

基坑开挖对邻近建筑物天然地基变形 影响及控制措施

韩健勇^{1,2},王庆海¹,赵明城³,崔中全⁴,柏 谦⁵

(1. 山东建筑大学土木工程学院,山东 济南 250101;2. 山东建筑大学建筑结构加固改造与地下空间
工程教育部重点实验室,山东 济南 250101;3. 中建八局第一建设有限公司,
山东 济南 250100;4. 济南中央商务区投资建设集团有限公司,
山东 济南 250014;5. 东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110004)

摘 要 目的 明确基坑开挖对天然地基变形的影响及控制措施,以保障基坑及周边
建筑群安全和稳定。方法 依托某基坑工程,首先进行不同工况下模型试验,研究基
坑开挖对天然地基变形的影响,然后基于室内试验建立数值模型,分析隔离桩对控制
天然地基变形的效果。结果 基坑开挖会使邻近建筑物天然地基部分监测点的变形
明显超过报警值,建筑物基础靠近基坑一侧的地表竖向位移远大于远离基坑一侧的
地表竖向位移。桩间距在1~3 m时,控制天然地基的变形效果比较明显,建议桩间
距取1.5 m。隔离桩埋深在3 m以内时,布置埋入式隔离桩的建筑物竖向位移增幅
较小,基本在5%以下。结论 基坑与建筑物之间设置隔离桩可有效减小基坑开挖对
天然地基变形的影响,基坑开挖深度越大,布置隔离桩的变形控制效果越明显。

关键词 基坑开挖;天然地基;竖向位移;隔离桩

中图分类号 TU471

文献标志码 A

Study on Influence of Excavation on Natural Foundation Deformation of Adjacent to Buildings and Its Control Measures

HAN Jianyong^{1,2}, WANG Qinghai¹, ZHAO Mingcheng³, CUI Zhongquan⁴,
BAI Qian⁵

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan, China, 250101; 2. Key Laboratory of Building
Structural Retrofitting and Underground Space Engineering (Shandong Jianzhu University), Ministry of Education,
Ji'nan, China, 250101; 3. The First Company of China Eighth Engineering Bureau Ltd, Ji'nan, China, 250100;
4. Central Business District Group, Ji'nan, China, 250014; 5. School of Resources and Civil Engineering,
Northeastern University, Shenyang, China, 110004)

收稿日期:2022-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51878127)

作者简介:韩健勇(1990—),男,博士,主要从事深基坑理论、非开挖技术及城市地下空间等方面研究。

Abstract: In order to clarify the influence of foundation excavation on natural foundation deformation and control measures to ensure the safety and stability of foundation pit and surrounding buildings. Relying on a foundation pit project, model tests under different working conditions were firstly conducted to study the influence of foundation pit excavation on the deformation of natural foundations in this paper, then a numerical model based on tests was established to analyze the effect of isolation piles on controlling deformation of natural foundations. The research results show that the excavation will cause the deformation of the natural foundation to significantly exceed the warning value, and the vertical displacement of the ground surface on the side of the building foundation close to the foundation pit is much larger than the vertical displacement of the surface on the side far from the foundation pit. When the pile spacing is 1 ~ 3 m, the effect of controlling the deformation of the natural foundation is obvious. In this project, the pile spacing is recommended to be 1.5 m. When the buried depth of the isolation pile is less than 3 m, the displacement increase of the building with the buried isolation pile is small, basically below 5%. Setting isolation piles between foundation pits and buildings can effectively reduce the influence of foundation pit excavation on natural foundation deformation. The greater the excavation depth of foundation pits, the more obvious the deformation control effect of isolation piles.

Key words: excavation; natural foundation; vertical displacement; isolation pile

天然地基是指在自然状态下就能够满足基础全部荷载要求、无需进行人工处理的地基。随着建筑材料的不断更新和发展,施工技术的不断进步,基坑施工邻近建筑物天然地基的工况也会越来越多。明确砂土地层基坑开挖引起的邻近建筑物天然地基变形规律和对天然地基变形的有效控制措施,对于保障基坑及周边建筑群安全和稳定至关重要。

目前,已经有很多学者对基坑开挖引起的建筑物沉降和围护结构变形展开了研究。韩健勇等^[1]基于现场实际监测数据及数值计算结果,对基坑开挖引起的既有建筑物的变形特性和基坑围护结构进行了研究。邓旭等^[2]结合天津实际深基坑工程,研究了基坑开挖对基坑围护结构和邻近结构的影响。范凡等^[3]将数值模拟计算与工程经验相结合,研究了坑外土体竖向位移随基坑开挖深度的变化规律。陈阳等^[4]基于某基坑工程的现场实测数据,对排桩内支撑基坑支护体系中的桩顶水平位移、桩体侧向位移以及基坑周边土体沉降量进行了深入研究。李志^[5]基于北京某基坑工程,通过理论设计、模型试验和数值模拟三者相结合的方式研究了钢管桩

基坑支护的位移、应力、变形及对基坑稳定性的影响,对钢管桩代替钻孔灌注桩的可行性进行了研究。晋霞^[6]通过模型试验分别模拟了三种基坑开工况,得到了在基坑开挖过程中支护结构的受力变形和周围建筑基础沉降之间的相互作用和影响规律。王琳等^[7-8]基于数值模拟研究了不同施工方法、施工参数下基坑开挖对周围环境的影响。E. Khalid^[9]通过现场监测分析了基坑开挖对邻近建筑物沉降的影响。S. Y. Fan^[10]通过数值模拟研究了大型基坑开挖对围护结构水平位移的影响。Y. Tan 等^[11-12]通过现场监测和数值模拟,研究了大型基坑开挖对基坑围护结构受力及坑外土体变形的影响。

在基坑与建筑物之间布置隔离桩是一种控制变形的办法。关于隔离桩方面的研究,郑刚等^[13]在工程实测数据的基础上,采用有限元方法对隔离桩的作用机制进行了参数分析,并研究了隔离桩对土体深层位移及对隧道位移的控制机制。翟杰群等^[14]对隔离桩的作用机理和结构形式进行了研究,并给出了隔离桩桩长、隔离桩结构形式等参数对隔离桩控制变形的影响规律。曾晓鑫等^[15]采

式中: E_m 为模型弹性模量; I_m 为模型惯性

矩; E_p 为原型弹性模量; I_p 为原型惯性矩; C_L 为长度相似比。

根据式(1)得出模型围护结构的抗弯刚度为 $4.602 \times 10^{-5} \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, 为防止试验中围护结构之间漏土, 选用薄铝板代替原型灌注桩, 其弹性模量约为 68 GPa。根据矩形惯性矩公式和模型箱尺寸求出铝板长 \times 宽 \times 厚为 $750 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 厚度约为 0.47 mm, 为便于加工, 铝板的厚度选为 0.5 mm。

依托工程内支撑原型为直径 609 mm、厚度 16 mm、长度 9 m、间距 3 m 的钢支撑。内支撑主要发挥抗压作用, 根据等效刚度替代法对原型内支撑进行替换, 根据相似定理可知模型中围护结构的抗压刚度为

$$E_m A_m = E_p A_p / C_L^3.$$

(2)

式中: A_m 为模型截面积; A_p 为原型截面积。

根据式(2)得出模型内支撑的抗压刚度为 $2.428 \times 10^2 \text{ kN}$, 选用 PVC 管作为相似材料, 其弹性模量约为 3 GPa。根据圆环面积公式和模型箱尺寸求出 PVC 管的直径为 16 mm, 厚度为 2 mm, 长度为 0.3 m, 间距为 0.1 m。试验模型中采用钢板模拟建筑物基础, 一块钢板的附加荷载为 4.71 kPa, 根据相似原理, 实际作用在地基上的附加荷载为 141.3 kPa, 相当于底面长 \times 宽为 $7.5 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 的 10 层框架结构作用在地基上。

选取彰武砂作为模型土进行基坑开挖模型试验, 彰武砂属大林矿系主矿脉的天然风积砂, 其粒径均匀符合试验要求。通过系列土工试验得到模型土的力学参数见表 1。

表 1 模型土力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model soil

含水率/ 度/ %	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	压缩模量/ MPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	平均粒径 $D_{50}/$ mm
1.8	1.545	2.7	25.3	35.5	0.201

N. K. Ovesen^[18]通过试验得出, 当基础直径与砂土平均粒径之比大于 30 时, 土体材

料不缩制不会对地基承载特性有较大影响, 此时可以选用原型土料进行试验。模型试验中与土体接触的钢块最小宽度为 150 mm, 与模型土平均粒径比值为 746, 符合要求。采用砂雨法分层制备性能稳定的人工模型地层, 并在试验前进行标定。模型试验中落砂高度取 1.1 m, 由此制备的土层相对密实度约为 0.6。

1.3 试验工况及方案

试验共分 4 组工况, 建筑物采用 4 块长 \times 宽 \times 高为 $250 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的钢板模拟, 通过增加钢板数量来模拟不同的建筑物附加荷载。在钢板底部贴上砂纸增加其与模型土的摩擦力, 以便更好地模拟实际中砂土与上覆结构的相互作用。

根据《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497—2009)可知, 基坑周边地表竖向位移监测点宜按监测剖面布置在坑边中部, 且监测剖面与坑边垂直, 建筑物周围地表竖向位移的报警值为 10 ~ 60 mm, 文中取 30 mm。根据相似理论可知, 试验中地表竖向位移的报警值为 1 mm。采用量程为 50 mm 的位移传感器并结合 3 816 N 数据采集仪测定建筑物基础周围竖向位移, 试验中位移传感器空间位置分布及试验装置见图 3。位移传感器 1 和位移传感器 5 测定靠近基坑的地表竖向位移, 位移传感器 2 和位移传感器 6 测定基坑与建筑物基础之间的地表竖向位移, 位移传感器 3 ~ 4、7 ~ 9 用来测定建筑物基础周边的地表竖向位移。

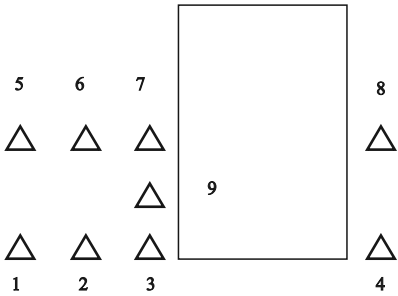


图 3 位移传感器布置图

Fig. 3 Layout of displacement sensors

每组试验均分五步开挖,每步开挖深度50 mm,每层开挖土下方放置一张透明薄膜,便于标记和取土。开挖前记录位移传感器初始示数,采用取土设备开挖至第一层透明薄膜,待位移传感器示数稳定后记录此时位移传感器示数;继续开挖至第二层透明薄膜,待位移传感器示数稳定后记录此时位移传感器示数;在开挖第三层土体的同时布置PVC管,将其固定在铝板和模型箱之间。PVC管位于100 mm标高处,继续开挖至第五层透明薄膜,试验结束并记录位移传感器数据。

2 结果与分析

提取步骤一(基坑开挖深度0.05 m)、步骤二(基坑开挖深度0.1 m)、步骤三(基坑开挖深度0.15 m)、步骤四(基坑开挖深度0.2 m)和步骤五(基坑开挖深度0.25 m)的位移传感器数据。相同附加荷载条件下各测点地表竖向位移随基坑开挖深度变化曲线如图4所示。

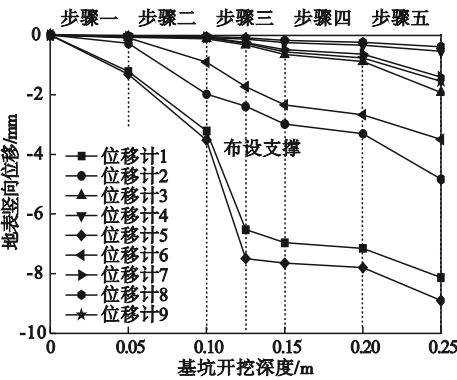


图4 地表竖向位移随基坑开挖深度变化曲线

Fig. 4 Variation of vertical surface displacements with excavation depth

由图4可知,随着基坑开挖深度逐渐增加,各位移传感器的示数逐渐增大。其中位移传感器1和位移传感器5的示数变化幅度最大,这是由于这两个测点靠近基坑开挖区,所受的扰动最大。位移传感器2和位移传感器6处于基坑与建筑物基础之间,在整个基坑开挖过程中,位移传感器2的示数均大于

位移传感器6的示数,笔者认为这是由于建筑物基础的存在引起了周围土体的隆起,进而抵消了一部分基坑开挖引起的竖向位移,且建筑物荷载对基础四周土体的影响小于对基础中部土体的影响。位移传感器3、7、9的变化趋势基本相同,位移传感器3的示数最大,位移传感器7的示数最小。

位移传感器3~4、7~9测定的是建筑物基础周围天然地基的沉降。当放置一块钢板时,随着基坑开挖深度的增加,位移传感器4和位移传感器8的示数均未超过报警值。基坑开挖深度大于0.2 m时,位移传感器3、7、9示数均超过报警值,且位移传感器3的示数与位移传感器7相比增大了26.56%,与位移传感器4相比增大了71.87%。当放置两块钢板时,位移传感器4和位移传感器8的示数均未超过报警值,位移传感器4的示数与位移传感器8相比增大了19.27%。基坑开挖深度大于0.1 m时,位移传感器3、7、9示数均超过报警值,位移传感器3的示数与位移传感器7相比增大了25.31%,与位移传感器4相比增大了64.9%。

当放置三块钢板时,位移传感器4的示数在基坑开挖深度为0.25 m时超过报警值,位移传感器8的示数未超过报警值,位移传感器4的示数与位移传感器8相比增大了34.37%。基坑开挖深度大于0.1 m时,位移传感器3、7、9示数均超过报警值,位移传感器3的示数与位移传感器7相比增大了23.52%,与位移传感器4相比增大了52.94%;位移传感器7示数与位移传感器8相比增大了59.61%。当放置四块钢板时,位移传感器4和位移传感器8均超过报警值,且位移传感器4的示数与位移传感器8相比增大了36.86%。基坑开挖深度大于0.1 m时,位移传感器3、7、9示数均超过报警值,位移传感器3的示数与位移传感器7相比增大了44.46%,与位移传感器4相比增大了62.21%。

选取基坑开挖结束后不同工况下传感器3、传感器4、传感器7与传感器8的地表竖向位移值进行分析,结果见图5。由图可知,当基坑开挖深度为0.25 m时,随着附加荷载的增加,位移传感器3处的竖向位移分别超过报警值92%、137%、172%、424%,位移传感器4处的竖向位移分别超过报警值-48%、-17%、28%、98%,位移传感器7处的竖向位移分别超过报警值41%、77%、108%、191%,位移传感器8处的竖向位移分别超过报警值-61%、-33%、-16%、25%。

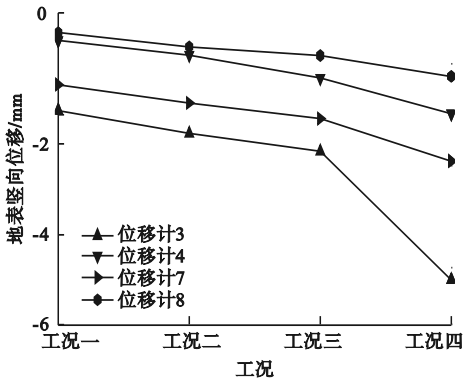


图5 不同工况下地表竖向位移值

Fig. 5 Vertical surface displacements under different cases

综合分析可知,基坑开挖深度增加会严重影响邻近建筑物天然地基的稳定性。当附加荷载相同时,随着基坑开挖深度的增加,建筑物基础靠近基坑一侧的地表竖向位移远大于远离基坑一侧的地表竖向位移。传感器7与传感器8的示数相差约为60%,传感器3与传感器4的示数相差约为63%,可以得出在建筑物基础中部和底边两个断面上,靠近与远离基坑位置处的地表竖向位移的差异基本相同。在建筑物平行基坑长边断面上,建筑物基础端部的地表竖向位移大于建筑物基础中部的地表竖向位移,相同附加荷载下地表竖向位移的增幅基本相同。随着附加荷载的增加,建筑物基础远离基坑一侧的角点处的地表竖向位移增幅约为35%;建筑物基础靠近基坑一侧左下角点处的地表竖向位移和建筑物基础

中部地表的竖向位移增幅先减小后增大。

3 数值模拟

3.1 计算模型建立及验证

基坑开挖会影响邻近建筑物天然地基的安全性,笔者依托实际工程构建三维模型,首先分析采用隔离桩的方式对天然地基变形的影响,然后研究桩间距(1 m、2 m、3 m、4 m和5 m)和桩埋深(0 m、2 m、4 m、6 m、8 m和10 m)对天然地基变形的影响及规律。模型尺寸及网格划分如图6所示。模型所有侧面约束其法向位移,底面固定,地表面为自由面。土体材料与试验相同,采用实体单元,修正摩尔库伦本构模拟,围护结构采用板单元,弹性本构模拟,内支撑采用梁单元,弹性本构模拟。建筑物通过施加141.3 kPa均布荷载模拟。计算模型施工过程与试验相同,整个模型共有22 569个单元。待数值模型与室内试验验证后在模型中添加隔离桩,隔离桩采用梁单元模拟,弹性本构。隔离桩长为9 m,桩径为600 mm,布置在基坑围护结构与建筑物的中间位置,距基坑围护结构的水平位移为75 mm。

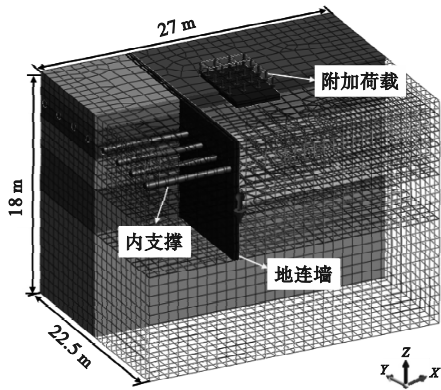


图6 计算模型

Fig. 6 Calculation model

在数值模型上布置监测点a和监测点b,监测点位置分别与模型试验中的传感器7和传感器8对应。将传感器7和传感器8的试验数据乘以相似比30后,与数值模型监测

点的竖向位移进行对比,结果见图7。由图可知,竖向位移的数值计算结果与试验结果整体变化趋势相同,两者结果吻合度较高,最终沉降值差距均在5%以内。证明笔者建立的数值模型准确性较好,可用于后续研究。

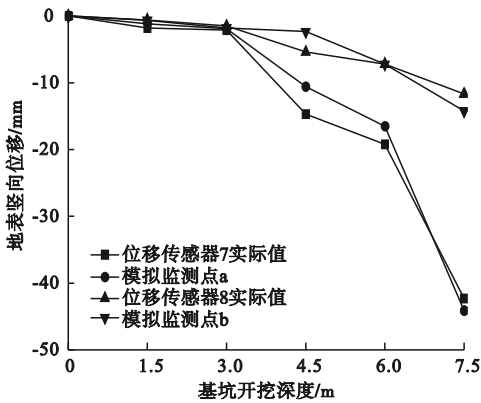


图7 试验值与模拟值对比

Fig. 7 Comparison between test values and simulated values

3.2 隔离桩对天然地基变形的影响

有无隔离桩情况下基坑开挖引起的建筑物竖向位移变化规律如图8所示。

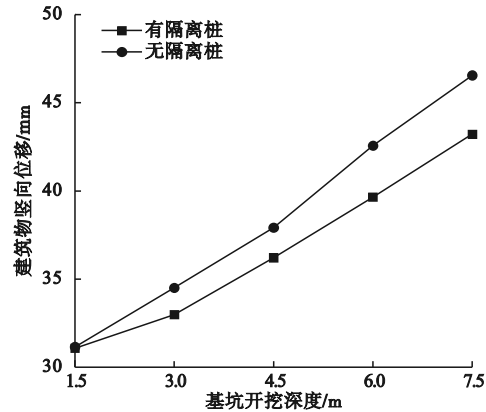


图8 不同基坑开挖深度与建筑物竖向位移关系曲线

Fig. 8 Vertical displacements of building under different excavation depth

由图8可知,基坑开挖深度越大,隔离桩控制天然地基变形的效果越显著。以有隔离桩工况下、基坑开挖深度为7.5 m时的建筑物竖向位移作为基准,对不同开挖深度下的建筑物竖向位移作归一化处理。随基坑开挖

深度的增加,建筑物竖向位移的增幅分别为0.16%、3.51%、3.95%、6.75%、7.72%。分析可知,当基坑开挖深度小于等于4.5 m时,建筑物的位移增幅不超过5%,此时采用隔离桩的方法对天然地基变形的效果不显著,因此可不采用隔离桩的方法;当基坑开挖深度大于4.5 m时,采用隔离桩控制变形的的方法对天然地基建建筑物十分有效。因此,当基坑开挖深度较大时,可通过施作隔离桩的方式对地层变形进行有效控制,从而减小天然地基建建筑物的位移。

3.3 桩间距对天然地基变形的影响

隔离桩的桩间距可以在一定程度上控制天然地基的变形,设置隔离桩间距分别为1 m、2 m、3 m、4 m、5 m,不同隔离桩间距与建筑物竖向位移之间的关系曲线如图9所示。

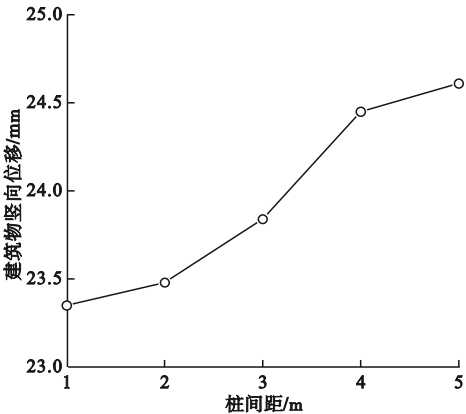


图9 不同隔离桩间距下建筑物竖向位移值

Fig. 9 Vertical displacements of building under different isolation pile spacing

由图9可知,邻近基坑建筑物竖向位移随隔离桩间距的变化呈非线性变化关系。采用隔离桩控制措施后,当隔离桩的间距增大时,建筑物竖向位移随之不断增大。相较于未采用隔离桩控制措施,邻近建筑物的竖向位移分别减小了14.99%、14.52%、13.21%、10.99%、10.41%,位移减小幅度随桩间距的增大而减小。这主要是由于隔离桩桩间土体产生的土拱效应逐渐减弱造成的。

当隔离桩间距为 4 m 时,隔离桩间土体的土拱效应已经明显减弱;当桩间距进一步加大时,桩侧土压力进一步降低;当桩间距增大到一定值的时候,桩间土拱效应完全消失。当桩间距在 1~3 m 时,控制天然地基的变形效果较为显著,土拱效应的产生也比较明显;但是当桩间距过小时,虽然土拱效应很明显,由于此时隔离桩布置过于密集,基坑施工的工程量也相应增大,进而增加了施工成本,性价比不高。如何合理选择隔离桩间距,既能较好地利用土拱效应,又能充分发挥隔离桩的隔离作用,是隔离桩设计中的一个关键问题,文中工程建议桩间距取为 1.5 m。

3.4 隔离桩埋深对天然地基变形的影响

为研究隔离桩埋深对控制天然地基的变形效果,设置隔离桩桩顶埋深分别为 0 m、1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m,埋入式隔离桩桩长分别为常规隔离桩桩长的 100%、88.89%、77.78%、66.67%、55.56%、44.44%。隔离桩埋深与邻近建筑物的竖向位移间关系曲线如图 10 所示。

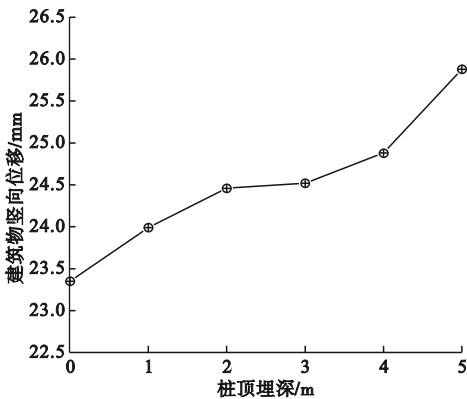


图 10 不同隔离桩埋深下建筑物竖向位移值

Fig. 10 Vertical displacements of building under different isolation pile burial depth

由图 10 可知,随着隔离桩埋深的不断增大,邻近建筑物竖向位移逐渐增大,布置埋入式隔离桩与布置常规隔离桩相比,建筑物竖向位移分别增加了 2.74%、4.75%、4.99%、6.55%、10.83%。分析可知,当隔离桩埋深在 3 m 以内(此时隔离桩桩长为常规隔离桩

的 66.67%)时,与常规隔离桩相比,布置埋入式隔离桩的建筑物竖向位移增幅较小,基本在 5% 以下;当隔离桩埋深在 4 m 以上时,建筑物竖向位移增幅较大。由此可见,采用常规隔离桩时,桩身在接近地表的部分对控制天然地基的变形影响不太显著,因此在基坑支护体系中加入埋入式隔离桩,可以取得和采用常规隔离桩相近的效果。在实际工程中,可以在施工要求范围内采用埋入式隔离桩,减少桩身长度,降低施工成本。

4 结 论

(1) 基坑开挖会使邻近建筑物天然地基部分监测点的变形明显超过报警值。随着基坑开挖深度的增加,建筑物基础靠近基坑一侧的地表竖向位移远大于远离基坑一侧的地表竖向位移。

(2) 当基坑开挖深度在 4.5 m 及以下时,设置隔离桩对控制邻近建筑物天然地基变形的效果有限。基坑开挖深度越大,设置隔离桩控制天然地基地层变形的效果越显著。

(3) 桩间距取为 1.5 m 时,既能较好地利用土拱效应,又能充分发挥隔离桩的隔离作用。建议在基坑工程支护体系中加入埋入式隔离桩,可以达到与施作常规隔离桩相近的效果,减少桩身长度,降低施工成本。

参考文献

[1] 韩健勇,赵文,关永平,等. 近接浅基础建筑物深基坑变形特性及关键参数[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(10):1463-1468. (HAN Jianyong, ZHAO Wen, GUAN Yongping, et al. Deformation characteristics and key parameters of deep excavation adjacent to buildings with shallow foundations [J]. Journal of northeastern university (natural science), 2018,39(10):1463-1468.)

[2] 邓旭,郑虹,宋昭煌,等. 邻近新建地铁车站的深基坑工程的变形分析[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(增刊1):270-277. (DENG Xu, ZHENG Hong, SONG Zhaohuang, et al. Deformation analysis of deep excavation adjacent to the new subway station [J]. Chinese journal of underground space and

- engineering, 2018, 14(S1): 270–277.)
- [3] 范凡, 陈锦章, 章红兵, 等. 基坑开挖引起紧邻建筑物沉降的简化计算方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊2): 61–64.
(FAN Fan, CHEN Jinjian, ZHANG Hongbing, et al. Simplified method to predict settlements of adjacent buildings due to deep excavation [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37(S2): 61–64.)
 - [4] 陈阳, 赵文, 贾鹏蛟, 等. 砂土地区深基坑稳定性评价及力学效应分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(9): 1353–1357.
(CHEN Yang, ZHAO Wen, JIA Pengjiao, et al. Stability assessment and mechanical effects analysis on deep foundation pit in sandy soil [J]. Journal of northeastern university (natural science), 2018, 39(9): 1353–1357.)
 - [5] 李智. 钢管桩基坑支护稳定性模型试验及数值模拟[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
(LI Zhi. Experimental investigation and numerical simulation of stability of foundation pit supported by steel pipe pile [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.)
 - [6] 晋霞. 深基坑开挖与邻建基础相互影响模型试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
(JIN Xia. Model experimental study of interaction between deep excavation and adjacent building foundation [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.)
 - [7] 王琳, 罗志华, 张晗. 地铁车站深基坑开挖对临近建筑物影响的三维有限元分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊1): 1928–1934.
(WANG Lin, LUO Zhihua, ZHANG Han. Finite element analysis of the influence of deep foundation pit excavation on adjacent buildings in subway station [J]. Building structure, 2021, 51(S1): 1928–1934.)
 - [8] 王耀, 李兵, 杨家新, 等. 上下同步逆作法深基坑及邻近地铁车站变形分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(15): 125–130.
(WANG Yao, LI Bing, YANG Jiaxin, et al. Analysis on deformation of deep foundation pit with synchronous top-down construction method and adjacent subway station [J]. Building structure, 2021, 51(15): 125–130.)
 - [9] KHALID E, SHEN Shuilong, TAN Yong, et al. Investigation into performance of deep excavation in sand covered karst: a case report [J]. Soils and foundations, 2018, 58(4): 1042–1058.
 - [10] FAN Shengyuan, SONG Zhanping, XU Tian, et al. Tunnel deformation and stress response under the bilateral foundation pit construction: a case study [J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2021, 21: 109.
 - [11] TAN Yong, LU Ye, XU Changjie, et al. Investigation on performance of a large circular pit-in-pit excavation in clay-gravel-cobble mixed strata [J]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 79: 356–374.
 - [12] TAN Yong, WEI Bin, DIAO Yanping, et al. Spatial corner effects of long and narrow multipropped deep excavations in Shanghai soft clay [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2014, 28(4): 04014015.
 - [13] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰. 隔离桩对基坑外既有隧道变形控制的优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3499–3509.
(ZHENG Gang, DU Yiming, DIAO Yu. Optimization analysis of efficiency of isolation piles in controlling the deformation of existing tunnels adjacent to deep excavation [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2015, 34(S1): 3499–3509.)
 - [14] 翟杰群, 贾坚, 谢小林. 隔离桩在深基坑开挖保护相邻建筑中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 162–166.
(ZHAI Jiequn, JIA Jian, XIE Xiaolin. Practice of partition wall in the building protection projects near deep excavation [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2010, 6(1): 162–166.)
 - [15] 曾晓鑫, 丁文湘, 彭玲, 等. 隔离桩间距对基坑开挖引起地铁隧道的位移影响分析[J]. 中国科技论文, 2018, 13(1): 17–22.
(ZENG Xiaoxin, DING Wenxiang, PENG Ling. Effects of pile spacing on the displacement of subway tunnel during excavation [J]. China science paper, 2018, 13(1): 17–22.)
 - [16] 纪新博, 赵文, 李慎刚, 等. 隔离桩在隧道侧穿邻近浅基建筑中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(1): 135–139.
(JI Xinbo, ZHAO Wen, LI Shengang, et al. Application of isolation piles on metro tunnel for side-crossing the buildings with shallow foundation [J]. Journal of northeastern university (natural science), 2013, 34(1): 135–139.)
 - [17] 郭健, 刘国彬, 苏维捷, 等. 群坑效应下已建地下结构对紧邻基坑开挖变形的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 222–230.
(GUO Jian, LIU Guobin, SU Weijie, et al. Numerical analysis about influence from the subsurface structure on adjacent deep excavation in foundation pit group [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2): 220–230.)
 - [18] OVESEN N K. The use of physical model in design: the scaling law relationships [C]. Proceedings of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton: [s. n.], 1979.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)