

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.04.003

# 深基坑半刚性半柔性支护结构及力学特性分析

贾金青<sup>1</sup>, 林青坤<sup>1</sup>, 陈湘生<sup>2</sup>, 杨庆<sup>1</sup>, 张丽华<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 深基坑半刚性半柔性支护适用于建筑物密集, 施工场地狭小的岩质深基坑支护。通过 ABAQUS 有限元软件对深基坑半刚性半柔性支护的作用机理及力学特性进行分析。分析得出, 由劲性桩承受开挖步荷载并传至上部已施工的预应力锚杆及下部未开挖土体, 保证了开挖过程中的基坑稳定性; 劲性桩的弯矩及剪力数值计算结果很小, 满足强度要求; 半刚性半柔性支护与预应力锚杆柔性支护相比, 基坑侧壁的水平位移和基坑外侧地表沉降显著减小, 基坑侧壁水平位移变化更均匀, 支护效果更优; 与桩锚支护相比, 变形形态相近, 最大水平位移发生位置向下转移, 最大水平位移值及最大地表沉降值均较小。

**关键词:** 基坑工程; 半刚性半柔性支护; 劲性桩; ABAQUS 数值模拟; 基坑变形

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)04-0016-05

## Mechanical Characteristics Analysis of Semi-rigid and Semi-flexible Support Structure in Deep Foundation Pit

JIA Jinqing<sup>1</sup>, LIN Qingkun<sup>1</sup>, CHEN Xiangsheng<sup>2</sup>, YANG Qing<sup>1</sup>, ZHANG Lihua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518000, China)

**Abstract:** Semi-rigid and semi-flexible support of deep foundation pit is suitable for rock deep foundation pit support with dense buildings and narrow construction site. In this paper, the mechanism and mechanical characteristics of semi-rigid and semi-flexible supporting structure in deep foundation pit are analyzed by ABAQUS finite element software. It is concluded that the stability of foundation pit during excavation is guaranteed by the prestressing anchor rod and the undisturbed soil at the upper part of the pile, which bears the excavation step load, and the numerical calculation results of the bending moment and shear force of the rigid pile are very small, meeting the strength requirement. Compared with the prestressed anchor flexible support, the horizontal displacement of the side wall of the foundation pit and the surface settlement of the outer pit of the foundation pit are significantly reduced, the horizontal displacement of side wall of foundation pit changes more uniformly, and the support effect is better. Compared with pile-anchor support, the deformation shape is similar, the maximum horizontal displacement shifts downward, and the maximum horizontal displacement and the maximum ground settlement are smaller.

**Keywords:** excavation engineering; semi-rigid and semi-flexible support; stiffened pile; ABAQUS numerical modeling; excavation deformation

近年来,我国城市建设发展迅速,高层建筑越来越多,城市用地越来越紧张,基坑工程往往处于房屋和生命线工程的密集地区,深基坑工程的数量也逐

年上升,深基坑的规模、深度和施工难度也越来越高<sup>[1]</sup>。特别是在旧城区中,深基坑邻近旧建筑或古建筑的情况,基坑开挖将对老旧建筑产生非常严重

收稿日期:2019-03-19

修稿日期:2019-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51678112);国家重点研发计划(2018YFC1505300-2)

作者简介:贾金青(1962—),男,河北沧州人,教授,博士生导师,主要从事结构工程、岩土工程及工程新材料的研究和开发应用。

E-mail: keyknown@163.net

通讯作者:林青坤(1994—),男,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。E-mail:18342238225@163.com

的影响,如下沉、开裂、甚至倒塌等。

在中心城市区域复杂的建筑施工环境下,为了有效地控制基坑开挖过程中产生的变形,防止建筑物及管线破坏,通常采用传统的桩锚刚性支护结构。然而,桩锚刚性支护结构工期长、造价高,并且在施工过程中大型施工机械的使用不可避免的会对周围的地下生命管线及周边建筑物产生扰动,甚至还有可能引起破坏;另一方面,由于施工场地狭窄,大型施工机械甚至无法进场施工。

而传统的包括土钉、复合土钉及预应力锚杆柔性支护结构在内的柔性支护结构虽然施工便捷,但由于先开挖再支护,产生的临空面不利于基坑的局部稳定性,导致无法对基坑的水平位移及沉降进行有效的控制;此外,当柔性支护用于深基坑支护时,基坑的水平位移及沉降控制更是目前仍没有突破的技术难点。

基于上述施工环境,对基坑支护的要求是:位移要求严格、不允许大型设备造成施工扰动。提出深基坑半刚性半柔性支护结构及方法<sup>[2]</sup>,结合刚性支护和柔性支护,利用现有两种技术的优点,如稳定性好、施工便捷、造价低廉,与单纯的锚杆或土钉支护相比,可以适用于较深的深基坑。而且施工时使用小型机械设备,震动小、对周边环境影响小、施工后基坑周边地面沉降较小、对周边老旧建筑物或古建筑的影响小。

深基坑半刚性半柔性支护结构最早应用于大连远洋大厦东侧的基坑支护中,但对其工作机理和设计方法的研究仍不够深入。本文通过数值模型实验的方法对该支护结构的力学特性进行了分析研究。并与预应力锚杆柔性支护及传统桩锚支护进行对比。

## 1 概述

深基坑半刚性半柔性支护是一种应用于支护岩质深基坑新型支护方法。该支护方法主要由劲性桩、喷射混凝土、预应力锚杆及腰梁四部分组成。

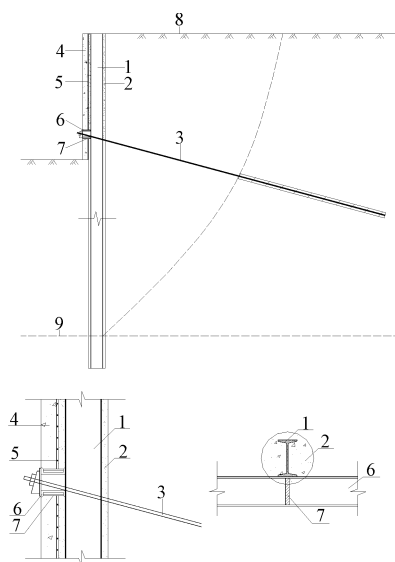
(1) 劲性桩由工字钢和砂浆或细石混凝土组成,采用机械钻孔,孔中放入工字钢,工字钢翼缘面向基坑,然后向孔中灌浆,形成劲性桩成,劲性桩孔深至少为基坑深度与三倍劲性桩直径的和。

(2) 预应力锚杆采用梅花状排列或矩形排列,锚杆之间的水平间距和垂直间距均为 1.5 m ~ 2.0 m,锚杆的杆体采用钢绞线或钢筋,分为自由段和锚固段,锚杆自由段部分缠塑料布或套塑料套管,使锚杆的杆体与水泥砂浆分离。

(3) 腰梁包括横向延伸的两根相对设置的槽钢,缀板将两根槽钢连接为整体,每根槽钢翼缘之间设置的加劲肋。腰梁翼缘间喷满混凝土,与锚杆支护结构中的喷射混凝土凝固连为一体,这样使锚杆的锚固力有效、连续均匀地传递至喷射混凝土面层和基坑侧壁,并能保障基坑的整体稳定有效。

施工过程中首先在基坑边缘按预设位置钻孔,灌注劲性桩,待劲性桩达到一定强度后进行第一步基坑开挖。

深基坑半刚性半柔性支护的构造如图 1 所示。



1-工字钢;2-细石混凝土或1:1砂浆;3-预应力锚杆;4-喷射混凝土面层;5-面层钢筋网;6-槽钢腰梁;7-槽钢加劲肋;8-地面;9-基坑底部

图1 深基坑半刚性半柔性支护示意图

## 2 作用机理分析

### 2.1 预应力锚杆柔性支护结构

预应力锚杆柔性支护结构<sup>[3-5]</sup>是利用土体具有一定的整体性和自立高度,基坑采用边开挖边支护的施工方法,从施工程序上是先开挖,后支护,开挖时基坑土体处于临空状态,没有任何支护,开挖荷载向上部及下部土体传递<sup>[4]</sup>。由于这种特别的施工方式,预应力锚杆柔性支护不需要嵌固深度,每一步开挖土体都有较大程度的应力释放,因此基坑变形较大,且呈现基坑顶部水平位移最大,沿深度方向水平位移逐渐减小底部水平位移接近零。阻挡基坑边坡下滑的抗滑力主要来源于锚杆。该种支护方法适用于土层属性较好的基坑支护,当基坑土质较差不能形成一定自立面或有软弱结构不连续面的岩石或风化岩时,该方法不适用。

### 2.2 传统桩锚支护

桩锚支护<sup>[6]</sup>由灌注桩、锚杆、腰梁及混凝土面

层组成,支护从施工程序上是先施工灌注桩,再分层开挖,开挖时基坑有灌注桩支护土体。每一步的开挖深度较大,土体卸荷压力由刚度较大的灌注桩承担,灌注桩作为主要受力构件,桩身弯矩较大,阻挡基坑边坡下滑的抗滑力主要来源于锚杆所提供的锚固力和灌注桩嵌固段提供的阻滑力。

### 2.3 深基坑半刚性半柔性支护

在预应力锚杆柔性支护基础上,提出由工字钢和混凝土注浆构成的小尺寸劲性桩,结合预应力锚杆的应用,形成深基坑半刚性半柔性的支护结构。支护从施工程序上是先施工劲性桩,再分层开挖,开挖时基坑有劲性桩支护土体。劲性桩在基坑开挖过程中,约束开挖土体的变形,将开挖步的土体卸荷压力,传递至上层锚杆及下层未开挖土体,由于锚杆竖向间距为 1.5 m~2.0 m,使得劲性桩的桩身弯矩很小。由于劲性桩嵌固段较浅,不能提供抗滑力,阻挡基坑边坡下滑的抗滑力主要来源于锚杆。相较于柔性支护,劲性桩的设置可以一定程度约束支护面层的竖向位移,提高了各个锚杆与支护面层的协调工作性能,提高了支护结构的整体稳定性。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 数值模型及参数设定

本文通过 ABAQUS 有限元软件对深基坑半刚性半柔性支护的力学特性进行分析,并与预应力锚杆柔性支护及桩锚支护进行了比较。

主要进行定性分析研究,其中岩土体采用三维实体单元(C3D8R)进行模拟,本构模型选用莫尔-库仑弹塑性本构模型<sup>[7]</sup>,岩土体屈服破坏准则选用 M-C 准则,岩土体参数<sup>[8]</sup>如表 1 所示。为了减小边界效应对模型计算结果的影响,参考相关三维基坑模拟的尺寸选择,计算模型尺寸取为 60 m×46 m×1.6 m,基坑开挖深度为 20 m,具体的尺寸示意图如图 2 所示<sup>[9-10]</sup>。

表 1 基坑岩土体 Mohr-Coulomb 模型参数

$E/\text{MPa}$	$\mu$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
250	0.24	22	30	32

分别采用三种支护方式进行设计计算分析,其中,半刚性半柔性支护,劲性桩直径为 240 mm,水平间距为 0.8 m,锚杆水平间距均为 1.6 m、竖向间距均为 2 m,预应力锚杆自由段长度及锚固段长度按规程要求计算<sup>[11]</sup>,预应力锚杆设计长度见表 2,初始预应力值为 62.5%  $N_k$  (锚杆轴向拉力标准值)。

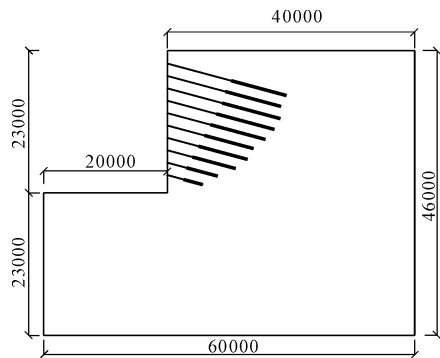


图 2 基坑数值模拟尺寸(单位:mm)

表 2 半刚性半柔性支护及预应力锚杆柔性支护中的锚杆长度

锚杆排号	自由段/m	锚固段/m	总长/m
1	11	6	17
2	10	6	16
3	9	6	15
4	8	6	14
5	7	6	13
6	6	6	12
7	5	6	11
8	4	6	10
9	3	6	9

预应力锚杆柔性支护与半刚性半柔性支护采用完全相同预应力锚杆设计方案,喷射混凝土面层强度为 C30,厚 120 mm;桩锚支护,采用钢筋混凝土灌注桩,直径为 0.8 m,嵌固深度为 5 m,水平间距为 1.6 m;采用 3 道锚杆支撑,水平间距均为 1.6 m,竖向间距为 5 m、5 m、5 m,预应力锚杆设计长度见表 3。

表 3 桩锚支护中的预应力锚杆长度

锚杆排号	自由段/m	锚固段/m	总长/m
1	10.0	8	18.0
2	7.5	8	15.5
3	5.0	9	14.0

劲性桩及钢筋混凝土灌注桩通过抗弯刚度等效为地下连续墙<sup>[12]</sup>,利用三维实体单元(C3D8R)来模拟,采用线弹性模型。预应力锚杆采用三维桁架单元(T3D2)进行模拟。

### 3.2 数值模拟过程

土工结构(包括基坑支护体系)的内力及变形往往和其建造过程有密切关系,分析土工结构的内力及变形时有必要模拟其建造过程<sup>[13-14]</sup>。本文在数值模拟分析过程中,严格模拟真实的施工过程。

半刚性半柔性支护及桩锚支护的模拟:先建立

劲性桩再分层开挖、分层支护,整个模拟过程共分为21个工况,具体的施工顺序为:geo:施加重力,地应力平衡;zhuang:劲性桩施工;r1:开挖第一层土体;m1:第一排预应力锚杆施工;r2:开挖第二层土体;m2:第二排预应力锚杆施工:重复以上施工步骤直至最后一层开挖 r10。预应力锚杆柔性支护采用开挖一层支护一层的施工过程,geo:施加重力,地应力平衡;r1:开挖第一层土体;m1:第一排预应力锚杆及喷射混凝土面层施工;r2:开挖第二层土体;m2:第二排预应力锚杆及喷射混凝土面层施工:重复以上施工步骤直至最后一层开挖 r10。均采用降温法对每一步施工的预应力锚杆施加预应力<sup>[15]</sup>。

## 4 数值计算结果分析

### 4.1 支护桩内力分析

为了比较分析劲性桩在基坑支护中的作用机理同传统桩锚支护的区别,对两种支护桩内力计算结果进行分析。

如图3、图4计算结果中,可见劲性桩所受最大正弯矩为 $11.63 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,最大负弯矩为 $5.32 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,发生在劲性桩底部;最大剪力为 $52.3 \text{ kN}$ 。灌注桩所受最大正弯矩为 $64.84 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,最大负弯矩为 $112.90 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,发生在灌注桩底部、基坑开挖面以下;最大剪力为 $246 \text{ kN}$ 。前者所承受最大弯矩约是后者的10%,最大剪力约是后者的21%。因此桩锚支护中灌注桩作为主要受力构件承受较大的弯矩及剪力,而半刚性半柔性支护中的劲性桩,由于锚杆间距较小,劲性桩所承受的弯矩及剪力较小,通常按构造要求设计即可满足强度要求。

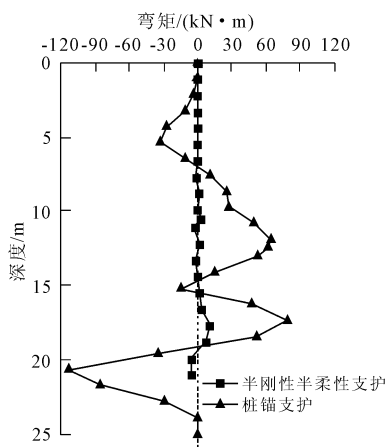


图3 桩身弯矩计算结果

### 4.2 基坑变形分析

(1) 与预应力锚杆柔性支护的比较。半刚性半

柔性支护与预应力锚杆柔性支护在开挖至基坑底部后基坑侧壁水平位移及基坑外侧地表沉降图分别如图5、图6所示。

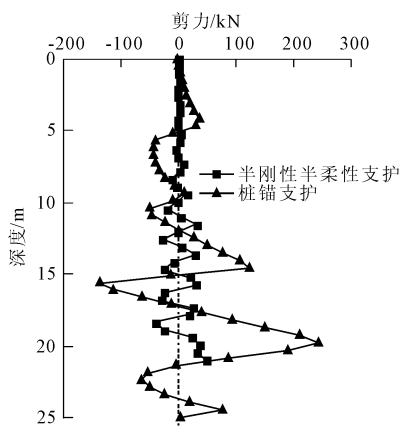


图4 桩身剪力计算结果

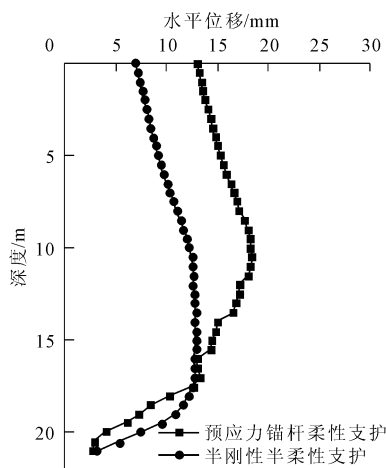


图5 基坑侧壁水平位移

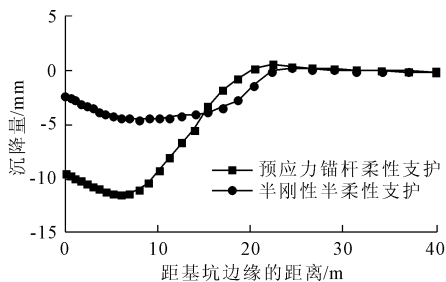


图6 基坑外侧地表沉降

由图5可见,预应力锚杆柔性支护,基坑顶部变形值较大为 $12.97 \text{ mm}$ ,基坑侧壁最大位移发生在基坑下部 $10.5 \text{ m}$ 位置处,大小为 $18.42 \text{ mm}$ ,基坑底部水平位移为 $2.73 \text{ mm}$ 。半刚性半柔性支护较预应力锚杆柔性支护,基坑的水平位移显著减小,对基坑上部土体的变形控制较好,基坑侧壁变形分布更加均匀,基坑顶部水平位移值为 $6.87 \text{ mm}$ ,较同等条件下预应力锚杆柔性支护的变形减小 $6.10 \text{ mm}$ ,基坑

侧壁最大位移发生在基坑下部 17 m 位置处,大小为 12.70 mm,较预应力锚杆柔性支护的变形减小 5.72 mm,基坑底部水平位移为 3.06 mm,较预应力锚杆柔性支护的变形增大 0.33 mm,基坑底部的位移值相差不大。

由图 6 可见,预应力锚杆柔性支护,基坑外侧地表沉降呈“汤勺”形分步,基坑侧壁的沉降值为 9.50 mm,坑后地表最大沉降量为 11.47 mm,位于坑后 6 m 位置处,向基坑外侧逐渐减小,距坑壁 20.32 m 位置处沉降量为零。半刚性半柔性支护,基坑外侧地表沉降呈“碗”形分步,基坑侧壁的沉降值为 2.32 mm,坑后地表最大沉降量为 4.49 mm,位于坑后 7.9 m 位置处,向基坑外侧逐渐减小,距坑壁 22.31 m 位置处沉降量为零。半刚性半柔性支护较预应力锚杆柔性支护基坑后侧的地表沉降显著降低,说明劲性桩能够约束坑后岩土体的变形,并提供支撑作用。

(2) 与桩锚支护的比较。半刚性半柔性支护与桩锚支护在开挖至基坑底部后基坑侧壁水平位移及基坑外侧地表沉降图分别如图 7、图 8 所示。

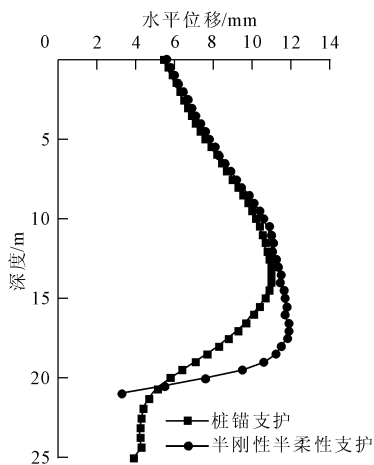


图 7 基坑侧壁水平位移

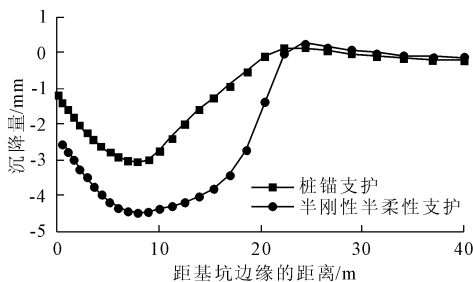


图 8 基坑外侧地表沉降

由图 7 可见,半刚性半柔性支护和桩锚支护基坑侧壁水平位移的变形形态相近,均呈现‘鼓肚形’,相同工况下,与桩锚支护相比,半刚性半柔性

支护基坑侧壁水平位移较大,最大水平位移发生位置下移。桩锚支护中由于灌注桩嵌固深度较大,基坑内侧开挖面以下土体仍承担较大荷载,造成基坑开挖面以下土体水平位移较半刚性半柔性支护大。两者的基坑变形均在较小的范围内,均满足规范要求。

由图 8 可见,相同工况下,与桩锚支护相比,半刚性半柔性支护基坑外侧土体地表沉降较大,且变形较大的区域范围也较大,但最大沉降值均较小,均满足规范要求。

## 5 结论

深基坑半刚性半柔性支护已经成功应用于工程实例当中,本文对深基坑半刚性半柔性支护基本组成进行了详细介绍,结合有限元软件对其受力特性进行模拟分析,并与预应力锚杆柔性支护及桩锚支护作对比,得出如下结论:

(1) 半刚性半柔性支护中劲性桩的桩身内力很小,其弯矩值约是桩锚支护中灌注桩的 10%,剪力值约是桩锚支护中灌注桩的 21%,因此劲性桩不需要较大尺寸就能够满足强度要求。

(2) 劲性桩超前支护的提出有效地避免了柔性支护基坑开挖过程中临空面的产生及柔性支护基坑变形先于支护的特点。与预应力锚杆柔性支护相比,能够显著减小基坑侧壁的水平位移和基坑外侧地表沉降。

(3) 与桩锚支护相比,支护结构的变形形态相近,基坑侧壁最大水平位移发生位置下移,最大水平位移值及最大地表沉降值均较小,均能满足规范要求。

## 参考文献:

- [1] 朱彦鹏,杨校辉,周勇,等.兰州地铁车站深基坑支护选型分析与数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):55-59.
- [2] 贾金青.一种深基坑侧壁半刚性半柔性支护结构和方法:中华人民共和国,CN106013171B[P].2016-06-30.
- [3] 涂兵雄.预应力锚杆柔性支护法机理与力学行为研究[D].大连:大连理工大学,2013:15-18.
- [4] 贾金青,涂兵雄.预应力锚杆柔性支护法在超深基坑中的实践[J].岩土工程学报,2012,34(S1):530-535.

- 与变形的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(1): 46-49.
- [10] 张宏刚, 张卫东. 土体含水量对西安黄土区土钉支护稳定性的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(5): 65-69.
- [11] 郭震山. 增湿条件下黄土陡坡变形特性及稳定性分析[J]. 地下空间与工程, 2018, 14(S1): 445-450.
- [12] 高 帅, 骆亚生, 胡海军, 等. 非饱和原状黄土增湿条件下力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 37(7): 1313-1318.
- [13] 周 学. 膨胀土地层基坑支护稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 73-82.
- [14] 郭林坪, 穆 坤, 杨爱武, 等. 天津滨海新区粘性土物理力学性质指标相关性[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 452-457.
- [15] 屈若枫, 徐光黎, 王金峰, 等. 武汉地区典型软土物理力学指标间的相关性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 113-119.
- [16] 张秀丽. 考虑含水量和密度影响的压实黄土工程性质试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011: 16-32.
- [17] 曹 净, 刘 甜, 桂 跃.  $c, \varphi$  互相关性对基坑支护可靠度的影响[J]. 控制工程, 2018, 25(1): 30-36.
- [18] 吴坤铭, 王建国, 郑 志. 基于可靠性分析设计基坑土钉支护工程[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(6): 818-822.
- [19] 何 渊. 深基坑土钉支护结构稳定问题的可靠度与模糊可靠度研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016: 33-43.
- [20] 李 健, 郭忠平, 郭嘉兴. 基于中心点法的井下巷道锚杆支护可靠性分析[J]. 煤矿安全, 2019, 50(4): 237-244.
- [21] 李典庆, 蒋水华, 张利民, 等. 考虑锚杆腐蚀作用的岩质边坡系统可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1137-1144.
- [22] 吴振君, 王水林, 汤 华, 等. 一种新的边坡稳定性因素敏感性分析方法-可靠度分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2050-2055.
- [23] 许梦国, 娄永忠. 深基坑支护系统稳定性可靠度分析[J]. 工业安全与环保, 2004, 30(8): 14-15.
- [24] 王建华. 基坑支护体系稳定可靠度分析[J]. 水力发电, 2008, 34(3): 52-54.
- [25] 张 琳, 赵 平, 谢行皓. 基坑支护体系概率极限状态设计中分项系数的研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1997, 29(4): 439-442.
- [26] 廖 瑛. 坑支护结构的稳定可靠度研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(1): 54-56.
- [27] 刘 春, 白世伟, 赵洪波. 粘性土土性指标的统计规律研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(10): 180-184.
- [28] 张宏刚, 崔中兴, 谢 森, 等. 深基坑支护失效模式初探[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(5): 110-112.
- [29] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑出版社, 2007: 842-846.

(上接第 20 页)

- [5] 贾金青, 陈国周, 孟祥波. 改进的杆系有限元在预应力锚杆柔性支护方法中应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2314-2318.
- [6] 周 勇, 朱亚薇. 深基坑桩锚支护结构和土体之间协同作用[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3246-3252.
- [7] 熊春宝, 雷礼钢, 葛有志. 土的不同本构关系对三维有限元分析的影响[J]. 天津理工大学学报, 2006, 22(1): 81-84.
- [8] 刘 星. 基坑土体参数及超挖变形的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 45-46.
- [9] 陈志明. 深基坑工程开挖与支护的三维有限元模拟[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [10] 赵静力. 基坑开挖的空间效应及土压力研究[D]. 保定: 河北大学, 2011.
- [11] 中华人民共和国行业标准. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] 付培帅, 王曙光, 唐小微, 等. ABAQUS 在深基坑设计及施工中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 161-165, 182.
- [13] 宋二祥, 邱 玥. 基坑复合土钉支护的有限元分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 241-245.
- [14] 宋二祥, 娄 鹏, 陆新征, 等. 某特深基坑支护的非线性三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 538-543.
- [15] 贾金青, 曹 静, 高军程. 无根护壁桩支护三维有限元分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 5-10.