



罗泾自动化集装箱堆场 ARMG 轨道基础结构设计

梁超¹, 岳田¹, 万立²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080)

摘要: 上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程陆域部分为对已建散货堆场的改造, 场地原堆货区地基承载力 ≥ 150 kPa 且经过多年预压已发生 1 m 以上固结沉降, 原非堆货区未进行地基处理、沉降小, 场地具有较大不均匀性; 而拟建自动化集装箱堆场 ARMG 轮压荷载大, 轨道对基础沉降和差异沉降敏感。针对上述设计特点, 进行轨道基础结构形式研究, 比选桩基轨道梁结构和轨枕道砟结构, 提出地基与 ARMG 轨道基础一体化设计理念, 结合沉降及 FLAC3D 模型计算结果, 推荐采用弹性地基梁+钢格栅加筋垫层+可调式支座, 既能够发挥预压地基优点, 又能够减小表层差异沉降、简化轨道基础的调整工作。该新型结构相较桩基轨道梁结构每延米可节约 18% 的工程费用, 相较轨枕道砟结构降低了使用期维护需求。

关键词: 弹性地基梁; 钢格栅加筋碎石垫层; 可调式支座

中图分类号: U656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0215-08

Design of ARMG rail beam for Luoqing automated container yard

LIANG Chao¹, YUE Tian¹, WAN Li²

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

2. Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: The land area part of the first phase of container terminal renovation project in Luoqing port area of Shanghai Port involves the transformation of an existing bulk cargo yard. For the existing stacking area, the bearing capacity ≥ 150 kPa and a settlement of more than 1 m has occurred due to several years of preloading, while the non-stacking area has experienced relatively smaller consolidation and settlement. The ground is uneven considerably. The ARMG wheel load is heavy and is sensitive to settlement and differential settlement of railway for automated container yard. In view of the aforementioned design features, a research on ARMG railway foundation structure is carried out. The pile foundation railway beam and rail sleeper ballast are compared, and an integrated design concept for the ground and the ARMG railway foundation is proposed. A new structure consisting of the elastic foundation beam+steel grid reinforced cushion+adjustable bearing system is adopted based on settlement and FLAC3D model calculation results, which can take full advantage of the preloaded foundation's benefits, reduce differential settlement and simplify the modification of ARMG railway foundation. Compared with pile foundation railway beam, this new structure can save 18% engineering cost, and compared with rail sleeper ballast the maintenance requirements can be reduced.

Keywords: elastic foundation beam; steel geogrid-reinforced crushed stone cushion; adjustable bearing system

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 梁超(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水工结构和道路堆场设计与研究。

近年来,国际集装箱贸易的快速发展对港口集装箱装卸效率提出了更高的需求,集装箱码头和堆场逐渐向自动化发展。作为自动化集装箱堆场的主要装卸设备之一,轨道式龙门起重机(automated rail-mounted gantry crane, ARMG)因其显著高于自动化轮胎式起重机(automated rubber-tyred gantry crane, ARTG)的装卸效率,获得了越来越多自动化集装箱堆场的青睐。ARMG 具有轮压荷载大、轨道对基础沉降和差异沉降敏感的特点,因此选择合理的 ARMG 轨道基础结构形式对自动化集装箱堆场建设和运营至关重要。上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程为功能转换项目,陆域部分是将原煤炭堆场和矿石堆场改造为全自动化集装箱堆场,场地条件复杂。本文针对 ARMG 轨道基础设计,以使用荷载、运营要求为基础,深入分析工程所在区域地基条件,结合上海地区工程经验,对 ARMG 轨道结构形式进行比选论证,最终选用弹性地基梁+钢格栅加筋碎石垫层+可调式支座结构。

1 自动化集装箱堆场 ARMG 轨道基础常用结构形式

1.1 桩基轨道梁基础

桩基轨道梁基础指钢筋混凝土梁结构下打设基桩,通过基桩将上部 ARMG 轮压荷载传递至地基中。基桩可采用 PHC 桩、预应力方桩、钢管桩和灌注桩等刚性桩。基桩打设进持力层,满足上部结构承载力需求,使用期基本无沉降和差异沉降,可保证轨道基础长期可靠使用。但在软土地基深厚的区域,轨道基础容易与堆箱区产生一定的差异沉降,影响堆箱区的平整度和排水。青岛前湾自动化集装箱堆场^[1]和苏州港太仓港区四期工程 ARMG 轨道基础均采用桩基轨道梁结构形式。

1.2 轨枕道砟基础

轨枕道砟基础为柔性基础,由钢筋混凝土轨枕和道砟组成。钢筋混凝土轨枕直接承受 ARMG 轮压荷载,并通过一定厚度的道砟分散到地基上。当地基发生沉降和差异沉降时,可通过改变道砟

厚度来调整轨道基础顶高程。轨枕道砟基础构件多、对施工设备要求低、施工速度快且具有较大的沉降调整空间,但对轨道的约束性较差,轨道在 ARMG 高频高强的轮压荷载作用下,容易发生沿轨长方向和竖向的位移,需定期维护。上海港洋山四期工程 ARMG 轨道基础采用了轨枕道砟基础结构形式^[2]。

1.3 弹性地基梁基础

弹性地基梁基础指钢筋混凝土轨道梁放置在天然地基或复合地基上,上部 ARMG 轮压荷载通过轨道梁直接传递到地基中。当钢筋混凝土梁下天然地基以砂、石为主时,土层易密实、刚度大且工后沉降小,可考虑将其直接建设在经过密实的天然地基上,阿联酋和以色列多个自动化集装箱堆场 ARMG 轨道基础均采用弹性地基梁+天然地基形式^[3]。当钢筋混凝土轨道梁下地基表层存在一定厚度的软弱土层,可考虑采用弹性地基梁+复合地基形式,即通过水泥搅拌桩或高压旋喷桩等对地基表层的软弱土层进行二次加固,进而提高地基承载力、减小沉降和差异沉降,广州港南沙四期工程 ARMG 轨道基础采用了弹性地基梁+复合地基结构形式^[4]。弹性地基梁施工工序简单、施工难度低、精度高、整体性好,适用于地质条件较好、工后沉降小的地基,或表层虽存在一定厚度的软弱土层但可以通过复合地基进行二次处理的地基。

2 罗泾自动化集装箱堆场 ARMG 轨道基础设计条件

2.1 地质条件

上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程陆域场地包括原罗泾一期煤炭堆场、原三角地煤炭堆场和原罗泾二期矿石堆场(部分),所在场区属滨海平原地貌类型,土层分布较为稳定,由上到下依次为①层人工填土、②₃层灰色砂质粉土、③层灰色淤泥质粉质黏土夹砂质粉土、④层灰色淤泥质黏土、⑤₁层灰色黏土、⑤_{3,1}层灰色砂质粉土、⑤₃层灰色粉质黏土和⑤_{3,夹}层灰色粉质黏土夹粉性土。①层人工填土可细分为杂填土(铺面结构

层)、冲填土(粉煤灰)和冲填土(砂质粉土),其中冲填土(粉煤灰)主要分布于原一期煤炭堆场和原三角地煤炭堆场,冲填土(砂质粉土)主要分布于原二期矿石堆场和和原三角地煤炭堆场。

③、④层淤泥质黏性土为欠固结—正常固结状态,压缩性高,地基稳定性相对较差。

本文工程各分区在建设期陆域形成填料不同,地基处理方式不同,运营期堆存货种、堆载高度和运营时长均不同,已发生沉降表现不同,地基不均匀性强。

2.1.1 原罗泾一期煤炭堆场

原罗泾一期煤炭堆场所在区域原滩地面高程为 $-2\sim 1$ m, 其上吹填平均厚度为 $4\sim 5$ m 的粉煤灰, 吹填后平均高程约 5.0 m。吹填的粉煤灰呈泥浆状态, 采用了塑料排水板动力固结钢碴挤实法进行地基处理, 施工工艺为: 在原状粉煤灰上开挖排水沟, 回填钢碴, 打设塑料排水板, 回填钢碴并强夯, 振动碾压。各分区根据运营需求对强夯工艺进行了针对性设计, 见图 1。强夯处理后地基表面承载力不小于 150 kPa。

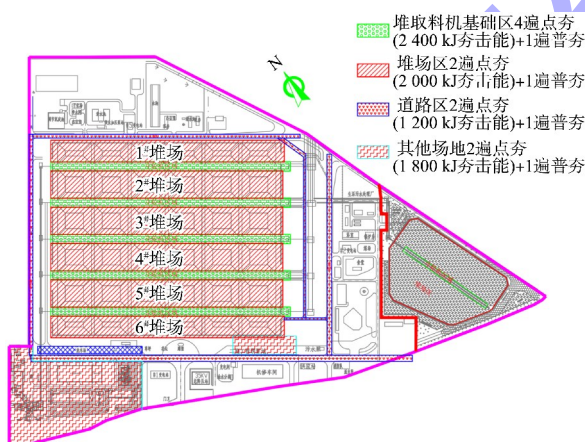


图1 原罗泾一期煤炭堆场地基处理分区
Fig.1 Ground treatment zones of the former
Luojiang coal storage yard

原罗泾一期煤炭堆场于 1997 年建成投产, 2017 年正式关停。运营期主要堆存货种为煤炭, 最大堆高为 12m。测图显示, 与竣工图相比, 煤炭堆场堆存区沉降值为 1.2~2.4 m, 其中 1[#]、6[#] 堆场沉降值小于 2 m, 2[#]、5[#] 堆场沉降值均在 2 m 以上, 堆取料机基础区域沉降值为 1.2~1.7 m。

2.1.2 原三角地煤炭堆场

原三角地煤炭堆场所在区域场地原滩地面以上吹填了 1 层砂(砂质粉土)和 1 层粉煤灰。该区域未实施过地基处理,自 2002 年起作为简易堆场堆存矿石,堆载高度约 4 m;2008 年建设煤炭堆场期间,对堆取料机基础下进行了振动碾压。2010 年投产后堆货货种主要为煤炭,最大堆高 12 m;2017 年随原罗泾一期煤炭堆场关停。

2.1.3 原罗泾二期矿石堆场

原罗泾二期矿石堆场原滩地面以上覆盖约 4 m 厚吹填砂(长江瑞丰细砂)。建设期对场地划分 4 个区域,采用不同方式进行地基处理。矿石堆载区和减压带采用振冲后插排水板+使用期矿石堆载区矿石分级压载方案;堆取料机基础区采用排水板+强夯方案(夯击能 1 000~3 000 kJ,点夯 3 遍);道路和一般地坪采用振冲进行地基处理,深度为砂面高程至吹填砂底高程以上 20 cm,处理标准为地表 1.0 m 以下加固深度范围内标贯击数 ≥ 15 击。原罗泾二期矿石堆场地基处理分区见图 2。

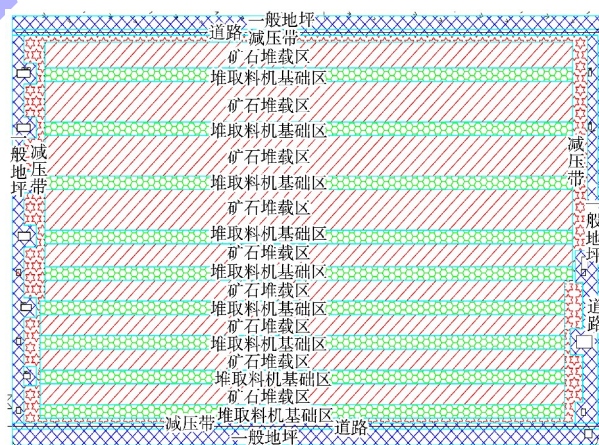


图 2 原罗泾二期矿石堆场地基处理分区

Fig.2 Ground treatment zones of the former Luojing mineral storage yard

原罗泾二期矿石堆场于 2007 年建成投产, 2019 年正式关停。运营期最大堆高为 13 m, 其中 1[#]~5[#]堆存区堆存矿石, 堆密度 2.5~2.8 t/m³; 6[#]~9[#]堆存区主要堆存轻辅料和件杂货, 堆密度 1~1.8 t/m³。测图显示, 与竣工图相比, 原罗泾二期矿石堆场堆存区沉降值为 1.4~2.9 m, 其中

1#~6#堆场沉降值在 2 m 及以上, 7#~9#堆场沉降值在 1.5 m 左右; 罗泾二期矿石堆场堆取料机基础曾于 2010 年进行过高程调整, 现状顶高程与 2010 年调整后顶高程接近。

2.2 荷载条件

工程重箱堆场采用自动化单悬臂轨道吊或自动化双悬臂轨道吊进行装卸作业, 其中双悬臂轨道吊荷载为计算控制工况。双悬臂轨道吊轨距 37 m, 基距 16.40 m, 轮数 6×4, 轮距 1.05 m, 工作状态轮压 290 kN/轮, 非工作状态轮压 335 kN/轮。轮系布置见图 3。

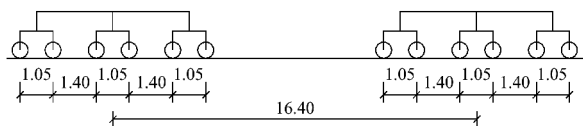


图 3 自动化双悬臂轨道吊轮系布置 (单位: m)

Fig. 3 Wheel layout of automated double-arm track crane (unit: m)

2.3 运营期钢轨允许高差

目前 ARMG 运营期钢轨允许高差无明确的限制要求, 仅 GB/T 10183.1—2018《起重机 车轮及大车和小车轨道公差第 1 部分: 总则》^[5] 和 JTS/T 174—2019《自动化集装箱码头设计规范》^[6] 有所提及。

1) 根据 GB/T 10183.1—2018《起重机 车轮及大车和小车轨道公差第 1 部分: 总则》表 7, 大机运行公差的要求(1 级)为: ①大车轨道上任一点处起重机轨道中心线之间跨度 S 的公差, 当 $S > 16$ m 时, 为 $\pm[10+0.25(S-16)]$, 工程 S 为 34、37 m, 取 14.5 mm; ②水平直线度公差为 ± 10 mm; ③两轨高度公差为 ± 10 mm。

2) 根据 JTS/T 174—2019《自动化集装箱码头设计规范》, 轨道基础沿线的差异沉降应小于 0.1%。

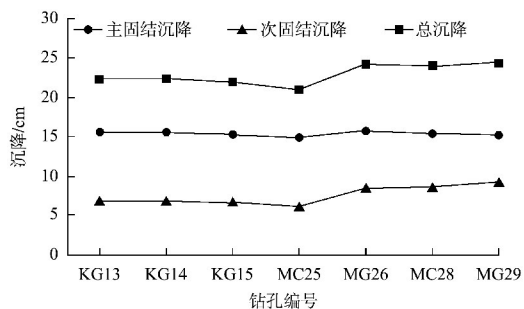
公差超过上述数值时, ARMG 运行性能下降并引起附加应力, 会导致钢轨、车轮、导向轮等磨损增大, 还可能损坏支承结构。实际运营过程中, 对于弹性地基梁或轨枕道砟基础等可能发生沉降的结构形式, 通常会根据设备运行情况和定期沉降测量数据, 适时启动维保工作。

3 ARMG 轨道基础结构设计

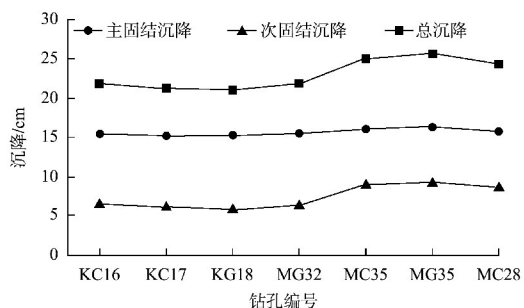
3.1 现状地质条件分析

GB/T 10183.1—2018《起重机 车轮及大车和小车轨道公差第 1 部分: 总则》和 JTS/T 174—2019《自动化集装箱码头设计规范》规定了轨道中心线之间跨度公差、水平直线度公差、两轨高度公差和轨道基础沿线的差异沉降限值。尽管 2 本规范限制条件有所区别, 仍能反映出沉降和差异沉降对 ARMG 正常运营的重要性。

根据竣工图和运营资料, 原罗泾一期煤炭堆场、三角地煤炭堆场和二期矿石堆场分别于 1997、2010 和 2007 年建成投产, 堆存区进行了 8~20 a 不同时间的压载。采用考虑应力历史的沉降计算方法计算拟建集装箱堆场的大面积工后沉降, 根据计算结果可知, 原罗泾一期煤炭堆场、三角地煤炭堆场和二期矿石堆场堆载区总沉降计算值为 15~26 cm, 其中①层人工填土和②₃ 层灰色砂质粉土总沉降计算值为 7~10 cm, 约占总沉降的 30%~56%; 未经过地基处理或堆载的区域, 沉降计算值为 55~77 cm, 其中①层人工填土和②₃ 层灰色砂质粉土总沉降计算值为 29~38 cm, 约占总沉降的 41%~52%。典型钻孔沉降计算结果见图 4, 其中 II 断面为未堆载区, IV、V 和 VIII 断面为堆载区。



a) IV断面



b) V断面

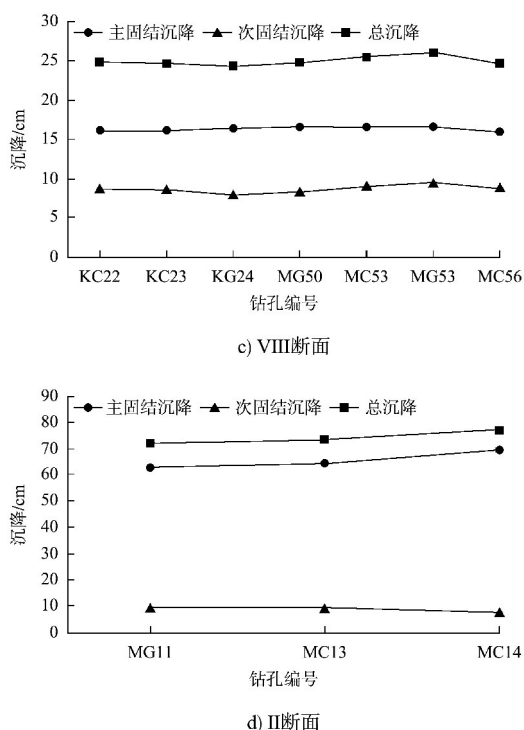


图 4 典型钻孔沉降计算结果

Fig. 4 Settlement calculation result of typical boreholes

3.2 ARMG 轨道基础结构选型分析

根据 3.1 节中沉降计算结果可知, 工程红线范围内未堆载区工后沉降偏大, 与已堆载区形成了比较明显的差异沉降。从地基加固角度看, 减小沉降和差异沉降最理想的措施是堆载预压或复合地基。工程③、④层淤泥质黏性土埋深大, 对堆载时间和堆载高度要求很高, 堆载预压工期长、土方工程量巨大; 成陆时间长, 即便在未堆载区域顶部也已形成约 8 m 左右硬壳, 排水板或水泥搅拌桩打设困难, 因此采用堆载预压或复合地基处理③、④层淤泥质黏性土难度很大。为满足 ARMG 设备运营对轨道沉降和差异沉降的要求,

只能将 ARMG 轨道基础结构与地基一体化考虑, 即当地基加固措施不能完全满足沉降要求时, 通过 ARMG 轨道基础的“基本不沉降”或“虽沉降但可调”来解决。“基本不沉降”轨道基础多采用桩基轨道梁结构, “虽沉降但可调”轨道基础多采用轨枕道砟结构。

3.2.1 桩基轨道梁基础

桩基轨道梁基础使用期基本不沉降, 可以从根本上解决沉降和差异沉降问题, 可靠性高, 维护费用低。工程桩基轨道梁基础可采用钢筋混凝土矩形梁, 宽 1.2 m, 高 1.5 m, 下设 $\phi 600$ mm PHC 桩, 间距 3 m, 桩长约 36 m, 持力层为⑤₃ 层灰色粉质黏土夹粉性土。桩基轨道梁方案结构断面见图 5a)。

3.2.2 轨枕道砟基础

轨枕道砟基础为“虽沉降但可调”的典型代表结构。轨枕道砟基础为柔性结构, 轨道沉降由两方面的因素造成, 一是地基基础沉降, 另一个是道砟随着 ARMG 的冲击荷载逐渐密实或被压碎、被挤开。轨枕道砟结构可以通过调整道砟厚度协调轨顶高程, 理论上无高程调整限制, 适用于地基基础差、可能发生较大沉降和差异沉降的区域。考虑道砟为散粒结构, 荷载作用下容易产生沉降和侧移, 可在基础中加铺钢格栅形成加筋体提高其刚度。工程轨枕道砟基础结构可采用 320 mm 厚 C35 钢筋混凝土轨枕, 下设 630 mm 厚轨枕道砟基础+1 层双向高强土工格栅, 2 层各 250 mm 厚轨枕道砟+1 层双向高强土工格栅以及 1 层 250 mm 厚级配碎石垫层+1 层双向高强土工格栅, 两侧为钢筋混凝土挡墙。轨枕道砟方案结构断面见图 5b)。

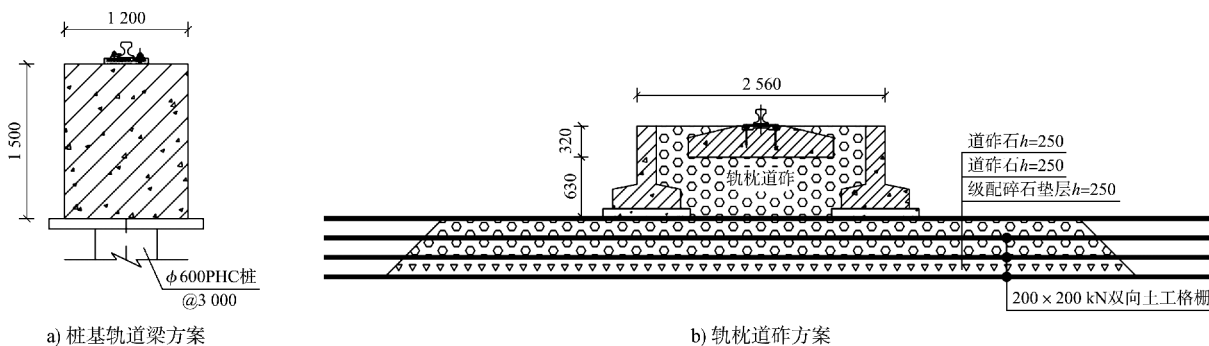


图 5 ARMG 轨道基础结构 (单位: mm)

Fig. 5 ARMG railway foundation structure (unit: mm)

3.2.3 方案比选

桩基轨道梁基础和轨枕道砟基础均能满足工程 ARMG 设备满足使用要求,其延米单价分别为 13 229 和 9 657 元。桩基轨道梁结构整体性好、可靠性高、维护需求低,但延米单价远高于轨枕道砟结构;而轨枕道砟中的道砟为散粒体,易受 ARMG 轮压冲击作用影响,即使在已堆载区域并配置了钢格栅加筋垫层,仍要定期进行维护,需要一定的经济成本和时间成本,两者均非本工程最优解。而弹性地基梁基础不设置长桩,可以有效降低工程费用;钢筋混凝土梁稳定可靠,规避了道砟结构由于散粒体特性产生的沉降和维护工作,若能通过一定措施满足 ARMG 设备使用要求,可能成为最为经济合理的方案。

3.3 弹性地基梁基础设计方案

弹性地基梁基础是 ARMG 轨道基础结构形式中对地基要求最高的一个,在不设置复合地基情况下,弹性地基梁基础随地基沉降而沉降,且调整相对困难。工程原煤炭堆场和矿石堆场大部分曾进行过地基处理或堆载,建设集装箱堆场工后沉降小;未地基处理或堆载区域仅占总面积的 1/4,弹性地基梁设计时需充分利用已堆载区域相对良好的地基条件。可将地基与 ARMG 轨道基础一体化考虑,在地基不能完全满足沉降和差异沉降要求时,一方面通过增强结构-地基一体化刚度,达到延缓工后沉降发生时间、减少堆场运营期维修次数的目的;另一方面借鉴轨枕道砟结构设计思路,对弹性地基梁自身寻求轨顶高程可调方案。

3.3.1 钢格栅加筋碎石垫层

增强结构-地基一体化刚度可以通过两种方式叠加实现,即硬壳层强夯法和钢格栅加筋碎石垫层。硬壳层强夯法为地基加固措施,即在软弱土覆盖层较深、处理难度大的区域,仅强夯其顶部覆盖层,形成一定厚度的硬壳层,以保证堆场前期使用沉降不大;钢格栅加筋碎石垫层为结构措施,即在钢筋混凝土轨道梁下铺设钢格栅+碎石垫层,增大地基表面刚度^[7]。

作为高模量整体,钢格栅加筋碎石垫层可以

大大减少荷载作用下由于土体的离散性产生的侧向水平位移。钢格栅约束层网孔具有同一形状,使合适粒径的碎石夹紧在其网格内,通过行车机械咬合作用产生相互有效应力传递,可阻止荷载压实引起局部位移变形,且依靠格栅的刚度、抗拉强度及网孔嵌锁三者相互作用可使地基具有整体性,并增强上下层之间土颗粒抗剪强度^[8-9]。

工程设计过程中,利用 FLAC3D 软件建立堆场的三维数值模型,研究钢格栅加筋碎石垫层对轨道基础沉降的影响,计算模型见图 6。模型计算结果显示,设置不同层数钢格栅加筋碎石垫层对轨道基础差异沉降影响不同,增设 2 层钢格栅加筋碎石垫层后,ARMG 轨道基础差异沉降情况得到显著改善,模型计算结果见表 2。

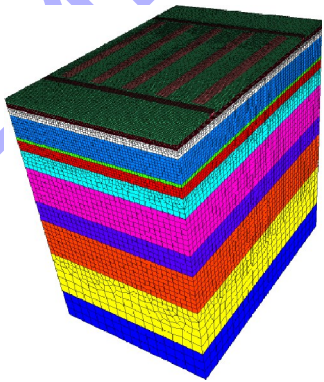


图 6 ARMG 轨道基础 FLAC3D 计算模型
Fig. 6 FLAC3D calculation model of ARMG railway foundation

表 2 轨道基础不同层数格栅差异沉降计算结果
Tab. 2 Differential settlement calculation results of ARMG railway foundation with different geogrid layers

孔位	位置	不加筋差异 沉降/mm	1 层格栅差异 沉降减少率/%	2 层格栅差异 沉降减少率/%
MC23	上侧轨道	36. 6	20. 49	43. 99
	下侧轨道	35. 7	19. 89	44. 06
KC12	上侧轨道	16. 2	16. 67	31. 71
	下侧轨道	15. 7	14. 65	35. 34

3.3.2 钢轨可调式支座

与轨枕道砟基础不同,钢筋混凝土弹性地基梁自身不具备可调性,设计考虑使用可调式支座替代传统扣件,通过调整可调式支座协调轨道的差异沉降。可调式支座为上层钢垫板、下层钢垫

板、钢轨压板、弹性胶垫板和螺栓组成的成品结构, 下层钢垫板预埋在钢筋混凝土轨道梁中, 通过套筒锚固螺栓或普通螺栓与钢筋混凝土轨道梁连接, 上层钢垫板通过连接螺栓与下层钢垫板连

接, 见图 7。通过调整套筒锚固螺栓或在上下层钢垫板之间增加钢垫板调整轨道垂直沉降, 垂直方向调整范围可达到 100~150 mm; 在压板调整范围之外, 侧向可调整量达到 40 mm。

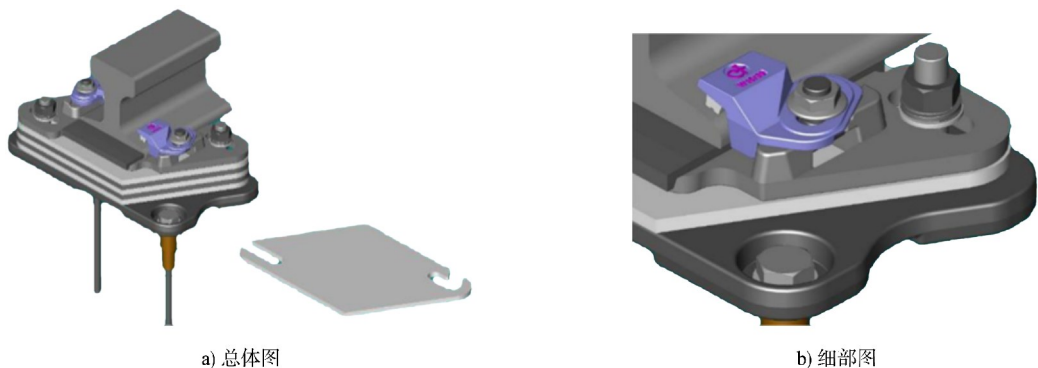


图 7 可调式支座
Fig. 7 Adjustable bearing system

3.3.3 弹性地基梁结构设计方案

工程弹性地基梁结构采用现浇钢筋混凝土轨道梁, 梁顶宽 1 000 mm, 底宽 2 200 mm, 梁高 1 000 mm, 下设 C15 素混凝土垫层厚 100 mm, 6%水泥稳定碎石基层厚 400 mm, 1 层双向高强土

工格栅, 级配碎石垫层 250 mm 厚, 1 层双向高强土工格栅, 级配碎石垫层 250 mm 厚, 1 层双向高强土工格栅(仅在未经过地基处理或堆载的区域设置), 弹性地基梁方案结构断面见图 8。钢轨扣件采用可调式支座。

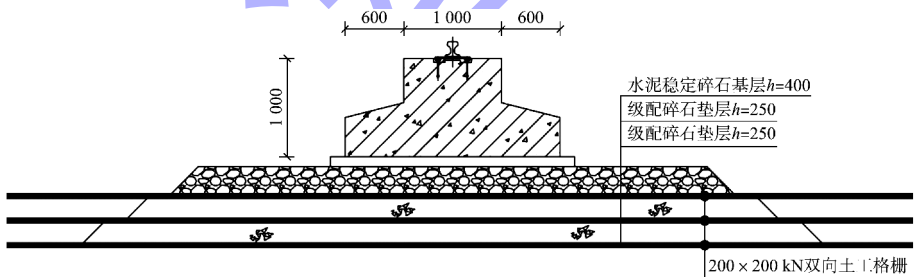


图 8 ARMG 轨道基础结构 (弹性地基梁方案) (单位: mm)
Fig. 8 ARMG railway foundation structure (elastic foundation beam scheme) (unit: mm)

经核算, 弹性地基梁延米单价为 10 808 元, 低于桩基轨道梁方案, 经济性更优; 略高于轨枕道砟结构, 但相差不多, 且轨枕道砟需要更频繁为维护, 占用更多经济成本和时间成本。弹性地基梁+钢格栅加筋垫层+可调式支座充分考虑了改造堆场现状地基具备一定强度又不均匀的特点, 在发挥已堆载地基优点基础上, 通过钢格栅加筋垫层和可调式支座最大限度降低差异沉降的影响, 节约了工程费用、降低了使用期维护需求, 为工程 ARMG 轨道基础最优解。

4 结语

- 1) 堆场改造工程中新建 ARMG 轨道基础时, 弹性地基梁结构可充分发挥预压地基高承载力的优点, 节约工程费用。
- 2) 钢格栅加筋碎石垫层可以有效增强结构-地基一体化刚度, 减小表层地基沉降, 可作为降低地基不均匀沉降影响的结构措施。
- 3) 设置可调式支座可以使轨道基础的调整简化为施工更方便、更快捷的机械式调整, 扩大了弹性地基梁的适用范围。

参考文献:

- [1] 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.
ZHU H T, CHEN S Z, FAN Y Y. Research on rail foundation design of one automated container yard in Qingdao Port [J]. Port engineering technology, 2018, 55(5): 108-111.
- [2] 韩时捷,王施恩,周亚平. 双重可调式轨道基础研究与设计[J]. 水运工程, 2016(9): 126-129, 139.
HAN S J, WANG S E, ZHOU Y P. Research and design on dually adjustable track foundation[J]. Port & waterway engineering, 2016(9): 126-129, 139.
- [3] 闫笑铭. 弹性地基梁在中东地区自动化集装箱堆场 ARMG 基础中的应用[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(9): 30-33.
YAN X M. Application of elastic foundation beam in ARMG foundation of automated container yard in the Middle East[J]. Chinaharbour engineering, 2021, 41(9): 30-33.
- [4] 张轩,郝志斌,林沛生. 广州港南沙四期工程轨道地基处理[J]. 水运工程, 2022(10): 120-123, 128.
ZHANG X, HAO Z B, LIN P S. Rail foundation treatment in the Guangzhou Port Nansha phase IV [J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 120-123, 128.
- [5] 起重机 车轮及大车和小车轨道公差 第1部分: 总则: GB/T 10183.1—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Cranes: Tolerances for wheels and travel and traversing tracks: Part 1: General: GB/T 10183.1-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [6] 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, 2020.
Design code of automated container terminal: JTS/T 174-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [7] 罗滔,陈鹏,邱焕峰,等. 土工格栅与填料相互作用研究进展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(S1): 111-115.
LUO T, CHEN P, QIU H F, et al. Research progress on interaction between geogrid and filler [J]. Engineering journal of Wuhan University, 2020, 53(S1): 111-115.
- [8] 王贤珠. 浅析钢塑格栅与级配碎石砂垫层在高填方路堤上的应用[J]. 福建交通科技, 2017(2): 19-22.
WANG X Z. Application of steel-plastic geogrid and graded gravel sand cushion in high-fill embankment [J]. Fujian Transportation Science & Technology, 2017(2): 19-22.
- [9] MA B, SI W, LI N, et al. Loading capacity strengthening to cement-stabilised crushed gravel using reinforced wire mesh [J]. Road materials and pavement design, 2014, 15(3): 733-745.
- [10] 刘家才,张斌. 集装箱堆场设备-轨道-基础的协同设计[J]. 水运工程, 2022(8): 167-171.
LIU J C, ZHANG B. Collaborative design of equipment-rail-foundation of container yard [J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 167-171.

(本文编辑 王传瑜)

声 明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动,他们建立伪网站,利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明,从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.sygcc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部