

侯文萃,陈能远,高洁.基坑排桩对建筑抗震性的影响分析[J].地震工程学报,2018,40(2):252-257.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.252

HOU Wencui, CHEN Nengyuan, GAO Jie. Influence of Foundation Pit Pile Rows on the Seismic Performance of Buildings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 252-257. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.252

基坑排桩对建筑抗震性的影响分析^①

侯文萃¹, 陈能远², 高洁²

(1. 吕梁学院建筑系, 山西 吕梁 033000; 2. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西 西安 710054)

摘要:以往对建筑抗震性影响因素的研究仅限于施工材料、技术手段等外部条件,忽略了基坑土体安全系数、基坑状态对建筑抗震性的影响,一定程度上削弱了建筑的抗震性能。本文从基坑排桩角度对建筑抗震性的影响展开分析,通过有限元强度折减法获取土体的安全系数与基坑状态的判断标准,在该标准下基于土体安全系数采用有限元强度折减法计算公式,获取各个土层计算参数。基于该参数使用 ABAQUS 有限元软件构建基坑排桩有限元分析模型(土体和桩体分别采用莫尔-库仑弹塑性模型和二维弹性模型)。实验采用所提分析方法,从基坑排桩排距、刚度两方面对建筑抗震性能进行分析。实验结果表明,当基坑排桩排距进行适当取值时,建筑抗震性越好;双排桩的刚度越大,建筑抗震性越好,且随着刚度的增加建筑抗震性能趋于平稳。

关键词: 基坑排桩; 建筑抗震性; 强度折减法; 有限元分析模型; 排距; 刚度

中图分类号: TU4 035

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)02-0252-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.252

Influence of Foundation Pit Pile Rows on the Seismic Performance of Buildings

HOU Wencui¹, CHEN Nengyuan², GAO Jie²

(1. Department of Architecture, Luliang University, Luliang 033000, Shanxi, China;

2. China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Previous studies on the factors influencing the seismic performance of buildings are confined to external conditions such as construction materials and technical methods. The influence of the safety factor of foundation soils and foundation pit conditions is often neglected, and this weakens the seismic performance of buildings. Therefore, in this study, the influence of foundation pit pile rows on the seismic performance of buildings is analyzed. Through the finite element strength reduction method, the safety factor of soil and the judging standards of the foundation pit condition were obtained, which helped to obtain the calculation parameter of each soil layer. Based on these parameters and the ABAQUS finite element software, the Mohr-Coulomb elastoplastic soil model and a two-dimensional elastic pile model were adopted to establish a finite element analysis model of pile rows in a foundation pit. An experimental analysis method was used to analyze the seismic performance of a building from the aspects of row spacing and stiffness of

① 收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 2015 年陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTZDSF03-03-01)

作者简介: 侯文萃(1984—), 女, 山西忻州人, 硕士, 助教, 研究方向: 岩土工程。E-mail: houwencui2005@163.com。

the foundation pit. The experimental results show that if the foundation pit pile row spacing is properly selected, the seismic performance of the building would be effective. The greater the stiffness of the double-row piles, the better the seismic performance of the building, which tended to be stable with the increase of piles stiffness.

Key words: foundation pit pile rows; seismic performance of building; strength reduction method; finite element analysis model; spacing; stiffness

0 引言

随着建筑工程技术与手段的持续更新,建筑的结构设计层出不穷,人们对于建筑的需求不仅局限于舒适程度,部分地震多发地区更注重建筑的抗震性能^[1]。建筑工程开工初期,基坑的稳定性直接影响建筑的抗震性能,基坑排桩以某种队列形式构成基坑支护结构,因此建筑的抗震性与基坑排桩有着密不可分的关系^[2]。由于双排桩具备防止基坑变形的能力,有利于维持基坑的稳定性,使得近几年其在基坑工程建设中的使用率较高,具有较大的研究价值,因此本文以基坑的双排桩为例研究其对建筑抗震性能的影响^[3]。以往对建筑抗震性的研究仅限于施工材料、技术手段等外部条件,忽略了土体安全系数、基坑状态的影响,不利于建筑抗震性能的研究^[4]。因此本文从基坑排桩角度出发,对某工程项目的基坑双排桩展开实验研究,分别从排距、刚度两方面探讨基坑双排桩对建筑抗震性的影响,以期为基坑建筑工程的施工提供有效的抗震依据,一定程度上提高建筑的抗震性。

1 基坑排桩对建筑抗震性的影响分析

1.1 有限元强度折减法计算理论

外荷载一定的基础上,土体内供应的抗剪强度最大值与外荷载于土内产生的实际剪应力之比,叫做有限元强度折减法^[5]。利用折减系数计算出土体强度参数(c, φ)的折减结果,当实际剪应力等于折减后土体供应的抗剪强度,这时仍保持折减计算不终止,则会出现土体失去平衡的状况,对建筑抗震性造成一定威胁^[6]。土体的安全系数 F_s 就是当土体处于极限平衡状态时相应的折减系数。

现代工程施工中一般将下述3种标准作为衡量基坑是否处于损坏状态的依据:

- (1) 将数值计算收敛作为判断标准。
 - (2) 将是否产生连续性的塑性贯通区作为判断标准。
 - (3) 将特征位置的位移拐点作为判断标准
- 根据判断标准(1)获取的安全系数可靠性较低,

因为收敛程度受到来自文章构建的有限元分析模型以及计算方法的影响,降低了结果的真实度,此标准不予采用^[7]。判断标准(3)与(2)相比,安全系数处于劣势,主要原因是特征部位点位移存在拐点不清晰、所处定位不能确定的弊端,导致极难获取^[8]。相比之下判断标准(2)具有可靠性,本文以此作为衡量标准对基坑损坏程度展开研究,并基于该破坏标准对建筑的抗震性能进行分析。

1.2 有限元强度折减法计算公式

基于上述分析的基坑损害衡量标准,本文依据土体安全系数采用有限元强度折减法计算公式,获取各个土层计算参数。强度折减法的研究与探讨是通过ABAQUS有限元软件完成的^[9]。基于对该软件的分析,通过场变量与温度变量的方法进行强度参数的折减计算^[10]。当土体处于修正剑桥模式的情况下,场变量与温度变量的改变不会影响参数原始屈服面大小 α_0 数值的改变^[11],所以发挥 Coulomb 屈服准则的作用,通过温度变量 F_s 实施土体材料强度的折减。式(1)对其进行了详细的描述:

$$\begin{cases} c_m = \frac{c}{F_s} \\ \varphi_m = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中:土体供应的黏聚力用 c 表示;内摩擦角用 φ 表示;将土体黏聚力与内摩擦角根据折减系数 F_s 实施折减获取 c_m, φ_m 。

基于对 Mohr-Coulomb 强度损坏准则的研究, F_s 可通过式(2)描述:

$$F_s = \frac{c_m + \sigma_s \tan\varphi_m}{c_s + \sigma_s \tan\varphi_s} \quad (2)$$

式(2)中,采用一致的折减比例对 c_m, φ_m 实施折减,那么将 F 描述成式(3):

$$F_s = \frac{c_m}{c_s} = \frac{\tan\varphi_m}{\tan\varphi_s} \quad (3)$$

其中:临界状态下的黏聚力可表示成 c'_s ;内摩擦角可表示成 φ'_s 。

基于有限元强度折减法计算公式获取基坑土层计算参数^[12],为有限元模型的构建提供了有利的数

据依据。

1.3 有限元分析模型

基坑开挖过程的模拟是在 ABAQUS 有限元软件基础上实现的^[13]。设置基坑形变使用平面应变模型,土体使用莫尔-库仑弹塑性模型^[14],桩体使用二维弹性模型,在忽略桩间土绕流的情况下,构建基坑双排桩有限元分析模型(图 1)。

土体使用 15 节点三角形单元,并且将桩体与板桩视为等效,使用线弹性梁单元作为连梁^[15],将 40 m×30 m 来对模型大小进行描述。用 $EI=1.4\times10^6$ kN·m²/m 表示前后排桩等效刚度,用 $EI=1.2\times10^6$ kN·m²/m 描述连梁等效刚度,双排桩的长度

均值是 22 m,1 m×0.8 m 是连梁的横截面积。表 1 详细列出了此模型的基坑土质参数与力学参数。

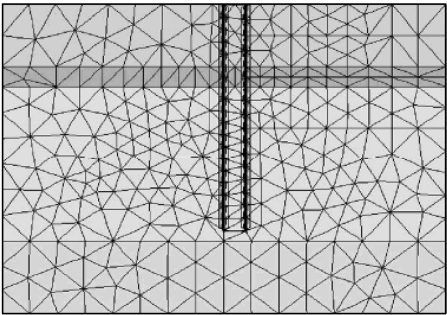


图 1 基坑双排桩有限元分析模型

Fig.1 Finite element analysis model of foundation pit pile rows

表 1 基坑土层计算参数

Table 1 Calculation parameters of soil layers in foundation pit

项目	厚度 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	泊松比 ν	模量 E /(kN·m ⁻²)
黏土	5	16.4	7.4	9	0.2	1 900
前排桩	3	18			0.21	7 000
后排桩	14	18.2			0.22	6 400
连梁	6	19			0.24	13 000

2 实验分析

采用本文所提分析方法对上海市某项目的 3A 期工程的基坑展开实验分析,分别从排桩的排距和刚度两个角度分析基坑双排桩对建筑抗震性的影响。

2.1 实验设置

该工程项目的基坑东面地表用杂填土进行覆盖;中间层部分用黏土以及含卵石黏土进行覆盖,其存在土质厚重、膨胀的特点,且与水混合后膨胀度降低;下层部分用全风化泥岩以及强风化泥岩进行填充。基于该基坑东面是城市道路,难以实施放坡操作,所以该工程将双排桩用于基坑支护。前排桩、后排桩、连梁共同构成了双排桩,5 m 是该基坑的前后排桩排距,3 m 是前后排桩之间的长度。前后排桩的详细参数如下:桩长平均值是 20 m、横截面的直径均值是 1 m,连梁截面的大小是 1 m×1 m,将 C30 混凝土作为排桩的材质。

2.2 实验结果分析

2.2.1 双排桩排距对建筑抗震性的影响

为验证基坑双排桩的排距对建筑抗震性的影响,设置排距为 3 m、5 m、7 m 及 9 m,并对其实施相关运算,将获取的数据制成折线图与表格(图 2、表 2)。图 2 对基坑排距与稳定安全系数关系进行了描述,表 2 介绍了不同排距塑性区变形分析结果。

分析图 2 能够看出,排距越大并不能代表其所在基坑的安全系数越大,当排距在 3~5 m 间时产生最大的稳定安全系数,当排距为 9 m 时稳定安全系数最低。分析表 2 能够看出,排距是 3 m 时后排

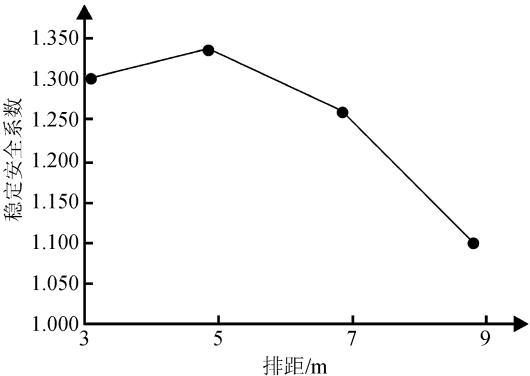


图 2 排距与稳定安全系数关系

Fig.2 Relationship between the row spacing and the stability safety factor

表 2 不同排距塑性区变形分析结果

Table 2 Analysis results of plastic zone deformation with different row spacing

方案	排距 /m	塑性区贯通位置 (相对后排桩)	破坏模式
1	3	后 2.1 m	顶部拉裂
2	5	后 0.7 m	内部剪切
3	7	后 1.0 m	内部剪切
4	9	桩间	顶部拉裂

桩与塑性区贯通位置的长度值为最大,这种情况下双排桩结构发挥了一堵墙的作用,导致顶部的土体拉裂直至损坏;当排距是 9 m 时塑性区贯通处于双排桩的中间部分,双排桩对土体的作用力较小,同样导致土体顶部拉裂直至损坏。综上所述,当排距处

于适当的数值时才能最大限度地发挥排桩的作用,基坑稳定性就越强,建筑的抗震性也越好。因此只有排距取值适当时,才能获取最佳的建筑抗震性。

图 3、图 4 对不同排距情况下前后排桩水平位移、桩后土压力进行了详细的描述。

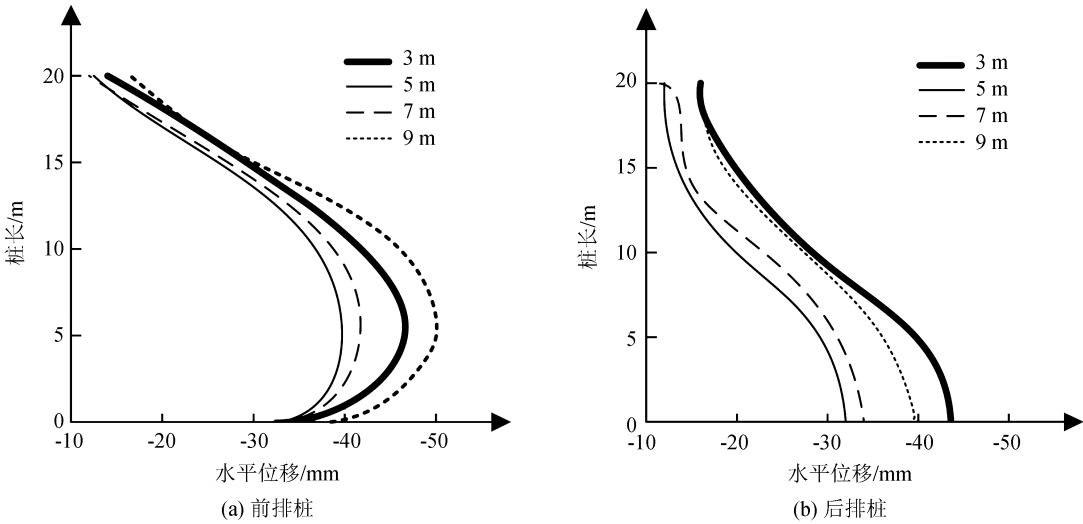


图 3 不同排距前后排桩水平位移

Fig.3 Horizontal displacement of the front and rear piles with different row spacing

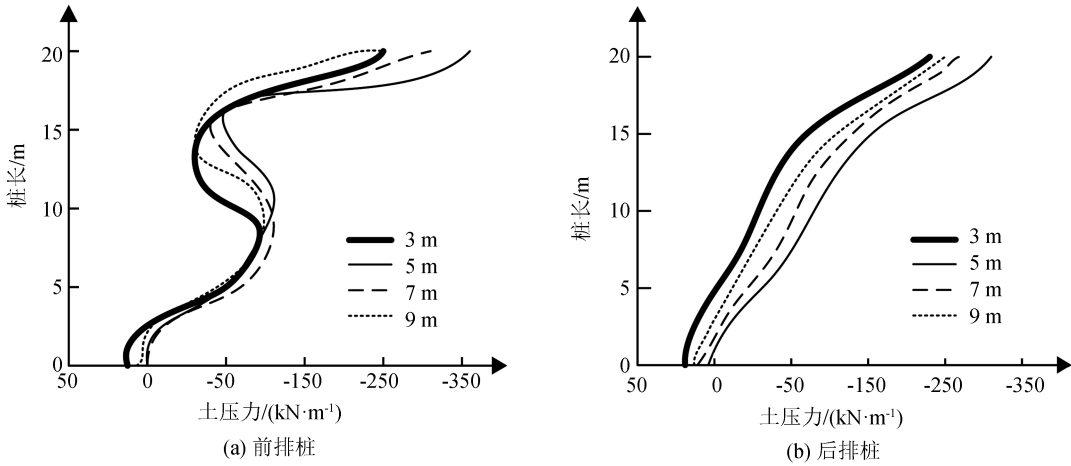


图 4 不同排距前后排桩桩后土压力

Fig.4 Soil pressure behind the front and rear piles with different row spacing

分析图 3 能够看出,在排距分别为 3 m、5 m、7 m 及 9 m 时,前后排桩水平位移值相差较小;在排距是 3 m、9 m 的情况下,排桩的水平位移较大。分析图 4 能够看出,当排距是 3 m、9 m 时双排桩的桩后土压力较小;当排距是 5 m、7 m 时双排桩的桩后土压力较大。其原因主要是排桩的水平位移越小基坑的稳定性越好,也就是说基坑的稳定性越好承受的土压力就越大。同样的,当排距取值适当时,能够获取最佳的基坑稳定性,此时建筑的抗震性较

好。实验结果表明,当基坑双排桩排距的取值过大或过小时,建筑抗震性较差;当基坑双排桩排距进行适当取值时,建筑抗震性较好。

2.2.2 双排桩刚度对建筑抗震性的影响

为验证基坑双排桩的刚度对建筑抗震性的影响,设置刚度为 $0.5EI$ 、 $1.0EI$ 、 $4.0EI$ 及 $10.0EI$,并实施相关运算,将获取的数据制成折线图与表格(图 5、表 3)。图 5 对基坑刚度与稳定安全系数关系进行了描述,表 3 介绍了不同刚度塑性区变形分析结果。

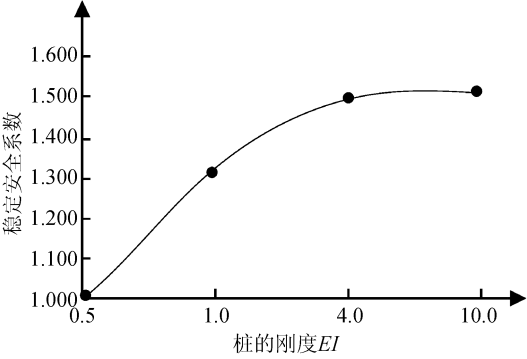


图 5 刚度与稳定安全系数关系

Fig.5 Relation between stiffness and stability safety factor

表 3 不同刚度塑性区变形分析结果

Table 3 Deformation analysis results of plastic zone with different stiffness

方案	双排桩 刚度 EI	塑性区贯通位置 (相对后排桩)	破坏模式
1	0.5	后 2.0 m	顶部拉裂
2	1	后 0.78 m	内部剪切
3	4	后 0.5 m	内部剪切
4	10	后 0.47 m	内部剪切

分析图 5、表 3 能够看出,当排桩刚度是 $0.5EI$ 时,安全系数最小;当排桩刚度是 $10.0EI$ 时,安全系数达到最大值,且处于不增加不减少的情况,初步断定排桩的刚度越大,基坑的稳定性越强。分析表 3 能够看出,在排桩刚度是 $0.5EI$ 的情况下,后排桩对于塑性区贯通长度较大,仅能产生微弱的支护作用,导致土体顶部拉裂直至损坏;在排桩刚度较大的情况下,双排桩附近的土体先屈服于双排桩,后排桩对于塑性区贯通长度慢慢变小,直至位于双排桩中间部位,形成内部剪切。由于基坑稳定性越强建筑的抗震性越好,因此得出,当双排桩刚度较大时,能够获取最好的建筑抗震性,且随着刚度的增大,建筑抗震性不会无限度增加,处于不变状态。

图 6、图 7 对不同刚度情况下前后排桩水平位移、桩后土压力进行了详细的描述。

分析图 6 能够看出,随着排桩刚度的增大,双排桩变形的状况越来越不明显,当排桩刚度增加到一定程度时,双排桩的水平位移无明显下降的趋势。分析图 7 能够看出,随着排桩刚度数值的上涨,双排

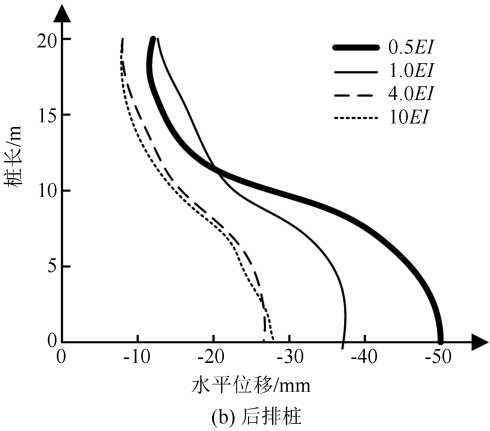
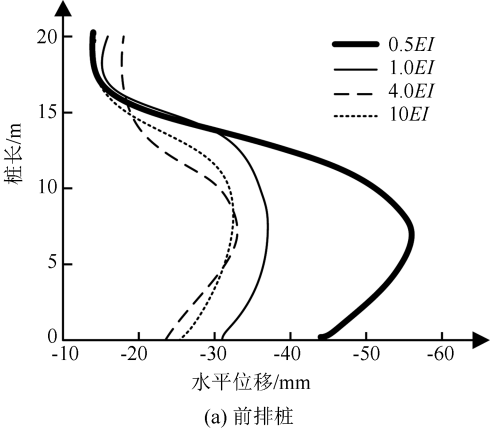


图 6 不同刚度前后排桩水平位移

Fig.6 Horizontal displacement of the front and rear piles under different stiffness

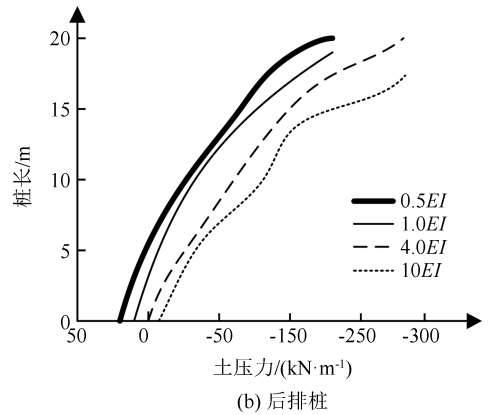
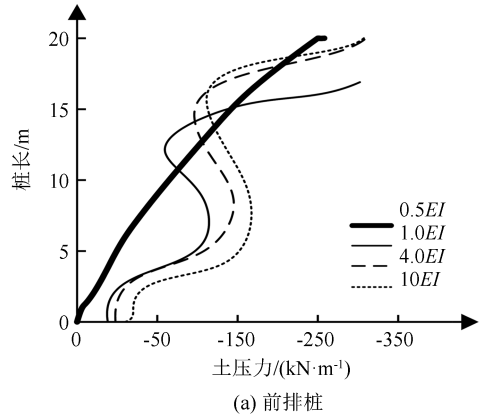


图 7 不同刚度前后排桩桩后土压力

Fig.7 Soil pressure behind the front and rear piles under different stiffness

桩承受土压力的能力也逐步加大,但增加到一定数值时其能力趋于不变状态,不再增加。由于双排桩承受土压力的能力越好,基坑的稳定性就越大,建筑的抗震性越好,则此时能够获取最佳的建筑抗震性。实验结果表明,双排桩的刚度越大,建筑抗震性越好,且随着刚度的增加建筑抗震性能趋于平稳。

3 结论

本文通过有限元强度折减法以及 ABAQUS 有限元软件,对基坑排桩对建筑抗震性的影响进行分析,得出当基坑排桩排距过大或过小时建筑抗震性越差;当基坑排桩排距进行适当取值时建筑抗震性越好;双排桩的刚度越大,建筑抗震性越好,且随着刚度的增加建筑抗震性能趋于平稳。本文方法获取的建筑抗震性分析结果可为建筑工程提供可靠的施工依据,使得基坑双排桩的研究具有实际应用价值。

参考文献(References)

- [1] 古海东,杨敏.考虑土拱效应的疏排桩支护基坑内力和变形分析[J].岩土力学,2014,35(12):3531-3540.
GU Haidong, YANG Min. Analysis of Internal Forces and Displacement of Pit Supporting Structure with Scattered Row Piles Considering Soil Arching Effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3531-3540.
- [2] 邹力,胡伟明,李雷雷.成层土条件下基坑支护结构稳定性的可靠性分析[J].四川建筑科学研究,2014,40(4):163-166.
ZOU Li, HU Weiming, LI Leilei. Anti-overturning Stability Analysis of Supporting Structure of Excavation under Condition of Multi-layers of Soil[J]. Sichuan Building Science, 2014, 40(4): 163-166.
- [3] LIANG G U. Study on the Load Bearing Mechanism of Double-Row Piles Supporting System in Deep Foundation Pit[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2014, 30(1): 108-114.
- [4] 俞海波,王红雨,王卫东,等.排桩与土钉墙联合支护基坑变形数值模拟[J].长江科学院院报,2017,34(3):96-99.
YU Haibo, WANG Hongyu, WANG Weidong, et al. Numerical Simulation on Deformation of Excavation Pit Supported by Row Piles and Soil Nailing[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 96-99.
- [5] 浦春林,雷秋生,李苏春,等.单支点排桩结合双排桩在基坑支护中的应用[J].建筑科学,2015,31(9):104-107.
PU Chunlin, LEI Qiusheng, LI Suchun, et al. Application of Single Fulcrum Row Pile Combined Double-row Piles in Pit[J]. Building Science, 2015, 31(9): 104-107.
- [6] 周勇,张康康.软弱夹层对深基坑水平位移影响的数值模拟分析[J].建筑科学与工程学报,2017,34(3):9-15.
ZHOU Yong, ZHANG Kangkang. Numerical Simulation Analysis of Influence of Soft Interlayer on Horizontal Displacement of Deep Foundation Pit[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(3): 9-15.
- [7] 张家国,肖世国.圆形深基坑排桩框架支护结构算法[J].冰川冻土,2016,38(4):915-921.
ZHANG Jiaguo, XIAO Shiguo. A Calculation Method of Retaining Piles with Circular Beams for Round Deep Foundation Excavations[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 915-921.
- [8] 么伦强,牛志伟,侯世超.地震高烈度区尾矿坝抗震有限元分析[J].水利水电技术,2017,48(2):45-49.
YAO Lunqiang, NIU Zhiwei, HOU Shichao. Seismic Finite Element Analysis on Tailings Dam in High Seismic Intensity Area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 45-49.
- [9] 郭院成,李永辉,周亮.排桩复合土钉支护结构受力变形机理分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(3):692-697.
GUO Yuancheng, LI Yonghui, ZHOU Liang. Mechanism Analysis on Strength and Deformation of Row Piles and Soil Nail Composite Supporting Structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(3): 692-697.
- [10] 陈占鹏,高伟,李永辉,等.排桩复合土钉支护结构在深基坑工程中的应用[J].建筑科学,2016,32(9):114-118.
CHEN Zhanpeng, GAO Wei, LI Yonghui, et al. Application of Pile Composite Soil Nailing Support in Deep Pit Slope[J]. Building Science, 2016, 32(9): 114-118.
- [11] 方光秀,王少东,赵石范.高层建筑深基坑人工挖孔排桩支护结构的设计与施工[J].建筑技术,2014,45(3):249-251.
FANG Guangxiu, WANG Shaodong, ZHAO Shifan. Design and Construction of Manual Hole Digging Pile Supporting Structure in Deep Foundation Pit of High-rise Building[J]. Architecture Technology, 2014, 45(3): 249-251.
- [12] 周勇,魏嵩琦,朱彦鹏,等.兰州地区地铁车站深基坑开挖对邻近地下管道的影响分析[J].兰州理工大学学报,2015,41(6):120-125.
ZHOU Yong, WEI Songqi, ZHU Yanpeng, et al. Influence of Excavation of Deep Foundation Pit for Subway Station in Lanzhou Area on Adjacent Underground Pipeline[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015, 41(6): 120-125.
- [13] 马怀发,张坤,王立涛.混凝土坝抗震安全评价指标和方法研究[J].水利水电技术,2017,48(5):110-119.
MA Huaifa, ZHANG Kun, WANG Litao. A Preliminary Study on Performance-based Seismic Safety Evaluation Index of Concrete Dams[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 110-119.
- [14] HU J. Research on the Influence of Excavation of Deep Foundation Pit to Adjacent Existing High-speed Railway Bridge Pile Foundations Stability[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(6): 12-17 and 22.
- [15] 程雪松,郑刚,邓楚涵,等.基坑悬臂排桩支护局部失效引发连续破坏机理研究[J].岩土工程学报,2015,37(7):1249-1263.
CHENG Xuesong, ZHENG Gang, DENG Chuhan, et al. Mechanism of Progressive Collapse Induced by Partial Failure of Cantilever Contiguous Retaining Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1249-1263.