



集装箱堆场设备-轨道-基础的协同设计

刘家才，张斌

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对现行集装箱堆场轨道基础设计方法在软土地区易造成不均匀沉降大、建设费用高、工期长的问题, 引入协同设计理念, 将装卸设备、轨道、基础作为一个系统进行设计, 通过提升设备对轨道公差的适应性和增加沉降调节设施以扩大系统对沉降的适应范围, 进而达到取消桩基础的目的。以某集装箱码头堆场工程为例, 对该理念下的堆场沉降预测、装卸设备对公差的适应性、轨道变形调整技术、结构的沉降适应性进行研究。结果表明, 协同设计方法能适应更大的工后沉降, 经济效益良好, 具有推广价值。

关键词: 协同设计；集装箱堆场；轨道；地基基础；沉降

中图分类号: U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0167-05

Collaborative design of equipment-rail-foundation of container yard

LIU Jia-cai, ZHANG Bin

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

Abstract: For the problems of existing container yard rail foundation design method in soft soil area including large differential settlement, high cost and long construction period, we introduce the collaborative design concept, which regards the handling equipment, rail and foundation as a system. Through improving the adaptability of equipment to tolerance and adding the facilities for settlement adjustment, we can extend the system's range of adaptation to settlement, and thus achieve the goal of eliminating the pile foundation. Taking a container yard project as an example, we study crucial factors including settlement prediction, adaptability of equipment to tolerances, technique of rail adjustment, as well as the adaptability of foundation to settlement. It is concluded that the collaborative design method can adapt to larger post-construction settlement and achieve better economic benefits, thus it is worthy of popularizing.

Keywords: collaborative design; container yard; rail; foundation; settlement

集装箱堆场设计内容包括装卸设备选型、轨道、基础、地基处理等。在现行的设计方法中, 设备、轨道、基础、地基一般被看作单独的设计对象, 按各自的设计标准进行设计。如轨道式装卸设备通常要求大车轨道公差为 $\pm 10 \sim \pm 20$ mm^[1], 地基处理的沉降控制目标是残留沉降小于 20~30 cm, 不均匀沉降小于 10~20 cm^[2]。由于轨道公差标准和地基残留沉降标准相差悬殊, 为保障设备的高效运行, 必须进一步减小轨道处地基沉降, 故轨

道基础多采用桩基础^[3]。因轨道基础与道路、堆场在平面上相邻或存在交叉, 在这些交接部位通常会因地基处理方法和控制标准的不同而产生不均匀沉降^[4], 对装卸设备和车辆作业不利。同时, 桩基工程投资高、工期长, 对项目投资效益有负面影响。所以在工后沉降较大的场地, 按现行设计方法并不能取得最佳方案。

刘洪波等^[5]提出, 在使用期沉降较大影响使用时, 可采用接高的方法进行轨道高程的调整。

林星铭等^[6]从设备选型角度研究不同设备结构形式对沉降的适应性，提出采用“一刚一柔”形式设备适应更大的轨道公差。笔者将二者结合起来，引入协同设计理念，即采用系统思维方式，将设备、轨道、基础和地基视为一个系统，通过放宽轨道使用标准、增加变形调节措施，使系统能适应更大的变形，从而降低地基加固标准，取消桩基础，达到节约费用和缩短工期的目的。以某集装箱堆场设计为依托，对协同设计法的几个关键环节包括堆场沉降预测、装卸设备选型、轨道变形调整技术、结构的沉降适应性进行分析研究，并优化设计方案，取得良好的经济与社会效益。

1 工程概况

某集装箱码头年设计吞吐量为 250 万 TEU，码头岸线长 1.2 km，可靠泊 3E 级集装箱船。港区道路采用“八横五纵”的道路网络，自动化堆场面积约 36 万 m²，堆场平行码头岸线布置，装卸工艺采用单悬臂自动化轨道吊(ARMG)+集卡方案，集装箱堆五过六。码头堆场平面布置见图 1。

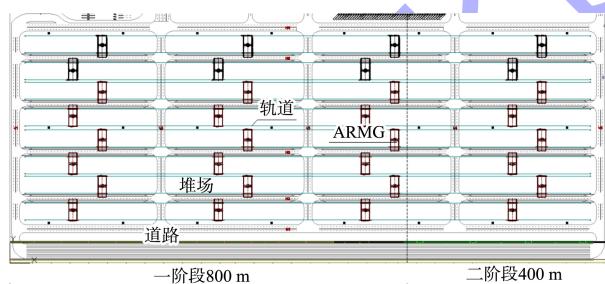


图 1 堆场平面布置

工程场地地基土层主要分 3 层：表层为吹填海砂，平均厚度约 12 m，细粒土含量低。其中一阶段顶部 6~8 m 砂层经过地基处理已达到密实状态，地基承载力为 150 kPa，且铺设有临时面层，作为堆放汽车、杂货等的临时场地；二阶段表层为新吹填海砂，第 2 层为松散状-中密的夹杂海洋贝壳碎片和微量砂屑灰岩的天然海砂，该层厚 0~2.3 m，实测标贯击数为 5~45 击；第 3 层由轻微风化、中度弱钙质岩石组成，厚 14~24 m；下卧层为细晶岩。二阶段地基采用振冲法处理，处理标准和一阶段一致。

2 协同设计法研究

2.1 协同设计法的设计原则

协同设计法以变形协调为中心，以满足设备使用要求为前提，通过工程措施，使系统在全寿命周期内能正常使用且成本最低。设计原则包括：1) 设备对变形的适应范围应尽可能大，以降低调节频率；2) 轨道变形可调，调节范围能覆盖最大不均匀沉降，始终满足设备正常使用要求；3) 地基加固后的工后沉降要满足基础结构的安全使用标准。

2.2 堆场沉降预测

沉降预测是协同设计法的基础，是设备选型、变形调节措施和基础设计的依据。为准确预测堆场工后沉降，本工程在地基处理后按 60 m 间距进行静力触探(CPT)检测，按使用均载 50 kPa 计算得场地工后沉降，如表 1 和图 2 所示。

表 1 轨道处地基工后沉降

孔号	轨道 A		孔号	轨道 B		垂直轨道不均匀沉降/mm
	沉降/mm	沿轨道不均匀沉降/mm		沉降/mm	沿轨道不均匀沉降/mm	
A1	27.9	2.8	B1	30.4	5.8	2.5
A2	30.7	4.0	B2	24.6	8.3	6.1
A3	34.7	1.5	B3	32.9	4.6	1.8
A4	36.2	1.2	B4	37.5	9.4	1.3
A5	37.4	16.4	B5	28.1	4.6	9.3
A6	21.0	3.6	B6	32.7	1.2	11.7
A7	24.6	1.3	B7	31.5	0.9	6.9
A8	23.3	7.6	B8	32.4	0.9	9.1
A9	30.9	6.5	B9	31.5	2.1	0.6

续表1

轨道 A			轨道 B			垂直轨道不均匀沉降/mm
孔号	沉降/mm	沿轨道不均匀沉降/mm	孔号	沉降/mm	沿轨道不均匀沉降/mm	
A10	24.4	0.1	B10	29.4	2.7	5.0
A11	24.5	2.4	B11	26.7	3.7	2.2
A12	22.1	1.4	B12	30.4	7.8	8.3
A13	23.5	-	B13	22.6	-	0.9
最大值	37.4	16.4	最大值	37.5	9.4	11.7

注: 垂直轨道不均匀沉降为轨道 A 和轨道 B 对应孔号位置的沉降差。

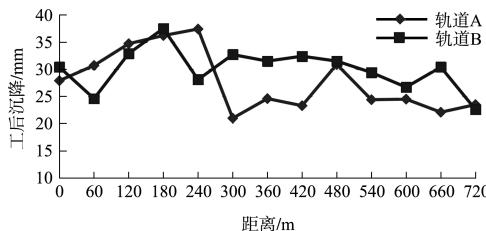


图 2 工后沉降沿轨道分布

由计算结果可知, 轨道沿线工后沉降最大值为 37.5 mm, 沿轨道不均匀沉降最大值为 16.4 mm, 垂直轨道不均匀沉降量最大值为 11.7 mm, 虽然满足道路堆场的沉降控制标准, 但沿轨道不均匀沉降可能导致轨道公差不满足使用要求, 在使用过程中须调整。另外, 沿轨道不均匀沉降会引起基础结构内力增加, 须在结构设计时予以考虑。

2.3 装卸设备对公差的适应性

根据支腿与主梁的连接方式, ARMG 可以分为 2 个支腿均为刚性连接(简称“双刚腿”)和一个腿刚性连接一个腿柔性连接(简称“一刚一柔”) 2 种结构形式(图 3)。

在长期使用过程中, 由于轨道变形, 轨道对设备将产生附加载荷, 包括垂向和侧向力。林星铭通过对不同结构形式与轨道运行公差适应性的研究发现, 在同样公差的情况下, 双刚腿形式的轨道吊大车对轨道的水平力以及门腿最大弯矩都比一刚一柔形式的大, 说明双刚腿形式的轨道吊对公差的适应性较差, 易出现卡轨现象。进一步的研究发现, 在两轨高差分别为 20、40、60 mm 时, 轨道吊大车对轨道的水平力不变, 故一刚一柔形式的轨道吊适用于沉降较大的基础。按协同设计法原则, 当预测工后沉降较大时, 应选用一刚一柔结构形式。



图 3 支腿与主梁的连接方式

2.4 调整沉降的工程措施

传统的钢轨扣件能调整的变形范围较小。为适应更大的沉降, 可将其改进为沉降可调式支座, 典型断面见图 4。支座系统主要由压板及压板螺栓、胶垫板、上钢垫板、下钢垫板、胶泥和预埋套管、套管锚栓、连接螺栓等几部分组成(图 5)。下层钢垫板与 RMG 基础通过锚固螺栓固定成一个整体, 上下钢垫板通过连接螺栓相连接。当沉降导致轨道公差超标时, 可将连接螺栓松开, 在上下钢垫板之间插入不同规格的钢垫片, 以调整轨道高程。同时, 上垫板螺孔水平方向也预留有调整空间。螺栓长度可根据预测沉降确定, 以便在整个使用期内都可以通过支座系统的调整来满足轨

道公差要求。

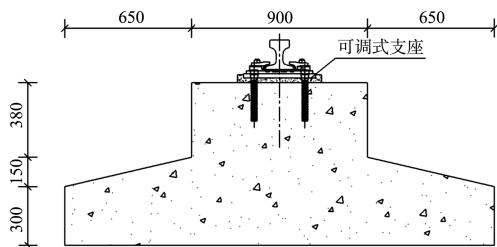


图 4 基础典型断面 (单位: mm)

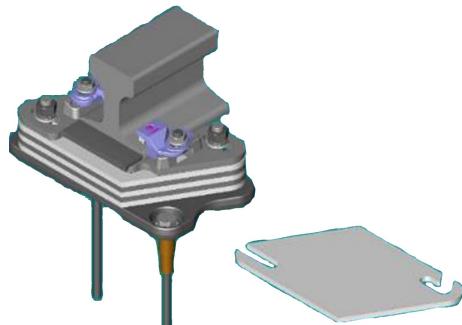


图 5 可调式轨道支座

根据预测, 轨道沿线工后沉降最大值为 37.5 mm, 考虑一定的富余量, 本工程支座的可调节量应不小于 50 mm。

2.5 轨道基础对不均匀沉降的适应性

协同设计法通过调整沉降的工程措施取消了桩基, 作为轨道基础的弹性地基梁应可以承受使用期内的地基不均匀沉降, 因此在结构设计时须充分考虑不均匀沉降引起的内力增加。

为研究弹性地基梁对沉降的适应性, 建立有限元模型(图 6), 梁截面几何尺寸见图 4, 模型参数 $E=32.5 \text{ GPa}$, 泊松比 0.2, 地基初始变形模量 30 MPa, 泊松比 0.3。利用 Vesic 公式根据地基变形模量推算弹簧刚度。计算模型中考虑结构自重和最大轮压工况。

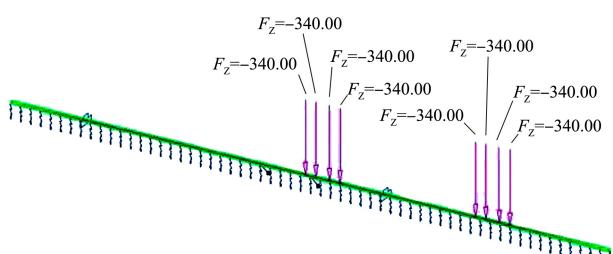


图 6 计算模型 (单位: kN)

模型中地基沉降通过地基软化实现, 不同的地基沉降对应不同的地基模量, 如表 2 所示。计算得不同软化长度($L=3, 4, 10, 15, 30 \text{ m}$)下梁的最大弯矩随地基模量的变化曲线(图 7)。

表 2 地基沉降与模量对应关系

沉降/mm	6.2	7.4	9.3	12.4	18.6	37.2
模量/MPa	30	25	20	15	10	5

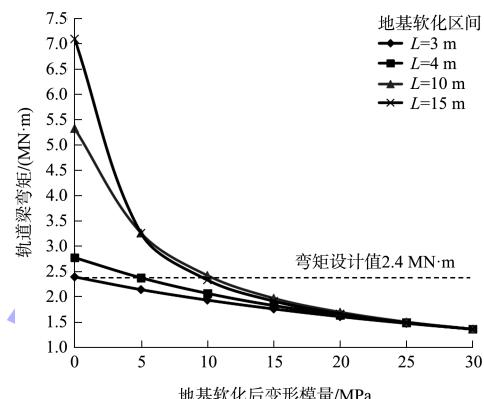


图 7 轨道梁弯矩和地基软化范围与程度的关系曲线

由图 7 可知, 对同样的软化长度, 地基软化程度越高, 梁的弯矩越大; 当软化程度确定时, 梁的弯矩随地基软化范围增加而变大, 说明地基沉降是引起结构内力增长的重要因素。弹性地基梁对地基变形有一定的协调能力, 梁弯矩达到设计值时的相对变形约为 0.2%。因此, 应对地基梁使用过程中的变形进行监测, 当出现较大范围的变形和较大的不均匀沉降时应采取加固措施。

2.6 方案优化及经济效益

本工程采用协同设计法, 选用“一刚一柔”形式 ARMG 和 2 级轨道公差标准, 通过增加能覆盖最大工后沉降的可调式支座, 取消了桩基。经测算, 优化方案费用 1.4 亿元, 比桩基方案节省 1.1 亿元, 费用降幅 43.7%, 缩短工期约 10 个月, 经济效益显著。

3 结语

1) 协同设计法通过选择能适应更大轨道公差的装卸设备和采取可调式支座的工程措施, 使设备-轨道-基础系统能适应更大的沉降, 从而可取消

桩基, 经济效益显著。

2) 堆场沉降分析是协同设计法的基础, 是设备选型、变形调节措施和基础设计的依据。

3) 与双刚腿形式 ARMG 相比, 一刚一柔形式 ARMG 能适应更大范围的轨道公差, 是协同设计法的首选设备形式。

4) 沉降可调式支座是调节轨道公差的有效措施, 螺栓长度根据沉降确定并留有富余, 以在整个使用期内都可以通过支座系统的调整来满足轨道公差要求。

5) 地基沉降是引起基础结构内力增长的重要因素, 应对地基梁使用过程中的变形进行监测, 当出现较大范围的变形和较大的不均匀沉降时应采取加固措施。

(上接第 68 页)

[2] 孟祥伟, 刘海成, 谭中华, 等. 取水口与码头共用岸线的有关问题研究[C]//中国海洋学会海洋工程分会. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 北京: 海洋出版社, 2017: 247-251.

[3] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 室外给水设计标准: GB 50013—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

[4] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 陈文彪. 河流动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.

[5] 湖北省水利水电勘测设计院. 泵站设计规范: GB 50265—

(上接第 134 页)

[10] GRILLI S T, WATTS P. Tsunami generation by submarine mass failure. II: Predictive equations and case studies[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2005, 131(6): 298-310.

[11] EVERNS F M, HAGER W H, BOES RM. Spatial impulse waves generation and propagation[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2019, 145(3): 1-15.

[12] 李荣辉, 蒋昌波, 邓斌, 等. 近坝库区狭窄河道滑坡涌浪高度及其传播规律[J]. 交通科学与工程, 2016, 32(2): 79-84.

[13] 彭辉, 吴凡, 金科, 等. 库岸滑坡涌浪首浪高度试验研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 95-100.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 大连华锐重工集团股份有限公司. 起重机车轮及大车和小车轨道公差: GB/T 10183. 1—2018/ISO 12488—1:2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2018.
- [3] 朱洪涛, 陈思周, 范莹莹. 青岛港某自动化集装箱堆场轨道基础设计研究[J]. 港工技术, 2018, 55(5): 108-111.
- [4] 徐刚, 袁静波. 港区道路及堆场病害原因分析与对策[J]. 中国港湾建设, 2014(7): 20-22.
- [5] 刘洪波, 李业富, 赵丽云. 复杂地基条件下轨道基础的研究及应用[J]. 水运工程, 2011(11): 207-210.
- [6] 林星铭, 黄河, 唐勤华, 等. 自动化轨道吊门腿形式对轨道运行公差的适应性[J]. 水运工程, 2018(6): 216-220.

(本文编辑 郭雪珍)

- [2] 2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文设计规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [8] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 河港总体设计规范: JTS 166—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

(本文编辑 王璁)

- [14] 戴磊, 白志刚. 涌浪形成与传播滑坡模型试验研究[J]. 港工技术, 2018, 55(4): 1-5.
- [15] 韩林峰, 王平义, 王梅力, 等. 碎裂岩体滑坡运动特征及近场涌浪变化规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(12): 2325-2334.
- [16] 王平义, 祖福兴, 韩林峰, 等. 河道型水库滑坡涌浪机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [17] 李玉成, 藤斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [18] 刘艺梁. 三峡库区库岸滑坡涌浪灾害研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.

(本文编辑 郭雪珍)