

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.05.007

不同支护形式结合处的基坑侧壁稳定性研究

朱成杰¹, 梁东², 杨彦飞³, 杨晨曦¹, 何俊照⁴, 王安明¹

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 2. 河南省地矿建设工程(集团)有限公司, 河南 郑州 450071;
3. 国网新疆电力有限公司, 新疆 昌吉 831100; 4. 河南省政务大数据中心, 河南 郑州 450018)

摘要: 在深基坑周围环境不同的情况下基坑应采用不同的支护形式, 深基坑相邻的不同支护形式结合处(过渡段)的基坑侧壁是比较敏感的区域, 容易发生变形不协调现象, 因此需要对结合处的敏感区域进行研究。以郑州市城市道路交叉口、周边环境复杂的深基坑为研究对象, 通过数值模拟和现场监测相结合的研究方法, 对其双排桩支护方案与其相邻的桩锚支护方案的基坑侧壁结合处进行分析。研究结果表明: 基坑开挖过程中两种支护方案的水平应力、水平位移、土压力等均有差别。随着开挖进行水平位移与水平应力逐渐增大。当开挖较深时, 同一深度处桩锚支护侧水平位移大于双排桩支护侧水平位移, 双排桩支护侧水平应力大于桩锚支护侧水平应力。

关键词: 深基坑; 监测; 桩锚支护; 双排桩支护; 数值模拟

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0046-07

Stability of Foundation Pit Side Walls at the Joint of Different Support Forms

ZHU Chengjie¹, LIANG Dong², YANG Yanfei³, YANG Chenxi¹, HE Junzhao⁴, WANG Anming¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China;

2. Henan Geology and Mineral Resources Construction Engineering Group, Zhengzhou, Henan 450071, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Corporation, Changji, Xinjiang 831100, China;

4. Provincial Government Big Data Center, Zhengzhou, Henan 450018, China)

Abstract: Different support forms should be adopted at different positions of deep foundation pits under different environmental conditions. The side walls of adjacent deep foundation pits at the junction of different support methods (transition section) are relatively sensitive areas, which are prone to deformation incompatibility. Therefore, it is necessary to analyze the sensitive areas at the junction. Taking the urban road intersection and complex surrounding environment of deep foundation pits in Zhengdong New District, Zhengzhou City as the research object, this work analyzed the joint of the double row pile support scheme and its adjacent pile anchor support scheme on the side wall of the foundation pit through a combination of numerical simulation, on-site monitoring, and rational calculation. The research results indicate that there are differences in horizontal stress, horizontal displacement, and soil pressure between the two support schemes during excavation of foundation pits. As excavation progresses, horizontal displacement and horizontal stress gradually increase. When excavating deeper, the horizontal displacement of the pile anchor support side at the same depth is greater than that of the double row pile support side, and the horizontal stress of the double row pile support side is greater than that of the pile anchor support side.

Keywords: foundation pit; monitor; pile-anchor support; double row pile support; numerical simulation

一般而言, 深基坑因为周边环境不同, 不同部位 会采用不同的支护形式, 将两种或多种支护形式结

收稿日期: 2024-05-19

修稿日期: 2024-06-22

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(182102310745)

作者简介: 朱成杰(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市地下空间工程。E-mail: z202210020310@stu.ncwu.edu.cn

通讯作者: 王安明(1975—), 男, 教授, 主要从事城市地下空间工程等方面教学与科研工作。E-mail: wam992001@163.com

合起来,充分发挥各支护结构的特点,能够使基坑在安全前提下达到节约成本的目的。但是由于不同的支护形式其支护刚度不同周边环境荷载也不同,由此造成在不同支护形式的结合处会出现变形不协调现象^[1]。

从国内外研究现状来看,基坑不同部分采用不同支护形式,这种情况在实际工程中比较常见。汪钰^[2]以合肥市某建筑基坑项目为研究背景,该基坑相邻场地采用单排桩和双排桩联合支护体系,研究了单排桩和双排桩联合支护衔接处土体隆起沉降、桩身位移变化、桩身受力和变形协调情况;李锐^[3]以广州某巴士站基坑工程为例,该工程以水泥土搅拌桩重力式挡墙联合排桩内支撑结构支护形式,对基坑不同支护结构过渡段变形进行了对比研究,并对基坑变形差异性原因进行了分析;徐煜航^[4]以郑州某基坑桩锚土钉联合支护工程为实例,对单独土钉支护、单独桩锚支护、桩锚土钉联合支护进行数值模拟分析,得出两种支护方式间协同作用的设计思路更为合理;刘庆林等^[5]以广州十一号线沙河站基坑工程为例,对大面积不规则深基坑不同部位采用了双排桩、混凝土支撑、斜抛撑与放坡等支护方式;丁龙翔^[6]以广州某基坑工程为例,南北两侧使用放坡与排桩加内支撑支护两种不同支护方式,建议多施工3~5段灌注桩作为过渡段。王振峰^[7]以拟建的工程项目为例,采用深基坑土钉墙与桩锚联合支护,经过优化后的施工方案可以实现对基坑地表沉降的有效控制,提升了工程整体施工质量。刁志刚等^[8]以二元地层超深深基坑为例,分析了吊脚桩与锚喷支护过渡段变形协调问题,提出了修正刚柔体系过渡段变形协调产生附加应力的计算新思路。毛可^[9]以盐城市盐高新区某项目为例,采用桩锚撑复合支护结构,分析了三种支护体系下变形协调问题。魏焕卫等^[10]基于Mindlin解考虑变形协调条件建立了锚杆复合土钉墙内力及变形计算方法,揭示了锚杆复合土钉墙的变形及内力随深度的变化规律。张天啸^[11]以太原市万科时代之光深基坑实际工程为研究对象,采用土钉墙与桩锚联合支护形式,通过数值模拟的方法改变模拟参数对联合支护进行优化分析,提高了基坑的稳定性。吴修明^[12]以济南历山永祥里工程为例,对基坑中土钉墙与桩锚联合支护设计进行理论与有限元分析,解释了土钉墙与桩锚联合支护的协同机理,改善了土钉墙与桩锚联合支护理论落后实践的现象。焦广莹^[13]以日照科技文化中心项目为背景,该工程采用锚索与微型钢管桩联

合支护形式,通过模拟与监测对比分析,得出该基坑在锚索与微型钢管桩联合支护形式下最佳支护参数范围。王帅栋^[14]以沙河镇科研中心基坑为例,该工程采用土钉墙、桩锚联合支护形式,通过模拟与监测数据对比研究,得出了围护结构参数选取范围。董建华^[15]以某深基坑工程为例,该工程采用框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护方案,通过联合支护与桩锚支护对比分析,验证了框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护结构的优越性。

基坑不同部分采用不同支护形式,虽然这种情况在实际工程中比较常见,但由于不同支护形式其刚度也是有差别的,很显然会对基坑交界处的稳定性带来影响。由于《建筑基坑支护技术规程》^[1](JGJ 120—2012)规定:“当基坑不同部位的周边环境条件、土层性状、基坑深度等不同时,可在不同部位分别采用不同的支护形式”、并且还规定“不同支护形式的结合处,应考虑相邻支护结构的相互影响,其过渡段应有可靠的连接措施”。从前文国内外相关文献研究可知,基坑相邻不同支护形式结合处的稳定性目前都是一些实际工程,对于不同支护结构因刚度不同在交界面附近引起的变形不协调及其机理分析缺少相关研究。

以郑州某深基坑同侧相邻不同支护方式的结合处为例,结合现场监测数据和数值模拟方法分析深基坑同侧相邻不同支护方式结合处的基坑侧壁稳定性,研究不同支护方式引起的基坑围护结构中的应力和位移的不协调问题,并给出不同支撑形式转换的连接措施,以期类似工程提供参考。

1 工程概况

工程位于郑州市,工程地块东西宽89.70 m,南北长91.80 m,基坑深度11.0 m,建筑物总建筑面积80 000 m²,框架剪力墙结构,总建筑高度90.5 m,地上14—19层,地下3层,采用桩基础。

该基坑东边环境较为复杂,相邻有一栋7层住宅楼和一朵10层综合性办公楼,如图1(a)所示,其中住宅楼有一层地下室,基础埋深5 m,距基坑边线约9.55 m,采用高压喷射桩复合地基和筏板基础。综合性办公楼有一层地下室,距基坑边线约18.05 m,采用钻孔灌注桩基础。

鉴于基坑离住宅楼较近,在该位置基坑采用双排桩支护方案,如图1(b)的2-2剖面所示。住宅楼相邻南侧为空地,基坑支护采用桩锚支护方案,如图1(c)的1-1剖面所示。基坑的深度大,周围环境复

杂,基坑安全等级为一级。

钻孔灌注混凝土桩与预应力锚杆组成的桩锚支护方案如图 1(c)所示,桩锚支护桩身截面圆形直径为 0.8 m,桩长为 16.5 m,桩间距为 1.5 m,嵌固深度为 8 m,混凝土标号 C30;基坑侧壁喷射混凝土面层 C20,厚度为 0.08 m;预应力锚杆打入三排,排距为 2.5 m,锚杆总长为 22 m,自由端长为 8 m,锚固长度为 18 m,倾角为 15°,每排锚杆距离地表依次为

3.0 m、5.5 m、8.0 m。

双排桩支护方案如图 1(b)所示,双排护坡桩有效桩长为 22.0 m,桩径为 0.8 m,桩间距为 1.5 m,排间距为 2.4 m,嵌固深度为 11 m,混凝土标号 C30,双排桩顶均设 0.7 m×0.9 m 的冠梁,冠梁之间设 0.7 m×0.9 m 的连梁,混凝土标号 C30。基坑侧壁喷射混凝土面层 C20,厚度为 0.08 m。

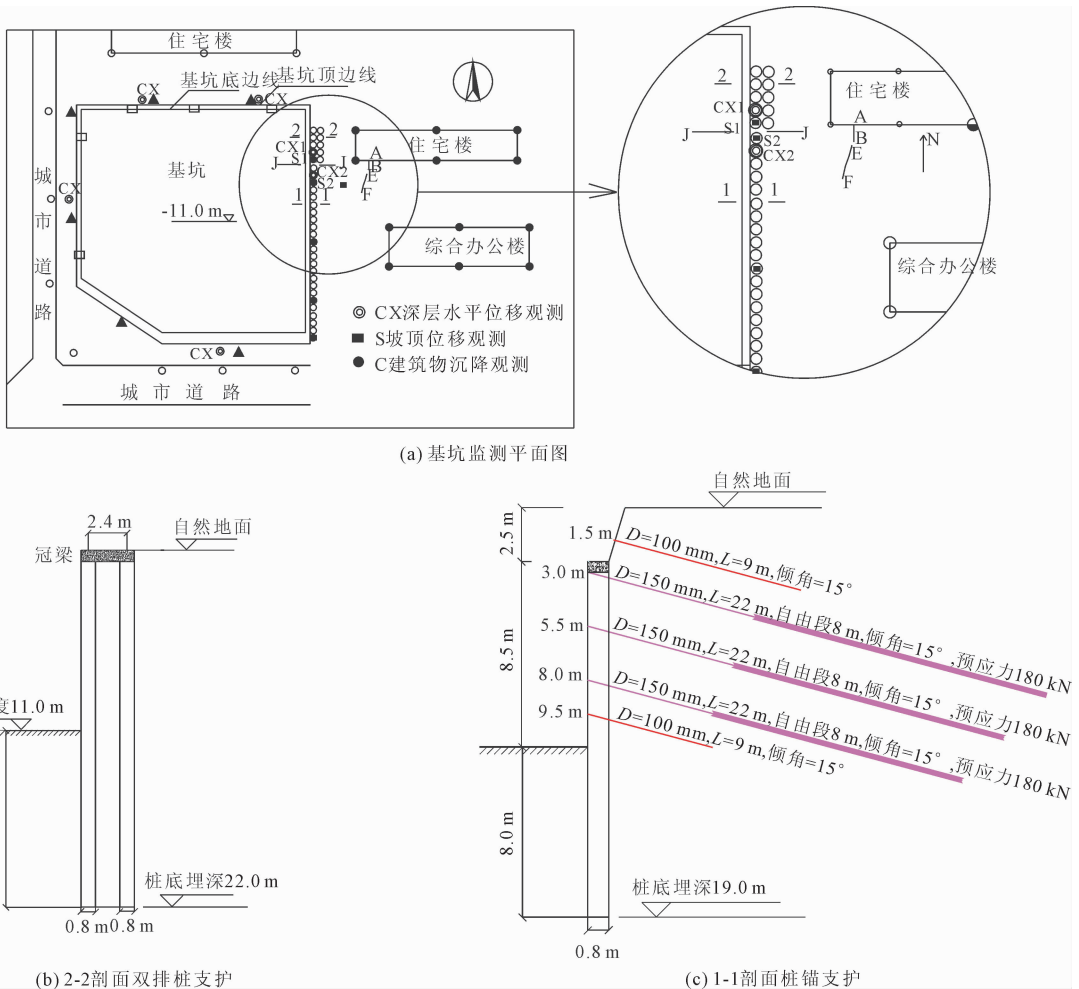


图 1 基坑平面及剖面图

2 地质条件

2.1 工程地质条件

场地地形平坦,最大高差 0.69 m,地貌单位为黄河冲积平原。根据地质勘察报告,在基坑开挖深度及影响范围内划分为 6 个工程地质层,从上到下各主要土层物理力学指标如表 1 所示。

2.2 水文地质条件

场地地下水位类型为潜水,补给来源主要为大气降水,地下水位约 12 m。考虑施工期间可能为丰水期,地下水位按 10.0 m 处理。

表 1 土层信息表

层号	土层名称	层厚 /m	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa
1	粉土夹粉砂	5.31	18.0	10.00	15.00	25
2	粉土	2.04	18.0	11.00	22.00	30
3	粉土夹粉质黏土	4.86	17.7	15.00	18.00	28
4	粉质黏土	5.23	17.5	18.00	12.00	28
5	粉土	1.38	17.9	10.00	22.00	30
6	粉砂	7.91	18.2	0.00	18.00	50

2.3 现场情况描述

在基坑开挖施工过程中,在交界面 J-J 方向上,在住宅楼的散水位置发生了开裂,如图 1(a) 的 A 点所示,并且在 A 点附近位置也发生了裂纹开裂,其现场照片如图 2 所示。显然,在 J-J 交界面两侧由于双排桩和桩锚支护的支护刚度的差异而发生了局部不协调变形,本文正是通过数值模拟方法和现场监测手段对这种差异变形进行更为细致的研究。



图 2 双排桩与桩锚支护连接处距坡顶一定距离处的 A 点裂缝图

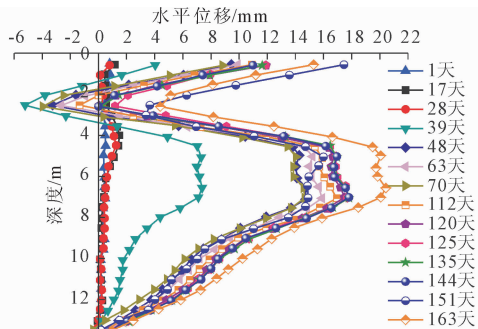
3 监测结果与数值模拟

3.1 基坑监测结果分析

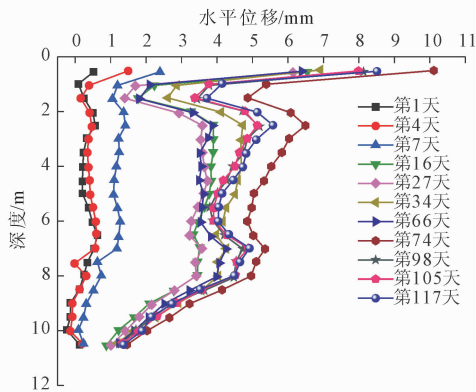
图 3 给出了桩锚支护侧和双排桩支护侧的基坑监测曲线。需要说明的是,由于现场桩施工等原因,两侧测斜管均埋在桩后土体中。总体变化趋势上双排桩的深层水平位移曲线呈“扁平状”,而桩锚支护的深层水平位移曲线呈“弧形弓形”,这是由双排桩支护和桩锚支护的支护特点决定的。双排桩支护的最大水平位移出现在地表下 2.5 m 处,最大水平位移值为 6.45 mm,桩锚支护的最大深度水平位移出现在地表下 7.0 m 处,最大水平位移值为 20.45 mm,两种支护方案最大深层水平位移值相差比较大,水平位移的差异必然导致两种支护方案在其结合处位置附近产生不协调变形。从位移变化速率看,桩锚支护最大深层水平位移速率为 1.16 mm/d,而双排桩最大深层水平位移速率为 0.34 mm/d,两种方案的最大深层水平位移速率差异较大,双排桩支护和桩锚支护由于其加固作用机理的不同,对基坑开挖有不同的响应。

双排桩和桩锚支护的桩顶水平位移结果如图 4 所示,随着开挖深度的增加,桩顶水平位移逐渐增大,总体趋势相同。从数值角度来看,桩锚支护桩顶水平位移大于双排桩支护桩顶水平位移,桩顶水平位移最大差异为 3 mm,这与数值模拟结果一致。另

外从变形速率看,在第 36 d 到第 40 d 基坑开挖最快的时期,两种支护方案的桩顶水平位移变化率都比较大,这一点与深层水平位移的观测结果也是一致的。



(a) CX2在桩锚支护一侧土层中的深层水平位移



(b) CX1在双排桩支护一侧土层中的深层水平位移

图 3 桩的水平位移与监测时间的关系曲线

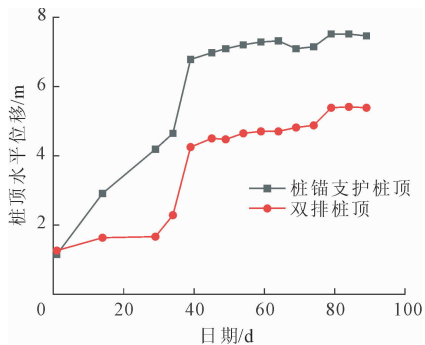


图 4 桩顶水平位移与监测时间的关系曲线

3.2 节点两侧支护方案的数值模拟分析

3.2.1 模型建立

由于本次研究重点在于双排桩支护与桩锚支护结合处,故取两种支护交界面两侧重点建模。一般而言,基坑开挖对周边环境的影响范围约为 3 倍基坑设计开挖深度,故模型深度方向即 Z 方向取为 40 m,模型向西即坑内方向取 15 m,向南取 72 m,平面图为一个长 100 m(南北方向)宽 95 m(东西方向)

的矩形。为更好地研究基坑开挖过程相邻不同支护形式相互影响,对基坑东侧支护结构、周边环境及其距基坑边 9.5 m 的建筑物详细建模如图 5 所示。

模型中建筑物参数:框架结构建筑物距离基坑边 9.5 m,俯视图为长(X 轴)46.5 m,宽 11.6 m(Y 轴)的长方形,建筑物共九层,每层 3 m,建筑物每层均布荷载取 20 kN/m^2 。建筑物东墙与西墙为整墙体。

划分网格的过程宜尽量精细,将桩间土及与建筑物西边相邻土体的网络尺寸控制在 1 m,向基坑内既东方向过渡到 3 m,向其余方向过渡在 4 m,模型网络如图 5 所示。

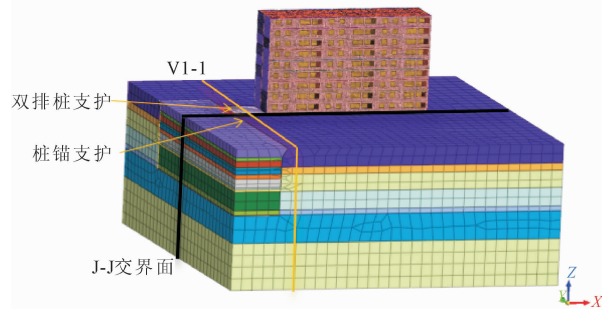


图 5 基坑侧壁的不同支护方法的计算模型示意图

3.2.2 施工阶段划分

该工程的开挖支护方式遵循“先开挖后支护、分层开挖”原则。在 MIDAS/GTS NX 软件中通过对土体网格组的“激活”、“钝化”来实现模拟基坑的开挖过程,模型共分 5 步进行计算:工况 1:向下开挖至 2.5 m 深,打入双排灌注桩,桩锚支护处进行 2.5 m 深放坡开挖,打入单排灌注桩和放坡土钉。工况 2:向下开挖至 3.5 m 深,打入预应力为 180 kN 的第一排预应力锚杆。工况 3:向下开挖至 6 m 深,打入预应力为 180 kN 的第二排预应力锚杆。工况 4:向下开挖至 8.5 m 深,打入预应力为 180 kN 的第三排预应力锚杆。工况 5:开挖至 11 m 深,喷射混凝土面层。

3.3 数值模拟与现场监测对比结果分析

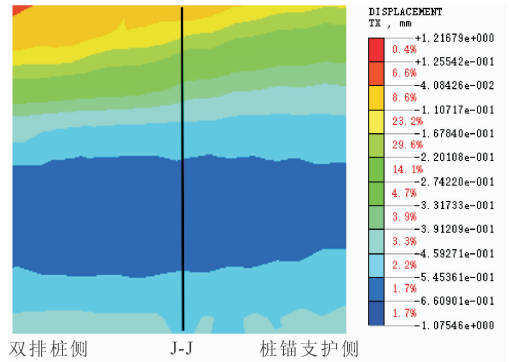
3.3.1 两种支护方式交界面变形不协调问题分析

(1) 分析监测面及模拟监测点的选取

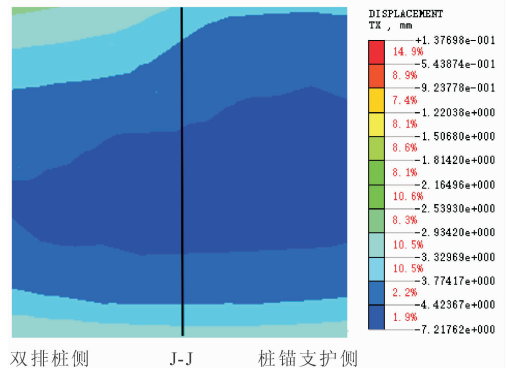
为了便于表达和准确分析,在所建立的模型中选取特定的截面作为分析监测面,如图 5 所示,J-J 截面为双排桩支护与桩锚支护之间垂直于基坑侧壁的竖向交界面;V1-1 为平行于基坑侧壁竖向切面,V1-1 距离基坑侧壁 0.8 m。

(2) 基坑侧壁水平位移对比分析

部分施工过程中的土体表面水平位移云图如图 6 所示,由图 6 可以看出,开挖早期工况 2 开挖深度较浅时水平位移云图基本呈对称分布,表明两种支护侧水平位移差别不大,开挖深度较大时桩锚支护侧发生“突变”,其水平位移大于双排桩支护侧水平位移。



(a) 工况 2 土体表面水平位移云图



(b) 工况 5 土体表面水平位移云图

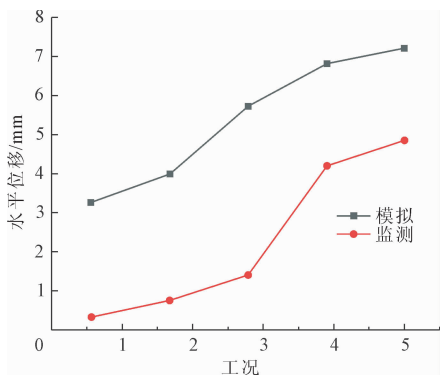
图 6 土体表面水平位移云图

模拟与监测水平位移对比如图 7 所示,根据图 7 可知:随着基坑开挖,桩顶水平位移逐渐增大,数值模拟与现场监测数据趋势相同,模拟数据大于监测数据但结果均在安全可控范围之内,证明数值模拟能够合理得反应基坑变形特性,可以为现场施工提供一定指导意见。

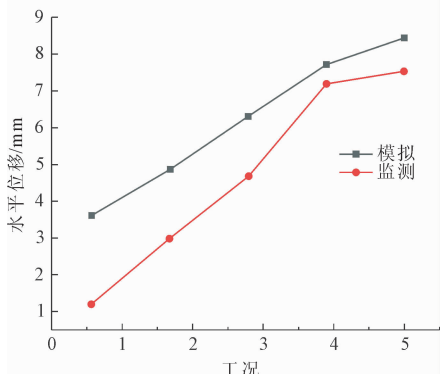
模拟与监测深层水平位移对比如图 8 所示,根据图 8 可知:模拟与监测结果大致为“S”型分布,趋势大体相同。监测与模拟数据都表明,桩锚支护侧深层水平位移明显大于双排桩支护侧水平位移,两种支护方式水平位移变形不协调,使支护交界面更容易成为薄弱区。

3.3.2 两种支护方案交界面附近应力对比分析

图 9 给出了交界面两侧平行于基坑侧壁切面水平应力云图,从工况 1、工况 5 水平应力云图中可以看出:随着开挖进行,双排桩支护侧与桩锚支护侧水

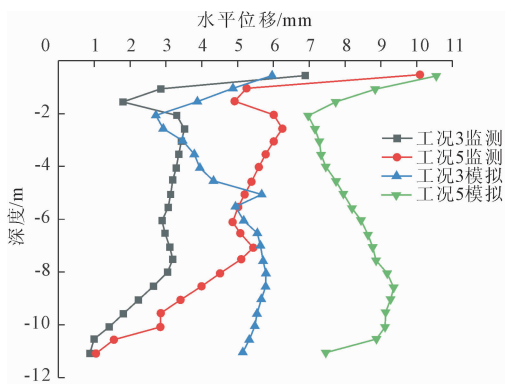


(a) 双排桩支护桩顶水平位移模拟监测对比图

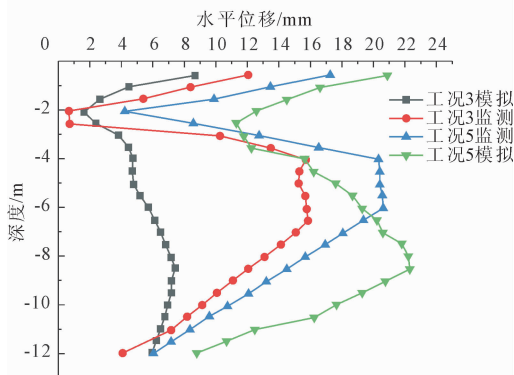


(b) 桩锚支护桩顶水平位移模拟监测对比图

图7 模拟与监测水平位移对比图



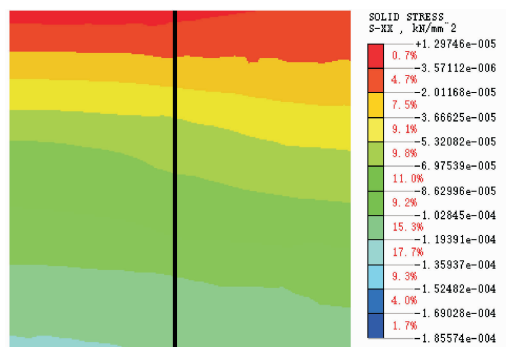
(a) CX1在双排桩支护侧深层水平位移对比图



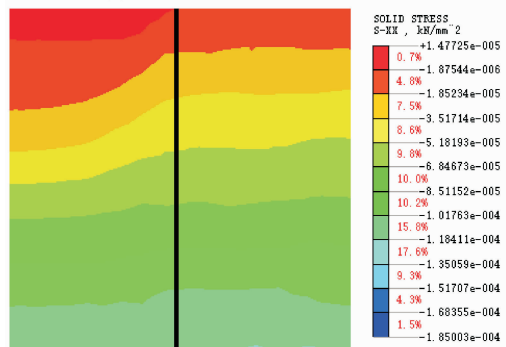
(b) CX2在桩锚支护侧深层水平位移对比图

图8 模拟与监测深层水平位移对比图

平应力逐渐增大。工况1开挖深度较浅时同一深度处交界面两侧水平应力差别不大,但同一种支护方式由浅到深水平应力逐渐增大。随着开挖进行,开挖较深时交界面两侧同一深度处水平应力差别较大,双排桩支护处水平应力大于桩锚支护处水平应力,这是由于两种支护形式承受了大部分荷载,其中桩锚支护预应力锚杆更有效控制了土体应力,改变了土体应力集中的现象。



(a) 工况1 V1-1土体水平应力云图



(b) 工况5 V1-1土体水平应力云图

图9 V1-1截面朝向基坑内部水平应力云图

4 不同支护形式结合处的连接措施

由于双排桩支护与桩锚支护加固机理不同,从计算可以看出两种支护形式变形差别较大,交界面处产生变形不协调。不同支护形式的过渡段应采取有效的衔接措施,防止不同支护结构的衔接部位成为支护结构的薄弱区。在本工程中,从前文研究结果可以看出,交界面桩锚支护处变形大于双排桩支护处变形,因此在交界处会产生变形不协调。为了解决此类问题,桩锚支护中三排锚索位置处的腰梁伸向双排桩一侧,并在双排桩一侧施工一道锚索,且锚索长度适当增加,有效地限制了两种方案在交界面附近的差异变形,达到了对两种方案在过渡段有效连接的目的。

5 结 论

对该工程基坑围护结构进行数值模拟和变形监测,分析了基坑开挖过程中部分监测项目的变化规律,主要得到如下结论:

(1) 监测结果表明两种支护方案深层水平位移最大值相差比较大,水平位移的差异必然导致两种支护方案在其结合处位置附近产生不协调变形。两种支护方案桩顶水平位移都明显增加,桩锚支护坡顶水平位移大于双排桩支护坡顶水平位移,桩顶水平位移的最大差异为 3 mm。

(2) 从基坑开挖数值模拟与监测数据对比分析可知,两种数据趋势一致,模拟数据大体大于监测数据。支护结构桩顶水平位移随着基坑的开挖逐渐增大。开挖较浅时,与双排桩支护结构相比,桩锚支护桩顶水平位移略大,但随着开挖的进行同一深度处桩锚支护处桩顶水平位移大于双排桩支护处桩顶水平位移,深层水平位移与桩顶水平位移趋势大体相同。在开挖初期两种支护方式水平应力差距不大,但随着开挖的进行,双排桩支护处水平应力大于双排桩支护处水平应力。

参考文献:

- [1] 建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:9-10.
- [2] 汪 钰. 单双排桩联合支护稳定性分析及影响因素研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2023:67-68.

- [3] 李 锐. 联合支护结构基坑安全性分析研究[D]. 成都:成都理工大学,2015:68-69.
- [4] 徐煜航. 深基坑桩锚与土钉联合支护的三维有限元模拟[J]. 能源与环保,2020,42(1):103-108.
- [5] 刘庆林,谢章绍,王增辉. 大面积不规则形状深基坑支护设计研究[J]. 人民珠江,2023,44(S2):482-487.
- [6] 丁龙翔. 基坑支护结构稳定性优化设计与分析[J]. 土工基础,2024,38(1):6-10.
- [7] 王振峰. 深基坑土钉墙与桩锚联合支护结构数值模拟与优化[J]. 广东建材,2024,40(2):117-119.
- [8] 刁志刚,夏文韬. 二元地层超深基坑桩锚撑组合支护轴力报警与变形协调分析[J]. 现代隧道技术,2020,57(S1):864-876.
- [9] 毛 可. 桩锚撑复合支护结构在基坑工程中的变形特性研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2024:72.
- [10] 魏焕卫,仇清辉,陈朝伟,等. 考虑变形协调的锚杆复合土钉墙变形计算方法[J]. 山东建筑大学学报,2022,37(3):1-9.
- [11] 张啸天. 深基坑土钉墙与桩锚联合支护结构研究与优化[D]. 长春:吉林建筑大学,2023:87-88.
- [12] 吴修明. 填土基坑中土钉墙与桩锚联合支护结构工作性状研究[D]. 济南:济南大学,2021:65-66.
- [13] 焦广莹. 日照某深基坑锚索与微型钢管桩联合支护变形稳定分析[D]. 青岛:山东科技大学,2019:70.
- [14] 王帅栋. 深基坑土钉墙-桩锚复合结构工作性能分析[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019:64-65.
- [15] 董建华,庄 超. 深基坑框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护结构力学特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(3):619-633.

(上接第 23 页)

- [11] 张绍逸. 玄武岩纤维筋与混凝土黏结锚固性能试验研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.
- [12] 张天鹏. BFRP-混凝土界面黏结性能研究[D]. 长春:吉林建筑大学,2019.
- [13] 赵 文,王 浩,陈 云,等. BFRP 筋锚杆土质边坡支护应用研究[J]. 工程地质学报,2016,24(5):1008-1015.
- [14] 唐 林. 全黏结玄武岩纤维增强聚合物锚杆应力分布特征研究[D]. 贵阳:贵州大学,2023.
- [15] 土木工程结构用玄武岩纤维复合材料:GB/T 26745—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
- [16] 刘文娟. 注浆锚杆对围岩加固作用机理及应用案例[J]. 科学技术与工程,2017,17(20):270-276.
- [17] 刘占占,李小刚,刘肖凡,等. GFRP 锚杆在不同水泥基材料中黏结性能的试验分析[J]. 江苏建筑职业技术学院学报,2022,22(4):22-25.
- [18] 胡金星. GFRP 锚杆锚固性能研究与分析[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [19] Zhao Dongping, Wen Sixun, Wang Luwei, et al. Structural parameters and critical anchorage length of tunnel system bolts made of basalt fibre[J]. Construction and Building Materials, 2021,310.