

· 地基与基础 ·



堆场改造沉降计算

高玉杰, 梁超, 刘强

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对煤炭、矿石等散货堆场改造为全自动化集装箱堆场, 区域不同使用荷载大小不等、堆货时间长短不一, 使得场地条件差别较大等问题, 为满足全自动化集装箱堆场使用要求, 进行了地基的沉降计算研究, 分别采用分层总和法、考虑应力历史的沉降计算法和应力面积法进行沉降计算, 并逐孔考虑其位置、地层分布及前期堆料荷载、堆料使用年限等条件。结果表明: 堆场改造地基中, 均载条件下考虑应力历史的沉降计算更符合实际。使用均布荷载条件下采用考虑应力历史的沉降计算法计算改造堆场的地基沉降, 具有较好的指导意义, 可为堆场改造中自动化集装箱堆场基础设计提供参考。

关键词: 散货; 集装箱; 堆场改造; 沉降计算

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0209-06

Settlement calculation for storage yard renovation

GAO Yujie, LIANG Chao, LIU Qiang

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: To the transformation of coal, ore and other bulk cargo yards into fully automated container yard, with varying load sizes and stacking times in different regions, resulting in significant differences in site conditions, a study is conducted on the settlement calculation of the foundation to meet the requirements for the use of fully automated container yards. The study adopts the layer-wise summation method, the settlement calculation method considering stress history, and the stress area method for settlement analysis, and considers the location, stratigraphic distribution, and previous stacking load, stacking service life, and other conditions for each hole. The results indicate that in the foundation renovation of the yard, the settlement calculation method considering stress history under uniform load conditions provides a more accurate representation of actual conditions. The application of the settlement calculation method considering stress history under uniform load conditions to calculate the foundation settlement of the renovated yard has good guiding significance, and can provide reference for the foundation design of automated container yards in yard renovation.

Keywords: bulk cargo; container; yard renovation; settlement calculation

上海港罗泾作业区由罗泾一期煤炭码头及堆场、罗泾二期矿石码头及堆场、钢杂码头及堆场、扩建煤炭码头及堆场组成。其中, 罗泾一期工程于 1997 年建成投产, 罗泾二期工程于 2007 年建成投产。应上海市战略安排, 上海港罗泾作业区罗泾一期煤炭堆场、罗泾二期矿石、扩建煤炭堆

场及堆场周边道路、绿化等区域功能调整, 按全自动化集装箱码头作业模式要求进行相应改造。煤炭堆场的使用荷载 150 kPa, 矿石堆场使用荷载 300 kPa, 堆场周边道路、绿化等区域使用荷载 0~20 kPa。改造的全自动化集装箱堆场需要依据原煤炭及矿石堆场建设之初的地基处理方式及运营

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 高玉洁(1974—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事地基处理专业工作。

使用情况评价地基的适应性以及选择地基加固方式。根据地质情况表层覆盖土为杂填土及粉土,厚度约十几米,有足够的条件形成硬壳,地基的承载力不是主要关注点,地基的沉降分析是整个地基处理方式选择的关键。

针对改造堆场作用区域不同使用荷载大小不等、场地不同位置堆货时间长短不一等原因,造成地基条件差别较大等问题,要满足全自动化集装箱堆场使用要求,本文进行了地基的沉降计算研究,采用每个地质钻孔逐孔依据其位置、地层分布、前期堆料荷载以及堆料使用年限,在集装箱使用荷载下利用各种沉降计算方法进行沉降计算,并对结果进行对比分析,得出各种沉降计算的特性,并建议改造堆场的沉降计算不能忽视改造前荷载的作用,应考虑其应力历史的影响,采用考虑应力历史的沉降算法更符合实际,旨在为地基加固的经济性和可靠性提供依据。

1 沉降计算方法

地基沉降计算包括两方面内容:一是最终沉降量,二是沉降的时间过程。一般地基的最终沉降量也就是它的最大的沉降量,是工程中首先最需要关心的问题。目前众多沉降算法中应用最广泛的仍是分层总和法,另外,还发展了考虑不同变形特性的分阶段地基变形算法以及考虑应力历史的沉降算法等。

1.1 分层总和法计算最终沉降量

分层总和法是假定地基土为直线变形体,在外荷载作用下的变形只发生在有限厚度的范围内,将压缩层厚度内的地基土分层,分别求出各分层的应力,然后用土的应力-应变关系式求出各分层的变形量总和即为地基的沉降量。分层总和法又分为单向应力和三向应力。单向应力分层总和法只需求出竖向应力 σ_z ,然后用室内压缩曲线或相应的压缩性指标 a 或 E_s 分层求算变形量再加起来;三向应力分层总和法则需要三向应力和,用

广义胡克定律或三向应力条件下的压缩曲线分层计算竖向变形量再加起来。工程中应用最广泛的是单向应力分层总和法。

分层总和法存在问题^[1]: 1) 分层总和用弹性理论求算地基中的竖向应力,用单向压缩的 $e-p$ 曲线求变形,这与实际地基受力情况不符; 2) 对于变形指标,其试验条件决定了指标结果,而使用中的选择又影响到计算结果; 3) 压缩层厚度确定方法没有严格的理论依据,是半经验的方法,其正确性只能从工程实测中得到验证。

以上问题必然使沉降计算值与工程中的实测值不完全相符,理论上解决这些问题较为困难,通过不同工程的实测资料积累和对比,采用合适的经验修正系数,以满足工程的精度要求,进而提出了应力面积法计算最终沉降量。

1.2 应力面积法计算最终沉降量

计算地基变形时,地基内的应力分布可采用各向同性均质线性变形理论。与同分层总和法相比,应力面积法主要有以下3个特点:

1) 由于附加应力沿深度的分布呈非线性,采用精确的应力面积概念,一般可以按地基土的天然层面划分,使计算工作得以简化。

2) 地基沉降计算深度 Z_n 的确定方法较分层总和法更为合理。

3) 提出沉降计算经验系数 ϕ_s ,由于 ϕ_s 是从大量的工程实际沉降观测资料中统计分析得出,综合反映了许多因素的影响,更接近实际。

应力面积法也是基于同分层总和法一样的基本假设,实质上是一种简化并修正的分层总和法。

1.3 考虑应力历史的沉降计算方法

分层总和法根据 $e-p$ 曲线进行沉降计算,根据 $e-\log p$ 曲线进行沉降计算,直观反映出前期固结压力,从而可以清楚地考虑地基的应力历史对沉降的影响。

1.4 考虑不同变形阶段的沉降计算方法

从机理上分析,饱和黏性土地基的最终沉降

由 3 部分组成的, 表现为 3 种类型的变形特征, 分别为瞬时沉降 S_d 、固结沉降 S_e 以及次固结沉降 S_s , 且满足如下关系^[2]:

$$S = S_d + S_e + S_s \quad (1)$$

式中: S 为地基最终沉降量。

固结度计算如下:

$$U = \frac{S_{e,t}}{S_e} \text{ 或 } S_{e,t} = US_e \quad (2)$$

式中: U 为地基的固结度; $S_{e,t}$ 为地基在某一时刻 t 的固结沉降。

当 $\bar{U}_z > 30\%$, 可按式简化:

$$\bar{U}_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 T_v}{4}\right) \quad (3)$$

式中: $\bar{U}_z$ 为竖向固结度; T_v 为竖向固结时间因数。

次固结沉降计算如下:

$$S_s = \frac{1}{1+e_0} C_a h \log \frac{t}{t_1} \quad (4)$$

式中: t_1 为相当于主固结度达到 100% 的时间; t 为需要计算次固结的时间; C_a 为次固结系数; e_0 为淤泥初始孔隙比; h 为软黏土层厚度。

1.5 沉降计算方法分析

国内常用沉降计算的方法基本上是上述 4 种方法, 但很少有规范明确每种方法的适用性及在港口工程建设中的应用。通过大量工程实践认为

分层总和法、应力面积法、考虑应力历史的沉降计算方法均基于弹性变形理论进行估算, 也是考虑不同变形阶段的沉降计算方法中计算固结沉降的常用方法, 固结沉降是针对饱和黏性土而言。对于砂土、粉土和非饱和黏性土分层总和法、应力面积法计算最终沉降得到的可以认为是瞬时沉降。因为考虑不同变形阶段的沉降计算方法对于砂性土、粉土和非饱和黏性土中, 瞬时沉降占主要比例, 对饱和黏性土而言, 固结沉降占主要比例, 如果饱和黏性土中有机质含量很高, 次固结沉降所占比例也很大。由散货堆场改造为集装箱堆场, 需选用合理的沉降计算方法, 保证基础设计及地基处理方式的经济性和可靠性。

2 沉降计算

2.1 集装箱堆场荷载分析

集装箱堆场的荷载有两种, 一是集装箱龙门起重机荷载和箱角荷载以集中荷载计, 另一种为堆货荷载以均载计。分析基础沉降时通常分别采用此两种荷载进行计算。

2.1.1 自动化轨道吊最大荷载

轨距 37 m, 基距 16.4 m, 轮数 6×4, 轮距 1.05 m, 台车间距 1.4 m, 工作状态轮压 290 kN/轮 (风速 20 m/s), 非工作状态轮压 335 kN/轮 (风速 55 m/s), 轨道吊的轮系布置见图 1。

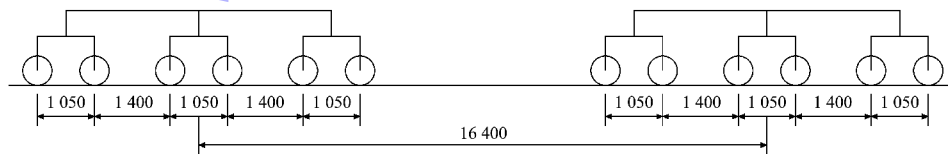


图 1 轨道吊轮系布置 (单位: mm)

Fig. 1 Layout of track hoisting wheel system (unit: mm)

2.1.2 集装箱箱角荷载

该工程集装箱主要为载质量较大的内贸集装箱, 堆高 6 层时箱角接地应力按 11.10 N/mm² 考虑, 多列箱箱角荷载标准值为 1 280 kN。

2.1.3 集装箱堆货均载

堆场区堆货均载: ≥ 60 kPa。

2.2 场地条件

除利旧建筑外改造堆场现状分为 3 个区, 分区①为原矿石堆场区域; 分区②为原煤炭堆场区域; 分区③为原矿石堆场、煤炭堆场周边区域, 主要为绿化区域、混凝土铺面区域。分区位置见图 2。

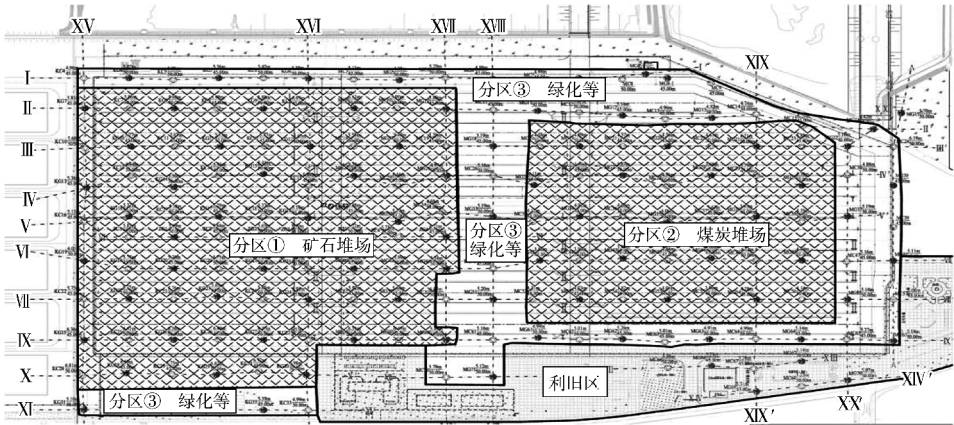


图 2 现状场地分区
Fig. 2 Current site zoning

根据地质勘察成果，场地顶部主要分布第①_{1,2}层灰黄-灰色砂质粉土为冲填土，含云母，夹粉砂、黏性土，土质不均匀，该层主要位于矿石堆场区域；第①_{1,3}层灰黄-灰砂质粉土为粉煤灰，含云母，夹粉砂、黏性土，土质不均匀，该层主要

位于煤炭堆场区域；第②₃层灰色砂质粉土，土质均匀，场地内普遍分布。其下两层为第③层灰色淤泥质粉质黏土和第④层灰色淤泥质黏土，场地内普遍分布。再往下为第⑤层黏土或粉质黏土，场地内普遍分布。各土层的物理力学参数推荐值见表 1。

表 1 土层物理力学参数
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

序号	土层名称	压缩模量 E_s /MPa	密度 ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	固结系数 C_α /($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	C_α	e_0	回弹指数 C_s	压缩指数 C_e
① _{1,2}	砂质粉土(冲填土)	8.90	1.85	0.023 60	0	0.836	0.031	0.268
① _{1,3}	砂质粉土(粉煤灰)	8.27	1.81	0.021 60	0	0.912	0.031	0.268
② ₃	砂质粉土	9.21	1.88	0.031 10	0	0.791	0.031	0.268
③	淤泥质粉质黏土	3.09	1.77	0.005 27	0.005 22	1.107	0.047	0.385
④	淤泥质黏土	2.08	1.69	0.001 11	0.015 68	1.367	0.055	0.423
⑤ ₁	黏土	2.82	1.76	0.001 00	0	1.140	0.054	0.399
⑤ _{3t}	砂质粉土	10.4	1.85	0.034 60	0	0.834	0.031	0.268
⑤ ₃	粉质黏土	4.41	1.83	0.004 24	0	0.944	0.031	0.268
⑤ _{3夹}	粉质黏土夹粉性土	5.43	1.84	0.018 30	0	0.922	0.031	0.268

2.3 沉降计算结果

2.3.1 计算的前提条件

1) 根据相关竣工图及运营资料，罗泾一期煤炭堆场、三角地煤炭堆场和二期矿石堆场场地布置及使用荷载各不相同，但均需改造为全自动化集装箱堆场。

2) 罗泾一期煤炭堆场、三角地煤炭堆场和二期矿石堆场建设及使用年限不同，分别于 1997、

2010 和 2007 年建成投产，使用了 25、12、15 a 不等。

2.3.2 计算结果

根据矿石堆场、煤堆场、堆场周边绿化分别选取钻孔，逐孔进行大面积均布荷载和集中荷载作用下沉降计算。大面积均布荷载利用分层总和法及考虑应力历史的沉降法逐孔计算。集中荷载作用下轨道梁、条基沉降计算利用应力面积法逐

孔计算。以上的计算按照考虑不同变形阶段的沉降分类属于瞬时沉降和固结沉降。饱和黏性土③、④土层按照式(2)计算次固结沉降, 再利用式(1)

计算③、④土层的固结度, 30 a 固结度 $U = 1$, 30 a 工后沉降计算结果见表 2 及图 3。

表 2 沉降计算结果对比
Tab. 2 Comparison of settlement calculation results

场地 分区	分层总和法(均布荷载)			考虑应力历史的沉降法(均布荷载)			应力面积法(集中荷载)		次固结 沉降/ cm
	表层 (粉土) 沉降/cm	深层 (淤泥质土) 沉降/cm	合计/ cm	表层 (粉土) 沉降/cm	深层 (淤泥质土) 沉降/cm	合计/ cm	轨道梁 基础沉降/ cm	堆箱条 基沉降/ cm	
	$\textcircled{1}_{1-2} + \textcircled{1}_{1-3} + \textcircled{2}_3$	$\textcircled{3} + \textcircled{4}$	$\textcircled{1}_{1-2} + \textcircled{1}_{1-3} + \textcircled{2}_3 + \textcircled{3} + \textcircled{4}$	$\textcircled{1}_{1-2} + \textcircled{1}_{1-3} + \textcircled{2}_3$	$\textcircled{3} + \textcircled{4}$	$\textcircled{1}_{1-2} + \textcircled{1}_{1-3} + \textcircled{2}_3 + \textcircled{3} + \textcircled{4}$	$\textcircled{1}_{1-2} + \textcircled{1}_{1-3} + \textcircled{2}_3 + \textcircled{3} + \textcircled{4}$	$\textcircled{1}_{1-2} + \textcircled{1}_{1-3} + \textcircled{2}_3 + \textcircled{3} + \textcircled{4}$	
分区①原矿石堆场区	4.05	15.08	19.13	9.33	13.01	22.34	2.4	5.2	6.82
分区②原煤炭堆场区	6.04	28.72	34.76	7.84	16.34	24.18	2.9	6.3	8.46
分区③原矿石堆场、煤炭堆场周边绿化区	3.71	23.45	27.16	29.17	42.61	71.78	3.1	6.8	9.22

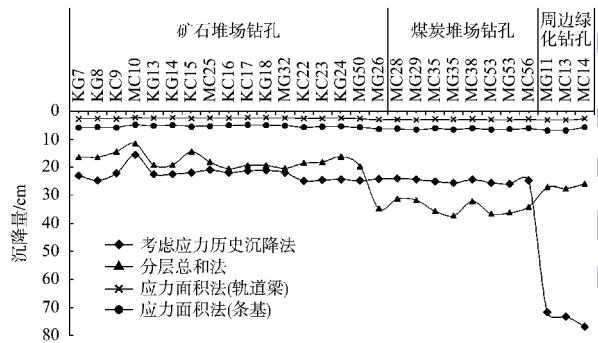


图 3 沉降计算结果对比
Fig. 3 Comparison of settlement calculation results

从计算结果图表分析可知: 1) 应力面积法适用于矩形基础及条基等浅基础的沉降计算, 计算结果远小于大面积均载条件下的沉降量。2) 大面积均载条件下的分层总和法与考虑应力历史的沉降算法相比, 在大的应力历史背景下(矿石堆场 300 kPa)两种计算结果相当。3) 从图 3 分层总和法沉降计算曲线看, 在土层厚度分布相对的条件 下堆场改造后原煤堆场区(150 kPa)的工后沉降比 周边绿化区(0 kPa)大。由此可知抛开先期固结压 力的影响计算沉降的结果偏差较大。4) 表层粉土 ($\textcircled{1}_{1-2} + \textcircled{1}_{1-3} + \textcircled{2}_3$) 的沉降为瞬时沉降, 可以通过地 基加固的方式来消除, 改造后堆场的沉降主要为

软黏土的沉降。

3 结论

1) 改造堆场经过一定时间和荷重的压载, 沉降计算时不能忽视先期的压载作用, 选用考虑应力历史的沉降计算方法更符合实际。压缩指数和回弹指数的试验为特殊试验, 改造堆场地质勘察阶段应提前策划, 提供可靠性土体参数, 确保计算结果更加精确。

2) 由于集中荷载作用在有限宽度和长度的基础上, 附加应力沿土层深度逐渐衰减, 应力面积法集中荷载计算的沉降量明显小于大面积均布荷载计算的沉降。堆场内条基及集装箱龙门起重机荷载基础相距较小, 一般在 30 m 范围都有堆箱和设备运行, 相邻荷载的影响不容忽视。由于相邻荷载的叠加作用, 集装箱堆场的沉降分析使用均载更符合实际, 而集中荷载可以用于基础结构及承载力的验算。

3) 改造后堆场的沉降主要为软黏土的沉降, 通过地基加固表层形成一定厚度的硬壳, 通过硬壳层的壳体效应、封闭作用以及对沉降的滞后作用, 使得工程沉降控制在合理范围。

参考文献：

[1] 高大钊,袁聚云.土质学与土力学[M].3版.北京:人民交通出版社,2006:86-107.
GAO D Z, YUAN J Y. Soil science and soil mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2006: 86-107.

[2] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996:169-193.
QIAN J H, YIN Z Z. Geotechnical principle and calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996: 169-193.

[3] JOSEPH E. BOWLES P E. Foundation analysis and design[M].5th ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997: 284-342.

[4] 肖熠,姜雄.自动化集装箱堆场中复杂应力历史地基的工后沉降预测[J].水运工程,2025(3):139-144.
XIAO Y,JIANG X. Post-construction settlement prediction of ground with complex stress history in automated container yard [J]. Port & waterway engineering, 2025(3): 139-144.

[5] 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.
ZHU P Y. Yard settlement after ground treatment in Shanghai Port Waigaoqiao port area[J]. Port & waterway engineering, 2009(6): 121-125.

[6] 郑建国,化建新.工程地质手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2018.
ZHENG J G, HUA J X. Geological engineering handbook[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.

[7] 港口工程荷载规范:JTS 144-1—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.
Load code forharbour engineering: JTS 144-1-2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.

[8] 港口道路与堆场设计规范:JTS 168—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
Design code of road and storage yard for portarea: JTS 168-2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.

[9] 自动化集装箱码头设计规范:JTS/T 174—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
Design code of automated containerterminal: JTS/T 174-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

[10] 董剑,郑晓国.软土地基上硬壳层效应分析及其工程应用[J].路基工程,2006(4):7-9.
DONG J, ZHENG X G. Effect analysis and applied to engineering for harden surface layer on soft soil ground[J]. Subgrade engineering, 2006(4): 7-9.

(本文编辑 赵娟)

· 消 息 ·

惠州大亚湾港湾码头项目通过交工验收

2025 年 10 月 10 日，四航局承建的广东惠州大亚湾港湾码头项目通过交工验收。该项目位于惠州市大亚湾石化工业区东南部，主要建设内容为 2 个 1 200 t 工作船泊位、1 座用于消防车上船的斜坡道、2 个快速救援艇泊位、接岸引桥以及相应的配套设施。该项目的开港运营，将大幅提升惠州市海警和海事部门的应急响应速度，显著提高石化区内的消防应急救援能力，为大亚湾石化区的安全生产提供坚实保障。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202511/t20251125_223993.html(2025-10-30)