

集装箱荷载下港口吹填地基数值模拟分析

赖汉江¹, 郑俊杰¹, 甘甜¹, 周燕君¹, 袁静波²

(1. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 吹填造陆是沿海地区解决建设用地的一种重要手段, 而目前对于港口吹填地基在集装箱荷载下受力变形特性的研究鲜有报道。采用 FLAC^{3D} 建立了与现场试验工况一致的数值模型, 铺面结构采用理想弹性模型, 地基采用 M-C 模型。模拟主要对地基中的附加应力、竖向应变及侧向位移进行深入分析, 模拟结果表明: 中粗砂垫层应力扩散能力比淤泥质黏土层好; 加载区域内地基中附加应力沿深度方向逐渐减小且最大侧向位移发生在淤泥质黏土层顶部; 加载区域外地基中附加应力沿深度方向呈逐渐增加趋势且最大侧向位移发生位置呈增加趋势。最后, 对中粗砂垫层和淤泥质黏土层回弹模量进行了参数分析。

关键词: 港口; 软土地基; 附加应力; 变形; 数值模拟

中图分类号: U652.7; TU471.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0528-04

作者简介: 赖汉江(1987-), 男, 福建龙岩人, 博士研究生, 主要从事软基处理方面科研工作。E-mail: lai_hanjiang@hust.edu.cn。

Numerical simulation analysis of reclaimed port ground under container load

LAI Han-jiang¹, ZHENG Jun-jie¹, GAN Tian¹, ZHOU Yan-Jun¹, YUAN Jing-bo²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Land reclamation is an important way in solving the land-scarce issue for construction in coastal areas. The stress and deformation properties of reclaimed port ground under the action of container load are insufficiently studied. A numerical simulation is conducted using FLAC^{3D} to establish a full-scale model as the field test conditions. The pavement is simulated by the elastic model and the ground is simulated by the M-C model. The additional stresses, vertical strains and lateral displacements are analyzed. The simulated results show that the ability of stress dispersion of medium-coarse sand is better than that of mucky clay. Within the loading region, the additional stress decreases with the increase of depth, and the maximum lateral displacement occurs at the top of mucky clay. Outside the loading region, the additional stress slightly increases with the increase of depth, and the location of the maximum lateral displacement gradually goes deeper. Finally, parametric studies on the elastic modulus of medium-coarse sand and mucky clay are presented.

Key words: port; soft foundation; additional stress; deformation; numerical simulation

0 引言

沿海城市经济高速发展, 大量港口建设对土地资源的需求日益迫切, 吹填造陆已成为沿海地区解决建设用地的一种重要手段^[1]。吹填造陆形成一定厚度的吹填软土层, 即使采用不同方式进行处理, 如抽真空预压, 但仍强度较低压缩性较大^[2]。实测资料表明软土地基在交通荷载作用存在较大的工后沉降^[3], 主要是因为交通荷载在软土中产生了较大的附加应力而引起^[4]。因此, 对于港口吹填软土地基在设计荷载作用下, 地基材料受力变形特性的研究具有重要意义。

目前, 国内外学者对于软土地基在外部荷载作用

下受力变形的研究主要在公路和铁路方面^[5-6], 对于吹填港口软土地基的研究鲜有报道。港口铺面结构及地基的设计也尚无专门规范, 设计与施工主要参考公路相关规范进行, 然而港口荷载要远大于公路交通荷载, 如正面吊运车单轮荷载达 300 kN, 6层集装箱箱脚接地应力达 9.51 MPa^[7]。在重荷载作用下, 吹填软土可能产生过大变形, 进而导致铺面结构出现开裂等病害,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278216); 交通运输部水运工程建设项目

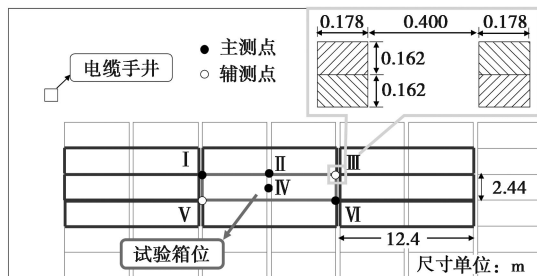
收稿日期: 2013-07-19

根据港区吹填地基和重荷载特点, 对软土的受力变形特性进行针对性研究显得十分必要。

本文基于广州南沙港一期工程现场足尺集装箱堆载试验结果, 采用有限差分软件 FLAC^{3D} 建立 3 层集装箱加载工况模型, 并对地基中附加应力、竖向应变及侧向位移进行深入分析。

1 现场试验工况

现场试验位于广州南沙港一期工程 E 区连锁块铺面重箱堆场。如图 1 (a) 所示, 现场共设置 6 个监测点, 分别位于箱脚、箱边和箱中位置正下方。分主辅测点, 其中主测点每隔 0.5 m 埋设一个土压力盒, 辅测点每隔 1.0 m 埋设一个。堆载试验中将 40 英尺 15 t 重的集装箱放置于试验箱位及其周边的 8 个箱位上, 如图 1 (b) 所示。



(a) 土压力盒布置、集装箱堆载及箱角结构示意图



(b) 现场土压力盒布置及集装箱堆载试验图

图 1 土压力盒布置及集装箱堆载试验

Fig. 1 Arrangement of earth pressure cells and container load tests

堆场结构从上至下名称及各层材料物理力学参数详见表 1。其中铺面结构 (连锁块、6%水稳层和碎石垫层) 参数根据相关规范进行经验取值并通过反演计算进行适当调整, 地基材料 (中粗砂垫层、细砂层、淤泥质黏土层和粉质黏土层) 参数通过现场钻探取样进行室内土工试验获得。

2 数值模拟分析

根据现场 3 层集装箱堆载试验工况, 采用 FLAC^{3D}

建立 3 层集装箱堆载工况试验模型。

表 1 堆场结构各层材料物理力学参数

结构层名称	层厚 /m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	E /MPa	c /kPa	φ /($^{\circ}$)
连锁块	0.10	26.0	35000	—	—
6%水稳层	0.48	25.0	2500	—	—
碎石层	0.20	24.0	350	—	—
中粗砂垫层	2.00	20.5	50	2	38
细砂层	1.00	20.0	24	2	32
淤泥质黏土	10.0	17.0	4	20	6
粉质黏土	10.0	20.0	8	40	18

2.1 数值模型的建立与验证

根据现场条件及表 1 材料参数, 建立 $120\text{ m}\times 37.2\text{ m}\times 23.78\text{ m}$ 的堆场集装箱堆载模型, 铺面结构采用理想弹性模型, 地基采用 Mohr-Coulomb 模型。加载范围及加载点与现场试验一致; 加载接触面上的均布荷载值是将总荷载根据文献[7]中对不同层数集装箱荷载折减比例折减后, 再平均分配到四个矩形面上 (如图 1(a)所示), 其中 3 层集装箱堆载折减比例为 20%。

图 2 为 FLAC^{3D} 数值模拟与现场试验数据对比曲线。在 3 层集装箱堆载工况下, 地基中附加应力在箱脚位置处最大, 箱边次之, 箱中最小, 且均随深度增加而逐渐减小。数值模拟结果规律与现场试验结果相似, 数值较为吻合, 验证了该模型的正确性, 表明此模型中各材料参数选择合理, 可用于港口地基中附加应力、竖向应变及侧向位移的分析。

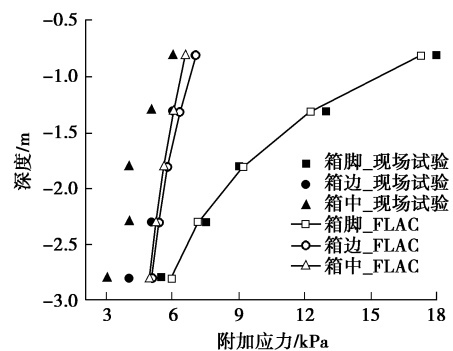


图 2 数值模拟与现场试验对比曲线

Fig. 2 Comparison between numerical simulation results and field test data

2.2 附加应力分析

图 3 (a) 为中心箱位箱脚下附加应力沿深度分布曲线。附加应力沿深度方向逐渐减小, 在各层材料介质中附加应力几乎都是呈线性减小, 沿深度减小的速率在中粗砂垫层中最大, 细砂层中次之, 淤泥质黏土层中最小。表明了中粗砂垫层具有较好的应力扩散能力, 而淤泥质黏土层的应力扩散能力较差。图 3 (b)

为不同深度处附加应力分布曲线。在地基浅层的砂垫层顶部,加载点下有明显的应力集中现象,随着深度的增加该现象逐渐减弱。另外,图3(b)还显示,加载区域内地基中附加应力沿深度方向逐渐减小,加载区域外有逐渐增加的趋势。

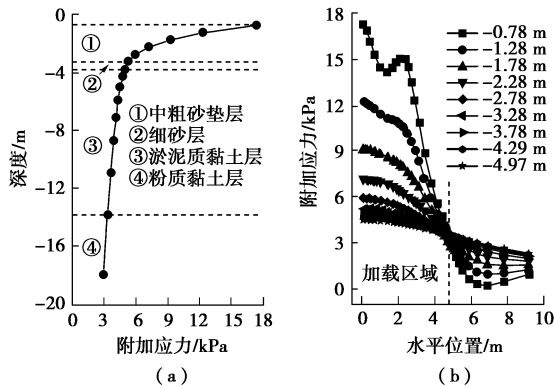


图3 地基中附加应力分布曲线

Fig. 3 Distribution of additional stresses

2.3 竖向应变分析

图4(a)为加载中心点下竖向应变沿深度分布曲线。竖向应变在中粗砂垫层中随深度的增加而减小,在细砂层中有小幅增加的趋势,进入淤泥质土层后突然增至最大值(0.61‰)并沿深度方向逐渐减小。图4(b)为地基不同深度处竖向应变沿水平位置分布曲线。加载点下浅层地基中竖向应变沿水平方向分布呈“山峰”状,加载中心点下竖向应变值最大;该现象随深度增加逐渐减弱,在一定深度后竖向应变随着与加载中心点距离的增加而逐渐减小。

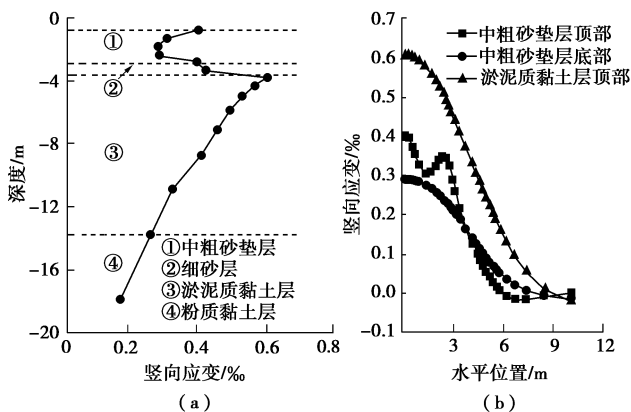


图4 竖向应变分布曲线

Fig. 4 Distribution of vertical strains

2.4 侧向位移分析

图5(a)为地基不同竖直断面处最大侧向位移沿水平位置分布曲线。距加载中心一定范围内(本文为12.37 m),随着与加载中心距离的增加,侧向位移逐渐增大,超过该范围后逐渐减小。图5(b)为地基不同竖直断面处侧向位移沿深度分布曲线。各断面处侧

向位移沿深度方向均呈先增大后减小的变化规律,加载区域内最大侧向位移发生在淤泥质黏土层顶部,加载区域外最大侧向位移发生位置呈加深趋势。

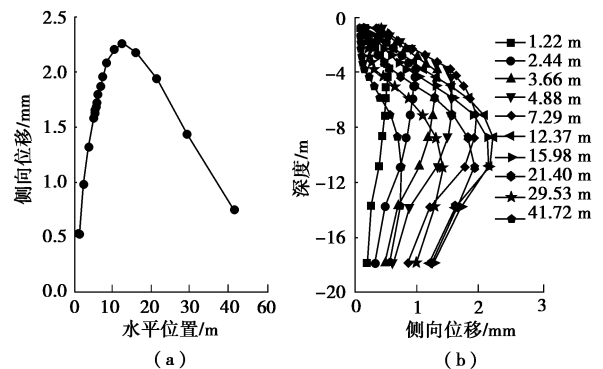


图5 地基中侧向位移分布曲线

Fig. 5 Distribution of lateral displacements

图6为地基不同深度处侧向位移分布曲线。各深度处侧向位移均沿水平方向均呈先增大后减小的变化规律。加载区域内淤泥质黏土层顶部侧向位移随着与加载中心距离的增加而增加,且该曲线与最大位移曲线几乎重合,加载区域外淤泥质黏土层顶部侧向位移随着与加载中心距离的增加逐渐减小,而地基最大侧向位移沿水平方向继续增加并在12.37 m处达到最大值后逐渐减小。

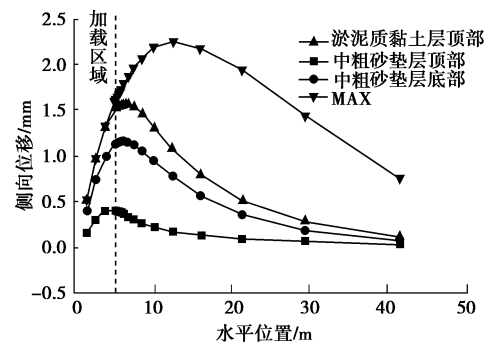


图6 地基不同深度处侧向位移分布曲线

Fig. 6 Distribution of lateral displacements at different depths

3 参数分析

基于3层集装箱加载工况,对砂垫层及淤泥质土层回弹模量对淤泥质土层顶部竖向应变进行分析。

3.1 中粗砂垫层回弹模量影响

图7为砂垫层回弹模量对淤泥质黏土层顶部竖向应变的影响曲线。随着回弹模量的增加,淤泥质黏土层顶部竖向应变逐渐减小。

3.2 淤泥质黏土层回弹模量影响

图8为淤泥质黏土层回弹模量对淤泥质黏土层顶部竖向应变影响曲线。随着回弹模量的增加,淤泥质黏土层顶部竖向应变逐渐减小。

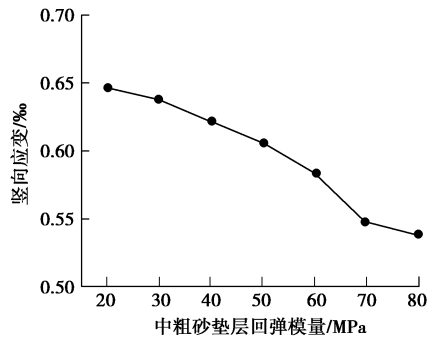


图 7 砂垫层回弹模量对竖向应变的影响

Fig. 7 Influence of elastic modulus of medium-coarse sand on vertical strain

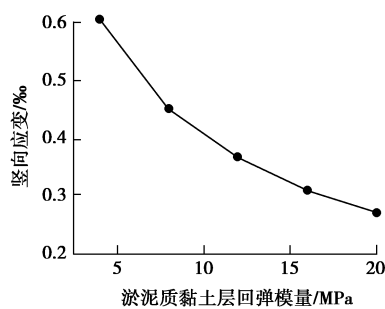


图 8 淤泥质黏土层回弹模量对竖向应变的影响

Fig. 8 Influence of elastic modulus of mucky clay on vertical strain

4 结 论

本文基于现场试验工况建立了 FLAC^{3D} 数值模型, 对地基中的附加应力分布、竖向应变和侧向位移以及中粗砂垫层和淤泥质黏土层回弹模量的影响进行了深入分析, 得出以下结论:

(1) 最大附加应力发生在箱脚位置。中粗砂垫层应力扩散能力比淤泥质黏土层好。加载区域内地基中附加应力沿深度方向逐渐减小, 加载区域外呈增加趋势。

(2) 侧向位移沿水平和竖直方向先增加后减小。加载区域内最大侧向位移发生在淤泥质黏土层顶部; 加载区域外最大侧向位移发生位置逐渐加深。

(3) 最大竖向应变发生在加载中心下淤泥质黏土

层顶部, 中粗砂垫层及淤泥质黏土层回弹模量的提高均可以有效减小淤泥质黏土层顶部竖向应变, 提高地基承载力。

参考文献:

- [1] YAN S W, CHU J. Soil improvement for a storage yard using the combined vacuum and fill preloading method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(4): 1094 - 1104.
- [2] 梅国雄, 徐 锴, 宰金珉, 等. 真空预压加固软土地基变形机理的探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1168 - 1172. (MEI Guo-xiong, XU Kai, ZAI Jin-min, et al. Deformation mechanism of soft foundation under vacuum preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1168 - 1172. (in Chinese))
- [3] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(1): 33 - 46.
- [4] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2004. (CHEN Xi-zhe. Soil mechanics and geotechnical engineering[M]. 4-th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [5] CHAI J C, MIRUA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(11): 907 - 916.
- [6] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891 - 895. (HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 891 - 895. (in Chinese))
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. JTS 144—1—2010 港口工程荷载规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (CCCC First Harbor Consultants Co Ltd. JTS 144—1—2010 Load standard of port engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))

(本文责编 明经平)