



自动化集装箱堆场中 复杂应力历史地基的工后沉降预测*

肖熠, 姜雄

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 在复杂应力历史场地上建设自动化集装箱堆场存在沉降控制标准高与工后沉降预测困难之间的矛盾。分别采用不考虑前期固结应力的 $e-p$ (孔隙比-压力) 曲线法和考虑前期固结应力的 $e-lgp$ 曲线法进行沉降计算, 并对比场地前期陆域形成、地基处理设计资料。结果表明, 在超固结土地基中, $e-lgp$ 曲线法计算得到的工后沉降远小于 $e-p$ 曲线法, 且与前期资料推算得到的沉降量更为接近。采用 $e-lgp$ 曲线法计算超固结地基沉降具有较好的指导意义, 可为复杂应力地基背景的自动化集装箱堆场基础设计提供参考。

关键词: 自动化集装箱堆场; 应力历史; 工后沉降预测

中图分类号: U653.7; U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0139-06

Post-construction settlement prediction of ground with complex stress history in automated container yard

XIAO Yi, JIANG Xiong

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: There is a contradiction between high settlement control standards and difficulty in predicting post-construction settlement when constructing automated container yards on complex stress historical sites. We use the $e-p$ (porosity ratio-pressure) curve method without considering pre-consolidation stress and the $e-lgp$ curve method considering pre-consolidation stress for settlement calculation, and compare design data of land formation and foundation treatment in the early stage of the site. The results show that in the super consolidated soil foundation, the post-construction settlement calculated by the $e-lgp$ curve method is much smaller than that calculated by the $e-p$ curve method, and is closer to the settlement calculated by the previous data. The use of the $e-lgp$ curve method to calculate the settlement of overconsolidated foundations has good guiding significance and can provide reference for the design of automated container yard foundations with complex stress foundation backgrounds.

Keywords: automated container yard; stress history; post-construction settlement prediction

随着集装箱堆场自动化技术的日益成熟, 堆场全自动操作模式在越来越多的集装箱码头得到运用。相较于传统人工操作堆场, 自动化集装箱

堆场对场地沉降更为敏感。在进行工程设计时, 准确推算堆场使用期沉降, 合理选择基础设施的基础形式, 对工程造价影响非常大。以堆场龙门

收稿日期: 2024-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200)

作者简介: 肖熠(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程陆域形成、地基处理及道路堆场设计。

吊轨道基础为例，采用桩基形式虽可基本杜绝使用期沉降的发生，减少轨道维护量^[1]，但其投资高昂；采用浅基础可节约投资，但仅可用于工后沉降小的地基条件中^[2-3]。因此准确推算集装箱堆场工后沉降，对指导设计选取更为经济合理的基础形式具有重要意义。

沉降计算为土力学研究的传统问题，大面积堆载场地常规的沉降计算方法有压缩模量法、 $e-p$ (孔隙比-压力)曲线法、 $e-lgp$ 曲线法等^[4]。目前国内工程界在计算沉降时主要采用压缩模量法和 $e-p$ 曲线法，这两种方法可较为准确推算正常固结和欠固结地基的沉降；但对于超固结地基，这两种方法往往存在计算结果偏大的问题^[5]。 $e-lgp$ 曲线法考虑了前期固结应力对地基沉降的影响，但因其计算繁琐，少有应用。

本文以盐田港区东作业区集装箱码头一期工程为例，提出采用 $e-lgp$ 曲线法计算预测复杂应力历史场地的工后沉降，指导堆场基础设施结构选型，为后续类似工程沉降计算提供参考。

1 工程概况

工程区域为深圳港盐田港区东作业区一期工程 20 万吨级集装箱码头后方堆场区，堆场集装箱

堆 6 过 7，根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[6]场地荷载按 60 kPa 均载考虑。

工程范围自 2008—2022 年近 15 年间分多次陆域回填形成陆域。如图 1 所示，对沉降最为敏感的自动化重箱堆场主要位于陆域形成 5[#]塘内。该区域通过围海吹填形成陆域，根据设计文件^[7]，施工水位以下吹填疏浚土，施工水位以上回填土石料，并通过堆载预压及强夯加固完成了地基处理，预压荷载 112 kPa。

根据工程地质资料，场地顶部土体为施工期回填、堆载预压、强夯补料形成的硬壳层，以碎石土为主，厚度 5~8 m。因前期已完成强夯加固，本文不考虑该层土的压缩沉降量，仅在计算时考虑其土体重力。其余土层自上而下分别为①₅ 灰色粉质黏土层、③₂₁ 中粗砂层、③₂ 灰-褐黄色粉质黏土、⑤ 残积土层，主要物理力学指标见表 1， $e-p$ 曲线见图 2。

表 1 土体的物理性质指标

Tab. 1 Physical property indexes of soil

土层名称	含水量 w/%	密度 ρ_l ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比 e	压缩指数 C_c
① ₅ 灰色粉质黏土	37.00	1 830	1.069	0.319
③ ₂₁ 中粗砂	18.33	1 960	0.615	-
③ ₂ 灰-褐黄色粉质黏土	28.18	1 910	0.835	-
⑤ 残积土	24.29	1 940	0.772	-

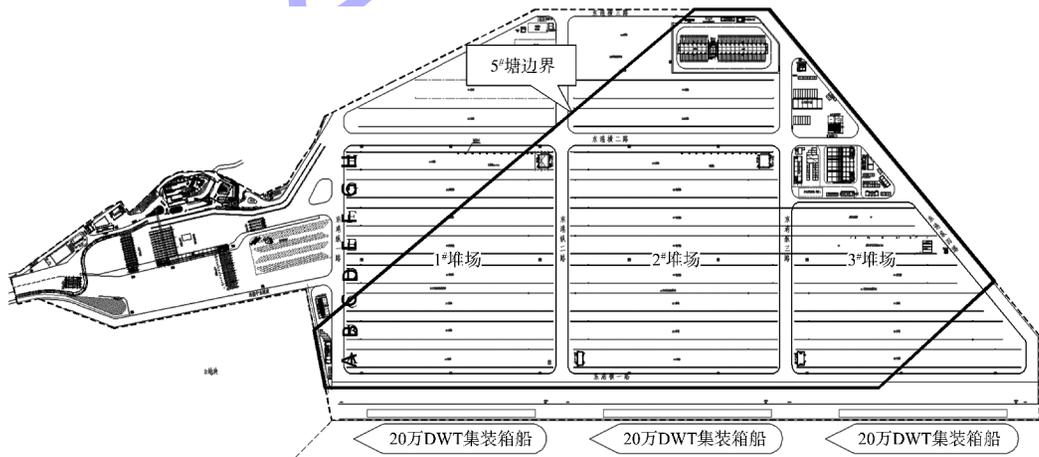
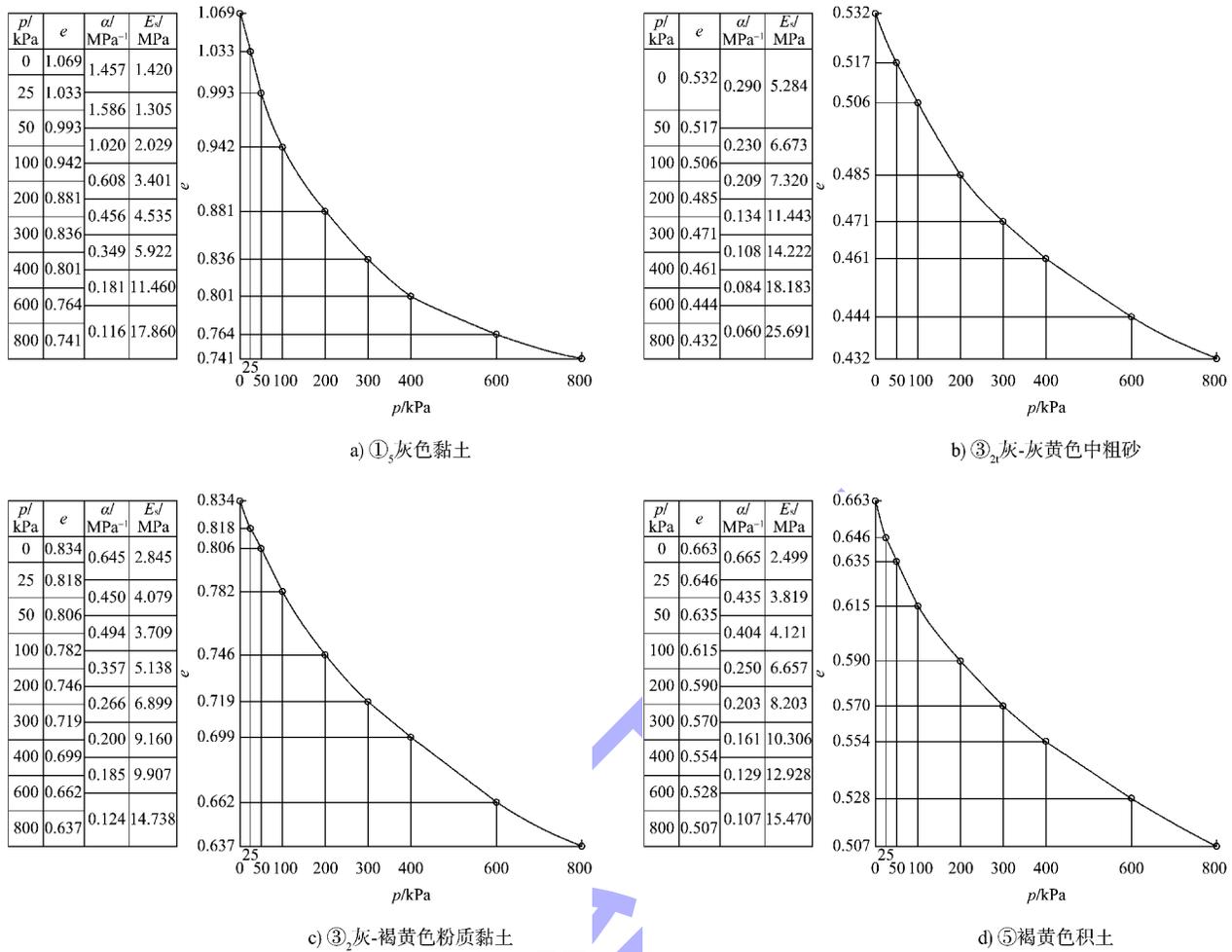


图 1 堆场与纳泥塘位置关系

Fig. 1 Position relationship between storage yard and sludge pond



注: α 为压缩系数, E_s 为压缩模量。

图 2 土体 $e-p$ 曲线
Fig. 2 $e-p$ curves of soil

2 沉降计算方法

本文采用考虑应力历史的 $e-lgp$ 曲线法对场地范围内的地质钻孔进行沉降计算, 并与工程设计常用的 $e-p$ 曲线法计算结果进行比较, 计算时附加应力为集装箱均载及道路面层结构自重荷载之和。其中集装箱堆载为 60 kPa 均载; 道路堆场面层结构重力密度取 20 kN/m³, 厚度为交工高程及钻孔口高程之差。

2.1 $e-p$ 曲线法

分层总和法公式为:

$$s = m_s \sum_{i=1}^n \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i \quad (1)$$

式中: s 为地基固结沉降量; h_i 为第 i 层土的分层

厚度; e_{1i} 、 e_{2i} 分别为第 i 层土自重应力、最终应力(自重应力和附加应力之和)对应的孔隙比, 根据土层 $e-p$ 曲线得到; m_s 为经验修正系数, 本工程①₃ 灰色粉质黏土层经验修正系数取 1.1, 其余土层经验修正系数取 1.0。

2.2 $e-lgp$ 曲线法

对于正常固结土(超固结比 $OCR \approx 1$), 考虑前期固结应力影响的分层总和公式为:

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{1 + e_{0i}} \left[C_{ci} \lg \left(\frac{p_{cz} + p_z}{p_{cz}} \right) \right]_i \quad (2)$$

式中: e_{0i} 为第 i 层土的天然孔隙比; C_{ci} 为第 i 层土的压缩指数, 由 $e-lgp$ 压缩曲线上求得; p_{cz} 为土层自重应力; p_z 为附加应力。

对于超固结土(OCR>1), 公式为:

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{1 + e_{oi}} \left[C_{si} \lg \left(\frac{p_c}{p_{cz}} \right)_i + C_{ci} \lg \left(\frac{p_{cz} + p_z}{p_c} \right)_i \right] \quad (p_z + p_{cz} > p_c)$$

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{1 + e_{oi}} \left[C_{si} \lg \left(\frac{p_{cz} + p_z}{p_{cz}} \right)_i \right] \quad (p_z + p_{cz} \leq p_c) \quad (3)$$

式中: C_{si} 为第*i*层土的回弹指数, 由*e*-lg*p*压缩曲线上求得; p_c 为分层土的先期固结压力。

对于欠固结土(OCR<1), 公式为:

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{1 + e_{oi}} \left[C_{ci} \lg \left(\frac{p_{cz} + p_z}{p_c} \right)_i \right] \quad (4)$$

地勘报告仅提供①₅灰色粉质黏土层的压缩指数, 因此仅针对该层土采用*e*-lg*p*法进行计算, 其余土层仍采用*e*-*p*曲线法。

另外, 本工程未开展土体回弹再压缩试验, 因此勘察报告中无回弹指数。金银富等^[8]对采用高岭土、伊利土与蒙脱石制成的不同混合土样开展一维压缩特性分析, 发现混合土样的压缩指数与回弹指数的比值介于6.1~9.1; 张帆舸等^[9]对泥炭土开展压缩及回弹变形规律研究, 发现压缩指数与回弹指数的比值平均为5.66。本文参考上述研究成果, 同时计算时出于保守考虑, ①₅灰色粉质黏土的压缩指数与回弹指数之比取5:1, 回弹指数取0.064。

地勘报告中给出的前期固结应力为平均值, 采用分层总和法计算时, 须根据埋深确定分层土的前期固结应力。参考设计文件, 吹填疏浚土顶高程为2.5 m, 堆载预压170 d后预估沉降量2.9 m。根据地勘报告, 5#塘内①₅灰色粉质黏土层顶高程平均为-0.73 m, ①₅灰色粉质黏土层及以下产生沉降已大于预估沉降量。分层土前期固结应力采用自重应力及堆载预压应力两部分组成, 本文计算时出于保守考虑, 取自重应力的90%、堆载预压应力的85%作为分层土体前期固结应力。

3 沉降计算结果

3.1 工后总沉降

分别采用*e*-*p*曲线法和*e*-lg*p*曲线法计算1C和2E箱区共计32个钻孔的沉降, 平均为0.291和0.130 m。从工后沉降计算结果平均值来看, 采用*e*-lg*p*曲线法得到的沉降小于采用常规*e*-*p*曲线法的计算值。

分别从两个箱区中选取相邻的两个钻孔进行分析, 钻孔位置、编号及土层分布见表2。

表2 自上向下土层分布
Tab.2 Soil layer distribution from top to bottom

钻孔 编号	厚度/m				
	碎石层	① ₅ 灰色粉 质黏土	③ ₂₁ 中粗砂	③ ₂ 灰-褐黄色 粉质黏土	⑤残 积土
LK105	6.50	9.10	1.20	6.2	1.50
LK127	6.00	7.70	4.70	6.0	-
LK194	5.00	10.90	1.20	-	2.70
LK195	8.10	8.30	2.00	-	2.20

根据JTS 168—2017《港口道路与堆场设计规范》^[10]关于堆场设计使用年限内地基沉降的规定, 集装箱堆场地基沉降不宜大于0.3 m。各钻孔总沉降见表3。可以看出采用*e*-*p*曲线法计算时, LK105及LK194工后总沉降已大于规范推荐的沉降标准, 对于沉降控制要求极为严格的自动化集装箱堆场来说, 该沉降是无法接受的; 当采用*e*-lg*p*法进行计算时, 4处钻孔的工后沉降计算值均在0.15 m以内, 可以满足规范要求。

表3 各钻孔总沉降
Tab.3 Total settlements at each borehole

计算 方法	钻孔沉降/m			
	LK105	LK127	LK194	LK195
<i>e</i> - <i>p</i> 曲线法	0.353	0.297	0.322	0.232
<i>e</i> -lg <i>p</i> 曲线法	0.134	0.116	0.125	0.098

基于上述4处钻孔, 重点分析两种方法在①₅灰色粉质黏土层中计算结果的差异。各钻孔①₅层沉降见图3。可以看出, 考虑前期固结应力后, ①₅层土体工后沉降为不考虑固结时的38%~43%, 土层整体压缩比从2.21%~2.55%降至0.64%~0.79%。是否考虑前期固结应力, 对于超固结地基工后沉降计算具有较大影响。

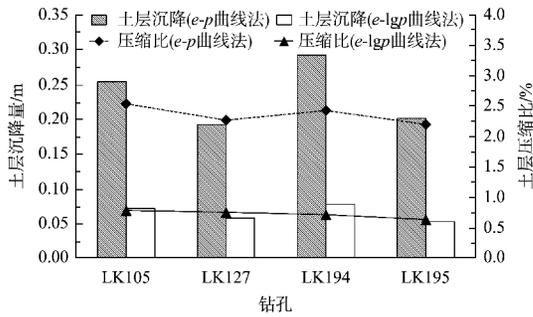


图 3 各钻孔①₅层沉降

Fig. 3 Settlements of layer ①₅ in each borehole

3.2 不均匀沉降分布情况

JTS/T 174—2019《自动化集装箱码头设计规范》^[11]要求轨道基础沿线差异沉降小于 0.1%, 且轨道基础及箱角基础差异相协调。

以 LK105、LK127、LK194、LK195 钻孔为例, 分别对比采用 *e-p* 法和 *e-lgp* 法的计算结果见表 4。采用 *e-p* 法计算时, 不仅存在工后总沉降超出规范推荐值的情况, 工后差异也过大。因此考虑提升工程质量、减少后期维护工程量, 采用桩基方案。另外为了保证轨道基础与箱角基础沉降协调, 箱角基础也须同步采用桩基础。考虑桩基数量众多, 且本工程地基顶层为回填碎石土强夯形成的硬壳层, 施工难度及工程投资均非常高。采用 *e-lgp* 曲线法进行计算, 得到的沉降数据可满足规范对于工后总沉降及差异沉降的标准, 若以此作为依据, 则可选取浅基础作为推荐方案。

表 4 差异沉降对比

Tab. 4 Contrast of differential settlements

钻孔 编号	使用期沉降计算结果/m		钻孔 间距/m	差异沉降/%	
	<i>e-p</i> 法	<i>e-lgp</i> 法		<i>e-p</i> 法	<i>e-lgp</i> 法
LK105	0.353	0.134	30	0.187	0.060
LK127	0.297	0.116			
LK194	0.322	0.125	37	0.243	0.073
LK195	0.232	0.098			

参考自动化重箱堆场所在的 5[#]塘陆域形成及地基处理施工图, 场地设计工后沉降不大于 0.3 m, 堆载期预计沉降 2.9 m。根据勘察资料, ①₅ 灰色粉质黏土层的顶高程已较施工吹填时下降 3.23 m, 大于采用堆载预压前正常固结土参数推算的总沉降量, 据此推算工程所在区域后期已几乎不发生

沉降。对比两种计算方法, 考虑前期固结应力的 *e-lgp* 曲线法计算结果与采用前期地基处理设计推算得到的沉降量更为接近。

4 结论

1) 本文通过两种方法计算复杂应力历史地基沉降, 并与前期设计资料相对比, 总体来说, 在超固结地基中, 采用 *e-lgp* 曲线法计算得到的工后沉降值与前期设计预期更为接近。另外, 因本工程目前尚处于施工期, 本文计算结果的准确性尚有待进一步使用后验证。

2) 地勘报告仅提供了单一土层的压缩指数, 在应对复杂应力历史条件场地时, 可要求勘察单位开展目标土层的高应力段压缩试验以及回弹再压缩试验, 以得到更准确、全面的土层参数, 用于 *e-lgp* 法计算。

参考文献:

[1] 彭浩, 王丽芳. 天津港智能化集装箱码头堆场精细化设计及应用[J]. 港工技术, 2022, 59(4): 56-59.
PENG H, WANG L F. Elaborate design and application of yard of intelligent container terminal in Tianjin Port[J]. Port engineering technology, 2022, 59(4): 56-59.

[2] 岑学徐, 廖晨彦, 陈钦. 自动化码头集装箱堆场设计方案及优化[J]. 水运工程, 2022(10): 163-165.
CEN X X, LIAO C Y, CHEN Q. Design scheme and optimization of automated terminal container yard[J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 163-165.

[3] 张金刚, 李太虎. 自动化集装箱堆场改造项目中 ARMG 基础结构方案比选[J]. 山东交通科技, 2022(2): 144-147.
ZHANG J G, LI T H. Comparison and selection of ARMG infrastructure schemes in automatic container yard reconstruction project [J]. Shandong transportation technology, 2022(2): 144-147.

[4] 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.

[5] 宋雨浩. 考虑多因素影响的湛江组黏土地基沉降计算公式[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
SONG Y H. Equations for calculating the foundation settlement of Zhanjiang formation clay considering the influence of multiple factors[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2023.

[6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Load code for harbour engineering: JTS 144-1-2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.

[7] 中交水运规划设计院有限公司. 深圳港盐田东港区一期集装箱码头 5# 塘陆域形成及地基处理工程施工图[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2012.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Construction drawing for land formation and foundation treatment project of container terminal 5# pool in Donggang District, Yantian, Shenzhen Port phase I [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2012.

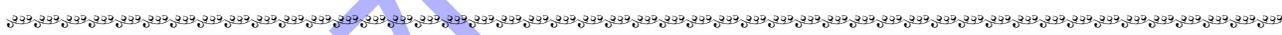
[8] 金银富, 张爱军, 尹振宇, 等. 矿物成分相关的黏土一维压缩特性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (1): 131-136.
JIN Y F, ZHANG A J, YIN Z Y, et al. One-dimensional compressibility of soft clay related to clay minerals [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35(1): 131-136.

[9] 张帆舸, 黄昌富, 姚铁军, 等. 泥炭土压缩及回弹变形规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 259-262.
ZHANG F G, HUANG C f, YAO T J, et al. Experimental study on laws of compression and rebound deformation of peaty soil [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S2): 259-262.

[10] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 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.
CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd. Design code of road and storage yard for port area: JTS 168-2017 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.

[11] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中国港口协会. 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.
CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., China Ports and Harbors Association. Code for design of automated container terminals: JTS/T 174-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

(本文编辑 王璁)



(上接第 70 页)

[14] 林泽耿, 谭学民, 刘炳凯, 等. 基桩自平衡法检测的相关问题探讨[J]. 广州建筑, 2016, 44(1): 26-28.
LIN Z G, TAN X M, LIU B K, et al. Discussion on the problems in self-balanced loading test of pile foundations [J]. Guangzhou architecture, 2016, 44 (1): 26-28.

[15] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 水运工程桩基设计规范: JTS147-7—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd. Code for design of pile foundation on port and waterway engineering: JTS147-7-2022 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.

[16] 广州市建筑科学研究院有限公司. 基桩自平衡法静载试验技术规程: DBJ/T 15-103—2014[S]. 北京: 中国城市出版社, 2014.
Guangzhou Institute of Building Science Group Co., Ltd. Technical specification for static load test of self-balanced method of foundation pile: DBJ/T 15-103-2014 [S]. Beijing: China City Press, 2014.

(本文编辑 赵娟)