

文章编号: 1000-7598 (2010) 05-1452-05

真空预压下软土渗透系数对固结的影响

董志良¹, 陈平山¹, 莫海鸿^{2,3}, 张功新¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广州 510230; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510240;
3. 华南理工大学 亚热带建筑国家重点实验室, 广州 510240)

摘 要: 考虑正常固结状态下前期固结压力对渗透系数的影响, 利用 ABAQUS 软件, 将渗透系数随固结应力的变化关系应用于真空预压下单井的三维有限元计算。计算结果表明, 考虑渗透系数随固结应力的变化, 其表面沉降要比渗透系数保持不变的沉降量小, 固结过程较慢, 相应的固结时间要长; 前期固结压力越大, 表面沉降将越小, 达到相同固结度时所需固结时间也越长。

关 键 词: 真空预压; 渗透系数; 正常固结; 前期固结压力; 固结应力

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Effects of permeability coefficients on consolidation of soft clay under by vacuum preloading

DONG Zhi-liang¹, CHEN Ping-shan¹, MO Hai-hong^{2,3}, ZHANG Gong-xin¹

(1. Engineering Research Institute Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbour Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. School of Civil Engineering and Traffic & Communications, South China University of Technology, Guangzhou 510240, China;
3. State Key Laboratory of Subtropic Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510240, China)

Abstract: Considering the influence of preconsolidation pressure on permeability coefficients under normal consolidated state, the 3-D FEM numerical simulation of single drain was executed for vacuum preloading with software ABAQUS, which took the relations between permeability coefficients with consolidation stress into account. The results show that when the permeability varied with consolidation stress, the surface settlement magnitude is smaller and the course of consolidation is slower, which resulted in the time needed to finish consolidation is longer. Meanwhile, the research also shows that more the preconsolidation pressure, smaller the surface settlement is, and the time to the same consolidation degree is longer.

Key words: vacuum preloading; permeability coefficients; normal consolidation; preconsolidation pressure; consolidation stress

1 引 言

真空预压下土体固结就是土体经过了从土体孔隙水承受真空压力到土体颗粒骨架承受真空压力的过程^[1]。试验表明, 土在固结过程中其渗透系数随固结度的增大而逐渐减小, 在相同的固结时间内, 考虑土的渗透系数变化和不考虑土的渗透系数变化所计算得到的孔隙压力, 其值可相差达 2 倍以上^[2]。大量的试验结果表明, 作为渗透系数函数的固结系数是随着有效应力的变化而变化的, 特别是在前期固结应力的前后, 其差别非常大^[3-5], 因此, 考虑渗透系数随孔隙比的变化对真空预压下软土固结的影响更加符合实际。从前人对真空预压的研究来看,

极少学者对这一问题进行深入分析, Shiffman & Gibson 曾经采用差分法, 求解考虑渗透系数随土层深度变化的太沙基一维固结问题^[6], 但对于砂井轴对称问题, 目前尚无考虑渗透系数随固结应力变化的精确解或数值解。彭劼^[7]采用修正剑桥模型, 通过试验参数确定了渗透系数随孔隙比变化的函数关系式, 但并未说明其求解过程。在目前工程设计中要考虑土的渗透系数变化对土的固结影响时, 通常采用固结前后渗透系数的平均值。这种方法并不可取, 因为渗透系数在固结过程中的变化幅度很大, 且其变化与固结历时之间并非是线性关系, 在固结初期渗透系数变化较大, 后期则变化较小, 因此合理描述渗透系数在固结过程中的变化过程是很关键

收稿日期: 2008-10-10

第一作者简介: 董志良, 男, 1965 年生, 博士, 教授级高工, 主要从事软基处理、环境岩土工程等方面的研究工作。E-mail: dzhiliang@gzpcce.com

的。国内学者进行了一些研究, 罗晓辉^[8]认为土体渗透系数与初始有效应力、有效应力和压缩系数有关; 杨志锡等^[9]给出了土体渗透系数与有效应力的分段耦合关系式, 并与孔隙比和有效应力有关。然而, 上述研究成果均没有考虑软土前期固结压力对其的影响。陈平山等利用文献[10]的室内试验数据, 考虑了前期固结压力的影响, 得到正常固结土在压缩过程中渗透系数与固结应力的关系式, 并和目前关于渗透系数与固结应力关系式进行了比较, 结合室内试验, 其结果表明考虑前期固结压力的渗透系数要比未考虑前期固结压力的更为合理^[11]。

本文基于文献[11], 在单井三维有限元计算中考虑了渗透系数随固结应力的变化关系, 进而探讨了真空预压下这种关系对固结的影响。

2 渗透系数与固结应力关系

文献[11]从固结系数的定义出发, 视压缩系数为变量, 利用室内试验数据, 拟合了固结系数与固结应力的关系式, 见式(1), 并以此建立了渗透系数与固结应力的微分方程, 从而求得了考虑前期固结压力时正常固结土的渗透系数随固结应力变化关系见式(2)。

$$C_v = \begin{cases} C_{v0} \exp[a(\sigma' - p_c)], & (\sigma' < p_c) \\ C_{v0}, & (\sigma' = p_c) \\ C_{v0} \exp[a(p_c - \sigma')], & (\sigma' > p_c) \end{cases} \quad (1)$$

$$k = \begin{cases} \frac{k_0}{1 + A[1 - \exp a(p_c - \sigma')]k_0}, & (\sigma' \leq p_c) \\ \frac{k_0}{1 + A[\exp a(\sigma' - p_c) - 1]k_0}, & (\sigma' > p_c) \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_0 为处于前期固结压力下的渗透系数; p_c 为前期固结压力; σ' 为固结应力; $A = \frac{1 + e_0}{C_{v0}\gamma_w na}$, e_0 、

C_{v0} 分别为前期固结压力下的初始孔隙比和固结系数; γ_w 为土中水的重度; n 为孔隙比与渗透系数关系式的一个系数; a 为固结系数与固结应力曲线对不同土质的修正系数 (kPa^{-1})。正常固结土的前期固结压力 p_c 就是其自重, 而 e_0 、 k_0 、 C_{v0} 、 n 和 a 可通过室内试验获得。

3 考虑渗透系数变化的单井三维有限元计算

文献[12]指出, 土体在抽真空前基本上处于正常固结状态, 受施工荷载影响, 施插塑料排水板期

间, 土体实际上处于超自重荷载预压, 因此其自重应力固结实际上已基本完成, 可以认为真空预压期间待加固土体是正常固结土。土体固结是一个渗流、变形相互耦合的问题, 比奥固结理论是目前关于土体固结最为完善的一种理论, 但只有在一些边界条件很简单的情況下才能求出其解析解, 通常采用有限单元法来进行求解。实际应用中, 砂井地基的有限元计算方法主要有单井法、等价砂墙简化法和平面变形-空间渗流有限元分析法, 其中等价砂墙简化方法是目前应用较多的计算方法, 许多学者推导了等效变化公式, 如 SHINSHAH^[13], HIRD C^[14], INDRARATNA B^[15], 赵维炳等^[16]。谢康和^[17]认为, 地基的变形是平面问题, 而渗流是空间问题, 对于长条形荷载正方形布置的砂井地基较为适用。严格说来, 砂井地基的渗流和变形属于三维问题, 对于大面积的砂井地基, 土层水平分布且较均匀时, 取单井的固结情况代替整个砂井地基的固结情况, 引起的误差会较小, 这里对单井进行三维有限元计算。

式(2)是关于渗透系数与固结应力之间的函数关系, 直接应用比奥固结方程求解难度很大, 由于固结问题本身就是一个非线性问题, 而渗流矩阵中的渗透系数又是变化的, 每一个迭代步开始时都需要将上一个迭代步计算所得的有效应力代入式(2)求得该步的渗透系数, 导致固结方程的非线性程度增加。本文利用 ABAQUS 软件来求解这一非线性问题, 该程序首先在连续方程中引入时间积分因子, 以保证计算的稳定性, 通常将这个因子取为 1.0, 将连续方程在时间上离散并牛顿线性化, 然后, 直接求解与平衡方程组成的耦合方程组。ABAQUS 程序提出的这种解法即使对于非线性程度很高的问题也能很快地达到收敛, 避免了先求解某个方程, 再将结果代入到另一个方程进行求解, 其计算结果返回到第一个方程继续求解, 如此循环, 直到满足给定的收敛条件为止, 这种方法效率低下, 且较难收敛。ABAQUS 程序中虽然无法直接考虑渗透系数随固结应力的变化关系, 但可以考虑渗透系数与孔隙比之间的关系, 这种关系比前者更为直观, 因此, 将式(2)转换为渗透系数与孔隙比之间的关系。

黄文熙^[18]建议在沉降计算中考虑土体三维变形情况, 并提出在球应力张量作用下土体体积应变:

$$\varepsilon_v = \frac{1 - 2\nu}{E_0} \Theta = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \quad (3)$$

式中: e_1 、 e_2 分别为压缩前和压缩后的孔隙比;

$\Theta = \sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z$ 。在真空预压下,土体受球应力作用而固结,即 $\sigma'_x = \sigma'_y = \sigma'_z$, 代入式 (3) 可得

$$\sigma'_z = \frac{E_0(e_1 - e_2)}{3(1 - 2\nu)(1 + e_1)} \tag{4}$$

利用式 (4) 将渗透系数与孔隙比联系起来, 求出不同的孔隙比下对应的固结应力 σ'_z , 再代入式 (2), 即可求得相应的 k 。

假设排水板呈正方形布置, 间距为 1.0 m, 排水板尺寸为 100 mm×4 mm, 按面积相等的原则换算为边长 2 cm 的方井。采用文献[11]的算例 1 进行计算, 土的物理力学指标见表 1, 有限元计算过程需要采用变形模量 E_0 , $E_0 = E_s(1 - \nu - 2\nu^2)/(1 - \nu)$, 文献[11]已通过室内试验结果求得 $a = 0.001 \text{ kPa}^{-1}$, $n = 2$, $C_{v0} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

表 1 土的物理力学指标
Table 1 Soil properties

材料	深度 / m	E_s / MPa	ν	k_h / (cm/s)	k_v / (cm/s)
淤泥	10	1.1	0.40	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}
排水板	10	0.1	0.32	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}

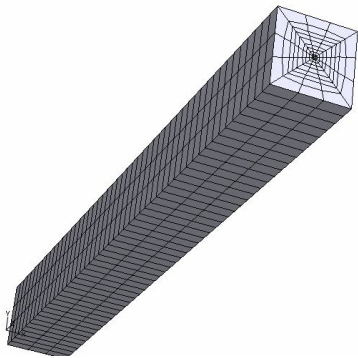


图 1 单井三维有限元模型网格图
Fig.1 Element mesh for 3D single drain

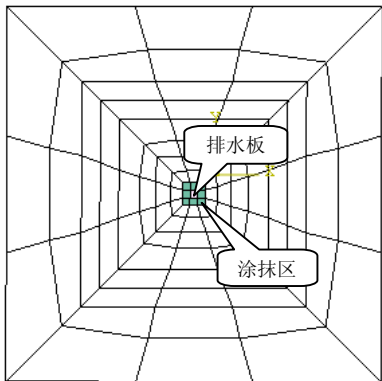


图 2 单井平面网格图
Fig.2 Plane mesh for 3D single model

为比较计算结果, 这里采用董志良解析解^[19]与数值计算结果进行对比, 数值计算分两种情况: 一种是渗透系数在真空预压期间保持常数, 另一种是渗透系数随孔隙比变化。解析解基于轴对称模型, 需要将排水板换算为等效的圆形, 经计算, 可得参数: $r_w = 0.035 \text{ m}$, $n = 16.114$, $r_c = 0.564 \text{ m}$, $s = 3.0$ 。模型的边界条件为: 地表孔压为 -85 kPa , 自由变形, 其他边界的孔压未知; 竖向边界面均为不透水边界, 自由变形; 基底为竖向、水平向位移约束, 同时也是不透水边界。依据式 (2) 和式 (4), 对前期固结压力 $p_c = 150 \text{ kPa}$ 时渗透系数随固结应力变化的单井固结进行计算, 初始孔隙比为 1.0, 渗透系数初始值为 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, $k_h/k_s = 3.0$, 表 2 为不同的孔隙比下对应的固结应力和渗透系数。

表 2 孔隙比、固结应力与渗透系数关系对应表
Table 2 Relationship between porous ratio consolidation stress and permeability coefficients

e	σ' / kPa	k / ($10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)
0.9	208	0.950
0.8	416	0.783
0.6	833	0.528
0.4	1 250	0.354

图 3 比较了 3 种计算方法下的平均固结度。从图可以看出, 轴对称问题的董志良解析解比 k 保持常数时的数值解稍大, 因为本文所取的计算区域和边界条件与常规的轴对称单井计算模型有所区别, 认为砂井作用交界面存在水平位移, 相当于释放了单井作用面上的横向约束, 固结比常规单井法要慢些。当 k 变化时, 单井的平均固结度在 3 种计算结果中最小, 而在真空预压最初期, 无论是解析解还是数值解, 结果都非常接近, 随着抽真空时间的增加, 孔隙比逐渐减小, 渗透系数降低, 土体孔隙中的水就愈难被抽出, 因此固结度较小。抽真空终了时刻, 其固结度要比渗透系数保持常数时的固结度大约小 12%, 这也说明当考虑渗透系数变化时, 固结时间比渗透系数为常数时的情形要长。图 4 比较了 k 为常数和随固结应力变化时的表面沉降, 从图看出, 在同一时刻, 考虑渗透系数变化时的表面沉降要比渗透系数保持常数时的沉降小, 对真空预压而言, 前者的最终变形也比后者小, 说明考虑渗透系数变化对固结过程的影响不可忽略。图 5、6 比较了不同前期固结压力下单井的表面沉降与固结度, 计算结果表明, 对同一种土, 前期固结压力越大, 表面沉降越小, 固结越慢。因此, 在真空预压设计

中要考虑前期固结压力对固结的影响, 以尽量减少工后沉降。

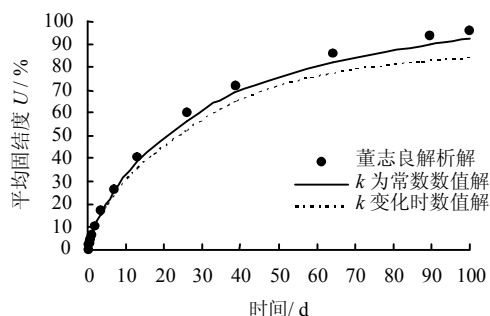


图3 平均固结度随时间变化曲线

Fig.3 Curves of consolidation degree vs. time

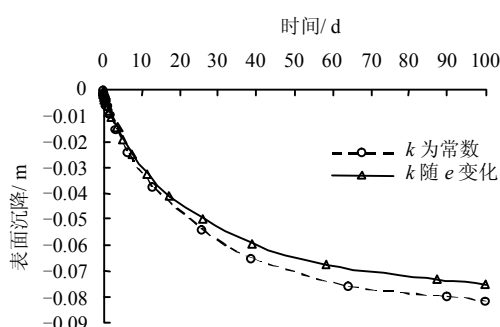


图4 表面沉降随时间变化曲线

Fig.4 Curves of surface settlement vs. time

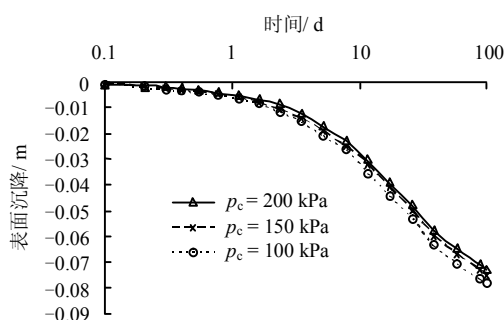


图5 不同前期固结压力下表面沉降随时间变化曲线

Fig.5 Curves of surface settlement vs. time under different preconsolidation stresses

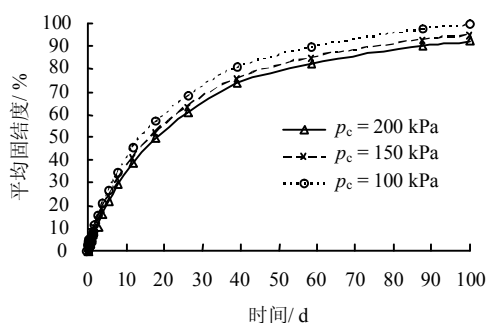


图6 不同前期固结压力下平均固结度随时间变化曲线

Fig.6 Curves of consolidation degree vs. time under different preconsolidation stresses

综上分析可以看出, 当考虑渗透系数在不同前期固结压力下随固结应力的变化时, 计算所得的表面沉降、平均固结度都要比视渗透系数为常数时的计算结果小。实际工程中, 渗透系数也是随着抽真空时间增加而减小的, 在现场监测过程中发现, 到了加固中、后期, 出水量很小, 说明由于固结变形排出的孔隙水减少了, 其中一方面的原因就是土体渗透系数的降低而使真空泵很难抽水上来, 此时, 即使延长抽真空时间也无法明显增加表面沉降。文献[12]的研究结论表明, 真空预压加固南沙港区的软土大约在前 30 d 内即可达到较好的加固效果, 其后将近 60 d 的时间里继续抽真空意义已经不大。因此, 在设计中有必要考虑渗透系数的变化对固结过程的影响, 根据具体的土体参数确定合理的抽真空时间。

4 结 论

通过对单井做三维有限元计算分析, 考虑渗透系数在固结过程中的变化, 得到如下结论:

(1) 在真空预压法处理软基的三维有限元计算中, 考虑渗透系数随固结应力的变化, 其表面沉降要比渗透系数保持不变的沉降量小, 固结过程较慢, 相应的固结时间要长。

(2) 前期固结压力越大, 其表面沉降越小, 固结度越低, 达到相同固结度时所需固结时间也越长, 真空预压设计中要考虑前期固结压力对固结的影响。

参 考 文 献

- [1] 彭劫, 刘汉龙. 真空-堆载联合预压法加固机理探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 560—563.
PENG Jie, LIU Han-long, CHEN Yong-hui. Mechanism of foundation strengthening by vacuum-surge preloading method[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2003, 31(5): 560—563.
- [2] 顾慰慈. 考虑渗透系数变化时土石坝的固结计算[J]. 河北水利水电技术, 1998, (4): 13—16.
GU Wei-ci. Consolidation of earth-rock dam considering the variation of permeability coefficient[J]. *Hebei Water Conservancy and Hydropower Technology*, 1998, (4): 13—16.
- [3] LOWE John III, JONAS E, OBRICIAN V. Controlled

- gradient consolidation test[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation on Engineering Division, ASCE**, 1969, 95(SM1): 77—97.
- [4] KARL TERZAGHI, RALPH B, PECK G M. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [5] 马驹. 固结系数与固结压力关系的统计分析与研究[J]. 港口工程, 1993, (1): 46—53.
- MA Xun. Statistical analysis and study of the relationships between the coefficient of consolidation and consolidation pressure[J]. **China Harbour Engineering**, 1993, (1): 46—53.
- [6] 赵维炳, 施建勇. 软土固结与流变[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996.
- [7] 彭勃, 刘汉龙, 陈辉, 等. 真空-堆载联合预压法软基加固对周围环境的影响[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 656—659.
- PENG Jie, LIU Han-long, CHEN Hui, et al. Effects of combined vacuum surcharge preloading to surrounding environment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 656—659.
- [8] 罗晓辉. 深基坑开挖渗流与应力耦合分析[J]. 工程勘察, 1996, (6): 37—41.
- [9] 杨志锡, 叶为民, 杨林德. 基坑工程中应力场与渗流场直接耦合的有限元方法[J]. 勘察科学技术, 2001, (3): 32—36.
- YANG Zhi-xi, YE Wei-min, YANG Lin-de. The finite element method of direct coupling between the stress field and the seepage field of foundation pit projects[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2001, (3): 32—36.
- [10] 林鹏, 许镇鸿, 徐鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 106—112.
- LIN Peng, XU Zhen-hong, XU Peng, et al. Research on coefficient of consolidation of soft clay under compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 106—112.
- [11] 吕卫清, 董志良, 陈平山, 等. 正常固结土渗透系数与固结应力关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 769—773.
- LÜ WEI-qing, DONG Zhi-liang, CHEN Ping-shan, et al. Research on relationship between permeability coefficient and consolidation stress of normal consolidation clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 769—773.
- [12] 张功新. 真空预压加固大面积超软弱吹填淤泥土试验研究及工程应用[博士学位论文 D]. 广州: 华南理工大学建筑学院, 2006.
- [13] ZENG G X, XIE K H, SHI Z Y. Consolidation analysis of sand drain ground by FEM[C]//Proc. 8th Asian regional Conf. Soil Mech. Kyoto: Kyoto University Press, 1987: 139—142.
- [14] HIRD C C. Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground[J]. **Geotechnique**, 1992, 42(3): 499—511.
- [15] INDRARATNA B, REDANA I W. Plane-strain modeling of smear effects associated with vertical drains[J]. **J. Geotech. Engg. Div. ASCE**, 1997, 123(5): 474—478.
- [16] 赵维炳, 陈永辉, 龚友平. 平面应变有限元分析中砂井的处理方法[J]. 水利学报, 1998, (6): 53—57.
- ZHAO Wei-bing, CHEN Yong-hui, GONG You-ping. A methodology for modeling sand-drain ground in plain strain analysis[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1998, (6): 53—57.
- [17] 谢康和. 砂井地基固结理论数值分析与优化设计[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 1987.
- [18] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [19] 董志良. 堆载及真空预压砂井地基固结解析理论[J]. 水运工程, 1992, (9): 1—7.
- DONG Zhi-liang. Consolidation theory on heaped load & vacuum preloading of sand drain foundation[J]. **Port & Water Engineering**, 1992, (9): 1—7.