

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.

ZHAO Lingyun, LU Wei, QIN JING, et al. Numerical simulation and monitoring analysis of composed open-typed support for deep soft soil foundation pit [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(2): 155-161.

软土深基坑组合开敞式支护数值模拟与监测分析

赵凌云¹, 路威^{1,2}, 秦景^{1,2}, 孙庚^{1,2}, 高霈生^{1,2}

(1. 北京中水科工程总公司, 北京 100048; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 以某沿海地区深基坑工程为背景, 介绍了软土地区采用分级卸荷、重力挡墙和桩锚组合的开敞式基坑支护型式。通过建立三维有限元模型模拟基坑开挖过程, 对比数值模拟和现场监测结果, 分析了基坑支护桩水平位移和锚杆力的变化规律。结果表明: 支护桩变形和锚杆力的模拟值与监测结果趋势一致, 实测结果与预测值的整体偏差在 15% 以内, 基坑工程处于安全稳定状态; 三维有限元模型可以较好地考虑基坑在组合支护情况下重力挡墙和空间效应对桩锚结构受力的影响, 具有较高的可信度; 对于软土基坑, 将重力挡墙和桩锚组合, 并结合分级卸荷, 改变了支护结构上的土压力分布规律, 能够有效控制基坑变形, 确保支护结构稳定。应用成果可以为同类工程提供参考。

关键词: 软土地区; 深基坑; 桩锚支护; 数值模拟; 动态监测

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.02.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV551.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2019)02-0155-07



Numerical simulation and monitoring analysis of composed open-typed support for deep soft soil foundation pit

ZHAO Lingyun¹, LU Wei^{1,2}, QIN Jing^{1,2}, SUN Geng^{1,2}, GAO Peisheng^{1,2}

(1. Beijing IWHR Corporation, Beijing 100048, China; 2. China Institute of Water

Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: By taking a deep foundation pit project in coastal area as the case, the open-typed support system composed by staged unloading, gravity retaining wall and pile-anchor for the foundation pit adopted in soft soil area is introduced herein. Through establishing the relevant 3-D finite element model for simulating the construction of the foundation pit, the results from the numerical simulation and the in situ monitoring are compared, and then the variation laws of the horizontal displacement of the supporting pile and the force of the anchor bolt for the foundation pit are analyzed as well. The results show that the trends of the simulated values of the deformation of the supporting pile and the force of the anchor bolt are coincided with those of the monitoring results, while the overall deviations between the measured results and the predicted values are within 15%, thus it is indicated that the foundation pit project is in a safe and stable status. The 3-D finite element model can better consider the influences from the gravity retaining wall and space effect on the pile-anchor structural stress under the condition of the foundation pit being supported by the composed support, and then has a higher credibility. For the soft soil foundation pit, combining gravity retaining wall with pile-anchor and integrating stage unloading can change the distribution law of the soil pressure on supporting structure and then effectively control the deformation of foundation pit for ensuring the stability of the supporting structure. The application results can provide references for the similar projects concerned.

收稿日期: 2019-02-21

作者简介: 赵凌云(1976—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水工结构及岩土工程设计与研究工作。E-mail: 154503041@qq.com

Keywords: soft soil area; deep foundation pit; pile-anchor support; numerical simulation; dynamic monitoring

0 引言

随着社会经济的快速发展,地下空间的开发利用规模加大,使得基坑工程日益增多,且向更深更大的方向发展,特别是沿海地区,其工程地质和水文地质条件较差,受潮汐影响严重,部分区域软土层深厚,力学性质差,增加了基坑工程的难度。在基坑支护结构选型过程中,不仅需要考虑结构自身的安全稳定,还要结合周边的环境条件,在环境条件允许的情况下,开敞式的支护型式由于具有投资省,工效快,结构形式简单等特点,更具有优势。

对于软土地区深基坑,一方面由于支护结构受力大、变形难以控制,且易失稳,单一的支护方法很难满足复杂的基坑设计,多种支护方案组合应用越来越多,以解决支护结构所承担的较大土压力。张玉成等^[1]在总结基坑支护型式和基坑设计存在问题的基础上,具体介绍了复杂环境下某深基坑所采用的多种支护型式;秦景等^[2]介绍了不同组合支护型式在某沿海软土深基坑中的应用;赵云等^[3]介绍了浅海钢板桩围堰与软土深基坑支护协同设计方法,分析了钢板桩和挡墙发生连续变形后采取的加固措施和应用效果;路威等^[4]通过现场试验,研究了基坑桩锚支护下旋喷锚杆的锚固体直径计算方法和影响参数;蔡建军等^[5]以某复杂深基坑工程为例,介绍了一种深基坑多层支护方法。

另一方面,对于基坑支护,现阶段的主要研究手段是以理论分析为基础,通过有限元对基坑施工过程进行三维模拟和结合现场监测结果分析,但是对于组合式支护,由于结构型式复杂,理论计算方法不能完全考虑结构的组合受力特点,更需要采用数值计算等手段。何志勇等^[6]以深圳某工程为例,结合数值模拟和现场监测,研究了深基坑在桩撑和桩锚的组合支护下结构的变形和受力特点;潘旭亮等^[7]结合实际监测结果,通过反演得出桩身弯矩,并与传统的m法和等值梁法进行比较,认为传统设计方法具有优化空间;周勇等^[8]以桩锚支护结构相互作用的基础上,建立静力平衡方程,对桩锚变形协调条件进行了改进;李方明等^[9]基于江漫滩地铁深基坑的变形实测资料,采用理论分析、经验公式和有限元数值模拟方法,总结了悬挂式帷幕基坑变形规律;叶帅华等^[10]分析了兰州市某地铁车站施工过程中的桩顶水平和竖

向位移、地表沉降、钢支撑轴力及地下水位的监测数据,并对基坑开挖过程进行了数值模拟。

对于软土地区深基坑,虽然多种支护方案组合应用较多,但是对采用分级卸荷、重力挡墙和桩锚组合的全开敞式支护方式,相关文献介绍不多。本文结合东南沿海区域某核电站二期循环水泵房(以下简称“二期泵房”)深基坑工程实例,阐述了软土区深基坑采用分级卸荷、重力挡墙和桩锚组合的开敞式支护设计型式,建立了三维有限元模型,模拟分析支护结构的水平位移和锚索力的变化规律,并结合现场监测数据进行对比验证。

1 工程概况

1.1 场地概况

二期泵房基坑位于某核电站场区东侧,邻近北侧护堤。基坑东侧为预制件车间,南侧为重件道路,西侧为已建成的一期泵房,北侧与挡潮海堤相接。泵房主体结构地下净尺寸为90 m×60 m×32 m(长×宽×深),底板设计底标高-20~-21 m,现状地面标高为+11~+12 m,实际基坑开挖(考虑放坡)尺寸为128 m×112 m×32 m(长×宽×深)。基坑工程安全等级为一级。

1.2 工程地质概况

该工程所在场地雨季较长且暴雨频现,常有台风发生。厂区原始地貌为滩涂和岛礁,地形呈簸箕状,岩面呈南高北低,滩涂淤泥及软土层分布为南浅北深,东北角最深,下伏软土层厚为15~45 m。厂区场坪经碎石回填标高为+12~+7.9 m,地下水位为+2.0~+3.63 m。

在勘察深度范围内,基坑场区地层主要分为6层,而本基坑开挖深度及基坑围护影响深度范围内主要土层为:第①层回填块石;第③₃层黏土;第③₄层粉质黏土。基坑范围内各岩土层层序、层名、岩土特征及空间分布等如表1所列,主要地层物理力学参数如表2所列。

2 工程难点

本基坑支护工程的难点主要有:(1)基坑开挖规模大,深度深,工期要求短,支护设计需要结合开挖工期;(2)基坑周边受已建构筑物、重件道路和挡潮护堤约束,场地受到限制,无法大范围卸荷,且变

表1 岩土层层序、层名、岩土特征及空间分布

层号	名称	埋深/m	厚度/m	分布情况	岩性描述	工程性质
①	回填块石	5.20~13.60	5.20~13.60	整个场地	杂色,以灰、灰绿、灰紫色为主,块石碎石组成,分选性差,块石粒径大小不均,局部少量黏性土和沙砾充填	呈松散~稍密状态,大孔隙,密实度不均
③ ₃	黏土	12.00~26.60	2.90~14.00	广泛分布	灰色,饱和,呈软塑状态,土质细腻光滑,常与粉质黏土互层,夹多层薄层分布粉细砂、粉土,含贝壳碎片及腐殖质	高压缩性,干强度高,韧性高,无摇晃反应
③ ₄	粉质黏土	16.00~29.50	1.00~10.10	广泛分布	灰色,饱和,软塑状态,局部夹少量粉土、粉砂团块,与黏土互层,土质均匀,切面稍有光泽	高压缩性,干强度高,韧性高,无摇晃反应
④	黏土	20~38.7	1.80~10.00	大部分分布	褐黄、灰褐色,可塑~硬塑,局部为粉质黏土,土质均匀,切面光滑	中等压缩性,干强度高,韧性高,无摇晃反应
⑦	粉质黏土	34.00~60.60	3.60~24.40	部分分布	兰灰、青灰色,可塑~硬塑,夹黏土或粉土薄层,切面稍有光泽	中等压缩性,干强度中等,韧性中等

表2 主要土层物理力学参数

层号	名称	容重 /kN·m ⁻³	含水率 /%	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	弹性模量 /MPa	泊松比
①	回填块石	20		0	30	40	0.2
③ ₃	黏土	17.7	43.3	23.4	10.8	8.95	0.35
③ ₄	粉质黏土	18.7	32.9	24.9	12.3	14.47	0.3
④	黏土	19.3	24.1	21	17.6	15.80	0.35
⑦	粉质黏土	18.4	34	29	12.2	16.83	0.3

形控制严格; (3) 基坑场区地下水位高,同时紧邻海堤,需要同时考虑挡潮防渗; (4) 基坑上部为碎石回填层,中间夹深厚软弱黏土层,物理力学参数差,支护结构受力大; (5) 设计坑底位于黏土层,岩面深度大,且变化不一,呈由西南向东北倾斜,基坑支护易产生整体失稳。

3 支护设计

鉴于本基坑工程规模大、开挖深、工期短,采用内支撑方案不可避免地会与基坑开挖产生冲突,严重影响工期,因此,结合场地条件,设计采用全开敞的支护方案,以桩锚为基础,通过分级卸荷和重力挡墙,降低作用在支护结构上的土压力,并增大支护桩前的被动区土体抗力的组合支护措施,保证支护结构的稳定性。同时在支护结构外围,结合地下水位和海潮高程,单独设置素混凝土桩止水帷幕,止水帷幕进入低透水软土层 1.5~6 m。基

坑支护平面布置如图 1 所示。

基坑支护设计综合考虑支护和开挖运输条件,方案如下: (1) 基坑西侧和南侧,对回填层采用 1:1 分级放坡至 0 m 高程,考虑基岩埋深相对较浅,在 0 m 高程和 -7 m 高程处布置 2 级桩锚支护,同时在支护桩之间布置格栅状搅拌桩加固软土层; (2) 基坑东侧,对回填层进行 1:1 分级放坡至 -2 m 高程,并在对软土层采用格栅状搅拌桩重力挡墙支护,台阶式卸荷至 -7 m, -7 m 以下采用桩锚支护,基坑内临近支护桩 3 m 范围进行旋喷加固,防止支护结构产生整体失稳; (3) 基坑北侧,其支护方式与东侧相同,属同一典型剖面,但是北侧有主体结构盾构隧道下穿,采

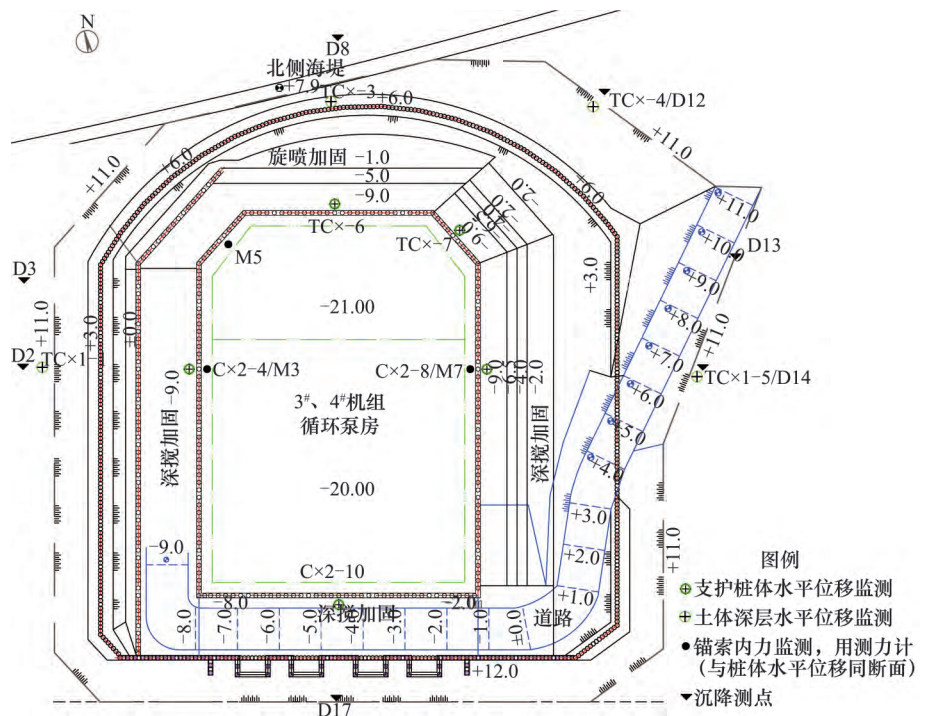


图1 二期泵房深基坑开敞式支护平面布置(单位: m)

用旋喷桩整体加固; (4) 施工道路以 10% 坡降, 自东北侧 +11 m 高程降低至西南角 -9 m 高程。

基坑支护典型剖面如图 2 所示。

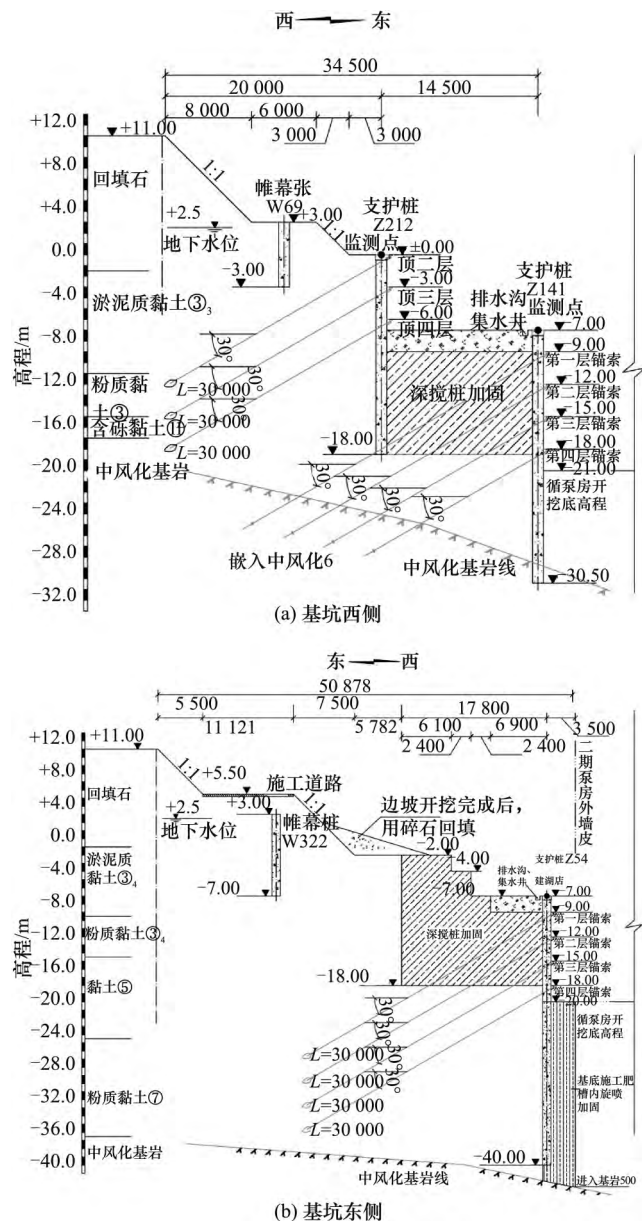


图 2 基坑支护典型断面(高程单位: m, 尺寸单位: mm)

4 计算模型及结果分析

4.1 计算模型

采用 ABAQUS 软件建立三维有限元模型, 模拟基坑开挖支护过程, 计算分析支护结构变形和锚杆受力。模型计算范围以基坑为基准, 向四周和下部各延伸 3 倍的基坑设计尺寸。模型中土体的本构模型为摩尔-库伦模型, 支护桩、梁采用梁单元模拟, 支护桩直径 1 m, 桩间距 1.5 m; 预应力锚杆采用杆单元模拟。模型共分为 221 119 个节点, 222 257 个单元。

模型网格划分和支护结构布置如图 3 和图 4 所示。

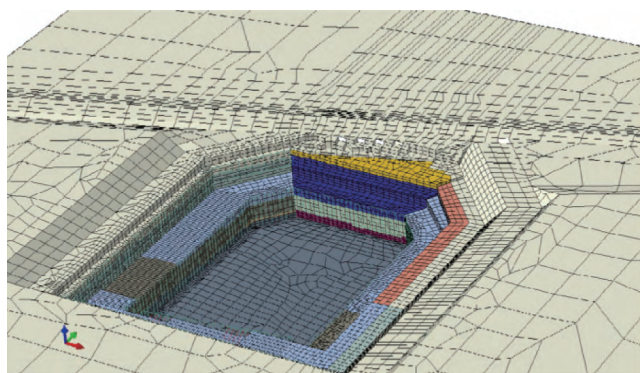


图 3 开挖完成后的二期泵房基坑有限元网格

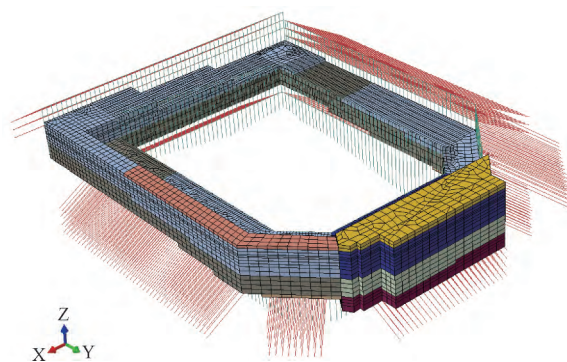


图 4 二期泵房基坑支护系统有限元网格

按照基坑实际开挖工序进行数值模拟, 即首先分级放坡开挖至 0 m 高程, 施加支护桩, 然后根据设计锚杆高程分层开挖, 开挖至对应高程后施加锚杆及预应力, 再进行下一层开挖, 直至开挖至坑底。

锚杆预应力通过在锚杆单元上施加相应的轴力进行模拟。锚杆自由段直径 150 mm, 岩石锚杆锚固段直径 150 mm, 旋喷锚杆锚固段直径 500 mm。

4.2 计算参数

有限元数值模拟中岩石、重力挡墙和支护结构的物理力学参数如表 3 所列。

表 3 岩土计算材料参数

序号	名称	容重 /kN · m ⁻³	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)	弹性模量 /MPa	泊松比
1	基岩	24	1 000.0	40.0	13 100	0.26
2	深搅桩挡墙	19.0	80.0	20.0	180	0.28
3	旋喷桩挡墙	19.0	120.0	25.0	400	0.25
4	混凝土	25.0			28 000	0.167
5	钢绞线	78.6			180 000	0.25

4.3 计算结果分析

基坑开挖完成后的地层和支护结构的整体水平位移如图 5 所示。计算结果表明, 基坑开挖完成后, 基

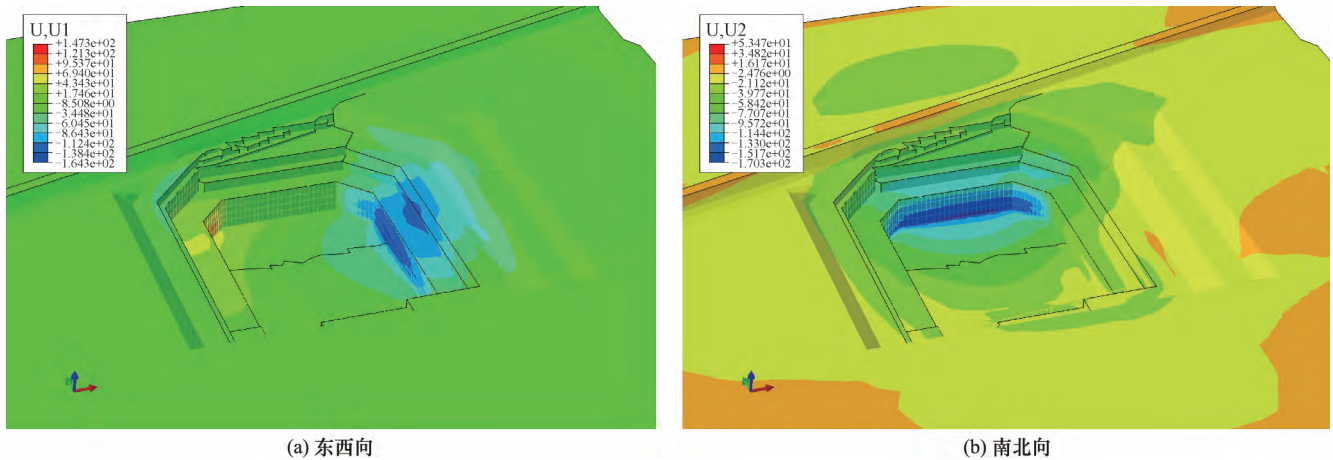


图5 基坑开挖后的基坑的横向水平位移(单位: mm)

坑整体处于稳定状态,最大水平位移约为 170 mm,出现在基坑的北侧中下部;基坑的东侧中部和西北角水平位移也相对较大,最大值约为 140~160 mm,而南侧则基本未产生水平位移。主要是由于:基坑南侧和西侧的基岩埋深相对较浅,基坑采用两级桩锚支护,后排(邻近基坑侧)支护桩桩底和预应力锚索的锚固段均位于基岩内,锚固区稳定,能够提供足够的锚固力,限制支护结构的水平位移;而基坑东侧和北侧,水平位移相对较大的原因主要有两个方面,一方面,基岩埋深较大,预应力锚索的锚固段和支护桩桩底均位于土层内,锚固段和桩底将产生一定的水平位移,另一方面,基坑上部采用重力挡墙支护,重力挡墙承受的部分土压力将会传递给支护桩,使得桩体承担的土压力增加,变形增大,因此出现支护结构的中下部呈整体变形这一趋势。在施工过程中,需要加强观测,特别是这一部位的变形发展趋势,并做好相应的应急处理措施。

基坑开挖完成后支护桩的桩体弯矩分布如图 6 所示。由图 6 可见,由于锚索对桩体变形的限制作用,南侧和西侧支护桩的中部产生约为 1 421 kN·m 的最大弯矩,与理论规律基本一致;而对于东侧和北侧,重力挡墙和支护桩联合作用,支护桩的受力规律发生变化,最大弯矩出现在坑底偏下,约为 -1 347 kN·m。

5 基坑监测结果与模拟值对比分析

在基坑开挖和主体结构施工过程中,进行了支护桩桩体位移、锚索轴力、土体深层水平位移和基坑周边地表沉降等 4 项监测项目,监测点的布置如图 1 所示。

5.1 基坑变形

监测数据从基坑开挖起,至基坑开始回填结束,

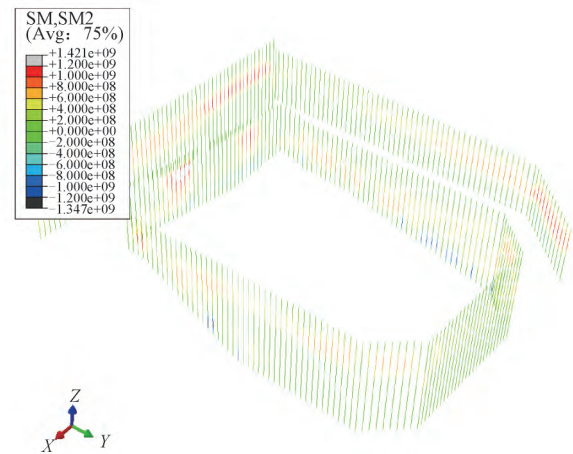


图6 支护桩的弯矩分布(单位: kN·m)

以完整反映基坑整个施工期和使用期各项指标的变化过程,掌握基坑的安全状况。主要测点的监测结果如表 4 所列。由表 4 可见:(1)对于边坡的坡顶水平位移,基坑北侧相对较大,最终约为 158.91 mm,东侧最小,仅为 22~58 mm,主要是由于基坑北侧由于邻近护堤,卸荷范围有限,且海潮波动也会对边坡产生影响,而东侧结合开挖出土道路,卸荷范围相对较大,且边坡下部重力挡墙有效限制了坡底的水平位移;(2)对于基坑周边地表沉降,从西侧中部至北侧、至东侧中部,均产生了 100 mm 以上的沉降,而南侧则仅为 21.1 mm,主要是由于南侧基岩埋深较浅,且重件道路基础在基坑开挖前已经进行了加固处理,而其他部位,由于软土层较深,基坑开挖过程中产生应力重分布,土体的深层位移和压缩变形增大了地表沉降;(3)对于支护桩的桩顶水平位移,北侧中部和东侧中部最大,达到 100 mm 以上,特别是东侧中部,达到 151.13 mm,而西侧中部和东北角相对较小,在 70 mm 左右,南侧则仅为 1.66 mm。

表4 基坑变形监测数据统计

监测项目	回填层开挖 实测累计 位移/mm	支护层开挖 实测累计 位移/mm	最终累计 位移/mm	高程 /m	说明
TCX1-1	68.86	34.29	103.15	+11~-21	西侧
TCX1-3	116.54	42.37	158.91	+7.5~-21	北侧
TCX1-4	1.08	21.26	22.34	+10~-21	东北
TCX1-5	30.59	27.48	58.07	+11~-21	东侧
D2	77.88	57.00	134.88	+5.5	西侧南
D3	45.61	64.65	110.06	+5.5	西侧北
D8	14.45	159.58	174.03	+5.5	北侧
D12	36.9	113.88	150.78	+5.5	东北角
D13	29.11	121.82	150.93	+5.5	东侧北
D14	22.47	116.01	138.48	+10	东侧中
D17	12.07	9.03	21.10	+12	南侧
CX2-4	67.21		67.21	-9~-20	西侧
CX2-6	102.43		102.43	-9~-21	北侧
CX2-7	71.28		71.28	-9~-21	东北
CX2-8	151.13		151.13	-9~-21	东侧
CX2-10	1.66		1.66	-5~-20	南侧

注: TCX 为边坡水平位移; D 为边坡沉降位移; CX 为支护桩水平位移, “-”为向坑外位移

同时,对于软土基坑,边坡的水平位移和地表沉降,不仅产生在边坡开挖阶段,而且在基坑向下继续开挖过程中,也会产生较大的持续变形,监测结果表明,基坑向下开挖过程中,边坡产生的水平位移和地表沉降达到最终值的27%~95%,这在软土深基坑支护中应引起注意,特别是周边存在重要建筑物的情况。

5.2 支护桩水平位移监测值与模拟值对比

选取典型监测断面,对基坑支护结构的水平位移的数值模拟结果和实测值情况进行了对比,结果如图7所示。

整体上看,对于支护桩的水平位移,数值模拟计算结果和实测值总体趋势一致,且吻合程度较高,模拟计算结果略大,但除北侧和个别测点外,偏差在15%以内。这表明,三维有限元计算模型能够较好地考虑软土基坑在重力挡墙和桩锚组合支护情况下的受力特点和空间效应对结构受力的影响,可信度较高。

数值计算结果和实测值产生差异的原因主要是数值模拟中并未考虑基坑内侧的局部土体加固对于坑底位移的限制效果,同时,数值模拟采用的重力挡墙参数可能比实际值略小,特别是北侧,数值模拟低估了旋喷挡墙的加固效果。

同时,从支护桩的水平位移上看,在采用重力挡墙和桩锚组合支护后,支护桩的最大位移出现在重力挡墙底部或墙底偏下,特别是北侧,这一特征更加明

显,旋喷挡墙的基础在坑底以下,相应的支护结构最大位移也出现在坑底以下。这说明,组合支护后,重力挡墙除自身承担一定的土压力外,还将会传递部分土压力给桩锚结构,导致桩锚结构上的土压力分布形式发生改变。

5.3 锚杆力监测值与模拟值动态对比

表5给出了典型支护断面上-9 m、-12 m、-15 m和-18 m不同高程处的四根锚索应力实测值和数值模拟结果对比。结果表明,锚索应力的数值模拟和实测值的对比结果与桩体变形的对比结果具有一致性,东侧、西侧和西北侧吻合程度较高。同时,大部分锚索的最终应力仅在预应力的基础上增加了10%~15%,处于安全范围内,因此软土基坑采用重力挡墙和桩锚组合的支护型式能够确保支护结构的稳定。

表5 基坑应力监测数据统计 kN

典型断面		预应力值	实测值	模拟值
东侧 (M7)	1(-9 m)	300	327.8	311.02
	2(-12 m)	400	450.8	442.44
	3(-15 m)	400	434.5	434.3
	4(-18 m)	400	433.9	415.6
西侧 (M3)	1(-9 m)	400	449.7	466.99
	2(-12 m)	600	623.8	674.8
	3(-15 m)	600	689.6	700.2
	4(-18 m)	600	720.1	710.3
西北侧 (M5)	1(-9 m)	300	336.6	327.63
	2(-12 m)	300	376.5	350.72
	3(-15 m)	400	431.8	411.44
	4(-18 m)	600	630.1	692.33

6 结论

(1) 三维有限元模型可以较好地考虑基坑在组合支护情况下重力挡墙和空间效应对桩锚结构受力的影响,模拟结果和实测值吻合较好,可信度高。

(2) 基坑开挖和使用全过程监测结果表明,重力挡墙和桩锚组合支护的结构形式,支护结构变形、锚索应力等均在预期范围内,基坑整体处于稳定状态。

(3) 软土基坑采用重力挡墙和桩锚组合支护,并结合分级卸荷,改变支护结构上的土压力分布规律,能够有效控制基坑变形,确保支护结构稳定,可为同类型的工程提供参考。

参考文献:

- [1] 张玉成,杨光华,胡海英,等.多种支护型式在超大深基坑工程设计中的组合应用[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2):198-204.

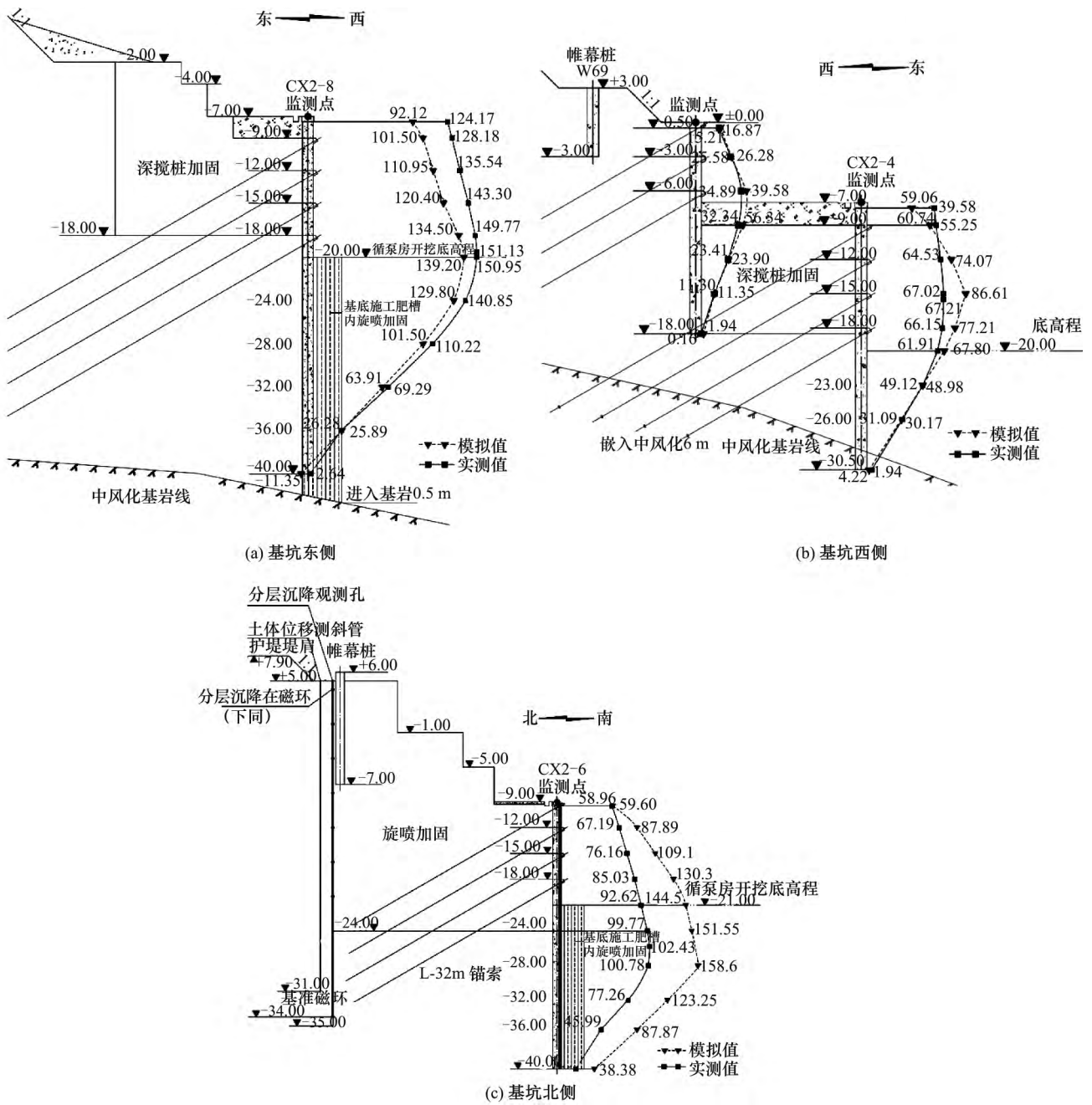


图7 基坑开挖后基坑的水平位移观测值与模拟值(高程单位: m, 位移单位: mm)

[2] 秦景, 路威, 高霏生, 等. 滨海软土区深基坑支护结构设计及变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1115-1120.

[3] 赵云, 朱俊臣, 李凡, 等. 浅海围堰与软土深基坑支护结构协同设计及应用研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(2): 138-143.

[4] 路威, 秦景, 娄鹏, 李海玲, 等. 旋喷锚杆锚固体直径计算方法及影响参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1783-1788.

[5] 蔡建军, 谢璨, 李树忱, 等. 复杂条件下深基坑多层支护方法及数值模拟研究[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 188-194.

[6] 何志勇, 王贤能. 深基坑在组合支护下的三维模拟及监测分析[J]. 路基工程, 2014(5): 149-157.

[7] 潘旭亮, 张钦喜, 杜修力, 王坚. 桩锚支护结构内力和变形试验分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 277-281.

[8] 周勇, 朱亚薇. 深基坑桩锚支护结构和土体之间协同作用[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3246-3252.

[9] 李方明, 陈国兴, 刘学珠. 悬挂式帷幕地铁深基坑变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2182-2190.

[10] 叶帅华, 丁盛环, 龚晓南, 等. 兰州某地铁站深基坑监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊1): 177-182.

(责任编辑 陈小敏)