

# 非对称荷载作用下装配式可回收支护 开挖数值分析

郭成超<sup>1,2,3</sup>, 叶思聪<sup>1,2,3</sup>, 曹鼎峰<sup>1,2,3</sup>, 叶钧陶<sup>1,2,3</sup>

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 广东省地下空间开发工程技术研究中心,  
广东 广州 510275; 3. 广东省海洋土木工程重点实验室, 广东 广州 510275)

**摘 要** 目的 研究在非对称荷载作用下装配式可回收支护结构基坑在开挖过程中支护结构的受力变形特性. 方法 依托郑州市某顶管工程, 运用有限元软件 ABAQUS 模拟非对称荷载条件下装配式可回收支护结构基坑开挖全过程, 分析支护结构的水平位移及受力. 结果 基坑开挖完成后, 非对称荷载侧桩体水平位移及弯矩均不一致, 荷载较大侧桩顶位移和桩体上部弯矩更大. 随着较大侧荷载的增加, 同侧桩体上部的坑内位移量及弯矩值相应增大, 冠梁和第 1 层腰梁在非对称荷载两侧的轴力分布及大小有明显差别. 结论 荷载较大侧的支护结构变形较大, 受力情况复杂, 施工时应重视并密切监测.

**关键词** 非对称荷载; 装配式可回收支护; 基坑开挖; 数值模拟

中图分类号 TU476<sup>+</sup>.9

文献标志码 A

## Numerical Analysis of Excavation of Prefabricated Recyclable Support under Asymmetric Load

GUO Chengchao<sup>1,2,3</sup>, YE Sicong<sup>1,2,3</sup>, CAO Dingfeng<sup>1,2,3</sup>, YE Juntao<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, China, 510275; 2. Guangdong Underground Space Development Engineering and Technology Research Center, Guangzhou, China, 510275; 3. Guangdong Key Laboratory of Marine Civil Engineering, Guangzhou, China, 510275)

**Abstract:** The mechanical and deformation characteristics of the new prefabricated recyclable support structure during excavation under asymmetric load are studied. Relying on a pipe jacking project in Zhengzhou, this paper uses the finite element software ABAQUS to simulate the whole process of excavation of the prefabricated recyclable support foundation pit under asymmetric load conditions. The change law of horizontal displacement and force of this kind of support structure is summarized. The calculation results show that when the foundation pit excavation is finished, the

收稿日期: 2019-08-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802300); 软弱土与环境土工教育部重点实验室项目(浙江大学)开放基金资助项目(2019P05); 岩土力学教育部重点实验室(河海大学)开放基金资助项目(2019011)

作者简介: 郭成超(1973—), 男, 副教授, 主要从事工程基础设施安全防护理论与技术方面研究.

horizontal displacement and bending moment of the piles on the asymmetric load side are not the same. On the side with larger load, the displacement and bending moment of the upper part of the pile are larger. With the increase of the load on the larger side, the displacement and bending moment of the upper part of this side of the pile increase correspondingly. The axial force distribution and value of the crown beam and the 1st floor middle beam on both sides of the asymmetric load are significantly different. All in all, the supporting structure on the side with larger load has larger deformation and more complicated mechanical characteristics, which should be paid attention to and closely monitored during construction.

**Key words:** asymmetric load; prefabricated recyclable support; foundation pit excavation; numerical simulation

基坑工程是地下空间开发和利用中不可缺少的组成部分之一<sup>[1]</sup>. 在基坑开挖过程中,坑边荷载是不可忽视的潜在危险因素,荷载会使得土体发生侧向挤出,桩结构因此产生较大的内力和挠度,影响基坑的稳定性. 目前国内外针对基坑在坑边荷载作用下开挖的研究主要集中在理论分析、工程监测和数值模拟方面. 在理论分析方面:刘发前等<sup>[2]</sup>在轴对称情况下利用土体极限平衡理论,将圆形基坑主动土压力的滑移线解推广到非均匀堆载情况. 徐洲等<sup>[3]</sup>基于圆弧滑动法,结合 Boussinesq 解,建立了考虑地面局部荷载的基坑三维抗隆起稳定性系数计算方法. 在工程监测方面:石钰锋等<sup>[4]</sup>和刘波等<sup>[5]</sup>分别对深圳和合肥的某个偏压基坑开挖进行了监测,研究其位移与内力特征;姚爱军等<sup>[6]</sup>对某个深基坑在不对称荷载下开挖进行监测,得出了若干围护结构的变形规律. 在有限元模拟方面:D. L. Wang 等<sup>[7]</sup>运用有限元软件 MIDAS 模拟了非对称荷载下深基坑开挖过程,比较计算结果及实际监测的数据,定性地总结了一些规律. 李志伟<sup>[8]</sup>结合某工程实例,运用有限元软件研究了邻近建筑物对软土地基深基坑变形的影响. 李玉岐等<sup>[9]</sup>在 Biot 三维固结理论基础上开发了考虑三维基坑有限元程序,分别研究了坑外荷载大小、荷载作用时间和荷载作用范围对支护水平位移、地表沉降和坑底隆起的影响. 王复明等<sup>[10]</sup>、Y. H. Pan 等<sup>[11]</sup>提出了新型环境友好

型的装配式可回收支护技术,改善了传统支护施工成本高、环境扰动大、对地基破坏严重等缺点. 随着地下空间开发的迅速发展,部分基坑由于临近大型建筑物、公路、河流等,导致基坑两侧存在非对称荷载. 在非对称荷载条件下进行装配式可回收支护基坑开挖,支护结构的受力变形特性尚不清楚. 笔者以郑州市某顶管工程为背景,将工程内某个使用装配式可回收支护结构的工作井作为研究对象,利用有限元软件 ABAQUS,建立其三维有限元模型. 在模型两侧施加非对称荷载,模拟基坑开挖全过程,通过对比在不同的非对称荷载组合下装配式可回收支护结构的变形和内力,总结出这种新型支护结构在非对称荷载作用下的水平位移和受力变化规律.

## 1 装配式可回收支护结构组成及工艺

装配式可回收支护结构结合了钢骨架支撑结构和高聚物注浆防渗技术<sup>[12]</sup>,实现了标准化设计,现场装配式施工的目标,通过高效率回收再利用来降低工程造价,具有施工快速,拆除简易,绿色环保等优势,其主要组成部分为:① 钢骨架. 主要承载构件,由型钢支护桩、冠梁和腰梁组成. ② 柔性面板. 分散水土压力,协调钢骨架整体受力. ③ 高聚物注浆层. 快速形成封闭防渗体,封堵渗漏<sup>[13]</sup>. 装配式可回收支护结构具体施工示意图如图 1 所示.

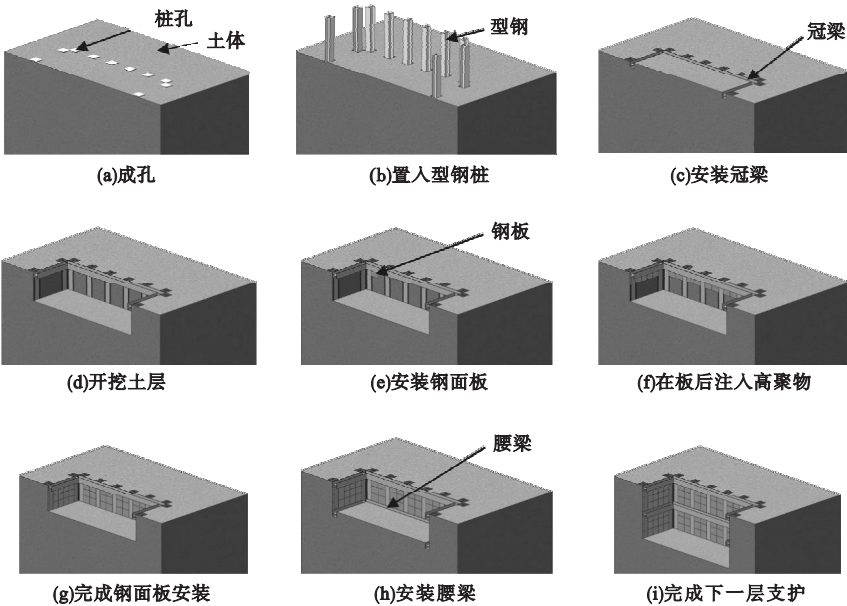


图1 装配式可回收支护结构施工流程

Fig. 1 Construction process of prefabricated recyclable supporting structure

图1表明了装配式可回收支护结构施工过程.

(1)在指定的施工区域,利用钻孔机械完成型钢支护桩的桩孔施工(见图1(a)). 在施工过程中,须严格控制成孔和成槽的精度,尤其是孔的位置精度和槽的垂直精度.

(2)利用专门的器械,将型钢支护桩精确地置入槽孔中,而后利用砂石等适合地层需要的材料对槽孔内的空隙部分进行回填,以保证型钢支护桩周边土体的稳定(见图1(b)).

(3)采用高强螺栓将施工前设计并加工好的冠梁和型钢支护桩的顶部进行拼接(见图1(c)).

(4)开始开挖土层(见图1(d)).

(5)对开挖深度范围内的基坑侧壁依次分层进行钢面板安装,利用螺栓将其固定在型钢支护桩上(见图1(e)).

(6)采用高聚物注浆方法填充钢面板与土体之间的空隙,以保证面板与侧壁土体紧密结合,协同变形(见图1(f)).

(7)完成开挖深度范围内基坑侧壁的钢面板安装(见图1(g)).

(8)当土层开挖至设计标高后,采用螺

栓连接方式安装腰梁(见图1(h)).

(9)重复步骤(4)~(8),直至施工到井底标高,完成装配式可回收支护结构的施工(见图1(i)).

## 2 工程背景及有限元模型

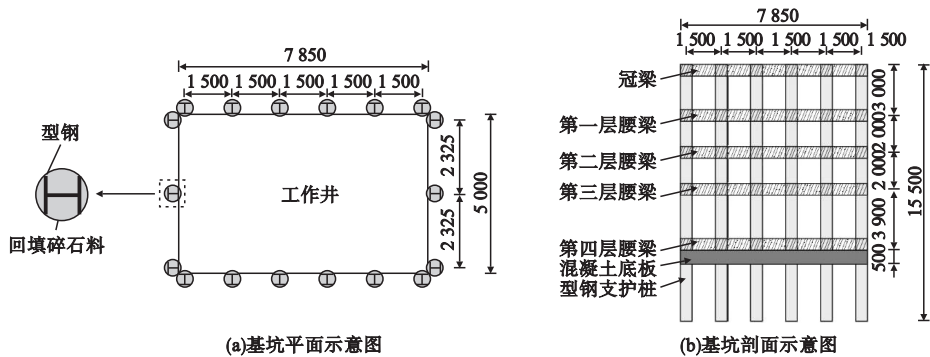
### 2.1 基坑概况及场地水文地质条件

笔者对郑州市某顶管工程项目的某个工作井进行分析. 工作井形状为矩形,长7.85 m,宽5.0 m,开挖深度为11.4 m,其平面布置图和剖面图分别如图2所示. 支护方式采用装配式可回收支护结构.

支护桩在基坑长边的桩距为1.500 m,在基坑短边的桩距为2.325 m,桩孔直径为600 mm,内置型钢 Hw350. 桩孔内插型钢后采用相当于 C20 的干拌级配水泥碎石料回填,桩长为15.5 m. 冠梁和腰梁同样采用型钢 Hw350,与型钢支护桩之间采用螺栓连接. 柔性钢面板厚度为5 mm,强度等级 Q235,其安装固定采用焊接方式. 底板采用 C30 素混凝土浇筑,厚度为500 mm.

工作井所在的附近区域的土层分布及物理力学性质如表1所示. 由于勘察期间内未

见地下水,因此不考虑地下水对基坑开挖的影响.



(a)基坑平面示意图 (b)基坑剖面示意图

图2 基坑平面及剖面示意图

Fig. 2 Top view and sectional view of the foundation pit

表1 各土层相关参数

Table 1 Parameters of all soil layers

层序	土层名称	土层厚度/m	重力密度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ $\text{kPa}$	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
1	杂填土	2.5	17.0	5.0	15.0
2	黄土状轻粉质壤土	3.6	17.6	18.3	19.1
3	黄土状中粉质壤土	0.9	17.7	22	21.7
4	黄土状轻粉质壤土	9.85	17.6	17.8	23.4
5	黄土状中粉质壤土	1.2	18.0	22	18.6

2.2 有限元模型的建立

笔者采用通用有限元软件 ABAQUS 建立三维模型,算例假定:① 土体应力-应变关系符合 Mohr-Coulomb 本构理论,型钢支护桩、冠梁、腰梁、柔性钢面板和素混凝土底板符合线弹性本构关系.② 型钢支护桩、柔性钢面板和素混凝土底板与土体之间的接触面服从理想弹塑性本构关系.③ 基坑开挖过程中不考虑因时间效应带来的影响,开挖一层立即完成柔性钢面板的安装.④ 柔性钢面板与侧壁土体紧密接触,不考虑高聚物注浆层的受力变形特性.

为了简化计算和建模、划分网格的方便,算例中进行处理:① 将型钢支护桩(包括内置的型钢以及回填的碎石料)按照刚度一致的原则简化成了长宽均为 0.5 m,深度为 15.5 m 的矩形钢桩.同时,为保持模型的桩距与依托工程中桩距保持一致为 1.5 m,模型中基坑的长度修改为 8.0 m.② 处在同一层开挖的多块小柔性钢面板统一成一块大的

柔性钢面板.③ 取第 4 次开挖深度为 4.0 m (实际为 3.9 m),其余的开挖步骤深度不变,故基坑总深度为 11.5 m,与实际情况的 11.4 m 相差不大,该差异对模拟计算结果影响不大<sup>[14]</sup>.

算例中,土体、钢桩和素混凝土底板采用三维 8 节点实体单元(C3D8),冠梁、腰梁采用空间梁单元(B31),柔性钢面板采用壳单元(S4)来进行模拟.钢桩、柔性钢面板和素混凝土底板与土体之间的摩擦系数取为 0.35.由于冠梁、腰梁与钢桩和柔性钢面板之间采用螺栓连接来进行固定,故在模拟中采用 Tie 接触,即绑定接触,使其在开挖过程中不产生相对位移.模型四周为水平方向约束,模型底部为固定约束,上表面为自由面.限制冠梁、腰梁沿长度和宽度方向的转动.土层参数设置方面如表 1 所示,支护部件参数设置方面如表 2 所示.

由于模型中桩体颇多,笔者选取若干具有代表性的桩,分别对其编号,依次为桩 A、



B、C 和 D. 其中, 桩 A 和 B 处在非对称荷载侧, 且关于基坑对称, 能比较好反映出非对称荷载对其影响的差别; 桩 C 和 D 处在无荷载侧, 同样关于基坑左右对称, 能比较好反映非对称荷载对无荷载侧桩体的影响及差别. 同时对冠梁和腰梁所在的每一侧也进行了编号, 分别是 L1、L2、L3 和 L4, 模型中对应装配式可回收支护结构的具体部件如图 3 所示.

表 2 各支护部件参数

Table 2 Parameters of support components			
支护部件	弹性模量/ GPa	重力密度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比
钢桩(简化后)	36.2	32.0	0.20
柔性钢面板	210.0	78.0	0.20
冠梁、腰梁	210.0	78.0	0.20
素混凝土底板	30.0	24.0	0.20

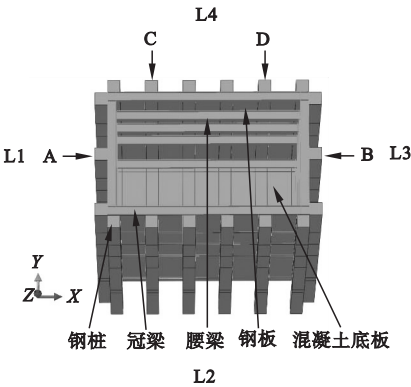


图 3 钢桩编号及支护部件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of steel pile serial numbers and support components

根据基坑周边环境及基坑开挖数值模拟的经验, 消除边界条件对模拟结果的影响, 基坑开挖水平和竖向影响范围按李玉岐等<sup>[9]</sup>的做法, 取开挖深度的 3 倍到 4 倍考虑, 由此确定模型长 79.0 m, 宽 76.0 m, 高 35.0 m.

由于模型尺寸较大, 而桩的尺寸偏小, 且桩附近的区域需要加密, 这将导致模型网格数量庞大. 为有效节省计算时间, 采用 G. Zheng<sup>[15]</sup> 等的网格划分方法, 即过渡网格划分: 模型中心密, 四周粗(见图 4).

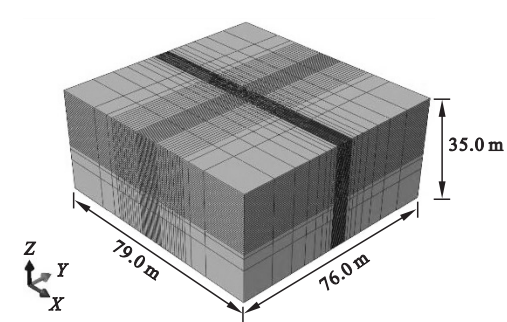


图 4 有限元模型网格划分图

Fig. 4 Mesh of the finite element model

结合装配式可回收支护基坑开挖的施工工艺顺序, 算例对基坑开挖过程的模拟共分为 12 个步骤进行, 具体的施工模拟步骤如表 3 所示.

表 3 施工工序模拟流程

Table 3 Simulation of construction process	
施工步骤	模拟施工内容
1	建立土层, 平衡地应力, 对位移清零
2	挖去钢桩所在位置土体, 激活钢桩
3	施作冠梁
4	开挖至 -3.0 m, 并施作钢面板
5	施作第 1 层腰梁
6	开挖至 -5.0 m, 并施作钢面板
7	施作第 2 层腰梁
8	开挖至 -7.0 m, 并施作钢面板
9	施作第 3 层腰梁
10	开挖至 -11.0 m, 并施作钢面板
11	施作第 4 层腰梁
12	开挖至 -11.5 m, 并施作底板

为模拟基坑两侧的非对称荷载, 分别在基坑外左右两侧设置荷载, 其形状为矩形, 长为 5.0 m, 宽为 6.0 m. 假设在基坑外左侧的荷载大小为  $P_1$ , 在基坑外右侧的荷载大小为  $P_2$ , 具体荷载位置及形状如图 5 所示. 分别计算 5 种不同的坑外荷载组合边缘距离基坑 1.0 m 时对装配式可回收支护基坑开挖的影响. 具体的荷载组合名称及对应的荷载大小情况如表 4 所示.

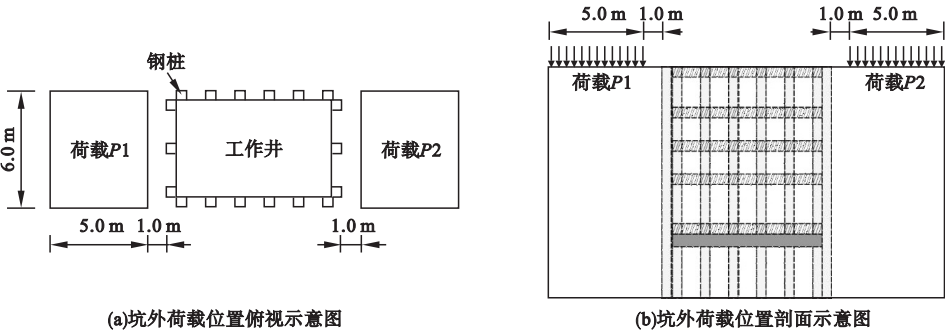


图5 坑外荷载位置俯视及剖面示意图

Fig.5 Top view and sectional view schematic diagram of loads positions

表4 荷载组合说明

荷载组合编号	荷载组合
1	$P1 = 10\text{ kPa}, P2 = 10\text{ kPa}$
2	$P1 = 10\text{ kPa}, P2 = 30\text{ kPa}$
3	$P1 = 10\text{ kPa}, P2 = 50\text{ kPa}$
4	$P1 = 10\text{ kPa}, P2 = 70\text{ kPa}$
5	$P1 = 10\text{ kPa}, P2 = 90\text{ kPa}$

3 结果分析

3.1 桩体水平位移分析

图6为在同一非对称荷载组合下,各开挖步对桩体水平位移的影响.开挖步对应的施工步骤可见表3.其中,水平位移图正值代表向坑内位移,负值代表向坑外位移.

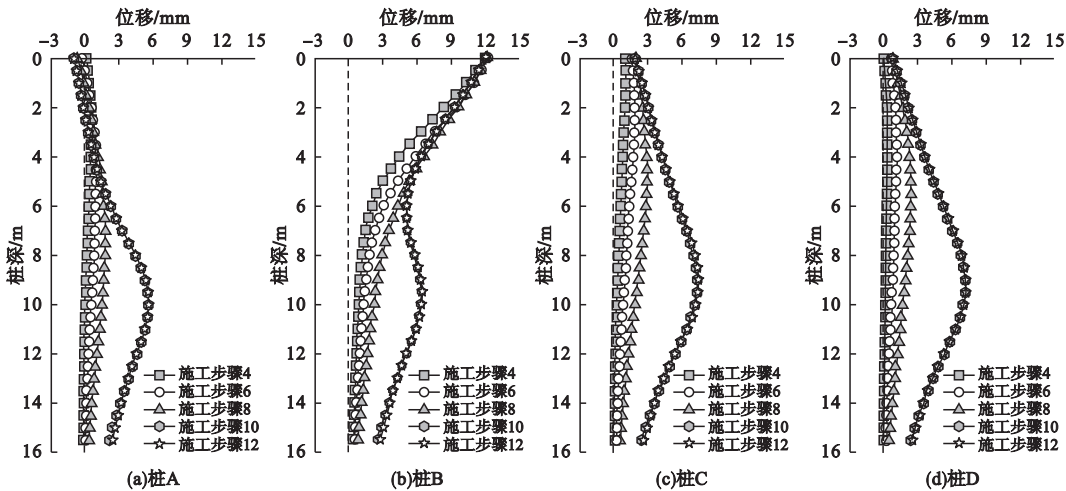


图6 荷载组合5下各开挖步骤桩A、B、C、D的水平位移图

Fig.6 Horizontal displacement diagram of steel pile A,B,C,D for all excavation steps under the 5th load group

从图6可以看出,随着开挖步的进行,桩体向坑内的水平位移均在增加,桩B最大位移基本保持不变,而桩A、C、D最大位移随着开挖深度的增加而增大,位于开挖面深度附近.由于最后一个开挖步仅开挖0.5m,在模拟时开挖与浇筑素混凝土底板同时完成,因此施工步骤10下的水平位移曲线与施工步骤12下的水平位移曲线基本重合.

在前3个开挖步里,桩B的水平位移曲线形状均是文献[16]中提到的基坑支护结构变形模式中的一种:“三角形”.当基坑完成第4次开挖后,桩B水平位移曲线中下部发生变化,呈另一种变形模式:“凸肚状”.这是由于随着基坑开挖深度的增加,侧壁土体作用在桩上的土压力随之增大,桩因此变形,同时地面荷载给予桩的影响越来越弱,故

桩B中下部水平位移曲线形状为“凸肚状”而不是“三角形状”。

基坑开挖完成后,位于无荷载侧的桩C和桩D水平位移曲线呈比较平滑的“凸肚状”,而位于非对称荷载侧的桩A,曲线中下部也呈“凸肚状”,但其上部向坑外弯曲,顶部出现向坑外水平位移,这是由于桩B一侧的荷载使得桩后土压力增大,在施工过程中,通过冠梁和部分腰梁的传递作用,使得左侧桩体上部一定范围内出现坑外位移,这与参考文献[17]中,不平衡堆载下堆载偏小侧的

墙体顶端在基坑开挖时出现向坑外的水平位移的现象一致。

图7为基坑开挖完后,不同的非对称荷载组合对桩体水平位移的影响.在非对称荷载侧,当 $P_2 = P_1$ 时,桩A水平位移曲线与桩B一致,随着 $P_2$ 的增大,桩A顶部往坑外水平位移越来越大,且桩B往坑内位移量越来越大,其曲线形状由“凸肚状”渐渐变化为上部呈“三角形状”而下部呈“凸肚状”的复合形状,此形状表明桩体顶部已严重变形,有破坏风险。

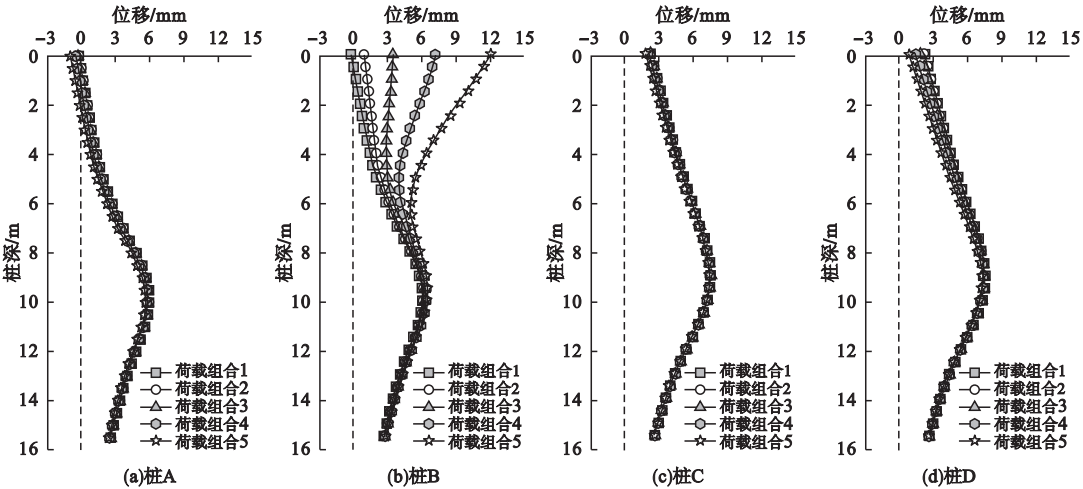


图7 基坑完成开挖后桩A、B、C、D的水平位移图

Fig. 7 Horizontal displacement diagram of steel pile A,B,C,D when excavation is finished

图8为 $P_1$ 均为10 kPa, $P_2$ 分别为10、30、50、70、90 kPa时5种荷载组合下,桩B顶部水平位移变化示意图.随着 $P_2$ 的线性增长,桩顶水平位移在荷载大于30kPa时斜率突增,发

生转折,此变化规律与Stewart通过离心试验得出的荷载作用下桩顶水平位移与平均荷载大小呈双线性关系的结论相吻合<sup>[18]</sup>。

无荷载侧的桩C、D在各非对称荷载组合下的水平位移曲线均呈平滑“凸肚状”,最大水平位移均发生在开挖面深度附近.随着 $P_2$ 增大,桩C和桩D顶部往坑内位移量越来越小,但桩D变化地更为明显,这是因为桩D在空间上更接近荷载较大侧.综合图7(c)和图7(d),可以看出不同的非对称荷载大小并不影响无荷载侧桩体的变形模式,而会影响桩体上部的水平位移。

3.2 桩身弯矩分析

图9为同一非对称荷载组合下,各开挖步骤对桩体弯矩的影响示意图.规定桩体内

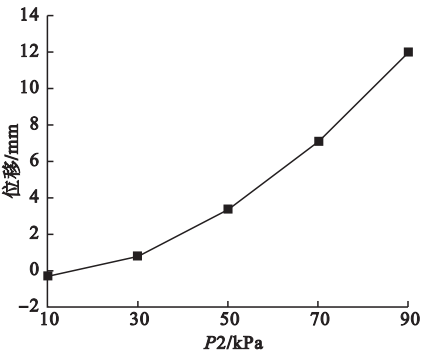


图8 5种荷载组合下桩B顶部水平位移图

Fig. 8 Horizontal displacement diagram of steel pile B under five different load groups

侧受拉时弯矩为负。

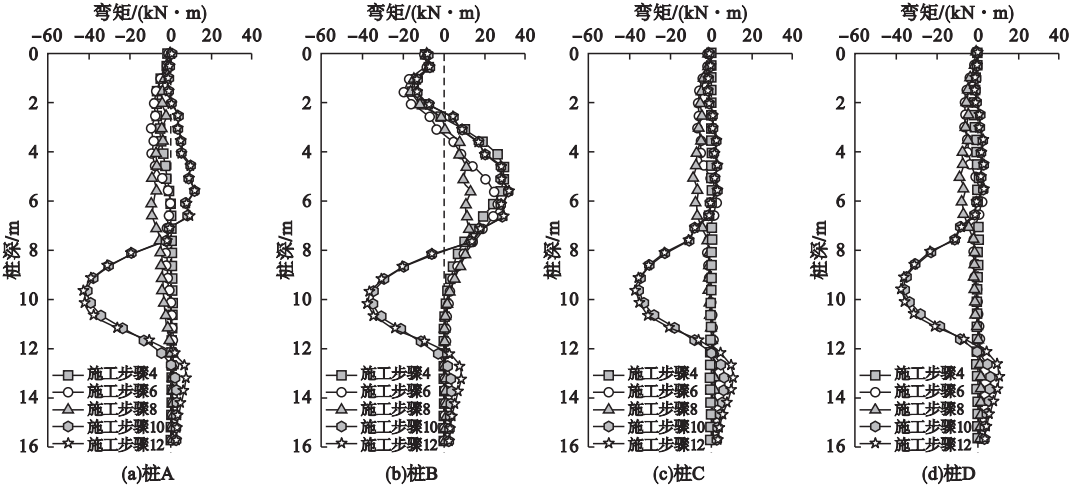


图9 荷载组合5下各开挖步骤桩A、B、C、D的弯矩图

Fig. 9 Moment diagram of steel pile A,B,C,D for all excavation steps under the 5th load group

对比桩 A 和桩 B 的弯矩图,在基坑开挖过程中,桩身弯矩在逐步增加,桩 B 的上部弯矩值始终比桩 A 大一倍左右,这是由于在非对称荷载下,桩 B 所在侧的荷载较大,因而桩 B 承受更大的土压力,桩身弯矩也对应的更大.故装配式可回收支护结构基坑在非对称荷载下开挖时,须格外注意荷载偏大一侧的支护施作以及桩体的变形监测,避免桩体在此侧由于承受较大的土压力,而出现桩

体失稳的现象.

位于无荷载侧的桩 C 和桩 D 随着开挖的进行,桩身弯矩也不断增加,最大弯矩位置随开挖面深度增加而下移,弯矩曲线变化特征和趋势基本一致,说明非对称荷载条件下基坑开挖对无荷载侧的桩身弯矩影响不大.

图 10 为基坑开挖完后,不同的非对称荷载组合对桩身弯矩影响.

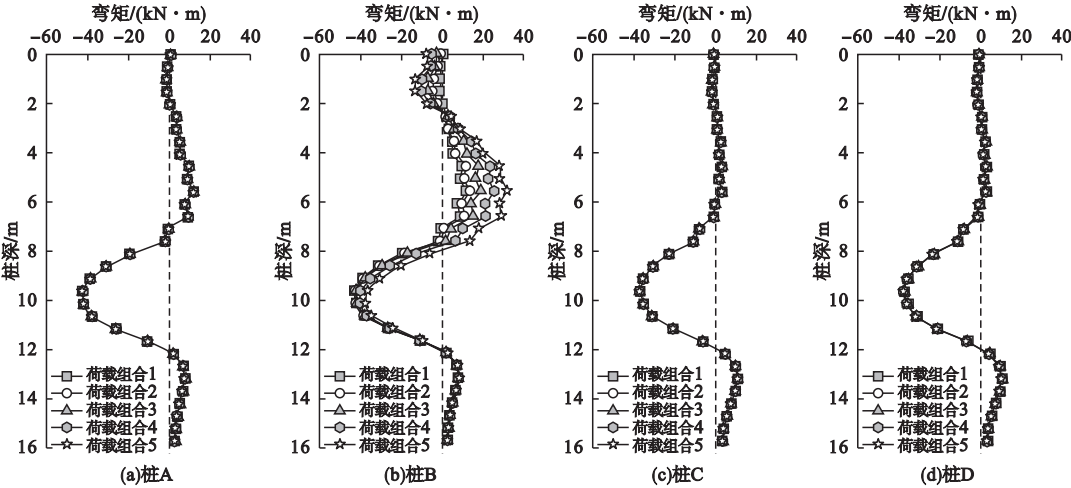


图10 基坑完成开挖后桩A、B、C、D的弯矩图

Fig. 10 Moment diagram of steel pile A,B,C,D when excavation is finished

对比图 10(a) 和图 10(b) 可以发现,非对称荷载作用下两侧桩的弯矩分布及大小并

不一致.  $P_2$  的大小变化不影响对面侧的桩 A 的弯矩值,而随着  $P_2$  的增大,同侧的桩 B 的



中上部弯矩值都有不同程度的增加:在 0 ~ 2.0 m 处,桩体负弯矩值增加;在 2.0 ~ 8.0 m 处,桩体的正弯矩值增加,两处的弯矩增长速率均越来越快. 这表明  $P_2$  的增大会引起同侧桩体弯矩波动越来越大,这对于桩体承载十分不利,并使得弯曲断裂的现象更易出现. 如图 10(c) 和图 10(d) 所示,随着  $P_2$  的增大,位于无荷载侧的桩 C 和桩 D 的弯矩变化均不明显,说明非对称荷载大小变化对无荷载侧桩体的弯矩大小影响不大.

3.3 冠梁和腰梁轴力分析

图 11 为冠梁、第 1 层腰梁、第 2 层腰梁、第 3 层腰梁分别在不同非对称荷载组合下的轴力示意图.  $Y$  轴坐标对应梁的一侧已在示意图的右方标出,L1 ~ L4 分别对应的方位可

见图 3,其中 L1 和 L3 侧为非对称荷载侧,L2 和 L4 侧为无荷载侧.

从图 11(a) 可以看出,L1 和 L3 侧梁轴力大小明显不一致,随着  $P_2$  的增大,L3 侧梁轴力变化较为剧烈,轴力分布愈发不均匀;梁两端受压程度加剧,中部受压程度则越来越弱,最后甚至变成受拉状态;L1 侧梁轴力变化并不大,其受压程度随  $P_2$  的增大相应减弱. 图 11(b) 变化特征及趋势与图 11(a) 基本一致,不同的点在于, $P_2$  的大小变化带来的影响逐渐减小. 图 11(c) 和图 11(d) 中,5 条曲线基本重合在一起,且非对称荷载两侧,即 L1 和 L3 侧的梁轴力大小基本一致,说明非对称荷载变化对第 2 层和第 3 层的腰梁轴力没有明显的影响.

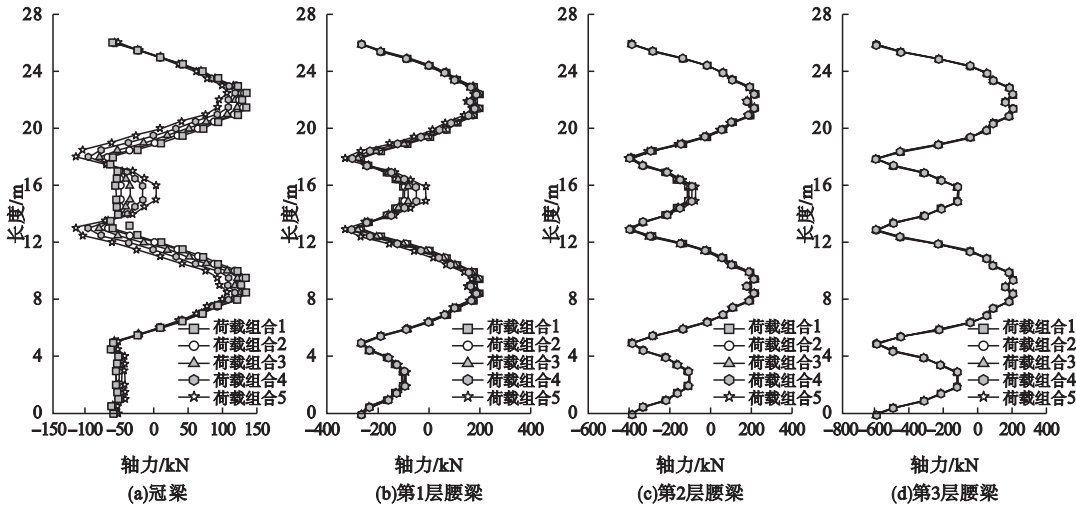


图 11 基坑完成开挖后冠梁和第 1 层、第 2 层、第 3 层腰梁轴力示意图

Fig. 11 Axial force diagram of crown beam and the 1st,2nd,3rd floor of middle beams when excavation is finished

4 结 论

(1)在非对称荷载条件下,非对称荷载两侧桩体水平位移曲线形状并不一致,荷载较小侧桩体顶部出现往坑外方向位移. 随着较大侧荷载大小的增加,同侧桩体顶部往坑内位移量增大且变化速率加快,荷载较小侧桩体顶部往坑外位移量相应增大.

(2)在非对称荷载条件下,荷载较大侧桩体中上部弯矩值偏大. 随着较大侧荷载大

小的增加,同侧桩体中上部弯矩绝对值增大,波动更加明显.

(3)在非对称荷载条件下,冠梁及第 1 层腰梁在荷载较大侧受压程度较弱. 随着较大侧荷载的增加,同侧梁轴力变化较剧烈,轴力分布愈发不均匀;两端受压程度加剧,中部受压程度则越来越弱,甚至还会变成受拉状态.

参考文献

[1] 孙超,郭浩天. 深基坑支护新技术现状及展望

- [J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3): 104-117.  
(SUN Chao, GUO Haotian. Present situation and prospect of new technology for deep foundation pit support [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2018, 35(3):104-117.)
- [2] 刘发前, 王建华. 非均匀堆载作用下圆形基坑主动土压力分析[J]. 上海交通大学学报, 2006(12): 2134-2136.  
(LIU Faqian, WANG Jianhua. The active earth pressure of circular pit subjected to non-uniform surcharge loading [J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2006(12): 2134-2136.)
- [3] 徐洲, 张栋. 考虑局部荷载的基坑抗隆起稳定性三维分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1553-1559.  
(XU Zhou, ZHANG Dong. Three-dimensional analysis on basal stability considering local ground load [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2017, 13(6):1553-1559.)
- [4] 石钰锋, 阳军生, 白伟, 等. 紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 826-833.  
(SHI Yufeng, YANG Junsheng, BAI Wei, et al. Analysis of field testing for deformation and internal force of unsymmetrical loaded foundation pit's enclosure structure close to railway[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(4): 826-833.)
- [5] 刘波, 席培胜. 某紧邻既有高速公路偏压深基坑开挖效应分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(6): 93-99.  
(LIU Bo, XI Peisheng. Study on excavation effect of an unsymmetrical loaded deep foundation pit adjacent to existed expressway [J]. Building structure, 2015, 45(6): 93-99.)
- [6] 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.  
(YAO Aijun, ZHANG Xindong. Influence of asymmetric load on supporting deformation for deep foundation pit [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(S2): 378-382.)
- [7] WANG D L, WANG L. Impact analysis of support structure of unsymmetrical loading deep foundation pit adjoining highway[J]. The open civil engineering journal, 2015, 9:463-470.
- [8] 李志伟. 邻近建筑物对软土地基深基坑变形的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 720-725.  
(LI Zhiwei. Analysis on the impact of the adjacent building on the deformation of deep excavation in soft ground[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(3): 720-725.)
- [9] 李玉岐, 周旋, 谢康和. 坑外荷载对软土地区基坑开挖变形性状的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2016(4): 97-102.  
(LI Yuqi, ZHOU Xuan, XIE Kanghe. Influence of outside load on deformation behavior of foundation pit excavation in soft soil area[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2016(4): 97-102.)
- [10] 王复明, 方宏远, 潘艳辉, 等. 一种柔性复合装配式可回收矩形工作井支护结构的设计施工方法: CN109056746A[P]. 2018-12-21.  
(WANG Fuming, FANG Hongyuan, PAN Yanhui, et al. Design and construction method of flexible composite prefabricate recyclable rectangular working well support structure: CN109056746A[P]. 2018-12-21.)
- [11] PAN Y H, FANG H Y, LI B, et al. Stability analysis and full-scale test of a new recyclable supporting structure for underground ecological granaries [J]. Engineering structures, 2019, 192:205-219.
- [12] 王复明, 李嘉, 石明生, 等. 堤坝防渗加固新技术研究与应用[J]. 水力发电学报, 2016, 35(12): 1-11.  
(WANG Fuming, LI Jia, SHI Mingsheng, et al. New seepage-proof and reinforcing technologies for dikes and dams and their applications [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2016, 35(12): 1-11.)
- [13] 王复明, 石明生, 张蓓, 等. 高聚物垂直支护体系注浆方法: CN103215960A[P]. 2013-07-24.  
(WANG Fuming, SHI Mingsheng, ZHANG Bei, et al. Polymer vertical support system grouting method: CN103215960A[P]. 2013-07-24.)
- [14] 龚剑, 王旭军, 赵锡宏. 深大基坑首层盆式开挖对基坑变形影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 439-448.  
(GONG Jian, WANG Xujun, ZHAO Xihong. Analysis of effect of first-level basin excavation on deformation of deep and large foundation pits[J]. Rock and soil mechanics, 2013, 34(2): 439-448.)
- [15] ZHENG G, ZENG C, DIAO Y, et al. Test and numerical research on wall deflections induced by pre-excavation dewatering [J]. Computers and geotechnics, 2014, 62:244-256.
- [16] 张运良, 聂子云, 李凤翔, 等. 数值分析在基坑变形预测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 113-119.  
(ZHANG Yunliang, NIE Ziyun, LI Fengxiang, et al. Deformation prediction of excavations based on numerical analysis [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S): 113-119.)
- [17] 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 Changjie, CAI Yuanqiang. 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.)
- [18] STEWART D P. Lateral loading of piled bridge abutments due to embankment construction [D]. Nedlands: University of Western Australia, 1992.  
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)