

振冲碎石桩在水库坝基处理工程中的应用

牛国生

(北京振冲工程股份有限公司, 北京 100102)

摘要: 振冲碎石桩具有施工速度快、工艺简单、投资低、加固效果好的优点, 被广泛应用于水利工程、道路修建、建筑工程等多个领域。在四川会理县黎溪镇大海子水库坝基处理工程中采用了振冲碎石桩技术。结合该工程实例, 介绍了振冲碎石桩的施工原理、施工工艺、施工顺序、施工情况等, 并对该工艺的实用价值和经济价值进行了评价。

关键词: 振冲碎石桩; 水利工程; 水库坝基处理; 软土地基加固

中图分类号: TV553 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2016)01-0075-06

Application of Vibro-replacement Stone Column in the Reservoir Dam Foundation Treatment/NIU Guo-sheng (Beijing Vibroflotation Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: Vibro-replacement stone column has been widely used in water conservancy, road building, construction engineering and other fields because of its advantages of rapid construction speed, simple process, low investment and good reinforcement effect, which was taken in a reservoir dam foundation treatment in Sichuan. With the engineering case, the paper introduces vibro-replacement stone column about its construction principle, technology, sequence and the situation and evaluates its practical value and economic value.

Key words: vibro-replacement stone column; water conservancy project; reservoir dam foundation treatment; soft soil foundation reinforcement

0 引言

水利工程是关系国计民生的基础性建设项目, 在水利工程施工过程中, 地基处理是其中较为重要的一道工序。地基是承载水利建筑物的基础部分, 其质量的好坏, 对于整个水利工程项目的质量控制具有决定性作用。在地基处理方法中, 振冲碎石桩是其中较为常见、经济的施工技术之一, 因此被广泛应用于水利、道路、建筑以及桥梁等多个领域。振冲碎石桩处理技术不仅具有施工速度快、工艺简单、投资低、加固效果好的优点, 还能对天然的土体进行有效利用, 使原有的软土地基与所构建的桩体形成复合地基, 从而提高地基整体的承载力, 确保水利工程后期施工的顺利进行。本文以四川会理县黎溪镇大海子水库坝基处理工程为例, 详细阐述振冲碎石桩在水利工程中的应用。

1 工程概况

大海子水利工程位于凉山州会理县南部黎溪境内, 是一座以灌溉为主, 兼有农村人、畜用水的跨流域引水中型灌溉工程。工程修建水库总库容

1950万 m^3 , 枢纽工程包括大坝和放水洞。大海子水库为Ⅲ等工程, 主要建筑物按3级设计, 次要建筑物按4级建筑物设计, 防洪标准按50年一遇设计, 1000年校核, 消能防冲标准按30年设计。

大坝坝型采用砾质土均质土坝, 大坝下游设块石棱体排水, 上、下游坝坡采用砼六方块护坡; 坝基采用振冲碎石桩加固, 坝基、坝肩采用帷幕灌浆防渗。坝基内有机质土层分布普遍较厚, 需要通过地基加固处理, 来提高地基土的强度, 满足筑坝土体荷载等设计要求, 加固处理有机质土是本次振冲碎石桩施工的难点与重点。

2 工程地质条件

2.1 地层情况

根据钻探揭露及地表调查, 大海子水库坝址区共划分为5个地层单元, 各地层特征及分布如下。

2.1.1 坝体、坝基填筑土(Q_4^{ml})

坝体填筑土: 黄褐、红褐色, 干, 稍密—中密, 以粉质粘土为主, 含大量强风化砂岩、泥岩角砾、碎屑, 大部分不坚固, 少量较坚固, 干钻钻进速度较快。

收稿日期: 2015-08-06; 修回日期: 2015-12-05

作者简介: 牛国生, 男, 汉族, 1979年生, 工程师, 从事岩土工程、地基处理工程现场施工工作, 北京市朝阳区望京西园221号博泰大厦12层, niuguosheng762@sohu.com。

坝基填筑土:灰、灰白色,湿,松散一稍密。该层分为2部分,一为坝基建基面碎石垫层材料,以碎石为主,石质成分主要为灰岩、白云质灰岩,含量60%~80%,粒径一般50~200 mm,最大可见280 mm,尖棱状,较坚固一坚固,以粘性土充填。二为坝基振冲碎石桩桩体材料,以碎石为主,石质成分主要为灰岩、白云质灰岩,含量85%~95%,粒径一般30~180 mm,最大达230 mm,尖棱状,较坚固一坚固,由于碎石桩是镶嵌在有机质土中,部分有机质土挤压进入碎石空隙中。钻探揭露厚度1.30~5.20 m。

2.1.2 第四系全新统冲积层(Q_4^{al})

有机质土:灰黑、深灰色,软塑,以粘粒为主,含腐殖质,易污手,稍具臭味,局部含大量腐化植物碎屑,质轻,质地疏松,分布不均匀,干钻钻进速度快,缩径现象严重。该层为本次地基处理的软弱土层,钻探揭露层顶高程介于1806.481~1810.680 m,层底高程介于1797.679~1801.181 m,揭露厚度5.30~12.30 m。

粘土:黄褐、灰褐色,局部浅灰绿色,可塑一硬塑,以粘粒为主,含少量粉粒,局部含圆砾,分布不均匀,干钻钻进速度中等。该层为设计的复合地基持力层,钻探揭露层顶高程介于1797.679~1801.181 m,层底高程介于1794.591~1798.708 m,揭露厚度0.70~4.70 m。

2.1.3 第四系全新统坡洪积层(Q_4^{dl+pl})

粉质粘土:红褐、黄褐色,硬塑一坚硬,以粉粘粒为主,含少量碎石及角砾,分布不均匀,干钻钻进困难。揭露厚度5.30~9.40 m。

2.1.4 第四系上更新统冲积层(Q_3^{al})

粘土:深灰、灰、灰黑色,软塑一可塑,以粘粒为主,含少量圆砾,含腐殖质及腐、炭化植物碎屑,分布不均匀,局部泥质弱胶结,干钻钻进速度较快。揭露厚度5.30~9.40 m。

含砾粉质粘土:浅灰绿、灰、灰褐色,硬塑一坚硬,局部呈可塑,以粉、粘粒为主。含18%~42%圆砾,粒径一般4~20 mm。局部见卵石,主要石质成分为砂岩,少量为灰岩,亚圆形,不坚固一较坚固,分布不均匀,泥质弱胶结,干钻钻进速度较慢。揭露厚度1.20~7.10 m。

2.1.5 三叠系上统至侏罗系下统白果湾群地层(T_3-J_1bg)

弱风化砂岩:深灰、灰黑色,主要矿物成分为长

石,含石英及少量云母,粉粒一中粗粒结构,泥质一钙泥质胶结,薄层一中厚层状构造。节理裂隙较发育,局部裂面见黄褐色铁锰质浸染,岩心较破碎,岩质较坚硬。该层为坝址区下伏基岩,最大钻探揭露厚度3.20 m,埋深介于21.90~33.20 m,层顶高程介于1782.370~1789.781 m,未揭穿。

2.2 工程地质条件分析

坝址区内未见滑坡、崩塌、泥石流等不良地质现象,特殊岩土为有机质土(软土),对坝基稳定影响较大,是本次振冲碎石桩处理的重点及难点。据钻探揭露坝基下部为有机质土,该层局部含大量腐化植物碎屑,标准贯入试验锤击数为3.2~6.2击,承载力特征值 $f_{ak}=70$ kPa。根据土工试验成果和现场直剪试验成果,该层密度 $\rho=1.80$ g/cm³,孔隙比 $e=1.46$,天然含水量 $W=62.1\%$,压缩系数(平均值) $\alpha_{1-2}=1.440$ MPa⁻¹, $\alpha_{2-3}=1.15$ MPa⁻¹,压缩模量 $E_{s1-2}=1.7$ MPa, $E_{s2-3}=2.2$ MPa,粘聚力 $c=13$ kPa,内摩擦角 $\varphi=9^\circ$,具有天然含水量高、孔隙比大、压缩性高和均匀性差等特点,对坝基稳定性影响大,需进行特殊处理方可作为坝基基础持力层。

3 振冲碎石桩施工

3.1 施工原理

振冲碎石桩是处理软土地基的一种施工方法,该法主要通过振冲器的作用,在待处理地基土体中进行成孔施工,以振密的填料替换软土后变形成坚实的碎石桩,然后与天然地基结合形成具有较强承载力的复合型地基。振冲碎石桩处理后的地基,不仅提升了土体的排水性,还提高了地基的稳固性,减少了地基不均匀沉降病害的发生。

3.2 施工工艺流程

振冲碎石桩施工顺序一般采用由一侧到另一侧或由里到外的流程,有秩序的施工能够提高工程的效率,将部分软土进行有效排除,方便后续的置桩控制。若施工地区的地基强度偏低时,可采用间隔振冲的方式进行施工,尽量避免桩间土质出现变动的情况。其具体的施工工艺流程如图1所示。

3.3 施工工序

(1)对施工地区进行场地清理,然后接通电源和水源。

(2)导入整个施工场区的测量控制线,并按设计要求布置桩点。

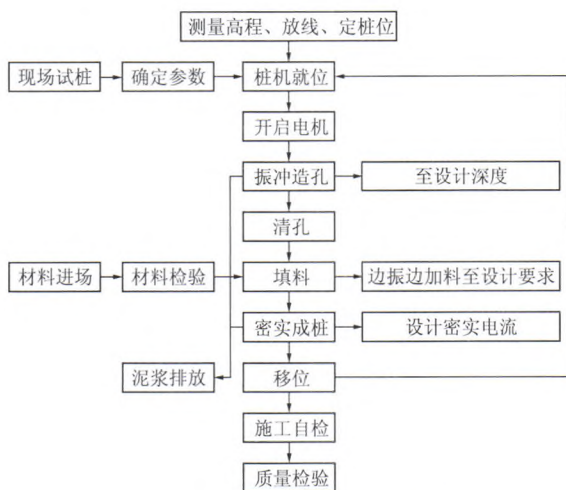


图 1 振冲碎石桩施工工艺流程图

(3)各仪器设备准备就位,调整好振冲器的位置及高度,使其对准桩位。

(4)造孔。将正对桩位的振冲器的压力泵开启,振冲器末端出水口喷水后,再启动振冲器,待振冲器运行正常开始造孔,使振冲器缓慢贯入土中,直至设计桩底标高;造孔过程中振冲器应处于悬垂状态。振冲器与导管之间有橡胶减震器联结,因此导管有稍微偏斜是允许的,但偏斜不能过大,防止振冲器偏离贯入方向。

(5)清孔。清孔处理需要 1~2 次,清孔时可将振冲器提出孔口或在需要扩孔地段上下反复提拉振冲器。

(6)填料加密。采用连续填料制桩工艺。制桩时应连续施工,加密从孔底开始,逐段向上,中间不得漏振。当达到加密电流和留振时间时信号指示灯亮起,信号灯亮后将振冲器上提继续进行下一个段加密,每段加密长度应控制在 50 cm 以内,重复上一步骤工作,自下而上,直至加密到设计要求桩顶标高。

(7)结束。关闭振冲器,关水,制桩结束,移位进行下一根桩的施工。

具体的施工工序如图 2 所示。

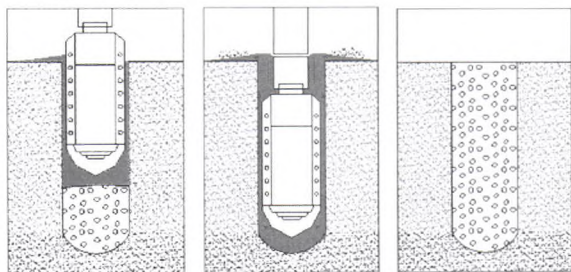


图 2 振冲碎石桩施工工序示意图

3.4 施工情况

本次地基改造施工之前,已有另外两家单位进行过振冲碎石桩试验施工,因试验效果达不到设计要求而告终,我单位受邀对本次地基改造工程进行试验施工。本次地基改造工程使用的振冲碎石桩技术各参数设置如下:造孔水压、清孔水压、加密水压控制在 0.6~0.7 MPa,气压控制在 0.4~0.55 MPa,加密段长度控制在 0.3~0.5 m,加密电流设定为 200 A,留振时间设定为 10 s。布桩形式采用等边三角形布桩,桩间距 2.0 m,桩长为 17.0 m。

3.4.1 常规水冲振冲法施工

以桩号 SYY3 振冲施工情况为例。

(1)造孔:振冲施工时上部约 3 m 受坝基填筑土层、前期振冲施工遗留的桩头及碎石褥垫层的影响造孔困难,振冲器贯入土层中的速度非常慢,振冲器进入有机质土层后贯入的速度有所提高,但不是太明显,随着贯入深度的增大,当到达粘土层时,受地质条件形成结构的影响,振冲器贯入该土体的速度又明显的降低。造孔电流值最低为 115 A,最高为 160 A。造孔时的水压相对稳定值在 0.7~0.8 MPa,造孔全过程耗时 60 min。

(2)清孔:清孔水压同上,清孔耗时 13 min。

(3)加密情况:加密水压同上,设定加密电流为 144 A,加密段长间距为 0.3~0.5 m,留振时间设定为 10 s。当加密电流值和留振时间值达到预设定值时,指示信号灯共同亮起,表明该段长的加密工作完成,依次类推,直至将加密工作完成。该桩加密时间耗时 100 min。

(4)施工评价:完成该桩施工总耗时为 173 min,投料总方量为 18.2 m³,实际单位填料量是 1.07 m³/m,未到达设计要求 1.5 m³/m 单位填料量,经重型圆锥动力触探检测锤击数 >9,满足设计要求。对以上施工情况进行分析后可以得出以下判断:

①施工初期处于施工摸索阶段,填料量比设计值偏低,桩径比设计值偏小,需要调整施工参数或优化改进施工措施;

②重型圆锥动力触探锤击数 >9,加密段间距和留振时间可作为延后试验参数;

③拟设定 144 A 加密电流施工参数的桩径和填料量没有达到桩径 1.2 m 和单位填料量 1.5 m³/m 的设计要求,需要采取措施扩大孔径;

④在试桩施工的造孔过程耗时长,存在造孔贯

入速度慢的原因,为提高功效,需要对工艺上加以改进,提高造孔速度。

综上所述,建议在延后试桩施工时优先考虑采取相应措施以扩大孔径,保证填料量。

3.4.2 外界高压气辅助水冲振冲法施工

以桩号 SYY2 振冲施工情况为例。

工艺上的改进措施是采用外接高压气辅助水冲振冲法施工,即在原振冲设备上增加供气系统加以辅佐。

(1)造孔:气泵辅佐气压值设定为 0.5 MPa,水压值设定为 0.65 ~ 0.75 MPa,该孔造孔耗时 50 min,比上根桩造孔节约时间 10 min,造孔工效有所提高,造孔电流值同上根桩差距不大。

(2)清孔:清孔水压值、气压值同上,清孔耗时 8 min,比上根桩清孔耗时缩短了 5 min,清孔工效也有所提高。

(3)加密情况:加密水压、气压同上,加密段长度及留振时间同上根桩,仅将加密电流上调到 152 A。该桩加密耗时 102 min。

(4)施工评价:完成该桩施工(SYY2 桩施工桩长为 15.5 m)总耗时为 160 min,投料总方量为 17.4 m³,实际单位填料量为 1.12 m³/m,未到达设计要求 1.5 m³/m 单位填料量,经重型圆锥动力触探检测锤击数 > 9,满足设计要求。对以上施工情况进行分析可以得出如下结论:

①施工初期处于施工优化阶段,填料量以及桩径没有达到设计值,还需要继续调整施工参数及调换、优化振冲器等设备;

②重型圆锥动力触探锤击数 > 9,桩体密实度有所保障,加密段长和留振时间没有必要再作调整和优化;

③振冲器外接高压气之后对提高振冲造孔的工效略有提高,在延后的试桩施工可以保留该辅佐设备;

④调换振冲器设备,对设备进行优化,相应的个别参数也必将随之变化,但还需要根据施工的具体情况作出界定。

综上所述,建议在此后试桩施工时优先考虑调换振冲器设备进行根本性的施工优化,以达到扩大孔径及增大填料量的目的。

3.4.3 设备优化后的施工

以桩号 SYY1 振冲施工情况为例。

改用新型 BJV377 - 150 型振冲器,对振冲器设备内部结构增加偏心块,增大了激振力,同时振幅也随之得到增大。对设备进行优化后,并仍旧采用外接高压气辅助的振冲法施工。

(1)造孔:水压调整为 0.6 ~ 0.7 MPa,造孔气压不变,设定为 0.5 MPa,经调整优化后的振冲器设备的造孔电流平均值为 190 A,最高达到 240 A,最低为 145 A,造孔耗时 35 min。

(2)清孔:清孔时的水压、气压同上,清孔耗时 5 min。

(3)加密情况:造孔时的水压、气压同上,加密电流设定为 200 A,加密段间距和留振时间同以上两根桩,加密耗时 126 min。

(4)工程评价:完成该桩施工总耗时 166 min,填料总方量为 26.9 m³,实际单位填料量为 1.58 m³/m,满足设计要求 1.5 m³/m 单位填料量,经重型圆锥动力触探检测锤击数 > 9,满足设计要求。由以上内容分析可知:

①调整优化振冲器设备后,单位填料量达到 1.58 m³/m,桩径达到 1.23 m,均满足设计要求;

②调整优化振冲器设备后,加密电流随振冲器设备的优化组合而相应变化设定为 200 A;

③从施工情况得出,调换优化振冲器设备后,施工过程中的造孔工作和清孔工作的耗时都得到了明显的缩短,施工工效有显著提高。

3.4.4 小结

综上所述,优化后的振冲器设备施工不仅解决了 SYY3 和 SYY2 两根桩遗留的关键问题,还对造孔和清孔工作的工效有着明显的提高。验证了优化后振冲器设备施工的可行性,对以后的试桩施工有着明确的、积极的、关键性的指导意义。在对 SYY3 - 1 桩施工情况进行对比分析后,对 SYY6、SYY5 桩的施工情况进行了优化调整,其具体的参数如表 1 所示。

表 1 各桩施工情况对比表(按施工顺序排列)

施工 桩号	桩长/ m	成桩 时间/ min	投料 量/ m ³	单位投料 量/(m ³ · m ⁻¹)	平均 桩径/ m	加密 段长/ m	加密 电流/ A	留振 时间/ s
SYY3	17.0	173	18.2	1.07	1.02	0.3 ~ 0.5	144	10
SYY2	15.5	160	17.4	1.12	1.04	0.3 ~ 0.5	152	10
SYY1	17.0	166	26.9	1.58	1.23	0.3 ~ 0.5	200	10
SYY6	17.0	135	26.1	1.54	1.21	0.3 ~ 0.5	200	10
SYY5	17.0	185	26.9	1.58	1.23	0.3 ~ 0.5	200	10

3.5 振冲施工质量控制

振冲施工质量控制主要是对水、电、料三要素进行有效控制,施工控制标准的制定应根据工程实际情况现场测试结果为准。

3.5.1 水的控制

水是振冲施工中的重要组成部分,对水的控制,主要是控制水的用量以及水压。在施工过程中,水量要保持充足,使孔内完全充满水分,避免塌孔情况的发生,为后续的制桩工序打下良好的基础;同时水量也不应过大,水量过大时,可能会将填料溢出流走。水压控制值应根据土质强度而定,对于强度较低的软土,可采用较小水压;而对于强度较大的土质,可采用较高的水压值。在成孔过程中,水压和水量应保持在较高值状态;而当孔洞接近设计深度时,应降低水压,以保护桩底下的土质不被破坏;在加料振密过程中,水压和水量应保持在较低值,以确保工程施工质量。

3.5.2 电的控制

电的控制主要是在加料振密过程中,对密实电流进行有效控制。振冲施工中的密实电流是由工程的实际情况决定的,应根据现场制桩试验结果而确定合适的电流值。一般情况下,密实电流值为振冲器潜水电机空载时电流值的基础上增加15~20 A,切不可把振桩时振冲器刚接触填料时的瞬间电流值作为密实电流。振冲器在制桩过程中,瞬时电流可能达到100~120 A,这时的瞬时电流并不能真正反映填料的密实程度,因为只要将振冲器停住不下降,电流值就会立即变小。能准确代表填料密实程度的电流值为振冲器在固定深度上振动一定时间(振留时间)后电流稳定的数值,而稳定电流值超过规定的密实电流值后,该段桩体即可制作完毕。

3.5.3 料的控制

振冲施工的质量还取决于填料水平的控制。在填料时,应严格控制填料的进量。一般而言,填料时不应一次添加过多,应以少量多次为添加原则,即每次加料量不宜过多,可分多次进行添加。在制作最底层的桩体时,为使电流值达到规定的密实电流,应添加较多的填料,部分桩体的底层填料量可占整根桩体填料总量的 $1/4 \sim 1/3$ 。底层填料为整个填料过程的最早阶段,在填料过程中会有相当一部分填料粘留在孔口到孔底的孔壁上,只有少量填料落在孔底;第二,若不对填料添加量进行严格控制,可能造成压力水超过设计值,增加孔底填料的数量;第

三,孔底的土质的实际情况可能与计算值存在一定的误差,导致填料数量超过正常用量。

3.5.4 其他方面的质量控制

施工期间,每制桩一根,都要在制桩结束后立即进行重型圆锥动力触探检测,根据制桩情况和检测结果查找存在问题的原因进行及时分析和判断,找到存在问题的关键所在并立即做出调整,争取每施工一根桩都要达到调整参数、调试设备以及更快接近设计要求,并希望由此调整,能够达到缩短试验工期、满足设计要求的目的。施工过程中发现0~3 m和穿透有机质土层至17.0 m两段内造孔慢,是由于工程地质条件所致,通过调整和改进振冲器已得到解决。在有机质土层内的3~9 m段内,有机质土呈软塑状,加密时所用石料相对较多,加密效果提升较慢、加密时间相对较长。有机质土层内,造孔泥浆较稠,而桩长深度内的粘土层和坝基填筑土较硬,造孔时三者都需要加大水压到0.6~0.7 MPa,并由辅佐气压使造孔速度有所增快。

4 工程评价

通过对大海子水库坝基改造工程的施工工艺的分析,可得出以下结论。

(1)振冲碎石桩施工工艺在加固大海子水库坝基的工程项目中具有一定的可行性和可靠性,能满足大海子水库正常使用的标准和设计要求。振冲碎石桩加密工艺的实施,对于提高水库地基的承载力,加快地基固结,减少地基沉降具有明显的作用,同时该工艺的使用在节约三材及成本,满足工程施工进度控制方面也显现出了巨大的优势。

(2)振冲碎石桩施工过程中各项参数的设定与工程地质状况有关,因此,在进行具体的施工过程中,应对工程地质状况进行详细勘探,以真实可靠的数据指导振冲碎石桩施工各参数的设定,以确保施工质量。

(3)建议碎石桩体采用重型圆锥动力触探试验检测,检测深度视质量情况而定;桩间土的检测可以进行,但不作为振冲碎石桩的质量验收标准。

(4)为保障工程的施工质量,应不断对施工工艺进行改进,优化施工辅助机具,提高施工效率。在石料级配方面的优化,可适当增大50~100 mm的粒石,以保证填料速度、强化桩体密实度;在人员配置方面应由有一级地基处理施工资质的、专业的、有

丰富振冲施工经验的地基处理公司来进行振冲碎石桩的施工。

(5)为提高整个工程的施工进度及施工质量,应认真解决好如下问题:振冲施工用水的落实、施工产生的大量泥浆的存放、增设变压器作为施工电源(施工中采用500 kW柴油发电机)以降低工程成本等。

5 结语

大海子水利工程所在地区的土质为有机土质,在承载力及强度方面较弱,采用振冲碎石桩施工技术进行处理。在处理过程中,严格按照既定的施工工艺进行施工,并在施工过程中做好水、电、料等要素的控制,尤其是料的控制上填料宜“少吃多餐”的方式控制,在有机质土层内则要用“先护壁,后制桩”的施工方法,以确保地基的施工质量。

碎石桩施工水平的高低是决定复合地基成败的关键因素,做好施工各项参数的控制工作,可为工程的顺利施工打下良好的基础。

大海子水利工程实践证明,振冲碎石桩在处理软土地基时,具有施工效果好、速度快、成本低等优点,

具有在水利工程中广泛推广的价值。

参考文献:

- [1] 王勇. 振冲碎石桩在加固软土路基中的应用[J]. 北方交通, 2013, (2): 3-5.
- [2] 姜波. 振冲碎石桩在地基处理中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2013, (8): 46-47, 67.
- [3] 李晓力, 肖普, 李庆跃. 重型动力触探在振冲施工质量控制及检测中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(2): 74-76, 80.
- [4] 肖黎明, 刘兴, 徐阳, 等. 无填料振冲法处理新近吹填粉细砂地基的工程应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(2): 56-59.
- [5] 李向群, 杨丰年, 王海鹏. 振冲碎石桩处理软土地基效果分析[J]. 岩土工程技术, 2015, (3): 127-131.
- [6] 王新宇. 振冲碎石桩在水利工程中的应用实例[J]. 山西水利科技, 2015, (2): 8-11.
- [7] 董立龙. 振冲碎石桩施工及效果分析[J]. 科技信息, 2014, (9): 187-188, 228.
- [8] 汪正荣. 建筑地基与基础施工手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 274-279.
- [9] DL/T 5214—2005, 水电水利工程振冲法地基处理技术规范[S].

(上接第74页)

(2)验证了ZK8321主孔见矿点偏距55~75 m处的磁异常,证实了磁铁矿的存在及厚度。

(3)在分支孔段复杂的地层成功完成分支孔的施工,为该矿区首例。

(4)加工制作了简单实用的反扭转器,保证了定向的准确性。

(5)分支孔的施工,节省了占地地基,可以减少设备搬迁和分支点以上的钻探工作量,又可避开上部复杂地层孔段(松散破碎、溶洞、采空区等)的钻探施工,可大幅度提高钻探效率,缩短工期,节约费用。

参考文献:

- [1] 胡志楠, 李粤南. 受控定向钻探孔身轨迹设计新方法与控制工

艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 1990, (3): 1-5.

- [2] 刘海翔, 向军文, 刘志强. 基于EXCEL的定向钻井应用程序及其工程应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 37(2): 14-16.
- [3] 刘德力. 光纤陀螺测斜仪的研制及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(22): 363-366.
- [4] 吴翔, 杨凯华, 蒋国盛, 等. 定向钻进原理与应用[M]. 中国地质大学出版社, 2006.
- [5] 樊腊生, 张伟, 吴金生, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-4孔定向钻进技术应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 101-108, 113.
- [6] 谢宏军, 索晓晶. 定向钻进技术在黑龙江金厂矿区的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(6): 19-22, 26.
- [7] 吴金生, 宋军, 尤建武, 等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1)定向钻进技术的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(12): 20-22.
- [8] 姚爱国, 高辉, 方小红. 定向钻进技术的发展与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(S1): 62-65.