



基于有限元计算的自动化堆场轨道基础方案

廖晨彦, 岑学徐, 乔 梁

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州, 510290)

摘要: 轨道基础对港区自动化堆场的安全高效运营至关重要。以实际工程项目为例, 比较了桩基轨道基础方案与复合地基轨道基础方案的优缺点。针对 PHC 桩基轨道梁方案, 通过 SAP2000 有限元建模分析不同桩径、桩距和梁截面组合下的轨道梁基础受力, 比选取桩基承载力利用率最大情况下的桩基轨道梁方案。

关键词: 自动化堆场; 轨道基础; 有限元; 方案优化

中图分类号: U 656+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)10-0149-05

Rail foundation scheme of automated stack yard by finite element calculation

LIAO Chen-yan, CEN Xue-xu, QIAO Liang

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

Abstract: The rail foundation is critical to the safe and efficient operation of automated container stack yards in port areas. Taking an actual project as example, the advantages and disadvantages of the pile foundation rail beam scheme and the composite foundation rail beam scheme are compared in this paper. For the PHC pile foundation rail beam scheme, the finite element modeling of SAP2000 is used to analyze the stress of the track beam foundation under different combinations of pile diameters, pile spacing and beam sections, and the pile based track beam scheme with the maximum utilization rate of the pile foundation bearing capacity is obtained by comparison and selection.

Keywords: automated container stack yard; rail foundation; finite element method; program optimization

自动化集装箱码头堆场通常采用 ARMG 作业, 其作业特点是沿固定轨道行驶、自动化程度高, 而轨道基础正是保障 RMG 平稳高效作业的关键, 目前国内运用成熟的轨道基础类型主要有桩基轨道梁基础、复合地基轨道梁基础和轨枕道砟式基础等 3 种类型^[1-3]。随着国内港口自动化、智能化的发展, 轨道基础的沉降控制标准越来越高, 如何在高要求和经济性之间取得平衡成为了设计的一大难题。本文基于钦州港大榄坪港区 7[#]~10[#]泊位自动化码头项目, 对轨道梁基础方案进行分析, 并提出了一种基于有限元计算分析的优化思路。

1 项目概况

钦州港大榄坪港区自动化码头工程位于钦州

保税港区南端, 陆域总面积约 63.2 万 m², 根据总平面和工艺设计, 自动化集装箱堆场相对于码头前沿呈 U 形垂直分布, 采用 ARMG 作业, 跨距 37 m, 每个支腿 6 个轮, 共 4 个支腿, 工作状态轮压 300 kN、非工作状态最大轮压 400 kN。

根据钻孔资料显示, 场地土层自上而下依次为①填土(主要为中砂)、②₁淤泥、②₂淤泥质土、②₃砂混淤泥(或细砂)、③黏性土、④中粗砂、④₁细砂、侏罗系基岩层。其中软土层的时空分布不均匀, 厚度在 0~12.1 m 不等。基于软土层的厚度不同, 在不同区域采取了强夯振冲、插板、堆载预压等方式进行组合处理, 处理后交工面承载力能够达到 150 kPa, 工后沉降 20 cm。

收稿日期: 2022-05-20

作者简介: 廖晨彦(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程道路及堆场设计工作。

2 轨道基础设计方案

为满足 ARMG 高精度作业的需求, 轨道基础的差异沉降应控制在 0.1% 以内^[4]。由于软土的分布不均匀且厚度较大, 差异沉降难以通过强夯、振冲等常规地基处理方式消除, 因此常规的轨枕道砟轨道基础和弹性轨道梁扩大基础在本项目中均不适用, 后期的差异沉降会导致频繁的维护和检修, 同时也会对作业安全带来隐患。经过综合考虑, 在项目初步设计阶段, 轨道基础方案主要考虑 PHC 桩基轨道梁和复合地基轨道梁两种方案。

2.1 PHC 桩基轨道梁基础方案

PHC 桩基轨道梁基础采用直径 0.6 m 的 AB 型 PHC 桩, 间距 4.5 m 布置, 见图 1, 轨道梁采用矩形截面梁, 宽高尺寸为 1.0 m×1.6 m。上部轨道梁与下部桩基通过桩芯现浇连接在一起, 形成整体结构。其中 PHC 桩深入基岩, 在为轨道梁提供足够竖向承载力的同时, 通过整体式的结构也为轨道梁提供了强大的抗水平力, 有效避免了轨道基础在使用过程中发生的水平位移。由于不考虑桩间土的共同作用, 桩基轨道梁的截面弯矩比弹性地基梁更大一些, 因此截面配筋率也随之增加。

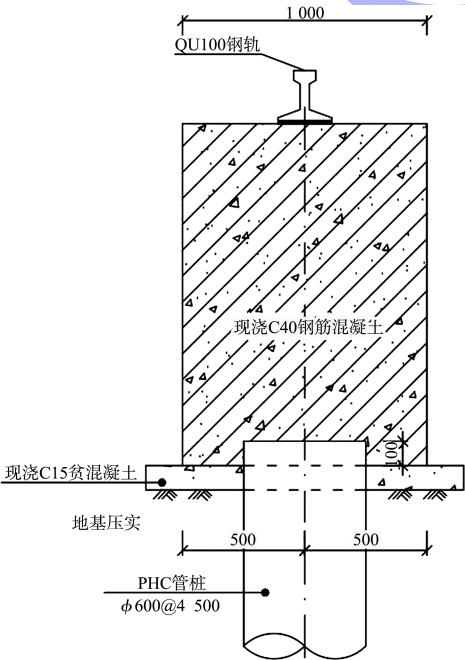


图 1 PHC 桩基轨道基础方案 (单位: mm)

2.2 复合地基轨道梁基础方案

根据钻孔资料, 场地软土层厚度及分布虽然不均匀, 但深度均在 20 m 以内, 可以采用水泥搅拌桩对轨道基础范围进行二次处理, 局部提高地基承载力、有效减少工后沉降。

复合地基采用桩径 0.6 m 的水泥搅拌桩垂直于轨道方向相切布置 3 根, 间距 0.6 m, 沿轨道梁方向桩间距 1.2 m; 轨道梁两侧扩大处理的 3~5 排搅拌桩, 间距 1.4 m×1.4 m, 正方形布置。桩体无侧限抗压 28 d 龄期强度不小于 1.0 MPa。轨道梁结构采用弹性地基梁, 倒 T 形截面(上顶宽×下底宽×高=0.8 m×1.7 m×1.5 m), 在轨道梁下设置 10 cm C15 素混凝土垫层、20 cm 水稳基层和 30 cm 的级配碎石底基层, 形成 3 层扩大基础, 进一步减少由轨道传递的竖向压力, 提高结构的稳定性, 见图 2。

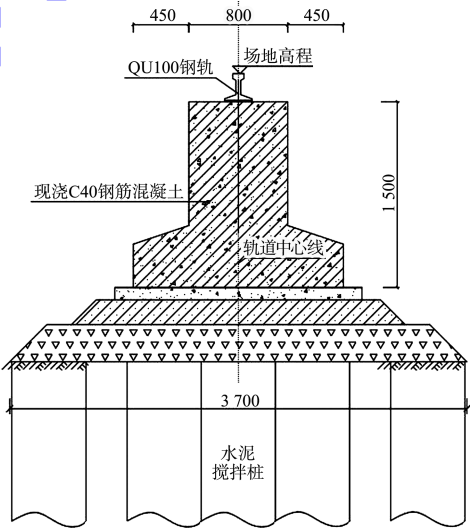


图 2 复合地基轨道基础方案 (单位: mm)

2.3 方案比选

针对初设阶段提出的两种可行方案, 从施工工期、质量以及沉降控制和造价等方面进行了定性和定量的比较^[5], 见表 1。

考虑到该项目施工工期紧、对质量要求高, 为保障项目按期完工和后期的顺利运营, 最终选择 PHC 桩基轨道梁基础方案作为设计方案。

表 1 初设阶段方案比选

轨道基础方案	施工工期	施工质量	沉降控制	工程造价	后期维护	其他
PHC 桩基轨道梁方案	施工速度快	预制桩、施工设备机械化程度高,质量控制较好	工后沉降、差异沉降几乎为 0	造价较高	后期维护成本低	由于桩基沉降很小,后期与周边场地会产生差异沉降,影响场地使用
复合地基轨道梁方案	施工速度较快	由于场地地层条件分布差异大,对成桩质量有一定影响	工后沉降<20 cm,差异沉降<10 cm	造价较低	后期维护成本高	水泥搅拌桩承载力较低,后期沉降无法避免

3 PHC 桩基轨道梁基础方案优化

3.1 方案优化思路

由于方案造价较高，为了缩减项目成本，进一步优化 PHC 桩基轨道梁方案，主要从 PHC 桩的桩径、桩距以及轨道梁截面 3 个方面，通过不同的组合比选得到最优方案。考虑 PHC 桩的持力层位于中风化岩层，桩径确定情况下桩基的承载力是确定的，因此通过比较不同组合下桩基承载力的利用率，可以得到以桩基承载力利用率最大为目标的最优组合。优化思路见图 3。

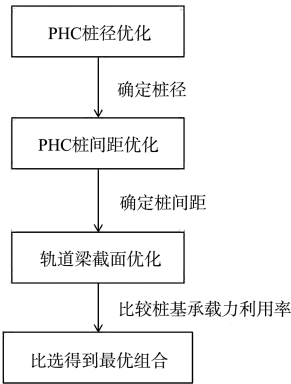


图 3 优化流程

3.2 SAP2000 有限元建模分析

以轨道梁 29 m 的标准段为例，采用 SAP2000 软件进行有限元建模分析，根据优化思路和中间成果，建立了图 4 所示的模型。轨道梁基础组合建模方案见表 2。

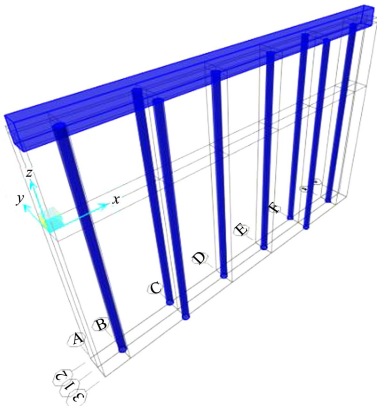


图 4 PHC 桩基轨道基础有限元模型

表 2 轨道梁基础组合建模方案

方案组合	桩径/mm	桩距/m	轨道梁截面/(m×m)
1	800	6.0	1.0×1.6
2	600	5.0	1.0×1.6
3	600	4.5	1.0×1.6
4	600	5.0	1.0×1.5
5	600	5.0	1.0×1.4
6	600	5.0	1.0×1.2

选取场地内具有代表性的钻孔数据分别计算不同桩径 PHC 桩的承载力特征值，结果见表 3。

表 3 PHC 桩基设计承载力特征值

PHC 桩基特征值	桩基抗压承载力/kN	桩基抗拔力/kN	桩基抗裂弯矩/(kN·m)
600PHC 桩 AB 型	2 263	1 016	223
800PHC 桩 AB 型	3 516	1 400	484

分别计算承载力极限状态和正常使用极限状态下各组合方案的轨道梁及桩基内力，结果见表 4。

表 4 内力计算结果

状态	方案组合	梁正弯矩/(kN·m)	梁负弯矩/(kN·m)	梁剪力/kN	桩弯矩/(kN·m)	拔桩力/kN	桩轴力/kN	桩基承载力利用率/%
承载力极限状态	1	1 784.0	2 040	1 766	428.0	0	2 688	76.4
	2	2 007.0	2 281	1 617	200.4	0	2 131	94.1
	3	1 814.5	1 584	1 369	136.0	37	1 998	88.2
	4	1 871.0	2 026	1 698	198.0	0	2 150	95.0
	5	1 736.0	1 801	1 679	219.0	0	2 191	96.8
	6	1 477.0	1 631	1 573	251.0	0	2 231	98.6

续表4

状态	方案组合	梁正弯矩/ (kN·m)	梁负弯矩/ (kN·m)	梁剪力/ kN	桩弯矩/ (kN·m)	拔桩力/ kN	桩轴力/ kN	桩基承载力 利用率/%
正常使用极 限状态	1	750.0	914	785	178.0	0	1 247	—
	2	856.0	1 009	717	82.7	0	980	—
	3	773.0	711	610	57.4	0	773	—
	4	796.0	902	744	85.0	0	950	—
	5	737.0	802	731	90.0	0	995	—
	6	624.0	719	679	103.0	0	1 003	—

3.3 优化方案分析

3.3.1 桩径的确定

通过比较组合 1 和组合 2 轨道梁标准段模型的内力(图 5、6,表 3) 可知,采用 800PHC 桩后,桩间距扩大到了 6 m,从而每标准段轨道梁可减少 1 根桩基,桩基抗压承载力也从 2 263 kN 显著提升到 3 516 kN,但承载力的利用率却从 94.1%下降至 76.4%,说明桩基承载力有较大富余,如果进一步扩大桩间距,轨道梁承受的弯矩也会相应增加,则原截面将无法满足。经过概算比较每标准段轨道梁造价,组合 1 仍要高出 1 000 元左右,因此在承载力足够的前提下,采用 600PHC 桩是更优选择。

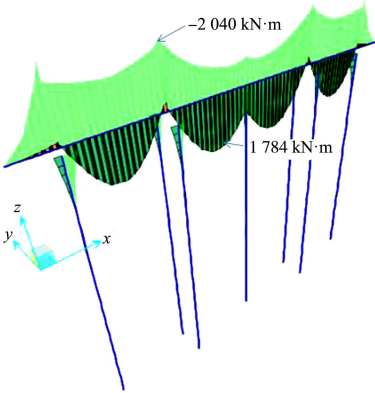


图 5 组合 1 轨道基础内力

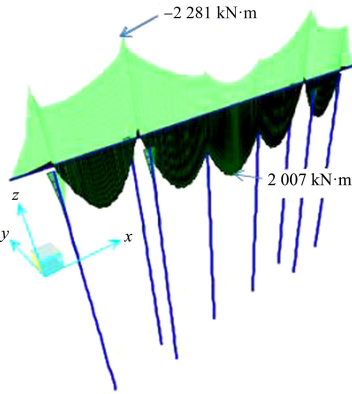


图 6 组合 2 轨道基础内力

3.3.2 桩距的确定

在确定了桩径后,通过比较组合 2、3 方案确定桩间距。内力计算结果见图 6、7 及表 4。原方案采用的 4.5 m 桩间距相对保守,当间距扩大到 5.0 m 时,桩基数量即可减少 1 根,但如果需要进一步减少桩基数量,则桩间距需要扩大至 6.0 m 以上,会对梁截面弯矩产生较大影响,且通过组合 1 可知,6.0 m 桩间距时的桩轴力将超过 600PHC 桩的特征值,因此只对 4.5 m 和 5.0 m 桩间距进行比较。分析组合 2 与组合 3 方案标准段轨道梁模型的计算结果可知,桩间距扩大到 5.0 m 是能够满足设计要求的,且桩基承载力仍有一定富余。

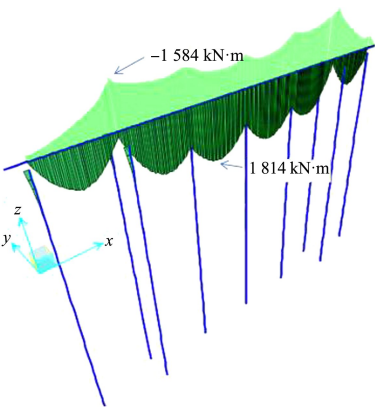


图 7 组合 3 轨道基础内力

3.3.3 轨道梁截面优化

考虑到 600PHC 桩在 5.0 m 间距布置的情况下桩基承载力仍有一定富余,且无法通过扩大桩间距实现桩基数量的优化,因此在此基础上对轨道梁截面进行优化比选。由于轨道可调式基座的宽度要求不小于 400 mm,因此轨道梁宽度 1 m 是比较合理的,调整优化的空间不大,通过组合 2、4、5、6,比较梁宽不变情况下减少梁高能否满足设计要求是主要的优化方向。

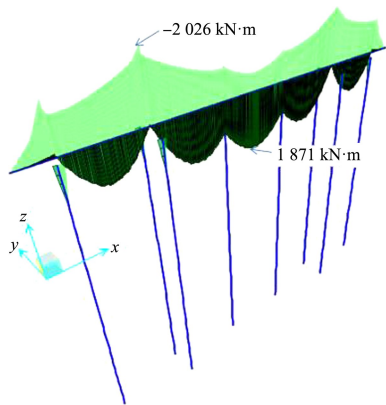


图 8 组合 4 轨道基础内力

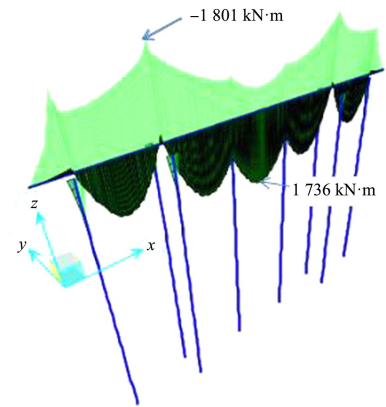


图 9 组合 5 轨道基础内力

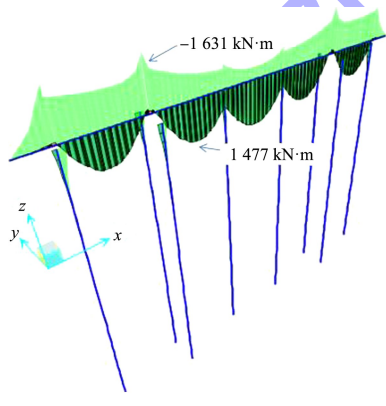


图 10 组合 6 轨道基础内力

比较组合 2~6 的计算结果(图 6~10,表 4)可知,当截面尺寸为 1.0 m×1.2 m 时,桩基承载力利用率最大,为 98.6%,但考虑到场地地质条件的不均匀分布,存在局部区域单桩承载力无法达到

设计特征值的情况。因此考虑截面尺寸为 1.0 m×1.4 m 时,桩基承载力利用率达到 96.8%,仍有少量富余,更为合适。

4 结论

1)自动化堆场中轨道基础是保障 ARMG 高效安全作业的关键,在设计中应结合地质条件和地基处理方案进行多方案比选,最终确定最合理的设计方案。

2)PHC 桩基轨道梁方案和复合地基轨道梁方案是自动化堆场中最常用的两种方案,PHC 桩基能够消除轨道梁基础的不均匀沉降,而复合地基则更具经济性。

3)通过 SAP2000 对 PHC 桩基轨道梁基础进行有限元建模分析,能够准确反映出轨道梁与 PHC 桩基在 ARMG 动荷载作用下的共同受力状态,从而有效指导方案的优化设计。

4)本文提出了一种 PHC 桩基轨道梁基础的优化思路,并通过 SAP2000 进行有限元建模计算,最终比选优化得到适用于本项目的最优桩径、桩距和轨道截面组合。

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, 2018.

[2] 程泽坤,何继红,刘广红. 自动化集装箱码头设计与实践[M].上海: 上海浦江教育出版社, 2019.

[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] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司.自动化集装箱码头设计规范: JTS 174—2019[S].北京: 人民交通出版社, 2020.

[5] 张春生. 码头门机轨道梁基础处理方法比较[J].水运工程, 2006(3): 69-71.

(本文编辑 武亚庆)