

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.03.004

复杂周边环境下深基坑支护方案选型及数值分析

谢 昊¹, 李大华¹, 张朋仁²

(1. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽建工三建集团有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 为研究复杂周边环境下多种基坑支护形式的共同作用效果, 以某周边建筑环境复杂深基坑项目为例, 通过基坑支护经验与理论计算分析, 最终采用排桩+斜撑、内支撑、预留反压土等多种支护方式, 对支护桩顶部位移、深层水平位移、支撑内力、周边竖向位移进行监测, 并结合MIDAS GTS NX进行有限元分析, 对实际监测数据与有限元分析数据进行对比分析, 结果显示较为吻合, 表明多种支护方案结合合理可靠, 达到了支护效果。

关键词: 深基坑; 基坑支护; 斜撑; 内支撑; 反压土; 有限元分析

中图分类号: TU473.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)03-0024-07

引文格式: 谢 昊, 李大华, 张朋仁. 复杂周边环境下深基坑支护方案选型及数值分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(3): 24-30.

Selection and Numerical Analysis of Deep Foundation Pit Support Scheme Under Complex Surrounding Environment

XIE Hao¹, LI Dahua¹, ZHANG Pengren²

(1. School of Civil Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230601, China;

2. Anhui Construction Engineering Sanjian Group Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: In order to study the interaction effect of multiple foundation pit support forms in complex surrounding environment, with a deep foundation pit project with complex surrounding building environment taken as an example, based on the analysis of pit support experience and theoretical calculations, a variety of support methods has thus been adopted including row piles + slant support, internal bracing, reserved back pressure soil, etc. A monitoring has been made of the top displacement, deep horizontal displacement, internal support force, and vertical displacement around the support piles, with a finite element analysis conducted by using MIDAS GTS NX, followed by a comparison and analysis of the actual monitoring data with the finite element analysis data. The results show a good agreement, indicating that the combination of multiple support schemes is reasonable and reliable, thus achieving the support effect.

Keywords: deep foundation pit; foundation pit support; slant support; internal bracing; back pressure soil; finite element analysis

0 引言

目前城市建设发展迅猛, 城市建筑密度增大, 造

成拟建基坑周边建筑环境复杂, 因此学者们针对各特性基坑支护进行了相关研究。顾问天^[1]通过3项工程案例对城市中心超大面积深基坑支护提出了合理

收稿日期: 2023-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52374073); 马鞍山首建工程咨询有限公司与安徽建筑大学合作基金资助项目(HYB20220091)

作者简介: 谢 昊, 男, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为工程建设管理与施工技术, E-mail: 2263124058@qq.com

通信作者: 李大华, 男, 安徽建筑大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为工程结构现代施工技术, E-mail: ldh2006@163.com

的支护选型方案;姜兴良等^[2]以定性分析与复合计算相结合,对支撑式结构、双排桩式结构及箱涵顶进出对复杂场地条件下的基坑支护进行了可行性验证;夏洪春等^[3]讨论了复合型支护结构在不同桩间距下支护桩的变形及受力情况,得到了复合型支护结构能有效减小灌注桩的水平位移与弯矩等结论;金雪峰等^[4]对某深基坑双排桩+中心岛(预留土坡)+竖向钢管斜支撑组合支护进行了模拟分析,确定了该组合支护合理可靠;肖淑君等^[5]对某深大基坑进行了排桩+内支撑、排桩+锚索、排桩+钢斜撑、喷锚等多种支护组合下的安全可靠性分析。也有关于多种复杂环境下基坑支护方案研究^[6-7],以及各种支护形式对基坑变形的影响分析^[8-12]。但针对具体的基坑支护工程,由于每个工程的特点和周边环境各不相同,无法直接复制已有的经验。

目前深基坑、深大基坑往往采用排桩+内支撑、排桩+锚杆等某单一支护形式,但基坑支护具有一定针对性,如狭长区域多采用内支撑,周边地下空间富余多采用锚杆,偏压情况多采用土体加固等。对此可根据基坑特点结合多种支护方式进行支护。本文以一深基坑为例,通过监测结果,并结合有限元计算分析复杂周边环境下多种支护方式结合的实施效果,以为类似基坑支护工程提供参考。

1 工程概况

中国科学院临床研究院建设项目位于合肥市蜀山区,拟建建筑用地面积 27 773.3 m²,项目开挖基坑外轮廓为切角矩形,基坑开挖深度为 8.3~14.8 m,基坑北侧开挖宽度为 147.5 m,西侧为 223.9 m,东侧为 70.4 m,南侧为 28.0 m,东南侧为 166.7 m,基坑周长为 636.5 m。基坑周边环境如图 1 所示。拟开挖深基坑周边环境复杂:基坑西侧为医院群楼,基坑距离建筑约 8 m;北侧为已建天鹅湖路,基坑距离道路边线约 11.7~18.1 m;东南侧为已建合作化路及金寨路高架,合作化路为城市主干道,车辆人员来往密集,基坑距离道路边线约 8.5~35.8 m。

1.1 工程地质条件

项目拟建场地属于江淮波状平原地貌单元,地貌属岗地坳沟,地面高程为 29.84~34.01 m,最大高程差为 4.17 m。拟建场地地基土自上而下构成层序及平均厚度如下:①层杂填土(约 3.96 m),杂色,湿,以黏性土为主;②层粉质黏土(约 3.07 m),灰黄、灰褐色,湿,可塑~硬塑状态;③层黏土(约 12.11 m),灰褐、黄褐、灰黄色,湿,硬塑状态;④层粉质黏土(约 8.88 m),灰黄色、黄褐,湿,硬塑状态;

⑤层全风化泥质砂岩(约 1.77 m),褐红、灰黄色,稍湿,密实状态。地勘基坑参数标准值见表 1。

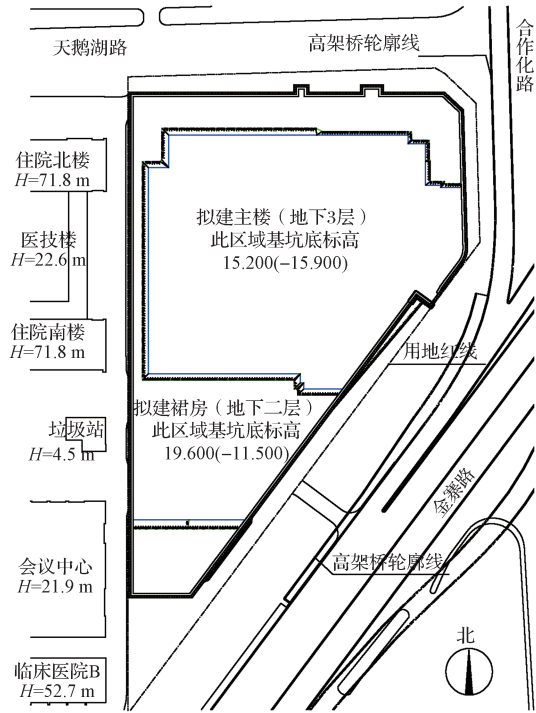


图 1 基坑周边环境示意图

Fig. 1 Map of foundation pit surroundings

表 1 地勘基坑参数标准值

Table 1 Criteria for ground investigation pit parameters

岩土名称	重度 / (kN·m ⁻³)	内聚力 标准值 /kPa	内摩擦角 标准值 / (°)	基底 摩擦因数
①层杂填土	18.0	8.0	10.0	—
②层粉质黏土	19.7	44.7	15.5	0.24
③层黏土	20.2	70.1	16.8	0.28
④层粉质黏土	20.2	50.7	17.8	—

1.2 水文地质条件

拟建场地水文地质条件一般,地表水主要由大气降水补给,地下水主要由①层杂填土中的上层滞水以及⑤层及以下的裂隙水(主要由地下径流渗透补给)构成。场地地下水的上层滞水静止水位埋深为 1.00~2.00 m,裂隙水水位标高为 21.9~29.4 m,场地地下水位变化幅度为 1.50 m 左右,综合考虑认为地下水对施工影响相对较小。

2 设计方案选型

2.1 基坑支护设计基本情况

基坑轮廓为切角矩形,基坑西侧开挖宽度约为北侧的 1.5 倍。由于合作化路、金寨路高架桥的空间位置,基坑南侧长度受影响较大,产生基坑狭窄区域,对基坑开挖过程中的整体稳定性存在很大影响;基坑

距离作为主干道的合作化道路、车流量较大的金寨路高架较近,需控制基坑开挖对道路沉降的影响。基坑西侧的建筑情况较为复杂,由于医院建筑高度、布局设置使得基坑西侧各段应力分布不同,对支护方式及支护密度需分区考虑;医院建筑与基坑边界间距 8 m,基坑西侧开挖长达 223.9 m,跨度较大,医院建筑与拟建建筑都存在地下建筑,且拟建建筑包含开挖区域、开挖深度不同的地下 3 层,支护方式较为受限。结合工程基坑开挖对周围环境的影响,在开挖过程中,需要对周围建筑以及道路的沉降变形进行实时监测,以保证周边建筑安全及正常使用。

2.2 设计方案筛选

根据基坑平面形状、周边环境的复杂度,综合分析如下,项目基坑的外形较为规整,可选择的围护结构主要为连续墙和排桩。采用排桩作为围护结构则有排桩+锚杆支护、排桩+内支撑支护及排桩+斜撑支护;采用连续墙主要配合逆作法进行施工作业。

2.2.1 方案比选确定

1) 连续墙配合逆作法。该项目地下建筑部分为地下二层,存在基坑部分开挖深度在 10 m 以内,连续墙对于构成主体结构部分有一定的浪费,不符合经济效益;该基坑地上水、地下水情况良好,未表现出较大的防水、抗渗需求;并对地下室施工提出较高要求。方案不可行。

2) 排桩+锚杆支护。基坑西侧距离医院建筑为 8 m,医院建筑存在地下车库等地下室建筑,打设锚杆会进入已建建筑地下室,部分建筑采用筏板基础,如若打设锚杆会与筏板基础存在碰撞,可能会影响建筑正常使用。方案不可行。

3) 排桩+内支撑支护。基坑西侧与北侧的宽度比约为 1.5:1,基坑东南侧与基坑北侧的宽度比约为 1:1,由于基坑东侧存在 70.5 m 的开挖范围,内支撑不好布置,分区布置内支撑经济效益不高。方案不可行。

4) 排桩+斜撑支护。基坑周边存在较大的地表荷载及繁杂交通,需增加基坑的承载能力和稳定性;基坑西侧存在其他地下建筑,需要保护其地下建筑的完整性;该深基坑需要进行大规模的土方开挖,需要提供大面积的支撑和稳定。并且排桩+斜撑较为灵活,适用于多种复杂情况下的基坑工程。方案可行,故确定排桩+斜撑为深基坑支护的主要支护方式。

2.2.2 其他支护方式

由于基坑为切角矩形,且对于东侧、南侧的基坑宽度相对较短,使得基坑两侧分别与北侧、西侧形成短距离连续基坑夹角,该区域较狭窄,故采用内支撑支护,内支撑支护可以适应变化的施工要求,支撑系

统可以减少基坑变形和坍塌风险,能有效提高工作效率,减少工程成本。

基坑开挖时,自上而下进行分层开挖。普通水平支撑体系限制顶部位移的效果较好,反压土+斜支撑支护体系对于基坑底部位移控制优于普通水平支撑^[8]。预留反压土可以增加土体的侧向支撑能力,平衡土压力减轻基坑内壁的水平荷载,减少土体在开挖过程中的变形和沉降,提高基坑的稳定性和安全性,增加边坡的稳定性。同时,反压土提供了相对稳定的施工平台,方便基坑施工。对基坑西侧建筑群造成的偏压效果,预留地下 3 层反压土,并以相应的土钉墙支护、喷锚进行加固。

深基坑支护体系布置如图 2 所示,主要支护形式为排桩+斜撑,根据土层厚度等相关影响因素设置了方案一:在 1-1、2-2、4-4、4b-4b、9-9 区域采用排桩+斜撑(两道斜撑),见图 3;方案二:在 3a-3a、3b-3b、4a-4a、5-5、6-6、7b-7b、8-8 区域采用排桩+斜撑(一道斜撑),见图 4;在基坑 3-3、7-7、2a-2a、7a-7a 区域采用内支撑支护。

基坑分 3 次开挖,第一次开挖除 3-3、3a-3a、3b-3b 区域外均预留反压土,第二次开挖在 1-1、2-2、4-4、4b-4b、9-9 区域预留反压土,第三次开挖完成。放坡支护面层采用 C20 喷射混凝土,并设置相应土钉,如图 3 所示。

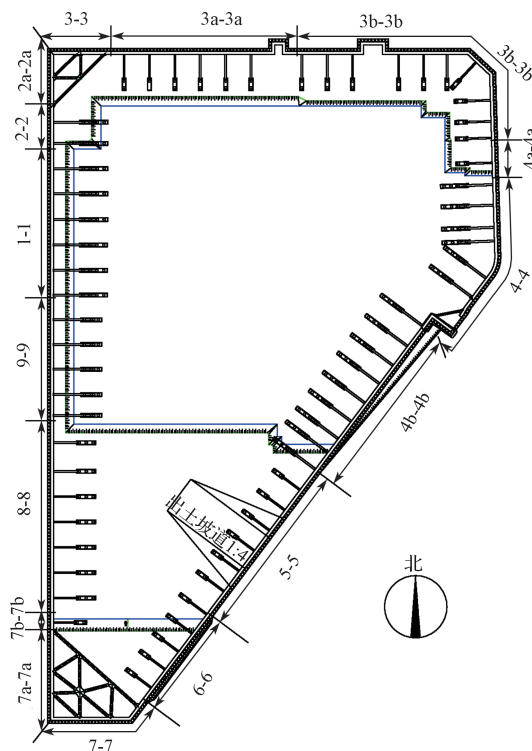


图 2 基坑支护结构布置图

Fig. 2 Layout of foundation pit support structure

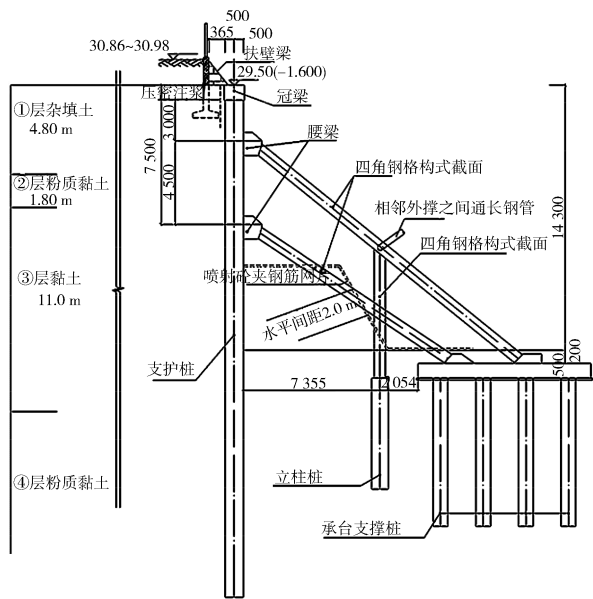


图3 方案一排桩+斜撑

Fig. 3 Row of piles + slant bracing scheme I

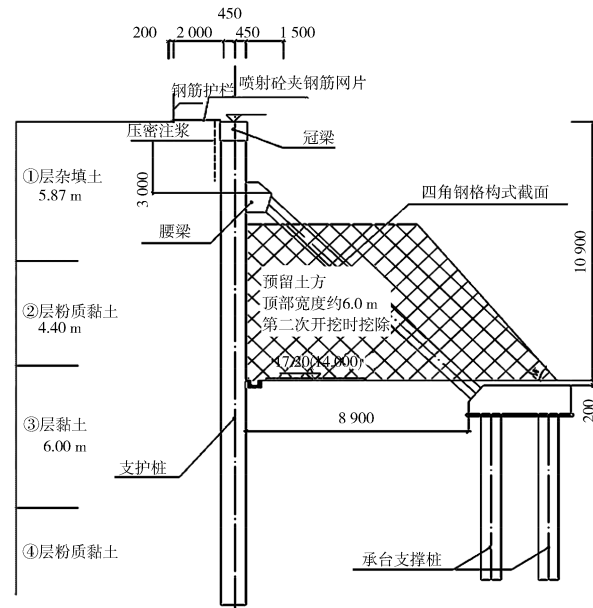


图4 方案二排桩+斜撑

Fig. 4 Row pile + slant bracing scheme II

3 数值分析设置

3.1 修正莫尔-库仑本构模型

基坑开挖引起的变形实际是卸荷过程引起的,理想弹塑性下的单纯加卸载过程无法完整模拟基坑开挖的卸荷过程^[13]。本文采用的修正莫尔-库仑本构模型适用于模拟计算软土等有一定差异的土体,且在受力剪切方向与压缩方向上引入了双硬化模型,可模拟不受剪切破坏或压缩屈服影响的双硬化行为。该本构模型是弹塑性模型与非线性弹性模型组合,可合理计算基坑开挖卸荷过程引起的基坑变形。

3.2 基本物理参数

数值分析中,土体采用3D单元进行模拟,岩土物理力学参数见表2。

表2 岩土物理力学参数

Table 2 Geotechnical physical and mechanical parameters

层序及 土层名称	容重/ (kN·m ⁻³)	黏聚 力/ kPa	内摩 擦角/ (°)	承载力 特征值/ kPa	压缩 模量/ MPa	基底 系数/ (MN·m ⁻³)
①层杂填土	18.0	8.0	10.0	—	—	—
②层粉质黏土	19.7	31.3	10.9	220	10.11	35
③层黏土	20.0	49.1	11.8	260	12.42	50
④层粉质黏土	20.2	35.5	12.5	280	12.56	—

建模过程中主要对排桩围护进行简化处理,忽略腰梁给分离式桩墙带来的水平方向整体空间效应,及基坑有限尺寸给墙体后土体作用在桩墙上土压力带来的空间效应,按等价壁式地下连续墙进行计算,结果是偏于安全的。其它结构属性物理参数见表3。

表3 结构属性物理参数

Table 3 Physical parameters of structural properties

结构名称	容重/ (kN·m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松比	截面形状与尺寸
冠梁	24.5	30 000	0.2	矩形 1 100×800 mm
腰梁	24.5	30 000	0.2	矩形 1 000×800 mm
承台	24.5	30 000	0.2	矩形 2 000×900 mm
支撑桩	24.5	30 000	0.2	圆形 D=800 mm
等效地连墙	24.5	30 000	0.2	矩形 t _w =900 mm
内支撑	24.5	30 000	0.2	矩形 800×800 mm
立柱	78.5	206 000	0.3	箱型 600×600 mm t _w =18 mm
斜支撑	78.5	206 000	0.3	箱型 600×600 mm t _w =18 mm
钢连系梁	24.5	25 500	0.2	管形 D=300 mm t _w =10 mm
护坡	24.5	25 500	0.2	矩形 t _w =80 mm

3.3 计算模型设置

二维模拟一般是对基坑最不利断面进行模拟分析,无法体现各侧变形情况,分析相对片面;忽略了三维模拟中相邻支护结构间协同作用的影响。故本模拟选择更加可靠合理的三维模拟。基坑模型如图5所示。根据基坑开挖情况及周边复杂环境布局,模型土体选择东西轴向宽度取240 m,南北轴向宽度取340 m,基坑西侧距土体边界66.5 m,基坑北侧距土体边界50 m,基坑东侧距土体边界26.4 m,基坑北侧由于医院已建建筑布局,基坑南侧距土体边界68.2 m。基坑的边界条件如下:左右边界约束法向位移,底部边界固接,顶部边界自由;设置模型自重;对支撑桩、立柱设置RZ约束,约束其自由度。

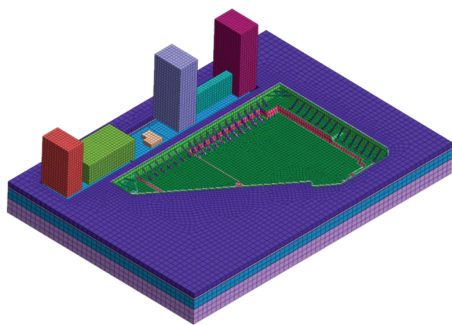


图 5 基坑模型示意图

Fig. 5 Pit modeling diagram

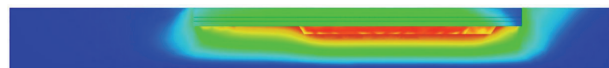
基坑开挖总体分为 7 层：第一层开挖至地下 4 m，为内支撑及第一道腰梁位置；第二层开挖至地下 7.5 m，为第二道腰梁位置；第三层开挖至地下 9 m，即地下一层平台；第四层开挖至地下 10.4 m，即地下二层平台；第五、六、七层开挖主要为基坑地下三层区域，即开挖至坑底，为地下 14.8 m 处。

基坑支护结构主要承担开挖过程中产生的土压力，其通过灌注桩等效地连墙传递给包含内支撑、斜撑及反压土在内的支护体系，基坑各侧极限荷载压力若小于基坑卸荷过程产生的土压力，就会发生周围土体坍塌，影响周边建筑安全。因此，研究多支护形式的组合支护，确定多支护结构支护安全可靠，为类似工程提供参考。

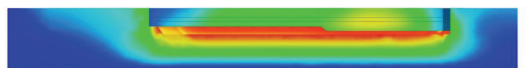
4 计算结果与监测结构对比分析

现以已施工完成且相应土体已开挖完成的支护结构作为分析对象，根据现场监测数据与 MIDAS GTS NX 有限元分析模拟数据，对土体深层水平位移、支护桩顶部水平位移、周边建筑沉降位移、支撑体系内力进行分析。

通过 MIDAS GTS NX 软件程序计算及处理后，可得到该基坑在多种不同支护方式下的基坑变形位移，沿基坑南北向剖面、东西向剖面位移云图如图 6 所示。



a) 南北向剖面图



b) 东西向剖面图

图 6 基坑变形位移云图

Fig. 6 Cloud view of deformation and displacement of the foundation pit

4.1 支护桩顶部水平位移

由计算模拟得出各边支护桩顶部水平位移最大值，分别为西侧 25.73 mm、东南侧 24.62 mm、东侧 21.58 mm、南侧 5.45 mm、北侧 19.98 mm。基坑南侧监测值为 4.0 mm，南侧开挖至地下一层，地下二、三层均与南侧距离较远，且开挖时间较早，后期开挖基本对其不造成影响，监测值较为稳定。由于基坑开挖深度存在差异，基坑支护方案也就存在差异，故选取基坑各侧支护桩顶部水平位移的最值点位进行分析比较。各侧最值点位支护桩顶部水平位移计算值、监测值随时间变化趋势见图 7（“东侧”为监测值，“东侧'”为计算值）。

基坑支护桩顶部水平位移较大值主要发生于西侧及东南侧，两侧最值均出现于基坑开挖至地下 3 层区域，支护方式均为排桩 + 斜撑方案一。由图 7 所示支护桩顶部水平位移变化曲线可以得知，各侧支护桩顶部水平位移计算值均大于监测值，满足小于报警值 30 mm。基坑各侧支护桩顶部水平位移计算值、监测值总体均呈现逐渐增大的趋势，随开挖工作进行至 2023 年 2 月—3 月，基坑冠梁施工完毕，斜撑开始施工，腰梁下方开挖工作开始与结束时的位移值变化较为明显，后增长速率逐渐趋于平缓。

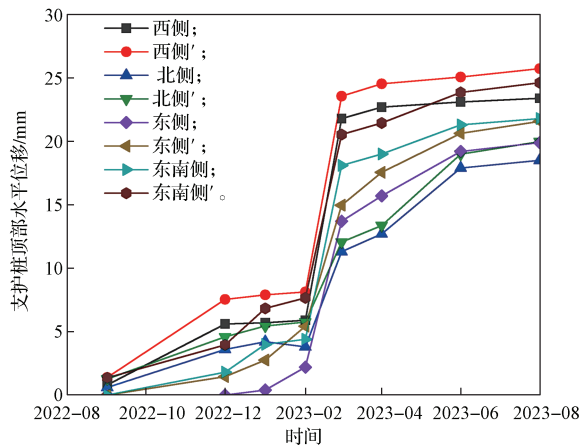


图 7 支护桩顶部水平位移变化曲线

Fig. 7 Variation of horizontal displacement at the top of the supporting piles

4.2 深层水平位移

由于该基坑的内支撑体系、两种排桩 + 斜支撑方案都体现在基坑西侧，且西侧开挖分别涉及地下一、二、三层，故对基坑西侧的土体深层水平位移进行分析比较。现场监测中，西侧自北向南依次布置 SC14-SC20 共 7 个点位，监测值如图 8 所示；有限元分析中，取西侧模拟最大、最小值点位（SC' max，SC' min），两点位分别位于西侧地下开挖一层、三层区域，深层水平位移变化情况见图 8。

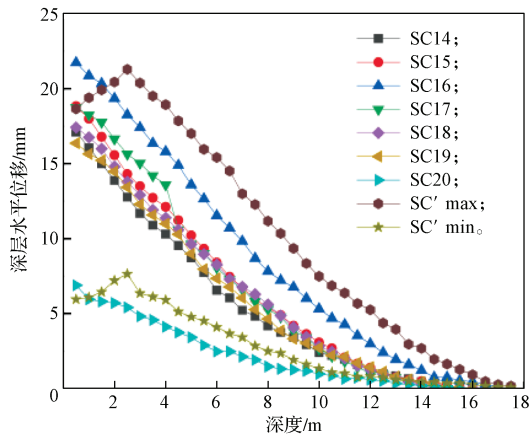


图 8 深层水平位移变化图曲线

Fig. 8 Variation of horizontal displacement at depth

由图 8 可知,地下一层部分位移值明显低于开挖至二、三层部分,西侧深层水平位移最值发生于开挖地下三层距基坑北侧约 (50 ± 10) m 范围内,计算最值为 21.29 mm,监测最值为 21.73 mm。计算模拟最值发生于基坑开挖深度约 2.5 m 处,监测最值发生于基坑开挖深度约 0.5 m 处,监测最值深度与计算最值深度存在较大差异;此外,计算模拟最值点位深层水平位移总体均略大于监测最值点位深层水平位移。基坑西侧点位监测值基本位于计算最大最小值范围内,计算结果偏安全。深层水平位移值总体不断减小,随开挖深度的增加,减值趋势逐渐趋于平缓,至基坑底部位移值基本趋近于 0。

4.3 周边建筑沉降

基坑周边建筑主要有医院楼群及各侧道路,取建筑沉降最值点位与各侧道路最值点位进行分析,监测沉降随时间的变化,结果如图 9 所示。可见基坑周边建筑设施沉降位移表现为随开挖时间增大,后期沉降值至开挖地下三层后基本趋于稳定。模拟结果显示建筑沉降最值为 12.59 mm,位于开挖地下三层对应高大建筑区域;道路沉降最值为 15.54 mm,位于东南

侧道路区域;两者均略大于监测值,区域基本吻合,且均远低于累计变化报警值 20 mm。总体基坑开挖对周边建筑设施未造成影响。

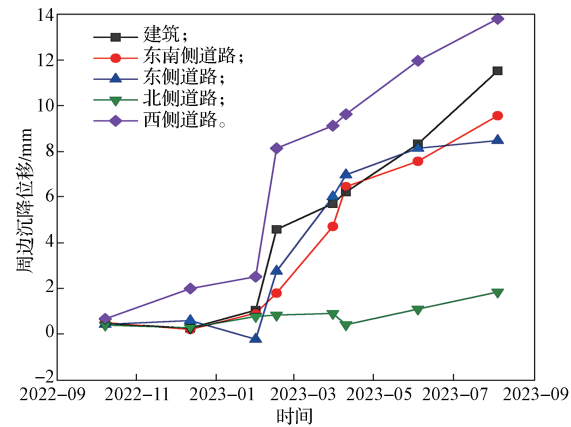


图 9 周边建筑沉降变化图

Fig. 9 Variation in settlement of surrounding buildings

4.4 支撑体系内力

支撑部分主要包括西北角和西南角的内支撑部分,以及主要支护结构斜撑。内支撑除去局部基坑分批分层开挖施工进程的影响或其他不确定干扰因素的影响,内支撑轴力总体变化趋势随基坑开挖呈现出前期增幅较大,后增幅逐渐减小,最终趋于稳定状态。由于内支撑分布集中于西北角与东北角,只在涉及该部位开挖过程中轴力变化才较为明显,取基坑开挖的最终开挖状态的计算值与监测值两最值结合内支撑轴力预警值进行对比分析,ZL3、ZL4 为内支撑轴力监测点位,对比分析结果见表 4 (西南侧、西北侧)。分析表中数据可知轴力值最值均低于预警值,内支撑区域的沉降与深层水平位移值均较小,对周边影响可忽略不计,内支撑支护状态良好。

斜撑部分分为两种类型,且分布区域的开挖深度存在较多差异,基坑实际排桩+斜撑较为复杂,简化的有限元模拟排桩+斜撑对于内力部分存在一定差异。斜撑内力计算值与监测值的最值见表 4。

表 4 支撑内力对比表

Table 4 Comparison of support internal forces

点位	代表区域	累计变化 /kN		预警值 /kN	是否预警	
		计算值	监测值		计算值	监测值
ZL3	西南侧	797.70	611.11	900	否	否
ZL4	西北侧	1 113.72	1 087.20	1 650	否	否
NL8	东南侧	940.52	904.12	1 400	否	否
NL17	东侧北侧交界	1 471.02	1 197.73	2 200	否	否
NL19	北侧	1 230.14	992.32	1 450	否	否
NL23	西侧地下三层 min	507.49	555.97	750	否	否
NL27	西侧地下三层 max	748.37	884.41	1 140	否	否
NL29	西侧地下二层	989.25	936.69	2 100	否	否
NL32	西侧地下一层	165.69	278.74	1 500	否	否

表 4 中 NL8~NL32 均为斜撑内力监测点位。斜撑内力计算最值与监测最值均发生于东侧与北侧交界的斜撑方案一处,斜撑方案二最值发生于西侧地下二层区域。除西侧地下一、三层外,基坑各侧支撑体系计算值均远大于监测值。西侧地下一、三层计算最值低于监测最值,原因为在施工阶段为保护西南侧内支撑与西侧地下三层支护安全,对西侧部分斜撑施加了约 100 kN 预应力,而简化模拟过程中未施加相应预应力,从而计算最值偏小。但计算最值与监测最值两者均远小于相应斜撑内力预警值,两者的斜撑支座位移均低于 4.5 mm,影响基本可忽略不计,满足其安全要求。

5 结 语

运用 MIDAS GTS NX 软件对深基坑进行了有限元分析模拟,得到的基坑变形位移计算值及支撑内力计算值与监测数据基本吻合,部分计算值略大于监测值,监测对比模拟更安全,表明模拟方案与实际方案基本吻合,模型模拟正确。

1) 排桩+斜撑支护结构方案在边廓线较规整的基坑较为适用,而对于地下开挖深度情况较为复杂的基坑,可适当调整各区域的排桩+斜撑方案,不考虑协同作用下支护结构相对独立,在保证基坑安全的情况下可节约一定的经济成本。本基坑支护桩顶位移与土体深层水平位移均位于累计报警值 30 mm 范围以内,排桩+斜撑支护结构方案能较好地维护基坑的稳定与安全。

2) 内支撑支护结构主要在基坑西北角、西南角分布,保证基坑转角区域的安全,对于基坑狭长分布区域可有效抑制边坡侧向变形,内支撑在对基坑变形要求较高区域同样广泛应用。本基坑外廓线为切角矩形,内支撑很好地解决了切角区域狭长问题。

3) 预留反压土在基坑不均匀开挖情况下,通过布置反压土对基坑停挖区域变形进行控制,提高了基坑稳定性。本基坑周边环境复杂,分区开挖在预留反压土作用下未对基坑变形造成消极影响。

该切角矩形深基坑的周边环境、边廓线分布较为特殊,长、短边效应较明显,通过结合实际情况对支护体系的搭配使用,保证了基坑的稳定性与安全性,为同类型基坑支护提供了参考。

参考文献:

[1] 顾问天. 城市中心超大面积深基坑支护选型研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(3): 93-97.

- GU Wentian. Research on Support Selection of Deep Foundation Pit with Super Large Area in Urban Center[J]. Railway Engineering, 2017, 57(3): 93-97.
- [2] 姜兴良, 汪映红, 邹开明. 复杂场地条件下深基坑支护方案[J]. 水运工程, 2018(4): 151-155.
- JIANG Xingliang, WANG Yinghong, ZOU Kaiming. Supporting Scheme of Deep Foundation Pit Under Complicated Geotechnical Condition[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(4): 151-155.
- [3] 夏洪春, 夏清勇, 朱训国. 深基坑复合型支护结构优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 46-52.
- XIA Hongchun, XIA Qingyong, ZHU Xunguo. Optimization of Composite Supporting Structure for Deep Foundation Pit[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(1): 46-52.
- [4] 金雪峰, 洗兆佳, 于彦召, 等. 双排桩支护结构在合肥天玥广场深基坑中的应用与分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(23): 80-85.
- JIN Xuefeng, XIAN Zhaojia, YU Yanzhao, et al. Application and Analysis of Double-Row Piles Structure for Deep Foundation Pit Construction of Hefei Tianyue Plaza[J]. Building Structure, 2017, 47(23): 80-85.
- [5] 肖淑君, 彭卫平. 某深大基坑支护设计方案选型分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(S1): 190-196.
- XIAO Shujun, PENG Weiping. Selection and Analysis of Supporting Design Scheme for a Deep and Large Foundation Pit[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(S1): 190-196.
- [6] 秦 响. 临近已建高架桥墩基坑开挖的支护方案优化设计[D]. 荆州: 长江大学, 2023.
- QIN Xiang. Optimal Design of Supporting Scheme for Foundation Pit Excavation Near the Existing Elevated Pier[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023.
- [7] 刘云霄. 城市核心区紧邻地铁线路地下建筑拆除改造基坑支护逆作法应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- LIU Yunji. Study on Application of Top-Down Method of Foundation Pit Support in Demolition and Reconstruction of Underground Buildings Adjacent to Subway Lines in Urban Core Area[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [8] 王 斌, 高文慧, 邓世强, 等. 反压土+斜支撑组合支护基坑的变形特性研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(11): 61-65, 125.
- WANG Bin, GAO Wenhui, DENG Shiqiang, et al. Deformation Behavior of Back-Pressed Soil and Inclined Support Structure Supporting Foundation Excavation[J]. Construction Technology, 2023, 52(11): 61-65, 125.

(下转第 38 页)