

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.05.004

基坑土钉支护开挖降水对周边建筑物的影响

段佳蕊, 杜珊, 王安明
(华北水利水电大学, 河南 郑州 450046)

摘要: 为了探讨基坑土钉支护开挖降水对周边建筑物的影响,以郑州市某基坑土钉支护开挖降水工程为例,使用有限元软件 midas GTS NX 对基坑施工过程及周边建筑物的存在进行数值模拟,分析基坑开挖降水等工况下土体的水平位移、竖向位移、孔隙水压力、及周边建筑物沉降的变化规律,研究基坑开挖降水对周边建筑物影响,结果表明:随着基坑开挖深度的增加,坑外地表沉降大小和范围慢慢增大,总体呈现先增大后减小最后趋于稳定的变化趋势;随着基坑降水深度的增加,孔隙水压力增大,表层土体中孔隙水压力的变化速率小于深层土体中孔隙水压力的变化速率;建筑物沉降随基坑施工工况的增加逐渐增大,基坑开挖到底时建筑物沉降变化趋势变缓趋于稳定,其数值在规范允许的范围内,表明基坑周边的建筑物处于安全状态。

关键词: 基坑开挖;土钉支护;数值模拟;降水;周边建筑物;沉降

中图分类号: TU942

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)05-0021-06

Influence of Excavation and Dewatering of Soil Nail Support in Foundation Pit on Surrounding Buildings

DUAN Jiarui, DU Shan, WANG Anming

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: In order to discuss the influence of soil nailing excavation and dewatering on surrounding buildings, taking the soil nail support excavation and dewatering project of a foundation pit in Zhengzhou as an example, the finite element software midas GTS NX was used to numerically simulate the construction process of the foundation pit. The surrounding buildings of the foundation pit were built into a solid model, the changes in horizontal displacement, vertical displacement, pore water pressure, and settlement of the surrounding buildings were analyzed under conditions such as excavation and dewatering. The impacts of excavation and dewatering on the surrounding buildings was further analyzed. The results show that as the excavation depth of the foundation pit increases, the size and range of surface settlement outside the pit gradually increase, showing a trend of first increasing, then decreasing, and finally stabilizing. As the depth of foundation pit dewatering increases, the pore water pressure increases, and the rate of change of pore water pressure in the surface soil is smaller than that in the deep soil. The settlement of buildings gradually increases with the increase of construction conditions of the foundation pit. When the foundation pit is excavated to the bottom, the trend of building settlement changes slows down and tends to stabilize. Its value is within the allowable range of specifications, indicating that the foundation pit is in a safe state.

Keywords: excavation of foundation pits; soil nail support; numerical simulation; precipitation; surrounding buildings; settlement

随着社会经济的快速发展,城市更新项目、旧改项目的日益增多,密集居民建筑区中出现了较多的

收稿日期:2023-05-11

修稿日期:2023-06-20

基金项目:河南省科技攻关计划项目(182102310745)

作者简介:段佳蕊(1998—),女,硕士研究生,研究方向为城市地下空间工程。E-mail:d1983802@163.com

通讯作者:王安明(1975—),男,教授,主要从事城市地下空间工程稳定性方面的工作。E-mail:wam992001@163.com

基坑支护项目。从经济技术方面考虑,选择合适的基坑支护方式最大程度减少基坑开挖降水对周边环境的影响,是基坑支护方案设计施工中的关键。在对国内外文献调研及其郑州市多个基坑工程实践调查中发现,当基坑深度不大(10 m 以下)、周边建筑物距离基坑较远且地下水埋深比较浅时,基坑支护设计施工方案选择中,一般为了节约成本,采用土钉支护并且不打止水帷幕的例子并不鲜见^[1-3]。但是在这种情况下基坑土钉支护开挖降水对周边建筑物的影响到底有多大,影响程度如何评估,多年来一直是现场基坑工程设计施工监测过程中的难题。

关于基坑土钉开挖支护降水对周边建筑物的影响文献研究方面,郭红仙等^[4]采用极限分析方法研究土钉长度对于直立软土和硬黏土基坑土钉支护整体稳定性的影响,得到相应的基坑极限高度,研究基坑底部土体承载力与放坡对于土钉支护整体稳定性的影响,并结合实际工程进行了讨论。袁野^[5]针对某工程详细介绍了软土地区土钉墙整体稳定性验算,通过降水、对土钉适当加长加密的方案,确保了基坑边坡和周围建筑物的安全稳定。杨继红等^[6]以郑州市某深基坑工程为例,利用岩土数值分析软件 FLAC^{3D}对开挖支护过程进行了模拟,深入分析了基坑位移场分布规律以及土钉支护结构的受力特性。可以看出,目前文献给出的基本都是工程实例的介绍,利用数值模拟方法结合监测数据评估基坑开挖降水对周边建筑物影响的文献很少,而数值模拟方法结合现场监测数据是评估基坑开挖降水对周边建筑物影响的有效方法^[7-9]。

本文利用有限元软件 midas GTS NX 对郑州市某基坑土钉支护开挖降水工程进行数值模拟^[10-14],并考虑基坑周边建筑物,结合现场监测数据,评估分析基坑土钉支护开挖降水过程中周围土体、孔隙水压力及建筑物的变形等变化规律。

1 工程背景

1.1 基坑位置与规模

基坑建筑场地位于郑州市老城区,周边环境复杂,北临住宅建筑,西临教学楼,东、南两侧临近市政主干道。拟建建筑主要由高层住宅、商业裙房及地下车库工程组成,基坑开挖深度为 8.95 m,东西方向长约 55 m,南北方向宽约 45 m,基坑平面布置示意图如图 1 所示。本工程为五边形基坑,面积比较大,结合含水层渗透系数,拟采取轻型井点降水,如图 2 所示。

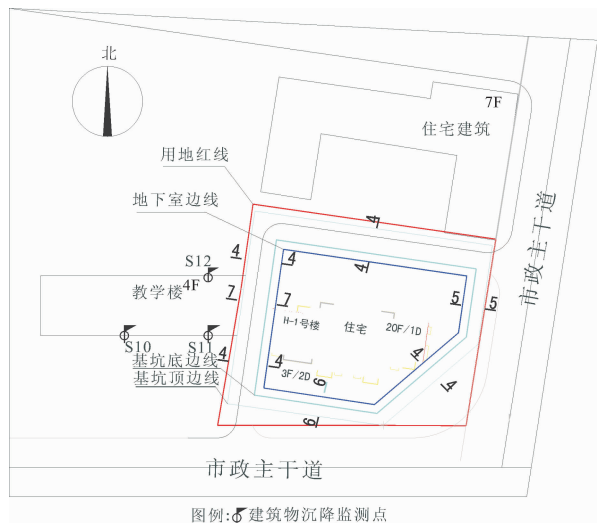


图 1 基坑支护平面布置图



图 2 基坑轻型井点降水现场图片

1.2 场地地质条件

拟建建筑场地属于黄河河漫滩相冲洪积平原地貌单元,地形平坦开阔,相对高差为 1.7 m。场地土层分布参数如表 1 所示。基坑开挖深度为 8.95 m,勘察期间实测地下水位稳定埋深为 -4.0 m,一般水位年变幅 1.5 m~2.0 m 左右,所以该基坑在设计和施工中需要考虑降水。

表 1 土层参数

土层	岩土名称	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	含水率 /%	厚度 /m
1	杂填土	21	15	24	7	1.70
2	粉土	20	19	16	14	2.30
3	粉质黏土	23	21	22	16	1.00
4	粉质黏土	21	28	20	25	2.65
5	粉土	19	20	18	23	42.35

2 基坑支护结构设计

本工程周边环境较复杂,地下水位较高,基坑边坡土的抗剪强度低,基坑工程侧壁安全等级按照二

级考虑,重要性系数为 1.0。该基坑设计时分不同的断面采用土钉墙或复合土钉墙支护结构,对 H 地块可分为 4-4、5-5、6-6、7-7 共 4 个支护剖面考虑支护,本文研究基坑开挖降水对周边建筑物的影响,选取基坑西侧 7-7 剖面 and 基坑北侧 4-4 剖面的土钉墙支护结构为主要研究对象,剖面支护结构如图 3、图 4 所示。

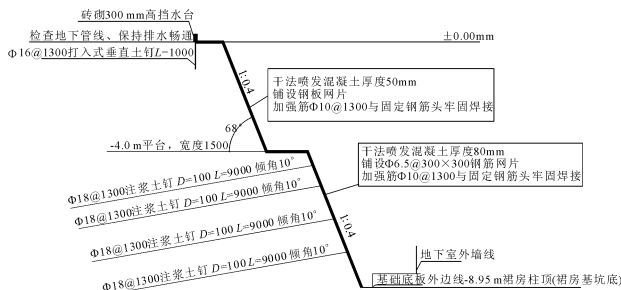


图 3 4-4 剖面基坑支护结构图

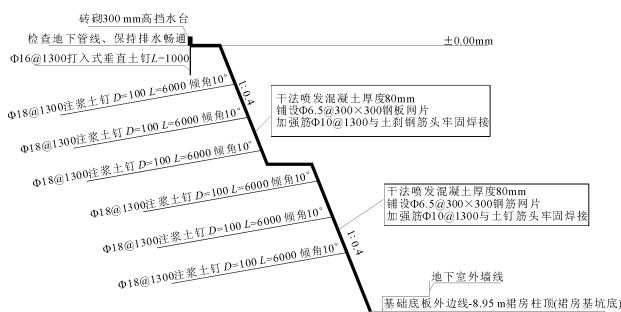


图 4 7-7 剖面基坑支护结构图

土钉和喷射混凝土面层。喷射混凝土的强度等级为 C25,弹性模量为 25.5 GPa,泊松比为 0.2。基坑西侧 4 层教学楼模型尺寸为 40 m × 14 m × 12.6 m,基础形式为条形基础,如图 6 所示。基坑北侧为 7 层住宅建筑,结构形式采用框架结构,基础为 CFG 桩筏板基础,如图 7 所示。构造柱、圈梁、框架柱、框架梁和 CFG 桩均用 1D 梁单元模拟,墙体与楼板用 2D 板单元模拟,基础、筏板和垫层都用 3D 实体模拟。

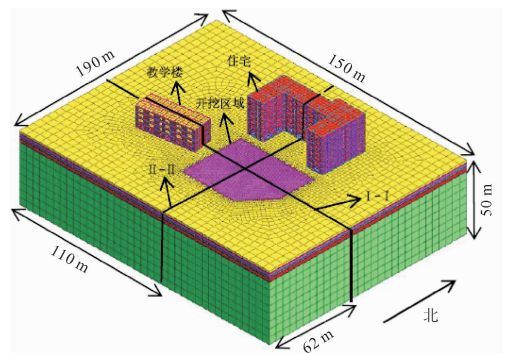


图 5 基坑和建筑模型示意图

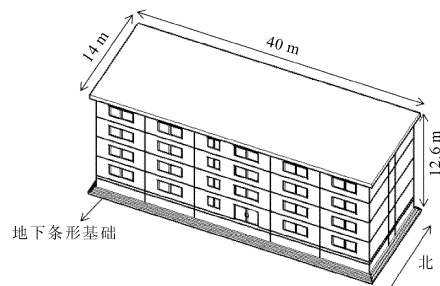


图 6 教学楼尺寸示意图

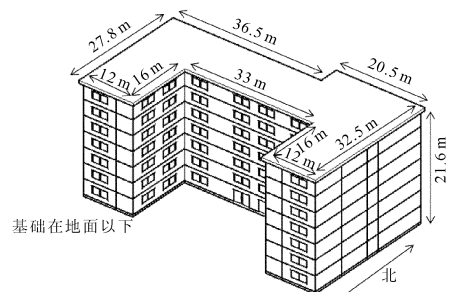


图 7 住宅建筑尺寸示意图

3 数值模型的建立

3.1 模型建立

以郑州市某基坑开挖工程为例,使用 midas GTS NX 模拟基坑,同时对基坑西侧 4 层教学楼和基坑北侧 7 层住宅建筑具体建模。基坑开挖深度为 8.95 m,考虑降水对周边建筑物区域的影响范围较大,模型最后确定的尺寸为 190 m × 150 m × 50 m,如图 5 所示。土体假定为各向同性的弹塑性材料,遵循修正摩尔-库伦准则;降水之前,土体呈现固结状态;降水过程持续均匀并且土体的黏聚力和内摩擦角以及渗透系数等参数的物理性质不发生变化;土钉不对周围土体产生力学性质的影响;不考虑开挖前附加荷载在基坑周边所产生的位移。

3.2 支护结构、建筑物参数的选取

土钉受力简单,采用植入式桁架结构单元,通过最近的节点传力,考虑节点耦合。每次开挖面上方 0.5 m 左右即为土钉的标高位置,开挖完成后设置

3.3 网格划分、边界条件

使用混合网格生成器,根据基坑放坡高度、土钉支护断面位置和基坑降水深度合理地进行网格划分,基坑开挖区域尺寸设置为 1.3 m,逐渐向模型边界过渡到 5.2 m,两个建筑物网格尺寸控制在 2 m,从基坑开挖区域到模型边界网格划分密度由稠密变为稀疏,保证计算结果的准确性和真实性。

土体模型的顶面为自由边界,底面边界在 XYZ 方向均固定,左右边界在 X 方向固定,前后边界在 Y 方向固定。支护桩设置 RZ 方向的旋转约束。地下水位通过水头边界设置节点水头模拟。

3.4 施工阶段

按照“先降后挖,先挖后支”的原则,通过操作网格组的“激活”和“钝化”模拟基坑的施工过程,施工阶段总分为 16 个工况,如表 2 所示。

表 2 施工阶段工况表

工况	施工阶段	模拟内容
1	初始渗流分析	激活所有土体、既有建筑和水位
2	初始应力分析	激活模型边界约束、重力荷载,设置位移清零
3	开挖 1	开挖至 -1.7 m,钝化杂填土开挖 1、开挖 2,激活相应位置喷射混凝土面层、激活 5-5、6-6 和 7-7 剖面土钉
4	开挖 2	开挖至 -2.9 m,钝化粉土开挖 3,激活剖面 5-5 土钉、剖面 6-6 土钉、剖面 7-7 土钉,喷射混凝土面层 3、微型桩 1 并施加约束 1
5	降水 1	降水至 -5.0 m,钝化初始水位,激活第一次降水
6	开挖 3	开挖至 -4.0 m,钝化粉土开挖 4,激活剖面 5-5 土钉、剖面 6-6 土钉、剖面 7-7 土钉,喷射混凝土面层 4
7	降水 2	降水至 -5.7 m,钝化第一次降水水位,激活第二次降水
8	开挖 4	开挖至 -5.0 m,钝化粉质黏土开挖 5,激活剖面 4-4 土钉,喷射混凝土面层 5-5
9	降水 3	降水至 -7.0 m,钝化第二次降水水位,激活第三次降水
10	开挖 5	开挖至 -5.7 m,钝化粉质黏土开挖 6,激活剖面 4-4 土钉、剖面 5-5 土钉、剖面 6-6 土钉、剖面 7-7 土钉、喷射混凝土面层 6
11	降水 4	降水至 -8.3 m,钝化第三次降水水位,激活第四次降水
12	开挖 6	开挖至 -7.0 m,钝化粉质黏土开挖 7,激活剖面 4-4 土钉、剖面 5-5 土钉、剖面 6-6 土钉、剖面 7-7 土钉、喷射混凝土面层 7、微型桩 2 并施加约束 2
13	降水 5	降水至 -8.95 m,钝化第四次降水水位,激活第五次降水
14	开挖 7	开挖至 -8.3 m,钝化粉质黏土开挖 8 和粉土开挖 8,激活剖面 4-4 土钉、剖面 5-5 土钉、剖面 6-6 土钉、剖面 7-7 土钉,喷射混凝土面层 8
15	降水 6	降水至 -9.95 m,钝化第五次降水水位,激活第六次降水
16	开挖 8	开挖至 -8.95 m,钝化粉土开挖 9,喷射混凝土面层 9

4 模拟结果分析

为了方便表达和准确分析整个数值模拟过程,在模型上选取特定的 I-I 截面(基坑侧壁中间平行于 X 轴)、II-II 截面(基坑侧壁中间平行于 Y 轴)研究坡顶位移、孔隙水压力、建筑物沉降等变化规律,如图 5 所示,又选取教学楼上的 A1 点—A6 点、住宅建筑上的 B1 点—B8 点、I-I 截面上的 C1 点—C9 点、II-II 截面上的 D1 点—D7 点来研究这些点的沉降随施工阶段变化情况,如图 8 所示。

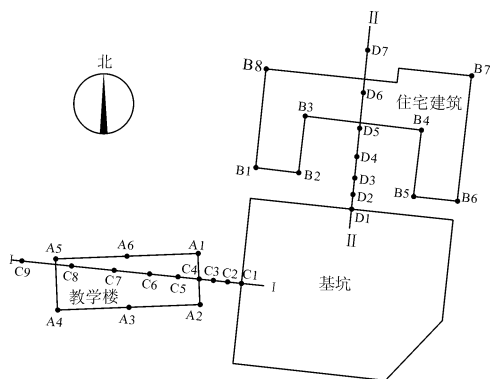


图 8 数值模拟监测点和监测截面示意图

4.1 坡顶水平位移与竖向位移

在基坑开挖降水的过程中地下水不能及时补充,土体孔隙压力降低,有效应力增加,造成土体固结,产生地面沉降^[15-18]。基坑开挖到底 I-I 截面、II-II 截面水平位移与竖向位移云图如图 9—图 12 所示,从水平位移云图分析可得:基坑在整个开挖过程中, I-I 截面产生的水平位移最大值为 4.44 mm,; II-II 截面产生的水平位移最大值为 -4.86 mm,两个截面的水平位移远远小于基坑规范规定的预警值,证明土钉支护结构在周围土体水平位移上的抑制作用是很好的。从竖向位移云图可以看出随着基坑开挖深度的增加,坑外地表沉降大小和范围都慢慢增大,当基坑开挖到坑底时,坑外地表沉降最大值为 -5.98 mm,基坑底部隆起值最大为 12.54 mm,都小于基坑规范规定的预警值。图 13—图 14 是在所建立的基坑模型上,选择监测点 C1—C9 和 D1—D7 建立坑外地表沉降和基坑距离之间关系曲线。从图中能够看出,从基坑侧壁到无限远处地表沉降曲线总体呈现先增大后减小最后趋于稳定的变化趋势。

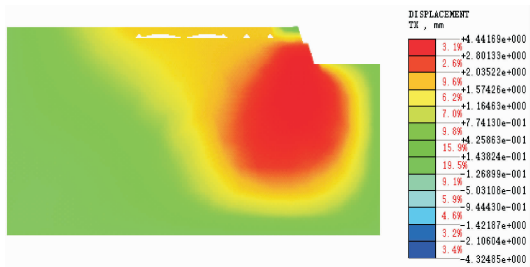


图 9 工况 16 I—I 截面水平位移云图

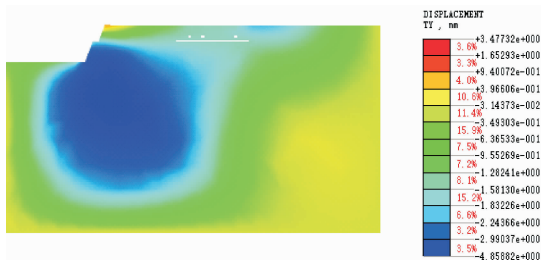


图 10 工况 16 II—II 截面水平位移云图

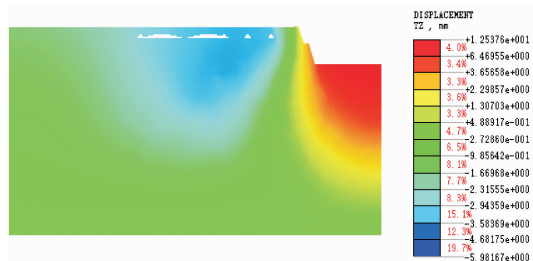


图 11 工况 16 I—I 截面竖向位移云图

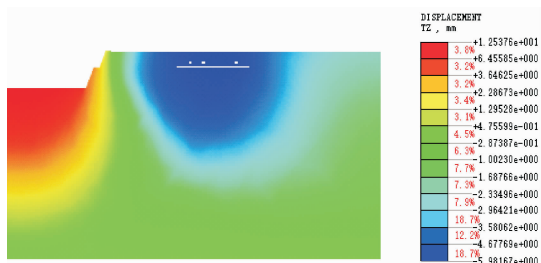


图 12 工况 16 II—II 截面竖向位移云图

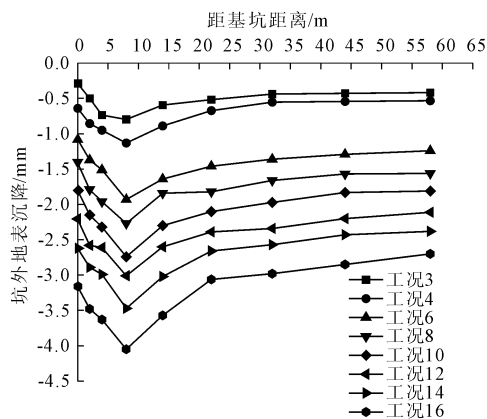


图 13 C1—C9 坑外地表沉降

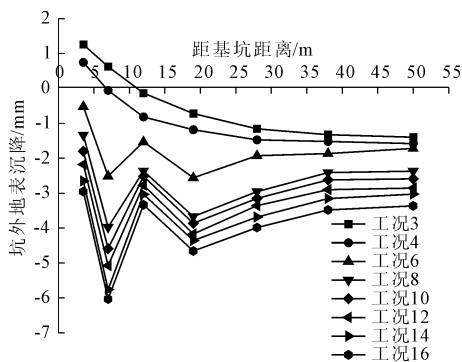


图 14 D1—D7 坑外地表沉降

4.2 孔隙水压力变化规律

孔隙水压力的变化是基坑发生沉降的一个主要影响因素,使基坑周围土体中渗流场和应力场发生变化,影响土钉支护结构的稳定性^[19-21]。变化过程以 I—I 截面为例研究每个降水工况完成后孔隙水压力的变化规律。从图 15 结合基坑降水不同工况孔隙水压力云图可得:基坑周围表层土体中孔隙水压力的变化速率小于深层土体中孔隙水压力的变化速率。同一深度位置处,基坑内外两侧孔隙水压力变化明显,基坑内外两侧孔隙水压力在基坑侧壁附近发生明显突变,随着降水深度的增大,孔隙水压力的分布范围向外扩散,靠近边界处基本没有太大的变化。

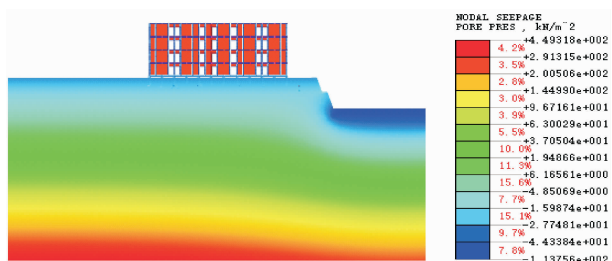


图 15 工况 15 I—I 截面孔隙水压力云图

4.3 周边建筑物沉降模拟分析

基坑开挖到底时,建筑物沉降云图如图 16 所示,从图 16 看出基坑降水对建筑物沉降影响较大,基坑西侧的教学楼沉降最大值为 -3.64 mm,而基坑北侧的住宅建筑沉降最大值为 -5.93 mm,都在规范允许的沉降值范围内,建筑物处于安全状态。

图 17 是在所建立的基坑模型上,选择监测点 A1—A6 和 B1—B8 建立建筑物沉降和工况之间的关系曲线。从图 17 中可以看到教学楼和住宅建筑的沉降值逐渐增大但沉降趋势变缓,基坑开挖到底时,教学楼上 A2 点的沉降达到最大值 -3.64 mm,

住宅建筑 B4 点的沉降达到最大值 -5.93 mm。

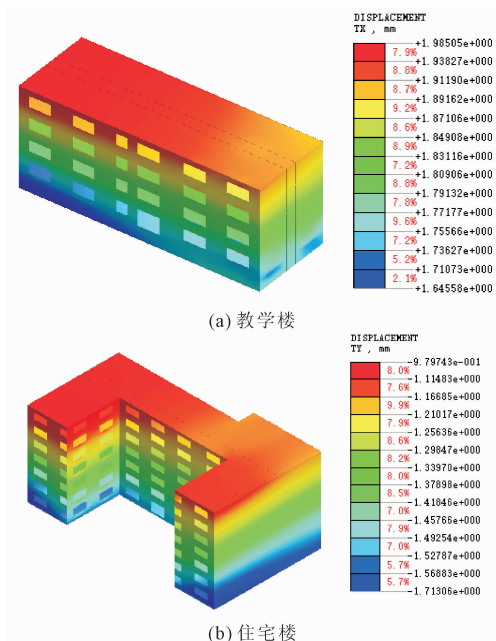


图 16 工况 15 建筑物沉降云图

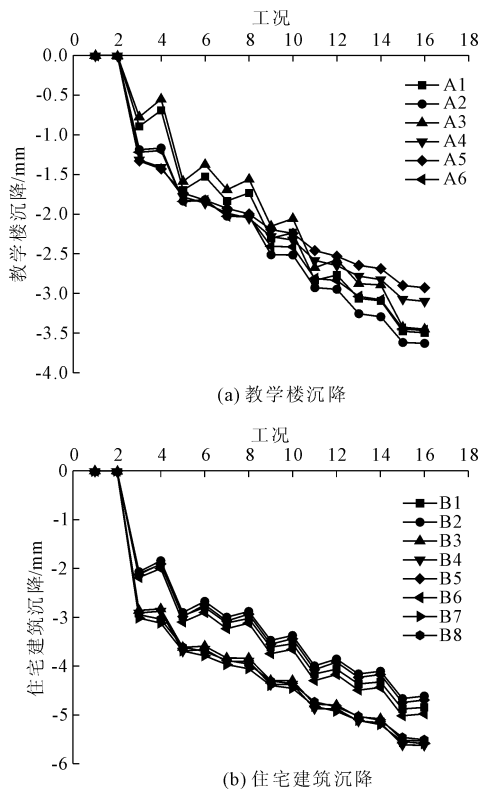


图 17 建筑物沉降随工况变化图

为了分析建筑物沉降,选取基坑西侧教学楼数值模型上 S10—S12 的模拟数据,然后与现场监测数据进行对比,基坑建筑物沉降监测布置示意图如前文图 1 所示。从基坑西侧教学楼 S10—S12 点沉降监测值与模拟值对比图 18 可知:随着基坑开挖,教

学楼沉降值越来越大;降水工况比开挖工况对教学楼的影响要大。现场监测沉降数据大于数值模拟沉降数据,这与数值模拟中模型建立的理想化有很大关系,另在实际基坑开挖施工过程中,因为降雨不断,现场坡面积水较多,导致教学楼三个观测点累计沉降量较大。

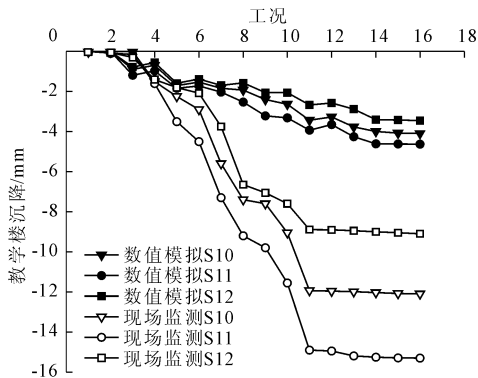


图 18 基坑西侧教学楼 S10—S12 点沉降监测值与模拟值对比图

5 结论

以郑州市某基坑开挖降水为例,利用有限元软件 midas GTS NX 建立基坑与基坑西侧 4 层教学楼和基坑北侧 7 层住宅建筑模型,研究基坑开挖降水对周边建筑物的影响规律,得到以下主要结论:

(1) 基坑在整个开挖过程中,土钉支护结构在周围土体水平位移上起很好的抑制作用,基坑开挖到坑底时坑底隆起值从基坑中心到基坑外围慢慢变小,并且从基坑侧壁到无限远处地表沉降曲线总体呈现先增大后减小最后趋于稳定的变化趋势。

(2) 孔隙水压力在竖直方向成层分布,地表附近孔隙水压力最小,孔隙水压力随着基坑降水深度的增加越来越大,基坑周围表层土体中孔隙水压力的变化速率小于深层土体中孔隙水压力的变化速率。

(3) 基坑降水对建筑物沉降影响较大,随着基坑的开挖教学楼和住宅建筑的沉降曲线总体上呈下降趋势并且沉降越来越大,基坑开挖到底时建筑物沉降变化趋势变缓趋于稳定,其数值在规范允许的范围,建筑物处于安全状态。

参考文献:

[1] 付宪章,武登辉,赵庆亮,等. 紧邻既有住宅建筑的深基坑支护及降水设计施工实例[J]. 建筑技术,2022, 53(2):177-180.

- [22] 张先伟,孔令伟,郭爱国,等. 湛江强结构性黏土的物理力学性质指标及相关性分析[J]. 工程地质学报, 2011,19(4):447-454.
- [23] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [24] 土的工程分类标准:GB/T 50145—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2007.
- [25] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [26] 张先伟,王常明. 一维压缩蠕变前后软土的微观结构变化[J]. 岩土工程学报,2010,32(11):1688-1694.
- [27] 王 港,张先伟,刘新宇,等. 厦门花岗岩残积土的压缩变形特性及其微观机制[J]. 岩土力学,2021,42(12):3291-3314.
- [28] 崔靖俞,张吾渝,解邦龙,等. 西宁地区不同深度原状黄土湿陷性及微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019,41(S2):249-252.
- [29] 柳艳华,石名磊. 海陆交互相下黏性土性状辨析及评价研究[J]. 岩土力学,2008,29(2):523-528.
- [30] 赵树德,廖红建. 土力学[M]. 第2版. 北京:高等教育出版社,2010.
- [31] 黄 琨,万军伟,陈 刚,等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(9):2600-2604.
- [32] 申春妮,方祥位,王和文,等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009,30(5):1347-1351.

(上接第 26 页)

- [2] 王 岚,韩广森. 某住宅小区二期地下室基坑支护设计[J]. 建筑结构,2016,46(S2):545-549.
- [3] 赵 帅,余建民,王荣彦. 深基坑开挖对邻近住宅楼的变形影响分析[J]. 河南科技,2023,42(10):63-66.
- [4] 郭红仙,周 鼎. 软土中基坑土钉支护稳定性问题探讨[J]. 岩土力学,2018,39(S2):398-404.
- [5] 袁 野. 软土地区土钉支护应用实例[J]. 建筑技术开发,2018,45(23):85-86.
- [6] 杨继红,丁 鹏,杨兴隆. 深基坑开挖过程中土钉支护结构的变形与受力特性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):133-136.
- [7] 李鹏举,钱林根,吴 强,等. 悬挂式止水帷幕基坑降水开挖对临近高铁桥墩影响[J]. 山东科学,2022,35(6):116-122.
- [8] 喻 伟,陈鑫磊,张学民. 深圳富水软弱地层深基坑施工对周边环境的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020,17(9):2251-2261.
- [9] 张卫兵,张刚柱,韩自刚,等. 基于 HS-Small 本构模型的银川地区深基坑开挖-降水过程数值分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2):211-218.
- [10] 张钦喜,宋亚通,闫金波. 悬挂式止水帷幕涌水量计算数值模拟及验证[J]. 岩土工程技术,2021,35(4):255-259.
- [11] 史伟中,陈颖辉,欧明喜,等. 基于 Midas GTS 岩土有限元软件模拟基坑降水对周围建筑物沉降的变形[J]. 中国水运,2020,20(1):255-258.
- [12] 张 军,冯佳蕊,翟少磊. 洞庭湖大桥锚定基坑降水及对地连墙影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018,14(S1):256-262.
- [13] 周小娟. 基坑开挖及降水的应力渗流耦合作用对邻近地下管线的影响[J]. 长江大学学报(自科版), 2017,14(9):59-64,6.
- [14] 刘 婧,陈锦剑,王建华. 虹桥交通枢纽多级梯次降水固耦合分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(S1):210-215.
- [15] 梁发云,贾亚杰,邓 航,等. 深基坑降水沉降计算土体弹性参数取值方法探讨[J]. 岩土工程学报,2017, 39(S2):29-32.
- [16] 韩文君,赵宇豪,闫 鑫,等. 常州地区基坑降水引起的地面沉降计算方法[J]. 城市轨道交通研究,2023, 26(1):55-59,64.
- [17] 李文广,胡长明. 深基坑降水引起的地面沉降预测[J]. 地下空间与工程学报,2008(1):181-184.
- [18] 吴意谦,朱彦鹏. 考虑疏干带非饱和土影响下基坑降水引起地面沉降的计算[J]. 工程力学,2016,33(3):179-187.
- [19] 任 壮,丁春林,吴 烁,等. 富水软弱地层基坑开挖中的土体变形与渗流特性[J]. 城市轨道交通研究, 2022,25(8):107-111.
- [20] 冯怀平,张伏光,岳祖润. 考虑流固耦合作用的深基坑有限元分析[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(2):286-291,333.
- [21] 胡 涛,冯晓腊,熊文林,等. 武汉地区基坑降水引起的地面沉降机理及定量预测[J]. 土工基础,2002(2):48-50,67.