

地质工程勘查中的钻探技术应用

赵晓杰

广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院有限责任公司 广西 南宁 530023

摘要: 钻探技术是地质勘查核心手段,能直接揭露地层、获取岩土参数,弥补物探多解性。文章阐述了地质勘查及回转、绳索取芯、冲击、定向钻探的适用地层与应用效果,分析了取芯率低、设备老旧、生态破坏、人员素养不足等问题,提出工艺优化、绿色施工、质量管控对策,并预判智能化、微创化、多技术融合的发展方向,以提升勘查质量与效益。

关键词: 地质工程勘查; 钻探技术; 应用

引言: 地质工程勘查是基建工程设计、施工和地质灾害防治的前置工作。钻探技术作为探明深部地层的关键手段,其数据直接关系到工程稳不稳。现在山地边坡、岩溶地层、深部岩层这类复杂施工场地越来越多,老一套勘查技术已经满足不了高精度的要求。为了适应各种勘查工况,结合工程实例,把主流钻探技术的应用要点理一理,分析现场施工的痛点,再优化一下施工方案,给各类场地的地质勘查施工提供一些实操参考。

1 地质工程勘查与钻探技术基础概述

1.1 地质工程勘查核心内涵与工作要求

(1) 地质工程勘查,就是为工程建设提供基础地质依据的系统性技术工作。核心是把场地的岩土类型、地质结构、水文条件以及不良地质现象查清楚,评估一下工程建在这里合不合适、稳不稳。(2) 工程勘查施工得按《岩土工程勘察规范》(GB50021)等标准来,坚持“先勘查后设计、分阶段实施、经济合理”的原则,保证钻孔布置、取样间距和测试方法都符合规程要求。(3) 现代工程勘查对施工精度要求高了,孔位偏差要控制在毫米级,原位测试数据要能实时采集。同时作业安全也要重视,钻机稳定性得验算,泥浆循环要防喷,复杂地层还要防塌孔。

1.2 钻探技术基本原理与核心功能

(1) 地质钻探靠钻机带动钻具旋转或冲击,把岩土体打碎形成钻孔,再靠循环介质把岩屑带出来或者提取岩心,这样就能把地下的情况看明白。(2) 钻探技术在勘查中承担着直接揭露地下介质、验证物探异常、获取力学参数试样的作用,是连接地表调查和深部探测的关键一环。(3) 钻探拿到的原状岩心、扰动岩屑以及孔内原位测试数据,能比较准地判断地层年代、岩土强度、

渗透性和含水性,为工程设计和灾害防治提供不可替代的基础资料。

1.3 地质钻探技术分类及适用场景划分

(1) 常规回转式钻探分硬质合金钻进和金刚石钻进。硬质合金钻进适合黏土、泥岩这些软到中硬的岩层;金刚石钻进则用在花岗岩、石英岩这类坚硬破碎的地层。(2) 冲击钻探靠重锤反复冲击来破碎岩石,适合卵石层、漂石层这些回转钻进效率不高的地方。复合钻探(冲击-回转)把两种方式的优点结合到一起,能对付软硬交替的地层。(3) 特种钻探包括空气反循环钻探、定向钻探和绳索取心钻探,分别用在干旱缺水地区、陡倾地层以及深孔高精度取心等复杂地质条件下^[1]。

1.4 钻探技术与传统勘查技术优劣对比

(1) 原位测试(比如标准贯入试验)受扰动和深度限制,物探勘查(像电法、地震波)有多解性,分辨率也不够,很难直接拿到真实的岩心样本。(2) 钻探技术能直接取出地层的实物样本,数据精度能到毫米级,穿透能力可以达数百米甚至上千米,对覆盖层、基岩以及断层破碎带都能可靠地揭示出来。(3) 钻探技术特别适合大型工程(比如水利水电、高速铁路、深基坑),可以结合多孔联测、孔内电视和抽水试验,搭出三维地质模型。它的直观性和验证性是其他方法没法替代的。

2 主流钻探技术在地质工程勘查中的实际应用

2.1 回转钻探技术在岩土勘查工程中的应用

(1) 回转钻探设备配置以液压驱动回转钻机(比如XY系列、GY系列)为主,再配上钻杆、硬质合金或金刚石钻头、泥浆泵以及循环系统。标准施工流程大致是:场地平整→孔位放样→钻机就位并校水平→开孔

(先慢速钻2到3米)→正常钻进(控制好压力和转速)→取心或做标准贯入试验→记下钻进参数→终孔后封填。整个过程得按《岩土工程勘察规范》(GB50021)来,对回次进尺、岩心采取率、原位测试间距都有明确要求^[2]。(2)软土层(比如淤泥、粉质黏土)取样的时候,用回转钻机配上薄壁取土器(面积比小于10%),快速静压或者低速回转提取原状土样,取出来后马上蜡封,防止水分跑掉。砂卵石地层则需要用植物胶护壁或者双管单动岩心管,减少扰动、提高采取率,保证颗粒分析和承载力参数可靠。(3)某住宅小区场地勘察中,布了XY-100型回转钻机勘探孔28个,最大孔深38米,揭露出杂填土、淤泥质土、粉细砂以及强风化泥岩这三层结构。通过标准贯入试验确定了各层的承载力特征值,给筏板基础设计和桩基持力层选择提供了直接数据,后期沉降观测跟勘察结论对得上,吻合度不错。

2.2 绳索取芯钻探技术深部地质勘查应用

(1)绳索取芯钻探的核心是“不提钻取心”。用的是双壁钻杆和内岩心管总成,钻到回次进尺(一般1.5到3.0米)后,扔下打捞器,靠钢丝绳把内管总成提到孔外取心,取完再投回去继续钻。工艺上要注意控制好钻压(8~15kN)、转速(300~600r/min)以及泥浆性能(失水量 $\leq 5\text{ml}/30\text{min}$,含砂量 $< 0.5\%$),还要定期检查卡簧座和内管的间隙,保证岩心能顺利折断。(2)在深部岩层(埋深超过300米)以及坚硬完整基岩(比如花岗岩、石英砂岩、大理岩)里,绳索取芯技术的岩心采取率普遍能达到95%到98%。岩心直径比较大(通常 $\Phi 47\sim\Phi 76\text{mm}$),结构面、裂隙充填物、蚀变痕迹都看得清清楚楚,能为岩体质量分级(算RQD值)和地质构造分析提供高质量的实物依据^[3]。(3)某铅锌矿山深部勘探,用 $\Phi 76\text{mm}$ 绳索取芯钻到920米,取出的矿芯连续完整,把矿体边界和夹石层位确定得很准。另一个公路隧道工程的深孔勘察(孔深410米),成功揭露出了断层角砾岩和高压涌水段,岩心编录显示断层带宽度达到12.5米,给隧道支护参数的确定和超前预报方案的制定帮了大忙。

2.3 冲击钻探技术复杂浅表地层勘查应用

(1)冲击钻探用的是钢丝绳冲击式钻机(比如CZ系列)。工作原理是:曲柄连杆机构把钻头提起来0.5到1.0米,然后让它自由落下去,靠冲击动能把岩石打碎;每次冲击完转一个角度,形成圆形钻孔,泥浆或清水正循环排渣,套管跟着下去护壁。设备冲击频率30到50次/分钟,钻头质量500到2000公斤,特别适合大粒径卵石、漂石以及建筑垃圾回填区这些回转钻进效率低的地

层。(2)在破碎岩层(强风化砂岩、碎裂状灰岩、断层角砾岩)和风化岩土层里,冲击钻探不用靠泥浆护壁,靠套管及时跟下去就能防止塌孔、埋钻。取出来的岩屑虽然碎了,但层序还能看清楚,能有效划分全风化、强风化、中风化这些界面,查明破碎带的厚度和充填物性质。(3)某崩塌堆积体边坡勘察中,用CZ-22冲击钻机布了6个勘探孔,最大孔深18米,揭露出块石含量约65%的混杂堆积层,确定了滑面埋深6到9米,给抗滑桩设计提供了依据。另一个城市地质灾害普查项目里,用冲击钻探查明了危岩体下方的崩积层厚度和基岩面形态,再结合孔内波速测试,有效支撑了边坡稳定性评价和防治工程选型。

2.4 定向钻探技术专项地质工程勘查应用

(1)受控定向钻探的核心原理是:用弯外管或弯接头螺杆马达当导向钻具,配上随钻测斜仪(比如电子单点、无线随钻测斜仪),实时盯着顶角、方位角和工具面向角。通过调整弯角方向、钻压和转速,让钻孔沿着事先定好的轨迹走,实现绕障、纠偏、多分支钻进这些定向功能。(2)地下管线勘查中,定向钻探可以从小角度开孔,沿着管线轴线布近水平或缓斜孔,精准查清管道顶部的埋深、防腐层有没有破损以及周围有没有空洞,避免大面积开挖。在岩溶隐蔽区,从单一场地向多个方向分支钻进,高效摸清溶洞群的规模、形态和充填特征。比如某岩溶区高层建筑勘查中,定向分支孔成功发现了三个连通的溶洞,最大洞高4.2米^[4]。(3)大型滑坡治理工程里,布设主孔穿过滑带进入稳定基岩6米,预埋测斜管和渗压计,实现对滑体位移和地下水位的长期自动化监测,为稳定性评价以及加固效果检验提供连续数据。另一个地下溶洞专项勘查中,布了3个主孔、9个分支孔,完整查清了溶洞群的顶板厚度、充填物性质以及连通关系,据此优化了注浆孔的布置,节省勘探成本约35%,注浆后的抽水试验也验证了封堵效果不错。

3 地质工程勘查中钻探技术应用现存问题、优化策略与发展趋势

3.1 地质工程勘查钻探施工现存实操问题

(1)复杂岩溶、破碎地层里,钻探取芯率普遍偏低。岩溶发育区经常掉块、漏浆、卡钻,破碎带的岩心容易被冲走或机械打碎,采取率常常不到60%,严重影响地层判断。(2)老旧钻探设备(比如早期机械式回转钻机)能耗高、效率低,有的钻进速度只有新型液压钻机的50%到70%,还老是出故障,辅助时间增加,拖慢了施工进度。(3)野外勘查钻探施工会产生泥浆、岩屑,还要开挖地表,容易破坏植被、污染水

土。尤其在水源保护区或生态敏感区，泥浆没处理就直接排，很容易引发环保纠纷。（4）一线施工人员的专业技术水平参差不齐，有的操作员对复杂地层判断不准、取心工具用得不对，造成钻孔偏斜、岩心堵塞，数据可靠性受影响。

3.2 钻探技术现场施工优化改进策略

（1）根据地层特点来适配钻探工艺和钻头。破碎地层用绳索取芯加植物胶护壁，卵石层换冲击钻头或复合片钻头，硬岩里优选金刚石钻头，再合理调好钻压和转速，单孔效率能提上来 20% 到 30%。（2）优化钻探泥浆的配比。水敏性地层里加点防塌剂（比如腐植酸钾），漏失地层用随钻堵漏材料，把泥浆失水量控制在 8ml/30min 以内，粘度适当提高，这样能有效提升岩芯的完整性和孔壁的稳定性^[5]。（3）把施工管控体系落到实处。建立钻孔质量的三级验收制度（机台自检、项目组复检、监理终检），把班报表、岩心牌、取样记录都规范好，让野外钻探作业流程标准化，减少人为误差。

3.3 绿色低碳钻探施工整改与环保优化方案

（1）无害化钻探泥浆循环回收利用技术落地。配上泥浆净化装置（振动筛、除砂器、离心机），把泥浆里的固相含量降到 5% 以下，重复利用率能到 80% 以上。废弃泥浆做破胶絮凝—固化处理，达标后覆土复绿。（2）小型模块化钻探设备（比如轻便背包钻机、履带式模块钻机）单件重量能拆到 50 公斤以内，不用专门修施工便道，对地表生态的扰动减少六成以上，适合山地、林区和水源地勘查。（3）工程勘查完工后，把钻探点位的生态恢复好。清除现场的水泥平台和残留物，回填原状土，再撒上草籽。泥浆坑做土壤修复和植被恢复，保证一年内植被覆盖率不低于周边的原始水平。

3.4 新时期地质钻探技术未来发展趋势

（1）智能化、自动化无人钻探设备正在研发应用。

集成了智能控制、自动钻进参数优化和远程运维系统，能实现“一键钻进”、岩心自动编码、实时数据上传。已经在深部矿山和核废料处置库勘查中试点，能减少人工干预七成以上。（2）微型微创钻探技术在城市密集工程勘查中推广得越来越快。用直径 25 到 50 毫米的微钻配上导向系统，在狭窄街道、建筑周边就能低扰动、高精度取样，对地下管线零损伤，大大压缩了施工面积和扰民时间。（3）多技术融合，钻探加物探一体化勘查技术也在发展。钻进过程中集成随钻测井（自然伽马、电阻率）、孔内电视和声波测试，实现“一孔多用”。用钻探验证物探异常，物探引导钻探定位，形成立体勘查模式，明显提升了对隐伏构造和地质灾害体的识别能力。

结束语

不同钻探技术适配浅表复杂地层、深部岩层、专项勘查等场景，实用性与精度优势明显，支撑了工程设计与灾害治理。当前钻探施工在工艺、设备、环保上仍有短板，通过优化钻头选型、改良泥浆、落实绿色施工、完善质控体系，可有效整改。未来需结合工程需求，推进智能钻探、钻物探一体化，平衡效率、精度与生态保护，推动地质勘查行业高质量发展。

参考文献

- [1] 王勇军. 天阳盆地高温硬岩地热钻探 PDC 钻头的研究应用 [J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 125-131.
- [2] 潘德元. 绳索取心满眼管柱的力学模型优化与应用 [J]. 力学与实践, 2023, 45(3): 585-591.
- [3] 李战锋. 阳山矿区严重漏失垮塌地层钻进工艺及工程实践 [J]. 地质装备, 2024, 25(2): 62-65.
- [4] 孙跃. 基于绿色勘查理念的浅层地质钻探技术优化应用 [J]. 中国矿业, 2024, 33(9): 112-117.
- [5] 甘超. 深部地质钻探钻进过程流式大数据分析 with 动态预处理 [J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 71-75.