

# 联合支护技术在深基坑支护中的应用

黄全海, 梁宁

(河南省地质矿产勘查开发局第三地质勘查院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**郑州市花园路一基坑支护工程, 由于场地周边环境的复杂性和基坑深度范围内软弱土体的存在, 护坡桩、预应力锚索、花管桩及桩前被动区土体加固等技术的联合应用, 确保了17~20 m深基坑壁及周边已有建筑的安全稳定, 尤其是采用的高压一次成型锚索施工技术, 解决了水位以下粉土及软弱土体成孔困难、锚索质量问题较多的情况。

**关键词:**深基坑; 联合支护; 高压一次成型锚索; 护坡桩; 预应力锚索; 花管桩; 桩前被动土体加固

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2015)07-0072-06

**Combined Support Technology in the Application of Bracing of Deep Foundation Pit/HUANG Quan-hai, LIANG Ning**  
(No.3 Geological Exploration Institute, Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Luoyang Henan 471023, China)

**Abstract:** This paper introduces an engineering of foundation pit support in Zhengzhou. Because of the complex surrounding environment and soft soil in the depth range of foundation pit, the combined application of slope protection pile, pre-stressed anchor cable, perforated pipe pile and passive soil consolidation around pile were used to ensure the safety and stability of 17~20m deep foundation pit wall and the existing buildings. Especially with once-forming anchor construction technology by high pressure, the hole-forming difficulties in silt and soft soil below water table were solved and the anchor cable quality was improved.

**Key words:** deep foundation pit; combined support; once-forming cable by high pressure; slope protection pile; pre-stressed anchor; perforated pipe pile; passive soil consolidation around pile

随着大批的高层和超高层建筑的建设, 开发商为提高建筑用地率, 加之国家有关规范对基础埋置深度和人防工程的要求及居民停车的需求, 建筑物地下室的设计已成为建筑设计的必要组成部分。虽然深基坑支护工程为临时建筑, 在基坑周边环境条件和地质条件复杂的情况下, 为了保证基坑周边已有建筑及基坑内施工人员和设备的安全, 常常采用水泥土搅拌桩、灌注桩、锚索(杆)、土钉等多种支护方案组合的形式进行<sup>[1]</sup>。而支护方案的优劣直接影响工程进度、质量和成本, 在整个基坑施工过程中占有重要的地位。

## 1 工程概况

河南省建行本部综合楼基坑支护工程位于郑州市花园路以西, 主体工程由主楼(地上32层, 总高度约137.9 m)和裙房(地上4层, 房屋高度约24 m)组成, 地下3层为车库、设备用房及人防工程, 总建筑面积约8.5万m<sup>2</sup>, 基坑平面尺寸约52 m×135 m, 基坑开挖深度为17~20 m。建筑物主楼基础采用桩筏基

础, 框架核心筒结构, 裙房为筏形基础, 框架结构。

## 2 周边环境

根据现场调查和建设单位提供的资料看, 除西侧较开阔外, 其它3侧基坑周边环境比较复杂, 见图1。其中东侧在距基坑开挖边上口边线13.0 m处有天然气管线自北向南通过, 管线埋深1.8 m左右, 15.0 m处为郑州市花园路主干道, 该路段为繁华的商业街区, 车流量大, 尤其是上下班高峰, 塞车现象明显; 南侧弧形段基坑周边存在4栋建筑物, 分别为2~5层砖混住宅和职工餐厅, 基础埋深均为1.5 m, 住宅最近端距离排桩中心线2.74 m; 北侧基坑上口边线外0.7 m为建筑围墙, 围墙外0.5~1.3 m地下管网密布, 分布有天然气、上下水、污水、各种通讯电缆等管线, 埋深2.0~2.2 m, 墙外为8 m宽进入小区的车辆和行人的主要通道, 道路北侧紧邻10层和3~4层住宅, 其中10层住宅为桩基础, 桩端入土深度12.0 m, 3~4层砖混住宅为条形基础, 基础埋深1.5 m。

收稿日期: 2015-01-28; 修回日期: 2015-04-09

作者简介: 黄全海, 男, 汉族, 1966年生, 副总工程师, 高级工程师, 注册土木(岩土)工程师, 河南省洛阳市关林南路74号, lykey123@126.com; 梁宁, 男, 汉族, 1975年生, 工程师, 从事探矿工程和岩土工程施工和研究工作。

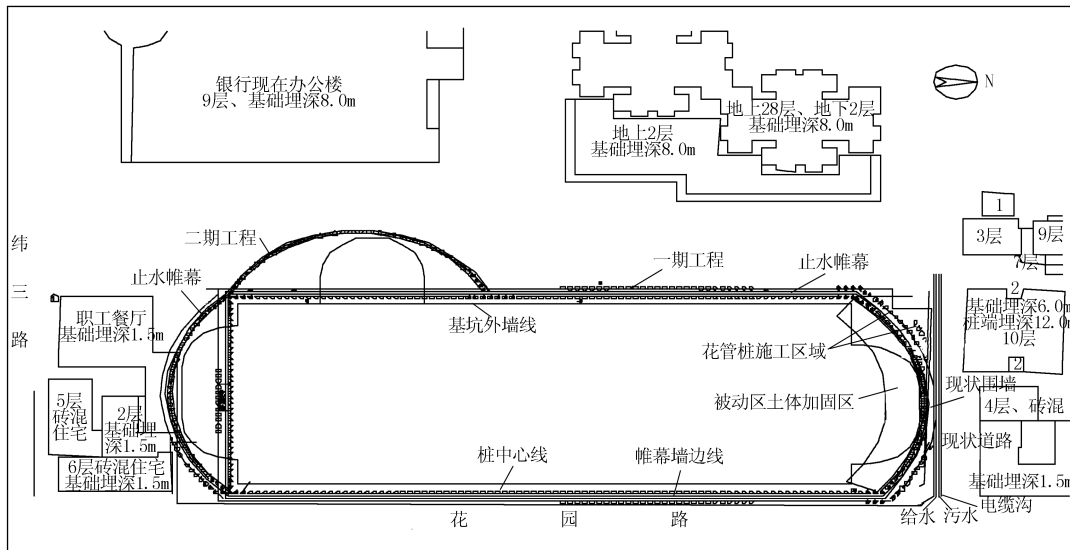


图 1 基坑周边环境及支护平面布置图

### 3 场地水文地质工程地质条件

拟建场地地形相对平坦,所在地貌单元为黄河冲积泛滥平原。根据地质资料,基坑开挖范围上部除 1.2~2.75 m 的杂填土外,主要为第四纪晚更新世冲积形成的地层,以粉土、淤泥质粉土、粉土、粉砂为主。与支护有关的各土层计算参数取值见表 1。

表 1 各土层计算参数取值表

层号	岩土名称	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	备注
①	杂填土	19.0	10.0	18.0	
②	粉土	19.8	10.7	23.5	
③	粉土	20.2	11.3	22.0	
④	粉土	20.1	12.7	23.0	
⑤	淤泥质粉质粘土	18.2	15.7	13.0	北侧有分布
⑥	粉土	19.8	13.1	22.7	
⑦	淤泥质粉土	18.1	15.5	13.4	北侧有分布
⑧	粉砂	20.0	0	30.0	

根据勘察报告,在勘探深度范围内地下水由潜水和承压水 2 种类型组成,钻孔测量自然地表下稳定地下水位埋深 11.2 m,水位标高为 85.43 m;承压水含水层为埋深 23.0 m 下的砂层,承压水头埋深 19.3 m。

### 4 支护方案设计

基坑支护设计主要是考虑基坑周边止水帷幕对土体加固的情况下,采用桩锚体系,直壁开挖方式,并根据周边环境和地基土体的不同,在不同部位增加了双排混凝土灌注排桩、花管桩及基坑底桩前土

体加固等措施,以达到最佳安全效果和经济效益;受场地限制,基坑支护施工分 2 期进行,不同支护方式及分期施工区域见图 1 所示。

#### 4.1 护坡桩

护坡桩采用钢筋混凝土钻孔灌注桩,除基坑南北两侧圆弧区域和主楼部位的东西两侧坑壁采用双排桩外,其它部位均采用单排桩,设计桩径 1000 mm,桩长 23~27 m,其中基坑底面以下嵌固深度为 9~14 m,桩间距 1600 mm(北侧弧线外排桩间距 1710 mm),双排桩处排距 2.6 m;排桩混凝土强度等级为 C30(圆弧段端部加强桩为 C45),桩顶设置冠梁,冠梁宽度 1.2 m,厚度 0.8 m。

#### 4.2 锚索

锚索采用高压一次成型锚索,一桩一锚,锚索间距同桩间距,在北侧圆弧部位受已有建筑及地下管线影响,共设置 3 排锚索,排距 2.0 m,其中第一排位于桩顶下 6 m 处,锚索长 30~31 m,直径 150 mm,倾角 20°~35°,其它部位设置 4 排锚索,排距为 2.5 m、2.5 m 和 2.0 m,其中第一排位于桩顶下 3.0 m,锚索长 20~28 m,直径 200 mm,倾角 15°,为了增加锚固力,锚固段增加 3 个扩大头,见图 2,锚索端部通过腰梁、围梁与支护桩连成一体。钢绞线采用 6 $\phi$ 15.2 mm 1860 级有粘结低松弛的钢绞线。

#### 4.3 花管桩

花管桩设置在基坑北侧两个圆弧间的中间地带,由于该区域含有较厚的淤泥质软土,为了控制和减少软土侧向变形并增加土体的抗剪强度,从地表

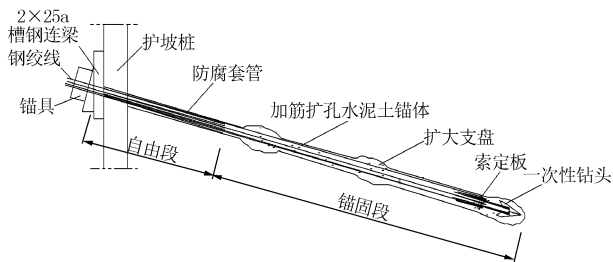


图2 预应力锚索结构图

下2.0 m开始设置花管桩,共设置9排(其中第一、二排桩位于护坡桩顶以上),排距1.0 m,桩径200 mm(内置花管直径32 mm,当地面出现位移或沉降过大时采用后注浆来对土体进行加固),花管桩距同护坡桩间距,倾角 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ,桩长控制在超过护坡桩的水平投影长度8 m,见图3。

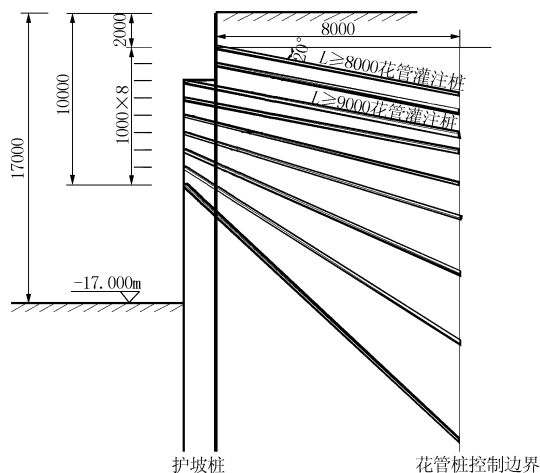


图3 花管桩支护剖面图

#### 4.4 桩前被动区土体加固

为了提高基坑底土的稳定性,防止坑底的隆起,确保支护结构安全有效,在基坑北侧区域护坡桩内侧采用高压旋喷桩进行软弱土体加固,加固区域呈扇形圆环,宽度6.2 m,桩径600 mm,桩距400 mm,加固深度为基坑底面标高下6.0 m,加固区剖面见图4。

#### 4.5 止水帷幕

止水帷幕沿基坑周边布置,要求采用落底式并插入⑮层粉质粘土1.6 m的幕墙,设计深度为自然地面下34 m,要求加固后土体无侧限抗压强度 $< 1$  MPa。其中基坑外围的东、西、南3侧的区域采用三轴搅拌桩施工,设计桩径为850 mm,桩距600 mm,邻桩相互搭接250 mm;北侧由于场地狭窄,设计采用高压旋喷桩施工工艺,设计桩径600 mm,桩心距350 mm,咬合250 mm。

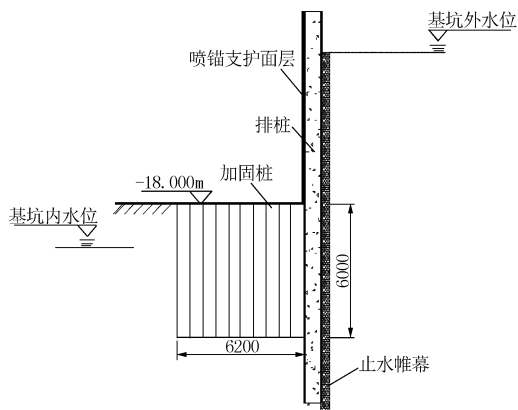


图4 被动区土体加固剖面示意图

## 5 主要施工技术和要点

### 5.1 护坡桩施工

#### 5.1.1 施工顺序

护坡桩施工选用7台SPC-100型钻机分区域同时施工,每台桩机在划定施工范围内按7根桩一组做小范围往返施工,每组桩施工时按1,4,2,6,3,5,7的顺序间跳施工。在设置双排桩的部位,由于止水帷幕设在双排桩之间,双排桩部位桩间净距离为1600 mm,考虑到排桩施工过程中的垂直度偏差、孔位偏差、以及扩孔等因素,容易导致止水帷幕施工设备卡住钻杆,无法完成止水帷幕的施工,为避免这一情况出现,所以在施工顺序上采用内排支护桩先施工,再施工止水帷幕,最后施工外排支护桩的施工顺序,以保证护坡桩和止水帷幕桩的顺利施工。

#### 5.1.2 质量控制要点<sup>[2]</sup>

(1)为确保施工质量符合设计及规范要求,重点做好钻孔定位、桩孔质量、孔底沉渣、钢筋笼制作与安装、混凝土的质量及水下混凝土的灌注等关键点的检查。

(2)断桩是灌注桩施工中严重的质量事故,灌注前认真检查清孔效果,灌注中谨慎操作,量准导管长度并计算好导管下端与孔底距离,一旦灌注中途发生卡管、导管漏水、泥砂流入管内等事故,则重新灌注,保证混凝土的均匀性和连续性。

(3)施工过程中,钢筋笼的偏位、上浮是多发事故。针对这一问题,采用自制的钢筋笼挂杆固定器固定钢筋笼,准确控制笼顶标高,有效地防止钢筋笼的上浮与下沉,同时在钢筋笼外侧增加混凝土垫块,每4 m放置3个,以确保钢筋笼在混凝土中的保护层厚度。

(4) 由于地层较为散软,全孔均为粉土、粉质粘土、细砂及淤泥质土等,容易坍塌,在施工中合理控制钻进速度,做好泥浆护壁措施,成孔时泥浆密度  $1.23 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ ,洗孔泥浆密度  $1.05 \sim 1.12 \text{ g/cm}^3$ 。

(5) 针对桩头容易出现强度偏低的现象,混凝土浇注过程中,除了采取一些措施使其密实度达到一定程度外,对混凝土超浇量控制在  $1.0 \text{ m}$  以上。

(6) 严格控制桩底沉渣厚度,浇注混凝土前,用导管进行二次清孔,在泥浆性能、沉渣厚度达到规范设计要求后,迅速进行混凝土浇注,避免再次沉淀。

## 5.2 锚索施工<sup>[3]</sup>

锚索采用高压一次成型施工,所使用的设备为 XL-50 型高压旋喷钻机。该工艺由高压旋喷桩演化而来,与高压旋喷桩有异曲同工之处,该工艺采用高压水泥浆切割土体,并用水泥浆将锚索范围内土体置换出来,一次成型,而非取土成孔。锚索直径大小靠控制注浆压力大小来实现,该工艺克服了在水位以下软弱土层中预应力锚索施工时成孔困难的弊端。

### 5.2.1 施工工艺流程

主要的施工工艺流程为:定位→钻机就位、锚索制备、水泥浆配置→在高压旋喷钻头上安装锚索→泵送喷浆、带浆下沉将锚索送到设计深度→慢速喷浆退钻形成锚固体→锚固体达到强度后依据设计参数对锚索进行张拉和锁定。

### 5.2.2 质量控制要点

#### 5.2.2.1 锚索制作

锚索由钢绞线、锚定板、锚具组成,在锚定板一侧将锚具套在钢绞线上,用挤压机挤压锚具。自由段在钢绞线上涂黄油作为隔离剂,使钢绞线与水泥土隔离并形成自由段。具体组件及连接方法如图 5 所示。

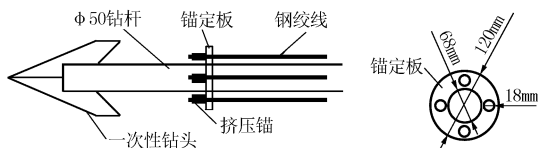


图 5 锚索结构图

#### 5.2.2.2 钻机安放

钻机安置于设计的孔位上,使钻头对准孔位的中心。同时保证钻孔达到设计要求的角度,然后作水平校正,保证锚索与护坡桩成一定角度。

#### 5.2.2.3 技术指标的控制

(1) 在北侧圆弧部位进行施工时,临近孔底  $2 \text{ m}$

处开始低速钻进,确保相邻建筑物安全。

(2) 固化剂浆液水灰比控制在  $0.5 \sim 0.8$ ,水泥采用 P.O 42.5 水泥,用自来水搅拌。

(3) 喷射钻进时先用清水冲洗,并保证喷浆前必须将喷浆管内水排净。第一次喷射下沉过程根据地层的软硬程度选用合适的喷射压力,一般为  $5 \sim 30 \text{ MPa}$ ,且下沉速度  $> 100 \text{ cm/min}$ ,并根据施工具体返浆情况调整下沉速度,确保喷射连续、均匀。喷射退钻时,为保护桩间土流失及桩后土扰动,在距离支护桩桩身  $3 \text{ m}$  处使用压力为  $15 \text{ MPa}$ ,退钻速度控制在  $80 \sim 100 \text{ cm/min}$ 。

(4) 单根锚索有 3 次扩径,每次扩径部位注浆量  $> 0.3 \text{ m}^3$ ,当钻头行至扩大头设计位置时,在扩大段范围内,注浆压力根据地层条件进行加大,控制在  $28 \sim 30 \text{ MPa}$  之间,退钻速度  $35 \text{ cm/min}$ ,复喷一次,形成扩大头。

(5) 张拉与锁定时,锚固段强度  $> 15.0 \text{ MPa}$  并达到设计强度  $75\%$  后进行张拉,张拉荷载稳定  $10 \text{ min}$  后进行锁定。

### 5.3 花管桩施工

花管灌注桩采用套管钻机跟管钻进工艺,钻孔直径为  $200 \text{ mm}$ ,在钻孔内灌注 C30 干性混凝土,孔内预留直径为  $32 \text{ mm}$ 、壁厚  $3 \text{ mm}$  的带孔花管。

#### 5.3.1 施工工艺

钻机就位及调整钻进角度跟管钻进至设计深度→下入花管→注入干性混凝土与拔出套管。

#### 5.3.2 控制要点

(1) 钻机安放及护坡桩预钻孔角度按设计的要求进行控制;

(2) 由于基坑边坡距离已有建筑较近,临近钻孔底部  $2 \text{ m}$  时应低速钻进,确保相邻建筑安全;

(3) 花管下放时,底口应用胶布包裹好,下放后用 C30 干性混凝土灌注;

(4) 在灌注干性混凝土过程中逐渐拔出套管,采取每填充  $1 \text{ m}$  时拔管  $1 \text{ m}$ ,以此类推直至全管填满为止。

### 5.4 桩前被动区土体加固施工<sup>[4]</sup>

被动区土体加固采用 XL-50 型高压旋喷钻机施工,由于加固部位主要为基坑底  $6 \text{ m}$  内的桩前被动区内土体,因此在基坑开挖至基坑底面标高上  $2 \text{ m}$  处时开始土体加固施工。

#### 5.4.1 施工技术参数

为保证成桩质量,水泥用量控制在每米桩长 160 kg;水灰比为 0.5 ~ 0.8,注浆压力为 20 ~ 22 MPa。

#### 5.4.2 控制要点

(1)施工高压旋喷桩时护坡桩已经施工完毕,而高压旋喷桩成桩是靠高压水泥浆成桩,靠近护坡桩施工时,调整钻杆与护坡桩之间的距离 < 250 mm,保证护坡桩在高压旋喷桩半径以内,保持相切。

(2)为了避免在施工中由于桩距小或地质差异,引起相邻两桩位由于施工时间较短而串浆,同时避免设备移位压桩,施工时采取跳打的施工方法。

(3)在旋喷过程中,若出现中间停机,当再次开机喷浆时,宜向下复喷 0.5 m 以上,保证桩身的搭接长度,避免出现断桩现象。

(4)为了保证软土加固效果,喷浆高度超过基底标高 < 1.5 m。

### 5.5 止水帷幕

#### 5.5.1 三轴搅拌桩施工<sup>[5]</sup>

三轴搅拌桩施工时采用隔幅跳打的施工顺序进行,见图 6。

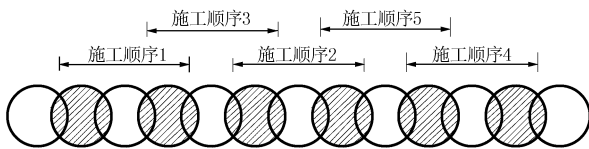


图 6 三轴搅拌桩施工顺序图

##### 5.5.1.1 施工技术参数

(1)水泥用量:虽然基坑止水部位主要在帷幕的中下部,但为了增加基坑壁土体的稳定性,三轴搅拌桩上部不进行空桩处理,地表至 9 m 深处采用水泥掺量为 8% 进行搅拌;下部 25 m (桩长 34 m) 按水泥掺量 22% 进行搅拌。

(2)下沉速度  $\geq 1.0$  m/min;提升速度  $\geq 2.0$  m/min。

(3)水泥选用 P. C 32.5 级(散装)普通硅酸盐水泥,下沉水灰比为 2.5 ~ 3.0,提升水灰比 1.5 ~ 1.8。

##### 5.5.1.2 施工控制

(1)预搅下沉:待搅拌桩机钻杆下沉到设计的桩顶标高时,开动灰浆泵,待纯水泥浆到达搅拌头后,按 1 m/min 的速度下沉搅拌头,边注浆(注浆泵出口压力控制在 0.4 ~ 0.6 MPa)、边搅拌、边下沉,使水泥浆和原地基土充分拌和,直至桩底设计标高。

(2)喷浆搅拌提升:搅拌下沉到设计深度后,静

止喷浆 20 s 后开始搅拌提升,按照不大于 2 m/min 的速度搅拌提升喷浆至桩顶。

(3)重复搅拌下沉和提升至孔口:为使土体和水泥浆充分搅拌均匀,要重复上下搅拌,但要留一部分浆液在第二次上提复搅时灌入,最终完成一根均匀性较好的水泥土搅拌桩。

#### 5.5.2 高压旋喷桩施工<sup>[6-7]</sup>

高压旋喷采用三重管法工艺,因桩位布置间距较小,为了保证施工机械交叉作业所需的工作面,同时防止相邻桩孔出现串孔现象,确定施工顺序时采用相隔 10 个桩孔进行跳打,循环进行施工,例如先施工 20,30,40,50 号桩孔,再安排 21,31,41,51 号桩的施工,依次类推,最终保证止水帷幕闭合。

##### 5.5.2.1 工艺参数选取

施工前首先根据类似工程经验初步选取浆液配比、喷射压力、喷浆量等技术参数,先在基坑东南侧进行高压旋喷桩试桩,试桩根数 3 根,桩径 600 mm,咬合 250 mm,桩间距 350 mm,试桩结束后经与业主、监理、总包单位共同揭露观察及实际测量各项指标均达到设计要求,故将试桩各项参数确定为正式施工参数,见表 2。

表 2 旋喷桩施工主要技术参数参考表

项 目	技术参数
水泥浆压力/MPa	29 ~ 31
水泥浆流量/(L·min <sup>-1</sup> )	80 ~ 100
水灰比	1
提升速度/(cm·min <sup>-1</sup> )	20 ~ 25
旋转速度/(r·min <sup>-1</sup> )	11 ~ 14

##### 5.5.2.2 施工控制要点

(1)引孔至设计深度后,拔出钻杆及钻具,引孔钻机移动至下一孔位,高压旋喷钻机移至该位置将喷射注浆管插入预定深度。在插管过程中,为防止泥砂堵塞喷嘴,边射水边插管,水压  $\geq 1$  MPa。当喷射注浆管插入设计深度后,接通泥浆泵,然后由下向上旋喷。喷射时,先应达到预定的喷射压力、喷浆后再逐渐提升旋喷管,以防扭断旋喷管。

(2)为保证桩底端的质量,喷嘴下沉到设计深度时,在原位置旋转 10 s 左右,待孔口冒浆正常后再旋喷提升。钻杆的旋转和提升应连续进行,不得中断。

(3)在高压喷射注浆过程中出现压力骤然下降、上升或大量冒浆等异常情况时,应查明原因及时

采取措施,处理完事故后,接桩时应从停喷点向下加深1.0 m处重新喷射接桩。

## 6 变形检测

根据设计方案,施工过程中在基坑坡顶设置了26个观测点进行沉降和位移观测,另在基坑周边3倍基坑深度范围内设置14个点进行沉降观测,重点检测基坑南侧、北侧已有建筑及东侧花园路沿线的沉降变化情况。基坑开挖施工过程中,虽然经历了整个雨季,但从检测数据看,北侧坡顶累计沉降量相对较大,为14.8~19.5 mm,其余3侧的累计沉降量为9.6~14.2 mm,所有检测点的检测数据均在规范允许范围内。

## 7 结语

桩锚联合在基坑支护工程中经过多年的应用与发展,已被深基坑设计、监理和施工人员所接受,并广泛应用于基坑工程中,但在地下水位以下和软弱土分布区域,常规施工方法完成的预应力锚索质量事故也多有发生,本工程中的高压旋喷一次性成型锚索施工方法,解决了软弱土中的成孔难题,且通过调整喷浆压力形成的3个锚索扩大段措施,有效地增加了单根锚索的抗拉承载力,且施工造价低、工期

短、施工方便、安全可靠,具有较广阔的应用前景;在软弱土体分布区域采取的护坡桩前被动区软弱土体加固措施,除了能够提供较大的被动土压力外,还可以为护坡桩提供很好的嵌固层,再加上该区域花管桩的实施,有效地减少了围护桩的竖向和水平变形。总之,在周边环境条件复杂和场地岩土工程地质条件较差的情况下,通过联合支护技术的应用,可以较好地保护基坑壁土体的稳定和安全。

## 参考文献:

- [1] 刘国彬,等. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 贺小龙,等. 混凝土灌注桩加预应力锚杆结构在深基坑支护中的应用[J]. 施工技术,2008,37,(S1):177-180.
- [3] 许录明,等. 桩锚结构在深基坑支护中的应用分析[J]. 探矿工程(岩土工程掘进),2013,40(6):57-60.
- [4] 寿旋,等. 软土地区深基坑被动土体加固高度改进研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(S1):104-108.
- [5] 贾建胜,等. 深层搅拌桩在深基坑止水帷幕中的应用[J]. 西部探矿工程,2008,(1):21-22.
- [6] 李洪厂,等. 高压旋喷桩在北京某深基坑止水帷幕中的应用[J]. 探矿工程(岩土工程掘进),2008,35(11):56-58.
- [7] 王德强,等. 高压旋喷止水帷幕在深基坑支护工程中的应用[J]. 建筑技术,2007,38(2):120-122.
- [8] 何德洪,等. 郑东新区土钉墙加微型钢管桩基坑支护技术[J]. 探矿工程(岩土工程掘进),2009,36(1):49-51.

## (上接第65页)

震击安全接头产生的震击力只是一个钻具受卡时的解卡附助力,不是所有的卡钻都能保证处理上来,在处理孔内“落鱼”时就要根据孔内情况合理应用调整好震击力并进行正确的操作,才能保证处理的效果。

## 参考文献:

- [1] 黄钟焯. 卡钻震击器[J]. 探矿工程,1957,(3).
- [2] 李谦,鄢泰宁,卢春华. 乌克兰的几种新型解卡震击器[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):73-77.

- [3] 韩兴玉. 随钻震击器计算及使用浅析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2011,31(7).
- [4] 吕瑞典,李怀仲,汤平汉,等. 随钻震击器震击力及影响因素分析[J]. 石油机械,2010,38(7).
- [5] 周家齐,张国田,李东阳,等. 全液压式随钻震击器的研制与应用[J]. 石油机械,2009,37(9).
- [6] 丰士俊. 整体机械式随钻震击器研制及应用[J]. 石油矿场机械,2010,39(1):89-90.
- [7] 孟胜涛,汪雪松,向东,等. 随钻震击器在钻井中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量,2012(7):142.
- [8] 张兆德,李向军,王德禹. 震击器解卡过程的动力学分析[J]. 石油矿场机械,2004,33(1):8-11.