

Exploration of the Construction Technology of Consolidation Grouting for Dam Foundation of Reservoir

Siyang Li

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

Abstract

Consolidation grouting, a critical concealed procedure prior to concrete placement, enhances the integrity and uniformity of rock formations adjacent to dam foundations. However, the on-site process—combining simultaneous drilling, slurry preparation, and grouting—becomes particularly complex under unstable geological conditions. This process is intricately intertwined with excavation, reinforcement binding, cooling water pipe installation, and formwork support, where any procedural oversight may significantly compromise grouting efficacy. To address these challenges, this study proposes targeted measures to optimize consolidation grouting operations, offering actionable and reusable organizational recommendations for reservoir dam foundation consolidation grouting construction.

Keywords

reservoir dam; dam foundation treatment; consolidation grouting; construction technology

水库大坝坝基固结灌浆施工技术的探索

李思阳

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 610213

摘要

固结灌浆是混凝土浇筑前的一个重要隐蔽工程,用于提高靠近坝基岩石整体性和均匀性,但施工现场是边钻孔、边制浆、边灌浆的过程,在地质条件不稳定情况下,与开挖、钢筋绑扎、冷却水管安装以及模板支护等多项工序形成相互交织,稍有一项措施没有做好,将大大制约灌浆效果。基于此,本文围绕固结灌浆过程中存在的问题,提出可指导灌浆施工开展的针对性措施,以期水库大坝坝基固结灌浆施工提供可操作、可复用的组织建议。

关键词

水库大坝; 坝基处理; 固结灌浆; 施工技术

1 引言

在水利水电工程建设的具体过程当中,固结灌浆技术有着极其广泛的应用范围,主要应用在中国水电工程的破碎岩体综合处理方面,此种技术对于全面提升岩体整体强度,对于保障岩体完整性和渗透性有着重要的功能和作用。在此基础之上,本文主要对水利水电工程建设过程当中,大坝坝基固结灌浆施工技术进行了全方位的分析 and 探讨,旨在进一步提升该技术的应用水平,维护水利水电工程的正常运转。

2 坝基固结灌浆技术概述

灌浆施工中,用水泥浆液将各种径流孔隙、裂缝及碎带填充密实,有助于增加坝基整体强度、控制坝基固结变形以及减少渗水通道,这一过程称为坝基固结灌浆。其处理

深度一般是覆盖开挖后的松动带,且向下延伸一定厚度的基岩范围,现场多见孔深约5~15m左右,灌浆常按照孔深分段进行,每段长度约2~5m左右,使用卡塞分段灌、孔内循环灌注法,为了确保灌浆质量,可利用简易压水试验来检查孔段吸浆量,并在此前提下,通过调节灌浆压力、浆液浓度以及变浆规律等措施来调整参数,防止选用参数值与实际脱钩。值得注意的是,虽然固结灌浆和帷幕灌浆有相似作用,但两者侧重不同,如:帷幕灌浆是形成一道连续的防渗墙;而固结灌浆则是为了增强坝基邻近区的整体性、密实性与稳定性,其在承压能力以及抗渗能力方面获得显著效果^[1]。正因如此,孔网布置多为梅花形、矩形布孔,按照由稀到密、分序加密原则来确定孔距和排距。

3 水库大坝坝基固结灌浆施工难点与风险点

3.1 孔网布置精度与造孔质量控制风险

坝基固结灌浆孔网布置受到坝段分缝、廊道边界、止水构造、仓面分层以及已浇筑层压实厚度等条件限制,在现场仅能提供有限的作业面积,从而难以实现孔位“可布置空

【作者简介】李思阳(1991-),男,中国四川眉山人,本科,工程师,从事水利水电施工及经营管理研究。

间”等于孔位“可施工空间”。在此情况下，固结灌浆效果无法得到保障，风险集中在孔位、孔斜、孔口封闭三个方面，举个例子，放样孔位不准或者孔斜控制不到位，可能会造成孔间搭接不充分，进而产生盲区；而孔距过密的话又会造成孔间距太小，存在重复加固的现象；如果孔口封堵不好，施工过程中就会发生漏浆、串浆，甚至灌浆不合格情况，需要反复停灌或返工补孔，增加处理成本与返工风险。

3.2 岩体非均质与裂隙连通造成吸浆异常

坝址基岩在现场不是一块整体，而是完整块体与破碎带相间分布，有一些位置还夹有断层泥、软弱夹层，节理裂隙也多，局部还可能存在卸荷裂隙或小空洞，故不同坝段内各孔段的可灌性差别较大。就拿坝肩开灌来说，如果前期未找到高透区的方向及连通通道，那么开灌后浆液容易顺着主裂隙溢流而出，造成开仓前吸浆量骤增，压力难立，使回浆在坡脚或邻孔外冒；当碰到泥化夹层、细碎带，浆液被阻隔不易流出还可能出现“拒灌”现象，造成压力短时间内急剧上升，处理不当会使该处发生新的裂缝。

3.3 灌浆压力控制与坝基抬动、开裂风险

固结灌浆一般在坝基混凝土具有一定的压实厚度且强度达到设计值后进行，但基于一些敏感区域，像断层槽、薄覆岩段以及靠近止水区的位置，它们对压力变化反应明显，如果压力过大，会使浆液在裂隙尖端产生劈裂效应，从而造成坝基混凝土产生轻微抬动、微裂缝发展，甚至导致施工缝被顶开；如果压力过小，不仅无法将灌浆浆液压入深部，更无法克服滤失阻力及渗流水头的压力，最终造成只在表面吃浆、深层得不到浆液，从而无法达到加固效果^[2]。

3.4 孔内冲洗、压水试验与检测偏差的叠加

固结灌浆前进行孔内冲洗和裂隙冲洗，是为了清理干净孔内钻渣、泥皮，保持水路畅通，为客观判断能不能灌、好不好灌奠定基础。但这一环节在现场易出现偏差：一方面，冲洗不到位孔壁会残存泥皮，形成一层泥膜将裂隙通道堵塞，这时压水试验的透水率数据偏小，这一结论容易产生岩体致密结实的误解。再者压水试验本身也受多重因素制约，譬如说孔壁钻进造成扰动、卡塞器坐封缺乏可靠、水温影响、孔口漏失等，这些均可能造成试验数据误差，伴随压水时间过长，还会造成孔壁吸水稳定后裂隙的真正渗透情况被掩盖。

4 水库大坝坝基固结灌浆施工技术的探索

4.1 以孔位复核、孔斜校正与护孔封闭构成的造孔体系

坝基灌浆造孔质量直接影响后续灌浆的顺利实施与加固效果。为避免灌浆过程中出现漏浆、串浆及反复返工等问题，造孔阶段应做到几方面：第一，在孔位复核方面，以坝段控制线为依据开展二次放样。开孔前逐项核对孔号、孔口高程、设计孔深等信息，填写孔口检查记录并现场签认。

与此同时，孔口安装可拆护孔套筒及防护盖，以防碾压、堆料等造成孔口掉边和圆度破坏。终孔孔径应满足下管及封闭器安装要求，现场常用不小于 38 mm 孔径（以设计及施工要求为准）。第二，在孔斜控制方面，应从钻机就位开始加强过程控制。钻机就位后采用限位支架稳定机身，并使用罗盘对孔向进行校正。开孔阶段宜采取低转速、小钻压、缓慢推进的方式，配合短进尺复核，能够及时发现并纠正偏斜。进入钢筋混凝土段，可先打小导孔探明钢筋密集区及硬点位置，再扩孔至设计直径。钻进过程中应结合返水颜色、砂粒情况及出水量变化识别裂隙发育段，据此调整冲洗水量与泵压^[3]。第三，在护孔封闭方面，终孔后采用测绳复核孔深，清孔至返水清亮，并检测沉渣厚度满足要求后方可坐封。孔口坐封段修整平顺，封闭器胶圈等易损件应及时检查更换；坐封完成后先进行低压试压，确认无渗漏后再组织起灌。施工现场要设置排浆沟和集浆桶，以期把浆液统一收集到集浆桶内外运处理，并在仓面内留人行通道以便及时清理钻渣，确保作业面清洁。

4.2 分序加密与孔段短化并用的吸浆异常处置流程

针对裂隙连通强、渗透性差异大的坝基坝段，推荐使用“分序加密+短孔段注入”方法处治吸浆异常。第一，按先周边、后中间的顺序组织孔序施工，即先打 I 序孔，再打 II 序孔。具体而言，I 序孔位用梅花形沿坝脚线上下布置成一圈封闭带，遇到高透水、裂隙发育地区，将孔距、排距适当缩小，目的是让浆液充分打入附近孔，优先堵住重要的裂隙通道；之后 II 序孔钻进后及时补充灌注加密，并根据邻孔回浆、回压的情况判断薄弱部位，避免中间孔先灌导致的串通失浆、损耗加大。第二，每个孔段按 5 ~ 8m 分段进行灌浆，这种短段施工有利于及时调整。起灌先用稀浆“探路”，同时边灌边测压力和流量的变化情况，并做好每段的量测记录。尤其是某一孔段出现吸浆突增或者压力不升反降的现象，说明该段灌浆有破碎带、砂砾层存在，也有可能是贯通性裂隙导致，这时需要调整浆液的浓度与流量等参数，并将其标注为重点段进行复灌。第三，当发生外冒、串浆或者回浆量突然下降等情况时，不能慌忙加压，要先稳定状态。处理上可采用低压稳流，逐渐加大浆液浓度，以及控制好加浓速度，使主通道应被“堵满、堵住”，再恢复正常灌浆节奏，必要时采取短时停灌—复压再灌方法检测封闭情况。第四，遇泥化夹层应先用高压水枪冲混浆体，静置一段时间后，再用较小浓度浆和流量进行灌注回填作业，减轻孔口堵死的风险；断层槽区通过回浆比重、含砂情况以及回罐量判断流失情况，对于耗浆量较大的孔段，在保证量测记录完整情况下可单孔变多孔同序灌注，要求并联孔数不超过 2 孔，并核对泵量情况防止出现一个孔吃满而另一个孔空转的现象^[4]。

4.3 以阶梯升压、限流稳压与抬动监测联动的压力控制

现场做坝基固结灌浆的压力控制阀采用分级升压、限

流稳压、抬动盯控联动方式,将压力当作受控加载量,既能把浆送进裂隙又能规避坝基升腾。①起灌要坚持低压起钻,在封闭器做得牢固、回浆管畅通、压力表回零灵敏的前提下,用最低压力打开水阀,将孔段润通,并测量注浆及回浆情况是否正常。当然,升压不允许按照时间硬性推进,应观察孔内情况,一般等到流量明显降低、回浆比较均匀后再升一级,升压幅度以0.1—0.2 MPa为宜,以防冲击过大造成裂隙冲坏。压力上限要根据坝段压重厚度、混凝土龄期及断层破碎情况分区确定,特别是重要部位最好先做试验段再定值,同时要结合具体情况变化对实际值作出相应调整。实践表明:试验段的作业带可参考第一序孔,0.6—1.0 MPa;第二序孔,0.8~1.2 MPa。②稳压要靠限流:到了稳压阶段不要猛加泵压,依靠阀门微调泵压,把流量卡到合适的挡位,保持压力稳定,如果泵站压力跳动大,则需要用缓冲罐、回流等方式把起动力控制在允许范围内。当孔口窜浆或者邻孔反压时,则应该先减小泵量,适当增加浆的浓度和稳压时间,以保证通道被填满。③抬动监测跟随压力级走:面向容易“吃压”的敏感区,布设抬动观测孔(千分表或位移计)并按一定的时间节点进行数值读取。位移要与压力、流量等数值一同记录,并加以对照分析,若出现位移异常,先降压或者停灌,再查看是否有封闭器漏、回浆堵塞、邻近孔串通等情况,经确定无误后再继续。断层坝段采用卡塞分段,在封孔之后需要按照规范进行回填。

4.4 清孔与压水试验一体化的孔段校准与复灌决策

清孔与压水试验是一体化过程,为的是提高孔段校准的准确性,同时检验真实透水性,对后期配浆,终灌和复灌提供重要的判断依据,由此可见清孔和压水试验并非走过场,其重要性不言而喻。第一,按照钻渣冲洗、返水通畅,含渣明显减少后、孔底沉渣复核的清孔操作步骤,确认孔底无堆渣及死区;接下来,裂隙冲洗直至回水清澈无细泥,同时将冲洗压力设置在拟定灌浆压力值的80%(绝对值),

压冲时长控制在拟定灌浆结束回弹压力时段内(均匀分级)。第二,压水试验与分段卡塞同步进行,每段长度应一致,卡塞器下放位置固定,从起压、稳压到降压全过程连续记录,稳压时间和读数间隔不可擅自更改,每段尽可能在较短时间内做完,最大程度减小时间效应对试验结果产生的影响。如果在试验中发现有透水率极低的孔段,不能一次判定已致密,应在此情况下再次清洗孔口螺帽处,或者所有可能产生渗漏、裂隙的地方,并仔细观察孔壁周围是否存在回浆、缩径现象,查明原因后再次复试压。试验结束后还要根据试验数据作出合理判断与决策调整:一是面向压水值高、吸浆量大而且返浆浑的孔段,应加强裂隙冲洗,采用由稀到稠的水灰比逐级加压;二是压水值降低但终压不稳、返水带砂段,要加设沉砂桶,滤清回水后再做试验和灌注,以免砂粒进入泵体和卡塞密封面带来泄压。

5 结语

综上所述,提高坝基固结灌浆质量的关键并不是提高其灌浆数量,而是整个过程精细化控制与组织配合。从施工现场来看,灌浆施工普遍存在岩体非均质、灌浆压力变化等难点,为此我们以问题为导向提出了造孔精度,分序加密、短段注入,阶梯升压限流稳压,清孔压水一体化校准等可操作工艺要点,经过数据化记录和动态参数调整,实现减小跑浆串浆和抬动的风险,实现灌浆均匀性和加固效果的目的。

参考文献

- [1] 柯丽琴.水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术研究[J].建筑工程技术与设计,2025(33):160-162.
- [2] 瞿刚修,蒋伟林,聂鼎.新集水库坝基消力池固结灌浆试验研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S1):309-313.
- [3] 李良川,陆广良.团结水库除险加固工程基础固结灌浆材料比选及灌浆效果分析[J].水上安全,2025(11).
- [4] 莫敬捷.水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术分析[J].城镇建设,2025(19):247-249.