

双排桩支护下基坑开挖与浅层土的变形关系

郝眩明

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 近年来,城市地下空间开发利用项目发展日新月异,涌现出越来越多的市区深基坑工程。在城市市区的深基坑开挖工程中,往往面临周边环境复杂的情况,如周边既有建筑,地下管线等。双排桩支护作为一种既能保证支护刚度、控制水平位移,又能避免施工水平内支撑对施工组织及工期的影响的支护形式受到不少设计及施工单位的青睐。结合南昌市某基坑工程,分别用2种常规深基坑计算软件及一种有限元软件分析双排桩支护形式下基坑开挖与浅层土变形的关系。同时与实际基坑开挖时的浅层土变形监测数据进行对比,对比上述3种软件计算结果与实际监测数据,为后续类似工程提供参考。

关键词: 深基坑;双排桩;有限元计算;浅层土变形

中图分类号: TU94*2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0268-05

Relationship between Foundation Pit Excavation and Shallow Soil Deformation under Double-row Pile Support

HAO Xuanming

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In recent years, the development and utilization of urban underground space have progressed rapidly, which makes more and more deep foundation pit projects emerge in urban areas. The deep foundation pit engineering in city centers often faces the complex surrounding environments, including adjacent existing buildings and underground pipelines. The double-row pile support structure has gained popularity among the design and construction units because of its effective solution that not only ensures the support stiffness, controls the horizontal displacement, but also avoids the impacts of horizontal internal bracing on construction organization and schedules. Combined with a foundation pit project in Nanchang, the relationship between the foundation pit excavation and the shallow soil deformation under the double-row pile support form is analyzed respectively by using two kinds of conventional deep foundation pit calculation software and one finite element software. Meanwhile, the comparison is carried out with the monitoring data of shallow soil deformation during the actual foundation pit excavation, and the above three calculation results of the software are compared with the actual monitoring data, which provides a reference for the subsequent similar projects.

Keywords: deep foundation pit; double-row piles; finite element calculation; shallow soil deformation

0 引言

城市地下空间开发利用项目发展日新月异,涌现出越来越多的市区深基坑工程。在城市市区的深基坑工程中,往往面临周边环境复杂的情况。由于城市基坑工程通常处于建筑物、重要地下构筑物和生命线工程的密集地区,变形控制和环境保护往往成为基坑工程成败的关键^[1]。基坑工程的极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态^[2]。除

满足土体稳定性要求外,基坑变形控制,特别是控制周边既有建筑及管线变形也是满足正常使用极限状态的关键。随着城市建设用地的限制和建筑空间的密集,越来越多的基坑工程邻近敏感建筑物^[3],采用锚杆常常受到出红线及产生地下垃圾^[4]的影响。有时使周边清理地下垃圾较为困难,对后续工程造成较大影响。然而,采用内支撑的支护形式存在安拆费时费工、经济性不强、对环境不友好的弊端^[5]。因此,找到一种同时避免上述问题的支护形式是解决该类基坑支护难点的关键。双排桩支护控制变形能力强,避免了大面积基坑布置内支撑造价高、工期慢、施工难度大的缺点^[6]。与单排悬臂桩相比,其抗

收稿日期: 2025-04-21

作者简介: 郝眩明(1981—),男,硕士,高级工程师,从事建筑结构及基坑设计工作。

弯强度与稳定性增加,侧向位移减少^[7]。双排桩施工流程较简单,传统工艺质量容易控制,但造价相对较高,适合在基坑需要长时间暴露的情况下采用,耐久性较好^[8]。此前赵玉成、代兆宇等^[9]以及吕高乐、易领兵等^[10]对双排桩支护下土体位移情况进行了研究。张治国等^[11]通过研究邻近深基坑建筑的沉降得出坑外土体侧压力和土体内部应力突然释放会引起土体变形速率增大,致使邻近建筑物沉降量骤增。郑刚等^[12]采用有限元法分析了坑角效应对基坑周边建筑物的影响。本文结合南昌市某基坑工程实例,分别用2种常规计算软件及1种有限元计算软件对双排桩支护形式进行计算分析,将基坑开挖导致周边浅层土变形的计算结果与实际监测数据进行对比。

1 项目概况

江西省南昌市某工程地下部分为两层地下室,挖深为 10.80 m,基坑周长约为 316 m,基坑面积约为 6 400 m²。原地貌属赣江冲积Ⅱ级阶地,场地暂为空地,均已完成平整。如图 1 所示,拟建场地以东为已建小区,以南为规划的市政道路及铁路修车库,西侧为市政道路、规划道路,北侧毗邻已建住宅小区。场地周边、邻区均为已建多层、小高层、高层。根据《南昌市深基坑工程支护结构方案设计文件编制与审查要点》附录 A^[13],基坑安全等级为一级。

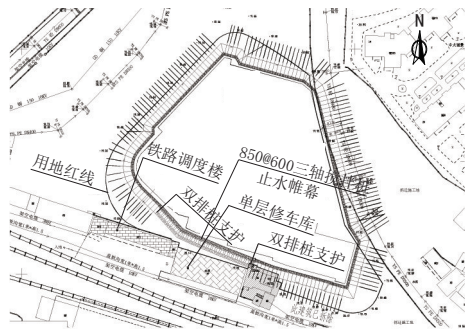


图1 周边环境示意图

该基坑周边环境较为复杂,特别是场地南侧距离项目红线较近,最近距离约 2.7 m。基坑南侧有 2 座既有建筑,均为浅基础砌体结构。其中距离基坑最近的单体为单层砌体结构仓库,最近处距离基坑约 5 m。基础形式为墙下条形基础,基础埋深约为地面以下 1.5 m,目前功能是铁路修车库。另外一座 3 层砌体结构建筑,距离基坑最近处约 6 m。基础形式也是墙下条形基础,基础埋深约为地面以下 1.5 m,目前功能是铁路调度楼。

本文主要针对南侧区域进行分析,该剖面土层主要由填土层、粉质黏土层、砂层、岩层构成,具体构成如表 1 所列。

表 1 各土层抗剪强度指标

土层	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	c/kPa	φ/(°)
①杂填土	2.51	18.8	5	8
②粉质黏土	4.4	19.5	29.8	12.0
④砾砂	12.9	21	0	38.0
⑤强风化泥质粉砂岩	1.8	25	45	25
⑥中风化泥质粉砂岩	7.2	26	50	40

2 支护形式

基坑整体采用灌注桩双排桩的形式,南侧开挖深度为 10.800 m。双排桩施工流程较简单,传统工艺质量容易控制,但造价相对较高,适合在基坑需要长时间暴露的情况下采用,耐久性较好^[8]。该工程为两层地下室,施工时间较长,采用双排桩合理。前/后排灌注桩采用 φ800@1 000 间距,桩长均为 23 m。双排灌注桩顶部均采用 1 200 mm×800 mm 钢筋混凝土冠梁,后排桩顶部设有 1.3 m 高混凝土挡墙。前后排桩间距 3 500 mm,桩之间设 200 mm 厚钢筋混凝土刚架板,并设 800 mm×800 mm@2 000 mm 混凝土连梁连接前后排冠梁。在前排灌注桩围护的基坑外侧设置单排 φ850 mm@600 mm 三轴水泥土搅拌桩止水帷幕,止水帷幕搅拌桩搭接 250 mm,桩长约 18 m,具体如图 2 和图 3 所示。

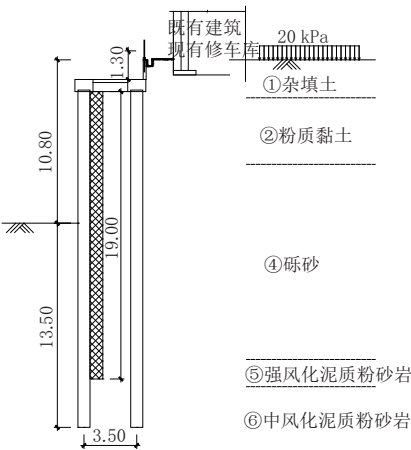


图2 双排桩支护剖面示意图(单位:m)

3 三种软件计算对比

以下将对南昌某工程南侧双排桩支护剖面,分别采用同济启明星软件、理正深基坑软件及 Plaxis2D 软件分别计算该侧基坑开挖对周边浅层土的变形,并进行对比。基坑开挖主要涉及杂填土、粉质黏土

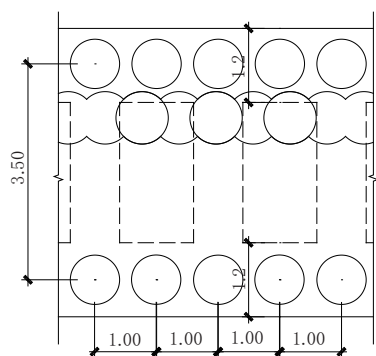


图3 双排桩支护平面布置图(单位:m)

及砾砂层,根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)杂填土、砾砂层采用水土分算,粉质黏土层采用水土合算^[14]。同济启明星软件与理正深基坑软件均为行业内公认的常用基坑结构计算软件,计算结果稳定可靠,得到了大量成功实际工程案例的验证。同济启明星与理正深基坑这2个常规计算软件均采用公式计算法对基坑支护结构进行计算和设计。Plaxis 2D是专门针对岩土工程应用而开发的稳定而易用的有限元程序,是复杂项目分析所需要的专业工具。Plaxis2D软件对双排桩基坑支护的数值模型可对双排桩基坑支护方式效果进行有效模拟^[15]。

3.1 同济启明星软件计算

同济启明星软件采用FRWS11.0版本,双排桩计算方法采用启明星方法。双排桩刚架结构计算模型按有一定刚度的梁考虑,前排桩采用朗肯主动土压力。作用在后排桩的荷载为前后排桩之间作用弹簧k12传递的荷载(见图4)。

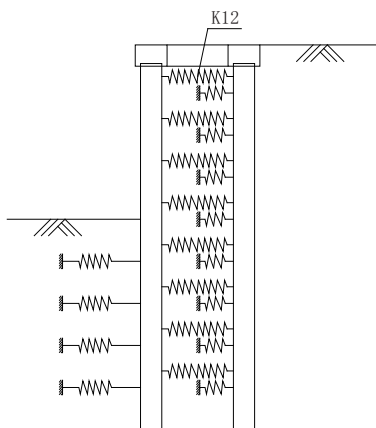


图4 双排桩启明星方法示意图

周边浅层土体位移即地表沉降采用同济启明星软件提供的抛物线模式计算。地表沉降范围:

$$x_0 = (h + D) \tan(45^\circ - \varphi/2)$$

$$\text{各点沉降: } \delta_x = 4\delta_m \frac{x_0 - x}{x_0^2} + \Delta\delta \frac{x_0 - x}{x_0^2}$$

$$\Delta\delta = 0.5(\delta_{w1} + \delta_{w2})$$

$$\delta_m = \frac{1.6\delta_w}{x_0} - 0.3\Delta\delta$$

式中: h 为基坑最大深度,m; D 为至基坑边的距离,m; S_w 为支挡结构侧移面积,m²; S_{w1} 为支挡结构顶端位移,m; S_{w2} 为支挡结构底端位移,m。

经计算,浅层土体最大竖向位移为22.7 mm,最大位移发生在距离基坑5.64 m处(见图5)。

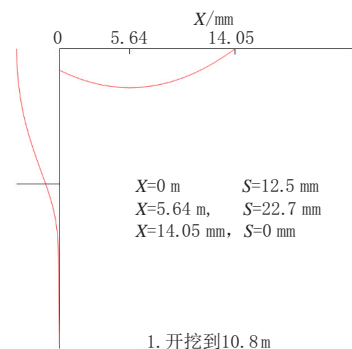


图5 启明星浅层土体位移计算结果

3.2 理正深基坑软件计算

理正深基坑软件所采用的版本为FSPW7.5,双排桩计算方法采用《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)中规范算法(见图6)。后排桩上土压力应与规范算法一致,前排桩上的土反力也应与规范要求一致。

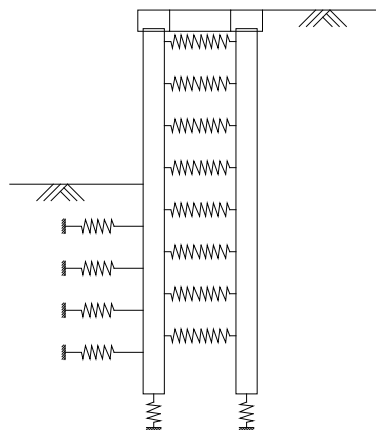


图6 双排桩规范计算方法示意图

前、后排桩的桩间土体对桩侧的压力可按式计算:

$$p_c = k_c \Delta v + p_{c0}$$

式中各项参数代表的含义及取值均按规范执行。

根据实际情况,周边浅层土体位移即地表沉降采用《基坑工程手册》中指数曲线计算。采用Peck理论的正态分布曲线,地表沉降范围:

$$x_0 = H_g \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

$$\text{沉降最大值: } \Delta\delta_{\max} = \frac{1.6\delta_w}{x_0} - 0.3\Delta\delta$$

式中: H_g 为围护墙的高度,m; S_w 为支挡结构侧移面积,m²。

经计算,浅层土体最大竖向位移为 47 mm,最大位移发生在距离基坑约 6 m 处(见图 7)。

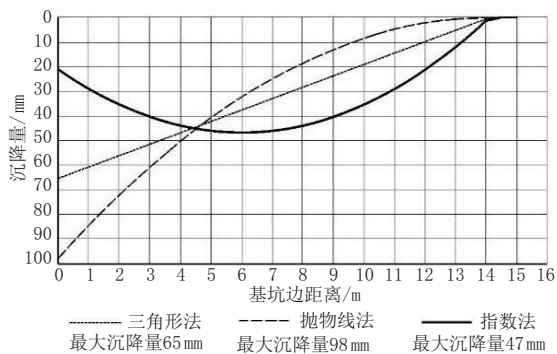


图 7 理正浅层土体位移计算结果

3.3 Plaxis 有限元软件计算

有限元计算软件采用 Plaxis 2D 2023.2 版本,本文采用数值模拟的方法对基坑开挖卸荷效应进行研究,通过建立平面应变有限元模型对基坑开挖过程中的附加变形进行预测评估。研究过程中实施了 3 项关键假定。

(1)初始地应力场假定:基于地勘数据建立各土层剖面模型,通过综合考虑各土层分层条件及土体自重等因素,对基坑开挖前原始应力场分布进行模拟。特别考虑围护体系施工和内支撑结构安装对初始应力场的扰动效应。

(2)连续介质耦合假定:在有限元分析框架下,运用小应变土体硬化本构模型表征土体特性,同时结合 Goodman 接触单元理论建立地下结构与周围土体的界面相互作用模型。

(3)动态施工过程假定:采用数值模拟软件的单元激活/钝化功能,实现双排支护桩施工和各层土体分级开挖的时序模拟。通过构建顺作法施工工况的数值模拟环境,完整复现基坑开挖全过程。

图 8 和图 9 所示分别为 Plaxis 浅层土体竖向和水平位移的计算结果。经计算,浅层土体最大竖向位移为 5.28 mm,最大浅层土体竖向位移位置在距离基坑约 5 m 处;最大水平位移为 23 mm,最大水平位移发生位置为坑顶基坑边线处。

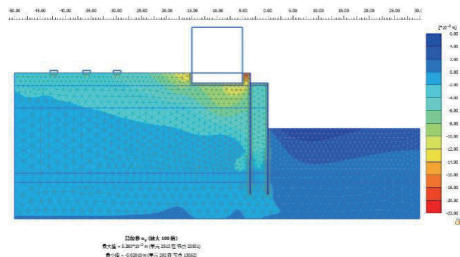


图 8 Plaxis 浅层土体竖向位移计算结果

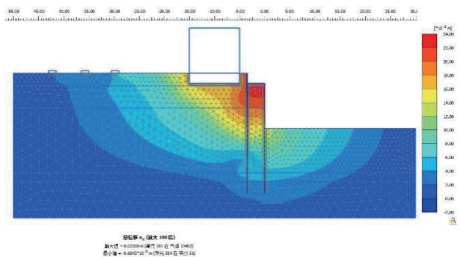


图 9 Plaxis 浅层土体水平位移计算结果

4 与实际监测数据对比

从双排桩施工开始现场监测,至基坑回填监测数据曲线如图 10 所示。

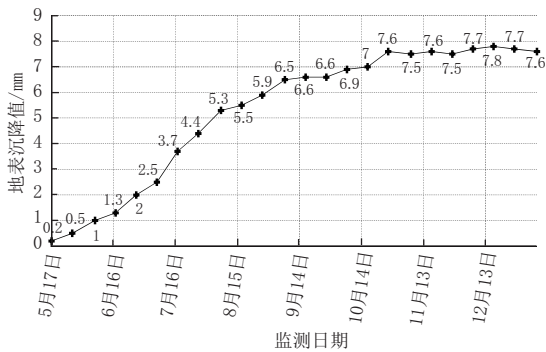


图 10 现场地表沉降监测曲线

根据现场监测记录显示,基坑开挖引起的浅层土体竖向变形即地表沉降值为 7.8 mm,监测点布置在距坑边 4.5 m 处。观察监测记录曲线,整体呈抛物线形式。基坑开挖至地下一层处即 5.8 m 处之前,位移变化相对较缓;开挖深度超过地下一层后,位移变化速率加快。

浅层土的实际位移监测数据与 3 种方法的计算数据对比如表 2 所列。

表 2 各算法下计算值与实测值对比表				单位:mm
类别	启明星	理正	Plaxis	监测值
竖向位移	22.7	47	5.28	7.8
与监测值偏差	14.6	39.2	-2.52	—

根据表 2 数据显示,有限元软件 Plaxis 计算出的浅层土位移与实际监测值最为接近。启明星及理正的计算结果偏离较大,过于保守。虽然启明星软件与理正软件都采用公式算法计算,但启明星在计算双排桩刚度时,除考虑前后排桩之间的相互作用外,还考虑了前后排桩间土对后排桩的刚度贡献;而理正深基坑则仅考虑前后排桩之间的相互作用对刚度的影响。因此启明星的计算结果数值相对较小,而理正深基坑则相对更保守。有限元软件 Plaxis 在计算中考虑了土颗粒之间的相互作用以及开挖之后的回弹,由于土颗粒的相互作用,坑内土的隆起在一定

程度上削弱了桩的下沉,开挖过程中土颗粒的实际情况也与上述分析较为接近。

5 结 语

根据上述3种软件计算结果与实测结果的对比,以及对实际监测数据的分析我们可以得出以下结论。

(1)双排桩基坑支护形式下,基坑开挖对于周边浅层土体的影响使周边浅层土体竖向位移呈抛物线分布,且抛物线最大位移处偏向基坑。

(2)经过3种计算软件的结果与实际监测数据的对比,有限元软件Plaxis的结果与实际监测数据最为接近,常规计算软件的计算值均偏保守。

(3)双排桩支护形式在基坑挖深小于6 m时能获得较好的侧向刚度,位移控制效果较好;但挖深超过6 m以后侧向刚度下降明显,会对周围浅层土体造成一定变形。

综上所述,启明星及理正深基坑软件的计算结果虽较为保守,但作为设计软件采用适当的保守设计策略是合理可行的。在本工程类似的地质情况及支护工况下,作为设计软件,采用理正深基坑的计算结果安全系数高但经济性较差,采用启明星的计算结果则可以在经济性和安全性上找到一个折中点。而有限元软件Plaxis 2D虽能获得较为准确的结果,但安全系数富余度较小,适用于不同的运用场景。针对上述3种软件,工程师可根据项目实际情况针对性地选择软件使用,以达到既安全又经济合理的目的。

通过对南昌某工程的分析,在双排桩支护下基坑开挖对周边浅层土体位移通过3种计算软件进行分析和比较,得出上述结论,为今后进行同类项目的基坑选型提供了一定的经验和参考。

参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].第2版.北京:中国建筑工业出版社,2009:8-9.
- [2] 常士骧,张苏民,项勃.工程地质手册[M].第4版.北京:中国建筑工业出版社,2007:823.
- [3] 张竹庭.狭小空间敏感环境下的基坑支护设计与施工[J].建筑施工,2017,39(2):162-165.
- [4] DBJ/T 15-20—2016,建筑基坑工程技术规程[S].
- [5] 窦红瑞.自稳式支护技术在基坑工程中的应用[J].地基处理,2025,7(1):90-100.
- [6] 初振环,陈鸿,王志人,等.紧邻地铁车站基坑双排桩支护结构性状分析[J].岩土工程学报,2012,34(增刊):474-479.
- [7] 赵同新,高需生.深基坑支护工程的设计与实践[M].第1版.北京:地震出版社,2010:125.
- [8] 马可.软土地区7 m左右挖深基坑几种支护形式分析比较[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2626-2631.
- [9] 赵玉成,代兆宇,夏瑞萌,等.雄安新区深基坑双排桩支护的实践与探讨[J].粉煤灰综合利用,2024,36(6):79-83;95.
- [10] 吕高乐,易领兵,王宝,等.黄河冲积平原复杂地质环境下双排桩支护结构的深基坑监测分析[J].工程地质学报,2018,26(增刊):730-739.
- [11] 张治国,赵其华,鲁明浩.邻近深基坑开挖的历史保护建筑物沉降实测分析[J].土木工程学报,2015,48(增刊2):137-142.
- [12] 郑刚,李志伟.坑角效应对基坑周边建筑物影响的有限元分析[J].天津大学学报,2012,45(8):688-699.
- [13] 南昌市深基坑工程支护结构方案设计文件编制与审查要点[M].南昌:江西科学技术出版社,2014.
- [14] JGJ 120—2012,建筑基坑工程技术规程[S].
- [15] 钱明.双排混凝土灌注桩支护的数值模拟分析[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2):136-139.

(上接第234页)

- [3] 陈阳阳.复合地层大直径盾构掘进稳定性影响与控制因素分析[D].武汉:华中科技大学,2021.
- [4] 赵文斌.智能盾构导向系统研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2017.
- [5] 陈悦.基于机器学习混合算法的盾构掘进参数预测与优化控制研究[D].北京:北京交通大学,2023.
- [6] 吴坚,曾志全,张亚鹏,等.基于循环神经网络的盾构姿态及掘进参数预测[J].浙江工业大学学报,2023,51(6):663-670.
- [7] 曾毅,吴嘉敏,卞跃威,等.基于LSTM算法的大直径泥水平衡盾构掘进姿态预测[J].隧道建设(中英文),2024(11):41-50.
- [8] 徐进,林良宇,章龙管,等.基于深度学习的盾构掘进姿态预测模型[J].地下空间与工程学报,2022,18(增刊2):813-821.
- [9] 李洋.地铁隧道盾构智能纠偏优化控制研究[D].西安:长安大学,2019.
- [10] 刘肖楠.盾构机掘进过程姿态建模与控制研究[D].赣州:江西理工大学,2020.