

预压法处理软土地基工后沉降预测分析

李景林¹, 杨 杰¹, 吴春勇^{1, 2}, 龙玉桥^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029;

2. 南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要: 根据现场实测沉降曲线计算总沉降和工后沉降的方法有多种, 但计算结果差异较大, 多年工程经验表明, 双曲线法计算的沉降量值普遍大于其他方法计算的沉降量值。本文结合一个工程实例, 分析了常规方法计算总沉降量时差异较大的原因, 并通过建立数值模型模拟分析软土地基的沉降发展过程。

关键词: 真空联合堆载预压; 工后沉降; 双曲线法; 弹塑性模型

中图分类号: TV641

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2017) 05-0024-05

Prediction of post construction settlement of soft soil foundation treated by preloading method

LI Jinglin¹, YANG Jie¹, WU Chunyong^{1, 2}, LONG Yuqiao^{1, 2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu;

2. Nanjing Ruidi construction science and Technology Co., Ltd, Nanjing 210029, Jiangsu)

Abstract: There are many kinds of method to calculate the total settlement and post construction settlement based on the field measured settlement curve. However the results are quite different. Years of engineering experience shows that the settlement value calculated by hyperbolic method is generally greater than other methods. In this paper, an engineering example is given to analyze the reasons for the large difference in the total settlement calculated by the conventional method. The settlement development of soft soil foundation is analyzed by numerical simulation.

Key words: vacuum combined surcharge preloading; post construction settlement; hyperbolic method; elastic-plastic model

0 引言

软土是一种特殊性岩土, 在工程上属于不良地质作用, 具有高孔隙比、高含水量、高压缩性、高灵敏度、低强度等特性, 不经处理不适于作为建构筑物地基^[1]。软土地基上建设建构筑物, 需解决两个问题: 稳定和沉降。对于大面积造地工程, 常用于消除地基沉降的处理方法是真空联合堆载预压工法, 其具有施工工期较短、处理效果好、投

资小等特点^[2]。

对于大面积造地工程, 软土地基处理的目的是为了使大部分沉降发生在施工期, 确保使用期工后沉降控制在合理范围内。如何判断地基处理后的工后沉降是否满足要求成为一个技术难题。目前, 工程上解决这一问题的常规手段是在设计阶段, 通过理论计算确定地基处理期间场地可能发生的沉降量和使用年限内的工后沉降量; 施工阶段对地基沉降进行实时观测, 获得沉降曲线; 施

收稿日期: 2017-01-19

作者简介: 李景林 (1973-), 男, 博士研究生, 主要从事软土地基处理、计算分析、监测等方面的研究。

作者简介: 杨杰 (1986-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程计算分析研究工作。

工阶段末期, 根据实测的沉降曲线采用一些数学方法计算总沉降量和工后沉降量, 以此来判断地基处理是否达到要求。本文主要对根据实测沉降曲线计算总沉降量的方法进行探讨。

1 常用工后沉降预测方法及分析

根据实测沉降曲线计算软土地基工后沉降的常用方法主要有三点法、双曲线法、Asaoka 法、星野法、泊松比法等^[3-7]。

1.1 常用方法简介

本文选取最常用的三点法、Asaoka 法和双曲线法进行介绍。

(1) 三点法

根据土力学中固结原理结合实测沉降曲线上任意三个等间隔的 (t, s) 点推导得出总沉降量计算公式 (1)。

$$S_{\infty} = \frac{S_3(S_2 - S_1) - S_2(S_3 - S_1)}{(S_2 - S_1) - (S_3 - S_2)}$$

(1)

$$S_r = S_{\infty} - S_t$$

(2)

式中:

- S_{∞} —根据实测沉降推算的最终沉降量;
- $S_1、S_2、S_3$ —满载后, 实测沉降曲线中对应于 $t_1、t_2、t_3$ 时刻的沉降量, 并满足 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$;
- S_t — t 时刻的沉降量;
- S_r —残余沉降量。

(2) Asaoka 法

根据一维固结理论考虑相关边界条件, 将沉降量写成差分形式:

$$S_j - 1 = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_j$$

(2)

推算总沉降量时, 取相同时间间隔 $(t_1 = t_2 = \cdots = t_j)$ 条件下的沉降量 $S_1、S_2 \cdots S_j$, 做出 $S_{j-1} \sim S_j$ 的拟合直线, 拟合直线与角平分线的交点对应的沉降值即为总沉降量。

(3) 双曲线法

《真空预压加固软土地基技术规程 (JTS147-2-2009)》推荐的工后沉降计算方法是双曲线法^[8], 假设现场实测沉降曲线符合双曲线规律, 可表示为:

$$\frac{t}{S_t - S_0} = \alpha + \beta t$$

(3)

式中:

- S_t — t 时刻沉降量;
- S_0 —达到满载时的沉降量;
- S_{∞} —最终沉降量;
- $\alpha、\beta$ —拟合参数。
- 绘制 $t/(S_t - S_0) \sim t$ 的关系曲线, 可确定 α 和 β , 从而计算出总沉降量和工后沉降量。

1.2 工程概况

某工程位于珠三角地区, 工程场地原为鱼塘、水田等, 回填并地基处理后作为厂区厂房、道路、绿化等用地。场地土层自上而下分布有填土层、淤泥层、淤泥质粘土层、粘土层、粗砂层等。地基处理的土层主要是淤泥层和淤泥质粘土层, 两层土总厚度基本在 20.0 ~ 27.0 m 之间。各土层物理力学指标见表 1。

根据场地使用情况, 制定的技术标准是: 在使用荷载作用下工后沉降小于 30 cm。设计时选用真空联合堆载预压法对该场地进行地基处理, 设计参数是: 排水板正三角形布置, 间距 1.1 m, 长

表 1 主要土层物理力学性质指标

岩土层名称	主要物理性质指标			直 剪				固 结 试 验	
				快 剪		固 结 快 剪			
	含水量 $w(\%)$	密 度 $\rho\text{ (g/cm}^3\text{)}$	孔隙比 e	内摩擦角 $\varphi_q\text{ (}^\circ\text{)}$	粘聚力 $c_q\text{ (kPa)}$	内摩擦角 $\varphi_{cq}\text{ (}^\circ\text{)}$	粘聚力 $c_{cq}\text{ (kPa)}$	压缩系数 $a_{1-2}\text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	压缩模量 $E_s\text{ (MPa)}$
人工填土	31.9	1.78	0.993	14.8	33.8			1.5	1.8
淤泥	61.5	1.61	1.666	5.0	2.9	16.0	12.8	0.94	2.6
淤泥质粘土	48.0	1.71	1.333	9.0	5.2	19.0	14.9	0.37	5.0
粘土	31.1	1.90	0.875	27.0	10.7			0.27	7.295
粗砂	9.0	1.98	0.465						

度以打穿软土层控制(23.0 ~ 28.0 m), 水平排水层为 60 cm 厚砂垫层, 密封系统采用 2 层土工布和 3 层密封膜, 按 800 m² 设置一台真空泵控制。恒载时间 4 个月, 填土总厚度约 5.0 m。见图 1。

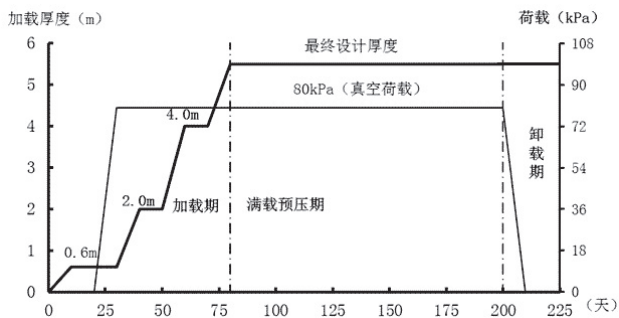


图 1 加载计划

1.3 原观数据

本工程地基处理面积约为 54 万 m², 共布置了 225 个沉降观测点, 限于篇幅限制, 本文选取 9 个沉降观测点数据进行分析。见图 2。

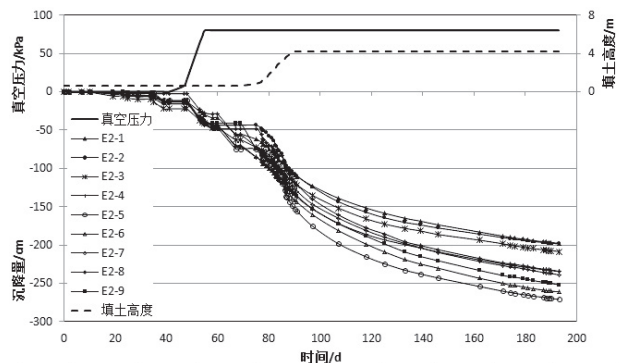


图 2 沉降-荷载-时间过程曲线

沉降观测的初始时间是铺完砂垫层打设排水板之前, 从图 2 中可看出, 打设排水板阶段场地有一定沉降量, 但量值较小, 在 10 ~ 20 cm 之间, 这应是插板期间软土被扰动且具有一定的欠固结性造成的; 真空荷载加载阶段场地有明显沉降, 沉降速率达到 30 ~ 40 mm/d, 从开始抽真空至膜下真空压力达到 80kPa, 7 d 时间里发生的沉降量约为 25 cm; 真空进入恒载, 上部进行填土阶段, 受填土加载和真空压力作用的共同影响, 该阶段沉降速率保持在 30 mm/d 左右, 总沉降量发展较快; 进入恒载阶段后, 总沉降量继续发展, 但沉降速率不断减小, 接近预压时间时, 沉降速率减小到 3 ~ 5 mm/d, 总沉降量达到 2.0 ~ 2.7 m 之间。

1.4 工后沉降计算

为了确定工程场地恒载预压时间达到设计要

求后工后沉降是否能够满足技术标准, 采用三点法、Asaoka 法和双曲线法依据实测沉降曲线进行总沉降量计算。计算结果见表 2。

表 2 沉降计算值

监测点		三点法	Asaoka 法	双曲线法
E2-1	S_{∞} /cm	219.0	222.7	250.5
	S_r /cm	21.3	25.0	52.8
E2-2	S_{∞} /cm	210.9	215.5	232.4
	S_r /cm	12.4	17.0	33.9
E2-3	S_{∞} /cm	225.2	228.2	246.4
	S_r /cm	16.7	19.7	37.9
E2-4	S_{∞} /cm	254.3	255.6	279.5
	S_r /cm	20.0	21.3	45.2
E2-5	S_{∞} /cm	288.7	290.4	318.3
	S_r /cm	17.8	19.5	47.4
E2-6	S_{∞} /cm	285.3	290.4	335.7
	S_r /cm	24.4	29.5	74.8
E2-7	S_{∞} /cm	263.2	264.7	292.5
	S_r /cm	24.4	25.9	53.7
E2-8	S_{∞} /cm	253.5	255.7	280.2
	S_r /cm	19.1	21.3	45.8
E2-9	S_{∞} /cm	276.5	281.1	319.1
	S_r /cm	24.7	29.3	67.3
平均值	S_{∞} /cm	253.0	256.1	283.9
	S_r /cm	20.1	23.2	51.0

注: S_{∞} —总沉降量, S_r —残余沉降量。

从表 2 的计算结果可看出, 采用三点法、Asaoka 法和双曲线法依据实测数据计算的总沉降量和残余沉降量偏差较大。其中三点法计算的总沉降量平均值为 253.0 cm, 残余沉降量为 20.1 cm; Asaoka 法计算的总沉降量平均值为 256.1 cm, 残余沉降量为 23.2 m; 双曲线法计算的总沉降量平均值为 283.9 cm, 残余沉降量为 51.0 cm。三点法和 Asaoka 法计算的沉降量值较接近, 而双曲线法计算的沉降量值较大。若根据三点法和 Asaoka 法计算结果, 场地已达到卸载标准, 若根据双曲线法计算结果, 场地至少需延长抽真空时间 2 个月, 这将严重影响

工期, 且会增大投资。因此, 针对真空联合堆载预压这种地基处理工法, 上述哪种方法计算的总沉降量更合理值得探讨。

2 数值模拟

岩土材料是一种粘弹塑性复合体^[9], 土力学发展过程中, 各种本构模型层出不穷, 但真正经受过工程实践检验的却寥寥无几。“南水模型”是一种双屈服面弹塑性本构模型, 多年来被广泛应用于软土地基的变形分析, 多个工程反映其分析结果与现场情况吻合度较高。本文基于“南水模型”的本构关系, 开发了模拟真空联合堆载预压处理软土地基的计算模型, 以现场实测数据为基础, 反馈分析软土地基的总沉降量。

2.1 本构模型

南水双屈服面弹塑性模型屈服面^[10]为:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= p^2 + r^2 q^2 \\ F_2 &= q^s / p \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:

p —球应力;

q —偏应力;

r, s —屈服面参数, 这里 r 和 s 可令其等于 2 或 3。

2.2 边界条件及模拟方法

土体内部发生固结变形过程是边界条件改变的结果。加荷压缩与真空排水预压虽在边界条件上有所不同, 但控制方程式及求解方法是完全一致的。对于加荷压缩, 边界荷载或边界位移发生变化, 水流边界条件不变; 真空排水问题中, 则只有水流边界条件发生变化, 随着真空作用点的水头下降, 形成由内向外的水力坡降。对于两者同时变化的问题可以同样求解。

地基的排水固结变形问题严格地讲是一个空

间问题。实际应用中, 将排水体参照砂井排水原理进行处理, 其等效砂井直径为:

$$d_w = 2\alpha(b + \delta) / \pi \quad (5)$$

式中:

b, δ —分别为排水体的宽度和厚度;

α —折减系数, 应通过实验确定, 一般取 0.75 ~ 1.0。计算时, 取 $d_w = 7$ cm, 即按直径 7 cm 的砂井进行计算。

具体计算时, 采用等价砂墙法, 将空间问题变为平面应变问题进行简化计算。

2.3 加载过程及计算参数

反馈分析时, 按照各断面实际填筑进度和膜下真空度情况模拟加载过程, 见图 2。模拟的最终时间为地基处理完工后 20 年。

计算中, 由于同一断面土层的渗透系数离散性较大。因此, 先选取渗透系数平均值进行试算, 再对渗透系数进行适当调整, 用计算的沉降曲线来拟合填筑期的实测沉降量曲线, 直到计算曲线与实测曲线较为接近为止。考虑施工中淤堵现象, 塑料排水板的渗透系数取 3.5×10^{-4} cm/s。对于真空荷载的模拟, 则根据现场真空泵的运行情况确定真空压力。

计算中涉及的参数见表 1 和表 3。

2.4 模拟结果及分析

限于篇幅, 本文选取 E2-2、E2-5 和 E2-8 三个监测断面进行模拟, 模拟结果见图 3, 各节点计算结果见表 4。

表 4 实测值与计算值对比表

监测断面	实测沉降 /cm	计算结果 /cm			
		预压期	5 年	20 年	工后沉降
E2-2	198.5	200.8	212.7	217.9	17.1
E2-5	270.9	271.7	289.2	296.3	24.6
E2-8	234.4	236.5	250.2	256.3	19.8

表 3 计算参数

土层	K	K_{ur}	n	c	φ	R_f	G	D	F
人工填土	150	250	0.30	20	30.0	0.80	0.30	2.50	0.10
淤泥	32	64	0.25	4	27.0	0.54	0.19	2.09	0.02
淤泥质土	50	100	0.30	15	27.8	0.67	0.19	2.44	0.02
粘土	80	160	0.31	16	28.0	0.78	0.22	2.50	0.05
粗砂	240	450	0.33	3	42.0	0.80	0.30	2.50	0.10

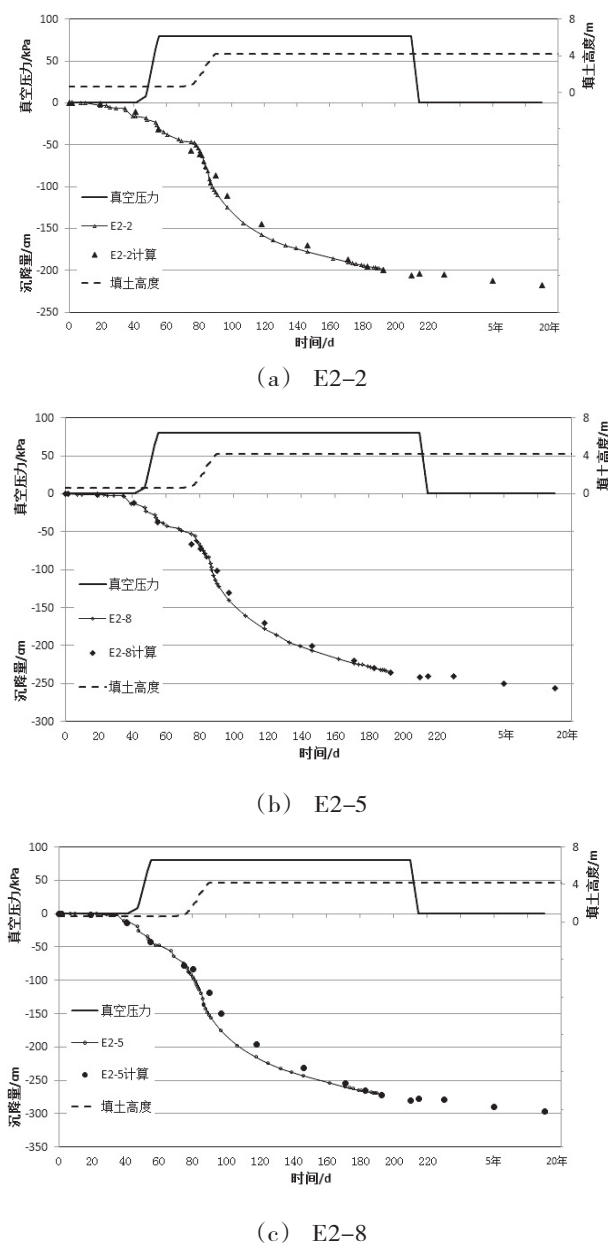


图3 实测沉降曲线与计算沉降曲线对比图

从图3中可看出,按照现场实际施工过程,采用“南水模型”模拟的沉降曲线与实测沉降曲线后半段吻合度较高,但在加载前期模拟结果与实测结果有一定出入,这应该是模拟加载过程无法完全考虑实际施工过程中各方面因素造成的。从模拟结果来看,真空卸载前后,地基土有一个较大的回弹,其中E2-2断面回弹量为17 mm, E2-5断面回弹量为23 mm, E2-8断面回弹量为20 mm,这与“南水模型”仅能考虑岩土材料的弹塑性特性,未能考虑粘滞特性有关。

本文关注的重点主要是采用真空联合堆载预压法处理软土地基后的工后沉降。因此,在模拟

E2-2、E2-5和E2-8三个断面的沉降过程曲线时,反馈分析的重心主要是预压荷载达到满载后至真空卸载这一段,通过调整计算参数,保证这一段计算结果与实测数据有较高吻合度,然后预测地基的工后沉降。从表4中可看出,预压期快结束时,三个断面计算结果与实测沉降量存在偏差很小,计算结果均比实测值略大。因此,计算的20年后沉降量和工后沉降量具有一定的可信度。

3 结论

(1) 根据实测沉降曲线计算总沉降量的常用方法无法考虑不同阶段地基上部荷载的变化,计算的工后沉降可靠度较差。

(2) 采用数值模型对软土地基整个施工及使用过程进行模拟,依据现场实测沉降曲线进行反馈分析,得到的总沉降量和工后沉降较为合理,但该方法对人员的技术水平要求较高。

参考文献:

- [1] 赵维炳.排水固结加固软土技术指南[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 吴春勇.真空预压加固深度分析与探讨[J].东北水利水电,2010,12:1-3.
- [3] 薛祥,宋连亮,贾亮,等.高速公路软土路基工后沉降预测的新方法[J].岩土工程学报,2011,33(增1):125-130.
- [4] 陈善雄,王星运,许锡昌,等.路基沉降预测的三点修正指数曲线法[J].岩土力学,2011,32(11):3355-3360.
- [5] 刘宏,李攀峰,张倬元.九寨黄龙机场高填方地基工后沉降预测[J].岩土工程学报,2005,27(1):90-93.
- [6] 朱才辉,李宁.基于修正FDA方法的黄土高填方地基工后沉降分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增1):3408-3417.
- [7] ASAKA A. Observational procedure of settlement prediction[J]. Soils and Foundations, 1978, 18(4): 87-101.
- [8] JTS147-2-2009.真空预压加固软土地基技术规程[S].北京:人民交通出版社,2009.
- [9] 扈胜霞,陈育民,闫竹玲.弹黏塑性模型及其在预压处理软基沉降计算中的应用[J].岩土力学,2014,35(4):1173-1180.
- [10] 杨杰,李国英,沈婷.复杂地形条件下高面板堆石坝应力变形特性研究[J].岩土工程学报,2014,36(4):775-781.

(责任编辑:王宏伟)