

# 软土地基中基坑内工程桩对开挖性状的影响

俞建霖<sup>1,2</sup>,徐山岱<sup>1,2</sup>,龙岩<sup>3</sup>,龚晓南<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心,浙江 杭州 310058;2. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心,浙江 杭州 310058;3. 浙江万科南都房地产有限公司,浙江 杭州 311122)

**摘要** 目的 研究考虑非挤土工程桩影响的软土地基基坑开挖性状,并探讨坑内工程桩的置换率和布置形式对基坑工作性状的影响.方法 基于有无工程桩的和6种工程桩的分布形式,运用Plaxis建立基坑开挖三维数值分析模型,得到了基坑水平位移、弯矩、周边地表沉降与坑内隆起的变化规律.结果 工程桩的存在可以使基坑水平位移、弯矩、沉降和坑内隆起的最大值分别减小15%、28.7%、17.1%和10%.工程桩置换率的增加,最大可减少73.7%的水平位移,39.7%的弯矩与62%的沉降.工程桩加密区位于基坑边中点区域时,对基坑工作性状影响相对最大.结论 工程桩的存在和工程桩置换率的提高均可有效减小围护结构水平位移、弯矩与沉降;在工程桩置换率相同的情况下,工程桩加密区位置对基坑的工作性状存在一定影响.

**关键词** 工程桩;基坑;开挖性状;软土地基

中图分类号 TU470 文献标志码 A

## Influence of Engineering Piles in Foundation Pit on Excavation Behavior in Soft Ground

YU Jianlin<sup>1,2</sup>, XU Shandai<sup>1,2</sup>, LONG Yan<sup>3</sup>, GONG Xiaonan<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310058;2. Zhejiang Urban Underground Space Development Engineering Research Center, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310058;3. Zhejiang Vanke Narada Real Estate Co. Ltd., Hangzhou, China, 310058)

**Abstract:** Considering the impact of non-squeezing soil engineering piles the properties of foundation pit excavation in soft soil are studied, and the effect of the replacement rate and layout of engineering piles on the properties of foundation pit are discussed. Based on the existence of engineering piles and layout of six types of engineering piles, the three-dimensional numerical analysis model of foundation pit excavation is established by using Plaxis, and the variation laws of the horizontal displacement, bending moment, settlement and bottom uplift are obtained. The existence of engineering piles can reduce the maximum values of horizontal displacement, bending moment, settlement and bottom uplift by 15%, 28.7%, 17.1% and 10%. The increase of the

收稿日期:2019-09-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51778575);浙江省重点研发计划项目(2019C03103)

作者简介:俞建霖(1972—),男,副教授,博士,主要从事软黏土力学、地基处理及基坑工程等方面研究.

replacement rate can reduce the horizontal displacement of 73.7%, the bending moment of 39.7%, and the settlement of 62% to the greatest extent. When the engineering pile encryption zone is located at the midpoint of the side of the foundation pit, it will have the greatest influence on the working properties of the foundation pit. The existence of engineering piles and the increase of replacement rate of engineering piles can effectively reduce the horizontal displacement, bending moment and settlement. With the same replacement rate, the location of the engineering pile encryption zone has a certain effect on the working properties of the foundation pit.

**Key words:** engineering piles; foundation pit; excavation properties; soft ground

随着我国城市建设的发展,各类用途的地下空间已在城市建设中不断得到开发利用,高层建筑的地下室、地铁车站、地下停车库等地下设施均涉及各类深大基坑工程. 基坑开挖的工作性状及其对周边环境的影响已引起广泛重视<sup>[1-4]</sup>. 在软土地基中建设建筑物时,通常需要使用桩基,而坑内的工程桩就相当于对坑底土体的加固. 工程桩的存在将对开挖过程中基坑的工作性状产生显著影响<sup>[5-9]</sup>. 查甫生等<sup>[10]</sup>以坑底无桩和坑底群桩两种基坑为研究对象,通过 ABAQUS 有限元软件分析了基坑开挖结束时墙后地表位移,坑底土隆起,围护结构变形、弯矩以及侧向土压力的变化规律. 鲁宏<sup>[11]</sup>通过 PLAXIS 软件针对地下连续墙支护形式,分析了工程桩的存在对基坑变形和内力的影响. 冯虎等<sup>[12]</sup>通过 FLAC 软件研究了工程桩对坑底隆起失稳破坏的影响和作用机理. 胡康俊等<sup>[13]</sup>采用 PLAXIS 软件研究了有无工程桩两种情况下基坑的变形和抗隆起稳定性. 郑刚等<sup>[14]</sup>通过有限差分数值模拟得出坑内工程桩的存在能在一定程度上提高基坑稳定安全系数的结论. 李承超等<sup>[15]</sup>针对坑底无桩和坑底群桩两种基坑模型,利用有限元软件 MIDAS NX 对比分析了不同开挖工况下的围护结构受力变形以及基坑的工作性状. 但是以往的研究成果基本均采用二维数值分析方法,在建模过程中需将坑内工程桩按轴向往等刚度原则简化为板桩墙,严重限制了坑内土体垂直于板桩墙方向的位移,无法模拟工程桩周边土体的“绕流”现象,大大降低了分析结果的可靠

性<sup>[16-17]</sup>. 笔者通过 Plaxis 软件采用三维数值分析方法,建立考虑非挤土工程桩影响的基坑开挖有限元模型,研究坑内工程桩对围护结构位移、弯矩、基坑外地表沉降和坑底隆起等基坑性状的影响,探讨工程桩的置换率和布置方式等因素对基坑工作性状的影响机理.

## 1 三维数值分析模型

数值分析原型取自浙江省台州地区某软土地基基坑工程. 本基坑周边自然地坪相对标高为 0.000 m,开挖深度  $H$  为 8.75 m,采用内撑式围护结构. 围护桩采用  $\phi 900 @ 1200$  钻孔灌注桩,桩底标高为 -27.000 m,桩底位于 4-1 粉质黏土层中. 设有一道钢筋混凝土内支撑,支撑顶标高为 -2.800 m,主支撑截面为 900 mm  $\times$  900 mm. 工程桩采用  $\phi 800$  钻孔灌注桩(非挤土桩). 基坑平面布置图如图 1 所示.

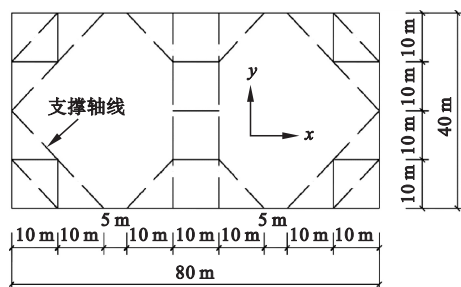


图 1 基坑平面布置图

Fig. 1 Plane layout of foundation pit

该基坑平面是长宽为 80 m  $\times$  40 m 的矩形,根据对称性选取基坑平面的 1/4 (40 m  $\times$  20 m) 进行三维分析,计算模型如图 2 所示.

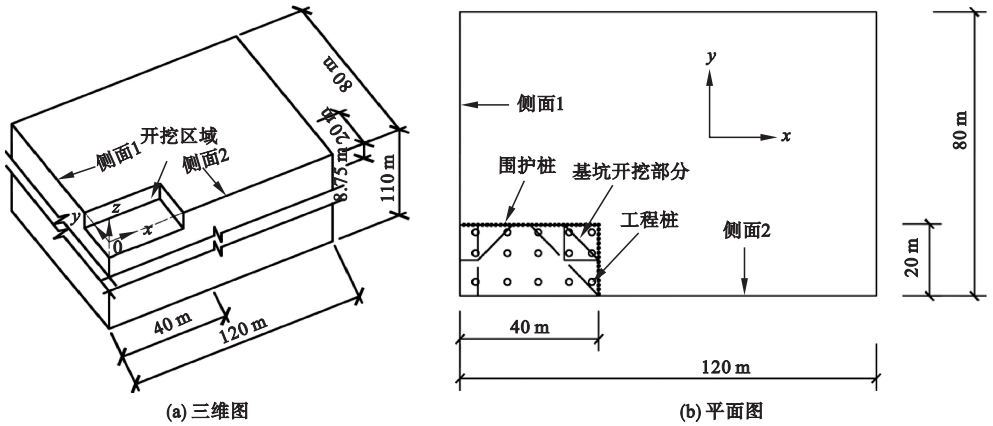


图2 计算模型简图

Fig. 2 Simplified diagram of calculation model

土体本构模型采用小应变硬化土模型(HSS). 围护桩和内支撑采用线弹性模型, 围护桩采用插入桩单元模拟, 支撑采用梁单元模拟, 工程桩采用混凝土实体单元模拟, 通过界面强度折减因子来考虑结构与相邻土体之间的黏聚力和内摩擦角. 模型的底面采

用全部约束, 侧面1施加  $x$  方向约束, 侧面2施加  $y$  方向约束, 其余侧面施加水平向约束. 地基中各土层厚度及计算参数如表1所示. 工程桩平面布置如图3所示, 桩长为71.25 m, 桩端进入8-1粉质黏土层不少于2倍桩径.

表1 地基各土层计算参数

Table 1 Calculation parameters of ground layers

土层	层厚/m	重力密度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^\circ$ )	压缩模量/MPa
黏土	1.70	18.4	25.43	11.70	4.93
淤泥	23.50	16.5	7.80	6.90	2.04
4-1 粉质黏土	14.00	18.9	35.48	12.90	6.71
4-2 粉质黏土	10.80	18.1	23.02	11.25	4.68
5-2 粉质黏土	5.70	18.4	22.13	11.63	4.70
6-1 黏土	9.00	18.6	36.30	12.53	6.96
7-2 粉质黏土	13.10	18.2	25.80	11.33	5.19
8-1 粉质黏土	3.60	18.8	37.88	12.75	7.58
9-1 粉质黏土	30.00	18.8	33.90	12.98	7.26

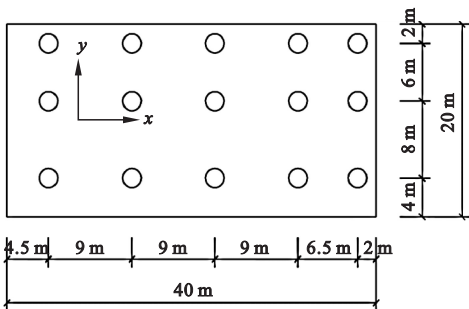


图3 工程桩平面布置图

Fig. 3 Plane layout of engineering piles

## 2 工程桩对基坑开挖性状的影响分析

笔者通过对比有工程桩和无工程桩情况下围护结构的水平位移和弯矩、坑边地表沉降以及坑底隆起来分析坑内工程桩对基坑开挖性状的影响.

### 2.1 围护结构水平位移

基坑计算模型中  $x$  方向40 m为长边,  $y$

方向 20 m 为短边. 分别对长、短边每隔 5 m 取点计算该位置处的最大水平位移, 得到的最大水平位移分布如图 4 所示. 由图 4 可看出: ①基坑围护结构的水平位移分布呈现显著的空间效应. 转角处围护结构水平位移较小, 随后沿基坑边逐步增大, 至基坑中部达到最大值. 无论是长边或短边, 在距离转角处 0.5 倍边长范围内围护结构的水平位移增长较快, 超出该范围后水平位移增长速率较小. 这是因为在基坑边角附近由于围护结构同时受到另一边围护结构的约束作用而位移小,

远离边角后约束作用减弱位移变大增长速率变大, 增长到一定值后趋于稳定. ②基坑内有工程桩情况下围护结构水平位移的分布与无工程桩的情况相似, 但位移值前者明显小于后者. 这主要是因为工程桩对基坑开挖面以下被动区土体起到了加固作用, 增加了对围护结构变形的约束力. 前者长边和短边的最大水平位移分别为 44 mm 和 26 mm, 而后者分别为 52 mm 和 31 mm, 分别减小了 15.4% 和 16.1%. 说明基坑内工程桩的存在可有效地减小围护结构的水平位移.

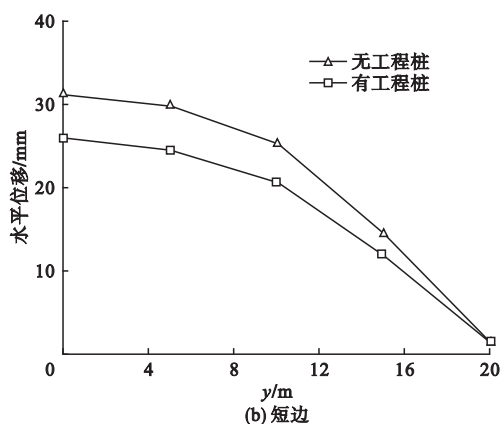
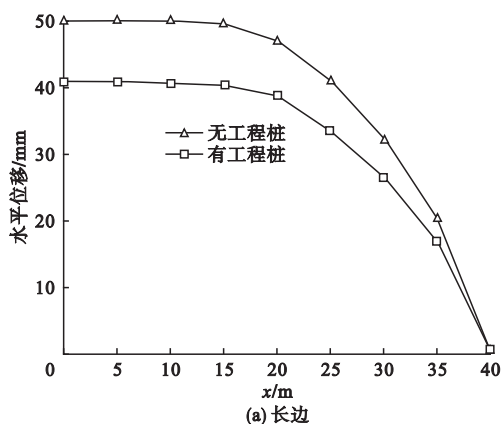


图 4 围护结构水平位移最大值分布

Fig. 4 Distribution of maximum horizontal displacement of retaining structure

## 2.2 围护结构弯矩

分别对长、短边每隔 5 m 取点计算该位

置处的最大弯矩, 得到的弯矩最大值分布如图 5 所示.

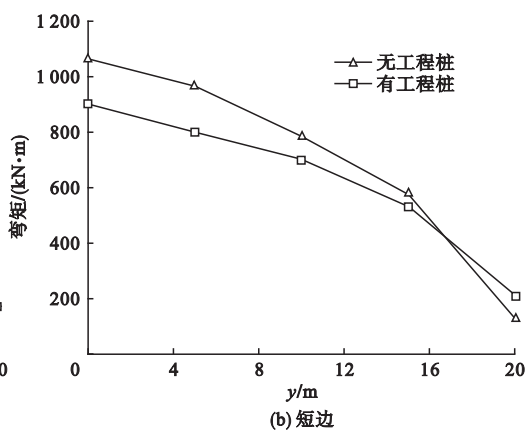
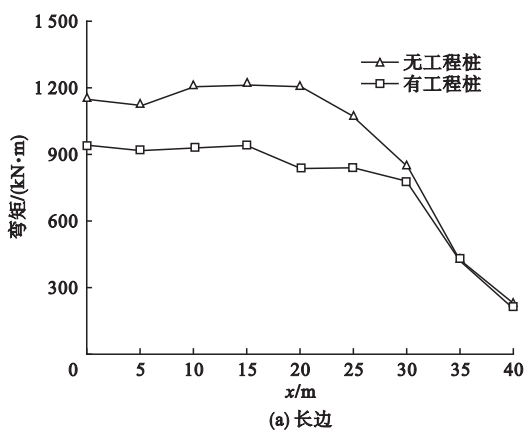


图 5 围护结构弯矩最大值分布图

Fig. 5 Distribution of maximum bending moment of retaining structure

由图 5 可看出: ①围护结构的弯矩分布也具有显著的空间效应. 转角处围护结构弯矩较小, 但增长速率较大; 基坑中部围护结构

弯矩值较大, 但变化幅度较小. ②在基坑长边的中部区域, 围护结构弯矩值随支撑的设置出现了一定的波动, 支撑点处围护结构弯矩





由图7可见,有工程桩和无工程桩情况下基坑坑底隆起分布存在显著差异.对于无工程桩情况(见图(7)a),随着与基坑边距离的增加,坑底隆起值不断增大,但增长速率迅速减小,并在基坑中心区域达到最大值.而对于有工程桩情况(见图7(b)),除围护结构边缘区域坑底隆起值较小外,在各工程桩附近坑底隆起值也较小,且隆起值随距工程桩距离的增大而迅速增加,以各个工程桩为中心呈“漏斗状”分布.由于工程桩的存在一方面加固土体,另一方面增加了桩土之间的摩阻力,使得有工程桩情况下最大隆起值比无工程桩情况减小约10%.

### 3 工程桩置换率和布置形式对基坑开挖性状的影响

基坑内工程桩的存在可以有效地减小围护结构的水平位移和弯矩、基坑周边地表沉降以及坑底隆起值.但在实际工程中,工程桩的分布往往还与主楼的位置有关:主楼区域工程桩间距较小,密度较高;而地库区域工程桩间距往往较大,密度低.基坑内工程桩的布置形式如图8所示.笔者分别设置基准算例a(见图3)、中部加密算例b(见图8(a))、长边加密算例c(见图8(b))、角部加密算例d(见图8(c))、全加密算例e(见图8(d))以及无工程桩算例f工程桩6种布置形式,分析对基坑开挖性状的影响.

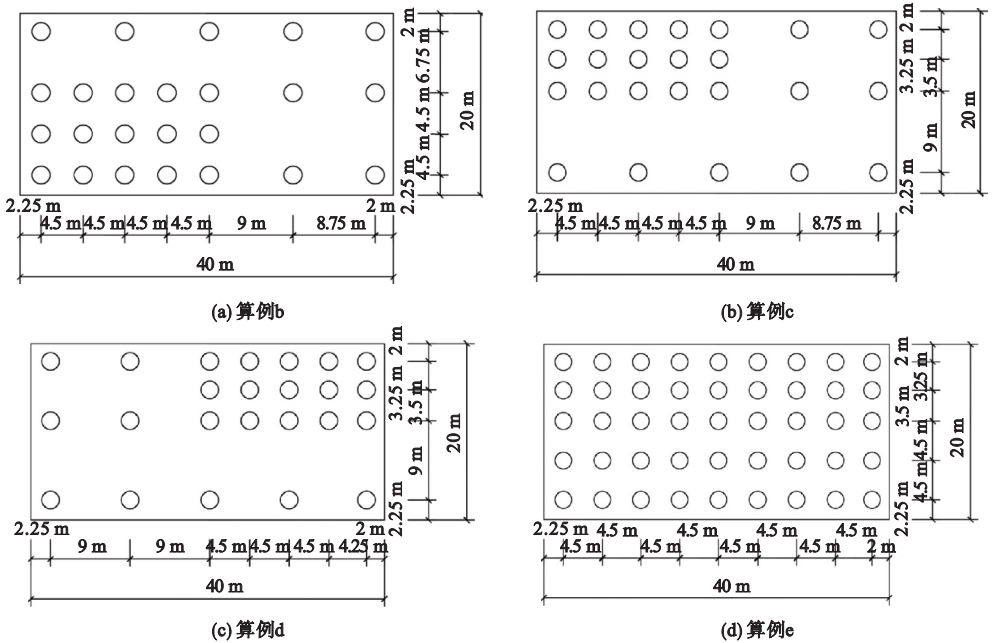


图8 算例b~算例e的工程桩平面布置

Fig. 8 Plane layout of engineering piles for example b to e

保持工程桩桩径、桩长及其他设计参数不变,定义工程桩置换率  $m$  为基坑内工程桩截面积之和与基坑底面积的比值,则算例a~算例f对应的置换率分别为0.94%,1.57%,1.57%,1.57%,2.83%,0%.其中算例b~算例d的置换率均为1.57%,但工程桩加密区(主楼位置)分别位于基坑中部、长边中部和基坑角部,位置不同,面积置换率一致.

#### 3.1 围护结构水平位移

图9为各算例中基坑长边中点和短边中点处围护结构的水平位移分布曲线.从图9可看出:①各算例围护结构水平位移沿深度均呈现为“弓”形分布,但随着工程桩置换率的增大,围护结构水平位移逐步减小,且最大点位置逐步提高,围护结构水平位移最大值可相差73.7%,再次证明了基坑内工程桩对

围护结构水平位移的影响. ②对于置换率相同的算例 b ~ 算例 d, 基坑短边中点处围护结构的水平位移相对接近, 而基坑长边中点处围护结构的水平位移则存在明显差异. 工程桩加密区位于基坑长边中部的算例 c 变形最小, 位于基坑中心部位的算例 b 略大, 而位于

基坑角部的算例 d 变形最大. 3 个算例中围护结构最大水平位移的差距可达 13.6%, 由此说明在置换率  $m$  相同的情况下, 工程桩加密区(主楼)位置对围护结构的水平位移有较大影响, 具体表现为加密区位置越靠近基坑长边中部, 位移越小.

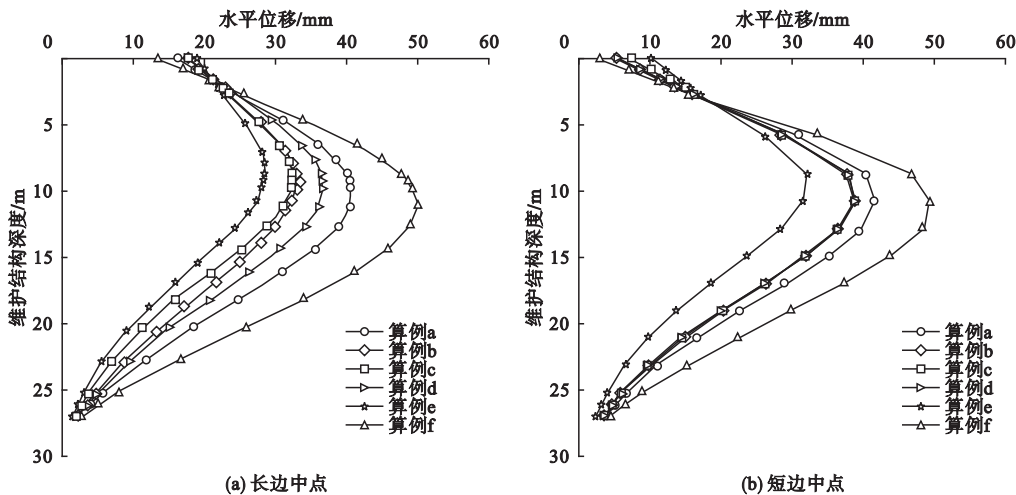


图 9 各算例围护结构水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of retaining structure in each example

### 3.2 围护结构弯矩

图 10 为各算例中基坑长边中点和短边

中点处围护结构的弯矩分布曲线.

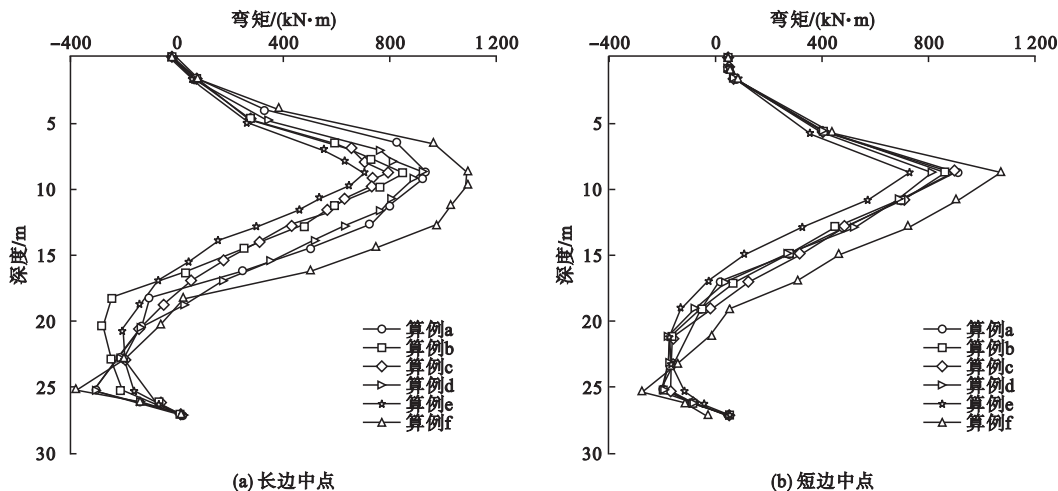


图 10 各算例基坑围护结构弯矩

Fig. 10 Bending moment of retaining structure in each example

由图 10 可见, 置换率对围护结构弯矩的影响规律与围护结构水平位移相似: ①随着工程桩置换率的增大, 围护结构弯矩逐步减小, 围护结构最大弯矩值可相差 39.7%. ②

对于置换率相同的算例 b ~ 算例 d, 基坑短边中点处的围护结构弯矩比较接近, 但基坑长边中点处围护结构弯矩则存在明显差异. 算例 c 弯矩最小, 算例 b 略大, 而算例 d 弯矩最

大.由此说明在置换率  $m$  相同的情况下,工程桩加密区(主楼)位置对围护结构的弯矩有较大影响,具体表现为加密区位置越靠近基坑长边中部,弯矩越小.

### 3.3 基坑周边地表沉降

图 11 为基坑外地表沉降等值线分布.从图 6(b)和图 11 可看出:①随着工程桩置换率

的增大,基坑周边地表沉降逐步减小,地表最大沉降量可相差 62%.②对于置换率相同的算例 b~算例 d,基坑周边地表沉降最大值也存在明显差异,说明在置换率  $m$  相同的情况下,工程桩加密区(主楼)位置对基坑周边地表沉降量有影响,具体表现为加密区位置越靠近基坑长边中部,周边地表沉降量越小.

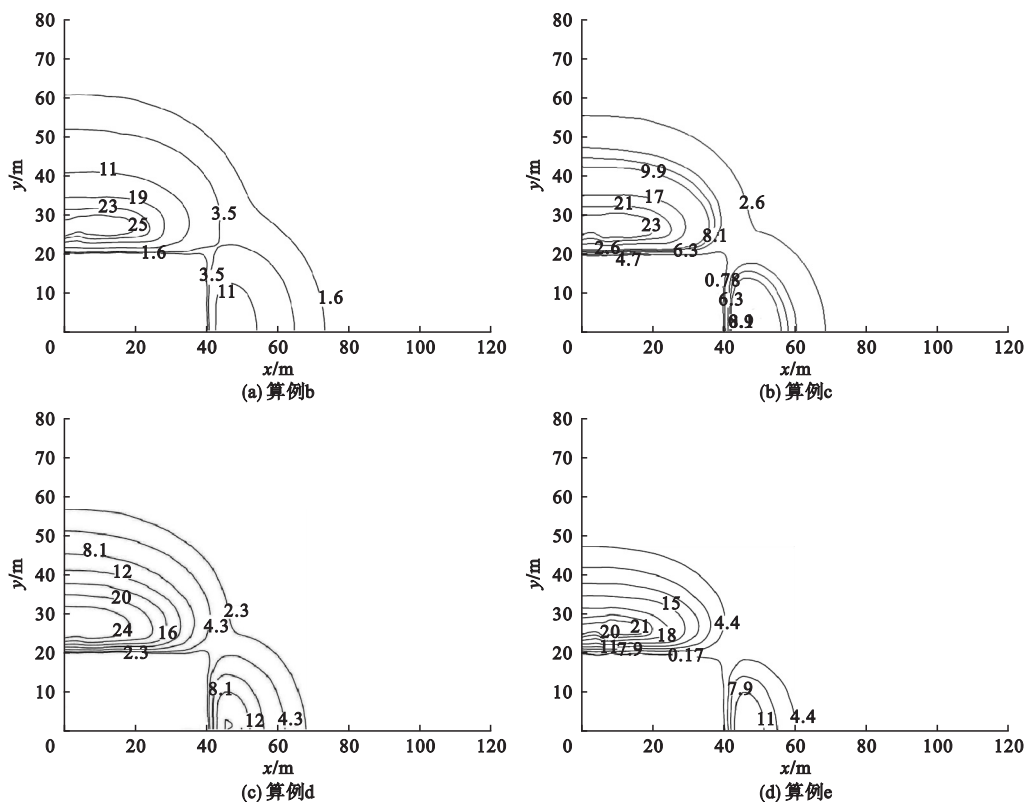


图 11 基坑外地表沉降等值线分布

Fig. 11 Contoure line of ground settlement outside foundation pit

## 4 结 论

(1)坑内工程桩的存在可以有效减小围护结构的水平位移值和弯矩值、基坑周边地表沉降量、沉降影响区范围以及基坑底隆起值.

(2)在坑内有工程桩的情况下,坑底隆起以各个工程桩为中心呈漏斗状分布.

(3)随着坑内工程桩置换率的提高,围护结构水平位移、弯矩以及周边地表沉降均表现为明显减小.

(4)在工程桩置换率相同的情况下,主楼(工程桩加密区)位置对围护结构的水平

位移、弯矩和地表沉降也存在一定影响,主楼位置在基坑边的中点附近区域时对围护结构的变形、内力及沉降控制比较有利.

(5)在基坑围护设计中,可根据基坑内工程桩的置换率与布置,优化基坑支护结构的刚度,以降低基坑支护成本,提高经济性.

### 参考文献

- [1] OU C Y, CHIOU D C, WU T S. Three-dimensional finite element analysis of deep excavations [J]. Journal of geotechnical engineering, 1996, 122(5):337-346.
- [2] 俞建霖,龚晓南.深基坑工程的空间性状分析[J].岩土工程学报,1999,21(1):21-25.



- (YU Jianlin, GONG Xiaonan. Spatial behavior analysis of deep excavation [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1999, 21(1):21-25.)
- [3] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程变形性状研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4):86-90.  
(YU Jianlin, GONG Xiaonan. Research on deformation of foundation-pit engineering[J]. China civil engineering journal, 2002, 35(4):86-90.)
- [4] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three dimensional effect for supported excavations in clay[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2007, 133(1):30-36.
- [5] IWASAKI Y, WATANABE H, FUKUDA M, et al. Construction control for underpinning piles and their behavior during excavation[J]. Géotechnique, 1994, 44(4):681-689.
- [6] 郑刚, 刁钰, 吴宏伟. 超深开挖对单桩的竖向荷载传递及沉降的影响机理有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6):837-845.  
(ZHENG Gang, DIAO Yu, WU Hongwei. Finite element analysis on mechanism of effect of extra-deep excavation on vertical load transfer and settlement of a single pile[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2009, 31(6):837-845.)
- [7] 徐枫, 魏建华, 吴超. 基坑开挖对坑内工程桩影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊2):1503-1506.  
(XU Feng, WEI Jianhua, WU Chao. Numerical analysis of influence of pit excavation on pile foundation[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2009, 5(S2):1503-1506.)
- [8] 杨敏, 逮建栋. 深开挖基坑回弹引起的坑中桩受力与位移计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(12):1730-1735.  
(YANG Min, LU Jiandong. A calculation of behavior of underpinning pile subject to excavation of deep foundation pit[J]. Journal of Tongji university(natural science edition), 2010, 38(12):1730-1735.)
- [9] 陈伟. 基坑开挖与降水对坑底工程桩影响的数值分析[J]. 结构工程师, 2011(5):140-145.  
(CHEN Wei. Numerical analysis of effect of dewatering and excavation on piles in a pit[J]. Structural engineers, 2011(5):140-145.)
- [10] 查甫生, 林志月, 崔可锐. 深开挖卸载条件下基坑应力和变形特性的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊1):484-488.  
(ZHA Fusheng, LIN Zhiyue, CUI Kerui. Numerical analysis of stress and deformation characteristics of foundation pits under deep excavation[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35(S1):484-488.)
- [11] 鲁宏. 考虑工程桩的存在对深基坑变形性状影响的有限元分析[D]. 天津:天津大学, 2004.  
(LU Hong, FEM analysis on deformation behavior of deep excavation considering foundation pile[D]. Tianjin:Tianjin University, 2004.)
- [12] 冯虎, 刘国彬. 考虑工程桩影响软土深基坑隆起破坏的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊2):314-320.  
(FENG Hu, LIU Guobin. Numerical simulation of failure mechanism of deep foundation pits in soft soil considering impact of piles[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(S2):314-320.)
- [13] 胡康俊, 丰土根, 张福海. 考虑工程桩影响的软土深基坑抗隆起稳定性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2015, 37(3):52-57.  
(HU Kangjun, FENG Tugen, ZHANG Fuhai. Analysis of basal heave stability of deep excavation in soft clays considering impact of foundation piles[J]. J of China three gorges univ. (natural science edition), 2015, 37(3):52-57.)
- [14] 郑刚, 张涛, 程雪松. 工程桩对基坑稳定性的影响及其计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊2):5-8.  
(ZHENG Gang, ZHANG Tao, CHENG Xuesong. Effect of foundation piles on excavation stability and its calculation[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(S2):5-8.)
- [15] 李承超, 周爱兆, 张静玉. 既有工程桩对深基坑力学变形特性影响分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(3):431-435.  
(LI Chengchao, ZHOU Aizhao, ZHANG Jingyu. Study of mechanical deformation behavior of deep foundation pits considering impact of piles[J]. Journal of Jiangsu university of science and technology (natural science edition), 2018, 32(3):431-435.)
- [16] 胡安峰, 陈博浪, 应宏伟. 土体本构模型对强度折减法分析基坑整体稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2011, 31(2):592-597.  
(HU Anfeng, CHEN Bolang, YING Hongwei. Influences of constitutive models on overall stability analysis of deep excavations using strength reduction method[J]. Rock and soil mechanics, 2011, 31(2):592-597.)
- [17] 王卫东, 徐中华. 基于强度折减法的圆形深基坑坑底抗隆起稳定性分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(5):195-201.  
(WANG Weidong, XU Zhonghua. Strength reduction approach for analyzing safety against basal heave of circular deep excavations[J]. Journal of building structures, 2010, 31(5):195-201.)
- [18] 俞建霖. 基坑性状的三维数值分析研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(4):65-70.  
(YU Jianlin. 3-D Numerical analysis on the behavior of excavation[J]. Journal of building structures, 2002, 23(4):65-70.)  
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)