doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.03.006

北京地铁地连墙基坑变形规律研究

祝建勋^{1,2},杨春阳^{1,2},罗正高^{1,2},郭 涛^{1,2}

(1. 北京安捷工程咨询有限公司,北京 100050;2. 城市轨道交通绿色与安全建造技术国家工程实验室,北京 100037)

摘 要:为研究北京地铁地连墙基坑受力变形特征,采用统计法对近5年期间北京在施地铁基坑变形监测数据进 行整理分析,并按照围护结构厚度及支撑体系类型对地连墙基坑进行分类,得出不同类型基坑地表、墙体、格构 柱的变形规律以及基坑沉降槽曲线,提出地表隆起及墙体变形的新模式。结果表明:1)基坑监测范围内的地表变 形中,地表隆起占比高达20%~45%,支撑体系类别及围护结构厚度不同对地表隆起比例与最大变形范围存在不 同影响:2)根据墙顶变形方向及幅度,将墙体变形分为4种类型,开挖深度对墙体变形量的影响要大于围护结构 厚度对土体变形的约束作用;3)墙顶的变形规律以上浮为主,占统计数据的90%以上;4)格构柱同样以隆起为 主,大于墙顶隆起。

关键词:城市轨道交通;地连墙基坑;支护体系;变形监测;变形模式 中图分类号:U433 文献标志码:A 文章编号:1672-6073(2023)03-0035-08

Deformation Law of Foundation Pit Connecting Beijing Subway and Ground

ZHU Jianxun^{1, 2}, YANG Chunyang^{1, 2}, LUO Zhenggao^{1, 2}, GUO Tao^{1, 2}

(1. AGILETECH Engineering Consultants Co., Ltd., Beijing 100050; 2. National Engineering Lab for Green and Safe Construction Technology in Urban Rail Transit, Beijing 100037)

Abstract: To investigate the stress and deformation characteristics of the diaphragm wall foundation pit in the Beijing subway, a statistical method was employed to analyze the monitoring data from the past five years, focusing on the foundation pit deformation of the Beijing subway diaphragm wall. The foundation pits were classified according to the thickness of the enclosure structure and type of support system. The deformation patterns of different types of foundation pit surfaces, walls, and lattice columns, as well as the curve of the foundation pit settlement groove, were determined. Additionally, a new model for surface uplift and wall deformation was proposed. The results show that 1) within the monitoring range of the foundation pit, the surface uplift accounts for 20%~45% of the deformation. Different types of support systems and thicknesses of the enclosure structure have varying impacts on the proportion of surface uplift and the maximum deformation range. 2) Wall deformation can be classified into four types based on the direction and amplitude of the wall top deformation. The influence of excavation depth on wall deformation is greater than that of the increased thickness of the enclosure structure. 3) The primary deformation pattern of the wall top is upward, comprising over 90% of the statistical data. 4) Lattice column deformation is also predominantly uplift, which is more significant than the uplift of the wall top.

Keywords: urban rail transit; ground wall foundation pit; support system; deformation monitoring; deformation mode

1 研究背景

随着北京市对地铁车站基坑降排水的要求趋严趋

紧,北京轨道交通明挖基坑围护结构及地下水控制方 案逐渐从降水+围护桩向地连墙转变,截至目前地连 墙已成为车站基坑围护结构选型主流做法。大量学者

收稿日期: 2022-09-01 修回日期: 2023-01-28

第一作者:祝建勋,男,本科,工程师,从事轨道交通建设工程安全风险管控研究,1033408392@qq.com

引用格式: 祝建勋,杨春阳,罗正高,等.北京地铁地连墙基坑变形规律研究[J].都市快轨交通,2023,36(3):35-42.

ZHU Jianxun, YANG Chunyang, LUO Zhenggao, et al. Deformation law of foundation pit connecting Beijing subway and ground[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(3): 35-42.

对基坑变形规律进行了系统研究,不同支撑体系与不同厚度的地连墙基坑变化规律虽然大致相同,但是在与支撑体系、侧壁土体耦合作用及各项监测变形量上仍存在一定的差别,因此开展不同支撑体系与不同厚度的地连墙变形规律研究,对于实现精细化风险管控具有重要意义。

对于地连墙基坑变形控制,目前已有大量研究成 果: 徐凌等依托北京地铁6号线多座明挖车站, 对富 水地层下不同支护体系基坑变形情况做了对比,得出 了地连墙在变形控制方面存在明显优势的结论[1];祝 建勋等开展了不同支护体系在同一地连墙基坑中的变 形控制分析,研究了高度相似条件下不同支护体系对 围护结构变形的控制效果[2-3]; 李淑等以北京地铁 30 个 明挖基坑现场实测数据为依据,研究了基坑的地表沉 降规律^[4],然而,由于基坑工程具有很强的区域特性, 不同地区基坑的变形量及规律存在较大差异:徐中华 等以上海地区 93 个地连墙基坑为依托,从统计角度探 讨地下连续墙的变形特征^[5]: 李燕伟等以苏州采用 3 种 支撑布置方案的某基坑为案例,结合实测数据对基坑 变形时空效应进行研究^[6];赵华菁等采用神经网络算 法对软土地区地连墙变形动态进行了预测[7]; 许有俊 等利用控制变量法,分别研究了3种不同地层中地连 墙嵌固比与基坑稳定性的关系^[8]。

截至目前,众学者多将不同类型围护结构下的基 坑变形规律进行对比,很少关注不同壁厚与不同支撑 体系地连墙基坑的变形控制效果。近年来北京地铁车 站基坑工程中围护结构绝大多数采用地连墙,墙厚以 600、800、1000 mm 为主,按其厚度可分为薄壁、中 壁、厚壁3类,本文基于大量基坑变形监测数据,总 结了不同壁厚与不同支撑体系地连墙作用下的基坑变 形规律,提出了基坑变形的新模式,针对现有的研究 成果进行了一定的补充。

2 工程案例数据

2.1 工程案例基本信息

对北京地铁 28 座车站的地连墙基坑设计、监测等 资料进行整理,并按照围护结构厚度将其分为薄壁基坑 (600 mm)、中壁基坑(800 mm)、厚壁基坑(1 000 mm); 按支撑体系类型将其分为钢支撑基坑、混凝土支撑基 坑、锚索基坑,同时根据基坑开挖深度与支护体系关 系可知,开挖深度处于 15~20 m 之间的基坑,基坑变 形相对较小,一般采用薄壁地连墙作为围护结构,其 支撑体系多以钢支撑与锚索为主;而开挖深度为 20~ 30 m 的基坑,其变形控制受多种因素制约,则多采用 中壁地连墙,3 种支撑体系均有存在;当基坑深度大 于 30 m,土方开挖时间长,基坑变形相对较大,则往 往选用厚壁地连墙作为围护结构,同时基坑支撑以混 凝土支撑为主,很少采用锚索。案例车站分布及相关 信息见图 1、表 1。



图 1 不同厚度地连墙基坑基本信息 Figure 1 Basic information of foundation pit with

wall connection of different thicknesses

表1 案例车站基坑分布情况

 Table 1
 Distribution of foundation pit cases

 in subway stations

座

		•			
地连墙厚度	7号线	3 号线一期	12 号线	17号线	昌南线
薄壁/600 mm	1	1	3	8	—
中壁/800 mm	—	1	3	6	1
厚壁/1 000 mm	—	1	—	1	2
小计	1	3	6	15	3

2.2 地层条件

本文统计的 28 座基坑以北京地铁 17 号线及部分 12 号线为主,多位于东部地区,地层岩性和水文情 况基本相似。基坑开挖范围内,地层自上而下主要为: 杂填土、砂质粉土、粉质黏土以及粉细砂等,未涉 及卵石层。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,土层物理力学性质如表 2 所示。

3 不同类型地连墙基坑变形规律

3.1 基坑变形规律

3.1.1 地表变形

本次研究共统计近 450 个地表变形点,剔除异常 点,共得到 415 个测点的有效数据,发现统计范围内 的地表变形测点中地表隆起所占比例十分明显,处于

衣2 工层物理力子性质						
Table 2 Physical and mechanical properties of soil layer						
土层名称	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	密度/g·cm ⁻³		
人工填土	$14 \sim 20$	0~8	10~15	1.6~1.95		
秋乐心 L	72 04	10 15	22 20	2 2.05		

黏质粉土	7.2~9.4	10~15	$22 \sim 30$	2~2.05
砂质粉土	13.9~16.7	8~18	$24 \sim 29$	2~2.1
粉质黏土	2.4~15	12~30	9~29	1.89~2.07
粉土	9.7~13.7	12~18	25~32	$2.01 \sim 2.07$
粉细砂	$18 \sim 44.4$	0	25~30	$1.95 \sim 2.1$
细中砂	25~30	0	28~30	$2.02 \sim 2.08$
黏土	6.8~13.6	26~37	9.9~18	1.84~1.97

20%~45%之间,主要受支撑类型、围护结构厚度、 坑底隆起等多种因素共同影响,其中全钢支撑基坑地 表隆起比例大于混凝土支撑,且大于锚索基坑。根据 基坑地表监测断面及时程曲线可以得出地表变形的时 空规律和变形模式,即"凹槽型"和"三角型",其中 凹槽 a 型为本文首次提出,见图 2。不同变形模式在 各类基坑中占比见表 3。



表 3 不同变形模式占比

 Table 3
 Proportion of different deformation modes %

支撑类型	凹槽a型	凹槽b型	三角型
钢支撑基坑	38.3	33.8	27.9
混凝土支撑基坑	20.5	63.6	15.9
锚索支护基坑	13.3	13.3	73.4
全部基坑	31	37.7	31.3

凹槽型:在基坑开挖初期,地表变形微小,随第 1 道支撑架设,部分近基坑侧土体在较大的支撑预应 力作用下表现为隆起趋势。随基坑开挖深度的加大, 受坑底隆起影响,地连墙表现为墙体隆起,墙边土体 在摩擦力作用下表现为继续向上的趋势,隆起量增 大,开挖至基底时达到最大值;随后在拆撑阶段隆起 值产生回落,远基坑侧的地表则随基坑的开挖表现为 逐渐沉降,在开挖至基底时沉降达到相对稳定阶段, 但地表沉降的最大值不是施作基坑开挖至坑底的底 板时,而是在拆除基坑底板以上的1~2 道支撑阶段。 在拆除支撑时,土层应力状态发生改变,原有的土压 平衡被打破,地表沉降会继续加大,达到最大值,根据地表最终位置与原地表关系可以将"凹槽型"地表沉降分为 a、b 两类。

三角型:这种沉降主要发生在"悬臂型"的墙体 变形基坑中,随基坑开挖坑外土体在卸荷作用下发生 沉降,地表沉降量与距基坑距离成反比,并随基坑开 挖深度的增加其沉降量逐渐加大,在基坑底板结构施 作时沉降达到基本稳定状态,然后在上部支撑拆除时 地表继续发生沉降,此时达到最大值。

地表变形监测通常沿基坑两侧平行布置两排测 点,与基坑距离分别为3m与8m,根据监测数据可 将地表变形时程曲线分为两类,即"隆起-沉降型" 与"沉降型",见图3、图4。其中隆起-沉降型变形多 存在于近基坑侧(距离基坑3m),在基坑开挖初期地表 土体受支撑预应力、坑底隆起等因素影响逐渐上升,



图 3 隆起-沉降型





Figure 4 Sedimentation types

土方开挖结束时达到峰值,隆起量基本处于 0~25 mm 范围之内,结构施工时逐渐回落并达到平稳,最终依 变形量不同则表现为凹槽 a 型与凹槽 b 型。而沉降型 多数存在于远基坑侧(距离基坑 8 m),随基坑土方开挖 一直表现为持续沉降,最后在下部支撑拆除时达到平 稳,如近基坑侧地表点也为沉降型,则此基坑断面的 地表沉降模式为三角型。

对大量地表变形监测数据进行综合分析可知,地 表最终变形值基本处于--15~10 mm 之间,所占比例 高达 60%左右,变形均值处于--10~-5 mm 之间,变 形占比最大区间为-5~0 mm,占比约为 20%。

3.1.2 墙体变形

统计的基坑墙体变形监测点共计 200 余个, 剔除 异常点后共得到 190 组监测数据,结合基坑开挖时空 变化过程,可将地连墙变形归纳为4种不同类型,即 抛物线型 a、b、c 型与悬臂型,其中抛物线 c 型为本 文提出的新型模式,见图 5。



1) 抛物线 a 型: 符合普适性规律,开挖过程中挖 撑衔接及时,中上部土体较为稳定,其墙顶位移向基 坑内发展但位移量较小,墙体最大变形位置随基坑开 挖而逐渐下移。

2) 抛物线 b 型:墙体随基坑开挖而向基坑内侧整体平移,最大变形位置下移幅度较小,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变形量大于抛物线 a 型,此类墙体变形多出现于支撑架设滞后、施工荷载较多或基坑两侧存在偏压荷载的基坑,且多与抛物线 c 型反对称出现。

3) 抛物线 c 型:墙顶位移与前两种明显不同,此 类基坑表现为以第 2 道支撑为支点的旋转变形特点, 其墙顶随下部墙体的内凸而逐渐向坑外移动,而第 1 道 支撑存在明显的卸力情况,墙体最大变形位置随基坑 开挖逐渐下移,此类变形多发生在开挖深度较大的基 坑中,或受偏压荷载影响与抛物线 b 型反对称分布。

4) 悬臂型: 多出现于锚索基坑, 此类基坑的中上

部锚索拉力受坑外管线、地层性质等影响导致锚索预 应力损失,锚固往往达不到理想状态,进而导致中上 部墙体水平位移大于下部。

对墙体水平位移监测数据进行分析可知,地下连续 墙墙体水平位移值基本处于 10~25 mm 之间,所占比 例高达 50%左右,墙体变形均值处于 17~25 mm 之间。 同时,将墙体变形值分为不同区间,统计各变形区间内 监测数据占总数据的百分比,发现占比最大的区间为 15~20 mm,处于 20%~30%之间。不同的支撑类型以 及围护结构厚度等对墙体水平位移量有不同影响。

3.1.3 墙顶变形

墙顶的变形规律以隆起为主,占统计数据的 90% 以上,隆起最大值基本处于 10~20 mm 之间。通过墙 顶变形时程曲线可知,地连墙墙顶的变形规律可以分 为 2 种模式: "先隆起后沉降型" 和"隆起型",见 图 6、图 7。在基坑开挖过程中,基坑上部土体被挖除 导致原有力学平衡遭到破坏,坑底土体产生卸荷回弹 变形,从而带动围护结构产生隆起,部分基坑墙顶在 结构施工阶段逐渐回落。





3.1.4 宽大基坑沉降槽曲线

部分基坑因开挖面宽度较大导致支撑体系跨度增加,需要设置格构柱来保证支撑体系的作用正常发挥。 坑底土体不仅受卸荷作用产生隆起,同时还受到基坑 两侧围护结构侧向挤压变形导致隆起程度加剧,多数 格构柱隆起值处于 30~40 mm 之间,隆起量大于地连 墙墙顶隆起,且大于坑边地表隆起。根据格构柱、地 连墙墙顶以及部分近基坑侧地表变形规律和隆起量可 以得出基坑变形沉降槽,见图 8。



3.2 不同支撑体系类型

3.2.1 地表变形

不同支撑体系地连墙基坑变形特征有明显差异, 在地表变形监测中,均有一定数量的监测点表现为隆 起。钢支撑基坑地表隆起比例高达43.2%,变形均值 为-5.28 mm,变形量集中于-10~10 mm之间,占比 64.08%。其中3m处的近基坑监测点,隆起占比较高, 而8m处监测点以沉降为主。钢支撑基坑其地表变形 均值小于其他支撑类型基坑。

北京地区混凝土支撑基坑基本为第1道支撑为混 凝土撑,下部为钢支撑的混合支撑形式,这种混合支撑 形式在所有统计基坑中占比较小,约为14%,其地表 隆起占比约为33.34%,稍小于钢支撑基坑。变形均值 为-5.57 mm,变形量多处于-10~0 mm之间,占比为 41.67%。锚索多用于地铁基坑轨排井和附属结构,在 北京地铁基坑中应用占比约为18%,锚索基坑地表隆 起占比约为24.13%。变形均值为-10.88 mm,变形量 多处于-15~5 mm之间,占比56.9%。3种支撑体系 基坑地表变形统计见表4。

3.2.2 墙体变形

3 类支撑体系地连墙墙体水平位移均值分别为 17.02、24.87、17.22 mm,占比最大变形区间也不相同, 从统计结果来看,钢支撑基坑墙体变形控制效果优于锚

索,混凝土支撑基坑变形最大,墙体变形统计见表5。

表 4 不同支撑体系地表变形对比 Table 4 Comparison of surface deformation of different support systems

变形	支撑	隆起	沉降	变形均值/	占比最大变形
类型	体系	比例/%	比例/%	mm	区间/mm
1. *	钢支撑	43.2	56.8	-5.28	$-5 \sim 0$
地衣	混凝土支撑	33.34	66.66	-5.57	$-5 \sim 0$
	锚索	24.13	75.87	-10.88	$-5 \sim 0$

表 5 不同支撑体系墙体变形对比

Table 5 Comparison of wall deformation

of different support systems

变形类型	支撑体系	变形均值/ mm	占比最大 变形区间/mm	墙体最大 变形位置均值
墙体水平 位移	钢支撑	17.02	$10 \sim 20$	0.6 H
	混凝土支撑	24.87	$15 \sim 20$	0.74 <i>H</i>
	锚索	17.22	5~10	0.55 H

钢支撑基坑中墙体最大变形位置基本处于 0.3~ 0.85 H之间,变形均值为 0.6 H, 混凝土支撑基坑墙体 最大变形位置更接近基坑底部,变形均值为 0.74 H, 而锚索基坑稍有不同,其最大变形位置虽处于一定范 围内但是相对较为分散,受锚索拉拔工艺水平影响较 大,变形均值为 0.55 H, 详见图 9。



with different support systems

3.2.3 支撑轴力

根据支撑轴力时程曲线可以将第1道支撑轴力分为快速上升—快速下降—缓慢下降—快速上升4个阶段。轴力变化与土体的卸荷作用以及相邻支撑的应力松弛关系较大。根据钢支撑轴力时程曲线图(见图 10)以及各断面轴力峰值图可知(见图 11),在整个基坑开挖过程中第2、3道支撑的支撑轴力为最大值,这与前

文提到的墙体最大变形位置相关。



图 11 不同断面各层支撑轴力峰值图



第1道支撑仅在下部支撑拆除阶段其轴力较大, 达到设计值,在土方开挖阶段仅为设计值的50%左右。 第2道支撑在整个基坑施工过程中发挥较为充分,实 测轴力与设计轴力占比为31.6%~72.6%,而第3道支 撑不仅架设时间短且支撑轴力发挥不充分,最大值仅 为设计轴力的41.8%,见表6。



支撑	设计	实测轴	ョカ/kN	实测轴力与设计
	轴力/kN	最小值	最大值	轴力之比/%
第1道钢支撑	1 591	267	1 627	16.7 ~ 102
第2道钢支撑	1 967	613	1 429	31.6~72.6
第3道钢支撑	2 171	572	908	26.3~41.8

在混凝土支撑基坑中,土方开挖初期混凝土支撑轴 力快速上升,于第2道支撑架设前达到峰值,然后随 下部钢支撑架设而产生一定的应力松弛,混凝土支撑 轴力减小,在后续基坑开挖过程中,下部钢支撑轴力 随基坑深度增加而逐渐增大,而混凝土支撑轴力则呈 现缓慢下降的过程,在下部钢支撑拆撑阶段混凝土支 撑轴力又表现为小幅的增长。通过实测轴力与设计轴 力的对比可知,混合支撑区混凝土支撑表现出相对较 强的独立性,在开挖中前期混合支撑区主要依靠混凝 土支撑受力,钢支撑作用不充分。而在钢支撑区各道支 撑均发挥作用,其中第2道支撑作用更充分,见图12。



of concrete support 与其他支撑体系相比,锚索的竖向间距更小,竖

向数量较多,从图中可以看出随基坑挖深增加,4道 锚索拉力增减幅度较小,基本呈直线型,而各锚索拉 力值与基坑深度呈正比关系,第3、4道锚索最接近地 连墙墙体最大变形位置,因此其拉力明显大于上部锚 索拉力,见图13。





3.3 不同围护结构厚度

在3种壁厚地连墙基坑地表监测中,中壁基坑隆 起比例最高,厚壁基坑最低。墙体水平位移与基坑深 度呈正比关系,当基坑开挖深度越大时,墙体水平变 形均值越大,同时,不同壁厚基坑的墙体变形最大占 比区间均值依次增大,由此可知基坑的开挖深度是影 响地连墙变形量的主要因素。

3.3.1 地表变形

薄壁地连墙基坑中地表隆起比例为 31.84%, 地表 变形平均值为--7.62 mm, 地表变形多数处于--15~5 mm 之间,总计占比 54.66%。中壁地连墙基坑中地表隆起 比例高于薄壁地连墙,其占比为 44.49%, 地表变形平 均值为--4.88 mm, 地表变形多数处于--10~10 mm 之 间,总计占比 65.47%。厚壁地连墙基坑中地表隆起比 例最小,仅占 18.28%, 地表变形平均值为--8.56 mm, 地表变形多数处于--15~5 mm 之间,总计占比 77.4%, 不同围护结构厚度地表变形对比见表 7。

表 7 不同壁厚基坑地表变形对比 Table 7 Comparison of surface deformation of foundation pits with different wall thicknesses

地连墙 厚度	地表隆起 比例/%	地表沉降 比例/%	地表变形 均值/mm	地表变形最大 占比区间/mm
薄壁	31.84	68.16	-7.62	$-5 \sim 0$
中壁	44.49	55.51	-4.88	0~5
厚壁	18.28	81.72	-8.56	-10~-5

3.3.2 墙体变形

将不同壁厚墙体变形值进行统计分析(见图 14),发现其变形值占比最多的区间也不相同,薄壁基坑变形大多数处于 10~15 mm 之间,占总测点数的 39.32%。中壁基坑中,墙体变形基本处于 5~30 mm 之间,占比高达 86.45%,其中 15~20 mm 变形值占比最多,约为 27.08%。而厚壁基坑中墙体变形占比最大区间为20~25 mm,占比约 21.83%。不同厚度的围护结构其墙体变形均值分别为 18.18、19.64、26.49 mm,对比见表 8。

3 种厚度地连墙最大变形位置基本处于 0.3~0.85 H 之间,最大变形量集中于 10~25 mm 之间,薄、中、厚 壁地连墙最大变形位置均值分别为 0.59、0.61、0.7 H 处, 与基坑开挖深度呈正比。通过基坑深度与墙体水平变形 关系可知(见图 15),两者呈一定的线性相关,对于开挖 深度较大的基坑,设计往往采取更厚的围护结构进行 变形控制,但是通过数据对比发现,基坑深度是影响









 Table 8
 Comparison of surface deformation of foundation pits with different wall thicknesses





墙体变形量的主要因素,基坑开挖深度增大对变形控 制的负反馈要大于围护结构厚度对变形控制的正反馈 作用。

4 结论

根据北京地铁 28 座地连墙基坑的详细资料,分析 研究北京地区基坑开挖引起基坑变形的特性,可得出 以下结论: 在地铁基坑中,基坑地表土体隆起现象较为明显。通过监测数据以及工程实际情况可知,最终表现为地表隆起的监测点占总测点数的20%~45%之间,地表隆起的监测点多分布于近基坑侧,主要受支撑类型、围护结构厚度、坑底隆起等多因素共同影响,其中全钢支撑基坑地表隆起比例大于混凝土支撑大于锚索基坑,且地表变形均值越来越大,分别为-5.28、-5.57、-10.88 mm。将地表变形分为凹槽 a、b型和三角型3种,其中凹槽 a型为首次提出的新型模式,并总结了其分布概率。

2)将地连墙变形归纳为4种不同类型,即抛物线 a、b、c型以及悬臂型,抛物线c型为首次提出的新 模式。其中悬臂型多出现于锚索基坑之中。结合监 测数据可知,地连墙墙体水平位移值基本处于10~ 25 mm之间,所占比例高达50%左右,墙体变形均值 处于17~25 mm之间。墙体最大变形出现在下部支撑 的拆除阶段,而不是土方开挖结束时,其中抛物线b、 c型受偏压影响往往同时会反对称出现。

3) 支撑轴力变化受支撑体系类型、施工阶段以及 相邻支撑架设影响较大。在全钢支撑和混凝土支撑基 坑中,相邻支撑架设导致的应力松弛现象非常明显。 全钢支撑与混凝土支撑基坑中仅首道支撑轴力接近设 计值,基本处于 80%~100%之间,轴力发挥较为充分, 而下部钢支撑实测值与设计值相差较多,基本处于设 计值的 50%以下。

4) 地连墙墙顶的变形规律以隆起为主,占统计数 据的90%以上,隆起最大值基本处于10~20 mm之间, 墙顶变形可以分为"先隆起后沉降型"和"隆起型"两 种类型。基坑格构柱变形规律类似,隆起值稍大于围 护结构。

5) 基坑墙体变形值与基坑深度呈线性关系,基坑 开挖深度增大对基坑变形的负反馈要大于围护结构厚 度对变形控制的正反馈作用。

参考文献

- 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):47-50. 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):47-50.
- [2] 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): 1-6.

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.

- [3] 祝建勋,杨春阳,李振东,等.不同支撑形式下基坑受力 变形特征对比研究[J]. 市政技术,2022,40(3):189-194.
 ZHU Jianxun, YANG Chunyang, LI Zhendong, et al. Comparative study on foundation pit deformation under different support[J]. Municipal engineering technology, 2022, 40(3): 189-194.
- [4] 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):189-198.
 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): 189-198.
- [5] 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):81-86.
 XU Zhonghua, WANG Jianhua, WANG Weidong. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J]. China civil engineering journal, 2008, 41(8):81-86.
- [6] 李燕伟,杨涛,梅源,等.多种支撑布置方案的苏州深基坑变形实测分析[J/OL]. 岩土力学,2022,43(S2):1-9.
 LI Yanwei, YANG Tao, MEI Yuan, et al. Analysis of deformation measurement of Suzhou deep foundation pit based on multiple support layout schemesrevoke[J/OL].
 Rock and soil mechanics, 2022, 43(S2): 1-9.
- [7] 赵华菁,张名扬,刘维,等.基于神经网络算法的深基 坑地连墙变形动态预测[J].地下空间与工程学报,2021, 17(S1): 321-327.
 ZHAO Huajing, ZHANG Mingyang, LIU Wei, et al. Dynamic

prediction of diaphragm wall deflection caused by deep excavation using neural network algorithm[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(S1): 321-327.

[8] 许有俊,李泽升,李文博. 深基坑多道内支撑式地连墙 嵌固比分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(9): 779-786.

XU Youjun, LI Zesheng, LI Wenbo. Analysis of the insertion ratio of multichannel brace-type underground diaphragm wall in deep foundation pit[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2020, 53(9): 779-786.

(编辑: 傅依萱)