

文章编号: 1674—8247(2019)06—0082—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.017

铁路堆场软土地基排水固结法现场试验研究

高令发

(中国铁路南昌局集团有限公司, 南昌 361007)

摘 要:为研究排水固结法在软土地基中的实用性和有效性,文章以江阴港铁路堆场的软土地基处理工程为背景,首先采用塑料排水板堆载预压排水固结法对现场软土地基进行了试验,并对分级加载情况下的工后沉降进行了监测,然后利用 FLAC3D 有限元软件进行数值验证。结果表明:(1)现场试验和数值模拟结果表明二者变化规律基本一致;(2)随着土层深度的增加,土层固结沉降量逐渐减小;(3)在堆载过程中,浅层土体发生了较大的固结沉降,而在深层淤泥中由于排水不畅,较难发生固结。该研究成果可为相似地基处理工程提供参考。

关键词:铁路;堆场;软土;地基;排水固结;试验;沉降

中图分类号:U216.41⁺4 文献标志码:A

Field Test Study on Drainage Consolidation Method for Soft Soil Foundation in Railway Storage Yard

GAO Lingfa

(China Railway Nanchang Group Co., Ltd., Nanchang 361007, China)

Abstract: To study the practicability and effectiveness of drainage consolidation method in soft soil foundation, taking the soft soil foundation treatment project of Jiangyin Port Railway Storage Yard as the background, the soft soil foundation was tested by preloading drainage consolidation method with plastic drainage plate, the post-construction settlement under the condition of graded loading was monitored, and was verified by FLAC3D finite element software. The results show that: (1) the change laws of the field test and numerical simulation are basically the same; (2) with the increase of soil depth, the consolidation settlement of soil layer decreases gradually; (3) during the preloading, the shallow soil has a large consolidation settlement, but in the deep silt, due to poor drainage, it is difficult to consolidate. The research results can provide reference for similar foundation treatment projects.

Key words: railway; storage yard; soft soil; foundation; drainage consolidation; test; settlement

随着沿海地区经济的快速发展,大型港口日益增多。沿海港口场地多以淤泥及淤泥质软土为主,软土地基具有承载力差、可压缩性强、含水量高以及土层厚度不均等特点^[1]。铁路堆场具有荷载集中、流通量大的特点,相对于普通的货物堆场,对沿海港口的铁路堆

场地基沉降控制更为严格。

目前,针对软土地基的处理方法已较成熟。塑料排水板堆载预压法因其施工简单、造价低廉、加固效果较好,在沿海地基处理中应用广泛^[2-4]。砂桩超载预压法多用于处理松散砂土和塑性指数不高的非饱和粘

收稿日期:2019-08-12

作者简介:高令发(1971-),男,高级工程师。

引文格式:高令发. 铁路堆场软土地基排水固结法现场试验研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(6):82-86.

GAO Lingfa. Field Test Study on Drainage Consolidation Method for Soft Soil Foundation in Railway Storage Yard [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 82-86.

性土地基。真空堆载预压法适用于含水量较高且软土层较厚、预压周期较短的地基^[5]。除此之外,还有浆喷桩、粉喷桩等方法处理软土地基^[6]。目前,在软土地基沉降的实践分析中,地基沉降的计算方法大致分为三类^[7]:一类是经验系数校正法,通过土力学中的经典理论公式进行沉降计算,是目前工程应用最为广泛的一种方法,主要有指数曲线法、对数曲线法、双曲线法等;另一类是利用现场实测数据进行的经验预测方法,如日本学者提出的 Asaoka 法;第三类是根据现场地质条件,利用各种本构关系和计算理论,通过计算软件来分析土体沉降。

铁路工程常规预测软土地基总沉降量一般按瞬时沉降 S_d 与主固结沉降 S_c 之和计算,对泥炭土、富含有机质黏土或高塑性黏土地层,可根据情况考虑次固结沉降 S_s 。主固结沉降 S_c 一般采用分层总和法或地基压缩模量计算。分层总和法一般采用 $e-p$ 曲线或 $e-\lg p$ 曲线计算。

不同的排水固结方法对不同地质条件的处理效果也不甚相同,选择合适的排水固结方法对工程施工安全有着重要意义。

基于此,本文针对福建江阴港铁路支线的货物堆场的软土地基,采用塑料排水板超载预压排水固结方法进行地基处理,并采用 FLAC3D 软件进行数值模拟,对比分析不同深度下现场实测数据和数值模拟数据,通过规律总结,为国内类似条件下的软土地基处理提供借鉴与参考。

1 塑料排水板堆载预压法加固机理

塑料排水板堆载预压法加固软土地基的原理是排水固结法,首先在软土地基上铺设一层砂垫层,然后在软土地基中埋设塑料排水板,将其作为软土地基的竖向排水结构,与砂垫层间的横向排水结构组成完整的排水系统,最后在软土地基上部进行大面积堆载,施加应力,对软土地基施加预压。一方面,土体上部堆载产生附加应力导致土体内孔压增大,因为排水系统的存在,土体中的水沿着竖向排水板加速排出,有效减小孔隙水压力,软土地基固结沉降,达到提高地基承载力的作用。另一方面,软土地基的完全固结时间与排水距离的平方成正比,而通过铺设排水板,减小排水距离、增加排水速率,有效地改善了土体内部的排水条件,加速土体的完全固结,保证了土体上部的施工安全^[8]。

2 工程概况

福州江阴港铁路支线位于福建省福清市境内。该支线从福厦线渔溪站接轨,跨越西港至江阴岛,沿西港

海岸前行,在其后方布置大型铁路货场,货场共占地 3 465 亩,全部处于海域滩涂。根据地质勘察报告,码头区自上而下地层主要为第四系全新海积层,其土层特征分别是:①填筑土,黄褐色,主要成分为细砂,松散,饱和,靠海堤地段上部填筑片石。②淤泥,深灰色,饱和,流塑,含少量中细砂,层厚度一般在 15~20 m 之间。③粉质黏土,浅灰色,灰黄色,硬塑,局部含角砾较多,厚度一般在 3~6 m。④全风化凝灰石,浅灰色,土状风化,可塑-硬塑。

3 现场试验

3.1 试验方案

根据工程施工的总体要求,首先对现场软土地基进行试验。因铁路堆场均在路基段,即要求试验区域在无潮汐干扰的情况下展开,因此修建围堰对潮水进行隔离,试验场地的设计标高为 4.2 m。

现场试验采用塑料排水板+大面积砂石进行堆载,塑料排水板间距为 1.2 m,呈正方形排列。砂石层分 3 级进行堆载,第 1 级为 2.8 m 厚的海砂层,第 2、3 级为 2.3 m 厚的压实中粗砂垫层,各级堆载均为自然放坡,堆放完成后静置数天。处理方案的横剖面图如图 1 所示。

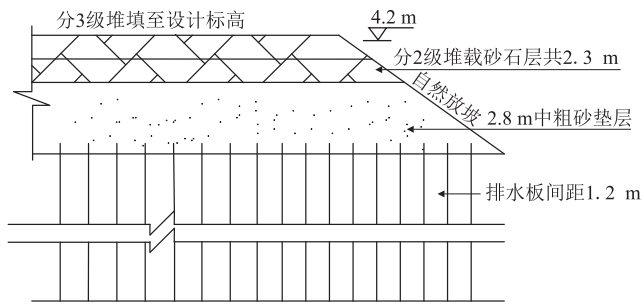


图1 现场试验横剖面示意图

为真实反映施工过程中土体排水固结情况,根据施工进度,及时地在各试验段的适当位置埋设了分层沉降观测孔和分层孔隙水压观测孔。各观测孔的具体信息如表 1 所示。

表1 监测孔埋设情况一览表

项目	孔号	深度/m	日期	备注
分层沉降	CJA	21.1	11月05日	13个沉降磁环
	CJB	21.4	12月13日	13个沉降磁环
	CJC	21.7	12月17日	13个沉降磁环
孔隙水压	KYA	18.6	11月09日	6个孔压计
	KYB	19.9	12月12日	6个孔压计
	KYC	21.7	12月20日	6个孔压计

分层沉降管和孔隙水压力计的埋设均按相关规程进行。其中在孔隙水压力计的埋设过程中,严格执行

了对孔压计前端透水石的抽气饱水工作。

3.2 试验结果与分析

现场监测工作共历时 240 d,监测频率按施工进度堆载阶段进行变化:在第 1 次堆载后到第 2 次堆载的施工期间每天对分层沉降、孔隙水压和进行 1 次观测;在第 3 次堆载期间每 3 d 观测 1 次;堆载到设计标高后每 5 d 观测 1 次。试验段不同深度随时间推移的沉降量如图 2、图 3 所示。随着土层深度的增加,其沉降量逐渐减小,深度 1 m 的累计沉降量为 72 cm,深度 18 m 的累积沉降量为 0.5 cm,由图 2 可知,大部分的沉降量发生在深度为 3~11 m 的浅层至中层深度的淤泥中,在 3 次堆载过程中,浅层、中层淤泥发生大固结沉降,深层淤泥较难发生排水固结。

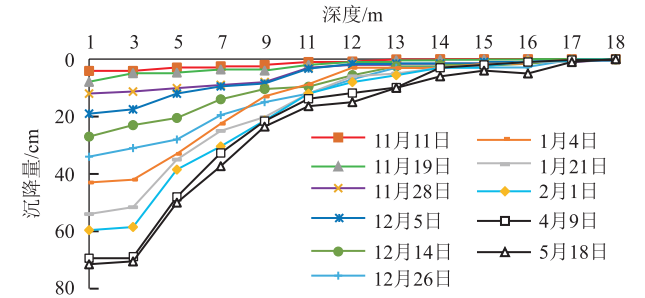


图2 分层沉降量随深度的变化情况图

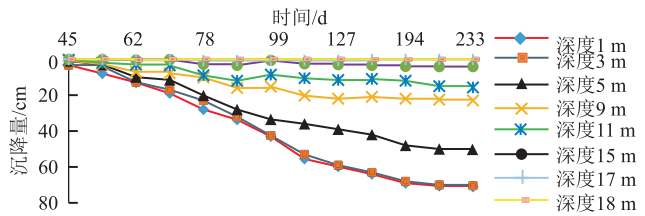


图3 分层沉降量随时间的变化情况图

试验段的孔隙水压的变化如图 4、图 5 所示。从中可以明显地看出孔隙水压力随着荷载、时间的变化而出现规律性变化。在堆载期间,所有深度的孔隙水压力均有不同程度的增加,而停止加载后,孔隙水压逐渐变得平稳。加载速率越快,则孔隙水压的变化越大。在塑料排水板的作用下,土层的排水速度加快,保证了土体的稳定。

4 数值模拟研究

4.1 基本数值模型

采用 FLAC3D 作为数值分析的平台。根据试验现场的实际情况,排水板的间距均为 1.2 m,淤泥层厚度为 16~20 m,故选取面积为 1.2 m×1.2 m、深度为 30 m(其中上部 18 m 为淤泥层,下部 12 m 为黏土层)的长方体作为研究对象。

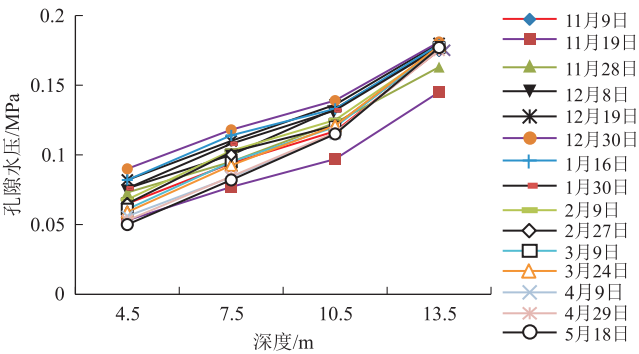


图4 分层孔隙水压随深度的变化情况图

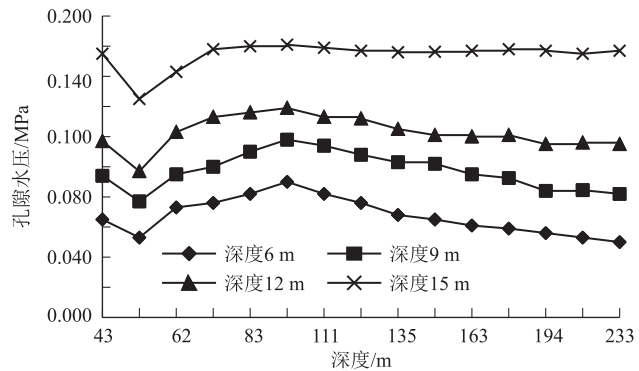


图5 分层孔隙水压随时间的变化情况图

4.2 土体参数反演方法

淤泥层和粘土层均采用 Mohr-Coulomb 本构模型,所需的土体参数如表 2 所示,其取值部分参考福州江阴港铁路支线项目可行性研究报告^[9]。其中淤泥层的压缩模量和渗透系数对沉降量的影响很大,故将这两者作为参数反演的对象(即通过试算不同的参数组合,确定一组最佳参数组合,使其数值计算结果最大程度上符合实测数据);然后利用反演所得的该组土体参数进一步估算前期沉降与预测工后沉降。

表2 淤泥层和粘土层的土体参数取值

地层	压缩模量 E /MPa	泊松比	渗透系数 k /($\times 10^{-8}$ m/s)	粘聚力 c /MPa	摩擦角 /($^{\circ}$)	膨胀角 /($^{\circ}$)
淤泥层	可变	0.45	可变	0.02	15	0
粘土层	10	0.3	1	0.1	30	3

4.3 数值模拟研究

根据现场的实际施工进度,设定数值模拟工况:第 1~30 d 进行 2.8 m 厚砂垫层的吹填施工;第 31~45 d 进行排水板施工;第 45~75 d 进行 1.4 m 厚砂石层的堆载施工;第 76~90 d 进行 1.0 m 厚砂石层的堆载施工(至设计标高但未超载);第 91~240 d 静置等待排水固结。监测仪器的埋设与观测工作从第 45 d 开始,第 240 d 结束。

按照以上工况设定,共进行了 11 组不同参数组合下的数值模拟计算,各组参数组合的具体数值如表 3

所示。打设排水板前后可认为土体的压缩模量没有变化,但是渗透系数变化很大,后者的渗透系数可达到前者的4~6倍。由于前期沉降无法准确得知,先假定由数值模拟得到的第45 d的沉降量即为前期沉降,而在此基础上叠加实测所得沉降量,即为实测修正沉降量。对比实测修正沉降量与数值模拟沉降量之间的误差(误差定义为两者相差值与实测修正沉降量的比值),选取平均误差最小的一组参数组合,作为最佳参数组合。

经过数值模拟计算,得出案例6参数组合计算得到的平均误差最小,因此采用案例6的数值模拟结果与现场实测数据进行对比,如图6所示。

案例	地基处理前		地基处理后	
	压缩模量 E /MPa	渗透系数 k /($\times 10^{-8}$ m/s)	压缩模量 E /MPa	渗透系数 k /($\times 10^{-7}$ m/s)
1	6.79	7.17	6.79	4.09
2	7.36	6.40	7.36	1.29
3	8.70	3.69	8.70	3.13
4	9.95	4.00	9.95	4.63
5	6.05	8.98	6.05	1.74
6	5.04	2.11	5.14	1.10
7	2.93	8.46	2.93	1.95
8	7.25	4.79	7.25	3.48
9	2.65	1.60	2.65	4.83
10	4.53	2.93	4.53	4.46
11	5.10	9.99	5.10	2.69

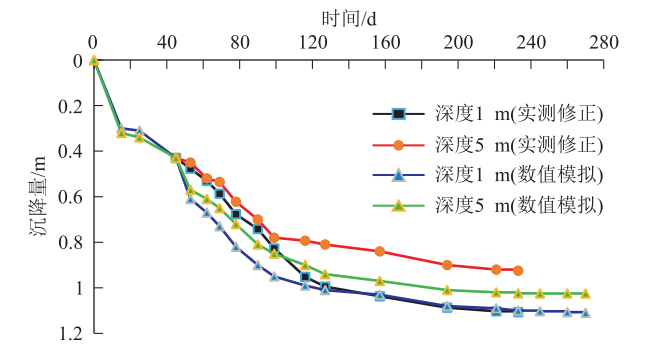


图6 数值模拟沉降量与实测修正沉降量的比较图

选取土层深度1 m和5 m沉降实测修正值与数值模拟沉降值对比可知,采用案例6参数组合的数值模拟基本上与实测数据吻合,两者变化规律基本一致。土层深度1 m处,两者间的平均误差为9.1%,土层深度5 m处,两者间的平均误差为12.1%。而随着时间的推移,深度1 m处数值模拟的计算结果逐渐趋向于 $y=1.2$ m,可以认为采用塑料排水板堆载预压法的总沉降量为1.2 m。说明通过数值计算的方法可以有效地对该工况下软土地基沉降进行预测。由此可见,现场试验的前期沉降为0.45 m,全部施工完毕后的总沉

降为1.2 m。

地基处理完毕后,现场试验时可进一步施加上部结构荷载、仓库货物荷载等。按照设计图纸中施加荷载等效于40 kPa的大面积堆载(约为2 m厚度的大面积砂石层堆载),在案例6的基础上继续进行数值模拟,可得工后沉降约为0.26 m,可满足工后沉降小于0.3 m的要求。

5 结论

本文通过现场试验和数值模拟的方法,对塑料排水板堆载预压法在福州地区滨海淤泥软土地基处理中的应用效果进行了研究,结论如下:

- (1)结合现场实际情况,考虑分级堆载,对塑料排水板堆载预压法的固结结果进行数值模拟计算。通过对比数值模拟与现场实测的结果对比,发现两者在各个位置处的结果相近,且随时间的变化趋势基本一致。
- (2)随着土层深度的增加,土层固结沉降量逐渐减小;在堆载过程中,浅层和中层淤泥发生了较大的固结沉降,而深层淤泥由于排水不畅,较难发生固结。
- (3)随着时间的推移,数值模拟的计算结果逐渐趋向于 $y=1.2$ m,可以认为采用塑料排水板堆载预压法的最终沉降量为1.2 m。

参考文献:

[1] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
WEI Rulong. Strength and Deformation of Soft Clay[M]. Beijing: China Communications Press, 1987.

[2] 王强. 塑料板排水预压法加固软基机理及沉降计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
WANG Qiang. Study on the Mechanism and Settlement Computation Method of Prefabricated Drain Preloading[D]. Nanjing: Hohai University, 2004.

[3] 赵明华, 杨明辉, 刘煜, 等. 软土路基固结沉降机理及其预测方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(4): 16-20.
ZHAO Minghua, YANG Minghui, LIU Yu, et al. Study on the Developing and Forecasting of the Settlement in Soft Clay Roadbed[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(4): 16-20.

[4] 谢非, 肖策, 王占东, 等. 塑料排水板堆载预压法在软基处理中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(S1): 1542-1548.
XIE Fei, XIAO Ce, WANG Zhandong, et al. Application of Plastic Dewatering Board of Preloading Method in Soft Subgrade Treatment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S1): 1542-1548.

[5] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1073-1080.
DONG Zhiliang, ZHANG Gongxin, ZHOU Qi, et al. Research and

Application of Improvement Technology of Shallow Ultra-soft Soil Formed by Hydraulic Reclamation in Tianjin Binhai New Area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1073 – 1080.

[6] 张在保. 软土地基处理沉降计算中相关参数的试验研究[J]. 路基工程, 2011, 29(2): 96 – 98.

ZHANG Zaibao. Experimental Study on Related Parameters in Settlement Calculation of Soft Soil Foundation [J]. Subgrade Engineering, 2011, 29(2): 96 – 98.

[7] 肖长生, 王守林, 金亮星. 经验分析方法在软基沉降预测中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(3): 72 – 76.

XIAO Changsheng, WANG Shoulin, JIN Liangxing. Application of Experience Analysis Method in the Prediction of Soft Ground Settlement[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(3): 72 – 76.

[8] 金亮星, 王守林, 陈明. 排水板堆载预压加固软基的固结沉降数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S2): 1930 – 1934.

JIN Liangxing, WANG Shoulin, CHEN Ming. Numerical Simulation of Consolidation Settlement of Reinforced Soft Foundation by Preloading Method with Plastic Drainage Plate[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(S2): 1930 – 1934.

[9] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 福州江阴港铁路支线项目可行性研究报告[R]. 福州: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2008.

China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. The Feasibility Study Report on Jiangyin Port Railway Spur Line Project in Fuzhou[R]. Fuzhou: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 2008.

(编辑: 苏玲梅 张红英)

(上接第 44 页)

[6] 张春霞, 张伟忠, 屠幼萍, 等. 隔离开关不完全合闸引起的电缆护层过电压分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2498 – 2505.

ZHANG Chunxia, ZHANG Weizhong, TU Youping, et al. Analysis of Cable Sheath Overvoltage Due to Not Completely Closing of GIS Disconnecter [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2498 – 2505.

[7] 彭涛, 陈剑云. AT 牵引供电对电力电缆感应电压仿真分析[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(5): 113 – 114.

PENG Tao, CHEN Jianyun. Simulation of AT Traction Power Supply System for Power Cable Induced Voltage[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(5): 113 – 114.

[8] 易志兴, 曹晓斌, 吴广宁. 高速铁路电缆接地方式对护层感应电压的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(6): 109 – 115.

YI Zhixing, CAO Xiaobin, WU Guangning. Influence of High-speed Railway Cable Grounding Mode on the Induced Voltage of the Cable Sheath[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(6): 109 – 115.

[9] 曹晓斌, 易志兴, 陈奎. 高速铁路单芯馈线电缆的敷设方式和敷设间距[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(6): 85 – 90.

CAO Xiaobin, YI Zhixing, CHEN Kui. Laying Mode and Laying Spacing for Single-Core Feeder Cable of High Speed Railway[J]. China Railway Science, 2015, 36(6): 85 – 90.

[10] 田金虎, 刘渝根, 赵俊光, 等. 多回同相多根并联高压电力电缆电流分布及金属护套环流计算[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 153 – 159.

TIAN Jinhu, LIU Yugen, ZHAO Junguang, et al. Circulating Current in Sheaths and Current Distribution on Same-phase Parallel Multi-cable of Multi-circuit Power Cable Lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 153 – 159.

[11] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

FENG Cizhang, MA Xikui. Engineering Electromagnetics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

[12] GB 50217 – 2018 电力工程电缆设计规范[S].

GB 50217 – 2018 Power Engineering Cable Design Specification[S].

(编辑: 车晓娟 白雪)