

# Research on the Construction Technology of Deep Fissure Rock Consolidation Grouting in Water Conservancy and Hydropower Engineering

Shisheng Li

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

## Abstract

Deep fissured rock masses are commonly found in high dams, large reservoirs, and underground cavern projects. Due to the combined effects of excavation unloading, tectonic actions, and groundwater pressure, the permeability and deformation characteristics of these rock masses often exhibit strong heterogeneity. Consolidation grouting, which delivers grout into the fracture network under controlled pressure to improve connectivity and enhance integrity, is a common method for dam foundation and surrounding rock reinforcement. In light of this, this paper, based on literature review and practical experience, summarizes key construction control points applicable to deep fissured rock masses, focusing on aspects such as borehole layout, flushing with pressurized water, staged grouting, treatment of special fractures, and inspection and sealing of holes, in accordance with the common lithology and fissure development conditions in China's water conservancy and hydropower projects.

## Keywords

hydraulic and hydroelectric engineering; deep fracture rock mass; consolidation grouting; construction; importance; process

## 水利水电工程中深部裂隙岩体固结灌浆施工工艺研究

李世胜

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川·成都 610213

## 摘要

深部裂隙岩体在高坝大库和地下洞室工程中普遍存在,受开挖卸荷、构造作用与地下水压力叠加影响,岩体渗透性与变形特征常呈强非均质。固结灌浆通过可控压力将浆液送入裂隙网络,改善连通性并提高整体性,是坝基与围岩加固的常用手段。有鉴于此,本文结合相关文献资料查阅以及自身实践情况下,基于中国水利水电工程常见岩性与裂隙发育条件,围绕钻孔布置、冲洗压水、分段注浆、特殊裂隙处置和检验封孔等环节,总结适用于深部裂隙岩体的施工控制要点。

## 关键词

水利水电工程;深部裂隙岩体;固结灌浆;施工;重要性;工艺

## 1 引言

中国西部峡谷区与寒区河谷多采用高坝深基坑和大规模地下洞室,坝基与围岩常见断层破碎带、节理密集带及卸荷裂隙。深部裂隙一旦形成贯通渗流通道,将影响抗渗与承载性能,并加剧开挖后变形。水利水电工程施工中,固结灌浆是一种较为常见的施工方法。固结灌浆可以有效改善岩层节理裂隙发育或岩体破碎的状况,提高岩石的物理力学性能及整体性、均质性,同时提高岩体的弹性模量与抗压强度,减少岩体的变形与不均匀沉陷,提高施工安全性<sup>[1]</sup>。同时固结灌浆需要在复杂地质与紧张工期条件下实现均匀加固与

可检验效果。本文从施工组织与工艺控制角度,对深部裂隙岩体固结灌浆的关键环节进行梳理。

## 2 水利水电工程中深部裂隙岩体固结灌浆施工重要性

深部裂隙岩体的固结灌浆之所以在中国水利水电工程中被反复强调,首先是因为高水头作用下坝基渗流具有找通道特性,断层与节理一旦被激活,渗压会沿裂隙网络迅速传递,导致局部扬压力增大并削弱基岩抗剪能力。其次,深基坑开挖和爆破扰动会引起松弛带向深部扩展,裂隙张开度增加,若不及时固结处理,后续混凝土浇筑完成后仍可能出现渗漏点迁移与坝段差异变形。以乌东德等特高拱坝为例,研究指出坝基开挖松弛会使无盖重固结灌浆面临压力受限与效果波动问题,因此提出以表层裂隙预处理、浅层孔网加密、深部适度升压和减少引管为主的组织思路,以适应深

【作者简介】李世胜(1984-),男,中国河南商丘人,本科,高级工程师,从事水利水电施工及施工管理研究。

部裂隙的空间差异。再次,丰满重建工程在断裂构造较发育的条件下采用梅花形孔网、先固结后帷幕的顺序,并在压重厚度满足要求后再实施固结灌浆,反映出深部裂隙处理与结构施工工序强相关<sup>[2]</sup>。最后,近期工程案例中钻孔深度常达到30 m至80 m,材料与工艺需兼顾不同渗透性区段,施工质量主要依赖钻孔、灌浆过程与封孔等环节的系统控制。因此,对深部裂隙岩体开展固结灌浆既是满足设计抗渗与承载指标的需要,也是降低后期补灌频次与运行维护成本的现实选择之一。

### 3 水利水电工程中深部裂隙岩体固结灌浆施工工艺

#### 3.1 孔网布置与钻孔成孔控制

为保证深部裂隙岩体固结灌浆的可控性,孔网布置与成孔质量需在施工组织、钻进方式、孔斜控制与孔口系统四个环节形成闭环管理。第一,按坝段或洞段分区放样,采用梅花形或方格形孔网,孔距与排距依据设计及现场试验确定,并实行分序加密,先成I序孔再补II、III序孔,同步编制孔序图与作业面走向。孔位坐标用统一控制网复核,放样桩号、标高与偏移量随孔编号归档,并与钢筋、埋件及冷却管线交叉校核,允许微移范围提前报审并在图上标注,孔口周边预留钻机平台并设置孔口保护<sup>[3]</sup>。第二,钻孔宜用金刚石或硬质合金钻具,进尺、转速与冲洗液量随岩性调整,冲洗以清水或稀浆为主并保持稳定返水。遇破碎带或软弱夹层时采用短进尺、勤扫孔和分段套管跟进,返渣异常应停钻复查,必要时先稳孔再扩孔,防止塌孔与缩径,并按规范完成清孔、验孔与孔径抽检,停钻时封闭孔口防落物。第三,深孔应将孔斜控制列为关键工序,钻机就位后两次定向校核并固定底座,钻进中按规定深度测斜,记录方位、倾角与孔深曲线,测斜结果当天汇总并对超限孔及时处置。偏差接近限值时通过调整推进力、扶正器或短段回退纠偏,纠偏无效则补孔并注明替代关系。孔内掉块、卡钻或障碍应先刮孔、扩孔后再复测孔径,保证止浆塞与灌段长度匹配。第四,孔口管、套管脚及孔口止浆装置应一次安装到位并做分级耐压试验,孔口渗漏先用快硬浆或止浆材料封堵后再转入正式灌注。每孔建立编号、孔深、岩性、见水与异常处置台账,交接时核对孔序、分段长度与止浆位置。

#### 3.2 裂隙冲洗与压水试验分段

进入固结灌浆前,现场应以裂隙冲洗与压水试验对孔段可进浆性进行分段判别,避免盲目灌注的漏灌与串段。第一,洗孔宜用压力水法自孔底反冲,钻具下到孔底后以较大流量连续冲洗,冲洗压力一般取拟用灌浆压力的约80%且不宜超过1 MPa,回水由浑转清且肉眼无岩粉后再维持一段时间,孔口无回水时仍按最低冲洗时长执行,并记录返水颜色、夹砂量及流量压力突变点,必要时短暫停泵复冲带出沉积物。第二,试段隔离宜采用单栓塞自上而下分段推进,孔

壁破碎或需复核异常段时改用双栓塞夹持成短段,栓塞位置应选在较完整岩段并预留锚固长度,充水或充气压力须高于试段最大试验压力,孔口与接头检漏止水,试验中严禁跨段连通与漏压。第三,压力加载宜按三级压力五个阶段分级升压与稳压读数,试验压力随埋深、地下水位及围岩条件调整,压力计算零线按压力表中心标高与水位换算确定,并修正管路压力损失,试验前核对压力表回零、流量计量程与阀门灵活性,稳压后按2 min至5 min间隔连续读数,满足多次读数差值控制后取稳定流量。第四,成果宜以透水率或渗透系数表达,并以Lugeon值等指标进行孔段对比,技术负责人结合压力流量曲线形态与孔内涌水判别连通性,高透水段先安排试灌并局部加密孔距,低透水段则缩短段长并采用稳压小流量推进,原始读数、计算表与试段示意随孔号归档。

#### 3.3 分段分级灌浆与浆液变换控制

深部裂隙岩体固结灌浆为保证孔段充填均匀,应将分段注入、分级升压与浆液变换统一到一套记录与判据中实施。第一,施工应依据孔深、裂隙发育与破碎分带确定段长与分段方式,破碎带、剪切带及强卸荷段宜缩短段长并优先采用自下而上分段,完整岩段可适当加长,段长以栓塞可靠坐封、回浆可观测且便于异常处置为准,避免段长过大导致串段和吸浆失真。每段开灌前必须复核栓塞定位与坐封压差,试通回浆与排气通道,孔口及止浆塞周边用速凝材料补封并留检视口,确认隔离到位后再进入升压程序。第二,灌浆压力宜在设计允许范围内分级提升,先以低压润湿孔壁并建立通道,观察注入率、返浆浓度与孔口渗漏,再按规定台阶逐级升压并控制每级稳压时间,使压力变化与注入率变化形成可判读的对应关系。出现跑浆、抬动、注入率突增或孔口冒浆时,应立即降至上一稳压级稳注,配合间歇灌浆与孔口补封,必要时先以较稠浆稳压封堵后再恢复分级升压。第三,浆液配比宜由稀到稠顺序变换,开灌采用较大水灰比以利入缝,随注入率持续下降或同压同流条件下稳定后再改浓一级,变配节点应与累计注入量或稳注时间挂钩并避免频繁来回。制浆应严格计量水泥与用水,控制搅拌时间并经筛网过滤,限制运输与停留时间,连续灌注时以泵送能力匹配制浆能力,防止水灰分离、沉淀堵管与脉动供浆<sup>[4]</sup>。第四,结束判据应以规定压力下吸浆率趋稳或达到控制指标为准,停浆前保持延续灌注并进行两次读数复核,同时核对该段总注入量、压力历程、变配节点与异常处置记录,必要时结合孔内返水与返浆性状作一致性校核,随后由旁站人员签认,以便该段参数用于后续孔序加密与质量检查。

#### 3.4 大开口裂隙与漏失段的针对性处置

针对深部固结灌浆中大开口裂隙与漏失段,处置应以先稳流、再加压、后充填为主线组织。第一,孔口或段内出现大量漏浆时,施工人员应立即停泵降压并保持栓塞密封,依据孔口返水、邻孔串浆、掌心面渗点与排水沟浑水变化判定泄漏通道,同时对外露裂隙先行清理后用快凝砂浆或快凝

水泥浆分层嵌填,必要时在孔口周边加设围堰与压盖封堵,待止浆稳定后再按原段长分段复灌,并将复灌起压点控制在前次稳定压力以下逐级恢复。第二,对涌水明显或裂隙连通性强而水泥浆易被稀释的区段,可采用先堵后灌的双液工艺,先以凝结时间可控的化学浆或掺速凝材料的水泥基浆低压短时注入形成初期止水壳,再切换为水泥浆由稀到稠充填,过程中以注入率与回浆浓度为依据调整配比,并在每次变换前进行短时稳压观察,避免未成壳即升压导致顺缝跑浆。第三,当裂隙宽大导致吸浆过快、扩散难控时,施工人员应放缓水灰比由稀到稠的变化速度,配合限流阀或节流孔板控制瞬时流量,采用少量多次与间歇灌注,使浆液在停歇期完成初凝与架桥,间歇期间宜保持微正压以防返砂堵管,同时布置邻孔或观测孔跟踪返水、孔口抬动与周边渗点,必要时对相邻孔实施低压补灌或反向封闭带,以缩小有效通道并稳定压力。第四,穿越断层泥或软弱夹层时,施工人员应降低单段压力并适当缩短段长,栓塞宜设在较完整岩段,必要时采用双栓塞隔离软弱带上下界,采用稳压慢注控制扰动,重点监测孔口回浆含砂、压力波动与地表冒浆,一旦出现回浆突浑或压力失稳应立即降压停歇并补封孔口,处置完成后按相同试段长度进行压水复测,试验压力宜不大于该段最大灌浆压力的80%。

### 3.5 封孔工序与质量检查闭环

固结灌浆结束后,封孔与质量复核需形成连续闭环,才能把已注入裂隙的浆体稳定保留到验收阶段。第一,每段停灌前先做段内回浆置换并稳压观察,确认返浆性状稳定后按规定分级泄压至零再拔管,孔段宜采用分层回填水泥砂浆或孔口止浆塞配合压力封孔,回填应随填随捣实并控制孔口封帽厚度,封孔材料与主体浆液宜保持相容,封闭后进行孔口回冒、渗漏与沉陷观测,达到初凝养护要求后方可转入下一孔序,孔口养护期间应设防护,严禁带压碰撞。第二,固结区应布置检查孔或复测孔,数量可按灌浆孔数约2%至5%设置,复测采用压水试验并保持与灌前一致的试段长度、压力级差和计算口径,试验前清孔复核深度并校验止浆器密

封,试验中记录稳压时间、流量与掉压曲线,出现异常回水、串通或波动时应分段复验并查明连通范围。第三,关键坝段、软弱带及高透区附近宜配合取芯与孔内声波等手段校核岩体均匀性,取芯重点核查裂隙充填连续、胶结密实与夹泥夹砂情况,声波指标与同岩性基准对照,发现空洞残留、充填不连续或松弛带改善不足时按分区补孔补灌并复测,补强孔的结束标准、压力上限与变配规则与原孔一致。第四,资料整理以孔号和段号为索引贯通全过程,至少包含孔位测量复核、钻孔与冲洗日志、压水记录、灌浆压力曲线、浆液变配与停灌节点、异常处置、封孔材料批次与封孔时间等,记录应按孔逐段装订,施工、监理与业主代表逐孔签认,并在当日完成复核汇总,形成孔段参数汇总表与检查结论对应表,便于追溯整改与复测<sup>[9]</sup>。

## 4 结语

综上所述,水利水电工程中深部裂隙岩体固结灌浆施工的成败,关键不在单一材料或单一参数,而在孔网与成孔质量、冲洗压水评价、分段分级注入、特殊段落处置以及封孔检查之间的闭环控制。工程实施应以压水试验与试灌结果为依据逐步校正段长、压力与配比,并保持全过程记录可核查。通过把常规工艺做细做实,才能在复杂地质与交叉作业条件下获得稳定、可验收的加固效果。

## 参考文献

- [1] 石海松,巨伟涛.无盖重固结灌浆智能施工技术[J].葛洲坝集团科技,2024(2):34-35.
- [2] 邱建雄.页岩类固结灌浆施工关键技术研究[C]//2023水利水电地基与基础工程技术创新与发展.2023.
- [3] 余江,张彦风,杨健光,等.岩溶裂隙发育区地表超前固结灌浆施工技术[J].云南水力发电,2024,40(12):70-73.
- [4] 董陇娟.隧洞浅孔充填灌浆施工方法及质量控制[J].产品可靠性报告,2025(9):75-76.
- [5] 王俊.双江口水电站右岸固结灌浆生产性试验[C]//2023水利水电地基与基础工程技术创新与发展.2023.