

钢纤维混凝土在水库溢洪道的运用研究

——以黄岑水库溢流坝直线段加固改造为例

廖武¹ 钟卫杰²

1.湖南九一工程设计有限公司 湖南 长沙 410000

2.湖南鑫禹项目管理公司 湖南 长沙 410000

【摘要】：溢洪道溢流堰长期承受高速含沙水流冲刷、空蚀、干湿交替荷载作用，普通钢筋混凝土易出现开裂、冲磨剥落、空蚀破损等病害，除险加固施工难度大、综合造价偏高。以湖南省宜章县黄岑水库中型溢流堰加固工程为实例，对比原钢筋混凝土加固方案与变更后钢纤维混凝土实施方案，分析溢流堰高速水流水力特性对护面混凝土的性能要求，系统梳理钢纤维混凝土全场景水工应用范围，阐述现场拌制 C25 剪切钢纤维混凝土配合比、滑模吊篮连续浇筑施工工艺，跟踪 21 年长期运行观测效果。结果表明：均匀乱向分布的短剪切钢纤维在混凝土基体内部形成空间传力网络，开裂后可持续传递拉应力，从根源抑制裂缝延展，大幅提升护面材料抵抗泥沙冲蚀、空泡剥蚀与干缩开裂的综合耐久能力^{[1][4]}。可大幅简化陡坡溢流面施工工序、降低工程投资。现有水利规范下 C25 钢纤维混凝土长期服役虽满足安全要求，但建议高速泄水建筑物溢流护面混凝土强度等级提升至 C30 及以上^[5]。研究可为同类水库溢洪道、水工隧洞、泄洪涵管加固改造提供工程参考。

【关键词】：钢纤维混凝土；溢洪道；溢流堰；抗冲磨；空蚀；除险加固；水工应用场景

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.024

引言

溢洪道溢流堰面常年受高速水流、推移质泥沙冲击，伴随负压空化、温度收缩、冻融干湿循环多重破坏作用，浆砌石、普通钢筋混凝土护面极易产生裂缝、蜂窝麻面、冲蚀坑、表层剥落等病害，严重威胁水库防洪安全。传统溢流面加固多采用厚层钢筋混凝土置换方案，存在基面拆除工程量大、陡坡施工安全风险高、模板与振捣变形、锚筋布设复杂、造价高昂等短板，在山区中小型水库资金受限场景下适用性较差。

钢纤维混凝土（SFRC）通过乱向分布短钢纤维形成三维增强网络，可有效阻滞微裂纹扩展、提升基体韧性、增强抗冲磨与抗空蚀能力，现已形成完整水工应用体系，覆盖泄洪、输水、地下洞室、闸室、U 型渡槽槽身、修复加固等多类场景^{[1][2]}。本文依托湖南省宜章县黄岑水库溢流堰除险加固工程，系统梳理钢纤维混凝土水工典型应用场景，对比论证钢纤维混凝土替代厚层钢筋混凝土的技术、经济、施工优势，总结陡坡薄壁钢纤维混凝土成套施工技术，结合二十余年运行实测成果评价长期服役性能，并提出规范优化与工程推广建议。

1 工程概况与加固方案比选

1.1 黄岑水库基础参数

黄岑水库位于湖南省宜章县，为山区中型水库，总库容 1489 万 m³，大坝采用浆砌石重力坝，坝顶总长 202m。

非溢流坝段：两岸布置，总长 181.50m，坝顶高程 542.60m，坝顶宽 7.00m，最大坝高 61.50m；上游设置 1.20m 高浆砌石防浪墙，墙顶高程 543.80m。

溢流坝段：河床中部布置，总宽 20.50m，净宽 16m，分双孔溢流，单孔净宽 8.00m；溢流堰顶高程 535.20m，下游陡槽直线段长度 33.4m，坝面坡比 1:0.7，坡度陡峻，常规地面作业无法开展。

1.2 原设计钢筋混凝土加固方案

2004 年大坝除险加固原设计方案针对溢流坝下游 499.2m~526m 高程直线段，计划全部拆除原有混凝土预制块，整体浇筑厚度 0.4m、C25 钢筋混凝土面层。

新旧混凝土连接：布设 $\Phi 16\text{mm}$ 锚筋，间距 200cm 梅花形布置，锚筋植入原坝体 1.0m，与面层钢筋网绑扎一体。

施工难点预判：预制块整体拆除易扰动下层结构、陡坡滑模支护难度大、厚层混凝土振捣易变形、吊篮高空作业工序繁琐安全隐患大。

造价短板：大面积拆除+钢筋+锚筋+厚层混凝土综合造价高，地方配套资金缺口较大。

1.3 变更后钢纤维混凝土加固方案

2005 年溢流坝部位除险加固开工后结合地方配套资金、施工、结构安全三大制约因素，优化变更加固方案：

作者简介：廖武（1977 年 9 月），男，籍贯：湖南省郴州市，汉族，本科毕业，高级工程师，现从事水利水电设计；

钟卫杰，湖南鑫禹项目管理公司，本科，高级工程师。

基面处理环节不再整体拆除原有预制块,仅使用风镐凿除表层碳化、松散破损区域,平均凿除厚度控制在3~5cm;植入 $\Phi 10\text{mm}$ 锚筋,横向纵向间距2m;直线段通长布设 $\Phi 6.5\text{mm}$ 钢筋网,网格间距100mm。

面层浇筑15cm厚C25剪切型钢纤维混凝土,新旧面层叠加总厚度不超过20cm,取消原方案大面积面层钢筋网与密集锚筋布置。

施工手段采用吊篮高空作业搭配移动式滑模连续浇筑,简化模板支护、分层振捣工序,大幅缩减拆除工程量与钢材投入。

方案优化后,同步解决资金缺口、陡坡施工困难、预制块拆除扰动坝体、厚层滑模变形四大实际难题,兼顾结构运行安全、现场施工便捷、工程投资节约三重效益。

2 钢纤维混凝土水工典型应用场景

结合国内已建大中型水利枢纽、中小型水库除险加固工程实践,钢纤维混凝土凭借高抗裂、高抗冲磨、高抗空蚀特性,形成六大类成熟水工应用场景,各类场景工况、破坏特征与实际工程案例整理如下:

2.1 老旧水工结构物修复加固

该类场景多用于水库坝面破损修补、泄水建筑物冲蚀坑填补、渠道边坡表层修复、冻融老化混凝土翻新处理。

工程现场痛点:原有坝体基面凹凸不平,整体拆除重建经济成本过高,常规薄层修补砂浆极易与原混凝土界面脱空、开裂。

材料应用优势:钢纤维混凝土与老混凝土粘结性能突出,仅局部凿除破损层即可薄层浇筑,无需大批量植入锚筋,十分适配资金预算有限的中小型水库改造项目,黄岑水库溢流堰加固工程便是该应用场景的典型落地案例。

2.2 高速输水、排沙洞室项目

适用构筑物包含泄洪洞、排沙洞、导流洞、水工隧洞衬砌、压力管道内壁等。

运行工况特点:洞内封闭高速水流持续冲刷,水体含沙量高,孔板、弯道位置空蚀效应突出;传统钢筋衬砌长期运行后钢筋锈蚀,会进一步加剧衬砌开裂破损。

实际应用案例:小浪底水利枢纽3条孔板消能泄洪洞过流段全部采用钢纤维混凝土抗冲磨护面,多年运行数据显示,后期空蚀维修频次显著下降^[8]。

2.3 溢流泄洪建筑物

如重力坝溢流堰、溢洪道泄槽、WES实用堰面、挑流鼻坎、消力池底板、护坦、海漫等。运行工况具有流速大,挟带泥沙持续冲磨,堰面负压诱发空蚀,干湿循环、温度收缩共同作用,表层易开裂、剥落、形成冲蚀坑等特点。

国内落地工程涵盖黄河小浪底泄洪洞护面改造、柘林水库溢洪道冲蚀坑修复,以及本文研究的黄岑水库溢流坝面层加固^[8,9]。此类泄水设施普遍采用10~20cm薄壁钢纤维混凝土护面,可省去面层钢筋网与密集锚筋布置,适配陡坡高空滑模连续施工^[6]。

2.4 闸室、船闸关键受力部位

闸门门槽、闸底板、闸墩、船闸廊道、止水周边混凝土均为应力集中区域。

工况损伤特点:闸门频繁启闭产生高频冲击荷载,门槽位置应力高度集中,普通混凝土极易出现边角开裂、表层崩缺;水位反复升降带来持续性干湿侵蚀。

采用钢纤维混凝土后,无序分布的钢纤维可约束边角微裂纹延伸,大幅降低门槽后期修补频次,长期运维成本明显下降。

2.5 地下厂房、边坡喷锚支护

多用于地下厂房顶拱、引水隧洞进出口边坡、坝肩岩体支护工程。

现场施工难点:岩体开挖后围岩变形会产生张拉裂缝,常规挂网喷混凝土内部钢筋容易锈蚀,曲面浇筑贴合效果差;顶拱部位自重荷载易造成喷护层整体脱落。

典型工程案例:三峡电源电站地下厂房顶拱采用喷射型钢纤维混凝土,取消钢筋网铺设,曲面成型质量更好,整体支护工期明显缩短^[10]。

2.6 其他拓展水工场景

渠道、U型渡槽薄壁衬砌可抵御泥沙冲刷与温度收缩裂缝;海堤、导流堤护面依靠纤维缓冲波浪冲击,耐受海水干湿腐蚀;消力坎、尾水墩等消能构件承受水跃剧烈冲击与脉动荷载,采用钢纤维混凝土可提升整体抗冲击能力。

3 溢流堰水力特征与混凝土性能要求

3.1 高速水流下溢流坝破坏机理

溢流面在泄洪工况下同步承受三重耦合损伤:一是高速挟沙水流持续切削造成骨料剥离、断面缺损,改变泄流体型。二是堰面不平整诱发负压空泡溃灭冲击基体,形成空蚀负压破坏。三是水位交替、温度收缩叠加形成长期耐久性损伤和破坏^[4]。

3.2 溢流面护面混凝土核心性能要求

结合黄岑水库溢流坝多年泄洪现场观测情况,溢流堰面层混凝土必须同时满足五项耐久指标:

一是具备优良抗裂韧性。15cm薄壁面层浇筑易产生温度、干缩裂缝,纤维增韧体系可有效阻断裂缝持续延伸。对于黄岑这类老旧中型水库,无需大面积拆除原有预制护面,仅局部处理破损层后浇筑薄层钢纤维混凝土即可完成修复,相比整体置

换钢筋混凝土方案经济性优势显著。工程养护完成后,笔者现场通过锤击检测面层,混凝土发出沉闷紧实的短促声响,证明内部密实无空鼓缺陷。

二是高抗冲耐磨性能。长期抵御含沙水流切削磨损,减少表层材料损耗,维持溢流堰原有泄水体型不变。对比坝体同期同标号普通混凝土,钢纤维维护面层经过21年高速水流冲刷,外观磨损程度更低,耐磨性能提升效果直观。

三是优异抗空蚀性能。基体密实度高,能够削弱空泡溃灭带来的裂纹拓展,降低表层剥落风险。

四是长期耐久性能。耐受干湿交替、年度温度循环、水体轻微化学侵蚀,延长坝面防护层服役年限。对比大坝同期其他位置同标号普通混凝土,运行21年后钢纤维溢流面层表观老化程度明显更轻。

五是浇筑成型平整度高。钢纤维混凝土浇筑成型后表面顺滑,无明显错台、蜂窝孔洞,从源头消除局部凸起带来的空化诱发源。

普通C25素混凝土一旦产生微裂纹,会快速贯通扩展;钢纤维无序分布形成桥接受力体系,混凝土开裂后仍可持续承担拉应力,综合提升抗冲磨、抗空蚀能力,适配溢流堰极端高速泄水工况^[1,11]。

4 黄岑水库钢纤维混凝土施工关键技术

4.1 原材料与配合比设计

受施工当年宜章县域条件限制,全部混凝土依靠项目现场强制式搅拌机拌合。核心原材料参数如下:选用0.5mm×25mm剪切型钢纤维,单方混凝土掺量60kg,纤维长径比适配15cm薄面层,拌合过程中分散均匀,不易出现纤维抱团结团现象;混凝土强度等级仍按原设计为C25^[3]。拌合管控严格把控坍落度与整体和易性,遵循随拌随浇施工原则,避免拌合料长时间静置,防止钢纤维下沉、骨料离析,同时搭配中低热II级粉煤灰,降低水泥水化热,减少温度收缩裂缝生成^[4]。

4.2 基面处理

凿毛作业借助空压机配套风镐,凿除预制块表层碳化、松散破损区域,平均凿除厚度3~5cm,基面凿制为凹凸粗糙界面,彻底清理松动骨料、浮尘与表面积水;浇筑前采用高压水枪全面冲洗基面,保持基面湿润但无积水,以此提升新旧混凝土界面粘结强度。

4.3 陡坡滑模吊篮连续浇筑工艺

溢流坝坡面坡比1:0.7,坡面陡峭,人员无法直接站立开展浇筑作业,项目定制吊篮搭配移动式滑模一体化施工。模板系统采用轻量化定制滑模,适配15cm薄面层浇筑,降低模板自重与浇筑变形风险,沿陡槽自下而上连续滑移作业。混凝土均匀分层布料,以平板浅层振捣器为主,配合小型插入式振捣器

辅助振捣;严格控制振捣时长,防止钢纤维下沉堆积,保障纤维在混凝土内部三维无序均匀分布。整体采用不间断分段连续浇筑,减少竖向施工冷缝,提升堰面整体完整性与表面平顺度,消除局部缺陷诱发的空化风险。

5 工程长期运行效果观测分析

黄岑水库溢流堰加固工程2005年完工,截至2026年稳定运行21年,期间先后经历2006年“7·15”特大洪水、2011年“8·19”特大洪灾、2024年“7·26”特大暴雨三次极端洪水工况,多次高水位全溢流泄洪。管理单位持续开展常态化现场巡检,现场观测溢流坝直线段钢纤维防护面层整体完好,不存在贯穿性裂缝、表层蜂窝麻面、大面积剥落、深度冲蚀凹坑等病害。二十余年高速含沙水流持续冲刷后,堰面泄流体型无明显形变,全程未出现空蚀破损区域。新旧混凝土结合界面无脱空、起鼓现象,界面粘结强度可满足长期泄洪运行要求。

李刚在护坦加固相关研究中提出,钢纤维混凝土薄层修复具备显著工程优势^[6]。本文依托黄岑水库21年持续实地巡检数据,进一步补充陡坡溢流坝长期服役性能实测结论:本次钢纤维混凝土优化方案技术路线合理,钢纤维增韧骨架可同步抵御冲磨、空蚀、温度收缩多重损伤,在资金受限、陡坡高空施工的山区水库改造场景下,能够实现长期安全稳定运行^[11]。

6 结论与工程应用建议

6.1 主要结论

高速泄水溢流堰的复杂水力工况,适配钢纤维混凝土材料特性。均匀拌合后的剪切钢纤维在混凝土内部形成无序立体桥接骨架,同步提升材料抗冲耐磨、抗空蚀、阻裂能力,能够解决传统钢筋混凝土护面易破损、陡坡施工难度大、综合造价偏高的工程痛点。该材料应用场景覆盖溢流泄洪设施、输水隧洞、闸室、U型渡槽、地下围岩支护、老旧水工结构修复等各类水利建筑物,工程适配范围广泛。

针对陡坡溢流坝面层加固,采用“局部凿除破损层+15cm薄壁钢纤维混凝土”改造方案,可省去原有大面积坝体拆除、密集锚筋、厚层钢筋网布置,大幅削减拆除工程量、高空作业安全风险,同时降低整体工程投资,施工便捷性与经济技术优势突出。

黄岑水库C25标号钢纤维混凝土溢流面层历经21年多轮特大洪水考验,整体运行状态完好,证明该方案在山区中型水库除险加固项目中具备落地可行性;但受当年水利行业规范限制,面层混凝土设计强度偏低,长期高流速泄水工况下,材料耐久储备仍有提升空间。

6.2 工程推广建议

(1) 优化混凝土强度设计标准:后续溢流堰、溢洪道陡槽、消力池等高速泄水构筑物,钢纤维防护面层混凝土强度等级不宜低于C30,进一步储备抗冲磨耐久性能^[5]。

(2) 分场景针对性推广: 溢流堰、泄洪隧洞、消力池、闸门门槽、老旧坝面修补等对抗裂、抗冲磨有硬性要求的部位, 优先选用钢纤维混凝土; 地下洞室、边坡支护工程可采用喷射型钢纤维混凝土简化现场施工工序。

(3) 标准化配合比设计: 溢流面专用钢纤维混凝土单方纤维掺量控制在 $60\sim 90\text{kg/m}^3$, 优先选用剪切型钢纤维, 复配高效减水剂, 降低水泥水化热, 优化拌合料整体和易性^[2,3]。

(4) 优化现场施工工艺: 陡坡薄壁泄水结构优先选用滑模连续浇筑工艺, 严控振捣时间避免钢纤维沉降聚集; 基面充

分凿毛冲洗, 保障新旧混凝土协同受力。

6.3 展望

随着水利工程耐久性标准不断提升, 钢纤维、合成纤维混杂纤维混凝土、超高性能纤维混凝土将逐步应用于高水头大型泄洪设施。后续可开展室内冲磨、空蚀对比试验, 量化不同强度等级、纤维掺量钢纤维混凝土的抗破坏指标, 建立山区中小型水库溢流堰纤维混凝土加固标准化设计体系^[4,5], 为水库长效安全运行提供材料技术支撑。

参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会.纤维混凝土结构技术规程:CECS38—2004[S].北京:中国计划出版社,2004.
- [2] 水利部.水利水电工程纤维混凝土施工技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [3] 住房和城乡建设部.普通混凝土配合比设计规程:JGJ55—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] 王浩.高速水流下水工混凝土冲磨空蚀破坏机理研究[J].水利学报,2023,54(6):712-721.
- [5] 张健.溢流面改造工程 SFRC30 钢纤维混凝土配合比试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(8):1924-1931.
- [6] 李刚.钢纤维混凝土在水库溢洪道护坦加固中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(增刊):215-218.
- [7] 刘建军.中型浆砌石重力坝溢流堰除险加固设计优化[J].大坝与安全,2021(3):45-49.
- [8] 陈军.钢纤维混凝土在小浪底泄洪洞抗冲磨防护中的应用[J].水电能源科学,2022,40(5):112-116.
- [9] 周明.柘林水库溢洪道空蚀坑钢纤维混凝土修复技术[J].大坝与安全,1996(2):32-35.
- [10] 赵伟.喷射钢纤维混凝土在地下厂房顶拱支护中的应用研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(4):89-94.
- [11] 孙家昌.钢纤维混凝土水工耐久性试验与工程应用[M].北京:中国水利水电出版社,2018:66-82.