

文章编号:1673-2049(2018)04-0120-07

# 土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系监测与分析

宋建学<sup>1</sup>, 李力剑<sup>1</sup>, 全元通<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中化地质郑州岩土工程有限公司, 河南 郑州 450011)

**摘要:**对郑州市某深基坑工程的施工全过程进行现场监测,通过分析坡顶水平位移、冠梁水平位移和支护桩深层水平位移等监测数据,研究土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系的变形规律;结合工程实例建立了有限元模型,将实测数据和数值分析结果进行对比,验证模型及参数适用性,进而总结了内支撑位置、锚索锁定值对支护结构变形的影响。结果表明:土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系中坡顶水平位移主要由上部土钉墙控制;该体系支护桩深层水平位移曲线大体呈 P 形,最大位移出现在内支撑附近,产生于钢筋混凝土内支撑形成强度之前;随内支撑标高上移,桩身最大位移点向基坑底面方向移动,在复合支护体系中内支撑标高的确定应以基坑外被保护对象的位置为依据;桩身最大水平位移所在位置随锚索锁定值的增大而下移,且最大水平位移值减小;当场地的工程地质条件较好时,可以通过适度增大锚索锁定值来控制支护结构水平位移。

**关键词:**地基工程;水平位移;现场监测;数值模拟;复合支护;土钉墙;桩锚

中图分类号:TU470

文献标志码:A

## Monitoring and Analysis on Composite Support System with Soil Nailing Wall-pile Anchor-inner Bracing

SONG Jian-xue<sup>1</sup>, LI Li-jian<sup>1</sup>, TONG Yuan-tong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. CCG Zhengzhou Geotechnical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450011, Henan, China)

**Abstract:** The field measurement of the whole construction process of a deep foundation pit engineering in Zhengzhou city was carried out. Through analysis of monitoring data such as the horizontal displacement of slope top and top beam, deep horizontal displacement of support pile, the horizontal displacement law of composite support system with soil nailing wall-pile anchor-inner bracing was studied. Combined with the engineering example, the finite element model was established, the measured data and numerical analysis results were compared to verify the applicability of model parameters, and then the influences of inner bracing position, anchor lock value on the deformation of support structure were summarized. The results show that the horizontal displacement of slope top is mainly controlled by the upper soil nailing wall in the composite support system with soil nailing wall-pile anchor-inner bracing. The deep horizontal displacement curve of the support pile in this system is generally “P” shape, and the maximum displacement occurs near the inner bracing, which is produced before forming strength of reinforced concrete inner bracing. As the elevation of inner bracing moves upward, the maximum displacement of pile moves towards the bottom of foundation pit. In the composite support

收稿日期:2017-11-02

基金项目:郑州市科技领军人才计划项目(112PLJRC353)

作者简介:宋建学(1967-),男,河南洛阳人,教授,工学博士,E-mail:13633843010@126.com。

system, the determination of the elevation of inner bracing should be based on the location of protected objects outside the foundation pit. With the increase of anchor lock value, the maximum horizontal displacement position of pile body moves down and the maximum horizontal displacement decreases. When the engineering geological condition of the site is better, the horizontal displacement of support structure can be controlled by increasing the anchor lock value appropriately.

**Key words:** foundation engineering; horizontal displacement; field measurement; numerical simulation; composite support; soil nailing wall; pile anchor

## 0 引言

对于周边环境复杂的深、大基坑,常规的支护形式很难满足支护强度和变形控制要求,复合支护体系越来越多地被尝试应用于实际工程<sup>[1-20]</sup>。当基坑周边环境条件复杂时,内支撑支护体系特别是现浇钢筋混凝土内支撑体系成为工程师的首选。以郑州地区为代表的中硬场地土条件下 12~18 m 基坑的主导型支护形式是上部土钉墙支护加下部桩锚支护。上部采用土钉墙支护结构可以减少基坑上部荷载,明显降低造价,下部采用桩锚支护结构可以有效控制基坑变形。当基坑深度较大,特别是基坑深部有软弱土层不足以形成强大的坑内被动土压力,不能有效避免“踢脚”破坏时,就需要在基坑深部加强支护。同时,受相邻地下工程设施的影响不能施工锚杆时,在基坑深部设置内撑可以解决这一问题,土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系是一种新的探索。

为了推动复合支护体系的应用,国内学者已有一些探索和总结。聂伟<sup>[7]</sup>对土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系的施工方法进行了阐述,肯定了该体系控制基坑变形的效果;马平等<sup>[8]</sup>通过数值分析,将土钉墙、桩锚及二者复合支护结构的计算结果进行对比,对现行的复合结构设计思路进行评价;张丽丽等<sup>[9]</sup>以北京某复合支护工程为例,对桩锚复合土钉支护中土钉的内力及变化规律进行了研究,认为土钉-桩锚复合支护体系中土钉的受力略小于同样条件下纯土钉墙支护土钉的受力,内力变化基本一致;宋建学等<sup>[10]</sup>建立了土钉墙-桩锚复合支护体系模型,通过与现场实测结果对比,认为该支护形式中土钉墙高度不宜超过 6 m;靳军伟等<sup>[11]</sup>针对某基坑工程存在电力隧道和防空洞等复杂情况进行研究,提出了采用土钉-桩锚复合支护体系处理该类深基坑的方法;黄志全等<sup>[12]</sup>建立三维有限元模型,对双排桩复合土钉支护下基坑在开挖过程中的变形破坏和支护结构受力演化规律进行了分析;吴昌长<sup>[18]</sup>依托某基坑工

程实例,研究了桩锚-内撑复合支护体系下深基坑开挖变形情况,探讨了桩锚-内撑复合支护的特点和工作机理。

迄今为止,对于复合支护体系的研究主要集中于土钉-桩锚支护<sup>[8-17]</sup>和桩锚-内撑支护<sup>[18-19]</sup>,而对于土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系的研究尚不充分,针对该复合支护体系的相关研究落后于工程需求<sup>[21-26]</sup>。本文依托某深基坑工程实例,通过支护结构变形现场监测和数值分析,研究土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系中不同支护方式之间协调变形、协同工作的机理,分析内支撑位置及锚索锁定值对支护结构变形性状的影响,深入讨论钢筋混凝土内支撑在控制变形方面的作用,为相似条件下的设计和施工提供参考。

## 1 现场试验

### 1.1 工程概况

工程实例为 1 栋写字楼及商业裙房项目,写字楼采用框架核心筒结构,商业裙房采用框架结构。该项目基坑大致呈长方形,平面尺寸为 106 m×65.9 m,基坑开挖深度为 15.9 m,基坑设计使用时间为 18 个月。

### 1.2 支护方案

本工程基坑安全等级为一级,采用土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系,上部土钉墙高度为 4.4 m,在-4.8 m 处设置平台,平台宽 920 mm,土钉墙按坡度系数 0.2 进行放坡,设置 2 排土钉,长度为 6 m,水平间距为 1.5 m。支护桩为钢筋混凝土灌注桩,桩径 1 200 mm,钢筋笼长度为 22.5 m,下部 5.5 m 为素混凝土桩。共设置 2 排预应力锚索,标高分别为-6.1,-9.6 m,长度为 22 m,水平间距为 1.5 m,锚索孔径为 150 mm,入射角度 15°,第 1 排锚索锁定值为 260 kN,第 2 排锚索锁定值为 210 kN。钢筋混凝土内支撑设置在-12.3 m(支撑顶标高)处,截面尺寸为 900 mm×900 mm,采用 C35 混凝

土,基坑典型支护剖面见图 1。

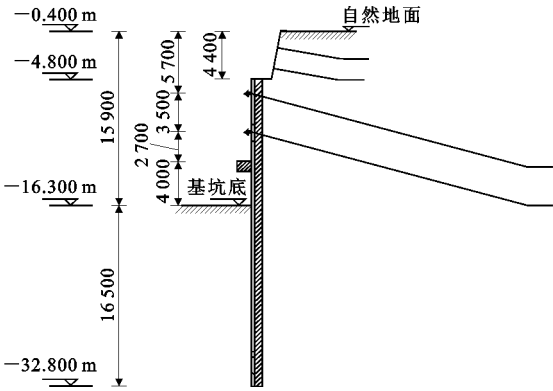


图 1 基坑典型支护剖面图(单位:mm)

Fig. 1 Typical Support Profile of Foundation Pit (Unit:mm)

1.3 现场监测及数据分析

以基坑典型支护剖面为例,坡顶、冠梁水平位移随时间变化曲线见图 2,3,各施工节点对应支护桩深层水平位移曲线见图 4。

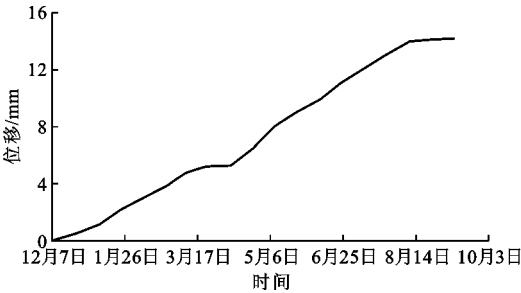


图 2 坡顶水平位移

Fig. 2 Horizontal Displacement on Slope Top

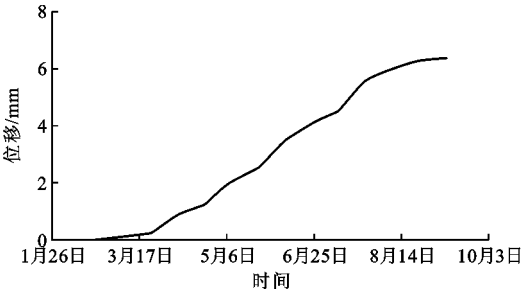


图 3 冠梁水平位移

Fig. 3 Horizontal Displacement of Top Beam

土钉墙坡顶水平位移随基坑开挖持续增大。第 1 排和第 2 排锚索施工完毕后,坡顶水平位移的增长速率没有明显变化,这表明锚索对坡顶水平位移的控制效果并不明显,坡顶水平位移主要由上部土钉墙设计参数控制。锚索施工完毕到内支撑施工完毕这段时间内,坡顶水平位移几乎呈线性增长,说明钢筋混凝土内支撑形成强度之前,其控制变形能力

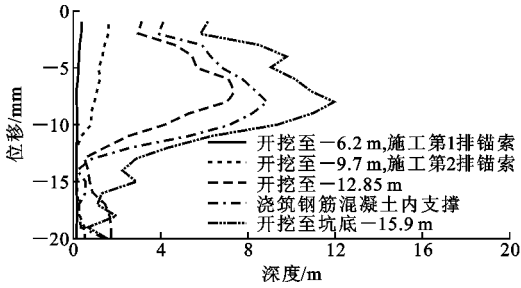


图 4 各施工节点下深层水平位移

Fig. 4 Deep Horizontal Displacements Under Different Construction Nodes

很弱。为了避免水平位移增长超过预警值,建议在这段时间内限制基坑开挖速度,或者采用跳仓开挖方式,适当增加技术间歇,待钢筋混凝土内支撑形成强度后再开挖下层土方。

冠梁水平位移在内支撑施工前发展速率较快,内支撑形成强度后速率明显减小。这表明内支撑对冠梁水平位移有较明显的控制效果。

比较图 2,3 可知,冠梁施工完毕后,在水平方向上,坡顶和冠梁已有约 4.6 mm 位移差。水平位移差随基坑开挖不断增大,到基坑开挖完毕,水平位移差约 7.8 mm。因此,若工程周边环境复杂、管线密集(通常集中在地面以下 5 m 范围内),应当在土钉墙和冠梁的设计中考虑基坑开挖对周边建筑物基础和管线的影响,提高冠梁标高,不低于相邻被保护建筑物的基础和邻近被保护管线的中轴线标高。

支护桩深层水平位移曲线大致呈 P 形,且最大位移出现在约 -8 m 处,即内支撑标高附近。这与支护设计最初的设想有些偏差,也表明钢筋混凝土内支撑限制变形是被动的,即在钢筋混凝土内支撑形成强度且支护桩发生变形后,才能充分发挥作用;另外,与钢管支撑不同,钢筋混凝土内支撑无法施加预应力,只有支护桩发生一定水平位移与内支撑紧密接触后,作用才能表现出来。此过程中,基坑开挖引起主动土压力增大,造成了内支撑标高附近水平位移较大。对照现场监测可以确认,该标高处水平位移主要产生于内支撑形成强度之前。

2 数值分析

2.1 有限元模型的建立

采用 ABAQUS 有限元软件对基坑开挖过程中基坑土体和支护结构的变形进行模拟。模型的尺寸为长 90 m,深 60 m;开挖部分的尺寸为长 29.15 m,深 15.9 m。模型中土体采用 4 节点平面单元,选用 Mohr-Coulomb 本构模型;桩体、锚索等采用线弹性

模型;桩土之间采用摩擦型接触进行模拟。土层与结构参数见表 1,2,基本分析模型如图 5 所示。

表 1 土层分布与模拟参数

Tab. 1 Soil Layer Distributions and Simulation Parameters						
编号	土类名称	厚度/m	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	压缩模量/ MPa
1	粉土	6.45	19.0	14	18	6.0
2	黏性土	2.06	18.9	24	15	3.5
3	粉土	3.39	19.3	14	20	8.1
4	黏性土	4.80	18.9	22	18	5.5
5	细砂	11.73	19.9	3	28	28.0
6	粉质黏土	11.93	19.5	22	18	12.7
7	黏性土	19.64	19.7	24	19	14.2

表 2 结构参数

Tab. 2 Structure Parameters			
结构	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ $10^4$ MPa	泊松比
支护桩	25.0	3.0	0.2
支撑	25.0	3.0	0.2
土钉	78.5	20.6	0.3
锚索	78.5	20.6	0.3

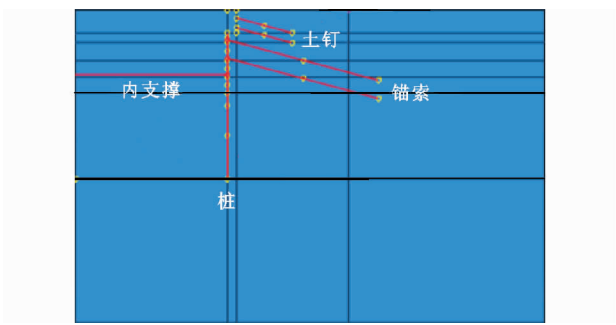


图 5 基本分析模型  
Fig. 5 Basic Analysis Model

2.2 计算工况

- 计算工况如下:
- 工况 1: 基坑开挖至-4.4 m, 浇筑支护桩, 打入 2 排土钉。
  - 工况 2: 基坑开挖至-6.2 m, 施工第 1 排锚索(-5.7 m)。
  - 工况 3: 基坑开挖至-9.7 m, 施工第 2 排锚索(-9.2 m)。
  - 工况 4: 基坑开挖至-12.85 m, 施工钢筋混凝土内支撑, 内支撑位置为-12.35 m。
  - 工况 5: 基坑开挖至坑底为-15.9 m。

2.3 实测与模拟结果对比分析

各工况下坡顶水平位移实测值与模拟值的对比见图 6, 工况 5 下支护桩深层水平位移实测值与模拟值的对比见图 7。

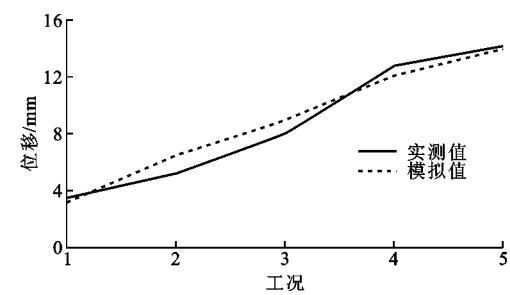


图 6 坡顶水平位移对比  
Fig. 6 Comparison of Horizontal Displacement on Slope Top

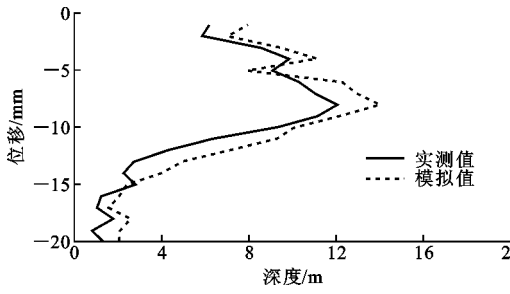


图 7 深层水平位移对比  
Fig. 7 Comparison of Deep Horizontal Displacement

坡顶水平位移和支护桩深层水平位移实测值与模拟值的趋势基本一致,且数值非常接近,验证了建模方法和参数选取的适用性,以下将按照已建立的有限元模型对支护结构进行虚拟设计,研究内支撑位置和锚索锁定值等设计参数对基坑变形的影响。

3 虚拟设计与参数分析

3.1 内支撑位置

在工况 5 下,分别将内支撑放置于第 1,2 排锚索中间(标高-7.5 m,虚拟工况 1)和桩顶处(标高-4.4 m,虚拟工况 2)进行计算分析,在工况 5 和虚拟工况 1,2 下的支护桩深层水平位移对比曲线见图 8,基坑支护结构的变形特征对比见表 3。

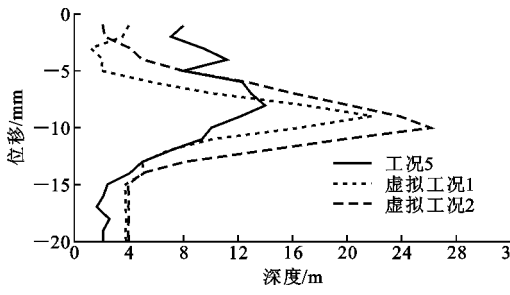


图 8 内支撑位置不同时的深层水平位移  
Fig. 8 Deep Horizontal Displacements in Different Inner Bracing Positions

由图 8 和表 3 可知,在土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系中,随内支撑上移,坡顶水平位移虽有减

表 3 内支撑位置不同时的基坑变形特征

Tab. 3 Deformation Characteristics of Foundation Pit in Different Inner Bracing Positions

工况	坡顶水平 位移/mm	冠梁水平 位移/mm	桩身最大水 平位移/mm	桩身最大水平位 移所在深度/m
工况 5	14.0	8.3	14.0	-8.0
虚拟工况 1	13.5	4.4	21.8	-9.5
虚拟工况 2	12.9	2.1	26.1	-10.5

少,但桩身最大水平位移增大更显著,且最大水平位移点向基坑底面方向移动,桩底水平位移变化较小。

上述实测与分析结果表明:在复合支护体系中内支撑标高的确定应以基坑外被保护对象位置为依据。对于周边管线(通常在地下 5 m 内)密集的基坑工程,可在支护桩高度上部的 1/3 区间内设置内支撑以控制基坑变形;当基坑外有深部存在的地铁、综合管廊等工程时,可在该范围内设置内支撑以限制支护结构的水平位移。

3.2 锚索锁定值

在工况 5 下,采用 4 组锚索锁定值进行虚拟设计,各虚拟工况中的锚索锁定值见表 4。支护桩深层水平位移在各工况下的对比曲线见图 9,基坑支护结构的变形特征对比见表 5。

表 4 各虚拟工况中的锚索锁定值

Tab. 4 Anchor Lock Value in Various Virtual Working Conditions

工况	锚索锁定值/kN	
	第 1 排	第 2 排
虚拟工况 3	360	210
虚拟工况 4	410	210
虚拟工况 5	360	310
虚拟工况 6	410	360

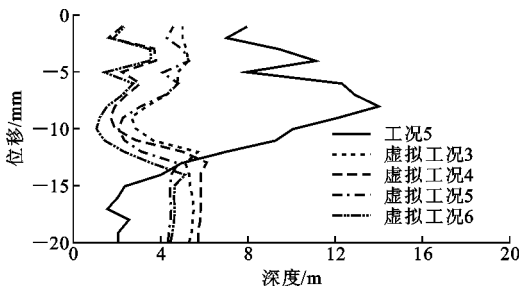


图 9 锚索锁定值不同时的深层水平位移

Fig. 9 Deep Horizontal Displacements Under Different Anchor Lock Values

由图 9 和表 5 可知,随锚索锁定值增大,桩身最大水平位移所在位置略有下移,这有利于内支撑作用的充分发挥。对于桩锚支护结构,冠梁水平位移随锚索锁定值的增大而稳步减小,这与该场地土层

表 5 锚索锁定值不同时的基坑变形特征

Tab. 5 Deformation Characteristics of Foundation Pit Under Different Anchor Lock Values

工况	坡顶水平 位移/mm	冠梁水平 位移/mm	桩身最大水 平位移/mm	桩身最大水平位 移所在深度/m
工况 5	14.0	8.3	14.0	-8.0
虚拟工况 3	12.6	5.1	5.7	-12.2
虚拟工况 4	11.8	2.5	6.0	-12.6
虚拟工况 5	12.1	4.9	4.7	-13.0
虚拟工况 6	11.7	2.4	5.1	-13.7

的工程地质条件较好有关。虚拟工况 6 相对于虚拟工况 4,第 2 排锚杆锁定值加大,但控制变形的效果并不明显。规范<sup>[27]</sup>规定锚杆锁定值宜取锚杆轴向拉力标准值的 75%~90%,因此在实际工程中锚索锁定值的变化范围有限。当场地的工程地质条件较好时,可以通过适度增大锚索锁定值(5%~15%轴向拉力标准值)来获取较好的支护效果。

4 结 语

(1)土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系中坡顶水平位移主要由上部土钉墙控制,下部锚索和内支撑对坡顶水平位移的控制效果不明显。

(2)土钉墙-桩锚-内撑复合支护体系中支护桩深层水平位移曲线大体呈现 P 形。

(3)钢筋混凝土内支撑限制变形是被动的,只有在强度形成且排桩产生侧移后才能发挥其约束变形的作用。

(4)内支撑可以有效约束其上下一定范围内支护桩的水平位移,随内支撑标高上移,桩身最大水平位移点向基坑底面方向移动,坡顶水平位移和桩底水平位移变化不明显。

(5)桩身最大水平位移所在位置随锚索锁定值的增大而下移,且最大水平位移值也减小。当场地的工程地质条件较好时,可以通过适度增大锚索锁定值(5%~15%轴向拉力标准值)来获取较好的支护效果。

参考文献:

References:

[1] 龚晓南. 土钉和复合土钉支护若干问题[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 80-83.  
GONG Xiao-nan. Some Problems on Soil Nailing and Composite Soil Nailing[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 80-83.  
[2] 张顶立. 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展

- [J]. 力学学报, 2017, 49(1): 3-21.  
ZHANG Ding-li, Essential Issues and Their Research Progress in Tunnel and Underground Engineering [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(1): 3-21.
- [3] 胡焕校, 杨涛, 蒋茵. 基坑支护结构与主体结构相结合的复合支护技术的应用[J]. 土工基础, 2017, 31(2): 133-138.  
HU Huan-xiao, YANG Tao, JIANG Han. Application of Combining the Excavation Support with the Main Building Structure[J]. Soil Engineering and Foundation, 2017, 31(2): 133-138.
- [4] 段石敦, 秦沛, 熊宗喜, 等. 复合支护体系在深基坑工程中的应用[J]. 建筑技术, 2014, 45(7): 628-630.  
DUAN Shi-dun, QIN Pei, XIONG Zong-xi, et al. Application of Composite Supporting and Protection System in Deep Foundation Pit Project[J]. Architecture Technology, 2014, 45(7): 628-630.
- [5] 严晓新, 黄延铮, 褚月华, 等. 复合支护结构在某深基坑工程中的应用[J]. 施工技术, 2014, 43(1): 60-63.  
YAN Xiao-xin, HUANG Yan-zheng, CHU Yue-hua, et al. Application of Composite Retaining Structure in a Foundation Excavation Engineering[J]. Construction Technology, 2014, 43(1): 60-63.
- [6] 刘文虎. 深大基坑复合土钉墙支护应用研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2017.  
LIU Wen-hu. Study on Application of Composite Soil Nailing Wall in Deep Foundation [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017.
- [7] 聂伟. 土钉墙、桩锚、桩撑复合支护在深基坑工程中的应用[J]. 建筑技术, 2014, 45(7): 612-614.  
NIE Wei. Application of Composite Support and Protection of Soil Nail Wall, Pile Anchor and Pile Support in Deep Foundation Pit Project [J]. Architecture Technology, 2014, 45(7): 612-614.
- [8] 马平, 申平, 秦四清, 等. 深基坑桩锚与土钉墙联合支护的数值模拟[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 401-407.  
MA Ping, SHEN Ping, QIN Si-qing, et al. Numerical Simulation of Pile-anchor and Soil Nailing Wall Composite Support Structure in Deep Foundation Pit[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(3): 401-407.
- [9] 张丽丽, 张钦喜, 马庆迅. 桩锚-土钉组合支护中土钉受力规律[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(9): 1338-1342.  
ZHANG Li-li, ZHANG Qin-xi, MA Qing-xun. Soil Nail's Axis Force of Pile-anchor Composite Soil-nailed Wall[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(9): 1338-1342.
- [10] 宋建学, 庞宏飞. 土钉墙-桩锚联合支护结构设计参数分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(6): 91-94.  
SONG Jian-xue, PANG Hong-fei. Study on Deformation Corresponding to Different Design Parameters of Excavation Retaining Structure with Soil Nail and Pile Anchor[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2014, 35(6): 91-94.
- [11] 靳军伟, 杜浩鸣, 张志强, 等. 复杂环境下桩锚土钉复合支护分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2017, 33(4): 613-620.  
JIN Jun-wei, DU Hao-ming, ZHANG Zhi-qiang, et al. Analysis of Pile-anchor and Soil-nailing Composite Supported System Under Complex Environment[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2017, 33(4): 613-620.
- [12] 黄志全, 李小慧, 孙怡, 等. 复合支护下深基坑的变形破坏和支护结构受力演化过程分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3): 74-80.  
HUANG Zhi-quan, LI Xiao-hui, SUN Yi, et al. Analysis of Deformation Failure and Supporting Structure Force Evolution of Deep Foundation Pit Under Compound Supporting [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(3): 74-80.
- [13] 黄锐. 桩锚-土钉复合支护基坑的变形与稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
HUANG Rui. Research on the Deformation and Stability of Soil-nail Wall with Deep Mixed Pile and Anchor Cable in Excavation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 金清平, 李小青, 胡斌. 复合土钉支护结构水平位移分析研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(1): 131-134, 142.  
JIN Qing-ping, LI Xiao-qing, HU Bin. Analysis on Horizontal Displacement of Composite Soil Nailing Supporting Structure[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(1): 131-134, 142.
- [15] 金红伟, 郭院成, 史科. 复合支护体系中土钉的受力特点[J]. 铁道建筑, 2015(12): 93-95, 109.  
JIN Hong-wei, GUO Yuan-cheng, SHI Ke. Axial Force in Soil Nails of Composite Supporting System [J]. Railway Engineering, 2015(12): 93-95, 109.
- [16] 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 Yuan-cheng, LI Yong-hui, 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.
- [17] 谢文东. 土钉与锚杆复合支护在基坑工程中的应用研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2016.
- XIE Wen-dong. Research on Application of Composite Soil Nailing with Anchor in Foundation Pit Engineering[D]. Beijing: North China University of Technology, 2016.
- [18] 吴昌长. 桩锚与桩撑联合支护下深基坑开挖变形数值模拟研究[D]. 昆明: 云南大学, 2014.
- WU Chang-chang. Numerical Simulation Study on Deep Excavation with the Composite Supporting Structure of the Pile-anchor and Pile-brace[D]. Kunming: Yunnan University, 2014.
- [19] 谢建斌, 曾宪明, 胡井友, 等. 硬化土模型在桩锚与桩撑组合支护深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增 2): 56-63.
- XIE Jian-bin, ZENG Xian-ming, HU Jing-you, et al. Application of Hardening Soil Model in Deep Excavations Supported by Pile-anchor and Pile-braced Composite Supporting Structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 56-63.
- [20] OU C Y, SHIAU B Y, WANG I W. Three-dimensional Deformation Behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) Excavation Case History[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2): 438-448.
- [21] 杨卓, 吴剑波, 赵一臻, 等. 地铁深基坑开挖对紧邻建筑影响的有限元模拟与监测研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(2): 121-126.
- YANG Zhuo, WU Jian-bo, ZHAO Yi-zhen, et al. Research on Finite Element Simulation and Monitoring of Influence Subway Deep Foundation Pit Excavation on Adjacent Building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(2): 121-126.
- [22] 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 Kang-kang. 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.
- [23] CLOUGH G W, DENBY G M. Stabilizing Berm Design for Temporary Walls in Clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(2): 75-90.
- [24] CLOUGH G W, HANSEN L A. Clay Anisotropy and Braced Wall Behavior[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1981, 107(7): 893-913.
- [25] ROBOSKI J F. Three-dimensional Performance and Analyses of Deep Excavations[D]. Evanston: Northwestern University, 2004.
- [26] OU C Y, SHIAU B Y. Analysis of the Corner Effect on Excavation Behaviors[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 532-540.
- [27] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].
- JGJ 120—2012, Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations[S].