当排水边界或荷载不对称时,不排水对称面的竖向位置不一定对称(处于中间位置)。目前某些土力学书^[11]中对于 Terzaghi 一维固结的单面排水和双面排水问题因仅考虑排水边界问题,而忽略了荷载的对称问题,从而出现了一个错误的认识:如图 1(b)所示,认为两者的固结过程是等效的。正确的应该是在荷载和上下边界透水性能都完全对称的情况下两者才有系统的固结性状,如图 1(c)所示。

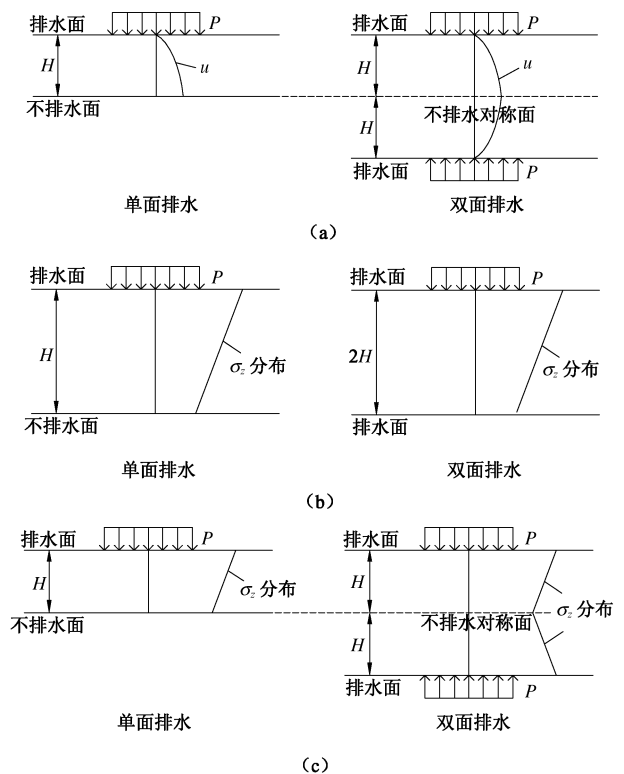


图 1 单面排水和双面排水的比较

Fig. 1 Comparison between single-drainage and double-drainage

由不排水对称面的定义可知, 该土体平面处的水流速度为零即 $\partial u / \partial z = 0$, 不排水对称面的位置也是孔压出现峰值的位置, 且 $\partial^2 u / \partial z^2 < 0$ (曲线存在拐点)。

需要强调的是, 理想状态下 Terzaghi 的单面排水中由于土体底面存在着绝对的不排水面, 孔压分布曲线中没有拐点, 故对于 Terzaghi 的单面排水来说并不存在不排水对称面。Terzaghi 的双面排水是在对称荷载作用且土体上下边界透水性能是相同的, 这种情况下的土体固结排水是关于土层中间对称的, 任意时刻的孔压分布曲线也都是关于土层中间对称的, 不排水对称面在土层的中间位置。然而在实际情况中, 即便在作用对称荷载下, 由于上下排水面的透水性能不一致, 不排水对称面会随着各种因素的改变而发生向上或者向下的移动, 如图 2。

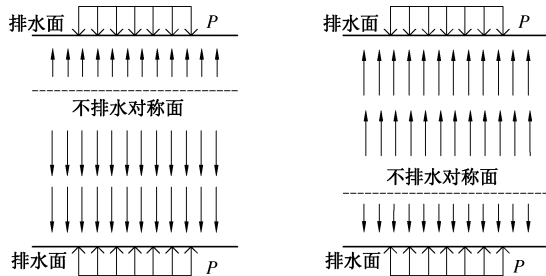


图 2 不排水对称面的分布

Fig. 2 Distribution of undrained symmetry plane

3 连续排水边界下不排水对称面的解析解答

对 Terzaghi 一维固结方程的边界条件进行修正:

$$\text{固结方程为} \quad \frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (0 \leq z \leq 2h) \quad ; \quad (3)$$

初始条件为

$$u(0, z) = p \quad ; \quad (4)$$

边界条件为

$$u(t, 0) = p \exp(-bt) \quad , \quad (5)$$

$$u(t, 2h) = p \exp(-ct) \quad . \quad (6)$$

式中, C_v 为土的竖向固结系数 (m^2/d), h 为地基土层最大竖向排水距离。

这是一个非齐次边界方程, 在不考虑重力作用下, 假设荷载是一次施加且为瞬间对称施加, 最后得出了连续排水边界下 Terzaghi 一维固结方程的解^[8]为

$$u(t, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4bp(2h-z)\sin[(2k-1)\pi z/2h]}{2h(2k-1)(D-b)\pi} [\exp(-bt) - \exp(-Dt)] + \frac{4cpz\sin[(2k-1)\pi z/2h]}{2h(2k-1)(D-c)\pi} [\exp(-ct) - \exp(-Dt)] + (2h-z)p\exp(-bt)/2h + pz\exp(-ct)/2h, \quad (7)$$

其中, $D = C_v[(2k-1)\pi/2h]^2$ 。

由不排水对称面的定义可知 $\partial u / \partial z = 0$, 令式 (7) 孔压 $u(t, z)$ 对深度 z 求偏导等于 0, 则可得到不排水对称面位置深度 z 的方程为

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{2p\sin[(2k-1)\pi z/2h]}{(2k-1)\pi h} \left\{ \frac{c}{D-c} [\exp(-ct) - \exp(-Dt)] - \frac{b}{D-b} [\exp(-bt) - \exp(-Dt)] \right\} + \frac{2p\cos[(2k-1)\pi z/2h]}{h^2} \cdot \left\{ \frac{(2h-z)b}{D-b} [\exp(-bt) - \exp(-Dt)] + \frac{zc}{D-c} [\exp(-ct) - \exp(-Dt)] \right\} + \frac{P}{2h} [\exp(-ct) - \exp(-bt)] = 0. \quad (8)$$

存在不排水对称面的前提需符合 $\partial^2 u / \partial z^2 < 0$, 从 Terzaghi 控制方程式 (3) 中可以得到 $\partial u / \partial t < 0$, 而孔压随时间的变化曲线总是递减的, 其曲线的切线斜率也必然小于 0。

由于方程的复杂性, 只能给出连续排水边界下不排水对称面的隐式解析解答。从式 (8) 中可以看出, 不排水对称面的位置不仅和时间、固结系数即渗透系数有关, 还和边界条件中给出的参数 b, c 的值有关。令边界参数 $b=c$, 解式 (8) 可以得到 $z=h$, 即不排水对称面在土层的中间位置, 验证了该解析解答的正确性。

4 不排水对称面的影响因素分析

从上节式 (8) 解析解答可知, 不排水对称面的影响因素包括上下边界透水性能参数、排水时间和渗透系数。运用有限元程序 ABAQUS 以及自行开发的连续排水边界子程序对连续排水边界下均质地基一维固结问题进行数值模拟。文献[12]已成功将连续排水边界退化为经典 Terzaghi 固结的排水和不排水边界, 并通过与连续排水边界下的 Terzaghi 一维固结解析解进行对比, 验证了该连续排水边界子程序的正确性。

结合 Terzaghi 一维固结理论在不考虑重力作用且在瞬间对称荷载的基础上, 分析比较不同排水边界参数比值、排水时间和渗透系数的变化对不排水对称面位置的影响, 并将所得的结果与理想状态下的 Terzaghi 一维固结理论进行对比分析。

4.1 计算模型

计算模型如图 3 所示。模型高度取 10 m, 土体表面一次瞬时施加对称均布荷载 $p=100$ kPa, 土层为单一的软弱土层, 土层的初始孔隙比为 1.5, 土体取为线弹性体, 弹性模量 $E=10$ MPa, 泊松比 $\nu=0.3$, 采用四节点四面体单元和 Standard 标准模块中的 Soil 分析步进行分析, 利用 ABAQUS 自定义边界条件子程序 DISP 接口对土体顶面和底面引入自定义连续排水边界条件。

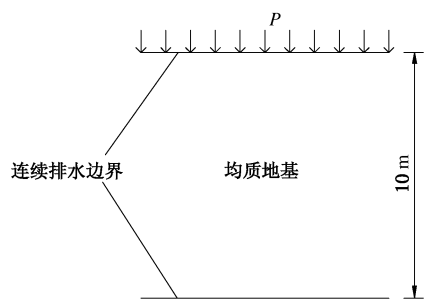


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation model

4.2 计算方案

令边界参数 $b=0.01$, $c=0.003$, 渗透系数 $k=7.4\times10^{-5}$ m/d, 取固结度达到 80%的排水时间约为 500 d 作为标准进行分析, 并将所得的结果与理想状态下的 Terzaghi 一维固结理论进行对比, 由于 Terzaghi 的单面排水中存在绝对的不排水面, 孔压分布曲线没有拐点, 故不存在不排水对称面, 只与 Terzaghi 的双面排水进行对比。计算方案如表 1 所示。

表 1 计算方案

Table 1 Calculation scheme

方案	影响因素	边界参数 比值 c/b	取排水时 间 T/d	渗透系数 $k/(m\cdot d^{-1})$
A	边界透 水性能	$c/b=0.3$	500	7.4×10^{-5}
		$c/b=0.5$		
		$c/b=1$		
B	排水时间	$c/b=0.3$	10	7.4×10^{-5}
			100	
			1000	
C	渗透系数	$c/b=0.3$	500	1×10^{-6}
				1×10^{-5}
				1×10^{-4}

(1) 边界透水性能的影响: 对边界参数的分析中存在 b, c 两个变量, 由于对两个变量同时进行分析情况较复杂, 故固定其中一个变量, 并利用比值的形式讨论上下边界参数对不排水对称面的影响。如方案 A 所示, 令渗透系数 $k=7.4\times10^{-5}$ m/d, 固定参数 $b=0.01$, 将边界参数 c 作为变量, 取 3 组不同边界参数比值 (0.003, 0.005, 0.01) 进行计算比较, 并取排水时间 500 d 进行分析。

(2) 排水时间的影响: 如方案 B 所示, 令边界参数 $b=0.01, c=0.003$, 渗透系数 $k=7.4\times10^{-5}$ m/d 进行计算, 按照数据处理的需要和不违背规律的基础上, 不妨按对数形式选取代表固结的初期、中期以及末期的时间, 即时间 $T=10, 100, 1000$ d (土体固结度已接近 98%) 3 种情况所得的结果进行对比分析。

(3) 渗透系数的影响: 如方案 C 所示, 令边界参数 $b=0.01, c=0.003$, 将土体渗透系数作为变量, 同样按照数据处理的需要和不违背规律的基础上取 3 组不同渗透系数 ($1\times10^{-6}, 1\times10^{-5}, 1\times10^{-4}$) 进行计算比较, 并取排水时间 500 d 进行分析。

4.3 不同边界参数 c/b 比值对不排水对称面的影响

连续排水边界可以描述介于 Terzaghi 的单面和双面排水这两种极限状态之间的边界条件。图 4 为当时时间 $T=500$ d 时不同边界参数 c/b 比值下的不排水对称面分布曲线。Terzaghi 的单面排水中不存在不排水对称面, 而对于 Terzaghi 的双面排水来讲, 不排水对称面的位置在土层中间 5 m 深度处。从图 4 中可知, 当 $b=0.01$, 随着参数 c 不断增大, 不排水对称面的位置在沿深度方向不断移动; 当边界参数 c/b 比值等于 1 时, 类似于 Terzaghi 的双面排水, 不排水对称面也在土体中部 5 m 深度位置。这说明当上下边界排水性能接近时, 不排水对称面接近于土层的中部位置, 边界排水性能的好坏和上下边界排水性能的差异对不排水对称面的位置变化影响较大。

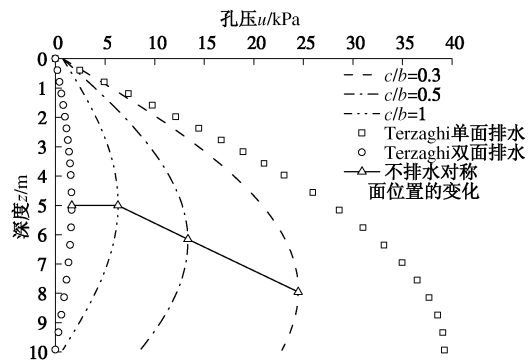


图 4 不同边界参数 c/b 比值下的不排水对称面分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of undrained symmetry plane under different boundary parameters c/b

4.4 排水时间对不排水对称面的影响

图 5 描绘了随着排水时间的增加, 不排水对称面位置的分布曲线。在 Terzaghi 的双面排水中不排水对称面并不会随着时间的改变而发生移动, 但在接近实际情况的连续排水边界下不排水对称面将随着时间发生变化。从图 5 中可以看出, 在边界参数 $b=0.01, c=0.003$ 的情况下, 当时间从 $T=10$ d 增加到 1000 d 时, 不排水对称面的位置从深度约 5 m 处移动到了 9 m 处左右, 变化的范围较大。这说明接近实际情况下在固结的初期不排水对称面在土体的中部位置附近, 随着排水时间的不断增加, 不排水对称面的位置在朝着上下边界排水性能相对较弱的方向移动。

4.5 渗透系数对不排水对称面的影响

图 6 给出了不同渗透系数下不排水对称面位置变化的分布曲线图。从图 6 中可知, Terzaghi 的双面排水中不排水对称面不会随着渗透系数的变化而变化; 而在连续排水边界 $b=0.01, c=0.003$ 下的不排水对称面位置从中部 5 m 逐渐变化到了 9 m 左右, 变化的范围较大。随着渗透系数的增大, 不排水对称面的位置同样在朝着上下边界排水性能相对较弱的方向移动。

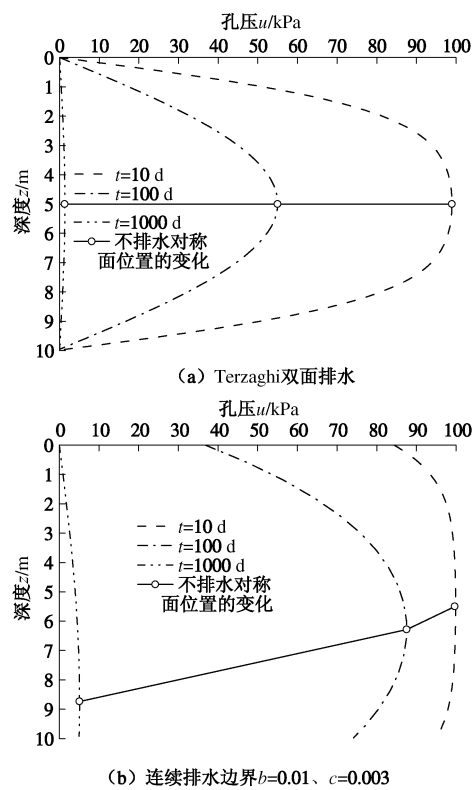


图 5 不同排水时间下的不排水对称面分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of undrained symmetry plane under different drainage time

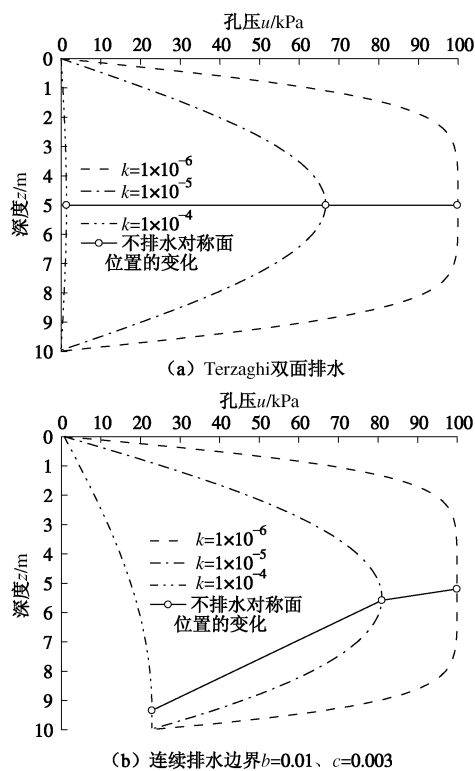


图 6 不同渗透系数下的不排水对称面分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of undrained symmetry plane under different permeability coefficients

事实上, 上述算例的边界参数 $b=0.01$, $c=0.003$ 属于上下边界排水性能相差较大的情况, 从图 5 (b) 和图 6 (b) 也可以看到, 这种情况下的不排水对称面

随排水时间和渗透系数变化的范围均较大; 而当上下边界相差较小即边界参数 c/b 比值接近 1 的情况, 其极限状态类似于 Terzaghi 的双面排水, 不排水对称面将在土体中部 5 m 深度附近变化, 排水时间和渗透系数变化对不排水对称面的影响均较小。从上述对上下边界透水性能、排水时间和渗透系数的分析可以得出, 只要上下透水边界和荷载均是对称的, 排水时间和渗透系数并不会影响到不排水对称面的位置变化。当上下边界透水性能相差越大, 排水时间和渗透系数对不排水对称面的影响也越大; 反之, 当上下边界透水性能相差越小, 排水时间和渗透系数对不排水对称面的影响也越小。

5 不同深度位置设置排水砂层的比较

通过分析比较不同上下边界透水性能、排水时间和渗透系数的变化对不排水对称面位置的影响, 进而考虑在排水边界对称和不对称两种情况下, 不排水对称面与在饱和软黏土中不同深度设置最佳排水砂层的关系。

5.1 计算模型

运用有限元程序 ABAQUS 以及自行开发的边界子程序, 在饱和软黏土内部设置厚度为 20 cm 的排水砂层进行模拟, 各土体参数列入表 2, 同样采用四节点四面体单元和 Standard 标准模块中的 Soil 分析步进行分析, 利用 ABAQUS 自定义边界条件子程序 DISP 接口对土体顶面和底面引入自定义连续排水边界条件, 计算模型如图 7。考虑在排水边界对称和不对称两种情况下分别设置排水砂层进行计算比较。

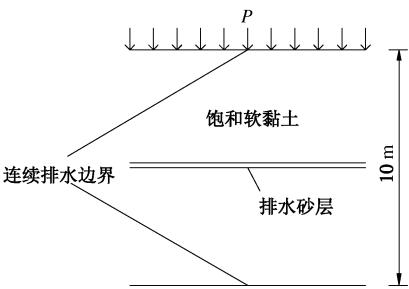


图 7 计算模型

Fig. 7 Calculation model

表 2 土体物理力学参数

Table 2 Parameters of soil properties				
土层	$\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E_s / MPa	ν	$k / (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
软黏土	18.1	10	0.3	7.4×10^{-3}
砂层	17.7	10	0.3	1

5.2 排水边界对称情况下的对比分析

由上节的影响因素分析可知, 在不考虑重力作用、荷载和上下透水边界都完全对称的情况下, 类似于

Terzaghi 的双面排水, 土体排水是关于中间对称的, 不排水对称面在中部 5 m 深度处且不会随着时间的变化而发生移动。令土体表面作用瞬间对称均布荷载 $p=100$ kPa 且边界参数比值 $c/b=1$, 做 4 组数值模拟试验进行对比, 分别在深度 2.5, 5, 7.5 m 处设置排水砂层以及不加排水砂层进行分析。

考虑到对于一维固结线弹性土体平均固结度按沉降定义和按平均孔压定义是一致的^[13], 故只对按沉降定义的平均固结度进行计算:

$$U_s = S_t / S_\infty$$

图 8 为在排水边界对称的情况下, 在不同深度位置设置排水砂层土体的平均固结度随时间的变化曲线。从图 8 中由对称性可知, 在深度 2.5 m 处和 7.5 m 处设置排水砂层时两者的固结速度是相同的; 而在 5 m 深度即不排水对称面位置设置排水砂层时, 土体排水固结速度是最快的, 对 Terzaghi 的双面排水同样可以得到类似结论。这说明在不排水对称面位置处设置排水砂层时土体的固结速度是最快的。

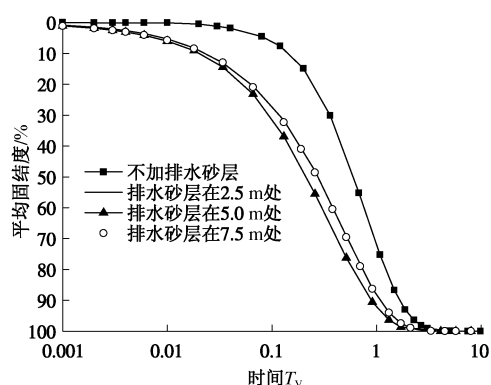


图 8 排水边界对称情况下设置排水砂层的对比图

Fig. 8 Comparison of setting sand layers under symmetric boundary

分析这种现象的原因, 可能是因为不排水对称面的位置即为孔压出现峰值的位置, 当在不排水对称面位置处设置排水砂层时, 孔压峰值处的排水渗流速度要比其他部位快, 所以土体固结的速度也是最快的。

5.3 排水边界不对称情况下的对比分析

当土体的上下排水边界参数和渗透系数均固定时, 不排水对称面的位置将仅受排水时间的影响。在接近实际情况的连续排水边界下, 当上下边界透水性能不对称时, 不排水对称面将随着时间的变化而发生移动。由于设置排水砂层的位置是固定的而不排水对称面是变化的, 故在不排水对称面约走过路径的一半位置设置排水砂层。

令土体表面作用瞬间对称均布荷载 $p=100$ kPa 且边界参数比值 $c/b=0.3$, 由上节时间的影响因素分析可知, 这种情况下的不排水对称面随时间变化的范围较

大, 故在不排水对称面约走过路径的一半位置设置排水砂层。例如上述图 5 (b) 中在上下边界参数比值 $c/b=0.3$ 时的不排水对称面随时间变化从约深度 5 m 移动到了 9 m 的位置, 故在土体深度约 7 m 左右的位置设置排水砂层。为与上节边界对称的情况保持一致, 则在 7.5 m 处设置排水砂层, 并另外做 4 组数值模拟试验进行对比, 分别在深度 2.5, 5, 9 m 处设置排水砂层以及不加排水砂层进行分析。

图 9 为在荷载对称而边界不对称情况下, 不同深度位置设置排水砂层土体的平均固结度随时间的变化曲线。从图 9 中可以看出, 与上节边界对称的情况不同, 在 7.5 m 处设置排水砂层土体的固结速度要快于 2.5 m 处。在固结度达到 50% 之前, 在深度 5 m 中部位置设置排水砂层土体的固结速度是最快的。当固结度达到 80%~90% 时, 在深度 7.5 m 处设置排水砂层土体的固结速度是最快的。在深度 9 m 处设置排水砂层时, 在固结的初期土体的固结速度较慢, 固结后期又逐渐加快。这是由于在固结的初期, 边界处孔压还未消散, 孔压沿深度方向的峰值即不排水对称面的位置在土体中部附近, 因而此时在土体中部位置设置排水砂层土体的固结速度是最快的。随着时间的增加, 不排水对称面逐渐向土体底面移动, 故在固结的后期深度 9 m 处设置排水砂层时土体固结速度又逐渐加快。对于土体固结度达到 80%~90% 的固结速度, 在不排水对称面约走过路径的一半位置设置排水砂层是最优的。

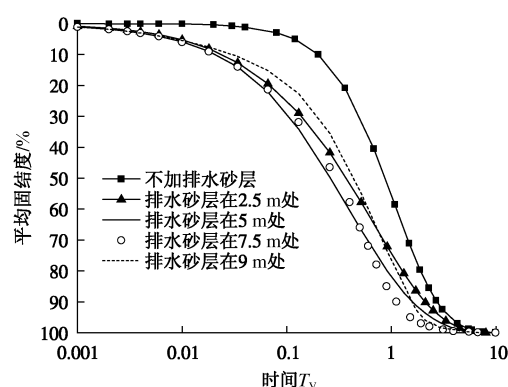


图 9 排水边界不对称情况下设置排水砂层的对比图

Fig. 9 Comparison of setting sand layers under asymmetric boundary

上述算例是在边界参数比值 $c/b=0.3$ 属于上下边界相差较大的情况。当上下边界相差较小即边界参数 c/b 比值接近 1 时, 其极限状态类似于 Terzaghi 的双面排水, 不排水对称面将在土体中部 5 m 深度附近变化, 此时在土体中部 5 m 深度处设置排水砂层相差结果并不会太大。由上述可知, 在边界不对称的情况下, 当上下边界排水性能相差较小时, 在土体中部位置设置

排水砂层是较优的;当上下边界排水性能相差较大时,对于土体固结度达到 80%~90%的固结速度,在不排水对称面约走过路径的一半位置设置排水砂层是最优的。连续排水边界的引入有利于不排水对称面的确定,进而解决实际工程中有关快速排水固结的问题。

6 结 论

(1)通过推导连续排水边界下不排水对称面一维固结的解析解答,得出了不排水对称面的影响因素包括上下边界透水性能、排水时间以及渗透系数。

(2)采用自行编制的连续排水边界条件子程序对经典固结理论理想化的边界条件进行修正,分析比较不同边界透水性能、排水时间以及渗透系数对不排水对称面位置的影响,得出了不排水对称面的变化规律。

(3)模拟在连续排水边界下的饱和软黏土中不同深度设置排水砂层进行比较分析,得出在不排水对称面位置处设置排水砂层时土体的固结速度是最快的。在边界不对称的情况下,当上下边界排水性能相差较小时,在土体中部位置设置排水砂层是较优的;当上下边界排水性能相差较大时,在不排水对称面约走过路径的一半位置设置排水砂层对于土体固结度达到 80%~90%时是最优的。

(4)本文只考虑了荷载对称的固结问题,而对于荷载不对称的固结问题,比如考虑土体的自重作用,将是笔者下一步进行研究的方

向,轴向对称固结 of a clay layer on a smooth impervious base[J]. Journal of Mechanical Applied Mathematics, 1970, 23(4): 256 - 264.

- [7] 黄文熙. 水坠坝的固结理论及其应用[J]. 水利学报, 1982(9): 13 - 23. (HUANG Wen-xi. Application of consolidation theory to earth dams built by sluicing-siltation method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982(9): 13 - 23. (in Chinese))
- [8] 梅国雄, 夏 君, 梅 岭. 基于不对称连续排水边界的太沙基一维固结方程及其解答[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 28 - 31. (MEI Guo-xiong, XIA Jun, MEI Ling. Terzaghi's one-dimensional consolidation equation and its solution based on asymmetric continuous drainage boundary[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 28 - 31. (in Chinese))
- [9] 郑 昱, 梅国雄, 梅 岭. 广义连续排水边界在一维固结问题中的应用[J]. 南京工业大学学报, 2010, 32(6): 55 - 58. (ZHENG Yu, MEI Guo-xiong, MEI Ling. Generalized continuous drainage boundary applied in one dimensional consolidation theory[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2010, 32(6): 55 - 58. (in Chinese))
- [10] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版, 1983 141 - 145. (HUANG Wen-xi. Engineering properties of soil[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983: 141 - 145. (in Chinese))
- [11] 薛守义. 高等土力学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007: 193. (XUE Shou-yi. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2007: 193. (in Chinese))
- [12] 蔡 烽, 何利军, 周小鹏, 等. 连续排水边界下成层地基一维固结问题的有限元分析[J]. 中南大学学报, 2012, 12(6): 55 - 63. (CAI Feng, HE Li-jun, Zhou Xiao-peng, et al. Finite element analysis of one-dimensional consolidation problem with continuous drainage boundaries in layered ground[J]. Journal of Central south University, 2012, 12(6): 55 - 63. (in Chinese))
- [13] 罗 勇, 龚晓南, 连 峰. 成层地基固结性状中不同定义平均固结度研究分析[J]. 科技通报, 2006, 22(6): 813 - 816. (LUO Yong, GONG Xiao-nan, LIAN Feng. Comparable analysis of different definitions of average degree of consolidation of layered soils[J]. Bulletin of Science and Technology, 2006, 22(6): 813 - 816. (in Chinese))

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Erdbaumechanik and bodenphysikalischer grundlage[M]. Lpz Deuticke, 1925.
- [2] REDULIC L. Porenziffer and porenwasserdruck in tonen[M]. Bauingenieur, 1936: 51 - 53.
- [3] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941(12): 155 - 167.
- [4] BIOT M A. Consolidation settlement under a rectangular load distribution[J]. Journal of Applied Physics, 1941(12): 426 - 430.
- [5] NAMEE M C, GIBSON R E. Plan strain and axially symmetric problems of the consolidation of a semi-infinite clay stratum[J]. Journal of Mechanical Applied Mathematics, 1960, 1(2): 124 - 135.
- [6] GIBSON R E, SCHIFFMAN R L, PU S L. Plan strain and