

DOI: 10.11779/CJGE2018S1029

兰州某地铁车站深基坑监测与数值模拟分析

叶帅华^{1, 2, 3}, 丁盛环^{1, 2}, 龚晓南³, 高升⁴, 陈长流⁵

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 4. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043;
5. 中国移动通信集团甘肃有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 依托兰州市地铁某车站基坑工程, 对基坑施工过程中的桩顶水平和竖向位移、地表沉降、钢支撑轴力及地下水位进行了监测, 并对监测数据进行了系统分析。监测结果分析表明, 桩顶水平位移随着基坑的开挖由小变大逐渐趋于平稳, 桩顶竖向位移随着开挖深度的增加而逐渐增加, 在开挖的过程中钢支撑的轴力趋于稳定。最后借助有限元软件对基坑开挖进行了数值模拟, 并将模拟结果与监测结果进行了对比分析, 结果表明, 数值模拟和监测结果变化规律基本一致, 证明了钻孔灌注桩联合钢管内支撑结构安全可行, 保证和维护了基坑的稳定, 为类似基坑的施工提供了有效可靠的参考资料。

关键词: 车站; 基坑; 变形; 支撑轴力; 地下水位; 监测分析; 数值模拟

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)S1-0177-06

作者简介: 叶帅华(1983-), 男, 河南巩义人, 博士后, 副教授, 主要从事支挡结构、地基处理及岩土工程抗震方面的教学和研究工作。E-mail: yeshuahua@163.com。

Monitoring and numerical simulation of deep foundation pit of a subway station in Lanzhou

YE Shuai-hua^{1,2,3}, DING Sheng-huan^{1,2}, GONG Xiao-nan³, GAO Sheng⁴, CHEN Chang-liu⁵

(1. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
4. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China; 5. China Mobile Group Gansu Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: Based on the foundation pit of a subway station in Lanzhou, the horizontal and vertical displacements of pile top, surface settlement, axial force of steel supports and groundwater level of foundation pit during construction are monitored, and the monitoring data are analyzed. The monitoring results show that the horizontal displacement of pile top gradually changes from small to large and the vertical one of pile top increases with the increase of excavation depth, and the axial force of steel supports in the excavation process tends to be stable. Finally, the finite element software is used to simulate the excavation of the foundation pit. The simulated and monitoring results are compared. The results show that the numerical simulations and the monitoring results basically have the same variation rules. It is proved that the combined structure of steel tube bored pile and support is safe and feasible, and it ensures and maintains the stability of the foundation pit. This study may provide effective and reliable reference for the construction of similar foundation pits.

Key words: subway station; foundation pit; deformation; axial force of support; groundwater level; monitoring analysis; numerical simulation

0 引言

兰州地区地形条件较为复杂, 是典型的湿陷性黄土地区, 近年来地下空间的开发较为迅速, 基坑开挖过程中未知因素较多, 风险较大, 基坑工程依然是岩土科学的研究难点课题。当今经济繁荣发展, 城市地

铁建设也迅速发展, 开展基坑系统全面的监测, 才能对基坑施工情况有全面的认识, 以保证工程安全进行。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508256); 甘肃省建设科技攻关计划项目(JK2015-5); 兰州市科技发展计划项目(2015-3-131)

收稿日期: 2017-06-11

虽然兰州地区情况特殊，但是对兰州地区的深基坑支护中采用不同的支护结构形式的研究还处于初步阶段，不同支护形式情况下基坑围护结构以及周边环境的变形特性还处于进一步的研究当中。叶帅华等^[1]对土钉加预应力锚杆的复合土钉墙、土钉墙和排桩加预应力锚杆三种支护结构的变形特性进行了分析，认为坡顶的水平位移随开挖深度的变呈现出逐渐增大的规律；任永忠等^[2]研究的基坑坑底标高比周围建筑物最深桩基础底面标高要低的情况下，在排桩预应力锚杆支护下得出了桩顶水平位变化很小；周勇等^[3]通过研究采用桩撑支护结构的基坑认为桩体的最大位移在开挖的上方。以上这些研究均是针对兰州地区，而丁智等^[4]通过基坑监测分析了杭州地铁基坑，认为监测初期应对轴力加强监测，监测后期应对深层水平位移加强监测。徐中华等^[5]研究上海地区深基坑变形控制指标。除此之外，徐杨青等^[6]运用 C 语言编程，开发一套更全面的基坑监测数据处理系统，使得监测和数据处理更专业。

本文以兰州西关十字地铁基坑为例对钻孔灌注桩联合钢管内支撑支护结构进行研究，对桩顶水平和竖向位移、地表沉降、钢支撑轴力及地下水位进行了监测以及监测结果进行分析，又对监测结果和有限元模拟分析进行对比，以补充兰州地区对基坑工程的研究工作，为以后的基坑研究工作提供一定的指导作用。

1 工程概况

1.1 工程概况及周边环境

西关十字站为兰州市城市轨道交通 1 号线一期工程换乘车站（与规划 3 号线换乘），十字路口西南侧为西单商场；十字路口东南侧为荣华商厦；十字路口东侧为张掖路步行街，地铁站的具体位置如图 1 所示。

西关十字站为岛式车站，车站主体长 263.72 m，标准段净宽 21.7 m，标准段净高 19.74 m。车站底板埋置深为 24.71~26.82 m，结构顶板覆土深度为 1.5~3.17 m。



图 1 车站位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of station location

1.2 工程地质概况

车站的勘探地层为人工填土；其下为全新统的冲、洪积卵石土、底部为第三系砂岩、场地地层自上而下划分为 5 层：①杂填土，层厚 1.5~6.2 m。②素填土，层厚 1.8~6.0 m，厚底深度 4.7~6.7 m。③卵石层，层厚 4.3~8.3 m。④砂岩，层厚 5.7~6.3 m，厚底深度 16.7~19.2 m。⑤砂岩，最大揭露厚度为 28.3 m。根据本工程特点及现场实际情况，本工程土体参数见表 1。

表 1 土体参数表

Table 1 Soil parameters

土层	土层	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 ϕ /(°)
1-1	杂填土	19.0	0	17.0
1-2	素填土	16.5	10	18.0
2-10	卵石土	23.0	0	40.0
4-2-1	砂岩	20.7	24	32.0
4-2-2	砂岩	21.9	33	35.0

1.3 水文地质概况

勘察期间地下水位埋深 5.5~8.1 m，地下水位高程介于 1516.55~1517.79 m。设计抗浮水位为 1521.00 m，设计防渗水位为 1519.00 m。地下水主要赋存于杂填土、素填土、卵石土及砂岩中，属潜水类型，其中卵石层透性好，赋水性强，是车站的主要含水层，其次为砂岩，富水性较弱。

2 基坑围护结构监测方案

基坑监测为确保基坑工程施工安全，在基坑开挖过程中实施科学的监测。根据文献[7~11]规定，对桩顶水平和竖向位移、地表沉降、钢支撑轴力及地下水位进行监测数。轴力计的安装实例如图 2 所示。

本车站基坑监测对象主要包括围护桩、钢支撑、周围土体、地下水。其中地表沉降监测点 142 个；支撑立柱沉降监测点 10 个，地下水位监测点 18 个，桩顶水平位移、桩体水平位移监测点 30 个；支撑轴力监测点 13 个；基坑测点剖面示意图如图 3 所示。



图 2 轴力计安装实例示意图

Fig. 2 Sketch of installation example of axial force meter

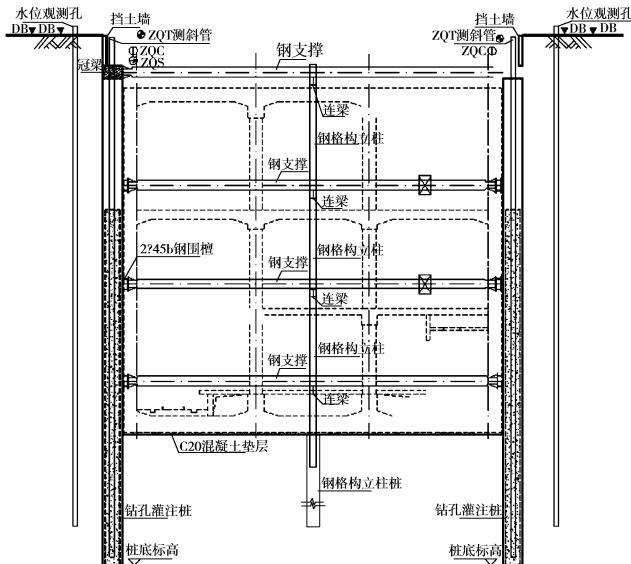


图 3 基坑测点剖面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measuring points for foundation pit

3 监测结果分析

3.1 桩顶水平位移

基坑呈东西走向, 现称东为基坑右侧, 西为基坑左侧。

桩顶水平位移的监测现选取 W29, W24, W20, W13, W17 六个测点进行分析, 其中 W13, W17 两测点位于基坑的最左侧, W29 位于最右侧, W24 位于基坑约中间位置, 现对 6 个测点的监测数据进行分析, 分析结果如图 4 所示。

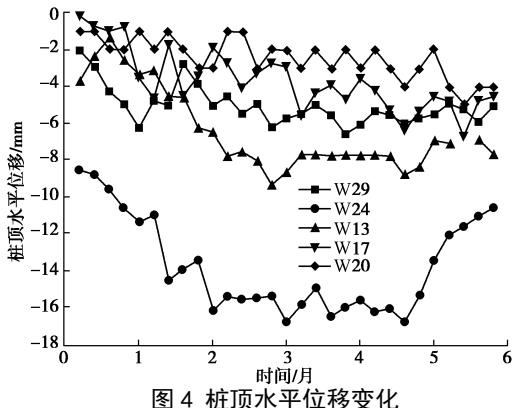


图 4 桩顶水平位移变化

Fig. 4 Horizontal displacements of pile top

由图 4 可以看出 W13、W17 测点的桩顶水平位移累计值的绝对值在图中呈现增大, 说明桩顶逐渐向坑内侧偏移, 最大的偏移值约为 9 mm, 小于监测报警值。W29 监测点在基坑开挖初期桩顶水平位移绝对值增大, 随后数值减小, 说明第一道支撑有效地分担了坑侧的主动土压力, 控制了基坑的变形。W17 的监测点的桩顶水平位移在基坑开挖初期向坑内侧偏移, 并且偏移量逐渐增加, 支撑布置以后水平位移减小, 在随后的基坑开挖过程中, W13, W17, W29 的变化趋

势一致, 位移逐渐增大但变化缓慢。由图明显看出 W24 监测点的桩顶水平位移一直增大, 在监测后期位移减小, 这是由于 W24 测点周围出现建筑物材料的堆载, 致使坑侧荷载值超过设计荷载, 坑侧压力增大, 水平位移严重增大, 后期堆载消失桩顶水平位移绝对值减小。

由图 4 看出, W29 累计水平位移量大于 W13, W24 累计水平位移量, 桩顶水平位移表现出了明显的时空效应。

3.2 桩顶竖向位移

现取 C12, C15, C28, C9 监测点的监测数据进行分析, 其中监测点 C12, C15 位于基坑右侧, C28 位于基坑左侧, C9 位于基坑中部, 桩顶竖向位移监测数据如图 5 所示。

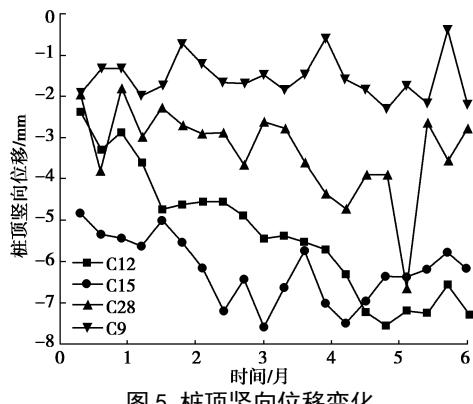


图 5 桩顶竖向位移变化

Fig. 5 Vertical displacements of pile top

从图 5 可以看出, 位于基坑左右两侧的测点 C12, C15, C28 的累计值的绝对值呈增大趋势, 图形变化趋势基本一致。基坑中部的测点 C9 的变化趋势平缓, 位移累计值较小。测点 C12, C15 的桩顶竖向位移累计绝对值明显大于 C28, C9 的累计值, 桩顶竖向位移随着时间的推移呈增大趋势, 位移的最大值约为 7.5 mm, 小于监测报警值。C12, C15, C28, C9 是坑侧边位置相距较远的测点, 变化趋势基本一致, 但是变化数值相差较大, 这说明基坑的时空效应明显。

3.3 支撑轴力

支撑轴力的监测结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出在坑开挖过程中第一道支撑 ZL12-1 和第二道支撑 ZL12-2 的轴力随着基坑开挖深度增加呈增大趋势, 说明在后续支撑没有布置之前坑侧的主动土压力全部由前两道支撑分担, 基坑继续开挖, 主动土压力增大, 分担在两道支撑上的力也逐渐增大, 这与支撑变化趋势逐渐增大相一致。第二道支撑 ZL12-2 布置之后, 开始时轴力增大较快, 在此期间第二道支撑 ZL12-2 轴力出现下降, 说明第二道支撑的布置分担了坑侧土的压力, 致使第一道支撑轴力值出现下降。由于基坑的继续开挖, 在后期两测点的值呈

增大趋势，变化相对平缓。测点 ZL5-3 的支撑轴力总体也呈增大趋势，变化较缓，最大轴力值小于 1400 kN，小于轴力的设计值，说明此基坑的设计在一定程度上偏于保守。由基坑剖面图图 2 可以看出本基坑随基坑开挖竖向共 4 道支撑，由于监测数据不完整取了测点 ZL12 的前两道支撑，第三道取 ZL5 的第三道支撑轴力进行分析，虽然第三道支撑与前两道支撑不在基坑的同一位置，但就研究支撑轴力变化情也有一定的参考价值。

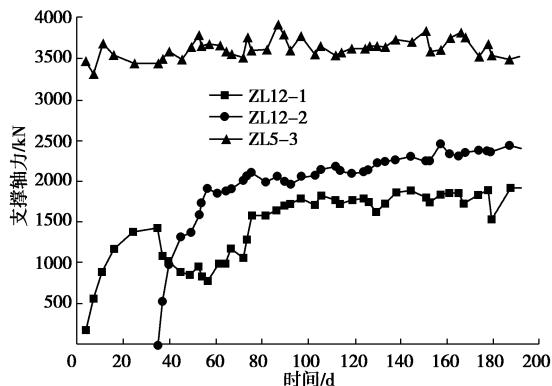


图 6 支撑轴力变化

Fig. 6 Change of axial force of support

3.4 地表沉降

现取 6 个测点的监测数据进行分析，其中 DB29-01 距离基坑最近，DB23-02 离基坑稍远，DB08-04、DB14-04、DB05-04 离基坑远近数值一致，离基坑最远。监测的地表沉降数据如图 7 所示。

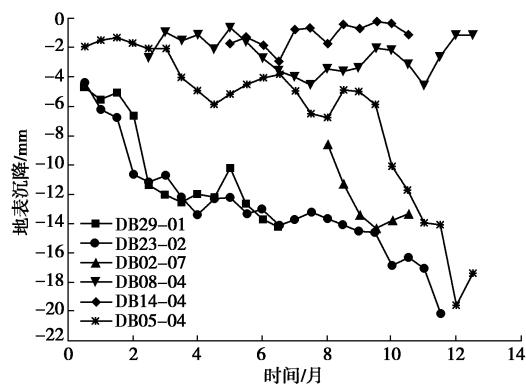


图 7 地表沉降

Fig. 7 Change of surface subsidence

由图 7 可见，位于基坑较远的监测点 DB08-04、DB14-04、DB5-04 变化趋势平稳，累计值的绝对值相对较小，位于基坑较近的监测点 DB29-01、DB23-02 地表沉降累计值绝对值呈增大趋势，数值明显大于其它监测点，说明距离基坑越近，由基坑开挖引起地表沉降越明显。由图可见监测点 DB05-04 的数据在后期出现突然的增长，这是由于监测点 DB05-04 附近出现堆载，堆载增大了地面的荷载，致使地面沉降严重

增大。

基坑周围机械的振动、车辆等不确定荷载都会引起地表的沉降，尤其是堆载情况会引起基坑周围地表的严重沉降。为了确保基坑施工的安全，要严格控制基坑周边的荷载情况，严格按照基坑设计进行。

3.5 地下水位

由于基坑工程是临时性结构，危险性较大，土方开挖和地下结构施工要始终处于地下水位以上，基坑周边的地下水位与基坑结构的稳定性密切相关，在地下水高于基坑底面进行基坑开挖施工时，由于坑内外的水位差，会影响到基坑边坡的稳定性，因此对于地下水位较高的基坑要采用降水处理。根据地下水位监测文献[12]，水位管理设后，采用水位计逐日连续观测水位，取 5 d 稳定数值作为初始值。

地下水位监测采用钢尺水位计 SWJ-8090，基坑周边设置 18 个监测点。根据监测的测点 SW03、SW012 和 SW08 得到的数据结果见图 8。

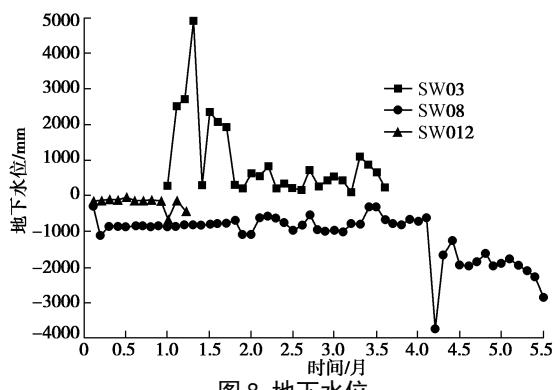


图 8 地下水位

Fig. 8 Change of groundwater level

从图 8 可以看出，总的地下水位呈现下降趋势，SW08 和 SW03 的监测数据不是特别完整，但就已有的数据来看，SW08、SW012 测点的水位都处于基坑以下。SW03 测点的数据明显的可以看出局部出现比较严重的波动，主要是因为 SW03 监测是从六月份开始，由于季节的影响，降雨严重影响水位的变化，又由于排水设施出现故障，降水没有及时从基坑排除，导致水位的增大，随后由于采取基坑降水，水位下降。

4 有限元模拟分析

4.1 建立模型

所建的有限元模型图、水平位移阴影图如图 9、图 10 所示。

本模型利用 PLAXIS2D 来模拟，模型采用平面应变，15-节点，由于基坑是对称的，故模型只建基坑的一半。用锚锭杆模拟钢管内支撑，围护桩用板来模拟，侧边的边界范围的数值大约为基坑深度的 4 倍，下边界大约是坑深的 1.5 倍，尽量减小边界对基坑开挖及

支护的影响。

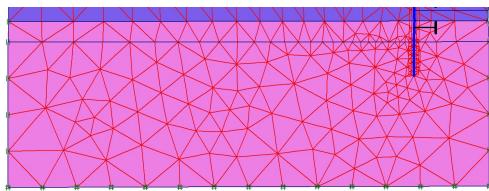


图 9 有限元模型图

Fig. 9 Finite element model

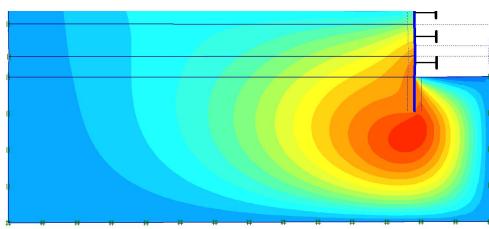


图 10 水平位移云图

Fig. 10 Nephogram of horizontal displacement

4.2 桩顶水平位移模拟数值分析

取 W20 测点模拟值与实测值进行分析比较, 得出的结果如图 11 所示。

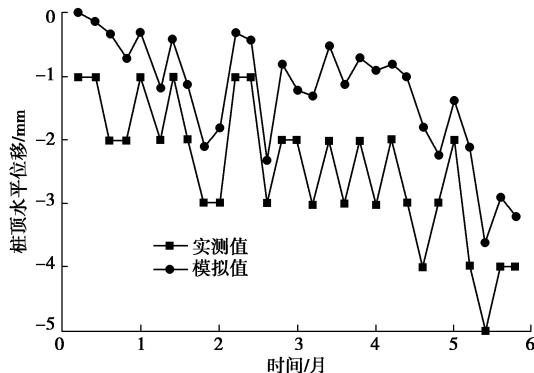


图 11 桩顶水平位移实测值与模拟值对比图

Fig. 11 Comparison between measured and simulated values of horizontal displacement of pile top

由图 11 可以得出, 桩顶水平位移的模拟值绝对值小于实测值的绝对值, 桩顶在基坑开挖的早期水平位移绝对值逐渐增大, 随之又减小, 由于模拟开挖是分步进行的, 开挖的初期坑侧主动土压力影响, 使得桩顶发生较大的水平位移, 支撑布置以后, 支撑轴力使得围护桩向坑外侧移动, 桩顶的位移减小。基坑开挖的模拟不能很真实的模拟出实际存在的各种不确定因素, 使得模拟值与实测值出现一定的偏差值, 但是二者的基本趋势是一致的, 说明模拟的结果是成功的, 只要选取合理的参数, 用有限元软件来模拟基坑的开挖是可取的。

4.3 支撑轴力模拟数值分析

取 ZL5-3 测点的模拟值与实测值进行比较, 结果

如图 12 所示。

图 12 中在前一部分模拟值明显小于实测值, 这是由于支撑初布置时的轴力数据不全, 无法显示支撑前期的受力情况, 而模拟值则是从支撑初布置的受力变化情况, 支撑轴力从 0 开始逐渐增大, 但是随着基坑的开挖, 二者的数值逐渐接近, 都趋于平稳变化, 基坑开挖的后期二者的变化趋势基本吻合。

由图 12 可以看出模拟值较真实值要小, 分析认为本基坑地处闹市区, 周边环境复杂, 车流及人流较大, 不稳定荷载变化范围不确切, 而且在现实的开挖过程中有可能会出现超挖现象, 这些不确定因素软件是无法模拟的, 这就引起模拟值和实测值之间的偏差。

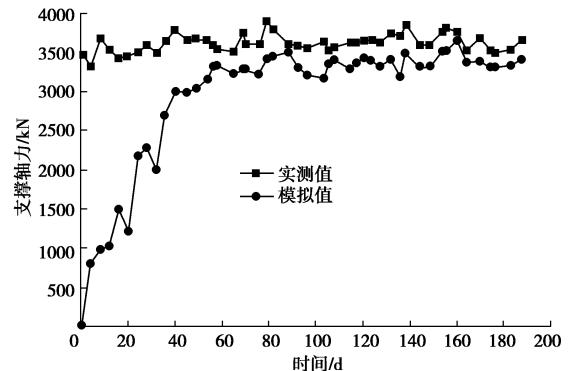


图 12 支撑轴力实测值与模拟值对比图

Fig. 12 Comparison between measured and simulated values of axial force

4.4 地表沉降模拟数值分析

取 DB23-2 监测点, 模拟数值与实测值的结果的对比如图 13 所示。

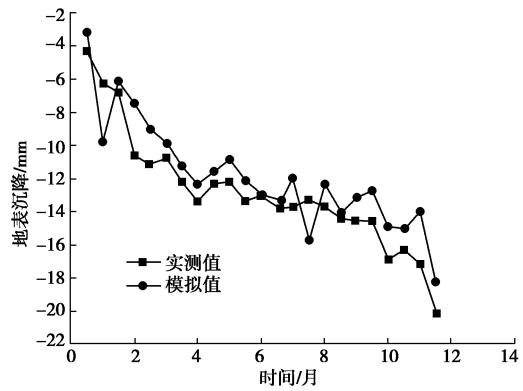


图 13 地表沉降实测值与模拟值对比图

Fig. 13 Comparison between measured and simulated values of surface subsidence

由图 13 可以看出在基坑开挖的初期模拟出的沉降值的绝对值较实测值要大, 由于在模拟的过程中, 开挖是分步进行的, 开挖之后钢支撑没有布置, 由于坑侧主动土压力的作用, 桩顶发生水平位移, 引起地表沉降, 地表沉降的最大值发生在桩侧周围。随着基坑开挖, 支撑布置之后, 支撑控制了桩体的位移, 分担了大部分的坑侧土压力, 地表沉降减小。模拟值中

地表沉降的最大值为 19.2 mm, 这与实测之中的 20 mm 相差不大。模拟值与实测值的变化曲线基本一致, 模拟值可以作为参考值指导基坑施工。

5 结 论

本文通过兰州市地铁一号线西关十字车站基坑施工过程中的数据监测, 对钻孔灌注桩联合钢管内支撑支护下的基坑进行分析, 得到以下 7 点。

(1) 本深基坑采取钻孔灌注桩联合钢管内支撑的支护方式是成功的。此支护方式比较适用于周边建筑物密集的环境下, 同时也适用于兰州地区。

(2) 桩顶水平位移的变化可有效的反映出桩身水平变化特性, 基坑侧壁中部的测点累计水平位移量大于基坑拐角处监测点累计水平位移量, 桩顶水平位移时空效应明显。

(3) 基坑土体的开挖影响桩顶竖向位移的变化, 桩顶竖向位移随着开挖深度的增加而逐渐增加, 但增大数值不大, 在允许范围之内。

(4) 钢支撑可有效地控制围护桩的倾覆和变形, 在开挖的过程中, 支撑的最大值小于设计值说明支护体系是非常有效的, 其设计参数的选取也是合理的。

(5) 基坑周围的土体出现沉降, 地表沉降的最大值出现在离基坑大约 9 m 左右的位置。距离基坑越近沉降值越大。

(6) 为确保基坑在“干”状态施工, 要及时做好基坑的排水, 雨季严重影响基坑的水位变化, 要做好雨季基坑的排水工作。

(7) 有限元模拟结果与监测结果变化规律基本一致, 说明基坑设计合理, 为后续此类基坑的研究提供可靠地参考资料。

参 考 文 献:

- [1] 叶帅华, 陈长流, 寇巍巍, 等. 兰州市某深基坑工程位移监测及变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 440 - 445. (YE Shuai-hua, CHEN Chang-liu, KOU Wei-wei, et al. Displacement monitoring and deformation characteristics of a deep foundation pit in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 440 - 445. (in Chinese))
- [2] 任永忠, 朱彦鹏, 周勇. 兰州市某深基坑支护设计及监测研究分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 1): 705 - 710. (REN Yong-zhong, ZHU Yan-peng, ZHOU Yong. Design and monitoring of bracings for a deep foundation pit in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,
- 2014, 36(S1): 705 - 710. (in Chinese))
- [3] 周勇, 郭楠, 朱彦鹏, 等. 兰州地铁试验段深基坑支护设计与施工监测分析[J]. 兰州理工大学学报, 2014(4): 110 - 114. (ZHOU Yong, GUO Nan, ZHU Yan-peng, et al. Design and construction monitoring analysis of deep foundation pit support in Lanzhou Metro test section[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014(4): 110 - 114. (in Chinese))
- [4] 丁智, 王达, 虞兴福, 等. 杭州地铁新塘路、景芳路交叉口工程深基坑监测分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 445 - 451. (DING Zhi, YU Xing-fu, WANG Jin-yan, et al. Monitoring and analysis of deep foundation pit at Xingtang Road-jingfang Road cross of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 445 - 451. (in Chinese))
- [5] 徐中华, 王卫东. 深基坑变形控制指标研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010(3): 619 - 626. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Deformation control criteria of deep excavations[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010(3): 619 - 626. (in Chinese))
- [6] 徐杨青, 程琳. 基坑监测数据分析处理及预测预警系统研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 1): 219 - 224. (XU Yang-qing, CHENG Lin. Analysis processing of monitoring data and forecast and early warning system of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S1): 219 - 224. (in Chinese))
- [7] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))
- [8] GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 2013. (GB 5033—2013 Technical code for building slope engineering[S]. 2013. (in Chinese))
- [9] JGJ 8—2016 建筑变形测量规范[S]. 2016. (JGJ 8—2016 Code for measurement of building deformation[S]. 2016. (in Chinese))
- [10] GB 50026—2007 工程测量规范[S]. 2007. (GB 50026—2007 Code for engineering surveying[S]. 2007. (in Chinese))
- [11] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016. (in Chinese))
- [12] 姜晨光. 基坑工程理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. (JIANG Chen-guang. Theory and practice of foundation pit engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)