

超长 L 形深基坑台阶法开挖围护结构变形特征研究^{*}甘彬霖^{1,2} 梁亚华³ 卞超^{1,2} 毕书琦^{1,2} 杨永华³ 李欢³

(1. 煤炭科学研究总院建井研究分院, 100013, 北京; 2. 北京中煤矿山工程有限公司, 100013, 北京;

3. 中国建筑第八工程局有限公司, 200013, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘要 通过对南宁地铁那洪立交站基坑工程的施工监测, 分析了不同施工阶段地下连续墙围护结构的墙顶竖向位移、墙顶水平位移和墙体深层水平位移的变化规律, 研究了超长 L 形深基坑台阶法开挖围护结构的变形特征。研究结果表明: L 形基坑围护结构变形的形状效应显著, 长边段中部的墙顶竖向位移量最大, 交汇处次之, 短边端最小; 开挖深度较浅时, 墙顶竖向位移以沉降为主, 随着深度增加, 围护结构发生波动隆起变形; 同一区段内墙顶水平位移方向相一致, 以向坑内变形为主; 坑内开挖深度差导致不同深度侧的墙顶水平变形量差异较大, 且变形方向相反。此外, 还得到了不同开挖深度对应的墙体深层水平位移最大值变化范围及其所处深度范围。

关键词 深基坑开挖; L 型深基坑; 围护结构变形

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.027

Research on the Deformation Characteristics of Enclosure Structure of Super-long L-shaped Deep Foundation Pit Excavated by Bench Method

GAN Binlin, LIANG Yahua, BIAN Chao, BI Shuqi, YANG Yonghua, LI Huan

Abstract Based on the field monitoring of the foundation pit project of Nahong Overpass Station of Nanning Metro, the laws of vertical displacement of wall top, horizontal displacement of wall top and deep horizontal displacement of wall body at different construction stages of the underground diaphragm wall enclosure structure are analyzed. The deformation characteristics of the enclosure structure of the super-long L-shaped deep foundation pit excavated by bench method is studied. The results show that the shape effect of deformation is significant to the L-shaped foundation pit enclosure structure. The vertical displacement of wall top in the middle of the long side section is the biggest, the intersection the second, and the short side the smallest. When the depth of excavation is shallow, the ver-

tical displacement of wall top is dominated by settlement. As the depth increases, the enclosure structure undergoes wave-form uplift deformation. The horizontal displacement direction of wall top is consistent in the same section, and the deformation direction mainly heads towards inside the foundation pit. Large differences appear in the horizontal deformation of wall top on different depth sides, which is created by the various excavation depths inside the pit, and the deformation direction is opposite. In addition, the variation range of the maximum deep horizontal displacement of wall body and its depth range corresponding to different excavation depths are also obtained.

Key words deep foundation pit excavation; L-shaped deep foundation pit; enclosure structure deformation

First-author's address Research Institute of Mine Construction, China Coal Research Institute, 100013, Beijing, China

在深基坑开挖过程中, 围护结构变形规律及控制是保证工程安全可靠的关键。目前基坑安全事故发生率高达 30%, 其中 42% 的地下工程事故主要由施工不当引发^[1-3]。经分析, 在基坑开挖施工过程中, 结构失效风险较大^[4]。基坑工程结构的失效破坏一般分为强度破坏和变形破坏, 其中围护结构变形破坏是基坑失效破坏的主要表现形式^[5]。

文献[6-13]主要通过理论分析、数值模拟和施工监测等方法, 对基坑开挖过程中围护结构变形规律及控制问题进行研究。围护结构处于岩土体天然介质环境系统中, 具有隐蔽性、复杂性、区域差异性和环境影响显著等特点, 理论分析和数值模拟一般基于地质环境和边界条件的假定, 故计算模型和分析结果同实际情况之间存在差异, 而监测分析结论与工程实际相符, 能更好地反映围护结构实际变形规律。文献[10]根据超大深基坑开挖监测, 分析车辆荷载和土体蠕变对支护结构水平变形的影响;

^{*} 山东省技术创新项目(202010606029); 中国建筑第八工程局有限公司科技开发项目(2017-16)

文献[11]通过中隔墙和“盆式开挖”优化设计,有效控制了某 L 形深基坑支护体系变形;文献[14]通过监测分析了上软下硬地质条件的深基坑开挖过程中围护结构位移规律;文献[15]根据监测结果,分析了深厚软土超深大基坑分区对称开挖引起围护结构变形特性。

目前,围护结构变形规律研究多针对单一基坑条件、开挖方式或开挖工况,对超长 L 形深基坑台阶法开挖围护结构变形特征研究相对较少。本文基于那洪立交站 L 形深基坑施工的现场监测,分析台阶法开挖不同施工阶段地下连续墙围护结构的墙顶竖向位移、墙顶水平位移和墙体深层土体位移的变化规律,为特殊开挖方式下异形深基坑围护结构变形控制提供参考。

1 工程概况

1.1 项目简介

那洪立交位于南宁那洪大道与壮锦大道交叉十字路口处,为南宁轨道交通 4 号线和 5 号线的换乘站。其中,4 号线车站主体基坑长 256.6 m,小里程端宽度为 31.4 m,联络通道段宽度为 28.2 ~ 37.1 m,标准段宽度为 27.5 m,大里程盾构端宽 42.8 m,深度为 25.9 ~ 29.5 m,采用厚 800 mm 的地下连续墙 + 内支撑支护形式,设置 4 道内支撑,其中第 1 道支撑为混凝土支撑,第 2 道及以下支撑为钢支撑。5 号线车站主体基坑长 269.8 m,标准段宽度为 27.5 m,联络通道段宽度为 25.0 ~ 32.8 m,标准段宽度为 22.9 m,大里程盾构端宽 35.5 m,深度为 17.9 ~ 22.6 m,采用厚 800 mm 的地下连续墙 + 内支撑支护形式,设置 3 道内支撑,其中第 1 道支撑为混凝土支撑,其余为钢支撑。基坑现场布置如图 1 所示。

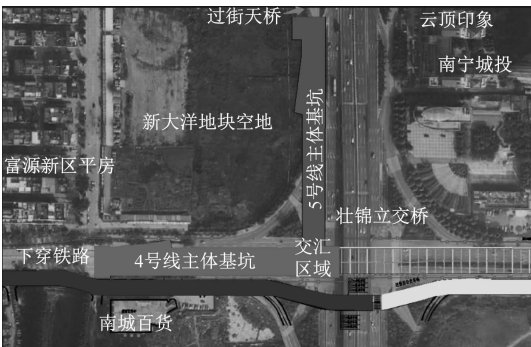


图 1 基坑现场俯视图
Fig. 1 Top view of the foundation pit site

1.2 场地条件

场区内主要工程地质结构层自上而下主要为:①₁ 砾石填土;①₂ 素填土;①₃ 淤泥质填土;⑤₂ 含黏性土圆砾;⑥_{1,2} 粉质黏土;⑥₂ 含黏性土粉砂;⑦_{1,2} 泥岩;⑦_{1,3} 泥岩;⑦_{2,2} 泥质粉砂岩;⑦_{2,3} 泥质粉砂岩;⑦₄ 炭质泥岩。地下水类型主要为上层滞水、第四纪松散岩类孔隙水及碎屑岩类孔隙裂隙水,水位埋深为 5.02 ~ 8.77 m。基坑施工采用深井管井降水方法,将坑内水位降至工作面之下 0.5 m 处。

2 基坑开挖和监测方案

2.1 开挖方案

该基坑采用分层分区、同槽开挖的台阶法开挖方案。4 号线基坑共划分 11 个单元区域(图 2),采用后退式台阶掘土开挖的方式,由两端往中间开挖;5 号线基坑划分 11 个单元区域(图 3),根据自南往北台阶法开挖的原则,先整体挖完第 2 道支撑以上土方,并在北端设马道坡,再从基坑南端往北进行后退式台阶掘土开挖,以提高出土效率。该项目基坑工程从 2018 年 5 月 5 日开挖动工,至 2018 年 12 月 10 日全部开挖完成。

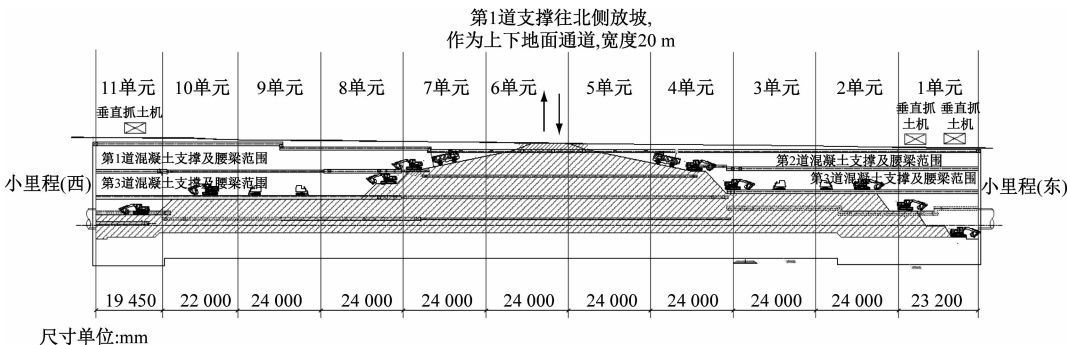


图 2 4 号线主体基坑分区开挖示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Line 4 main body foundation pit excavation zoning

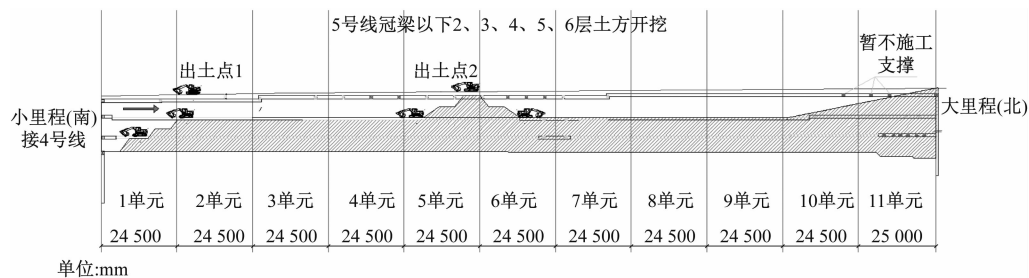


图 3 5 号线主体基坑分区开挖示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Line 5 main body foundation pit excavation zoning

2.2 监测方案

那洪立交站基坑的重要性等级和监测等级均为Ⅰ级。在开挖过程中,对围护结构的墙顶竖向位移、墙顶水平位移和墙体深层水平位移进行全面监测。

监测点沿地下连续墙布置(如图 4 所示),墙顶

竖向位移监测点(ZQC1~ZQC61)及墙顶水平位移监测点(ZQS1~ZQS61)布置在墙顶冠梁处,墙体深层土体位移监测点(ZQT1~ZQT61)布置在靠近墙体周围土体处。各监测项目的布置要求和监测控制值如表 1 所示。

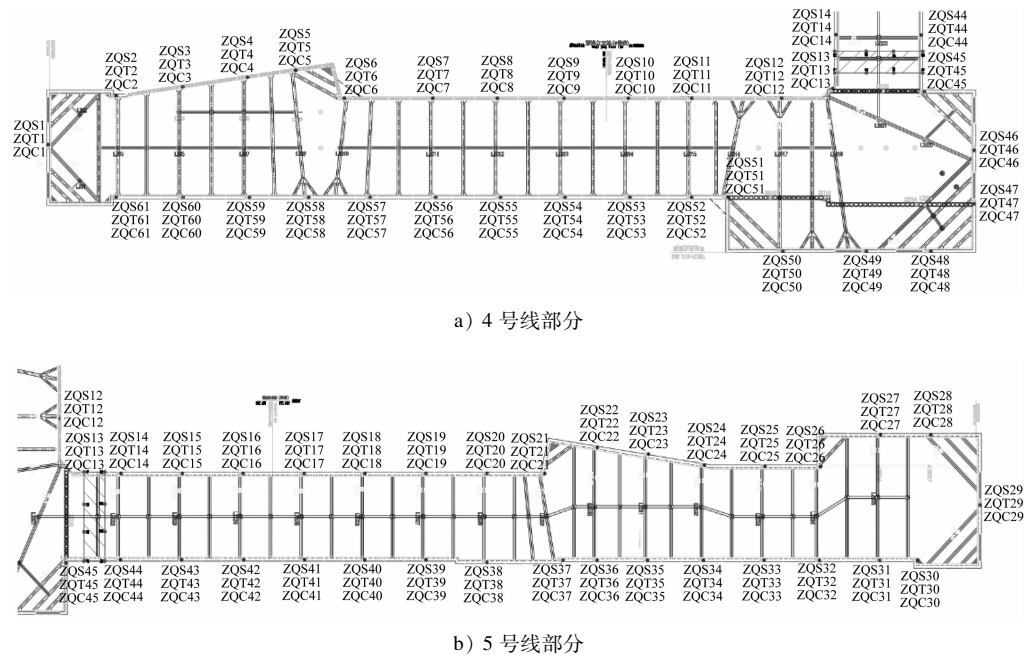


图 4 支护结构监测点布置平面图

Fig. 4 Layout of monitoring points of retaining structure

表 1 支护结构监测项目布置要求和监测控制值

Tab. 1 Retaining structure monitoring items layout requirements and monitoring control values

监测项目	测试仪器	测点布置要求	测点数/个	监测控制值
墙顶竖向位移	全站仪、经纬仪	间距为 15 ~ 20 m, 每边不少于 3 个	61	位移量≤10 mm, 变形速率≤2 mm/d
墙顶水平位移	全站仪、经纬仪	间距为 15 ~ 20 m, 每边不少于 3 个	61	位移量≤10 mm, 变形速率≤2 mm/d
墙体深层土体位移	测斜管、测斜仪	间距为 15 ~ 20 m, 测点竖向间距为 0.5 m	61	位移量≤0. 15% H 且≤25 mm, 变形速率≤3 mm/d

注: H 为开挖深度。

3 监测结果与分析

3.1 墙顶竖向位移

截至开挖完成时,墙顶竖向位移监测结果(见图5)中,除 ZQC8 监测点出现 1.12 mm 下沉外,其余监测点均出现不同程度上升。其中,ZQC20、ZQC21、ZQC37、ZQC38、ZQC39、ZQC51 监测点的竖向位移超过监测控制值(10 mm),属于橙色预警状态。经分析,ZQC20、ZQC21、ZQC37、ZQC38 及 ZQC39 位于 5 号线基坑中部两侧,且 ZQC20、ZQC21 位于基坑中部西侧犄角处,ZQC51 位于基坑交汇的西侧内凹角。这表明基坑的形状和所处位置对围护结构的竖向位移影响很大,基坑中部和犄角处的变形相对较大。

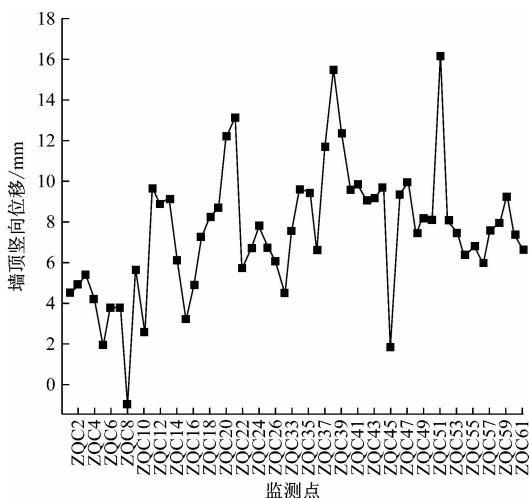


图5 墙顶最终竖向位移

Fig. 5 Final vertical displacement of wall top

本文选取基坑西端的 ZQC1,4 号线基坑中部的 ZQC6 和 ZQC57,4 号线及 5 号线基坑交汇处的 ZQC46 和 ZQC51,5 号线中部的 ZQC21 和 ZQC38,对历时数据进行分析,得到 L 形基坑开挖过程中不同区段围护结构累计竖向位移的历时曲线(见图6)。

由图6可知,开挖过程中墙顶竖向位移随时间变化明显。当开挖深度较浅时,墙顶竖向位移以沉降为主;随着时间和开挖深度的增加,卸荷效应作用增大,隆起量大于沉降量,围护结构发生隆起变形,并具有一定的波动性。

对不同区段而言,L 形基坑长边中部的竖向位移量最大,交汇处次之,短边端最小,但内凹处竖向位移量相对更大,基坑的形状效应显著。根据监测

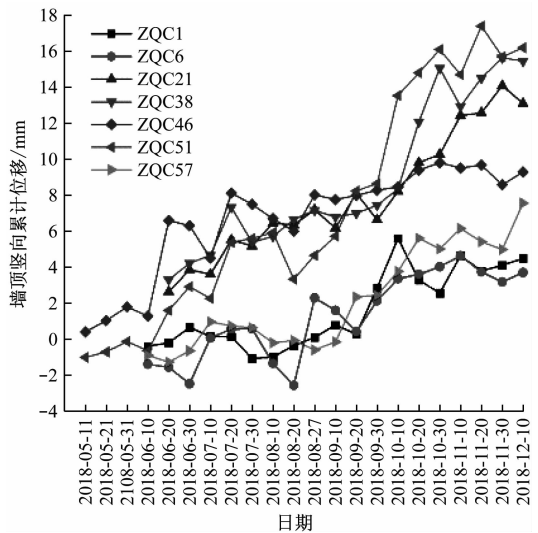


图6 墙顶竖向累计位移历时曲线

Fig. 6 Vertical cumulated displacement-time curve of wall top

结果,ZQC51、ZQC38 和 ZQC21 的竖向累计位移量均超过了 ± 10 mm 的控制值,并分别在 9 月 22 日、10 月 15 日和 10 月 29 日达到橙色预警等级。4 号线基坑中部的开挖深度比 5 号线基坑中部开挖深度大 3.6 m,但 4 号线主体基坑中部的 ZQC6 和 ZQC57 的竖向位移量小于 5 号线主体基坑中部的 ZQC38 和 ZQC21。这表明由基坑两端向中间掘土的后退式台阶开挖方式比单向后退式台阶法掘土开挖方式更能有效控制围护结构的竖向变形。

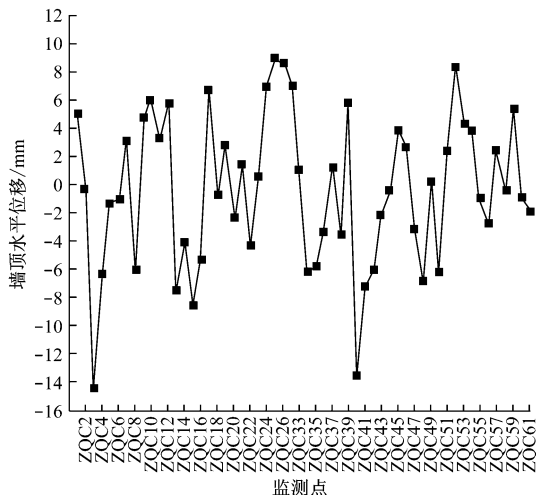
对比同一区段的最终竖向变形值,ZQC6 和 ZQC21 处分别小于 ZQC57 和 ZQC38 处变形值。这与该区段基坑南侧和东侧土体变形分别受建筑物和桥基的抑制有关。

3.2 墙顶水平位移

基坑开挖完成后,不同监测点的墙顶最终水平位移量均小于控制值(± 25 mm),如图7所示。根据不同监测点的水平位移量,拟合出基坑开挖完成后围护结构的变形情况,如图8所示。

由图8可见:墙顶水平位移以向基坑内变形为主;同一区段的水平位移变形方向基本一致,即同时向内或向外变形;基坑内凸处的水平变形量相对较大,但受内支撑结构的影响,墙顶水平位移没有明显的区段特征。

4 号线主体基坑东侧开挖深度为 26.5 m,5 号线主体基坑南侧开挖深度为 17.9 m,因此在基坑交汇处有 1 个 8.6 m 深的坑中坑。基坑交汇区域的墙



注:墙顶水平位移为正表示向基坑内变形,为负表示向基坑外变形。

图7 墙顶最终水平位移量

Fig.7 Final horizontal displacement of wall top

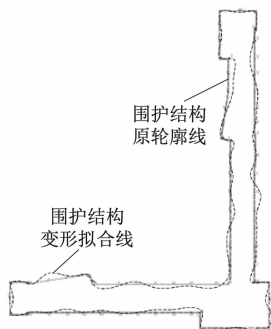


图8 围护结构水平位移拟合图

Fig.8 Horizontal displacement fitting diagram of enclosure structure

顶水平位移历时曲线如图9所示。在基坑开挖初期,开挖深度较浅且相同,基坑交汇区域监测点的墙体水平位移量较小且变化趋势基本一致。在8月10日之后,基坑交汇区域北侧的开挖深度开始逐渐大于南侧开挖深度。此时:北侧 ZQS12、ZQS45 和 ZQS46 监测点处的墙体水平位移以向坑内变形为主,南侧 ZQS48、ZQS49 和 ZQS50 监测点的墙体水平位移以向坑外变形为主,且变形量均随时间的推移逐渐增大;在坑中坑临界处,ZQS47 和 ZQS51 监测点的墙顶水平位移值介于南北侧监测点的水平位移值之间。这表明施工过程中,基坑内的开挖深度差导致区域土体产生不均匀的应力场和位移场,进而使同一区段内不同开挖深度侧的墙顶水平变形量不同,且变形方向相反:较深侧以向坑内变形为主,较浅侧以向坑外变形为主。

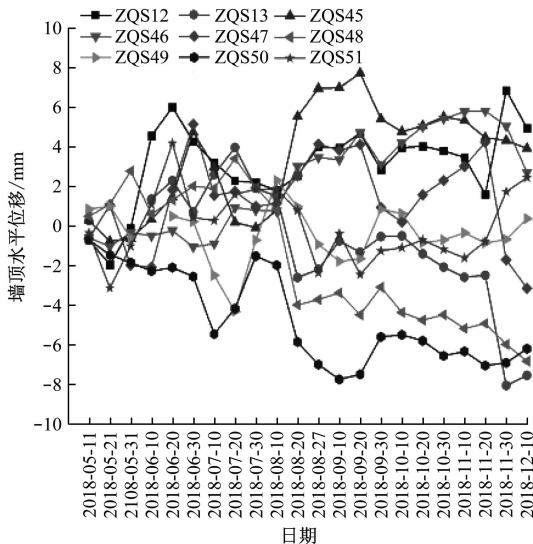
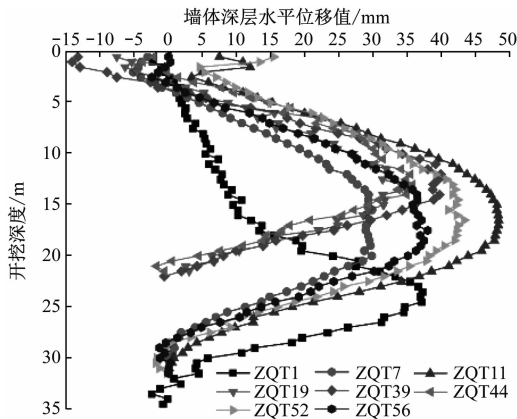


图9 交汇区域墙顶水平位移历时曲线

Fig.9 Horizontal displacement-time curve of wall top in intersection area

3.3 墙体深层水平位移

基坑开挖完成后,不同区域的墙体深层水平位移监测值如图10所示,不同监测点的墙体深层水平位移随深度的变化规律基本相同,位移-深度曲线呈明显指向坑内的“弓”形。ZQT1处的开挖深度为29.5 m,ZQT7、ZQT11、ZQT52及ZQT56处的开挖深度为26.2 m,ZQT19、ZQT39和ZQT44处的开挖深度为19.0 m。结合图10可知,墙体深层水平位移最大值位置的深度随开挖深度的增大而增大。



注:水平位移值为正表示向基坑内偏移,为负表示向基坑外偏移。

图10 开挖完成后的墙体深层水平位移监测值

Fig.10 Deep horizontal displacement monitoring value of wall body after excavation

通过对28组墙体深层水平位移监测点的区域开挖深度、水平位移最大值及其所处深度数据统计

分析,墙体深层水平位移最大值为 $0.076\% H \sim 0.264\% H$ (H 为所在区域开挖深度),水平位移最大值所在深度为 $0.54H \sim 0.80H$ 。对同一区段而言,ZQT39、ZQT56 和 ZQT11 处不同深度的水平位移分别大于 ZQT19、ZQT7 和 ZQT52 对应深度的水平位移。这表明:对于 L 形基坑长边段中部墙体深层水平位移,外侧大于内侧;对于基坑交汇处的墙体深层水平位移,内阴角侧大于对侧。

在基坑开挖过程中,墙体深层水平位移随时间及深度变化的曲线分别如图 11 和图 12 所示。在基坑开挖初期,墙体水平位移呈现斜线形分布,位移量随深度的增加而减小;随着开挖深度的增加,墙体深层水平位移逐渐表现为“弓”形分布,开挖深度越大“弓”形分布的特点越明显,墙体最大水平位移值及其所在深度随开挖深度的增加而增加。至 9 月 30 日,ZQT1 所在区域的土体开挖完成,ZQT1 处深层最大水平位移值的深度基本保持不变,而最大水平位移值随时间的增加而逐渐增大;至 11 月 15 日,

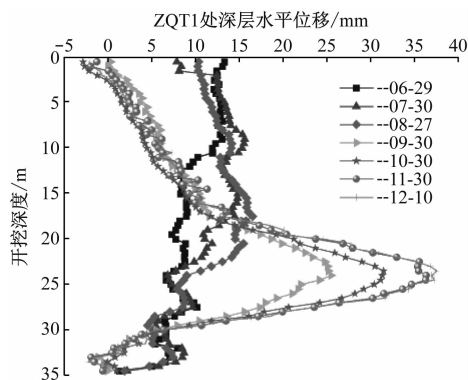


图 11 ZQT1 深层水平位移历时曲线

Fig. 11 Deep horizontal displacement time history curve of ZQT1

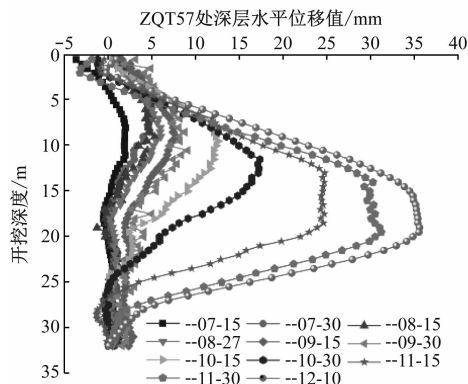


图 12 ZQT57 深层水平位移历时曲线

Fig. 12 Deep horizontal displacement time history curve of ZQT57

ZQT57 所在区域的土体开挖基本完成,墙体深层水平位移变化特点与 ZQT1 处类似。这表明:墙体深层最大水平位移值的深度主要由开挖深度决定;最大水平位移值具有明显的时间效应,开挖完成后最大水平位移值随着基坑暴露时间的增加而增大。因此,在基坑施工过程中,应合理安排工序,减少基坑暴露时间,以控制围护结构的深层水平变形。

4 结论

1) L 形基坑围护结构变形的形状效应显著,基坑长边中部的墙顶竖向位移量最大,基坑交汇处次之,短边端最小,内凸处的竖向位移量相对较大;墙顶竖向位移随时间变化明显,当开挖深度较小时,墙顶竖向位移以沉降为主,随着时间的推移和开挖深度的增加,基坑卸荷效应作用增大,隆起量大于沉降量,围护结构发生波动隆起变形。

2) 同一区段的墙顶水平位移方向一致,均以向坑内变形为主;虽基坑内凸处的水平变形量相对较大,但受内支撑支护影响,墙顶水平位移没有明显的区段差异特征;坑内开挖深度差导致同一区段内不同深度侧的墙顶水平变形量差异较大,且变形方向相反。

3) 墙体深层最大水平位移具有明显的时间效应;最大水平位移值约为 $0.076\% H \sim 0.264\% H$;最大值所在深度约为 $0.54H \sim 0.80H$,主要由开挖深度决定;对于 L 形基坑长边段中部墙体深层水平位移,外侧大于内侧,对于交汇处的墙体深层水平位移,内阴角侧大于对侧。

参考文献

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(10):1945.
QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(10):1945.
- [2] 东兆星, 齐燕军, 周国庆. 深基坑圆形冻土帷幕力学性能的模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(增刊2):4362.
DONG Zhaoxing, QI Yanjun, ZHOU Guoqing. Model experimental study on mechanical characteristics of round-shaped frozen soil wall in deep pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(S2):4362.
- [3] 2020 中国城市地下空间发展蓝皮书(公共版)[R]. 北京: 中国工程院战略咨询中心, 中国岩石力学与工程学会地下空间分会, 中国城市规划学会, 2020.
2020 Blue book of urban underground space development in China

- (public edition) [R]. Beijing: Strategic Consulting Center of Chinese Academy of Engineering, Sub-society for Underground Space of CSRME, Urban Planning Society of China, 2020.
- [4] 赵国藩, 金伟良, 贡鑫. 结构可靠度理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- ZHAO Guofan, JIN Weiliang, GONG Jinxin. Structural reliability theory [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [5] 杨文. 软土地基深基坑监测与数值模拟分析 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- YANG Guanwen. Monitoring and numerical simulation analysis for deep foundation pit in soil foundation [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [6] OZTOPRAK S, CINICIOGLU S F, OZTORUN N K, et al. Impact of neighbouring deep excavation on high-rise sun plaza building and its surrounding [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 111: 495.
- [7] 李涛, 周志龙, 刘波, 等. 盾构井深基坑围护结构变形规律及信息化施工研究 [J]. 西安理工大学学报, 2012(3): 361.
- LI Tao, ZHOU Zhilong, LIU Bo, et al. Research on displacements law of shield shaft enclosure structure and the informatization construction analysis [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012(3): 361
- [8] 李苏春, 袁运涛. 两紧邻基坑支护设计及监测分析 [J]. 工业建筑, 2012(10): 89.
- LI Suchun, YUAN Yuntao. Analysis of excavation retaining design and monitoring for two adjacent foundations [J]. Industrial Construction, 2012(10): 89.
- [9] 俞建霖, 龙岩, 夏霄, 等. 狭长型基坑工程坑底抗隆起稳定性分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017(11): 2165.
- YU Jianlin, LONG Yan, XIA Xiao, et al. Basal stability for narrow foundation pit [J]. Journal of Zhejiang University (Engineer Science), 2017(11): 2165.
- [10] 徐飞, 王渭明, 张乾青, 等. 黄河冲积平原地区超大型深基坑开挖现场监测分析 [J]. 岩土工程学报, 2014(增刊2): 471.
- XU Fei, WANG Weiming, ZHANG Qianqing, et al. Monitoring analysis of super large and deep foundation pit in alluvial plain of Yellow River [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014(S2): 471.
- [11] 鲍旺, 雷克, 王莉锋, 等. 紧邻地铁修复段的 L 形深基坑设计优化及施工技术研究 [J]. 建筑施工, 2018(4): 484.
- BAO Wang, LEI Ke, WANG Lifeng, et al. Study on design optimization and construction technology for L shaped deep foundation pit adjacent to metro repair section [J]. Building Construction, 2018(4): 484.
- [12] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究 [J]. 岩土力学, 2016(4): 1075.
- CHEN Kun, YAN Shuwang, SUN Liqiang, et al. Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation unloading condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(4): 1075.
- [13] 俞建霖, 夏霄, 张伟, 等. 砂性土地基深基坑工程对周边环境的影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2014(增刊2): 311.
- YU Jianlin, XIA Xiao, ZHANG Wei, et al. Effect of sandy soil deep excavation engineering on adjacent circumstance [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014(S2): 311.
- [14] 林之航. 上软下硬深基坑变形规律与空间效应分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2020(6): 1792.
- LIN Zhihang. Research on deformation and spatial effect of upper-soft and lower-hard deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020(6): 1792.
- [15] 奚家米, 陈让清. 软土超深大基坑分区对称开挖围护结构变形及地表沉降实测分析 [J]. 建筑科学, 2020(3): 143.
- XI Jiami, CHEN Rangqing. Deformation and surface settlement analysis of super-deep and large foundation pit excavation enclosure structures in soft soil area [J]. Building Science, 2020(3): 143.

(收稿日期: 2021-05-20)

(上接第 124 页)

- [2] 彭益成, 丁文其, 闫治国, 等. 修正惯用法中弯曲刚度有效率的影响因素分析及计算方法 [J]. 岩土工程学报, 2013(增刊1): 495.
- PENG Yicheng, DING Wenqi, YAN Zhiguo, et al. Analysis and calculation method of effective bending rigidity ratio in modified routine method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(S1): 495.
- [3] SAKAGUTI Y, MATSUI Y, MOTEGI T. Cotter jointing method for shield-segment jointing [J]. Journal of Tunnel Engineering JSCE, 1991, 1: 113
- [4] 李兆平, 王臣, 苏会峰, 等. 预制装配式地铁车站结构榫槽式接头力学性能研究 [J]. 中国铁道科学, 2015(5): 7.
- LI Zhaoping, WANG Chen, SU Huifeng, et al. Mechanical property of tenon-groove joints for metro station constructed by prefabricated structure [J]. China Railway Science, 2015(5): 7.
- [5] 李兆平, 王臣, 苏会峰, 等. 装配式地铁车站结构接头混凝土裂缝及接缝变形规律试验研究 [J]. 土木工程学报, 2015(增刊1): 409.
- LI Zhaoping, WANG Chen, SU Huifeng, et al. An experiment study on the evolution law of concrete structure crack and joint seam deformation for tenon groove joints in the prefabricated metro station [J]. China Civil Engineering Journal, 2015(S1): 409.
- [6] 李兆平, 苏会峰, 吕书清, 等. 装配式地铁车站结构双榫槽式接头抗弯力学性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2017(增刊2): 28.
- LI Zhaoping, SU Huifeng, LYU Shuqing, et al. Experimental study on flexural mechanical properties of the double tenon groove joints of prefabricated subway station [J]. China Civil Engineering Journal, 2017(S2): 28.
- [7] 曾东洋, 何川. 地铁盾构隧道管片接头抗弯刚度的数值计算 [J]. 西南交通大学学报, 2004(6): 744.
- ZENG Dongyang, HE Chuan. Numerical simulation of segment joint bending stiffness of metro shield tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004(6): 744.

(收稿日期: 2021-07-23)