

止水-加强型土钉墙在软弱土层基坑支护中的应用研究

周宏益¹, 吴厚信²

(1. 广东省物料实验检测中心, 广东 广州 510080; 2. 广东省地质建设工程勘察院, 广东 广州 510080)

摘要: 止水-加强型土钉墙是由土钉墙和止水帷幕组成的一种新型支护体系, 具有强度高、止水效果好和比较经济的特点, 适用于淤泥和砂层等软弱地层基坑支护工程。结合广州地区某基坑特征, 分析了止水-加强型土钉墙的支护机理和受力特点, 指出止水-加强型土钉墙是通过压力注浆锚杆(管)、搅拌桩和钢管桩的共同作用, 使加筋范围内具有近似于“重力式挡土墙”的特征。最后通过基坑监测数据表明此支护体系有足够的储备, 可推广于类似地层基坑支护工程。

关键词: 基坑支护; 止水-加强型土钉墙; 水泥土搅拌桩; 边坡稳定; 复合土体

中图分类号: TU473.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2009)08-0046-05

Application of Reinforced Impervious Soil-nailing Wall in Soft-soil Foundation Pit Support/ZHOU Hong-yi¹, WU Hou-xin² (1. Guangdong Province Material Testing Center, Guangzhou Guangdong 510080, China; 2. Guangdong Geological Engineering Investigation Institute, Guangzhou Guangdong 510080, China)

Abstract: The reinforced impervious soil-nailing wall is a new type of supporting system composed of soil nail and impervious wall, which has high water impermeability with high strength but low cost, and is suitable to foundation pit supporting engineering in silt and sand formation. Analysis was made on supporting mechanism and stress characteristics of the reinforced impervious soil-nailing wall in combination with a case of foundation pit engineering in Guangzhou, and conclusion was drawn that the characteristics of reinforced impervious soil-nailing wall, which was similar to ‘gravity retaining wall’ in range of bolt, came from the interaction of pressed grouting bolt, mixing piles and steel pipe pile. The monitoring data show that this foundation supporting system has sufficient safety reservation, and can be extended to foundation pit supporting project in similar formation.

Key words: foundation pit supporting; reinforced impervious soil-nailing wall; cement-soil mixing pile; slope stability; composite soil

0 前言

止水-加强型土钉墙是为防止基坑外地下水位降低而引起坑周建(构)筑物、道路及管网沉降而开发出的一种止水型土钉墙。止水-加强型土钉墙一般由土钉墙和止水帷幕两部分组成, 而止水帷幕通常采用相互搭接的深层搅拌桩、高压旋喷桩或压密注浆技术。这样就使土钉墙在不先进行降水处理的情况下得以应用。

深层搅拌桩造价较低, 适用于人工填土、一般粘性土和粉土地层。当土质条件较差及地下水较丰富时, 可用双排甚至多排搅拌桩形成止水帷幕并加固土体。为限制土钉墙位移, 采用土钉墙和预应力锚杆(索)联合使用的技术, 即对于变形要求严格的工程, 在单排甚至多排搅拌桩中内插钢管桩后, 在土钉墙的中部设置预应力锚杆(索), 对土钉墙施加初始

预应力。这种加强型土钉墙, 可大大地减少墙体的位移, 提高工程的安全度, 满足不同实际的需要。笔者通过参与多个止水-加强型土钉墙设计并直至基坑施工稳定, 以此总结出该类支护体系的特征, 可作为类似地层中的基坑支护参考。

1 止水-加强型土钉墙的作用机理

止水-加强型土钉墙的基本构造有土钉(预应力锚杆)、水泥土搅拌桩、挂网喷射混凝土面层、原位土等, 通常可在水泥土搅拌桩中内插钢管桩以提高其抗弯能力。其构造组成如图1所示。设计中一般竖向钢管桩桩径取114~150 mm, 壁厚3~5 mm, 间距1.0~2.0 m, 可在钢管桩内壁加焊2~3根Ø25 mm纵筋加强钢管桩抗弯能力。加强型土钉墙在软土或砂层中, 可采用Ø48δ3.5 mm钢花管土钉注浆,

收稿日期: 2009-06-21

作者简介: 周宏益(1981-), 男(汉族), 海南陵水人, 广东省物料实验检测中心, 地质工程专业, 硕士, 主要从事岩土工程勘察和设计方面的生产和科研工作, 广东省广州市东风东路751号, zhouhongyi0701@163.com; 吴厚信(1941-), 男(汉族), 广东普宁人, 广东省地质建设工程勘察院高级工程师, 地质矿产专业, 从事水文地质、工程地质、环境地质、岩土工程、地基与基础工程技术和管理工作, 广东省广州市东风东路739号, wuhouxin_1@163.com。

注浆材料为 42.5R 普通硅酸盐水泥,水泥浆水灰比 0.5~0.6。

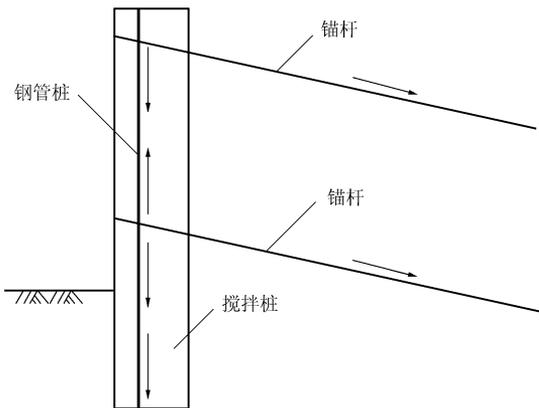


图1 止水-加强型土钉墙构造及其力的传递示意图

土钉(预应力锚杆)通过水泥土搅拌桩和钢管桩进行力的传递和扩散,使支护体形成一共同受力的整体,其作用机理为:在支护体中,使用具有一定强度和刚度的土钉通过压密注浆置于原位土中,与原位土形成复合土体,土钉与土体共同承担外荷载和土体的自重应力,当土体进入塑性变形阶段,土体应力逐渐向土钉转移。由于土钉与土体的相互作用,土钉将所承受荷载通过土钉向土体深层传递及周围扩散,从而降低复合土体的应力水平,并推迟土体开裂域的形成。土钉在高压注浆过程中,由于注浆时一般压力都控制在 0.5~0.6 MPa 左右,浆液在压力作用下,沿土体裂隙及毛细孔扩散,不仅使土体得到加固,改变了原有受力性能,且由于钢筋(钢管)的加筋作用,可以视为在加筋范围内的“重力式挡土墙”^[1]。实践证明,具有足够厚度和嵌固深度的帷幕墙实际上还具有明显的传力和挡土能力。

2 止水-加强型土钉墙的设计

因止水-加强型土钉墙中的土钉设计和土钉总抗拔力验算与普通土钉墙大体相同,以下主要阐述止水-加强型土钉墙因有了超前支护其设计验算方法与普通土钉墙的不同之处。

2.1 土钉设计

土钉设计参数包括土钉长度、孔径、间距、倾角及钢筋直径等,如遇淤泥层或砂层可改用锚管替代土钉可获得足够的抗拉能力。

土钉长度与基坑深度之比一般在 0.6~1.2 之间,对于饱和软土层,由于抗剪强度低,土钉内力因水压作用而增加, $L/H > 1.0$ 为宜。初选土钉长度还可按下式进行计算:

$$L = mH + S_0 \quad (1)$$

式中: m ——经验参数,取 0.6~1.0; H ——基坑垂直深度,m; S_0 ——止浆器长度,一般取 0.6~1.2 m。

土钉间距一般在 1.2~2.0 m 之间,成孔直径和施工机械有关,一般在 110~130 mm 之间。

在饱和软土层中,土钉间距可小于 1.0 m,但土钉间距应符合下列公式:

$$S_x \cdot S_y \leq 6.0 \quad (2)$$

$$S_x \cdot S_y \leq KDL \quad (3)$$

式中: S_x ——土钉水平间距,m; S_y ——土钉垂直间距,m; K ——注浆工艺系数; D ——孔径,m; L ——土钉长度,m。

土钉验算包括土钉长度验算和土钉直径验算,此验算和普通土钉墙验算相同。

2.2 帷幕体的设计

止水-加强型土钉墙中的止水帷幕(水泥土搅拌桩)可起挡水、固化软弱土层,还起着抗渗、抗隆起等作用。但是在止水-加强型土钉墙的设计中一般不考虑水泥土搅拌桩的影响,仅仅把它当作一种安全贮备。不过,水泥土桩的抗剪能力大约提供 25% 的抗滑力矩,因此,不能随意削弱。在开挖过程中,在下一层土钉施工前,水泥土搅拌桩起临时支护作用,可以防止帷幕后的泥(砂)水挤出。因此,要验算水泥土桩产生冲剪破坏和弯折破坏的可能性。帷幕功能的好坏是止水-加强型土钉墙成败的关键,具体设计时应根据场地地质条件,综合安全、经济等因素,选择合理的帷幕体形式。根据大量的工程实践,止水帷幕宜插入相对不透水层的深度 d 可按式(4)计算:

$$d = (h - ba)/2a \quad (4)$$

式中: h ——作用水头,m; a ——接触面允许水力坡降,当以残积粘性土作为相对不透水层时,可取 2~3; b ——帷幕的厚度,m,若止水帷幕没有插入相对不透水层,则应进行管涌和抗隆起验算。

另外,搅拌桩中内插钢管桩强度验算可采用排桩支护模式计算,所得支护桩最大弯矩和剪力作为钢管桩型号的选用依据。

2.3 稳定性验算

止水-加强型土钉墙内部稳定性分析方法常用极限平衡法,重要工程用有限元法设计与分析。用极限平衡法分析内部稳定性时,采用的土体破坏面形状常假定为圆弧线。止水-加强型土钉墙内部稳定性验算实际是一个不断寻找临界破坏面的过程。其理论公式与素土边坡稳定性计算公式相似,只是

在公式里考虑了土钉、锚杆和水泥土搅拌桩的影响。同时计算应考虑不同开挖工况时的整体稳定性。其整体稳定性计算可参照图2。

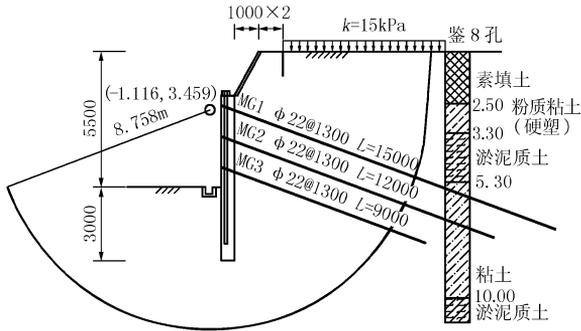


图2 止水-加强型土钉墙整体稳定性计算简图

在内部自身稳定得到保证的情况下,在土钉长度范围内会形成一个“土墙”,它的作用类似重力式挡墙。因此,以重力式挡土墙的计算理论进行止水-加强型土钉墙的外部稳定性分析,外部稳定性分

析包括整体滑移分析和整体倾覆分析,可参照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002)中有关重力式挡土墙的规定进行验算。

3 工程实例

3.1 工程概况

已支护的某基坑工程位于广州市海珠区江燕路与燕子岗路交汇处东北侧,建筑物高度33.45 m,设地下室1层,地下建筑面积2397 m²,地上8层,地上建筑面积20519 m²。本工程计算开挖深度约为5.50 m;消防水池底板面标高约为-5.600 m,计算开挖深度约为6.30 m;电梯井底板面标高约为-6.400 m,计入基础承台厚度及垫层厚度后,电梯井计算开挖深度约为8.80 m。基坑西面为江燕路,人行道边距离基坑最小距离约为5 m,多数地下管线沿江燕路布设,最近管线约距基坑10.7 m。该基坑平面布置如图3所示。

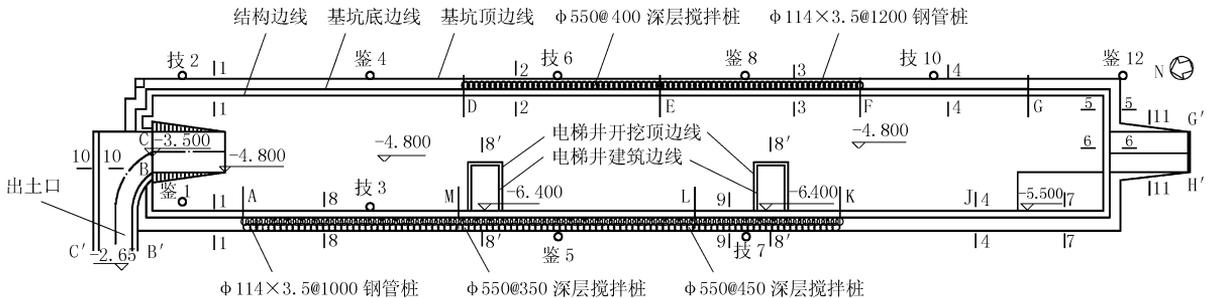


图3 基坑支护平面图

3.2 地层与岩土参数取值

开挖范围内主要地层有填土层、冲(坡)积土层(Q^{al+pl})、残积层(Q^{el})、基岩(K_2s^1),按成因类型、名称、状态划分,将岩土分层由上至下分为:

(1) 人工填土层(Q^{ml})

①填土,杂色,由碎石、砖块、砼块及粘性土等组成,土质不均,结构松散,层厚0.50~2.60 m。

(2) 冲(坡)积土层(Q^{al+pl})

②淤泥(淤泥质土),深灰色,流塑,含粉细砂,层顶埋深3.30~10.00 m,层厚1.00~2.20 m;

③中砂,灰黑色,松散~稍密,以松散为主,颗粒稍均匀,饱和,层顶埋深0.50~10.80 m,层厚1.00~4.00 m;

④粘土、粉质粘土、粉土,红黄色、灰黄色,软塑~坚硬,以可塑、硬塑为主,局部为粉土,含粉细砂,按稠度可划分为:

④₁层,可塑,层顶埋深0.90~11.90 m,层厚0.80~5.80 m;

④₂层,硬塑,部分孔为中密状粉土,层顶埋深0.60~11.00 m,层厚1.00~4.70 m。

(3) 残积土层(Q^{el})

⑤粉质粘土、粉土,褐黄色、褐红色,含粉细砂、中粗砂及稍密~中密状粉土,为原岩风化残积土,分布广泛,根据其稠度状态分为两个亚层:

⑤₁层,可塑,部分孔为稍密状粉土,层顶埋深2.00~12.00 m,层厚1.80~4.80 m;

⑤₂层,硬塑,部分孔为中密状粉土,层顶埋深4.15~11.60 m,层厚1.80~2.35 m。

(4) 基岩

本场地揭露的基岩为白垩系上统三水组段(K_2s^1)的沉积碎屑岩,岩性主要有细砂岩、含砾粗砂岩、砾岩。岩心呈褐灰~褐红色,岩石差异风化作用较强烈,分布不均匀。根据岩石风化程度分为三个风化带:

⑥₁强风化,岩心破碎,呈碎块或碎屑状,局部夹薄层全风化及中等风化岩,采心率40%~61%,层

顶埋深6.50~19.50 m,层厚0.60~2.50 m;

⑥₂中等风化,裂隙发育,岩心较破碎,呈短柱状、块状、碎块状,局部夹薄层强风化岩及微风化岩,铁钙质胶结,采心率80%~95%,层顶埋深3.00~18.50 m,层厚0.80~6.00 m;

⑥₃微风化,岩心完整,呈柱状、块状,局部夹薄层中等风化岩,铁钙质胶结或钙质胶结,采心率90%~98%,层顶埋深3.20~21.10 m,层厚0.70~12.20 m。

岩土层主要参数见表1所列。

表1 各土层岩土力学指标

地质成因	土层名称	天然重度 γ / (kN·m ⁻³)	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
Q ^{ml}	人工填土层	19.5	8	14
	淤泥	16.2	5	5
	细砂	19.5	0	25
	中砂	19.3	0	25
	粗砂	19.3	0	25
冲(坡)积土层 Q ^{al+pl}	粉质粘土、粉土(软塑)	17.0	14	10
	粉质粘土、粉土(可塑)	17.5	18	14
	粉质粘土、粉土(硬塑)	18.2	25	16
	粉质粘土、粉土(坚硬)	18.4	35	20
残积层	可塑状粉质粘土	19.2	25	18
	硬塑状粉质粘土	19.4	35	22
基岩 K _{2s} ¹	强风化岩	20.2	50	26
	中风化岩	21.5	350	31
	微风化岩	22.0	600	33

其中,中砂层以松散为主,颗粒粗大,孔隙率高,是场地主要的富水层位,淤泥及粘土(粉质粘土),属弱含水层或近似相对隔水层。勘探期间实测钻孔地下水位埋深为0.60~1.00 m,地下水位主要受大

气降水及侧向渗透补给。基坑的总体地质条件为东面中段及西面中段地层含较厚的淤泥层及砂层,为软弱不良地层,其余各面地层均较好。

3.3 基坑支护方案

本工程基坑开挖深度为5.50、6.30、8.80 m,基坑开挖深度范围主要为素填土、淤泥和细、中砂层,且部分地段存在淤泥及砂层较厚(有的地方为4.0 m),基岩埋藏较深,地下水位埋深为0.60~1.00 m,以砂层为富含水层,故深基坑支护需解决以下几个重点和难点:

(1) 基坑止水,特别要注意解决砂层间的止水问题;

(2) 要考虑深厚淤泥、细、中砂层中锚杆(索)成孔及质量难以保证的困难,以及锚杆(索)施工可能带来涌水、涌砂对周边道路、建(构)筑物的影响;

(3) 基坑存在车道入口和出口,结构外侧局部出现附属设施。

因此,根据周边环境情况、地质情况及基坑开挖深度,并考虑到施工的可行性,基坑支护在基坑中部地层较弱地段也就是基坑长边中段受力最大部位,采用止水+加强型土钉墙支护型式,即小放坡+密排1~2Ø550@400 深层搅拌桩内插钢管桩+锚杆(索)支护(见图4);地层较好地段采用普通土钉墙支护,从而有效地解决淤泥和砂层等软弱地层地段基坑支护的问题。

3.4 支护体系评价

3.4.1 方案优选

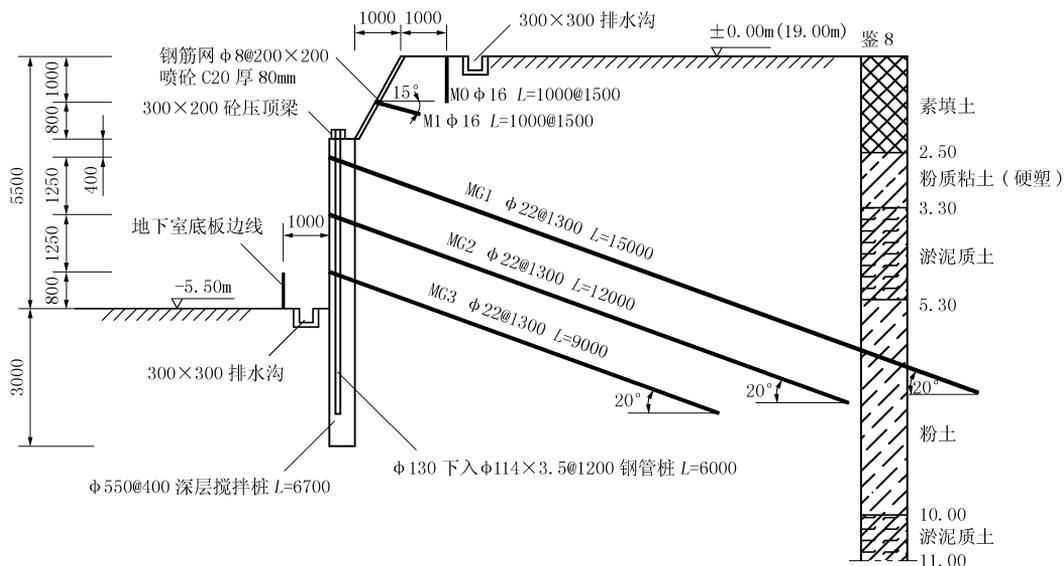


图4 止水+加强型土钉墙基坑支护典型剖面图

基坑东面中段及西面中段地层存在较厚的淤泥层及砂层,若采用普通土钉墙支护则存在以下弊端:

(1) 淤泥层放坡较困难,容易引发基坑滑塌;

(2) 砂层富含地下水,普通土钉墙不能起到止水的作用,且紧邻基坑西面为主要交通干道,地理位置显著,不允许基坑发生较大的形变,若基坑发生漏砂则极易引起大面积的地面沉降,危及周边环境安全;

(3) 基坑顶面放坡位置有限,普通土钉墙形成的坡面过陡不利。

若采用止水-加强型土钉墙可解决施工空间不足的问题,搅拌桩搅拌后可确保西面道路不发生漏砂沉降现象。

3.4.2 计算结果

取最不利3-3剖面进行分析。图5为采用止水-加强型土钉墙支护后不同计算各工况下的包络图。该图表明,经计算基坑顶部水平位移 $\delta = 29.8 \text{ mm} < [\delta_{容}] = 30 \text{ mm}$,搅拌桩内插钢管桩后桩弯矩呈“大肚子”状,中部最大弯矩 $M = 32.52 \text{ kN} \cdot \text{m} < [M_{容}] = 35 \text{ kN} \cdot \text{m}$,整体稳定安全系数 $K_s = 1.235 > 1.200$,抗倾覆安全系数 $K_s' = 2.471 > 1.200$,基坑整体稳定性、变形及搅拌桩抗弯性能等设计指标均满足要求。

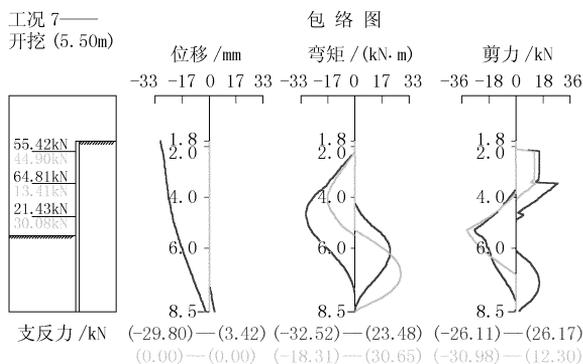


图5 止水-加强型土钉墙基坑支护典型剖面计算结果

3.4.3 监测结果

根据广东核力工程勘察院2009年3月5日基坑监测最终报告表明,基坑采用止水-加强型土钉墙支护段基坑顶面最大沉降量仅为8.74 mm,最大水平位移量仅为8.00 mm,大大低于基坑顶部水平位移计算值 $\delta = 29.8 \text{ mm}$,也均分别低于设计值最大沉降量25 mm和最大水平位移量30 mm,仅相当于

设计值的35%和26%,说明设计中水泥土搅拌桩的搅拌作用以及土钉(锚索)0.5~0.6 MPa的压密注浆作用效果明显,计算中未考虑这两个因素的加固作用仅当成安全储备,另外经锚杆抗拔试验表明,抗拔力满足设计值的1.2~1.5倍条件,证明采用此支护结构较为安全。

4 结论

(1) 止水-加强型土钉墙适用于回填土、淤泥质土、粘性土、砂土、粉土等软弱地层基坑支护工程,可改善普通土钉墙难以垂直放坡、淤泥砂层中难以放坡的弱点,易于在场地狭小的条件下方便施工;止水-加强型土钉墙可在不降水条件下采用,解决了在城市建设中环境限制不宜人工降水的难题;在工程规模上,深度12 m以内的深基坑均可根据具体条件,灵活、合理地推广使用。

(2) 基坑支护计算中可不考虑搅拌桩的抗弯矩作用和土钉高压压密注浆改善土体作用,仅考虑当成安全储备。实践表明,基坑加固效果好。

(3) 基坑支护设计中应考虑搅拌桩软弱地层中成桩的影响,一般搅拌桩只可在标贯击数15击以下的地层中成桩,若软弱地层标贯击数较大(≤ 35 击),可改用大直径旋喷搅拌桩搅拌。

(4) 广州地区已大量使用止水-加强型土钉墙支护技术,可作为介于普通土钉墙与桩锚或桩内撑支护的优选支护体系,该技术安全、可行、成本低,值得推广应用。

参考文献:

- [1] 简文立. 加强型土钉墙在软弱土层基坑支护工程中的应用[J]. 岩土工程界, 2005, 7(9): 58-62.
- [2] 张旭芝, 潘宏春. 深层搅拌水泥土墙与土钉墙在基坑围护中的组合应用[J]. 建筑技术, 2003, 32(2): 120-121.
- [3] CECS 96:97, 基坑土钉支护技术规程[S].
- [4] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [5] JGJ 120-99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [6] 高天. 软土地区截水-加强型土钉墙在深基坑支护中的研究与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [7] 夏念恩. 土钉墙支护技术在深基坑支护工程中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [8] 胡运杰, 卢信雅. 大直径搅拌桩在地基加固中的发展[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2002. 60-70.