

文章编号: 1674-599X(2021)01-00034-08

邻近边坡偏压深基坑开挖效应分析

张军, 崔会宁

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 依托长沙地铁 6 号线望岳路站深基坑工程, 探究了邻近边坡偏压地铁车站基坑开挖的变形特性与受力特点, 采用 Midas/GTS 对基坑分层开挖与支护进行了数值模拟, 分析了地连墙位移、内支撑轴力、地表沉降等, 并将数值模拟值与工程实际监测数据进行对比, 分析了支护结构变形特性的影响因素。研究表明: 偏压作用下, 基坑两侧围护结构变形明显不同, 非偏压侧的桩身水平位移大于偏压侧的; 偏压与非偏压的两侧地表沉降具有明显的空间效应, 偏压侧的坑周地表最大沉降量大于非偏压侧的; 工程边坡侧增设大直径钻孔灌注围护桩、多道钢角撑数量, 能有效控制边坡侧基坑变形; 数值模拟值与实际监测结果一致, 可为地铁车站深基坑工程的设计与施工提供借鉴。

关键词: 偏压基坑; 监测数据; 数值模拟; 变形

中图分类号: TV551.4*2 **文献标志码:** A

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.006

Analysis of excavation effect of deep foundation pit under eccentric pressure adjacent

ZHANG Jun, CUI Hui-ning

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Based on the deep foundation pit engineering of Wangyue Road Station of Changsha Metro Line 6, Midas GTS was used to simulate the layered excavation and support of foundation pit. Ground wall displacement, internal support axial force and ground settlement were analyzed. The influence factors of the deformation characteristics of the retaining structure were analyzed by comparing the numerical simulation with the actual monitoring data. The results show that the deformation of the retaining structure on both sides of the foundation pit is obviously different under the action of eccentric pressure. The horizontal displacement of the pile body on the non-eccentric pressure side is larger than that on the eccentric pressure side. The ground settlement on both sides of the non-eccentric pressure side and the eccentric pressure side has an obvious space effect. The maximum ground settlement around the side-pit is larger than that of the non-side-pit. The deformation of the side-pit can be effectively controlled by adding large diameter bored piles and steel angle braces. The results of numerical simulation are basically consistent with the measured results, which provide a scientific basis for the rational design and safe construction of deep foundation pit of metro station.

Key words: bias excavation; monitoring data; numerical simulation; deformation

城市地下空间的建设工程中, 基坑周边存在建筑物、公路、铁路、边坡等造成深基坑支护工程的复杂性和不确定性。针对偏压基坑问题, 刘波^[1]等人采用数值模拟, 分析了基坑周围的公路路基及坑

内开挖深度悬殊的基坑工程, 指出基坑两侧围护结构变形明显不对称, 中、下部支撑对基坑稳定性的影响较上部支撑的大。石钰锋^[2-3]等人根据实际监测数据, 分析了受偏压影响的基坑围护结构位移及

收稿日期: 2020-06-17

作者简介: 张军(1967-), 女, 长沙理工大学教授。

受力模式, 指出基坑受偏压影响须重视。刘有志^[4-5]等人探究了在基坑周围不对称荷载作用下, 基坑一侧围护桩具有较高安全系数, 另一侧已经出现变形, 指出在设计计算时应考虑不同的超载作用。刘志方^[6]等人采用数值模拟与监测数据对比, 研究了土压力不平衡的大高差基坑开挖, 应加大支护桩和支撑截面, 加强挡土结构和支撑体系的刚度, 有效控制基坑变形。秦坤元^[7]等人采用数值模拟, 分析了削坡、基坑开挖对邻近边坡的影响。通过实测结果分析边坡的加固效果, 指出削坡后应及时采取合理的边坡加固措施。现场采用边坡加固措施, 确保了边坡稳定性。作者以长沙地铁 6 号线望岳路车站基坑工程为背景, 拟选取典型监测点实测数据, 建立基坑三维有限元模型, 模拟开挖过程, 并且对比偏

压作用下变形与受力效应数据, 以期为类似工程设计和施工提供参考。

1 工程简介

1.1 基坑概况

长沙地铁 6 号线全长约 51.5 km, 设车站 34 座, 全为地下站。望岳路站为第 11 站, 车站全长 226 m, 位于桐梓坡路与望岳路的十字路口。东北角有一个高边坡, 约 13 m。因高边坡的存在, 使得该车站基坑两侧处于偏压状态(高边坡一侧称为偏压侧, 另一侧称为非偏压侧)。车站采用半盖挖法进行施工, 设计为地下两层岛式车站, 支护选用钻孔灌注桩+内支撑+止水帷幕的围护结构形式。车站围护结构采

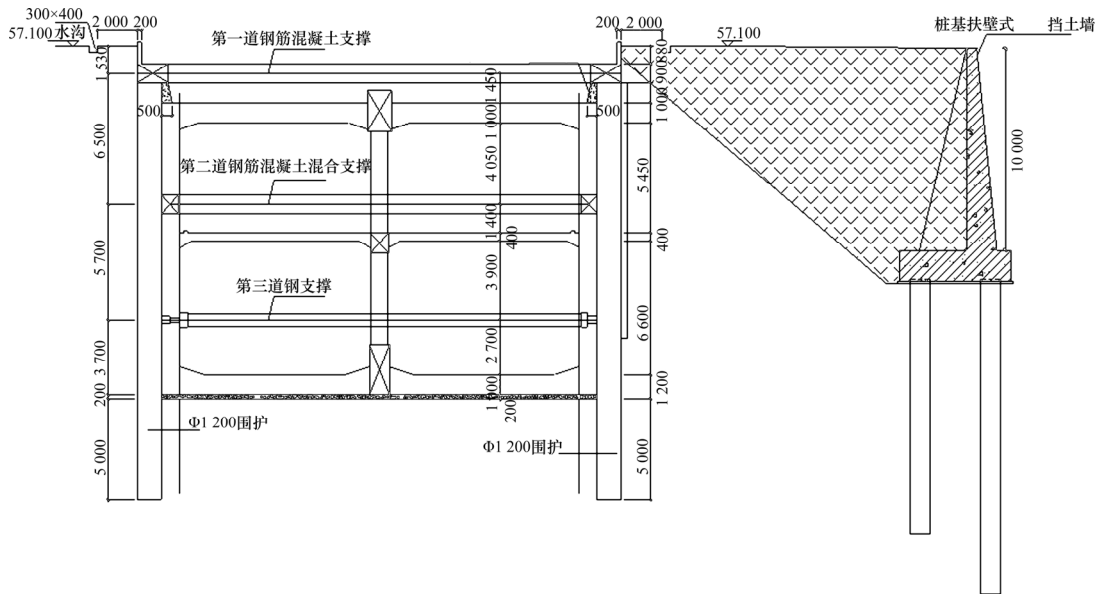


图 1 车站主体结构剖面图(单位: m)

Fig. 1 Section of main structure of station (unit: m)

用 $\phi 1\ 000@1\ 200$ 钻孔灌注桩桩+ $\phi 800@1\ 200$ 旋喷桩止水帷幕。近边坡侧采用 $\phi 1\ 200@1\ 400$ 钻孔灌注桩+ $\phi 800@1\ 400$ 旋喷桩止水帷幕。竖向设立三道内支撑, 分别为: 钢筋混凝土支撑、钢筋混凝土+钢混合支撑、钢支撑。再配合边坡挡土墙回填土。

1.2 工程地质概况

车站原始地貌为剥蚀丘陵地貌叠加河流冲积地貌, 现状地势西低东高, 地形相对平坦。基坑范围内, 土层地质情况依次分为: ①第四系全新统人工填土层。该层为素填土, 呈褐黄色, 以黏性土和全风化板岩为主。土质已压密夯实, 局部含砾石,

在水平方向上广泛分布于整个车站。②第四系全新统冲积层。该层分为上、下两层, 分别为一类粉质黏土、二类粉质黏土。其中, 一类粉质黏土呈灰黑色, 软塑, 局部为可塑状, 黏性较好, 干强度中等, 本层分布于车站东北部和中部南侧。二类粉质黏土呈褐黄色, 硬塑状, 含约 12%圆砾, 主要成分为石英颗粒和强风化板岩, 韧性中等, 本层主要分布于车站西部区域。③元古界冷家溪群地层。该层分为三层, 依次为全风化板岩、强风化板岩、中风化板岩。全风化板岩为褐黄色、暗红色, 成岩矿物基本风化完全, 岩石组织结构大部分破坏, 局部夹强风

化岩块，本层在水平方向上全场分布。强风化板岩为灰黄色，板状构造，节理裂隙极发育，一般属软岩，本层存在风化不均。中风化板岩为青灰色，变余泥质结构，板状构造，一般属软岩，局部为较软岩，本层主要分布于基坑底部以下。

2 监测方案

2.1 监测项目

长沙地铁 6 号线望岳路站现场监测项目的主要内容为：①桩顶竖向位移，布置 9 个测点，采用水准仪 DINI03 进行监测，预警控制值为 ± 30 mm；②围护桩身水平位移，布置 6 个测点，采用测斜仪 CX-06A 进行监测，预警控制值为 ± 30 mm；③内支

撑轴力，布置 4 个测点，采用频率读数仪进行监测，预警控制值为 $\pm 7\ 200$ kN；④坑周土体沉降，布置 52 个测点，采用水准仪 DINI03 进行监测，预警控制值为 ± 30 mm。

2.2 监测点布置

桩顶竖向位移采用偏压侧 ZQC21-23 测点与非偏压侧 ZQC18-20 测点的 2 组监测数据，围护桩身水平位移采用 ZQT11、ZQT14 斜测点的监测数据，内支撑轴力采用端部斜向支撑 ZL2 和标准段竖向支撑 ZL14 测点的监测数据，坑周土体沉降选用基坑高边坡处两侧地表监测点的数据，监测点位置分布如图 2 所示。图 2 中，ZQC●为桩顶竖向位移监测点，ZQT■为围护桩身水平位移监测点，ZCL◆为内支撑轴力监测点，DBC▲为坑周土体沉降监测点。

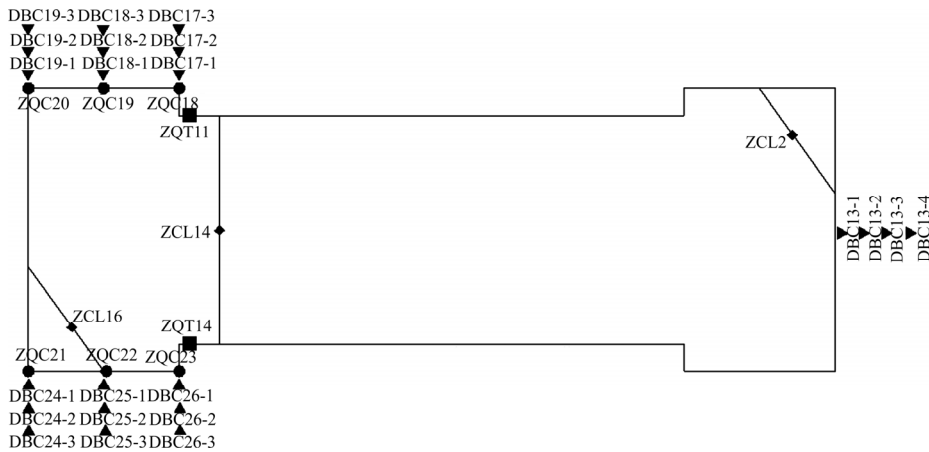


图 2 监测点平面布置

Fig. 2 The layout of monitoring points

3 监测数据分析

3.1 桩顶竖向位移

非偏压 ZQC18、ZQC19、ZQC20 和偏压侧 ZQC21、ZQC22、ZQC23 2 组桩顶竖向位移的监测结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出，非偏压侧的桩顶竖向位移沉降量大于偏压侧的，这是因为非偏压侧对应测点的深层桩身水平位移大于偏压侧的。基坑开挖过程中，桩顶竖向位移在 2019 年 11 月份出现增大现象，然后随着基坑的开挖，桩顶竖向位移沉降量逐渐增大，开挖到坑底后趋于稳定。这是因为该基坑属于分段开挖，由该工程 10 月份的施工进度可知，此时基坑刚开挖到 14 轴，深 10~15 m，位于 24 轴处测点的土体还没有开挖。桩顶随着 11

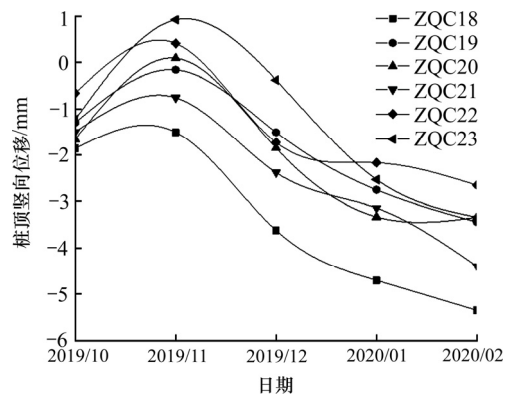


图 3 桩顶竖向位移监测数据变化曲线

Fig. 3 The monitored vertical displacement of pile at the position of top

月份对 1~10 轴中板和 10~14 轴底板的浇筑完成，基坑应力重分布，开挖引起 24 轴处桩顶竖向位移

的影响随之减小, 桩顶竖向位移上升。

3.2 围护桩身水平位移

围护桩作为主要支护结构, 变形大小仍是基坑安全与否的重要指标^[8]。偏压侧 ZQT14 测点与非偏压侧 ZQT11 测点的桩身水平位移如图 4,5 所示。从图 4,5 可以看出, 随着基坑开挖, 桩身最大位移逐渐加大且最大水平位移发生位置不断下移^[8]。非偏压侧的桩身水平位移明显大于偏压侧的, 偏压侧与非偏压侧的最大桩身水平位移分别为 5.86 mm 和 7.57 mm。这是因为偏压侧高边坡的存在, 使得基坑偏压侧的土压力小于非偏压侧的土压力, 土压力通过内支撑传递, 使得非偏压侧桩身整体水平位移的增大。

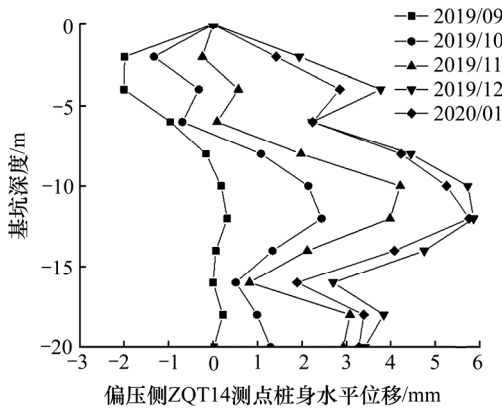


图 4 偏压侧桩身水平位移监测数据变化曲线

Fig. 4 The monitored lateral displacement of pile at the position of eccentric pressure side

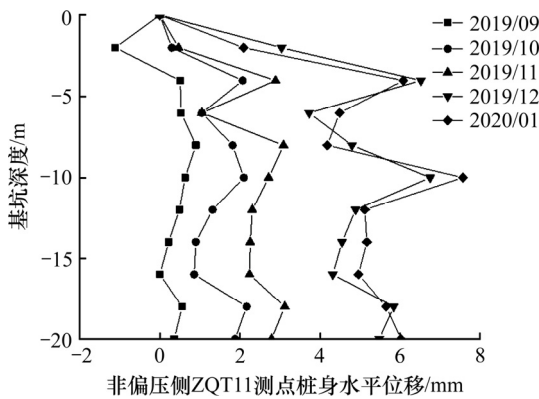


图 5 非偏压侧桩身水平位移监测数据变化曲线

Fig. 5 The monitored lateral displacement of pile at the position of non-eccentric pressure side

3.3 内支撑轴力

选取 ZL2 测点三道内支撑轴力的实测数据, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 开挖初期, 由于土

方开挖, 导致轴力增加, 第一道钢筋混凝土支撑轴力增长迅速, 对基坑围护桩的位移变形起到了较好的抑制作用。第二道内支撑轴力理论上伴随基坑开挖应呈逐渐增大趋势, 但实际开挖过程中第二道内支撑轴力一直较为稳定。因此, 第二道钢支撑在基坑开挖中, 可能出现了一定的应力损失。每道支撑的架设都对相邻支撑轴力的大小产生了影响。第二道内支撑开始架设后, 第一道内支撑轴力明显减小。第三道内支撑开始架设, 第二道内支撑轴力也有下降趋势。

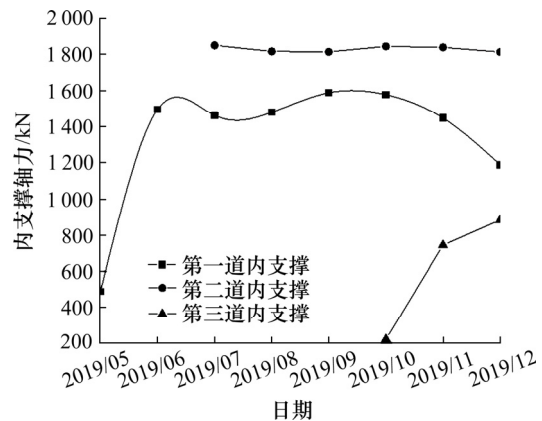


图 6 内支撑轴力监测数据变化曲线

Fig. 6 The monitored data of internal support axial force

3.4 坑周土体沉降

选取基坑边坡偏压侧测点 DBC24~26 与其对应非偏压侧测点 DBC17~19 的监测数据, 如图 7,8 所示(图中线段缺失部分为未监测到数据)。从图 7,8 中可以看出, 偏压与非偏压的沉降曲线的两侧沉降变化规律相似, 均为先下降后趋于稳定, 与文献[9]一致。偏压侧的基坑周围地表沉降最大沉降点发生

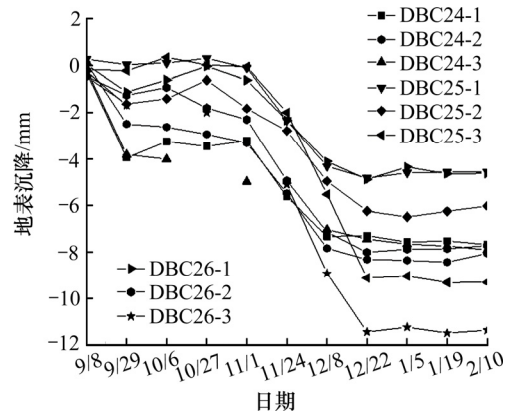


图 7 偏压侧坑周地表沉降监测数据变化曲线

Fig. 7 The monitored surface subsidence around pile at the position of eccentric pressure side

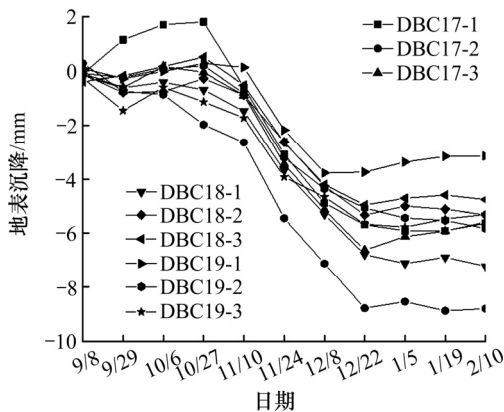


图 8 非偏压侧坑周地表沉降监测数据变化曲线

Fig. 8 The monitored surface subsidence around pile at the position of non-eccentric pressure side

在边坡回填土测点 DBC26-3 处, 最大沉降量达到 11.49 mm, 大于非偏压的最大沉降量 8.88 mm, 总体沉降量不大, 满足基坑地表沉降控制的设计要求。

4 数值模拟

4.1 计算模型建立

运用 Midas GTS 软件, 根据基坑结构和施工方案, 建立有限元计算模型, 如图 9 所示。模型长 386 m, 宽 201 m, 深度 70 m, 网格采用计算精度较高的“六面体+四面体”混合网格。土体采用实体单元模拟, 基坑内部支护结构如图 10 所示。其中, 钢筋混凝土支撑、钢管支撑和冠梁、腰梁均采用梁

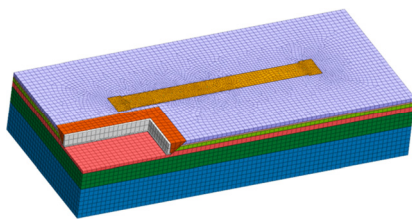


图 9 基坑有限元计算模型

Fig. 9 Finite element calculation model of foundation pit

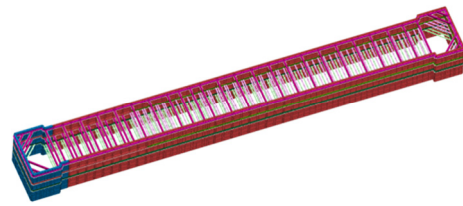


图 10 基坑支护结构有限元模型

Fig. 10 Finite element model of foundation pit supporting structure

单元模拟; 钻孔灌注桩根据等效刚度原则, 等效为地连墙采用板单元模拟; 地连墙与土体之间采用界面单元模拟。模型底部设置为固定约束, 四周设置为水平单向约束, 上表面为自由边界。在车站东北侧处按实际情况建立边坡挡土墙, 挡土墙表面为自由边界。

基坑支护结构有限元模型如图 10 所示, 基坑内支撑、围檩、围护桩均采用各向同性的线弹性材料定义。围护桩厚度根据《基坑工程手册(第二版)》中等刚度转换的原则, 得到公式为:

$$h = \sqrt[3]{\frac{3\pi D^4}{16L}} \quad (1)$$

式中: D 为桩体直径; L 为桩间距。

其中, 基坑边坡侧为增强稳定性, 加大围护桩径, 采用 $\phi 1\ 200@1\ 400$ 钻孔灌注桩, 等效板厚为 0.955 2 m; 标准段采用 $\phi 1\ 000@1\ 200$ 钻孔灌注桩, 等效板厚为 0.788 6 m。

4.2 土层参数设置

该基坑数值模拟土体采用修正-摩尔库伦模型, 由弹塑性模型和非线性弹性模型组合而成, 这样可同时模拟土的剪切和压缩硬化的行为。在基坑开挖模拟过程中, 能得出较合理的桩身变形和坑周土体沉降结果。土体参数的取值来自《长沙市轨道交通 6 号线工程 KC-1 标段望岳路站详细勘察阶段岩土工程勘察》的地勘报告, 结合地区经验公式^[10]取得。各项土体参数见表 1。

表 1 修正摩尔库伦模型参数取值

Table 1 The modified parameters of the Moore-Coulomb model

名称	厚度/m	容重/kPa	E_{50}^{ref}/MPa	E_{oed}^{ref}/MPa	E_{ur}^{ref}/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	膨胀角	孔隙比
素填土	4.24	19.0	4.0	4.0	12.0	15	10	0.26	0	0.825
1 类粉质黏土	1.55	18.5	3.0	3.0	9.0	12	11	0.29	0	0.892
2 类粉质黏土	4.57	20.0	7.0	7.0	21.0	35	16	0.25	0	0.761
全风化板岩	6.03	20.0	10.5	10.5	31.5	40	18	0.22	0	0.761
强风化板岩	18.62	22.0	19.0	19.0	57.0	65	26	0.20	0	0.500
中风化板岩	34.99	24.0	30.0	30.0	90.0	300	32	0.18	2	0.300

注: E_{50}^{ref} 为割线模量; E_{oed}^{ref} 为切线模量; E_{ur}^{ref} 为卸荷再加载模量。

5 模拟结果分析

5.1 桩顶竖向位移分析

根据等效刚度原则, 将钻孔灌注桩等效为地连墙, 并采用板单元模拟。实际工程中, 围护结构为长短不一的钻孔灌注桩, 绕基坑紧密排布, 导致计算模型的地连墙整体刚度和嵌固深度与实际工程存在一定差异。由于桩顶竖向位移模拟曲线与实测数据曲线拟合不佳, 对工程指导意义不大, 因此不予对比。

5.2 围护桩身水平位移分析

为验证本研究模拟结果的可靠性, 选取 12 月 22 日围护桩 ZQT14 斜测点监测数据, 此时基坑已开挖至坑底与数值模拟施工过程相同。数值模拟曲线与实测值曲线变形趋势相同, 桩身最大位移发生位置也一致, 如图 11 所示。由于围护桩建模中将钻孔灌注桩等效为地连墙, 增大了围护桩的刚度, 而且实际工程中的钻孔灌注桩长度不一, 施工工艺无法完全模拟, 导致数值模拟曲线的水平位移小于实测值曲线的。对偏压和非偏压的两侧桩身水平位移曲线进行对比, 如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 非偏压侧的桩身水平位移变形均大于偏压侧的, 与测点 ZQT14 与 ZQT11 桩身水平位移监测数据所得结果相同。因此, 模拟结果能够体现出桩身变形特性的一般规律, 对实际施工有一定的指导意义。

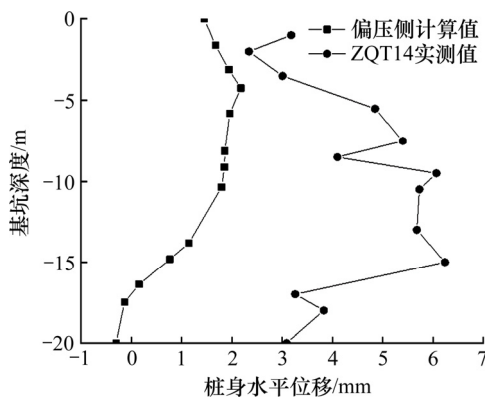


图 11 偏压侧桩身水平位移与实测值对比曲线

Fig. 11 Contrast curve between monitored and simulated horizontal displacement of pile on eccentric pressure side

5.3 内支撑轴力模拟分析

选取 ZL2 角撑数值模拟轴力计算结果对比实

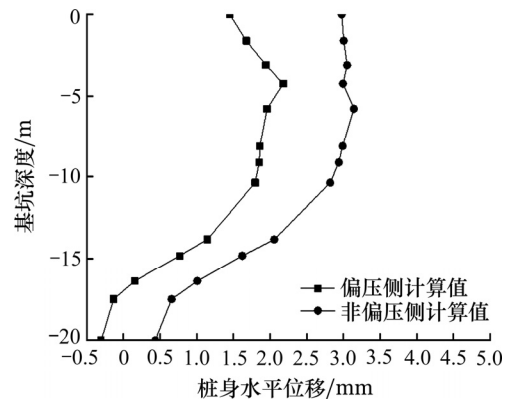


图 12 偏压侧与非偏压侧桩身水平位移模拟数据曲线

Fig. 12 Simulation data curves of horizontal displacement of pile on eccentric and non-eccentric sides

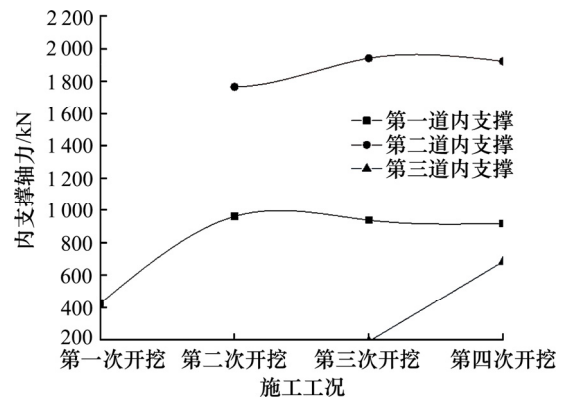


图 13 内支撑轴力模拟数据变化曲线

Fig. 13 Simulation data of internal support axial force

测轴力数据, 如图 13 所示。从图 13 中可以看出, 部分结果较为接近。基坑进行第三次开挖时, 第二道内支撑上出现最大轴力为 1 942.6 kN。第一道内支撑轴力计算结果与实测数据有一定差异, 变化规律相似, 均为轴力先增大后逐渐减小, 最终趋于稳定。这是因为实际工程中, 第一道内支撑受到邻近建筑物荷载作用, 基坑在往下开挖过程中, 荷载无法顺利传递给第二道内支撑, 导致轴力实测数据与计算结果有一定偏差。

5.4 坑周土体沉降分析

影响基坑周围土体沉降的因素: 基坑地下水位的降低, 引起土的固结沉降; 围护桩身位移变形, 引起坑周地表的下沉; 数值模拟中, 土体参数设置中勾选“帽”选项, 计算过程中会考虑土体固结引起的土体沉降。该基坑在监测过程中, 地下水位变化不大, 所以地表沉降主要是与围护桩身的位移与数值模拟土体参数的设置有关。

基坑中断面两侧坑周土体沉降曲线如图 14,15 所示。从图 14,15 中可以看出，偏压与非偏压两侧地表沉降曲线均为“凹槽状”，随着基坑开挖深度的增加，两侧土体沉降也增加；距离基坑中心越远，土体沉降越小。偏压侧地表最大沉降为 17.4 mm，发生在挡土墙边坡回填土处；非偏压侧的地表沉降为 11 mm，发生在紧邻基坑地表处。偏压侧的地表沉降数值模拟值和监测结果均大于非偏压侧的。这是由于偏压侧高边坡的存在，在高边坡处设立挡土墙，并且在挡土墙与基坑之间选用粉质黏土回填加固。实际工程中，采用对回填土进行分层夯实等加固工艺，这是数值模拟中无法完全实现的。因此，数值模拟中，回填土的强度较实际的低，基坑开挖后，地表出现较大沉降。

从图 14,15 和图 7.8 又可以看出，存在高边坡的偏压基坑，对非偏压侧的地表沉降影响范围较

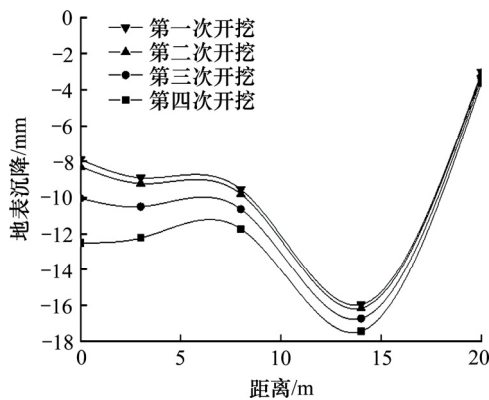


图 14 偏压侧地表沉降模拟数据曲线

Fig. 14 Simulation data of surface subsidence on eccentric pressure side

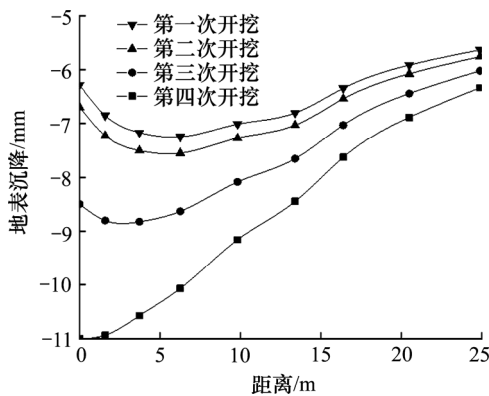


图 15 非偏压侧地表沉降模拟数据曲线

Fig. 15 Simulation data of surface subsidence on non-eccentric pressure side

大，为确保模型正确的计算结果，适当加大非偏压侧的模型尺寸，以消除边界侧限效应的影响。

6 结论

以长沙城市轨道交通 6 号线望岳路站邻近边坡偏压深基坑为研究背景，通过实际监测和模拟分析等方法对偏压基坑开挖变形效应进行分析研究，得出结论为：

1) 因车站东北侧高边坡存在，使得基坑东侧处于偏压状态，基坑东侧采用增设一道大直径钻孔灌注围护桩，增加东侧钢角撑的数量，有效防止了偏压作用下土压力不平衡导致的支护结构变形，变形值的监测数据与数值计算结果均满足设计阶段对支护结构变形控制要求，该方案合理可行。

2) 偏压作用下，基坑两侧围护结构变形明显不同。偏压侧的围护桩身在一定深度范围内，出现整体向基坑外侧边坡的偏移，将桩身变形的监测数据与数值计算结果进行对比，基坑非偏压侧的桩身水平位移均大于偏压侧的，加大非偏压侧桩体的嵌固深度，减少深层土体的无支撑暴露开挖时间，可有效减小变形。

3) 对比基坑内支撑轴力的监测数据与数值分析结果，可以发现第一道钢筋混凝土支撑的轴力变化范围较大，数值分析的计算轴力值与实际相差较大。因此，需加强对轴力的监测，防止出现轴力异常，导致基坑整体失稳。

4) 基坑偏压与非偏压两侧地表沉降具有明显的空间效应，最大地表沉降点位于回填土上。实际施工中，对偏压侧回填土边坡表层浮土进行分段削坡。削坡后，立即采用网喷+短筋型式进行临时支护，修建临时排水沟，坡顶采取防护安全措施，回填土分层压实，对降低基坑开挖偏压侧地表沉降量，增强基坑整体稳定性具有一定作用。

5) 实际工程中，会受周边环境、可变荷载、基坑降水等因素影响。同时，数值分析模型会受空间局限性、参数选取等影响。因此，无法完全真实的反映基坑开挖过程中的变形情况，导致部分数值分析结果与监测数据有一定差异。但是数值计算结果反映出的变形规律与实测结果一致，能够为基坑设计提供一定重要的可靠性数据。

参考文献(References):

- [1] 刘波,席培胜,章定文.偏压作用下非等深基坑开挖效应数值分析[J].东南大学学报:自然科学版,2016,46(4): 853-859. (LIU Bo, XI Pei-sheng, ZHANG Ding-wen. Numerical analysis of excavation effect of unsymmetrical loaded foundation pit with different excavation depths[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(4): 853-859.(in Chinese))
- [2] 石钰锋,阳军生,白伟,等.紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4): 826-833. (SHI Yu-feng, YANG Jun-sheng, BAI Wei, et al. Analysis of field testing for deformation and internal force of unsymmetrical loaded foundation pits enclosure structure close to railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 826-833. (in Chinese))
- [3] 吴意谦,朱彦鹏.兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律监测与数值模拟研究[J].岩土工程学报, 2014, 36(S2): 404-411. (WU Yi-qian, ZHU Yan-peng. Monitoring and numerical simulation of deformation law of deep foundation pit of subway station in Lanzhou collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 404-411. (in Chinese))
- [4] 刘有志,徐国元.不对称加载深基坑对相邻公路支护结构影响分析[J].公路工程,2018,43(1):70-74,117.(LIU You-zhi, XU Guo-yuan. Influence of asymmetric loading deep foundation pit on adjacent highway supporting structure[J]. Highway Engineering, 2018, 43(1): 70-74, 117.(in Chinese))
- [5] 林刚,徐长节,蔡袁强.不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2592-2598. (LIN Gang, XU Chang-jie, CAI Yuan-qiang. Research on characters of retaining structures for deep foundation pit excavation under unbalanced heaped load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2592-2598.(in Chinese))
- [6] 刘志方.土压力不平衡情况下深基坑支护设计与实践[J].岩土工程学报, 2014, 36(S1): 141-147.(LIU Zhi-fang. Design and practice of deep foundation pits under unbalanced earth pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S1): 141-147.(in Chinese))
- [7] 秦坤元,刘五一,肖育斐,等.深基坑开挖对邻近边坡稳定性影响与控制[J].中外公路,2019,39(4):15-19.(QIN Kun-yuan, LIU Wu-yi, XIAO Yu-fei, et al. Impacts and control of deep foundation excavation on stability of adjacent slope[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019,39(4):15-19.(in Chinese))
- [8] 房师军,付拥军,姚爱军.某地铁工程深基坑排桩围护结构变形规律分析[J].岩土工程学报,2011,33(S1): 223-226. (FANG Shi-jun, FU Yong-jun, YAO Ai-jun. Deformation of row pile retaining structures for deep foundation pit of subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 223-226. (in Chinese))
- [9] 陈尚荣,曹传祥,廖志坚.不同支护深基坑开挖对地下通道变形的影响[J].交通科学与工程,2018,34(4):43-52. (CHEN Shang-rong, CAO Chuan-xiang, LIAO Zhi-jian. The influence of deep excavation on the deformation of surrounding rectangular underground tunnel based on different supporting forms[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(4): 43-52. (in Chinese))
- [10] 杨兰强,周立波,夏雯,等.宁波软土地区基坑数值计算中HS模型参数试验研究[J].隧道建设:中英文,2018,38(6): 954-962.(YANG Lan-qiang,ZHOU Li-bo,XIA Wen,et al. Experimental study of parameters of HS model for numerical analysis of foundation pits in Ningbo soft soil area[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(6): 954-962. (in Chinese))