

DOI: 10.11779/CJGE2021S1036

洛阳地铁车站基坑支护变形特性模型试验研究

慕焕东¹, 邓亚虹², 张文栋³, 宋登艳⁴

(1. 西安理工大学,陕西 西安 710048;2. 长安大学地质工程系,陕西 西安 710054;3. 西安市地质环境监测站,陕西 西安 710016;4. 机械工业勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710043)

摘要:以洛阳火车站地铁车站明挖基坑支护工程为背景,对基坑开挖过程中支护结构侧向位移变化规律开展3组小比尺模型试验,探讨基坑开挖后基坑支护桩身位移变化规律并考虑不同桩间距的影响。研究结果表明,桩身位移随着基坑深度的增加在基坑边缘处为先增大后减小,在基坑中间部位为先缓慢增加后急剧增加,最大桩身位移深度为距基坑底部1/6基坑深度处,桩身位移达3.91 cm;桩身位移随着地面荷载的增加逐渐增大,且距基坑顶部1/6处桩身位移变化幅度较小,最大桩身位移为1.8 cm,随着距离增加至距基坑顶部1/2处桩身位移变化幅度增加了41.1%,最大桩身位移为2.54 cm;当距离增加至距基坑底部1/6处桩身位移变化幅度急剧增大,最大桩身位移为3.91 cm,相比基坑顶部1/6处增加近1.2倍。研究成果对洛阳地铁火车站深基坑工程设计具有重要指导意义。

关键词:地铁车站;排桩-内支撑;基坑支护;变形特性;模型试验

中图分类号:TU443 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-4548(2021)S1-0198-06

作者简介:慕焕东(1989—),男,实验师,主要从事工程地质灾害防灾减灾及模型试验研究。E-mail: mhd3373@126.com。

Model tests on deformation characteristics of foundation pit at Luoyang Railway Station

MU Huan-dong¹, DENG Ya-hong², ZHANG Wen-dong³, SONG Deng-yan⁴

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Department of Geology Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
3. Xi'an Municipal Environmental Monitoring Station, Xi'an 710016, China; 4. China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co. Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: With the support project of open-cut foundation pit of Luoyang Railway Station as the background, three groups of small-scale model tests are carried out to study the variation of lateral displacement of support structures of foundation pit during the excavation process, and the variation law of displacement of support piles after excavation and the consideration of the different pile spacings are discussed. The results show that the displacement of piles increases first and then decreases with the increase of the depth of foundation pit, and increases slowly and sharply in the middle of foundation pit. The maximum displacement depth of piles is 1/6 of the depth of foundation pit at the bottom of foundation pit, and the displacement of piles reaches 3.91 cm. The displacement of pile body increases with the ground load. The maximum displacement of piles is 1.8 cm. The displacement of piles increases by 41.1% and the maximum displacement of piles is 2.54 cm as the distance increases to 1/2 of the top of foundation pit. When the distance increases to 1/6 of the bottom of foundation pit, the displacement of piles increases sharply. The maximum displacement of piles is 3.91 cm, which is nearly 1.2 times larger than that of the top 1/6 of the foundation pit. The research results have important guiding significance for the design of deep foundation pit of Luoyang Railway Station.

Key words: subway station; row pile-inner support; foundation pit support; deformation characteristic; model test

0 引言

随着城市轨道交通建设的快速发展,地铁车站基坑开挖工程越来越多。考虑到基坑开挖、卸荷及施工必然会改变原有土层的应力状态,导致其土层应力重新分布,进而导致基坑产生变形或失稳破坏。为了防止基坑产生过大变形而失稳破坏就必须对开挖的基坑进行支护,因支护结构受基坑两侧建构筑物固有竖向

荷载的影响,若支护形式简单则结构可能产生过大的变形而引发工程灾害,相反若支护形式复杂则必然会增加工程建设成本。因此,合理的支护结构和类型的

基金项目:国家自然科学基金项目(41772275);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD300102268203);陕西省教育厅科研计划专项项目(20JK0801)。

收稿日期:2020-12-15

选择对基坑支护设计具有实际意义。

针对地铁车站基坑开挖后基坑周围建筑物荷载对基坑变形及支护结构的影响,许多学者采用不同研究方法开展了相关研究。应宏伟等^[1]、初振环等^[2]研究了基坑双排桩支护结构变形特征及其对地铁结构安全的影响,认为支护桩顶水平位移可达 16 mm;杨有海等^[3]采用弹性地基梁杆系有限元分析方法分析了支撑排列方式对支护结构变形的影响,研究认为不宜通过增加桩体刚度来减小围护结构的变形,支撑排列以基坑下部密和上部疏的方式较好;童建军等^[4]采用离散元法,分析成都地铁卵石地层深基坑开挖过程中周边地面沉降的变化规律,研究认为成都地铁卵石地层深基坑周围地表沉降曲线呈凹槽型,最大沉降点位于坑壁外 $0.25H$ 处,突变点位于坑壁外 $0.5H$ 处。闫建龙等^[5]等采用 MIDAS 有限元分析方法,对北京地铁 19 号线新宫站基坑工程进行分析,认为支护结构局部破坏的情况下,复合支护体系的过渡部位桩体变形都出现了明显的增大,在有腰梁的情况下,桩体的变形得到了很好的控制;朱瑶宏等^[6]对 13 个车站地下连续墙深基坑监测数据进行统计分析,认为最大侧移介于 $(0.18\% \sim 0.80\%)H$;黄云龙^[7]采用 ANSYS 软件建立二维模型,分析基坑支护结构在开挖过程中内力变化和位移的关系,研究表明钢筋混凝土支撑的轴力最大,基坑两侧围护桩剪力和弯矩分布基本上呈对称分布;聂庆科等^[8]、白冰等^[9]根据某大型深基坑工程的实测资料,对双排桩支护结构变形和土压力分布特征进行了研究,认为传统土压力计算方法估算双排桩支护结构上的土压力存在较大偏差;李竹等^[10]针对带水平支撑的长短桩组合排桩,在砂土中进行了 11 组模型试验,模拟开挖过程中对等长排桩以及长短桩组合排桩的桩身应变和桩身位移进行了测量。

上述关于地铁车站基坑支护体系变形特性的研究描述虽然已经取得了很多有价值或直接指导工程实践的研究成果,但值得注意的是:现有的成果大多集中在三个方面,亦即理论分析、数值模拟分析、现场监测分析,而模型试验研究较少的涉及。而模型试验在基坑开挖及支护过程中可有效再现其变形破坏过程,揭示其变形破坏机理。

考虑基坑开挖过程中基坑及支护结构必将受到周围建筑物荷载的影响而产生变形,甚至引起局部失稳破坏。鉴于此,以洛阳火车站地铁车站工程为研究对象,基于模型试验方法开展基坑开挖后基坑支护结构变形特性研究,主要分析不同基坑深度条件下排桩支护结构的水平位移变化规律,同时分析不同荷载条件下排桩支护结构的水平位移变化规律,在此基础上探讨不同位置处排桩支护结构变形

的临界深度,研究结果为洛阳火车站地铁车站工程提供设计参数。

1 工程地质概况

洛阳火车站地铁车站周边建筑物密集,其中西北侧为锦远汽车站候车和售票厅(2 层),东北侧为陇海铁路洛阳火车站站前广场,东南侧为洛阳市旅游集散中心(2~5 层酒店商铺为主),西南侧为洛阳小吃城(2~5 层)。地铁车站外包总长 200 m,车站总宽 22.7 m,为地下二层岛式车站。基坑开挖深度 $18.43 \sim 19.61$ m(洛阳火车站地铁车站主体采用明挖顺筑法施工,底板标高为 132.84 m,稳定水位埋深为 21.30~21.90 m,施工不需考虑降水措施),车站围护结构采用钻孔灌注桩及内支撑的支护型式进行边坡支护(图 1)。

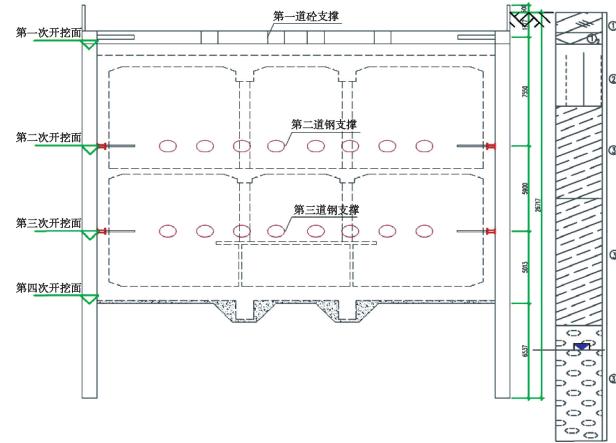


图 1 基坑开挖及支护断面图

Fig. 1 Excavation and support section of foundation pit

场地地貌属于洛河二级阶地,场地地层主要为:第①₁层:杂填土,成分复杂,工程性质较差;第②₂层:素填土,中密或可塑、稍湿、成分复杂,工程性质较差;第②₂₂层:黄土状粉质黏土,可塑、土质不均、压缩性中等、弱透水性;第③₂₂层粉质黏土:可塑、土质不均、压缩性中等、弱透水性;第③₂₃层粉质黏土:硬塑、土质不均、压缩性中等、弱透水性;第③₉₃层卵石:中密、潮湿—饱和、土质不均、压缩性低、强透水性;第⑦₁层泥岩:全风化、压缩性低、弱透水性;第⑦₂层泥岩:强风化、压缩性低、弱透水性。基坑开挖影响范围内主要土层物理力学参数见表 1。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

土层	含水率 /%	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
② ₂₂ 黄土状粉质黏土	21.1	28.2	19.0	6.0
③ ₂₂ 粉质黏土	24.0	26.2	19.7	5.6
③ ₂₃ 粉质黏土	23.1	33.1	19.8	6.8

2 模型试验设计

2.1 模型试验装置

模型试验采用箱式模型箱, 尺寸为长×宽×高=0.8 m×0.6 m×0.55 m, 模型箱剖面图见图2。

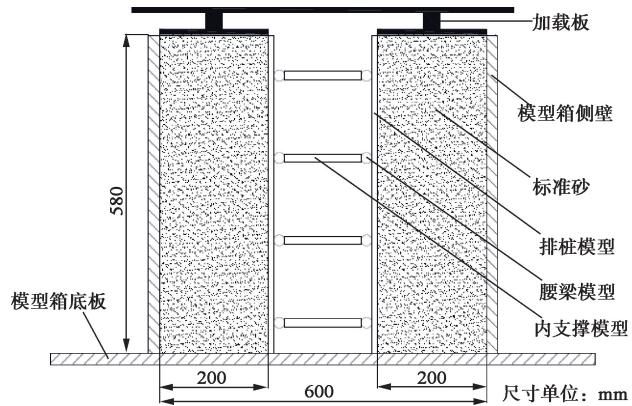


图2 模型箱系统示意图

Fig. 2 Schematic of model box system

2.2 相似关系设计

模型试验选取几何相似常数1:40, 根据量纲分析法列出相似准则方程, 计算各物理量相似比如表2。

表2 模型试验相似比尺

Table 2 Similar relations of shaking table tests

类型	物理量	相似比
几何特性	长度	40
土的材料特性	重度	1
	应力	40
	弹性模量	40
	泊松比	1
	黏聚力	40
	内摩擦角	1

2.3 试验布置与加载

模型试验选取福建标准砂作为模型试验土层材料, 采用白卡纸作为挡土墙、排桩、腰梁、内支撑的支护结构材料^[11]。在两侧标准砂铺设完毕之后放置加载板, 放置加载板时紧贴箱壁, 防止加载板与支护体系发生挤压, 并且使得百分表更加易于测量。模型试验材料参数如表3所示。

表3 模型试验材料参数

Table 3 Parameters of model test materials

材料名称	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	弹性模量 E_s/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
标准砂	16.41	20	0.35	0	34
白卡纸	0.92	56	0.13	—	—

2.4 模型试验加载

模型试验设置排桩分别为5, 6, 7排, 桩间距分别为197.5, 158.0, 131.6 mm, 设置4排腰梁, 梁间距为

180 mm, 内支撑采取点点支撑(排桩和腰梁交叉点位置, 具体示意如图3所示(图中蓝色虚线为监测剖面, 圆圈为监测点位置))。

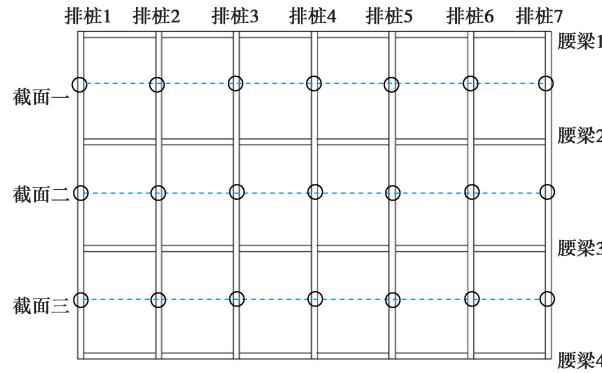


图3 模型试验数据监测点剖面图

Fig. 3 Profile of monitoring points for model tests

模型试验采用5 kg与10 kg的砝码逐级加载, 加载过程用于模拟基坑周边的荷载, 加载原则及方案(表4)如下:① 试验时每次加载50 kg砝码(4.17 kPa), 共加载8次, 累计土体竖向荷载为33.3 kPa; ② 每级荷载施加后, 静置10 min或直到百分表读数稳定, 然后记录不同截面处排桩的桩身位移数据。

表4 模型试验加载方案

Table 4 Loading schmes of model tests

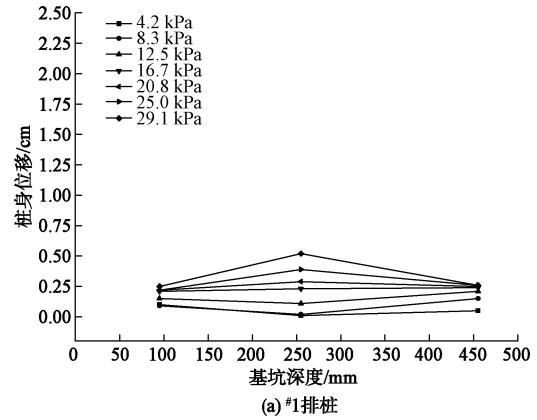
加载次数	加载砝码质量/kg	地面荷载/kPa
1	50	4.2
2	100	8.3
3	150	12.5
4	200	16.7
5	250	20.8
6	300	25.0
7	350	29.1
8	400	33.3

3 模型试验结果分析

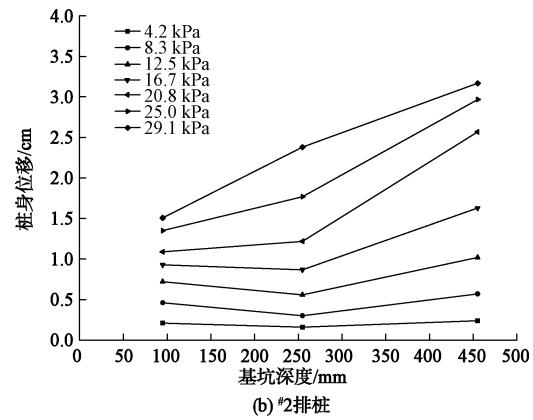
3.1 桩身位移随深度变化规律

根据模型试验结果, 绘制不同桩号桩身位移随基坑深度变化规律曲线如图4(a)~(g)所示。由图4可知, 桩身位移随着基坑深度的增加表现为3种类型。^{#1}桩处在基坑边缘, 在低荷载条件下桩身位移随基坑深度增加先减小后增大, 而在高荷载条件下则先增大后减小, 且桩身位移整体变化较小, 最大桩身位移仅为5.2 mm, 最大桩身位移发生变化的荷载为29.1 kPa, 基坑深度为距地表250 mm, 亦即距基坑底部1/2处(对应原型为10 m)。相比于^{#1}桩, ^{#2~#6}桩处在基坑中间部位, 桩身位移随基坑深度增加在低荷载作用下缓慢变形(斜率小, 曲线近乎平直), 但随着荷载的增加变形急剧增大(曲线斜率大), 且桩身位移发生变化

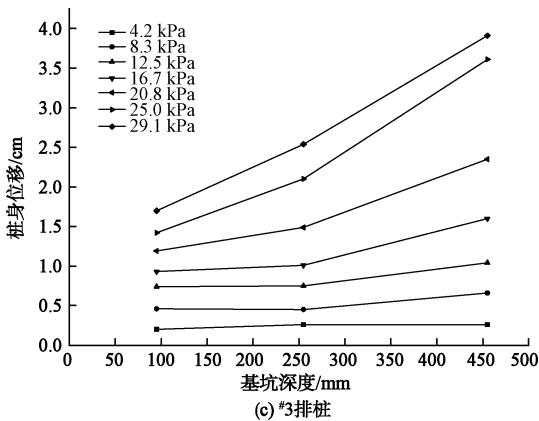
的荷载多为 25.0 kPa; 最大桩身位移分别为 2.97, 3.91, 3.39, 2.61, 3.29, 2.61 cm, 最大桩身位移发生变化的荷载为 29.1 kPa, 基坑深度为距地表 450 mm, 亦即距基坑底部 1/6 处(对应原型为 18 m); #7 桩处于基坑



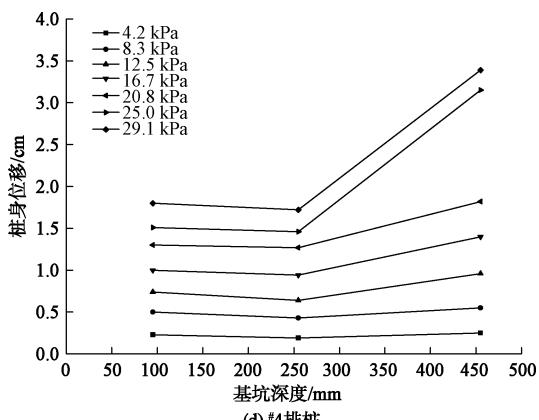
(a) #1 排桩



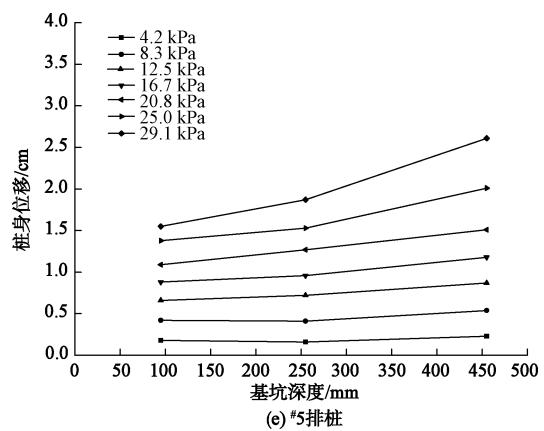
(b) #2 排桩



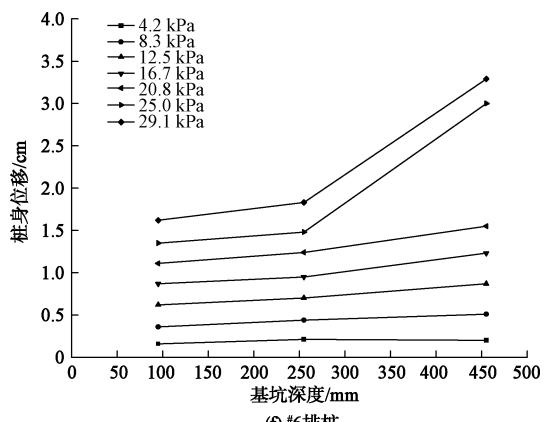
(c) #3 排桩



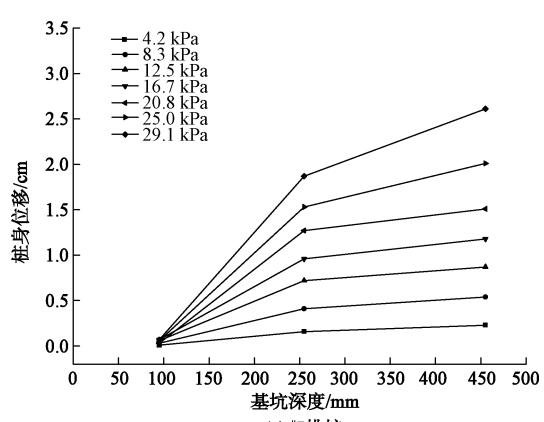
(d) #4 排桩



(e) #5 排桩



(f) #6 排桩



(g) #7 排桩

图 4 桩身位移随深度变化曲线

Fig. 4 Variation of displacement of piles with depth

右侧, 表现出与基坑左侧及基坑中间桩不同的变化规律, 其桩身位移随基坑深度的增加在低荷载作用下急剧增大(曲线斜率大), 在高荷载作用下增速变缓(斜率小, 曲线近乎平直), 最大桩身位移为 2.61 cm, 最大桩身位移发生变化的荷载为 29.1 kPa, 基坑深度为距地表 450 mm, 亦即距基坑底部 1/6 处(对应原型为 18 m)。

3.2 桩身位移随荷载变化规律

为进一步研究不同垂直荷载作用对桩身位移变化规律的影响, 绘制两者变化规律曲线如图 5 所示。

由图 5 可知, 在距离基坑顶部 1/6 处(截面一), 桩身位移随地面荷载的增加基本呈现出直线型增大, 但

增幅较小(亦即斜率较小),最大桩身位移为4号桩;在距离基坑顶部 $1/2$ 处(截面二),桩身位移随地面荷载的增加先缓慢增加(斜率较小)、后急剧增大(斜率较大),其拐点约为 16.7 kPa ,最大桩身位移为3号桩,表明在距离基坑顶部 $1/2$ 处存在支护结构变形破坏的临界破坏荷载。在距离基坑底部 $1/6$ 处(截面三),桩身位移随地面荷载的增加先缓慢增大、后急剧增大、最后趋于平缓,急剧增大的范围大约在 20 kPa 至 25 kPa ,最大桩身位移为3号桩。为更清晰的看出不同桩的位移变化规律,绘制同一截面处不同垂直荷载作用桩身位移与桩号变化规律曲线如图6所示。

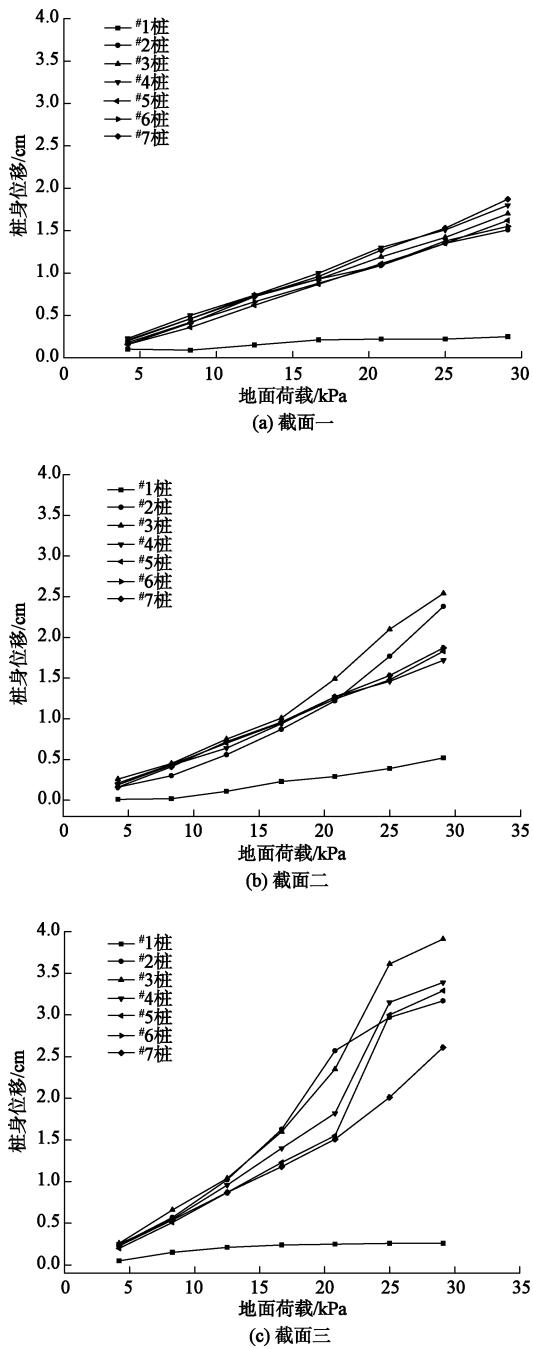


图5 桩身位移随荷载变化曲线

Fig. 5 Variation of displacement of piles with load

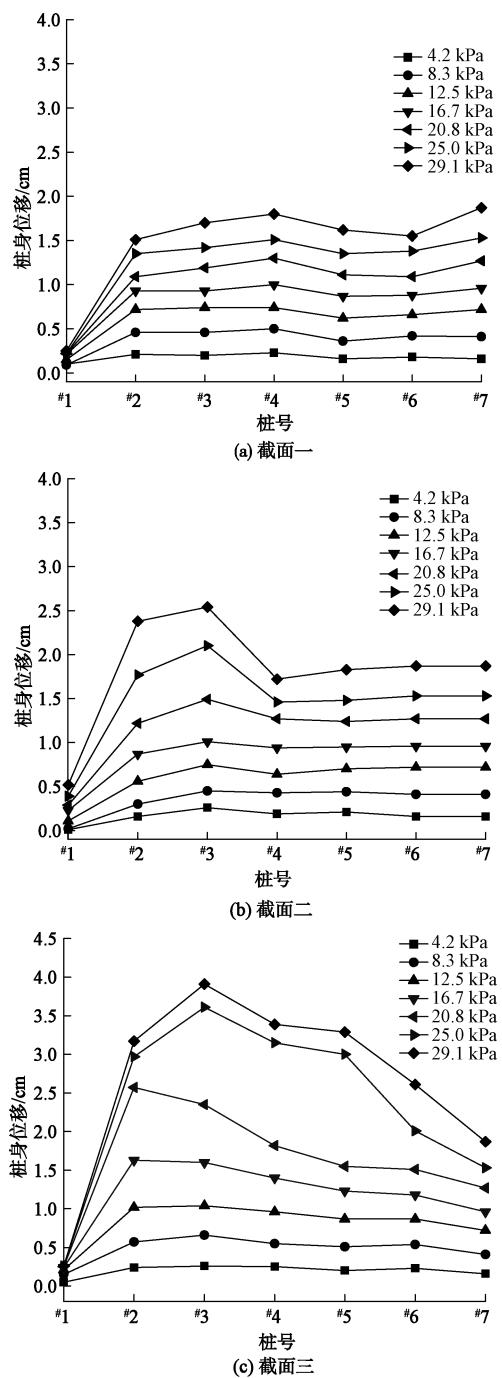


图6 桩身位移随桩号变化曲线

Fig. 6 Variation of displacement of pile with pile number

由图6可知,在距离基坑顶部 $1/6$ 距离处(截面一),桩身位移由基坑左侧壁至右侧壁为先增大后趋于平缓;在距离基坑顶部 $1/2$ 距离处(截面二),桩身位移由基坑左侧壁至右侧壁为先增大后减小后趋于平缓;在距离基坑底部 $1/6$ 距离处(截面三),桩身位移由基坑左侧壁至右侧壁为先增大后减小。为进一步分析不同桩间距下桩身位移变化规律,绘制不同排桩桩数下最大桩身位移如图7所示。

由图7可知,桩身最大位移随着荷载的增加呈现出“S”型。当排桩数为5排时(桩间距为 197.5 mm)、6排(桩间距为 158 mm)、7排(桩间距为 131.6 mm)

时, 桩身最大位移在荷载小于 12.5 kPa 时增幅均较小, 当荷载大于 12.5 kPa 时, 5 排、6 排的桩身位移分别出现了近 2 倍、1.5 倍增加, 7 排的桩身位移随后随着荷载的增加保持 0.4~0.7 mm 的平稳增加。

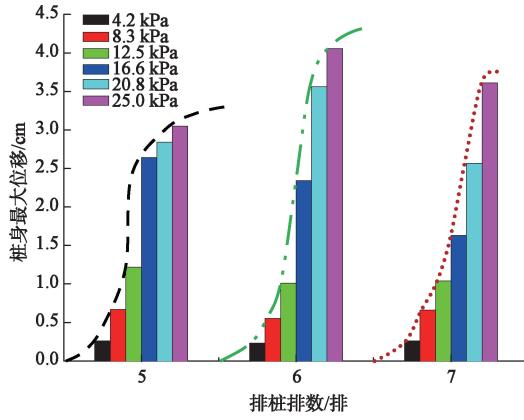


图 7 排桩桩数与桩身位移关系曲线

Fig. 7 Relationship between pile number and displacement of piles

4 结 论

以洛阳火车站地铁车站明挖基坑支护工程为背景, 基于模型试验方法开展了基坑排桩支护结构的水平位移变化规律分析, 模型试验结果表明:

(1) 桩身位移随着基坑深度的增加逐渐增大, 在基坑左侧为低荷载时先减小后增大、高荷载时先增大后减小; 在基坑中间为先缓慢增加后急剧增加; 在基坑右侧在低荷载时急剧增大、高荷载时增速变缓。

(2) 桩身位移随着地面荷载的增加逐渐增大, 在距离基坑顶部 1/6 距离处桩身位移随地面荷载的增加呈现出直线型增大; 在距离基坑顶部 1/2 处则呈现出先较小斜率、后较大斜率增大; 在距离基坑底部 1/6 处则呈现出先较小增大、后急剧增大、后趋于平缓。

(3) 桩身最大位移随着荷载的增加均呈现出“S”型, 桩间距越大桩身最大位移变化的幅值越大。

参考文献:

- [1] 应宏伟, 初振环. 带撑双排桩支护结构性状分析 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 1): 1450~1454. (YING Hong-wei, CHU Zhen-huan. Analysis of braced retaining structures with double-row piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1450~1454. (in Chinese))
- [2] 初振环, 陈 鸿, 王志人, 等. 紧邻地铁车站基坑双排桩支护结构性状分析 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 474~479. (CHU Zhen-huan, CHEN Hong, WANG Zhi-ren, et al. Behavior of retaining structure with double-row piles for deep excavations subway stations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 474~479. (in Chinese))
- [3] 杨有海, 武进广. 杭州地铁秋涛路车站深基坑支护结构性状分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3386~3392. (YANG You-hai, WU Jin-guang. Analysis of retaining structures for deep foundation pit of Qiutao Road station in Hangzhou Metro [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3386~3392. (in Chinese))
- [4] 童建军, 王明年, 于 丽, 等. 成都地铁车站深基坑周围地表沉降规律研究 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 97~101. (TONG Jian-jun, WANG Ming-nian, YU Li, et al. A study of the land subsidence around the deep foundation pit of the Chengdu subway station [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 97~101. (in Chinese))
- [5] 闫建龙, 闫亚斌, 沈宇鹏, 等. 北京地铁新宫站基坑复合支护过渡部位的冗余度设计 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 162~169, 178. (YAN Jian-long, YAN Ya-bin, SHEN Yu-peng, et al. Research on redundancy design of the transition section of composite pit support in the foundation pit of the Xingong Station of the Beijing subway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 162~169, 178. (in Chinese))
- [6] 朱遥宏, 叶俊能, 刘晓虎, 等. 宁波轨道交通地下连续墙深基坑工程变形特性及控制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 66~74. (ZHU Yao-hong, YE Jun-neng, LIU Xiao-hu, et al. Deformation characteristics and control of foundation pits supporting with diaphragm wall in the Ningbo urban rail transit [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 66~74. (in Chinese))
- [7] 黄云龙. 某地铁车站深大基坑支护结构受力分析 [J]. 兰州交通大学学报, 2016, 35(3): 45~51. (HUANG Yun-long. Analysis of deformation and internal force of retaining and protecting structure of deep foundation pit [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong Universit, 2016, 35(3): 45~51. (in Chinese))
- [8] 聂庆科, 胡建敏, 吴 刚. 深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3089~3094. (NIE Qing-ke, HU Jian-min, WU Gang. Deformation and earth pressure of a double-row piles retaining structure for deep excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3089~3094. (in Chinese))
- [9] 白 冰, 聂庆科, 吴 刚, 等. 考虑空间效应的深基坑双排桩支护结构计算模型 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 118~124. (BAI Bing, NIE Qing-ke, WU Gang, et al. A calculation model for double-row-pile retaining structures in deep foundation pit considering 3D effect [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 118~124. (in Chinese))
- [10] 李 竹, 郑 刚, 王海旭. 带水平支撑长短桩组合排桩工作性状模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 440~446. (LI Zhu, ZHENG Gang, WANG Hai-xu. Model tests on work behaviors of retaining piles with different lengths and horizontal support [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 440~446. (in Chinese))
- [11] 王立彬, 李 靓, 魏 洋, 等. 纸质构件力学性能试验研究 [J]. 力学与实践, 2010, 32(6): 88~91. (WANG Li-bin, LI Liang, WEI Yang, et al. Experimental study on mechanical properties of paper components [J]. Mechanics in Engineering, 2010, 32(6): 88~91. (in Chinese))

(编校: 孙振远)