

北京地铁薄壁地下连续墙基坑变形规律统计分析*

祝建勋^{1,2} 杨春阳^{1,2} 李永伟^{1,2} 赵智涛³ 钟巧荣^{1,2} 宋云兴⁴

(1. 北京安捷工程咨询有限公司, 100050, 北京; 2. 城市轨道交通绿色与安全建造技术国家工程实验室, 100037, 北京;
3. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 100068, 北京; 4. 北京公联洁达公路养护工程有限公司, 100071, 北京)

摘要 [目的] 地下连续墙(以下简称“地连墙”)厚度对基坑变形量与变形模式的影响较为明显,尤其是薄壁地连墙对于基坑开挖和坑边荷载十分敏感。因此,有必要对北京地铁不同壁厚的地连墙基坑变形规律进行研究。[方法] 以北京地铁6座薄壁地连墙车站基坑工程为例,使用统计学方法对其地面竖向变形、地连墙墙顶竖向变形、地连墙水平位移及钢支撑轴力的监测数据进行统计分析。[结果及结论] 薄壁地连墙基坑的地面变形可分为隆起-沉降型和沉降型两种,且地面变形中隆起变形的占比较高。土方开挖阶段,地连墙呈快速隆起趋势,开挖结束后墙顶隆起值产生小幅回落,并最终达到稳定值。根据地连墙变形特征,将其分为正常抛物线型、荷载抛物线A型、荷载抛物线B型3种类型。地连墙最大变形位置一般处于 $0.50H \sim 0.85H$ (H 为基坑深度),累计变形量集中于 $10 \sim 20$ mm。第1道钢支撑轴力变化特征较为明显,其曲线可分为快速上升、快速下降、缓慢下降、快速上升4个阶段。

关键词 地铁; 薄壁地连墙; 基坑变形

中图分类号 U231.3; TU753

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.022

Statistical Analysis of Beijing Subway Thin-walled Diaphragm Wall Foundation Pit Deformation Law

ZHU Jianxun^{1,2}, YANG Chunyang^{1,2}, LI Yongwei^{1,2}, ZHAO Zhitao³, ZHONG Qiaorong^{1,2}, SONG Yunxing⁴

(1. Beijing Agile-Tech Engineering Consultants Co., Ltd., 100050, Beijing, China; 2. National Engineering Lab for Green and Safe Construction Technology in Urban Rail Transit, 100037, Beijing, China; 3. Beijing Rail Transit Construction Management Co., Ltd., 100068, Beijing, China; 4. Beijing Gonglian Jieda Highway Maintenance Engineering Co., Ltd., 100071, Beijing, China)

Abstract [Objective] The thickness of diaphragm walls significantly affects the amount and mode of foundation pit de-

formation, thin-walled diaphragm walls are especially sensitive to excavation and edge loads of foundation pit. Therefore, it is necessary to study the deformation law of foundation pit diaphragm walls with different thicknesses in Beijing Subway. [Method] Taking six thin-walled diaphragm wall station foundation pit projects in Beijing Subway as examples, statistical analysis is conducted on monitoring data of ground vertical deformation, diaphragm wall top vertical deformation, horizontal displacement of diaphragm walls, and axial force of steel supports using statistical methods. [Result & Conclusion] The thin-walled diaphragm wall foundation pit ground deformation can be classified into heave-subsidence type and subsidence type, with a higher proportion of heave ground deformation. During soil mass excavation phase, the diaphragm wall exhibits a rapid upheaving trend, followed by a slight rebound of wall top uplift value after excavation completion, and eventually reaching a stable value. Based on the deformation characteristics of diaphragm walls, three types are identified: normal parabola, load parabola A and load parabola B. The maximum deformation of diaphragm walls generally occurs between $0.50H$ and $0.85H$ (H as the excavation depth), with cumulative deformation concentrated in the range of 10 and 20 mm. The axial force variation of the first steel support is rather distinct, and its curve could be divided into four stages: rapid rise, rapid decline, slow decline, rapid rise.

Key words metro; thin-walled diaphragm wall; foundation pit deformation

近年来,随着北京市政府对基坑降排水的要求趋严趋紧,北京地铁车站基坑工程围护结构及地下水控制方案逐渐从降水+围护桩向地下连续墙(以下简称“地连墙”)转变,第三轮建设规划调整线路共计20座明挖车站,其中18座采用地连墙,占比高达90%。地连墙已成为车站基坑围护结构选型的主流做法。已有研究结果表明,不同壁厚的地连墙

*北京市轨道交通建设管理有限公司双创基金项目(SCJJ2023001)

基坑变形规律虽大体相同,但在外部因素影响下,其变形阶段、变形部位、变形发展速度等各方面存在差异性。目前,大多数车站基坑采用 600 mm 壁厚地连墙。为了更好地落实差异化管理,实现精细化管控,适时开展不同壁厚地连墙变形规律及影响因素研究对于实现安全风险管控具有重要的意义。

文献[1]基于地连墙实测数据和土层条件等,对地连墙变形规律进行了综合分析。然而,由于基坑工程具有较强的区域特性,不同地区基坑的变形大小及规律存在较大的差异,因此各地学者分别以当地基坑为研究对象,开展了大量的基坑变形研究工作。文献[2]收集了上海地区 93 个地连墙基坑实测变形资料,从统计学角度分析了地连墙的变形性状。文献[3]以北京地铁 7 座明挖车站为例,对典型支护结构的变形规律进行了统计分析,研究结果表明,墙撑支护体系对基坑变形的控制效果优于桩锚、桩撑。文献[4]对 1 200 mm 厚的大厚壁地连墙进行了详细研究,提出了适用于上海软土地区的大厚壁地连墙施工工艺改良方法。文献[5]以北京地铁昌平线清河小营桥站为例,总结分析了地铁车站基坑分段应用不同支护形式的变形控制效果。

现有文献大多将不同类型围护结构下的基坑变形规律进行了对比,较少关注不同壁厚地连墙作用下的基坑变形特征。近年来,北京地铁车站基坑工程中的围护结构大多采用地连墙形式,墙厚以 600 mm、800 mm、1 000 mm 为主,按其厚度可分为薄壁、中壁、厚壁三类。本文针对薄壁地连墙基坑开挖过程中遇到的变形问题,整理了北京地铁 6 座明挖基坑的 800 个监测点数据,总结了 600 mm 壁厚薄壁地连墙作用下的基坑变形规律。本文研究可为后续薄壁地连墙基坑设计、施工与监测等提供一定的工程经验。

1 工程概况

所选取的北京地铁 6 座明挖车站详细参数如表 1 所示。6 座车站的开挖深度、支护体系、地层条件等参数较为接近,且围护结构均为 600 mm 壁厚的地连墙。6 座明挖车站基坑穿越的地层大体相近,其岩性自上而下主要为:杂填土、砂质粉土、粉质黏土及粉细砂。基底以上地下水类型多为上层滞水和潜水,局部地段含有承压水。

表 1 北京地铁 6 座明挖车站详细参数

Tab. 1 Detailed parameters of 6 Beijing Subway open-excavation stations

名称	基坑开挖尺寸/m			嵌固深度/m	钢支撑数量/道
	长度	宽度	深度		
北神树站 (17 号线)	287.35	21.0 ~ 25.0	21.00	6.0	3
十八里店站 (17 号线)	299.20	21.0	17.65	6.0 ~ 9.0	3
驼房营站 (12 号线)	263.75	23.1	16.80 ~ 17.80	10.0	3
姚家园站 (3 号线)	300.70	21.9	17.00	6.0	3
红军营站 (17 号线)	365.00	21.0	16.70	7.5	3
嘉汇湖站 (17 号线)	445.80	23.1	17.60	7.0	3

2 基坑变形监测数据分析

根据相关规范,分别对 6 座明挖车站的地面竖向变形、地连墙墙顶沉降、墙体水平位移、钢支撑轴力等参数进行实时监测,本文共选取 812 个测点,剔除异常测点后,从中选取 800 个数据监测点的监测数据进行分析。

2.1 地面竖向变形

地面竖向变形测点共计 203 个,均匀分布于基坑两侧,与基坑距离分别约为 3 m 和 8 m。各地面竖向变形范围测点数占比如图 1 所示。由图 1 可知:因基坑开挖引起的地面沉降共占 74.38%,而地面隆起占 25.62%;地面竖向变形值的变化范围主要集中在 $-25 \sim 5$ mm;地面沉降值为 $0 \sim 5$ mm 的测点所占比例最高,多达 25.12%;其次为地面隆起小于 5 mm 的测点,占比约为 15.76%;占比第三的为沉降值处于 $10 \sim 15$ mm 的测点;地面沉降均值为 6.28 mm,即 $0.35\% H$ (H 为基坑深度);沉降值大于 40 mm 的测点约占 7.38%。沉降值大于 40 mm 的测点大多位于 17 号线红军营站,根据现场调查,施工期间基坑边缘存在大量施工动、静荷载作用,造成监测数据偏大。

将薄壁地连墙基坑地面变形统计结果与文献[6]研究得出的北京地铁围护桩基坑地面变形规律进行对比可知:薄壁基坑地面变形中的隆起占比(25.62%)明显高于文献[6]中的数据(11.62%);占比最大的地面沉降范围($0 \sim 5$ mm)稍小于文献

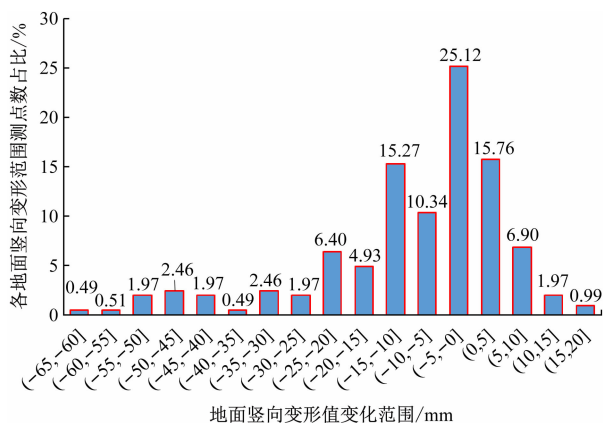


图1 各地面竖向变形范围测点数占比

Fig. 1 Proportion of the number of measuring points in each ground vertical deformation range

[6]中的数据(10~15 mm);薄壁地连墙基坑地面竖向变形值主要集中于-15~5 mm范围,而文献[6]得出的围护桩基坑地面竖向变形值大多集中于-20~0 mm范围。综上所述,本文得出的北京地铁薄壁基坑地面变形值明显较小,主要原因在于地连墙结构刚度大于围护桩结构刚度,整体变形偏小。这与围护结构变形的情况基本匹配。

根据不同开挖阶段的沉降数据,可将地面沉降划分为两种类型:隆起-沉降型和沉降型。两种类型的差异主要受场区布置、施工组织等外在因素的影响。当近基坑侧因施工需要存在施工荷载时,因开挖造成围护结构背后土体产生向下及坑内蠕变的趋势更敏感,因此地面很少呈现隆起,基本以沉降型为主。实际上,坑边土体在钢支撑预应力作用下有向外移动的趋势,致使局部地面轻微隆起,这种现象在大壁厚地连墙基坑中更为明显。随着基坑开挖深度的增加,基坑土体卸荷作用逐渐增强,地面变形由隆起转为沉降,隆起值基本在15 mm以内。

以12号线驼房营站为例,其基坑平面与典型测点位置示意图如图2所示。土方开挖期间,12号线驼房营站不同地面沉降测点处的沉降曲线如图3所示。距离基坑不同位置测点的地面沉降曲线有所差异。近基坑处监测点(距基坑约3 m)的沉降情况受支撑架设、土方开挖影响明显,部分监测点沉降曲线呈折线型。远基坑处的监测点(距基坑约8 m)虽然大部分呈现为沉降趋势,但由于距离基坑开挖线较远(约0.47H),地层扰动小,其沉降曲线较为平滑,表现为直线型。



注:DB-08-01为远基坑处地面沉降测点;DB-08-02为近基坑处地面沉降测点;GZL-06-01—GZL-06-03为钢支撑轴力测点。

图2 12号线驼房营站基坑平面与典型测点位置示意图

Fig. 2 Diagram of Line 12 Tuofangying Station foundation pit plan and position of typical measuring points

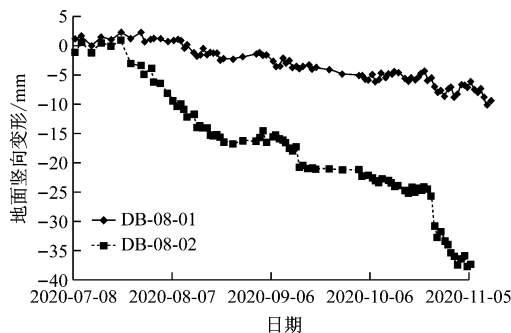
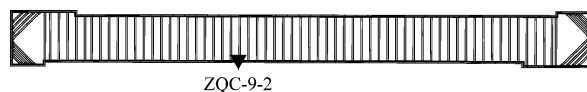


图3 土方开挖期间12号线驼房营站不同地面沉降测点处的沉降曲线

Fig. 3 Subsidence curves at different land subsidence measuring points of Line 12 Tuofangying Station during earthwork excavation

2.2 地连墙墙顶竖向变形

以3号线姚家园站为例,其基坑平面与典型测点位置示意图如图4所示,土方开挖期间3号线姚家园站地连墙测点处的竖向变形曲线如图5所示。在土方开挖阶段,坑底土体随上部土方的挖除而产生回弹变形,从而带动地连墙上浮,其上浮量受各基坑地层差异、土方施工快慢、支撑跟进的影响而略有不同,但总体上浮量变化范围为6~12 mm。土方开挖接近尾声时,地连墙墙顶竖向变形值缓慢回落,最终稳定在4~7 mm。在基坑开挖过程中,若基坑两侧地连墙竖向变形差值过大,尤其是土方收口等荷载不对称部位,可能导致基坑的支撑体系节点松动,进而影响局部支撑体系稳定,甚至危及基坑安全。



注:ZQC-9-2为地连墙竖向变形测点。

图4 3号线姚家园站基坑平面与典型测点位置示意图

Fig. 4 Diagram of Line 3 Yaojiayuan Station foundation pit plan and position of typical measuring point

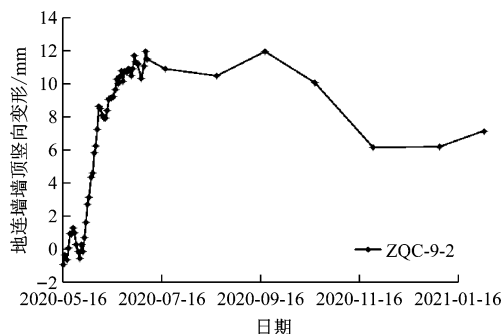


图5 土方开挖期间3号线姚家园站地连墙测点处的竖向变形曲线

Fig. 5 Vertical deformation curve of Line 3 Yaojiayuan Station diaphragm wall measuring points during earthwork excavation

综上所述,近、远基坑侧地面及地连墙变形可以分为两个阶段:①阶段1主要为土方开挖阶段。在此阶段,近基坑侧地面及地连墙均呈隆起趋势,大量土方被挖除,原地层力学平衡受到破坏,坑底土体表现为卸荷回弹趋势。同时,坑外表层土体多为杂填土,密实性差、黏聚力小,在地连墙抬升、摩擦及钢支撑预应力等多种情况作用下产生隆起,两者的隆起值基本为6~12 mm,近基坑侧地面隆起基本在坑边3~5 m范围内,远基坑侧地面则表现为沉降。②阶段2主要为底板施工及下部拆撑阶段。在此阶段,坑内外压力处于平衡状态,随着底板结构的施作,坑内结构质量增大,坑底土体受上部压力影响由回弹转为压缩,且受施工空间影响,多数车站均未架设钢倒撑。随着最下部钢支撑的拆除,坑内外土压平衡被破坏,墙后土体沿土体滑移面产生向坑内的变形趋势,从而带动坑外土体产生沉降,同时地连墙下部变形增大。由此可知,在阶段2,地连墙及近基坑侧土体表现为回落、沉降,最终变形范围稳定在4~7 mm左右,近基坑侧地面隆起缩小范围在3 m内,而远基坑侧地面则进一步发生沉降,且沉降范围逐渐增大直至稳定。两个阶段的近、远基坑侧地面及地连墙变形示意图如图6所示。

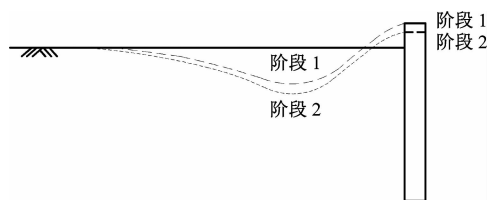


图6 两个阶段的近、远基坑侧地面及地连墙变形示意图

Fig. 6 Diagram of deformation of foundation pit near and far side ground and in diaphragm wall in two stages

2.3 地连墙墙体水平位移

基于现有的大量监测数据分析,同时结合基坑开挖过程,可将薄壁地连墙变形归纳为3种不同类型:正常抛物线型、荷载抛物线A型、荷载抛物线B型。以17号线红军营站为例,其基坑平面与典型测点位置示意图如图7所示。不同开挖日期下,3种地连墙变形类型墙体水平位移随开挖深度的变化关系如图8所示。



注:ZQT为墙体水平位移测点。

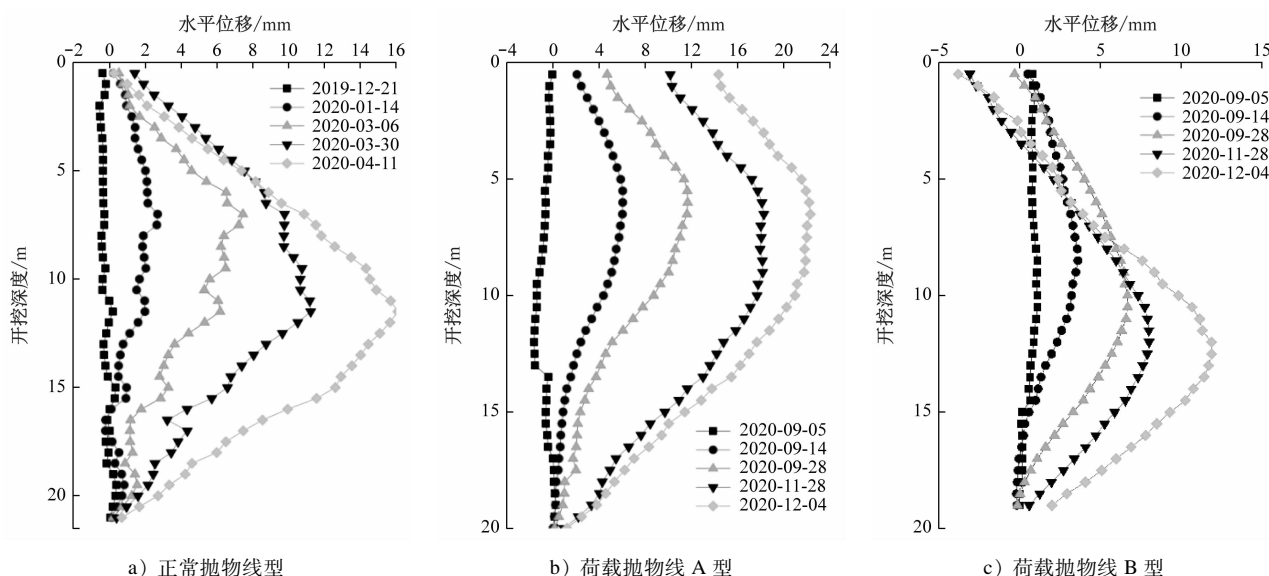
图7 17号线红军营站基坑平面与典型测点位置示意图

Fig. 7 Diagram of Line 17 Hongjunying Station foundation pit plan and position of typical measuring points

3种地连墙变形曲线的区别主要在于地连墙最大水平变形位置是否随基坑开挖的改变而改变,以及墙顶的变形方向。①正常抛物线型墙体水平位移类型较为常见;开挖过程中上部土体较为稳定,其墙顶位移向基坑内发展,但其水平变形位移量较小;墙体的最大水平变形位置随着基坑开挖而逐渐下移。②荷载抛物线A型墙体水平位移随着基坑开挖而向基坑内侧整体平移,墙体最大水平变形位置下移量较小;随着土方向下开挖,上部范围土体变形持续发展,墙顶位移随地连墙向坑内整体移动,且其水平变形量大于正常抛物线型的变形量;此类墙体变形多出现于施工荷载较多及支撑架设不及时的基础坑。③荷载抛物线B型墙顶位移与以上两种类型明显有所不同。此类基坑墙体受周边环境条件制约,存在偏压现象,且存在偏压的对侧墙顶随着墙体的内凸而逐渐向坑外移动,表现为以某道支撑(一般为第2道支撑)为支点的旋转变形特点,墙体最大水平变形位移随着基坑开挖逐渐下移。

存在偏压现象的部分基坑断面内,荷载抛物线A型、B型墙体变形往往同时出现。在部分基坑上层土体以杂填土等力学性质较差的土体为主时,随着开挖深度的增加,下部墙体变形持续增大,上部墙体表现为向坑外移动的变形趋势。同时,第1道钢支撑存在明显的卸力特点,此类变形模式与荷载抛物线B型相一致。

汇总6座案例车站中所有壁厚为600 mm的薄壁地连墙墙体位移数据,地连墙最大变形位置及最



注:水平位移以向坑内变形为正,反之则为负。

图8 不同开挖日期下3种地连墙变形类型墙体水平位移随开挖深度的变化关系

Fig. 8 Wall horizontal displacement changing with excavation depth for three diaphragm wall deformation types on different excavation dates

大水平变形量统计数据如图9所示。地连墙最大变形位置一般处于 $0.50H \sim 0.85H$ 。正常抛物线型地连墙最大变形位置相对靠上,约为 $0.50H$,而荷载抛物线B型地连墙最大变形位置相对靠下,约为 $0.85H$ 。薄壁地连墙最大水平变形量基本集中于 $10 \sim 20 \text{ mm}$,最大变形均值为 19.01 mm (约 $1.05\% H$),墙体最大水平变形量范围均值为 $0.68H$ 。根据前文分析可知,薄壁基坑地面变形与侧壁最大变形均值分别为 -6.28 mm 和 19.01 mm 。当基坑边缘存在大量施工荷载时,地连墙水平变形有所增大,约为 $30 \sim 50 \text{ mm}$ 。由此可见,薄壁基坑对坑边荷载较为敏感,在基坑超载时,其变形量急剧增长。

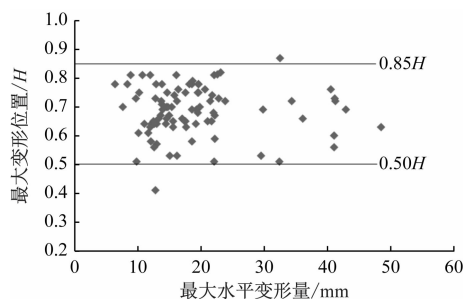


图9 地连墙最大变形位置及最大水平变形量统计数据

Fig. 9 Statistical data of diaphragm wall maximum deformation position and maximum horizontal deformation amount

将本文所得结论与已有研究成果进行对比,文

献[7]研究的上海软土基坑地连墙最大水平位移与基坑深度的比值均处于 $0.1\% H \sim 1.0\% H$,而本文研究的北京地铁薄壁地连墙水平位移与基坑深度比值约为 $0.50\% H \sim 0.85\% H$,其位移与深度比相对集中。地层岩性是影响基坑侧向变形的重要因素,根据北京、上海两地的地层岩性可知,北京地层多以粉质黏土为主,力学性质较好,因此地连墙最大水平变形范围相对稳定。

2.4 钢支撑轴力

以12号线驼房营站为例,本文选取其06号钢支撑监测断面进行数据分析。基坑施工期间,不同测点处的钢支撑轴力变化情况如图10所示。由图10可知:3道钢支撑轴力曲线存在一定的差异。第1道钢支撑(测点为GZL-06-01)的轴力随时间的变化最为明显,其变化曲线分为快速上升、快速下降、缓慢下降、快速上升4个阶段。在初始架设时,第1道钢支撑的支撑轴力随着预应力的施加和基坑开挖而呈现快速上升的趋势。但在第2道钢支撑架设时,GZL-06-01测点的钢支撑轴力因应力松弛而快速下降,随着基坑的开挖,其下降趋势趋为平缓,但在车站底板结构完成后的拆撑阶段,基坑上部的钢支撑轴力会随着基坑下部钢支撑的拆除而快速上升,甚至会超过设计值(1591 kN)并达到预警值。结合现场实际情况,多数明挖基坑受施工便利性影响而取消倒撑,导致拆除下部支撑时上部支撑轴力

超过设计值。结合监测数据,建议施工方重视倒撑施作,并落实相关措施。第2道钢支撑(测点为GZL-06-02)轴力变化规律与第1道钢支撑轴力变化规律基本一致,同样存在4个轴力变化阶段,且其受到基坑开挖和应力松弛的影响较大。但在拆撑阶段,第2道钢支撑的轴力上升相对较小,第2道钢支撑轴力在整个基坑开挖阶段明显大于其他钢支撑轴力。第3道钢支撑(测点为GZL-06-03)为最后一道钢支撑,因此不存在下部钢支撑拆除导致的应力松弛现象,其轴力监测曲线较为平缓,且第2道、第3道钢支撑轴力均未达到设计值。

分析整个变形监测过程可知:地连墙墙体最大变形处约为第2道钢支撑架设位置,因此第2道钢支撑的支撑轴力在基坑开挖中处于最大值,但在拆撑过程中,由于下部钢支撑的拆除导致基坑应力释放,应力重新分布,此时第1道钢支撑的轴力快速上升,该现象应引起相关部门的重视。

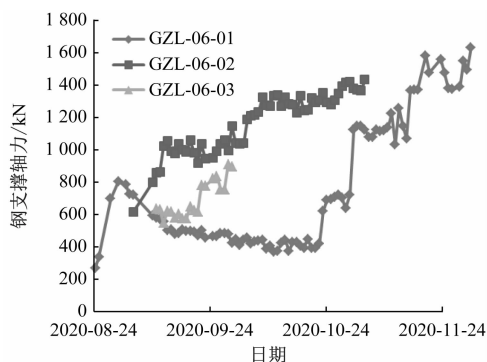


图10 基坑施工期间不同测点处的钢支撑轴力变化情况

Fig. 10 Changes of steel support axial force at different measuring points during foundation pit excavation

3 结语

通过对800个基坑变形监测点的监测数据进行统计分析,总结得出北京地铁600 mm壁厚的薄壁地连墙基坑地面沉降、墙体位移、钢支撑轴力的变化规律。主要获得以下结论:

1) 根据地面随基坑开挖时间的变形过程,将地面变形分为隆起-沉降型和沉降型两种,其主要受坑边堆载、钢支撑预应力等因素的影响。近基坑处的地面变形较远基坑处的地面变形更为敏感。薄壁基坑地面变形中,地面沉降和隆起的占比分别为74.38%和25.62%,地面隆起比例相对较高。地面竖向变形值主要集中于 $-15 \sim 5$ mm,其中:沉降值

为 $0 \sim 5$ mm的测点占比最高,约为25.12%;因施工荷载的引起沉降值大于40 mm的测点占比约为7.38%,对施工超载反映强烈。本文研究所得的地面变形规律与其他学者研究成果存在差异,地连墙基坑的地面累计变形优于围护桩结构。

2) 地连墙墙顶变形规律为先快速上升后逐渐收缓,最后趋于稳定3个阶段。在土方开挖阶段,地连墙随坑底土体隆起而产生上浮,上浮量约为 $6 \sim 12$ mm。随着车站结构的施作,地连墙逐渐回落,最终变形值趋于稳定,稳定变形值约为 $4 \sim 7$ mm。

3) 将薄壁地连墙墙体变化类型分为正常抛物线型、荷载抛物线A型、荷载抛物线B型。在邻边无施工荷载因素影响时,墙体变形表现为正常抛物线型;当基坑受施工荷载影响或支撑架设不及时,墙体变形表现为荷载抛物线A型(动载因素作用);当基坑断面存在偏压荷载时,墙体变形表现为荷载抛物线B型(静载因素叠加开挖卸载作用),部分偏压断面内,荷载抛物线A型、B型往往同时出现。

4) 地连墙最大水平变形位置一般处于 $0.50H \sim 0.85H$,最大变形量集中于 $10 \sim 20$ mm。当基坑边缘存在大量施工荷载时,地连墙水平变形增大,变形量为 $30 \sim 50$ mm,施工荷载对薄壁基坑墙体变形影响较大。地层岩性是影响结构变形的重要因素,需根据不同地层岩性进行差异化设计及施工组织。

5) 不同位置的钢支撑轴力曲线存在一定的差异。第1道钢支撑轴力变化最明显,可分为快速上升、快速下降、缓慢下降、快速上升4个阶段。随着基坑开挖及预应力的施加,第1道钢支撑轴力快速上升,在下部钢支撑架设时,由于应力松弛现象而导致上部钢支撑轴力快速下降。与其他钢支撑轴力不同的是,在后续基坑开挖阶段,第1道钢支撑轴力呈现平缓的下降趋势,而第2道、第3道钢支撑轴力逐渐增长。在拆撑阶段,基坑发生应力重分布而导致第1道钢支撑轴力快速上升,此时应加强轴力监测,施工单位应重视倒撑施作或采用其他倒撑优化方案。

参考文献

- [1] 李炜明,姚成毅,任虹,等. 地铁车站异形狭长基坑地连墙变形分类及规律研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(4): 17.
LI Weiming, YAO Chengyi, REN Hong, et al. Study on deformation classification and law of diaphragm wall of irregular long-narrow foundation pit in metro station[J]. China Railway Science, 2019, 40(4): 17.

(下转第140页)

参考文献

- [1] 谢雄耀, 王强, 齐勇, 等. 圆砾泥岩复合地层泥水盾构下穿房屋沉降控制技术研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1591.
XIE Xiongyao, WANG Qiang, QI Yong, et al. Settlement control of slurry shield tunnelling crossing adjacent buildings in mixed ground of round gravel and mudstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1591.
- [2] 张哲. 超大直径盾构下穿棚户区沉降控制技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1541.
ZHANG Zhe. Research on settlement control technology of oversized shield tunneling through sheds area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1541.
- [3] 王谦, 杨昌鸣, 陆继广, 等. 盾构近距离侧穿建筑遗产的施工技术分析及其保护措施加固效果[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 11339.
WANG Qian, YANG Changming, LU Jiguang, et al. Construction technology analysis and reinforcement measures effect of shield tunneling close side crossing architectural heritage[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11339.
- [4] 刘辉, 李彦青. 上软下硬浅覆土条件下土压平衡盾构下穿密集建筑群施工技术[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 186.
LIU Hui, LI Yanqing. Study on the construction technology for EPB shield crossing under dense buildings in upper-soft and lower-hard stratum with shallow-buried depth[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(6): 186.
- [5] YAO C, YAN Q, SUN M, et al. Rigid diaphragm wall with a relief shelf to mitigate the deformations of soil and shallow foundations subjected to normal faulting[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 137: 106264.
- [6] 李方明, 陈国兴. 南京江漫滩区间隧道盾构施工地表沉降变形特性研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 155.
LI Fangming, CHEN Guoxing. Study on deformation characteristics of ground surface settlement during shield tunnel construction of river floodplain in Nanjing[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 155.
- 收稿日期:2022-02-22 修回日期:2022-03-29 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-22 Revised:2022-03-29 Published:2024-07-10
- 第一作者:黄兴,助理工程师,15303232659@163.com
通信作者:姚超凡,副研究员,313842540@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
-
- (上接第 132 页)
- [2] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81.
XU Zhonghua, WANG Jianhua, WANG Weidong. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 81.
- [3] 徐凌, 张顶锋, 张昊. 北京地铁明挖车站典型支护结构的变形规律研究[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(1): 47.
XU Ling, ZHANG Dingfeng, ZHANG Hao. Deformation rule of typical supporting structures for Beijing Subway station with open-cut construction method[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(1): 47.
- [4] 李耀良, 袁芬. 大深度大厚度地下连续墙的应用与施工工艺[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 615.
LI Yaoliang, YUAN Fen. Application and construction techniques of great deep and thick diaphragm wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 615.
- [5] 祝建勋, 杨春阳, 张豫湘, 等. 不同支护体系在同一基坑中分段应用的变形特征分析[J]. 工程勘察, 2022, 50(1): 1.
ZHU Jianxun, YANG Chunyang, ZHANG Yuxiang, et al. Analysis of deformation characteristics of different supporting systems applied in the same deep excavation project[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, 50(1): 1.
- [6] 李淑, 张顶立, 房倩, 等. 北京地铁车站深基坑地表变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 189.
LI Shu, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Research on characteristics of ground surface deformation during deep excavation in Beijing Subway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 189.
- [7] 刘兴旺, 施祖元, 益德清, 等. 软土地区基坑开挖变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 456.
LIU Xingwang, SHI Zuyuan, YI Deqing, et al. Deformation characteristics analysis of braced excavation on soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 456.
- 收稿日期:2022-01-14 修回日期:2022-05-30 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-14 Revised:2022-05-30 Published:2024-07-10
- 第一作者:祝建勋,工程师,1033408392@qq.com
通信作者:杨春阳,工程师,553442352@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license