

砂石桩-土钉墙组合支护结构的 变形及稳定性分析

范海涛¹, 张涛¹, 赵洲源², 赖彦林²

(1. 四川正基岩土工程有限公司, 四川 绵阳 621000; 2. 中国人民解放军 63839 部队, 四川 绵阳 621000)

摘要: 砂石桩-土钉墙组合支护体系具有较好的经济性及使用性。通过建立基坑体系的二维有限元弹塑性模型,运用强度折减法对砂石桩-土钉墙组合支护结构的变形及稳定性进行数值分析。计算结果表明:砂石桩能有效的控制坡体水平位移,而竖向位移仍由土钉-土体组成的“加筋体”共同约束;土钉轴力在滑裂面、砂石桩与土体接触界面轴力达到大值,土钉穿越砂石桩后轴力减小;砂石桩的破坏位置介于桩端持力层与坑底之间,破坏形式为剪切破坏。

关键词: 基坑工程;砂石桩;土钉墙;组合支护;有限元;强度折减法

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)04-0117-05

Deformation and Stability Analysis of Sandstone Pile-Soil Nailing Wall Composite Support Structure

FAN Haitao¹, ZHANG Tao¹, ZHAO Zhouyuan², LAI Yanlin²

(1. Sichuan Zhengji Geotechnical Engineering Co., Ltd., Mianyang, Sichuan 621000, China;

2. People's Liberation Army 63839, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: Sand-gravel pile-soil nailing wall support system has better economy and usability. Based on the two-dimensional finite element elastic-plastic model of the foundation pit system, the deformation and stability of the composite retaining structure with sand-gravel piles and soil nailing walls are numerically analyzed by the strength reduction method. The results show that the horizontal displacement of the slope can be effectively controlled by sand-gravel piles, while the vertical displacement is still constrained by the “reinforced body” composed of soil nails and soil bodies; the axial force of soil nails is constrained by the sliding surface, sand-gravel piles and soil. The axial force of the body contact interface reaches a large value, and the sand-gravel pile can reduce the peak axial force of the soil nail; the failure position of the sand-gravel pile is between the bearing layer and the bottom of the pit, and the failure form is shear failure.

Keywords: foundation pit engineering; gravel pile; soil nailing wall; combined support; finite element; strength reduction method

软土地区的基坑开挖工程较为复杂,通常采用的技术手段为排桩、水泥土墙、水泥搅拌桩等单一支护方式,当开挖基坑深度较大时,单一支护方式存在钢筋用量多、设计墙体厚度大、水泥用量多等不利影响,导致造价较高、施工较为复杂,严重制约工程建设。

为节约经济造价,降低施工难度,许多学者将半

刚性、刚性桩与土钉墙支护方式相结合,组成联合支护结构运用于基坑工程。如:朱建新等^[1]将高压旋喷桩与土钉联合运用于南海某基坑工程,验证了该方案能确保了基坑的安全性和防水效果。谢永明^[2]对基坑坡脚设置水泥搅拌桩,坡面设置土钉墙,对水泥搅拌桩的合理长度和宽度进行讨论。郝峰^[3]对高压旋喷桩复合土钉墙进行了 PLAXIS 有限

元分析,得出高压旋喷桩在土层较软时,贡献作用较大。汪志鹏^[4]对泛海·花园工程基坑中应用了复合土钉墙与高压旋喷桩组合支护,验证了其具有较好的可靠性。许岩剑等^[5]对水泥搅拌桩和土钉联合支护结构进行稳定性分析,结果表明联合支护的坑壁破裂面从桩底穿过,土钉水平投影段范围内滑动面呈水平向拉长;程文若^[6]将水泥土搅拌桩与土钉墙联合支护运用于软土基坑中。

总的来说,目前对联合支护研究较少,而已有的研究成果中又多是对半刚性、刚性桩与土钉墙相组合进行探讨,对无粘结强度的散体桩与土钉支护相结合的研究甚少。笔者就某基坑工程中使用的砂石桩-土钉墙支护结构进行有限元数值模拟,探讨其坡体位移、土钉轴力等分布规律,同时运用强度折减法计算其稳定性,为砂石桩-土钉墙组合支护工程设计与施工提供一定的参考依据。

1 强度折减法基本原理及失稳破坏判据

若使砂石桩-土钉墙支护体系真正发挥其支护边坡的效能,必然存在砂石桩、土钉、土体三者之间的相互作用与协调变形,而传统的极限平衡分析法很难解决这一问题,采用强度折减的有限元法无疑能解决这一问题。

1.1 基本原理

有限元强度折减法最早由 Zienkiewicz 于 1975 年提出,随着计算机技术的发展,该方法成为有限元边坡稳定性分析的研究热点^[7]。其基本原理是基于强度储备理论,将强度折减的概念、极限平衡原理与弹塑性有限元计算原理相结合^[8]。

其基本原理是:首先在数值分析前预先给定一个强度折减系数 F_s ,用以调整土体强度指标 C 和 ϕ 值(式 1),再将 C' 和 ϕ' 值循环代入数值计算,确定数值模型中的应力、应变场或位移场,计算至土体达临界破坏状态时,将此时的折减系数定义为稳定安全系数^[9-10]。

$$C' = C/F_s, \phi' = \arctan(\tan\phi/F_s) \quad (1)$$

1.2 失稳破坏判据

当前大多数学者对土体整体失稳破坏的力学行为尚没有统一的认识^[11],从强度折减法的观点出发,衍生出了三类失稳判据:即有限元数值迭代不收敛判据、特征部位位移突变判据、广义塑性应变或等效塑性应变贯通判据。

根据裴利剑等^[12]研究成果,在足够的有限元数值计算精度或迭代次数下,三类失稳判据具有一致

性和统一性。本文将采用第二判据为主、第三判据为辅作为本次强度折减失稳判据。

2 工程概况与计算模型

2.1 工程概况

某基坑平面呈较规则圆形基坑,开挖深度为 6.0 m。场平后坑壁土体分层为淤泥质粉质黏土(软塑—可塑):0~7.6 m;黏土(可塑):7.6 m~11.2 m;其下为粉砂质泥岩、埋深较深;局部存在上层滞水,易于疏干。

设计思路:先采用砂石桩对淤泥质粉质黏土进行置换,增强土体的同时加速排水固结,静置 21 d 待其超孔隙水压力消散后,再进行基坑开挖与土钉墙施工(见图 1)。

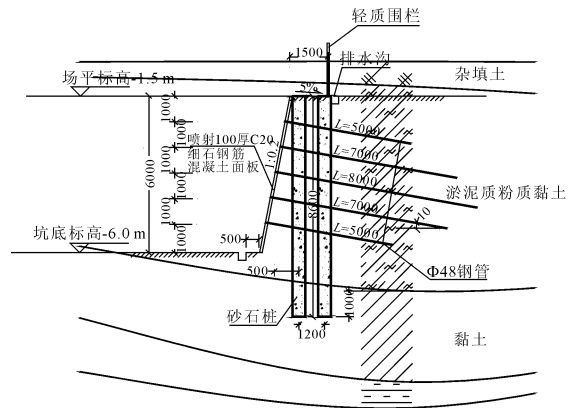


图 1 设计断面图

2.2 计算模型与参数选取

2.2.1 模型与边界

计算软件采用 Phase2D,为避免尺寸效应对计算精度的影响,由此确定计算模型尺寸为:土钉边坡前的开挖宽度取 $3.3H$ 、支护后边界取 $3H$ 、下边界取开挖底面以下 $2.3H$ 。模型计算范围为 $20 \text{ m} \times 40 \text{ m}$,采用六节点三角形网格,共划分网格 1 110 个(见图 2)。

边界条件确定为顶部地表面无约束、为自由边界;模型两侧为水平约束、竖向不约束,为滚轮支座;模型底面水平、竖向均约束,为固定铰支座。由于砂石桩与淤泥质粉质黏土在刚度与强度上存在较大的性状差异,在外力作用下,其界面可能产生相对滑移变形,本模型中砂石桩与原状土体之间设置 Structural-Interface 接触单元描述其特性,接触面之间可传递切向力和法向力,模拟桩土相互作用。

2.2.2 计算参数

本文计算的土体采用非线性弹塑性模型,破坏准则选用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)准则。土体

参数见表 1。

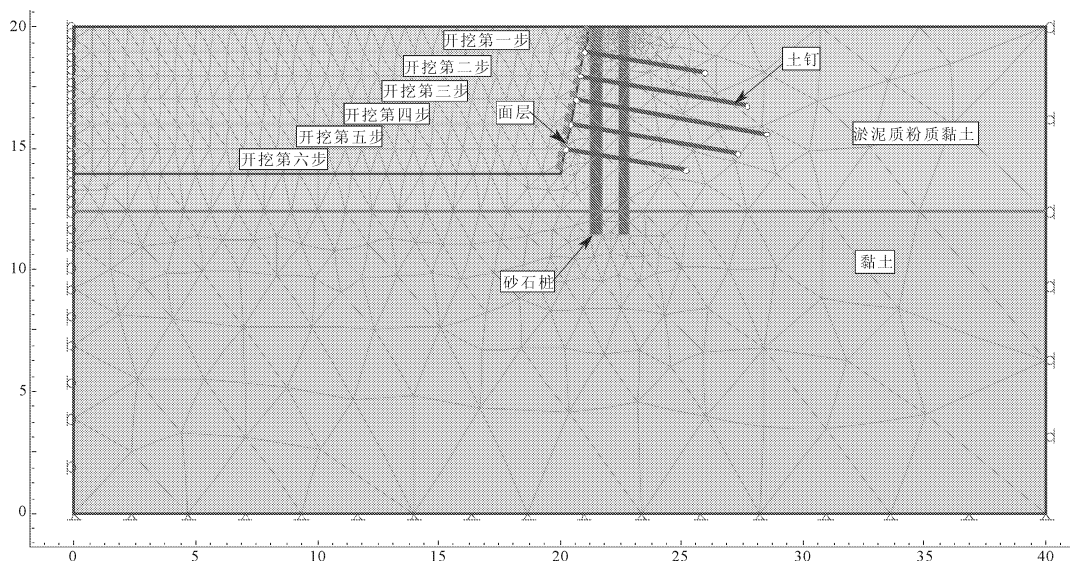


图 2 砂石桩-土钉墙支护结构网格模型

表 1 土体参数

土层名称	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	摩擦角/($^\circ$)	弹性模量/ MPa	泊松比	抗拉强度/ kPa
淤泥质粉质黏土	18.5	12	8	2.0	0.38	0
黏土	19.5	25	15	6.0	0.32	0
砂石桩	21.0	20	28	10.0	0.28	0

土钉单元采用 Cable 单元模拟,土钉参数见表 2。

表 2 土钉参数

钢管直径 / mm	钻孔直径 / mm	水平间距 / m	摩阻力 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	弹性模量 / MPa	水灰比
48	130	1.2	80	5×10^5	0.35

面板采用 Liner 单元模拟,面层参数见表 3。

表 3 面层参数

钢筋网片	厚度 / mm	钻孔直径 / mm	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / MPa	泊松比
$\phi 8@100$	100	130	5.0	3×10^4	0.24

了有效控制;在背离基坑方向上,水平位移表现为沿土钉支护方向逐步减小,但在区域 B、C 间明显分区,这是由于基坑开挖支护后,区域 A、B 卸荷后向坑内侧移,区域 C 侧向约束减弱,导致该区域内土体发生变形。

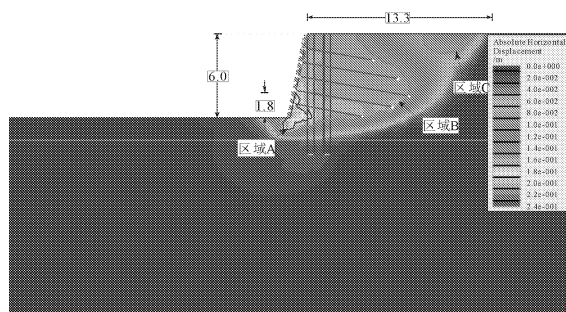


图 3 水平位移分布云图

3 计算分析

3.1 位移变化特征

从整个基坑支护完成后水平位移云图图 3 表明,砂石桩-土钉墙支护体系坡顶影响范围约为 $2.2H$ (H 为基坑开挖深度),坡脚影响高度约为 $0.3H$;若单一的土钉墙支护,坡体位移大值应分布于坡顶或坡体中部^[13],但砂石桩预先加固土体后再采用土钉墙支护,坡体水平位移大值分布于坡角,坡顶位移较小,证明砂石桩置换土体后,坡顶位移得到

由竖向位移云图图 4 可见,竖向位移大值出现在土钉支护区域外侧 $1.0H \sim 2.2H$,影响深度至第三排土钉;坑顶竖向沉降影响深度约 $0.56H$,土钉与土体组成“加筋体”对区域内土体竖向位移约束较大。

由此可见,在砂石桩-土钉墙支护体系中,砂石桩能有效的控制坡体水平位移,而竖向位移仍由土钉-土体组成的“加筋体”共同约束。

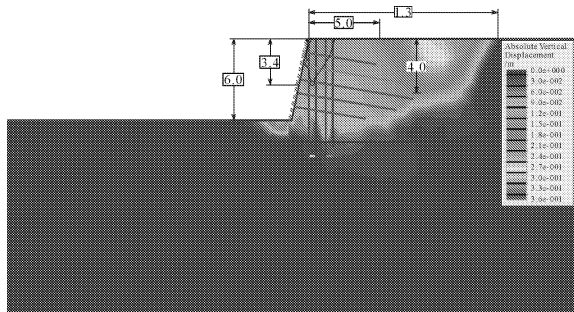


图 4 竖向位移分布云图

3.2 土钉轴力变化特征

从土钉轴力分布图图 5 可见,各排土钉轴力最大值分布与基坑开挖深度有关,上部土体具有一定的自稳能力,整体呈现规律为第 4、5 排土钉轴力较 1~3 排大,轴力较大值出现在中下部土钉。

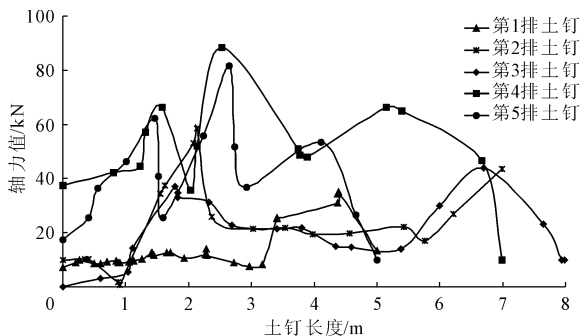


图 5 各排土钉轴力分布图

支护结构若仅有土钉支护情况下,单根土钉轴力如文献[14]中描述,土钉轴力沿长度呈现中间大、两端小的“弓”形状态;当砂石桩-土钉联合支护时,单根土钉轴力变化趋势呈现出三个“波峰”,与文献[14]中结论不一的原因是,砂石桩与其桩间土形成的增强体不仅提供了较大的摩阻力,而且还具有一定的“强度”使土钉在该段区域内呈现“受压”状态,导致轴力在滑裂面处、砂石桩与土体接触界面处轴力达到较大值,土钉穿越砂石桩后轴力减小。

同时由砂石桩的变形趋势线可见,砂石桩的破坏与具粘结强度刚性桩不同,其变形破坏位置介于桩端持力层与坑底之间,破坏形式为剪切破坏(见图 6)。

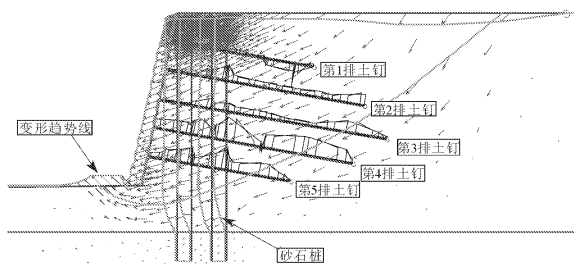


图 6 砂石桩-土钉墙变化趋势、轴力分布云图

3.3 稳定性分析

稳定系数取基坑强度折减计算不收敛对应的强度折减系数不合理,建议取基坑强度折减系数与侧向变形关系曲线中拐点对应的折减系数,作为稳定性系数^[15],见图 7。

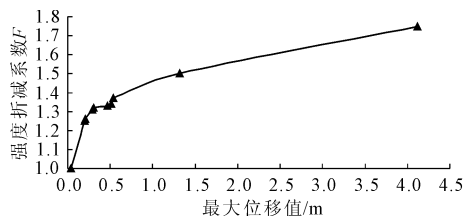


图 7 强度折减系数-位移关系曲线

由贯通剪应变云图图 8 可见,砂石桩-土钉墙支护结构达到稳定性极限状态后,土钉加固后所形成的复合土体出现类似“锚定板”中出现的破裂面后移现象,与砂石桩在土钉加固区域内形成一个“土墙”,提高了整体稳定性,根据强度折减法计算其稳定性系数为 1.32。

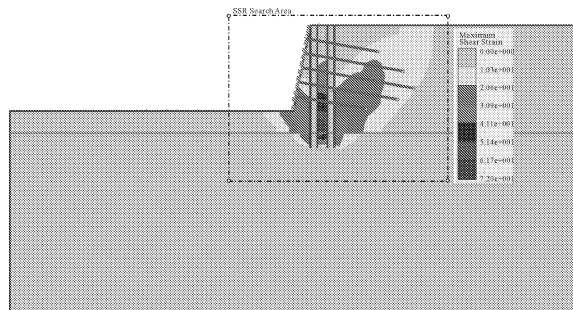


图 8 最大剪应变云图

综上,该基坑采用砂石桩-土钉墙组合支护结构,减少了基坑变形,提高了整体稳定性,经过一年的使用期,取得了良好的经济效益。

4 结论

通过对某基坑采用的砂石桩-土钉墙组合支护结构进行有限元数值模拟分析表明:

- (1) 砂石桩能有效的控制坡体水平位移,而竖向位移仍由土钉-土体组成的“加筋体”共同约束。
- (2) 砂石桩-土钉墙支护体系各排土钉轴力最大值分布与基坑深度有关,上部土体加固后具有一定的自稳能力,轴力较大值出现在中下部土钉;单根土钉轴力变化趋势呈现出三个“波峰”,土钉轴力在滑裂面处、砂石桩与土体接触界面处轴力达到较大值,土钉穿越砂石桩后轴力减小。
- (3) 砂石桩在土钉加固区域内形成一个“土墙”,整体很难出现内部破坏;且砂石桩的破坏与具

粘结强度刚性桩不同,表现的破坏方式为剪切破坏,其破坏面介于基坑底部与桩端持力层之间。

(4) 强度折减过程中未考虑土钉结构体的参数折减,相关工作有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 朱建新,温小军,罗明高,等. 土钉墙与高压旋喷桩在基坑工程中的联合应用[J]. 工程建设与设计,2004(6):34-36.
- [2] 谢永明. 软土基坑水泥搅拌桩-土钉组合支护结构的研究与应用[J]. 福建建筑,2009(8):56-58.
- [3] 郝峰. 高压旋喷桩复合土钉墙 Plaxis 有限元分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(9):52-55.
- [4] 汪志鹏. 土钉墙和高压旋喷桩在泛海·花园基坑中的应用[J]. 水电站设计,2010,26(2):75-77.
- [5] 许岩剑,肖仁成,钟德明. 软土基坑中水泥搅拌桩和土钉联合支护稳定性分析[J]. 市政技术,2011,29(1):128-130.
- [6] 程文若. 复合土钉墙支护在长江 I 级阶地软土基坑中的应用[J]. 土工基础,2013,27(4):12-16.
- [7] 陈子玉,宋彦辉,严豪. 有限元强度折减法应用的几

个问题及拓展[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):196-200.

- [8] 赵杰,邵龙潭. 基坑土钉支护边坡有限元稳定性分析方法探讨[J]. 岩土力学,2008,29(6):1654-1658.
- [9] 赵杰. 边坡稳定有限元分析方法中若干应用问题研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [10] 古海东,杨敏. 基于强度折减法的土钉支护结构稳定性分析[J]. 同济大学学报,2012,40(7):1003-1007.
- [11] 杨有成. 强度折减法在斜坡稳定性分析中的适用性研究[D]. 北京:中国地质大学,2008.
- [12] 裴利剑,屈本宁,钱闪光. 有限元强度折减法边坡失稳判据的统一性[J]. 岩土力学,2010,31(10):3337-3341.
- [13] 王树和,郑政,张举兵,等. 土钉墙支护基坑对临近地下管线的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(6):20-24.
- [14] 王曙光,滕延京,段启伟,等. 土钉墙变形及土钉内力特征研究[J]. 土木工程学报,2015,48(S2):36-40.
- [15] 庞晓明. 水泥土搅拌桩复合土钉支护基坑的变形与稳定性分析[D]. 上海:上海交通大学,2007.

(上接第 101 页)

参考文献:

- [1] 李晓军,李世民,徐宝. 岩土锚杆、锚索的新发展及展望[J]. 施工技术,2015,44(7):37-43.
- [2] 刘波,张功,杨伟红,等. 扩大头锚索在饱和粉细砂层中的受力特性[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(2):412-419.
- [3] 曾召田,刘发标,吕海波,等. 干湿交替环境下膨胀土变形试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(3):72-76.
- [4] 杨相. 膨胀土工程特性试验研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2018.
- [5] 何鹏. 膨胀土力学特性研究及边坡稳定性分析[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [6] 袁俊平,丁巍,蔺彦玲,等. 浸水历时对裂隙膨胀土渗透性的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1):83-86.
- [7] 陈亮,卢亮. 土体干湿循环过程中的体积变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(2):229-235.
- [8] 冷挺,唐朝生,徐丹,等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. 工程地质学报,2018,26(1):112-128.
- [9] 李凌芸. 基于干湿循环的膨胀土工程特性试验研究

[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.

- [10] 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.
- [11] 任德斌,常思萌,王国业. 扩大头锚杆结构参数优化研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016(3):466-475.
- [12] 李芬祥. 深基坑桩锚支护的数值模拟分析[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2013.
- [13] 黄明华,赵明华,陈昌富. 锚固长度对锚杆受力影响分析及其临界值计算[J]. 岩土力学,2018,39(11):125-133,154.
- [14] 李阳,王利超,冯振华,等. 扩大头抗拔锚杆承载特性理论分析与数值模拟[J]. 西南公路,2017(3):150-155.
- [15] 曹帅. 旋喷扩大头锚索在帝一广场基坑项目中的应用研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2018.
- [16] 四川省建筑地基基础检测技术规程:DBJ51/T014—2013[S]. 成都:西南交大出版社,2013.
- [17] 袁贵兴,张炳焜,胡蓉. 膨胀土地区压力型囊式锚索抗拔承载力试验研究[J]. 四川建筑,2015,35(3):124-127.