



同深基坑开挖对 紧邻地铁车站特性研究

曹前^{1,2}, 秦鹏¹, 周云¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 长沙市轨道交通集团有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 紧邻地铁车站的深基坑开挖容易导致地铁车站的倾斜和混凝土开裂, 本文以长沙地铁某车站为工程背景, 运用MIDAS/GTS有限元计算软件对地铁车站柱、结构板和地下连续墙进行数值模拟。重点分析地铁车站柱、结构板和地下连续墙的内力和变形, 总结了内力和位移的一般变化规律, 通过与现场实测对比, 验证了深基坑开挖的安全性。

关键词: 地铁车站; 数值模拟; 深基坑开挖

中图分类号: TU398 文献标志码: A 文章编号: 1672-7029(2017)06-0000-00

Study on characteristics of subway station induced by excavation of adjacent deep foundation pit

CAO Qian^{1,2}, QIN Peng¹, ZHOU Yun¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Changsha Metro Group Co., Ltd, Changsha 410082, China)

Abstract: The deep foundation pit excavation adjacent to the subway station will easily lead to the tilt and concrete crack of the subway station. This title is based on the engineering background of metro station in Changsha, by using the calculation software of MIDAS/GTS, numerical simulation was carried out to research the column, structural plate and underground continuous wall of the subway station. Focus on analyzing the internal force and deformation of the column, structural plate and underground continuous wall of the subway station. Summarizing the general change rule of the internal force and deformation. By comparing with the field measurement, verifying the safety of deep foundation pit excavation.

Key words: subway station; numerical simulation; deep foundation pit excavation

近年来, 我国城市轨道交通处于高速发展时期, 地铁换乘车站作为轨道交通网络中重要的建筑物, 具有埋深大、跨度大和结构复杂等特点^[1]。因

城市用地紧张, 必然在紧邻已运营地铁车站开挖深基坑, 而深基坑侧开挖对已运营地铁车站产生影响, 必须严格控制已运营地铁车站结构变形^[2]。王

收稿日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51308201)

通信作者: 周云(1979-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 从事结构健康监测研究; E-mail: zhouyun05@126.com

杰光等^[3]结合南宁某地铁深基坑为工程背景, 对比模拟结果与现场实测结果, 总结出墙体外侧地表沉降与支护结构变形的规律, 验证了模型的准确性; 任伟明等^[4]以北京地铁工程为背景, 运用 FLAC^{3D} 软件建立三维数值分析模型模拟深基坑开挖, 通过计算结果分析基坑工程施工对既有车站结构的影响, 总结相关变形规律, 并提出建议措施; 胡春杰等^[5]针对基坑逆作法开挖, 运用 MIDAS/GTS 软件分析整个基坑开挖过程中地下连续墙与柱的沉降变化规律; 蔡武林^[6]为研究基坑开挖对临近地铁站的影响, 通过对比模拟结果与现场实测结果, 验证参数选取的合理性; Finno 等^[7]提出 PSR(三维模型与二维模型中基坑长边中点最大位移的比值)概念, 运用有限元模拟三维空间效应, 以基坑长边与开挖深度比值、基坑长边与短边比值和围护结构刚度为变量, 得出 PSR 与各变量之间的经验公式; Potts 等^[8]针对采用有限元模拟墙体前部开挖和后部填土 2 种工况, 以侧向系数 K_0 为变量, 得出在 K_0 越低, 模拟结果比极限平衡法低; K_0 越高, 模拟结果比极限平衡法高; Qu 等^[9]采用邓肯-张模型模拟水泥搅拌桩加固坑底, 对比复合地基和桩土分开加固效果, 得出 2 种加固效果相差不大; 旷庆华^[10]运用 ABAQUS 软件研究同深基坑开挖引起的紧邻地铁车站结构变形发展变化规律进行分析, 并讨论有效控制车站结构变形的主要施工措施。但是, 大多数研究主要集中在地铁车站周边局部浅基坑开挖上, 对于并行同深基坑开挖对地铁车站影响的研究较少。本文以长沙地铁某车站为工程背景, 运用 MIDAS/GTS 有限元分析软件, 建立三维数值计算

模型, 研究并行同深基坑开挖对地铁车站内力和变形的规律, 并与现场实测进行对比, 得出一些有效结论, 为类似工程设计及施工提供参考。

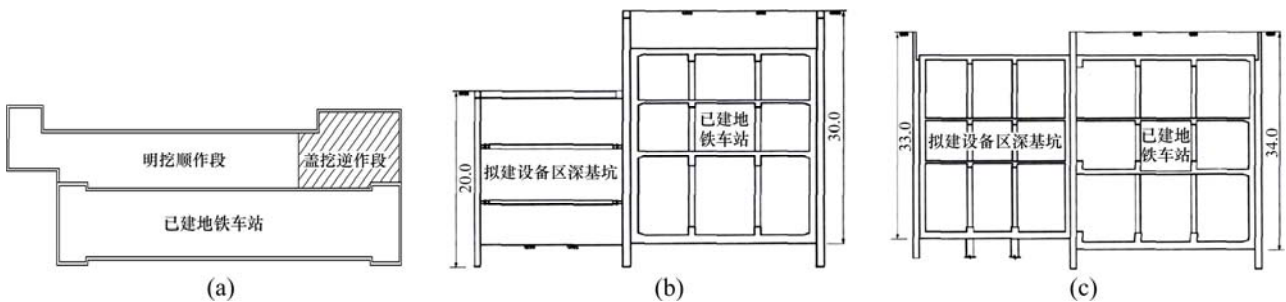
1 工程概况

1.1 工程设计情况

以长沙地铁某车站为工程背景, 该车站外包总长 165.5 m, 标准段总宽 25.5 m, 车站中心里程处顶板覆土厚度约 3.6 m, 底板埋深约 30 m。车站主体结构采用钢筋混凝土箱型结构, 围护结构采用 1.0 m 厚地下连续墙。车站北侧建设车站设备区, 并与车站共用地下连续墙, 远侧采用 0.8 m 厚短地连墙支护。车站设备区深基坑采用明挖顺作和盖挖逆作相结合的施工工艺, 基坑明挖顺作段采用 3 道内支撑, 第 1 道支撑为钢筋混凝土支撑, 第 2、3 道支撑为钢支撑; 基坑盖挖逆作段则利用各层楼板作为支撑体系, 明挖顺作段部分与地下商业开发项目相接, 地面标高以下约 10 m 的土体采用先行共同开挖的方式处理, 余下的部分采用短地连墙支护; 盖挖逆作段先行施工围护结构和中间立柱, 然后自上而下浇筑各层板、侧墙, 并完成各层土方开挖。图 1 为拟建深基坑与既有地铁车站相对位置图。

1.2 工程地质与水文条件

根据地质详勘报告, 车站位于内陆湖相沉积的白垩地层, 车站范围内构造形迹不甚发育, 岩层面稳定、产状平缓, 岩性以泥质粉砂岩为主。表 1 为地层的主要物理力学性能指标。



(a) 拟建深基坑与既有车站平面布置示意图; (b) 明挖顺作段剖面; (c) 盖挖逆作段剖面

图 1 拟建深基坑与既有地铁车站相对位置图

Fig. 1 Relative location between proposed deep foundation pit and the existing subway station

表 1 地层的主要物理力学性能指标

Table 1 Main physical and mechanical performance index of formation

土层号	土层名称	h/m	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	E_s/MPa	c_u/kPa	$\phi/(^\circ)$
①	杂填土	3.3	19.5	8.0	15	12
②	淤泥质粉质黏土	1.2	18	4.0	13	10
③	粉质黏土	1.4	19.9	7.5	35	20
④	黏土	3.0	19.9	6.5	41	18
⑤	强风化泥质砂岩	4.5	20.9	110	45	26
⑥	中风化泥质砂岩	16.6	23.9	320	80	32

2 数值模拟分析

2.1 计算假定

- 1) 基坑开挖为三维空间有限元问题;
- 2) 岩土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型, 单元类型为实体单元;
- 3) 混凝土支撑、钢支撑、车站结构梁、柱均采用空间梁单元模拟, 而车站结构楼板采用板单元模拟;
- 4) 地下连续墙采用板单元模拟, 更好地反映土体与围护结构之间的非线性接触效应;
- 5) 不考虑围护结构开挖和降水对土体性质的影响, 基坑开挖期间土体按不排水条件考虑, 不考虑渗流和固结的影响;
- 6) 不考虑土体与围护结构的相对位移, 土体与围护结构节点位移耦合。
- 7) 地面超载按 20 kPa 压力荷载施加在整个模型平面范围内。

2.2 计算模型

基坑平面尺寸约 166 m×28 m, 开挖深度约 30 m。考虑基坑开挖对周边土体的扰动, 三维模型取为 350 m×200 m×100 m, 计算模型的上边界为自由边界, 底部全约束, 各个侧面限制水平方向位移。三维有限元分析模型图见图 2。

2.3 本构模型及相关参数

地下连续墙、混凝土支撑、车站梁-柱以及车站楼板变形在基坑开挖的过程中变形相对较小, 不会达到屈服状态, 故本计算中采用线弹性本构。钢筋混凝土重度均取 24 kN/m³, 弹性模量 3.0×10⁴ MPa, 泊松比 0.2。

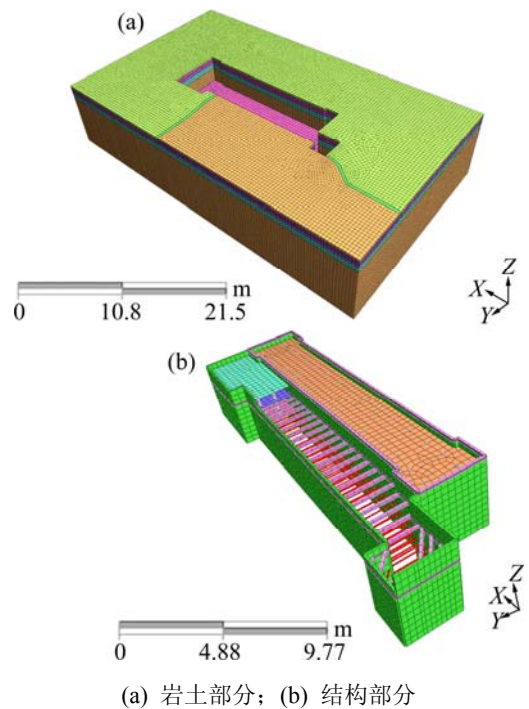


图 2 三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model

2.4 分析步骤

依据结构设计文件, 基坑开挖可划分为 11 个分析步骤, 具体分析步骤如下:

- 1) 第 1 次地应力平衡(沉降置 0);
- 2) 施工地下连续墙、中间立柱及桩基;
- 3) 第 2 次地应力平衡(沉降置 0);
- 4) 北侧设备区及地下商业开发范围第 1 次开挖至-5 m, 盖挖逆作段施工顶板;
- 5) 北侧设备区及地下商业开发范围第 2 次开挖至-10 m;
- 6) 明挖顺作段施工冠梁及第 1 道混凝土支撑, 盖挖逆作段施工中 1 板;

- 7) 北侧设备区第3次开挖至-17 m;
- 8) 明挖顺作段施工第2道钢支撑, 盖挖逆作段施工中2板;
- 9) 北侧设备区第4次开挖至-24 m;
- 10) 明挖顺作段施工第3道钢支撑;
- 11) 北侧设备区第5次开挖至基坑底, 盖挖逆作段施工底板。

3 计算结果及分析

3.1 基坑开挖对车站柱轴力影响

选取车站端柱和车站标准段柱有限元分析结果, 研究基坑开挖对车站柱轴力影响。如图3所示, 柱轴力从顶板至底板逐渐增大, 这是由于上部及各层荷载通过结构柱向下传递, 车站标准段柱轴力与车站端柱轴力相比较大。随着基坑开挖深度的增加, 柱轴力呈线性减少, 且柱轴力降低幅度为-4.7%, 说明车站单侧卸载对既有地铁车站结构柱内力的影响较小。图中A和B表示端柱和标准段柱; 1, 2和3分别表示地下1层、地下2层和地下3层。

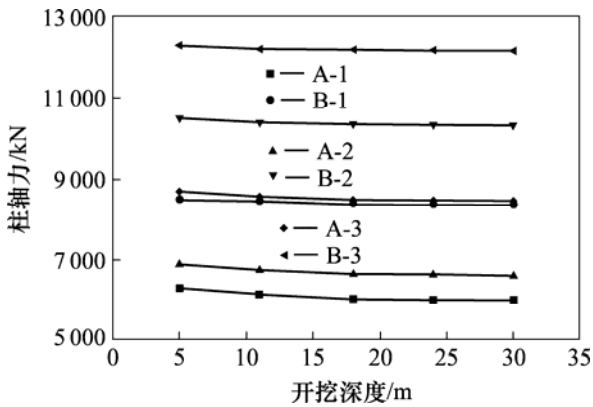


图3 柱轴力

Fig. 3 Axial force of columns

3.2 基坑开挖对车站结构板内力影响

选取临近明挖顺作段和盖挖逆作段车站顶板和底板有限元分析结果, 研究基坑开挖对车站结构板内力影响。如图4所示, 随着基坑开挖深度的增加, 顶板和底板的最大弯矩值呈线性增加, 且最大弯矩增加幅度为8.1%; 靠近明挖顺作段顶板弯矩与靠近盖挖逆作段顶板弯矩相差较大, 靠近明挖顺作段底板弯矩与靠近盖挖逆作段底板弯矩相差较小。

图5所示为基坑开挖深度对车站顶板和底板最大主应力的影响, 随着基坑开挖深度的增加, 顶板最大主应力增大, 第4次基坑开挖结束后, 顶板最大主应力无明显变化, 最大主应力增加幅度为6.6%; 在前4次基坑开挖中, 底板最大主应力呈线性降低, 第5次基坑开挖结束后, 底板最大主应力有所增加, 最大主应力降低幅度为-1.7%, 说明车站单侧卸载对既有地铁车站结构板内力的影响较小。

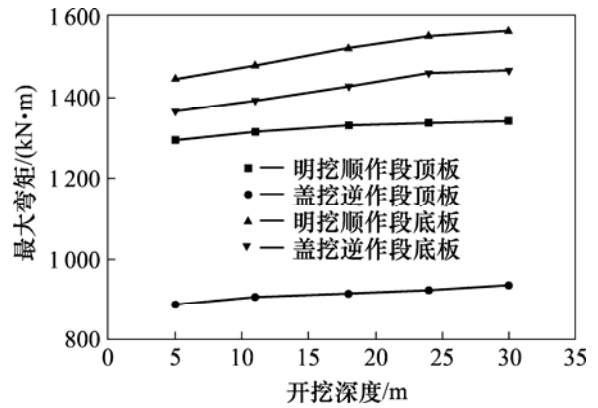


图4 车站板最大弯矩

Fig. 4 Maximum bending moment of the board of station

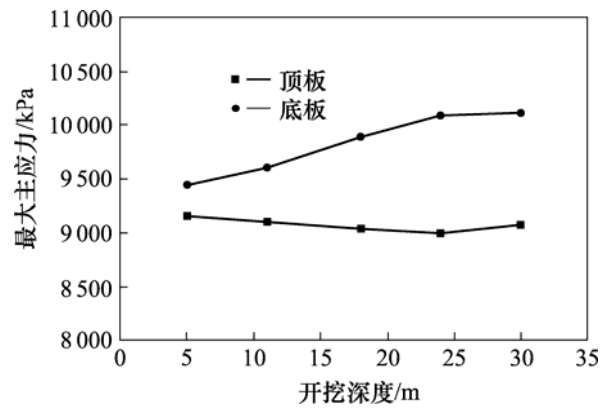


图5 车站板最大主应力

Fig. 5 Maximum principal stress of the board of station

3.3 基坑开挖深度对车站结构板位移影响

选取明挖顺作段和盖挖逆作段车站顶板和底板有限元分析结果, 研究基坑开挖对车站结构板最大位移影响。图6所示为基坑开挖对车站顶板最大位移的影响, 随着基坑开挖深度的增加, 靠近明挖顺作段和盖挖逆作段的顶板最大位移基本上呈线性增长, 变化幅度分别为442%和850%。远离基坑一侧顶板最大位移基本上呈线性增长, 变化幅度为

381%。图 7 所示为基坑开挖对车站底板最大位移的影响, 随着基坑开挖深度的增加, 底板最大位移基本呈线性增加, 靠近明挖顺作段底板最大位移变化幅度为 640%, 远离基坑一侧底板最大位移变化幅度为 700%。说明基坑开挖对车站结构板位移影响较大。这是由于, 随着土方开挖的进行, 顶板外侧防止顶板变形的土压力逐渐降低, 顶板外侧变形约束力减小, 顶板鼓胀变形增加; 并且盖挖逆作发生在顺作之后, 土压力降低更加明显, 导致盖挖逆作段的顶板位移大于顺作时段的位移。

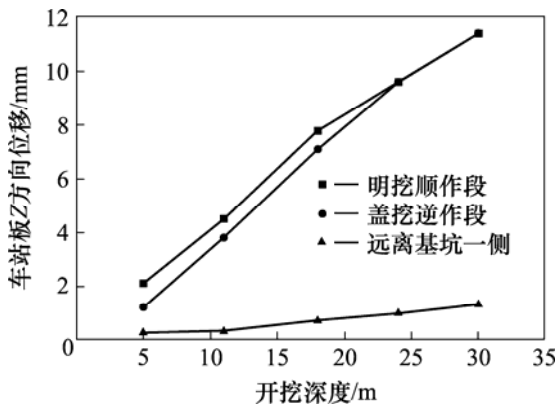


图 6 车站顶板位移

Fig. 6 Displacement of the roof of station

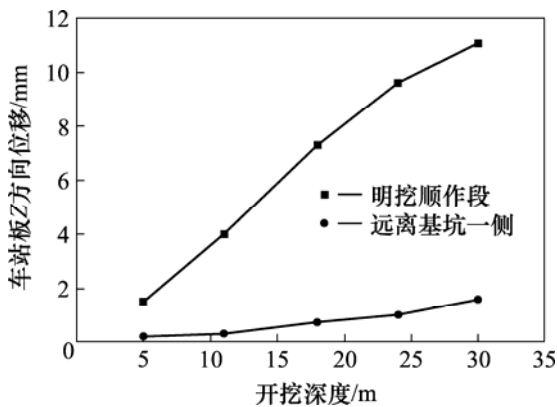


图 7 车站底板位移

Fig. 7 Displacement of the floor of station

3.4 基坑开挖深度对地下连续墙内力影响

选取地下连续墙最大弯矩有限元分析结果, 研究基坑开挖对地下连续墙内力影响。图 8 所示为基坑开挖深度对地下连续墙最大弯矩的影响, 从图中可以看出, 前 4 次基坑开挖中, 地下连续墙最大弯矩逐渐增大, 第 5 次基坑开挖, 地下连续墙最大弯

矩降低; 靠近基坑一侧车站地下连续墙最大弯矩大于基坑长边地下连续墙最大弯矩, 基坑长边最大弯矩大于基坑短边最大弯矩。

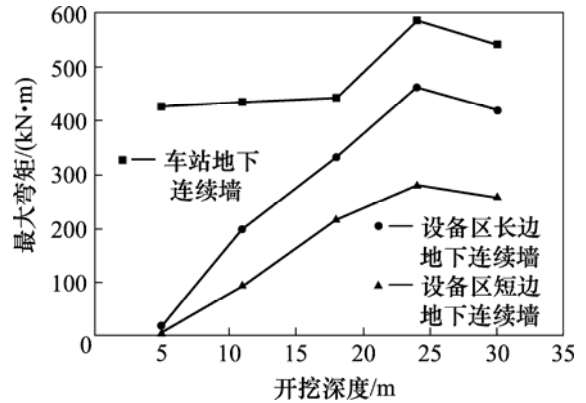


图 8 地下连续墙最大弯矩

Fig. 8 Maximum bending moment of underground continuous wall

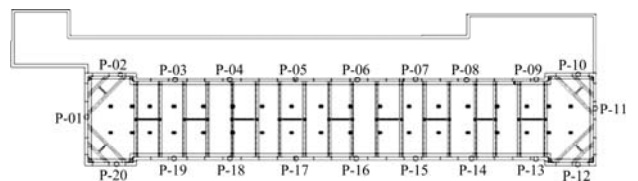


图 9 车站监测点布置示意图

Fig. 9 Monitoring point arrangement diagram of station

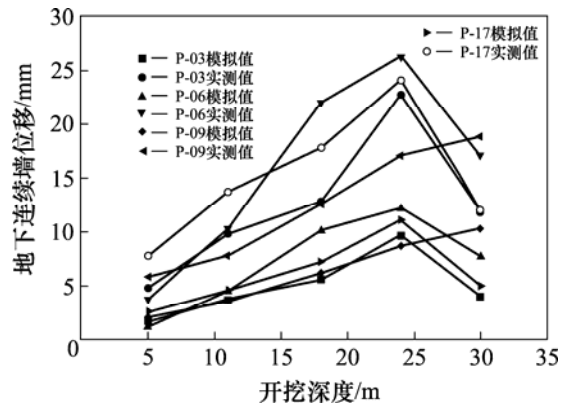


图 10 有限元结果与实测值对比图

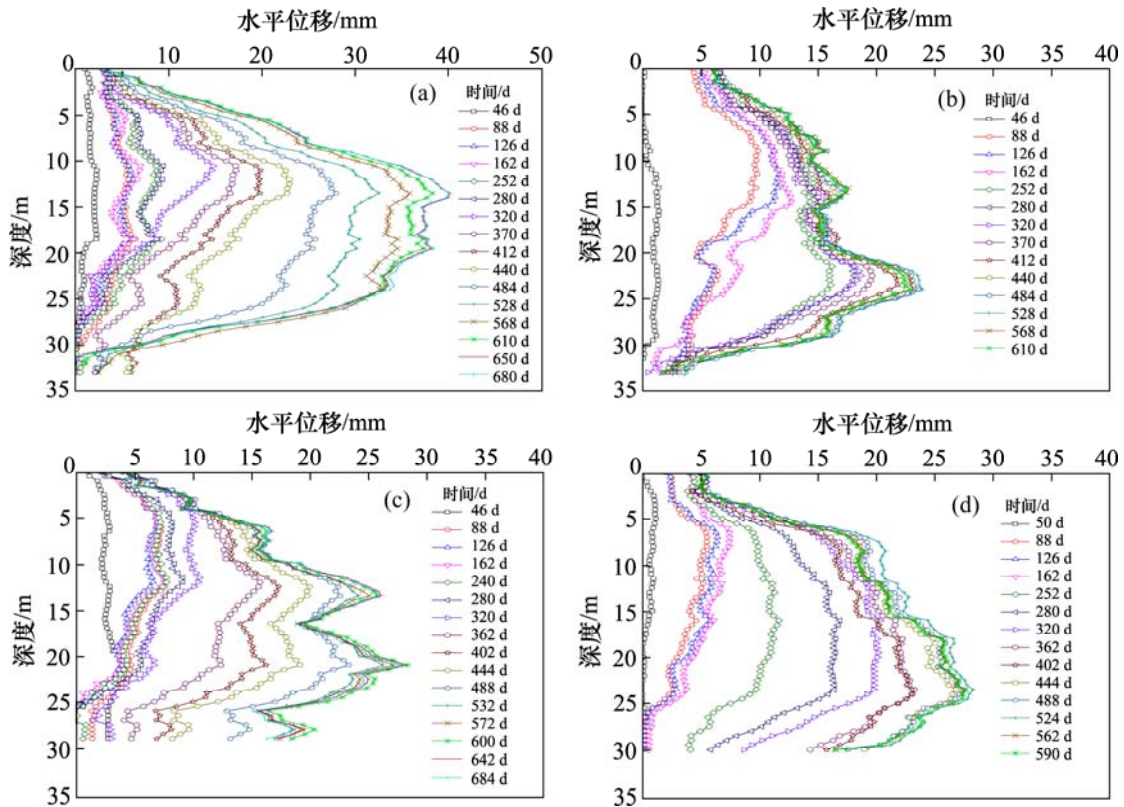
Fig. 10 Contrast diagram between the finite element results and measured results

3.5 基坑开挖深度对地下连续墙侧向位移影响

选取地下连续墙位移有限元分析结果, 研究基坑开挖深度对地下连续墙内力影响。图 9 为地铁车站测点布置图, 图 10 为地下连续墙位移有限元分

析结果与现场实测结果对比。从图中可以看出,各测点有限元模拟结果与现场实测结果走势基本相同,模拟值小于现场实测值,这是由有限元模拟中基本假定与实际情况差别导致。说明挖顺作段的地

下连续墙最大位移高于盖挖逆作段;靠近基坑一侧地下连续墙位移与远离基坑一侧地下连续墙位移相差不大。



(a) 测点 P-03; (b) 测点 P-06; (c) 测点 P-09; (d) 测点 P-17

图 11 水平位移随深度及时间变化的关系曲线

Fig. 11 Curves of horizontal displacement with the change of depth and time

4 现场实测分析

图 11 为测点 P-03, P-06, P-09 和 P-17 水平位移随基坑开挖深度及时间的变化曲线。从图中可以看出,测点 P-03 最大水平位移高于测点 P-09 和 P-17 最大水平位移,说明挖顺作段的地下连续墙最大位移高于盖挖逆作段,靠近基坑一侧地下连续墙位移高于远离基坑一侧地下连续墙;通过对基坑采取加强支护措施,各测点水平位移逐渐趋于稳定。

5 结论

1) 车站柱轴力从顶板至底板逐渐增大,这是由

于上部及各层荷载通过结构柱向下传递。车站标准段柱轴力与车站端头相比较,随着基坑开挖的进行,柱轴力变化较小,这说明车站单侧卸载对既有地铁车站结构柱内力的影响较小。

2) 车站顶板靠近明挖顺作段的内力较大,靠近盖挖逆作段的内力较小,因为盖挖逆作段顶板在施工期间由于未直接承受荷载,整体内力值较小,但随着施工的进行也有逐渐增大的趋势。随着基坑开挖的进行,底板的弯矩和最大主应力值均变化较小。

3) 基坑开挖对车站结构板最大位移影响较大,这主要是由于受基坑开挖的影响,土体变形从基坑底向外传递,导致车站发生背向基坑的倾斜。明挖顺作段的最大位移稍大于盖挖逆作段。

4) 随着基坑开挖的进行,地下连续墙内力逐渐增大,基坑长边的连续墙弯矩大于基坑短边的连续墙弯矩。

5) 随着基坑开挖的进行,地下连续墙往基坑内的侧向变形越来越大,既有地铁车站近基坑侧与远基坑侧围护结构均朝向基坑内变形。

参考文献:

- [1] 郭海柱,张庆贺,朱继文,等. 地铁十字换乘车站施工关键技术研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(6): 3229-3236.
GUO Haizhu, ZHANG Qinghe, ZHU Jiwen, et al. Study on key techniques for construction of metro crossing transfer station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 3229-3236
- [2] 丁乐. 基坑开挖对邻近地铁车站安全影响的三维有限元分析--以西朗交通枢纽站为例[J]. 隧道建设, 2015, 35(4): 328-334.
DING LE. Case study on 3D finite element analysis on influence of cutting of foundation pit on safety of existing adjacent metro station[J]. Tunnel Construction, 2008, 35(4): 328-334.
- [3] 王杰光,廖武新,孔令鹏. 地铁站基坑开挖变形特征与数值模拟分析[J]. 兰州工业学院学报, 2017, 24(1): 13-18.
WANG Jieguang, LIAO Wuxin, KONG Linpeng. Deformation characteristics and numerical simulation analysis of foundation pit excavation of subway station[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2017, 24(1): 13-18.
- [4] 任伟明,彭丽云,刘军. 邻近地铁车站的基坑开挖基于FLAC^{3D}数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 276-280.
REN Weiming, PENG Liyun, LIU Jun. Numerical simulation of excavation of deep foundation pit adjacent to metro station based on FLAC^{3D}[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 276-280.
- [5] 胡春杰,程桦,曹广勇. 数值分析逆作法深基坑差异沉降规律[J]. 安徽建筑大学学报, 2016, 24(4): 40-44.
HU Chunjie, CHENG Hua, CAO Guangyong. The laws of differential settlement in top-down construction method of deep foundation pit analyzed with numerical simulation[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2016, 24(4): 40-44.
- [6] 蔡武林. 深基坑开挖对临近地铁车站及区间影响的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 222-226.
CAI Wulin. Numerical simulation of the influence of deep foundation pit on adjacent subway station and tunnels[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(6): 222-226.
- [7] Finno R J, Black J T, Roboski J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 2007, 133(1): 30-36.
- [8] Potts D W, Fourie A B. The behavior of a propped retaining wall results of a numerical experiment[J]. Geotechnique, 1984, 34(3): 383-404.
- [9] Qu C Y, Wu T S, Hsieh H S. Analysis of deep excavation with column type of ground improvement in soft clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(9): 709-716.
- [10] 旷庆华. 同深基坑开挖引起紧邻地铁车站变形特性研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(5): 130-137.
KUANG Qinghua. Study on characteristics of subway station deformation induced by excavation of adjacent deep foundation pit[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(5): 130-137.

(编辑 阳丽霞)