

深开挖卸载条件下基坑应力和变形特性的数值分析

查甫生, 林志月, 崔可锐

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 随着工程建设的不断发展, 深基坑工程层见叠出, 而深基坑坑底一般会有密集的工程桩。目前, 国内外对于坑底工程桩的研究尚不全面, 实际工程中常因对此了解不深而开挖不合理产生工程事故或盲目打桩导致资源浪费。主要以坑底无桩和坑底群桩两种基坑为研究对象, 通过有限元软件 ABAQUS, 对比分析了开挖结束时墙后地表位移, 坑底土体隆起, 围护结构变形、弯矩以及侧向土压力的变化, 分别得出了深开挖卸载条件下基坑的变形性状和围护结构的应力特征; 最后考虑坑底单桩的模型, 分析了不同开挖步骤时桩土相对位移、桩身轴力和侧摩阻力的变化, 得出了深开挖卸载条件下桩基的受力特性。

关键词: 工程桩; 深开挖; 应力; 变形

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S1-0484-05

作者简介: 查甫生(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土工程与非饱和土方面的教学与科研工作。Email: zhafusheng@163.com。

Numerical analysis of stress and deformation characteristics of foundation pits under deep excavation

ZHA Fu-sheng, LIN Zhi-yue, CUI Ke-rui

(School of Resource and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: With the rapid development of engineering construction, more and more deep foundation pits have occurred, while there are usually intensive engineering piles in the bottom of deep excavation. At present, the researches on engineering piles in the bottom of excavation are not comprehensive at home and abroad, and construction accidents are often caused because of unreasonable excavation or wasting resources due to blind piling with little understanding of this in actual engineering. For two cases of no piles and pile groups in the bottom of excavation, the changes of ground displacement, soil uplift on the bottom of excavation, structural deformation, structural moment and lateral earth pressure are compared by means of the finite element software ABAQUS. The deformation behaviors of the foundation pit and the stress characteristics of retaining structures are investigated under deep excavation unloading conditions. Finally, the changes of pile-soil relative slip, pile shaft axial force and skin friction under various excavation steps are analyzed, and the stress characteristics of the piled foundation under excavation unloading conditions are gained.

Key words: engineering pile; deep excavation; stress; deformation

0 引言

随着国民经济的快速发展及高层建筑物与地下工程的不断涌现, 基坑工程向着大、繁、杂慢慢转变。近年来, 各种基坑事故层出不穷, 主要表现为基坑的大变形或者破坏, 造成了各方面的重大损失。在基坑开挖前, 可先在地下预定位置施工工程桩, 工程桩可以有效地控制基坑的变形。因而, 探讨坑底工程桩的性质与工程建设关系重大。对于基坑开挖与桩基的相互作用研究, 多局限于开会与基坑临近桩基的研究, 而涉及坑底工程桩的系统研究成果还比较少。

近些年, 国内外众多学者开始慢慢重视这个问题。

Iwasaki 等^[1]最早提出了坑底土体竖向回弹对坑底桩基的影响这一工程问题, 认为土体回弹会对桩产生例了向上的摩阻力而使桩身上拔。王旭东等^[2]用有限元法对比了有无工程桩对地表沉降和坑底隆起的影响, 结果表明, 有工程桩时能减小沉降和隆起, 特别是对减小隆起有明显的的作用。廖俊展等^[3]采用数值模拟的方法, 分析了抗浮抗拔桩对深基坑开挖性状的影响及在基坑开挖过程中桩体的受力特性, 得出逆作法施工

基金项目: 合肥工业大学科研发展基金项目 (2010HGJ0052)

收稿日期: 2013-03-02

相比顺作法可以明显减小坑底隆起。郑刚等^[4]通过有限元分析研究了超深开挖对单桩的竖向荷载传递及沉降的影响机理, 指出深基坑开挖由于其回弹和卸载效应可降低工程桩的承载力和轴向刚度。徐枫等^[5]采用有限元软件对基坑开挖时坑内工程桩的性态进行平面有限元分析, 研究了不同开挖工况、不同桩土接触条件以及不同位置处工程桩的性状, 结果为基坑开挖越深、桩土接触越光滑、工程桩离坑边越远时, 桩顶位移和桩身受力越大。杨敏等^[6]在不考虑桩身自重的情况下, 研究了刚性桩桩体回弹量和桩侧摩阻力分布, 提出了均质土中基坑开挖引起立柱桩回弹的计算方法。陈伟^[7]利用数值分析软件 ABAQUS 研究了大面积基坑开挖卸荷与降水对坑底群桩受力变形性状的影响, 并探讨了基坑开挖与降水对坑底群桩变形影响的规律, 结果表明, 采用不考虑降水的总应力法计算的结果偏大, 而采用考虑降水的有效应力法更符合工程实际。由以上分析来看, 国内外对基坑应力和变形以及坑底工程桩的研究已取得了颇为丰硕的成果, 并积累了大量工程经验。但大多都是定性分析, 或是定量分析不够系统, 在深开挖卸载条件下基坑的应力和变形特性这一重要问题上尚未得到统一认识。

本文利用 ABAQUS 软件, 主要建立了坑底无桩、坑底单桩和坑底群桩 3 种有限元模型。针对坑底无桩和坑底群桩模型, 计算了开挖结束时墙后地表位移, 坑底土体隆起, 围护结构变形、弯矩以及侧向土压力的变化, 并对比了两种模型的结果; 针对坑底单桩模型, 计算了不同开挖步骤时的桩土相对位移、桩身轴力和侧摩阻力的变化。

1 模型与参数

1.1 基坑变形与围护结构应力计算有限元模型

本计算中建立平面有限元模型, 模型尺寸为 $60\text{m} \times 100\text{m}$, 考虑对称性, 采用 $1/2$ 模型。一半的基坑开挖宽度 $B=20\text{m}$, 开挖深度 $H=12\text{m}$, 分 4 次开挖, 每次开挖 3m 。土体采用四节点平面应变单元 CPE4, 土体本构为修正的剑桥模型。本文采用的是上海地区土层参数, 主要参考文献[3]的资料, 对土层深度做了一定的修正。这种简化便于模型的建立和网格的划分, 对计算结果没有什么实质性的影响, 土质分布情况及计算参数见表 1 所示。假设土体饱和。

围护结构采用地下连续墙, 墙体深度 $h=24\text{m}$, 厚度 $t=1\text{m}$, 弹性模量为 $3 \times 10^7\text{kPa}$, 泊松比为 0.2, 重度为 25kN/m^3 , 采用实体单元 CPE4, 线弹性模型。

采用三道内支撑, 第一道支撑截面 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$, 第二、三道支撑截面 $600\text{mm} \times 600\text{mm}$, 三道支撑弹性模量均为 $2.0 \times 10^7\text{kPa}$, 泊松比为 0.2, 采用杆

单元 T2D2, 线弹性模型, 分别设置在地表以下 3m , 6m , 9m 处。

工程桩截面尺寸为直径 1000mm , 桩长 40m , 桩间距 4m , 桩的弹性模量为 $2.4 \times 10^7\text{kPa}$, 泊松比为 0.2, 桩的重度为 25kN/m^3 , 采用实体单元 CPE4, 线弹性模型。地连墙和土体之间、工程桩和土体之间均采用主从面面接触, 罚摩擦, 摩擦系数为 0.3; 地连墙和支撑之间为 Tie 约束。为了便于对比分析工程桩存在时对基坑变形的影响, 无工程桩时和有工程桩时的模型取相同的计算条件。无工程桩时, 有限元简化模型如图 1 所示。考虑工程桩时, 有限元简化模型如图 2 所示。

表 1 土层分布及剑桥模型参数

Table 1 Soil layers and parameters of Cambridge model

土层	层厚 (标高) /m	γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	ν	λ	κ	M/ϕ'	e_1
1	3(-3)	19.1	0.33	0.110	0.006	0.64(16.8°)	0.958
2	9(-12)	17.8	0.35	0.127	0.008	0.62(16.3°)	1.317
3	8(-20)	18.2	0.33	0.115	0.005	0.41(11.0°)	1.073
4	10(-30)	19.6	0.32	0.081	0.005	0.54(14.4°)	0.735
5	15(-45)	19.3	0.30	0.054	0.003	1.27(31.5°)	0.762
6	15(-60)	18.4	0.33	0.141	0.008	1.00(26.3°)	1.052

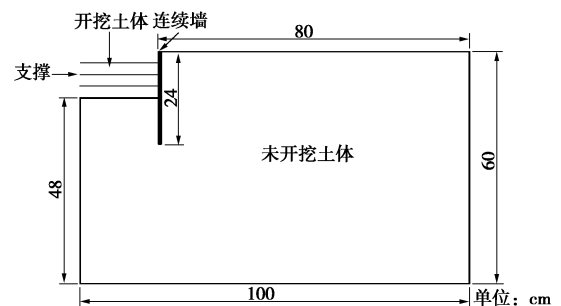


图 1 坑底无桩简化模型示意图

Fig. 1 Simplified model for pit without piles

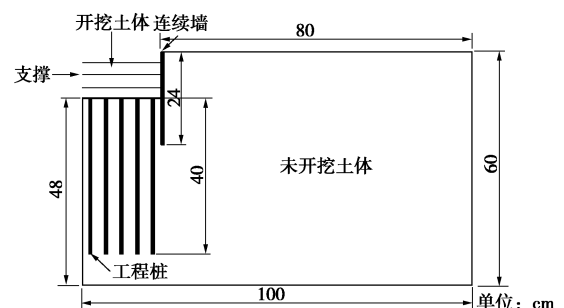


图 2 坑底群桩简化模型示意图

Fig. 2 Simplified model for pit with group piles

1.2 基桩应力计算有限元模型

采用简化的轴对称模型, 对称轴在模型最左侧, 桩、土、支撑以及地连墙材料与无桩和群桩情况均为相同。其中桩身与土体采用四节点轴对称实体单元

CAX4 模拟,连续墙及支撑均采用轴对称板单元 SAX1 单元模拟。坑底单桩简化模型示意图如图 3 所示。

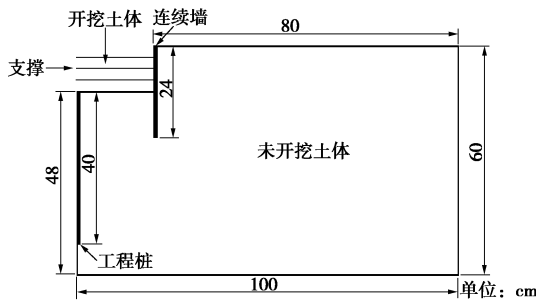


图 3 坑底单桩简化模型示意图

Fig. 3 Simplified model for pit with single pile

2 计算结果与分析

2.1 基坑变形与围护结构应力

(1) 墙后地表位移

基坑开挖结束时,墙后地表位移的变化曲线如图 4 所示。基坑周围地表主要以沉降为主,随着离基坑越来越远,沉降慢慢接近于零;对于坑底加桩的情况,沉降明显要小,地表沉降的影响范围也比无桩时小;另外,加桩时在基坑边缘,基坑周围土体甚至产生一定的抬升,这是由于加桩时土体绕地连墙底端流动,地下连续墙被抬升,地连墙和土体的摩擦作用带动坑外土体的上移。

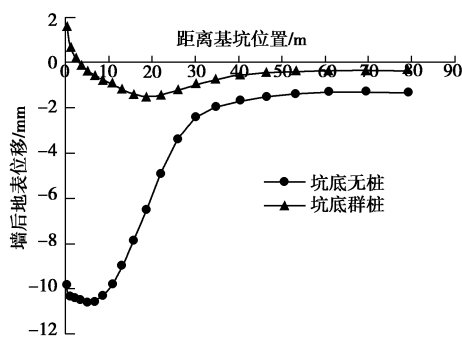


图 4 墙后地表位移的变化曲线

Fig. 4 Variation of displacement of ground surface behind underground diaphragm wall

(2) 坑底土体隆起

基坑开挖结束时,坑底土体隆起的变化曲线如图 5 所示,其中以基坑中心位置为零点。基坑中心位置的隆起值最大,对于坑底无桩情况,越往两边隆起越小;而工程桩的加固作用,显著减小了坑底的隆起值。

(3) 围护结构变形

基坑开挖结束时,地下连续墙水平位移随深度的变化曲线如图 6 所示,这里规定墙体向基坑内侧移动位移为负值。总体变化规律都是自上而下逐渐减小;3 m 以下时,加桩较无桩情况有显著的减小;对于 3 m 以上位置,由于没有加支撑,加桩时会导致地连墙有

一个初始的水平变形,所以此处的墙体位移大于无桩情况。

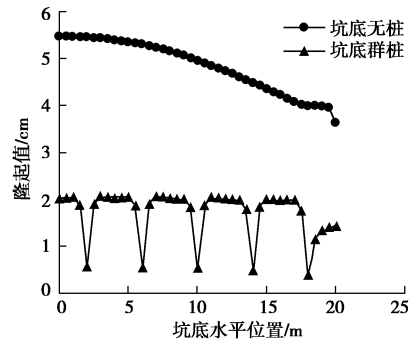


图 5 坑底土体隆起的变化曲线

Fig. 5 Variation of uplift displacement of pit bottom ground

(4) 围护结构弯矩

Day 进行平面分析时认为模拟截面厚度较小的围护墙时采用梁单元较实体单元更加精确^[8]。这里把连续墙替换为梁单元,其他条件不变。开挖结束时,地下连续墙弯矩随深度的变化曲线如图 7 所示,规定弯矩正值(基坑外侧)为受拉侧。墙体最大弯矩出现在坑底附近,工程桩对基坑开挖面以下土体具有加固作用,增强了对墙体底部的约束作用,致使墙体底部出现锚固弯矩,墙体最大弯矩比无工程桩时的弯矩大^[9]。

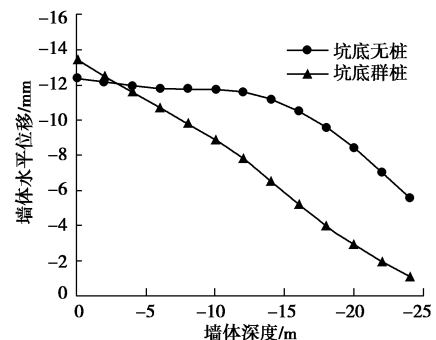


图 6 地下连续墙水平位移随深度的变化曲线

Fig. 6 Variation of horizontal displacement of underground diaphragm wall with depth

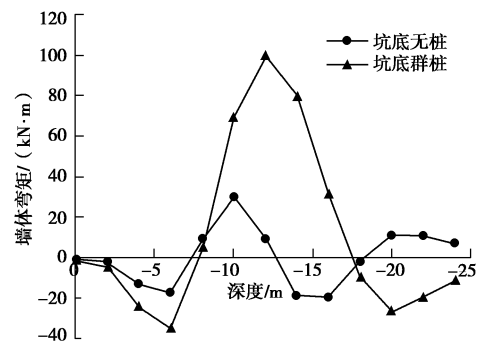


图 7 地下连续墙弯矩随深度的变化曲线

Fig. 7 Variation of moment of underground diaphragm wall with depth

(5) 墙后主动土压力

开挖结束时,墙后主动土压力随深度的变化曲线

如图 8 所示。坑底加桩会导致连续墙承受的主动土压力变大, 且随着深度的增加越来越明显。

(6) 墙前被动土压力

开挖结束时, 墙前被动土压力随深度的变化曲线如图 9 所示。总体来说, 坑底加桩会导致连续墙承受的被动土压力增大。

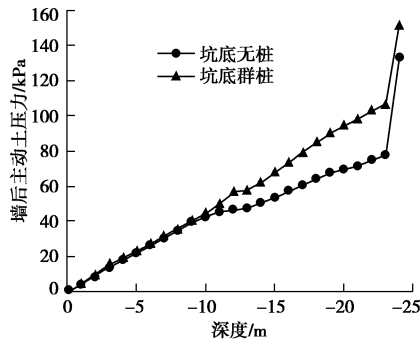


图 8 墙后主动土压力随深度的变化曲线

Fig. 8 Variation of active earth pressure with depth of underground diaphragm wall

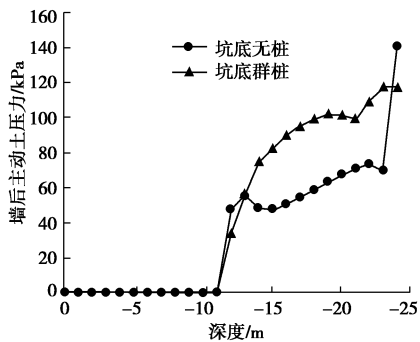


图 9 墙前被动土压力随深度的变化曲线

Fig. 9 Variation of passive earth pressure with depth of underground diaphragm wall

(7) 讨论

图 8, 9 中, 由于土与连续墙的接触, 靠近连续墙位置处的土压力无法精确获得, 所以才会出现图中所示的突变点。

由上述 6 个指标的变化可以看出, 坑底加桩可以有效减小墙后地表位移、坑底土体隆起和围护结构变形, 但是增加了基坑开挖面下部围护结构的弯矩以及墙前、墙后土压力, 这对围护结构的强度要求有一定限制, 所以加桩时要考虑工程桩和围护结构之间的协调性问题。

2.2 基桩应力

(1) 桩土相对位移

不同开挖深度时, 桩土相对位移随深度的变化曲线见图 10。在桩的顶部, 桩土相对位移最大, 随深度的增加, 慢慢变小, 由于侧摩擦力的存在, 桩土相对位移出现负值, 桩端位置的桩土相对位移近乎为零。

(2) 桩身轴力

不同开挖深度时, 桩身轴力随深度的变化曲线如

图 11 所示, 以拉为正。桩身轴力沿桩身至上而下先增大后减小, 这是因为桩顶附近一定深度范围内土压力较小, 导致桩土接触面法向应力不足, 侧摩阻力无法发挥, 而桩身中性点附近桩土相对位移接近于零, 轴力最大, 中性点以下主要为负摩阻力, 又削弱了桩身轴力。总体来说, 随着开挖深度的不断增加, 桩身轴力逐渐增大, 这是因为桩顶上覆土压力减小, 桩受到的拉应力越来越明显。

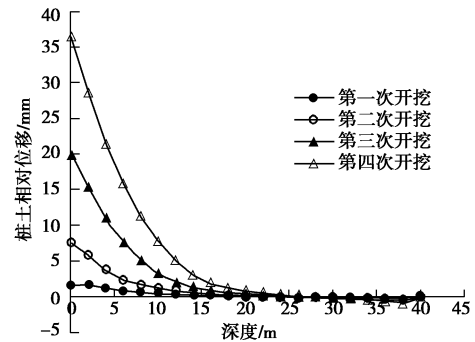


图 10 桩土相对位移随深度的变化曲线

Fig. 10 Variation of pile-soil relative displacement with depth of engineering pile

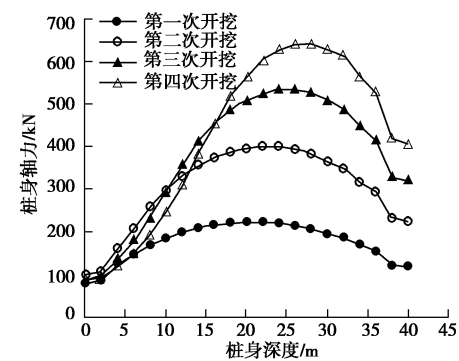


图 11 桩身轴力随深度的变化曲线

Fig. 11 Variation of axial stress distribution of engineering pile with depth

(3) 桩侧摩阻力

不同开挖深度时, 桩侧摩阻力随深度的变化曲线如图 12 所示。在主从接触分析中, 桩端底部节点的摩阻力无法精确模拟, 这是因为在基于连续介质力学的有限元分析中, 桩端并不可能发生真正的刺入变形,

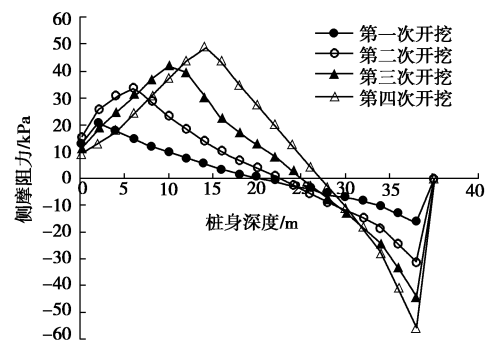


图 12 桩侧摩阻力随深度的变化曲线

Fig. 12 Variation of side friction of engineering pile with depth

在桩侧面和桩底面交接点桩和土有脱开的趋势^[10]。桩身上部承受向上的摩擦力，桩身下部承受向下的摩擦力，正摩擦阻力和负摩擦阻力都是先增大后减小，随着开挖深度的增加，中性点逐渐下移。工程桩的受力情况如图13所示。

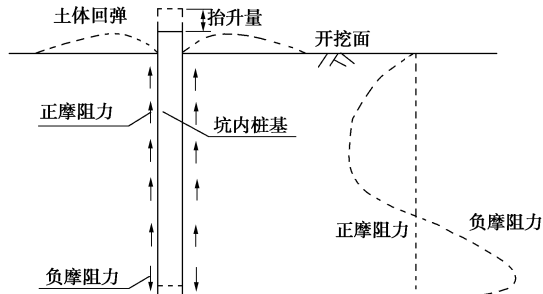


图13 工程桩的受力情况^[11]

Fig. 13 Analysis of stress of engineering pile^[11]

3 结 论

(1) 深开挖卸载会导致几种变形：基坑周围主要产生沉降，随着离基坑越来越远，这种变形逐渐减小；坑底土体产生隆起，基坑中心位置隆起最大；围护结构产生向坑内的位移，从上至下逐渐减小。对比有桩和无桩情况，工程桩可以使这几种变形明显减小。

(2) 工程桩对围护结构具有显著影响：连续墙的最大弯矩比无工程桩时大很多；主动土压力和被动土压力都比无桩时要大。说明加工程桩时要考虑围护结构的强度，不能盲目打桩。

(3) 对单桩模型，随着开挖深度的增加，桩土之间位移逐渐增大；桩身轴力有一定增大，且最大值逐步下移；桩身上部承受正摩擦阻力，下部承受负摩擦阻力，侧摩擦阻力中性点逐渐下移。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 王旭东, 黄力平. 基坑开挖中水泥土挡墙的变形分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994, 28(1): 25 - 30. (WANG Xu-dong, HUANG Li-ping. The deformation analysis of cement soil retaining wall in excavation using finite element method[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1994, 28(1): 25 - 30. (in Chinese))
- [3] 廖俊展, 黄茂松, 王卫东, 等. 设置抗浮抗拔桩深基坑的三维数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊1): 1370 - 1373. (LIAO Jun-zhan, HUANG Mao-song, WANG

Wei-dong, et al. 3D numerical simulation analysis of deep excavation enforced by uplift piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1370 - 1373.

- [4] 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, NG C W W. 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. (in Chinese))
- [5] 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 Jian-hua, 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. (in Chinese))
- [6] 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 Jian-dong. A calculation of behavior of underpinning pile subject to excavation of deep foundation pit[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(12): 1730 - 1735. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] DAY R A, POTTS D M. Modelling sheet pile retaining walls[J]. Computers and Geotechnics, 1993, 15(3): 125 - 143.
- [9] 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, 2003. (LU Hong. A FEM analysis of the influence of the foundation pile on the deformation behavior of deep excavation[D]. Tianjing: Tianjing University, 2003. (in Chinese))
- [10] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010. (in Chinese))
- [11] 胡琦, 凌道盛, 陈云敏, 等. 深基坑开挖对坑内基桩受力特性的影响分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1965 - 1970. (HU Qi, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min, et al. Study of loading characters of pile foundation due to unloading of deep foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1965 - 1970. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)