

# 球状风化孤石群内端承桩复合成孔施工技术

李福清<sup>1,3</sup>, 王元满<sup>2</sup>, 胡向东<sup>3,4</sup>

(1. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200082; 2. 上海广联建设发展有限公司, 上海 200438; 3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 同济大学岩土及地下工程教育部重点试验室, 上海 200092)

**摘要:**在深圳地铁 4 号线 403 标, 需要在高强度、各向异性、大倾角等特性的球状风化花岗岩孤石群地层中进行端承桩成孔, 成孔与周围建筑物距离仅约 20 m, 且一幢建筑物已严重倾斜, 鉴定判断已属于危房等级, 经多次论证, 最终采用对周边环境影响较小的回转钻孔工艺。先后采用刮刀钻头切削钻进、球齿滚刀钻头碾压钻进、套筒取心钻头环切纠偏等多种钻孔措施相结合的复合钻孔工艺, 配以反循环泥浆护壁进行钻孔施工, 取得成功。该项技术可为类似地质条件桩基成孔提供良好的技术支持。

**关键词:**球状风化花岗岩; 钻孔桩成孔; 滚刀碾压; 套筒环切; 纠偏

**中图分类号:** TU473.1<sup>+</sup>4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2009)01-0043-06

**Composite Construction Technology of Boring for End-bearing Pile in Spherical Weathered Boulders/LI Fu-qing<sup>1,3</sup>, WANG Yuan-man<sup>2</sup>, HU Xiang-dong<sup>3,4</sup>** (1. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 2. Shanghai Guanglian Construction and Development Co., Ltd., Shanghai 200438, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In 403 section of Shenzhen metro Line 4, borehole should be completed for end-bearing pile in spherical weathered granite with high strength, anisotropy and large inclined angle, which was only 20m to nearby buildings, so rotary drilling was adopted for safety. Composite drilling technology of drag bit cutting drilling, button roller bit compacting and rectification by annular coring bit was adopted with wall protection by slurry reverse circulation.

**Key words:** spherical weathered granite; bored drilling pile; hob cutter compaction; annular cutting by thin-wall bit; rectification

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

本工程为深圳轨道交通 4 号线 403A 标民白高架区间 A15 ~ A19 墩地下灌注桩施工, 施工区域遇球状风化花岗岩孤石群地层, 经取样检测岩石单轴抗压强度最高为 182 MPa, 钻孔桩需穿过该地层进入微风化花岗岩岩面 50 cm。沿线其它墩台桩基已采用冲击成孔等工艺施工完毕。本区段桩基原计划采用冲击成孔工艺施工, 由于受上下成串高强度孤石群等特殊地质条件限制, 且桩位距东侧澳门新村居民房较近, 该小区 71 号楼已出现明显倾斜, 经相关机构检测已判定为危房, 该楼与本工程桩位最近距离不到 22 m。前期采用冲击钻进, 遇球状风化花岗岩孤石, 孤石单轴强度高, 无法成孔; 且由于在冲击钻孔施工时产生的土体挤压位移可能会对附近危房倾斜产生不利影响, 未成孔已停止施工并作回填处理, 共 23 根桩。

### 1.2 工程地质

A15 ~ A19 上下球状孤石成群, 地质剖面如图 1 所示。

## 2 工程施工特点及难点

工程施工区域地层含球状风化花岗岩较多, 针对这种地层采用冲击、爆破等工艺进行成孔施工较为理想, 但因距离居民房较近且其中一幢房屋已经出现倾斜现象, 采用冲击、爆破等工艺在很大程度上会使土体产生挤压位移而对周边构筑物的结构安全造成威胁, 故选择对周边土体挤压影响较小的回转钻孔施工工艺进行钻孔成桩施工。施工特点和难点主要有如下几点。

(1) 孔口易坍塌: 本工程上部回填土层、残积土层、全风化花岗岩等地层结构松散, 属于遇水软化不稳定地层, 孔壁自稳定性较差, 易出现坍塌现象。加上本工程 A18 ~ A19 墩台回填杂土深度在 8 ~ 16

收稿日期: 2008-07-21

作者简介: 李福清(1969-), 男(汉族), 安徽人, 上海隧道工程股份有限公司高级工程师, 同济大学硕士研究生在读, 地下工程专业, 研究方向为隧道与地下建筑工程, 上海市西营南路 67 弄 6 号 401 室(200126), lfqtj@163.com。

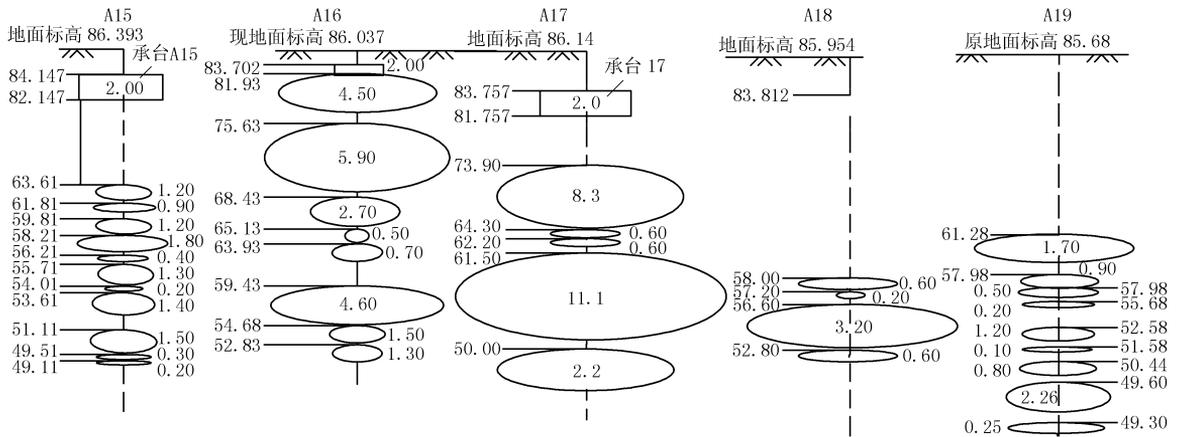


图1 A15~A19承台中心孤石分布示意图(单位:m)

m,增加孔壁坍塌的风险。

(2)地层可钻性差:本工程地层中球状风化花岗岩抗压强度高、层次多、分布不规则、研磨性强,对施工机械损伤较大,钻孔施工难度很大,钻进效率低。

(3)工艺复杂:本工程是在特殊地质条件下进行钻孔施工,采取一般某单一成孔施工措施很难达到施工效果,需采用套筒取心钻、刮刀钻、滚刀碾压钻等多种措施相结合的复合钻孔施工工艺。需要施工人员具备高超的业务知识与操作技能,能根据地层变化随时调整钻进参数。

(4)岩面倾角大且层次多,垂直度控制难度较大:本工程是在高强度球状风化花岗岩孤石群地层中钻孔施工,因球状风化岩石面一般倾角较大且分布不规则,甚至有可能在半坡边施工,容易发生斜孔现象,钻孔垂直度控制很困难。

(5)预钻孔资料难以真实反映桩基地质实际情况:由于每根桩基仅布置1根预钻孔,很难全面反映地质情况,该区域地质变化十分显著。

(6)球状花岗岩孤石群之间的强风化层,并非纯粹意义上的水平层理强风化花岗岩层,施工难度大:在球状花岗岩孤石群之间的强风化层施工时,由于岩石裂隙风化不均匀,导致钻机回转不稳定、瞬间扭矩大、容易走偏造成钻孔倾斜等。在该地层中钻进施工时钻具损伤严重,钻进参数很难控制。

### 3 工艺及设备选择

#### 3.1 工艺选择

根据本工程具体情况,经过多方论证,决定采用无土体挤压效应、对周边环境影响甚微的回转钻进工艺进行桩基础钻孔施工。针对A15~A19实际地质条件及以往的施工经验,采用以刮刀钻头切削钻进、球齿滚刀钻头碾压钻进、套筒取心钻头环切纠偏

等多种钻孔措施相结合配以反循环泥浆护壁的钻孔施工工艺。

上部回填土、残积土、全风化等地层采用普通的刮刀钻头进行钻进;进入球状风化及完整微风化花岗岩时,采用球齿滚刀全断面碾压钻进;在岩面倾角较大及钻孔出现倾斜现象时用套筒取心钻头环切纠偏。

由于本工程钻孔施工区域内遍布高强度球状风化花岗岩孤石群地层,该层具有层次分布多且不规则、岩石单轴抗压强度高、岩面倾角大、地层可钻性差、对钻具损伤大等特点,采用常规回转钻孔工艺施工难度很大,为检验该工艺在这种特殊复杂地层中钻进施工的可行性,经商议,选择代表性较强的A17-4作为试验桩,于2008年3月14日~5月2日完成该实验桩的钻孔及水下混凝土浇灌等施工工作。目前已顺利完成7根,证明该成孔工艺在技术上是可行的。

#### 3.2 主要设备选择

##### 3.2.1 钻机

本工程在遇球状风化花岗岩回转钻进时钻机的瞬间扭矩较大且容易出现斜孔现象,对钻机的机械性能及钻杆的刚度等均有一定的要求,根据本工程实际情况,选用输出扭矩 $\geq 120 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 的QJ250-1型转盘钻机2台,配备 $\text{O}319 \text{ mm}$ 双壁高强度抗扭法兰连接钻杆,以满足本工程施工要求。

##### 3.2.2 钻头

根据本工程具体情况,选用套筒、刮刀、球齿滚刀等多种钻头组合使用,各种钻头结构简述如下。

###### 3.2.2.1 刮刀切削钻头

本工程上部回填土层、全风化花岗岩等地层结构较松散,拟采用回转刮刀钻头进行切削钻进。

###### 3.2.2.2 球齿滚刀钻头

球齿滚刀钻头主要针对高强度岩石层的碾压钻进施工,本工程在进入球状风化花岗岩层及桩底微风化岩层钻进时均采用球齿滚刀钻头全断面碾压钻进。由于本工程球状风化花岗岩单轴抗压强度高且层次较多,另外钻孔直径相对比较小,为满足破岩效果及布刀合理性,拟采用专门针对本工程设计的改进型 8 in 球齿滚刀,共布置 8 只(见图 2)。



图 2 球齿滚刀钻头

### 3.2.2.3 硬质合金套筒取心钻头

由于球状风化花岗岩地层分布不规则,岩面倾角大,采取滚刀碾压及其它钻进工艺易出现孔斜,遇到岩面倾角较大及孔斜时采用硬质合金套筒取心钻头(见图 3)或滚刀加硬质合金先导圈环切导正纠偏(见图 4)。



图 3 硬质合金套筒取心钻头



图 4 滚刀加焊硬质合金先导钻头

## 4 综合监测

本工艺施工过程中不会产生挤压土体和冲击效

应,因此对周边建筑物和环境影响甚微,但本工程距离澳门新村 71 栋危房较近,从安全角度考虑,在桩位与房屋之间开挖一条防震沟(见图 5),以降低钻进过程中可能产生的影响。防震沟开挖在 A17 ~ A19 墩台与危房之间,距离钻孔平台边 3 m,开挖深度为 2 m,上宽 3 m,下底宽 1 m,长 30 m,并在沟内每间隔 5 m 共设置 6 个沉降观测点,施工期间每天至少观测一次。同时,为检测钻孔施工过程中可能产生的冲击波对该幢危房的影响程度,特采用地震检测仪进行监控检测,采集相关震动数据(见表 1)。并布置 5 只测斜管兼作水位观测孔,用以监测土体是否产生水平位移及倾斜。

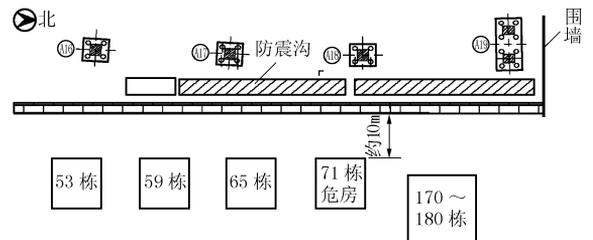


图 5 防震沟布设示意图

表 1 未施工与施工 2 种状态速度峰值差值结果表  $\text{/(mm} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$

日期	钻井旁 $v_1$	路面 $v_2$	近窗台 $v_3$	远窗台 $v_4$
3-15	0.096	0.004	0.001	0.008
3-16	0.047	0.013	-0.004	-0.005
3-17	0.415	0.012	-0.004	0.000
3-18	0.275	-0.003	0.019	0.006
3-20	0.331	0.025	-0.007	0.000
4-11	0.369	0.025	-0.001	0.001
4-14	0.321	0.017	0.010	0.010
4-16	0.673	0.018	0.009	0.007
4-18	0.303	0.030	0.011	0.015
4-22	0.478	0.027	0.013	0.012
4-23	0.450	0.022	0.011	0.009
4-24	0.452	0.027	0.009	0.011

注:各测点速度峰值的差值为施工监测结果减去未施工监测结果所得。

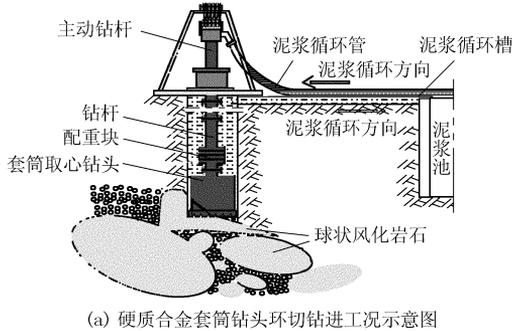
## 5 钻孔施工

### 5.1 上部松散地层钻孔施工

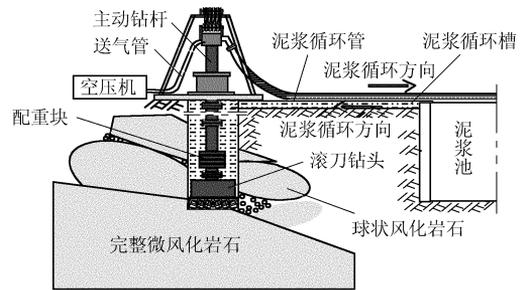
本工程上部较松散的回填土、残积土、全风化花岗岩等地层分布不均,采用刮刀钻头切削钻进,配以正循环优质泥浆护壁的钻孔工艺。其中 A17-4 等桩孔施工时,泥浆密度、粘度分别达到 1.25 kg/L 和 25 s 以上,由于出现泥浆大量漏失、孔壁掉块失稳等现象,遂采用套管跟进方式加深钢护筒,避免出现坍塌事故。

### 5.2 球状风化花岗岩层钻孔施工

球状风化花岗岩钻进是本工程施工的最大难点,原计划在该地层采用牙轮套筒环切取心进行钻孔施工,但实际施工时钻进效率很低,经实践摸索后改用球齿滚刀全断面碾压加硬质合金套筒环切纠偏的复合工艺进行钻进施工。即在遇岩面倾角较大、



(a) 硬质合金套筒钻头环切钻进工况示意图



(b) 球齿滚刀钻头碾压钻进工况示意图

图 6 硬质合金套筒钻头及球齿滚刀钻头施工模拟图

半坡、钻孔出现倾斜等状况时采用硬质合金套筒环切钻进,其它状况时采用球齿滚刀钻头碾压钻进。

硬质合金套筒环切和滚刀碾压工况如图 6 所示。

### 5.2.1 钻压控制

钻压是决定高强度硬岩地层钻进效率的最重要参数,是岩石产生体积破碎的决定性因素,本工程球状风化花岗岩岩心单轴抗压强度最高达 182 MPa,因此钻头齿尖给予岩面的钻压应  $\geq 182$  MPa,为满足钻压要求,根据本工程实际施工情况,除钻杆、钻头、配重块等钻具自身重力外增加 180 kN 配重(另一台钻机增加 200 kN),采用悬吊减压给压方式增加钻压。根据地层和工艺不同调整悬吊量,采用滚刀钻头在刚接触球状风化岩面钻进时提高悬吊量轻压慢转,悬吊量为钻具总重力的 3/5 左右,转速控制在 7 r/min 以内,待钻头完全接触岩面后增加钻压,逐渐降低悬吊量到钻具总重力的 1/7 左右,同时根据钻机稳定性情况调整转速到 24 r/min,本工程按此钻压正常钻进时钻进效率基本在 8 cm/h 左右。采用硬质合金套筒在刚接触岩面尚未形成环切槽时,需要提高悬吊量轻压慢转,悬吊量为钻具总重力的 4/5 左右,转速控制在 7 r/min 以内,待环切槽形成后增加钻压,逐渐降低悬吊量到钻具总重力的 1/5 左右,同时根据钻机稳定性情况调整转速到 12 r/min 左右。

### 5.2.2 垂直度控制

在球状风化花岗岩地层中钻孔极易出现孔斜现象,垂直度控制是主要难点,一旦出现孔斜纠偏难度很大,所以我们在本工程施工中采取的成孔原则是“主动防斜,积极纠偏”。

本工程防止孔斜的主要措施有以下几点:

(1) 开钻前,调整好钻机的水平与垂直度,使钻机的吊钩、转盘与钻头处在同一中轴线上;

(2) 选用刚性粗径钻杆,钻具的刚度越小,钻具下端压向孔壁的偏斜力就越大,故采用外径为 319 mm 的高强度双壁法兰连接钻杆,以提高钻具刚度,减少偏斜;

(3) 在钻头上部增加配重量,采取悬吊减压工艺匀速钻进,使钻具始终处于重垂拉伸自动导正状态;

(4) 设置导向扶正器并增加钻头上部粗径钻杆长度,减小钻头倾斜自由度,本工程将配重、粗径钻杆及导向扶正器组合在一起加工成粗直径加重钻挺,钻挺直径为 1180 mm,如图 7 所示;



图 7 粗直径导向加重钻挺

(5) 进入岩面结合部钻进时,应严格控制钻进速度,轻磨慢转,待钻头与岩面全断面接触后再转入正常钻进。

### 5.2.3 纠偏

由于球状风化花岗岩分布均不规则、岩面倾角无规律,成明显各向异性分布,采用回转钻进出现孔斜的概率很大,当发现孔斜以及遇到岩面倾角较

大或半坡地层时应及时采取措施纠偏。

本工程纠偏施工主要是采取硬质合金套筒钻头环切纠偏,包括浇注混凝土硬化后重新环切及在滚刀钻头前加焊先导切削圈。亦连接粗直径导向加重钻铤采取悬吊减压钻进,在刚接触岩面环切槽尚未形成时轻磨慢转低速钻进,待钻头刃口切入岩面、环切槽已形成、钻机回转平稳后逐渐加压正常钻进;本工程硬质合金套筒正常环切施工时,钻压  $P = 4.5n$  (其中  $n$  为硬质合金数量,  $P$  单位为 kN)。

套筒钻头硬质合金布置:硬质合金间距  $L$  等于 2.5 倍套筒切口宽度,负前倾角  $r = 15^\circ$ ,底出刃  $h$  和侧出刃  $b$  均为 1 mm,水槽口间距  $W = 3L$ 。

硬质合金套筒环切钻进转速确定:在刚接触岩面时需采取悬吊减压慢速回转钻进,正常钻进时增加钻压,根据钻机稳定性情况调整转速到 12 r/min 左右。硬质合金套筒钻头环切转速:

$$n = 60\pi Dv \quad (3)$$

式中: $D$ ——钻头直径,m; $v$ ——钻头切削具线速度,本工程取 0.6 m/s。

本工程球状风化花岗岩岩石抗压强度高、硬度大、研磨性强,采取套筒环切对硬质合金磨损严重,施工时先后试验使用 YG8、YG11c、YG15 等系列型号硬质合金,但成孔效果均不理想,经与硬质合金生产单位共同研究,专门委托定制生产一种硬度为 HRA88、抗弯强度为 2600 MPa 的 YG 系列粗颗粒硬质合金。

本工程 A17-4 桩孔在孔深 12.5~13.8 m 出现孔斜时采用混凝土封填硬化后重新环切纠偏,其余桩孔在遇到孔斜时基本采取硬质合金套筒直接环切纠偏。套筒钻头环切取出的部分岩心和岩样见图 8。



图 8 纠偏施工取出的部分岩心

### 5.3 完整岩层钻孔施工

进入完整球状风化花岗岩及桩端微风化地层采用球齿滚刀钻头全断面碾压钻进。本工程花岗岩属于石英含量较高的基性岩石,岩石抗压强度高、硬度大、研磨性强,钻进难度大,对钻头刀齿磨损严重。为提高钻进效率,在该层钻进可采取重压快转方式钻进,增加钻压方式仍采取悬吊减压工艺匀速加压,并根据钻机性能及回转稳定性等情况适当提高转

速,本工程在该层正常钻进转速为 24 r/min。

由于岩石强度高,研磨性强,被钻头碾磨的岩样多为粉末状,虽然对球齿结构进行改进,以增强其耐磨性和使用寿命,但钻头滚刀磨损依然严重,一般每进尺 4 m 左右球齿尖就被磨平,进尺 10 m 就需要更换一批滚刀。图 9 为部分磨损的滚刀和岩样照片,图 10 为 A17-1 孔典型成孔曲线。

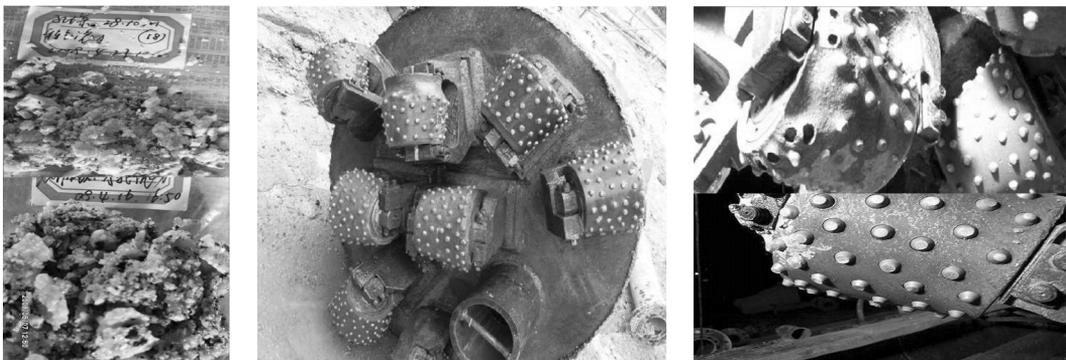


图 9 部分岩样及被磨损的钻头滚刀

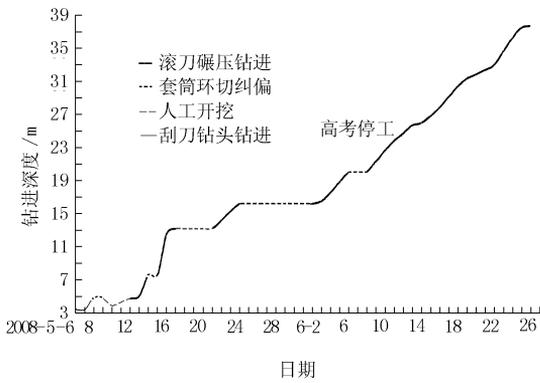


图 10 A17-1 孔典型成孔曲线图

## 6 结论及建议

由于本工程至结稿时仍在施工中,到目前共完成 4 根桩钻孔施工。由各根桩基成孔经验及数据分析显示,相对能全面代表此类地质条件的端承桩的成孔技术,可以判断,采用球状滚刀碾压及套管取心及纠偏在技术上是可行的。主要结论及建议如下:

(1) 该地区地质条件的分布非常复杂,初勘及详勘阶段,地质资料不够完善,后虽然每根桩增加了 1 个预钻孔,但由于球状风化球孤石分布极其离散,成明显的各向异性,实际成孔中,可预见性差,各类成孔工艺须反复使用,成孔风险很大;

(2) 孤石分布及倾角无法事前得知,成孔纠偏难度大,不同地层须不断预防及纠偏,纠偏工程量占总成孔工程量的 30% ~ 40% ;

(3) 由于实验条件限制,孤石单轴抗压强度最高达 182 MPa,但实际真三轴抗压强度会更高,实际在地下围岩环境下成孔,所需钻压、配重、泥浆流速等技术参数的设定,绝不是理论计算所能解决,须依据不同地层,逐步分析及总结规律,用以指导施工;

(4) 在类似地质条件下的桩基施工,须适当增加预钻孔的数量,通常仅承台中布置 1 个勘察钻孔是远远不够的,即使每根桩布置 1 个勘察孔,也不能全面反映地质实际工况,孤石分布特别复杂的桩基,应增加勘察孔数量,如每桩基 3 ~ 4 根,以进一步探明地质工况;

(5) 受孔径及钻机设备能力限制,勘察孔成孔垂直度普遍较低,实际施工时须严格控制钻进垂直度,以求更真实地反映地质工况。

## 参考文献:

- [1] 鄢泰宁,孙友宏,彭振斌,等. 岩土钻掘工程学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2001.
- [2] 乌效鸣,胡郁乐,贺冰新,等. 钻井液与岩土工程浆液[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2002.

## “PVC-U 塑料管在浅层地热能及地下水开发工程中应用与研究”通过部级鉴定

本刊讯 2008 年 12 月 23 日,国土资源部国际合作与科技司在北京组织有关专家对我队完成的“PVC-U 塑料管在浅层地热能及地下水开发工程中应用与研究”项目进行了技术鉴定。成果鉴定委员会由中国地质调查局原副局长、博士生导师王达教授,中国工程院苏义脑院士,中国地质调查局张伟教授,吉林大学博士生导师殷琨教授,中国地质大学(武汉)博士生导师、俄罗斯科学院外籍院士鄢泰宁教授,北京探矿工程研究所副所长贾军教授,《探矿工程(岩土钻掘工程)》杂志主编李艺教授,中国地质调查局水文地质环境地质调查中心叶成明教授以及河南省地质矿产勘查开发局总工程师张宗恒教授共 9 位专家组成。

专家认为:“PVC-U 塑料管在浅层地热能及地下水开发工程中应用与研究”项目“以塑代钢”,对解决传统金属成井存在的腐蚀结垢严重、维修频繁、使用寿命低、工人劳动强度大等问题具有重大意义,其研究成果对我国浅层地热能及地下水资源开发工程、节能减排和环境保护具有重要的示范和指导作用;利用该项技术施工的两眼示范井创国内外大口径全塑料管井深度记录,拓展了 PVC-U 塑料管的应用领域;提出的“压力平衡法”成井工艺解决了 PVC-U 塑料管下入困难和挤毁爆裂等技术难题;其成井结构设计、钻井技术、

成井工艺和事故处理及预防等关键技术保证了塑料管井的安全性和质量;项目进行的金属井管和 PVC-U 塑料管管的腐蚀与结垢的对比试验对金属井管的腐蚀类型进行了总结和分析,为今后成井管材的选择提供了科学依据。

鉴定委员会认为,该项成果符合国家节能减排、可持续发展政策,在水文水井、浅层地热能开发等领域具有重大的推广应用价值,前景广阔,为钻探技术的延伸和井管更新换代起到积极的推动作用,其成果达到国际先进水平,同意通过鉴定。

“PVC-U 塑料管在浅层地热能及地下水开发工程中应用与研究”项目成果是我队重视自主创新、提升单位科技实力的具体见证。同时,该项目也得到了河南省地质矿产勘查开发局的特别重视,副局长王建平时刻关注鉴定进展情况,局总工程师张宗恒及局科技处处长左玉明也亲自前往北京参加了鉴定会。此项成果通过部级鉴定,是对我队一直致力于探矿技术和钻井工艺研发工作的充分肯定,我队将以此为动力,继续坚持以科学发展观为统领,在不断发展中追求创新,继续为地质科技发展做出新的更大贡献。

(河南省地矿局水文二队 朱玉娟 供稿)