

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202109027

张敏, 周灵, 谭超, 等. 复杂地层方形抗滑桩旋挖成孔工艺及工程应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 85-93.

ZHANG Min, ZHOU Ling, TAN Chao, et al. Techniques of rotary hole-drilling for square anti-slide piles in complex formation and its application[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 85-93.

复杂地层方形抗滑桩旋挖成孔工艺及工程应用

张 敏, 周 灵, 谭 超, 廖黎韦, 陈中伟, 侯志勇
(四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 为提高方形抗滑桩开挖成孔效率, 研究适用于复杂条件岩质滑坡抗滑桩快速成孔的工艺, 以成都东部某大型岩质滑坡 101 根大截面抗滑桩为对象, 通过现场调查、理论分析及工程试验等方法, 研究了方形抗滑桩工程成孔工艺、施工特征和不同地层成孔工艺适用体系。研究表明, 研制的“旋挖钻孔+人工辅助清边”成孔工艺作业效率大大提高, 在该抗滑桩工程中实施达到日平均进尺 2.0 m 高效率, 顺利达到工期要求, 进而解决了岩石成孔效率慢、工艺落后的问题; 根据滑坡所处条件选择合适的施工工艺对抢险救灾工程至关重要, 对于交通条件好、工期要求高的大型滑坡治理工程, 优先考虑“旋挖钻孔+人工辅助清边”工艺; 对于交通条件差、作业受限的小型滑坡治理工程, 采用风镐开挖土体、水磨钻开挖岩石成孔工艺。

关键词: 方形抗滑桩; 成孔工艺; 旋挖引孔; 人工清边; 水磨钻

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)01-0085-09

Techniques of rotary hole-drilling for square anti-slide piles in complex formation and its application

ZHANG Min, ZHOU Ling, TAN Chao, LIAO Liwei, CHEN Zhongwei, HOU Zhiyong
(Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co.Ltd., Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: To improve the hole-forming efficiency of square anti-slide pile excavation and study the rapid hole-forming technology suitable for rock landslides under complex conditions, this paper aims to study the hole-forming technology, the construction characteristics and the applicable system of hole-forming technology in different strata of square anti-slide piles by means of field investigation, theoretical analysis and engineering test. In this paper, a large rock landslide treatment project in eastern Chengdu with 101 large-section anti-slide piles is taken as the research object. The research shows that the new hole-forming technology of “rotary hole-drilling + manual excavation of the remaining earthwork” has greatly improved work efficiency and achieved a high efficiency of 2.0 m daily average footage in the anti-slide pile project. In the project, the new technology has successfully met the requirements of the construction period and solved the problem of slow hole-forming efficiency and backward technology. It is very important for disaster relief projects to choose the appropriate construction technology according to the conditions of landslides. For large-scale landslide treatment projects with good traffic conditions and high construction period requirements, the technology of “rotary hole-drilling + manual excavation of the remaining

收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2021-11-29

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 中石油管道有限责任公司科学研究与技术开发项目“山区油气管道线路设计与工程防护关键技术研究”(2020B-3106-0501)

第一作者: 张 敏(1989-), 男, 陕西汉中, 地质工程与地质资源专业, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程勘察与地质灾害治理相关技术的研究工作。E-mail: minzhang1989@163.com

通讯作者: 周 灵(1983-), 男, 硕士, 浙江衢州人, 地质工程专业, 高级工程师, 主要从事水工环地质勘查、项目管理工作。

E-mail: 49948147@qq.com

earthwork" is preferred. For small landslide treatment projects with poor traffic conditions and limited operation methods, we can use pneumatic picks to excavate the soil and use watermill drills to excavate the rock.

Keywords: square anti-slide pile; hole-forming technology; rotary drilling rig; manual excavation of the remaining earthwork; watermill drill

0 引言

我国是地质灾害多发国家,每年因滑坡造成伤亡事故及经济损失巨大。由于滑坡危害大,社会各界十分关注。如何快速应急处置,最大限度地减少损失,这些问题对治理滑坡工作来说具有重大意义^[1]。目前关于滑坡发育特征、滑动原理、早期识别、监测监控、防治体系的研究较多^[2-6],对于应急处置、治理工程的施工技术研究较少。方形抗滑桩有理论成熟、抗滑能力大、支挡效果好、对坡体扰动小、能及时增加抗滑力等优点,是滑坡治理中最常用的工程措施^[7-10]。在工程实践中,抗滑桩开挖成孔占据抗滑桩施工工期的 70% 以上,是制约抗滑桩施工效率的最关键因素。

桩孔开挖目前依据《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(DZ/T 0219-2006)、《抗滑桩施工技术规范(试行)》(TCAGHP 004-2018)等规范,采取人工风镐开挖土层、水磨钻开挖岩石等方法的相关研究较多。如刘松等^[11]介绍一种手提式风镐开挖各向异性围岩非爆破开挖方法;张敏等^[12]研究了油气管道滑坡水磨钻成孔施工工艺,详细分析了风镐、水磨钻在山区线路工程滑坡中的应用和特征;蔡奉祥等^[13]分析了桩基施工中花岗岩地层人工挖孔+水磨钻成孔工艺方法。此类方法由于设备动力差、劳动强度高、作业受限多、进度和安全不易保证,因此适用范围受限。将圆桩常用的旋挖钻、回旋钻、潜孔钻等及高效率设备应用于方桩成孔,也不乏尝试,如张家伟等^[14]研究出中部旋挖钻孔两侧方形切割的方形旋挖钻头施工工艺;赵建兵等^[15]研制出桩孔四角旋挖钻孔后成槽机刻槽成方形的成孔方法;秦亮等^[16]研究了适用于黄土的矩形抗滑桩“小钻头周边取土+大钻头中部取土+矩形修边器修边+钢筋笼整体调装+导管法灌注”施工工艺;张智斌^[17]提出了旋挖钻机引孔、成槽机整修孔壁的成孔方法;赖晓燕等^[18]发明了一种软质岩层矩形抗滑桩施工方法和矩形开挖钻头。此类研究在黄土、红黏土、碎石土等土体自稳能力较好的条件下应用效果良好、成效显著,但对于西南地区诸如红层基岩滑坡、堆积体滑坡、土石混合型滑坡的高硬度岩石、丰富地下水、岩土体不稳定的复杂条件下适用性较差。

综上,传统人工开挖方形桩孔作业面临安全风险

高、劳动强度大、工作效率低的现状。因此,作业机具和施工工艺的革新等因素对治理滑坡至关重要。文中将旋挖钻应用于方形抗滑桩成孔中,通过理论分析及试验实践,成功研制出“旋挖钻孔+人工辅助清边”的方桩成孔工艺。通过分析不同成孔工艺的原理、适用性及优缺点,总结了方形抗滑桩成孔技术适用经验,为滑坡治理施工设计及此类型滑坡应急治理提供借鉴。

1 研究区概况

1.1 滑坡概况

文中研究区为成都东部一红层滑坡抢险工程。滑坡平面上呈“长舌状”,剖面上呈折线形,后缘顶部高程 577 m,前缘高程 461 m,相对高差约 116 m,滑坡整体坡度较缓,平均坡度 15°~20°。滑坡纵向长 690 m,横向前缘宽 450 m,分布面积约 11.61×10⁴ m²,厚度 9.1~30.6 m,平均厚度约 18.9 m,滑坡体积 220×10⁴ m³,主滑方向 91°,为一大型推移式的岩质堆积体滑坡。主滑坡北侧发育次级滑坡,纵长 125 m,横向前缘宽 130 m,分布面积约 1.07×10⁴ m²,平均厚度约 13.1 m,滑坡体积为约为 14×10⁴ m³,滑动方向 65°,为一在主滑坡的侧向滑动力推挤作用下发育的中型堆积层次级滑坡。

1.2 滑坡岩土体特征

滑坡经过多次滑动,岩土体结构复杂。滑体主要为基岩滑坡堆积体,母岩成分为砂岩、泥岩、页岩,砂岩基本为中厚层状构造,粉砂质结构。滑带为基岩间软弱夹层,主要物质为青灰色、紫红色、黄褐色含角砾粉质黏土、含角砾黏土、粉质黏土、黏土,湿—饱和,少量呈软塑状,角砾、碎石含量为 5%~15%,母岩成分以强—全风化的页岩、泥岩和砂岩为主,粒径 0.05~3 cm。滑床主要为侏罗系蓬莱镇组(J_{3p})青灰色砂岩与紫红色泥岩互层地层组成,局部夹青灰—灰黑色页岩。

1.3 工程治理设计方案

治理措施包括锚索抗滑桩、截排水、削方绿化及道路恢复,其中抗滑桩是最重要的治理措施。共设四级支挡 101 根抗滑桩,分两类,A 型 20 根桩径 2.0 m×3.0 m,护壁厚度 0.25 m;B 型 81 根桩径 3.0 m×4.0 m,护壁厚度 0.30 m。桩孔开挖深度 20~50 m,属大截面超深抗滑桩(图 1)。

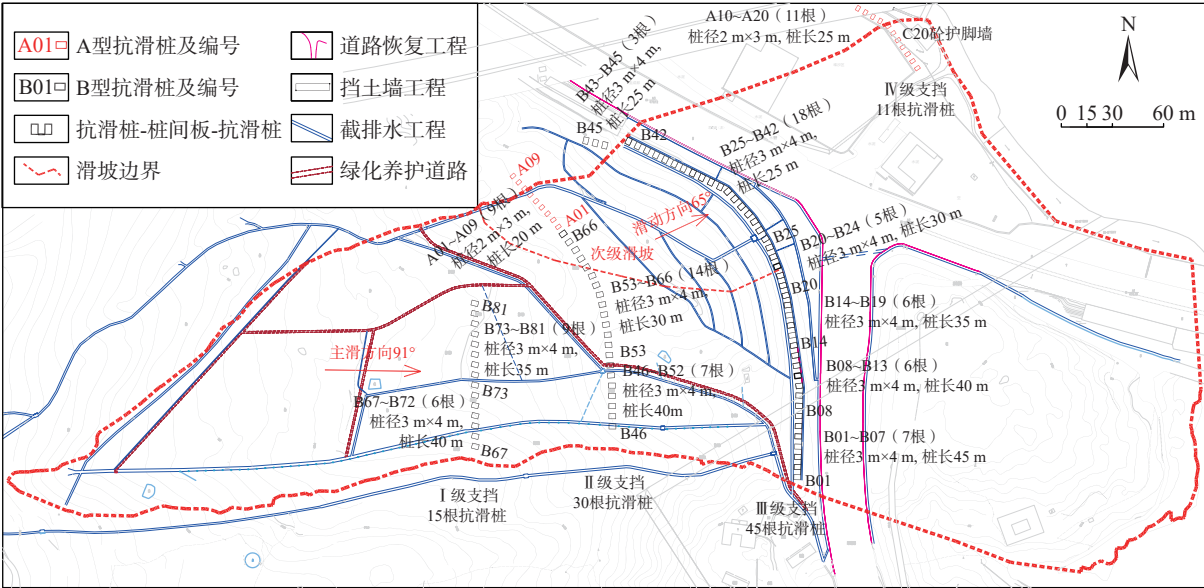


图 1 滑坡抢险救灾工程布置平面图

Fig. 1 Layout plan of landslide rescue and disaster relief projects

1.4 项目特征

项目 12 月初开工,要求第二年 4 月底完成抗滑桩工程,在汛期前达到抗滑能力。有效工期不足 5 个月,抗滑桩共计 101 根,总进尺 3 272 m,工程体量大,工期紧张。抗滑桩设计开挖深度属于超过一定规模危险性较大的分步分项工程,按施工图设计人工挖孔工艺,人工井下作业受坠落、触电、桩孔坍塌、物体打击的可能性很大,安全风险很高。桩孔由滑体解体的大块砂泥岩或者滑床完整砂泥岩构成,软硬岩交错互层,地下水丰富,地质条件十分复杂,由于临近高速公路且处于城市周边区,不能采取爆破作业,只能采用人工或机械开挖,开凿岩石难度很大。

2 研究方法

鉴于项目工期紧、体量大、风险高、施工难的特征,桩孔开挖方法和工艺研究为此次抢险救灾工程的关键点。根据以往工程经验和目前规范规定,一般采用人工铁锹、风镐开挖土方、水磨钻开挖岩石,此方式作业效率极低,且安全风险极高。文中在同一区域设置对比试验,将传统人工挖孔工艺与旋挖工艺进行对比,分析工艺特征和作业效率。

旋挖机械成孔工艺的原理、设计及流程如下。

2.1 工艺原理

桩孔开挖的核心在于岩土体的破碎,爆破是岩石破碎最高效的方式,然而爆破属于特种行业,在实际生产

中,使用概率很低。风镐、潜孔钻利用压缩空气为动力,使锤体进行往复冲击运动,形成冲击力,使镐钎或钻头打入岩石中,至分裂成块^[19]。

水磨钻、回旋钻、长螺旋钻、旋挖钻等是利用动力设备带钻头旋转,钻孔取芯将岩土体分解。旋挖机具有机动灵活、功率大、轴向压力大、输出扭矩大、钻孔效率高特点,适用各类土层及岩石,是目前桩基工程较为先进的成孔工艺^[20-21]。将旋挖钻应用在方桩成孔是解决方形桩机械开挖的一种方法,理论上,采用合适的钻头紧密相切布设,并将桩孔内的岩土体取芯,即能达到接近 100% 机械成孔结果。例如,李明欢等^[22]、金勤胜等^[23]研究出桩孔内土体紧密旋挖钻取,达到桩孔 100% 的旋挖钻进。但实践表明,在稳固土层中,可采取旋挖钻头搭接切割钻孔开挖取土,而开挖岩石时,旋挖机运行功率很大,受力集中在钻杆与钻具上,如果只钻进一侧岩土体,钻具与钻杆受力不均衡很容易导致钻机偏心,极容易引发安全事故。

因此,在西南山区基岩滑坡、堆积体滑坡、土石混合型等复杂岩土体条件下,桩孔开挖无法做到全孔机械化作业。

2.2 工艺设计

2.2.1 “桩芯旋挖+人工辅助清边”工艺设计

该工艺选择合适钻头在桩孔中部旋挖钻孔,人工下井凿除剩余岩土体,采用旋挖机出渣。旋挖机常用钻头直径为 $\phi 1.0\text{ m}$ 、 $\phi 1.5\text{ m}$ 、 $\phi 2.0\text{ m}$ 、 $\phi 2.5\text{ m}$,抗滑桩截面常

见的有 2.0 m×2.5 m、2.0 m×3.0 m、3.0 m×4.0 m, 设计典型方桩旋挖钻进理论模式图(图 2), 进行旋挖机钻头配置, 计算旋挖钻进占桩截面百分比统计表(表 1)。研究发现, 当采用 4 个 1.5 m、3 个 1.0 m 钻孔模式, 即 7 孔旋挖占比可达 56.88%, 总的来说, 旋挖钻孔越多、布置越紧密, 旋挖占比越大。

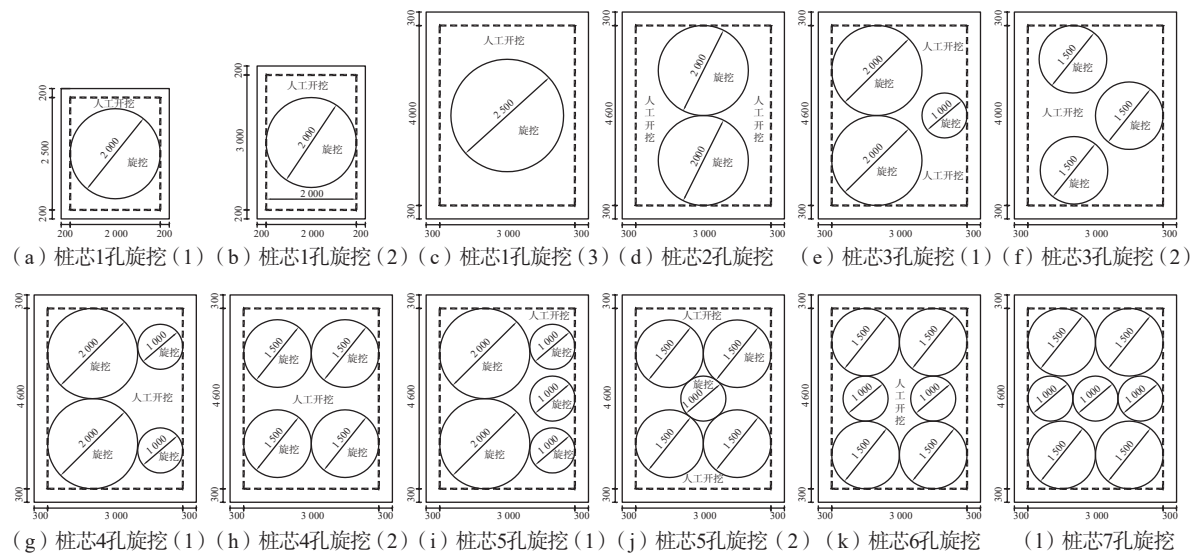


图 2 方形抗滑桩“桩芯旋挖+人工辅助清边”工艺设计模式图

Fig. 2 Process design pattern diagram of “pile core single hole rotary excavation+ manual excavation of the remaining earthwork” for square anti-slide piles

表 1 旋挖钻开挖方形抗滑桩设计参数统计表

Table 1 Statistical table for design parameters of square anti-slide pile excavated by rotary drill							
序号	桩径/m	护壁厚度/m	桩截面/m ²	旋挖孔数/孔	旋挖截面/m ²	旋挖面积占比/%	旋挖钻孔直径/m
a	2.0×2.5	0.2	6.96	1	3.14	45.11	1个2.0 m钻孔
b	2.0×3.0	0.2	8.16	1	3.14	38.48	1个2.0 m钻孔
c	3.0×4.0	0.3	16.56	1	4.91	29.63	1个2.5 m钻孔
d	3.0×4.0	0.3	16.56	2	6.28	37.92	2个2.0 m钻孔
e	3.0×4.0	0.3	16.56	3	7.07	42.66	2个2.0 m、1个1.0 m钻孔
f	3.0×4.0	0.3	16.56	3	5.30	32.00	3个1.5 m钻孔
g	3.0×4.0	0.3	16.56	4	7.85	47.40	2个2.0 m、2个1.0 m钻孔
h	3.0×4.0	0.3	16.56	4	7.07	42.66	4个1.5 m钻孔
i	3.0×4.0	0.3	16.56	5	8.64	52.14	2个2.0 m、3个1.0 m钻孔
j	3.0×4.0	0.3	16.56	5	7.85	47.40	4个1.5 m、1个1.0 m钻孔
k	3.0×4.0	0.3	16.56	6	8.64	52.14	4个1.5 m、2个1.0 m钻孔
l	3.0×4.0	0.3	16.56	7	9.42	56.88	4个1.5 m、3个1.0 m钻孔

试验发现, 并非采用的旋挖越密集、孔数越多施工效率越高, 因为旋挖机更换钻头占用时间较长以及不同钻头的工作效率不同。在开挖黏土、碎石土、强风化基岩等破碎、松散的土体时, “h 工艺”4 个 1.5 m 钻孔配合人工辅助清边效率最高。在开挖岩体时, “i 工艺”2 个 2.0 m 钻孔、3 个 1.0 m 钻孔配合人工辅助清边效率最高。当然, 在不同结构岩土和不同硬度强度的岩石时, 所采用的钻孔大小和数目不同, 可以根据图 1 先进行试验确定最佳钻孔模式再施工。

2.2.2 “桩周旋挖引孔+桩芯旋挖+人工辅助清边”工艺设计

由 2.2.1 节讨论得知, “桩芯旋挖+人工辅助清边”工艺能解决桩芯旋挖钻开挖, 但旋挖程度不高, 特别是对于大截面桩孔开挖, 即便是采用 7 孔紧密旋挖, 旋挖面积占比只能达到 56.88%, 当桩孔岩土体为孤石、块石、基岩等坚硬岩石, 人工下井开凿岩石比例依然较高、护壁开凿难度较大。凿除护壁岩石是旋挖工艺优化的关键, 为解决该问题, 进一步优化设计, 沿护壁桩周边界首

先进行预成孔,即先沿护壁边界放线,采用旋挖钻孔至设计桩底,将较完整的桩周护壁岩体分解,为保桩滑坡稳定和桩孔孔壁土压力平衡,将下一个钻孔土体回填至上一个钻孔,然后再旋挖桩芯岩土体(图3)。通过优化设计,桩芯2孔旋挖(2.0 m 钻孔)占比 49.77%,桩芯3孔(2孔 1.5 m、1孔 1.0 m 钻孔)旋挖占比 54.51%,桩芯5孔(2孔 2.0 m、3孔 1.0 m 钻孔)旋挖占比 80.59%。由此可见,该工艺旋挖比例显著提高,解决了桩芯开挖后桩周护壁岩土体完整开挖难度大的问题,大大节省人工凿除周边岩土体的时间。

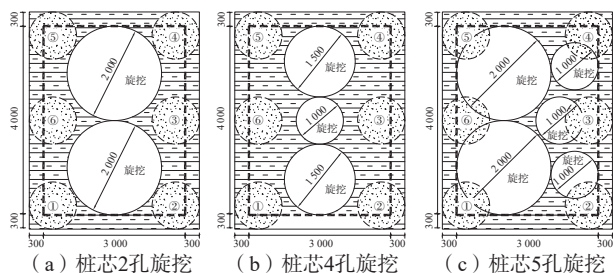


图3 方形抗滑桩“桩周旋挖引孔开挖回填+桩芯旋挖取土+人工辅助清边”工艺设计模式图

Fig.3 Process design pattern diagram of “rotary excavation and backfilling of pile lateral + rotary excavation of pile core + manual excavation of the remaining earthwork” for square anti-slide piles

2.3 工艺流程

2.3.1 “桩芯旋挖+人工辅助清边”工艺流程

根据以上设计,进行现场试验,旋挖机钻孔施工操作规范及要求参考相关资料文献^[24],主要操作流程为:

(1)根据桩径大小及岩层硬度情况选择合适钻头,采用旋挖机分节开挖桩芯,遇土层、强风化基岩或软岩采用旋挖钻头,钻进硬质岩石采用牙轮桶式钻头或环状钻头^[25]。滑体或松散岩土层中设置钢筋混凝土护壁,一般护壁长 1.2 ~ 1.5 m,在松散易垮塌、地下水丰富段缩短护壁长度,加密护壁钢筋。

(2)旋挖完一节后,人工下井清边,凿除多余岩土体,达到设计截面尺寸,旋挖机机械出渣。

(3)支模板、浇筑护壁混凝土,进行下一段施工。

2.3.2 “桩周旋挖引孔+桩芯旋挖+人工辅助清边”工艺流程

(1)沿桩孔护壁四周钻孔 6 个(桩径 3.0 m×4.0 m),采取 1.0 m 直径钻头一钻到底,为防止护壁坍塌及工人下井施工护壁时安全,将下一钻孔的土方回填至上一钻孔,即⑥→⑤→④→③→②→①→⑥,该步骤主要目的是将桩孔护壁土石方变成“松方”,节省人工下井凿除护壁时间。

(2)根据桩孔截面尺寸和岩层特征,选择合适旋挖钻头,进行钻孔布置,逐节钻孔出渣,滑体或松散岩土层中设置钢筋混凝土护壁,一般护壁长 1.2 ~ 1.5 m,在松散易垮塌、地下水丰富段缩短护壁长度,加密护壁钢筋。

(3)人工下井清边,凿除多余岩土体,达到设计截面尺寸,旋挖机机械出渣。

(4)支模板、浇筑护壁混凝土,进行下一段施工。

3 结果与分析

3.1 工艺对比试验结果

该滑坡为基岩滑坡,滑体为解体的岩石和滑体完整的基岩,岩石硬度高、软硬岩层互层分布,地下水丰富,施工条件复杂。加之工程桩孔截面大、工作量多、工期紧张,桩孔开挖抢险实施难度很大。

采用风镐、水磨钻开挖工艺,施工中投入大量作业人员,轮流两班倒。针对混杂岩土层,采取风镐、水磨钻轮换作业,大型悬臂吊增加出渣效率。经过 2 个月现场实施,发现 B 型桩(桩径 3.0 m×4.0 m,开挖截面 3.6 m×4.6 m)采用风镐每天开挖深度约 0.35 m,水磨钻每天开挖岩石深约 0.60 m,效率低下。工人劳动强度很高,富水、深孔作业的工作环境差,项目管理难度和安全风险大。

“桩芯旋挖+人工辅助清边”、“桩周旋挖引孔+桩芯旋挖+人工辅助清边”工艺,经过理论设计及现场试验。成功应用于文中项目,后续 81 根桩采取新工艺施工,达到日均进尺 2.0 ~ 2.5 m,比风镐、水磨钻效率提高了 2 ~ 3 倍。

3.2 工程应用分析

3.2.1 应用效果分析

(1)进度效益。采取新工艺每天开挖深度 2.0 ~ 2.5 m,比原风镐、水磨钻工艺提高了 2 ~ 3 倍,大大提高了效率,原计划工期 275 d,采用新工艺工期 130 d,节约工期 145 d。

(2)经济效益。风镐开挖块石土、软岩费用 280 元/m³,水磨钻开挖岩石预算 467 元/m³,桩孔开挖共计约 1 720 万元。采用新工艺费用 325 元/m³,费用节省 230 万元,由于工期缩短节约管理费等 45 万元。

(3)社会效益。采用新工艺在要求工期内治理工程顺利完工,保障了交通要道通车,在汛期强降雨期间安全度汛,保障了人民财产安全。

通过文中工程的有效尝试,积累了该工艺施工经验,后续在四川盆地红层基岩滑坡中可以推广应用。

3.2.2 施工整体技术要点及操作流程

主要技术要点如下:

(1)平整场地,修筑旋挖机作业便道,对主要便道进行硬化或铺设钢板;

(2)桩孔定位,根据开挖截面施放旋挖预成孔位置;

(3)桩周护壁进行旋挖预成孔,并及时将下一个钻孔岩土体回填至上一个钻孔;

(4)制作锁口,锁口段进行加强,长度 3.0 m, C25 混凝土浇筑,并加密钢筋;

(5)桩芯旋挖,根据桩孔截面尺寸及岩土体结构选择合适的钻孔布置,详细参建图 3;

(6)人工辅助清边,旋挖钻孔完成后,人工下井将多于岩土体凿除,修整至设计截面尺寸;

(7)旋挖机出渣,孔内凿除的弃渣,由旋挖机旋挖出孔,及时清运至渣场;

(8)绑扎护壁钢筋、支模板浇筑护壁混凝土,单节作业完成,循环下一节。

操作流程如图 4 所示。

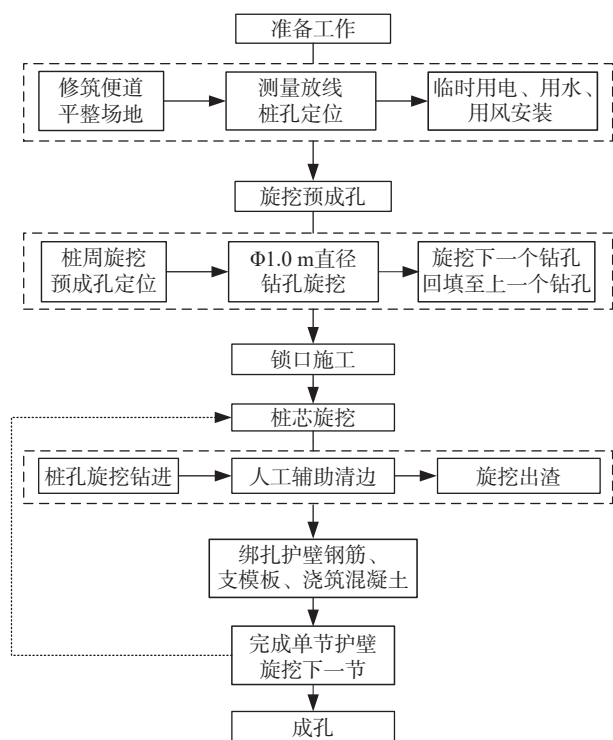


图 4 “桩周旋挖引孔开挖回填+桩芯旋挖取土+人工辅助清边”

工艺施工整体操作流程图

Fig. 4 Process flow chart of “rotary excavation and backfilling of pile lateral + rotary excavation of pile core + manual excavation of the remaining earthwork”

3.2.3 施工注意事项

由于旋挖机属于大型机械设备,且在滑坡体上作

业,因此在施工中务必注意以下几个问题:

(1)旋挖钻机重量较大(三一重工的 SR360R 钻机重量达 117.5 t),机架较高、设备昂贵,作业中必须保证安全,施工期要加强滑坡体变形观测,建立自动化监测点,对滑坡体变形稳定情况进行实时监测,特别是旋挖机扰动附近的观测情况,严格采取动态监测施工。

(2)旋挖作业队桩孔井口侧向荷载较大,必须对井口锁口段进行加强,采取加深锁口、加大截面、加强配筋、加大混凝土强度的方式,旋挖钻机施工时,在行驶便道处进行硬化或加铺钢板,钻杆保持垂直稳固,位置准确,防止因钻杆晃动导致旋挖机失稳。

(3)桩周旋挖引孔开挖至桩底标高时,不可连续不间断钻孔,需要间断钻孔,且要及时将钻孔回填,防止滑坡变形及桩芯开挖时垮塌。

3.3 不同工艺特征及适用条件分析

通过对比传统人工挖孔工艺、风镐水磨钻开挖工艺与“旋挖钻孔+人工辅助清边”的工艺特征及效率、费用及安全等方面,表明:①“旋挖钻孔+人工辅助清边”、“桩周旋挖引孔+桩芯旋挖+人工辅助清边”工艺具有流程简单、操作方便等特点,所需作业人员包括旋挖机操作工、指挥工、孔内凿岩工、孔口吊装工,所需设备包括旋挖机、空压机、风镐等(表 2、图 5);②机械化程度高、效率显著提高,具有降低工人劳动强度,容易形成流水作业等特点,以典型桩孔截面 2.0 m×3.0 m 为例,开挖土层达到 2.6 m、岩石开挖达 2.5 m,作业效率是传统人工挖孔工艺、风镐、水磨钻工艺的 2~3 倍,与传统人工挖孔风镐、水磨钻工艺相比较;③适用范围广,适用与各类岩土体的开挖;④成本显著降低,每方土石方成孔费用比风镐、水磨钻低,由于效率提高使得管理费 etc 间接费用显著降低;⑤安全风险大大降低,传统人工挖孔工艺、风镐、水磨钻等工艺工人劳动强度高,人员频繁上下井,卷扬机吊装出渣等可能出现的高空坠物、坠落、触电、机械伤害等事故多发,新工艺避免以上危险发生,有效降低安全风险。

总结 4 种成孔工艺各自优缺点及适用条件见表 3。研究表明,对于交通条件差、作业受限的小型滑坡治理工程,特别是线路工程偏远山区的滑坡治理工程,建议采用风镐开挖土体、水磨钻开挖岩石成孔工艺;对于交通条件好、工期要求高的大型滑坡治理工程,优先考虑“旋挖钻孔+人工辅助清边”工艺。在施工图设计阶段,可根据具体现场实际条件及工期要求选择合适的工艺。

表 2 抗滑桩桩孔成孔施工工艺特征对比表

Table 2 The table of construction process characteristics of anti slide pile hole

施工工艺	典型桩孔截面	设备配置	劳动力/人				效率/(m·d ⁻¹)			费用/(元·m ⁻³)		安全效益
			吊装	凿岩	水磨钻	旋挖操作工	土层	软岩	孤石、硬岩	土方	岩石	
传统人工挖孔工艺	2.0 m×3.0 m	铁锹、锄头、钢钎	1	2	—	—	0.80	0.40	—	120 ~ 180	—	人员频繁上下井,受机械伤害、高空坠物、坠落的风险高
	3.0 m×4.0 m		1	3	—	—	0.60	0.30	—			
风镐成孔工艺	2.0 m×3.0 m	4.5 m ³ 空压机1台,风镐2台	1	2	—	—	1.00	0.45	—	160 ~ 220	380 ~ 450	人员频繁上下井,受机械伤害、高空坠物、坠落的风险高
	3.0 m×4.0 m	5.0 m ³ 空压机1台,风镐3台	1	3	—	—	0.80	0.35	—			
水磨钻成孔工艺	2.0 m×3.0 m	水磨钻机2台,4.5 m ³ 空压机1台,风镐2台	1	2	2	—	—	—	0.90	—	420 ~ 650	人员频繁上下井,受机械伤害、高空坠物、触电、坠落的风险高
	3.0 m×4.0 m	水磨钻机3台,4.5 m ³ 空压机1台,风镐2台	1	2	3	—	—	—	0.60			
旋挖钻孔+人工辅助清边	2.0 m×3.0 m	旋挖机1台,3.5 m ³ 空压机1台,风镐1台	1	2	—	2	2.6	2.5	2.5	220 ~ 300	320 ~ 465	机械化程度高,人员不用频繁上下井,采取旋挖出渣,高空坠落、触电、机械伤害风险较低
	3.0 m×4.0 m	旋挖机1台,5 m ³ 空压机1台,风镐3台	1	3	—	2	2.2	2.0	2.0			

注: 以上费用测算基于地质灾害施工预算定额并结合项目现场实际测算;—表示未使用此种方法。



图 5 “桩周旋挖引孔开挖回填+桩芯旋挖取土+人工辅助清边”实况图

Fig. 5 Fact charts of “rotary excavation and backfilling of pile lateral + rotary excavation of pile core + manual excavation of the remaining earthwork”

表 3 非爆破开挖成孔工艺技术适用体系统计表

Table 3 Statistical table of applicable system for non-blasting excavation technology

序号	成孔技术	优势	缺点	适用条件
1	传统人工挖孔工艺	操作简单,对工人技术要求不高,易上手	1.效率低,劳动强度大; 2.仅适用在土方开挖	1.适用于土质滑坡卵石土、碎石土等土层开挖; 2.交通条件差,偏远山区
2	风镐开挖	设备轻便,井下受限空间作业灵活,操作简单、技术性不强	1.效率低,人工劳动强度大; 2.人工下井作业频繁,安全隐患大; 3.风镐钻进岩石粉尘大,对工人职业健康不利	1.适用于交通条件差,大型设备无法进场,周围条件受限、作业空间受限的情况,例如偏远山区小型滑坡、管道、铁路等线状工程滑坡; 2.适合小截面方桩的土层、碎石土、强风化基岩开挖
3	水磨钻开挖	1.设备轻便,机动灵活,操作简单; 2.适用岩层范围广,不同岩石硬度均可适用	1.设备小、动力差、效率低,劳动强度大; 2.人工下井作业频繁,安全隐患大	1.适用于适用于交通条件差,大型设备无法进场,周围条件受限、作业空间受限的情况,例如偏远山区小型滑坡、管道、铁路等线状工程滑坡; 2.适合小截面方桩硬度高的岩石开挖
4	旋挖钻孔+人工辅助清边	1.设备动力大、机械化程度高、工人工劳动强度降低、效率高; 2.人员不用频繁上下井,不用吊桶出渣,安全隐患降低	1.设备操作复杂,需要专业机械队伍作业; 2.地理位置、交通条件要求高,能满足旋挖机进场到达孔位; 3.作业扰动大,对滑坡稳定要求高,需要实时监测动态施工	大型滑坡的大截面深桩成孔作业,地理位置交通条件好,对工期要求高的抢险救灾工程

4 结论

(1)桩孔开挖是抗滑桩工程最为关键的工序,文中

通过理论研究及试验实践,研究出“旋挖钻孔+人工辅助清边”、“桩周旋挖引孔+桩芯旋挖+人工辅助清边”工艺,该工艺机械化程度高、成本费用低、作业效率高,能

够广泛应用于复杂地质条件下的大截面抗滑桩成孔。主要步骤包括桩周旋挖引孔开挖回填、制作锁口、桩芯旋挖钻孔、人工下井清边达到设计尺寸、旋挖机出渣。

(2)因地制宜选择合适的施工工艺对抢险救灾工程至关重要,对于交通条件差、作业受限的小型滑坡治理工程,建议采用风镐开挖土体、水磨钻开挖岩石成孔方式;对于交通条件好、工期要求高的大型滑坡治理工程,优先考虑旋挖钻孔+人工辅助清边工艺。

(3)旋挖机械成孔工艺施工中必须做好滑坡体的监测工作,另外需要加大成孔工艺的研究力度,从根本上研制更为高效、适用范围更广的设备及工艺。

参考文献(References):

- [1] 裴振伟, 年廷凯, 吴昊, 等. 滑坡地质灾害应急处置技术研究进展 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1382–1394. [PEI Zhenwei, NIAN Tingkai, WU Hao, et al. Research progress on emergency treatment techniques for landslide geological hazards [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1382–1394. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 朱庆, 曾浩伟, 丁雨淋, 等. 重大滑坡隐患分析方法综述 [J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1551–1561. [ZHU Qing, ZENG Haowei, DING Yulin, et al. A review of major potential landslide hazards analysis [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1551–1561. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 姜清辉, 郑俊, 位伟, 等. 重大滑坡灾害全过程调控减灾技术及试验验证与潜在应用 [J]. 工程科学与技术, 2020, 52(5): 62–70. [JIANG Qinghui, ZHENG Jun, WEI Wei, et al. Disaster prevention and mitigation technology for the whole process of serious landslides and its experimental verification and potential applications [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(5): 62–70. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈其针, 仲平, 张贤, 等. 构建中国自然灾害防灾减灾新体系 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 1–4. [CHEN Qizhen, ZHONG Ping, ZHANG Xian, et al. Establishment of an innovative system of natural disaster prevention and mitigation in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 1–4. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 周定义, 左小清, 喜文飞, 等. 基于SBAS-InSAR技术的深切割高山峡谷区滑坡灾害早期识别 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 16–24. [ZHOU Dingyi, ZUO Xiaoqing, XI Wenfei, et al. Early identification of landslide hazards in deep cut alpine canyon using SBAS-InSAR technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 16–24. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 唐军峰, 唐雪梅, 周基, 等. 滑坡堆积体变形失稳机制——以贵州剑河县东岭信滑坡为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 503–516. [TANG Junfeng, TANG Xuemei, ZHOU Ji, et al. Deformation and instability mechanism of landslide accumulation: A case study of Donglingxin landslide accumulation in Jianhe County, Guizhou Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 503–516. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 魏少伟, 隋颜阳, 杨建民. 圆形与矩形截面抗滑桩抗滑性能的模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 951–961. [WEI Shaowei, SUI Yanyang, YANG Jianmin. Model tests on anti-sliding mechanism of circular and rectangular cross section anti-sliding piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 951–961. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘宝生, 宋京雷, 郝社峰, 等. 江苏宁镇地区典型下蜀土滑坡机理分析及应急处理措施 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 31–36. [LIU Baosheng, SONG Jinglei, HAO Shefeng, et al. Analysis and emergent control measures of the typical Xiashu loess landslides in Nanjing-Zhenjiang area, Jiangsu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 31–36. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 邓时容, 肖世国. 嵌固段顶部拓宽型抗滑桩计算方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 84–91. [DENG Shirong, XIAO Shiguo. Calculation method of stabilizing piles with broadened top at the built-in section [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 84–91. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王文沛, 殷跃平, 王立朝, 等. 排水抗滑桩技术研究现状及展望 [J/OL]. 水文地质工程地质: 1–11 [2022-12-19]. [WANG Wenpei, YIN Yueping, WANG Lichao, et al. Status and prospects of studies on anti-slide shaft technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology: 1–11 [2022-12-19]. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘松, 翟军, 陶力, 等. 各向异性岩体非爆破开挖新工法在地下工程中的应用 [J]. 公路, 2019, 64(7): 343–347. [LIU Song, ZHAI Jun, TAO Li, et al. Application of new construction method of non-blasting excavation of anisotropic rock mass in underground engineering [J]. Highway, 2019, 64(7): 343–347. (in Chinese)]
- [12] 张敏, 周灵, 谭超, 等. 油气管道滑坡应急治理水磨钻开挖工艺与应用 [J]. 油气储运, 2021, 40(7): 816–821. [ZHANG Min, ZHOU Ling, TAN Chao, et al. Water mill drilling technology for landslide emergency treatment of oil and gas pipelines and its application [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(7): 816–821. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 蔡奉祥, 马耀举. 浅析坚硬花岗岩地层桥梁桩基成孔工

- 艺 [J]. 公路, 2021, 66(9): 210–213. [CAI Fengxiang, MA Yaoju. Analysis on the hole forming technology of bridge pile foundation in hard granite stratum [J]. Highway, 2021, 66(9): 210–213. (in Chinese)]
- [14] 张家伟, 赵湖潮, 王锐麟, 等. 矩形截面抗滑桩施工中方形钻头的应用 [J]. 建筑施工, 2019, 41(12): 2132–2133. [ZHANG Jiawei, ZHAO Huchao, WANG Ruilin, et al. Application of square drilling bit in construction of anti-slide pile with rectangular section [J]. Building Construction, 2019, 41(12): 2132–2133. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 赵建兵, 张德忠, 郑旭, 等. 矩形抗滑桩机械快速成孔施工方法: CN110593753A [P]. 20191220. [ZHAO Jianbing, ZHANG Dezhong, ZHENG Xu, et al. Rectangular anti-sliding pile mechanical and fast hole forming construction method: CN110593753A [P]. 20191220. (in Chinese)]
- [16] 秦亮, 赵立新, 杨涛. 黄土地层矩形抗滑桩旋挖钻快速成桩技术及应用 [J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊2): 366–371. [QIN Liang, ZHAO Lixin, YANG Tao. Rapid pile drilling technology by rotary drilling of rectangular anti-slide pile in loess stratum and its application [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(Sup 2): 366–371. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张智斌. 矩形截面抗滑桩机械成孔施工技术 [J]. 交通世界, 2020(8): 133–135. [ZHANG Zhibin. Construction technology of mechanical hole-forming for rectangular section anti-sliding piles [J]. TranspoWorld, 2020(8): 133–135. (in Chinese)]
- [18] 赖晓燕, 郑上满, 林志成, 等. 一种软质岩层矩形抗滑桩施工方法: CN111691408B [P]. 2021-08-03. [LAI Xiaoyan, ZHENG Shangman, LIN Zhicheng, et al. Construction method of soft rock stratum rectangular slide-resistant pile: CN111691408B [P]. 2021-08-03. (in Chinese)]
- [19] 刘洋. 岩石特性对碎岩开挖方法的影响研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020. [LIU Yang. Study on the influence of rock characteristics on the method of rock fragment and excavation [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 梁森, 袁誉飞, 舒波, 等. 超大直径超深桩基施工技术 [J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊2): 910–915. [LIANG Sen, YUAN Yufei, SHU Bo, et al. Construction technology of super large diameter and super deep pile foundation [J]. Building Structure, 2020, 50(Sup 2): 910–915. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 周外男, 缪玉卢. 坚硬岩石地层钻孔桩旋挖钻机成孔技术 [J]. 世界桥梁, 2019, 47(4): 27–31. [ZHOU Wainan, MIAO Yulu. Using rotary drilling rigs to make holes for bored piles in hard rock strata [J]. World Bridges, 2019, 47(4): 27–31. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李明欢, 罗志雄, 古宇鹏, 等. 方形抗滑桩施工方法: CN107675703B [P]. 2019-11-19. [LI Minghuan, LUO Zhixiong, GU Yupeng, et al. Construction method of square-shaped slide-resistant pile: CN107675703B [P]. 2019-11-19. (in Chinese)]
- [23] 金勤胜, 赵江, 姚院峰, 等. 旋挖钻孔灌注桩的混凝土充盈系数控制与现场试验 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 250–255. [JIN Qinsheng, ZHAO Jiang, YAO Yuanfeng, et al. Control and field tests of the concrete filling coefficient of cast-in-place piles dug by rotary drilling rig [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(3): 250–255. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 颜涛, 朱宾勤. 破碎岩土体中大直径抗滑桩施工工艺研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(增刊1): 304–308. [YAN Tao, ZHU Binqin. Study on construction technology of large diameter anti-slide pile in broken rock and soil [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(Sup 1): 304–308. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 刘宏亮, 尹莉, 付玲, 等. 钻头圆锥钻齿切削岩石数值模拟以及一种新的解析估算模型 [J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(1): 38–43. [LIU Hongliang, YIN Li, FU Ling, et al. Numerical study and a new analytical calculation thod for the rock cutting with the conical pick [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2021, 19(1): 38–43. (in Chinese with English abstract)]