

DOI: 10.11779/CJGE2014S2079

地铁换乘车站基坑支撑轴力监测与数值模拟

张光建, 姚小波, 胡瑾

(中冶集团武汉勘察研究院有限公司, 湖北 武汉 430080)

摘要: 以某地铁换乘车站基坑为研究背景, 研究基坑开挖过程中支撑轴力随基坑开挖时间的变化规律。建立三维有限元模型对地铁车站深基坑开挖过程进行模拟计算, 将获得的支撑轴力计算值与实测值进行了对比分析。结果表明: 第四道钢筋混凝土支撑的支撑轴力最大, 第五道和第六道钢支撑的设计偏于保守, 支撑的拆除会对其相邻支撑产生很大影响。支撑轴力的计算值小于实测值, 但其发展变化的趋势几乎一致。三维有限元模型能够较好的模拟异形基坑的开挖过程, 可以为优化设计和施工提供有益的参考。

关键词: 换乘车站; 深基坑; 支撑轴力; 监测; 有限元

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0455-05

作者简介: 张光建(1987-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事地基处理与基坑工程的设计工作。E-mail: zhanggj546@126.com。

Monitoring and numerical simulation of axial forces of struts for foundation pit of a metro transfer station

ZHANG Guang-jian, YAO Xiao-bo, HU Jin

(Wuhan Surveying-geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Wuhan 430080, China)

Abstract: Based on the foundation pit project of a metro transfer station, the changing laws of the axial forces of struts with the excavation time are studied. A three-dimensional finite element model is established to numerically simulate the foundation pit of the metro station. The FEM and in-situ monitoring results of axial forces of struts are compared. The results show that the axial forces of the fourth concrete strut are the maximum, and the design values of the fifth and the sixth steel struts are conservative. Besides, the removal of a strut has a notable influence on its adjacent struts. The calculated results are less than the in-situ monitoring ones, but the trend of their changing laws is almost uniform. The three-dimensional finite element model can simulate the excavation process of abnormal foundation pits, and it can be used to provide reference for their design and construction.

Key words: transfer station; deep foundation pit; axial force of strut; monitoring; finite element

0 引言

随着城市地铁建设规模的不断扩大, 产生了大量地铁车站深基坑工程^[1-2]。对地铁基坑工程而言, 支撑轴力的监测对地铁基坑的开挖有着重要的工程指导意义, 它是分析支护结构受力情况不可缺少的参数, 同时也是判断基坑安全的重要信息。由于地铁基坑施工边界的复杂性以及存在非荷载因素的影响, 支撑结构轴力的实测值与设计值存在较大差异^[3-6]。

本文结合杭州地铁基坑支撑轴力的监测数据, 通过有限元分析软件对地铁车站基坑进行模拟计算, 分析了基坑在开挖过程中支撑轴力的变化情况, 得到了一些基坑施工过程中轴力的变化规律, 可为今后类似地铁基坑的优化设计和信息化施工提供有益的参考。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

杭州地铁1号线滨江站位于杭州市滨江区江陵路与江南大道交叉处江陵路上, 6号线滨江站位于江南大道与江陵路相交叉路口江南大道上, 与沿江陵路的地铁1号线车站换乘, 1号线在上, 6号线在下。本站为地下三层岛式车站。1号线车站沿江陵路南北向布置, 为地下2层站, 车站总长474.5 m, 标准段宽20.3 m, 车站总建筑面积15812 m²。6号线沿江南大道东西向布置, 为地下3层站, 车站总长148 m, 标准段宽19.3 m, 车站总建筑面积14425.3 m²。地铁1号线和6号线在滨江站节点同时施工。

表1 土体物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

| 岩土 编号 | 岩土名称 | 重度 γ / (kN·m ⁻³) | 天然孔隙比 e | 黏聚力 c /kPa | 内摩擦角 φ / (°) | 厚度 /m | 地基土承载 力 f_{ak} /kPa |
|----------------|---------|--|--------------|-----------------|-------------------------|----------|--------------------------|
| ① ₂ | 素填土 | 17.0 | | | | 1.5 | |
| ③ ₂ | 砂质粉土 | 18.6 | 0.856 | 7.3 | 23.4 | 2.1 | 120 |
| ③ ₃ | 砂质粉土夹粉砂 | 19.3 | 0.812 | 12.0 | 26.9 | 4.4 | 160 |
| ③ ₄ | 砂质粉土 | 19.0 | 0.849 | 8.7 | 26.1 | 5.0 | 110 |
| ③ ₅ | 粉砂夹砂质粉土 | 18.5 | 0.890 | 8.0 | 25.0 | 2.6 | 150 |
| ③ ₇ | 砂质粉土 | 18.7 | 0.877 | 10.0 | 32.3 | 1.4 | 130 |
| ④ ₃ | 淤泥质粉质黏土 | 17.3 | 1.268 | 9.0 | 10.0 | 8.0 | 80 |
| ⑥ ₂ | 淤泥质粉质黏土 | 17.6 | 1.143 | 2.0 | 15.0 | 4.6 | 90 |
| ⑫ ₁ | 中砂 | 19.0 | | 0 | 38.0 | 12.7 | 190 |
| ⑭ ₁ | 圆砾 | 19.5 | | 0 | 35.0 | 12.3 | 400 |

主体部分围护结构采用 1000 mm 厚连续墙, 附属结构采用钻孔咬合桩。车站主体采用明挖顺作法施工,

节点基坑开挖深度为 16.7~24.3 m, 先期施工的换乘节点设置 4 道钢筋混凝土支撑和 2 道钢管支撑。第一、二道钢筋混凝土支撑的截面尺寸为 800×1000 mm, 第三、四道钢筋混凝土支撑的截面尺寸为 1000×1000 mm, 第五、六道钢支撑采用直径 609 mm, 壁厚 16 mm 的钢管。第一道支撑在-1.9 m 架设, 第二道支撑在-7.1 m 架设, 第三道支撑在-10.7 m 架设, 第四道支撑在-14.0 m 架设, 第五道钢支撑在-17.7 m 架设, 第六道钢支撑在-21.0 m 架设, 如图 1 所示。

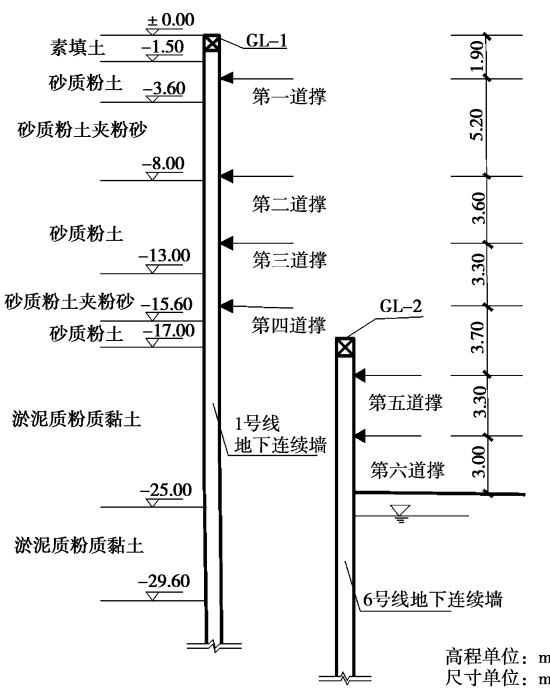


图1 基坑围护结构剖面图

Fig. 1 Profile of retaining structure of foundation pit

1.2 工程地质条件

该地铁车站场地属于钱塘江冲海积平原地貌单元, 地基土属中软场地土。主要地层为①₂素填土, 层

厚 1.5 m; ③₂砂质粉土, 层厚 2.1 m; ③₃砂质粉土夹粉砂, 层厚 4.4 m; ③₄砂质粉土, 层厚 5.0 m; ③₅粉砂夹砂质粉土, 层厚 2.6 m; ③₇砂质粉土, 层厚 1.4 m; ④₃淤泥质粉质黏土, 层厚 8.0 m; ⑥₂淤泥质粉质黏土, 层厚 4.6 m, 场地主要土层的物理力学指标见表 1。地下水分布为两个主要含水层, 即浅层潜水和深层承压水。潜水含水层组主要为全新统冲海积砂(粉)土, 包括③层粉土及粉砂夹粉土, 潜水位埋深 2.1~3.90 m; 承压含水层主要分布于⑫₁层中砂、⑭₁层圆砾中, 勘察期间测得承压水位埋深 4.00 m, 水位标高为 2.24 m。

2 车站基坑监测测点布置

本文的研究对象为先期施工的换乘节点, 根据工程支护方案以及规范的要求, 考虑到基坑周围的环境条件, 本工程选取了基坑不同开挖位置 3 处共 18 根支撑进行了轴力监测, 支撑监测测点的分布情况如图 2, 3 所示。

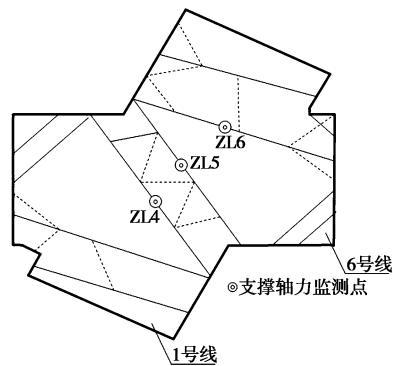


图2 第1~4道支撑测点布置图

Fig. 2 Layout of monitoring points 1~4

3 支撑轴力监测数据分析

3.1 支撑轴力的变化

支撑轴力监测是基坑监测的一个主要内容, 是考察支撑体系安全状况的重要指标。为了及时反映施工

过程中各支撑轴力的变化情况, 本文选取了有代表性的两处支撑, 对它们在基坑开挖过程中轴力的变化情况进行了分析。图4, 5分别为对撑ZL5和ZL6的轴力随施工工况的变化曲线, 基坑开挖的关键工况见表2。从图中可以看出, 支撑轴力随着开挖深度的加大而增大, 当开挖至坑底后, 支撑轴力开始逐渐回落。钢筋混凝土支撑均承受了较大的轴力, 而钢管支撑的轴力很小。几乎所有支撑在工况9即基坑开挖至坑底时, 其支撑轴力均达到了最大值。尤其是第四道支撑, 轴力在工况9时达到了所有支撑轴力的最大值, 其轴力发展的速度也很快。

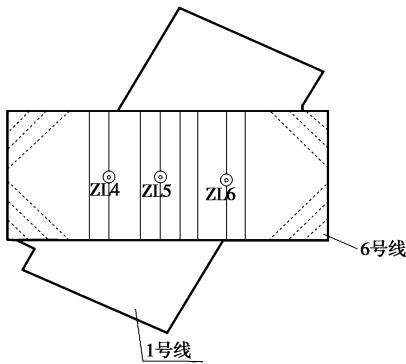


图3 第5~6道支撑测点布置图

Fig. 3 Layout of monitoring points 5~6

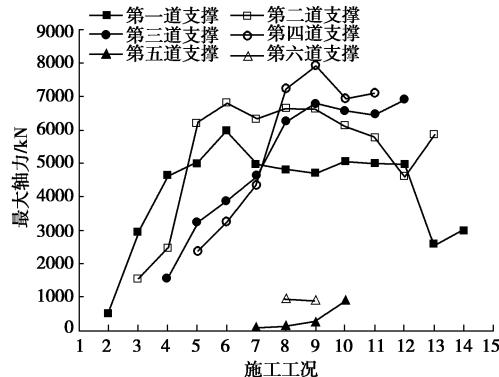


图4 ZL5 最大支撑轴力随施工工况变化的曲线

Fig. 4 Variation of maximum axial forces of strut ZL5 with construction stage

在拆撑过程中, 每道支撑的拆除会对相邻支撑的轴力产生很大的影响。第六道支撑的拆除会引起第五道支撑轴力的突然增加, 但对其他支撑却影响很小, 第四道支撑的拆除会引起第三道支撑轴力的突然增加, 但却没有引起第二道及第一道支撑轴力的突然变化。因此, 在拆除支撑过程中, 应时刻关注其邻近支撑的轴力变化情况, 防止邻近支撑轴力的突然增加带来不利影响。

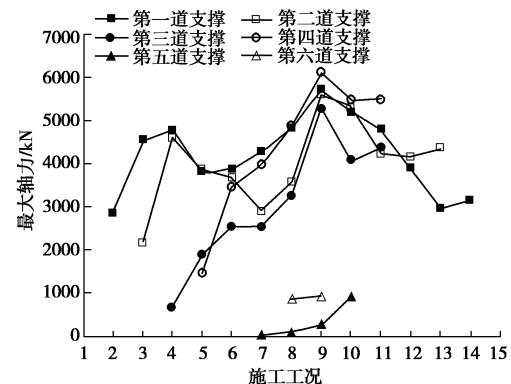


图5 ZL6 最大支撑轴力随施工工况变化的曲线

Fig. 5 Variation of maximum axial forces of strut ZL6 with construction stage

表2 关键施工阶段

Table 2 Key construction stages

| 工况 | 基坑施工阶段 |
|----|-----------------------------|
| 1 | 施工地连墙以及封堵墙 |
| 2 | 开挖第一层土, 施工冠梁 GL-1 和第一道混凝土支撑 |
| 3 | 开挖第二层土, 施工第二道混凝土支撑 |
| 4 | 开挖第三层土, 施工第三道混凝土支撑 |
| 5 | 开挖第四层土, 施工第四道混凝土支撑 |
| 6 | 开挖第五层土至地连墙冠梁 GL-2 下并施工 GL-2 |
| 7 | 开挖第六层土, 施工第五道双幅钢支撑 |
| 8 | 开挖第七层土, 施工第六道钢支撑 |
| 9 | 开挖到基坑底 |
| 10 | 施工垫层和底板, 拆除第六道钢支撑 |
| 11 | 施工第五道换撑, 拆除第五道双幅钢支撑 |
| 12 | 施工二层中板, 拆除第四道支撑 |
| 13 | 拆除第三道支撑 |
| 14 | 施工一层中板, 拆除第二道混凝土支撑 |
| 15 | 施工顶板, 拆除第一道混凝土支撑和第五道换撑 |

3.2 实测轴力与设计轴力的对比分析

表3为基坑开挖过程中每道支撑轴力实测最大值与设计值的百分比。由表3可以看出, 所有支撑的轴力实测值均小于设计值, 支撑的轴力实测值相对于设计值来说在一个相对安全的范围之内。四道钢筋混凝土支撑的实测值占设计值的百分比较高, 两道钢支撑的实测值占设计值的百分比很低, 说明钢筋混凝土支撑

表3 实测轴力与设计轴力对比

Table 3 Comparison between measured and calculated axial forces of struts

| 项目 | 设计值 /kN | 实测值 /kN | 最大值百分比/% |
|------------|---------|---------|----------|
| 第一道钢筋混凝土支撑 | 7793 | 5976 | 77 |
| 第二道钢筋混凝土支撑 | 6834 | 6206 | 91 |
| 第三道钢筋混凝土支撑 | 7923 | 6891 | 87 |
| 第四道钢筋混凝土支撑 | 12899 | 7935 | 62 |
| 第五道钢支撑 | 8615 | 913 | 11 |
| 第六道钢支撑 | 5221 | 936 | 18 |

发挥了较大的支撑作用,而两道钢支撑实测轴力极低,设计过于保守。因此,基坑设计时可优化设计方案,达到安全性和经济性的统一。另外,部分支撑的最大轴力是在基坑拆撑时达到的。因而设计合理的拆撑方案,加强拆撑过程中轴力的监测对基坑的安全有着重要意义。

4 有限元计算模拟及分析

4.1 数值计算模型

由于节点基坑的空间不对称性,取整体进行计算分析,采用有限元软件ABAQUS建立三维有限元模型,有限元计算模型见图6。其中,支撑结构中的梁和柱采用空间梁单元,地铁车站的楼板和地下连续墙采用空间壳单元,联系杆采用线弹性杆单元模拟。

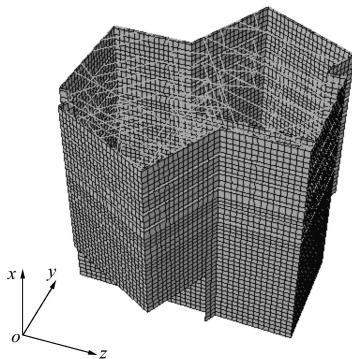


图 6 节点基坑的三维有限元模型

Fig. 6 Three-dimensional finite element model of foundation pit

车站底板下和基坑外侧的土体采用 Winkler 弹性地基,简化为土弹簧单元。随着开挖深度的增加,被动区土层标高下降后会导致不同土层的等效土弹簧刚度逐步减小。本文的有限元模型考虑了土弹簧刚度的动态调整。

4.2 计算参数的选取

由于支护结构刚度较大,选用线弹性模型,地下连续墙及混凝土水平支撑为 C30,弹性模量取为 25 GPa,泊松比取为 0.2。水平钢管支撑弹性模量取为 210 GPa,泊松比取为 0.3。

4.3 计算与监测结果对比

选取有代表性的三道支撑的轴力计算值与实测值进行对比分析,图 7,8 分别为 ZL5 和 ZL6 处 3 道支撑最大支撑轴力的实测值与计算值的对比曲线,从图中可以看出,钢筋混凝土支撑的轴力计算值小于实测值,可能是计算模型所限,无法考虑车辆、施工机械等的影响,使实测结果和计算结果有一定的偏差,此外,钢筋应力计的灵敏度、混凝土支撑配筋以及温度也会对支撑轴力造成影响,而混凝土的收缩和徐变对

支撑轴力的影响不容忽视,往往会造成实测值偏大^[7-8],但实测值与计算值发展变化趋势基本一致。计算得到的钢管支撑轴力远小于混凝土支撑轴力,但与实测值相差不大。本文通过 ABAQUS 软件对节点基坑建立整体的三维有限元模型,能够较好的模拟基坑的开挖过程。支撑轴力的计算值与实测值发展变化趋势基本一致,说明了本文模型建立、参数选取以及计算方法是合理的。

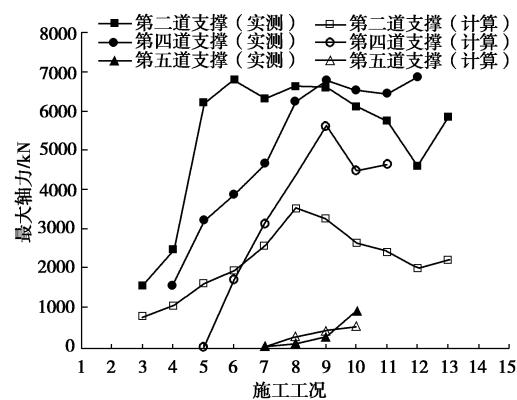


图 7 ZL5 最大支撑轴力的实测值与计算值对比曲线

Fig. 7 Comparison between measured and calculated maximum axial forces of strut ZL5

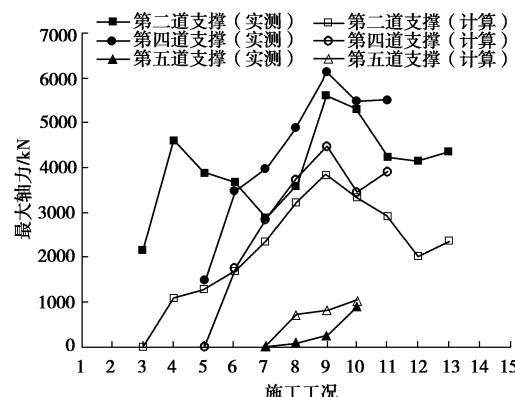


图 8 ZL6 最大支撑轴力的实测值与计算值对比曲线

Fig. 8 Comparison between measured and calculated maximum axial forces of strut ZL6

5 结 论

(1) 采用 ABAQUS 有限元软件对基坑开挖的施工过程进行模拟研究,将计算结果与监测结果进行了对比,结果表明:钢管支撑的计算值与实测值差距很小。钢筋混凝土支撑的轴力计算值小于实测值,但其发展变化的趋势几乎一致。有限元计算模型和参数选取是合理的,可用于基坑工程数值模拟分析。

(2) 支撑的拆除会对相邻支撑的轴力产生很大的影响,拆除支撑时应加强对邻近支撑的监测,并设计合理的拆撑方案。

(3) 第五道和第六道支撑的设计过于保守, 基坑支撑设计方案可以进行优化。

(4) 本文所建立的数值模型考虑了土弹簧刚度的动态调整, 实际计算工作量小, 能够较好的模拟异形基坑的开挖过程, 可以为优化设计和信息化施工提供参考。

参考文献:

- [1] 杨有海, 武进广. 杭州地铁秋涛路车站深基坑支护结构性状分析[J]. 岩石力学与工程学报. 2008, **27**(增刊 2): 3386 - 3392. (YANG You-hai, WU Jin-guang. Analysis of retaining structures for deep foundation pit of qutao road station in Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2008, **27**(S2): 3386 - 3392. (in Chinese))
- [2] 霍润科, 颜明圆, 宋战平. 地铁车站深基坑开挖监测与数值分析[J]. 铁道工程学报, 2011, **152**(5): 81 - 85. (HUO Run-ke, YAN Ming-yuan, SONG Zhan-ping. The monitoring and numerical analysis of deep foundation in subway station[J]. Journal of Railway Engineering Society. 2011, **152**(5): 81 - 85. (in Chinese))
- [3] 马文娟, 单红仙, 刘小丽, 等. 钢筋混凝土与钢管混合支撑体系的内力监测分析[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(增刊 1): 697 - 702. (MA Wen-juan, SHAN Hong-xian, LIU Xiao-li, et al. Monitoring analysis of internal force for mixed-support structure of concrete support and steel support[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(S1): 697 - 702. (in Chinese))
- [4] 张忠苗, 房凯, 刘兴旺, 等. 粉砂土地铁深基坑支撑轴力监测分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 426 - 429. (ZHANG Zhong-miao, FANG Kai, LIU Xing-wang, et al. Monitoring analysis of axial forces of strut for deep foundation pits of subway station in silty sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 426 - 429. (in Chinese))
- [5] 陆培毅, 韩丽君, 于勇. 基坑支护支撑温度应力的有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(5): 1290 - 1294. (LU Pei-yi, HAN Li-jun, YU Yong. Finite element analysis of temperature stress in strut of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics. 2008, **29**(5): 1290 - 1294. (in Chinese))
- [6] 叶万灵. 围护结构中钢筋混凝土支撑轴力和变形的研究[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(5): 83 - 87. (YE Wan-ling. Research on the axial force and deformation of reinforced concrete braces of support structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(5): 83 - 87. (in Chinese))
- [7] 李文峰. 对地铁基坑混凝土支撑轴力监测精确性的探讨[J]. 隧道建设, 2009, **29**(4): 424 - 427. (LI Wen-feng. Discussion on monitoring accuracy of axial force of concrete bracing of metro foundation pit works[J]. Tunnel Construction, 2009, **29**(4): 424 - 427. (in Chinese))
- [8] 叶真华, 黄飘. 基坑支撑轴力实测值与理论计算值对比分析[J]. 岩土工程界, 2009, **12**(3): 27 - 30. (YE Zhen-hua, HUANG Piao. Analysis of the measured and calculated axial forces of strut for foundation pit[J]. Geotechnical Engineering World, 2009, **12**(3): 27 - 30. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)