

# 不同修复材料对水工结构应用效果的影响

周钰棋 王子豪

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6630

**[摘要]** 水工结构在长期运行过程中不可避免地出现损伤与病害,修复材料的选择直接关系到结构的安全性与耐久性。本文系统分析传统修复材料、新型复合修复材料及生态环保型修复材料在水工结构中的应用现状,深入探讨不同修复材料对结构强度、耐久性、抗渗防腐性能以及经济性与施工性的影响机理。研究表明,修复材料的选择应综合考虑结构类型、损伤特征、施工环境多重因素,针对当前修复材料应用中存在的问题。本文从结构类型匹配、环境适配性评估、性能测试与质量控制方面提出优化策略,为水工结构修复材料的科学选择与合理应用提供理论依据和实践指导,对提升水工结构修复质量、延长工程使用寿命具有重要意义。

**[关键词]** 水工结构; 修复材料; 应用效果; 性能影响; 优化策略

**中图分类号:** TV3 **文献标识码:** A

## Influence of different repair materials on the application effect of hydraulic structure

Yuqi Zhou Zihao Wang

Zhongshui Northeast Survey and Design Research Co., Ltd.

**[Abstract]** Damage and disease will inevitably occur in the long-term operation of hydraulic structures, and the selection of repair materials is directly related to the safety and durability of structures. This paper systematically analyzes the application status of traditional repair materials, new composite repair materials and eco-friendly repair materials in hydraulic structures, and deeply discusses the influence mechanism of different repair materials on structural strength, durability, impermeability and corrosion resistance, economy and construction. The research shows that the selection of repair materials should comprehensively consider multiple factors such as structure type, damage characteristics and construction environment, aiming at the problems existing in the current application of repair materials. This paper puts forward optimization strategies from the aspects of structural type matching, environmental suitability evaluation, performance testing and quality control, which provides theoretical basis and practical guidance for the scientific selection and rational application of repair materials for hydraulic structures, and is of great significance for improving the repair quality of hydraulic structures and prolonging the service life of projects.

**[Key words]** hydraulic structure; Repair materials; Application effect; Performance impact; Optimization strategy

## 引言

水工结构是水利工程的核心组成部分,承担着防洪、灌溉、发电等重要功能,其安全稳定运行关系到国计民生。然而,水工结构长期处于复杂多变的水环境中,受到水流冲刷、温度变化、冻融循环等多种因素作用,不可避免地产生裂缝、剥蚀、渗漏等病害,严重影响结构的安全性与使用功能,修复材料作为结构加固与病害治理的关键载体,其性能优劣直接决定修复效果的好坏。近年来,随着材料科学技术的快速发展,修复材料从传统的水泥砂浆、混凝土逐步向高性能聚合物材料、纤维增强复合材

料方向拓展,生态环保理念也日益融入修复材料研发与应用之中,面对种类繁多的修复材料,如何根据水工结构的实际情况科学选择、合理应用,成为工程界亟待解决的重要课题。

### 1 不同修复材料在水工结构中的应用现状

#### 1.1 传统修复材料的应用特点

传统修复材料以水泥基材料为主体,包括普通水泥砂浆、混凝土及聚合物改性水泥砂浆,具有原材料来源广泛、成本较低、施工工艺成熟等优势。这类材料与原结构性质相近,能够较好地实现新旧材料结合,在大坝缺损修补、裂缝填充等方面广泛应

用。然而也存在收缩性大易产生二次裂缝、抗渗性能不足、冻融耐久性欠佳等局限性,特别是在高寒地区、盐碱环境等特殊工况下,传统材料性能衰减较快,修复效果难以长期维持<sup>[1]</sup>。

### 1.2 新型复合修复材料的发展

新型复合修复材料主要包括聚合物基复合材料、纤维增强复合材料、高性能灌浆材料等。通过材料组分优化设计实现性能显著提升,聚合物基材料具有优异的粘结性和抗渗性,能有效封闭裂缝阻断水分侵入。纤维增强材料利用高强纤维增强作用,大幅提升承载能力与抗疲劳性能,高性能灌浆材料凭借良好流动性深入细微裂缝实现深层修复,这类材料在强度、耐久性、抗渗性方面表现优异,但面临成本较高、施工技术要求严格挑战<sup>[2]</sup>。

### 1.3 生态环保型修复材料的推广

生态环保型修复材料注重资源循环利用与环境友好性,主要包括矿物聚合物材料、生物基修复材料、工业固废再生材料等,矿物聚合物材料以粉煤灰、矿渣为原料。通过碱激发反应形成胶凝体系,实现固废资源化利用并具备良好性能,生物基材料利用天然高分子的环境友好特性降低环境负荷,工业固废再生材料通过加工建筑垃圾、尾矿等生产修复材料。这类材料契合绿色发展要求,但在性能稳定性、标准规范方面仍需完善,应用范围有待扩大<sup>[3]</sup>。

## 2 修复材料对水工结构性能的影响分析

### 2.1 修复材料对结构强度与耐久性的影响

修复材料的力学性能直接决定修复后结构的承载能力与长期稳定性,传统水泥基材料强度提升有限,受水灰比、养护条件影响较大。在高应力区域修复效果不理想,新型高性能材料如聚合物砂浆、环氧树脂具有更高的抗压强度与抗拉强度,能满足结构补强要求,修复材料的耐久性能同样关键,水工结构面临水流冲刷、化学侵蚀、冻融循环等复杂作用,材料的抗渗性、抗冻性、抗侵蚀性直接影响服役寿命。修复材料与原结构的相容性对耐久性具有重要影响,弹性模量、热膨胀系数等物理性能差异过大在界面产生应力集中,加速材料劣化,因此应充分考虑材料匹配性,通过合理设计与施工控制实现协同工作,保证结构长期强度与耐久性能<sup>[4]</sup>。

### 2.2 修复材料对抗渗防腐性能的影响

修复材料的抗渗性能对防止结构渗漏、保护钢筋免受锈蚀具有关键作用,传统水泥基材料因孔隙率高、界面薄弱等,抗渗性能不足,聚合物改性材料通过有机聚合物填充改性,显著降低孔隙率与渗透系数,大幅提升抗渗性能。环氧树脂类材料具有致密分子结构与优异粘结性,能形成连续防护层,有效阻隔水分与侵蚀性介质,防腐性能主要体现在对内部钢筋的保护,修复材料应隔离氧气与水分,防止电化学腐蚀。含阻锈剂的材料能在钢筋表面形成钝化膜抑制腐蚀,材料的碱性环境对维持钢筋钝化状态至关重要,碳化速度直接影响长期防腐效果,材料选择应重点关注密实性、抗渗级、阻锈性能关键指标<sup>[5]</sup>。

### 2.3 修复材料对结构经济性与施工性的影响

修复材料的成本、施工周期、维护费用直接影响工程投资效益,传统材料虽单价低但可能需频繁维修,全生命周期经济性未必最优,新型高性能材料初期投入高,但凭借优异性能与持久效果能减少后期维护成本,综合效益更可观,材料的施工性能对工程进度与质量控制具有重要意义。流动性好的材料能充分充填缺陷保证密实性,快速固化的材料可缩短工期,温度适应性好的材料能拓展施工时间窗口,施工工艺复杂程度影响质量稳定性,工艺简单、操作便捷的材料更易于质量控制。特别是水下修复、带水作业特殊工况下,材料的施工适应性成为关键制约因素,应综合考虑材料成本、施工难度、工期要求等因素,追求技术经济最优平衡。

## 3 优化水工结构修复材料选择的策略

### 3.1 基于结构类型的修复材料选择原则

水工结构类型多样,包括混凝土重力坝、拱坝、土石坝、闸门、渠道,不同结构的受力特点、损伤形式、工作环境存在显著差异,修复材料的选择必须与结构类型相匹配。混凝土大坝承受水压力、自重等静力荷载,修复材料应重点关注抗压强度、耐久性、抗渗性等性能指标,拱坝因特殊受力机制,对修复材料的弹性模量、变形协调性要求较高,应选用与原混凝土性能接近的材料,避免因性能差异导致应力重分布,土石坝的渗漏修复需考虑防渗材料与坝体的相容性。闸门结构修复材料除应具备基本力学性能外,还需重点考虑防腐性能,渠道工程面临流速冲刷与冻融破坏,修复材料应具备较高的抗冲磨性能与抗冻性能,结构的重要性也是材料选择的重要依据,关键部位、高风险区域应优先选用性能可靠的高级修复材料,修复材料的选择应遵循因材施用原则,根据结构类型、损伤特征、性能需求进行系统分析与科学决策。

例如,在某大型水库混凝土重力坝表面修复工程中,首先对坝体进行全面检测,发现表层存在明显的冲刷磨损缺损区域,以及多条不同宽度的表面裂缝。针对表层缺损,技术人员选择高强度聚合物改性砂浆作为修复材料,该材料抗压强度高,与原混凝土强度级相当,且具有良好的粘结性能和耐久性,修复时先对缺损部位进行清理,去除松散混凝土至坚实基层,再涂刷界面剂增强新旧材料粘结。然后分层填充修复砂浆并充分压实抹平,确保修复层与原结构紧密结合。通过针对不同损伤类型选用适宜的修复材料和施工工艺,该工程修复效果良好,经过多年运行观测,修复部位未出现开裂、脱落现象,抗渗性能和表面强度均保持稳定,满足工程安全运行要求。

### 3.2 施工环境与材料适配性评估方法

水工结构修复施工面临水下作业、潮湿环境、温度变化复杂条件,修复材料必须适应实际施工环境才能保证修复效果,施工环境评估应从温度、湿度、水文条件、施工空间多维度展开。温度是影响修复材料固化与性能发展的关键因素,水泥基材料在低温下水化反应缓慢,高温则会导致快速失水,聚合物材料对温度更为敏感,环氧树脂在低温下粘度增大、固化时间延长,高温环境下可能出现反应过快、放热集中问题,湿度与水文条件对

材料的粘结性能影响显著。多数修复材料要求基层干燥才能保证有效粘结,而水工结构往往处于潮湿或水下环境,施工空间的限制也会影响材料选择与施工方法,在狭窄空间、高空作业特殊工况下,应优先选用施工便捷的材料,材料适配性评估可采用现场试验、模拟试验方法,在实际施工前进行小范围试验验证,观察材料的工作性能、固化效果、粘结强度等指标。

例如,在某水闸闸墩水下裂缝修复工程中,由于修复部位位于水下较深位置,常年浸水且无法排干施工,施工环境评估成为关键环节,技术人员首先对水下环境进行详细勘察,测定水温常年较低,水流具有一定流速,基层表面附着有藻类和淤泥附着物。针对这些环境条件,选择水下不分散环氧灌浆材料进行修复,该材料具有在水中不分散、不流失的特性,且能在潮湿基层上实现有效粘结,施工前先进行小范围适配性试验,在类似水深和温度条件下制作试块,检测材料的水下工作性、固化时间和粘结强度,试验结果显示材料在低温水体中固化时间较长但最终强度满足要求。正式施工时,潜水员先对裂缝部位进行水下清理,使用钢丝刷仔仔细清除藻类和松散物,露出坚实基层,再用水下专用界面剂涂刷处理增强粘结,然后采用水下注射器将环氧灌浆材料缓慢注入裂缝,注射过程中控制适当速度避免材料流失扩散,每条裂缝自下而上分段注射确保充填密实无空洞,材料固化后进行水下检查,修复部位表面平整饱满。通过水下超声波检测仪器验证灌浆质量,确认修复部位灌浆饱满、与基层粘结良好,满足防渗和结构强度要求。

### 3.3 修复材料性能测试与质量控制体系

修复材料的性能测试是保障修复质量的重要手段,应建立完善材料检测与质量控制体系,从原材料进场、施工过程到修复完成全程把控材料质量,原材料检测是质量控制的第一关,水泥、砂石、外加剂、聚合物原材料必须符合相关标准要求,修复材料的配合比设计应经过充分试验验证。通过调整材料组分与配比使性能满足工程需求,配合比试验应涵盖工作性能、力学性能、耐久性能多项指标,施工过程中应加强现场质量检测,对拌合物的稠度、流动度、凝结时间工作性指标进行实时监控。修复完成后应进行强度检测、粘结强度测试、抗渗性能试验,评估修复效果是否达到设计要求,无损检测技术如超声波检测、回弹法检测可用于修复部位的质量评价,长期性能监测同样重要,应对修复部位进行定期观测与检测,跟踪材料的性能演化与修复

效果的持久性,建立修复材料性能数据库与质量追溯体系,完善修复材料标准规范体系。

例如,在某水电站溢洪道修复工程中,建立完整的材料质量控制体系贯穿全过程。工程开工前,对拟采用的聚合物改性混凝土修复材料进行全面性能测试,确保所有原材料质量合格后方可使用。施工过程中,每班次检测拌合物坍落度控制在合理范围,凝结时间适中便于施工,确保施工质量稳定,定期留置标准试块送检,检测抗压强度和粘结强度是否达标。修复完成后,采用回弹仪检测修复层表面强度,用超声波检测仪检查修复层与基层的粘结质量,对重点部位钻芯取样检测内部密实度,建立修复部位档案,详细记录材料批次、施工日期、检测结果完整信息。

## 4 结语

修复材料是水工结构病害治理与功能恢复的关键要素,其性能优劣直接关系到修复效果与结构安全。通过对传统修复材料、新型复合材料、生态环保材料应用现状的分析,以及对修复材料在强度、耐久性、抗渗防腐、经济施工方面影响机理的深入探讨,本文提出基于结构类型匹配、施工环境适配、性能测试控制的修复材料优化选择策略。未来应进一步加强修复材料的基础研究与应用技术创新,开发性能更优、适应性更强的新型材料,完善材料标准规范与质量控制体系,推动修复材料向高性能化、绿色化、智能化方向发展,为水工结构的安全运行与可持续发展提供有力的技术支撑。

### [参考文献]

- [1] 娄岩,冯涛,胡艳芳.微生物修复水工混凝土力学性能与微观机理研究[J].水利科技与经济,2023,29(1):129-132.
- [2] 刘旭.不同修复材料对水工结构应用效果影响的研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(7)[2024-7-1].
- [3] 齐士强.渗透结晶材料修复水工混凝土裂缝的作用机理研究[J].黑龙江水利科技,2024,52(2):31-32.
- [4] 钟桂清.不同修复材料对水工结构应用效果的影响[J].东北水利水电,2023,41(1):33-36.
- [5] 李珍,熊泽斌.高寒地区水工混凝土防护修复技术与应用[J].长江科学院院报,2022,39(6):1-8.

### [作者简介]

周钰祺(1994--),男,汉族,河南省新乡市人,硕士,工程师,研究方向:从事水利水电工程设计工作。