

· 地基与基础 ·



湛江港深厚软土地区码头堆场 工后沉降分析及处理措施

张会荣, 姚紫涵

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 湛江港某工程堆场地基土层是由新近人工回填的素填土和原始海相沉积淤泥、淤泥质土组成的深厚软土地基, 素填土土质极不均匀, 呈欠压实状。淤泥、淤泥质土层承载力低, 含水量高, 为高压压缩性软弱土, 地基处理均采用堆载预压。项目交工后对堆场的沉降进行长期沉降观测, 观测数据显示4个堆场均出现不同程度的沉降。总结了堆场工后沉降的主要特点、规律, 分析了造成沉降的主要影响因素。为减少堆场工后沉降和不均匀沉降, 根据堆场的功能、面积、荷载、地质资料等, 提出堆场运营管理、软基处理设计、排水设计等针对性处理措施, 有效消除后期沉降对堆场正常生产运营的影响, 旨在为类似工程的设计、管理提供参考。

关键词: 堆场; 软土; 堆载预压; 工后沉降; 软基处理

中图法分类号: U651

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0170-06

Analysis and treatment measures for post construction settlement of stockyards in deep soft soil areas of Zhanjiang Port

ZHANG Huirong, YAO Zihan

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The foundation soil layer of a certain engineering stockyard in Zhanjiang Port is a deep soft soil foundation composed of recently manually backfilled plain fill soil and original marine sedimentary silt and muddy soil. The plain fill soil is extremely uneven and in an undercompacted state. The silt and muddy soil layers have low bearing capacity, high water content, and are high-pressure compressible soft soil. The foundation treatment adopts preloading. After the completion of the project, long-term settlement observation is conducted on the settlement of the stockyard. The observation data shows that the four stockyards all have different sizes of settlement. This article summarizes the main characteristics and laws of post construction settlement of the stockyard, and analyzes the main influencing factors that cause settlement. To reduce post construction settlement and uneven settlement of the stockyard, targeted treatment measures such as stockyard operation management, soft foundation treatment design, and drainage design are proposed based on the function, area, load, and geological data of the stockyard, which can effectively eliminate the impact of later settlement on the normal production and operation of the stockyard. The aim is to provide reference for the design and management of similar projects in the future.

Keywords: stockyard; soft soil; preloading; post construction settlement; soft foundation treatment

我国对外贸易经济的快速发展, 促使港口工程大规模建设和港口的装卸能力的不断提高, 要求港口装卸机械向大型化、重型化发展。随着堆场的使用不规范和超载的普遍存在, 以及临海码

头场地存在高压压缩性的淤泥和淤泥质土等因素, 导致堆场竣工后不久就出现较大的工后沉降和不均匀沉降。一般情况下, 软土地区堆场多进行施工期沉降观测以便卸载, 利用土体固结曲线推测

收稿日期: 2024-01-15

作者简介: 张会荣 (1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事公路、市政、港口工程等设计工作。

工后沉降^[1-2]。软土地区工后沉降持续时间较长, 长期监测成本较高, 造成目前有关堆场工后沉降分析及研究资料较少^[3], 缺少普遍性和代表性。本文以湛江港某工程为依托, 结合堆场工后沉降的观测资料, 总结工后沉降的分布特性、规律, 分析影响工后沉降的主要因素, 并提出相应的处理措施。对于完善珠三角深厚软土地区堆场设计、延长堆场使用寿命、提高堆场生产效率具有重要意义。

1 工程概况

根据工程地质勘察报告, 拟建场地上部为新

近回填的素填土(Q₄^m)、第四纪全新世海相沉积形成的松散中粗砂层、粉细砂、灰色淤泥、淤泥质土、淤泥混砂及砂混淤泥等软弱土层(Q₄ⁿ); 中部为第四纪中更新世北海组形成的杂色黏土-粉质黏土、中粗砂、粉细砂等土层(Q₂^b); 下部为第四纪下更新世湛江组形成的灰色黏土-粉质黏土、灰色中粗砂、灰色粉细砂(Q₁^s)等地层。淤泥-淤泥质平均厚度约 8.6 m。场地主要软土物理力学指标见表 1。

项目所在区域原为一片滩涂地带, 施工前已吹填成为陆域, 总体地势平缓, 高程约 5.0 m, 堆场平面布置见图 1。

表 1 主要压缩土层物理力学指标

土层	含水量/ %	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	塑性指数/ I_p	直接快剪		固结快剪		压缩模量 E_{s1-2}/MPa	标贯 击数/击
					黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$		
素填土	64.7	1.61	1.769	29.3	12.6	1.1	14.2	14.0	2.059	1.3
淤泥	59.5	1.59	1.618	25.9	8.1	0.6	6.2	11.9	2.008	0.3
淤泥质土	65.1	1.59	1.793	24.8	8.5	0.9	6.6	13.4	1.492	2.5

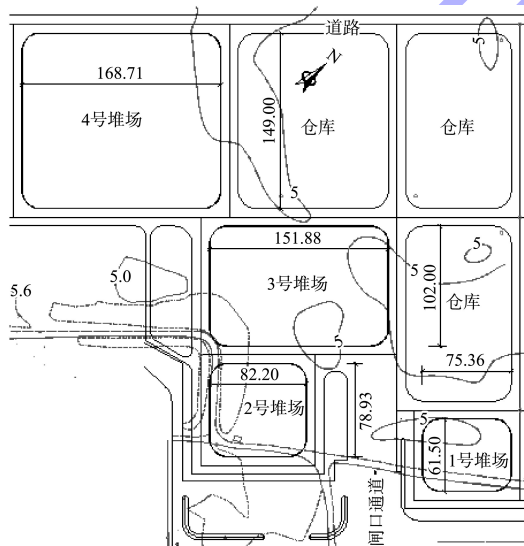


图 1 堆场平面布置 (单位: m)

2 堆载预压设计及施工

2.1 设计标准

堆场采用堆重箱堆场设计方案, 工后沉降量按 25 cm。1) 静荷载: 堆高 5 层重箱, 按均布荷载 50 kPa 设计; 2) 流动机械荷载: 集装箱拖挂车满载时前轴 20 kN/轮、后轴 70 kN/轮; 集装箱

正面吊运车满载时前轴 300 kN/轮、后轴 100 kN/轮; 3) 路面结构: 采用高强联锁块铺面, 结构层分别为 10 cm 厚高强混凝土联锁块、3 cm 厚中粗砂垫层、48 cm 厚 6% 水泥稳定基层、20 cm 厚级配碎石底基层; 4) 雨水排水方案: 设置从堆场中心往四周 0.45%~0.50% 纵坡和横坡, 散排汇入周边道路雨水口。

2.2 堆载预压方案

场地开挖平整至 5.8 m 后, 回填 70 cm 中粗砂垫层; 再插间距 1.0 m 的塑料排水板, 正方形布置, 插穿软土层, 处理深度约 8.0~18.0 m; 然后进行分级堆载, 堆载厚度 5.0 m。

地基处理要求: 1) 平均固结度不小于 85% 方可卸载; 2) 堆载料采用中细砂, 含泥量不大于 10%, 密度 1.7 g/cm³, 施工荷载 85 kPa; 3) 卸载后场地平整碾压至交工高程 6.06 m; 4) 检验项目包括加固后钻静力触探试验孔、荷载板试验, 交工面承载力不小于 120 kPa。

2015 年 1 月 5 日开始堆载, 2015 年 2 月 17 日

满载, 2015 年 5 月 31 日开始卸载, 2015 年 6 月底卸载完毕。采用静力触探试验进行堆载预压加固效果检测, 加固后土体比贯入阻力 P_s 随土层深度变化见图 2。加固后淤泥 $P_s = 0.614$ MPa, 淤泥质土 $P_s = 0.670$ MPa。

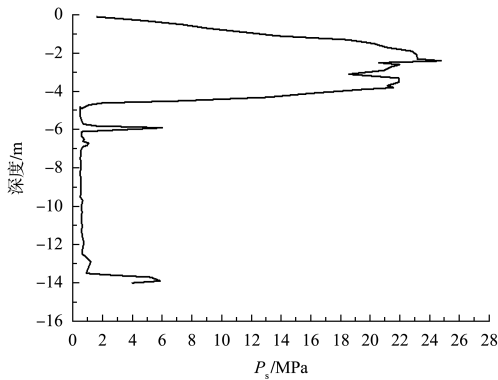


图 2 加固后土体比贯入阻力 P_s -深度分布

3 堆场沉降观测及分析

3.1 堆场沉降

当堆场的尺寸较小时, 1 号和 2 号堆场呈现典型的盆形状沉降(图 3), 与其他项目类似^[4]。3、4 号堆场面积远大于 1、2 号堆场, 由于面积巨大, 使用单位现场根据货物实际情况分块使用, 3 号堆场沿长度方向一分为二, 4 号堆场沿中心分为 4 块。4 号堆场沉降沿宽度、长度分布见图 4, 最大沉降约 390 mm, 沿宽度方向呈 U 形, 沿长度方向呈 W 形, 三维空间呈马鞍形状, 起伏较大。3 号与 4 号堆场沉降分布规律类似。当长度超过 150 m 时, 堆场的尺寸效应明显, 堆场空间变形复杂, 呈现出马鞍形、波浪形, 沿堆场长度方向表现显著。

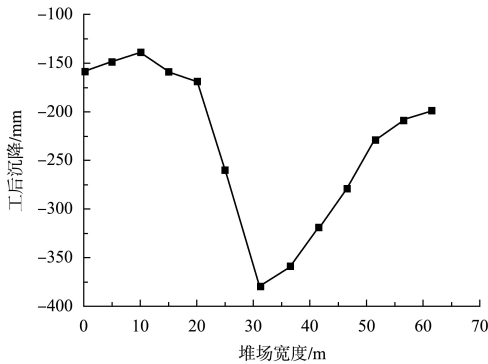
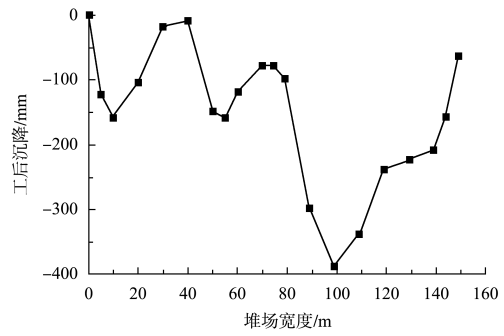
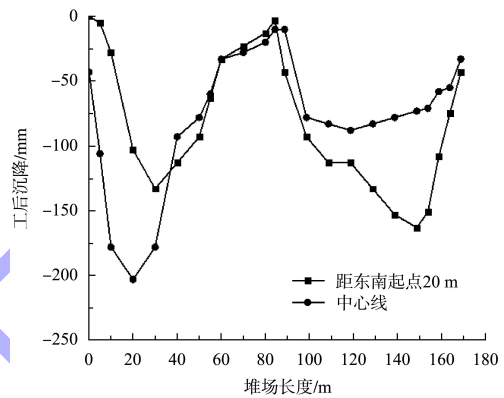


图 3 1 号堆场沿宽度方向工后沉降



a) 沿宽度方向(距东南向起点 30 m)



b) 沿长度方向

图 4 4 号堆场工后沉降

项目竣工后, 进行了 10 期沉降观测。2020 年 12 月第 10 期报告显示, 堆场工后沉降已趋于稳定, 大部分堆场新增沉降趋于零。

3.2 工后沉降影响因素分析

1) 原设计为集装箱码头堆场, 受经济周期、市场环境等因素影响, 为提高堆场的使用率和周转率, 改变堆场的用途, 部分时段存放散货和件杂货。散货主要为白糖、化肥等, 散货的堆放一般采用中间高四周低的方式, 堆载面积较大, 且存放周期较长。现场调查发现一些散货存放时间超过 6 个月, 散货堆放的地方极易产生盆形沉降。4 号堆场左侧堆放热轧钢卷, 右侧堆放白糖, 堆货见图 5。

2) 超载比较严重, 现场测量数据显示化肥堆载最高点货物高度为 10 m, 化肥密度按 1.0 g/cm^3 计, 荷载约 100 kPa, 超设计值 1 倍。该部分荷载是造成工后沉降过大的主要原因。



图 5 4号堆场货物存放现状

3) 钢材等荷载局部超限, 单卷热轧钢材 18.530 t, 接地面积宽 0.2~0.3 m, 局部线荷载约 620~920 kPa, 现场调查显示这些钢材存放 1~3 月, 堆载时间较短, 此荷载导致堆场局部连锁砖破损, 地基土产生塑性变形, 堆场局部沉降较大, 呈波浪形。

4) 项目所在地受台风影响, 降雨量非常大, 堆场设计纵横坡为 0.45%~0.50%, 堆场四周的道路纵坡为平坡, 横坡为 0.50%, 堆场中心高于四

周道路约 12~26 cm, 暴雨时排水不畅, 堆场发生沉降后积水难排除, 面积越大排水越困难, 为此现场设置临时排水沟, 但积水仍难以排除干净, 4号堆场积水见图 6。堆场一旦发生盆形沉降, 中心点高程低于四周道路高程, 积水只能通过机械作业或自然蒸发清除, 土体饱和密度增加, 地下水位以上土体受下渗积水影响发生软化, 土体强度降低, 沉降进一步加大。



图 6 4号堆场现状积水

4 处理措施

4.1 制定科学的堆场管理制度

堆场的工后沉降过大主要原因在于堆场的荷载过大, 远超过设计允许值。因此在堆场的使用过程中, 应制定科学的管理制度, 加强监督力度, 严禁超载。完善堆场的保养和养护细则, 当堆场出现连锁砖破损、积水时及时处理。

4.2 合理设计堆场

1) 堆场的荷载是影响堆场使用、工后沉降的主要因素。在项目前期阶段应加强项目定位和需求分析, 考虑实际运营过程中堆场使用功能会发生改变的情况, 合理确定设计标准。现行 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[5]不同堆场的荷载标准值差别较大, 散货堆场的荷载标准值 50~100 kPa, 远大于

集装箱堆场荷载标准值 20~60 kPa。设计时应考虑该部分影响, 采取较高荷载标准。

2) 本工程工后沉降尺寸效应显著, 堆场面积越大工后沉降越复杂, 堆场沉降起伏较大, 后期病害较多, 平整度差, 严重影响正常的生产作业, 同时后期维修工程量大, 管理难度大。应根据实际需求合理确定堆场面积。

3) 堆场须重视排水设计。湛江雨季时间长, 造成堆场长时间积水, 积水最深超过 30 cm, 使用单位为了防止雨水浸泡货物, 在堆场上敷设临时支架和增挖临时排水沟等措施, 不间断采用机械或人工清除积水, 大大降低了堆场的使用效率。堆场坡度应结合园区路网综合考虑, 建议采用 CJJ 193—2012《城市道路路线设计规范》^[6]技术标

准,使道路纵坡不小于0.3%,有条件不小于0.5%,道路横坡不小1.0%,大面积堆场应采用多坡率的设计方案,加大堆场坡度,纵、横坡不小1.0%,有条件预留排水口,通过管道与排水管网衔接。

4.3 优化堆场软基处理方案

湛江地区软土分布广泛,软土承载力低,压缩性高^[7-8],大部分为欠固结土,在堆载预压荷载作用下完成大部分主固结沉降,工程竣工后,在后期集装箱或散货堆载荷载^[9]作用下会产生次固结沉降,上部土体受水浸泡或超载作用下产生塑性变形,这些因素影响将导致较大的工后沉降和不均匀沉降。

在深度20 m范围处附加压应力范围为91~98 kPa,不同宽度堆场荷载引起的附加压应力差别并不显著,地基土处于均布受压状态,这是大部分软土的分布范围;深度超20 m,不同宽度堆场的附加压应力差异较大,然而超过该深度,地层处于压缩模量大、压缩性低的土层,该部分荷载引起的变形较小。不同宽度堆场在荷载 $P(100\text{ kPa})$ 作用下附加压应力见图7,主要软土层参数见表2。

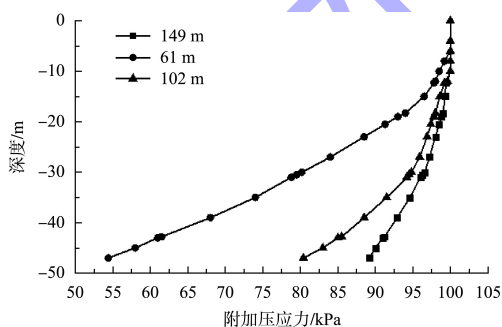


图7 不同宽度堆场在荷载 $P(100\text{ kPa})$ 作用下附加压应力

表2 软土层压缩数据

压力 P/kPa	孔隙比 e	
	淤泥	淤泥质土
0	1.639	1.242
50	1.508	1.129
100	1.414	1.060
200	1.278	0.948
400	1.115	0.827

上述分析可知,工后沉降主要由附加压应力所在区域的软土在超载作用下发生的变形,沉降观测资料显示4个堆场的最大沉降约400 mm,与改进的高木俊介法计算结果基本一致,工后沉降计算结果见表3。

表3 堆场100 kPa工后沉降计算数据

时间/d	固结度/ $\%$	工后沉降/mm
20	0.89	430
30	0.91	460
40	0.92	490
50	0.94	510
60	0.95	530

1) 在堆场面积较大的情况下,堆场中心由于装卸方便等因素,使用频率远高于堆场四周,在大面积堆载作用下,尤其散货堆载时,其荷载常呈三角形分布,中心点荷载远大于四周,鉴于上述情况,堆载预压施工时,增加中心点范围的内超载并延长堆载时间,可有效降低堆场工后沉降。

2) 李建忠^[10]相关研究表明延长堆载预压时间对土体后期强度增加有限。当软土埋深较浅时,深度约15~20 m范围,工期较短情况下,采用复合地基方案,如水泥搅拌桩、CFG桩、预应力管桩等方案,大面积堆场采用长短桩或加密中心处理范围内桩间距方案,均能改善下覆软土层的属性,提高堆场的承载能力并显著减小变形。

3) 当软土埋深大于20 m时,相关研究^[11]采用预应力管桩、CFG桩能提高堆场的承载力且工后变形较小,但工程造价较高;徐志飞^[12]在广州南沙滨河路工程中,采用堆载预压和水泥搅拌桩长短桩方案,先进行水泥搅拌桩施工后,插打塑料排水,复合地基承载力90 kPa。但由于先进行搅拌桩施工,其成桩质量一般,堆场的承载力高于道路工程,且后方堆场常采用吹填成形,土体的物理力学指标更差,大面积堆场采用二次处理方式,先进行堆场预压处理,待土体固结完毕后进行二次处理,短桩可采用水泥搅拌桩、CFG桩等方案,其相对于超载处理方案具有工期短、工后沉降小的优点,缺点是工序多、工程造价较高。

4.4 不均匀沉降处理

大面积堆场的不均匀沉降^[13]是堆场病害的主

要形式之一, 呈波浪形分布于堆场四周, 影响各种机械车辆行驶、作业。由于堆场的平整度差, 车辆的行驶过程中较颠簸, 轮胎的冲击力增加, 进一步加快了堆场连锁砖的破坏, 造成雨水下渗, 土体软化造成工后沉降增加, 周而复始, 堆场使用功能降低。汪日灯等^[14]分析重型流动荷载下堆场的地基的工作区深度约 4.37~5.50 m, 深度远大于一般公路路基的工作区, 工作深度区范围内主要受力结构为堆场铺面铺装, 铺面结构设计的不合理是堆场产生早期病害的主要原因。

随着交通水运工程的发展, 集装箱码头和散货码头的荷载呈增大的趋势, 重载作用下码头铺面结构^[15]设计愈发重要, 码头堆场受传统的强基薄面理念设计影响, 路面结构层厚度较小, 早期病害较多。公路路面结构设计也经历类似的发展过程, 逐渐发展到现在的长寿路面结构理念^[16], 面层厚度基本都大幅度增加, 出现柔性基层结构组合, 路面早期病害大幅度减少, 路面使用寿命得到延长。大多数码头堆场面层采用 10 cm 厚的预制连锁砖, 公路沥青路面平均厚度约 16~18 cm, 水泥混凝土路面结构平均厚度约 22~28 cm, 堆场面层厚度远小于高速公路的路面结构厚度, 而堆场流动荷载正面吊满载 ($P=300\sim 900\text{ kN}$) 远大于公路设计荷载 ($P=100\text{ kN}$)。建议重载堆场采用厚度较大的沥青混凝土、水泥混凝土路面结构, 提高堆场的整体性, 更好地分散荷载, 使整个堆场均匀受力, 有效改善堆场的不均匀沉降。雨水沿破损的连锁砖下渗造成水泥稳定土基层浸泡, 基层强度降低, 是造成预制连锁砖铺面结构早期病害的主要原因, 建议采用贫混凝土基层或者透水基层, 完善相关排水设施, 同时采用提高连锁块厚度和强度、施工质量等措施, 以改善堆场的受力状况, 并减小不均匀沉降。

5 结语

1) 堆场的工后沉降, 当堆场尺寸较小时, 堆场变形三维空间呈盆形状, 盆形四周有小的波浪状; 当堆场长宽尺寸超过 150 m 时, 尺寸效应明显, 沿宽度方法呈 U 形, 沿长度方向呈 W 形, 堆

场的空间变形复杂, 三维空间呈现马鞍形、波浪形, 沿堆场长度方向表现尤为显著。

2) 堆场用途受经济周期、市场环境等因素影响, 改变堆场用途后, 不合理的使用造成堆场的严重超载, 大面积超载是堆场工后沉降的主要原因, 堆场坡度较小, 排水不畅, 积水的存在进一步加剧了堆场的工后沉降。局部荷载远超原有设计值, 造成堆场部分连锁砖破损, 地基土产生塑性变形, 堆场局部沉陷较大, 呈波浪形。

3) 应制定科学的堆场管理制度, 加强监督力度, 严禁超载。完善堆场的保养和养护细则, 对损坏的堆场及时开展维修, 防止堆场积水和损坏加大。

4) 为减少堆场后期工后沉降, 设计阶段应考虑堆场后期的使用荷载、大面积堆场工后沉降的尺寸效应、排水设计等因素, 优化相关设计。

5) 大面积堆场尤其是使用频率较高和使用时间较长的中心区域, 采取提高堆载荷载和延长堆载时间、水泥搅拌桩等复合地基、二次处理的长短桩等方案, 能有效减小堆场工后沉降, 解决盆形沉降, 防止堆场积水, 改善堆场的使用状况, 提高生产效率。

6) 重载堆场采用厚度较大的沥青混凝土和水泥混凝土面层、贫混凝土基层或透水基层等措施, 可有效减小堆场的不均匀沉降。

参考文献:

- [1] 颜祖鹏. 长江边马钢原料堆场基土固结沉降变形规律研究[D]. 桂林: 桂林工业大学, 2023.
- [2] 潘宣何, 刘晓平, 陈中秋. 岳阳新港集装箱堆场沉降观测试验及预测分析[C]//中国力学学会. 第 18 届全国结构工程学术会议论文集第 II 册. 广州: [出版者不详], 2009: 511-514.
- [3] 朱鹏宇. 上海港外高桥港区地基处理后堆场沉降[J]. 水运工程, 2009(6): 121-125.
- [4] 王连才. 天津港港区堆场地基承载力分析[J]. 水道港口, 2002, 23(S1): 222-225.
- [5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.