

DOI: 10.11779/CJGE2021S2039

大面积堆载预压处理深厚软基工后沉降预测研究

李 波¹, 程文亮², 项存平³, 陈军锋³, 余建飞⁴

(1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 珠海市交通勘察设计院有限公司合肥分公司, 安徽 合肥 230000;
3. 舟山绿色石化基地管委会, 浙江 舟山 316000; 4. 浙江石油化工有限公司, 浙江 舟山 316000)

摘要: 沉降预测问题一直是软土工程中的难点, 而基于实测数据的沉降预测法最为直观有效, 但传统的沉降预测方法具有可靠度和预测精度均较低等局限。提出一种新的基于现场实测数据的工后沉降预测模型, 利用最小二乘法对模型参数进行求解。结合某石化基地软基处理的现场沉降监测数据, 分析地表沉降规律和沉降速率, 结果表明新的沉降预测模型预测的沉降曲线与实测曲线非常接近, 验证了其合理性。分析表明: 较传统的预测方法更为精确, 尤其是中后期的预测结果; 将整个软土处理沉降期进行分级叠加预测, 相对应每一级模型参数也不同, 更符合实际软土沉降规律; 对比不同地层厚度的长期沉降预测结果, 软土工后沉降量与软土厚度密切相关, 软土厚度越大沉降越大。

关键词: 堆载预压; 排水固结; 沉降预测; 深厚软基

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0162-04

作者简介: 李 波(1982—), 男, 山东泰安人, 博士, 主要从事岩土工程和离心模型试验技术方面的研究。E-mail: libo_auliso@126.com。

Prediction of post-construction settlement of soft foundation after large-area surcharge preloading treatment

LI Bo¹, CHENG Wen-liang², XIANG Cun-ping³, CHEN Jun-feng³, YU Jian-fei⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Zhuhai Traffic Survey and Design Institute Co., Ltd. Hefei Branch, Hefei 230000, China; 3. Zhoushan Green Petrochemical Base Management Committee, Zhoushan 316000, China; 4. Zhejiang Petrochemical Co., Ltd, Zhoushan 316000, China)

Abstract: The problem of prediction of soft soil settlement has always been a difficult problem in engineering, but the settlement prediction method based on the measured data is intuitive and effective. The traditional settlement prediction method has the limitation of low reliability and low accuracy, so a new settlement prediction model is proposed. The characteristics of the new settlement prediction model are analyzed, and the model parameters are solved by using the least square method. Based on the site settlement monitoring data of soft foundation treatment in Zhoushan Green Petrochemical Base, the surface subsidence law and settlement rate of monitoring points are analyzed, and the new settlement prediction model is verified theoretically. Finally, the following three conclusions are drawn. Using this model to predict the settlement of soft soil for a long time is more accurate than using some traditional prediction methods. The prediction of the middle and late periods of this method is relatively accurate, and the predicted results of the middle and late periods of actual engineering are more meaningful. The relative error of this method is smaller than that of the three-point method and the hyperbolic method. It is proposed that the whole settlement period of soft soil treatment should be graded and superimposed, and the corresponding parameters of each model are different, which is more in line with the law of actual soft soil settlement. The larger the thickness of soft soil, the greater the settlement.

Key words: surcharge preloading; drainage consolidation; settlement prediction; deep soft foundation

0 引言

排水固结法是目前软土地基处理的重要方法之一^[1], 主要是利用排水系统将土体孔隙水排出, 孔隙体积减小, 地基发生固结变形, 随着时间的推移超静孔隙水压力逐渐消散, 从而提高土体中的有效应力^[2]。

排水固结法通常联合预压法, 常见的有塑料排水板堆载预压法、袋装砂井堆载预压法和塑料排水板真空预

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2017012/YT); 国家自然科学基金项目(51308067)
收稿日期: 2021-08-01

压等方法。但是地基处理后的工后沉降预测是目前工程的难点。

工程中关于软土地基沉降量计算可分为基于沉降计算的理论公式法、基于固结理论与土体本构模型的数值分析法和基于实测数据的沉降预测法 3 大类。由于软土沉降与时间存在显著的关系, 利用现场沉降观测值进行软土沉降预测已成为非常有效的方法。主要预测方法有双曲线法、三点法、Asaoka 法、泊松法、灰色模型法等。潘林有等^[3]提出了利用曲线拟合法预测软土地基沉降, 但点值的选取对沉降预测计算结果影响很大; 黄广军^[4]也提出了 Asaoka 预测沉降存在的问题; 泊松模型要求实测数据必须是等时空距数据, 且数据越多预测精度越高。雷学文等^[5]利用灰色模型预测沉降, 但是该法要求原始数据需是光滑离散数列。钟国强等^[6]基于 SFLA-GRNN 模型对地表沉降预测, 解决了平滑因子难以确定的问题。汪建斌等^[7]提出利用荷载高度去预测软基沉降, 认为荷载可以表征为荷载高度的线性函数。张仪萍等^[8]认为每一级荷载增量下所引起的沉降量是可以叠加的。

依托舟山某基地建设二期工程, 在现场埋设传感器观测地表沉降随堆载预压时间的变化规律。基于沉降观测曲线, 本文提出了一种软土沉降预测模型, 与现有的双曲法线、指数曲线法等相比, 与实测值更为接近, 验证了该计算方法的合理性。

1 工程概况

舟山某基地项目采用围海造陆方式规划形成陆域面积约 41 km²。由于该区域软土地层深厚, 最大厚度超过 50 m, 因此首先采用塑料排水板联合堆载预压进行地基处理。地层的主要物理力学参数如表 1 所示。

表 1 地层的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of main soil strata

土层 名称	含水率 /%	重度 (kN·m ⁻³)	压缩模 量/MPa	黏聚 力/kPa	内摩擦角 /(°)
素填土	27.7	20	50	2	36
冲填土	—	19	20	2	28
粉质黏土	46.4	19.6	9.5	23.5	18.5
含砾粉质黏土	24.0	20	31.1	28.1	19.6
凝灰岩	—	20	20000	—	—

本工程采用塑料排水板联合堆载预压的地基处理方法。塑料排水板处理深度为 17~30 m, 布置间距为 1.2 m, 如图 1 所示。上部进行堆载预压, 最大堆载高程为 8~10 m, 堆载预压时间为半年。通过现场埋设沉降板, 监测堆载预压作用下典型地层条件下地表沉降的变化规律。共埋设沉降板 10 个, 间距 100 m; 沉降板采用 50 cm×50 cm×0.8 cm 钢板。

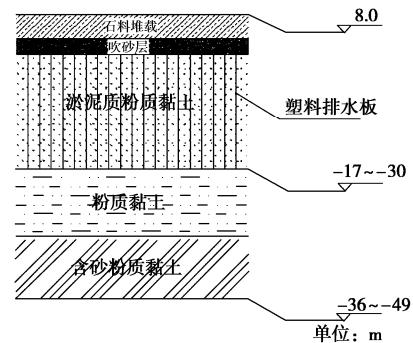


图 1 塑料排水板预压图

Fig. 1 Preloading of plastic drain plate

2 监测结果与分析

选取典型现场沉降监测点进行分析, 绘制地表沉降和沉降速率随时间的变化曲线如图 2, 3 所示。分析表明, 监测所得最小沉降为 465 mm (A3-5), 最大沉降为 1743 mm (A3-8)。图 3 分析表明, 沉降速率变化较大主要集中在堆载前期, 地表沉降速率迅速增大, 随着堆载时间的延长, 沉降速率趋于平缓, 故最终沉降趋于收敛。最终沉降速率绝大部分小于 1 mm/d, 表明塑料排水板法处理地基效果良好。

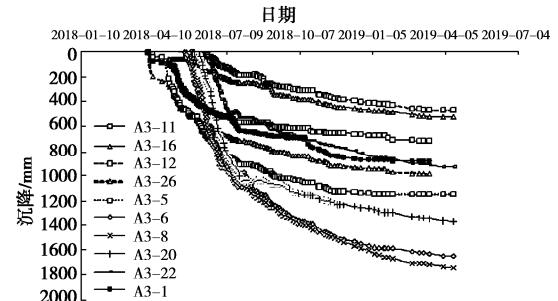


图 2 地表沉降随时间关系曲线

Fig. 2 Relationship between surface subsidence and time

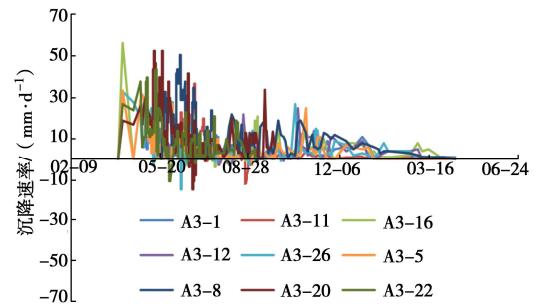


图 3 沉降速率与时间关系

Fig. 3 Relationship between settlement rate and time

3 软土沉降量的预测

根据本工程的特点和前人研究成果^[9], 提出了软土沉降预测的模型,

$$S_t = \sum_{i=1}^n \frac{c_i \Delta h_i}{\left(1 + \frac{1}{a_i t_i}\right)^{m_i}} \quad , \quad (1)$$

式中, c_i , a_i , m_i 为无量纲参数, Δh_i 指第 i 级荷载高度的增量, t_i 指的是 t 时刻与第 i 级荷载时间的间隔。

3.1 预测模型的原理

其中 c , a , m 参数利用非线性最小二乘法确定。

利用 Gauss-Newton 法对非线性函数 $f(c, t)$, (t_i, S_i) 其中 $(i=1, 2, 3, \dots, n)$ 进行拟合。 $f(c, t)$ 中, 设 $c = (c_0, c_1, c_2)$ 。则本模型变换为

$$f(c, t) = \sum_{i=1}^n \frac{c_0 p_i}{\left(1 + \frac{1}{c_1 t}\right)^{c_2}} \quad . \quad (2)$$

首先拟合系数赋予初始值 $c_j(0)$ ($j=0, 1, 2, \dots, n$) 有:

$$c_j = c_j(0) + \delta c_j \quad . \quad (3)$$

若求出 δc_j , 则就可以确定 c_j 。将函数 $f(c, t)$ 转化为关于 δc_j 的线性函数, 定义拟合残差平方和:

$$Q = \sum_{i=1}^n [f(t, c) - y_i]^2 \quad . \quad (4)$$

并在 $c_j(0)$ 附近对函数进行泰勒级数展开, 由最小二乘法原理可知:

$$\frac{\partial Q}{\partial \delta c_j} = 0 \quad . \quad (5)$$

再根据矩阵方程式求得 δc_j 。若所求得 $|\delta c_j|$ 值较大, 则将 c_j 作为 $c_j(0)$ 新值重复计算, 通过迭代使 $|\delta c_j|$ 足够小, 进而其他参数就可全部求出。

根据 Gauss-Newton 非线性最小二乘法可求多级荷载下所对应的参数。步骤简述如下:

(1) 首先根据实测数据利用非线性最小二乘法求得第一级堆载高度下参数, c_1 , a_1 , m_1 。

(2) 在第二级堆载高度下, 已知 c_1 , a_1 , m_1 , 进而可以反演求出 c_2 , a_2 , m_2 , 可得

$$S_t = \frac{c_2 \Delta h}{\left(1 + \frac{1}{a_2 t}\right)^{m_2}} - \frac{c_1 \Delta h}{\left(1 + \frac{1}{a_1 t}\right)^{m_1}} \quad . \quad (6)$$

同理在第 n 级堆载高度下, c_i , a_i , m_i ($i=1, 2, 3, \dots, n-1$) 已知, 进而可以反演求出 c_n , a_n , m_n , 可得

$$S_t = \frac{c_n \Delta h}{\left(1 + \frac{1}{a_n t}\right)^{m_n}} - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{c_i \Delta h}{\left(1 + \frac{1}{a_i t}\right)^{m_i}} \quad . \quad (7)$$

所以, 可求出第 n 级堆载高度下任意时刻的沉降值。本模型预测沉降计算简图见图 4。

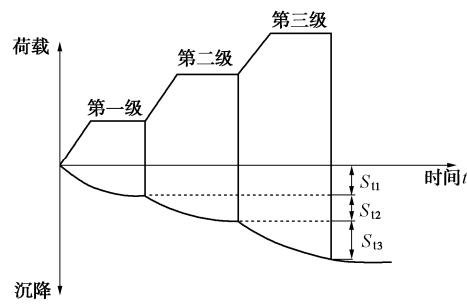


图 4 本文法预测关系简图

Fig. 4 Schematic diagram of predicted relation

3.2 与实测结果对比

基于工程实测数据对该模型预测值进行验证。选取块地具有代表性的 A3-1, A3-5, A3-6 三个观测点, 软土层厚度分别为 10, 20, 30 m。选取 2018 年 5 月 10 日—11 月 10 日的观测值进行预测, 然后与 2018 年 11 月 30 日—2019 年 4 月 14 日的观测值进行对比验证, 并将本文方法与现有的双曲线法、三点法进行了对比。依据沉降监测数据反演推算出模型参数 c, m, a , 如表 2 所示。计算所得新模型拟合曲线与实测数据对比如图 5。将 A3-1 预测值与传统的沉降预测方法进行对比如表 3 所示。

表 2 A3-1 预测模型参数

Table 2 Parameters of prediction model

A3-1	c	a	m
第一级	0.17623	0.36635	1.29968
第二级	0.08836	0.37822	1.35654
第三级	0.07781	0.58262	1.44129

表 3 A3-1 本文方法与其他预测方法对比

Table 3 Comparison between proposed method and other prediction methods

实测值	本文方法		三点法		双曲线法	
	计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%
836.9	820.6	-1.61	695.5	9.0	691.7	9.6
842.9	826.6	-1.60	695.9	10.3	694.1	10.5
848.9	829.2	-1.20	696.0	11.9	695.0	12.0
859.9	831.6	-0.20	696.2	12.5	695.1	12.7
866.9	833.0	0.45	696.3	13.7	695.7	13.8
867.9	834.0	0.45	696.5	14.6	700.0	14.2

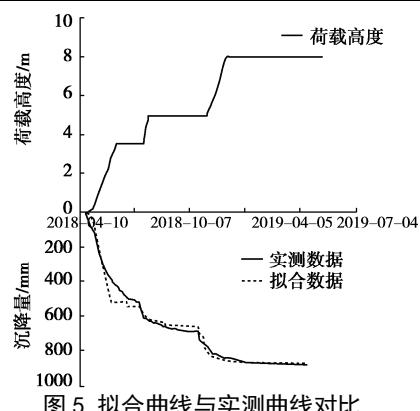


图 5 拟合曲线与实测曲线对比

Fig. 5 Comparison between fitted and measured curves

3.3 本文方法长期沉降预测

利用本文方法分别对不同软层厚度的沉降点 A3-1、A3-5、A3-7 长期沉降值分别进行预测, 其结果如图 6 所示。A3-1-10, A3-6-30, A3-5-22 最终沉降分别为 982, 2105, 1346 mm。从以 2019 年 4 月份的观测值为例, 其累计地表沉降值分别为 877.9, 1716, 1148 mm, 所对应的工后沉降分别为 104, 389, 198 mm。

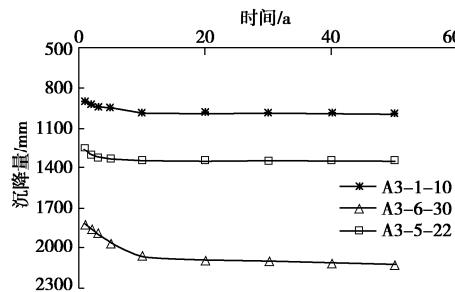


图 6 不同软土厚度长期沉降预测

Fig. 6 Prediction of long-term settlement of soft soil with different thicknesses

4 结 论

(1) 利用本模型对软土长期预测的沉降结果相对于一些传统的预测方法较为精确, 本文方法中后期预测相对精确, 而实际工程的中后期预测结果更有意义。

(2) 本文方法的提出, 是将整个软土处理沉降期进行分级叠加预测, 相对应每一级模型参数也不同, 更符合实际软土沉降规律。然而, 很多传统的沉降预测模型, 如: 双曲线模型、指数模型、平方根模型、对数模型、幂函数模型等, 只是单纯的将整个软土沉降期的沉降规律近似看成某个具体函数形式, 而模型的选择也与自身经验和对实际工程了解程度有关, 故预测有时会与实际存在较大的出入。

参考文献:

- [1] 王安明, 李小根, 李彭明, 等. 软土动力排水固结的室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1643 – 1648. (WANG An-ming, LI Xiao-gen, LI Zhang-ming, et al. Indoor model test of dynamic drainage consolidation method of soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1643 – 1648. (in Chinese))
- [2] 刘吉福. 排水固结法砂垫层厚度需求[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 366 – 371. (LIU Ji-fu. Requirements of thickness of sand mats for consolidation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 366 – 371.

(in Chinese))

- [3] 潘林有, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1053 – 1058. (PAN Lin-you, XIE Xin-yu. Observational settlement prediction by curve fitting methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1053 – 1058. (in Chinese))
- [4] 黄广军. Asaoka 法预测软土地基沉降时存在的问题和对策[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1061 – 1065, 1074. (HUANG Guang-jun. Problems and their solutions in predicting soft ground settlement based on Asaoka's method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1061 – 1065, 1074. (in Chinese))
- [5] 雷学文, 白世伟, 孟庆山. 灰色预测在软土地基沉降分析中的应用[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 145 – 147. (LEI Xue-wen, BAI Shi-wei, MENG Qing-shan. The application of grey forecasting to analysing soft foundation settlements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(2): 145 – 147. (in Chinese))
- [6] 钟国强, 王 浩, 李 莉, 等. 基于 SFLA-GRNN 模型的基坑地表最大沉降预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 792 – 798, 808. (ZHONG Guo-qiang, WANG Hao, LI Li, et al. Prediction of maximum settlement of foundation pit based on SFLA-GRNN model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 792 – 798, 808. (in Chinese))
- [7] 汪建斌, 陈忠平. 一种考虑荷载高度的沉降预测新方法[J]. 中外公路, 2003, 23(5): 72 – 74. (WANG Jian-fu, CHEN Zhong-ping. A new method for settlement prediction considering load height[J]. Chinese and Foreign Highway, 2003, 23(5): 72 – 74. (in Chinese))
- [8] 张仪萍, 曹国强, 李 涛, 等. 分级加载条件下沉降预测方法[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 30 – 33. (ZHANG Yi-ping, CAO Guo-qiang, LI Tao, et al. Prediction method of settlement under multi-stage loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 30 – 33. (in Chinese))
- [9] 冯怀平, 耿会岭, 韩博文, 等. 非饱和土地区高速铁路路基沉降预测模型[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1089 – 1095. (FENG Huai-ping, GENG Hui-ling, HAN Bo-wen, et al. Prediction model for settlement of high-speed railway embankment in unsaturated areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1089 – 1095. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)