

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.02.008

有无侧限条件下公路软基堆载预压对比研究

聂志林, 刘 杰, 刘 庭, 刘丰玮

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为降低堆载预压排水固结对周边环境的不利影响, 提出了侧限堆载预压控制技术。基于FLAC^{3D}有限元分析软件建立有无侧限堆载预压排水固结模型, 将无侧限堆载预压模拟结果与实测结果进行对比, 验证了数值模拟模型的合理性与可行性, 探讨了有无侧限堆载预压的差异。研究表明: 侧限控制技术能有效降低软土地基沉降、加快前期固结速率; 同时侧限位置离堆载预压区边缘越近, 侧限效果越好。

关键词: 侧限; 公路软基; 堆载预压; 沉降

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)02-0044-05

A Comparative Study on the Surcharge Preloading of Highway Soft Foundation with the Lateral Restraint a Variable

NIE Zhilin, LIU Jie, LIU Ting, LIU Fengwei

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to reduce the adverse effects of the preloading drainage consolidation on the surrounding environment, the concept of the lateral restraint of the surcharge preloading has been put forward. A preloading drainage consolidation model with the lateral restraint a variable has been established by using the finite element analysis software FLAC^{3D}, followed by a comparison between the simulation results and the measured results of the surcharge preloading without the lateral restraint, which has verified the liability and feasibility of the numerical simulation model. An investigation has been made of the differences between the surcharge preloading with or without the lateral restraint. Experimental results show that the controlling of the lateral restraint helps to effectively reduce the settlement of the soft soil foundation and speed up the initial consolidation rate. Meanwhile the closer the position of the lateral restraint to the edge of the surcharge preloading area, the better the lateral confinement effect will be.

Keywords: lateral restraint; highway soft foundation; surcharge preloading; settlement

0 引言

软土地基是一种特殊性岩土地基, 一般在静水或缓慢流水的环境下沉积形成, 大多分布在我国沿海地区, 洞庭湖、洪泽湖、太湖、鄱阳湖以及昆明滇池等地区也分布有湖相沉积内陆软土^[1-2]。由于软土地基具有压缩性高、抗剪强度低、透水性差等特点,

所以在软土地基上修建公路, 必须考虑公路路基的变形和稳定问题。

历年来, 众多学者针对软土地基的处理总结了多种应用方法, 如换填法、加筋法、置换法、排水固结法等。然而在实际工程中, 往往出现土体的侧向挤出变形, 导致土体不均匀沉降, 周边相邻建筑物倾斜等问题。彭宇一等^[3]通过对高速公路软土路基侧向变

收稿日期: 2016-10-27

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ5017)

作者简介: 聂志林(1991-), 男, 湖南怀化人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为软土地基处理,

E-mail: nzlmail@qq.com

形的研究,分析了侧向变形的特点,侧向变形对路基稳定的影响以及控制侧向变形的措施,指出了目前对侧向变形监测与评价中存在和应注意的问题。N. Loganathan 等^[4-5]系统分析了侧向位移对路基沉降的影响,并定量给出了路基沉降与侧向位移的关系。李国维等^[6]基于三轴蠕变试验和平面应变蠕变试验结果,研究了路堤下深厚的海相沉积软土侧向变形对沉降的影响。陈继彬等^[7]依据四川省遂—资(遂宁至资阳)高速公路软基沉降变形观测的结果,探讨了西南地区软土路基经塑料排水板(PVD)、碎石桩处理后,路基侧向变形随深度、最大侧向变形增量与地表沉降增量、平均侧向变形量与地表沉降量的变化规律。

本文基于FLAC^{3D}有限元分析软件建立有无侧限堆载预压模型,来对比研究有无侧限堆载预压排水固结的差异,探讨侧限设置位置对地基沉降的影响。

1 侧限堆载预压技术

为限制软土在预压荷载作用下的侧向挤出,降低堆预压对周边环境的不利影响,提出了侧限堆载预压技术,即在堆载预压区边缘通过水泥搅拌桩相互搭接,形成限制软土侧向挤出的格栅状水泥土墙,如图1所示。水泥土墙的深度及宽度由水泥土墙的稳定性和软土厚度、不透水层的埋藏深度等综合确定。此技术的作用是:1)侧限作用。通过设置水泥土墙,限制软土侧向挤出,降低堆载预压对周边环境的不利影响。2)隔离作用。对于地下水位较高的场地,采用水泥土墙将堆载区与非堆载区隔离开来,阻断或延长地下水的渗透路径,避免非堆载区地下水位大幅度降低导致周边环境产生较大沉降及不均匀沉降。

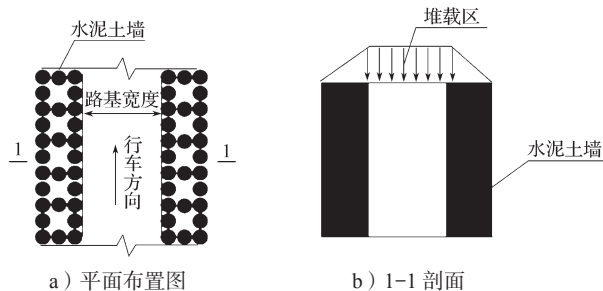


图1 侧限技术示意图

Fig. 1 A sketch map of lateral restraint technology

2 工程概况

妈祖城核心区基础设施工程建设项目^[8]地处福建省莆田市忠门半岛东南媚洲湾畔,施工的填砂总量约32.3万m³;填海造地面积约341万m²,充填砂总量约1430万m³。

2.1 工程地质地貌

湄洲湾受地质构造和岩性控制,呈西北高,东南低的地势。文甲贸易码头北依陆地,南面临海,由北向南逐渐向海中倾斜。本工程填海造地面积较大,工程区域的地基土层主要由软土组成,包括淤泥质黏土层A、粉质黏土层B、淤泥质粉质黏土层C及部分含泥中砂。地基软土层的厚度分布不均,软土时代不明,软土层主要物理力学参数如表1所示。

为提高地基承载能力,采用堆载预压加竖向排水板技术进行加固,塑料排水板长度为7m,其中2.5m位于吹填砂内。为了控制固结速率,采用分期堆载,堆载高度与时间的关系曲线如图2所示。

表1 软土层主要物理力学参数

Table 1 Major physical and mechanical parameters of the soft soil

土层	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	弹性模量 E/MPa	泊松比 γ	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa
填砂	1 630	8.00	7.29	0.19	3.918	3.062
A	1 820	3.18	2.15	0.33	2.104	0.807
B	1 880	5.09	4.16	2.06	2.889	1.651
C	1 790	2.77	2.11	0.29	1.678	0.819

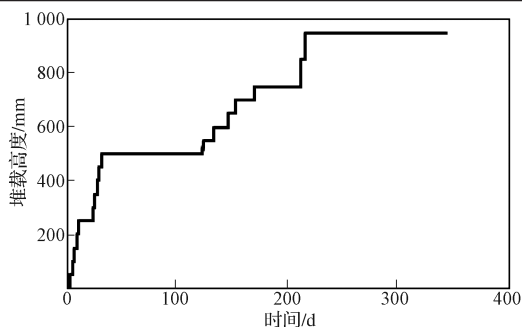


图2 堆载高度与时间的关系曲线

Fig. 2 Relation curve of load height and time

2.2 监测结果

根据现场实测数据选取PXK1+000观测点的沉降值进行分析。持续观测332d,累计沉降269mm。

现场需要将2.5m高砂垫层填完后再插入塑料排水板,因此现场记录下的堆载—沉降曲线是在2.5m砂垫层吹填完后监测的结果。堆载高度、沉降与时间的关系曲线如图3所示。

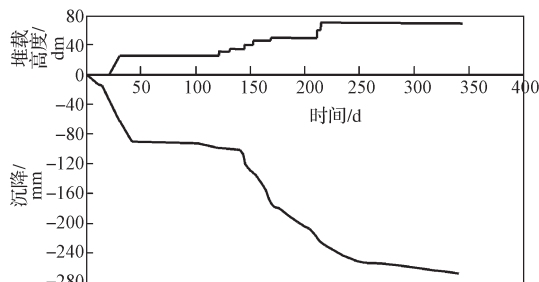


图3 堆载高度、沉降与时间的关系曲线

Fig. 3 Relation curves of load height, settlement and time

3 数值分析

结合地质勘察报告,以现场监测的横断面 P XK1+000 为建模的参考面,岩层层顶埋深为 13 m。为了简化计算模型,通过李豪的方法^[9]将塑料排水板的地基土层参数等效成渗透系数较大的天然地基土层。数值模拟计算的土层参数见表 2。

表 2 数值模拟各土层计算参数

Table 2 Parameters of the soil layers in numerical simulation

土层	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa	等效竖向渗透 系数 / (cm·s ⁻¹)	孔隙比
填砂	30.00	0	3.25E-03	0.71
A	12.15	16.97	2.11E-04	1.62
B	15.54	40.00	3.60E-05	0.85
C	9.68	21.42	2.06E-06	1.09

考虑到堆载预压的影响范围,半模型的计算宽度 X 方向取 60.0 m,其中 25.5 m 为堆载预压区;根据岩层的埋深,13.0 m 以下为刚性层,计算深度 Z 方向取 13.0 m;计算长度 Y 方向取单位长度。模型范围如图 4 所示,数值模拟与实测结果对比如图 5 所示。

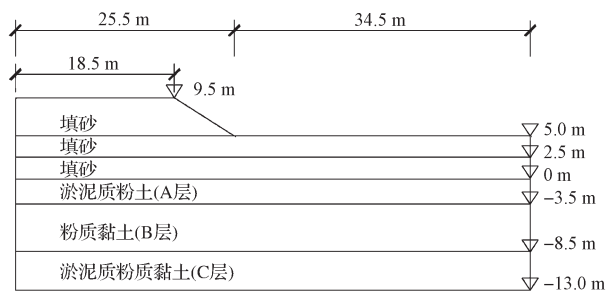


图 4 模型范围示意图

Fig. 4 A sketch map of the model range

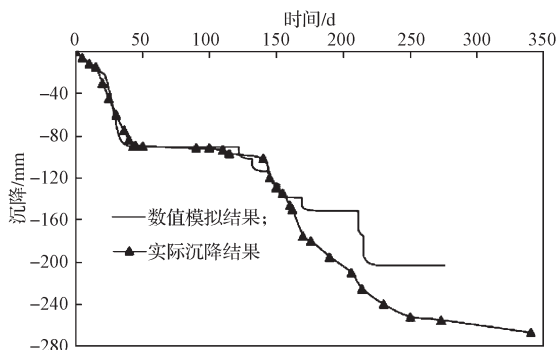


图 5 沉降-时间曲线

Fig. 5 Settlement-time curves

由图 5 可知,数值模拟结果与实际沉降结果前期吻合较好,后期偏差较大。主要原因是,一方面数值模拟时地基土的渗透系数取值为常量,而实际情况是渗透系数随着堆载时间增加而减小;另一方面现场的实际施工过程与数值模拟的加载过程存在一定的差异。

4 有无侧限堆载预压对比研究

为了对比有无侧限堆载预压排水固结技术,数值模拟模型如图 6 所示,数值模拟各土层计算参数见表 2。堆载预压高度为 7.0 m,重度 16.30 kN/m^3 。模型计算宽度 X 方向取 74.0 m,其中 24.0 m 为堆载预压区;假设 13.0 m 以下为刚性层,因此模型计算深度 Z 方向取 13.0 m;计算长度 Y 方向取单位长度。

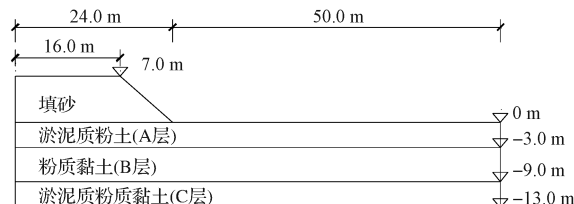


图 6 数值模拟范围示意图

Fig. 6 Schematic diagram of pile loading model

堆载时,为了防止堆载在填筑过程中因地基承载力不足而发生稳定性破坏,因此采用分级堆载,堆载总高度为 7.0 m。堆载过程如图 7 所示。

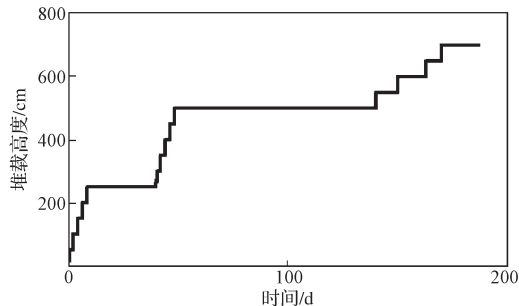


图 7 堆载高度与时间的关系曲线

Fig. 7 Relation curves of load height and time

图 8~14 为有无侧限时数值模拟结果。由该数值模拟结果可知:无侧限时,堆载预压区最大沉降为 308.06 mm;侧限位置离堆载区边缘的距离分别为 0, 2, 4, 10, 20, 50 m 时,堆载预压区的最大沉降分别为 126.50, 152.08, 167.93, 196.90, 225.36, 271.62 mm。这表明,侧限的设置对降低堆载预压区沉降有很好的作用;当侧限设置在预压区边缘,堆载预压区最大沉降降低 58.93%;当侧限位置离预压区边缘的距离分别为 2, 4, 10, 20, 50 m 时,堆载预压区最大沉降也分别降低 50.63%, 45.49%, 36.08%, 26.85%, 11.83%。

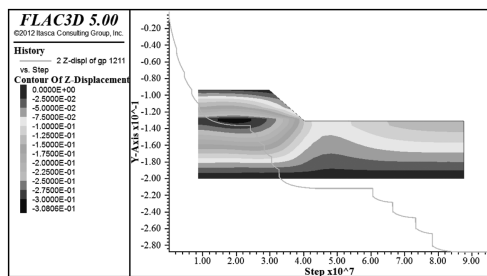


图 8 无侧限时数值模拟结果

Fig. 8 Simulation results without lateral constraints

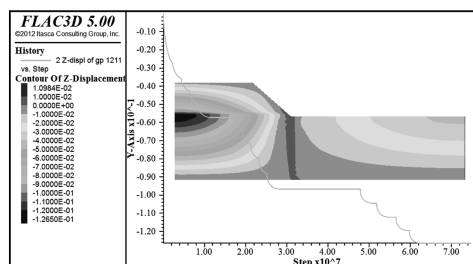


图9 侧限在堆载预压区边缘时数值模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results of the lateral confinement on the edge of the surcharge preloading area

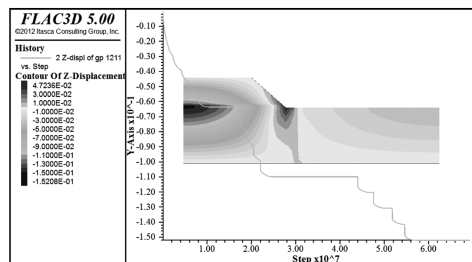


图10 侧限距堆载预压区边缘2 m时数值模拟结果

Fig. 10 Numerical simulation results: with the distance of the lateral limit to the surcharge preloading area being 2 meters

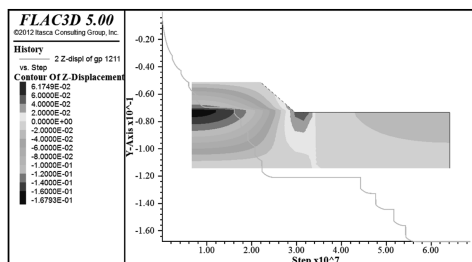


图11 侧限距堆载预压区边缘4 m时数值模拟结果

Fig. 11 Numerical simulation results with the edge distance of the lateral limit of the surcharge preloading area being 4 meters

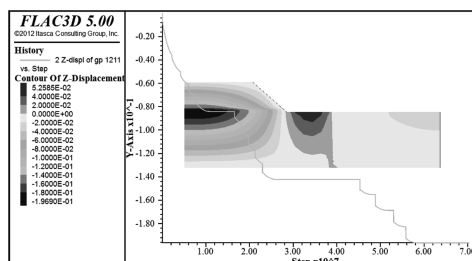


图12 侧限距堆载预压区边缘10 m时数值模拟结果

Fig. 12 Numerical simulation results: with the distance of the lateral limit to the surcharge preloading area being 10 meters

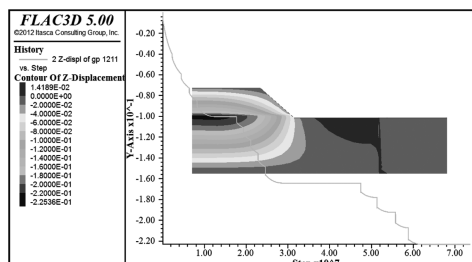


图13 侧限距堆载预压区边缘20 m时数值模拟结果

Fig. 13 Numerical simulation results: with the distance of the lateral limit to the surcharge preloading area being 20 meters

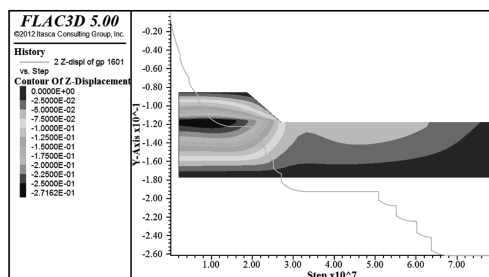


图14 侧限距堆载预压区边缘50 m时数值模拟结果

Fig. 14 Numerical simulation results: with the distance of the lateral limit to the surcharge preloading area being 50 meters

图15为侧限设置位置与堆载预压区最大沉降的关系曲线。从该曲线可以看出,当侧限位置离堆载预压区边缘的距离大于2 m时,曲线斜率逐渐变小,说明侧限的设置对堆载预压的最终沉降量影响变小。

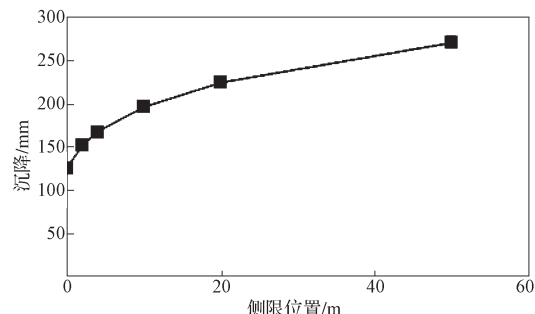


图15 侧限位置与最大沉降的关系

Fig. 15 Relationship between the lateral position and maximum settlement

图16为不同侧限位置与各级堆载下,沉降稳定时间的数值模拟结果。由图可知,当侧限设置在堆载预压区边缘时,各级荷载作用下沉降稳定时间很短,第一级堆载稳定沉降值与最终堆载沉降稳定值相差不大;当侧限位置离堆载预压区边缘的距离大于2 m时,侧限的设置对堆载预压沉降稳定时间影响变小。

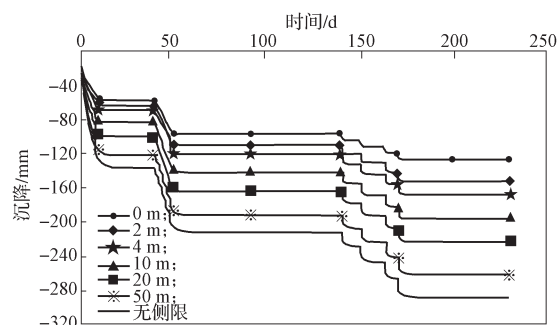


图16 不同侧限位置对沉降稳定时间的影响

Fig. 16 Effects of different side limit on the time of settlement stabilization

由数值模拟结果可以推得不同侧限情形下,达到不同固结度时所需预压时间,结果见表3。由表3可知,当侧限位置设置在堆载预压区边缘时,土的固结度达到80%所需预压时间为140 d;当无侧限及侧限位置

离堆载预压区边缘的距离为 2, 4, 10, 20, 50 m 时, 固结度达到 80% 所需预压时间均为 150 d; 固结度达到 90% 所需堆载预压时间均为 163 d。由此可知, 侧限设置在预压区边缘, 前期固结速度较快, 达到 80% 固结度较无侧限可缩短 10 d, 但达到 90% 的固结度所需时间基本一致。侧限设置的最佳位置是在堆载预压区边缘。

表 3 不同侧限下达到不同固结度时的时间

Table 3 Time of different consolidation degrees under different lateral limits d

固结度 /%	无侧限	侧限位置距预压区边缘距离 /m					
		0	2	4	10	20	50
80	150	140	150	150	150	150	150
90	163	163	163	163	163	163	163

5 结语

为限制软土在预压荷载作用下的侧向挤出, 降低堆载排水预压对周边环境的影响, 提出了侧限堆载预压技术。通过有无侧限堆载预压数值模拟对比研究, 可得以下结论:

1) 堆载预压侧限控制技术能有效降低软土地基沉降, 提高前期固结速率, 固结度达 80% 堆载预压时间最大可缩短 10 d, 但对最终固结时间影响不大。

2) 侧限设置位置对堆载预压影响显著。当侧限位置位于堆载预压区边缘时, 与无侧限相比, 堆载预压区最大沉降降低 58.93%。

3) 当侧限位置离堆载预压区边距离大于 2 m 时, 侧限设置对堆载预压影响逐渐减小, 最佳侧限位置位于堆载预压区边缘。

参考文献:

- [1] 张浩华. 软土高填方路基后处理技术及工程应用研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2004.
ZHANG Haohua. Study on Post-Processing Technique and Engineering Application of Thick Filling on Highway Soft-Foundation[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2004.
- [2] 尹利华. 公路软土地基处理关键技术智能信息化研究

[D]. 西安: 长安大学, 2011.

YIN Lihua. Intelligent Informationization Research on the Key Technology for Soft Ground Improvement of Highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.

- [3] 彭宇一, 朱志铎. 高速公路软土路基侧向变形分析 [J]. 路基工程, 2008(5): 85-86.
PENG Yuyi, ZHU Zhiduo. Expressway Soft Soil Roadbed Lateral Deformation Analysis[J]. Journal of Subgrade Engineering, 2008(5): 85-86.
- [4] LOGANATHAN N, BALASUBRAMANIAM A S, BERGADO D T. Deformation Analysis of Embankment [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(8): 1185-1206.
- [5] ALAMGIR M, MIURAN, POOROOSHASB H B, et al. Deformation Analysis of Soft Ground Reinforced by Columnar Inclusions[J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(4): 267-290.
- [6] 李国维, 蒋华忠, 杨涛, 等. 路堤下深厚软土侧向变形的沉降影响研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2817-2822.
LI Guowei, JIANG Huazhong, YANG Tao, et al. Influence of Lateral Deformation on Settlement of Thick Soft Soil Underlying Embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2817-2822.
- [7] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴, 等. 不同方式处理后软土地基侧向变形规律 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 340-347.
CHEN Jibin, ZHAO Qihua, PENG Sheqin, et al. Lateral Deformation Law of Soft Soil Subgrade Treated by Different Modes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 340-347.
- [8] 罗嘉金. 塑料排水板堆载预压法加固软基机理分析及固结沉降研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
LUO Jiajin. Study on Reinforcement Mechanism and Consolidation Settlement Analysis of Soft Foundation Treatment with the Method of Prefabricated Drain Preloading[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [9] PYRAHIC, HIRD C C, RUSSEL D. Finite Element Modelling of Vertical Drains Beneath Embankments on Soft Ground [J]. Geotechnique, 1992, 42(3): 499-511.

(责任编辑: 邓光辉)