

DOI: 10.11779/CJGE2021S1024

基坑开挖对邻近建筑桩基弯矩和变形影响的模型试验

冉启仁, 王旭, 王博林, 蒋代军, 张延杰, 李建东
(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:结合天水市商阜—阜北路地下基坑开挖实例进行了室内模型试验,研究了基坑开挖过程中群桩桩身水平位移和弯矩的变化规律,讨论了基坑的深宽比、地下连续墙墙趾埋深以及距离基坑的远近对邻近建筑物桩基的影响规律。结果表明:桩基的变形同时受到基坑深宽比与上部荷载的影响,且深宽比越大基坑受上部荷载的影响越大。基坑开挖对周围建筑物的影响随着开挖距离的增大而减弱。随着离开挖面距离的增大,桩身最大弯矩出现上移趋势,且最大值始终小于同一深度处距离基坑较近的桩。随着地下连续墙墙趾埋深的增加,地下连续墙对建筑桩基的保护作用加强。群桩基础中,前排桩对后排桩有很好的隔离作用。该模型试验充分考虑了基坑开挖过程中各类因素对邻近建筑桩基的影响,能够为类似工程提供参考依据。

关键词:深宽比;墙趾埋深;桩;位移;弯矩

中图分类号:TU43

文献标识码:A

文章编号:1000-4548(2021)S1-0132-06

作者简介:冉启仁(1995—),男,甘肃会宁人,硕士,主要从事岩土工程领域的科研工作。E-mail:ranqiren0806@163.com。

Model tests on influences of excavation of foundation pits on bending moment and deformation of pile foundation of adjacent buildings

RAN Qi-ren, WANG Xu, WANG Bo-lin, JIANG Dai-jun, ZHANG Yan-jie, LI Jian-dong

(Civil Engineering College, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Model tests are carried out based on an example of the excavation of an underground foundation pit on Shangfu-Fubei Road in Tianshui City. The horizontal displacement and bending moment of the pile groups during the excavation of the foundation pit are studied. The influence laws of depth-to-width ratio of the foundation pit, buried depth of the toe of the diaphragm wall and the distance from the foundation pit on the pile foundation of adjacent buildings are investigated. The test results show that the deformation of the foundation pile is affected by the depth-to-width ratio of the foundation pit and the upper load, and the larger the depth-to-width ratio of the foundation pit, the more influences by the upper load. The influences of excavation of the foundation pit on the surrounding buildings decreases as the excavation distance increases. As the distance from the excavation surface increases, the maximum bending moment of the piles has a tendency to move upward, and the maximum value is always smaller than that of the pile closer to the foundation pit at the same depth. As the buried depth of the toe of the diaphragm wall increases, the protective effect of the diaphragm wall on the pile foundation of the buildings is strengthened. In the foundation with pile groups, the front-row piles have a good isolation effect on the back-row ones. The model tests fully consider the influences of various factors on the pile foundation of the neighboring buildings during the excavation of the foundation pit, and can provide a reference for similar projects.

Key words: depth-to-width ratio; depth of wall toe; pile; displacement; bending moment

0 引言

近年来,中国城市化进程不断加快,城市人口持续上升,公共设施的改扩建已迫在眉睫。钱七虎等^[1-3]曾说过,21世纪是开发利用地下空间的世纪,地下多层次空间的开发和利用将显得尤为重要。在地下空间的开发过程中,不可避免的涉及到基坑工程,其中需解决的关键问题为基坑变形对建筑物的影响。

基坑开挖对周围建筑桩基变形的影响,国内外学者进行了大量研究。梅祯等^[4]通过三维有限元反演基

坑施工过程的计算参数,并在此基础上研究了开挖距离、基坑规模、开挖深度、基坑数量和施工工序对邻近地铁高架结构的影响。张世民等^[5]根据降水引起土体沉降的机理,运用修正的分层总和法单独计算由降水引起的周围土体沉降。魏纲等^[6]考虑基坑开挖时卸载在隧道轴线处产生的附加应力,建立了综合考虑剪切错台变

基金项目:国家自然科学基金项目(41662017)

收稿日期:2020-12-15

形和刚体转动变形的隧道变形计算模型。徐日庆等^[7]基于影像源法,推导了在基坑开挖下的坑外土体水平位移半解析式。王恩钰等^[8]采用有限元软件 Plaxis3D,对比了多种倾斜桩组合支护结构在控制桩身变形和坑外沉降方面的特性。梁发云等^[9]采用 ABAQUS 分析了不同土体侧移对于桩基承载和变形性状的影响;杨敏等^[10]分析了邻近桩基对基坑开挖所引起土体变形场的影响;Finno 等^[11]利用有限元对基坑开挖引起临近桩基的破坏进行了分析;Poulos 等^[12]将有无支撑作为研究对象,得出无支撑措施会增大周边桩基变形的结论。Leung^[13]利用离心试验进行深基坑开挖对于周边桩基变形的研究,同时采用三维数值模拟软件进行分析。Moormann^[14]总结了基坑在施工过程中引起土体变形的原因。Pan^[15]采用三维数值分析软件进行分析,发现土体变形与桩基变形之间存在严密的关系。本文结合天水市商阜—阜北路地下基坑开挖的工程实例,设计了室内缩尺模型试验,对比工程实测数据和室内模型试验结果,探究基坑开挖过程中邻近桩基的受力变形特点。

1 现场试验

1.1 地质条件与土层参数

该基坑工程位于甘肃省天水市,上层是杂填土,土质不均匀。往下为含钙质砂粒及粉土,呈黄褐色,稍密。再往下是湿度较高,密度较大的粗砂。再往下是圆砾。再往下是粉质黏土,土质均匀。再往下是碎石。土层参数如表 1 所示。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层	厚度 /mm	弹性模量 / (MPa)	重度 / (kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)
杂填土	1.80	10	18.5	5	10
粉质黏土	1.80	20	18.5	10	15
粗砂	1.70	25	19.0	0	20
圆砾	4.10	30	19.5	0	23
粉质黏土	2.10	40	20.0	15	38
碎石	>10	60	21.0	0	35

1.2 试验方案和试验内容

基坑开挖过程中,在基坑邻近建筑物上布置沉降标,用水准仪观测水平位移,将距基坑 2,4,6,8 m 的建筑物分别编号为#1,#2,#3,#4,如图 1 所示,绘制 2017 年 9 月 28 日—2018 年 10 月 15 日间各建筑物水平位移变化曲线。

#1—#4 建筑物累计水平位移如图 1 所示,2017 年 10 月 8 日基坑开挖后,各建筑物累计水平位移不断增大;2018 年 1 月 30 日后,#3,#4 建筑物的水平位移趋于稳定,分别为 3.5,1.1 mm,2018 年 10 月 15 日,#1,#

2 建筑物的累计水平位移分别达到了 7.2,6.1 mm 且均未达到稳定。其原因是基坑开挖引起基坑周围土体应力释放,土压力由静止土压力变为主动土压力,土体产生水平位移。在基坑支护结构的作用下,该水平位移随距基坑距离的增大而减小。

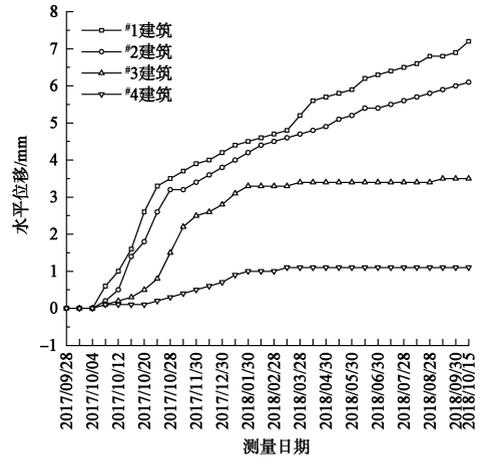


图 1 建筑物累计水平位移

Fig. 1 Cumulative horizontal displacements of buildings

2 室内模型试验

2.1 模型箱设计与填土控制标准

模型箱长、宽、高分别为 2.4,1.2,1.2 m,选用 10 mm 厚的有机玻璃板模拟地下连续墙。填土为甘肃天水粉质黏土,控制压实度为 85%,分层填筑,填土基本物理力学参数如表 1 所示。

2.2 模型桩制作

模型桩制作参考文献[16,17],模型桩采用半径 40 mm、壁厚 4 mm 的空心铝管加工而成,桩长 0.9 m,弹性模量为 70 GPa。为了增大桩的侧摩阻力,在桩的外侧均匀黏结标准砂。

2.3 量测系统设计

桩身应变片分布如图 2 所示。桩身应变通过 DH3816 静态应变测试系统来采集,加载标准根据规范确定^[18]。

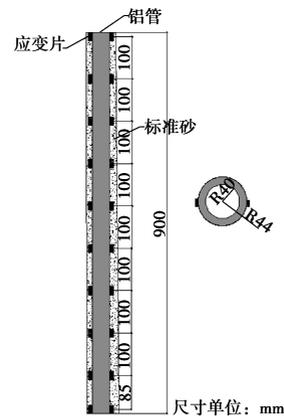


图 2 桩身应变片布置图

Fig. 2 Layout of strain gauges for pile

3 试验结果分析

3.1 基坑的深宽比对桩身变形的影响

模型试验桩布置如图3,4所示,当基坑开挖时,通过应变片的读数可得到桩身弯矩及水平位移。在无荷载作用和正常受力两种工况下,分别讨论不同深宽比条件下桩身水平位移和弯矩的变化规律。

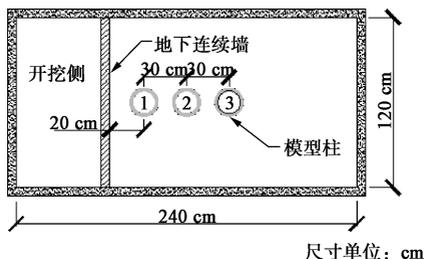


图3 模型试验桩位布置图

Fig.3 Layout of model test piles



图4 模型试验桩位布置图

Fig.4 Layout of model test piles

不同深宽比下桩身位移随深度的变化如图5所示,此时地下连续墙墙趾埋深为0.3 m。由图可得,桩身水平位移在桩顶达到最大,随着土层深度的增加,水平位移逐渐减小,桩身上部40 cm范围内位移值较大,超过40 cm后水平位移较小且位移变化趋于缓慢。

由图5(a)可知,随着深宽比增大,桩顶位移不断增大,深宽比从1/6增加到5/6时,桩顶位移增加76%。由图5(b)可以看出,桩顶正常受力工况下深宽比从1/6增加到5/6时,桩顶位移增加了3.75倍。对比图5(a),5(b)可知,基坑深宽比为1/6,1/3,1/2,2/3,5/6时,正常受力工况下的水平位移分别是无荷载工况下的8.4,13.8,18.2,22.0,22.8倍。说明建筑桩基的变形同时受到基坑深宽比与上部荷载的影响,且深宽比越大受上部荷载的影响越大。故深宽比较大的基坑开挖时要密切关注周边的堆载情况,选择合适的围护结构来减小基坑开挖对周围建筑桩基的影响。

3.2 基坑的深宽比对桩身弯矩的影响

不同深宽比对应的桩身弯矩随土层深度的变化如图6所示。由图可知,桩身弯矩随土层深度的增加呈先增大后减小的规律。对比图6(a)、6(b)可知,无荷

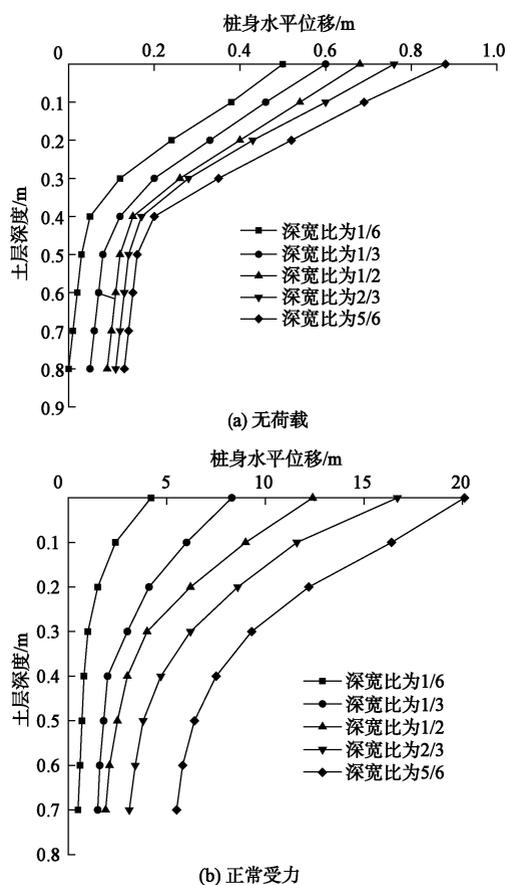


图5 #1 桩桩身位移图

Fig.5 Displacements of pile No.1

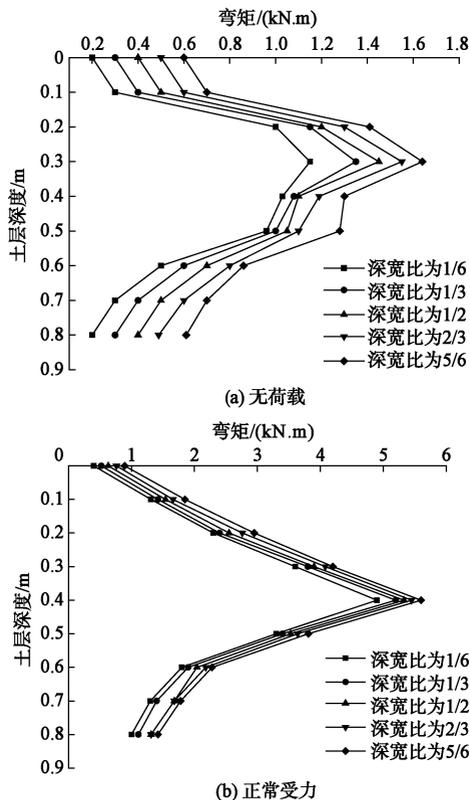


图6 #1 桩桩身桩身弯矩图

Fig.6 Bending moments of pile No.1

载作用工况下不同深宽比的基坑桩基均在土层深度为 0.3 m 处达到了弯矩最大值,正常受力工况下不同深宽比的基坑桩基均在 0.4 m 处达到了弯矩最大值。由此可见,桩顶受力工况下,桩身最大弯矩下移。由图 6(a)可知,桩顶无荷工况下,深宽比为 1/6,1/3,1/2,2/3,5/6 时,#1 桩桩身最大弯矩分别为 1.12,1.35,1.46,1.53,1.64 kN·m;由图 6(b)可以看出,桩顶正常受力工况下基坑深宽比为 1/6,1/3,1/2,2/3,5/6 时,#1 桩桩身最大弯矩分别为 4.9,5.22,5.33,5.45,5.6 kN·m。由此可见,同一工况下深宽比越大,距桩顶相同距离处的桩身弯矩越大,相同深宽比下,正常受力工况桩身最大弯矩明显大于无荷工况下桩身最大弯矩。由此可知,荷载的施加导致了最大弯矩下移,竖向荷载作用下基坑周边桩基的桩身弯矩增加,对周边的建筑物会产生较大影响。

3.3 地下连续墙墙趾埋深对桩身变形的影响

为了研究地下连续墙对周边土体扰动的削弱作用,保持基坑深宽比为 1/2,在正常受力工况下,分别研究墙趾埋深为 0.5,0.4,0.3,0.2,0.1 m 和不设地下连续墙等 6 种工况桩身水平位移和弯矩随深度的变化规律,如图 7,8 所示。

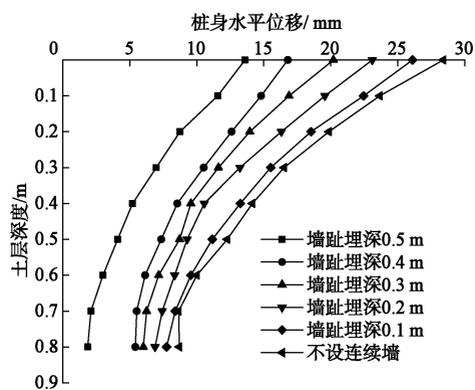


图 7 #1 桩桩身位移图

Fig. 7 Displacements of pile No. 1

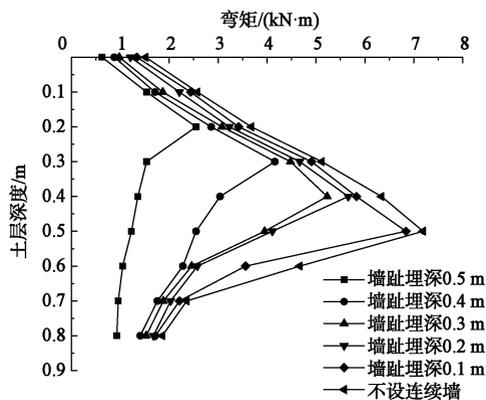


图 8 #1 桩桩身弯矩图

Fig. 8 Bending moments of pile No. 1

由图 7 可得,桩身水平位移随地下连续墙埋置深度的增大而减小。当不设地下连续墙时桩身水平位移

最大值为 28.4 mm,比墙趾深度为 0.5 m 增加了 1.08 倍。由此可见,地下连续墙对于基坑开挖引起的土体水平位移有较大的削弱作用。

3.4 地下连续墙墙趾埋深对桩身弯矩的影响

不同的墙趾埋深对桩身弯矩的影响如图 8 所示。由图可知,不同墙趾埋深下桩身弯矩随着土层深度的变化趋势一致,随着土层深度的增加,桩身弯矩先达到最大值再逐渐变小。

由图 8 可知,正常受力工况下,不设地下连续墙时#1 桩桩身最大弯矩出现在距桩顶 0.5 m 处,为 7.58 kN·m。设置地下连续墙后,最大弯矩点随着墙趾埋深的增大上移,当墙趾埋深为 0.5 m 时,最大弯矩点上移到距桩顶 0.2 m 处,为 2.61 kN·m,比不设地下连续墙时减小了 65.6%。说明设置地下连续墙能很大程度的削弱基坑开挖对周边建筑桩基的影响,但地下连续墙对基坑开挖造成影响的削弱作用随着墙趾埋置深度的减小而减弱。

3.5 距基坑不同距离的桩身变形特点

为了研究正常受力工况下基坑开挖对周围建筑桩基的影响与桩基距基坑远近的关系,保持基坑的深宽比为 1/2,地下连续墙墙趾埋深为 0.3 m 不变,研究开挖面距#1 桩分别为 0.5,0.4,0.3,0.2 m 时#1 桩水平位移和弯矩的变化,具体规律如图 9,10。

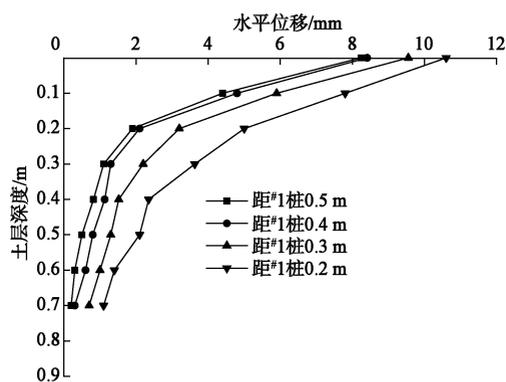


图 9 #1 桩桩身位移图

Fig. 9 Displacements of pile No. 1

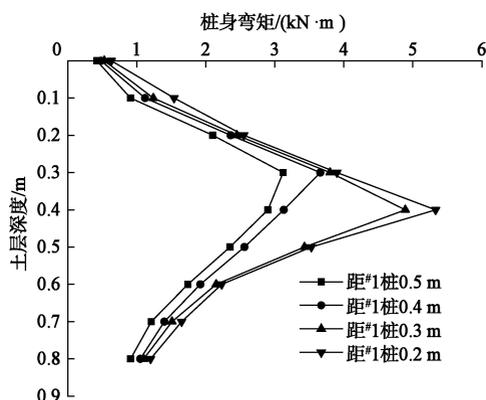


图 10 #1 桩桩身桩身弯矩图

Fig. 10 Bending moments of pile No. 1

由图9可知,距#1桩0.2,0.3,0.4,0.5 m时桩身最大水平位移分别为10.6,9.55,8.41,8.24 mm。分析可知,正常受力工况下,建筑桩基距开挖面越近,桩身水平位移越大。随着离开开挖面距离的增加,桩身水平位移减小。

距#1桩0.2,0.3,0.4,0.5 m工况下,从桩顶到0.4 m处桩身水平位移的变化量依次为8.25,8.03,7.28,7.24 mm,而从距桩顶0.4 m深度处至桩底,水平位移变化量依次为1.23,0.9,0.9,0.71 mm。由此可知,桩身水平位移在距离桩顶0.4 m深度内变化较大。

3.6 距基坑不同距离的桩身弯矩特点

桩身弯矩随土层深度的变化如图10所示。由图可知,正常受力工况下,弯矩在桩身的分布都随着距基坑远近的不同呈现出有规律的变化,桩身弯矩沿着土层深度方向总是呈先增大后减小的趋势。

如图10所示,#1桩距开挖面0.2,0.3 m时桩身最大弯矩出现在0.4 m处,分别为5.33,4.89 kN·m。当#1桩距开挖面0.4,0.5 m时,桩身最大弯矩下移到0.3 m处,分别为3.66,3.12 kN·m由此可见,桩身弯矩随着距开挖面距离的增大而减小,随着距开挖面距离的增大,桩身弯矩上移。

3.7 群桩受力变形特点分析

为了探讨基坑开挖对群桩作用的规律,选取#1,#2,#3桩室内模型试验数据,对其桩身弯矩和水平位移进行分析,#1,#2,#3桩在正常受力工况下的弯矩、位移如图11,12所示。

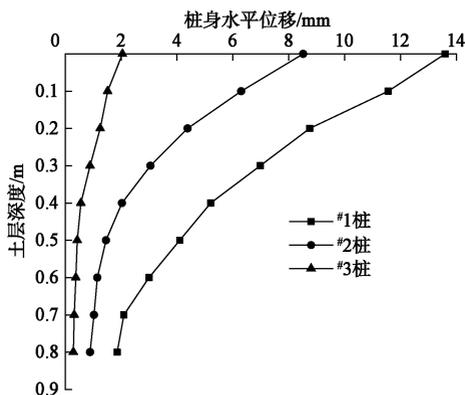


图11 #1,#2,#3桩桩身位移图

Fig. 11 Displacements of pile No. 1, 2 and 3

群桩的桩身水平位移随着土层深度的变化如图11所示。由图可知,#1,#2,#3桩的桩身水平位移均随着土层深度的增加而减小,桩顶水平位移最大,分别为13.6,8.51,2.05 mm。由此可见#2桩的最大水平位移相对于#1桩减小了37.4%,#3桩的最大水平位移相对于#1桩减小了84.9%。

群桩的桩身弯矩随着土层深度的变化如图12所

示。由图可知,#1,#2,#3桩的最大弯矩分别出现在距桩顶0.4,0.3,0.2 m的位置,大小分别为4,2.15,0.68 kN·m。说明#2桩的最大弯矩相对于#1桩减小了46.3%,#3桩的最大弯矩相对于#1桩减小了83%,且#2桩,#3桩桩身最大弯矩相对于#1桩出现了上移。因此,前排桩对后排桩存在明显的隔离作用,故在较大规模的深基坑工程中可通过设置围护桩的方法减小基坑开挖对周围建筑桩基的影响。

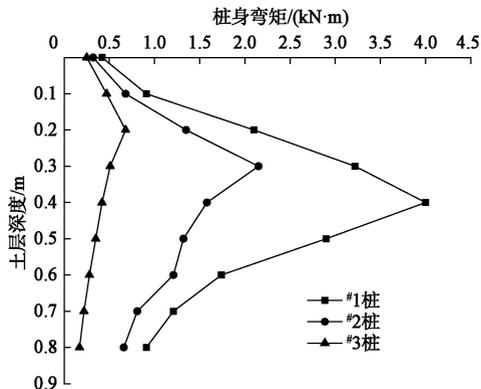


图12 #1,#2,#3号桩桩身弯矩图

Fig. 12 Bending moments of pile No. 1, 2 and 3

4 结 论

本文结合天水市商阜—阜北路地下基坑工程,通过室内模型试验分析了基坑开挖过程中邻近建筑桩基弯矩和水平位移的变化规律。

(1) 桩基变形同时受到基坑深宽比与上部荷载的影响。基坑的深宽比越大,桩基受上部荷载的影响越大。故深宽比较大的基坑开挖时要密切关注基坑周边的堆载情况,选择合适的围护结构来减小基坑开挖对桩基础的影响。

(2) 随着距开挖面距离的增大,桩身弯矩和水平位移减小,说明基坑开挖对周围建筑物的影响随着开挖距离的增大而减弱。随着离开开挖面距离的增大,桩身最大弯矩出现上移趋势,且最大值始终小于同一深度处距离基坑较近的桩。

(3) 地下连续墙对基坑周边桩基具有很好的保护作用,且随着墙趾埋深的增加,地下连续墙对基坑周边建筑桩基的保护作用加强。

(4) 群桩基础中,前排桩对后排桩有很好的隔离作用。故对于变形要求比较高的建筑物,可以在支护结构与建筑物基础中间加设一排围护桩来减小基坑开挖对周边建筑物的影响。

参考文献:

[1] 钱七虎. 推进城市地下空间规划建设的思考[J]. 城乡建设, 2017(18): 60 - 65. (QIAN Qi-hu. Thinking on

- promoting urban underground space planning and construction [J]. *Urban and Rural Development*, 2017 (18): 60 – 65. (in Chinese))
- [2] 钱七虎. 科学利用城市地下空间, 建设和谐宜居、美丽城市 [J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2019, 1(1): 1 – 7. (QIAN Qi-hu. Scientific use of the urban underground space to construction the harmonious livable and beautiful city [J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2019, 1(1): 1 – 7. (in Chinese))
- [3] 钱七虎, 陈晓强. 城市化发展呼唤积极和科学开发利用城市地下空间 [J]. *科技导报*, 2010, 28(10): 3. (QIAN Qi-hu, CHEN Xiao-qiang. Urbanization development calls for active and scientific development and utilization of urban underground space [J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(10): 3. (in Chinese))
- [4] 梅 祯, 肖军华, 王炳龙. 基坑开挖对临近基坑地铁高架结构变形的影响 [J]. *土木与环境工程学报 (中英文)*, 2019, 41(4): 51 – 58. (MEI Zhen, XIAO Jun-hua, WANG Bing-long. Influence of foundation pit excavation on the deformation of adjacent subway elevated structure [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(4): 51 – 58. (in Chinese))
- [5] 张世民, 景峰卫, 黄英省, 等. 基坑开挖及降水对坑外地表沉降的影响 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(5): 43 – 49. (ZHANG Shi-min, JING Feng-wei, HUANG Ying-sheng, et al. The influence of foundation pit excavation and dewatering to ground surface settlement [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(5): 43 – 49. (in Chinese))
- [6] 魏 纲, 洪文强, 魏新江, 等. 基坑开挖引起邻近盾构隧道转动与错台变形计算 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(7): 1251 – 1259. (WEI Gang, HONG Wen-qiang, WEI Xin-jiang, et al. Calculation of rigid body rotation and shearing dislocation deformation of adjacent shield tunnels due to excavation of foundation pits [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(7): 1251 – 1259. (in Chinese))
- [7] 徐日庆, 程 康, 应宏伟, 等. 基于影像源法的基坑开挖引起的土体水平位移预测 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(增刊 1): 17 – 20, 72. (XU Ri-qing, CHENG Kang, YING Hong-wei, et al. Prediction of horizontal displacement of soils caused by excavation of foundation pits based on virtual mirror technology [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S1): 17 – 20, 72. (in Chinese))
- [8] 王恩钰, 周海祚, 郑 刚, 等. 基坑倾斜桩支护的变形数值分析 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(增刊 1): 73 – 76. (WANG En-yu, ZHOU Hai-zuo, ZHENG Gang, et al. Numerical analyses of deformation of inclined pile-retained excavations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S1): 73 – 76. (in Chinese))
- [9] 梁发云, 李彦初. 土体侧移模式对邻近桩基性状影响的三维数值分析 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(增刊 2): 399 – 403. (LIANG Fa-yun, LI Yan-chu. Numerical analysis for effects of lateral soil movement on adjacent piles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(S2): 399 – 403. (in Chinese))
- [10] 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 Min, ZHOU Hong-bo, YANG Hua. 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))
- [11] FINNO R J, LAWRENCE S A, ALLAWH N F, et al. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(6): 934 – 955.
- [12] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(2): 94 – 99.
- [13] LAEFER D F. Prediction and assessment of ground movement and building damage induced by adjacent excavation [D]. Urbana-Champaign : University of Illinois at Urbana-Champaign. 2001.
- [14] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database [J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44(1): 87 – 98.
- [15] PAN, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay [J]. *Geotechnical Special Publication*, 1981, 107(118): 1840 – 1858.
- [16] 鲁 嘉, 喻 军, 陈金祥, 等. 砂土中成桩工艺对桩基承载性能影响的室内模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(5): 1055 – 1063. (LU Jia, YU Jun, CHEN Jin-xiang, et al. Laboratory model test research on influence of piling techniques on bearing performance of pile foundations in sand [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(5): 1055 – 1063. (in Chinese))
- [17] 唐俊巍, 赵春风, 赵 程, 等. 桩端土对桩侧摩阻力影响的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(增刊 2): 454 – 459. (TANG Jun-wei, ZHAO Chun-feng, ZHAO Cheng, et al. Experimental study on influence of pile-tip soil on friction resistance [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(S2): 454 – 459. (in Chinese))
- [18] 建筑基桩检测技术规范 JGJ 106—2003 [S]. 2004. (Technical code for testing of building foundation piles JGJ 106—2003 [S]. 2004. (in Chinese))