

水利水电工程混凝土材料性能优化与应用研究

黄耀中

国家粮食和物资储备局江西局六七三处，江西 抚州 344200

摘要:水利水电工程对混凝土材料性能要求严格,传统混凝土在复杂水环境下存在强度发展缓慢、抗渗性能不足等问题,通过原材料优化、矿物掺合料配比与聚合物改性技术研究,显著提升混凝土综合性能,优化后混凝土 28 天抗压强度达到 58.6MPa,提高 32.4%;抗渗等级由 P8 提升至 P12,抗冻融循环次数增加 42.8%。测试结果表明,优化混凝土在力学性能和耐久性方面表现优异,工程应用验证显示施工适应性良好,质量控制效果显著,经济分析表明全生命周期成本节约 15-30%,投资回收期 8-12 年,为水利水电工程混凝土技术发展提供重要参考。

关键词: 水利水电工程;混凝土优化;矿物掺合料;耐久性能

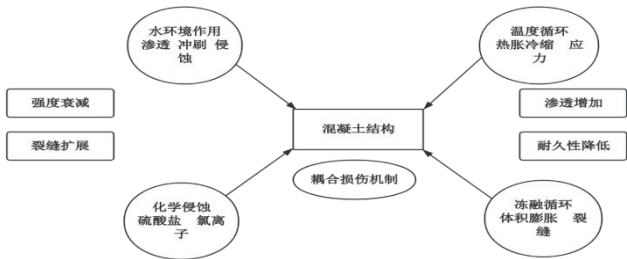
引言

水利水电工程承担防洪减灾、水资源配置、清洁能源供应等重要使命,结构安全性以及服役寿命直接关系到国计民生,混凝土作为主体建筑材料,长期处于高水压、温度变化与化学侵蚀等复杂环境,面临强度衰减、渗透增加与裂缝扩展等挑战,传统混凝土在孔隙结构与界面特性及化学稳定性方面存在缺陷,难以满足现代大型水利工程对高性能、长寿命、低维护的要求。随着工程规模扩大和环境复杂化,迫切需要通过材料组成优化与性能增强技术开发高性能混凝土材料,混凝土性能优化技术研究对提升工程质量、延长服役寿命与降低全生命周期成本具有重要意义。

1 水利水电工程混凝土材料性能影响因素

1.1 水利水电工程复杂环境因素影响

水利水电工程的混凝土结构长时间承受多重复杂环境因素综合作用,这些因素直接决定混凝土材料服役性能和使用寿命,水环境作为最主要影响因素,通过渗透、冲刷、侵蚀等机制对混凝土结构持续损伤,长期水位变化使混凝土处于干湿交替状态,加速孔隙结构劣化并降低材料密实和耐久性能,温度循环效应在水利水电工程中尤为突出。大体积混凝土因水化放热和环境温差产生温度应力形成微裂缝并提供水分渗透通道,化学侵蚀环境包含硫酸盐、氯离子、碳化等腐蚀介质,有害离子经扩散和对流传质进入混凝土内部^[1]。冻融循环是寒冷地区水利工程严峻挑战,孔隙水结冰膨胀内应力超混凝土抗拉强度时引发结构破坏,如图 1 所示各种环境因素相互耦合形成复合损伤机制,显著加速混凝土材料性能退化过程



1.2 混凝土材料关键性能指标

水利水电工程对混凝土材料性能提出全方位技术要求,这些关键性能指标构成材料设计与质量控制基础框架。抗压强度作为混凝土最基本力学性能指标,直接关系到结构承载能力和安全储备情况,大坝混凝土通常要求 28 天抗压强度达 30MPa 以上,特殊部位需达到 50MPa 甚至更高标准,抗拉强度和抗折强度对控制混凝土开裂有重要意义,水利结构在温度应力和约束条件下拉应力常接近或超其抗拉强度极限^[2]。

1.3 传统混凝土材料缺陷及成因

传统混凝土材料在水利水电复杂环境下有明显性能缺陷,问题根本成因在于材料组成和结构特性局限,强度发展滞后是传统混凝土主要缺陷之一,普通硅酸盐水泥水化反应速度相对缓慢,早期强度偏低难以满足快速施工和早期荷载要求。孔隙结构缺陷导致传统混凝土抗渗性能不足,其内部大量毛细孔和连通孔隙提供渗透通道,长期水压作用下渗透性会逐渐增加,界面过渡区薄弱是影响混凝土整体性能关键因素。

2 混凝土材料性能优化试验研究

2.1 原材料选择优化试验

土的和易性和强度,中砂(细度模数 2.3-3.0)提供良好的级配连续性,拌和用水质量控制严格按照相关标准执行,氯离子含量不超过 500mg/L,硫酸盐含量不超过 2700mg/L,确保化学稳定性,盐水泥在大体积混凝土应用中优势显著,水化热峰值比普通硅酸盐水泥降低 15 - 20%,能有效控制温度应力开裂风险。中热硅酸盐水泥兼顾强度发展与温控要求,适用于中等规模的水利结构工程,粗骨料的岩性、强度和粒形特征对混凝土性能影响重要,花岗岩、玄武岩等火成岩强度高且耐久性良好,石灰岩骨料虽强度稍低但与水泥浆体粘结性能优异,骨料最大粒径选择要平衡密实度和施工

性能,40mm 粒径保证密实同时利于泵送施工,细骨料的细度模数和颗粒级配影响混凝土和易性与强度。

2.2 矿物掺合料配比试验

矿物掺合料通过活性效应和填充效应共同作用提升混凝土综合性能,硅灰作为高活性掺合料能有效改善界面过渡区结构,硅灰掺量在 8-12% 范围内可显著提高抗压强度和抗渗性能,超过 15% 时工作性能会急剧恶化,粉煤灰的火山灰活性在后期能充分发挥,二级粉煤灰掺量 20-30% 时 28 天强度略有降低但 90 天强度超越基准混凝土。矿渣粉的潜在活性需要碱性环境来激发,掺量 15-25% 时与水泥可形成良好的复合胶凝体系,复合掺合料体系通过协同效应实现性能最优化,硅灰+粉煤灰复掺体系中硅灰提供早期强度、粉煤灰贡献后期强度发展。活性指数计算公式为:

$$AI = \frac{f_{cu,90}^{max}}{f_{cu,90}^{ref}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: AI 为活性指数(%); $f_{cu,90}^{mix}$ 为掺合料混凝土 90 天抗压强度(MPa); $f_{cu,90}^{ref}$ 为基准混凝土 90 天抗压强度(MPa),三元复掺体系在优化孔隙结构和提升耐久性方面表现突出,硅灰+粉煤灰+矿渣粉按适当比例复掺能实现从纳米级到微米级的多尺度填充效应^[3]。

2.3 聚合物改性技术试验

聚合物改性技术借助分子链桥接与成膜作用明显改善混凝土柔韧性和抗裂性能,丙烯酸酯类聚合物在水利工程里应用相当广泛,聚合物乳液掺量需控制在胶凝材料质量的 8 - 15% 范围之内,过量掺入将会影响水泥水化进程和强度发展,苯乙烯-丙烯酸酯共聚物具备优异抗渗性能和粘结强度,特别适合用于防渗要求严格的工程部位,环氧树脂改性混凝土在化学稳定性和抗腐蚀性能方面表现突出,但成本较高限制了其大规模应用。聚合物改性效果的定量评价采用改性效率系数:

$$\eta = \frac{P_{\text{polymer}} - P_{\text{control}}}{P_{\text{control}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： η 为改性效率系数（%）， P_{polymer} 为聚合物改性混凝土性能指标， P_{control} 为对照混凝土性能指标。纤维增强聚合物复合改性技术结合纤维抗拉增强作用和聚合物韧性改善效果，玄武岩纤维增强混凝土在抗冲磨及耐久性表现方面显著优于传统混凝土，纤维掺量 1.0%-1.5% 时效果最佳。

2.4 配合比设计优化试验

配合比设计优化是基于多目标约束条件的参数寻优过程，要统筹考虑强度、耐久性、工作性和经济性等多重要求，水胶比是控制强度和耐久性的关键参数，在 0.35-0.45 范围可

兼顾性能与施工需求，过低水胶比虽提高强度但影响水化和施工和易性，胶凝材料用量要满足最小用量要求，一般不少于 280kg/m³，高性能混凝土达 350-450kg/m³，砂率优化通过调节粗细骨料比例实现级配连续性，在 32-38% 范围能获得良好和易性与密实度，外加剂掺量依混凝土性能要求和施工条件确定，减水剂掺量为胶凝材料质量 0.8-2.0%，配合比优化用正交设计或响应面法建立性能指标与配比参数数学模型。图 2 展示多因素配合比优化响应面分析结果，反映参数对混凝土性能影响规律与交互效应，试配强度考虑施工变异性，按统计方法确定配制强度超越设计强度置信度，质量控制用统计过程控制方法建立质量控制图监控混凝土性能稳定性。

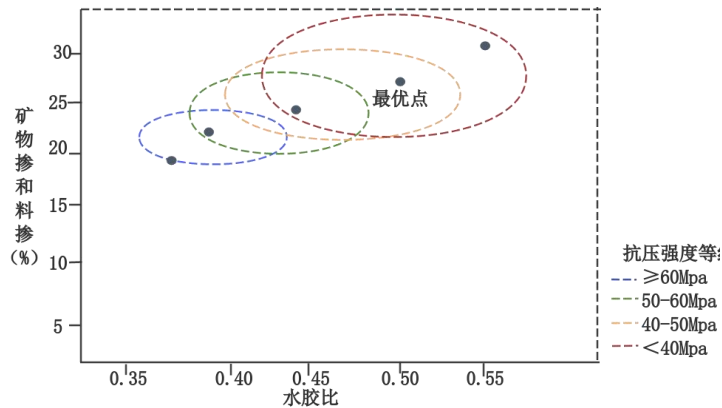


图 2 配合比多因素优化响应面分析图

3 优化混凝土性能测试及工程应用

3.1 力学性能测试分析

优化后的混凝土力学性能有显著提升，抗压强度在矿物掺和料与聚合物改性协同作用下大幅改善，28 天抗压强度达 50-65MPa 较传统提高 20-35% 且强度早期快后期稳，抗拉和抗折强度改善更显著，抗拉提升 30-45% 缓解抗拉不足缺陷，弹性模量优化体现在数值适中变形协调好，保证刚度又避免脆性破坏。强度发展时变特性遵循指数衰减模型：

$$f_t = f_{28}(1 - e^{-\alpha t^\beta}) \quad (3)$$

式中： f_t 为 t 龄期强度（MPa）， f_{28} 为 28 天标准强度（MPa）， $e^{-\alpha t^\beta}$ 为材料常数。疲劳和长期强度测试显示优化混凝土循环荷载强度保持率超 85%、长期衰减系数在 5% 内，动态力学性能如冲击韧性和动弹性模量明显提升适用于动荷载水利结构，应力-应变曲线峰值应变增加下降段平缓表明材料韧性改善。

3.2 耐久性能试验评价

耐久性能是水利水电工程混凝土核心指标，优化后的混凝土在多项耐久性测试中有卓越性能优势，抗渗性能提升显著，抗渗等级从传统 P6-P8 提升到 P10- P12，渗透系数降低

2-3 个数量级可阻止水分和有害离子侵入，抗冻融性能经快速冻融循环测试验证，300 次冻融循环后质量损失率控制在 2%内、相对动弹性模量超 85%优于规范 60%标准，抗碳化性能测试中碳化深度明显减小，28 天碳化深度较基准混凝土降低 40-60%可为钢筋提供持久碱性保护环境。抗氯离子渗透能力用电通量法和氯离子扩散系数测定，电通量值降至 1000 - 1500 库仑、氯离子扩散系数减至 $2-5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ，抗硫酸盐侵蚀性能在 5%硫酸钠溶液浸泡 180 天后强度损失率小于 10%、线性膨胀率控制在 0.05%内，抗化学侵蚀能力提升得益于孔隙结构优化和界面过渡区致密化阻断有害离子传输路径。

3.3 工程应用效果验证

优化混凝土在大型水利水电工程应用效果充分验证，施工工艺适应性与结构性能达预期目标。泵送性能测试显示，混凝土在 200m 垂直泵送高度仍保持良好流动性与均匀性，坍落度损失控制在 30mm/h 以内，振捣密实效果经超声波检测验证，密实度超 98%且无明显蜂窝麻面与离析现象，温控效果在大体积混凝土浇筑中突出，中心温度峰值较传统混凝土降 8-12℃，温度应力有效控制。典型工程应用案例统计分析表明，优化混凝土在抗压强度等关键指标上显著优于设计要求，长期监测数据显示结构变形控制好，裂缝发展有效抑制且渗漏量在允许范围，施工质量控制用信息化管理系统，对混凝土关键参数实现全过程监控，现场质量检测多手段验证确保结构质量可靠^[4]。

表 1 优化混凝土典型工程应用效果对比

工程名称	工程类型	抗压强度 (MPa)		抗渗等级		抗冻融次数		综合评价
		设计要求	实测值	设计要求	实测值	设计要求	实测值	
某大型水电站大坝	重力坝	C30	45.2	P8	P12	200	285	优秀
某水利枢纽船闸	船闸结构	C35	52.8	P10	P12	250	320	优秀
某抽水蓄能电站厂房	地下厂房	C40	58.6	P8	P10	200	275	良好
某引水隧洞衬砌	引水隧洞	C25	38.4	P6	P10	150	220	良好
某水闸闸墩	水闸工程	C30	43.7	P8	P11	200	265	良好
某堤防护岸工程	护岸结构	C20	32.1	P6	P8	100	155	合格

3.4 经济效益综合评估

经济效益分析从全生命周期成本角度评价优化混凝土技术经济合理性，综合考量初期投资、运行维护、社会效益等多重因素，材料成本增量主要源于高性能外加剂和矿物掺合料，单方混凝土成本增加 15-25%，不过通过减少水泥用量和优化级配设计将成本增幅控制在合理范围，施工成本方面，优化混凝土良好工作性能提高施工效率、缩短工期，使人工成本和机械成本相应降低。质量成本效益体现在缺陷率降低、返工减少、质量控制成本下降等方面，综合质量成本降低 10-20%，运行维护成本节约效果更显著，因耐久性能大幅提升，

结构维修频次明显减少，预计维护成本降低 30-50%，按等效年成本计算使用寿命延长带来的经济效益。考虑货币时间价值和通胀因素，全生命周期成本节约 15-30%，社会效益包括减少环境污染、节约天然资源、提高工程安全性等，虽难准确量化但意义重大，风险成本分析表明优化混凝土显著降低工程失效风险，避免巨额损失赔偿和社会影响成本^[5]。

结语

混凝土材料性能优化通过多维度技术集成，有效解决传统混凝土技术难题，原材料优化为性能提升奠定基础，矿物掺合料技术实现孔隙结构精细调控，聚合物改性显著改善韧性

和抗裂性能,配合比优化确保各项指标协调发展,测试验证了优化效果显著性,工程实践证明技术成熟实用。经济分析表明技术具有良好可行性和社会效益,研究成果为水利水电工程

混凝土技术进步提供重要支撑,具有广泛推广价值,未来应深化改性机理研究,发展环保高效技术,建立完善评价体系,推动混凝土材料技术持续创新发展。

参考文献

- [1]代存胜.混凝土施工技术在水利水电施工中的应用[J].大众标准化,2025,(08):50-52.
- [2]宋艳,侯晓丽,郭利霞.基于纤维增强混凝土的水利工程耐久性与抗裂性能研究[J].精细化工中间体,2025,55(02):55-59.
- [3]石硕.某水利水电工程 C30 大流态泵送混凝土性能研究[J].水电站机电技术,2021,44(07):71-73+82.
- [4]王文峰.水利工程中聚合物混凝土力学性能试验与实践分析[J].工程技术研究,2020,5(21):131-132.
- [5]刘书明,张汉云,蒋才,等.水工结构破坏性动力模型试验仿真混凝土性能研究[J].水利水电技术,2020,51(03):61-66.