

塑料排水板结合真空预压法的径向固结解析解

高广运^{1,2}, 聂春晓^{1,2}, 张海丘³, 雷丹^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. Center for Geomechanics and Railway Engineering, Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia)

摘要: 塑料排水板结合真空预压的软土地基加固方法是一种经济高效并被逐渐广泛应用的软土地基加固方法, 该方法不仅可以减少堆载预压坝体的高度, 还能减少土体的侧向位移。推导的塑料排水板与真空预压结合的非线性径向固结解析解可以较好地用于该种地基加固的预测和分析。求解过程认为软土在一维固结条件下孔隙比与平均有效应力、水平渗透系数成对数线性关系, 而非以前认为的一维线性关系, 因排水板周围土体被扰动, 所以涂抹区中水平渗透系数采用抛物线分布形式, 同时还考虑真空预压对固结的作用。退化提出的解析解与前人解析解进行对比验证、完成解析解与试验结果验证, 证明了解析解的正确性。最后, 分析了参数 κ 和 C_k/C_c 对固结的影响, 结果表明 C_k/C_c 值越大, 固结时间越短, κ 值增大, 固结时间增长。

关键词: 塑料排水板; 非线性土体本构; 非达西定律; 真空预压; 径向固结

中图分类号: TU43

文献标志码: A

Radial Consolidation Solution of Plastic Wick Drain Combined Vacuum Preloading

GAO Guangyun^{1, 2}, NIE Chunxiao^{1, 2}, ZHANG Haiqiu³, LEI Dan^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China, 3 Center for Geomechanics and Railway Engineering, Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia)

Abstract: A system of radial consolidation by combining the plastic wick drain with the vacuum preloading is one of the most popular way for soft ground improvement, which can not only reduce the height of surcharge preloading on dam, but also reduce the lateral displacement of soil. The consolidation solution of plastic wick drains and vacuum preloading based on

the nonlinear relationship can well forecast and analyze this kind of ground improvement. In the process of analytical solution, the relationship between the void ratio and the mean effective stress, as well as the horizontal permeability coefficient under one-dimensional consolidation is considered to be semi logarithmic linear, rather than previously thought one-dimensional linear. Because of disturbing on soil around PVD in smear zone, permeability around PVD in the zone distributes in parabolic form. Besides, the effect of vacuum preloading on consolidation is taken into consideration. This analytical solution is verified through degradation method and compared with test results. Finally, the effects of κ , C_k/C_c are analyzed on consolidation. The results indicate that consolidation rate increases with the increasing of C_k/C_c and decreasing of κ .

Key words: plastic wick drains; non-linear constitutive relationship of soils; non-Darcy's law; vacuum preloading; radial consolidation

随着我国基础设施建设的不断发展以及城镇化的不断推进, 工程建设的规模和数量在加大, 且多集中在沿江河湖海地区。这些地区多有软土分布, 软土有含水率高、强度低、压缩性高等不良的工程特性, 给工程的顺利完成和安全使用提出了挑战。

真空预压适用于处理以粘性土为主的软弱地基, 具有固结快、工期短、施工简洁、且加固深度大的特点。塑料排水板虑水性好, 排水通畅, 且有良好的强度和延展性, 能适合地基变形而不影响排水性能, 可以加速地基固结。塑料排水板与真空预压相结合的软基加固方法结合二者的优点, 在狭窄地段、边坡附近亦可使用, 在工程中有经济高效的特点, 是一种较为实用的地基处理方法。对于该种地基处理方法, 目前尚未有可以预测和计算地基固结的解析解, 基

收稿日期: 2016-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(41372271)

第一作者: 高广运(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土动力学和岩土地震工程。

E-mail: gaoguangyun@263.net

于此,本文分别从塑料排水板和真空预压结合的角度分析,求出适用于软粘土固结的解析解.相关结果可用于工程设计和实际应用.

目前研究塑料排水板和真空预压处理地基的方法主要有试验方法、数值方法和解析方法.有现场试验和室内试验,如张泽鹏等^[1]根据现场实测证明了塑料排水板在真空预压加固软土地基中作用明显.王军等^[2]提出了一种新型的防淤堵真空预压方法,改善了原排水板淤堵严重的情况.雷华阳等^[3]对超软土开展室内试验,研究超软浅层真空预压加固处理前后的固结特性.数值方法有有限元法和有限差分法,如 INDRATANA 等^[4]采用有限差分法,考虑了井阻、拱效应以及涂抹区效应在碎石桩径向排水中的作用. RUJIKIATKAMJORN 等^[5]借助有限元模型分析塑料排水板结合真空和堆载预压的沉降特性.董志良等^[6]对真空预压法加固软基做了平面应变和三维有限元比较.也有很多学者在解析分析方面做了研究, BARRON^[7]提出了等应变和自由应变解析解,后来 HANSBO^[8]解的广泛应用促使解析研究的进一步发展.以上研究主要以一维太沙基固结理论为基础.假设土体为线弹性体,且固结系数不发生变化,这些假设与软粘土的高压缩性、孔隙率大的特性相差甚远.李菲菲等^[9]完成了考虑指数流的真空预压竖井地基固结解答. INDRARATNA 等^[10]在进行解析分析时考虑了有效应力和渗透系数对径向排水固结的作用,但未考虑涂抹区渗透系数的影响.

也有学者在进行解析分析时把涂抹区的渗透系数作为常数来考虑,但是 SATHANANTHAN 等^[11]研究认为,安装塑料排水板会扰动土体,使渗透系数发生类似于抛物线规律的变化,涂抹区内的水平渗透系数大约是未经扰动区域的 61%~92%. WALKER^[12]在解析分析过程中考虑了水平渗透系数抛物线形的变化规律,但在求解时仍假设土体为线弹性体.张海丘等^[13]考虑了涂抹区水平渗透系数的非线性分布,但该方法仍不能反映真空预压在软土固结中的作用.

设置塑料排水板的软粘土地基受到外荷载作用,土体固结渗透系数和压缩系数同时减小,因此需要考虑渗透系数的非线性变化.已广泛使用的真空预压与堆载预压相比优点显著,同时采用塑料排水板可加速软土地基固结.据此,本文提出了塑料排水板结合真空预压的径向排水固结解析解,首先从塑料排水板的工作原理出发,认为近排水板区的扰动影响土体的渗透系数,进而影响土体固结;然后基于

真空预压,求得土体径向排水固结的解析解;最后采用退化验证和试验结果对比验证本文解析解,并分析了相关参数对软土固结的影响.

1 径向固结基本方程

塑料排水板平面布置一般有正方形和等边三角形两种形式,在实际工程中正方形布置操作方便,但是等边三角形布置产生的沉降更为均一,因此本文采用三角形布置进行分析.塑料排水板三角形水平布置如图 1 所示, d 是两个塑料板之间的距离,图 1 中圆形区域表示塑料排水板的影响区域,简化研究其工作原理,如图 2 所示.在三维空间中塑料排水板简化成一圆柱体,其中, r 表示半径; r_c 为影响区半径; r_w 为排水板的有效排水半径; r_s 为涂抹区半径. k_s 为涂抹区水平渗透系数; k_h 为非涂抹区水平渗透系数; l 为塑料排水板深度.

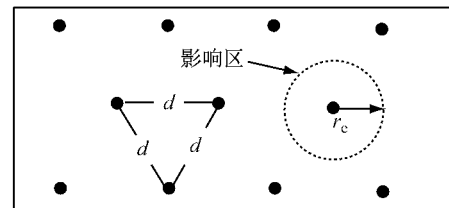


图 1 塑料排水板平面布置图

Fig.1 Layout of plastic wick drain

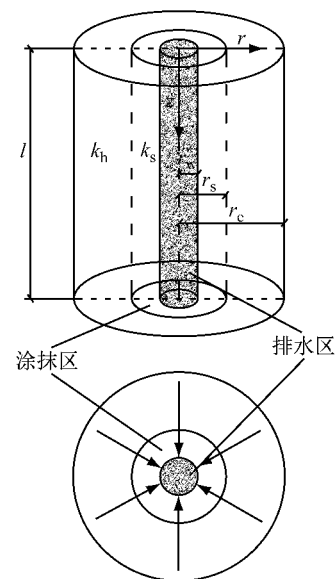


图 2 塑料排水板工作原理图

Fig.2 Working principle of plastic wick drain

安装塑料排水板会扰动土体,从而影响土体渗透系数,此时把渗透系数作为常数进行解析分析误差较大,因此本文采用 WALKER 等^[12]建议的变渗

透系数方法进行分析,涂抹区水平渗透系数为

$$k_s(r) = k_0(\kappa - 1) \left(A - B + C \frac{r}{r_w} \right) \left(A + B - C \frac{r}{r_w} \right) \quad (1)$$

式中: k_0 为 $r=r_w$ 处的渗透系数,即表示塑料排水板表面处的渗透系数; $\kappa = k_h/k_0$; 为了后续计算方便,在此定义 $A = [\kappa/(\kappa - 1)]^{0.5}$; $B = s/(s - 1)$; $C = 1/(s - 1)$; s 表示 r_s/r_w 的值。

HANSBO^[8]的解析解被广泛认可,据此进行径向排水固结方程求解。塑料排水板的排水速率为

$$q_1 = 2\pi r v \quad (2)$$

式中: r 为半径; v 为渗流速率。

土体的体积压缩变化速率为

$$q_2 = \pi(r_e^2 - r^2) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3)$$

式中: $\partial \varepsilon / \partial t$ 为一维固结应变速率。

假设流体不可压缩,所以饱和土体的体积压缩量等于流体流出的量,即式(2)和式(3)相等,得

$$2\pi r v = \pi(r_e^2 - r^2) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \quad (4)$$

对于瞬态加载,应变速率表达为

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -m_v \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (5)$$

式中: m_v 是体积压缩系数。根据达西渗透定律渗流速率表达如下:

$$v' = k_s \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u_s}{\partial r}; r_w \leq r \leq r_s \quad (6)$$

$$v = k_h \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial r}; r_s \leq r \leq r_e \quad (7)$$

式中: γ_w 是水的重度。联立式(1)、式(4)、式(6)和式(7)得

$$\frac{\partial u_s}{\partial r} = -\frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \frac{1}{2c_h} \cdot \frac{1}{(A - B + C r/r_w)(A + B - C r/r_w)} \left(\frac{r_e^2 - r^2}{r} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \frac{1}{2c_h} \left(\frac{r_e^2 - r^2}{r} \right) \quad (9)$$

式中: c_h 是水平固结系数,根据边界条件, $r=r_w$ 时,孔压 $u_s = (u_s)_{r=r_w}$; $r=r$ 时, $u_s = u$ 。分别对(8)式和(9)式积分得

$$u_s = -\frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \frac{1}{2c_h} \frac{1}{2A} \cdot$$

$$\left[D \ln(r/r_w) + E \ln \left(\frac{A - B + C r/r_w}{A - B + C} \right) + F \ln \left(\frac{A + B - C r/r_w}{A + B - C} \right) \right] + (u_s)_{r=r_w} \quad (10)$$

$$u = -\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \frac{1}{2c_h} \left(r_e^2 \ln(r/r_w) - \frac{r^2}{2} + G \right) + (u_s)_{r=r_w} \quad (11)$$

$$\text{其中, } D = \frac{2Ar_e^2}{A^2 - B^2};$$

$$E = \frac{(A^2 - 2AB + B^2)r_w^2 - C^2 r_e^2}{C^2(A - B)};$$

$$F = \frac{(A^2 + 2AB + B^2)r_w^2 - C^2 r_e^2}{C^2(A + B)};$$

$$G = -\left(r_e^2 \ln s - r_w^2 \frac{s^2}{2} \right) +$$

$$\frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{1}{2A} \left[D \ln s + E \ln \left(\frac{A - B + Cs}{A - B + C} \right) + F \ln \left(\frac{A + B - Cs}{A + B - C} \right) \right];$$

平均孔隙水压力满足如下数学表达式

$$\pi(r_e^2 - r_w^2) \bar{u} l = 2\pi \int_0^l \int_{r_w}^{r_s} r u_s(r, z) dr dz + 2\pi \int_0^l \int_s^{r_e} r u(r, z) dr dz \quad (12)$$

归一化系数后的形式是

$$\bar{u} = \frac{2}{(N^2 - 1)l} \left[\int_0^l \int_1^s y u_s(y) dy dz + \int_0^l \int_s^N y u(y) dy dz \right] \quad (13)$$

将式(10)和式(11)代入,得

$$\bar{u} = -\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \frac{1}{2c_h} \alpha - p_0 \frac{1 + k_l}{2} \quad (14)$$

常数 α 为

$$\alpha = \frac{2r_w^2}{r_e - r_w^2} \left[\left(\frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{1}{2A} \right) (Da + Eb + Fc) + d \right] \quad (15)$$

$$\text{其中, } a = \frac{1}{2} \left[s^2 \left(\ln s - \frac{1}{2} \right) \right] + \frac{1}{4}$$

$$b = \ln \left(\frac{A - B + Cs}{A - B + C} \right) \left(\frac{s^2}{2} - \frac{(A - B)^2}{2C^2} \right) - \frac{s^2}{4} + \frac{(s - 1)(A - B)}{2C} + \frac{1}{4}$$

$$c = \ln \left(\frac{A + B - Cs}{A + B - C} \right) \left(\frac{s^2}{2} - \frac{(A + B)^2}{2C^2} \right) - \frac{s^2}{4} - \frac{(s - 1)(A + B)}{2C} + \frac{1}{4}$$

$$d = \frac{1}{8} (4N^4 \ln N - 3N^4 + s^4 + 2N^2 s^2 - 4N^2 s^2 \ln s) + E \left(\frac{N^2 - s^2}{2} \right)$$

CHU 等^[14]进行了两组现场试验,试验土样为两层,第一层土厚 4~5 m,为软粘土,第二层土厚 10~16 m,为海相粘土。试验时通过排水板施加真空预压,发现随着深度增加,真空负压有近似线性减小、孔压近似线性增加的规律。据此原理,INDRARATNA 等^[15]认为真空预压随深度的分布

如图 3 所示. 可知土体在排水边界处的孔压为

$$(u_s)_{r=r_w} = -p_0 \left[1 - (1 - k_1) \frac{z}{l} \right] \quad (16)$$

式中: p_0 为表面处的真空预压压力; k_1 为塑料排水板底部的真空预压力与顶部真空预压的比值.

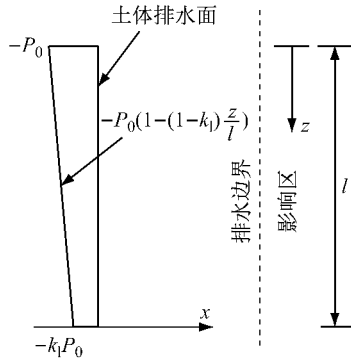


图 3 模型分析中真空度的分布情况

Fig. 3 Distribution of vacuum pressure in analytical model

2 土体的本构方程

前人在进行径向排水固结求解时通常是采用线弹性的一维压缩关系, 但试验研究表明, 土体的孔隙比和有效应力、渗透系数有经验对数线性关系^[16], 如图 4 所示. 对于正常固结土, 孔隙比和有效应力、渗透系数关系如下

$$\begin{aligned} e &= e_0 - C_c \log\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0}\right) \\ e &= e_0 + C_k \log\left(\frac{k}{k_0}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

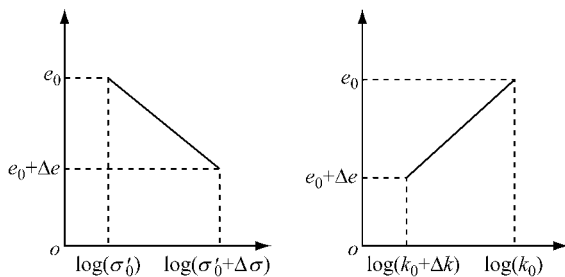


图 4 有效应力、渗透系数与孔隙比的经验对数线性关系

Fig. 4 Empirical linear relationship between effective stress, permeability coefficient and void ratio

式中: C_k 为渗透指数; k 为当前的渗透系数; e 为当前的孔隙比; C_c 为压缩指数; σ' 为当前的有效应力; k_0 、 e_0 和 σ_0' 为初始渗透系数、孔隙比和有效应力. 为便于分析, 采用量纲为一的超孔压系数 W , 即

$$W = \frac{\bar{u}}{\Delta\sigma} \quad (0 \leq W \leq 1) \quad (18)$$

式中: \bar{u} 为平均超静孔压; $\Delta\sigma$ 为瞬时施加的堆载应力. 有效应力可以表达为

$$\sigma' = \sigma_0' + \Delta\sigma - W\Delta\sigma \quad (19)$$

体积压缩系数为

$$m_v = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial \sigma'} \quad (20)$$

将式(17)的第 1 式微分, 代入到式(20)得

$$m_v = \frac{-0.434 C_c}{\sigma' (1 + e_0)} \quad (21)$$

体积压缩系数相对变化与有效应力相对变化关系可表达为

$$\frac{m_{v0}}{m_v} = \frac{\sigma'}{\sigma_0'} \quad (22)$$

把式(17)的第 2 式代入式(17)第 1 式得到渗透系数与有效应力的关系为

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}\right)^{\frac{C_c}{C_k}} \quad (23)$$

水平固结系数为

$$c_h = \frac{k_h}{m_v \gamma_w} \quad (24)$$

合并式(19)、式(22)、式(23)和式(24), 得到固结过程中的固结系数与初始固结系数比值的关系

$$\frac{c_h}{c_{h0}} = \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0'} - \frac{W\Delta\sigma}{\sigma_0'}\right)^{1 - \frac{C_c}{C_k}} \quad (25)$$

式(25)表示归一化的固结系数, 其中, c_{h0} 为初始水平固结系数; c_h 为随固结过程变化的水平固结系数. 求解控制方程会用到上述关系.

3 方程的求解

方程(15)可以写为

$$\partial T = -\frac{\partial W}{W + P} \frac{c_{h0}}{c_h} \quad (26)$$

其中, $P = p_0 \frac{1 + k_l}{2\Delta\sigma}$; $T = t \frac{2c_{h0}}{r_w^2 \alpha} = T_{h0} \frac{8N^2}{\alpha}$; $T_{h0} = \frac{c_{h0} t}{4r_e^2}$, P 是量纲为一的真空预压表达式.

令 $Y = W + P$, 得

$$\begin{aligned} \frac{1}{W + P} \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0'} - W \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0'}\right)^{-\left(1 - \frac{C_c}{C_k}\right)} &= \\ \frac{1}{Y} \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0'} + P \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0'} - Y \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0'}\right) & \end{aligned} \quad (27)$$

将方程在 $Y=0$ 处用泰勒级数展开, 得

$$\begin{aligned} \frac{c_h}{Y c_{h0}} &= \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0'} + P \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0'}\right)^{-\left(1 - \frac{C_c}{C_k}\right)} \cdot \\ \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\left\{1 - \frac{C_c}{C_k}\right\}_j}{j!} \left(1 + P + \frac{\sigma_0'}{\Delta\sigma}\right)^{-j} (Y)^{j-1} & \end{aligned} \quad (28)$$

$$T(Y) = - \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma'_0} + P \frac{\Delta\sigma}{\sigma'_0} \right)^{-1 \frac{C_c}{C_k}} \cdot \left[\ln \left(\frac{Y}{1+P} \right) + \left(1 - \frac{C_c}{C_k} \right) \left(1 + \frac{\sigma'_0}{\Delta\sigma} + P \right)^{-1} \cdot (Y - (1+P)) + \sum_{j=2}^{\infty} \frac{\left\{ 1 - \frac{C_r}{C_k} \right\}_j}{j!(j-n+1)} \cdot \left(1 + \frac{\sigma'_0}{\Delta\sigma} \right)^{-j} (Y^j - (1+P)^j) \right] \quad (29)$$

运用数值积分方法,并且根据初始条件, $t=0$ 时,施加瞬时堆载应力,孔隙水压力没有消散,所以 $W=1$, $Y=1+P$; t 为无穷大时,已经完全施加真空预压,所以 $W=-P$, $Y=0$ 积分得到式(29)。

式(29)表示平均归一化孔压和时间的关系,通过该式可以分析出孔压随时间的变化规律. Y 是介于 0 和 $1+P$ 之间的间断值,把 Y 值代入式(29)得到相对应的时间. 与张海丘等^[13]的解析解对比,因本文用 Y 代替了 W , Y 中包含了真空预压项 P , 所以本解析解考虑了真空预压的影响,适用于塑料排水板与真空预压相结合的径向固结计算。

需要注意的是,真空预压固结度的计算有所不同,本文采用的真空固结度的计算公式为^[10]

$$U = \frac{1-W}{1-W_\infty} \times 100 \quad (30)$$

式中: W_∞ 为时间 t 趋于无穷大时土层的量纲为一的超孔压系数。

4 退化验证

为了验证该解析解的正确性,文中分别与 INDRARATNA 解^[10]、WALKER 解^[12,17]进行对比验证. 在与 INDRARATANT 解^[10]进行退化验证时,仅考虑真空预压的影响,不考虑孔隙比与有效应力和渗透系数的非线性关系,其他参数与 INDRARATNA 解^[10]相同. 与此同时,不考虑涂抹区的影响,若本文解直接取 $s=1$,会造成收敛困难,所以取 $s=1.001$. N 为影响半径 r_e 与排水半径 r_w 的比值,取为 9; p_0 与 $\Delta\sigma$ 取为 50 kPa, k_1 分别取为 0 和 0.75. 纵坐标为归一化的平均超孔隙水压力,其中 u_0 为初始平均超孔隙水压力,即上部瞬时堆载产生的孔隙水压力, u 是随时间变化的孔压. 因为抽真空之后,超额孔隙水压力是负值,所以在图中出现负值. 退化结果如图 5 所示,与 INDRARATANT 解^[10]吻合很好。

由于 WALKER 解^[12]能考虑涂抹区水平渗透系数的抛物线分布和土体的线性关系,因此,在进行退化验证时,也仅考虑这两项因素. 所以,取 $C_k=C_c$, 不考虑孔隙比与有效应力和渗透系数的非线性关系. 取 $p_0=0$, 不考虑真空预压的影响,结果如图 6 所示. 其中, N 分别取为 9 和 19, s 取为 2 和 4, k 取为 2 和 4. 文中将解析解退化到不考虑真空预压和渗透系数非线性变化的情况,与 WALKER 解^[12]退化到不考虑非达西渗透定律的条件下对比验证,由图可知,本文退化解析解与 WALKER 解^[12]较为吻合,证明本文解析解的正确性,也说明本文的解析解是 WALKER 解^[12]的拓展。

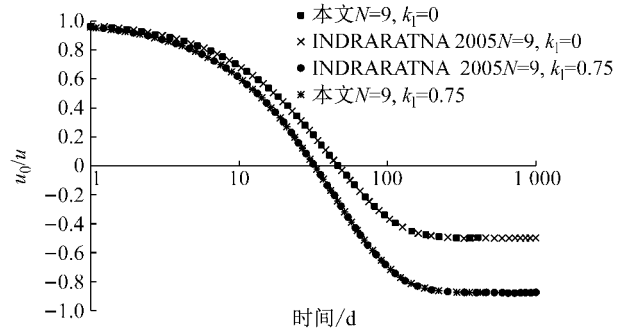


图 5 N 和 k_1 不同取值下与 INDRARATNA(2005) 解析解退化验证

Fig. 5 Degradation analysis of the obtained solutions with different values of N and k_1

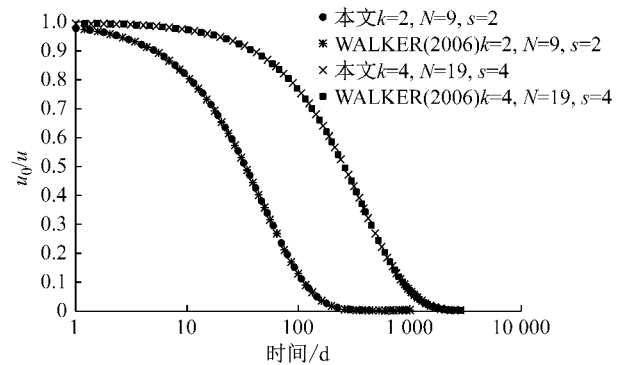


图 6 N 、 k 和 s 不同取值下与 WALKER(2006) 解析解退化验证

Fig. 6 Degradation analysis of the obtained solutions under different values of N , k and s

WALKER 解^[17]可考虑孔隙比与有效应力和渗透系数的非线性关系,但无法体现 WALKER 解^[12]中涂抹区渗透系数抛物线分布特性,本文对此不足进行改进. 与 WALKER 解^[17]对比验证时,退化涂抹区渗透系数抛物线分布影响这一特性,仅考虑 C_k/C_c 的影响. 对比结果如图 7 所示. 为了能够证明本文解

的广泛适用性,分别取 N 为 9 和 19, C_k/C_c 分别取为 1.55 与 2.93. 退化涂抹区渗透系数后的结果与 Walker 解^[17]结果吻合性非常好,说明本文解析解具有可以考虑孔隙比与有效应力和渗透系数的非线性关系对固结的影响这一优点.

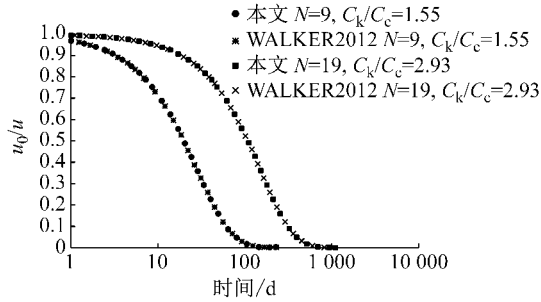


图 7 N 和 C_k/C_c 不同取值下与 Walker(2012) 解析解退化验证

Fig. 7 Degradation analysis of the obtained solutions with different values of N and C_k/C_c

5 试验验证

推导了塑料排水板与真空预相结合的非线性径向解析解,本节对解析解和试验结果进行对比验证,试验条件和本文解析条件相同. 解析解的参数及其取值如表 1. 参数 $\kappa(k_h/k_0)$ 是根据文献[12,18]建议的水平渗透系数平均值,通过将 $\kappa(k_h/k_0)$ 设为未知数,对涂抹区半径水平渗透系抛物线方程,即式(1),积分求得. 其他试验参数都是通过室内试验获得. 因篇幅限制原因,参数具体含义见文献[10].

表 1 分析中用到的参数

Tab.1 Parameters used in analysis

参数	试验 1	试验 2
C_c	0.29	0.29
C_k	0.45	0.45
影响半径 r_e/m	0.45	0.45
等效排水半径 r_w/m	0.066	0.066
涂抹区半径, r_s/m	0.2	0.2
$N=r_e r_w$	6.79	6.79
$W=r_s r_w$	3.02	3.02
最初水平渗透系数, $k_{h0}/10^{-10}ms^{-1}$	4.4	4.0
$k_h k_0^{-1}$	2.6	2.6
最初孔隙比 e_0	1	0.95
$c_{h0}/10^{-3}m^2d^{-1}$	1.20	2.68
初始高度, H/m	0.925	0.87
预固结压力, σ'_p/kPa	20	50
荷载, $\Delta\sigma/kPa$	30	50

此处,采用位移固结度的概念进行对比验证,即

$$U_{hs} = \frac{\rho}{\rho_{\infty}} \quad (31)$$

式中: U_{hs} 为位移固结度; ρ 为当前沉降量; ρ_{∞} 为最终沉降量. 若求出量纲为一的超空隙水压力 W , 沉降结果就可以按照式(32)计算,即

$$\rho = \frac{HC_c}{1+e_0} \log \left[1 + \frac{\Delta\sigma(1-W)}{\sigma'_0} \right] \quad (32)$$

式中: H 为土层高度.

基于沉降的固结度计算公式为

$$U_{hs} = \frac{\log \left[1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma'_0(1-W)} \right]}{\log \left[1 + \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) \right]} \quad (33)$$

图 8 是文献[15]试验固结和本文解析固结随时间变化对比图,本文的解析分析结果和试验测试结果的固结曲线高度吻合,说明本文推导的解析方法正确,可以用来计算和预测塑料排水板与真空预压相结合的软土地基加固.

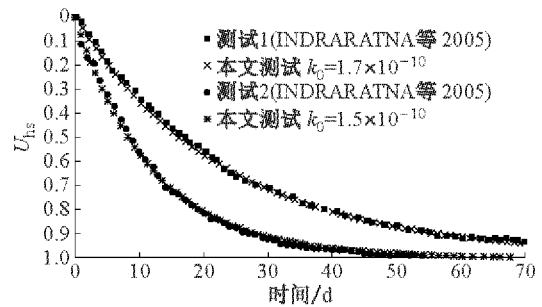


图 8 试验固结与解析解固结随时间变化图

Fig. 8 Consolidation rate comparison of test and analytical solution

6 模型的应用与参数分析

前人对参数 N 和 s 对固结速率的影响进行了诸多分析,所以本文不再对这两个参数对固结速率的影响详细分析,分别取 $N=9, s=5$. 重点关注参数 C_k/C_c 与 κ 对正常固结土的固结速率影响. 其中参数 κ 分别取 2、4、6、8 和 10, C_k/C_c 分别取 1.55 和 3.1, 由图 9 中 10 种情况对比可知,在 κ 相同的情况下 C_k/C_c 值越大,固结需要时间越短,因此, C_k/C_c 增大促使固结速率加快.

图 9 中分析参数 κ 对固结的影响时,非扰动区土体的渗透系数不发生变化,仅涂抹区渗透系数发生变化,参数 κ 在 2~10 之间变化,如图 9 所示 κ 值增大,固结所需时间加长. 这表明,如果施工对涂抹

区造成扰动越大,使 κ 增大,增加固结所需时间. 因此在分析采用塑料排水板固结的工程时需要考虑施工扰动对固结的影响.

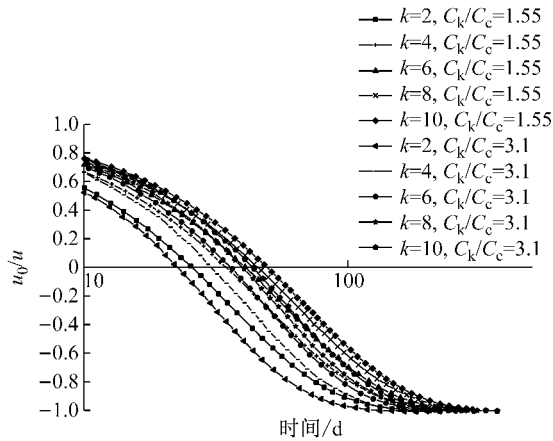


图 9 k 与 C_k/C_c 不同取值对固结速率的影响
Fig. 9 Variation of consolidation rate with different k and C_k/C_c values

7 结论

塑料排水板与真空预压相结合的软土地基加固方法广泛使用,本文以此为工程背景,推导了塑料排水板与真空预压结合的径向固结解析解,在此解析解中考虑了渗透系数变化和真空预压的影响,并对影响固结速率的部分因素进行了分析,主要有如下结论:

(1) 本文推导的解析解能够综合考虑真空预压、涂抹区水平渗透系数的抛物线分布、孔隙比与水平渗透系数和有效应力的非线性关系对固结的影响.

(2) 通过退化,本文的解析解分别与 INDRARATNA 解、WALKER 解进行了对比验证,证明了该解析解的正确性.

(3) 本文解析解与试验结果对比非常吻合,证明了该解析解的正确性与实用性,可用于塑料排水板与真空预压相结合的软土地基加固计算和预测.

(4) C_k/C_c 值越大,固结需要时间越短,因此, C_k/C_c 增大对促使固结加快的作用. 若施工对涂抹区造成扰动, κ 增大,增加固结所需时间,对工程不利.

参考文献:

[1] 张泽鹏, 李约俊, 冯滢清, 等. 塑料排水板在真空预压加固软

基中的作用[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2002, 1(2): 68.

ZHANG Zepeng, LI Yuejun, FENG Ganqing, *et al.* The effect of plastic drain board in atmospheric pressure soft base reinforcement[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2002, 1(2): 68.

[2] 王军, 蔡袁强, 符洪涛, 等. 新型防淤堵真空预压法室内与现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1257.

WANG Jun, CAI Yuanqiang, FU Hongtao. *et al.* Indoor and field experiment on vacuum preloading with new anti-clogging measures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1257.

[3] 雷华阳, 张文振, 韩鹏, 等. 吹填超软土浅层真空预压加固处理前后的固结特性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2328.

LEI Huayang, ZHANG Wenzhen, HAN Peng, *et al.* Consolidation property of ultra-soft soils before and after treatment of surface-layer improvement by vacuum preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2328.

[4] INDRARATNA B, BASACK S, RUJIKIATKAMJORN C. Numerical solution of stone column-improved soft soil considering arching, clogging, and smear effects[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(3): 377.

[5] RUJIKIATKAMJORN C, INDRARATNA B, CHU J. 2D and 3D numerical modeling of combined surcharge and vacuum preloading with vertical drains[J]. International Journal of Geotechnics, 2008, 8(2): 144.

[6] 董志良, 陈平山, 莫海鸿, 等. 真空预压法有限元计算比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2347.

DONG Zhiliang, CHEN Pingshan, MO Haihong, *et al.* Comparison of numerical simulation with finite element method for vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2347.

[7] BARRON B A. Consolidation of fine grained soil by drain wells [J]. Transaction of the American Society of Civil Engineers, 1948, 113: 718.

[8] HANSBO S. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains[C]// Proceedings of the 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundations Engineering. Stockholm: A A Balkema, 1981: 677-682.

[9] 李菲菲, 谢康和, 邓岳保. 考虑指数流的真空预压竖井地基固结解析解[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 146(3): 1075.

LI Feifei, XIE Kanghe, DENG Yuebao. Analytical solution for consolidation by vertical drains with exponential flow under vacuum preloading [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 146(3): 1075.

[10] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, SATHANANTHAN I. Radial consolidation of clay using compressibility indices and varying horizontal permeability [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1330.

[11] SATHANANTHAN I, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Evaluation of smear zone extent surrounding mandrel driven vertical drains using the cavity expansion theory [J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8(6): 355.

- [12] 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.
- [13] 张海丘, 高广运, 雷丹. 考虑3种非线性关系的径向排水固结解析解[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(4): 681.
ZHANG Haiqiu, GAO Guangyun, LEI Dan. An analytical solution of radial consolidation considering three non-linear relationships of soft soils[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(4):681.
- [14] CHU J, YAN S W, YANG H. Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station[J]. *Geotechnique*, 2000, 50(6): 625.
- [15] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, SATHANANTHAN I. Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(4): 994.
- [16] TAVENAS P, JEAN P, LEBLOND P, *et al.* The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20(4): 645.
- [17] WALKER R, INDRARANA B, RUJIKIATKAMGORN C. Vertical drain consolidation with no-darcian flow and void-ratio-dependent compressibility and permeability[J]. *Géotechnique*, 2012, 62(11):985.
- [18] SATHANANTHAN I, INDRARATNA B. Laboratory evaluation of smear zone and correlation between permeability and moisture content [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(7): 942.

~~~~~

(上接第 1289 页)

- ZHANG Yonglin, ZHONG Yifang. Time domain model of road undulation excitation to vehicles [J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2004, 35(2): 9.
- [13] CHENG Y, CHEUNG Y K. Effects of random road surface roughness and long-term deflection of prestressed concrete girder and cable-stayed bridges on impact due to moving vehicles[J]. *Computers and Mechanics*, 2001, 79:853.
- [14] SCHIEHLEN W, HU B. Spectral simulation and shock absorber identification [J]. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2003, 38:161.
- [15] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
CCCC Highway Consultants Co. Ltd. General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press. 2015.
- [16] 张立明. ALGOR, ANSYS 在桥梁工程中的应用方法与实例 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
ZHANG Liming. ALGOR, ANSYS applied to bridge engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [17] 李闰. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.  
LI Wei. The example of civil engineering by ANSYS [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2007.
- [18] 徐勤武, 胡长顺, 王 虎. 混凝土桥面复合式铺装层受力分析和设计[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2007, 27(4): 28.  
XU Qinwu, HU Changshun, WANG Hu. Mechanic analysis and design of composite type overlay on concrete bridge pavement [J]. *Journal of Chang' an University (Natural Science Edition)*, 2007, 27(4): 28.