

Accurate Control of Grouting Volume in Consolidation Grouting Construction of Complex Karst Development Area of Hydraulic Engineering

Shisheng Li

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

Abstract

In complex karst regions, caves, fissures, and underground rivers often exhibit multi-level connectivity. Consolidation grouting frequently encounters issues such as grout consumption surges, pressure establishment difficulties, and uncontrolled leakage, leading to inaccurate injection volumes. Relying solely on cumulative volume from a single borehole or empirical upper/lower limits in engineering practice may result in localized over-injection or under-injection, complicating subsequent borehole sequence verification. This paper addresses common filling-type and cavity-type karst formations in dam foundation and cavern surrounding rock treatment for hydraulic structures. In accordance with current technical specifications for cement grouting in hydraulic engineering, it proposes actionable methods for precise grouting volume control, covering trial section identification, limited steady injection, progressive mix design, termination criteria, and closed-loop re-injection procedures.

Keywords

Hydraulic engineering; Complex karst cave development area; Consolidation grouting construction; Grouting volume; Precision control

水利工程复杂溶洞发育区固结灌浆施工的注浆量精准控制

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

复杂岩溶区溶洞、溶隙与暗河常呈多级连通, 固结灌浆往往出现吃浆突跳、压力难建、串冒难控等注入量失真问题。工程上如果仅凭单孔累计方量或经验上限下限判断, 容易造成局部过灌或漏灌, 后续孔序也难以复核。本文立足水利工程坝基与洞室围岩处理中常见的充填型与空洞型溶洞, 结合现行水工建筑物水泥灌浆施工技术规范要求, 从试段判别、限量稳注、配比递进、终止判据与复灌闭环等方面, 提出注浆量精准控制的可操作做法。

关键词

水利工程; 复杂溶洞发育区; 固结灌浆施工; 注浆量; 精准控制

1 引言

岩溶发育水利工程的地基与围岩加固中, 固结灌浆既承担提高整体性与强度的任务, 也常被用于切断局部渗流通道。然而灌浆工程属于隐蔽工程, 由于复杂溶洞裂隙发育规律的复杂性、灌浆浆液在基岩裂隙中扩散的不确定性和灌浆施工条件的影响, 往往导致注浆量和施工质量难以准确控制^[1]。部分工程在突遇大吃浆时盲目追量, 反而诱发串冒、抬动或边界外渗点。为避免浆液无效流失和加固不均, 现场需要在规范框架内建立分段可核、可比、可复验的注浆量控制方法。

【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。

2 水利工程复杂溶洞发育区固结灌浆施工概述

水利工程复杂溶洞发育区固结灌浆施工, 是指在坝基、厂房洞室、引水隧洞及其邻近影响带内, 面对岩溶作用形成的溶洞、溶槽、溶隙与充填破碎带, 通过分区布孔、分段注入与浆液递进充填等手段, 使围岩或地基岩体的裂隙与空隙得到充填和胶结, 从而提升整体性并控制渗流。与一般裂隙岩体固结灌浆不同, 复杂溶洞区空洞体量跨度大、连通通道隐蔽、地下水流动性强, 施工中易出现回浆忽有忽无、压力难建立、吃浆量突增及串冒点外移。中国工程实践通常先开展详勘与施工补勘, 结合揭露洞室、物探与钻孔见洞记录, 划分溶洞集中带、溶隙发育带与相对完整带, 并据此确定孔距、孔深与分段长度, 破碎或见洞段多采用短段控制。钻孔成孔后需按规范开展冲洗与压水试验, 以判清可灌区段并统一试验压力、管路损失修正及稳定读数准则, 减少盲目追量。

灌浆过程中多采用单栓塞或双栓塞分段,按孔序由稀到稠变换浆液,并记录压力、流量、回浆浓度与周边渗点变化。当遇到空洞型溶洞或强连通带时,施工常先进行洞口封堵、回填或设置临时止浆措施,再转入固结注入,以保证注入量用于有效充填而非外泄^[2]。

3 水利工程复杂溶洞发育区固结灌浆施工的注浆量精准控制

3.1 分区定额与试段校核

为实现复杂岩溶发育区固结灌浆的注浆量精准控制,现场应以分区定额并配合试段校核把方量约束到可追溯范围内。第一,施工单位应把见洞深度、掉钻空程、返水含砂、孔口涌水与漏失点、压水试验吸水值等作为分区判据,结合勘察揭露对溶洞规模与连通性分级,按孔段建立溶洞型与溶隙型两类定额区间,并在孔段记录卡中明确段长、起灌压力与允许累计方量,经监理签认后执行,防止同类孔段随意放大吃浆。第二,同一分区内应选取代表性孔段开展试灌,试灌以低起压稳注并限制最高浆浓为原则,连续记录单位时间吃浆、压力回落、回浆颜色与孔口返浆稳定性,必要时短停注后复压核对吸浆恢复幅度,再根据试灌曲线反算单段合理方量上限与止浆门槛,并把门槛固化为该分区的开灌、改浓与限流规则。第三,遇充填型溶洞或泥砂充填带时,计量应区分排水置换量与固结充填量,先以清水或稀浆置换至回浆基本清洁且砂量稳定下降,再按分区定额计入有效注入量,同时以透明度、含砂与压力波动三项记录固化置换结束点,避免把清孔损耗误计为成效方量。第四,分区定额应随孔序推进滚动修正,后续孔段若出现同压力下吃浆显著降低、回浆提前变稠或周边渗点减少,应先复核栓塞止水与管路损失计算,再下调控制方量并适度缩短段长,必要时把止浆门槛前移为分级止浆^[3]。同步对相邻孔段累计方量、见洞记录、漏失位置与复测吸水值进行对照,若差异无地质解释则暂停推进复核分区边界,并将调整理由、参数与影响孔段一并归档,确保定额修正可复查。

3.2 稳压起灌与限量台阶

溶洞连通段的注浆量要做到可核算,需先把压力与流量控制在可稳定重复的工作区间。第一,试段开灌先以低压小泵量试注,边注边核对孔口、管路栓塞止水,栓塞宜卡在较完整岩段并留足承压裕度,确认无渗漏后按台阶升压,升压以压力表指针摆动中值为读数并将摆动幅度控制在允许范围内。每一台阶稳压观测应不少于数分钟,待压力稳定且吸浆率变化趋缓再进入下一台阶,同时按埋深与地下水位统一压力基准线并折算管路压力损失。第二,在稳压起灌的基础上实行单段限量台阶管理,将允许注入方量分解到固定时间窗,例如每10min设一档允许量并规定最大瞬时泵量,记录按台阶编号同步填写起止时刻、压力级与累计量,并把停注时压力与回浆状态一并记载。当超过允许量仍无回浆

或压力难建立时应先降压卸荷再停注,随后排查孔口漏浆、栓塞串段、回浆管堵塞及空腔突接等原因,处理完成后按原台阶回到低泵量复压再续注。第三,对吸浆突增而压力下滑的段落采用限流稳注,优先降泵量而非盲目升压,使试段压力不超过设计上限并保持小幅波动,必要时采用间歇注入,间歇时长以压力恢复与吸浆减缓为准,停注期间不宜完全泄压,可保留孔内残压或适度回压,使浆体在洞腔内逐步沉积并初凝后再续注,续注时仍从上一稳定泵量起步,连续核对注入率与回浆性状,若出现回浆倒灌、浆液稀释或夹砂增多,应先降压稳注并补封孔口,再按台阶续注。第四,邻孔或邻段出现孔口反喷、周边冒浆、回浆中断或压力突降时,应立即降压停泵并锁定本段累计量为暂定量,沿作业面、排水点及可能露头巡查泄浆通道,必要时先封堵外泄点后再复灌,异常消除后从低压台阶复灌,补注记录注明起止量、压力级与停注时长。

3.3 浆液递进与临界配比锁定

在复杂溶洞与溶隙并存的固结灌浆中,浆液递进与临界配比锁定应围绕吃浆收敛、回浆可见与记录可核三条控制线展开。第一,开灌宜以低压稀浆先探通道,但必须把稀浆限定在明确水灰比区间内,并同时设定单段稀浆累计方量上限和连续注入时长上限,搅拌时间、过筛与计量器具校核按规范执行,孔口连续记录单位时间吃浆、压力、回浆首次出现点及其由清转浑的节点,必要时短暂停注再复压判断通道是否建立,当在规定压力级内仍大流量吃浆且回浆长期缺失时,应视为稀浆外溢或被水流携带,立即改用堵漏型配比或提高固相含量并下调流量,转配前后的注入量分列记载并在孔段卡上注明转配触发条件。第二,配比递进应按由稀到稠分级变换,每次变浓后保持稳注观察窗口,采用固定间隔读数对比变浓前后吃浆下降幅度与回浆稠度稳定性,同时核对孔口压力波动是否收敛,当变浓一级后吃浆明显收敛且回浆颜色与稠度趋稳时,即将该级作为主配比锁定连续注入,并在原始记录中标注锁定时刻、压力级、注入速率、浆液批次与累计量,锁定后仍按间隔复测吃浆与回浆变化,出现异常时及时调整而不合并记录^[4]。第三,洞内有水流或水下空洞段,应优先选用抗分散性能较好的浆体或掺合料体系,先做现场对比试验,以留存率为控制指标,按流速分级做小试确定水固比范围与留存率阈值,试验中记录回水浑浊度、浆团成形与沉积厚度,并用同批材料复配验证可泵性与不离析条件,必要时选用改性黏土等体系提升抗分散并把试验配比写入孔段卡。相关试验表明留存率受水固比与流速影响明显。第四,主配比锁定后仍保留回退程序,当升压后回浆突然中断、邻孔冒浆或渗点增强时,应先降压稳注并回退至上一等级稀浆少量润滑再进入,回退期间的注入量与时长单列,通道恢复后再回到主配比稳注。

3.4 回浆判读与周边渗点闭环

复杂溶洞发育区要把回浆变化与周边渗点的出现纳入

同一套计量校核流程,才能把注入量锁定在可控充填范围内。第一,孔口回浆宜实行分级判读与取样复核,开灌先观察回浆颜色、含砂与稀稠变化,回浆由清转浑、由稀转稠时分别记录对应时间、压力与累计注入量,并在首次见浆、回浆连续稳定、回浆显著变稠三个节点取样测比重或稠度,样品取自回浆管中段以避免沉积影响,同时核对回浆中是否夹带新鲜岩粉或气泡,以区分冲洗残留与真实充填推进,回浆管路应保持畅通并及时排气,出现间断时先查堵再升压。第二,作业面应设置固定巡查线并形成记录闭环,巡查范围覆盖洞室衬砌背后、施工缝、排水孔、变形缝及邻近钻孔孔口,巡查间隔随压力级别加密,发现渗点或冒浆后立即用油漆编号标记位置,注明浆色、稠度、冒出量级与是否夹水,并绘制简图或里程桩号定位,随后把该编号与当时注入量、压力级、段号同步写入灌浆日志,交接班需复核编号与位置一致,必要时对疑似串段点安排短时降压稳注以验证关联。第三,对已确认外逸点应先控后补,现场可采用快凝砂浆、木楔加麻丝或袋装砂浆对裂隙口与缝隙回填封堵,封堵后保持孔段卸压并留足初凝养护,复注宜从较稠浆起步并限量补注,压力控制在能维持回浆但不致扩缝的水平,补注以回浆恢复并稳定一段时间为止,复注过程中持续观察原编号渗点是否再现以及回浆是否恢复稳定,渗点复发时应停止补注并复查封堵面与裂隙走向,必要时下移栓塞或改为短段分次注入^[5]。第四,当回浆长期缺失且周边出现多点渗出时,应将该段判为连通通道未受控,立即停止追量并联动暂停相邻孔段升压,转入先控通道后充填程序,可先以少量稠浆或砂浆预堵再转常规浆液,通过缩短段长、重新选取完整岩段封塞或先对洞口外露裂隙封闭,待回浆与渗点均转入可判读状态后再恢复计量注入。

3.5 终止判据与复灌复核

为实现复杂溶洞发育区固结灌浆注浆量的精准控制,终止判据与复灌复核应形成可执行的现场闭环。第一,单段终止不只看累计方量,应在规定终压级下稳注观察,当注入率进入平台并满足阈值后停注,常按最大设计压力下注入率不大于 1L/min 且延续灌注 30min 执行,并同步核对回浆浓度趋稳、返水颜色与砂量无再变化、孔口压力平稳、周边无新增渗点及无突发压降。稳注期间每 3min 至 5min 测读一

次压力与流量,连续 4 次读数波动在允许范围内再留观察时间,必要时对可疑渗点做标记复核。第二,停注后先做段内回浆置换并缓慢卸压,置换用量单列,再封孔或转段,置换应以回浆由浑转清且无大颗粒为准,卸压后需短时观察孔口回冒与周边渗漏,原始记录要写清终止压力级、稳注起止时刻、读数点、累计注入量与处置经过,由施工负责人和监理旁站当班签认,严禁跨班补记、估算补填或合并相邻段量。第三,溶洞集中带宜设检查孔或复测孔,按灌前一致的分段压水方法、试段长度与压力级复核,检查时间可在灌后 3d 以后组织,检查孔数量不宜少于灌浆孔总数的 5%,判定以 80% 以上试段透水率不大于设计规定为控制,其余试段透水率不超过设计值的 150% 且不集中。第四,需补灌时应针对前次高吸浆或未充填段重新划定补灌区,调整段长与封塞位置,必要时缩短段长以切断串通通道,浆液由稀到稠分级变换并控制变换节奏,终止门槛宜较首灌更严,并加密周边巡视与孔口渗漏检查,补灌后再按同口径压水复测,同时将补灌段终止点与最终量单独归档。

4 结语

复杂溶洞发育区的固结灌浆,注浆量一旦脱离可核边界就会变成数字上的完成。工程控制应把分区定额、稳压限量、配比锁定、外溢闭环与终止复核串成同一套现场规则,使每一段的最终注入量都有来路与去向。施工组织还应在孔序推进中持续修正规则参数,并把异常段的处置与补灌量单列管理,以免统计口径混乱。当记录、复测与补灌能够相互印证时,注浆量才能真正做到精准可控。

参考文献

- [1] 吴跃帮,杨再涛,马红钧,等.大纵坡长斜井富水软岩地层地面高压预注浆施工方案[J].云南水力发电,2024,40(9):117-121.
- [2] 曹亚奇,李文龙,罗桂军,等.富水欠固结石回填土区袖阀管注浆技术研究[J].建筑机械化,2021(012):042.
- [3] 陈森森,高鑫荣,李晓东.隧道无砟轨道板防抬升的控制灌浆措施[C]//2023水利水地地基与基础工程技术创新与发展.2023.
- [4] 廖志煌,闫思泉,曾志全,等.基于UDEC的裂隙岩体注浆参数研究[J].江苏科技信息,2020,37(14):6.
- [5] 彭强,彭焕敏.烟台市老岚水库固结灌浆施工技术[J].地质装备,2023,24(2):35-40.