

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.049

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



土钉墙+水泥土桩墙联合支护结构的力学特性分析

万宗江¹, 朱碧堂²

(1. 中铁二局集团有限公司, 成都 610031; 2. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 南昌 330013)

摘要:为充分发挥水泥土桩墙的高强度特性,提出了一种土钉墙+水泥土桩墙的基坑联合支护结构,并介绍了其设计理念。基于有限元数值模型,结合南昌地区典型地质条件,系统地研究了联合支护结构对渗流场、土体水平位移、土钉轴力、水泥土桩墙桩身应力、基坑破坏模式的影响,以及坑底加固、水泥土桩墙距离对基坑支护性能的影响,并与传统土钉墙和复合土钉墙支护结构进行了对比分析。结果表明:在保证墙体安全的条件下,联合支护结构的受力机制更合理,开挖面处土体水平位移、桩身轴向及切向应力均小于传统的土钉墙和复合土钉墙;基坑破坏模式表现为重力式挡土墙破坏模式,对坑底进行加固处理可进一步显著改善其支护性能。

关键词:深基坑;水泥土桩墙;土钉墙;支护结构;数值模拟

中图分类号:TU751 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)04-0010-09

Analysis of mechanical properties of a novel support structure with soil nailing wall combined with cemented soil pile/wall for deep excavation

Wan Zongjiang¹, Zhu Bitang²

(1. China Railway No. 2 Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, P. R. China; 2. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, Nanchang 330013, P. R. China)

Abstract: In order to fully utilize the high strength of the cemented soil pile/wall, a retaining structure with soil nailing wall combined with cemented soil pile/wall for deep excavation is proposed and its design philosophy is discussed in this paper. Based on finite element numerical simulation combined with the typical geological condition of Nanchang area, the distribution characteristics of seepage flow, horizontal soil displacement, axial force of soil nail, stress of cement-soil pile wall and the failure mode as well as the influence of bottom reinforcement and cement-soil pile wall distance of the novel structure on the support performance are systematically studied. Meanwhile, comparative analysis with the traditional soil nailing wall structure and the composite soil nailing wall structure are conducted. The results show that: Under the condition of ensuring the safety of the wall, the support mechanism of the novel structure is more reasonable due to the horizontal displacement of the soil at the excavation face and the axial and tangential stresses of cement-soil pile wall much smaller than that under the traditional soil nailing wall structure and the composite soil nailing wall structure; the failure mode of the foundation pit is similar with that under the gravity retaining wall support method, and reinforcement of the pit bottom can significantly improve its

收稿日期:2020-03-10

基金项目:国家自然科学基金(41972291)

作者简介:万宗江(1978-),男,高级工程师,主要从事城市轨道交通、桥梁、隧道工程研究, E-mail:117905252@qq.com。

Received:2020-03-10

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 41972291)

Author brief: Wan Zongjiang (1978-), senior engineer, main research interests: urban railway, bridge and tunnel engineering, E-mail: 117905252@qq.com.

support performance.

Keywords: deep excavation; cement soil pile wall; soil nailing wall; supporting structure; numerical modelling

在富水砂层或中等强度黏土层的基坑支护设计中,水泥土桩墙(包括搅拌桩、高压旋喷桩、等厚度水泥土墙 TRD)通常用作止水帷幕以隔绝基坑内外的地下水连通,以便于基坑开挖施工^[1]。事实上,除了隔水作用外,水泥土桩墙本身就具有优良的力学性能,其刚度和强度远超天然土体。例如,李建军等^[2]基于室内模型试验研究了粉土中不同水泥掺入比下水泥土强度及变形特性,试验结果表明,24%水泥掺入比下,28 d 无侧限抗压强度接近 5 MPa,变形模量达到 4.6 GPa。此外,刘松玉等^[3]的现场实测也表明,在淤泥质黏土地层中,水泥土搅拌桩的无侧限抗压强度平均值也能达到 0.6 MPa。因此,在目前的基坑支护设计中,仅利用水泥土桩墙的隔水性能而未充分发挥其较好的刚度和强度特性,会造成材料或结构本身的巨大浪费。另一方面,随着城市地下综合体的不断兴起,传统的内支撑支护结构已较难适用于大面积基坑开挖支护,相反,具有自稳能力的绿色基坑支护结构有巨大的应用潜能^[4]。

为发挥水泥土桩墙的支挡性能,在目前工程实践中已发展出一种复合土钉墙支护结构,其将水泥土桩墙设置在开挖面处作为挡土结构,并通过土钉将其锚定在基坑外侧的土体中。杨志银等^[5]、段建立等^[6]详细介绍了该支护结构在实际工程中的应用,并给出了相应设计方法。张宗领等^[7]基于有限元方法量化分析了基坑转角对复合土钉墙支护结构受力和变形有利影响的范围。但由于土钉直径较小、土体强度低,满足设计锚固力需要的土钉长度较长,在周边建(构)筑物或者管线较为密集且对场地红线要求较为严格时,其适用性受到了限制。此外,龚晓南^[8]指出,对于传统的土钉墙或者复合土钉墙支护结构,需要特别重视其支护位移的评价分析,以降低对周边环境的影响。

鉴于此,笔者提出了一种新型土钉墙+水泥土桩墙(水泥搅拌桩、高压旋喷桩、等厚度水泥土连续墙 TRD)的联合基坑支护结构(如图 1 所示),基坑开挖面采用放坡土钉墙支护,其端头锚固在基坑外围的水泥土桩墙内。相较于传统的土钉墙支护,由于水泥土桩墙本身具有较高的承载性能,能提供更

大的锚固力,锚固作用更可靠。更重要的是,由于水泥土桩墙良好的锚固作用,可以大大降低土钉长度,将其限制在基坑开挖面至水泥土桩墙内。在场地红线控制严格的环境下,该支护结构能最大程度地发挥土钉的支护性能,扩大了其场地适用范围。

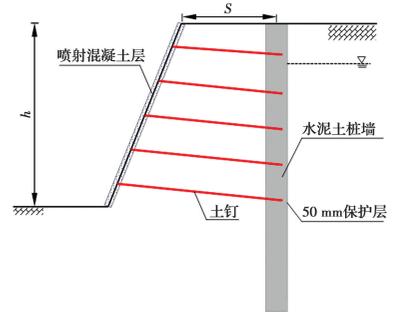


图 1 土钉墙-水泥土桩墙联合支护结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combined support structure

为了验证所提出的土钉墙+水泥土桩墙联合支护结构的支护性能,采用有限元分析软件 PLAXIS 研究其支护力学特性及破坏模式,并与传统支护结构进行对比分析。通过对基坑开挖面土体变形控制能力、基坑破坏模式等方面的对比分析,验证联合支护结构的优越支护性能。

1 联合支护结构设计理念

图 1 为土钉墙+水泥土桩墙联合支护结构示意图。在坑底未加固条件下,受地基承载力和坑底隆起控制,该支护结构可适用于开挖深度不大的基坑,其基本工作机理如下:

1) 水泥土桩墙除了止水外,插入到水泥土桩墙内的土钉可作为加强锚固段,水泥土桩墙可提供远大于原状土的锚拉力。同时,预留的保护层厚度(土钉末端到水泥土桩侧外侧距离,一般不小于 50 mm)和土钉孔内水泥浆能防止地下水渗漏。

2) 土钉墙和水泥土桩墙之间的土体受土钉加固和水泥土桩墙的约束作用,不发生主动破坏,土钉+水泥土桩墙整体表现为重力式挡墙工作性态。

3) 土钉墙+水泥土桩墙联合支护结构主要受水泥土桩墙后方土体施加的主动土压力作用。

4) 在土钉墙+水泥土桩墙重力式挡墙内部,被土钉墙加固的土体可视为水泥土桩墙前的预留土

体,对水泥土桩墙施加被动抗力。

5)土钉的设置主要用来抵抗水泥土桩墙内侧的土压力,考虑到土钉墙为柔性结构,在设计时仍按照库仑主动土压力理论进行计算,喷射混凝土与土体之间的摩擦角取土体内摩擦角的 $2/3$ 。

为实现土钉墙+水泥土桩墙联合支护的设计目标,其基本构造要求如下:

1)基坑进行放坡开挖,在开挖面设置喷射混凝土层,以满足整体支护要求。喷射混凝土厚度一般为 $80\sim 100\text{ mm}$ 。

2)土钉端部植入至水泥土桩墙内,以提供可靠的锚固作用。为防止地下水沿土钉渗漏,预留 50 mm 保护层,土钉全长注浆。

3)为了提供足够的锚固力,土钉植入至水泥土桩墙的长度不小于 1.0 m 。考虑到土钉的设计倾斜角度,水泥土桩墙可采用双排搅拌桩,无需搭接,可基本满足锚固长度要求。

4)水泥土桩墙距开挖面的距离 S 主要由场地建筑红线确定,在基坑设计时,可结合基坑开挖放坡大小和深度综合确定其设置距离,一般应控制在 $4\sim 6\text{ m}$ 范围内。

2 数值分析模型

2.1 典型支护方案

为了验证上述土钉墙+水泥土桩墙联合支护结构的支护性能,以南昌地区典型基坑工程为例,基于有限元分析软件 PLAXIS 对不同支护结构下的基坑工作特性进行分析。图 2(a)给出了采用联合支护结构进行基坑支护设计时其相应设计参数:基坑开挖深度为 8 m ,采用单道水泥土桩墙+土钉墙的支护方法,水泥土桩墙厚度 1 m ,喷射混凝土厚度为 100 mm ,从上至下共设置 5 道土钉。

此外,为了更好地说明联合支护结构的支护性能,在同等支护条件下设置了两组对照支护结构,即复合土钉墙支护结构和土钉墙支护结构。复合土钉墙支护结构中水泥土桩墙设置于开挖面处,且为了简化分析,将各层土钉进行了等长化处理,其总长度与联合支护时一致。土钉墙支护结构中仅考虑水泥土桩墙的隔水作用,厚度为 500 mm ,其余设计参数与联合支护方法一致。两组对照支护结构的支护参数如图 2(b)、图 2(c)所示。

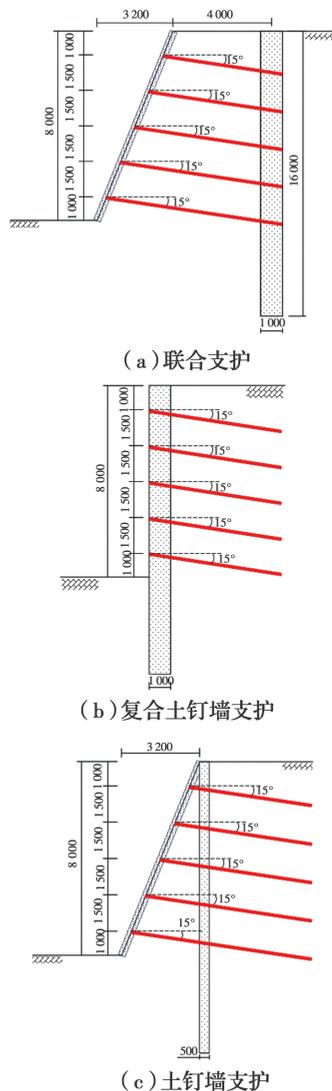


图 2 不同支护结构下基坑设计参数

Fig. 2 Design parameters of foundation pit under different support structures

2.2 模型参数及模拟方法

南昌地区典型的地质条件为富水砂层上覆粉质黏土和填土地层。在模型研究深度范围内,从上至下可分为素填土、粉质黏土、细砂及中粗砂,地下水埋深 2 m 。在数值计算模型中,土体采用摩尔-库伦模型,其相应参数见表 1。

水泥土搅拌桩采用摩尔-库伦模型进行模拟,根据原位土体的不同,其无侧限抗压强度 f_{cu} 一般在 $0.3\sim 4.0\text{ MPa}$ 之间,对黏性土层取低值,砂性土层取高值。叶观宝等^[9]基于大量统计资料分析给出了水泥土黏聚力 c 与无侧限抗压强度 f_{cu} 的经验关系式 $c = (0.2\sim 0.3) f_{cu}$,内摩擦角 $\varphi = 20^\circ\sim 30^\circ$ 。此外,在有限元分析中取水泥土搅拌桩的弹

性模量 $E=(300\sim 500)f_{cu}^{[10]}$ 。考虑到地层差异对水泥土成桩性能的影响,从上至下各土层中的水泥土搅拌桩无侧限抗压强度 f_{cu} 分别取0.5、1、2、4 MPa。

参考水泥土参数的经验取值方法,为了更合理地考虑水泥土搅拌桩在不同地层中的力学性质差异,在数值计算中按照地层的差异分别赋予水泥土桩墙不同的力学参数,其取值见表1。

在数值模型中,土钉及喷射混凝土均采用结构单元进行模拟,其中,土钉采用格栅单元,喷射混凝土

土采用板单元。格栅单元仅能承受拉力作用,不能承受弯曲力作用,其等效抗拉刚度 EA 可按式(1)、式(2)确定。

$$E_{eq} = E_n(A_n/A) + E_g(A_g/A) \quad (1)$$

$$EA = \frac{E_{eq}}{S_h} \left(\frac{\pi D_{DH}^2}{4} \right) \quad (2)$$

式中: E_g 为注浆材料弹性模量; E_n 为土钉弹性模量; A 为土钉孔总截面积; A_n 为土钉截面积; A_g 为注浆材料截面积, $A_g = A - A_n$; S_h 为土钉水平间距, $S_h = 1.0$ m; D_{DH} 为钻孔直径, $D_{DH} = 0.1$ m。

表1 数值模型计算参数

Table 1 Parameters adopted for numerical modelling

名称	厚度/m	饱和密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	非饱和密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	弹性模量 E/MPa	泊松 比 ν	渗透系数/ ($cm \cdot s^{-1}$)
素填土	2	1.87	1.67	16	19	5	0.33	4×10^{-2}
粉质黏土	5	1.90	1.60	16	35	6.5	0.33	2×10^{-5}
细砂	5	1.93	1.72	32	1	10	0.33	3×10^{-3}
中粗砂	20	1.97	1.65	34	1	18	0.33	6×10^{-2}
水泥-素填土	2	2.0	2.0	25	100*	150**	0.2	
水泥-粉质黏土	5	2.0	2.0	25	200*	300**	0.2	
水泥-细砂	5	2.0	2.0	25	400*	600**	0.2	
水泥-中粗砂	4	2.0	2.0	25	600*	900**	0.2	
喷射混凝土		2.5				22 000	0.2	

注:土体参数来源于南昌地区某实际场地的地质勘察报告;*按照 $c=0.2f_{cu}$ 确定(中粗砂 $c=0.15f_{cu}$);**按照 $E=300f_{cu}$ 确定(中粗砂 $E=300f_{cu}$)。

在实际工程中,土钉的受拉破坏面主要位于土钉外侧土体中,其界面并不会发生滑移破坏,因此,在数值计算中,土-结构物界面采用刚性界面,以保证其相互间不会产生错动滑移^[11]。

数值计算时采用先一次性降水至坑底以下1 m,然后再分层开挖的方式模拟实际基坑工程的开挖施工,每层开挖厚度由土钉的竖向间距大小确定。

对于联合支护结构中土钉和喷射混凝土的设置,若严格按照先开挖后支护的方式进行数值模拟,当开挖到下部较深土层时,容易导致数值计算不收敛。实际施工时一般会先开挖基坑四周局部土体进行土钉支护,其余大部分土体仍处于未开挖状态,因此,按照开挖和土钉喷锚支护同步考虑进行数值计算。

3 数值模拟计算结果

3.1 渗流场分布

图3为不同支护结构下基坑渗流场分布图。从图3可以看出:不同支护结构下,基坑渗流场分布形态基本一致;由于中粗砂的渗透系数远大于其上部土体,地下水主要在中粗砂中横向流动。此外,由于水泥土搅拌桩渗透系数远低于天然土体,其隔水效果较好,坑内外保持了较高的水头差。

需要指出的是,在模型中由于水泥土搅拌桩未隔断含水砂层,基坑降水量总体偏大,3种支护结构下每天降水量基本在 $60\sim 68$ m^3/m 之间。为减小渗流量,可以考虑加大止水帷幕的深度以隔绝坑内外地下水的连通。

3.2 水平位移分布模式

图4为不同支护结构下基坑水平位移云图。从

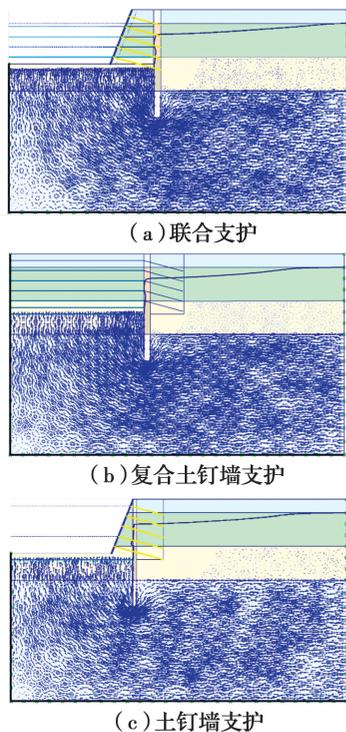


图3 不同支护结构下基坑渗流场分布图

Fig. 3 Distribution diagrams of seepage field of foundation pit under different support structures

图4可以看出:不同支护结构下基坑水平位移分布模式基本一致,即均表现为基坑中下部区域位移大、上部浅层区域位移小的分布特性。与传统支护结构(复合土钉墙与土钉墙)不同的是,采用联合支护结构,由于土钉对水泥土桩墙的拉拽作用,将一部分土压力传递至深层土体中,从而在水泥土搅拌桩底部产生一定的侧向变形,其变形影响范围有所增大,这也从侧面反映了水泥土桩墙对土钉的锚固作用。

图5为不同支护结构下开挖面水平位移随深度的分布曲线。从图5可以看出:采用联合支护结构,基坑的最大水平位移要显著小于其他两种基坑支护结构,其最大水平位移为37.1 mm;土钉墙支护中,开挖面水平位移分布模式与联合支护结构基本一致,但其最大位移值为56 mm,较联合支护结构大18.9 mm;相对而言,复合土钉墙支护结构变形控制能力较差,最大水平位移值达95.2 mm。从上述分析可以看出,相较于传统支护结构,联合支护结构的支护性能更为优越,能更好地控制基坑水平变形,以满足工程设计要求。

3.3 土钉轴力分布

图6为开挖至设计深度时不同支护结构下土钉

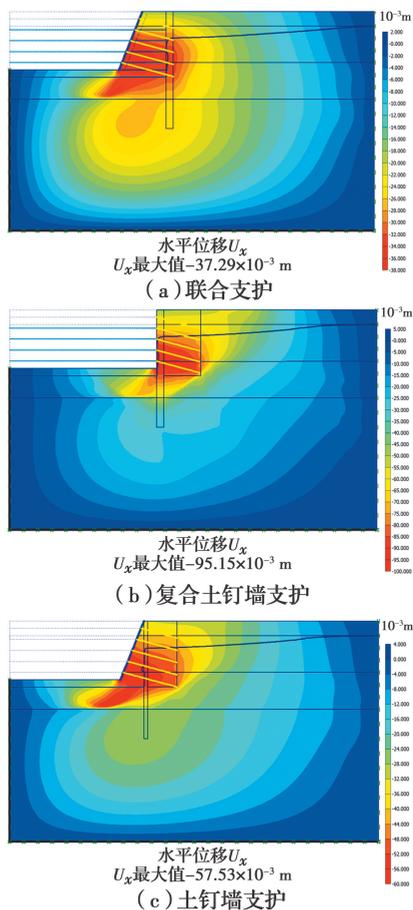


图4 不同支护结构下基坑水平位移云图

Fig. 4 Contours of horizontal displacement under different support structures

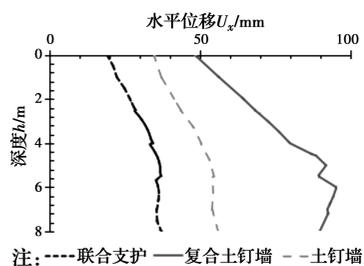


图5 不同支护结构下基坑开挖面水平位移曲线

Fig. 5 Horizontal displacement curves of excavation face under different support structures

的轴力分布图。从图6可以看出:总体而言,土钉轴力随埋置深度的增加而不断增大,最大轴力均位于底部第5道土钉处,且复合土钉墙中土钉最大轴力大于其他两种支护结构,这主要与其整体变形较大有关。

此外,不同支护结构下土钉轴力的分布特性也存在一定差异。对于联合支护结构和土钉墙支护结

构,土钉轴力沿着土钉端部往外持续增长,基本在端头处达到最大值。相对而言,在复合土钉墙中,土钉的锚固作用主要体现在水泥土挡墙背后的土体中,在水泥土桩墙内,由于其变形模式为挡墙侧移拉拽带动土钉滑移,其轴力发生显著衰减。对于联合支护结构,土钉轴力在水泥土桩墙内增长较快,但由于其整体变形较小,土钉轴力仍然处于较低水平,远小于其极限锚固力,锚固作用未充分发挥。

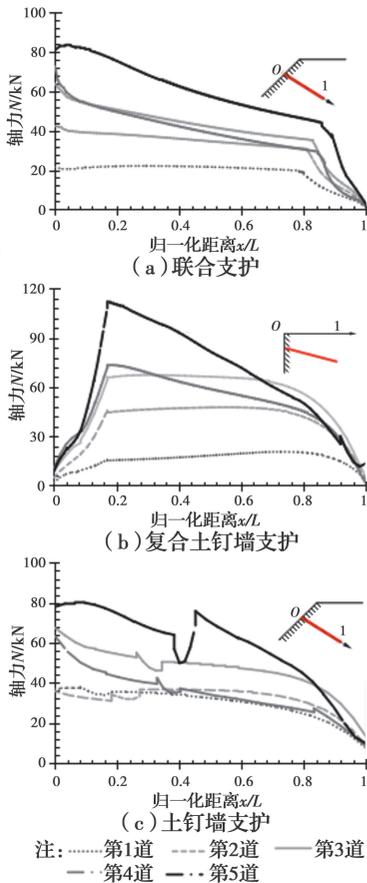


图 6 不同支护结构下土钉轴力分布图

Fig. 6 Distribution diagrams of soil nails axial force under different support structures

如图 6(c)所示,在土钉墙支护结构下,土钉轴力在中部区域发生了突变。其主要原因是数值模型中在此位置处设置了一道止水帷幕用的水泥土搅拌桩(图 2(c)),其物理力学参数与周边土体有显著差异,导致土钉在穿越水泥土桩时轴力发生了突变。但总体而言,由于水泥土桩厚度只有 500 mm,其对土钉整体轴力分布特性的影响有限。

3.4 水泥土桩墙桩身应力分布

为保证水泥土桩墙不发生材料屈服破坏,需控

制水泥土桩墙桩身应力不超过相应允许值。以最大拉应力小于 $5\% f_{cu}$ 、最大压应力小于 f_{cu} 、最大剪应力小于 $10\% f_{cu}$ 作为桩身允许应力控制标准,其中, f_{cu} 为水泥土桩墙无侧限抗压强度。

图 7、图 8 为基坑开挖至 8 m 时水泥土桩墙轴向及切向应力分布曲线,其中左侧是基坑开挖侧;自重应力指的是未开挖时由水泥土自身重量引起的应力。

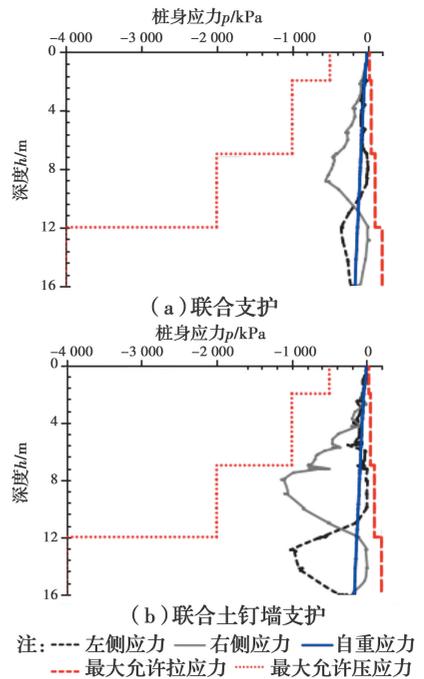


图 7 桩身轴向应力分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of axial stress of cemented soil pile

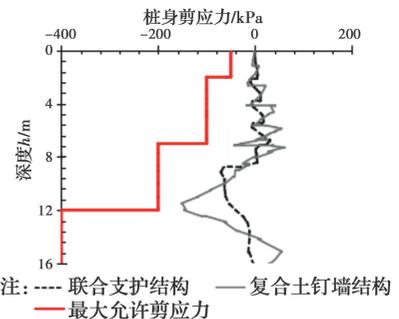


图 8 桩身剪应力分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of shear stress of cemented soil pile

从图中可以看出:在联合支护结构和复合土钉墙支护结构中,其桩身应力大小均满足设计要求;但相对而言,联合支护结构由于其受力机制更为合理,桩身轴向及切向应力更小,水泥土桩墙更为安全可靠。

3.5 基坑破坏模式

对基坑破坏模式的研究不仅能更准确地揭示基坑支护机理,还可以为基坑整体稳定性验算提供理论基础。基于强度折减法,对不同支护条件下的基坑破坏模式进行了分析。

如图9所示,对于联合支护结构,开挖面与水泥土桩墙之间的土体基底承载力失稳滑移,继而引起水泥土挡墙整体倾覆破坏,表现为重力式挡土墙破坏模式。从图9(b)可以看出,水泥土桩墙内侧土体塑性点分布特性符合地基承载力失稳破坏模式,而外侧土体则表现为主动破坏模式。

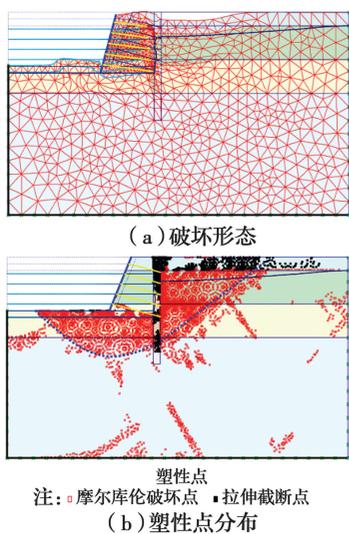


图9 联合支护结构下基坑破坏模式

Fig. 9 Failure mode of foundation pit under combined support structure

图10为复合土钉墙中基坑破坏形态及塑性点分布图。从图10可以看出:基坑破坏形态表现为水泥土桩墙自身材料的破坏,并引起搅拌桩外侧土体的整体滑移;相较于联合支护结构,复合土钉墙支护结构中土体受拉屈服分布较为广泛,未能充分发挥其抗剪性能。

土钉墙支护中基坑的破坏形态与土体塑性区域分布如图11所示。从图11可以看出:水泥土桩墙由于只考虑其隔水作用,厚度较小,其对基坑整体失稳破坏模式的影响较小,表现为沿着薄弱面的整体滑移破坏。

3.6 坑底加固对比分析

由前述基坑破坏模式分析可知,对于联合支护

结构,其破坏模式主要表现为基底承载力的不足,因此,对坑底进行加固处理可以进一步改善其支护性能。采用水泥土桩墙进行坑底加固,加固区域尺寸为 $8\text{ m} \times 4\text{ m}$ (深 \times 宽),沿着开挖面坡脚分布,加固区域水泥土搅桩参数与止水帷幕搅拌桩参数一致。

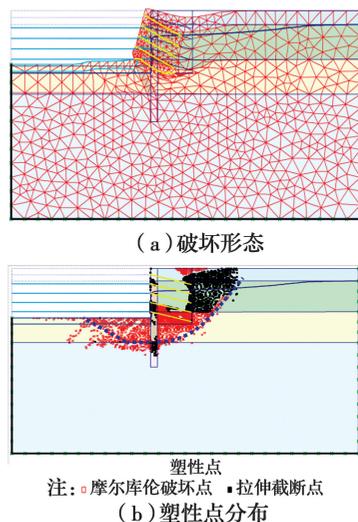


图10 复合土钉墙支护结构下基坑破坏模式

Fig. 10 Failure mode of foundation pit under composite soil-nailed wall supporting structure

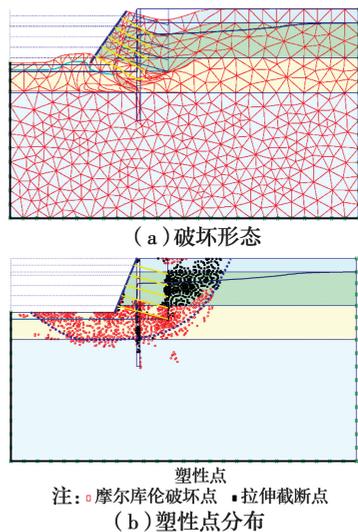


图11 土钉墙支护结构下基坑破坏模式

Fig. 11 Failure mode of foundation pit under soil nailing wall support structure

图12为不同坑底处理条件下基坑水平变形分布曲线。从图12可以看出:坑底加固能显著减小基坑水平变形,进一步提高基坑支护性能;顶部变形由 19 mm 减小至 6 mm ,减小幅度为 68% ,最大水平变形也由 37 mm 降低至 25 mm ,减小幅度为 32% 。

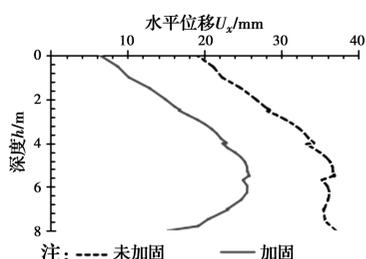


图 12 不同坑底处治条件下基坑水平位移对比曲线

Fig. 12 Curves of horizontal displacements of foundation pit under different base treatment conditions

3.7 距离影响分析

采用联合支护结构进行基坑设计时,水泥土桩墙距开挖面的水平距离 S 也是需要特别考虑的设计参数。图 13 为不同距离下基坑水平变形随深度发展的曲线,从图 13 可以看出:在 $S=2$ m 时,基坑水平变形大小显著大于其余两种工况,其最大变形值接近 50 mm;相对而言, $S=4$ m 及 $S=6$ m 情况下开挖面的水平位移基本完全一致,表明当水泥土桩墙距开挖面超过 4 m 后,继续增大间距 S 并不能改善土体水平变形大小,开挖面后侧土体对水泥土搅拌的支撑作用已达到稳定。因此,为保证土钉墙+水泥土桩墙表现为重力挡墙工作模式,取 $S=4\sim 6$ m 合适。

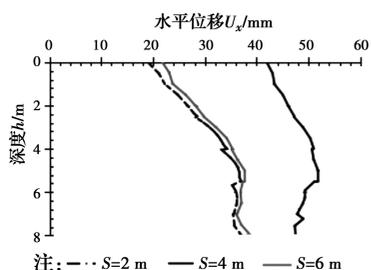


图 13 水泥土桩墙距离对开挖面水平位移曲线影响

Fig. 13 Horizontal displacements of the excavation for different distances of the cemented soil pile/wall to the excavation edge

4 结论

基于有限元分析软件 PLAXIS,结合南昌地区典型地质条件,较为系统地研究了土钉墙+水泥土桩墙联合支护结构的力学特性,并与传统支护结构进行了对比分析。根据计算分析结果,得出以下结论:

1)相较于传统土钉墙和复合土钉墙,土钉墙+

水泥土桩墙联合支护结构可充分利用水泥土桩墙良好的止水和锚固特性,所需土钉长度更短,可有效避免土钉侵占场地红线问题,其适用性更广泛。

2)在土钉墙+水泥土桩墙联合支护结构中,土钉墙依靠水泥土桩墙进行锚固,而水泥土桩墙借助加筋土的反压作用可进一步减小基坑开挖引起的土体变形,达到联合支护的效果;且水泥土桩墙桩身轴向及切向应力较传统复合土钉墙支护大为降低,水泥土桩墙更为安全可靠。

3)土钉墙+水泥土桩墙联合支护结构的基坑破坏模式表现为重力式挡土墙破坏,对坑底进行加固处理可进一步改善其支护性能。

参考文献:

- [1] 王贤昆,程群,庞建勇,等. 水泥土搅拌桩止水帷幕工程特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 706-712.
WANG X K, CHENG Q, PANG J Y, et al. Engineering properties of waterproof curtain from cement mixing piles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 706-712. (in Chinese)
- [2] 李建军,梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 473-477.
LI J J, LIANG R W. Research on compression strength and modulus of deformation of cemented soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 473-477. (in Chinese)
- [3] 刘松玉,席培胜,储海岩,等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 560-564.
LIU S Y, XI P S, CHU H Y, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 560-564. (in Chinese)
- [4] 郑刚,郭一斌,聂东清,等. 大面积基坑多级支护理论与工程应用实践[J]. 岩土力学, 2014, 35(Sup2): 290-298.
ZHENG G, GUO Y B, NIE D Q, et al. Theory of multi-bench retaining for large area foundation pit and its engineering application [J]. Rock and Soil

- Mechanics, 2014, 35(Sup2): 290-298. (in Chinese)
- [5] 杨志银, 张俊, 王凯旭. 复合土钉墙技术的研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 153-156.
- YANG Z Y, ZHANG J, WANG K X. Development of composite soil nailing walls [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 153-156. (in Chinese)
- [6] 段建立, 谭跃虎, 樊有维, 等. 复合土钉支护的现场测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2128-2132.
- DUAN J L, TAN Y H, FAN Y W, et al. Field testing study on composite soil nailing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2128-2132. (in Chinese)
- [7] 张宗领, 王士革, 刘林超. 复合土钉支护转角有利影响范围[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 107-114.
- ZHANG Z L, WANG S G, LIU L C. Beneficial affected area of corner of composite soil nailed wall [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(3): 107-114. (in Chinese)
- [8] 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 X N. Some problems on soil nailing and composite soil nailing [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 80-83. (in Chinese)
- [9] 叶观宝. 地基加固新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- YE G B. New technology for foundation reinforcement [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [10] 林国彬. 水泥土搅拌桩复合土钉支护体系的有限元分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- LIN G B. Finite element analysis of cement-soil mixing pile composite soil nailing support system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] BABU G, SINGH V. Simulation of soil nail structures using PLAXIS 2D [J]. Plaxis Bulletin, 2009, 25: 16-21.

(编辑 章润红)