

DOI: 10.11779/CJGE2021S2040

硬质地层中偏压基坑支护结构受力特性研究

朱湘旭¹, 徐昭辰^{2,3}, 章定文^{2,3}, 武同东¹, 马飞鹏¹

(1. 中建八局轨道交通建设有限公司, 江苏 南京 210046; 2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189;

3. 道路交通工程国家级实验教学示范中心(东南大学), 江苏 南京 211189)

摘要: 依托宁句城际轨道句容站基坑工程, 通过现场监测和数值模拟方法, 探究了硬质地层中偏压荷载对基坑围护桩桩身水平位移和桩身弯矩的影响规律。结果表明: 硬质地层中偏压基坑两侧围护桩均向基坑内侧变形, 偏压荷载在增加偏压侧桩身位移的同时抑制非偏压侧的桩身位移; 偏压侧围护桩的最大水平位移出现在桩顶处, 其随偏压距离与开挖深度比值减小而成指数增加; 偏压距离小于基坑开挖深度时, 偏压荷载对偏压侧桩身变形影响显著; 偏压荷载使偏压侧围护桩桩身峰值弯矩显著增加, 但对非偏压侧桩身弯矩几乎无影响; 偏压基坑设计应对偏压侧围护结构进行增强以控制工程风险。

关键词: 偏压基坑; 硬质地层; 围护桩; 水平位移; 弯矩

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0166-04

作者简介: 朱湘旭(1986—), 男, 工程师, 主要从事地下工程施工与新技术研究。E-mail: 3306642286@qq.com。

Behaviors of supporting structures of asymmetrically loaded deep excavation in hard soil layer

ZHU Xiang-xu¹, XU Zhao-chen^{2,3}, ZHANG Ding-wen^{2,3}, WU Tong-dong¹, MA Fei-peng¹

(1. China Construction Eighth Engineering Division Rail Transit Construction Co., Ltd., Nanjing 210046, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Road and

Traffic Engineering Education (Southeast University), Nanjing 211189, China)

Abstract: Based on the excavation at Jurong Station of Nanjing-Jurong Intercity Railroad, the stress and deformation characteristics of the supporting structures during the construction of the asymmetrically-loaded excavation in hard soil layer are investigated through the in-site monitoring and numerical simulation methods. The results show that the retaining piles of the asymmetrically-loaded excavation in the hard soil at both sides are deformed to the inner side of the excavation, and the asymmetrical-load increases the displacement of the loading-side piles meanwhile suppresses the displacement of the unloading-side piles. The maximum horizontal displacement of the piles at the loading-side appears at the pile top, which increases exponentially with the decrease of the ratio of the distance of load to the depth of the excavation. When the loading distance is less than the depth of the excavation, the load has a significant effect on the deformation of the loading-side piles. The existence of the load significantly increases the peak bending moment of the loading-side retaining piles, but has almost no effect on the bending moment of unloading-side piles. In order to control the risks of excavation, the retaining piles at the loading side of excavation in the hard soil should be enhanced.

Key words: asymmetrically loaded excavation; hard soil layer; retaining pile; horizontal displacement; bending moment

0 引 言

偏压基坑是指基坑两侧存在相差较大荷载而处于不对称受力状态下的基坑。因基坑紧邻高边坡、高层建筑、周围成层差异或交通荷载等而引起的偏压问题十分常见^[1]。偏压基坑两侧的围护结构受到不对称的作用力, 其变形性状呈现出不同于普通基坑的特点, 按常规方法设计存在一定安全隐患。已有学者开始关注偏压基坑围护结构受力变形特性^[2]。Xu等^[3]通过数

值模拟研究了不同偏压情况下的基坑围护墙变形和弯矩, 并指出偏压基坑两侧墙体应采用不同的配筋方案。Liu等^[4]基于现场实测数据和数值模拟对某一邻近高速公路的偏压基坑进行研究, 分析了支护桩水平位移、内支撑轴力和坑后地表沉降等参数的变化特性。姚爱军等^[5]通过工程实测指出, 偏压荷载使基坑两侧的围

收稿日期: 2021-08-17

*通信作者 (E-mail: 220203211@seu.edu.cn)

护桩桩身位移出现显著差异, 在一侧围护桩有较高安全系数时, 另一侧已超限。刘波等^[6]总结了偏压条件下基坑围护结构变形模式, 指出当偏压荷载足够大时, 围护结构可能会发生向荷载较小侧的整体“漂移”。已有研究主要集中于软弱土层中的偏压基坑特性, 对硬土地层中偏压基坑的围护结构受力变形特征还鲜有报道。依托宁句城际轨道句容站基坑工程, 通过建立基坑典型断面的二维有限元模型并结合工程实测数据, 研究高边坡下硬质地层中偏压基坑围护结构的受力变形特性和影响因素, 以期为类似工程提供参考。

1 工程简介

1.1 工程概况

句容站为地下两层岛式车站, 一期基坑标准宽度 20.7 m, 长约 308 m, 底板埋深约 16.68~19.51 m。基坑采用明挖法施工, 支护体系采用钻孔咬合桩加内支撑的形式。围护结构为直径 1 m、间距 0.8 m 的钻孔咬合桩, 桩长 21 m; 支撑体系为三道水平内支撑, 其中第一道为钢筋混凝土支撑, 截面尺寸 800 mm×1000 mm, 间距约 8 m, 第二道和第三道为 $\Phi 609 \times 16$ 钢支撑, 间距约 4 m。句容站基坑东侧存在一大型连续土堆, 高度约 8 m, 沿基坑全长分布, 距基坑边缘约 15 m, 使基坑处于严重偏压状态。基坑典型剖面见图 1。

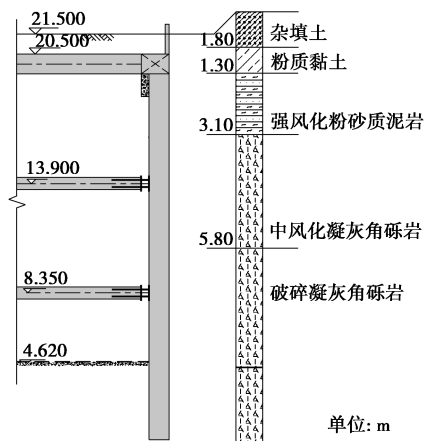


图 1 基坑支护剖面图

Fig. 1 Sectional drawing of supporting structures for excavation

1.2 工程与水文地质条件

句容站基坑场地地质条件较好, 以各类风化岩为主: ①粉质黏土, 黄褐色, 硬塑, 中低压缩性; ②强风化粉砂质泥岩, 棕红色, 土柱状, 属极软岩, V 级岩体, 遇水易软化; ③中等风化凝灰角砾岩, 灰黄色, 属软岩, 岩体较完整, IV 级岩土, 遇水易软化; ④破碎凝灰角砾岩, 青灰白色为主, 碎块状, 属极软岩—软岩, V 级岩土, 遇水易软化; ⑤中等风化砂岩, 青灰色为主, 短柱状, 属较硬岩, 岩体较破碎, IV 级岩

体。场地内地下水主要为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。松散岩类孔隙水以孔隙潜水为主; 基岩裂隙水主要赋存于粉砂质泥岩、砂岩和凝灰角砾岩强风化带。

2 数值模拟

2.1 模型建立

选取基坑的一个典型断面作为计算断面, 使用 ABAQUS 有限元软件建立基坑的二维模型, 模型高 60 m、宽 160 m。土体和围护桩选择 CPE4 单元模拟, 钢筋混凝土支撑和钢支撑选择梁单元模拟。约束模型两侧水平方向的位移和模型底部水平、竖直两个方向的位移, 上表面设置为自由边界。加 160 kPa 恒定荷载 (起始位置距基坑边缘 10 m, 作用长度 15 m,) 模拟基坑东侧的高边坡。

2.2 计算参数选取

土体的本构模型采用修正剑桥模型, 围护桩、钢筋混凝土支撑和钢支撑采用线弹性模型, 相关计算参数列于表 1, 2。围护桩直径 1 m、长度 21 m; 钢支撑外径 609 mm, 壁厚 16 mm。

表 1 土层计算参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	κ	λ	M
粉质黏土	10	0.29	0.0258	0.14	1.0
强风化粉砂质泥岩	30	0.23	0.0186	0.11	1.1
中风化凝灰角砾岩	60	0.20	0.0042	0.04	1.3
破碎凝灰角砾岩	30	0.19	0.0078	0.06	1.2

表 2 支护结构计算参数

Table 2 Parameters of supporting structures

名称	材料	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量 /GPa
围护桩	C20+C35 混凝土	2400	0.20	28.8
砼支撑	C35 混凝土	2400	0.20	31.5
钢支撑	Q235	7850	0.28	210.0

2.3 施工步骤模拟

通过 ABAQUS 中的激活/杀死单元对基坑开挖施工过程进行模拟, 工况划分如下: ①地应力平衡; ②施加围护桩; ③开挖第 i 层土并架设第 i 道支撑 ($i=1, 2, 3$); ④开挖至坑底设计标高。

3 偏压基坑围护桩受力变形特性分析

3.1 监测数据分析与模型验证

基坑开挖至坑底时两侧围护桩的水平位移实测值如图 2。数值计算结果与实测变形基本吻合。高边坡侧 (以下称为偏压侧) 围护桩产生整体向基坑内部

的变形，桩顶处水平位移最大，桩身变形从顶部到底部逐渐减小；非偏压侧围护桩身侧移曲线呈现向基坑内侧的“鼓肚形”，桩身水平位移从上到下先增加后减小，最大变形在第一道支撑下方，约 14 mm。基坑两侧桩身变形具有明显的不对称性，偏压侧围护桩的水平位移明显大于非偏压侧，且两侧围护桩变形形态不同。此偏压基坑的围护桩变形并没有出现典型的偏压效应，即偏压侧围护桩向基坑内倾倒而非偏压侧围护桩向基坑外部变形，这说明硬质地层中的偏压基坑支护结构具有不同于软土基坑的受力变形性状。

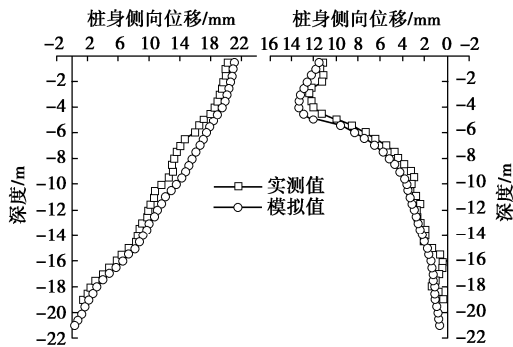


图2 围护桩水平位移实测曲线和模拟曲线

Fig. 2 Monitoring and simulated horizontal displacements of retaining piles

3.2 偏压荷载大小对桩身水平位移的影响

图3是偏压荷载为0, 25, 50, 100, 200 kPa时基坑开挖完成后围护桩的水平位移。偏压荷载越大，基坑偏压侧围护桩向基坑内侧的位移越大，而非偏压侧围护桩的变形越小。偏压荷载不超过50 kPa时，偏压荷载对围护桩变形的影响较小；偏压荷载超过50 kPa时，基坑两侧的桩体变形差异开始显著，偏压侧围护桩向坑内倾倒而非偏压侧围护桩的变形受到抑制。偏压荷载从0增加到200 kPa时，偏压侧桩身的最大水平位移增加了10.5 mm，而非偏压侧桩身的最大水平位移减小了9.9 mm。偏压荷载增加了偏压侧围护桩的主动土压力，进而增加向坑内方向的变形。土压力通过水平支撑传递给非偏压侧的围护桩而限制了其水平变形。偏压侧桩体的变形始终呈“开口形”，即从上到下逐渐减小；非偏压侧桩体变形呈“鼓肚形”，最大变形位置出现在第一道支撑下方。非偏压侧围护桩并没有发生向基坑外部的变形，说明硬质地层能给桩体较大的土压力以抵消支撑的作用力。

3.3 偏压荷载大小对桩身弯矩的影响

图4为偏压荷载大小分别为0, 25, 50, 100, 200 kPa时基坑开挖完成后围护桩的桩身弯矩。可见，偏压荷载小于50 kPa时，其对偏压侧围护桩桩身弯矩的影响较小，各点弯矩的增加不超过30 kN·m；偏压荷

载达到200 kPa时，尽管桩身峰值弯矩的位置与无偏压时相近，均位于第二道支撑下方，但峰值弯矩大小达到了233.4 kN·m，约为无偏压时的1.6倍。偏压荷载对非偏压侧的桩身弯矩影响较小，荷载从0 kPa增加到200 kPa的过程中，非偏压侧围护桩弯矩的大小和分布均未发生显著变化。因此，偏压荷载较大时宜将偏压侧和非偏压侧的围护结构分开设计，对偏压侧围护结构增加配筋而非偏压侧围护结构则无需增强。

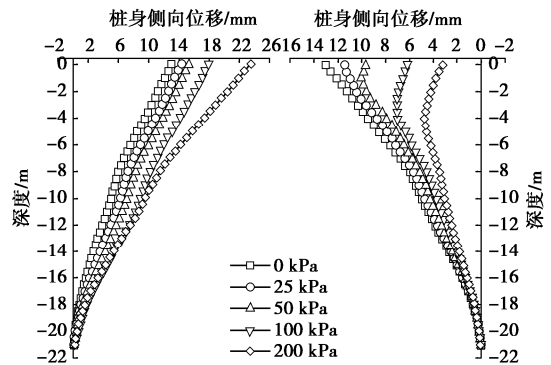


图3 不同偏压荷载下的桩身侧向位移

Fig. 3 Lateral displacements of piles with different loads

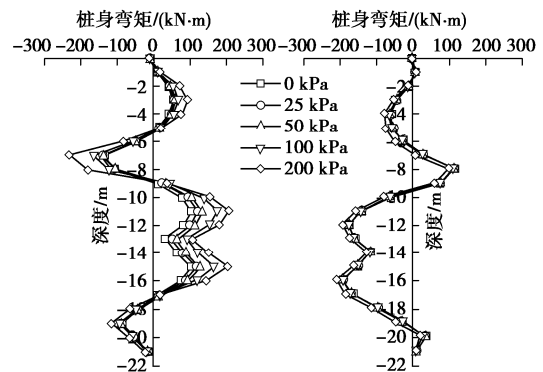


图4 不同偏压荷载下的桩身弯矩

Fig. 4 Bending moments of piles with different loads

3.4 偏压荷载位置对桩身水平位移的影响

图5为偏压荷载200 kPa，荷载作用起始点与基坑边缘距离分别为5, 10, 15, 20, 25 m时基坑开挖完成后围护桩的水平位移。偏压荷载与基坑边缘的距离越小，偏压侧桩体向基坑内侧的位移越大，非偏压侧的变形受到抑制效应减弱。偏压距离减小与偏压荷载增加对围护桩变形性状的影响效果相似。图6显示，偏压侧围护桩的最大水平位移 y 随偏压距离 L 与开挖深度 H 比值的增加而呈指数减小。当 $L/H < 1$ 时，桩体水平位移随 L/H 的增加大幅降低，当 $L/H > 1$ 时，偏压侧围护桩的水平位移受偏压荷载影响较小。因此，基坑设计时应仔细测绘基坑周边场地情况，距基坑边缘一倍开挖深度内存在高边坡、建筑物等较大偏压荷载时，应对偏压侧围护结构增强。

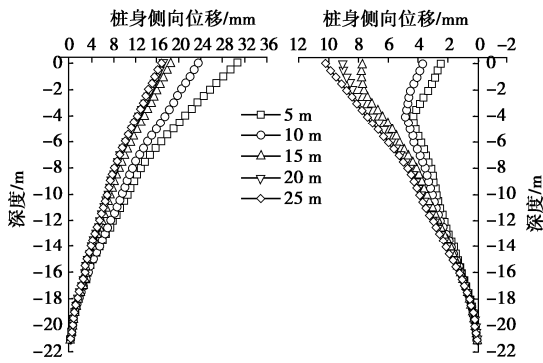


图5 不同偏压距离下的桩身侧向位移

Fig. 5 Lateral displacements of piles with different distances

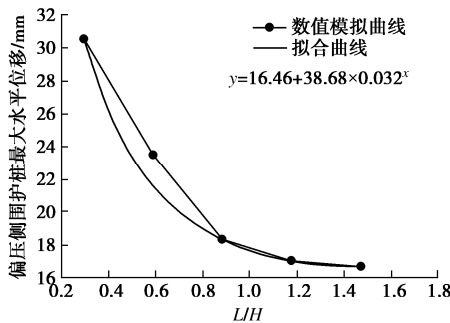


图6 偏压侧墙体最大水平位移与L/H关系

Fig. 6 Maximum horizontal displacement versus L/H

3.5 偏压荷载位置对桩身弯矩的影响

图7为偏压荷载200 kPa, 荷载作用起始点与基坑边缘距离分别为5, 10, 15, 20, 25 m时基坑开挖完成后围护桩的桩身弯矩分布。偏压荷载对桩身弯矩的影响随偏压距离的减小而显著增大。当 $L/H < 1$ 时, 桩身最大弯矩迅速增加, 从144 kN·m ($d=15$ m)增加到252 kN·m ($d=5$ m), 增加约1.74倍。偏压侧桩身峰值弯矩出现在第二道支撑上方近1 m处和第三道支撑上下方约2 m处。偏压距离的减小对非偏压侧围护桩的桩身弯矩影响很小。偏压距离减小和偏压荷载增加对围护桩桩身弯矩具有相似的影响效应。

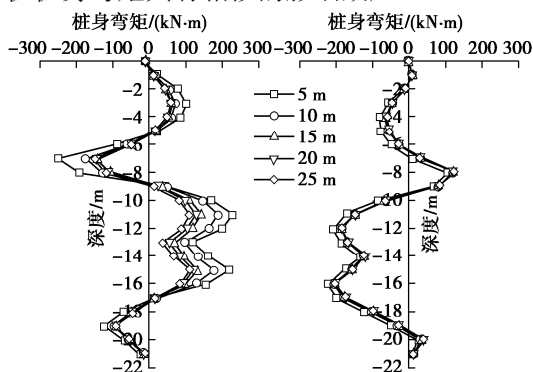


图7 不同偏压距离下的桩身弯矩

Fig. 7 Bending moments of piles with different distances

4 结 论

(1) 硬质地层中偏压基坑两侧围护桩均产生向基

坑内侧的水平位移; 偏压侧桩体变形性状为“开口形”, 桩顶位移最大, 非偏压侧桩体变形呈“鼓肚形”, 最大变形位置在第一道支撑下方, 且偏压侧的桩身变形明显大于非偏压侧。

(2) 偏压荷载的增加及偏压距离的减小会显著影响压侧围护桩水平位移和弯矩。偏压荷载超过50 kPa后, 偏压效应显著; 当偏压距离小于基坑开挖深度时, 偏压荷载对偏压侧桩身变形具有显著影响。

(3) 偏压基坑设计中宜增强偏压侧围护结构配筋, 以降低工程风险。

参考文献:

- [1] 刘波, 席培胜, 章定文. 偏压作用下非等深基坑开挖效应数值分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 853 - 859. (LIU Bo, XI Pei-sheng, ZHANG Ding-wen. Numerical analysis of excavation effect of unsymmetrical loaded foundation pit with different excavation depths[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2016, 46(4): 853 - 859. (in Chinese))
- [2] 林刚, 徐长节, 蔡袁强. 不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2592 - 2598. (LIN Gang, XU Chang-jie, CAI Yuan-qiang. Research on characters of retaining structures for deep foundation pit excavation under unbalanced heaped load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2592 - 2598. (in Chinese))
- [3] XU C J, XU Y L, SUN H L, et al. Characteristics of braced excavation under asymmetrical loads[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1 - 12.
- [4] LIU B, ZHANG D W, XI P S. Influence of vehicle load mode on the response of an asymmetrically-loaded deep excavation[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(8): 3315 - 3329.
- [5] 姚爱军, 张新东. 不对称荷载对深基坑围护变形的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 378 - 382, 388. (YAO Ai-jun, ZHANG Xin-dong. Influence of asymmetric load on supporting deformation for deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 378 - 382, 388. (in Chinese))
- [6] 刘波, 章定文, 席培胜. 偏压基坑工程设计、施工与受力变形特性研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 791 - 804. (LIU Bo, ZHANG Ding-wen, XI Pei-sheng. Review on design, construction, stress and deformation characteristics of asymmetrically loaded deep excavation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 791 - 804. (in Chinese))