

文章编号: 1000-7598-(2006) 09-1475-05

竖向排水井地基工后沉降预测

刘加才¹, 赵维炳², 施建勇³, 宰金珉¹

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009; 2. 南京水利科学研究所, 南京 210024; 3. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 预测工后沉降是排水固结预压加固软土地基的关键问题之一。根据等应变竖向排水井地基固结理论, 提出了沉降曲线的近似计算方法。通过实测沉降资料与近似理论曲线的拟合, 获得竖向排水井地基的最终沉降量和平均固结度, 从而预估其工后沉降量。将该方法分别应用于真空预压和堆载预压处理的竖井地基, 进行工后沉降预测, 结果表明该方法是可行的。

关 键 词: 竖向排水井; 软土地基; 固结; 工后沉降

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Estimation of post construction settlement of ground with vertical drains

LIU Jia-cai¹, ZHAO Wei-bing², SHI Jian-yong³, ZAI Jin-min¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 3. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Estimation of the post construction settlement of the ground improved by preloading drainage is one of the most critical problems. Based on the consolidation theory of ground with vertical drains under the condition of equal vertical strain, approximate theory settlement curve calculation method is put forward. The least squares optimization method is used to best fit the theory settlement curve with the measured settlements and to determine total primary settlement and average consolidation degree, consequently post construction settlement can be estimated. The method is applied to two cases histories of ground with vertical drains improved by vacuum preloading and surcharge respectively to predict post construction settlement. It is verified that the method is applicable to engineering.

Key words: vertical drain wells; soft ground; consolidation; post construction settlement

1 前 言

近年来, 随着真空预压施工技术的日趋成熟, 竖向排水井结合真空堆载联合预压广泛应用于围海造田, 港口, 码头, 高速公路等工程的软土地基处理中。由于高速公路自身需要加载路堤的特点, 该方法在高速公路软基处理中的应用更为普及。如何很好地控制工后沉降是排水固结预压处理软土地基所面临的主要问题之一。如果工后沉降或工后差异沉降过大, 会造成桥头跳车, 路面开裂, 公路使用年限缩短等。对竖向排水井地基, 一般是通过竖井地基竖墙化, 再通过平面有限元进行固结及变形分析^[1]。由于各种原因, 设计计算的沉降与实测沉降之间有时相差很大, 从现场实测资料推算最终沉降和平均固结度是较为科学合理的方法。如何简便可

靠地确定工后沉降一直是工程界和理论界较为关注的焦点问题。

目前, 通过现场观测资料推求最终沉降和固结度有多种方法^[2], 如对数配合法, Asaoka 法, 双曲线法等。这些方法只是针对一般无竖向排水井地基, Tan. S. A 利用 Sridharan, A 提出的矩形双曲线法^[3]进行竖向排水井地基进行预测^[4, 5], 该方法需要给定竖井打设参数, 对不同的竖井打设深度, 间距等对应不同的 α , 不方便工程使用; 另外, 该方法需要通过绘制沉降曲线, 确定固结度为 50% 和 90% 所对应的沉降点, 人为影响较大, 其精度得不到保证。刘加才^[6]基于成层竖井地基固结理论提出了利用最小二乘法确定竖向排水井地基平均固结度方法, 其优化参数较多, 初值选取对计算结果有一定影响, 且很难应用于多级加载的复杂情况。

收稿日期: 2004-11-24

基金项目: 国家自然科学基金 (No.50279021)。

作者简介: 刘加才, 男, 1970 年生, 博士, 讲师, 主要从事软土地基特性及其地基处理方面的教学和科研。E-mail: liujchhu@163.com

工程上对工后沉降的控制,通常是采用沉降稳定控制方法,即:连续一段时间沉降速率小于某个值。如广东高速公路建设者认为当沉降速率小于等于5 mm/月时进行路面施工,剩余沉降可以满足工后沉降要求^[7];港工规范则规定当真空堆载联合预压连续5~10 d沉降速率均小于或等于2 mm/d时,可停抽真空^[8]。文献[7]、[8]对以后期沉降速率作为控制标准进行了讨论,指出其应用具有前提条件,不能一概而论。为了提高工后沉降的预测精度,本文提出了通过实测沉降资料与近似理论曲线的拟合,获得竖向排水井地基的最终沉降量和平均固结度,从而预估其工后沉降量方法,并对工程实例进行了计算。该方法弥补了现有单一沉降速率控制方法的不足,可以为类似工程提供参考依据。

2 瞬时荷载作用下均质竖井地基固结度简化计算

赵维炳对基于麦钦特流变模型的饱和黏弹性地基轴对称固结问题进行了研究^[9],给出了其固结解答。若不考虑土体黏滞性,其固结解答可用下式表示:

$$\bar{u}_z = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} \exp(-K_m t) \quad (1)$$

式中 $\bar{u}_z$ 为任一深度平面上土体的平均孔压; u_0 为初始孔压; $M = (2m-1)\pi/2$; K_m 如下式所示:

$$K_m = \frac{M^2 C_v}{H^2} + \frac{M^2 n^2 \mu}{M^2 n^2 \mu + (n^2 - s^2)G} \frac{2C_h}{r_e^2 \mu} \quad (2)$$

式中 G 为井阻因子, $G = (2k_h H^2)/(k_w r_w^2)$, 其中 k_h 为土体水平向渗透系数, k_w 为竖向排水井的渗透系数, r_w 为竖井半径; H 为竖井打设深度; $C_v = \frac{k_v}{m_v \gamma_w}$,

其中 m_v 为土体的体积压缩系数, k_v 为土体竖向渗透系数; $\mu = \frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln \frac{n}{s} - \frac{3n^2 - s^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s} \frac{n^2 - s^2}{n^2} \ln s$;
 r_w 为水重度; $C_h = \frac{k_h}{m_v \gamma_w}$; r_e 为竖井等效影响半径;
 $n = r_e/r_w$; $s = r_s/r_w$ 。

若已知竖向排水井地基参数,则可以获得其孔压消散规律。对式(1)进行积分,即可获得其平均固结度:

$$\bar{U} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-K_m t) \quad (3)$$

若不计井阻及竖向向固结作用,即 $G=0$;
 $C_v=0$, 则 K_m 可简化为

$$K_m = \frac{2C_h}{r_e^2 \mu} \quad (4)$$

相应的式(2)则简化为

$$\bar{U} = 1 - \exp\left(-\frac{2C_h}{r_e^2 \mu} t\right) \quad (5)$$

从式(2)中可以看出,第一项所占比例极小,可以忽略,但实际工程中井阻作用对砂井地基固结的影响是较大的^[10],因此应对式(5)进行修正。由于级数收敛较快,前几项对固结度的变化影响较大。取第一项,即 $m=1$ 时的系数作为修正系数,即:

$$\alpha = \frac{\pi^2 n^2 \mu}{\pi^2 n^2 \mu + 4(n^2 - s^2)G} \quad (6)$$

修正后的固结度简化近似表达式为

$$\bar{U} = 1 - \exp\left(-\alpha \frac{2C_h}{r_e^2 \mu} t\right) \quad (7)$$

建筑地基基础处理技术规范^[11]给出了瞬时荷载作用下,考虑井阻和涂抹作用时,竖井地基径向排水平均固结度的计算公式为

$$\bar{U} = 1 - \exp\left[-\frac{8C_h}{(F_a + \pi G)d_e^2} t\right] \quad (8)$$

式中 $F_a = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k_h}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4}$; $G = \frac{k_h}{k_w} \frac{H^2}{d_w^2}$ 。

为了对此简化计算所产生的固结度误差进行定量的评价,本文在此用简化解和精确解以及规范解对同一算例进行了固结度对比计算。算例所取参数为: $r_w = 0.035$ m, $r_e = 0.75$ m, $r_s = 0.07$ m, $k_h = 2.0 \times 10^{-7}$ m/s, $k_s = k_v = k_h/2$, $k_w = 2.0 \times 10^{-4}$ m/s, $m_v = 0.4$ MPa⁻¹, $H = 15.0$ m。为了叙述方便,取无量纲参数 $T_h = \frac{2C_h t}{r_e^2 \mu}$ 作为时间因子。利用式(6)进行计算,可得修正系数 α 为 0.671 6,图1为采用4种计算方法对该算例进行平均固结度计算的比较情况。

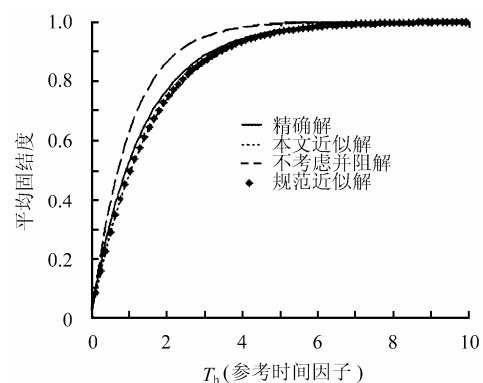


图1 算例1平均固结度比较

Fig.1 Comparison of average consolidation degree of case 1 calculated by different methods

从图中可以看出,若不考虑井阻影响,其所计算得的平均固结度比严格解析解要大得多,夸大了地基的固结速度。利用本文提出的近似方法,计算结果与精确解较为接近。平均固结度超过 90 % 以后部分几乎完全重合。固结过程中近似解与精确解的最大误差为 2.23 %,完全可以满足工程精度要求。从图中还可以看出,规范近似解与本文近似解解答也较为接近,比较情况如表 1 所示,两解答相差不超过 0.35 %。

表 1 本文近似解与规范近似解平均固结度比较
Table 1 Comparison of average consolidation degree of case 1 calculated by present solution and code method

	1	2	3	4	5	6
本文法/ %	48.91	73.91	86.67	93.19	96.52	98.22
规范法/ %	49.25	74.25	86.93	93.37	96.63	98.30

若 $r_c=0.55$ m, $H=20.0$ m 时,此时修正系数 α 为 0.510 3, 3 种计算方法所计算得到的平均固结度比较情况如图 2 所示。从图中可以看出,不考虑井阻作用引起的误差比算例 1 更大,采用本文近似方法修正后与精确解较接近,最大误差为 2.16 %。从图中还可以看出,规范近似解与本文近似解解答也较为接近,比较情况如表 2 所示,两解答相差不超过 0.40 %。

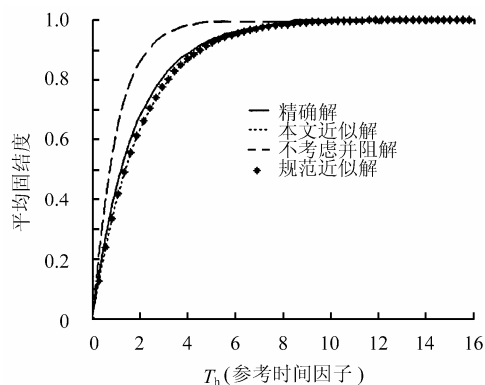


图 2 算例 2 平均固结度比较

Fig.2 Comparison of average consolidation degree of case 2 calculated by three methods

表 2 本文近似解与规范近似解平均固结度比较
Tab.2 Comparison of average consolidation degree of case 1 calculated by present solution and code method

	1	2	3	4	5	6
本文法/ %	39.97	63.96	78.37	87.01	92.20	95.32
规范法/ %	40.29	64.34	78.71	87.29	92.41	95.47

两种算例工况在实际工程中具有代表性,说明本文所提出的近似计算方法是可以满足工程精度要

求的。规范近似解和本文近似解均表明,瞬时荷载作用下平均固结度可以采用如下近似公式进行计算:

$$\bar{U}=1-\exp[-\beta t] \quad (9)$$

式中 β 为常数系数。

3 根据实测资料预测竖向排水井地基工后沉降

通过实测沉降资料对竖向排水井地基工后沉降进行预测,主要原理是首先根据实测资料拟合理论沉降曲线,从而获得最终沉降量 S_∞ 或平均固结度 $\bar{U}$ 。 $\bar{U}$ 可表示为已发生的沉降量 S_f (finished settlement) 与最终沉降量 S_∞ 之比。若为等载预压,则预测的最终沉降量 S_∞ 减去已发生的沉降量 S_f (finished settlement) 即为尚未完成的主固结沉降量。工后沉降量 S_{pc} (post construction settlement) 等于尚未完成的主固结沉降量再加上次固结沉降量,次固结沉降量按照总沉降的 8 % ~ 10 % 计算^[2]; 若为超载预压,则若预压荷载 L_p (preloading) 与平均固结度的乘积大于使用荷载 L_u (using load), 即可认为工后沉降满足要求。下面对不同加载方式下竖井地基的沉降预测进行研究,并对适用条件进行讨论。

(1) 瞬时加载情况

若竖向排水井地基为一次性加载,如真空预压,若密封效果较好,一般 1 d 即可抽到 80 kPa。则近似沉降 S_t 可用式 (10) 表示:

$$S_t=S_\infty[1-\exp(-\beta t)] \quad (10)$$

式中 S_∞ 为最终沉降量。采用最小二乘法^[12],通过实测沉降值与理论近似曲线(10)的逼近,获得 S_∞ 及 β 值。

(2) 单级线性加载情况

若为单级线性加载,加载期为 t_u , 则近似平均固结度公式如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U} &= \frac{t}{t_u} - \frac{1}{t_u \beta} (1 - e^{-\beta t}) & (t_u \geq t \geq 0) \\ \bar{U} &= 1 - \frac{1}{t_u \beta} [e^{-\beta(t-t_u)} - e^{-\beta t}] & (t \geq t_u) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

加载稳定期后的近似沉降 S_t 可用式 (12) 表示:

$$S_t=S_\infty - \frac{S_\infty}{t_u \beta} [e^{-\beta(t-t_u)} - e^{-\beta t}] \quad (12)$$

通过加载稳定期后实测沉降值与理论近似曲线 (12) 的逼近,获得 S_∞ 及 β 值。

(3) 多级加载情况

若为多级加载,如图3所示。由理论分析可知,对应于多级加载,如果其加载间歇期较短,则固结曲线与简单换算的线性加载较为接近。如果加载间歇越长,则其固结曲线与简单换算的线性加载固结曲线相差越大。但固结后期几乎没有差别。因此,在计算后期固结度时,为计算方便,可以用简单线性加载代替多级加载,而不会产生较大误差。图中, t_{eu} 为简单线性加载等效时间, q_{eu} 为等效荷载。

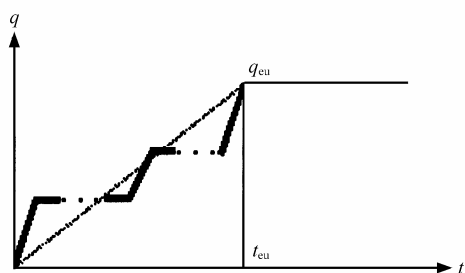


图3 多级线性加载
Fig.3 Multiple ramp loading

固结变形后期的近似沉降 S_t 可用式(13)表示:

$$S_t = S_\infty - \frac{S_\infty}{t_{eu}\beta} \left[e^{-\beta(t-t_{eu})} - e^{-\beta t} \right] \quad (13)$$

通过固结变形后期卸载前实测沉降值与理论近似曲线(11)的逼近,获得 S_∞ 及 β 值。

(4) 讨论

由于上述沉降预测方法是基于竖向排水井打穿均质软土层线弹性理论而得到的,若竖向排水井未打穿压缩层范围内的软土层,则本文方法并不适用。另外,一般竖向排水井地基由成层土组成,而其中高压缩软土层一般较厚,其变形占地基变形的主要部分,则本文方法仍然适用。土体固结过程中存在着非线性,用本文方法预估沉降会带来一定误差,但由于固结后期土体的应力应变关系基本上可认为是一常量,由后期沉降观测资料拟合理论曲线其误差相对来说较小。

4 工程算例分析

利用上述工后沉降预测方法,分别对真空预压和真空堆载联合预压处理软土地基的工程实例进行研究。

算例1 采用文献[6]中的算例。深圳市宝安区固戍开发区南昌路 K0+340~K0+625.16 段采用真空预压法进行软基处理。2 d 内真空度达到 -75 kPa,以后保持在 -75 kPa 左右。

由于采用真空预压方法,可以认为荷载一次性施加,用实测沉降资料对近似沉降曲线进行拟合,拟合情况如图4所示。从图中可以看出实测曲线与理论曲线较为吻合,预测最终沉降量为 0.712 m,文献[6]预测最终沉降量为 0.752 m,两者仅差 4 cm,在工程精度允许范围内。使用荷载小于 75 kPa,故其工后沉降量小于尚未完成的主固结沉降与次固结沉降之和, $S_{pc} \leq 0.072$ m。

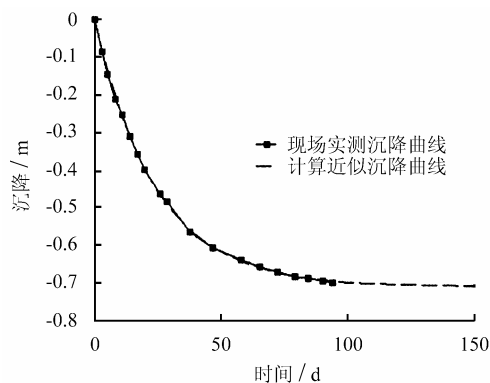


图4 实测沉降拟合曲线
Fig.4 Measured settlement data-fitting curve

算例2 南京经四东路 K0+015~K0+800 路段采用堆载预压处理。道路经过区域的地质情况自上而下为: I-1 杂填土层厚 0.6~4.8 m,非均质,低强度; I-2 素填土,黄灰色,松散,以软塑状亚黏土为主,层厚 0.6~2.3 m; II-1 亚黏土,黄灰色,软塑,局部硬塑,局部缺失,发育部位层厚 0.3~1.6 m; II-2 淤泥质亚黏土,灰色,场地均有分布,层厚 2.9~10.3 m,属高压缩性; II-3 淤泥质亚黏土,灰青色,流塑,层厚 1.3~15.3 m,属高压缩性; II-3A 亚黏土夹亚砂土,软流塑,层厚 2.10~3.10 m,中高压缩性; II-4 粉砂夹亚黏土,青灰色,稍密,层厚 0.7~6.85 m,属中等压缩性; II-5 粉细砂,青灰色,稍密,属中低压缩性; III-1 粉砂,青灰色,中密,层厚 13.10~16.0 m,属中低压缩性。竖向排水体采用塑料排水板,打设深度为 17.0 m 左右,间距 1.5 m,采用梅花形布置。2003 年 9 月 8 日开始加载,到 9 月 19 日加载基本完成,后有零星补填土方。以 9 月 8 日作为施工开始时间,等效加载时间可设为 12 d。

由于 cj14 沉降板沉降量最大,且其收敛趋势与其它各沉降板一致,较为典型,固选取该板所测沉降资料进行分析。采用沉降后期 4 个观测点的实测沉降资料与理论计算曲线进行拟合,拟合情况如图5所示。图中可以看出,从 60 d 到 146 d 的实测沉

降与近似理论曲线均较为吻合。经拟合得到的最终沉降量为 646.8 mm, 146 d 时已发生的沉降量为 573 mm。使用荷载几乎与预压荷载相同, 故尚未完成的主固结沉降量为 73.8 mm, 次固结沉降量按 65 mm 考虑, 则总的工后沉降量为 138.8 mm, 满足设计要求。

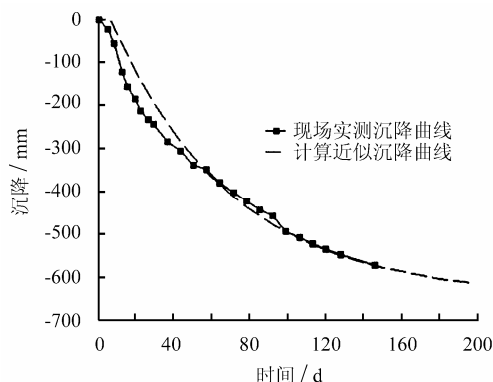


图5 后期实测沉降拟合曲线

Fig.5 Measured late settlement data-fitting curve

5 结 语

采用竖向排水井结合预压方法加固软土地基的沉降预测是工程界和理论界关心的焦点。本文基于竖井地基等应变固结理论, 提出了各种加载工况下的近似理论曲线, 通过实测沉降资料与理论曲线的拟合, 获得最终沉降量和平均固结度。通过对真空预压和堆载预压两种排水固结预压处理的工程实例进行分析, 表明该方法是合理的, 为工后沉降预测提供了切实可行的思路。对于竖向排水井未贯穿软土地基情况, 本文方法不适用, 应依据分层沉降资料将土体沉降划分为加固区沉降和下卧层沉降两部分进行研究。

参 考 文 献

- [1] 刘加才, 施建勇. 一种竖井地基竖墙化等效计算方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1 782—1 785.
LIU Jia-cai, SHI Jian-yong. An equivalent calculation method to converse vertical drains into vertical walls foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(11): 1 782—1 785.
- [2] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.
- [3] Sridharan A, Murthy N S, Prahash K. Rectangular hyperbolic method of consolidation analysis[J]. *Geotechnique*, 1987, 37(3): 335—368.
- [4] Tan S A. Ultimate settlement by hyperbolic plots for clays with vertical drains[J]. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119(5): 950—956.
- [5] Tan S A. Hyperbolic method for settlements in clays with vertical drains[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(1): 125—131.
- [6] 刘加才, 施建勇. 用最小二乘法确定竖井地基平均固结度[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(4): 28—31.
LIU Jia-cai, SHI Jian-yong. Adopting least squares method in evaluating average consolidation of soil foundation with vertical drains[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2004, 21(4): 28—31.
- [7] 刘吉福, 陈新华. 应用沉降速率法计算软土路堤剩余沉降[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 232—235.
LIU Ji-fu, CHEN Xin-hua. Application of rate of settlement to evaluate residual settlement on soft soil ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(2): 232—235.
- [8] 姜炎, 杨守华, 高长胜. 对真空预压加固中沉降稳定标准的讨论[J]. 中国港湾建设, 2004, (2): 23—31.
LOU Yan, YANG Shou-hua, GAO Chang-sheng. Discussion on convergence standard of settlement curve in vacuum preloading[J]. *China Harbour Engineering*, 2004, (2): 23—31.
- [9] 赵维炳. 广义 Voigt 模型模拟的饱和土体轴对称固结理论解[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1988, 16(5): 96—105.
ZHAO Wei-bing. Theoretical Solution to Symmetrical Consolidation of Saturated Clays with Generalized Voigt Model[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 1988, 16(5): 96—105.
- [10] 曾国熙, 谢康和. 井阻作用对砂井地基固结的影响[A]. 第一届全国地基处理学术讨论会[C]. 上海: [s. n.], 1986.
- [11] JGJ79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [12] 席少霖. 非线性最优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.