



# 自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础设计

马强, 范学勇

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 自动化集装箱码头堆场常采用 ARMG 进行集装箱自动化装卸作业, ARMG 轨道基础的合理设计是保证 ARMG 自动化作业安全高效运行的关键。通过对比分析天然地基轨道基础、复合地基轨道基础、桩基轨道基础 3 种常用 ARMG 轨道基础设计方案的特点, 并针对 3 种方案进行全生命周期的费用分析, 提出自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础的推荐方案以及轨道基础过路段差异沉降的控制措施。研究成果可为自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础设计提供借鉴。

**关键词:** 轨道基础; 天然地基; 复合地基; 桩基; 过路段

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0208-05

## Design of ARMG track foundation for automated container terminals

MA Qiang, FAN Xueyong

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

**Abstract:** ARMG is often used to automated operation for containers in automated container terminal yards. The rational design of ARMG track foundation is the key to ensure the safe and efficient operation of ARMG. Based on the comparative analysis of the characteristics of three common ARMG track foundation design schemes of natural foundation, composite foundation and pile foundation, and the cost analysis of the whole life cycle of the three schemes, this paper proposes the recommended scheme of ARMG track foundation of automated container terminal and the differential settlement control measures of ARMG track crossing sections. The research results can provide reference for the design of ARMG track foundation for automated container terminals.

**Keywords:** track foundation; natural foundation; composite foundation; pile foundation; crossing section

自动化集装箱码头在降低码头人工成本、实现绿色低碳、提升港口形象等方面发挥着重要作用, 是未来港口发展的趋势<sup>[1]</sup>。传统集装箱码头常采用轮胎式集装箱门式起重机 (rubber-tyred container gantry crane, RTG) 进行集装箱装卸作业, RTG 跑道梁常采用天然地基钢筋混凝土矩形梁形式, 其理论研究和设计施工均日益成熟。自动化集装箱码头则采用全自动轨道式集装箱龙门起重机 (automated rail mounted gantry crane, ARMG) 进行集装箱装卸作业, ARMG 具有高速重载、行驶轨迹固定、重复作用次数高等特点<sup>[2]</sup>, 其轨道基础应具备较高的疲劳强度和较低的变形要求。目前

国内针对如何科学合理设计 ARMG 轨道基础的研究成果较少。

本文提出 3 种 ARMG 轨道基础设计方案<sup>[3]</sup>, 通过分析 3 种方案的地基适用条件、轨道基础结构形式、全生命周期费用等, 提出自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础的推荐方案以及轨道基础过路段差异沉降的控制措施。

### 1 ARMG 轨道基础类型

#### 1.1 天然地基轨道基础

#### 1.1 适用条件

天然地基轨道基础适用于地质条件良好、地

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 马强 (1985—), 男, 高级工程师, 从事港口道路堆场设计工作。

基承载力较高的情况,包括:1)地质条件良好,无软土地基;2)原状表层软土厚度较小,一般厚度在3 m以内;3)原状地基无软土层,陆域形成回填料厚度较大,回填料要求为开山土石、中粗砂等<sup>[4]</sup>。

### 1.1.2 地基处理方案

对地质条件良好、无软土地基的情况,应根据表层土的性质进行处理。当表层土性质较好、可满足轨道基础承载力要求时,直接对表层土进行碾压处理;当表层土不能满足轨道基础承载力要求时,应对表层土进行超挖、换填性质良好材料,并对换填料进行分层碾压回填处理。

对原状表层软土厚度较小的地基情况,应采用换填法将软土全部换填性质较好的材料。换填法设计应满足地基的承载力和变形要求,将软弱土层换填为强度高、压缩性低的材料,从而有效提高地基承载力、减少基础的沉降量。

对原状地基无软土层、陆域形成回填料厚度较大的情况,可在回填过程中采用分层碾压法进行地基处理,并控制好填料的压实度;也可在回填完成后进行地基处理,对回填料为开山土石的情况采用强夯法进行处理,对回填料为砂性土的情况采用振冲法或强夯法进行地基处理。

### 1.1.3 轨道基础方案

天然地基轨道基础截面通常采用钢筋混凝土倒T形梁结构,顶面宽0.8~1.0 m,底宽1.5~2.0 m,高1.2~1.5 m,尺寸根据场地承载力条件和轨道基础刚度要求计算确定。通过基层、底基层刚度的逐渐过渡,与轨道基础形成弹性层状体系,将压力传递到地基,减少轨道基础变形<sup>[5]</sup>。为了达到最理想的效果,天然地基轨道基础常采用可调式钢轨扣件,以消除使用过程中产生的差异沉降,可调式钢轨扣件的竖向最大可调节高度通常为10 cm。天然地基轨道基础断面见图1。

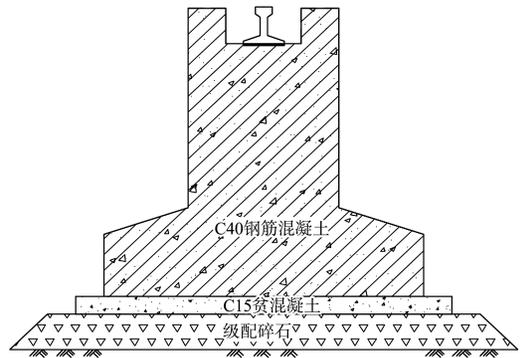


图1 天然地基轨道基础断面

## 1.2 复合地基轨道基础

### 1.2.1 适用条件

复合地基轨道基础适用于天然或吹填形成的陆域,该情况下采用常规大面积地基处理方法如真空预压、堆载预压等无法满足轨道基础对沉降的要求,需要对轨道基础区域进行复合地基二次处理,以减少工后地基的整体沉降和差异沉降。

### 1.2.2 地基处理方案

常用的复合地基处理方法有水泥搅拌桩、高压旋喷桩等。水泥搅拌桩造价较低,施工速度快,工期短,质量稳定,一般要求打穿软土层进入相对较硬的下卧土层,处理深度一般在25 m以内;高压旋喷桩穿透能力强,能打穿硬土层,处理深度可达30~40 m,但施工难度较大,桩径不易控制,造价较高,一般为水泥搅拌桩的2倍左右<sup>[6]</sup>。

### 1.2.3 轨道基础方案

当采用水泥搅拌桩复合地基轨道基础时,轨道基础上部结构常采用钢筋混凝土倒T形梁结构,顶面宽0.8~1.0 m,底宽1.5~2.0 m,高1.2~1.5 m,尺寸根据场地承载力条件和轨道基础刚度要求来计算确定。复合地基对上部的轨道基础刚度影响较小,在设计上需考虑轨道基础具有足够的刚度,以使轨道基础的挠度满足ARMG高速重载行走的要求。复合地基轨道基础虽能有效减小轨道地基的整体沉降和差异沉降,但因地基处理深度有限,工后仍会出现一定的沉降,同样需要采用可调式钢轨扣件<sup>[7]</sup>。水泥搅拌桩复合地基轨道基础断面见图2。

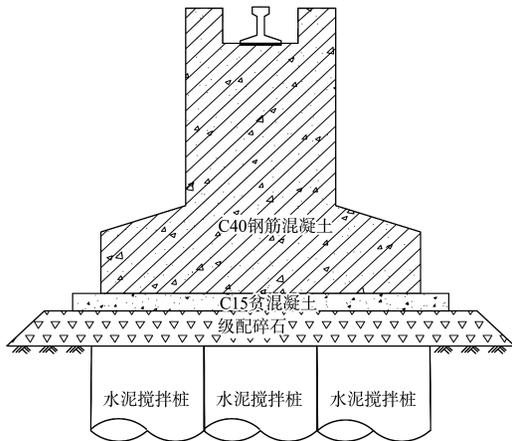


图2 复合地基轨道基础断面

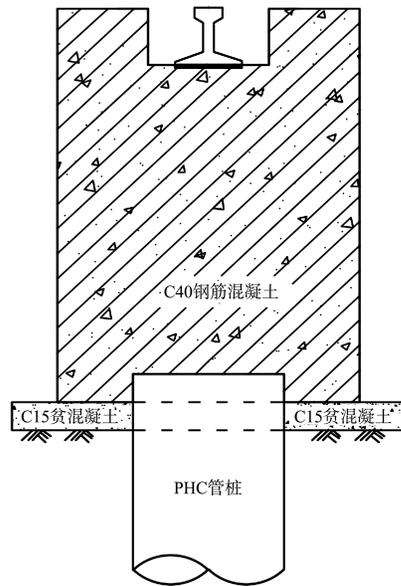


图3 桩基轨道基础断面

### 1.3 桩基轨道基础

#### 1.3.1 适用地质条件

桩基轨道基础适用于软土厚度较厚，且具备坚硬持力层的地质情况。

#### 1.3.2 地基处理方案

常用的桩基础主要有钻孔灌注桩、PHC管桩等，其中PHC管桩具有单桩承载力高、工厂标准化预制、桩身质量可靠、施工机械化程度高等特点，在自动化集装箱码头中得到广泛应用。

#### 1.3.3 轨道基础方案

桩基轨道基础上部结构常采用钢筋混凝土矩形梁，下部常采用0.6、0.8 m直径PHC管桩。PHC管桩可通过增大桩径、桩间距以减少打桩数量，降低打桩施工难度；同时，采用PHC桩基对上部钢筋混凝土轨道基础结构刚度有提高作用，且ARMG荷载全部由PHC桩基承担，桩间土影响很小。与天然地基轨道基础相比，桩基轨道基础截面弯矩较大，需要加大轨道基础截面高度并增加截面配筋面积，以增加梁体竖向抗弯刚度<sup>[8]</sup>。桩基轨道基础作为深基础，可以提供足够的承载能力，工后整体沉降和差异沉降都很小。桩基轨道基础断面见图3。

## 2 ARMG轨道基础方案选型

### 2.1 全生命周期费用分析

全生命周期费用通过综合分析不同方案建设期的工程基建费、运营期的维修养护费和其他费用(主要指维修养护期间由于影响生产而造成的间接损失)，确定各方案投资消耗的最佳值，从而得到满足目标要求下的全生命周期内费用最低的方案。

天然地基轨道基础常采用钢筋混凝土倒T形梁，配合采用高度可调式钢轨扣件，工程基建费低。运营期轨道基础会产生较大的差异沉降，10 cm以内的差异沉降可通过钢轨扣件进行调节，10 cm以上的差异沉降则需要对轨道基础进行改造，常用的方法是将钢轨及钢轨扣件拆除，将轨道梁基础进行加高处理。运营期维修养护难度大、费用高，且维修养护周期长对正常生产影响大，引起的其他费用也高。

复合地基轨道基础上部结构常采用现浇钢筋混凝土倒T形梁，配合采用高度可调式钢轨扣件，工程基建费适中。运营期复合地基轨道基础仍会

产生一定的差异沉降, 一般可控制在 10 cm 以内, 可通过钢轨扣件进行调节, 方便快捷, 对正常生产运营影响小。预计运营期维修养护次数 1~2 次, 维修养护费用低, 其他费用低。

桩基轨道基础上部结构常采用现浇钢筋混凝土矩形梁, 工程基建费用高。运营期桩基轨道基础基本无沉降, 但会造成过路段轨道基础与两侧道路产生一定的差异沉降, 仍需必要的维修养护。预计运营期维修养护次数 1~2 次, 维修养护费用低, 其他费用低。不同轨道基础类型的全生命周期费用对比见表 1。

表 1 不同轨道基础类型的全生命周期费用对比

轨道基础类型	工程基建费	维修养护费	其他费用
天然地基	低	高	高
复合地基	中	低	低
桩基	高	低	低

## 2.2 方案选型

对天然地基轨道基础、复合地基轨道基础、桩基轨道基础从施工难度、施工工期、使用期沉

降、沉降适应性及全生命周期费用等方面进行综合对比, 见表 2。由表可知: 1) 天然地基轨道基础施工难度小, 使用期整体沉降大、轨道基础沉降适应性差, 沉降超过 10 cm 时轨道基础修复困难。该基础对项目地基状况要求较高, 一般沿海地区吹填成陆的自动化集装箱码头地基经大面积处理后基本不能满足基础地基要求, 所以天然地基轨道基础基本不适用于沿海地区自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础设计, 但在地基条件较好的内河自动化集装箱码头可作为 ARMG 轨道基础的比选方案。2) 复合地基轨道基础施工难度大, 使用期整体沉降小(一般不超 10 cm), 轨道基础沉降适应性好, 10 cm 以内的沉降均可通过可调式钢轨扣减消除, 全生命周期费用适中。该基础在近年修建的自动化集装箱码头中应用广泛, 可以作为自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础设计的推荐方案。3) 桩基轨道基础施工难度大, 使用期基本无沉降, 全生命周期费用高, 可作为自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础设计的比选方案<sup>[9]</sup>。

表 2 不同轨道基础类型综合对比

轨道基础类型	施工难度	施工工期	使用期沉降	沉降适应性	全生命周期费用
天然地基	小	短	整体沉降大	沉降适应性差, 沉降超过 10 cm, 轨道基础修复困难	高
复合地基	大	长	整体沉降小	沉降适应性好, 10 cm 以内的沉降均可通过可调式钢轨扣板消除	适中
桩基	大	长	基本无沉降	-	高

## 3 ARMG 轨道基础过路段差异沉降控制

由于轨道基础过路段和两侧相邻道路地基处理方式不同, 轨道基础与两侧相邻道路容易产生一定的差异沉降, 影响自动化运输设备的行驶平顺性, 严重时甚至引起自动化运输设备的跳车现象<sup>[10]</sup>。如何有效控制轨道基础过路段的差异沉降是轨道基础过路段设计的重点和难点。天然地基轨道基础与两侧相邻道路地基处理方式相同, 轨道基础过路段并不会产生明显的差异沉降, 以下仅针对复合地基和桩基轨道基础提出合理的轨道基础过路段差异沉降控制措施。

### 3.1 复合地基轨道基础过路段差异沉降控制

复合地基轨道基础应在轨道基础两侧一定范

围内设置钢筋混凝土搭板过渡段, 搭板与轨道基础用传力杆连接, 搭板长度常采用 8~10 m, 搭板过渡段地基常采用处理深度逐渐减小的水泥搅拌桩。过渡断面见图 4。

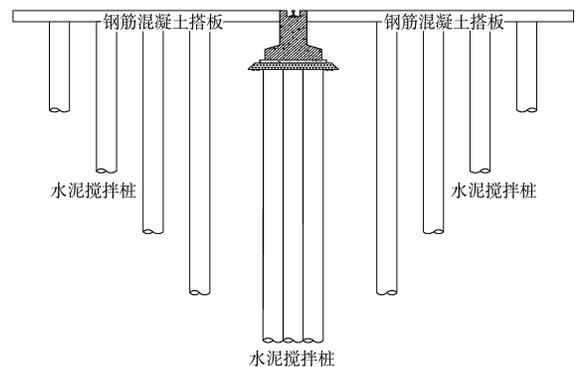


图 4 水泥搅拌桩过渡断面

### 3.2 桩基轨道基础过路段差异沉降控制

桩基轨道基础应在轨道基础两侧一定范围内设置钢筋混凝土搭板过渡段，搭板长度常采用 8~10 m，搭板过渡段常用地基处理方式有 2 种：水泥搅拌桩和 PHC 长短桩组合过渡。

1) 水泥搅拌桩过渡。为避免钢筋混凝土搭板

在搭接处拱起，搭板与相邻混凝土道路铺面通过传力杆连接，使该范围内道路的沉降能够均匀过渡，避免在轨道基础过路段出现跳车现象，减小对自动化运输设备的影响，保障自动化作业的安全。过渡断面见图 5。

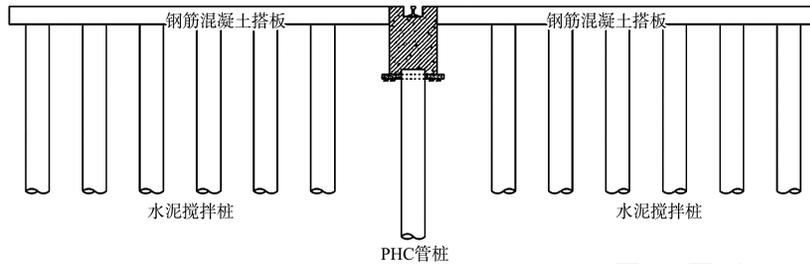


图 5 水泥搅拌桩过渡断面

2) PHC 长短桩组合过渡。PHC 桩的布置原理与水泥搅拌桩类似，PHC 桩具有工厂化预制和施工沉桩快的特点，有利于节约工期。过渡段

PHC 桩以摩擦桩为主，为过渡段道路提供额外的支撑，通过增加桩间距或缩短桩长使沉降得以均匀过渡。过渡断面见图 6。

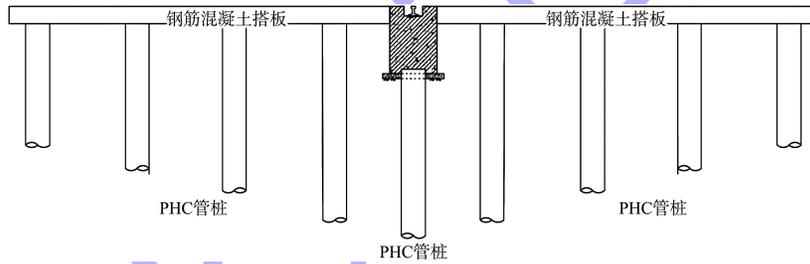


图 6 PHC 桩过渡断面

### 4 结语

1) 根据地基状况，ARMG 轨道基础可采用天然地基轨道基础、复合地基轨道基础、桩基轨道基础。从全生命周期费用综合考虑，天然地基轨道基础全生命周期费用较高，复合地基轨道基础全生命周期费用适中，桩基轨道基础全生命周期费用最高。

2) 通过多因素比选得出，天然地基轨道基础可作为地基条件较好的内河自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础的比选方案，复合地基轨道基础可以作为自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础设计的推荐方案，桩基轨道基础可作为自动化集装箱码头 ARMG 轨道基础设计的比选方案。

3) 复合地基轨道基础过路段应在轨道基础两侧一定范围内设置钢筋混凝土搭板过渡段，其地

基常采用处理深度逐渐减小的水泥搅拌桩；桩基轨道基础过路段应在轨道基础两侧一定范围内设置钢筋混凝土搭板过渡段，其地基常采用水泥搅拌桩或 PHC 长短桩组合。

### 参考文献：

[1] 麦宇雄, 刘洋, 梁浩. 自动化集装箱码头平面与工艺总体布局现状与发展趋势[J]. 水运工程, 2022(10): 1-7.

[2] 元征, 于青双. 青岛港集装箱自动化码头关键技术综述[J]. 港工技术, 2020, 57(5): 16-19.

[3] 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 174—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

[4] 张恩铭. 不同场地条件下轨道基础设计研究[J]. 工程与建设, 2020, 34(1): 69-70.