

挡墙转动对既有刚性桩复合地基荷载分配影响研究

李明宇¹, 钱宇奔¹, 郭院成¹, 魏艳卿²

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 洛阳理工学院土木工程系, 河南 洛阳 471023)

摘要 目的 探究挡墙转动对邻近刚性桩复合地基荷载分配机制的影响. 方法 采用室内模型试验分析对比挡墙静止和转动模式下4桩复合地基的荷载分配机制. 结果 挡墙转动使墙后土体发生移动, 进而使土体先发生沉降, 上部荷载由此向桩顶转移. 桩顶应力不断增大, 桩间土应力不断减小, 使得桩土应力比持续增大; 桩顶应力和桩端应力在转动角度 10^{-3} rad 以内变化较大, 后期趋于稳定, 总体趋势呈现二次抛物线形状; 转动导致土体位移量由近而远减小, 后桩应力增长率明显大于前桩, 且后桩应力增长速率约为前桩应力增长速率的3倍. 结论 桩顶应力、桩端荷载承担比和桩土应力比随转动量的增加而逐渐增加, 且后桩桩顶应力增加快于前桩; 桩间土应力随转动量增加而减少, 且靠近转动挡墙处桩间土应力下降最快.

关键词 挡墙转动; 刚性桩复合地基; 荷载分配机制; 模型试验

中图分类号 TU432

文献标志码 A

Study on Influence of Retaining Wall Rotation on Load Distribution of Rigid-pile Composite Foundation

LI Mingyu¹, QIAN Yuben¹, GUO Yuancheng¹, WEI Yanqing²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. Department of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang, China, 471023)

Abstract: Influence of retaining wall rotation on the load distribution mechanism of adjacent rigid pile composite foundation is studied. The indoor model test is used to analyze the load distribution mechanism of four piles composite foundations under static and rotating modes of retaining wall. The displacement of the soil behind the wall is caused by the rotation of the retaining wall. The soil first settles, then the upper load is transferred to the top of the pile. Therefore, the pile top stress is continuously increased, and the soil stress between piles is continuously reduced, so that the pile-soil stress ratio continues to increase. The pile top stress and the pile end stress vary greatly within the rotation angle of 10^{-3} rad, and tend to be stable in the later stage, and the overall trend shows a quadratic parabolic shape. The displacement of the soil is caused by rotation to decrease from near

收稿日期: 2018-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978235); 河南省住房城乡建设科技计划项目(k-1818)

作者简介: 李明宇(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事隧道及地下建筑工程方面研究.

to far, and the growth rate of the post-pile stress is significantly larger than that of the front-pile, and the growth rate of the post-pile stress is about three times that of the front-pile. The pile top stress, pile end load ratio and pile-soil stress ratio grow with the increase of the rotation amount, and the post-pile top stress increases faster than the front-pile; the soil stress between piles decreases with the increase of the rotation amount; pile soil stress near the retaining wall drops fastest.

Key words: retaining wall rotation; rigid-pile composite foundation; load distribution mechanism; model test

刚性桩复合地基由于沉降小、适用范围广对比桩基更加经济,在城市地下空间的发展中得到越来越多的应用.但是随着城市建筑密度的增加,新建建筑基坑开挖与既有建筑基础之间距离逐渐减小,开挖所导致的支护结构位移势必会引起其背部土体位移场的变化,进而对既有刚性桩复合地基荷载分配机制产生较大影响,从而导致邻近建筑发生较大的沉降变形,危害上部结构的安全.因此需要对土体侧移条件下邻近既有刚性桩复合地基荷载分配机制的变化展开系统研究.

对于复合地基问题,已有学者进行了理论分析^[1-4],有限元模拟^[5-8]和室内试验^[9-15]研究.此外,越来越多学者关注基坑开挖条件下土体位移场对桩身承载性能的影响.王贵和^[16]研究分析了有无上部建筑时基坑开挖对复合地基的不同影响.梁云发^[17]研究了桩基受竖向-水平荷载组合作用下的受力与变形问题.姚国圣^[18]分析了开挖引起的土体侧移改变邻近轴向受荷桩承载和变形问题.郑刚^[19]分析了桩基与基坑间距、桩基刚度等对桩基附加弯矩、位移的影响.

上述文献没有涉及支护结构位移对桩土荷载分配机制、桩承载能力影响的研究.为解决这个问题,笔者采用自主研发设计了室内模型装置,分析对比了挡墙静止和转动模式下4桩复合地基的荷载分配机制,以期相关的工程设计和施工提供参考.

1 试验方案

1.1 试验模型

模型箱长×宽×高为2.4 m×1.6 m×

2.2 m,箱体一侧是活动挡墙,挡墙转动通过和挡墙相连的4排8根丝杆控制,具体示意图如图1所示.

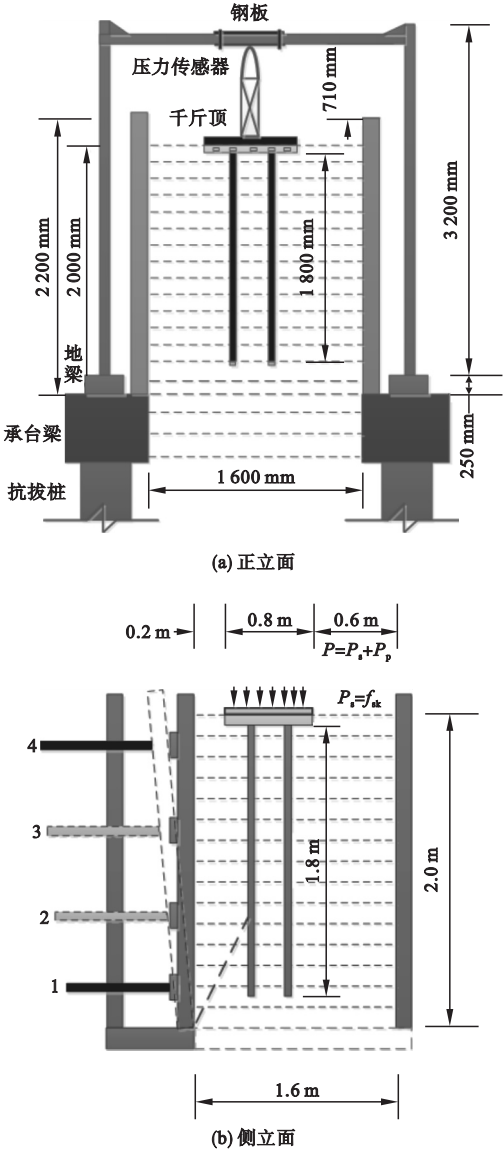


图1 模型箱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model box

1.2 试验填土

选取河砂作为模型土. 通过颗粒级配试验确定试验用砂平均粒径 D_{50} 为 0.12 mm; 通过 4 组室内直剪试验测得土的物理力学参数如表 1 所示.

表 1 干砂的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of dry sand			
土体深度/mm	土体密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	内摩擦角/ $(^\circ)$	黏聚力/ kPa
200	1.569	33.81	5.9
800	1.582	32.97	7.2
1 400	1.657	33.63	6.3
1 800	1.665	33.27	6.4

1.3 褥垫层和模型桩

垫层的材料和厚度对桩和桩间土的协调变形和应力分配有重要影响,所以合理的褥垫层参数设计对本试验至关重要.《复合地基技术规范》(GBT 50783—2012)建议褥垫层材料采用中砂、粗砂、级配砂石或碎石等,最大粒径不应大于 30 mm,因此选取标准砂作为垫层材料,其最大粒径为 2 mm,平均粒径为 0.75 mm 满足规范要求.参考佟建兴^[20]对垫层厚度的研究,试验中的垫层厚度取 60 mm,最终垫层长×宽×厚为 0.8 m×0.8 m×0.06 m.

试验中的模型桩采用 C30 混凝土预制而成,桩径 100 mm,桩长为 1.8 m,桩间距 0.4 m,长径比约为 18.

1.4 测量元件的布置

1.4.1 土压力盒的布置

每组试验共用 13 个 XHZ-4XX 型土压力盒,其中桩顶、桩端各 4 个量程为 500 kPa 的压力盒,桩间土布置 5 个量程为 200 kPa 的压力盒,所有土压力盒尺寸为 $\Phi 28\times 7\text{ mm}$,试验中土压力盒的布置位置及编号如图 2 所示.

1.4.2 位移计的布置

试验中分别采用 4 个 YHD 系列电子应

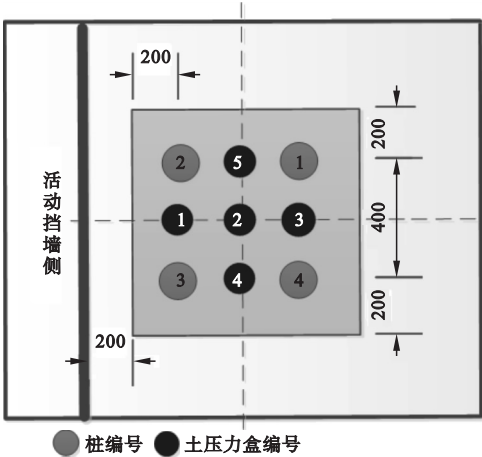
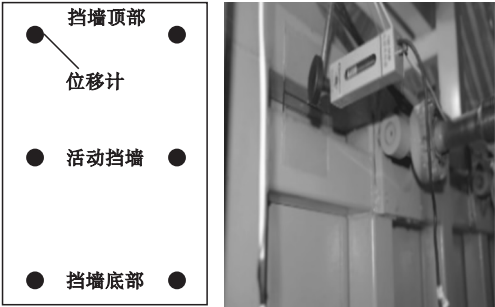
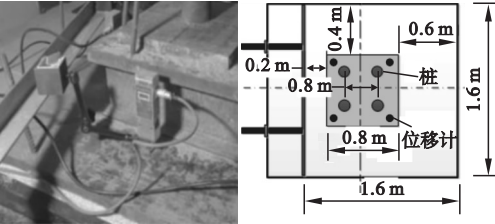


图 2 土压力盒编号及布置位置

变式位移传感器和 4 个 MFX-50 型系数显百分表分别布置在挡墙和承压板上,以测得挡墙位移量和承压板沉降量,具体布置如图 3 所示.



(a) 活动挡墙位移计布置图



(b) 承压板位移计布置图

图 3 位移计布置图

Fig. 3 Layout of the displacement meter

1.5 加载量的确定

分别进行天然地基和复合地基静载荷试验得到天然地基、复合地基荷载-沉降($p-s$)曲线如图 4 和图 5 所示,根据《复合地基技术规范》(GBT 50783—2012)和《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)中相

关特征值的取值要求,按相对变形值 $s/b = 0.01$ 确定天然地基承载力特征值为110 kPa. 其中, s 为沉降,mm; b 为加载板宽度,m;复合地基特征值为其桩间土达到 110 kPa 时的上部加载量,其值为 181 kPa. 将每级加载设为 11 kPa,天然地基为 10 级,复合地基为 17 级,每级数据稳定后进行下一级加载.

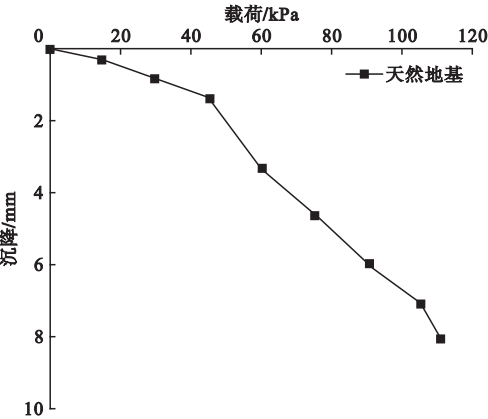


图4 天然地基 $p-s$ 曲线

Fig. 4 The $p-s$ curve of natural foundation

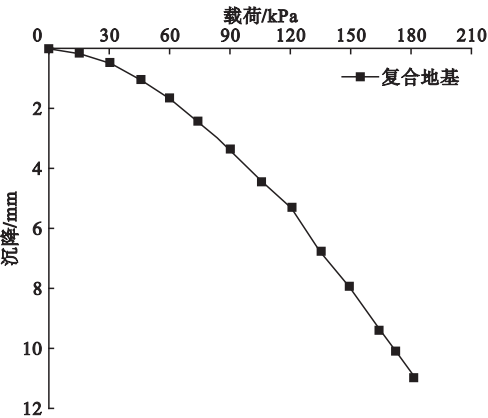


图5 复合地基 $p-s$ 曲线

Fig. 5 The $p-s$ curve of composite foundation

1.6 转动量的确定

根据已有研究和规范得知土体达到主动朗肯状态时挡土结构所需位移量为其高度 H 的 0.1% ~0.4%,且与砂土的物理力学特性有关. 本次模型试验所用砂土的松散细砂,因此选取的土体破坏时挡墙的最大转动量为 0.3% H ,即 6 mm. 为了保证墙背土体完全达到破坏,本次试验转动量设置为15 mm,分

30 级转动每级转动 0.5 mm,每级数据稳定后进行下一级转动.

2 试验结果

2.1 加载过程中荷载分配机制

图 6 和图 7 分别给出了桩顶应力和桩间土应力的加载变化曲线. 随着加载量的增加刚性桩复合地基中桩顶应力、桩间土应力随之增大.

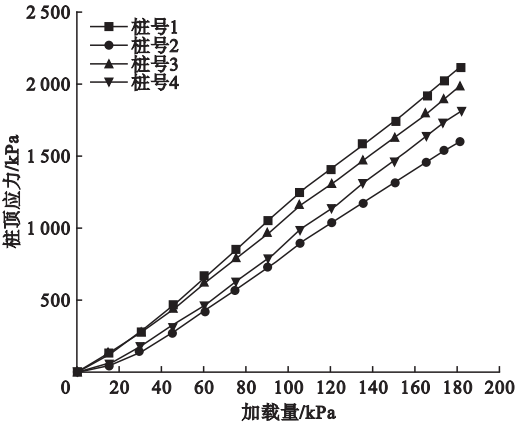


图6 桩顶应力随加载量的变化曲线

Fig. 6 Stress on the top of the pile with different loading

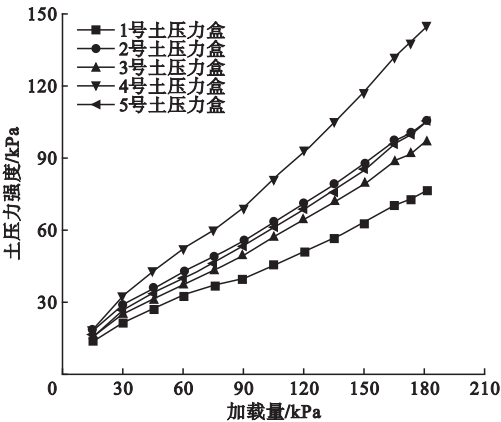


图7 桩间土应力随加载量变化曲线

Fig. 7 Soil stress between piles with different loading

图 8 和图 9 分别给出了桩端应力和桩端荷载分担比的加载变化曲线. 随着加载量的增加桩端应力随之增大,与桩顶应力规律相近;但桩端承担上部荷载的比值先增加后趋于稳定.

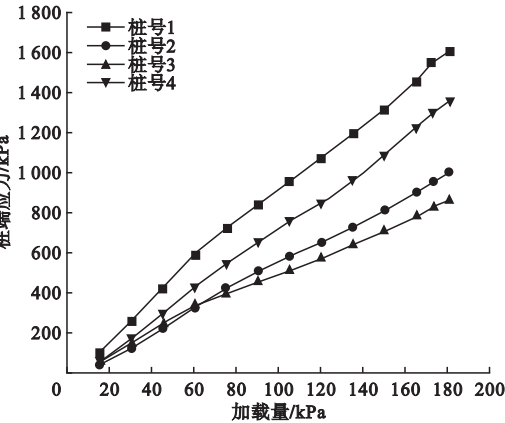


图8 桩端应力随加载量变化曲线

Fig. 8 Stress at the tip of pile with different loading

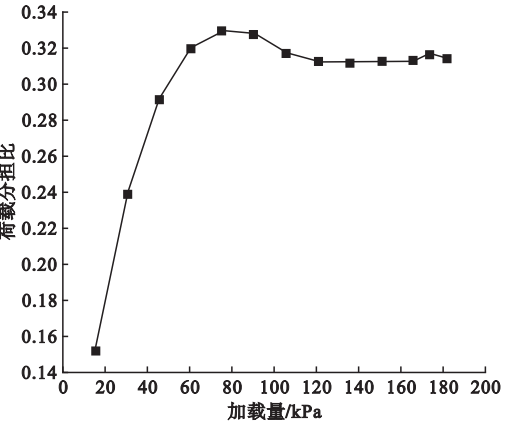


图9 桩端荷载分担比随加载量变化曲线

Fig. 9 Load sharing ratio at the end of pile with different loading

图10和图11分别给出了桩土应力比和荷载分担比的加载变化曲线。

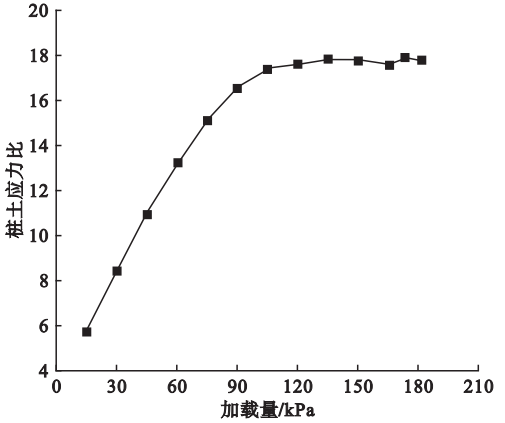


图10 桩土应力比随加载量变化曲线

Fig. 10 The load-sharing ratio of pile-soil with different loading

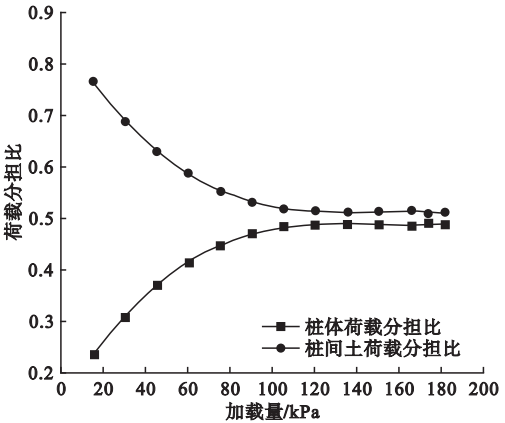


图11 桩土荷载分担比随加载量的变化

Fig. 11 The pile-soil load sharing ratio with different loading

随着加载量的增加,桩间土逐渐受压密实,压缩模量随之增大,桩土相对位移减小,桩和桩间土的荷载分担趋于平衡.因此桩土应力比和荷载分担比都呈现了趋于稳定的趋势。

2.2 转动过程中荷载分配机制

图12和图13分别给出了挡墙转动时复合地基桩顶应力和桩间土应力的变化曲线.随着挡墙转动量的增加,挡墙转动卸载使墙后土体发生移动,进而使桩间土体先发生沉降,上部荷载由此向桩顶转移.因此桩顶应力持续增大;桩间土应力不断减小,且靠近挡墙的1号土压力盒因为土体位移大应力降低最快.图14给出了挡墙转动时桩端应力变化曲线.随着转动量的增加,桩端应力随之增大,桩端应力在转动角度 10^{-3} rad以内变化较大,后期逐渐稳定。

由于挡墙转动导致土体位移量由近而远逐渐减小,以至于前后桩桩间土位移量不同并使前后桩顶应力和桩端应力增幅有明显差异,后桩桩顶应力增加率明显大于前桩,其增长速率约为前桩的3倍如表2和表3所示.随着转动量的增大,桩顶荷载分担比和桩端荷载分担比随之增大,桩间土荷载分担比随之减小,桩端荷载分担比大致呈现二次抛物线的变化规律.因为转动过程中土体产生位移卸荷,上部附加荷载更多转移到桩身上,桩

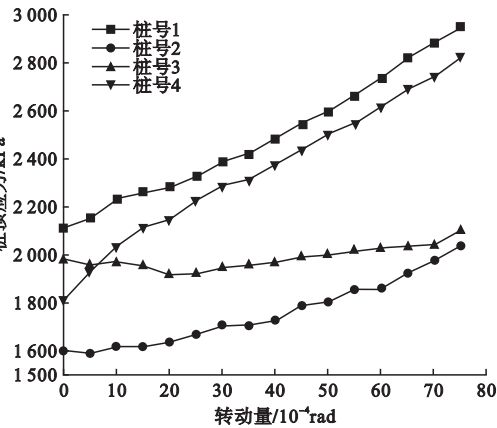


图 12 桩顶应力随转动量变化曲线

Fig. 12 The pile stress on the top with different rotation

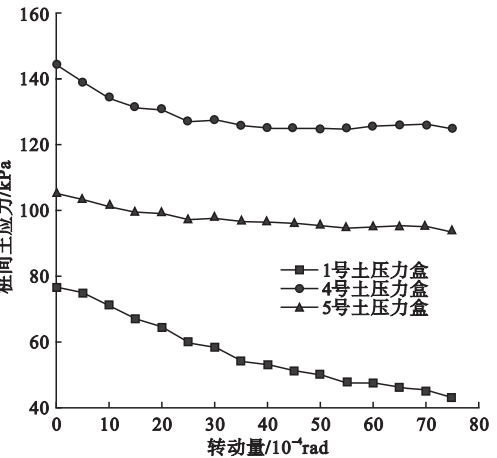


图 13 桩间土应力随转动量变化曲线

Fig. 13 The soil stress between piles with different rotation

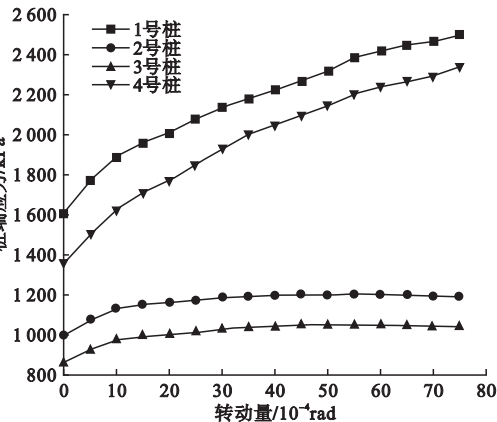


图 14 桩端应力随转动量变化曲线

Fig. 14 The pile stress at the end with different rotation

身应力逐渐增大;而转动过程中桩间土应力持续减小,转动过程中土体位移降低了桩间土的承载能力;在上部加载量不变的情况下多余的荷载均由桩来承担,这导致了桩土应力比的持续增加。

表 2 桩顶应力增加率

Table 2 The comparison results on the pile top			
桩	加载最终 应力/kPa	转动最终 应力/kPa	增加率/ %
前桩	1 789. 56	2 068. 22	15. 6
后桩	1 959. 38	2 883. 29	47. 2

注:2,3 号桩为前桩;1,4 号桩为后桩;最终应力取 2 个桩平均值。

表 3 桩端应力增加率

Table 3 The comparison results at the pile end			
桩	加载最终 应力/kPa	转动最终 应力/kPa	增加率/ %
前桩	932. 142	1 116. 46	19. 8
后桩	1 482. 14	2 416. 61	63. 0

注:2,3 号桩为前桩;1,4 号桩为后桩;最终应力取 2 个桩平均值。

图 15,图 16 和图 17 分别给出了挡墙转动时桩端荷载承担比,桩土应力比和桩土荷载分担比的变化曲线。

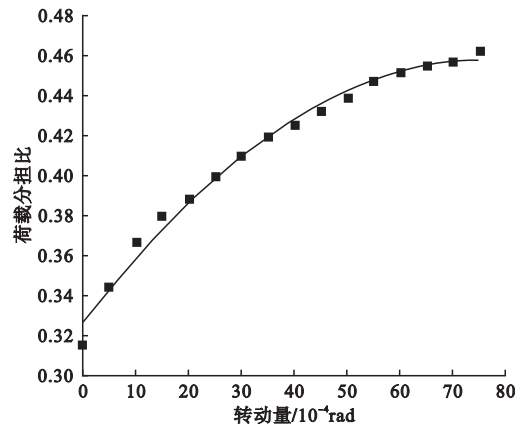


图 15 桩端荷载分担比随转动量变化曲线

Fig. 15 The load sharing ratio at pile end with different loading

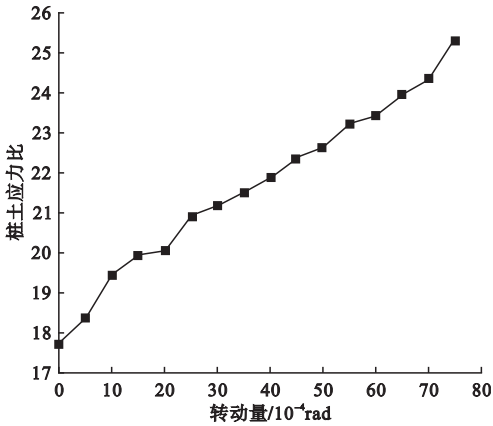


图 16 桩土应力比随转动量变化曲线

Fig. 16 The load-sharing ratio of pile-soil with different rotation

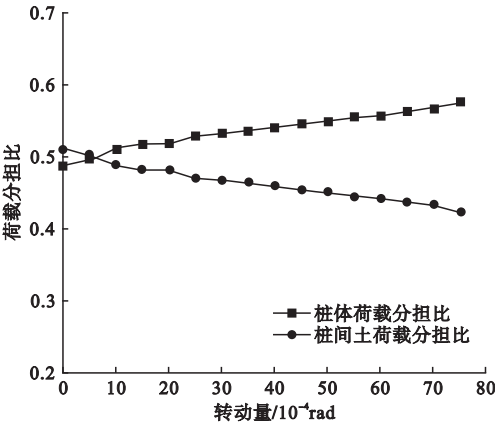


图 17 桩土荷载分担比随转动量变化曲线

Fig. 17 The load sharing ratio of pile-soil with different rotation

3 结 论

(1)加载过程中,随着加载量的增加桩间土逐渐受压密实,压缩模量随之增大,桩土相对位移减小,桩和桩间土的荷载分担趋于平衡.因此桩土应力比和荷载分担比都呈现了趋于稳定的趋势.

(2)挡墙转动过程中,挡墙转动卸载使墙后土体发生移动,进而使桩间土体先发生沉降,上部荷载由此向桩顶转移.因此桩顶应力持续增大;桩间土应力不断减小.

(3)挡墙转动过程中,随着转动量的增加桩端应力随之增大,且在 10^{-3} rad 转动角

度以内变化比较明显,之后趋于平缓.桩端荷载承担比也随着转动量的增加而增加,呈现二次抛物线的规律.

(4)由于挡墙转动导致土体位移量由近而远逐渐减小,以至于前后桩桩间土位移量不同并使前后桩顶应力和桩端应力增幅有明显差异,后桩桩顶应力增加率明显大于前桩,其增长速率约为前桩的 3 倍.

参考文献

[1] 王洪亮,宋二祥,宋福渊. 紧邻既有建筑基坑有限土体主动土压力计算方法[J]. 工程力学,2014,31(4):76-81.
(WANG Hongliang, SONG Erxiang, SONG Fuyuan. Calculation of active earth pressure for limited soil between existing building and excavation[J]. Engineering mechanics, 2014, 31(4):76-81.)

[2] 杨明辉,汪罗成,赵明华. 有限土体主动土压力计算的土拱效应分析[J]. 建筑结构,2013,43(2):71-75.
(YANG Minghui, WANG Luocheng, ZHAO Minghua. Calculation of active earth pressure for finite soils based on the soil arching theory[J]. Building structure, 2013, 43(2):71-75.)

[3] 杨明辉,汪罗成,赵明华. 考虑变形非线性影响的有限土体土压力计算模型[J]. 水利学报,2012,43(9):1121-1126.
(YANG Minghui, WANG Luocheng, ZHAO Minghua. A calculation model of the earth pressure for the limited soils considering the nonlinear influence of the displacement[J]. Journal of hydraulic engineering, 2012, 43(9):1121-1126.)

[4] 闫涛旺,郎瑞卿,孙立强,等. 基于薄板理论的刚性桩网复合地基桩土应力比计算[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(8):237-246.
(YAN Shuwang, LANG Ruiqing, SUN Liqiang, et al. Calculation of pile-soil stress ratio in composite foundation with rigid pile-net based on plate theory[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2017, 36(8):237-246.)

[5] 徐新星,张季超. 刚性桩长变化对 CM 复合地基工作性状影响[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(1):124-130.
(XU Xinxing, ZHANG Jichao. Influence of rigid pile length on working characteristics of CM composite foundation[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2018, 14(1):124-130.)

[6] 李连祥,符庆宏,张海北,等. 复合地基侧向力学性状离心试验方案研究与设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(2):80-88.

- (LI Liangxiang, FU Qinghong, ZHANG Haibei et al. Research and design of centrifuge model tests on lateral mechanics properties of composite foundation [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural sciences edition), 2016, 35(2): 80-88.)
- [7] 王洪亮, 宋二祥, 宋福渊. 基坑周边荷载引起支护结构上土压力的分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(9): 90-95.
(WANG Hongliang, SONG Erxiang, SONG Fuyuan. Analysis of earth pressure on the retaining structure due to surcharge near the excavation [J]. Industrial building, 2012, 42(9): 90-95.)
- [8] 王保军, 周同和, 郭院成. 特殊条件下基坑支护侧向土压力与稳定性计算方法讨论[J]. 河南科学, 2012, 30(9): 1271-1275.
(WANG Baojun, ZHOU Tonghe, GUO Yuancheng. Discussion on the calculation of lateral soil pressure and stability of foundation pit supporting under special conditions [J]. He'nan science, 2012, 30(9): 1271-1275.)
- [9] 应宏伟. 考虑邻近地下室外墙侧压力影响的平动模式挡土墙主动土压力研究. 岩石力学与工程学报[J]. 2011(1): 2970-2978.
(YING Hongwei. Study of active earth pressure on retaining wall subject to translation mode considering lateral pressure on adjacent existing basement exterior wall [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011(1): 2970-2978.)
- [10] ZHU Xiaojun. Analysis of the load sharing behaviour and cushion failure mode for a disconnected piled raft [J]. Advances in materials science and engineering, 2017(2): 1-13.
- [11] 佟建兴, 闫明礼, 王明山, 等. 刚性桩复合地基侧向土压力试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1572-1578.
(TONG Jianxing, YAN Mingli, WANG Ming-shan et al. Experimental study of lateral earth pressure of rigid pile composite foundation [J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(6): 1572-1578.)
- [12] 刘鹏, 杨光华, 范泽, 等. 刚性桩复合地基尺寸效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 187-200.
(LIU Peng, YANG Guanghua, FAN Ze, et al. Experimental study on scale effect of rigid pile composite foundation [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(1): 187-200.)
- [13] 段晓沛, 司文明, 曾伟. CFG 桩复合地基变形承载特性的室内试验研究[J]. 北方交通, 2014(6): 101-104.
(DUAN Xiaopei, SI Wenming, ZENG Wei. The laboratory test investigation on the deformation bearing characteristics of cement fly-ash grave composite foundation [J]. North transportation, 2014(6): 101-104.)
- [14] 赵明华, 龙军, 张玲, 等. 不同型式复合地基试验对比分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 611-618.
(ZHAO Minghua, LONG Jun, ZHANG Ling, et al. Comparative analysis of model tests on different types of composite foundations [J]. Chinese journal of rock engineering, 2013, 35(4): 611-618.)
- [15] TRADIGO F. Non-linear soil - structure interaction in disconnected piled raft foundations [J]. Computers and geotechnics, 2015, 63: 121-134.
- [16] WANG Guihe. Effect of cantilever soldier pile foundation excavation closing to an existing composite foundation [J]. Journal of central south university, 2013, 20(5): 1384-1396.
- [17] 梁云发. 竖向-水平荷载联合作用下单桩性状模型试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(6): 92-94.
(LIANG Yunfa. Experimental study on single pile traits model under combined vertical horizontal loads [J]. Building structure, 2013, 43(6): 92-94.)
- [18] 姚国圣. 土体侧移作用下轴向受荷单桩承载性状数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011(1): 1-6.
(YAO Guosheng. Numerical analysis of bearing behavior of axially loaded single pile under lateral displacement [J]. Journal of tongji university (natural science), 2011(1): 1-6.)
- [19] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳等. 基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 638-643.
(ZHENG Gang, YAN Zhixiong, LEI Huayang, et al. Field measurement and finite element numerical simulation analysis of influence of foundation pit excavation on adjacent pile foundation [J]. Chinese journal of rock engineering, 2007, 29(5): 638-643.)
- [20] 佟建兴, 孙训海, 杨新辉, 等. 长短刚性桩复合地基桩、土承载性状与厚径比相关关系试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013(5): 955-960.
(TONG Jianxing, SUN Xunhai, YANG Xinhui, et al. Experimental study on the relationship between pile and soil bearing behavior and thickness-diameter ratio of composite foundation with long and short rigid piles [J]. Journal of geotechnical engineering, 2013(5): 955-960.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)