

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.006

## 地铁竖井深基坑与龙门吊轨道基础共同作用分析\*

施有志<sup>1</sup>, 赵花丽<sup>1</sup>, 阮建凑<sup>1</sup>, 林树枝<sup>2</sup>

(1. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门市交通运输局, 福建 厦门 361003)

**摘要:**为合理设计地铁区间隧道竖井基坑支护方案和龙门吊基础,以厦门市轨道3号线某区间隧道竖井工程为研究背景,采用PLAXIS 3D岩土有限元数值分析软件建立竖井基坑、龙门吊轨道基础结构及邻近渣坑堆土相互作用的三维数值模型,模拟计算12种龙门吊荷载不同作用位置及偏压作用工况,结果表明:龙门吊行车作用下的地表最大沉降为4 mm,基坑围护墙结构最大变形值为16 mm,约为基坑开挖深度的0.64%;基坑开挖变形引起的龙门吊轨道基础结构内力变化最大值为270 kN·m,变化幅度约为16.4%;周边堆土对竖井基坑变形及轨道梁内力变化量不超过13%,主要需满足未堆土工况下的侧壁自身稳定性;最后通过对基坑的监测数据分析,表明数值模型可靠,基坑总体上安全稳定,龙门吊基础设计合理,且有足够的安全度。

**关键词:**竖井; 深基坑; 龙门吊基础; 龙门吊行车荷载; 周边堆土

**中图分类号:** TU473.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0527-10

## Analysis on the Interaction between Deep Foundation Pit of Subway Shaft and Rail Foundation of Gantry Crane

SHI Youzhi<sup>1</sup>, ZHAO Huali<sup>1</sup>, RUAN Jiancou<sup>1</sup>, LIN Shuzhi<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China;  
2. Xiamen Transportation Bureau, Xiamen 361003, China)

**Abstract:** In order to reasonably design the supporting scheme of the shaft foundation pit and the gantry crane foundation of the Metro tunnel, taking the shaft engineering in Xiamen Railway Line 3 as the research background, this paper establishes a three-dimensional numerical model by using the 3D geotechnical finite element numerical analysis software PLAXIS to study the interaction of the shaft foundation pit, the gantry crane rail foundation structure and the adjacent slag pit. The conditions with 12 kinds of gantry crane loads at different locations and under eccentric loading conditions are simulated and calculated. Results show that the maximum ground settlement under gantry crane operation is 4 mm. The maximum deformation value of the retaining wall structure of the foundation pit is 16 mm, which is about 0.064 percent of the excavation depth. The variation of the internal force of gantry crane rail foundation structure caused by deformation of foundation pit excavation is 270 kN·m. The variation rate is about 16.4%. The variation of foundation pit deformation and internal force of rail beam caused by surrounding pile soil is no more than 13%. The design mainly needs to meet the side wall stability under the condition of no pile soil. Finally, the monitoring data of foundation pit shows

\* 收稿日期:2018-07-04;修回日期:2018-12-08

基金项目:厦门市科技计划项目(3502Z20183043)、厦门市建设局科技项目(XJK-2019-1-4)资助

作者简介:施有志(1976-),男,教授,博士。主要从事岩土与地下工程方面的研究。Email:2013110907@xmut.edu.cn

that the numerical model is reliable, the foundation pit is generally safe and stable, and the gantry crane foundation is reasonable and safe enough.

**Keywords:** vertical shaft; deep foundation pit; gantry crane foundation; gantry crane traffic load; surrounding pile-up soil

## 引言

竖井是地铁施工中经常遇到的一种辅助性结构,它既可以作为临时结构(如区间隧道的施工通道),也可以作为永久结构(如通风竖井)。大型地铁竖井深基坑的施工方法以明挖为主,包含较多突变因素,如场地土的地质水文条件和周边环境条件(邻近建筑物、地下管线等),具有强烈的地域性、综合性、实践性和风险性<sup>[1-5]</sup>。龙门吊作为地铁竖井深基坑、竖井永久结构及区间隧道暗挖施工所需的起吊、垂直运输首选设备,其基础结构设计,从安全、经济等方面考虑至关重要。贾波等<sup>[6]</sup>和方华等<sup>[7]</sup>建立三维有限元分析模型,分析隧道竖井基坑施工对地下管线的影响,引起周边建筑物变形的特点、原因及规律;孙永超等<sup>[8]</sup>和刘滨葭等<sup>[9]</sup>采用有限元数值模拟方法,通过分析不同堆载大小、宽度和坑边距工况下围护墙变形、地表沉降及支撑轴力的基本特性,研究坑外堆载对基坑支护结构内力和位移的影响;吴从师等<sup>[10]</sup>分析了深基坑地下连续墙在不同工况下的变形规律,揭示龙门吊集中力荷载对地下连续墙变形的影响,提出了优化后的支撑位置;张厚美等<sup>[11]</sup>以广州地铁2号线赤岗地铁车站为例,以土弹簧模拟土层对基础的作用,采用有限元软件Algor 12进行龙门吊轨道基础设计;王忠昶等<sup>[12]</sup>通过有限元数值方法对龙门吊走行轨天然及处理后地基在一定设计荷载下的沉降变形与承载能力进行分析,考虑了软弱地基产生的差异沉降对龙门吊的影响,并提出加固措施。

综上所述,国内众多学者主要就龙门吊基础设计模式或考虑不良地基影响的龙门吊基础设计进行了分析探索,未见综合考虑基坑开挖变形与周边堆土的龙门吊基础设计,也未见基于土体堆载和龙门吊行车荷载共同作用下设计的相关基坑支护方案研究报告。因此,本文以厦门市轨道3号线湖里公园站与人才中心站区间段的竖井工程为例,考虑竖井基坑-龙门吊基础-土体堆载相互作用,利用PLAXIS 3D岩土有限元软件模拟基于竖井基坑-龙

门吊基础-周边堆土共同作用下的三维数值模型,计算受龙门吊行车荷载、基坑开挖和土体堆载影响的基础结构内力变化,并结合基坑监测数据分析基坑的安全稳定性,验证基坑支护方案和龙门吊基础设计安全合理。

## 1 工程概况

### 1.1 工程地质概况

厦门市轨道3号线某竖井为区间隧道联络通道兼废水泵房,场地位于残积台地区及低山丘陵区,沿线地势中间高,两侧低。仙岳山越岭段地层主要为中微风化凝灰溶岩,受狐尾山—钟宅断裂带局部节理、裂隙发育,越岭段两侧浅埋段表层受后期人工改造,局部填土厚度较大,以下地层主要为残积土及风化岩。

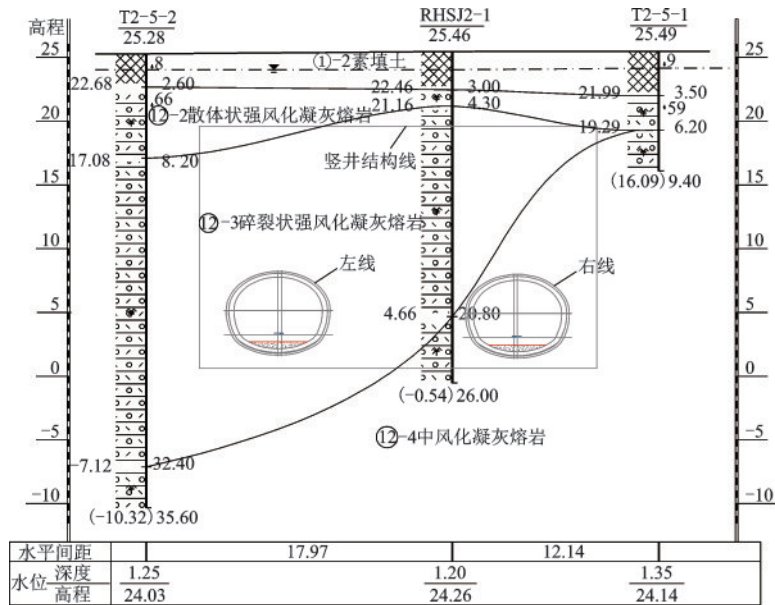
根据地质补勘揭示(图1),可以看出地铁竖井基坑范围内主要地层为①-2层素填土( $Q_4^{ml}$ )、⑫-2层散体状强风化凝灰熔岩( $J_3n$ )、⑫-3层碎裂状强风化凝灰熔岩( $J_3n$ )、⑫-4层中风化凝灰熔岩( $J_3n$ )。其中,碎裂状强风化凝灰熔岩层的平均厚度最大,为12.82 m,具体分布情况及深度范围见表1。该场地地下水位埋深为1.10~1.40 m,水位高程为24.17~24.56 m。

### 1.2 基坑围护结构设计

该3号线地铁区间段的竖井工程结构净空平面尺寸长为28.4 m、宽为15.1 m,基坑深度约为25.5 m,采用明挖法开挖。围护结构设计为 $\Phi 1\ 000@1\ 200$ 钻孔灌注桩+内支撑+ $\Phi 800$ 三重旋喷桩止水帷幕。围护桩桩长为8~30 m;沿基坑深度设置六道支撑,其中第一道为钢筋混凝土支撑,断面尺寸为 $800\times 1\ 000$  mm,其余支撑采用 $3\Phi S21.6@2\ 000$ 钢绞的锁脚锚索。基坑围护结构平面布置如图2所示。

### 1.3 龙门吊基础设计概况

该竖井龙门吊设计起重量为45 t,轨距为16 m,



单位: m

图1 工程地质剖面

Fig.1 Engineering geological profile

表1 地基土层划分及场地各土层厚度、层顶高程和层顶埋深统计

Table 1 Thickness and buried depth of foundation soil layers

层号	土层名称	地层厚度/m			层顶埋深/m			层顶高程/m		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
①-2	素填土	2.30	5.80	3.68	0.00	0.00	0.00	25.28	27.33	25.70
⑫-2	散体状强风化凝灰熔岩	0.60	9.20	4.06	2.30	5.80	3.51	19.77	23.39	22.02
⑫-3	碎裂状强风化凝灰熔岩	1.65	24.20	12.82	3.50	13.00	8.10	12.59	23.83	17.66
⑫-4	中风化凝灰熔岩	3.20	24.10	9.08	3.20	32.40	14.00	-7.12	22.25	11.69

注:⑫-4层中风化凝灰熔岩为揭示厚度,未揭穿

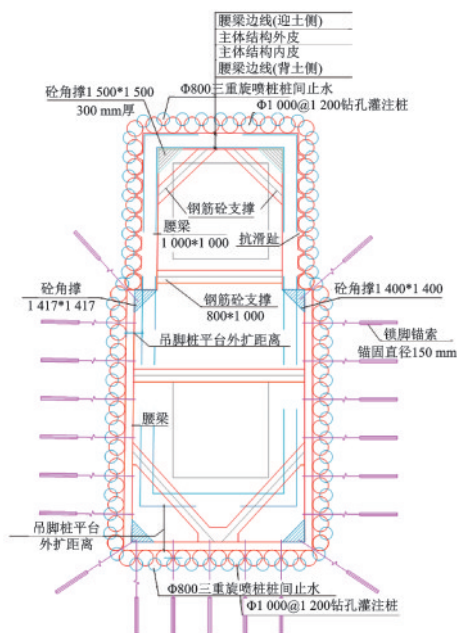


图2 基坑围护结构平面布置

Fig.2 Layout plan of bracing structure of foundation pit

两侧轨道(43 kg/m)各自长为43.5 m;竖井基坑两侧各设置五个墩台,断面尺寸长为2.5 m、宽为1.0 m、高为1.5 m,配筋采用上下层各为3Φ22、左右侧各为7Φ22;墩台上设置轨道主梁(与轨道通长),断面尺寸为43.5 m、宽为0.5 m、高为1.0 m,上下层各为5Φ25、左右侧各为2Φ22。龙门吊行走轨道及墩台平面布置如图3所示。

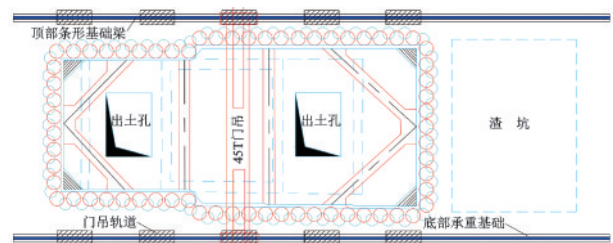


图3 龙门吊行走轨道及墩台平面布置

Fig.3 The plane layout of the rail and the pier of a gantry crane

注:竖井东西两侧为异型口(东大西小)

## 2 竖井基坑-龙门吊基础-土体堆载相互作用分析

### 2.1 数值模型设计

基于PLAXIS 3D岩土有限元数值分析平台建立竖井基坑、龙门吊轨道基础结构、邻近渣坑堆土、地层相互作用三维数值模型,模型网格划分如图4所示。三维数值模型长为75 m,宽为56 m,高为40 m。四周侧边界设置法向约束,底部边界设置固定约束,顶部边界为自由地表。

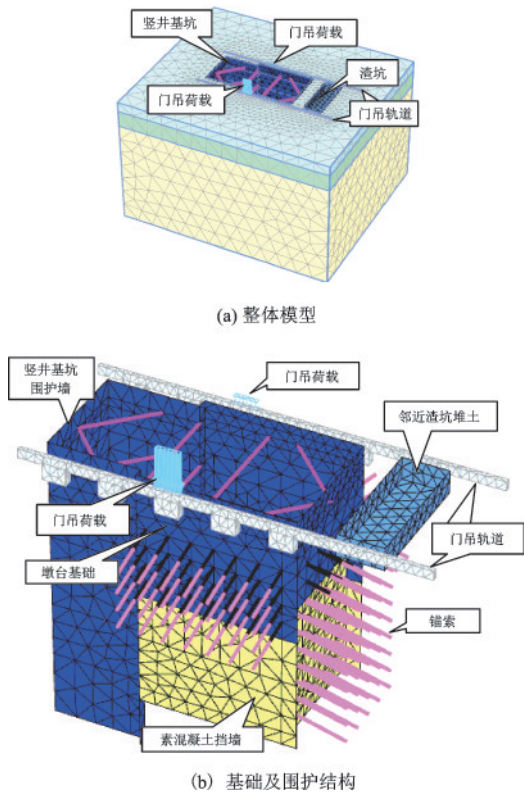


图4 竖井基坑三维数值模型

Fig.4 Three-dimensional numerical model of shaft foundation pit

地层和龙门吊轨道梁及墩台基础钢筋混凝土结构均采用10节点高阶四面体单元进行模拟,墩台基础和轨道梁为钢筋混凝土结构,假定为线弹性材料。由于实体单元模拟结构不能直接输出结构内力,在轨道梁实体模型内插入一根嵌入式梁单元,同时将梁单元刚度取为轨道梁实际刚度的1/1 000,使其对实体轨道梁的刚度贡献基本可以忽略,从而可以利用嵌入式梁单元输出实体轨道梁的内力,只需将其结果再放大1 000倍即可。土体采用小应变

硬化模型(HSS),各土层物理参数综合地勘报告,并根据地区经验得出,见表2。轨道基础混凝土材料采用线弹性本构模型, $\gamma=25\text{ kN/m}^3$ , $E=3\times 10^7\text{ kPa}$ ,泊松比 $\nu=0.2$ 。竖井基坑围护桩、素混凝土挡墙、内支撑、锚索锚固段均采用线弹性本构模型。围护墙和素混凝土支撑采用板单元模拟,竖井基坑内支撑采用梁单元模拟,预应力锚索自由段采用点弹簧单元模拟,锚固段采用嵌入式梁单元模拟,结构材料参数见表3。

表2 土层物理参数

Table 2 Soil physical parameters

参数	素填土	强风化凝灰岩	中风化凝灰岩
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	18	20	22
$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	5	15	50
$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	5	15	50
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	30	45	150
$m$	0.65	0.5	0.5
$c'/\text{kPa}$	10	15	50
$\varphi'/(^{\circ})$	28	32	28
$\gamma_{0.7}/(10^{-3})$	0.25	0.2	0.1
$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	90	135	300

注: $\gamma$ 为重度、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水剪切实验的参考割线模量、 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 为固结实验的参考切线模量、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水卸载-再加载试验的参考卸载再加载模量、 $m$ 为与模量应力水平相关的幂指数、 $c_{\text{ref}}$ 为有效黏聚力、 $\varphi'$ 为有效内摩擦角、割线剪切模量衰减为0.7倍的初始剪切模量 $G_0$ 时对应的剪应变、 $G_0^{\text{ref}}$ 为小应变刚度试验的参考初始剪切模量

表3 基坑围护结构材料参数

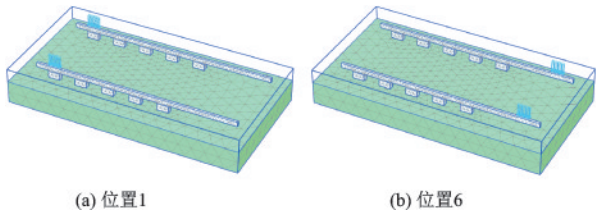
Table 3 Material parameters of foundation pit supporting structure

参数	围护桩	素混凝土挡墙	内支撑	锚索锚固段
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	25	25	25	25
厚度(m)	0.79	0.3	—	—
面积( $\text{m}^2$ )	—	—	0.8	0.03 142
$E/\text{kPa}$	$32.5\times 10^6$	$28\times 10^6$	$30\times 10^6$	$28\times 10^6$
$\nu$	0.15	0.2	0.2	0.2
极限侧阻力/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	—	—	—	100

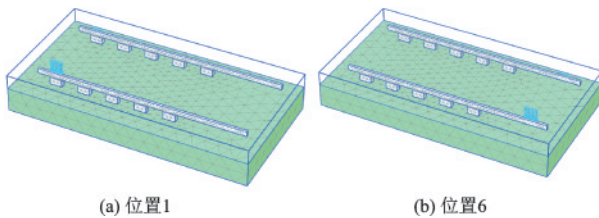
### 2.2 计算工况

首先,将龙门吊行走台车轮压等效为作用于轨道梁顶面的均布面荷载,一般工况为两侧荷载相同,均为 $180\text{ kN/m}^2$ ,偏压工况一侧为 $72\text{ kN/m}^2$ ,偏压侧为 $360\text{ kN/m}^2$ 。其次,根据龙门吊行车荷载的特点及墩台分布数量和位置,共考虑6种龙门吊荷

载分布位置,并对每一处荷载分布位置考虑一般工况和荷载偏压工况,共计进行12种荷载工况的计算分析。一般工况和偏压工况如图5、图6所示。最后,对竖井基坑围护桩、分层逐步开挖、设支撑和锚索施工全过程进行三维动态模拟,待竖井基坑开挖至设计深度,对坑边龙门吊行走台车荷载的不同作用位置及偏压作用工况进行模拟。另外,对渣坑堆土工况进行分析,模拟渣坑堆土高度为4 m,考察其对竖井基坑及龙门吊基础的影响。



(a) 位置1 (b) 位置6  
图5 龙门吊荷载作用一般工况  
Fig.5 General loading condition of gantry crane



(a) 位置1 (b) 位置6  
图6 龙门吊荷载作用偏压工况  
Fig.6 Load action of gantry crane

### 2.3 结果分析

#### 2.3.1 龙门吊行车荷载对基坑及地基的影响

龙门吊行车荷载作用下土体塑性点分布和基坑围护墙变形形态如图7、8所示。由图7、8可以看出,基坑开挖至设计深度后,围护结构变形集中在素混凝土支护挡墙且位置较深,量值为16 mm,约为基坑开挖深度的0.64‰。

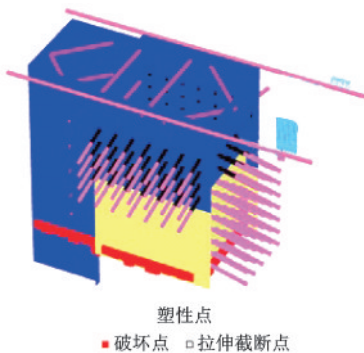
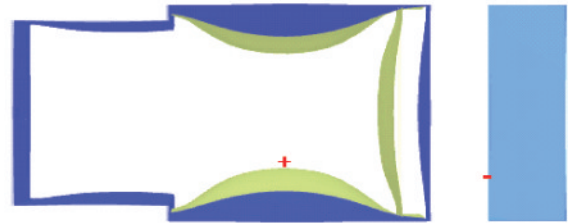


图7 塑性点分布  
Fig.7 Plastic point distribution

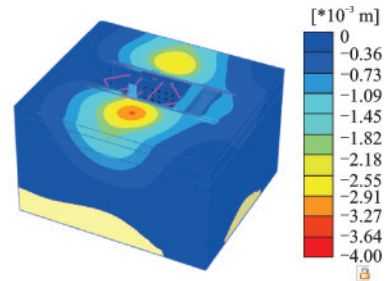


总位移 $|u|$ (放大200倍)  
最大值=0.016 03 m(单元1 451在节点98 668)

图8 基坑围护墙变形形态

Fig.8 Deformation form of retaining wall in foundation pit

典型偏压荷载工况下的地表沉降情况如图9所示。从图9可以看出,发生的地表最大沉降值为4 mm,对轨道梁基础有一定影响。



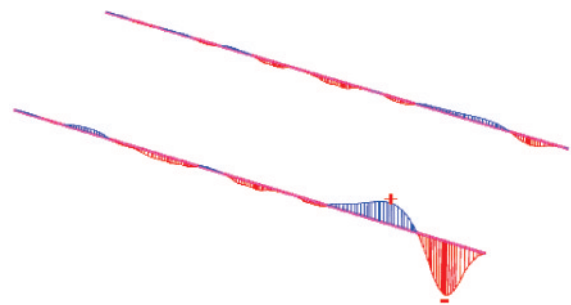
总位移 $u_z$   
最大值=0.017 69 m(单元36 587在节点100 553)  
最小值=-3.909\*10<sup>-3</sup> m(单元42 139在节点83 819)

图9 位置5偏压工况下地层沉降云图

Fig.9 Stratigraphic settlement cloud chart under bias condition at location 5

#### 2.3.2 基坑开挖对轨道梁的影响

竖井基坑开挖完毕后,典型偏压荷载工况下轨道梁弯矩如图10所示;未开挖情况下,位置6偏压工况下轨道梁弯矩如图11所示。



弯矩 $M_x$ (放大20.0倍)  
最大值=0.109 0 kN·m(单元1 542在节点172 679)  
最小值=-0.270 0 kN·m(单元1 557在节点172 709)

图10 竖井基坑开挖完毕,位置6偏压工况下轨道梁弯矩  
Fig.10 Bending moment of rail beam at location 6 after the completion of shaft foundation pit

通过图 10、11 可以看出,考虑基坑开挖情况下轨道梁弯矩比不考虑基坑影响有所波动。对于基坑开挖至设计深度,荷载位于位置 6 偏压工况,弯矩达到 270 kN·m,而不考虑基坑开挖影响时轨道梁弯矩为 231.9 kN·m,变化幅度约为 16.4%;对于跨中的偏压工况而言,基本上都在 200 kN·m 以内。可见,基坑开挖引起的轨道梁内力改变不显著。

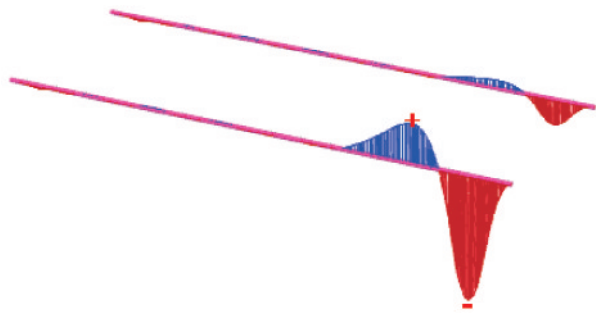


图 11 竖井基坑未开挖,位置 6 偏压工况下轨道梁弯矩  
Fig.11 Bending moment of rail beam at location 6 before the excavation of shaft foundation pit

### 2.3.3 渣坑堆土对基坑及轨道基础的影响

渣坑堆土时基坑变形和轨道梁弯矩与未堆土时的结果对比见表 4。由表 4 可见,不论是基坑变形还是轨道梁内力变化幅度都较小,均不超过 13%;地表沉降变化幅度略大,约为 19.6%,但绝对值较小。

图 12 为渣坑堆土 4 m 高时竖井基坑周边土体塑性点分布,与图 7 所示渣坑未堆土时基本一致。

## 3 基坑监测结果分析

为观察基坑开挖过程中,围护结构的变形情况,选取竖井基坑桩顶竖向位移、支护桩顶部水平

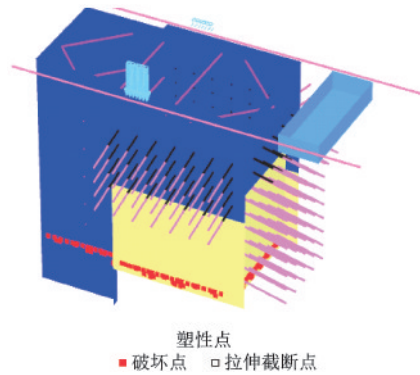


图 12 渣坑堆土荷载作用下土体塑性点分布  
Fig.12 The distribution of soil plastic point under soil load of slag pits

位移、支护桩及土体深层水平位移和地表沉降四项监测数据结果进行分析,测点平面布置如图 13 所示。

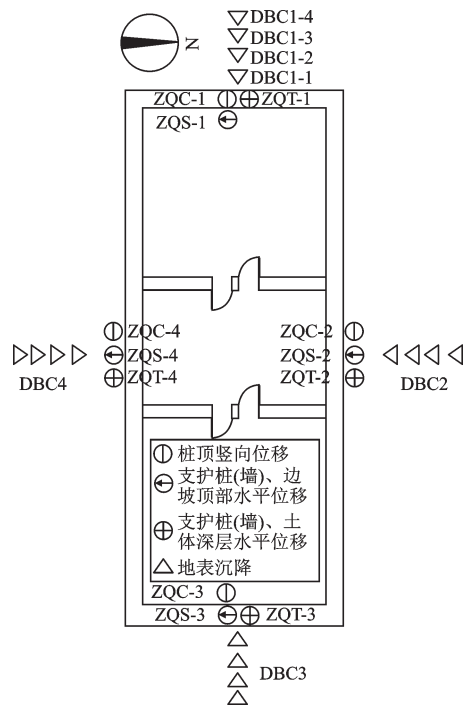


图 13 基坑监测平面布置  
Fig.13 Layout map of foundation pit monitoring

表 4 渣坑堆土工况与未堆土工况竖井基坑变形及轨道梁弯矩对比

Table 4 Comparison of deformation of foundation pit and bending moment of rail beam with and without slag dump soil

工况	地表沉降/mm	围护墙 x 位移/mm	围护墙 y 位移/mm	轨道梁弯矩/(kN·m)
未堆土	-3.909	1.036/-7.071	16.03/-15.38	64.94/-137.6
堆土 4 m	-4.674	1.161/-7.493	16.2/-15.5	59.0/-140.8
变化量	19.57%	12.07%/5.97%	1.06%/0.78%	9.15%/2.33%

注:符号“/”的左边表示最大值,右边表示最小值

### 3.1 桩顶竖向位移数据分析

监测点 ZQC-1、ZQC-2、ZQC-3、ZQC-4 的桩顶竖向位移时态曲线如图 14 所示。从图 14 可以看出,随基坑开挖至设计标高,围护桩发生缓慢沉降,在结构底板浇筑后(2018 年 03 月 27 日),围护桩的竖向位移随即趋于稳定;竖井基坑支护桩顶沉降累计最大值为 3.7 mm,与计算结果 4 mm 接近,远低于桩顶竖向位移控制值 25.00 mm,出现在测点 ZQC-1(基坑西侧)上;测点 ZQC-3(渣坑堆土区域)的竖向位移变化曲线与其他测点相似,可以推断桩顶竖向位移受到土地堆载的影响很小。另外,从监测数据可知,龙门吊吊装过程未导致桩基的显著沉降,总体上桩体于垂直方向变化处于稳定状态。

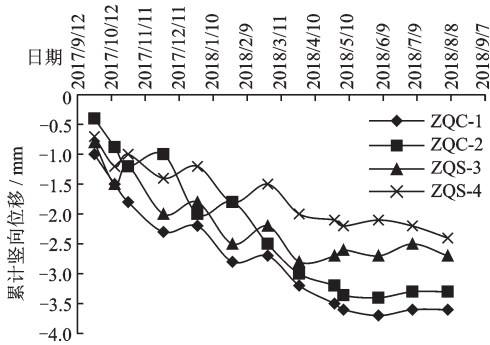


图 14 桩顶竖向位移时态曲线

Fig.14 Vertical position curve diagram of pile top

### 3.2 支护桩顶部水平位移数据分析

通过对 ZQS-1、ZQS-2、ZQS-3、ZQS-4 监测点累计水平位移数据结果统计如图 15(向坑内为正)所示。从图 15 可以看出,竖井基坑四侧的支护桩

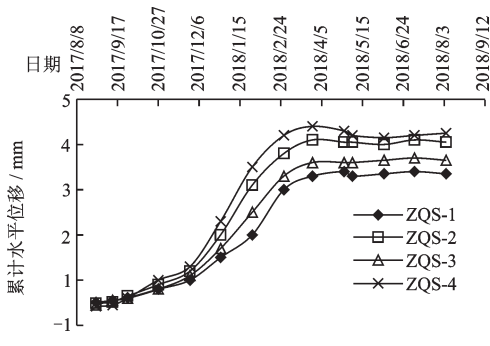


图 15 支护桩顶部水平位移时态曲线

Fig.15 Time-history curve of horizontal displacement at top of supporting pile

(墙)、边坡顶部水平位移时态曲线有着相同的变化规律。竖井基坑初步开挖时桩顶水平方向位移很小,趋于 0;开挖深度 2 m 至设计深度过程桩顶朝坑内侧移趋势明显,待 2018 年 03 月 27 日底板施作完成后,桩顶位移于水平方向趋于收敛。由图 15 还可以看出,ZQS-4(南侧)的桩顶侧移量最大,累计变化值为 3.9 mm,与堆土区测点峰值(3.2 mm)相差不大,可见土体堆载对桩顶水平位移的影响较小。

### 3.3 支护桩及土体深层水平位移数据分析

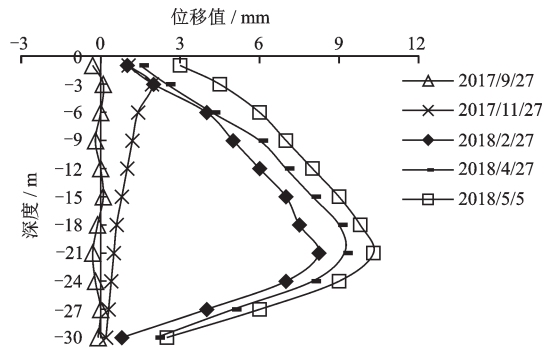
由图 1 和表 1 可知,⑫-3 碎裂状强风化凝灰熔岩层与⑫-4 中风化凝灰熔岩的分界线呈 45°,其埋深范围在 3.5~13 m,主要分布在基坑东侧。根据勘察报告确定各监测点 ZQT-1、ZQT-2、ZQT-3、ZQT-4 的测斜管打入深度分别为 -30、-20、-10、-15 m。各测点的支护桩及土体深层水平位移监测曲线(以向坑内移动为正)如图 16 所示。

从图 16 可以看出,支护桩及土体深层水平位移形态呈近似三角形,中间位移大,两端位移小,最大位移基本出现在基坑开挖深度范围内分布的⑫-3 底部以上 1/3 处,最大位移发生在 ZQT4(基坑南侧)监测点上,累计值为 15.8 mm,与表 4 中所示围护墙深层侧向位移变化量接近,低于控制值 30.00 mm。由图 16(b)~(d)可知,测点 ZQT-2、ZQT-3 和 ZQT-4 分别于 20、10 和 15 m 土体深度的变形量趋于 0,而测点 ZQT-1 在 30 m 深度处发生 2.5 mm 侧移,这很可能是因为该位置下土体仍分布着⑫-3,强度和刚度较⑫-4 更弱。图 16(c)与其他测点的曲线形态相似,表明基坑东侧的堆土荷载对支护桩(墙)的侧向变形影响不明显。待竖井南北两侧隧道开始暗挖掘进,深层土体也未见明显变形。

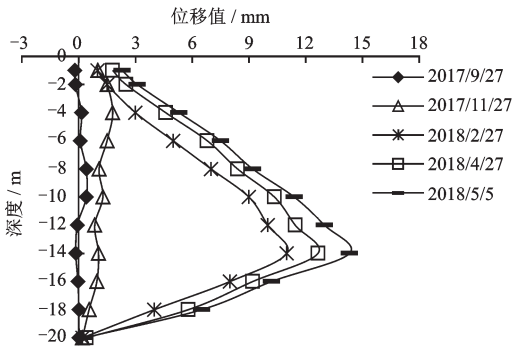
### 3.4 地表沉降数据分析

地表沉降监测剖面 DBC-1、DBC-2、DBC-3 和 DBC-4 随坑边距离变化的地表沉降监测曲线如图 17 所示。

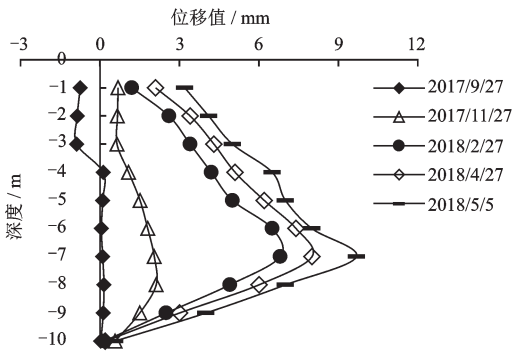
由图 17 可以看出,坑外地表沉降随基坑开挖过程逐渐增大,竖井基坑四侧的累计地表沉降最大值为 7.62 mm,远低于控制值 30.00 mm,最大沉降出现在距坑边约 6~10 m,与图 9 所示地层最大沉降云图中的最大沉降范围接近。从图 17(a)和(c)可以看出 DBC1(西侧)的沉降走向呈上升趋势,与同一断面东侧 DBC3 的沉降形态略有不同,待竖井结构底板施作完成后,在分别距坑边 10 和 15 m 位置处



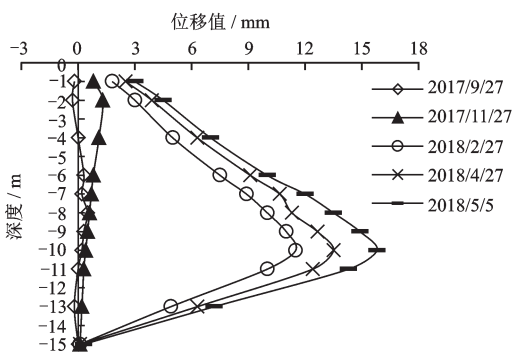
(a) ZQT-1(西侧)



(b) ZQT-2(北侧)



(c) ZQT-3(东侧)

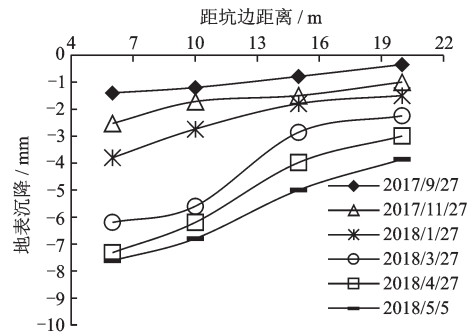


(d) ZQT-4(南侧)

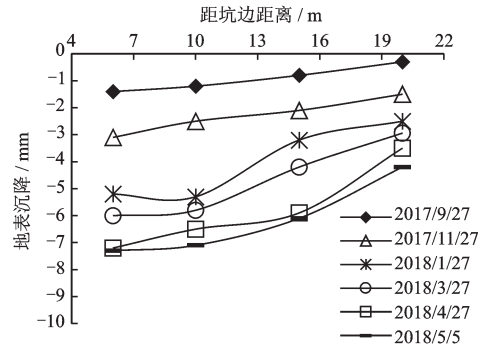
图 16 支护桩及土体深层水平位移监测曲线

Fig.16 Curves of monitored deep horizontal displacement of supporting piles and surrounding soils

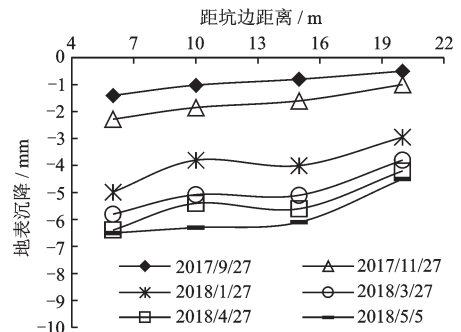
的两个沉降值十分接近,相差不超过 1 mm,导致这样在同一断面两侧的沉降特征不同的原因很可能



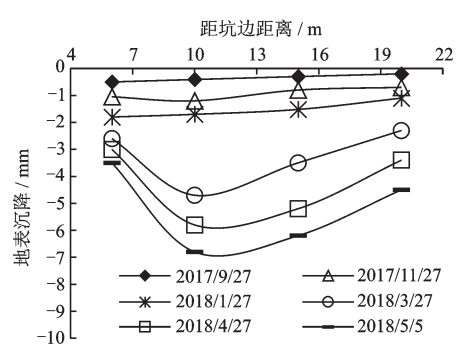
(a) DBC-1(西侧)



(b) DBC-2(北侧)



(c) DBC-3(东侧)



(d) DBC-4(南侧)

图 17 地表沉降随距离变化曲线

Fig.17 Relationship of surface subsidence with distance

是地层不均匀分布、坑内开挖三维空间效应等因素引起了支护体系的刚体位移,或是 DBC3 受到上方土体堆载的空间效应影响。从图 17(b)和(d)可以看出基坑南侧 DBC4 在距基坑最近的监测点 DBC4-1 的沉降值均不超过 3.5 mm,但在北侧最靠近基坑

的监测点DBC2-1反而对应其监测剖面的最大沉降量,可见内支撑对基坑南侧支护桩墙的约束效果明显。

地表沉降监测剖面DBC-1、DBC-2、DBC-3和DBC-4随时间变化的地表沉降监测曲线如图18所示。

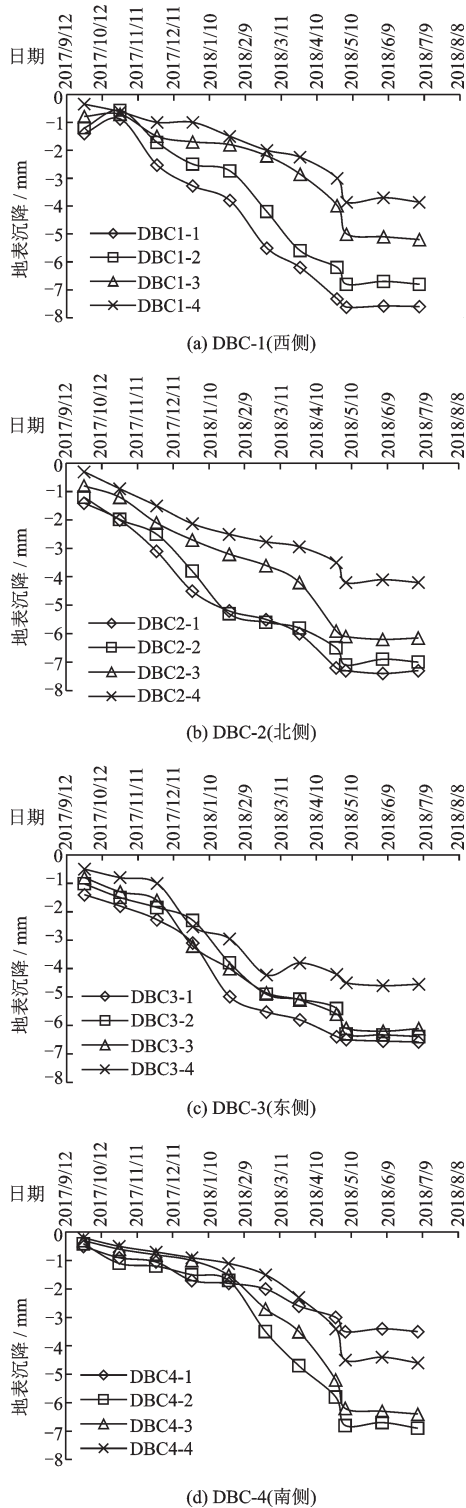


图18 地表沉降随时间变化曲线

Fig.18 Relationship of surface subsidence with time

示。由图18知,2018年1月27日洞口段的大管棚与超前小导管开始施工,沉降速率有所增大,待基坑施作底板后地表沉降基本收敛。从图18(c)可以看出,DBC-3剖面在基坑东侧渣坑堆土的影响下,沉降量不超过6.5 mm,与数值模拟计算结果相近,可见,周边堆土对地表沉降的影响较小。

## 4 结 论

针对厦门市轨道3号线湖里公园站与人才中心站区间段竖井龙门吊基础的设计展开研究,通过考虑龙门吊吊车行走、周边渣坑堆土对竖井基坑及龙门吊基础的影响,基坑开挖变形对龙门吊基础的影响,利用PLAXIS 3D岩土有限元软件模拟基于竖井基坑-龙门吊基础-周边堆土共同作用下的三维数值模型,结合监测数据分析结果验证基坑的安全稳定,得到以下结论:

(1)基于基坑开挖过程与龙门吊荷载及轨道梁相互作用,结果表明龙门吊行车作用下的地表最大沉降为4 mm,基坑围护墙结构最大变形为16 mm,约为基坑开挖深度的0.64%,可见,龙门吊荷载对基坑及轨道梁基础的影响较小。

(2)借助有限元软件模拟基坑开挖至设计深度后进行计算分析,轨道梁弯矩比不考虑基坑影响的量值变化幅度约为16.4%,基本上都在200 kN·m左右。由此说明,基坑开挖引起的轨道梁内力改变不显著。

(3)周边堆土(模拟高度4 m)对竖井基坑及龙门吊基础的影响较小,与渣坑未堆土相比,量值变化量均不超过13%,主要需满足未堆土工况下的侧壁自身稳定性。

(4)监测数据表明,竖井基坑桩顶竖向位移最大值为-3.7 mm,远小于控制值,受土体堆载影响很小;支护桩(墙)及边坡顶部水平位移主要朝坑内侧移,累计变化量为3.9 mm;支护桩深层水平位移的变形形态呈近似三角形,累计最大变化值为15.8 mm;坑外地表沉降随基坑开挖过程逐渐增大,最大值为7.62 mm,最大沉降主要出现在距坑边约为6~10 m,受堆土作用区域的地表沉降不超过6.5 mm,影响较小;监测数据与数值模拟计算结果相近,数值模型可靠;龙门吊吊装过程也未导致基坑出现显著变形,可见竖井基坑处于安全稳定状态,基坑支护方案与龙门吊基础设计合理。

## 参考文献:

- [1] 王绍君,刘江云,耿琳,等.深基坑支护体系冻胀变形及控制三维数值分析[J].土木工程学报,2018,51(5):122-128.  
Wang Sh J, Liu J Y, Geng L, et al. Three dimensional numerical analysis of frost heaving deformation and control of deep foundation pit supporting system[J]. Civil Engineering Journal, 2018, 51(5):122-128. (in Chinese)
- [2] 李思慧,刘海卿.基于LMD-PSO-LSSVM组合模型的深基坑变形预测[J].地下空间与工程学报,2018,14(2):483-489.  
Li S H, Liu H Q. Prediction of deep foundation pit deformation based on LMDPSO-LSSVM combination model[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2):483-489. (in Chinese)
- [3] 章润红,刘汉龙,仇文岗.深基坑支护开挖对临近地铁隧道结构的影响分析研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(5):857-866.  
Zhang R H, Liu H L, Ge W G. Analysis and research on the effect of deep foundation pit support and excavation on the structure of near metro tunnels[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(5):857-866. (in Chinese)
- [4] 徐洪钟,崔文森,胡文杰.南京地区地铁车站深基坑变形性状分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(4):599-607.  
Xu H Zh, Cui W S, Hu W J. Deformation behavior analysis of deep foundation pit of nanjing metro station[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4):599-607. (in Chinese)
- [5] 张立明,朱敢平,郑习羽,等.软土地区深基坑对临近地铁结构影响的实测与分析[J].岩土工程学报,2017,39(增2):175-179.  
Zhang L M, Zhu G P, Zheng X Y, et al. Measurement and analysis of the influence of deep foundation pit on adjacent subway structure in soft soil area[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Sup 2):175-179. (in Chinese)
- [6] 贾波,刘干斌,徐立,等.地铁竖井施工对周边建筑影响及加固措施[J].工业建筑,2011,41(8):121-125.  
Jia B, Liu G B, Xu L, et al. Influence of subway shaft construction on surrounding buildings and reinforcement measures [J]. Industrial Buildings, 2011, 41(8):121-125. (in Chinese)
- [7] 方华,李国成,丁烈云,等.隧道竖井施工对地下管线影响的数值模拟[J].铁道工程学报,2008,25(11):62-65.  
Fang H, Li G Ch, Ding L Y, et al. Numerical simulation of the influence of tunnel shaft construction on underground pipelines [J]. Journal of Railway Engineering, 2008, 25(11):62-65. (in Chinese)
- [8] 孙永超,陈玮,徐曼,等.坑外堆载对软土深基坑开挖变形影响分析[J].施工技术,2017,46(13):98-102.  
Sun Y Ch, Chen W, Xu M, et al. Analysis of the influence of pit loading on the deformation of deep excavation of soft soil [J]. Construction Technology, 2017, 46(13):98-102. (in Chinese)
- [9] 刘滨霞,吴旭.外有堆载的深基坑桩锚支护结构性状[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(5):488-492.  
Liu B J, Wu X. Characteristics of pile anchor supporting structure for deep foundation pit with external loading [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016, 35(5):488-492. (in Chinese)
- [10] 吴从师,潘隆武.地铁车站深基坑地下连续墙施工变形的分析研究[J].中外公路,2011,31(5):189-192.  
Wu C Sh, Pan L W. Analysis and study on deformation of diaphragm wall of deep foundation pit of subway station [J]. Chinese and Foreign Highway, 2011, 31(5):189-192. (in Chinese)
- [11] 张厚美,赖兆武.地铁车站顶部龙门吊轨道基础设计计算[J].工业建筑,2003,33(1):79-81.  
Zhang H M, Lai Zh W. Design and calculation of the track foundation of the gantry crane at the top of the subway station [J]. Industrial Building, 2003, 33(1):79-81. (in Chinese)
- [12] 王忠昶,杨庆.龙门吊轨道软弱地基变形及加固的数值分析[J].广西大学学报(自然科学版),2011,36(1):182-186.  
Wang Zh Ch, Yang Q. Numerical analysis of deformation and reinforcement of soft foundation of gantry crane [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2011, 36(1):182-186. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)