

高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理及 UHPC 修复材料的原型试验研究

郑芝鑫

广东宏茂建设管理有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025050012

摘 要： 高流速泄洪洞作为水利工程中的关键泄水设施，其混凝土结构长期承受高速水流携带泥沙的冲磨作用，极易发生破坏，严重影响工程的安全运行。本文深入分析高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理，研究超高性能混凝土（UHPC）修复材料的性能，并开展原型试验验证其修复效果。结果表明，UHPC 材料在抗冲磨性能、力学性能等方面表现优异，能有效修复冲磨破坏的混凝土结构，为高流速泄洪洞的安全运行提供有力保障。

关 键 词： 高流速泄洪洞；混凝土；冲磨破坏机理；UHPC 修复材料；原型试验

Failure Mechanism of Concrete Washing and Grinding in High-Flow Velocity Flood Discharge Tunnel and Prototype Test Study of UHPC Repair Materials

Zheng Zhixin

Guangdong Hongmao Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： As a key drainage facility in water conservancy projects, the concrete structure of the high-flow flood discharge tunnel has long been subjected to the erosion of sediment carried by high-speed water flow, which is very easy to cause damage and seriously affects the safe operation of the project. In this paper, the failure mechanism of concrete erosion in high-flow flood discharge tunnels is deeply analyzed, the performance of ultra-high performance concrete (UHPC) repair materials is studied, and prototype tests are carried out to verify its repair effect. The results show that UHPC material has excellent performance in terms of erosion resistance and mechanical properties, and can effectively repair the concrete structure damaged by erosion, providing a strong guarantee for the safe operation of the high-flow velocity flood discharge tunnel.

Keywords： high flow velocity flood discharge tunnel; concrete; grinding failure mechanism; UHPC restorative materials; prototype trial

引言

在水利工程中，泄洪洞承担着宣泄洪水、调节库水位的重要任务。对于高流速泄洪洞而言，水流速度通常可达 20m/s 以上，水流中携带的泥沙、砾石等固体颗粒会对洞壁混凝土产生强烈的冲磨作用^[1-3]。长期运行后，混凝土表面会出现磨损、剥蚀、露筋等破坏现象，不仅降低了泄洪洞的过流能力，还威胁到结构的整体安全性。目前，用于泄洪洞混凝土修复的材料主要有普通混凝土、钢纤维混凝土等，但这些材料在高流速、高含沙水流条件下的抗冲磨性能难以满足长期使用要求。超高性能混凝土（UHPC）作为一种新型建筑材料，具有高强度、高韧性、高耐久性等特点，在抗冲磨领域展现出巨大的应用潜力。本文通过理论分析和原型试验，系统研究高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理及 UHPC 修复材料的应用效果，为相关工程的修复设计提供参考。

一、高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理

高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏主要包括磨损与空蚀两类。磨损破坏由高速水流携带的固体颗粒与混凝土表面相对滑动、滚动或冲击所致，滑动磨损多在直段，颗粒切削表面；滚动磨损见于

流态复杂区，颗粒碾压研磨；冲击磨损发生在弯道等部位，颗粒冲击导致材料剥落^[4]。空蚀破坏则因水流经体型突变部位时流速骤增、压力骤降产生空化，气泡溃灭的微射流和冲击波反复冲击，使表面出现蜂窝、麻面乃至剥蚀，且与磨损相互促进。影响因素包括水流参数（流速为关键，冲磨程度与流速 n 次方成正

比，紊流加剧作用）、固体颗粒特性（粒径、硬度、浓度等影响显著）及混凝土自身性能（强度、韧性等决定抗冲磨能力）^[5]。

二、UHPC 修复材料的性能研究

（一）UHPC 材料的组成与特点

UHPC 是一种以水泥、硅灰、超细石英砂、钢纤维等为主要成分，通过优化配合比设计而制备的高性能混凝土材料。其具有高强度、高韧性、高耐久性和良好的施工性，通过合理的配合比设计，UHPC 具有较好的流动性和易密性，便于施工浇筑^[6]。

（二）UHPC 材料的抗冲磨性能试验

为了评价 UHPC 材料的抗冲磨性能，采用旋转式冲磨试验机进行试验。试验选用粒径为 0.5–2mm 的石英砂作为磨料，控制水流速度为 30m/s，冲磨时间为 24h。同时，以普通 C40 混凝土作为对比试件。试验结果如下表 1 所示：

表 1：不同材料抗冲磨性能试验对比				
材料		冲磨后质量 (g)	质量损失 (g)	相对磨耗率 (%)
UHPC	500.0	492.5	7.5	1.5
C40 混凝土	500.0	470.0	30.0	6.0

从表 1 可以看出，在相同的试验条件下，UHPC 材料的质量损失为 7.5g，相对磨耗率为 1.5%；而 C40 混凝土的质量损失为 30.0g，相对磨耗率为 6.0%。UHPC 材料的相对磨耗率仅为 C40 混凝土的 25%，表明其具有优异的抗冲磨性能。这主要得益于 UHPC 材料较高的强度和密实度，能够有效抵抗固体颗粒的磨损作用^[7–8]。

（三）UHPC 材料的力学性能试验

对 UHPC 材料和 C40 混凝土进行力学性能试验，包括抗压强度、抗折强度和弹性模量测试，结果如下表 2 所示：

表 2：不同材料力学性能试验对比			
材料	抗压强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
UHPC	180	25	45
C40 混凝土	40	5.5	30

由表 2 可知，UHPC 材料的抗压强度为 180MPa，是 C40 混凝土的 4.5 倍；抗折强度为 25MPa，是 C40 混凝土的 4.5 倍；弹性模量为 45GPa，高于 C40 混凝土的 30GPa。UHPC 材料优异的力学性能为其抵抗冲磨破坏提供了坚实的基础，较高的抗压强度和抗折强度能够承受固体颗粒的冲击和磨损，较高的弹性模量则有助于减少材料在冲磨作用下的变形^[9–10]。

三、UHPC 修复材料的原型试验研究

（一）试验工程概况

选取某水利枢纽的高流速泄洪洞作为试验工程，该泄洪洞全长 800m，最大过流流速为 35m/s，运行年限已达 15 年。由于长期受高速水流携带泥沙的冲磨作用，泄洪洞进口段和弯道段的混凝土表面出现了严重的磨损和空蚀破坏，最大磨损深度达 50mm，严重影响了泄洪洞的安全运行。

本次原型试验选取泄洪洞进口段 20m 长的范围作为修复试验区，采用 UHPC 材料进行修复。修复施工过程如下：

（1）表面处理：对混凝土表面的破损部位进行凿除，清除松动的混凝土和杂物，并用高压水冲洗干净。

（2）界面处理：在处理后的混凝土表面涂刷界面剂，以提高 UHPC 与基层混凝土的粘结强度。

（3）UHPC 浇筑：采用泵送方式将 UHPC 浇筑到修复部位，振捣密实，确保混凝土与基层紧密结合。

（4）养护：浇筑完成后，及时覆盖塑料薄膜进行保湿养护，养护时间为 28d。

（二）原型试验监测方案

为了监测 UHPC 修复材料的使用效果，在修复区域布置了监测点，主要监测表面磨损量、裂缝发展和渗水量；在修复区域设置渗水量观测点，监测修复后泄洪洞的渗漏情况。监测周期为 1 年，分别在修复完成后 1 个月、3 个月、6 个月和 12 个月进行监测。

（三）原型试验结果分析

1. 表面磨损量分析

修复完成不同时间 1 个月、3 个月、6 个月和 12 个月的表面磨损量监测结果分别为 0.2mm、0.5mm、0.8mm、1.2mm；UHPC 修复材料在 12 个月的运行过程中，表面磨损深度仅为 1.2mm，磨损速率较为缓慢。这表明 UHPC 材料在实际工程应用中具有良好的抗冲磨性能，能够满足高流速泄洪洞的使用要求。

2. 裂缝发展情况分析

在 1 年的监测周期内，未发现修复区域出现新的裂缝，表明 UHPC 材料与基层混凝土之间具有良好的粘结性能和整体性，能够承受水流的冲击和振动作用。

3. 渗水量分析

修复前，泄洪洞的渗水量为 15.0L/min；修复后 1 个月，渗水量降至 0.5L/min；修复后 12 个月，渗水量略有增加，但仍仅为 0.8L/min。这表明 UHPC 材料具有优异的抗渗性能，能够有效阻止水流的渗漏，提高泄洪洞的整体性和安全性。

四、结论

本文通过对高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理及 UHPC 修复材料的原型试验研究，得出结论：高流速泄洪洞混凝土的冲磨破坏主要包括磨损破坏和空蚀破坏，其影响因素主要有水流参数、固体颗粒特性和混凝土自身性能。UHPC 材料具有高强度、高韧性、高耐久性和优异的抗冲磨性能，其相对磨耗率仅为普通 C40

混凝土的 25%，抗压强度和抗折强度分别是 C40 混凝土的 4.5 倍。原型试验结果表明，采用 UHPC 材料修复高流速泄洪洞混凝土结构，12 个月内表面磨损深度仅为 1.2mm，未出现裂缝，渗水量显著降低，修复效果良好。虽然 UHPC 材料的初始造价较高，但从长期运行成本和经济效益来看，其具有明显的优势。

参考文献

[1] 姜开明, 宋启港, 周剑, 等. 装配式波形钢腹板-UHPC组合梁抗弯试验研究 [J]. 桥梁建设, 2024, 54(06): 64-71.

[2] 周莉莉, 李倍安, 李沅睿, 等. UHPC超高性能混凝土在动物通道天桥的应用 [J]. 西部交通科技, 2024, (12): 65-68.

[3] 翁志英. UHPC嵌缝加固既有石墙体抗剪性能试验研究 [J]. 海峡科学, 2024, (12): 106-110.

[4] 黄煌煌, 滕乐, 高小建, 等. 流变与浇筑方式对 UHPC纤维分散和取向的影响 [J]. 材料导报, 2024, 38(24): 140-145.

[5] 徐周浩, 谢青海, 文哲鸣, 等. UHPC中空柱轴心受压性能有限元分析 [J]. 江苏海洋大学学报 (自然科学版), 2024, 33(04): 94-101.

[6] 米孝生, 陈海斌, 郭泰广. 基于 UHPC的隧道节点改造结构体系方案研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2024, (12): 262-265+28.

[7] 冯硕, 石新波, 王威, 等. UHPC-NSC界面黏结性能的评价方法 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26(11): 1220-1228.

[8] 徐中浩, 吴凤, 李黄敏, 等. CK-水工高性能抗冲磨材料在毛尔盖水电站泄洪洞缺陷修复中的应用 [C]// 土石坝技术 2020 年论文集. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司; 四川省大数据中心; , 2022: 145-150.

[9] 吴辉, 梁金松. 水电站泄洪洞洞身缺陷修复技术及应用 [J]. 水电站设计, 2022, 38(01): 91-96.

[10] 胡超, 周正清. 高流速泄洪洞洞身混凝土过流面修补材料选择及应用 [J]. 四川水利, 2021, (S2): 36-40.