

排桩复合土钉支护结构受力变形机理分析*

郭院成¹,李永辉¹,周亮²

(1. 郑州大学 土木工程学院,郑州 450001;2. 重庆市建筑科学研究院,重庆 400000)

摘 要:排桩复合土钉支护结构是近年来在基坑工程实践中得到成功应用的一种新型支护形式,为研究其受力变形机理,在工程案例分析基础上,采用有限元软件建立排桩复合土钉支护结构三维数值模型,模拟基坑分步开挖工况,对排桩侧移、坑后地表竖向沉降、坑底土体隆起变形、土钉轴力及桩身弯矩等进行了研究分析。结果表明:排桩复合土钉支护结构中土钉起着“弱锚杆”作用,相对于纯排桩支护结构,改变了排桩的变形和受力性状;相对于纯土钉支护结构,排桩复合土钉支护结构中土钉轴力峰值较小且靠近基坑侧壁,土钉受排桩-面层系统的拉拔作用,钉头处轴力较大。研究成果可为排桩复合土钉支护结构的设计、施工提供理论参考。

关键词:排桩复合土钉;基坑支护;数值模拟;受力变形机理

中图分类号:TU476 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)03-0692-06

Mechanism Analysis on Strength and Deformation of Row Piles and Soil Nail Composite Supporting Structure

Guo Yuancheng¹,Li Yonghui¹,Zhou Liang²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P.R. China; 2. Chongqing Construction Science Research Institute, Chongqing 400000, P.R. China)

Abstract: Row piles and soil nailing composite supporting structure is a new type of pit supporting form in application in recent years. In order to study the stress and deformation mechanisms of the composite supporting structure, one project case was analyzed. Then, non-linear 3D models were built using finite element analysis software to stimulate the horizontal displacement of the pile, earth surface setting and horizontal displacement behind pit, pit bottom upheaval, pile axial force and pile moment concerning the contact between soil and pile as well as the contact between nail and soil. From the results, soil nails act as the “weak anchors” in the row piles and soil nail composite supporting structure, which has changed the initial mechanics and deformation status of row piles; compared with soil nail supporting structure, the maximum value of soil nail axial force is smaller and its place is near pit lateral wall, soil nail is in tension and nail tip force is very big. Relevant results got from this study can well serve the optical design and field construction of row piles and soil nail composite supporting structure theoretically.

Keywords: row piles and soil nailing composite supporting structure; pit supporting; numerical stimulation; stress and deformation mechanism

0 引言

排桩复合土钉支护是在普通间距排桩桩间设置一列土钉的新型复合支护形式,主要适用于周边环境不允许设置较长预应力锚杆,但对于变形有较高要求的基坑工程,也可用于开挖范围内存在较厚

* 收稿日期:2016-08-03(修改稿)
作者简介:郭院成(1965-),男,河南辉县人,博士,教授,主要从事基坑支护、地基处理等领域教学与科研工作。
E-mail:guoyuancheng@163.com

素(杂)填土层的基坑支护工程^[1]。排桩复合土钉支护结构不仅具有良好的变形控制性能,且经济、施工便捷,相对于内支撑支护形式,避免了内支撑对基坑开挖及地下结构施工的不利影响。^[2]

目前,对于疏排桩复合土钉墙支护体系研究较多。郑少河等^[3]基于工程监测结果,研究了土钉墙代替内支撑并与稀疏灌注桩组合的基坑支护技术的适用性;吴忠诚等^[4]提出了疏排桩-土钉墙支护技术,并对其土压力问题进行了研究;杨敏、刘斌等^[5-8]研究了疏排桩复合土钉支护结构的支护机理、破坏模式及计算理论。然而,对于排桩复合土钉支护结构,虽在一些基坑工程中得到成功应用^[9-10],但其受力变形机理尚未见相关文献阐述,这不利于该支护技术的发展及在工程实践中的推广应用。

基于此,本文通过工程实例分析,采用ABAQUS有限元软件建立三维数值模型,对基坑的分步开挖进行数值模拟,较为系统地探讨排桩复合土钉支护结构受力变形机理。研究成果将为此类基坑支护工程的设计、施工提供理论参考。

1 工程案例分

郑州某深基坑工程位于郑州市龙子湖高校园区湖心环路与湖心一路交叉口,基坑设计开挖深度为15.6 m。该工程场地属于黄河冲积平原区,地貌单一。场地表面为耕地,地形较平坦,勘探深度80 m范围内主要为第四纪全新世、晚更新世沉积的地层。基坑开挖深度内土层及其概况如表1所示。

表1 基坑挖深范围内土层概况

Table 1 Overview of the soils in the scope of foundation pit

层号	名称	层厚 /m	c_u /kPa	φ_u /(°)	$E_{s0.1-0.2}$ /MPa
	粉土夹粉砂	2.6	11.7	17.3	9.0
②	粉砂夹粉土	3.4	6.0	21.8	12.0
② ₋₁	粉土	1.1	12.1	15.2	5.6
③	粉质黏土夹粉土	2.3	11.6	7.0	4.5
④	中砂	4.0	0	30.0	22.0
⑤	粉土夹粉质黏土	1.1	12.5	15.5	10.5
⑥	粉砂	3.1	2.0	25.0	18.5

根据场地环境条件及工程地质情况,该基坑支护工程设计采用上部放坡、下部排桩复合土钉支护形式。排桩直径为600 mm,长度为16 m,间距为

1.5 m;土钉设置4排,排距为2 m、长度分别为15 m、14 m。该基坑支护剖面示意图如图1所示。

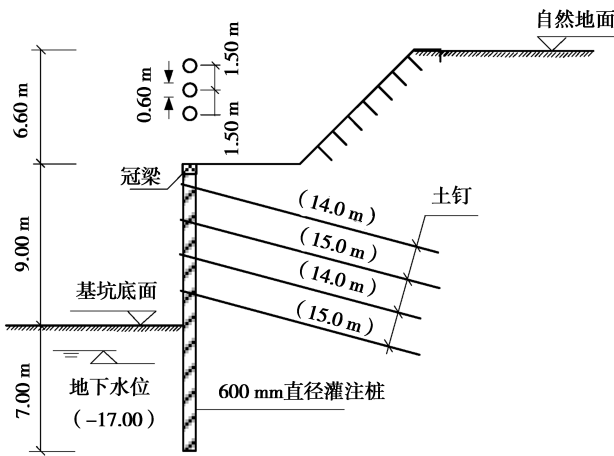


图1 基坑支护剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foundation pit support profile

该基坑工程实施过程中,通过在桩体内预埋测斜管对排桩侧移进行了监测,其结果如图2所示。由图可知,随着基坑开挖深度增加,排桩侧移逐渐增大,开挖完成后,变形量逐渐趋于稳定,整体上排桩侧移量较小,表明排桩复合土钉支护具有较好的变形控制能力,土钉的存在对排桩的变形具有一定的约束作用,在减小其侧移量的同时,使其分布曲线呈现向坑后回敛的现象,这与纯排桩的弯曲型侧移曲线有所不同。

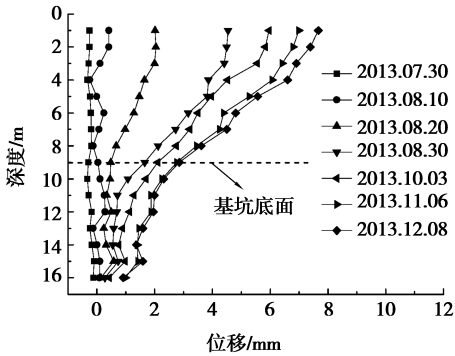


图2 排桩水平位移实测曲线

Fig. 2 Measured horizontal displacement curves of row pile

表2为基坑开挖完成后土钉轴力监测结果。由表可知,基坑中下部土钉轴力最大,这与土钉墙中土钉轴力沿深度变化规律^[11]基本一致。

表2 开挖至坑底后土钉轴力监测平均值

Table 2 Average measured axial forces of soil nails

位置	第1排	第2排	第3排	第4排
轴力/kN	64.58	135.53	182.31	176.54

2 数值模拟分析

根据实际工程应用的成功案例,建立排桩复合土钉支护结构三维有限元数值模型,模拟分析基坑分步开挖工况,对桩体的侧移、桩后土体的竖向沉降及水平侧移、坑底土体隆起、土钉轴力、桩身弯矩等受力变形性状进行系统研究。

2.1 数值模型与计算参数

为简化分析将土钉设置为水平向构件,计算模型如图 3 所示。排桩中心间距为 1.5 m,桩长为 18 m,桩径为 800 mm,排桩嵌入土体 9 m;基坑开挖 9 m,分 6 步开挖,每次开挖 1.5 m,完成一步开挖后设置一层土钉和面层,土钉长度为 9 m,面层厚 100 mm。

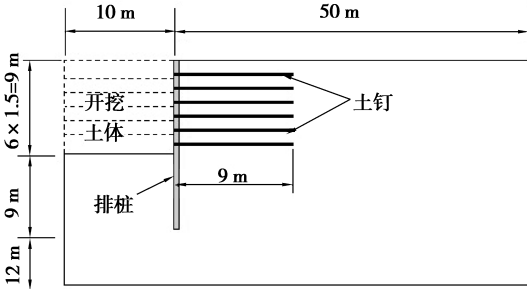


图 3 排桩复合土钉支护计算模型

Fig. 3 Calculation model of row piles and soil nailing composite supporting structure

采用单层均质土体进行数值计算,土体本构采用修正剑桥模型,考虑到排桩复合土钉支护结构在软弱土层中应用,参考文献[12]进行土体参数取值,如表 3 所示。

表 3 土体参数

Table 3 Parameters of soil

重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 ν	λ	κ	M	e_0	e_1
18	0.35	0.15	0.01	1.2	1.2	3.0

排桩、面层、土钉均采用弹性本构模型进行模拟,排桩和面层为实体单元,土钉采用线性梁单元来计算,支护结构参数取值如表 4 所示。

表 4 支护结构参数

Table 4 Parameters of supporting structures

部件 名称	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比 ν
桩体	25	24 000	0.2
土钉	25	27 000	0.202
面层	25	10 000	0.25

2.2 计算结果与分析

2.2.1 排桩水平变形

图 4 为不同开挖深度 H 下排桩的水平侧移曲线。由图可知,排桩的水平侧移随着开挖深度的增加而增大,且整体上在开挖深度较小时表现为以弯曲变形为主,而开挖完至第 4 步后,排桩侧移有较明显的回敛,表现出弯剪型变形特征,这与工程实测的规律较为一致,表明随着土钉逐步施加并发挥作用,通过面层对桩体产生类似锚杆的作用。

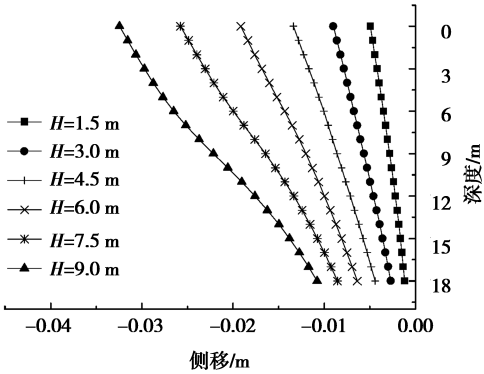


图 4 各开挖步下排桩的水平侧移曲线

Fig. 4 Horizontal displacements of pile at different excavation steps

2.2.2 坑后地表沉降变形

如图 5 所示,距离基坑一定范围内,坑后土体呈现“上抬”现象,每步开挖引起的沉降曲线形状大致相同,开挖至最后,土体沉降的最大值位于土钉的尾部附近。坑后土体出现上台现象的原因主要有两方面:一方面为桩体和土体之间存在摩擦,当开挖卸载时桩体回弹带动桩后邻近土体上抬;另一方面土钉通过面层和排桩联成一个整体,当开挖卸载引起桩体回弹时会带动土钉的上移,进一步增大桩后土体的上抬量。

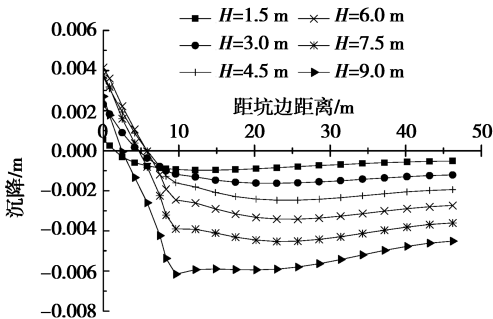


图 5 各开挖步下坑后地表沉降曲线

Fig. 5 Ground surface settlement curves at different excavation steps

2.2.3 坑底隆起变形

如图 6 所示,随着基坑开挖深度的增加,坑底

土体隆起量逐渐增大,前几个开挖步中坑底土体隆起值增幅较大,后续开挖步中隆起值的增量逐渐减小。引起坑底土体隆起的主要原因为土体开挖卸载引起开挖区土体本身的回弹,开挖卸载引起支护结构的侧移,以及坑后土体的变形进而对坑内土体产生挤压作用。

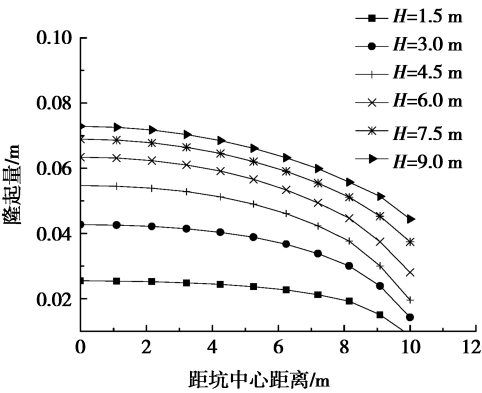
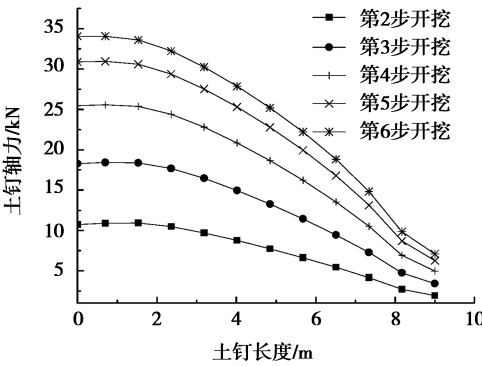


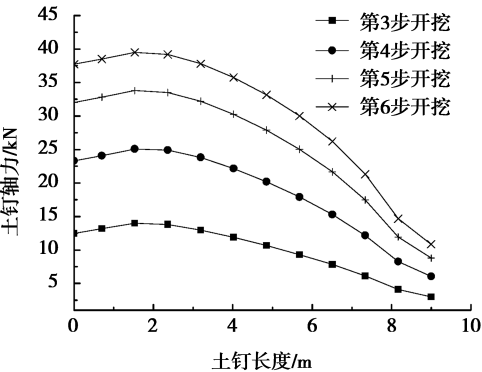
图6 各开挖步下基坑坑底隆起变形曲线
Fig. 6 Bottom uplifts of foundation pit at different excavation steps

2.2.4 土钉轴力

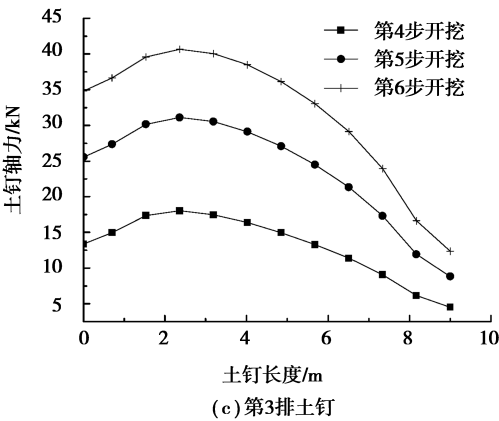
排桩复合土钉支护结构中各排土钉轴力随着基坑开挖的变化规律如图7所示。由图可知,土钉轴力随着开挖深度的增大而增大,在同一开挖步下,距离基坑开挖面越远,土钉轴力值的增大幅度越小。



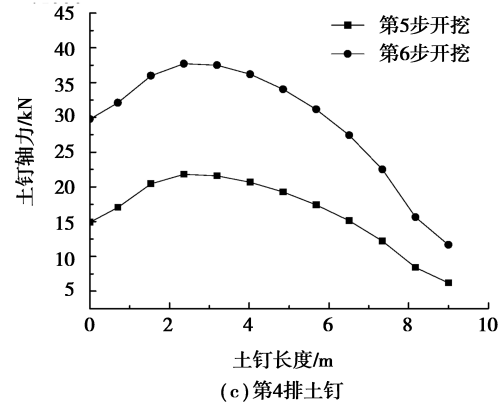
(a) 第1排土钉



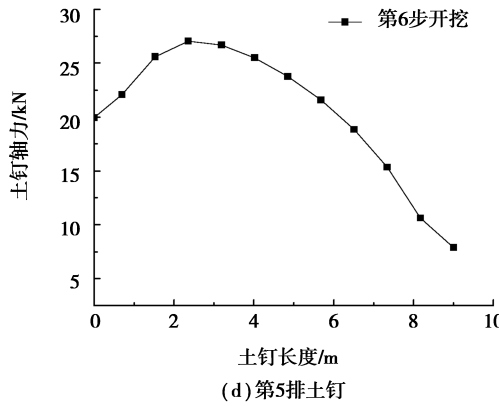
(b) 第2排土钉



(c) 第3排土钉



(d) 第4排土钉



(e) 第5排土钉

图7 各排土钉轴力分布曲线

Fig. 7 Axial force distribution curves of each nail

图8所示为基坑开挖至9m时,排桩复合土钉支护结构中各排土钉的轴力大小分布情况。对比相同条件下纯土钉支护各排土钉的轴力大小分布情况(如图9所示),排桩复合土钉支护结构中各排土钉轴力最大值点靠近基坑侧壁,且钉头部位轴力值较大。此外,除第1排土钉外,其与各排土钉轴力峰值均小于纯土钉支护。主要原因为该复合支护结构中由于排桩的存在,排桩分担了较大部分的土压力,并有效减小了支护体系的侧移,因此,其土钉轴力较小;同时,土钉和排桩通过面层的联系

形成整体,排桩的侧向变形会对土钉产生一定的拉拔作用,因此,其土钉钉头处轴力较大。

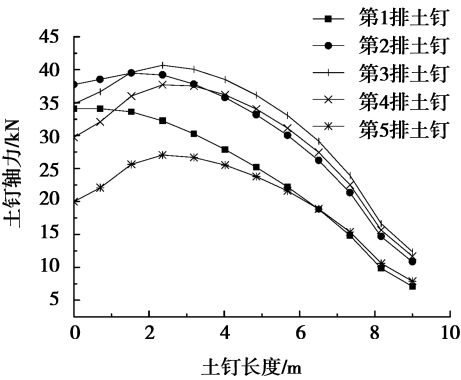


图 8 排桩复合土钉中各排土钉轴力分布特征
Fig. 8 Distribution curves of each nail's axial forces of row piles and soil nail composite supporting structure

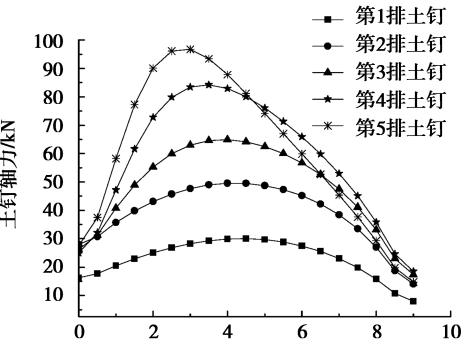


图 9 纯土钉支护中各排土钉轴力分布特征
Fig. 9 Distribution curves of each nail's axial forces of soil nailing supporting structure

2.2.5 排桩弯矩

图 10 为排桩复合土钉支护结构中排桩的弯矩随基坑开挖深度的增加而变化的情况。对比相同条件下纯排桩支护结构中排桩的弯矩图(如图 11 所示),排桩复合土钉支护结构中,未设置土钉的第 1 步开挖工况下,排桩承受负弯矩,后继开挖步中,土钉逐渐发挥作用,排桩弯矩在土钉位置处出现明显转折点,并逐渐出现正弯矩。随着开挖深度及相应水平侧移的逐渐增加,土钉作用得以更充分发挥,排桩正、负弯矩值均有所增大,且正、负弯矩最大值点均随着开挖的进行而下移。总体上,排桩复合土钉支护结构中排桩最大弯矩较纯排桩支护结构减小很多,且在基坑开挖面附近处弯矩较小。

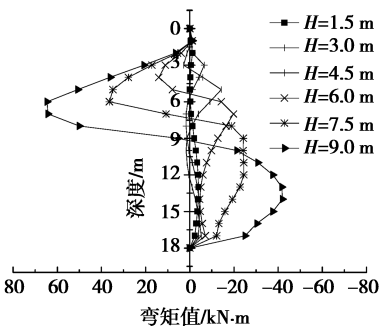


图 10 排桩复合土钉支护中排桩弯矩分布曲线
Fig. 10 Moment of piles under row piles and soil nail composite supporting structure

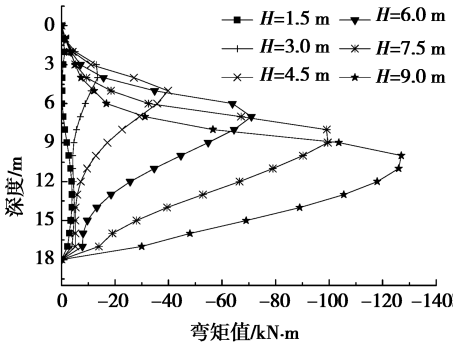


图 11 纯排桩支护中排桩弯矩分布曲线
Fig. 11 Moment of piles under row piles supporting structure

3 结论

(1)复合支护体系中,排桩、土钉和土体能较好地作为统一整体协同工作,土钉对土体的加固效果明显。

(2)排桩复合土钉支护结构中,土钉起着“弱锚杆”作用,对排桩产生较大的约束力,使桩体顶部侧移变形回敛,整体侧移曲线表现出弯剪型变形曲线特征。

(3)排桩复合土钉支护结构中,土钉轴力峰值较纯土钉支护中减小,且轴力峰值点位置靠近基坑侧壁,土钉受到排桩-面层系统拉拔作用,土钉钉头轴力较大。

(4)排桩复合土钉支护结构中,土钉的存在改善了排桩的受力状态,排桩在坑底以上受正弯矩,坑底以下受负弯矩,弯矩零点位置接近于开挖面附近,且较纯排桩支护结构,排桩最大弯矩值大幅度减小。

参考文献(References)

- [1] 河南省住房和城乡建设厅. 河南省基坑工程技术规范(DBJ41/139—2014)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Housing and Urban-Rural Construction Department of Henan Province. Henan technical code of foundation excavations (DBJ41/139-2014) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [2] 张家国, 肖世国, 邹力, 等. 砂卵石地层圆形深基坑排桩支护结构受力特征[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1603-1610. (Zhang Jiaguo, Xiao Shiguo, Zou Li, et al. Mechanical Characteristics of Retaining Piles with Circular Beams for Round Deep Foundation Pit in Sand-Cobble Soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6): 1603-1610. (in Chinese))
- [3] 郑少河, 阚志强. 土钉墙与稀疏灌注桩组合在基坑工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增2): 1704-1707. (Zheng Shaohu, Kan Zhiqiang. Application of compound support technology of soil nailing wall and sparse filling piles in a foundation excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(Supp.2): 1704-1707. (in Chinese))
- [4] 吴忠诚, 朱志荣, 吕晶, 等. 疏排桩-土钉墙支护技术土压力特性研究与计算[J]. 广州建筑, 2009, 37(5): 18-23. (Wu Zhongcheng, Zhu Zhirong, Lü Jing, et al. Calculation and analysis of the soil pressure behind the scattered pile-soil-nailed wall protection structure [J]. Guangzhou Architecture, 2009, 37(5): 18-23. (in Chinese))
- [5] 杨敏, 刘斌. 疏排桩-土钉墙组合支护结构工作原理[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 126-133. (Yang Min, Liu Bin. Retaining characteristics of composite structure with scattered piles and soil nailing [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 126-133. (in Chinese))
- [6] 刘斌, 杨敏. 疏排桩-土钉墙组合支护结构的疏排桩计算模型[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 159-164. (Liu Bin, Yang Min. Computational model for scattered row plies of composite retaining structure with scattered row plies and soil nailing wall [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 159-164. (in Chinese))
- [7] 杨敏, 孙宽, 古海东, 等. 疏排桩-土钉墙组合支护结构离心模型试验研究-稳定性与破坏模式[J]. 结构工程师, 2012, 28(1): 94-99. (Yang Min, Sun Kuan, Gu Haidong, et al. Centrifuge modeling of composite structures with scattered row piles and soil nailing-stability and failure mode [J]. Structural Engineers, 2012, 28(1): 94-99. (in Chinese))
- [8] 刘斌, 杨敏. 疏排桩-土钉墙组合支护结构的计算参数与支护特性[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增1): 1372-1376. (Liu Bin, Yang Min. Analysis of parameters and retaining characteristics of composite structure with scattered piles and soil nailing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Supp.1): 1372-1376. (in Chinese))
- [9] 占宏, 余连根. 土钉结合沉管灌注桩复合支护的应用[J]. 低温建筑技术, 2004(4): 75-76. (Zhan Hong, Yu Liangen. Application of soil nailing and tube-sinking cast-in-situ pile composite supporting structure [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2004(4): 75-76. (in Chinese))
- [10] 徐国忠. 软土基坑土钉与排桩联合支护的设计[J]. 江苏建筑, 2007(4): 52-53. (Xu Guozhong. Design of soil nailing combined with piles in retaining and protecting for soft foundation excavation [J]. Jiangsu Construction, 2007(4): 52-53. (in Chinese))
- [11] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (Liu Guobin, Wang Weidong. Foundation pit engineering handbook (Second edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [12] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (Xu Zhonghua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese))