

混凝土面板堆石坝施工质量控制关键技术研究

陆振英

昌吉州水利管理总站 新疆 昌吉 831100

摘要: 本文系统探讨其施工质量控制关键技术,先概述结构特点与质量控制重要性,再从堆石料开采加工、坝体填筑碾压、接缝止水系统施工、混凝土面板浇筑四大核心环节,剖析关键技术要点、常见问题及控制措施。结合新疆阜康市四工河水库等典型工程实例,研究表明,精细化料场管理、科学的碾压试验及全过程沉降监测等举措可有效保障整体施工质量。最后,文章展望智能化、数字化技术在CFRD质量控制中的应用前景,为高坝大库建设提供理论与实践指导。

关键词: 混凝土面板堆石坝; 施工质量控制; 堆石体填筑; 接缝止水

引言

我国水利水电事业蓬勃发展,对高坝大库需求渐增。混凝土面板堆石坝(CFRD)凭借利用当地材料、造价低、施工简便、抗震好、适应地形地质强等优点,成为200米级高坝建设首选坝型之一。从早期西北口等工程,到洪家渡、三板溪,再到世界最高的水布垭及在建的双江口等超级工程,CFRD技术在中国成就斐然。特别是在新疆等西部地区,CFRD更是因其能充分利用当地丰富的砂砾石料而备受青睐,如正在建设的阜康市四工河水库工程即采用了79米高的混凝土面板砂砾石坝。但CFRD成功不易,其“堆石+面板”复合结构体系,使施工质量控制面临挑战。堆石体主体特性影响面板应力,混凝土面板若出现裂缝或接缝止水失效,会导致水库渗漏,威胁大坝安全。历史经验显示,许多工程渗漏问题源于施工阶段质量缺陷,故对CFRD施工全过程严格科学质量控制,是保障工程百年大计的根本。

1 堆石料开采、加工与质量控制

1.1 料场勘察与规划

施工前,必须对选定的料场进行详尽的地质勘探和试验工作。通过钻探、物探等手段,查明料场岩性、风化程度、节理裂隙发育情况及覆盖层厚度。关键在于评估岩石的单轴抗压强度(通常要求饱和抗压强度不低于30MPa)、软化系数(大于0.75)和坚固性。同时,需进行大规模的爆破试验,以确定最优的爆破参数(孔径、孔深、孔距、排距、装药结构等),目标是获得符合设计级配要求的块石,最大限度减少超径石(>800mm)和细颗粒(<5mm)的产生。以四工河水库为例,其初步设计阶段对库盆、C1、C2等多个砂砾石料场进行了详细勘察,最终确定主填筑料优先采用库盆和C2料场的天然砂砾石料,这不仅储量充足(C2料场储量约420万m³),且

紧密密度(2.29g/cm³)、含泥量(1.19%)及内摩擦角(41.9°)等关键指标均满足规范要求,体现了料源选择与工程地质条件紧密结合的重要性。

1.2 加工系统与级配控制

现代大型CFRD工程普遍采用集“梯段爆破、粗碎、预筛分、中细碎和成品筛分”于一体的综合加工系统。该系统能够有效调控堆石料的最终级配,满足不同分区对骨料粒径的严格要求。在这一过程中,质量控制的核心在于破碎与筛分设备的合理选型,通常选用高效、耐磨的反击式或圆锥式破碎机,并配备多层振动筛以确保各级骨料分离清晰。更为重要的是,需要建立在线监测与反馈调节机制,在成品料输送皮带上安装图像识别或激光扫描设备,实时监测各级骨料的粒径分布^[1]。一旦发现级配偏离设计包络线,例如最大粒径过大或细颗粒含量超标,系统能够立即发出指令,调整破碎机排料口间隙或更换筛网尺寸,实现动态闭环控制。此外,不同粒径的堆石料,如垫层料、过渡料、主堆石料和次堆石料,必须进行严格的分区、分层堆放,并设置醒目的标识牌。堆存场地应进行硬化处理,以防止泥土混入,尤其要保证作为面板直接支撑基础的垫层料的纯净度,杜绝任何可能影响其渗透性和承载力的杂质污染。

1.3 常见质量问题与对策

在堆石料的制备过程中,常见的质量问题主要包括超径石过多和细颗粒含量过高。超径石过多会导致填筑时产生严重的架空现象,即使经过强力碾压,也难以达到设计要求的密实度,从而在坝体内形成潜在的薄弱区域。针对这一问题,除了在源头上加强爆破试验、优化孔网参数外,还应在填筑作业面前设置格栅进行二次筛分,将超径石剔除或破碎。另一方面,过多的粉细颗粒会显著降低堆石体的整体渗透性和排水能力,在高水头

作用下极易诱发管涌等渗透破坏。为解决此问题，可以在加工系统中增设洗砂或风选设备，对细颗粒进行有效分离。同时，严格控制爆破过程中的炸药单耗，避免因过度粉碎而产生不必要的细料，是从根本上保证堆石料质量的关键所在。

2 坝体填筑与碾压质量控制

2.1 碾压试验（工艺性试验）

正式填筑前，必须进行现场碾压试验，这是确定最优施工参数的科学依据。碾压试验的内容涵盖铺料厚度、碾压遍数、加水量以及碾压机械的选择等多个方面。通过系统性地改变这些变量，可以绘制出干密度（或孔隙率）与碾压遍数的关系曲线。对于砂岩等相对较软的岩石，适当洒水（含水率约2%-5%）有助于颗粒在碾压过程中发生破碎和重组，从而提高整体密实度。四工河水库工程坝体主填料为天然砂砾石，其压实性能较好，易压实，孔隙率较小，这本身就为控制坝体沉降变形、提高运行安全可靠创造了有利条件。试验的最终目的是确定一组最优的组合参数，使得堆石体能够稳定地达到设计所要求的孔隙率（主堆石区通常为18%-22%），为后续的大规模填筑提供可靠的技术指导。

2.2 填筑过程精细化控制

一是分区分层填筑：严格按照设计断面进行分区（主堆石区、次堆石区、过渡区、垫层区）填筑，各区之间设置明显的界桩。特别要注意过渡区和垫层区的施工，它们是连接堆石体与面板的关键，必须保证级配连续、填筑密实^[2]。二是层面处理：每一填筑层在碾压前，需检查层面是否平整、有无杂物。两区交界处，应将较粗料区削坡，形成台阶状，再填筑较细料，防止粗细料分离形成集中渗流通道。三是沉降观测与反演分析：在坝体内埋设大量沉降仪和测斜仪，实时监测填筑过程中的沉降和水平位移。利用这些数据进行反演分析，可以动态评估堆石体的变形模量，预测后期沉降趋势，为面板浇筑时机的选择提供决策支持。例如，通常要求坝体填筑至一定高程后暂停一段时间（“预沉降期”），待大部分主固结沉降完成后浇筑上部面板，以减小面板的挠曲应力。

2.3 质量检测与验收

坝体填筑的质量检测与验收是确保施工成果符合设计要求的最后一道关口。常规的检测方法包括按规范要求对每一填筑层进行干密度（通常采用灌水法或核子密度仪）和级配的抽样检测。然而，随着技术的进步，智能碾压技术（IC）正逐步在大型工程中得到推广应用。该技术通过在碾压机上集成GPS定位、加速度传感器和温度传感器等设备，能够实时记录每一次碾压的轨迹、遍数、激

振力以及压实度等关键参数，并自动生成覆盖全坝区的压实质量云图。这种“无死角”的监控方式，不仅极大地提升了质量控制的客观性和效率，还实现了从传统的点式抽检向全面、连续的过程控制的根本性转变，为构建高质量的堆石坝体提供了强有力的技术保障。

3 接缝止水系统施工质量控制

3.1 止水结构形式

典型的CFRD接缝止水系统采用“三道防线”的设计理念，以形成多重保险。第一道防线位于缝顶，通常采用柔性嵌缝材料（如GB止水腻子），其主要作用是封闭缝口，防止硬物进入损伤内部止水带。第二道防线是中部的铜片或不锈钢片止水带，凭借其优异的延展性和密封性，构成了主要的防渗屏障。第三道防线则位于底部，一般采用PVC或橡胶止水带，作为辅助防线，以防万一主止水带失效时仍能提供一定的防渗能力。这种多层次的防护体系，旨在应对复杂的水力条件和巨大的结构变位。

3.2 关键施工技术与质量控制点

止水系统的施工质量控制贯穿于从工厂预制到现场安装的全过程。首先，止水带的十字、T形等复杂接头必须在专业车间内采用热压硫化或精密焊接工艺进行预制，严禁在现场进行简单的搭接处理。所有焊缝都必须经过严格的气压或真空检漏试验，确保其100%的密封性。其次，在现场安装环节，止水带的位置精度和稳固性是关键。其安装位置必须与设计图纸精确吻合，尤其是铜止水带鼻子的朝向，必须严格朝向上游，以正确引导水流。为了防止在后续的混凝土浇筑过程中发生位移、扭曲或破损，必须采用专用夹具或钢筋支架将其牢固地固定在预定位置。此外，保护措施不容忽视。在止水带附近进行钢筋绑扎、模板支立或其他交叉作业时，必须铺设木板或橡胶垫等保护层，严禁施工人员踩踏、碰撞，更要严防电焊火花灼伤止水带，任何微小的损伤都可能成为未来渗漏的源头。

3.3 常见失效模式与预防

回顾历史上的CFRD工程，多起渗漏事故的根源都指向了止水系统的失效。其主要原因包括工厂预制的止水带接头焊接质量不合格、现场安装过程中发生偏位、混凝土浇筑时被意外破坏，以及周边缝的实际变位超出了止水带材料的极限伸长率。特别是周边缝，作为面板与趾板或岸坡的连接处，承受着最大的三维变位，是止水系统中最薄弱也最关键的部位。除了标准的三道止水外，工程实践中常辅以表面柔性防护（如铺设PVC垫层、氯丁橡胶垫）和内部充填（如设置沥青井）等特殊措施，以增强其适应大变形的能力^[3]。鉴于止水系统的重要性，必

须建立起一套从原材料进场、工厂预制、运输、现场安装到隐蔽工程验收的全过程质量追溯体系,确保每一个环节都处于受控状态,从根本上杜绝渗漏隐患。

4 混凝土面板浇筑质量控制

4.1 混凝土配合比优化

配合比优化的核心策略是在保证必要强度的前提下,尽量降低水泥用量(通常控制在每立方米200公斤以下),以从源头上减少水化热和干缩变形。同时,大量掺加优质的I级粉煤灰或硅粉,不仅能有效替代部分水泥,还能改善混凝土的和易性,并通过火山灰反应提高其后期强度和抗渗性能。此外,使用聚羧酸类高性能减水剂是获得高流动性(坍落度控制在140-180mm)且不离析泌水的混凝土的关键,这为滑模的顺利施工创造了有利条件。适量引入微小、稳定的气泡(含气量控制在3%-5%),则能显著提升混凝土抵抗冻融循环破坏的能力,这对于寒冷地区的工程尤为重要。骨料的选择同样不可忽视,必须严格控制其含泥量和针片状颗粒含量,优选粒形好、质地坚硬的优质骨料,以确保混凝土的内在质量。

4.2 滑模施工与表面修整

滑模系统(无论是无轨还是有轨)的行进速度必须与混凝土的初凝时间精确匹配,以确保脱模时混凝土已获得足够的早期强度(通常为0.2-0.4MPa),既能保持形状稳定,又不会因粘模而受损。在混凝土入仓后的振捣环节,需采用附着式振捣器与插入式振捣棒相结合的方式,确保混凝土充分密实,尤其要加强止水带附近的振捣,避免因振捣不足而形成空洞或蜂窝,削弱止水效果^[4]。脱模后的表面处理同样关键,需立即组织人工进行精细抹面,并在混凝土初凝前完成二次收浆,以有效消除因水分蒸发过快而产生的塑性收缩裂缝。待混凝土终凝后,必须及时覆盖土工布、草帘等保温保湿材料,为后续的养护创造良好条件。

4.3 温控防裂技术

在夏季高温季节施工时,必须对原材料进行降温处理,例如对骨料堆场采取遮阳和喷淋措施,对拌合用水

加入冰屑,以确保混凝土出机口温度不超过设计限值(通常为28°C)。在施工组织上,应合理规划面板的分块宽度(通常为12m或16m),并尽可能避开日最高温和昼夜温差最大的时段进行浇筑,有条件时优先选择在夜间或气温较为温和的秋冬季节施工。然而,最为关键的环节是全过程、高标准的养护。从混凝土终凝那一刻起,就必须不间断地进行流水养护或蓄水养护,养护期不得少于28天。养护水的温度与混凝土表面温差应控制在20°C以内,以防因冷击而引发新的裂缝。在寒冷地区,冬季还需采取额外的保温越冬措施,如覆盖保温被或搭建暖棚,以防止面板遭受冻害而开裂。

5 结语

混凝土面板堆石坝施工质量控制是贯穿各环节的复杂系统工程。本文深入分析堆石料制备等四大关键技术得出结论:源头控制是基础,需精细化料场管理与现代化加工保障优质堆石料;过程监控是核心,要依靠科学碾压试验、严格现场控制及沉降监测数据动态管理;细节决定成败,接缝止水施工要“精、准、稳”;防裂是面板施工灵魂,优化配合比等温控养护举措可确保面板完整性。展望未来,随着BIM、物联网、大数据和AI等新一代信息技术发展,CFRD施工质量控制迈向智能化、数字化新阶段。基于BIM的施工模拟可优化工序衔接,传感器网络能实时感知预警关键参数,AI算法可深度学习监测数据预测质量风险,这些技术融合将提升工程建设质量、效率与安全水平。

参考文献

- [1]成柳.基于混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术 with 质控检测[J].中国水泥,2025,(11):97-100.
- [2]张泽阳,刘珊珊,刘征.现代混凝土面板堆石坝施工质量检测控制要点[J].山东水利,2025,(10):27-28+36.
- [3]陈迪.水利工程中混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术研究[J].现代工程科技,2025,4(14):37-40.
- [4]郑燕妮.某水库混凝土面板堆石坝施工质量的控制[J].住宅与房地产,2021,(24):179-180.