



# 复杂地层下轨道基础差异沉降分析和 自动化监测\*

赵文惠, 肖熠

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 盐田港东作业区拟建成为自动化集装箱堆场, 堆场采用轨道式龙门吊作业, 因场地不具备施打桩基的条件, 采用强夯置换法进行轨道基础区域的加固。针对东作业区地层组成极为复杂, 且突变地层较多, 同时轨道吊对差异沉降要求极高的问题, 结合现场已完成地基处理区域的检测数据, 采用各向同性均质线性变形体理论, 对场地的工后沉降和差异沉降进行分析计算。结果表明, 强夯置换对地基基础沉降有明显改善作用, 但在局部抛石层与填土层交接处差异沉降相对较大。针对该结论进行了自动化监测的方案研究, 提出采用全站仪自动化检测系统, 对安全风险系数较高的区域进行监测, 通过自动化监测系统的自动整理数据、分析结果, 可实时了解和掌控轨道的运行安全。

**关键词:** 复杂地层; 轨道基础; 强夯置换; 差异沉降; 自动化监测

中图分类号: U655.57

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0116-05

## Analysis of differential settlement of track foundation and automatic monitoring in complex geological formations

ZHAO Wenhui, XIAO Yi

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

**Abstract:** The east operating area of Yantian Port is planned to be developed into an automated container yard, which will be operated by rail-mounted gantry crane (RMG). Due to the lack of conditions for pile foundation construction on the site, the track foundation area will be reinforced by dynamic compaction replacement method. In response to the extremely complex geological composition and frequent abrupt changes in the area, as well as the high requirements for differential settlement by rail cranes, this article combines the detection data of the completed foundation treatment area on site and adopts the theory of isotropic homogeneous linear deformation to analyze and calculate the post construction settlement and differential settlement of the site. The results show that dynamic compaction replacement has a significant improvement on the foundation settlement, but the differential settlement is relatively large at the junction of the local riprap layer and the fill layer. In response to this conclusion, this article conducts a study on the scheme of automated monitoring and proposes the idea of using a total station automated detection system to monitor areas with high safety risk factors. Through the automatic organization of data and analysis results by the automated monitoring system, the safety of track operation can be monitored and controlled in real time.

**Keywords:** complex geological formations; track foundation; dynamic replacement by heavy tamping; differential settlement; automatic monitoring

随着科技的不断进步, 自动化港区越来越普及, 作为自动化港区核心作业设备的轨道式龙门

吊对地基稳定性要求极高, 其中差异沉降是轨道式龙门吊基础设计时的重要控制标准<sup>[1]</sup>, 针对土

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: 赵文惠 (1993—), 女, 工程师, 从事海堤、堆场结构相关设计工作。

质分布不均匀的场地, 通常采用桩基消除差异沉降<sup>[2]</sup>, 但当现场不具备打桩条件时, 则须选择其他处理方式尽量减少差异沉降, 强夯置换法为可替代方式之一, 但强夯置换法的成桩效果、有效加固深度一直备受争议<sup>[3]</sup>。本文结合盐田港东作业区自动化堆场项目, 分析在极为复杂的地质条件下, 采用强夯置换法加固后, 计算轨道式龙门吊基础的沉降, 并分析地质突变区域之间的差异沉降, 提出了在运营期间自动化监测的设想。

### 1 工程概况

盐田港东作业区位于深圳市盐田区大鹏湾北岸, 主要用途为自动化重箱及空箱堆场, 采用轨道式龙门吊作业, 轨距 37 m, 每支腿 8 轮, 每轮

轮压 262 kN。轨道区域地基处理采用强夯置换法。

### 2 地质条件

工程地层分布极不均匀(图 1), 场地浅部为回填土层, 填料成分复杂, 包括软弱黏性土、中粗砂土和碎石土, 不同回填成分工程地质性质差异较大(表 1), 并且没有成层回填, 回填土层分布规律差, 回填时间为 5~10 a, 结构较为松散, 均匀性差, 固结程度低。回填土层下伏可塑-硬塑状粉质黏土和中密-密实状砂土, 局部发育软塑状黏性土和松散-稍密状砂土软弱透镜体; 场地底部为残积土和基岩风化层, 风化程度不均匀, 基岩顶板起伏大, 且该场地发育多种岩性基岩, 软硬差异较大。

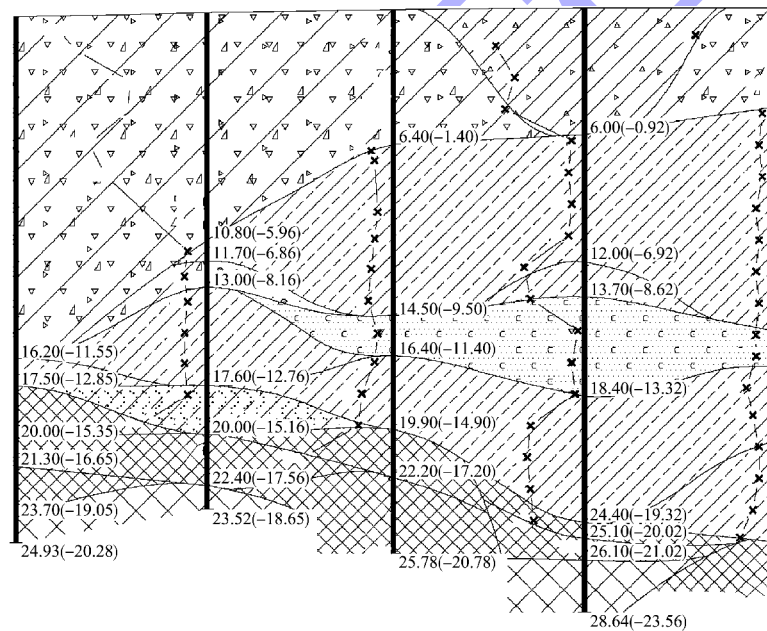


图 1 工程典型地质剖面 (单位: m)

Fig. 1 Typical geological profile of project (unit: m)

表 1 土层物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical indices of soil layers

土层编号	土层名称	含水率 $\omega/\%$	孔隙比 $e$	压缩模量 $E_{s1-2}$
① <sub>1</sub>	素填土	28.96	0.945	3.90
① <sub>1-1</sub>	填砂	20.48	0.656	5.13
① <sub>5</sub>	粉质黏土	37.00	1.069	3.43
③ <sub>2</sub>	粉质黏土	28.18	0.835	5.17
③ <sub>2-1</sub>	粉质黏土	34.19	0.998	3.64
③ <sub>2-1</sub>	中粗砂	18.33	0.615	5.75
③ <sub>3</sub>	中粗砂	18.57	0.638	5.75
③ <sub>4</sub>	粉质黏土	25.65	0.746	5.86

### 3 地基处理

#### 3.1 地基处理方案

场地内地基均匀性差, 差异沉降明显, 表层覆盖约 5 m 厚块石层, 若采用桩基方案施工困难, 因此采用强夯置换法代替。

强夯置换法采用点夯+普夯的工艺<sup>[4]</sup>, 点夯夯锤采用特制的圆柱形钢质锤, 直径 1.4~1.5 m, 夯点间距 4 m, 单点夯击次数不少于 16 击, 前 6 击夯击能量 3 000 kJ, 之后采用 6 000 kJ 夯击能

量, 点夯后沿轨道中心线进行一次搭接普夯, 普夯夯能 1 500 kJ, 夯锤直径 2.7 m, 每点击数 4 击, 夯点搭接 1/3 夯锤直径。夯点平面布置见图 2。

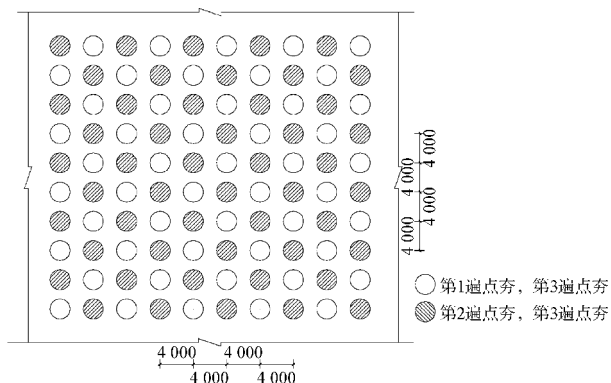


图 2 夯点平面布置 (单位: mm)  
Fig. 2 Plan layout of tamping points (unit: mm)

### 3.2 轨道吊基础结构

轨道式龙门吊基础采用倒 T 形的弹性地基梁结构<sup>[5]</sup>, C40 钢筋混凝土, 梁底宽 2.5 m, 梁高 1.433 m, 结构断面见图 3。

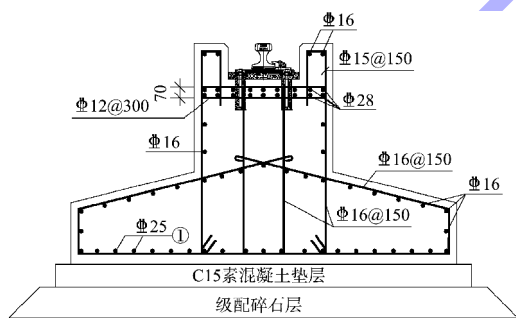


图 3 轨道吊基础结构断面 (单位: mm)  
Fig. 3 Section of RMG foundation structure (unit: mm)

## 4 沉降分析

### 4.1 理论依据

根据 CECS279: 2010《强夯地基处理技术规程》规定<sup>[6]</sup>, 复合土层的压缩模量可按式计算:

$$E_{sp} = [1 + m(n-1)] E_s \quad (1)$$

式中:  $E_{sp}$  为复合土层压缩模量, MPa;  $E_s$  为桩间土压缩模量, MPa, 宜按当地经验取值, 如无经验时, 可取天然地基压缩模量;  $m$  为面积置换率;  $n$  为桩土应力比。在无实测资料时, 对黏性土可取 2~4, 粉土可取 1.5~3.0, 原土强度低取大值, 原土强度高取小值。

地基变形计算依据各向同性均质线性变形体理论。变形量可按式计算<sup>[7]</sup>:

$$s = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{s,i}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (2)$$

式中:  $s$  为地基最终变形量, mm;  $s'$  为按分层总和法计算的地基变形量, mm;  $\psi_s$  为沉降计算经验系数;  $n$  为地基变形计算深度范围内所划分的土层数;  $p_0$  为准永久组合时基础底面处的附加应力, kPa;  $E_{s,i}$  为基础底面下第  $i$  层土的压缩模量, MPa;  $z_i$ 、 $z_{i-1}$  为基础底面至第  $i$  层土、第  $i-1$  层土底面的距离, m;  $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$  为基础底面计算点至第  $i$  层土、第  $i-1$  层土底面范围内平均附加应力系数。

### 4.2 现场检测数据

在已经完成地基处理的轨道区域进行钻孔检测, 每条轨道选多点进行钻孔, 主要检测内容为碎石柱长度和终孔深度, 见表 2。

表 2 各检测点碎石柱长度及终孔深度

Tab. 2 Length of gravel columns and depth of pile holes at each detection point

钻孔点	碎石柱长度/m	终孔深度/m	钻孔点	碎石柱长度/m	终孔深度/m	钻孔点	碎石柱长度/m	终孔深度/m
1A-1-41	5.10	5.70	1A-1-17	4.10	5.00	1A-1-29	4.00	4.60
1A-1-127	5.30	5.90	1A-1-125	4.50	4.60	1A-1-137	5.00	5.90
1B-1-30	4.70	5.10	1B-1-8	5.30	5.55	1B-1-62	4.00	4.80
1B-1-215	4.80	7.00	1B-1-124	5.60	5.80	1C-1-6	5.60	6.00
1C-1-10	5.95	6.40	1C-1-58	3.60	4.20	1C-1-128	10.85	11.25
1C-1-195	5.55	6.00	1C-1-122	9.95	10.40	1D-1-68	5.00	5.90
1D-1-25	7.90	8.30	1D-2-109	9.40	9.80	1H-2-153	5.00	5.90
1H-2-190	5.30	5.80	1D-2-142	6.50	8.90	1F-1-58	5.60	11.30
1H-1-92	11.80	12.30	1F-2-142	7.90	8.50	1G-1-77	7.00	10.00

### 4.3 沉降计算

根据现场检测数据,对强夯置换形成的碎石墩在长度上已有初步判断,结合碎石柱长度检测点所在钻孔对后期变形进行计算(表3),并分析相邻检测点间的差异沉降(表4)。本次沉降计算采用理正结构工具箱软件中地基沉降板块。

表3 沉降计算  
Tab.3 Settlement calculation

箱区	检测 点位	所处 钻孔	沉降/ mm	箱区	检测 点位	所处 钻孔	沉降/ mm
1A	17	LK003	28.413	1C	122	LK124	19.039
	29	LK004	28.102		128	LK125	27.738
	41	LK006	27.271		195	LK129	29.446
	125	LK040	28.604	1D	25	LK147	23.485
	127	LK041	28.836		68	LK150	29.345
	137	LK042	27.363		109	LK169	27.707
1B	8	LK060	28.162	142	LK170	19.352	
	30	LK062	29.538	1F	58	LK236	22.394
	62	LK064	28.644		142	LK254	28.087
	124	LK081	28.371	1G	77	LK282	25.189
	215	LK087	29.790	92	LK313	19.182	
1C	6	LK102	27.004	1H	153	LK324	29.109
	10	LK102	26.991		190	LK327	19.402
	58	LK106	27.231				

表4 同轨道相邻点位差异沉降  
Tab.4 Differential settlement of adjacent points  
on same track

箱区	检测 点位	差异 沉降/%	箱区	检测 点位	差异 沉降/%
1A	17~29	-0.000 6	1C	6~10	-0.000 1
	29~41	-0.001 7		10~58	0.000 1
	125~127	0.002 9		122~128	0.036 2
	127~137	-0.003 7		128~195	0.000 6
1B	8~30	0.001 6	1D	25~68	0.003 4
	30~62	-0.000 7		109~142	-0.006 3
	124~215	0.000 4	1H	153~190	-0.006 6

按照相关规范要求,轨道吊基础地基差异沉降应 $\leq 0.5\%$ ,根据已有的地基钻孔检测资料,通过计算可知,强夯置换加固后对于浅层的松散土层加固效果明显,同一轨道点与点之间差异沉降较小,均满足使用要求。但在1C箱区122~128点位处,点位之间距离为24 m,成桩长度接近,因地层组成不同,122点位下方块石较厚且岩层较高

无明显压缩层,而128点位下方块石层厚度减少了6 m,且块石下方存在粉质黏土层,导致该组检测数据的差异沉降值相对较大。对于相邻钻孔之间地层的突变现象建议在轨道吊运营期间加强监测,降低风险。

## 5 运营期监测

### 5.1 监测目的

尽管强夯置换法处理后的工后沉降均在设计标准范围内,但由于本工程地质条件的特殊性,在钻孔与钻孔间仍存在地层的不确定性,因此需要在运营期间加强轨道的监测,尤其在差异沉降较大的区域增设监测点。

### 5.2 监测方法

目前,我国对于结构的位移变形观测方案包括:自动全站仪测量、液体静力水准测量、卫星定位测量(实时差分定位,Real-time kinematic,RTK)和传统机器视觉测量,其中自动化全站仪测量为广泛使用的监测手段<sup>[8-9]</sup>。

全站仪自动化监测系统主要由GeoMoS软件、徕卡TM50监测机器人、无线数据传输组成,其中TM系列机器人具有调节焦距、正倒镜监测、数据记录、辨别目标、对准作用等自动功能,可自动测量监测点的绝对位移,进而计算位移类变形,满足自动化、实时化、精度高等使用要求<sup>[10]</sup>,可对运营时期的轨道进行全天候监测,并自动整理和分析监测数据,及时在系统平台上发布,可实时了解和掌控轨道运行安全。

### 5.3 监测方案

为确保自动化监测数据的准确性,重点在于选择合适的基准点,通常选在地质相对稳定,周边环境扰动较少的区域。针对集装箱堆场的运营特点,基准点可设置于轨道端头车挡一侧,不受轨道运行、堆箱及港区集卡的影响。

监测点则沿轨道方向按一定间隔进行布置,并根据地质情况适当调整监测点密度,当遇到地层突变的区域,如场地内抛石层与素填土层相接处,需减小监测点间距,加密布置。

## 6 结语

1) 盐田港东作业区地层组成极为复杂, 强夯置换加固后, 成桩效果较好, 对于浅层的松散土层加固效果明显。

2) 根据现场检测数据, 采用各向同性均质线性变形体理论计算地基变形, 得出同一轨道点与点之间差异沉降为 0.000 1%~0.036 2%, 均满足使用要求。

3) 由于钻孔密度有限, 地质突变在工程范围内又极为常见, 因此采用全站仪自动化监测系统, 监测点沿轨道方向按一定间隔进行布置, 在突变位置加密监测点, 实时掌握轨道运行情况。

### 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.  
CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd. Design code of road and storage yard for port area: JTS 168-2017 [S]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2017.
- [2] 刘东旭. 软土地基 450 t 提梁龙门吊行走轨道基础设计[J]. 国防交通工程与技术, 2017, 15(2): 24-27.  
LIU D X. On the design of the track foundation for 450 t girder-lifting gantry cranes on weak soil ground[J]. Traffic engineering and technology for national defence, 2017, 15(2): 24-27.
- [3] 水伟厚. 对强夯置换概念的探讨和置换墩长度的实测研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 502-506.  
SHUI W H. Exploring concept of dynamic replacement and measured length of replacement pier [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(S2): 502-506.
- [4] 李岳, 刘文俊, 蔡靖, 等. 强夯置换的 ALE 法仿真与夯击参数研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (7): 1471-1479.  
LI Y, LIU W J, CAI J, et al. Simulation of dynamic compaction replacement using ALE method and tamping parameters [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(7): 1471-1479.
- [5] 周淦成. 弹性地基上龙门吊轨道基础计算[J]. 工程建设与设计, 2021(19): 29-31, 40.  
ZHOU G C. Calculation of gantry crane track foundation on elastic foundation [J]. Construction & design for engineering, 2021(19): 29-31, 40.
- [6] 山西省机械施工公司, 陕西建筑工程(集团)总公司. 强夯地基处理技术规程: CECS 279: 2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.  
Shanxi Machinery Construction Company, Shaanxi Construction Engineering (Group) Corporation. Technical specification for ground treatment by heavytamping: CECS 279: 2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [7] 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
China Academy of Building Research. Code for design of building foundation: GB 50007-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [8] 刘冠兰. 地铁隧道变形监测关键技术与分析预报方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.  
LIU G L. Study on the method of monitoring and data processing for metro tunnel deformation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [9] 邱国庆. 基于全站扫描仪的地铁隧道变形监测方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.  
QIU G Q. Study on the methods of subway tunnel deformation monitoring based on total station scanner [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [10] 刘玉勇. 自动化监测系统在城市轨道交通工程控制保护区既有线监测中的应用探讨[C]//中国土木工程学会. 2021年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册), 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 175-178.  
LIU Y Y. Application of automatic monitoring system in monitoring existing lines of urban rail transit engineering control protection area [C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of the 2021 national civil engineering construction technology exchange conference (volume 1), Beijing: China Architecture & Building Press, 2021: 175-178.

(本文编辑 赵娟)