

硬质岩滑坡深大抗滑桩一体化旋挖成孔技术及应用

杨涛^{1,2,3}, 李强^{1,2,3*}, 孙东^{1,2,3}, 伍剑波^{1,2,3}, 邹先敏^{1,2,3}, 罗小惠^{2,3}, 赵松江^{1,2,3}

(1. 四川省地质环境调查研究中心, 四川 成都 610081; 2. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川 成都 610081;
3. 四川省地质灾害防治工程技术研究中心, 四川 成都 610081)

摘要: 硬质岩深大抗滑桩桩孔成孔效率是滑坡灾害防治的难点问题之一。选取川西南典型复杂山区硬质岩滑坡抗滑桩成孔为研究对象, 系统分析了裂隙发育深部硬岩地层抗滑桩传统工艺成孔存在的问题, 对此设计了9种组合旋挖成孔工艺方案进行现场试桩试验, 从钻进效率、技术及经济可行性等方面进行了分析论证。现场试验及分析结果表明: 采用“大扭矩截齿筒钻旋挖+扩孔直径差0.4m”分级扩孔一体化成孔技术在硬岩地层中钻进效率较高、钻具损耗较低、成本较低, 验证了硬质岩抗滑桩高效旋挖分级扩孔技术的可行性和高效性, 对比现有人工成孔、冲击钻成孔、旋挖一次成孔等工艺, 从安全、效率、成本等方面均得到了极大提升。该技术成功应用于白鹤滩迁建集镇后缘滑坡桩基施工, 每延米综合耗时1.43h, 较改进前旋挖一次成孔效率提升3倍, 成本降低了60%。该技术为复杂地质条件下水敏型、震敏型硬岩滑坡抗滑桩快速成孔施工提供了高效、可行的技术方案。

关键词: 抗滑桩; 硬质岩; 旋挖钻进; 分级扩孔; 一体化成孔; 滑坡防治

中图分类号: P634.5; P642.22; TU457; U213.1⁺52.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)04-0135-10

Integrated rotary drilling and hole forming technology and application for deep and large anti-slide piles with hard rock

YANG Tao^{1,2,3}, LI Qiang^{1,2,3*}, SUN Dong^{1,2,3}, WU Jianbo^{2,3}, ZOU Xianmin^{1,2,3}, LUO Xiaohui^{2,3}, ZHAO Songjiang^{1,2,3}

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu Sichuan 610081, China;

2. Sichuan Huadi Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610081, China;

3. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Geohazard Prevention, Chengdu Sichuan 610081, China)

Abstract: The efficiency of pile hole formation for deep and large anti-slide piles in hard rock has always been a highly concerning issue in the industry. This study selected the formation of anti-slide pile holes in typical complex mountainous areas with hard rock landslides in southwestern Sichuan as the research subject. It systematically analyzed the traditional drilling pain points in deep hard basalt formations with weakly developed fractures, and designed nine combined rotary drilling hole formation process schemes for on-site pile testing. An analysis and demonstration were conducted from the aspects of drilling efficiency, technical and economic feasibility. The on-site testing and analysis results showed that the integrated hole formation technology of “large torque cutting tooth barrel drilling rotary drilling and stepwise borehole expansion with optimal cutting diameter difference of 0.4m” has the highest drilling efficiency, lowest tool wear, and lowest cost in hard rock formations. It verified the feasibility and efficiency of the high-efficiency rotary drilling stepwise borehole expansion technology for anti-slide piles in hard rock formations. Compared with existing manual hole formation, impact drilling, and one-time rotary drilling, this technology has greatly improved safety, efficiency, and cost. The technology has been successfully applied to the construction of pile foundations for

收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2024-06-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.04.017

基金项目: 四川省科技计划资助(编号: 2023NSFSC0784); 四川省地质调查研究院科技创新项目(编号: SCIGS-CZDXM-2024008)

第一作者: 杨涛, 男, 汉族, 1990年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事地质灾害防治技术研究工作, 四川省成都市一环路北二段3号, 1029193228@qq.com。

通信作者: 李强, 男, 汉族, 1980年生, 高级工程师, 地质工程专业, 主要从事地质灾害防治技术研究工作, 四川省成都市一环路北二段3号, 53507997@qq.com。

引用格式: 杨涛, 李强, 孙东, 等. 硬质岩滑坡深大抗滑桩一体化旋挖成孔技术及应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 135-144.

YANG Tao, LI Qiang, SUN Dong, et al. Integrated rotary drilling and hole forming technology and application for deep and large anti-slide piles with hard rock[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 135-144.

landslides at the rear edge of the relocated Baihetan Town, with an average time consumption of 1.6 hours per meter, which is three times more efficient and 60% percent less costly than the previous improved one-time rotary drilling efficiency. This technology provides an efficient and feasible construction technical solution for the rapid hole formation of water-sensitive and earthquake-sensitive hard rock landslide anti-slide piles under complex geological conditions.

Key words: anti-slide piles; hard rock; rotary drilling; stepwise borehole expansion; integrated drilling; landslide prevention and control

0 引言

复杂地质条件硬质岩深大抗滑桩成孔技术历来是滑坡灾害防治的难点问题之一。滑坡抗滑桩区别于其他工程桩体,其本身修建于变形的滑坡体上,对桩孔成孔技术的要求远高于其他地基承载类桩体,主要表现在要求成孔速度快、对周边地质环境扰动小,且由于大部分滑坡均具有震敏或水敏型特点,因此控制成孔过程中震动和用水量是抗滑桩成孔的关键要素。传统的冲击钻进会产生较大震动,且冲击钻进成孔需要用水拌合泥浆进行护壁,因此在抗滑桩成孔中一般不采用;人工成孔在复杂地层中经常被采用,但受其掘进效率低、安全隐患大影响,近年来也较少采用,特别是对于硬质岩抗滑桩成孔,人工成孔效率更低,不能满足治灾工程工期要求^[1]。旋挖钻进技术的发展为抗滑桩成孔带来了新的发展机遇,旋挖钻机以其灵活的机械性、极高的钻进效率以及广泛的地层适宜性为抗滑桩成孔提供了新的解决方案。旋挖钻机在土体、软岩以及较坚硬岩(单轴饱和抗压强度 <60 MPa)的钻进中具有明显的效率优势,但在坚硬岩(单轴饱和抗压强度 >60 MPa)地层中旋挖钻机施工效率非常缓慢,且钻具损耗严重。对此许多学者开展了研究工作,Sakiz U等^[2]通过旋挖岩心钻试验机对不同转速、不同静荷载、不同岩石强度进行钻进试验,得出了钻进速率指数、硬度 Q_{tip} 和施加负荷是旋挖钻进性能的最具影响力的因素。Larisch M D^[3]开展了不同硬质岩成孔方法比较研究,认为丛式钻机生产效率比传统钻具快10倍,比气腿取心筒快4倍,是满足钻孔桩硬岩钻孔要求的重要选择。张兴贵等^[4]通过对传统钻孔灌注桩施工技术整合对比,提出了螺旋钻进与冲击钻进交替组合的长螺旋钻孔灌注桩施工新技术简单、高效、机械化程度高,但仅能适用于软基桩基成孔。Van Hung N等^[5]通过对6种硬岩开展三轴及旋转冲击试验,提出了一种预测钻进速率的数学模型。赵伏军等^[6]开展了动静荷载耦合

作用下岩石破碎理论研究,认为冲击及旋转组合荷载模式能大幅提高破岩效率,并进行了试验验证。刘先珊等^[7]通过理论分析及数值模拟等手段开展了旋挖钻机截齿的破岩机理及优化研究,解释了截齿破岩机理,并优化了最高钻进效率的截齿布置方式。另外,许多一线施工作业技术人员也从硬质岩抗滑桩施工技术、施工工艺、钻机选型、钻头选择、钻头部署等方面开展了一系列研究^[8-14],同时不少技术人员也在桥梁桩基、基坑桩基等工程中开展了多手段组合、旋挖分级扩孔等实践,取得了一定的认识和经验^[15-21]。综上,他人的研究主要集中在室内试验、理论研究以及工程实践总结,而对特定工程开展批量试桩试验研究相对较少,本文以西南典型硬质岩滑坡灾害为依托,通过现场试桩试验研究及综合分析,总结形成硬质岩深大抗滑桩成孔一体化技术。

1 场地条件及工程概况

1.1 工程概况

不稳定斜坡治理工程区位于四川省凉山州宁南县白鹤滩镇,金沙江左岸、白鹤滩电站大坝上游约3.0 km,前缘临金沙江,坡度 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$,上陡下缓,不稳定斜坡横宽1000 m,纵长450~600 m,高差约280 m,滑坡厚度10~22 m,滑带为岩屑泥岩,滑体为玄武岩及上覆第四系崩坡积碎块石土,滑床为玄武岩,为顺层基岩滑坡。不稳定斜坡治理工程分为2期(见图1),一期工程主要针对斜坡体上强变形区(II-①、D1-4和D1-3)开展治理,共完成182根抗滑桩。二期工程共部署机械成孔圆形抗滑桩280根,桩径2.0 m,桩长22~41 m。一期工程因桩截面大,采用人工挖孔方法,效率低,施工风险高;二期工程桩径统一为2 m,设计要求采用旋挖机械一次成孔。

1.2 场地工程地质条件

斜坡区出露地层主要为第四系松散堆积物 and 二叠系上统峨眉山组($P_2\beta$)玄武岩(见图2)。



图 1 治理工程平面部署

Fig.1 Layout plan of governance engineering

第四系松散堆积物主要以碎石混合土为主,厚度 5~25 m。下伏基岩为二叠系上统峨眉山组($P_2\beta$)玄武岩,岩层产状 $N35^\circ\sim 45^\circ, SE\angle 15^\circ\sim 22^\circ$ 。受到风化、卸荷等浅表生改造作用,层间错动带 C8 层以上坡表岩体趋于破碎,层间错动带 C8 层以下 $P_2\beta_8$ 玄武岩饱和单轴抗压强度为 60~100 MPa,为坚硬岩,钻进难度大。

2 硬质岩深大抗滑桩成孔技术分析

2.1 传统桩基成孔技术优缺点分析

抗滑桩桩基快速成孔问题一直以来是防灾减灾工程施工领域研究的热点问题。冲击钻、人工掘进以及旋挖钻成孔已被验证为桩基成孔中最常用且有效的工艺。

硬质岩深大桩基成孔通常采用冲击钻成孔。

其缺点是占地面积大、环保性差、能耗高,成孔效率低。冲击钻因其本身成孔过程中产生较大震动且需要泥浆反循环,不利于滑坡稳定。因此针对滑坡等震敏型、水敏型地质灾害防治工程桩孔施工一般不采用冲击钻成孔。

人工成孔速度慢、安全风险高,特别是针对滑坡等已经存在缓慢变形的斜坡灾害成孔风险极大,极易发生桩孔坍塌等安全事故。因此人工成孔作业不适用于灾害防治工程硬质岩深大抗滑桩成孔。

旋挖钻机自发展以来一直以成孔速度快、精度高、机械化程度高、移位快捷、占地小、震动小、无需泥浆护壁等优点著称,旋挖钻机在土层、软岩及较坚硬岩施工中成孔效率尤为突出,但在坚硬岩地层中钻进速度低,且钻头磨损消耗严重,因此如何解决旋挖钻在硬质岩中掘进效率低的问题,对于提高复杂地质条件下硬质岩地层快速成孔具有重要的现实意义。

2.2 硬质岩深大抗滑桩旋挖成孔难点分析

结合分析,硬质岩深大抗滑桩成孔首选旋挖钻进成孔工艺。以本次工程设计推荐抗滑桩成孔施工方案为例,设计单位推荐采用覆盖层全护筒跟进成孔工艺,进入稳定基岩层后一次旋挖钻进成孔,采用 XR450、XR360 型等大扭矩旋挖钻机。按照设计推荐方案,选取 A3-26 抗滑桩试桩,桩长 22.0 m, XR450 型旋挖钻机截齿筒钻钻进,3.5~5.0 m 强一中风化层钻进速度较快,每小时进尺约 0.5 m,基本满足需求,但在 5.0~22.0 m 微风化玄武岩硬岩地层中由于岩体坚硬,钻进效率低且截齿钻头消耗大,

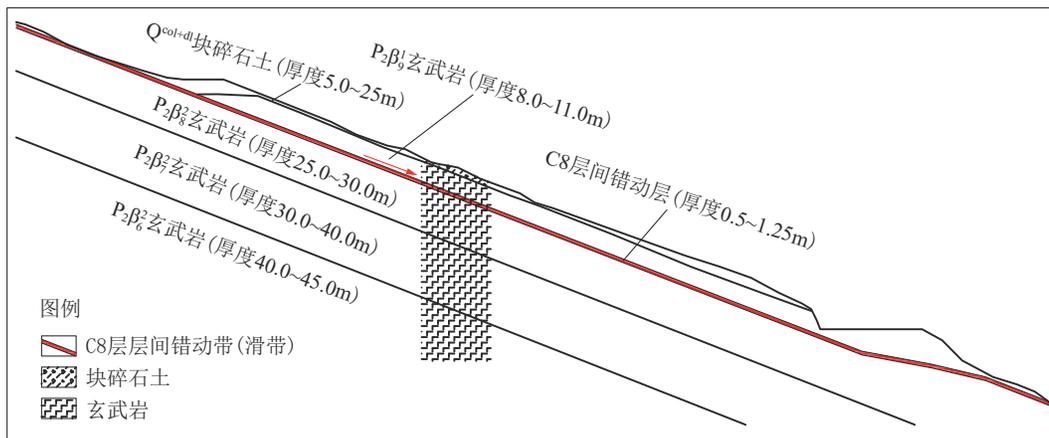


图 2 场地岩土体结构剖面示意

Fig.2 Schematic Profile of Site Rock and Soil Structure

每小时进尺约0.2 m,每延米消耗截齿钻头约2个,不能满足需求。可见深部坚硬岩层中采用一次成孔工法效率低、钻头消耗大。综合分析影响成孔效率及成本的主要因素是钻机型号、钻头类型以及钻进工艺。钻机型号主要体现在动力头最大扭矩,扭矩越大钻进效率越高,但扭矩越大钻机功率越高,相应的成本越高,因此在设备选型中应满足进度要求的基础上选择合适功率的钻机。针对硬质岩大断面钻进钻头选择主要有截齿筒钻和牙轮筒钻,如何选择既能满足钻进效率又能确保经济性的钻头类型是实现高效低成本钻进的关键。实践中发现钻进工艺是制约钻进效率的关键因素之一,一次成孔工艺虽然施工简单但进尺效率太低无法满足工期要求,因此如何通过钻进工艺改进实现效率和成本“双控”是本次研究的重点内容。

3 试桩试验设计

通过对传统硬质岩深大抗滑桩成孔技术以及设计推荐方案测试分析,可知旋挖钻进方案更适用于硬质岩深大抗滑桩成孔。如何进行钻机型号、钻头以及钻进工艺的合理匹配使得整个钻进过程高效且成本可控是本次试桩试验设计的核心目的。

3.1 钻机型号选择

对比行业内适合深大抗滑桩成孔施工的旋挖钻机各项性能指标(见表1),选取功率能够满足钻进需求的3种型号钻机进行试桩试验对比分析,然后通过交叉试验获得最优组合设备及工艺。

表1 旋挖钻机性能对比

Table 1 Comparison table of rotary drilling rig performance

钻机型号	动力头最大扭矩/(kN·m)	最大钻孔深度/m	卷扬机最大拉力/kN	定额油耗/(L·h ⁻¹)	工作质量/t	租赁价格/(万元·月 ⁻¹)
XR405	405	106	400	24	120	20
XR420	420	110	500	25	141	20
XR450	450	120	600	28	159	22
XR580	580	150	800	32	230	26

考虑到XR405型钻机和XR420型钻机租赁费用和定额油耗差异性较小,结合施工效率综合选定XR420、XR450、XR580型钻机进行对比分析。

3.2 钻头选择

在二期工程前期试桩中采用钨钴硬质合金截齿钻头(见图3),中—微风化岩层每延米平均消耗



图3 截齿筒钻

Fig.3 Conical tooth bit drilling

量为2个(见表2)。也选取了硬质合金牙轮钻头进行了试桩(见图4),每延米平均消耗量为1个(见表2)。每个截齿钻头成本仅为牙轮钻头的6%,综合考虑,硬质岩旋挖钻进钻头选择钨钴硬质合金截齿钻头施工效率和经济性更优。

表2 钻头功效对比(XR420型钻机一次成孔)

Table 2 Comparison of drill bit efficiency (XR420 Drill Rig—One shot hole)

钻头类型	试桩号	桩长/m	基岩厚度/m	基岩钻进效率/(m·h ⁻¹)	每延米消耗/个	钻头单价/元
截齿钻头	A3-13	33.4	29.0	0.2	2	350
牙轮钻头	A3-14	32.2	29.0	0.3	1	5000



图4 牙轮筒钻

Fig.4 Roller cone bit drilling

3.3 成孔工艺设计

为了最大程度减少钻头的损耗并提高钻进效

率,采用了分级扩孔施工工艺。分级钻进的理念是将难以完成的大直径硬岩单次成孔工艺分解成多个等级,逐步扩孔,从而降低每次钻进的难度,实现快速钻进。确定合理的分级数是关键,分级过少会增加每级钻进的难度,影响效率;分级过多则会使施工工序繁琐,降低效率。

当前国内外对分级扩孔方案的研究和实践较少,没有形成相对科学的取心孔径、扩孔直径以及扩孔次数供施工借鉴^[22]。为了探索和确定最佳的分级施工顺序,针对工程中2.0 m直径桩孔设计了3种扩孔方案,并分别采用XR420、XR450、XR580型3种钻机进行施工作业,然后根据钻进效率、钻头消耗量以及不同类型钻机租赁价格综合计算硬质岩地层每延米成孔综合费用及钻进效率,从而获取最优组合分级扩孔方案。扩孔直径差选择主要考虑常用钻具直径,在常用钻具条件下进行分级扩孔,工艺组合方案见表3。其中0.4 m扩孔直径差钻进施工程序为:Ø1.2 m截齿筒钻取心至孔底;Ø1.6 m截齿筒钻一级扩孔至孔底;Ø2.0 m截齿筒钻二级扩孔至孔底,完钻。0.5 m扩孔直径差钻进施工程序为:Ø1.0 m截齿筒钻取心至孔底;Ø1.5 m截齿筒钻一级扩孔至孔底;Ø2.0 m截齿筒钻二级扩孔至孔底,完钻。0.8 m扩孔直径差钻进施工程序为:Ø1.2 m截齿筒钻取心至孔底;Ø2.0 m截齿筒钻一级扩孔至孔底,完钻。

表3 工艺组合方案

Table 3 Technological process combination scheme

方案编号	扩孔直径差/m	钻机型号	扩孔级配	试桩号
1	0.4	XR580	二级	A3-1
2	0.4	XR450	二级	A3-4
3	0.4	XR420	二级	A3-7
4	0.5	XR580	二级	A3-2
5	0.5	XR450	二级	A3-5
6	0.5	XR420	二级	A3-8
7	0.8	XR580	一级	A3-3
8	0.8	XR450	一级	A3-6
9	0.8	XR420	一级	A3-9

本次方案设计通过方案1~3、方案4~6、方案7~9方案间对比,实现不同扩孔直径差及扩孔次数间的对比分析,从而获得最优扩孔次数和扩孔直径差,通过各组方案内对比获得0.4、0.5和0.8 m三种

级差下的最优扩孔方案,从而达到钻进效率和钻进成本双向优化。

4 试验结果分析

根据制定的9种组合工艺方案,选取工作区内第四系覆盖层最薄的区域(Ⅲ-1区)开展试桩试验。桩型为A3型,桩径2.0 m,为尽量控制下伏基岩差异对试桩带来的影响,在Ⅲ-1区连续选取A3型桩9根(A3-1~A3-9)开展桩基成孔试桩试验。

试验结果统计见表4。第四系覆盖层采用“旋挖钻机取心+人工清边+钢筋混凝土护壁”组合工法,在覆盖层碎块石土中钻进速度明显大于基岩的钻进速度,且各型号钻机钻进速度相当。而在基岩层玄武岩钻进过程中没有体现出明显的强—微风化钻进速度差异,这与现场勘察资料显示一致,表明玄武岩地层强—中风化厚度较薄,钻进速度与微风化基岩层差异性小。但不同工艺组合试桩方案差异明显,下面从钻进速度、钻具损耗及成孔成本进行详细分析。图5为现场试桩照片。

4.1 钻进效率分析

钻进效率是体现钻进方案是否科学的主要指标之一。9种组合工艺方案成孔效率对比见图6,由图6可知,方案1(0.4 m扩孔直径差+XR580型钻机)和方案2(0.4 m扩孔直径差+XR450型钻机)两级扩孔工艺组合方案效率最高,均为0.7 m/h,但方案2采用的是XR450型钻机,功耗及成本更低。方案9(0.8 m扩孔直径差+XR420型钻机)和方案6(0.5 m扩孔直径差+XR420型钻机)效率最低,在0.3 m/h左右。分析可知,一是钻机功率越大钻进效率越高。整体效率XR580型钻机>XR450型>XR420型,说明钻机功率对成孔效率影响最大,是控制成孔效率的核心因素。二是两级扩孔整体优于一级扩孔效率。主要原因是两级扩孔虽然工序更为复杂,但钻头在入岩切削过程中临空面距离钻头入岩位置更近,更容易通过压剪作用力在岩体中形成破裂面,从而实现快速切削岩体钻进(见图7)。三是扩孔直径差越小扩孔效率越高。扩孔直径差越小钻头入岩位置与第一次取心完成形成的临空面越近,更容易在压剪过程中产生破裂面,这与分级扩孔效率高原理相同。但需要注意的是并不是扩孔直径差越小,钻进效率越高,当扩孔直径差无限小时,钻进过程类似“扫孔”,并不能实现高效钻

表4 试桩结果统计
Table 4 Test piling result statistics

方案	桩号	钻机型号	实测孔深/m	有效桩长/m	钻进工序	土层			基岩			钻进效率/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	钻头消耗总数/ 个
						厚度/m	耗时/h	平均每米耗时/h	厚度/m	耗时/h	平均每米耗时/h		
1	A3-1	XR580	34.2	34	取心	3.7	4	1.08	30.5	21.75	0.71	1.40	11
					一级扩孔	—	—	—	30.5	11.31	0.37	2.70	6
					二级扩孔	—	—	—	30.5	10.44	0.34	2.92	5
					合计	3.7	4	1.08	30.5	43.5	1.43	0.70	22
2	A3-4	XR450	34	32	取心	3	3.5	1.17	31	22.25	0.72	1.39	8
					一级扩孔	—	—	—	31	11.57	0.37	2.68	4
					二级扩孔	—	—	—	31	10.68	0.34	2.90	4
					合计	3	3.5	1.17	31	44.5	1.44	0.70	16
3	A3-7	XR420	31.5	28	取心	4	4.5	1.13	27.5	34.25	1.25	0.80	7
					一级扩孔	—	—	—	27.5	17.81	0.65	1.54	4
					二级扩孔	—	—	—	27.5	16.44	0.60	1.67	3
					合计	4	4.5	1.13	27.5	68.5	2.49	0.40	14
4	A3-2	XR580	34.9	33	取心	2	2.5	1.25	32.9	27.1	0.82	1.21	12
					一级扩孔	—	—	—	32.9	14.092	0.43	2.33	6
					二级扩孔	—	—	—	32.9	13.008	0.40	2.53	5
					合计	2	2.5	1.25	32.9	54.2	1.65	0.61	23
5	A3-5	XR450	32.95	31	取心	3.64	4	1.1	29.31	30	1.02	0.98	8
					一级扩孔	—	—	—	29.31	15.6	0.53	1.88	4
					二级扩孔	—	—	—	29.31	14.4	0.49	2.04	3
					合计	3.64	4	1.1	29.31	60	2.05	0.49	15
6	A3-8	XR420	27.5	26	取心	3.6	4	1.11	23.9	39	1.63	0.61	6
					取心	3.8	4	1.05	30.2	32.175	1.07	0.94	11
					一级扩孔	—	—	—	30.2	26.325	0.87	1.15	10
7	A3-3	XR580	34	32	合计	3.8	4	1.05	30.2	58.5	1.94	0.52	21
					取心	3.5	4	1.14	29	38.5	1.33	0.75	8
					一级扩孔	—	—	—	29	31.5	1.09	0.92	7
8	A3-6	XR450	32.5	30	合计	3.5	4	1.14	29	70	2.41	0.41	15
					取心	3.9	4.2	1.08	25.8	54.725	2.12	0.47	7
					一级扩孔	—	—	—	25.8	44.775	1.74	0.58	6
9	A3-9	XR420	29.7	27	合计	3.9	4.2	1.08	25.8	99.5	3.86	0.26	13



图5 XR420型钻机A3-7试桩

Fig.5 XR420 drilling rig on-site A3-7 test pile

进。过大的扩孔直径差又不利于钻头入岩部位破裂角的产生,因此合适的扩孔直径差与分级扩孔工艺组合是提高钻进效率的有效手段。综上,通过本次试桩试验,针对复杂地质条件下坚硬岩2 m直径抗滑桩桩基成孔推荐采用方案2(0.4 m扩孔直径差+XR450型钻机)两级扩孔工艺组合方案效率最高。

另外,针对硬质岩 \varnothing 2 m桩基成孔,结合他人研究及施工经验,人工挖孔工法每延米综合耗时约8 h,冲击钻成孔每延米综合耗时约5 h,XR420型旋挖

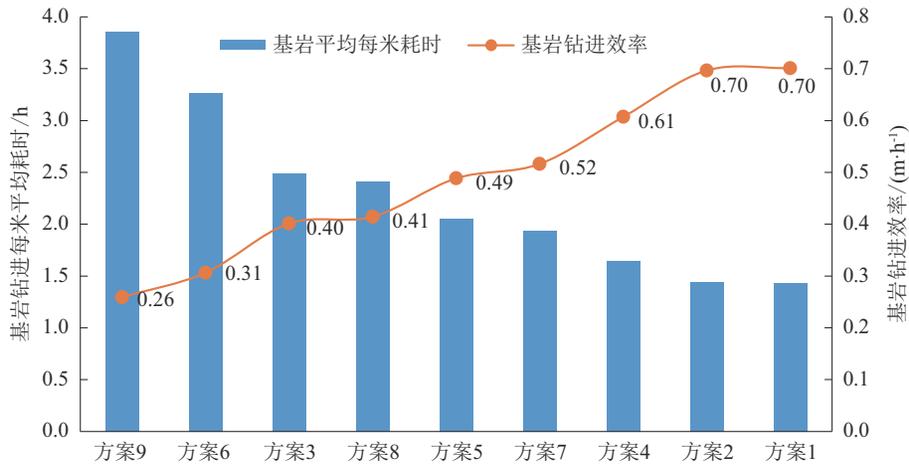


图 6 试桩成孔效率对比

Fig.6 Comparison of pile driving efficiency in hole formation

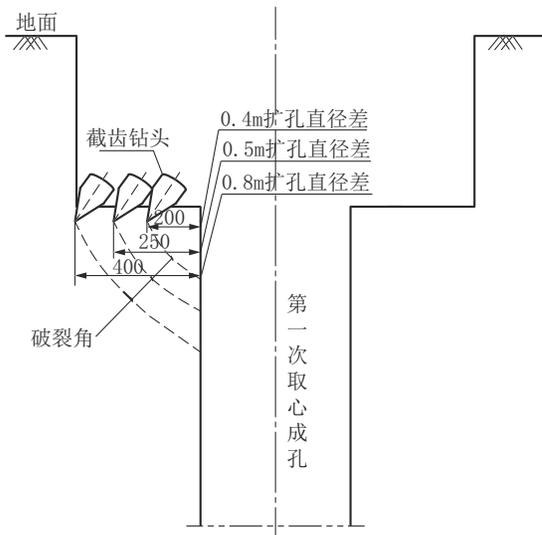


图 7 钻头入岩切削原理

Fig.7 Schematic diagram of rock cutting principle for drill bits

钻一次取心成孔每延米综合耗时 5 h, 本次试桩各组合方案钻进效率为每延米耗时 1.43~3.86 h, 可见在成孔效率方面, 旋挖钻进具有绝对优势, 特别是采用 0.4 m 最优扩孔直径差两级扩孔旋挖工法, 每延米综合耗时 1.43 h, 极大地提升了施工效率, 其施工效率是人工挖孔桩的 5 倍, 是冲击钻成孔和旋挖钻一次取心成孔效率的 3 倍。

4.2 钻具损耗分析

钻具损耗是评价成孔过程的又一重要指标。本次试桩试验不同工法组合方案 2 m 直径硬质桩孔钻头消耗对比见图 8。由图 8 可知, XR420 型、

XR450 型钻机各工艺组合钻头消耗量基本相同, 均为每延米约 0.5 个钻头, XR580 型钻机每延米消耗约 0.7 个钻头, 可见大功率钻机钻进过程中钻头消耗量明显高于中等功率钻机, 而与钻进工法没有明显相关性, 其主要原因是大功率钻机在钻进过程中转速和钻进压力大, 钻头在同等条件下与岩体压剪作用力更大, 从而导致钻头磨碎速度更快。综上, 钻具损耗是工法组合选择的重要参考。

4.3 成本及功效综合分析

经济成本也是衡量方案是否可行的重要因素之一。针对本次试桩试验, 选取钻机租赁单价(P)、额定油耗(F)、钻进效率(E)以及钻头消耗量(N)等指标进行每延米成孔综合单价(C)计算。计算公式如下:

$$C = \frac{P + 720FO}{720E} + NU$$

式中: C ——每延米成孔综合单价, 元; P ——钻机租赁单价, 元/月; F ——钻机额定油耗, L; O ——柴油单价, 元/L; E ——基岩钻进效率, m/h; N ——每延米钻头消耗量, 个; U ——钻头单价, 元/个。

钻机租赁、柴油、钻头按照市场行情价格计算, 本次试桩试验 9 种工艺组合方案每延米综合成孔单价见表 5。由表 5 可知, 方案 2(0.4 m 扩孔直径差 + XR450 型钻机) 两级扩孔方案效率最高, 成本最低, 每延米综合成孔单价约 970 元, 较改进前旋挖一次成孔降低了 60%; 而方案 9(0.8 扩孔直径差 + 420 型钻机) 一级扩孔方案成本最高, 效率最低, 每延米综合成孔单价高达 2000 余元, 约为方案 2 的 2 倍。

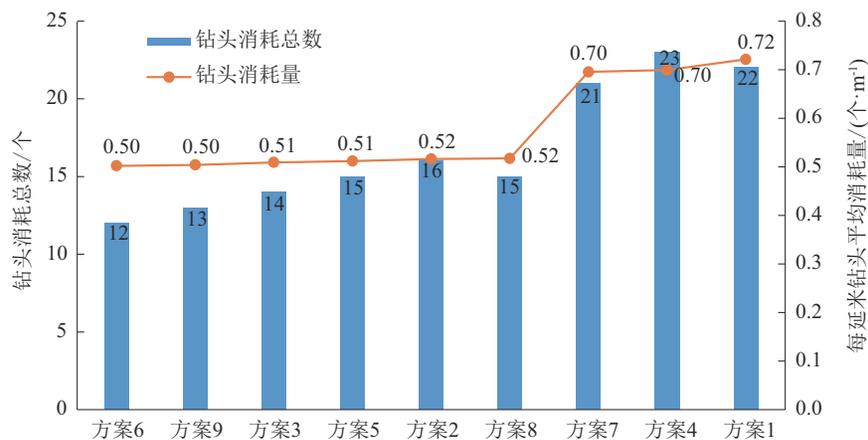


图8 不同工法2 m直径硬质岩桩孔钻头消耗对比

Fig.8 Comparison of consumption of 2m diameter hard rock pile hole drill bits for different construction methods

根据表5绘制的不同工法硬质岩桩孔成孔成本及效率对比雷达图见图9。

表5 试桩试验成孔综合单价计算

Table 5 Comprehensive unit price calculation table for test piling trial holes

方案	钻机型号	定额油耗/(L·h ⁻¹)	租赁价格/(万元·月 ⁻¹)	截齿钻头单价/(元·个 ⁻¹)	每延米成孔综合单价/元
1	XR580	32.0	26.0	350.0	1165.01
2	XR450	28.0	22.0	350.0	969.35
3	XR420	25.0	20.0	350.0	1412.50
4	XR580	32.0	26.0	350.0	1298.75
5	XR450	28.0	22.0	350.0	1303.86
6	XR420	25.0	20.0	350.0	1792.94
7	XR580	32.0	26.0	350.0	1482.79
8	XR450	28.0	22.0	350.0	1507.26
9	XR420	25.0	20.0	350.0	2087.40

综上所述,针对2 m直径硬质岩抗滑桩成孔采用“XR450型截齿筒钻旋挖+最优切削直径差0.4 m”分级扩孔一体化成孔技术在硬质岩地层中钻进效率最高、钻具损耗最低、成本最低,验证了硬质岩抗滑桩高效旋挖分级扩孔技术的可行性和高效性。对比现有人工成孔、冲击钻成孔、旋挖一次成孔等工艺,从安全、效率、成本等方面均得到了极大提升。

5 硬质岩深大抗滑桩成孔解决方案

通过本次试桩试验及他人研究成果总结分析,

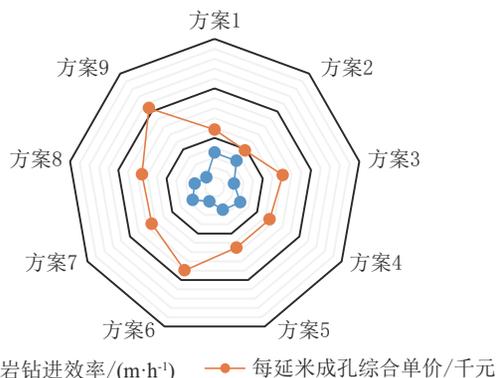


图9 不同工法硬质岩成孔成本及效率对比

Fig.9 Comparison of drilling cost and efficiency for hard rock using different construction methods

在考虑桩孔直径、钻进效率以及经济成本基础上提出了适用于坚硬岩地层(单轴饱和抗压强度 >60 MPa)的深大抗滑桩成孔综合解决方案(详见表6)。抗滑桩工程中经常使用的圆形抗滑桩桩径一般在2.5 m以内,如遇桩径 >2.5 m的圆形抗滑桩建议采用小直径截齿筒钻梅花形取心并辅以切削修壁成孔。

6 讨论

本次现场试验完成了9组试桩试验,并从钻进效率、钻具损耗以及钻进成本等方面进行了综合分析,论证了2.0 m直径硬质岩抗滑桩成孔采用“XR450型截齿筒钻旋挖+扩孔切削直径差0.4 m”分级扩孔一体化成孔技术在硬质岩地层中钻进效率较高、钻具损耗较低、成本最低,验证了硬质岩抗滑桩高效旋挖分级扩孔技术的可行性和高效性。

表6 常用桩径推荐钻进方案

Table 6 Recommended drilling plan for common piling diameters

常用桩径/m	钻进工法	钻机型号选择	钻头选择
1.2	Ø1.2 m截齿筒钻一次取心直接成孔	XR420(首选)或XR450	截齿筒钻
1.5	Ø1.2 m截齿筒钻一次取心,一次扩孔,扩孔直径差0.3 m	XR450	截齿筒钻
2.0	Ø1.2 m截齿筒钻一次取心,两次扩孔,扩孔直径差0.4 m	XR450	截齿筒钻
2.5	Ø1.2 m截齿筒钻一次取心,三次扩孔,扩孔直径差0.4~0.5 m	XR450	截齿筒钻或牙轮钻

但仍然有诸多不足,一是受依托工程限制,没能对比2.5 m直径和3.0 m直径抗滑桩钻进效率,因此对2.5 m以及3.0 m等超大直径桩成孔方案给出的建议结合了他人研究及测试成果,仍需进一步验证。二是受现场工期要求,没能对每个方案开展多组试验,从而取平均值,但现场地形及下伏地层差异较小,单组试验结果可信度较高。综上,本次试验及分析仍有不足之处,但现有试验及分析成果基本能够为硬质岩深大抗滑桩成孔提供参考。

7 结论

本次研究选取川西南典型复杂山区硬质滑坡抗滑桩成孔为研究对象,系统分析了硬质岩抗滑桩成孔各种工法优缺点,开展了9种组合旋挖成孔工艺试验,从钻进效率、钻具损耗、成本以及功效等多方面进行了综合分析,得出以下结论:

(1)针对复杂地质条件硬质岩深大抗滑桩成孔首选旋挖钻成孔,该方案对震敏型、水敏型以及周边环境复杂型滑坡尤为适用。

(2)综合分析试桩试验,对于2 m直径硬质岩抗滑桩成孔,采用“XR450型截齿筒钻旋挖+切削直径差0.4 m两级扩孔”一体化成孔技术掘进效率最高,达0.7 m/h,钻具损耗较低、成本最低,较改进前旋挖一次成孔效率提升3倍,成本降低了60%,验证了硬质岩抗滑桩高效旋挖最优切削直径分级扩孔技术的可行性和高效性。

(3)提出了复杂地质条件下硬质岩深大抗滑桩成孔解决方案,即上部架空型地层采用“旋挖取心+人工清边+钢筋混凝土护壁”工法,当钻进至坚硬基岩后采用“截齿筒钻旋挖+最优扩孔直径差分级扩孔”组合工法,在经济合理的基础上,能够较大程度提高钻进效率。

参考文献(References):

- [1] 牛万保. 旋挖钻机破岩的力学分析及机理研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
NIU Wanbao. Mechanical analysis and mechanism research on rock breaking of rotary drilling rig[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [2] Sakiz U, Aydın H, Yaralı O. 旋转钻机基岩钻进性能研究[J]. 工程地质与环境通报,2022,81:1-18.
Sakiz U, Aydın H, Yaralı O. Investigation of the rock drilling performance of rotary core drilling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022,81:1-18.
- [3] Larisch M D. 不同硬岩钻孔灌注桩钻探方法的比较[C]//第16届澳大利亚岩土力学研讨会.2012.
Larisch M D. Comparison of different hard rock drilling methods for bored piles[C]//16th Australian Geomechanics Symposium. 2012.
- [4] 张兴贵,黄柳云,王洋,等. 岩溶地区嵌岩桩基测试方法[J]. 应用力学与材料,2011,55:105-108.
ZHANG Xinggui, HUANG Liuyun, WANG Yang, et al. Testing methods for rock-embedded foundation pile in karst area[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011,55:105-108.
- [5] Van Hung N, Gerbaud L, Souchal R,等. 旋挖冲击钻在坚硬岩中钻进速率预测[J]. 科学技术杂志,2016,54(1):133-149.
Van Hung N, Gerbaud L, Souchal R, et al. Penetration rate prediction for percussive drilling with rotary in very hard rock[J]. Journal of Science and Technology, 2016,54(1):133-149.
- [6] 赵伏军,李夕兵,冯涛,等. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005(8):1315-1320.
ZHAO Fujun, LI Xibing, FENG Tao, et al. Theoretical analysis and experimental study on rock breaking under the coupling action of dynamic and static loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(8):1315-1320.
- [7] 刘先珊,牛万保,许明. 旋挖钻机截齿的破岩机理及优化研究[J]. 重庆大学学报,2023,46(9):52-65.
LIU Xianshan, NIU Wanbao, XU Ming. Study on rock breaking mechanism and optimization of cutter teeth of rotary drilling rig[J]. Journal of Chongqing University, 2023,46(9):52-65.
- [8] 王世东. 连徐高铁硬岩地层钻孔桩施工技术[J]. 上海铁道科技,2018(3):98-99.
WANG Shidong. Construction technology of drilled piles in hard rock strata of Lianyungang-Xuzhou high-speed railway[J]. Shanghai Railway Technology, 2018(3):98-99.
- [9] 韩晓宇. 桥梁桩基旋挖钻成孔全护筒跟进技术研究[J]. 交通科技与管理,2024,5(1):80-82.
HAN Xiaoyu. Research on follow-up technology of full casing

- drilling for bridge pile foundation[J]. Transportation Science and Management, 2024, 5(1):80-82.
- [10] 蔡明祥,魏理,黄诗颖.旋挖成孔灌注桩在桥梁桩基础中的应用[J].人民长江,2016,47(18):80-83,95.
CAI Mingxiang, WEI Li, HUANG Shiyong. Application of rotary drilled piles in bridge foundations[J]. People's Yangtze River, 2016, 47(18):80-83, 95.
- [11] 齐栓,董红姑,沈泽强.硬岩地质大直径抗滑桩旋挖钻机成孔施工技术[J].建筑机械化,2023,44(10):42-45.
QI Shuan, DONG Honggu, SHEN Zeqiang. Bored piling construction technology of large diameter anti-sliding piles in hard rock geology using rotary drilling rig[J]. Construction Mechanization, 2023, 44(10):42-45.
- [12] 王瑞利,李菲.硬岩高性能旋挖机齿的工艺试验研究[J].现代制造技术与装备,2015(3):38-40.
WANG Ruili, LI Fei. Process experimental study on high-performance rotary drilling machine teeth for hard rock[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2015(3):38-40.
- [13] 何正勇,李应平.潜孔锤-旋挖组合钻进技术在硬岩桩基工程中的应用[J].钻探工程,2021,48(12):114-119.
HE Zhengyong, LI Yingping. Combination of the DTH hammer with rotary drilling in hard rock pile foundation [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12):114-119.
- [14] 许谷星,孙言.超大直径超深嵌岩旋挖分级成孔技术[J].山西建筑,2022,48(22):78-80.
XU Guxing, SUN Yan. Graded drilling technology for ultra-large diameter and ultra-deep rock-embedded rotary drilling[J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(22):78-80.
- [15] 刘彪.大直径灌注桩硬岩旋挖导向分级扩孔施工技术[J].科技和产业,2022,22(8):336-343.
LIU Biao. Construction technology of large diameter cast-in-place pile hard rock rotary drilling guided graded enlargement[J]. Science and Technology and Industry, 2022, 22(8):336-343.
- [16] 王广杰,朱成斌.谈在上覆玄武岩地层中桩基成孔的施工方法[J].山西建筑,2015,41(10):80-82.
WANG Guangjie, ZHU Chengbin. Discussion on the construction method of pile foundation drilling in overlying basalt strata [J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(10):80-82.
- [17] 黄思凯,李德昆.旋挖钻机在舟山新城大桥海上深孔坚硬地层中的应用[J].上海建设科技,2020(2):76-77.
HUANG Sikai, LI Dekun. Application of rotary drilling rig in deep and hard strata of Zhoushan Xincheng Bridge in the Sea[J]. Shanghai Construction Science and Technology, 2020(2):76-77.
- [18] 叶以挺,蒋红星,潘江波.旋挖钻机在之江大桥深埋硬质岩层中的应用[J].公路,2012(3):34-37.
YE Yiting, JIANG Hongxing, PAN Jiangbo. The application of rotary drilling rig in deep hard rock for Zhijiang Bridge [J]. Highway, 2012(3):34-37.
- [19] 陈永华.坚硬岩层斜岩地质条件下超大直径桩基成孔施工技术研究与应用[J].交通世界,2017(24):58-59.
CHEN Yonghua. Research and application of construction technology for drilling ultra-large diameter pile foundations in hard rock strata with inclined rock geological conditions [J]. Transport World, 2017(24):58-59.
- [20] 高文.旋挖钻硬岩成孔工效分析[J].建材与装饰,2018(13):241-242.
GAO Wen. Efficiency analysis of hard rock drilling with rotary drilling rig [J]. Building Materials and Decoration, 2018(13):241-242.
- [21] 张建杰,李海明.京津冀协同发展区地应力监测孔钻探施工技术[J].钻探工程,2022,49(6):48-53.
ZHANG Jianjie, LI Haiming. Drilling technology for geostress monitoring holes in Beijing-Tianjin-Hebei Collaborative Development Region [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):48-53.
- [22] 张建杰,李海明,刘春生,等.地应力监测孔钻进效率统计与分析研究[J].钻探工程,2024,51(1):120-125.
ZHANG Jianjie, LI Haiming, LIU Chunsheng, et al. Statistics and analysis of drilling efficiency of geostress monitoring holes [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1):120-125.

(编辑 王文)