

文章编号: 1007-2993(2025)01-0089-08

# 深基坑开挖对临近建筑物的稳定性分析

康凯<sup>1</sup> 李宁<sup>1</sup> 石卫<sup>2,3</sup> 谭天翔<sup>4</sup> 王姝婧<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西西安 710048; 2. 陕西省城市地质与地下空间工程技术研究中心, 陕西西安 710068; 3. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西西安 710068; 4. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200112)

**【摘要】** 由深基坑开挖卸荷引起的邻近既有建筑物变形问题是城市基础设施建设面临的热点和难点问题。依托西安某大厦改扩建工程建立数值模型, 以不同支护结构、建筑物与基坑间距为研究变量, 分析了不同工况下深基坑开挖对邻近既有建筑物稳定性的影响特性。结果表明: 桩锚支护体系的围护效果最好, 双排桩在合适的排桩间距下也能发挥良好的支护效果; 随着建筑物与基坑间距的增大, 建筑物所受到的扰动随之减小, 基坑开挖造成的扰动具有一定的范围, 本工程条件下, 在 12 m 之外的建筑物所受扰动不会影响其安全使用。

**【关键词】** 基坑开挖; 邻近建筑; 支护结构; 变形

**【中图分类号】** TU470

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2023-0822

## Stability analysis of deep foundation pit excavation on adjacent buildings

Kang Kai<sup>1</sup> Li Ning<sup>1</sup> Shi Wei<sup>2,3</sup> Tan Tianxiang<sup>4</sup> Wang Shujing<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Engineering Technology Research Center for Urban Geology and Underground Space, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Hydrogeology Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 4. China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200112, China)

**【Abstract】** The deformation of adjacent existing buildings induced by deep foundation pit excavation and unloading poses a significant and challenging issue in urban infrastructure construction. A numerical analysis model was established based on the reconstruction and expansion project of a building in Xi'an. Different supporting structures and the spacing between buildings and the foundation pit were investigated as research variables to analyze the impact characteristics of deep foundation pit excavation on adjacent existing buildings under various working conditions. The results revealed that the pile-anchor support system exhibited the best enclosure effect, while double-row piles could also achieve good supporting performance under appropriate pile spacing. Furthermore, the disturbance caused by foundation pit excavation has a limited range; specifically, buildings located beyond 12 m from the excavation site experienced negligible disturbance that did not compromise their safe use.

**【Key words】** foundation pit excavation; adjacent buildings; support structure; deformation

## 0 引言

基坑开挖过程中, 周围土体应力呈现动态重分布, 并产生一定的位移, 从而对邻近建筑物产生影响<sup>[1-3]</sup>。在周边建筑密集处开挖基坑, 如何有效控制基坑变形, 减小基坑施工对邻近建筑物影响是深基坑工程相关研究的重点。

诸多学者从不同角度对基坑开挖影响问题进行了研究。王卫东等<sup>[4]</sup>基于大量坑外地表发生沉降的基坑工程案例, 通过墙后土体的差异沉降推导出地表倾斜量, 进而初步预测基坑开挖对邻近建筑物的影响。

徐孟龙<sup>[5]</sup>在研究中发现坑外地表沉降值均在基坑边缘以外 20 m 处达到稳定状态, 说明基坑开挖一定范围以外的建筑物受到的扰动较小, 可以忽略不计。郑刚等<sup>[6]</sup>在研究基坑土体变形问题上, 考虑了不同围护结构形式。杨敏等<sup>[7]</sup>采用有限元计算的方法研究了邻近桩基础对基坑开挖引起的变形场的影响情况, 并讨论了不同因素条件下桩基础的位移及弯矩变化情况。还有部分专家学者研究了基坑开挖时邻近建筑物基础的受力特性, 结果表明基坑土体的开挖必然会引起建筑物桩基的位移变形, 对建筑物产生一

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2021SF2-02); 陕西省公益性地质专项(202109, 20180303)

作者简介: 康凯, 男, 1998 年生, 在读博士研究生, 主要从事基坑工程方面研究。E-mail: KangKai-xaut@qq.com

定的扰动影响<sup>[8-13]</sup>。

此外,黄启舒等<sup>[14]</sup>对比分析了两种支护方案下邻近建筑物桩柱的受影响情况,研究表明支撑梁预支护加楼板支护条件下邻近建筑物桩柱所受影响较桩锚支护条件下受到的影响小很多。施有志等<sup>[15]</sup>研究了基坑开挖对不同建筑基础形式的影响情况。Li等<sup>[16]</sup>针对地下开挖引起的桩基破坏问题,以 $p-y$ 曲线为基础构建数值分析模型,分析了黏土开挖过程中桩-土的相互作用机理。郑刚等<sup>[17]</sup>利用数值分析的方法对与基坑边成一定角度的邻近建筑物进行了分析,并对建筑物的挠曲变形以及扭转变形情况进行了深入研究。木林隆等<sup>[18]</sup>运用两阶段分析方法进行参数分析,建立了围护墙与桩基变形之间的关系,提出了基坑邻近桩基的变形影响因子。黄武英<sup>[19]</sup>运用数值模拟的方法,研究了内支撑排桩支护条件下基坑的开挖情况,并分析了邻近双排桩桩基的影响因素。李伟强等<sup>[20]</sup>通过有限元数值模拟的方法,研究分析了深基坑与临近既有建筑物的相互影响情况,并针对既有工程提出了相应的风险控制措施,进而降低施工过程中邻近建筑物的受影响程度。

综上所述,基坑开挖对邻近建筑物的影响是一项重要的热点课题,尽管已有专家学者做了多方面的研究,但由于基坑工程条件、场地地质条件及周边建筑条件的复杂性,仍需进行深入全面的研究。本文依托西安某大厦改扩建工程,利用midas软件模拟基坑开挖全过程,结合现场实际监测的变形数据研究基坑开挖对邻近既有桩基础的影响,并在此基础上,以基坑支护形式、邻近建筑物距基坑的距离为研究变量,分析了不同工况下深基坑开挖对邻近既有建筑物稳定性的影响特性,可为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 场地概况

拟建场地位于西安市中心城区,周边建筑物密集(见图1),其中基坑北侧约20m处为某花园建筑,居住人员密集,该建筑物为地上15层,设有一层地下室,基础埋深约3.0m,基础形式为柱下桩基础,柱间距6.6m,桩长25.0m,桩径为1.0m,为柱下单桩。

### 1.2 地质概况

拟建场地地貌单元属黄土梁,地层自上而下依次为人工填土,第四系上更新统风积黄土、残积古土壤,中更新统风积黄土、残积古土壤、冲积粉质黏土和砂土。地下水埋深介于9.96~10.50m,属潜水类型,水位年变化幅度约2.0m。

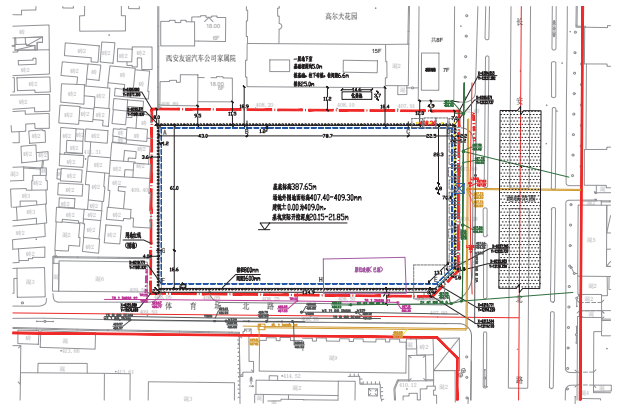


图1 基坑平面布置图

### 1.3 基坑工程概况

基坑长144.20m,宽79.60m,基坑底口线周长442.18m,基坑深度约20m。地下结构采用明挖顺做法分段施工,基坑支护结构采用桩锚支护体系。本研究选取基坑北侧AB段,该段具体支护形式见图2、图3,支护方案简述如下。

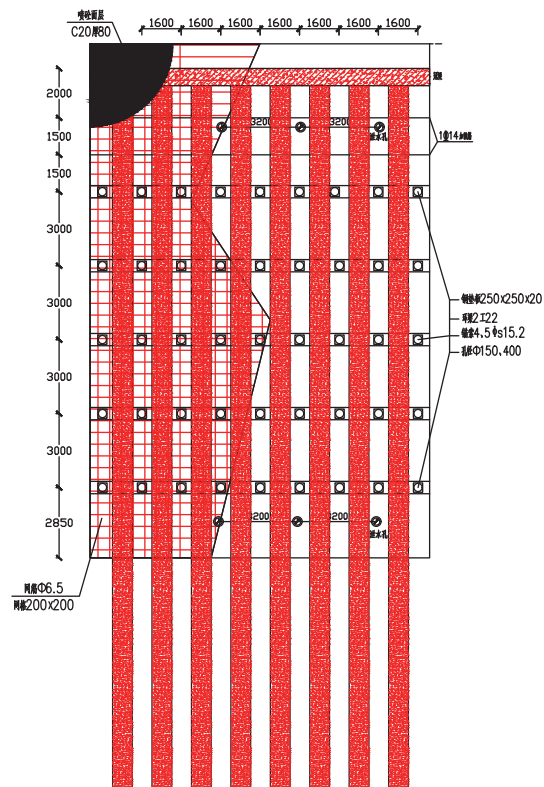


图2 AB段支护正立面图(单位:mm)

(1)支护桩:桩顶标高位于自然地面下1.80m,桩径1.00m,桩间距1.60m,桩长25.00m,嵌固深度9.35m,冠梁截面尺寸为1200mm(宽)×800mm(高),支护桩及冠梁混凝土强度等级均为C35。

(2)锚索:共设5排锚索,均为1桩1锚,第1排锚索位于冠梁顶面下5.0m,各排锚索排间距均为

3.0 m。其中第 1, 2, 5 排为普通锚索, 锚索孔径 150 mm, 锚筋采用 4φ15.2 钢绞线, 首次注浆采用水泥砂浆, 二次补浆采用水泥净浆, 浆体强度等级均为 M20。考虑地层因素, 为增加锚固力, 第 3, 4 排采用旋喷锚索, 锚索锚固体直径 500 mm, 锚筋采用 5φ15.2 钢绞线, 高压旋喷水泥浆水灰质量比为 1.1 : 1, 水泥采用 P·O 42.5。锚索腰梁采用 2 根工字钢并联, 各排锚索分布情况、长度及锚固力设计值见图 2、图 3。

(3) 坑壁支护: 基坑坑壁采用挂网喷砼支护。喷射混凝土强度等级为 C20, 喷射面层厚度为 80 mm, 内置钢筋网片规格为 φ6.5@200×200 mm。

(4) 地下水控制: 本工程基坑地下水控制采用大口径管井联网抽降方案。

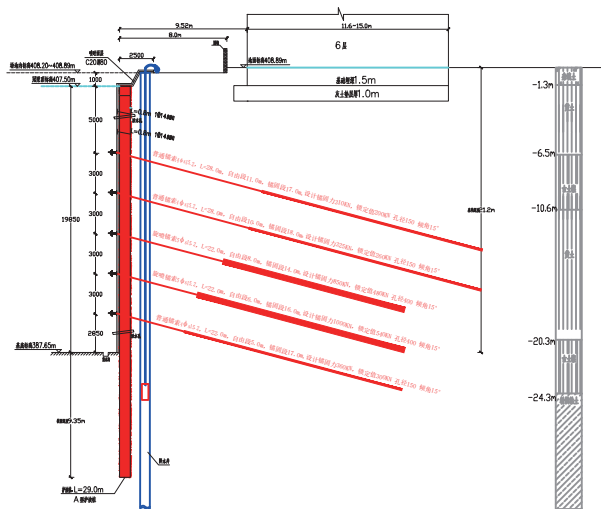


图 3 AB 段支护剖面图

#### 1.4 基坑监测点布置

基坑监测共布置 23 个基坑水平位移观测点, 编号 Ki(i=1~23), 监测点间距约 20 m, 于高尔夫花园建筑物共布设 6 个沉降观测点, 编号 Ci(i=1~6), 分别位于建筑物四角以及长边的中心处。基坑监测点的具体布置见图 4。

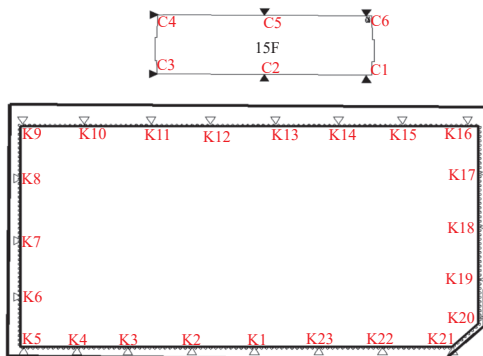


图 4 监测点位图

## 2 数值仿真分析

### 2.1 模型的建立

基坑开挖尺寸为 144.6 m×79.6 m×20 m, 充分考虑基坑开挖影响范围及周边既有建筑规模, 数值模型尺寸设定为 432 m×240 m×60 m, 根据勘察资料土层共划分为 5 层, 整体模型示意图见图 5。

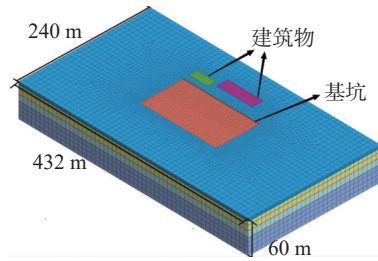


图 5 整体模型示意图

土体的本构模型采用 midas GTS NX 软件自带的 Modified Mohr-Coulomb 模型, 土层采用实体单元模拟, 土层物理力学参数见表 1。

表 1 基坑土层物理力学参数

地层	c/kPa	φ/(°)	γ/(kN·m <sup>-3</sup> )	E/MPa
素填土	10.0	10.0	19.1	11.4
黄土1	21.0	18.5	16.2	16.4
黄土2	23.0	18.5	16.2	22.5
古土壤	26.0	19.5	19.5(水下9.5)	32.8
粉质黏土	38.0	22.0	19.5(水下9.5)	42.6

### 2.2 支护结构模拟

#### (1) 支护桩

通过软件内置的 2D 平面单元对支护桩进行模拟, 根据设计方案, 支护桩主体材料为 C35 混凝土, 弹性模量 E=3.15×10<sup>4</sup> MPa, 泊松比为 0.3, 重度为 25 kN/m<sup>3</sup>。

支护桩可按式(1)(经验公式)等效为地下连续墙:

$$H = \sqrt[3]{\frac{3\pi D^4}{16B}} \quad (1)$$

式中: H 为等效连续墙厚度; D 为护坡桩直径; B 为护坡桩间距。

按照式(1)等效后的地连墙厚度为 0.532 m。

#### (2) 冠梁与腰梁

对于梁、柱、桩等构件可以通过 1D 线单元来模拟, 考虑到节点耦合问题, 因此采用析取线上网格的方式获得一维梁单元。腰梁主体材料为 C35 混凝土, 参数取值同护坡桩。

### (3) 锚索

锚索按照分段设计方案,采用植入式桁架单元模拟,并赋予相应的预应力。锚索弹性模量取 210 GPa,预应力按照施工设计方案进行施加。

基坑开挖后的整体支护结构数值模拟效果图如图 6 所示。

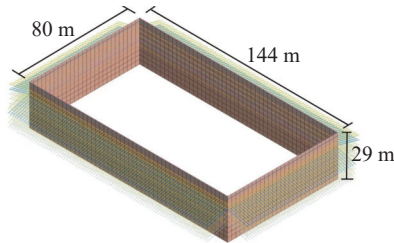


图 6 总体支护结构效果图

### 2.3 周边建筑物结构模拟

建筑物结构采用弹性模型,用 2D 板单元进行模拟,桩基础与承台采用 1D 梁单元进行模拟,分别赋予不同的结构尺寸。上部荷载按照每层 15 kPa 的设计荷载施加于楼板上。基坑北侧建筑物基础的模型效果图如图 7 所示。

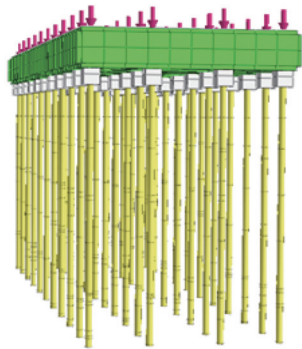


图 7 建筑物的桩基础模拟效果图

### 2.4 施工过程模拟

模型施工过程具体工序如表 2 所示。

### 2.5 数值分析结果与监测结果对比分析

为验证数值模拟计算的准确性,选取基坑侧壁 K13 号桩的深层水平位移和北侧 K9—K16 号的桩顶水平位移及邻近建筑物沉降变形的监测数据与数值模拟结果进行对比,结果如图 8—图 10 所示。图 8 为 K13 号监测点处桩身水平变形情况的对比分析图,由图 8 可知,模拟和实测的桩体水平变形都呈现随开挖深度增加而逐渐增大的趋势,最大水平位移值均出现在桩身下部 12 m 左右。根据各点相对误差得到的平均相对误差值为 4.57%,水平位移的数值分析结果接近现场监测值。

图 9 为基坑北侧 K9—K16 号点桩顶水平变形

表 2 基坑开挖工序

工序	施工内容
1	第一层开挖,开挖深度 2 m
2	激活第一层冠梁、第二层腰梁
4	开挖至 5 m 处
5	激活第三层腰梁单元施加第一排锚索
6	开挖至 8 m 处
7	激活第四层腰梁单元施加第二排锚索
8	开挖至 11 m 处
9	激活第五层腰梁单元施加第三排锚索
10	开挖至 14 m 处
11	激活第六层腰梁单元施加第四排锚索
12	开挖至 17 m 处
13	激活第七层腰梁单元施加第五排锚索
15	开挖至 20 m 处
16	激活底部垫层单元

结果对比图,从图中可以看出,基坑北侧桩顶位移都呈现出两侧小中间大的变形规律,且最大变形都位于 K13 号点位,模拟值与实测值两者相对误差值为 5.67%,处于可接受范围内。

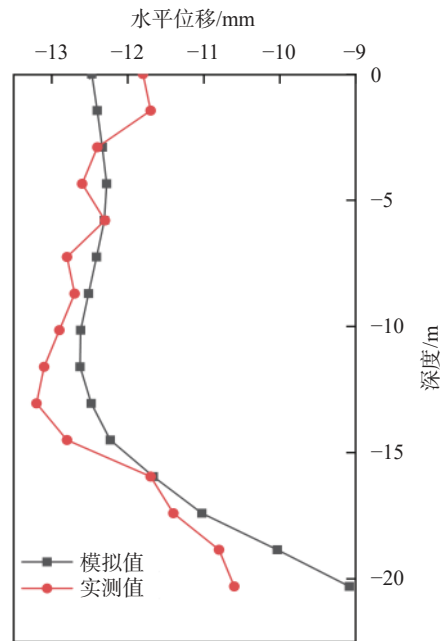


图 8 K13 号桩深层水平位移模拟值与实测值对比

图 10 为北侧邻近建筑沉降模拟值与监测值对比图。从图 10 可以看出,建筑物实测沉降值明显大于数值模拟的结果,实际监测最大沉降值为 -7.60 mm,位于 C2 监测点;最小沉降值为 -4.90 mm,位于 C4 监测点。从沉降量分布看,建筑物产生了不均匀沉降,但未呈现向基坑开挖面倾斜的趋势。而模拟结

果的 C1—C3 号监测点沉降则略大于 C4—C6 号监测点沉降, 即靠近基坑一侧沉降大于远离基坑一侧。模拟最大沉降值为-6.80 mm, 其位于建筑物南侧中点处; 最小沉降值为-3.02 mm, 其位于 C4 监测点, 即建筑物西北顶角处, 建筑物存在向开挖卸荷面倾斜的趋势。

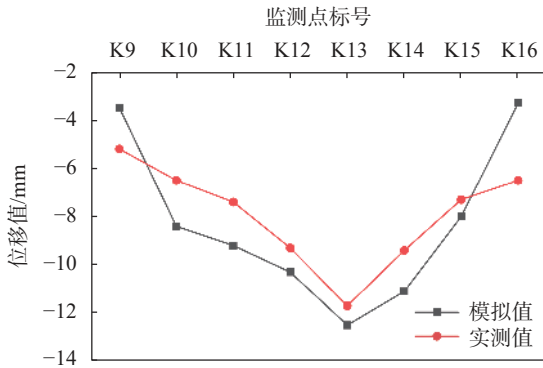


图 9 基坑北侧桩顶水平位移模拟值与实测值对比

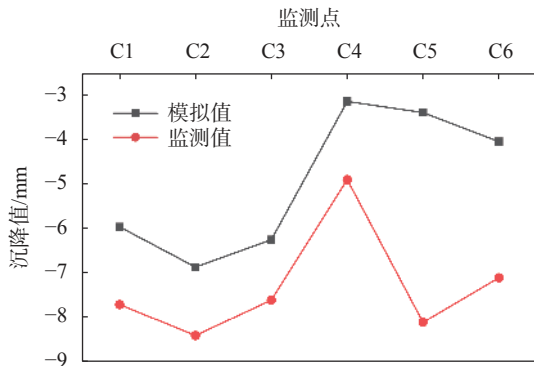


图 10 邻近建筑物沉降量模拟值与监测值对比

### 3 不同工况下数值仿真分析

为了进一步了解基坑开挖对邻近建筑物桩基础的影响, 分别针对不同支护结构及建筑物与基坑不同间距进行仿真模拟, 分析不同工况下基坑开挖对邻近建筑物的影响规律。

#### 3.1 不同支护结构结果对比分析

支护结构分别采用双排桩支护与原有的桩锚支护体系, 其他条件保持不变。支护结构参数参照前述 2.2 护坡桩参数进行设置。

考虑到双排桩的支护效果, 排桩间距为  $3d$  ( $d$  为桩的直径)。双排桩简图见图 11。桩锚支护结构如前文所述。

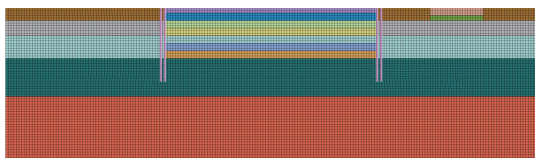


图 11 双排桩模型简图

图 12 为不同支护体系支护水平位移图。从图 12 可以看出, 不同支护体系下的桩体变形规律相似, 但总体上, 桩锚支护下桩体水平位移变化小于双排桩支护时的位移, 桩锚支护在控制桩体水平位移上效果最好。

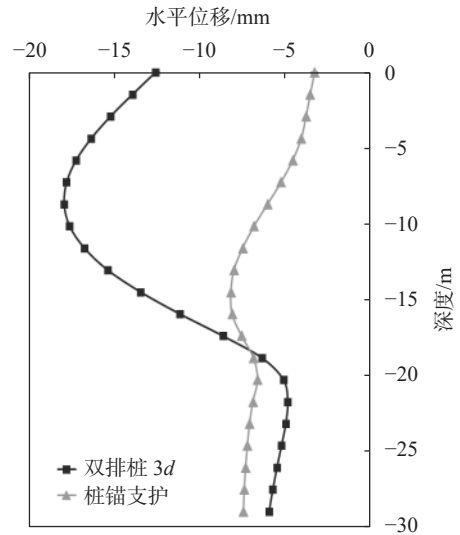


图 12 不同支护体系支护水平位移

从图 13 可以看出, 在双排桩支护下, 先在双排桩之间形成较平缓沉降槽, 在后排桩之后形成较大的沉降槽, 最大沉降量有了明显减小; 桩锚支护的沉降曲线最为平缓。综合对比来看, 在控制基坑位移方面桩锚支护体系支护方式效果更优。

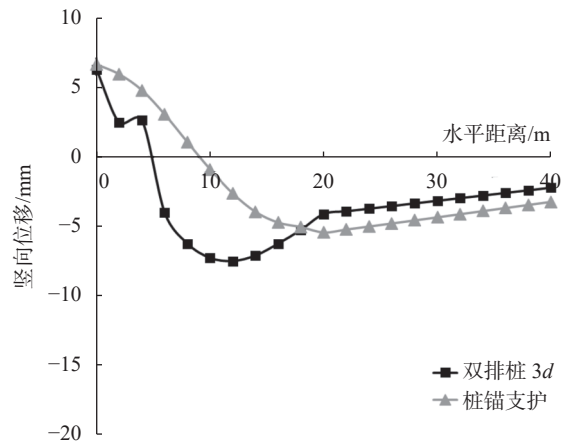


图 13 不同支护体系下墙后土体竖向位移曲线

从图 14 可以看出, 在锚索的影响下, 各支护方式所得到的建筑物竖向位移几乎一致, 桩锚支护下, 建筑物的沉降反而较大。

综上所述, 桩锚支护体系在控制基坑水平位移及墙后土体竖向位移方面发挥较大的作用, 能有效抑制基坑变形, 但在建筑物沉降方面它的支护效果没有排桩和悬臂桩支护体系效果好。

双排桩虽然没有桩锚体系的支护效果,但能起到良好的围护效果,在减小墙后地表沉降、减少建筑物所受开挖扰动上亦能发挥作用。此外,双排桩支护体系优点十分明显:施工简单,工程用地较少。在内支撑支护体系耗材太大、施工不便,或针对本工程中出现的锚索预应力设计值过大导致的施工困难、锚索侵入其他地下结构安全红线内等问题,可以考虑将桩锚支护体系转换为双排桩支护体系。

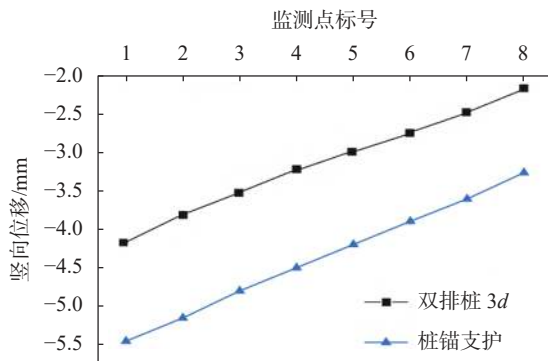


图 14 不同支护体系下建筑物竖向位移

### 3.2 建筑物与基坑不同间距结果对比分析

桩基建筑物与基坑间距(建筑物与基坑边缘间距)分别取为 8, 12, 16, 20, 24 m, 基坑开挖深度、土层参数等条件均与前述基坑工程实例一致。

由图 15 可以看出,随着建筑物与基坑间距的减小,建筑物荷载对基坑的影响逐渐增大,基坑边墙位移变化幅度也在增大。当间距为 8 m 时,边墙最大位移达到了-17.57 mm。

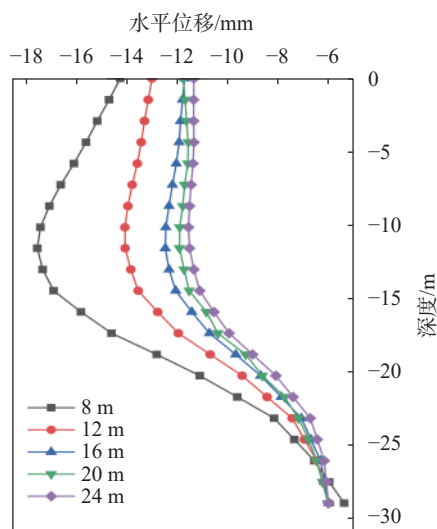


图 15 不同间距下支护水平位移曲线图

从图 16 可以看出,不同间距下墙后地表沉降曲线变化规律十分相似,都出现一定形状的沉降槽,整体呈现距离基坑越近,墙后最大沉降值越大的规律。

在距离为 8~12 m 时,最大沉降值都出现在建筑物近基坑一侧,这说明桩基建筑物在发挥了一定的挡土作用,阻止了土体的继续沉降;随着间距的增加,建筑物荷载的影响在逐渐减弱,具体表现为最大沉降值的减小,墙后隆起值与隆起范围逐渐增加,最大沉降值分布位置逐渐远离基坑。

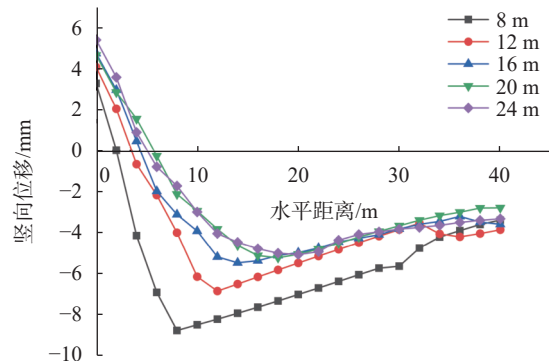


图 16 不同间距下墙后土体竖向位移曲线图

从图 17 可以看出,建筑物与基坑间距越小,建筑物沉降量越大,所受扰动越大。在距离为 8 m 时,建筑物最大沉降量为 8.77 mm。从整体上看,各工况下建筑物沉降均处于安全范围内,未出现严重的不均匀沉降现象。这是因为穿插在土层内的锚索与建筑物桩基础形成了对土体的一种加固作用,限制了部分桩间土体的移动,上部建筑物并未受到明显扰动。此外,桩基础也发挥着稳定上部结构的作用。

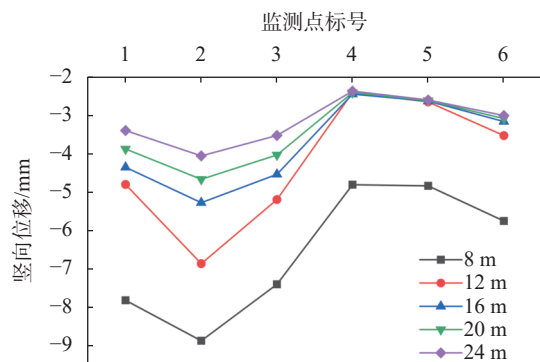


图 17 不同间距下建筑物沉降变化图

## 4 结论

本文采用 midas GTS NX 软件分析了深基坑开挖对临近既有建筑物稳定性的影响。分别研究了支护结构形式、建筑物与基坑间距改变时临近既有建筑物的变形特性,主要结论如下:

(1) 桩锚支护体系的围护效果最好,双排桩在合适的排桩间距下也能发挥良好的支护效果。在内撑体系与桩锚体系受场地限制时,可以考虑采用双排桩支护。

(2)随着建筑物与基坑间距的增大,建筑物所受到的扰动随之减小,基坑开挖造成的扰动具有一定的范围,本工程条件下距基坑 12 m 以外的建筑物所受扰动很小,不会影响其安全使用。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 裴行凯. 深基坑开挖对临近既有地铁隧道的纵向影响分析 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(1): 205-210. (PEI X K. Numerical analysis of influences of excavation on adjacent tunnels[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2019, 17(1): 205-210. (in Chinese))
- [ 2 ] DEMEIJER O. 邻近地下结构的深基坑变形特性及其控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018. (DEMEIJER O. 邻近地下结构的深基坑变形特性及其控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018. (DEMEIJER O. Deformation behavior and control of a deep excavation adjacent to substructures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese))
- [ 3 ] LI M G, DEMEIJER O, CHEN J J. Effectiveness of servo struts in controlling excavation-induced wall deflection and ground settlement[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(9): 2575-2590.
- [ 4 ] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(11): 1659-1666. (WANG W D, XU Z H, WANG J H. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(11): 1659-1666. (in Chinese))
- [ 5 ] 徐孟龙. 深基坑桩锚支护位移及内力数值模拟分析 [J]. *盐城工学院学报 (自然科学版)*, 2019, 32(1): 72-78. (XU M L. Numerical simulation analysis of displacement and internal force of pile anchor support in deep foundation pit[J]. *Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 32(1): 72-78. (in Chinese))
- [ 6 ] 郑 刚, 邓 旭, 刘 畅, 等. 不同围护结构变形模式对坑外深层土体位移场影响的对比分析 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(2): 273-285. (ZHENG G, DENG X, LIU C, et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on displacement field of deep soils outside excavations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(2): 273-285. (in Chinese))
- [ 7 ] 杨 敏, 周洪波, 杨 桦. 基坑开挖与临近桩基相互作用分析 [J]. *土木工程学报*, 2005, 38(4): 91-96. (YANG M, ZHOU H B, YANG H. Numerical analysis of pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(4): 91-96. (in Chinese))
- [ 8 ] 刘 健. 穿河深基坑变形规律及其对邻近桥桩变形影响研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2020. (LIU J. Study on the deformation law of deep foundation pit and its influence on the deformation of adjacent bridge pile[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese))
- [ 9 ] 陈福全, 汪金卫, 刘毓毓. 基坑开挖时邻近桩基性状的数值分析 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(7): 1971-1976. (CHEN F Q, WANG J W, LIU Y C. Numerical analysis of pile response due to braced excavation-induced soil lateral movement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(7): 1971-1976. (in Chinese))
- [10] 张雅宁, 杨春山, 刘锦伟, 等. 基坑开挖对既有桥梁桩基的数值分析 [J]. *广东工业大学学报*, 2014, 31(1): 107-111,117. (ZHANG Y N, YANG C S, LIU J W, et al. Numerical analysis of responses of existing bridge piers induced by deep excavation[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2014, 31(1): 107-111,117. (in Chinese))
- [11] 王 恒, 陈福全, 林 海. 基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响与加固分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(5): 1257-1265. (WANG H, CHEN F Q, LIN H. Behaviors and strengthening of bridge piles subjected to excavation-induced soil movement[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(5): 1257-1265. (in Chinese))
- [12] 韩健勇, 赵 文, 李天亮, 等. 深基坑与邻近建筑物相互影响的实测及数值分析 [J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(4): 149-156. (HAN J Y, ZHAO W, LI T L, et al. Field measurement and numerical analysis of the influences between the deep excavation and adjacent buildings[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(4): 149-156. (in Chinese))
- [13] 周 晋. 基坑开挖对邻近建筑物影响的数值分析 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2014, 12(5): 162-166. (ZHOU J. Numerical simulation study on effect of deep foundation excavation to adjacent buildings[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2014, 12(5): 162-166. (in Chinese))
- [14] 黄启舒, 孟庆生. 采用不同支护方案下基坑开挖对周边建筑桩基和地表影响的数值分析 [J]. *湖南交通科技*, 2019, 45(3): 172-177. (HUANG Q S, MENG Q S. Numerical analysis of influence of foundation pit excavation on surrounding building pile foundation and surface under different support schemes[J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2019, 45(3):

- 172-177. (in Chinese))
- [15] 施有志, 赵花丽, 李秀芳, 等. 深基坑开挖对邻近不同基础型式建筑物影响的数值分析 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(22): 256-265. (SHI Y Z, ZHAO H L, LI X F, et al. Numerical analysis of the influence of deep excavations on neighboring buildings with different types of foundations[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(22): 256-265. (in Chinese))
- [16] LI H J, LIU S Y, TONG L Y. A numerical interpretation of the soil-pile interaction for the pile adjacent to an excavation in clay[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 121: 104344.
- [17] 郑刚, 李志伟. 基坑开挖对邻近任意角度建筑物影响的有限元分析 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(4): 615-624. (ZHENG G, LI Z W. Finite element analysis of response of buildings with arbitrary angle adjacent to excavations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(4): 615-624. (in Chinese))
- [18] 木林隆, 朱孟玺, 黄茂松, 等. 基于临近桩基保护要求的基坑变形控制指标研究 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(3): 465-470. (MU L L, ZHU M X, HUANG M S, et al. Control criteria for deformation of foundation pits based on protection requirements of adjacent pile foundations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(3): 465-470. (in Chinese))
- [19] 黄武英. 桩基开挖对邻近桩基受力性状的敏感性分析 [J]. *西部交通科技*, 2019(9): 133-136, 156. (HUANG W Y. Sensitivity analysis of pile excavation to the stress characteristics of adjacent pile foundations[J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2019(9): 133-136, 156. (in Chinese))
- [20] 李伟强, 宋捷, 周萍. 深基坑与邻近既有建筑地基基础相互影响实例分析 [J]. *建筑结构*, 2016, 46(17): 105-108. (LI W Q, SONG J, ZHOU P. Case analysis on interaction between deep foundation pit and foundation of adjacent existing buildings[J]. *Building Structure*, 2016, 46(17): 105-108. (in Chinese))

收稿日期: 2023-10-31