

DOI: 10.11779/CJGE2021S1020

兰州地铁雁园路站基坑支护监测与数值模拟分析

尹利洁^{1,3}, 李宇杰², 朱彦鹏^{*2}, 霍 滨⁴, 杨志团⁴, 段秦川⁴

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司,北京 100101;2. 兰州理工大学土木工程学院,甘肃 兰州 730050;3. 城市轨道交通深基坑岩土工程北京市重点试验室,北京 100101;4. 兰州市轨道交通有限公司,甘肃 兰州 730030)

摘要:兰州地区特有的富水红砂岩在开挖裸露情况下极易崩解,基坑开挖与降水异常困难,至今仍没有完整设计及施工经验可供参考。以兰州地铁雁园路站深基坑为例,通过对车站周边建筑环境、工程地质及水文条件分析,提出适宜于红砂岩深基坑的地下连续墙加内支撑支护结构体系。分析了基坑施工过程中支护结构及周围环境变形监测数据,利用Midas GTS 有限元软件对基坑开挖过程进行了数值模拟,对比分析了模拟数据和监测数据,结果表明各测点变形均在安全控制范围内,说明该基坑支护结构选择合理。研究结果可为兰州地铁后续施工中遇到的类似红砂岩基坑支护结构设计提供经验借鉴。

关键词:地铁;深基坑;桩撑支护;施工监测;数值模拟;位移

中图分类号:TU476 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-4548(2021)S1-0111-06

作者简介:尹利洁(1989—),男,硕士,工程师,主要从事岩土工程类研究、设计等工作。E-mail:ylj1165@163.com。

Monitoring and numerical simulation of support for foundation pit at Yanyuan Road Station of Lanzhou Metro

YIN Li-jie^{1,3}, LI Yu-jie², ZHU Yan-peng^{*2}, HUO Bin⁴, YANG Zhi-tuan⁴, DUAN Qin-chuan⁴

(1. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Beijing Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Deep Foundation Pit of Urban Rail Transit, Beijing 100101, China; 4. Lanzhou Rail Transit Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: The unique water-rich red sandstone stratum in Lanzhou area is easy to disintegrate when excavated and exposed, and the excavation and dewatering of foundation pits are extremely difficult. There is still no complete design and construction experience for reference. Taking the deep foundation pit at Yanyuan Road Station of Lanzhou Metro as an example, by analyzing the surrounding building environment, engineering geology and hydrological conditions, a suitable supporting structure system of diaphragm wall and internal support for deep foundation pits of red sandstone is put forward. The monitoring data of deformation of supporting structure and surrounding environment during the construction of the foundation pit are analyzed, and the finite element software MIDAS GTS is used to simulate the excavation process. The results show that the deformation of each measuring point is within the safety control range, which means that the selection of supporting structure of the foundation pit is reasonable. They may provide experience and technical support for the design of supporting structure of similar foundation pits of red sandstone encountered in the subsequent construction of Lanzhou Metro.

Key words: metro; deep foundation pit; pile support; construction monitoring; numerical simulation; displacement

0 引言

随着城市建设的快速发展,地铁成为城市交通向着地下发展的一种必然趋势,其中深基坑工程是地铁建设中的关键工程,而基坑工程的设计理论目前尚完善^[1]。兰州市南北窄而东西狭长的带状分布严重制约了交通畅通,拥堵问题日渐严重^[2]。为了解决交通拥堵,2012年兰州地铁1号线开始修建,在施工过程中遇到了特殊的红砂岩地层,该岩层未扰动时强度和硬度均能满足工程需要,但遇水极易崩解,给施工带来极大的困难^[3]。若基坑支护和地下水设计方案不合理,

将导致基坑被水浸泡、坑壁涌水涌砂等危害基坑安全性的工程问题,这种富水红砂岩地层下的地铁深基坑支护与降水的设计及施工没有经验可供参考^[3]。雁园路站基坑开挖过程中遇到的红砂岩地层岩性具有代表性,采用岩土工程领域中常用有限元法对基坑开挖的过程进行数值模拟^[4-5],利用计算结果对基坑工程中可

基金项目:教育部长江学者和创新团队支持计划项目(IRT_17R51);甘肃省科技计划项目(18YFIGA136);兰州市科技计划项目(2018-4-12)

收稿日期:2020-12-15

*通信作者(E-mail: zhuyp@lut.cn)

能存在的问题进行预测并给出支护方案优化的合理建议^[6-7]。

本文以兰州地铁雁园路站深基坑为例,对施工过程中监测数据及Midas GTS数值模拟结果进行分析,验证该基坑支护结构设计的科学性,以期为兰州地铁后续施工中遇到的类似基坑支护体系设计提供指导建议。

1 工程概况

1.1 车站概况

兰州地铁2号线连接着兰州市东西方向,在城市蜂腰地段形成东西第二通道的轨道交通主干线,雁园路站是4号线与2号线的换乘站,本文针对2号线雁园路基坑工程,该车站为地下三层双柱三跨箱型框架结构,总长185.001 m,标准段宽度约23.3 m,底板埋深24.33~24.73 m,主体基坑拟采用明挖法施工。

1.2 周边建筑环境

车站两侧地面建筑物密集,其中车站主体结构北侧是兰州市城关区人民检察院,钢筋混凝土框架结构,钢混凝土桩基基础。该车站场地地下管线密布,横穿道路方向还有天然气过街管道,雨污水过街管道等,市政管网对本工程影响较大。

1.3 地质及水文条件

雁园路车站场地地面以下55 m深度范围内的土层物理力学参数见表1。

表1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

地层	层厚 /(m)	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 c /kPa	内摩 擦角 φ /(°)	渗透 系数K /(m·d ⁻¹)
1 杂填土	2.0~7.0	18.0	0	15.0	8.0
2 素填土	1.2~5.1	16.5	8	15.0	5.0
3 粉土	0.4~3.0	16.6	12	22.0	1.0
4 粉细砂	1.2~3.8	19.8	0	32.0	2.0
5 卵石	6.5~16.0	21.0	0	38.0	35.0
6 强风化 砂岩	12.3~21.5	20.6	15	31.5	3.0
7 中风化 砂岩	未穿透	21.0	21	33.5	0.5

车站场地地下水的类型为潜水,5层卵石为主要含水层,该地层厚度大、透水性好、赋水性强,6层强风化砂岩和7层中风化砂岩为孔隙裂隙水含水层,稳定地下水位埋深5.50~7.20 m。地下水位受季节影响变化较大,年变化幅度约2.00 m左右。结合兰州地区深基坑经验及该车站施工周期长的特点,确定采用坑外大口径管井降水,并根据实际降水效果必要时对6层强风化砂岩采用轻型真空井点进行坑内二次降水。

2 支护结构设计及监测

2.1 支护结构方案

雁园路车站场地水文地质条件特殊,强风化砂岩层天然状态强度较高,遇水易软化崩解,基坑降水开挖后容易在该层顶部出现局部渗水,造成边坡局部掏空。基坑的施工场地狭窄,两侧地面建筑物密集,大多采用浅基础,其自身的稳定性对基坑开挖及降水施工有较大影响,故基坑的支护结构选型需要很强的支承性。超过20 m的车站深基坑通常采用咬合桩或地下连续墙支护,但在红砂岩地层中钻孔咬合桩钢筋笼顶、底标高定位控制比较困难,容易出现较大偏差,造成咬合失败,导致支护结构发生渗漏。雁园路车站基坑开挖深度为24 m,安全考虑基坑支护结构选用兼具支承和止水作用的地下连续墙。

车站为地下三层双柱三跨箱型框架结构,支护结构采用地下连续墙加内支撑的形式,地下连续墙入土深度为6 m,厚度为1 m,深度为30 m,混凝土强度等级为C35,车站标准段基坑竖向设置四道支撑和一道换撑,第一道支撑采用800×800 mm的钢筋混凝土支撑,水平间距约9 m,其余为Φ609, t=16 mm的钢管支撑,水平间距约3 m,基坑支护结构剖面如图1。

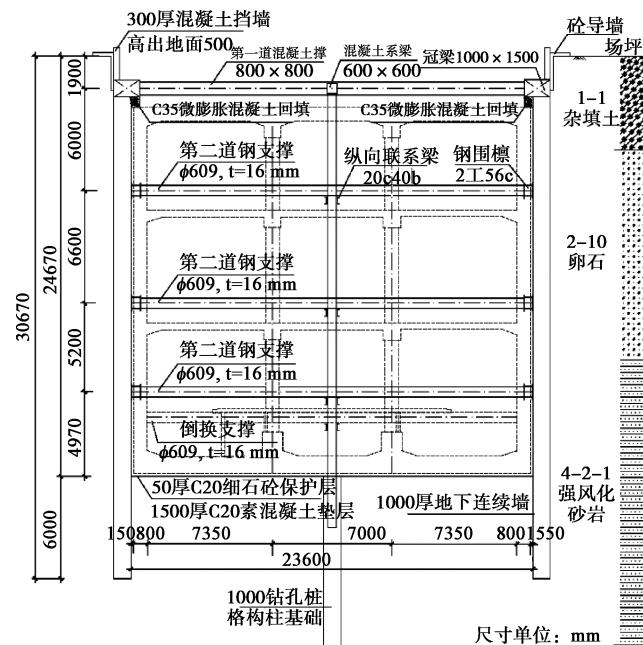


图1 基坑支护结构剖面图

Fig. 1 Sectional drawing of supporting structure for foundation pit

2.2 监测方案

为了确保车站工程、周边建筑物及地下管线的安全,并对施工进行指导,该工程对地下连续墙、周边地表、建筑物和支撑轴力等项目从施工开始到完成进行了监测,具体的监测内容及其控制值见表2,监测点平面布置图见图2。

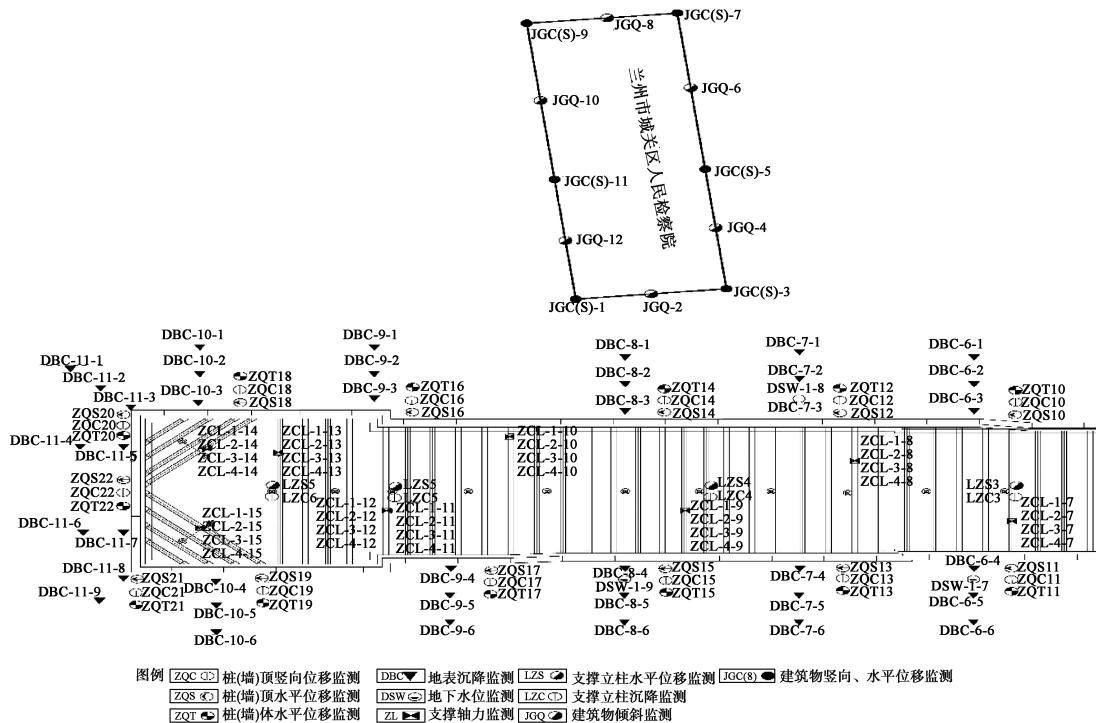


图 2 监测点布置平面图

Fig. 2 Layout of monitoring points

表 2 基坑监测项目及控制值

Table 2 Monitoring items and control values for foundation pit

序号	监测项目	累计绝对 值/(mm)	累计开挖 深度/%	变化速率 (mm·d ⁻¹)
1	支护墙顶竖向位移	25	0.15	3
2	支护墙顶水平位移	25	0.15	3
3	支护墙体水平位移	30	0.15	3
4	周边地表沉降	30	0.15	3
5	建筑物沉降	30	0.15	3
6	支撑轴力			轴力设计值

2.3 现场监测结果分析

(1) 围护墙顶水平位移

基坑施工过程中,随着坑内土压力的卸载,支护墙体后土体的压力会导致其发生侧向位移,支护墙顶的水平位移值反映了墙后土压力的大小,其值的变化情况反映了基坑的变形情况,关系着基坑的稳定性,因此支护墙顶的水平位移是衡量基坑支护结构安全性的主要指标。本文选取基坑周边的监测点 ZQS10、ZQS13、ZQS14 和 ZQS17 的实测结果进行研究,分析支护墙顶水平位移随时间的变化关系,如图 3。

由图 3 可知,基坑在不同施工阶段的水平变形量不同,在开挖过程中,围护墙顶的侧移量起伏变化且明显增大,开挖基本结束后,各道内支撑发挥作用,抑制了基坑水平变形,围护墙顶侧移量的变化也基本趋于平稳。监测点 ZQS10 的水平位移最大值为 4 mm, ZQS13 的最大值为 5 mm, ZQS14 的最大值为 3 mm,

ZQS17 最大值为 1 mm, 监测点 ZQS13, ZQS10, ZQS14, ZQS17 离基坑中部依次渐远,说明基坑周边土体水平位移分布不均匀,基坑中部围护墙顶位移最大。监测点 ZQS10 的位移量为 3~4 mm, ZQS13 的位移量为 1~5 mm, ZQS14 的位移量为 1~3 mm, ZQS17 的位移量为 3~4 mm, 均远小于控制值 25 mm, 表明冠梁和第一道钢筋混凝土支撑的施工对地下连续墙墙顶水平位移有明显的约束作用,整体上基坑的开挖过程安全可控。

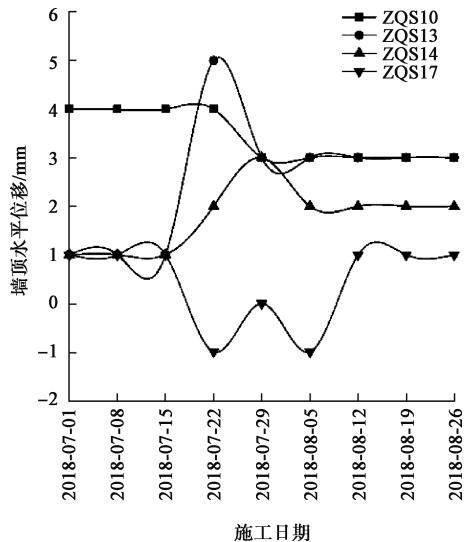


图 3 墙顶水平位移随时间的变化关系

Fig. 3 Variation of horizontal displacement at wall top with time

(2) 围护墙顶竖向位移

本文选取沿基坑两侧围护墙顶布置的监测点

ZQC7-13、ZQC7-14 和 ZQC7-17, 分析其实测数据来研究围护墙顶竖向位移随基坑开挖的变化关系, 绘制变形规律曲线如图 4 所示。

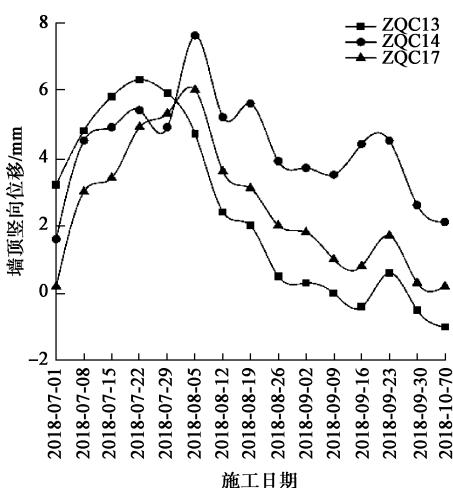


图 4 墙顶竖向位移随时间的变化关系

Fig. 4 Variation of vertical displacement at wall top of with time

由图 4 可知, 随着基坑开挖深度增大, 各监测点的竖向位移量有一定波动, 但曲线的变化趋势大致相似, 都是先增大再减小, 最终趋于平稳的过程。基坑开挖是一个卸荷的过程, 随着基坑内土层压力的减小, 围护墙内外的土压力差逐渐增大, 坑底土体隆起带动周边围护墙体向上运动, 随着各道内支撑的施工, 支护墙内外的水土压力差逐渐减小, 并在自重作用下, 其竖向位移逐渐减小。8月5日之后3个监测点的竖向位移均出现明显的下降, 这是由于第二道钢支撑架设减小了地连墙内外的压力差。实际施工中降水的速率、降水井的出砂量、施工现场基坑周边堆载情况等都会对监测结果有一定的影响。

监测点 ZQC7-13 处围护墙顶上升累计最大值为 6.3 mm, ZQC7-14 的最大值为 7.6 mm, ZQC7-17 的最大值为 5.3 mm, 均远小于控制值 25 mm。基坑开挖过程中, 各段地连墙都会产生不同程度的沉降差, 其中不均匀沉降差的最大值为 4.8 mm, 沉降差值过大会影响冠梁及整个内支撑体系的安全, 因此对围护墙顶的竖向位移监测十分必要。

(3) 基坑周边建筑物沉降

地铁车站深基坑开挖过程中土层在长期大降深的条件下会产生较大的变形, 从而引起地面沉降, 周边建筑物也会因不均匀沉降导致开裂、变形, 建筑物自身的稳定性对后续基坑开挖及降水施工有较大的影响, 因此对基坑周边建筑物的沉降控制尤为重要。

兰州市城关区人民检察院是雁园路车站基坑施工建筑物沉降的主要的监测对象, 监测点 JGC1, JGC3, JGC5, JGC7, JGC9 的沉降变化曲线如图 5, 其中 JGC1, JGC3, JGC7, JGC9 沿基坑开挖方向布置, JGC3, JGC5,

JGC7 垂直基坑开挖方向布置。

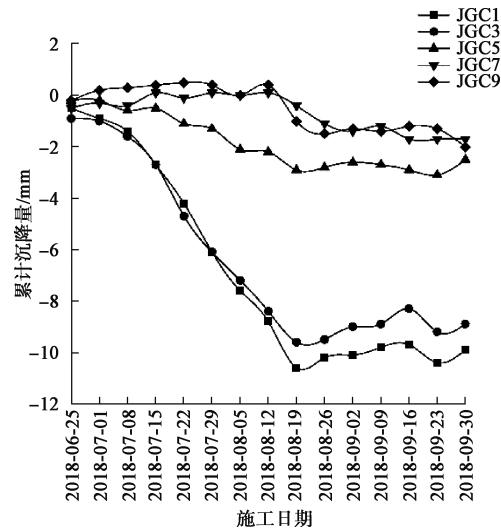


图 5 建筑物沉降随时间的变化关系

Fig. 5 Variation of building settlement with time

由图 5 可知, 建筑物的沉降曲线分为两种不同的变化趋势。监测点 JGC1 和 JGC3, 沉降量在不同的时间段差异性较大, 基坑施工的初期阶段, 由于土层开挖及降水造成的卸荷, 沉降量急剧增长, 在 8 月 19 日第三道钢支撑施工完毕后, 沉降变化趋于平稳。监测点 JGC5, JGC7 和 JGC9 的沉降曲线变化较为平稳, 沉降量在不同的时间段差异性较小。8 月 5 日第二道钢支撑施工完毕后, JGC5, JGC7 和 JGC9 曲线的沉降量都有明显的控制, 8 月 19 日第三道钢支撑施工完毕后, 沉降变化进入平稳阶段。

但总体上五条曲线的变化趋势一致, 除了在基坑开挖的前期监测点 JGC9 由于沉降的不均匀性导致微小的隆起外, 建筑物整体的沉降值伴随着微小的上下起伏与时间增长呈正相关。

距离基坑边缘近的监测点 JGC1 和 JGC3, 两者的变化曲线基本一致, 距离基坑边缘远的 JGC7 和 JGC9, 两者的变化趋势较为相似, JGC1 和 JGC3 的沉降值整体上大于 JGC3 和 JGC9, JGC5 的沉降量介于这四条曲线之间, 可见基坑开挖对周边建筑物的沉降影响随着距基坑的距离增加而减小。5 个监测点的最大沉降值为 JGC1 在 8 月 19 日的 10.6 mm, 远小于控制值 30 mm, 说明基坑开挖造成该建筑物的沉降影响在安全范围内。

3 数值模拟分析

3.1 模型及边界条件

选择基坑的标准段区域建模, 标准段宽度约为 24.6 m, 深度约为 24 m, 基坑长度延伸方向取 7—13 轴之间的 43.5 m。根据圣维南原理, 模型的平面尺寸取基坑平面尺寸和基坑开挖深度并集的 3~5 倍, 模型

的深度取基坑开挖深度的3~5倍,模型尺寸为120 m×50 m×75 m,见图6。以雁园车站的工程地质勘察报告和主体支护结构设计图为依据,选取基坑标准段进行数值模拟,将该剖面的土层简化为3层。岩土体的本构模型选用修正莫尔-库仑(MMC)模型,土体的卸载弹性模量值取4倍的压缩模量值。内支撑及地下连续墙均采用弹性本构,建立模型时地下连续墙采用2D板单元,钢筋混凝土撑、冠梁、钢支撑、钢围檩、格构柱及格构柱基础都采用1D梁单元来模拟。模型的边界条件采用自动约束的地基边界,自重荷载,并对立柱施加螺旋约束,假设基坑开挖时已经完成降水,地下连续墙及基坑底部均视为不透水边界。

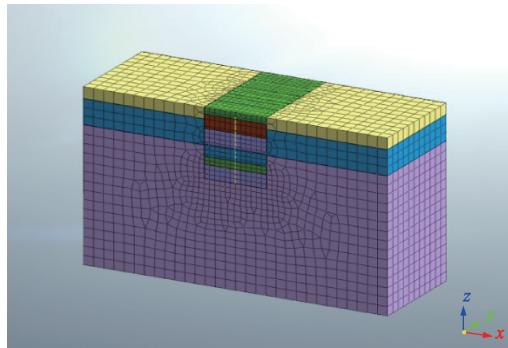


图6 计算模型网格划分

Fig. 6 Gridding of computational model

基坑开挖前设置工况初始地应力平衡及场地位移清零,然后开始各工况开挖,见表3。

表3 施工工况

Table 3 Working conditions

工况	时间	施工状态
1	开始开挖—2018-07-01	开挖深度2.9 m,第一道钢筋混凝土支撑施工完毕
2	2018-07-01—2018-07-15	开挖深度8.9 m,第一道钢支撑施工完毕
3	2018-07-15—2018-08-05	开挖深度15.5 m,第二道钢支撑施工完毕
4	2018-08-05—2018-08-19	开挖深度20.7 m,第三道钢支撑施工完毕
5	2018-08-19—2018-08-26	开挖深度24.07 m,防水垫层已浇筑,底板钢筋施工

3.2 支护墙顶水平位移分析

选择所建模型区域内支护墙顶水平位移的监测点ZQS17,将其监测值和模拟值在不同工况下的变化曲线对比分析,如图7所示。

由图7可知,模拟值和监测值并不完全一致,这是因为数值模拟的建模条件比较理想,为了提高计算速度,只截取了基坑的标准段进行建模,其受力条件与完整的基坑有所差异;对土层进行了简化,假设其均匀分布,而实际情况土层分布并不完全水平;没有考虑施工

过程中基坑周边可能堆放的机具及其它的临时荷载。

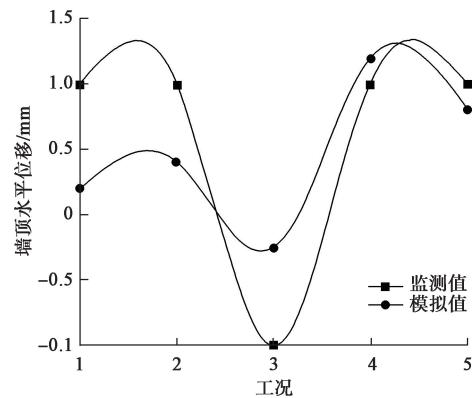


图7 支护墙顶水平位移模拟值与监测值对比曲线

Fig. 7 Comparison curves between simulated and monitored values of horizontal displacement at wall top

模拟结果和监测结果的曲线变化趋势大致相似,地连墙顶随着各工况在水平方向移动,工况一在第一道支撑完成后,土层继续开挖,支护墙顶的位置从基坑外向着基坑内微小移动,直到工况三第三道支撑完成,又开始向着基坑内部移动,最终趋于稳定。模拟值总体上都小于监测值,这是因为建模过程对实际工程进行了简化,计算结果为理想值,但二者最大值仅为1.3 mm,未超过控制值25 mm,基坑的开挖过程处于安全状态。

3.3 支护墙顶竖向位移分析

选择所建模型区域内支护墙顶竖向位移的监测点ZQC14,将其监测值和模拟值对比分析,如图8所示。

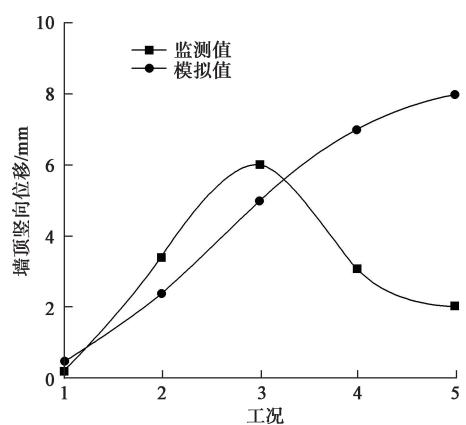


图8 支护墙顶竖向位移模拟值与监测值对比曲

Fig. 8 Comparison of simulated and monitored vertical displacements at wall top

由图8可知,支护墙顶竖向位移的监测值和模拟值虽然并不完全相等,监测值的曲线走势先增大后减小,而模拟值逐渐增大。实际施工中,基坑开挖初期,在第一道支撑施工后,第二道支撑施工结束前,随着基坑内土压力逐层卸载,支护墙内外的压力差逐渐增大,基坑内土体向上运动带动支护墙体也向上运动,支护墙顶的竖向位移逐渐增大,随着工况三第三道支撑的

施工,支护墙内外的水、土压力差的增长小于支护墙的自重,墙顶竖向位移才逐渐减小。建立数值模型时,假设基坑已经完成降水,开挖过程中围护墙内外的水、土压力差一直保持在较大的情况下,因此地连墙一直在下沉。

实测的最大竖向位移为 7.6 mm,模拟的最大值为 5.5 mm,都远小于控制值 25 mm,表明开挖过程中支护结构稳定性良好。

4 结 论

本文依托兰州地铁雁园路站深基坑工程,对基坑施工过程中支护墙顶水平及竖向位移、基坑周边建筑物沉降的监测数据进行分析,并建立 Midas GTS 数值模型,选取典型工况的监测值与数值模拟结果对比分析,验证了在兰州地区针对该类特殊红砂岩地层深基坑支护结构设计的科学性,主要得到 3 点结论。

(1) 基坑中部围护墙顶位移最大,但远小于控制值,表明支护选型和降水方案可行。

(2) 基坑开挖过程中各段地连墙产生不同程度的沉降差,沉降差值过大会影响冠梁及整个内支撑体系的安全,而监测结果的最大值为 4.8 mm,远小于控制值,说明支护结构设计可进一步优化。

(3) 墙顶水平位移监测结果与数值模拟结果对比分析表明,两者数值并不完全一致,但变化趋势大致相似,表明有限元数值模拟软件应用于深基坑工程具有可行性,可对基坑工程中可能存在的问题进行预测并给出支护方案优化的合理建议。

参考文献:

- [1] 赵文,李慎刚,徐岩,等. 地铁基坑施工稳定性监测分析[J]. 岩土力学,2007,28(增刊1):643-646. (ZHAO Wen, LI Shen-gang, XU Yan, et al. Monitoring analysis of subway foundation-pit engineering stability [J]. Rock and

Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 643-646. (in Chinese))

- [2] 周勇,郭楠,朱彦鹏. 兰州地铁世纪大道站基坑支护监测与数值模拟[J]. 铁道工程学报,2014,31(1):82-88. (ZHOU Yong, GUO Nan, ZHU Yan-peng. Construction monitoring and numerical simulation of deep excavation of century avenue metro station in Lanzhou [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31 (1): 82 - 88. (in Chinese))
- [3] 张波. 兰州盆地第三系砂岩工程地质特性评价研究[J]. 工程地质学报,2014,22(1):166-172. (ZHANG Bo. Evalution of the engineering geological condition of n-sandstone in Lanzhou basin [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 166 - 172. (in Chinese))
- [4] 王惠君. 兰州特殊红砂岩地层地铁深基坑桩撑支护结构施工力学行为分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019. (WANG Hui-jun. Construction mechanics behavior analysis of pile-strut supporting structure of subway deep foundation pit in Lanzhou special red sandstone formation [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [5] 俞建霖,龚晓南. 基坑工程变形性状研究[J]. 土木工程学报,2002,35(4):86-90. (YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Research on deformation of foundation-pit engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 86 - 90. (in Chinese))
- [6] 李云安. 深基坑工程变形控制优化设计及其有限元数值模拟系统研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(3):421. (LI Yun-an. Research system of optimized design with deformation control and numerical simulation with finite element of deep excavation engineering [J]. Journal of rock mechanics and Engineering, 2001, 20 (3): 421. (in Chinese))
- [7] CLOUGH G W, HANSEN L A. Clay anisotropy and braced wall behavior [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(7): 893-913.

(编校:胡海霞)