

文章编号: 1007-2993(2023)06-0669-07

“两墙合一”双环形支撑体系基坑变形特性分析

周尧¹ 苗向光¹ 廖文智¹ 江杰² 张鹏²

(1. 中铁建设集团南方工程有限公司, 广西南宁 530000; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

【摘要】 南宁市某基坑采用“两墙合一”双环形支撑体系, 为研究基坑开挖工况下地下连续墙及坑外浅基础建筑物的变形特性, 基于现场监测资料, 对基坑开挖引起的临近建筑物沉降、地连墙顶水平位移、竖向位移以及地连墙墙体侧向位移进行了系统分析。分析结果表明: 周边建筑物沉降受其高度、基础形式、埋深、距基坑距离以及与基坑相对位置等因素的影响程度较大; 地连墙竖向变形受基坑开挖暴露时间以及临近建筑物的影响较大, 其最大竖向位移 V_{wy} 变化区间为 $(-0.088\% \sim 0.083\%) H_c$ (H_c 为开挖深度); 近建筑物段地连墙侧移呈现为“内凸悬臂复合式”变形形态; “坑角效应”导致位于坑角处的地连墙呈现出“阶梯内凸式”变形形态; 地连墙的最大侧移变化区间为 $(0.02\% \sim 0.21\%) H_c$, 平均值为 $0.085\% H_c$ 。

【关键词】 基坑开挖; 两墙合一; 建筑物沉降; 双环形支撑

【中图分类号】 TU 476; TU 753

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.06.007

Analysis of Foundation Pit Deformation Characteristics of “Two Walls Combined into One” and Double Ring Bracing System

Zhou Yao¹ Miao Xiangguang¹ Liao Wenzhi¹ Jiang Jie² Zhang Peng²

(1. China Railway Construction Group Southern Engineering Co., Ltd., Nanning 530000, Guangxi, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

【Abstract】 To study the influence of excavation with a double ring bracing system on the deformation behavior of the diaphragm wall and shallow foundation building outside the pit under the condition of “two walls combined into one”. Taking a foundation pit project in Nanning city as an example, the settlement of adjacent buildings, the horizontal and vertical displacements of the top of the diaphragm wall, and the lateral displacement of the diaphragm wall caused by the foundation pit excavation were studied by using the site monitoring data. The results show that the settlement of a building was greatly affected by its height, foundation form, buried depth, and distance from the foundation pit. The vertical deformation of the diaphragm wall was greatly affected by the exposure time of foundation pit excavation and adjacent buildings. The maximum vertical displacement of the diaphragm wall, V_{wy} , varies between $-0.088\% \sim 0.083\% H_c$ (where H_c is the excavation depth). The adjacent part of the diaphragm wall lateral movement presents a “convex cantilever compound” deformation form; Due to the effect of the pit angle, the diaphragm wall at the pit angle presents a “stepped convex” deformation form. The maximum horizontal displacement range of the underground diaphragm wall was $0.02\% H_c \sim 0.21\% H_c$, and the average horizontal displacement of the diaphragm wall was $0.085\% H_c$.

【Key words】 foundation pit excavation; two walls combined into one; building settlement; double annular internal support

0 引言

基坑开挖通常会引起强烈的环境效应, 当基坑开挖临近老旧建筑物时, 由于老旧建筑物整体刚度差, 对不均匀沉降较为敏感, 因此对基坑周围环境变形控制要求较为严格^[1-5]。

目前, 国内外针对基坑开挖对临近建筑物的影

响做了许多研究工作。张爱军等^[6]根据影像源法计算出基坑开挖引起的坑外土体位移场。张珂峰^[7]对“两墙合一”地下连续墙基坑的支护结构变形、内力以及周边建筑物沉降进行了实测分析, 分析了不同施工工况下支护结构变形规律, 以及开挖对临近建筑的影响。赵涛等^[8]基于数值模拟, 分析了基坑施工全

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52068004); 广西重点研发计划项目(AB19245018)

作者简介: 周尧, 男, 1988年生, 瑶族, 广西灵川人, 大学本科, 工程师, 主要从事工程管理工作。E-mail: 1943303498@qq.com

通讯作者: 江杰, 男, 1979年生, 汉族, 湖北麻城人, 博士, 教授, 主要从事复杂受力环境的桩基础理论与应用方面的教学与研究。E-mail: jie_jiang001@126.com

过程的边坡土体变形、坑外地表沉降及土压力分布的规律。杜世伟^[9]对采用地下连续墙结合锚杆支护体系的基坑进行模拟,分析了基坑开挖过程中墙体变形及锚杆受力规律,并对相应的参数进行优化。张波等^[10]依托工程实例研究了基坑开挖引起的内支撑轴力以及围护结构变形的变化规律。赵斌^[11]基于工程监测数据,分析了基坑开挖引起的地表沉降及支护结构的变形规律,并对混合支护形式下的基坑稳定性进行了评价。

地连墙支护体系的受力和变形较为复杂,并且呈现出明显的时空效应,支护体系施工过程中的受力和变形特征与设计情况往往存在较大差异^[12-14]。当基坑尺寸较大时,采用传统内支撑形式将有可能出现稳定性或经济性等问题。而环型支撑结构受力以受压为主,能充分利用混凝土的抗压强度,同时由于基坑内部较少设置支撑杆件,可方便施工作业,弥补了传统内支撑形式的不足^[15]。然而,目前的研究主要集中于传统内支撑形式,例如对撑、角撑或边桁架等支撑体系,而对于地下连续墙结合双环形支撑体系的研究较为缺乏。同时,双环形支撑体系对基坑施工过程中的不均匀受力较为敏感,需合理的控制基坑周边的不均匀荷载对支撑体系的不利影响^[16]。因此对“两墙合一”条件下采用双环形支撑体系的基坑的受力变形特性进行研究是十分必要的。

南宁市某基坑采用“两墙合一”地下连续墙+双环形支撑体系,以该基坑工程为依托,基于基坑施工全过程中的现场监测数据,系统地分析基坑开挖引起的临近建筑物沉降、地连墙顶水平位移、竖向位移以及地连墙墙体侧向位移的变形特性,可为类似工程设计提供参考。

1 工程概况

1.1 基坑概况

依托工程位于南宁市主城区,建筑场地平整,周边环境条件复杂,分布有建筑物、市政干道及电缆等

市政管线。基坑开挖深度约为 14.7 m,其长边约为 181.5 m,短边约为 79.9 m,支护周长约 520 m。基坑竖向支护结构采用地下连续墙(兼做地下室外墙),地下连续墙厚度为 0.8 m,深 21 m,墙体混凝土强度为 C30;基坑采用双环形内支撑体系,沿基坑竖向设两层支撑,内支撑截面尺寸为 1000 mm×1000 mm,均采用现浇钢筋混凝土结构,混凝土强度等级为 C30;立柱采用格构钢立柱,共布置 56 根,立柱桩采用机械成孔灌注桩,桩径 1 m,C30 混凝土浇筑。基坑围护结构部件材料参数如表 1 所示,基坑布置见图 1。

表 1 围护结构部件材料参数

构件名称	截面尺寸/m	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量E/MPa	泊松比
地下连续墙	0.8×21	25	3.25×10 ⁴	0.2
支撑梁	1.0×1.0	22	3.15×10 ⁴	0.2
腰梁	1.0×0.8	22	3.15×10 ⁴	0.2
冠梁	0.8×0.8	22	3.0×10 ⁴	0.2

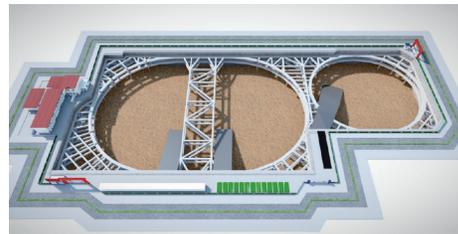


图 1 基坑布置示意图

1.2 工程地质条件

根据勘察资料显示,基坑施工影响范围内各土层岩性由上到下大致为:杂填土(Q₄^{ml})、河流冲积(Q₃^{al})形成的粉质黏土、圆砾等,下伏基岩为新近系(N)北湖组湖相沉积的泥岩、粉砂岩等。具体土层物理力学参数如表 2 所示。

场地地下水主要为上层滞水、孔隙承压水和孔隙裂隙承压水。上层滞水主要分布于杂填土层中,地下水位埋深为 0.40~1.60 m,对工程施工影响较小。孔隙承压水赋存于圆砾层中,水量较丰富,略具承压

表 2 土层物理力学参数

土层名称	土层厚度/m	天然重度/(kN·m ⁻³)	压缩模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	0.50~2.40	18		0.45	6	8
粉质黏土	1.50~2.60	19.5	5	0.24	22.8	9.5
圆砾	2.10~7.90	22.5	15	0.24	0	35
全风化粉砂质泥岩	1.70~10.50	20	9	0.24	25.4	6.5
强风化粉砂质泥岩	0.90~5.60	20.3	12	0.24	65.6	11
中等风化粉砂质泥岩	0.60~26.20	21	15	0.24	90	15
泥质粉砂岩	0.90~15.30	21.5	18	0.24	40	35

性,该层地下水稳定水位埋深为 2.3 ~ 5.0 m,对施工影响较大,施工时要做好防涌防塌措施。孔隙裂隙承压水赋存于泥质粉砂岩的孔隙内,水位埋深约 6.8 ~ 33.8 m,其下部具承压性,各含水层承压水头不一。

1.3 基坑支护设计

1.3.1 围护结构设计

由于该工程地下连续墙为“两墙合一”,因此地下连续墙施工需兼顾围护结构的要求和地下室结构的要求,具体施工要求为:①厚度允许偏差控制为 ± 10 mm以内,槽段深度允许偏差为 ± 100 mm以内,槽段垂直度允许偏差为 1/300 以内,沉渣厚度 ≤ 100 mm,地连墙表面平整度 ± 100 mm;②在地下连续墙顶部及槽幅分缝等位置设置结构构件进行连接,以满足地下连续墙在正常使用阶段的受力和变形要求;③在连续墙顶部设置贯通、封闭的压顶圈梁,压顶圈梁上须预留与上部后浇筑结构墙体连接的插筋,以此增强地连墙纵向的整体刚度;④加强地连墙与结构构件的连接部位以及地连墙墙幅与墙幅之间接头位置的防渗漏处理措施。

1.3.2 支撑体系设计

根据基坑形态,可将其简化为 2 个长方形区域,同时考虑到周边存在较多既有建筑,内支撑需要承受较大的附加压力,考虑到环形支撑结构在附加荷载作用下可将外力转换为环撑的轴力而不产生弯矩,因此内支撑采用环形支撑结合辐射杆的结构形式。但若环梁受力不均匀,将产生较大的剪力和弯矩,造成结构失稳,为了充分发挥环撑抗压性能好的特性,避免区受剪受弯引起结构失稳,设计利用布置部分角撑及辐射杆来调整内撑体系内力,尽量使环撑处于小偏心受压状态。

1.4 施工与监测方案

“两墙合一”地下连续墙在垂直度控制、平整度控制、墙底注浆及接头防渗等几个方面的施工质量控制比临时围护地连墙要求更高,其中墙底注浆更是“两墙合一”地下连续墙控制竖向沉降和提高竖向承载力的关键措施。

根据该基坑支撑布置形式及规模,基坑挖土采用“中心岛”挖土方式,即先挖四周后挖中心岛的挖土方式,以便及早形成支撑桁架,同时尽量减少基坑无挖土支撑的暴露时间,严格控制基坑变形。基坑共分 3 层 4 次开挖,每层挖土以每道支撑底标高为分界线,分别为 -5.2 m、 -9.1 m、 -14.7 m。具体施工进度见表 3。

基坑开挖卸载将打破坑内外水土压力平衡,必

然引起支护体系受力和周围环境的变化。因此,为了保障基坑及其周边环境安全,针对支护结构与临近建筑物布置了多个监测点,具体点位布置如图 2 所示。其中临近建筑物共设置了 16 组监测点,地连墙顶设置了 25 组监测点,地连墙墙体设置了 20 组监测点。

表 3 施工进度

工况	开始日期 (年-月-日)	结束日期 (年-月-日)	内容
1	2020-11-23	2021-01-10	导墙施工
2	2021-01-11	2021-05-08	地连墙施工
3	2021-05-30	2021-06-14	冠梁施工
4	2021-06-15	2021-06-27	开挖第一层土体至 -5.2 m
5	2021-06-28	2021-08-17	第一道内支撑施工
6	2021-08-18	2021-09-13	开挖第二层土体至 -9.1 m
7	2021-09-14	2021-10-25	第二道内支撑施工
8	2021-10-26	2021-12-10	开挖第三层至 -14.7 m
9	2021-12-11	2022-03-01	基础底板施工
10	2022-03-02	2022-04-01	地下室三层结构

2 实测变形分析

2.1 建筑物沉降监测分析

图 3 为基坑开挖到底后(即工况 9)周围各建筑物的累计平均沉降曲线。由图 3 可以看出,在各建筑物中,建筑物 G 的沉降量最大,为 18.4 mm,建筑物 P 的沉降量最小,为 0.9 mm。从空间位置上分析,可以看出,离基坑较远的建筑物 B、C、M 以及位于基坑坑角处的建筑物 A、D、E 的沉降量都相对较小,而位于基坑中部位置的建筑物 G、H 的沉降量则相对较大。

为了分析基坑开挖全过程中建筑物沉降的变化情况,特选取 A 楼、G 楼、J 楼、L 楼为代表性建筑,绘制其沉降变化曲线(见图 4),图 4 中沉降量 >0 表示监测点下沉,沉降量 <0 表示监测点上浮。由图 4 可以看出,随着土层的开挖,各建筑物的沉降呈增加趋势,当底板施工完成后沉降变化曲线呈下降趋势。从沉降的增长速度来看,在开挖第三层土和基础底板施工期间,其沉降增长相对较快。因此,在基坑开挖后期,应当加大监控频率,适当控制土体开挖速度,防止临近建筑物出现过大沉降和变形。

通常而言,地连墙施工引发周边环境变形程度主要与沟槽的宽度、深度、长度以及泥浆护壁效果紧密相关。本基坑工程主要采取设置导墙以及改善泥浆性能等措施控制变形。其中导墙采用倒“L”形钢筋混凝土导墙,当遇到建筑物基础时,使用深导墙结

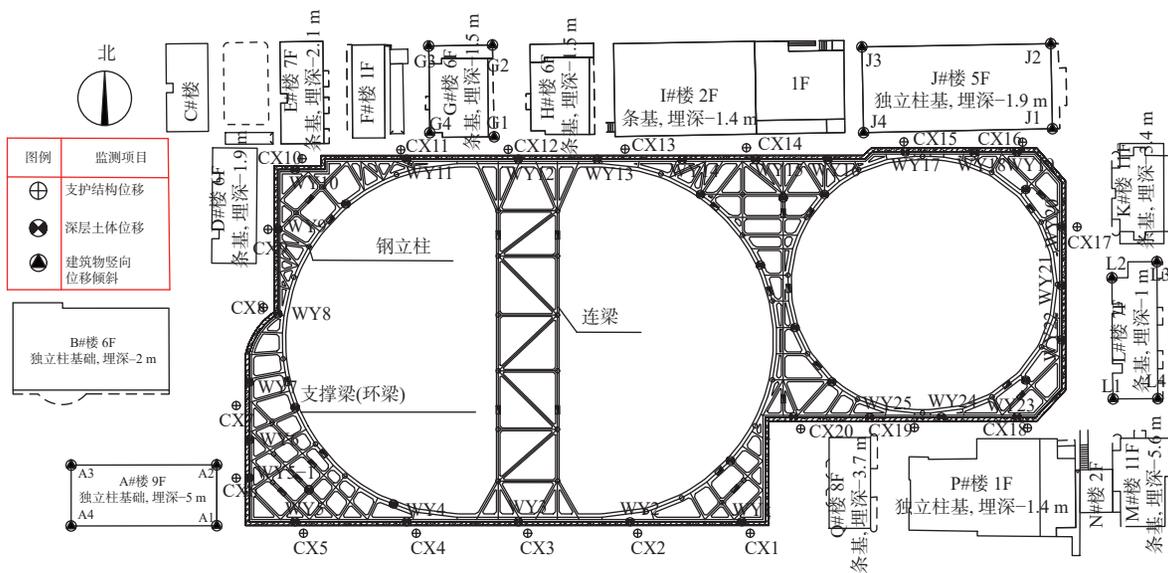


图2 基坑支护及监测布置示意图

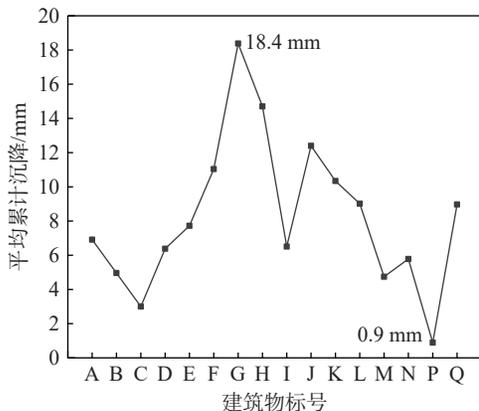


图3 各个建筑物累计平均沉降曲线

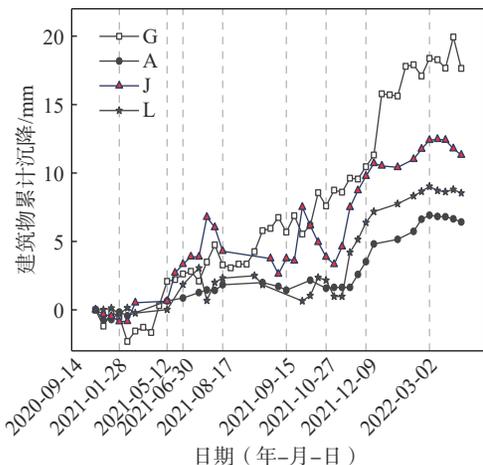


图4 建筑物累计平均沉降变化曲线

构形式,同时在两侧导墙之间设置2道 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的混凝土支撑,混凝土支撑竖横间距均为 2 m 。由图4可以看出,在地连墙施工期间,建筑物沉降增大趋势并不明显,表明所采取的控制措施能有效控制变形。

针对建筑物不均匀沉降的变化情况,选取建筑

A楼、G楼、J楼、L楼进行分析,结果如图5所示。由图5(a)可以看出,建筑物A的角点A1的沉降量最大,角点A3的沉降量最小,建筑物表现为由A3沿对角线向A1方向发生倾斜。由图5(b)可知,建筑物G的4个边角测点的沉降曲线呈现出明显的区别,其中G1、G4相对较大,而G2、G3相对较小,这表明建筑物G向更临近基坑一侧倾斜。如图5(c)所示,建筑物J的沉降变化与建筑物G较为相似,同样为沿着更临近基坑一侧(J1、J4侧)倾斜。从图5(d)可以看出,建筑物L的4个边角测点的沉降相差较小,沉降较为均匀。

2.2 地连墙顶位移监测分析

2.2.1 地连墙顶水平位移分析

地连墙顶共计布置25个位移监测点,为了分析基坑开挖全过程中地连墙顶水平位移变化规律,取基坑南侧无临近建筑物的测点WY3、WY4和临近建筑物A、G、J、L处的地连墙顶位移监测点的监测数据进行分析,分析结果如图6所示。在图6中,位移量 >0 表示观测点向基坑内侧位移,位移量 <0 表示观测点向基坑外侧位移。总体上看,各测点水平位移均大于0,即墙顶水平位移都朝向基坑内侧,当基础底板施工完成后,墙顶水平位移增长速度也随之减缓。由图6可知,临近建筑物G处的监测点位WY12的累计水平位移量相对最大,其最大位移量达到了 37.3 mm ,而临近建筑物A的监测点WY5-1、WY6以及临近建筑物L的监测点WY21、WY22的累计水平位移量则相对较小,基坑南侧无临近建筑物的测点WY3、WY4的水平位移量处于各个点位移量的中间值。

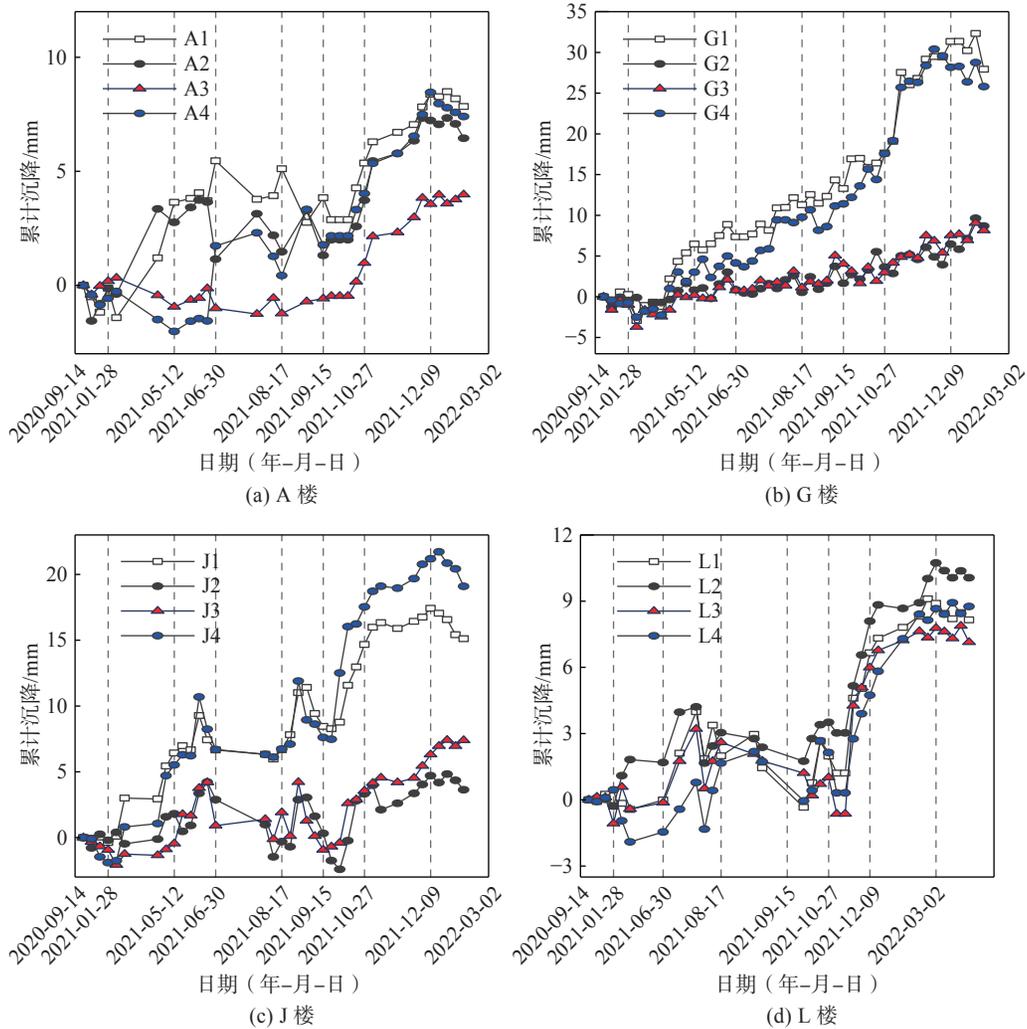


图5 建筑物边角累计沉降变化曲线

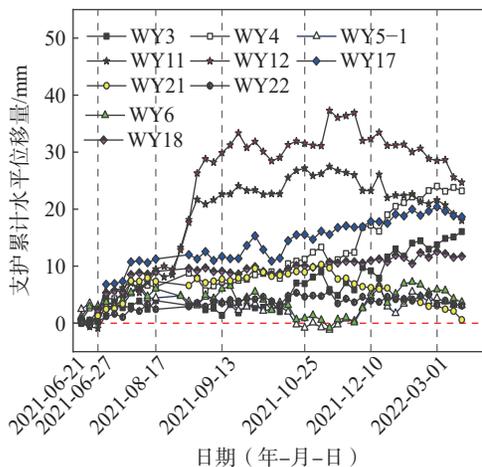


图6 地连墙顶水平位移变化曲线

2.2.2 地连墙顶竖向位移分析

所选取的地连墙顶位移监测点竖向位移变化曲线见图7,其中沉降量 >0 表示观测点下沉,沉降量 <0 表示观测点上浮。整体上看,土体开挖后的内撑施工阶段以及基础底板施工阶段,地连墙竖向位移增长幅

度相对较大,说明地连墙竖向变形受基坑开挖暴露时间影响较大。具体来说,建筑物J附近的监测点WY17、WY18的累计竖向位移量相对最大,其最大位移量达到了19.7 mm,并且在基坑施工全过程中其竖向位移表现为下沉。同时,建筑物L附近的测点WY21、WY22的竖向位移量在0值线上下轻微浮动,无明显的上浮或下沉。而测点WY11、WY12在开挖第三层土体之前,其测点位移趋势表现为上浮,随着第三层土体的开挖,其位移趋势变为下沉。而测点WY3、WY4、WY5-1、WY6在基坑开挖全过程中,几乎都表现为上浮,只是在基础底板施工完成后有所下沉。

地连墙墙顶竖向位移与基坑开挖深度的关系如图8所示。地连墙的最大竖向位移 V_{WY} 变化区间为 $(-0.088\% \sim 0.083\%)H_e$ (H_e 为开挖深度)。整体上,在开挖第一层土期间,地连墙竖向位移以下沉为主,开挖第二层土期间以上浮为主。然而开挖第三层土期间,基坑北侧测点以下沉为主,基坑南侧无临近建筑的测点竖向位移以上浮为主。

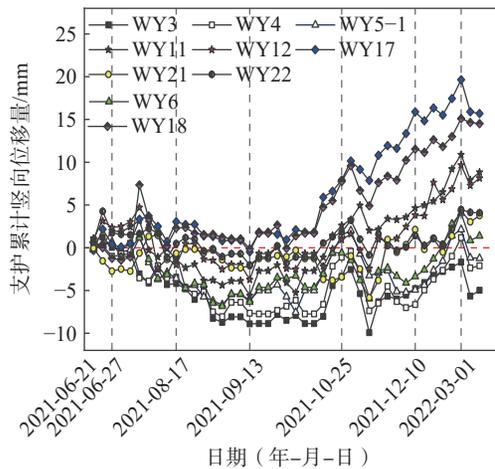


图7 地连墙顶竖向位移变化曲线

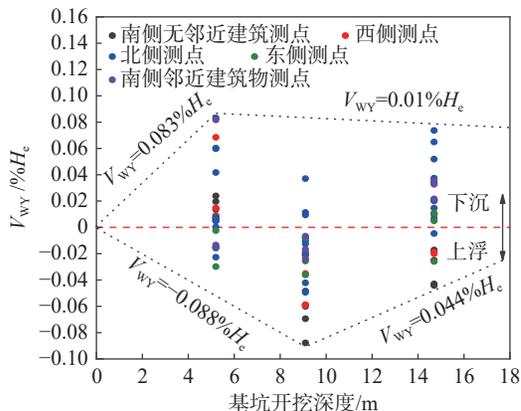


图8 地连墙竖向位移和开挖深度的关系

2.3 地连墙侧移分析

基坑监测共布置 20 个地连墙侧移监测点,为了分析临近建筑物对地连墙侧移变化规律的影响,选取基坑南侧无临近建筑物的测点 CX3、CX4、临近基坑拐角处的测点以及临近建筑物 A、G、J、L 的测点进行分析,结果如图 9 所示。图中位移量 >0 表示测点向坑内位移,位移量 <0 表示测点向坑外位移。由图 9 可以看出,临近建筑物的相关测点侧移曲线在整体上呈现为“内凸悬臂复合式”变形形态,即地连墙顶部发生一定的位移,随后在地连墙中部位置向基坑坑内发生较大位移,最后在基坑底部变形收敛。

图 10 为临近基坑坑角处地连墙侧移变形曲线。可以看出,除测点 CX20 外,其他各测点的位移曲线呈现“阶梯内凸式”变形形态。主要由于坑角效应的影响,抑制了坑角临近区域位移的发展,导致地连墙侧移在一定深度范围内出现不平滑减小。测点 CX20 的位移变形曲线总体上呈“三角形”形态,其位移量为临近坑角处的各个测点中的最大值,最大位移出现在第二道支撑附近。这是由于 CX20 位于基坑阳角附近,其两侧土体出现临空面,导致该处土体和

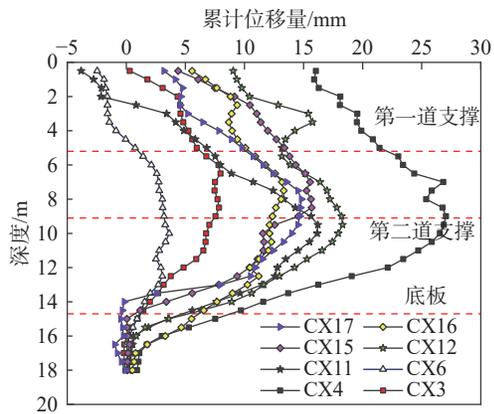


图9 临近建筑的地连墙侧移变化曲线

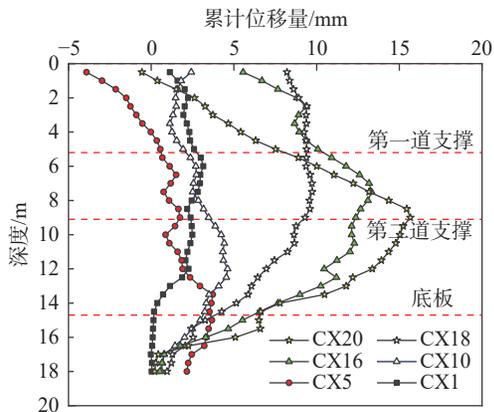


图10 临近坑角处地连墙侧移变化曲线

支护结构的内力更为复杂,更容易造成应力集中。

对基坑开挖完成后各个测点的地连墙最大侧移进行分析,结果见图 11。由图 11 可知,临近建筑物的地连墙侧移量相对较大,基坑南侧无临近建筑物的测点侧移量相对较小,但是 CX4 处侧移量相对较大,这是由于该处临近基坑出土口受到的扰动影响较大。地连墙最大侧移值出现在测点 CX19 处,为 28.91 mm。同时可以看出,由于坑角效应的作用以及内部支撑对支护结构水平位移的限制,临近坑角的测点水平位移量相对基坑中部处的测点而言都有所减小。

图 12 为地连墙的最大侧移 δ_{CX} 与基坑开挖深度 H_e 的关系曲线。可以看出地连墙最大侧移随基坑开挖深度的增加而增大,地连墙的最大侧移 δ_{CX} 变化区间为 $(0.02\% \sim 0.21\%) H_e$, 其平均值为 $0.085\% H_e$ 。

3 结论

(1) 基坑周边建筑物沉降受其高度、基础形式、埋深、距基坑距离以及与基坑的相对位置等因素的影响程度较大。位于基坑中部位置的建筑物沉降普遍大于位于基坑坑角处的建筑物沉降。临近建筑物极易出现不均匀沉降,受土体卸荷的影响,建筑物存在朝向基坑一侧倾斜的趋势。

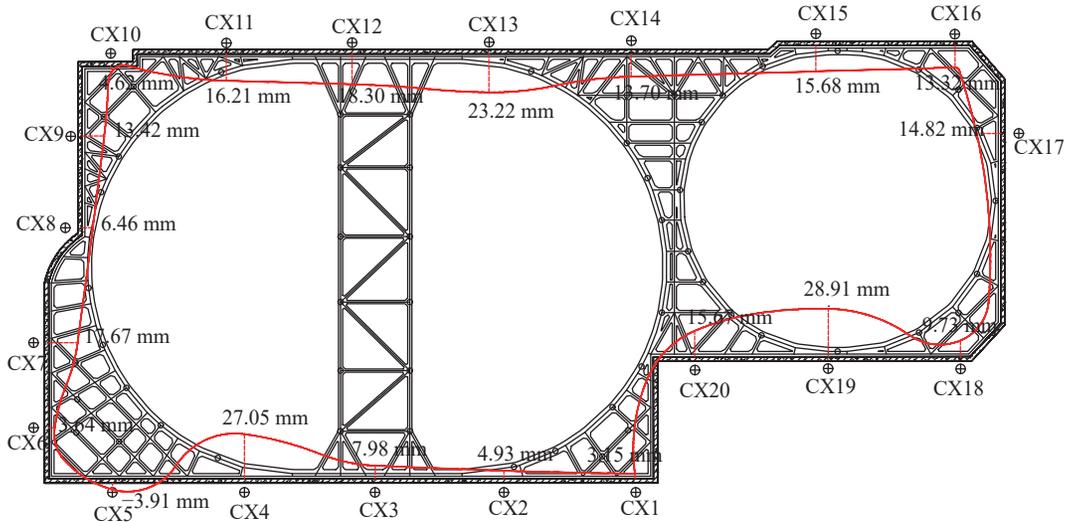


图 11 地连墙最大侧移变化曲线

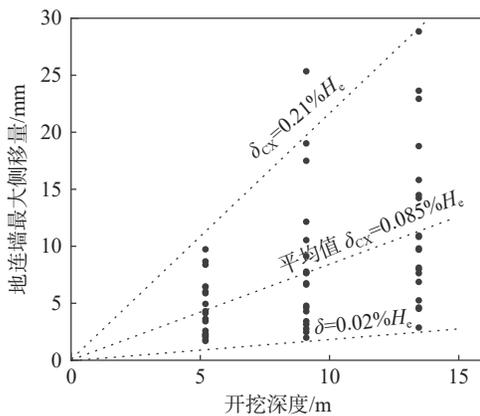


图 12 地连墙最大侧移量与开挖深度的关系

(2)地连墙竖向变形受基坑开挖暴露时间以及临近建筑物的影响较大,地连墙的最大竖向位移 V_{wy} 变化区间为 $(-0.088\% \sim 0.083\%) H_c$ 。在开挖第一层土期间,地连墙竖向位移以下沉为主,开挖第二层土期间以上浮为主。然而开挖第三层土期间,基坑北侧地连墙竖向位移以下沉为主,基坑南侧无临近建筑处的地连墙竖向位移以上浮为主。

(3)受临近建筑物影响,近建筑侧地连墙的侧移呈现为“内凸悬臂复合式”变形形态;而位于坑角处的地连墙,由于受坑角效应的影响,地连墙侧移呈现出“阶梯内凸式”变形形态。地连墙的最大侧移变化区间为 $(0.02\% \sim 0.21\%) H_c$,平均值为 $0.085\% H_c$ 。

参 考 文 献

[1] 郑刚,朱合华,刘新荣,等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 1-24.
 [2] 韩健勇,赵文,李天亮,等. 深基坑与临近建筑物相互影响的实测及数值分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(4): 149-156.
 [3] 魏涛. 临近建筑物桩基对基坑开挖的影响[D]. 长沙:

中南大学, 2010.

[4] 万星,戈铭,贺智江,等. 南京软土地区基坑墙体变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 85-88.
 [5] 贾曾潘,陈保国. “两墙合一”条件下地铁车站深基坑变形特性[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(3): 47-54.
 [6] 张爱军,莫海鸿,李爱国,等. 基坑开挖对临近桩基影响的两阶段分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2746-2750.
 [7] 张珂峰,吴昌将,易礼. “两墙合一”地下连续墙基坑开挖对临近建筑的变形影响与实测分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(20): 128-132.
 [8] 赵涛. 基坑开挖引起支护结构土压力分布研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2016.
 [9] 杜世伟. 深基坑地下连续墙加锚杆支护机理分析和设计优化[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
 [10] 张波,钱德玲,蒋玉敏. 深基坑开挖变形控制及对周边建筑物影响的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(11): 1513-1517.
 [11] 赵斌. 混合支护下深基坑开挖引起的近接建筑物稳定性分析[J]. 人民长江, 2021, 52(S1): 281-286,308.
 [12] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
 [13] 胡勇,李云安,李波,等. 承压水位变动下深大基坑空间效应离心试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 1999-2007.
 [14] 丁勇春,王建华,徐中华,等. 上海软土地区地铁车站深基坑的变形特性[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(11): 1871-1875.
 [15] TAN Y, WANG D. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. II: top-down construction of the peripheral rectangular pit[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11): 1894-1910.
 [16] 梁发云,赵鸣一,陈尚荣. 软土地区深大基坑双环形支撑体系受力变形特性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(S1): 173-177.

收稿日期: 2022-10-23