

软土地区某阶梯式深基坑变形监测与数值模拟

李程¹, 贾战磊¹, 徐成皓²

(1. 江苏省岩土工程勘察设计院, 江苏 镇江 212021;

2. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212003)

摘要:软土区深基坑的支护结构在基坑开挖时容易变形破坏造成安全事故。以镇江市软土区深基坑工程为研究对象,探讨了阶梯式支护结构的变形规律。通过现场实测和数值模拟对阶梯式支护结构进行综合分析,重点对比了支护桩位移结果。结果表明,模型计算结果与现场实测数据基本一致,可以准确地反映支护结构的变形规律;在开挖过程中,基坑中部支护桩的水平位移最大,桩顶最大水平位移为33.4 mm,并且水平位移沿桩身呈“弓形”变形模式;通过对比基坑南北两侧结果,发现采用阶梯式支护结构可以很好地控制支护桩的水平位移。

关键词:深基坑;阶梯式支护结构;基坑监测;数值模拟;位移

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)04-0061-08

地下空间的开发利用是拓展城市空间、解决城市土地资源紧张的最有效途径^[1]。随着城市地下空间开发的不断深入,深基坑工程设计时难免面临复杂的地域条件、不良的地质条件和不规则的地下结构等难题^[2]。尤其是沿海城市,其地质条件较差,地下水丰富,软土层深厚,若基坑支护结构设计不合理,在开挖施工及运营期间,极易发生支护结构破坏、基坑坍塌和地表沉降等灾害,给基坑施工质量和安全带来了隐患^[3-6]。因此对深基坑开挖施工中的变形规律进行研究具有重要意义。

目前,针对软土地区深基坑支护,主要通过现场监测数据分析、数值模拟以及二者结合的方法进行研究。王卫东等^[7]对上海国际金融中心重大项目基坑工程的监测数据进行分析,研究了顺逆作法交叉施工下基坑的变形特性。顾祯雪等^[8]通过对深基坑现场监测数据进行分析,研究了地连墙的变形规律。刘杰等^[9]以天津市某深基坑工程实例为研究对象,通过FLAC3D分析了桩锚混合围护结构的变形规律。赵凌云等^[10]以某沿海深基坑为例,介绍了分级卸荷、重力挡墙和桩锚组合的开敞式基坑支护型式,并结合数值模拟和现场监测数据,研究了组合围护结构水平位移和锚杆力的变化规律。吴瑞拓等^[11]基于HSS模型,结合数值模拟和现场监测数据,探讨了地下连续墙的侧移和坑外地表沉降的空间效应。于至海等^[12]依托软土区深基坑工程,通过FLAC3D研究了被动区超前加固的变形控制效果。郁志伟等^[13]以上海某深基坑为背景,通过数值模拟探讨了不同规格的地下连续墙变形特征。陈晓鹏等^[14]通过对比数值模拟结果和现场监测结果,分析了绍兴市地铁一号线深基坑支护结构体系的位移变化。

以上是诸多学者对常规深基坑的变形规律研究,但对于阶梯式深基坑的变形特性少有研究。因此,以镇江市某基坑工程为例,通过分析现场监测数据得到支护结构的变形规律,并将监测结果与Midas GTS数值模拟结果进行对比分析。

1 工程概况

1.1 场地概况

基坑位于镇江丹阳市新民路南侧,拟建项目由5幢9、10层住宅楼、2幢6层住宅楼和3幢3、4层商

收稿日期:2023-06-16 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230159

作者简介:李程(1981—),男,高级工程师,研究方向为土木工程。E-mail:380526425@qq.com

李程,贾战磊,徐成皓.软土地区某阶梯式深基坑变形监测与数值模拟[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(4):61-68.

业楼组成,下设 1 座 2 层大底盘地下室。建筑总用地面积约 22 677 m²,地上建筑面积约 45 355 m²,地下建筑面积 34 531 m²,总建筑面积 79 886 m²,底板设计底标高-2.2 m。

1.2 工程地质及水文条件

场地位于丹阳市城区内,场地地貌为太湖水网平原区,地貌单元为水网平原。场地现为露天停车场。地面高程 6.16~8.33 m,相对高差约 2.0 m,地形较平坦。场地从上至下岩土层依次为:①层素填土、②层粉土、③层淤泥质粉质黏土夹粉土、④层淤泥质粉质黏土、⑤层粉质黏土、⑥层粉质黏土夹粉土和⑥₋₁层粉质黏土。

勘察期间,测得孔隙潜水初见水位埋深 0.91~2.25 m,稳定水位埋深 0.82~2.15 m。水位为 5.90~6.18 m。水位受季节性变化及附近河水位影响较大,年变化幅度一般在 1.2 m 左右。场地内 3~5 a 及历史最高地下水位可按整平后室外地坪下埋深 0.5 m 考虑。

1.3 工程特点

开挖深度范围内①层填土松软、透水,②层粉土及③层淤泥质粉质黏土夹粉土开挖后易渗水,引起坑壁坍塌,并且③层淤泥质粉质黏土夹粉土和④层淤泥质粉质黏土为软土,流塑状态,强度低、压缩性高,抗剪强度低,具触变性,渗透性较小,中灵敏性,基坑开挖后易发生局部崩塌或整体滑坡破坏等不良地质现象。另一方面,地下室形状不规则,在 2 层地下室的南侧存在逆错层,基坑开挖时会形成阶梯式深基坑,基坑开挖深度为 6.2~10.0 m。因此,在进行基坑开挖时应采取相应的支护措施,确保基坑施工安全。

2 支护结构设计及监测

2.1 支护结构方案

施工场地工程地质条件特殊,填土层和淤泥质土层天然状态强度较低,基坑开挖后容易在该层发生坍塌。基坑周边均为老旧居民楼,距离基坑较近,基坑开挖对其稳定性有较大影响,故围护结构需要严格控制变形。结合地质条件和周边环境情况,本着安全、经济的原则,基坑的围护结构整体采用控制变形较好的钻孔灌注桩支护,灌注桩直径为 900 mm,基坑内部设置 2 道 700 mm×700 mm 的钢筋混凝土支撑,围护桩外部设置三轴深层搅拌桩止水帷幕。支护体系具体如下:基坑北侧、东侧及西侧范围,上部放坡处理,下部采用直径为 900 mm 的钻孔灌注桩+钢筋混凝土支撑;基坑南侧为逆错层,采用阶梯式支护,即阶梯上部采用钻孔灌注桩支护,下部采用水泥土墙+复合土钉墙,形成组合支护结构,如图 1 所示。

2.2 监测方案

为了确保基坑工程、周边建筑物及地下管线的正常运行,对基坑支护结构、建筑物及管线进行监测。监测内容包括支护桩的深层水平位移、支护桩顶水平位移与竖向位移、支撑轴力等项目,具体监测点布置如图 2 所示。监测项目的控制要求为:支护桩的水平位移报警值为 35 mm,水平位移变化速率 ≥ 2 mm/d 时报警,支护桩竖向位移报警值为 15 mm,竖向位移变化速率 ≥ 2 mm/d 时报警;建筑物位移报警值为 20 mm,变化速率 ≥ 2 mm/d,整体倾斜度累计值达到 2/1 000 时报警;基坑深层水平位移绝对累计值为 45 mm,变化速率 ≥ 2 mm/d 时报警。

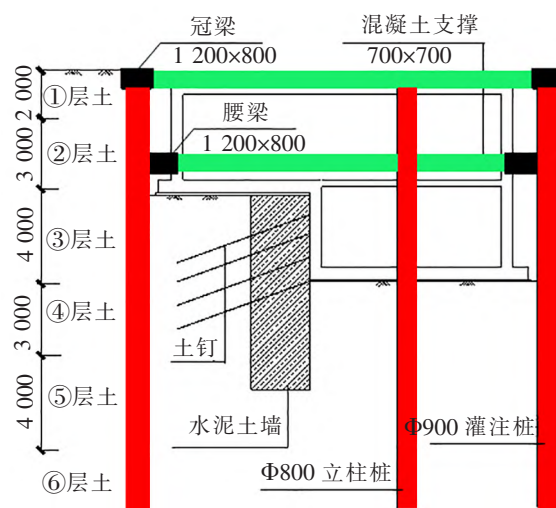


图 1 阶梯式支护结构剖面图(单位:mm)

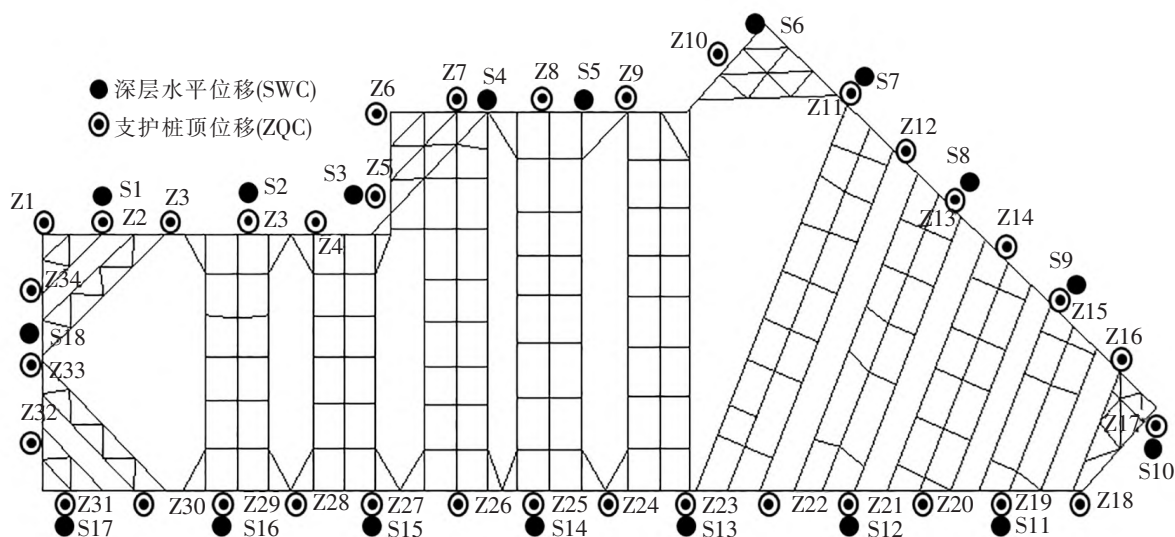


图2 基坑监测点布置平面图

2.3 现场监测结果分析

2.3.1 支护桩顶水平位移分析

随着基坑内部土方的逐步开挖,坑内土压力逐渐减小,在支护桩后的土压力作用下,支护桩发生侧向位移,其值的变化可直接反映基坑的变形情况,因此,支护桩顶的水平位移是指导基坑工程施工以及衡量基坑支护结构是否安全的关键指标。选取典型监测点进行统计分析,选取监测点为 ZQC2、ZQC8、ZQC13、ZQC16、ZQC21、ZQC25、ZQC31 和 ZQC34 的实测结果进行统计,分析支护桩顶水平位移随施工时间的变化趋势,如图 3 所示。

由图 3 可知,不同支护桩顶的水平位移变化趋势基本一致,都是先增大,最终趋于平稳,从土方开挖到基坑回填整个过程中支护桩顶的累计水平位移值为 33.4 mm,满足监测要求。在前期支护桩顶的水平位移变化较小,这是由于土方开挖深度较浅,作用在桩外侧的土压力较小。随着开挖深度逐渐增加,作用在桩体的土压力急剧增大,桩体产生较大位移,变形速率也明显增加。然而,在第 2 道钢筋混凝土内支撑施工之后,与第 1 道钢筋混凝土内支撑以及支护桩形成稳定的框架结构,水平位移得到了有效控制,随着开挖深度增加,其变化速率逐渐减小。同时,可以观察到施工时间超过 120 d 时,支护桩顶水平位移显著增大,这是因为拆除第 1 道钢筋混凝土内支撑之后,支护桩受到的支撑作用削弱。

另外,通过观察图 3 可以发现,监测点 ZQC21、ZQC25、ZQC31 的水平位移值明显小于其他监测点的数值,这是由于基坑南侧采用了阶梯式支护,阶梯下部的水泥土墙和复合土钉墙加固了支护桩内侧被动区,削弱了支护桩内侧的坑底隆起。并且,可以发现点 ZQC16 的变形明显小于点 ZQC13,说明同一支护结构条件下基坑长边的变形大于短边的变形,即具有长边效应。

2.3.2 支护桩顶竖向位移分析

支护桩作为深基坑的围护结构,其沉降关系着深基坑的安全,沉降过大时会直接破坏结构的整体性,引发基坑失稳安全事故,因此,支护桩的沉降监测是重点。根据实测数据绘制支护桩顶沉降随施工时间

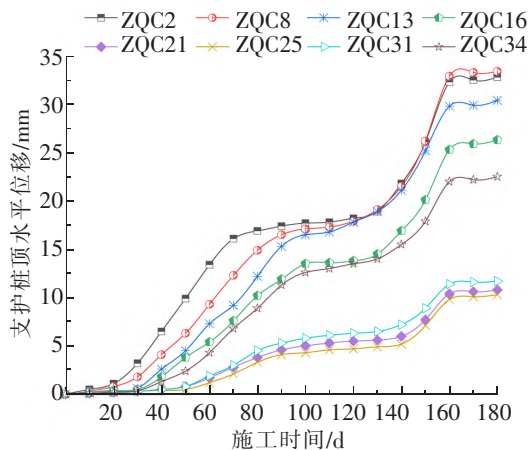


图3 支护桩顶水平位移随施工时间的变化关系

变化的关系曲线,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,支护桩顶竖向位移随着施工时间的增加而增大,最终趋于平稳。支护桩顶部不同位置的竖向位移随着基坑开挖深度增大而增大。对比南北两侧不同部位的竖向位移可知,北侧支护桩的顶部竖向位移明显小于南侧的位移值,主要原因在于南侧基坑阶梯下部采用水泥土墙联合土钉支护形式。此外,可以发现曲线的增长趋势为非线性,曲线局部的斜率减小,即沉降速率减小,这是因为在内支撑施工之后,立柱桩与内支撑形成整体,且立柱桩嵌入土体深度较大,其侧壁摩阻力减小支护桩的竖向位移。

2.3.3 深层土体水平位移分析

基坑的开挖会导致基坑周围深层土体发生水平位移,位移过大会导致支护桩破坏引发事故。深层土体水平位移可以直接反映桩身的水平位移情况,因此,对深层土体水平位移进行监测是十分必要的。

图 5 为基坑回填时不同监测点深层土体发生的水平位移,观察图 5 发现:①不同位置监测点的深层土体水平位移均呈现沿深度方向先增大后减小,整体表现为两端位移小、中间大的“弓形”变形模式;②深层土体水平位移最大为 44.9 mm,位于基坑的北侧中部深度为 6 m 的位置,即临近第 2 层地下室坑底的位置;③由于南侧坑内设置了水泥土墙和土钉,其水平位移明显小于北侧,最大水平位移位于基坑的南侧中部深度为 3.5 m 的位置,即临近第 1 层地下室坑底的位置。

为了进一步分析不同工况下深层土体水平位移,选取位于基坑北侧中部的 SWC2 号监测点进行分析。由图 6 可以看出,基坑开挖较浅时,由于未设置内支撑,支护桩为悬臂状态,此时深层土体水平位移较小。随着基坑继续开挖,深层土体水平位移逐渐增大,曲线的趋势更加明显。

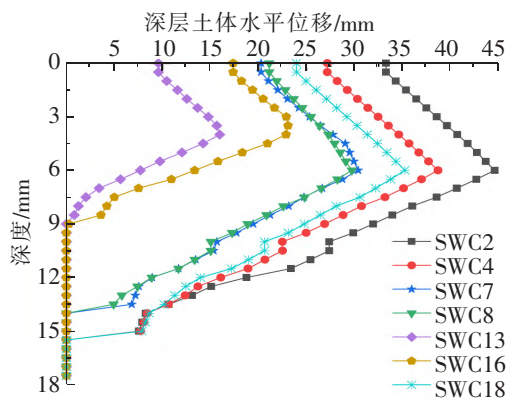


图 5 基坑回填时不同监测点深层土体的水平位移

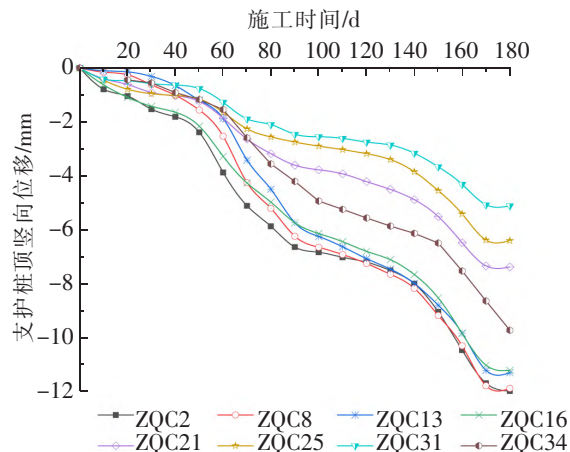


图 4 支护桩顶竖向位移随施工时间的变化关系

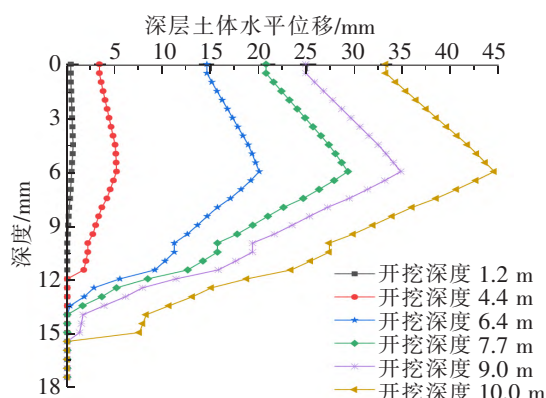
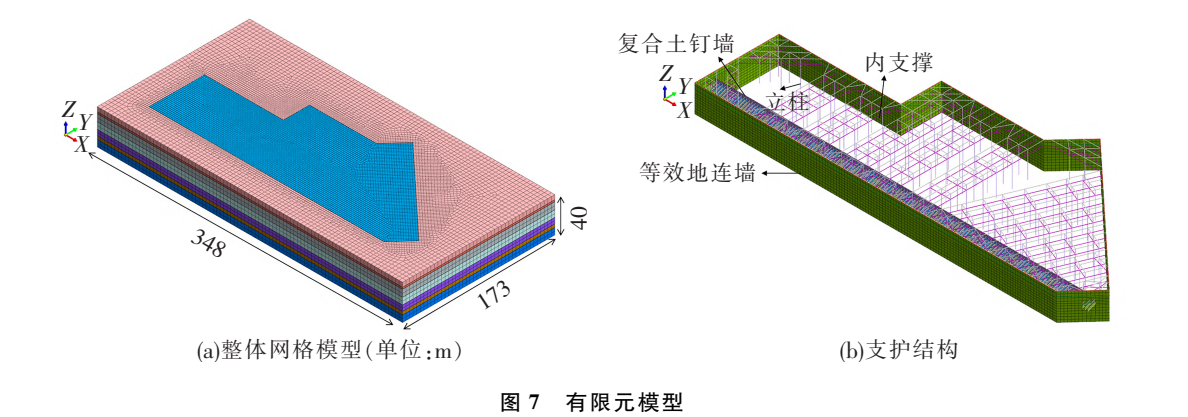


图 6 不同施工阶段下深层土体水平位移与深度的关系曲线

3 数值模拟分析

3.1 模型建立

本模型采用 Midas GTS NX 来模拟,得到不同施工阶段支护桩的变形特性。根据圣维南原理,基坑开挖边线外地层的平面尺寸及其深度取开挖深度的 5 倍,模型平面尺寸为 $348 \text{ m} \times 173 \text{ m}$,地层深度取 40 m,基坑的三维几何模型如图 7 所示。模型主要包括地层、排桩支护结构、土钉、内支撑以及立柱桩。地层采用修正摩尔-库伦本构,内支撑、排桩、立柱桩、水泥土墙和土钉等支护结构采用弹性本构。建立支护结构模型时将排桩等效为地下连续墙。假设地层均匀分布,周边道路荷载取 12 kN/m^3 ,周边建筑荷载取每层 15 kN/m^3 。模型的边界采用自动约束,并对立柱设置旋转约束。



3.2 模型参数选择

根据现场勘察资料选取岩土参数,基坑支护结构参数根据实际工况选取经验值(见表 1)。基坑支护结构的具体属性与尺寸见表 2。

表 1 土层及材料参数

名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/ MPa	泊松比 μ	切线压缩 模量/MPa	卸载-再加载 模量/MPa
①	17.7	8.0	7.6	5.00	0.32	5.00	15.00
②	18.3	9.0	28.7	7.35	0.30	7.35	22.05
③	17.6	12.0	14.2	4.57	0.33	4.57	13.71
④	17.4	7.0	9.5	4.14	0.34	4.14	12.42
⑤	19.0	17.0	15.1	5.37	0.29	5.37	16.11
⑥	19.8	43.0	15.1	7.08	0.30	7.08	21.24
⑥ ₋₁	19.3	27.0	16.4	6.63	0.28	6.63	19.89
C30	24.0	—	—	30 500	0.20	—	—
立柱	78.5	—	—	20 500	0.20	—	—
土钉	78.5	—	—	30 500	0.20	—	—
水泥土墙	20.0	—	—	800	0.30	—	—

表 2 基坑支护结构属性

名称	单元类型	所用材料	截面尺寸/m
围护桩	2D	C30	0.7(板厚)
冠梁	1D	C30	0.8×1.2
内支撑	1D	C30	0.7×0.7
腰梁	1D	C30	0.8×1.2
立柱	1D	立柱	0.85(半径)

3.3 施工阶段组设置

为了与现场实际工况一致,在模型计算时进行了相同工况的划分,首先进行初始应力分析,消除模型自重对开挖过程的影响,然后进行基坑支护施工和土方开挖。由于支护结构主要为钻孔灌注桩和重力式水泥土墙,其施工对周边环境影响较小,故模拟工况设置时也需要进行位移清零。基坑施工模拟采用施工阶段进行模拟,施工阶段组结合施工工艺关键节点进行设置,土方分 7 次开挖。

3.4 数值计算结果对比分析

采用 Midas GTS NX 进行计算,获得基坑支护结构在土方开挖完成时的水平变形结果,如图 8 所示。图 8(a)为 X 方向支护桩的水平位移,通过观察发现支护桩均向坑内方向发生侧移,X 方向水平位移最大为 34.7 mm。由图 8(b)可知,支护桩的最大水平位移为 44.87 mm,侧移方向为坑内。同时,可以发现支护桩桩身水平位移主要集中在桩身中上的部位,呈现出中间大、两端小的“弓形”变形特点。

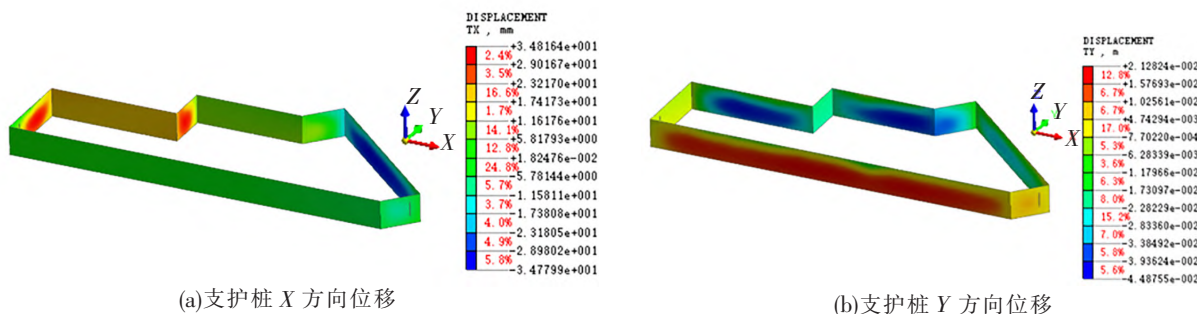


图 8 支护桩水平位移

3.4.1 支护桩顶水平位移对比分析

为了进一步分析支护结构的变形特点,在模型计算结束后选取实际监测点相同位置的支护桩顶水平位移计算结果与实测值进行对比分析,如图 9 所示。

由图 9 可知,模拟结果与监测值不完全一致,这是因为在数值模拟建模时简化了土层,而实际土层分布不均匀;其次,模型的边界条件和受力条件比较理想,没有考虑施工时场地内的临时堆载和活荷载。此外,可以发现模拟结果曲线的变化趋势与监测数据曲线基本一致,支护桩的位移随着施工时间的增加逐渐增大,最终趋于稳定。在拆除第 1 道内支撑之前,各工况模拟结果基本小于监测值。然而,在第 2 道内支撑拆除时,模拟结果大于监测值,这是由于实际工程中,内支撑拆除时会进行换撑,而在数值模拟时没有考虑换撑。虽然第 2 道拆除时数值模拟结果较大,但未超过预警值,基坑支护结构处于安全状态。

3.4.2 支护桩顶竖向位移对比分析

在模型计算结束后选取实际监测点相同位置的支护桩顶沉降计算结果与实测值进行对比分析,如图 10 所示。

通过观察图 10 发现,支护桩顶竖向位移的模拟结果与监测值的增长趋势基本一致。实际工程中,基坑开挖之前需要进行降排水处理,土层失去自由水,孔隙水压力消散,在土体自重作用下发生沉降,而数值模型计算时假设降排水已完成,故其模拟结果均小于监测值。但两者的最大值仅为 12.01 mm,小于预警值 15 mm,表明基坑支护结构的稳定性较好。

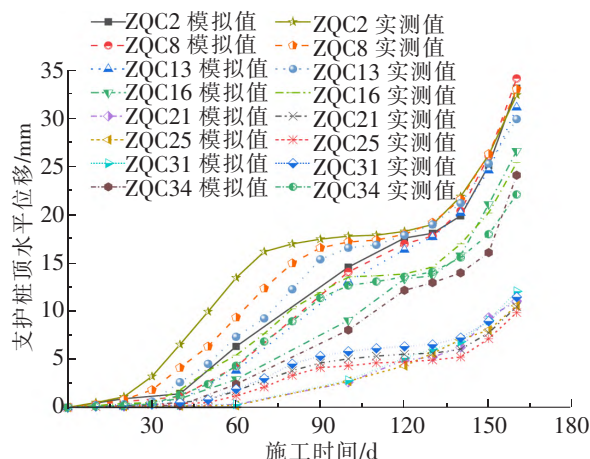


图 9 支护桩顶水平位移模拟值与监测值对比曲线

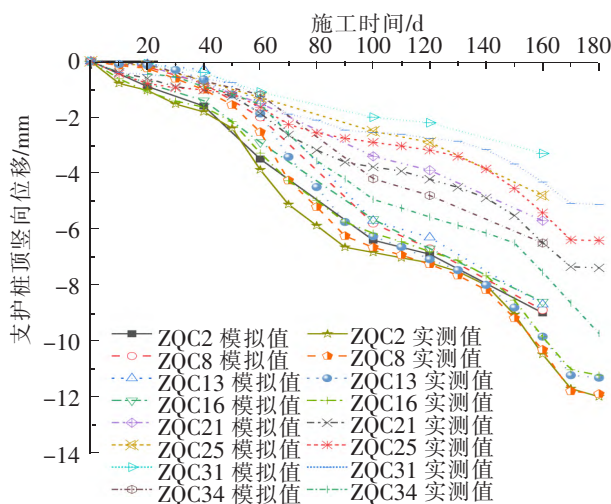


图 10 支护桩顶竖向位移模拟值与监测值对比曲线

4 结论

依托镇江软土地区某阶梯式深基坑工程,对基坑施工过程中支护桩的位移进行了全面分析,通过有限元模型对典型剖面的监测结果与数值模拟计算结果进行分析,主要得到以下结论:

(1)在阶梯式基坑开挖过程中,基坑中部支护桩的位移最大,桩顶实测位移最大值达到 33.4 mm,桩身最大水平位移为 44.9 mm,均小于监测报警值。其变形规律与数值模拟结果基本一致,验证了数值模拟的准确性。

(2)通过实测数据和数值模拟结果对比,发现支护桩水平位移沿桩身呈“弓形”分布。随着基坑开挖深度增加,支护桩的水平位移不断增大,桩身最大位移的位置向下部移动,均位于开挖面附近。

(3)基坑南侧支护桩的水平位移明显大于北侧支护桩的水平位移,表明采用阶梯式支护可以有效地控制支护桩和周围土体的变形。

参 考 文 献

- [1]金乐文,王琛,梁发云.城市滨海软土地区深层地下空间开发现状及工程问题[J].岩土工程学报,2021,43(增刊2):178-183.
- [2]郭书兰,阎长虹,杨战勇,等.特殊地质环境条件研究在超大基坑支护设计中的意义——复杂地质环境下超大异形基坑支护设计优化分析[J].地质论评,2017,63(5):1419-1427.
- [3]张玉成,杨光华,胡海英,等.珠三角深厚软土地区浅基坑支护若干问题探讨[J].岩土工程学报,2014,36(增刊1):1-11.
- [4]倪小东,王琛,唐栋华,等.软土地区深基坑超大变形预警及诱因分析[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(6):2245-2254.
- [5]乔丽平,李韵迪,杨超.填海区临地铁超大直径圆环撑基坑变形控制及监测分析[J].科学技术与工程,2022,22(7):2838-2847.
- [6]黄睿,许毓啸,吴灿鑫.软土基坑分区开挖对临近地铁隧道影响的实例分析[J].现代隧道技术,2022,59(增刊1):509-517.
- [7]王卫东,徐中华,宗露丹,等.上海国际金融中心超深大基坑工程变形性状实测分析[J].建筑结构,2020,50(18):126-135.
- [8]顾祯雪,楼伟中,程钰博,等.南京软土地区超长异形深基坑地连墙变形性状分析[J].现代隧道技术,2021,58(1):182-189.
- [9]刘杰,郑刚,聂东清.天津软土地区深基坑多级支护结构变形的参数分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2018,31(1):47-54.
- [10]赵凌云,路威,秦景,等.软土深基坑组合开敞式支护数值模拟与监测分析[J].水利水电技术,2020,51(2):155-161.
- [11]吴瑞拓,顾晓强,高广运,等.基于HSS模型的上海地铁深基坑开挖变形分析[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):64-70.
- [12]于至海,吴旭君,曹文昭.软土深基坑被动区超前加固变形控制效果研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):71-79.
- [13]郁志伟,张克胜,宋卓华,等.软土地层深基坑围护结构变形分析及模拟研究[J].建筑结构,2022,52(增刊2):2373-2377.
- [14]陈晓鹏,陈士军,吴烈,等.绍兴地铁一号线深基坑开挖过程数值分析[J].济南大学学报(自然科学版),2022,36(4):444-451.

Deformation Monitoring and Numerical Simulation of a Stepped Deep Foundation Pit in Soft Soil Area

Li Cheng¹, Jia Zhanlei¹, Xu Chenghao²

(1. Jiangsu Geotechnical Engineering Survey and Design Institute, Zhenjiang 212021, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The support structure of deep foundation pits in soft soil area is prone to deformation and failure during excavation, leading to potential safety accidents. Taking the deep foundation pit project in the soft soil area of Zhenjiang city as the research target, the deformation law of the stepped support structure was investigated. Through on-site measurement and numerical simulation, a comprehensive analysis was conducted on the stepped support structure, with a particular focus on comparing the displacement results of the support piles. The results shows that the computed results closely align with the actual field data, accurately reflecting the deformation patterns of the support structure. During the excavation process, the highest horizontal displacement of support piles can be observed in the middle of the foundation pit, with a maximum of 33.4 mm at the top of the pile. Moreover, the horizontal displacement presents a “bow-shaped” deformation pattern along the pile body. By comparing the deformation results from the north and south sides of the foundation pit, it can be observed that the implementation of the stepped support structure effectively regulates the horizontal displacement of the support piles.

Key words: deep foundation pit; stepped support structure; foundation pit monitoring; numerical simulation; displacement

~~~~~  
(上接第 33 页)

[6]位庆江. 缺陷和局部失效对钢管混凝土系杆拱桥的影响研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2022.

[7]TED Z,RYAN W. Design of long span bridges for cable loss[M]. Lisbon: IABSE,2005.

[8]吴庆雄,罗健平,魏小康,等. 考虑吊杆断裂过程的下承式钢管混凝土拱桥动力分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023,51(3):409-416.

[9]蔡建国,冯健. 大跨空间结构连续倒塌分析若干问题探讨[J]. 工程力学,2012,29(3):143-149.

## Analysis of Mechanical Properties of the Structure Caused by the Fracture of the Suspension Rod of Spatial Mesh Suspension Rod Tied Arch Bridges

Zou Lanlin, Hu Yanshu

(School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** Based on the research background of a steel box tied arch bridge with a wide spatial mesh boom, the effects of the broken boom on the mechanical properties of the structure were analyzed. By simulating the state of the broken boom, the static characteristics of the number and position of the broken boom on the internal force of the remaining boom, the internal force of the main beam, the internal force of the main arch, the line shape of the main beam and the line shape of the main arch were analyzed. The results show that the internal force redistribution of the adjacent boom will occur after the boom breaks, and the closer the distance to the fracture, the greater the impact. After the boom was broken, the peak of displacement reduction would appear near the fracture position, and the farther away from the fracture position, the influence on the linear shape of the main beam and main arch would gradually decrease. Through the analysis of single boom fracture and two booms fracture, it can be seen that the arch foot position and mid-span position have the greatest influence on the main beam and main arch after the boom fracture.

**Key words:** spatial mesh; steel box tie arch bridge; structural stability; broken boom; statics