

水利工程建设中混凝土试验检测及其质量控制

李作磊

陕西秦海检测科技有限公司 陕西 咸阳 712042

摘要：水利工程承担防洪、灌溉、供水、发电等综合功能，其混凝土结构长期承受水荷载、温度变化、冻融循环和冲刷磨蚀等复杂作用，质量要求远高于一般建筑工程。试验检测作为质量控制的基石，贯穿于原材料进场、拌合浇筑和验收养护全过程。本文系统梳理了水利工程混凝土的质量特性与检测需求，从原材料检测、施工过程检测和非破损检测几个维度构建了完整的试验检测体系，进而提出涵盖事前预防、事中控制和事后验收的全过程质量控制框架。研究旨在为水利工程混凝土质量管控提供系统性的方法论参考，推动检测工作从“被动验证”向“主动控制”转变。

关键词：水利工程；混凝土；试验检测；质量控制；耐久性；全过程管理

引言

水利工程混凝土长期处于浸水、冻融、冲刷等严苛环境，对耐久性要求极高，其质量直接决定工程安全与寿命。当前部分工程出现裂缝、渗漏等问题，多源于混凝土质量失控或检测把关不严。试验检测作为质量控制核心，应覆盖原材料、拌合物及硬化混凝土性能，为配合比优化与施工调控提供依据。然而，实践中常存在定位模糊、方法不当、频次不足及数据管理粗放等问题，使检测流于形式，难以发挥过程指导作用。本文强调从水利工程特殊性出发，构建科学的试验检测技术体系，厘清检测与质量控制的逻辑关系，推动检测由“事后报告”转向“过程导航”，实现全过程闭环管理，为提升水工混凝土耐久性与工程可靠性提供支撑。

1 水利工程混凝土质量特性与检测需求

1.1 水利工程混凝土的特殊性

水利工程混凝土面临的工作条件具有显著特殊性。首先，大体积混凝土结构（如重力坝、拱坝）体量巨大，水泥水化热引起的温度应力是导致裂缝的主要原因，因此对混凝土的绝热温升、热传导系数和温度变形性能有严格限制。其次，水工结构长期与水接触，渗流压力可能引发溶蚀和钢筋锈蚀，抗渗等级通常要求达到W6以上，重要工程甚至要求W12。再次，寒冷地区的水工混凝土需经受每年数十次至上百次冻融循环，抗冻等级要求F100至F300不等。此外，泄水建筑物过流面承受含沙高速水流的冲刷磨蚀，对抗冲磨强度有特殊指标。这些特殊性决定了水利工程混凝土不能简单套用房建标准，而必须建立针对性的检测参数和质量指标体系。

1.2 质量控制总体目标与检测依据

水利工程混凝土质量控制的总体目标是确保结构在

设计使用年限内安全、适用、耐久，具体可分解为强度合格、耐久性达标、体积稳定和外观完好四个子目标。为实现这些目标，试验检测工作需覆盖从原材料到成品的全链条，并将检测结果与设计指标、规范限值进行比对，判定合格性，同时分析偏差趋势以预警质量波动。检测依据主要包括《水工混凝土试验规程》（SL/T352）、《水工混凝土施工规范》（SL677）以及《混凝土质量控制标准》（GB50164）等。这些标准规定了各类检测项目的试验方法、取样频率和评定规则，是检测工作规范化的基础。

1.3 检测在质量控制中的定位与作用

在质量控制体系中，试验检测承担“眼睛”和“标尺”双重角色。作为“眼睛”，检测通过数据反映原材料质量、拌合均匀性、浇筑密实度和养护效果，使隐含的质量状态显性化；作为“标尺”，检测结果与标准值比较，判断质量是否合格，并为偏差纠正提供定量依据^[1]。检测的作用不仅在于最终验收，更在于过程监控——通过动态检测及时发现配合比执行偏差、骨料含水率变化或外加剂失效等问题，指导施工调整，避免质量缺陷的积累和扩大。因此，检测活动应贯穿施工全过程，且应前置至材料源头和后延至竣工后的长期监测。

2 混凝土原材料的试验检测

2.1 水泥的检测指标体系

水泥是混凝土中最重要的胶凝材料，其品种、强度等级和安定性直接影响混凝土强度和耐久性。水利工程常用硅酸盐水泥或中热硅酸盐水泥，检测项目主要包括：细度（筛余或比表面积）、标准稠度用水量、凝结时间（初凝不早于45分钟，终凝不迟于10小时）、安定性（沸煮法合格）、胶砂强度（3天和28天抗压抗折）以

及水化热（对大体积混凝土尤为重要）。每批水泥进场应核查出厂检验报告，并按同厂家、同品种、同强度等级、同批号进行抽样复验，复验不合格者严禁用于主体工程。检测中应特别注意安定性不合格或强度富余不足的水泥，这类水泥即使勉强使用也会留下严重隐患。

2.2 细骨料与粗骨料的检测与控制

骨料占混凝土体积的60%~80%，其级配、含泥量、坚固性和有害物质含量对混凝土工作性和耐久性影响显著。细骨料（砂）的检测项目包括：颗粒级配（细度模数控制在中砂范围）、含泥量（不超过3%）、泥块含量、云母含量、轻物质含量以及氯离子含量（对钢筋混凝土有严格要求）。粗骨料（碎石或卵石）检测包括：最大粒径与级配、含泥量（不超过1%）、泥块含量、针片状颗粒含量（不超过15%）、压碎指标和坚固性（硫酸钠溶液循环试验）。水利工程还特别关注骨料的碱活性，若采用碱活性骨料，需配合低碱水泥或掺加活性掺合料以抑制碱骨料反应。骨料堆放场地应硬化并设置分级隔离，避免混料和泥土污染，且每批进料均须检测含水率，用以调整施工配合比。

2.3 掺合料与外加剂的质量检验

掺合料（粉煤灰、矿渣粉、硅灰等）和外加剂（减水剂、引气剂、缓凝剂等）是现代高性能混凝土不可或缺的组分，但其质量波动较大。粉煤灰的检测重点为细度、需水量比、烧失量和三氧化硫含量，其中烧失量反映未燃碳含量，过高会影响减水剂吸附效果。外加剂需检验减水率、含气量、泌水率比、凝结时间差和抗压强度比等指标，且应通过与工程实际水泥和骨料的相容性试验验证其适应性^[2]。水利工程特别强调引气剂的起泡稳定性和气泡间距系数，因为合理的气泡结构是抗冻性的重要保证。掺合料和外加剂的检测频率应按规范批次执行，且应留置封存样品以备争议仲裁。

2.4 拌和用水的质量要求

拌和用水看似简单，但水质不达标会影响水泥水化和钢筋锈蚀。检测指标包括pH值、不溶物、可溶物、氯化物、硫酸盐和碱含量，应满足《混凝土用水标准》的要求。尤其当采用循环水或地表水时，需定期检测有机物和悬浮物含量。海水严禁用于钢筋混凝土和预应力混凝土。水质检测应至少每季度一次，水源变更时须重新检验。对于饮用水，可适当简化检测手续。

3 施工过程中的混凝土试验检测

3.1 拌合物性能的现场检测

施工过程中的检测以拌合物性能为主，因其反映混凝土的即时质量状况。坍落度检测是最常规的项目，每

班至少检测两次，且每浇筑100立方米或每工作班不少于一次，当原材料或气候发生变化时应加密检测。含气量检测对掺引气剂的混凝土尤为重要，应采用气压法进行现场测定，含气量偏差不得超过设计值的 $\pm 0.5\%$ 。此外，还应检测泌水率、表观密度和凝结时间，其中凝结时间可帮助判断是否发生速凝或缓凝异常，以及确定抹面和养护时机。所有拌合物检测应在取样后15分钟内完成，以保证结果代表性。

3.2 硬化混凝土强度检测

强度是混凝土质量验收的核心指标。强度检测采用标准养护试件和同条件养护试件两种方式。标准养护试件按规范尺寸（150mm立方体或圆柱体）制作，在标准温湿度条件下养护至规定龄期后测试抗压强度，用于评定配合比是否满足设计强度等级。同条件养护试件置于结构附近接受与结构相同的温度和湿度环境，用于确定拆模、张拉或承载时机。取样频率按《水工混凝土施工规范》执行，如每100立方米或每浇筑块至少取一组^[3]。强度评定采用统计方法，当样本数较多时按标准差法评定，样本较少时采用非统计法，评定结论应包含平均强度、最小值及合格判定系数，只有统计合格的结构部位方予验收。

3.3 耐久性专项检测

耐久性检测在水利工程中具有特殊地位。抗渗试验采用逐级加压法，测定混凝土能承受的最大水压力，渗水高度法也常用来评价抗渗均匀性。抗冻试验采用快冻法，以相对动弹性模量和质量损失率作为评定指标，当相对动弹性模量下降至60%或质量损失率达5%时判定为冻融破坏。抗冲磨试验以单位面积质量损失表征抗冲磨能力。这些耐久性指标通常在设计龄期（如90天或180天）进行检测，因为后期强度增长对耐久性有积极影响。耐久性检测的频率较强度检测略低，但对重要部位和关键结构应每个配合比或每2000立方米至少检测一组。

3.4 非破损检测技术的应用

除破坏性检测外，非破损检测在水利工程混凝土质量检验中日益受到重视。回弹法通过测量混凝土表面硬度推定强度，操作快捷，可用于大范围普查，但受碳化深度和表面湿度影响，需建立地区测强曲线。超声脉冲法通过测量声速判断混凝土内部密实性和均匀性，可检测空洞、裂缝等内部缺陷。超声回弹综合法结合两种参数，可提高推定精度。此外，钻芯法虽属半破损方法，但能直接反映结构实体强度，常用于有争议部位的复核。非破损检测不能完全替代标准试件检测，但可作为补充手段用于过程监控和长期安全评估，尤其适用于已

建结构的定期检查。

4 全过程质量控制体系与运行机制

4.1 事前控制：原材料进场检验与配合比审批

事前控制是质量管理的源头。所有进场原材料必须附有质量合格证书和出厂检验报告，进场后按规范频次进行抽样复验，复验合格后方可入库使用。水泥、外加剂等应分批次标识，避免混用和过期。配合比应提前至少28天完成设计和验证，并报送监理工程师审批，审批通过后方可用于施工。此外，还应审查施工单位的试验室资质、检测设备检定证书和检测人员资格证书，确保检测能力满足要求。事前控制的核心是“提前介入、预防为主”，将质量隐患消灭在施工之前。

4.2 事中控制：施工参数监控与动态检测

事中控制贯穿拌合、运输、浇筑、振捣和养护各环节。拌合楼应实时监控称量系统的准确性，每班检查计量误差，骨料含水率应根据天气变化每2至4小时测定一次，及时调整用水量。运输过程中应防止离析和水分蒸发，浇筑时控制卸料高度不大于2m，分层厚度不超过振捣器有效长度，振捣应避免过振或漏振^[4]。养护方式（喷雾、覆盖或流水养护）和养护时间应依据气温和水泥品种确定，并记录养护温度。现场检测按前述频率进行，若发现坍落度或含气量异常，应立即停止浇筑，查明原因并调整配合比，已浇筑的不合格混凝土须按方案处理。

4.3 事后控制：验收检验与缺陷处理

事后控制以验收检验为核心，包括结构实体的外形尺寸检查、强度验收和耐久性验收。强度验收按统计方法评定，若评定不合格，应委托第三方检测机构进行钻芯取样或超声回弹复核。对于裂缝、蜂窝、麻面等外观缺陷，需测量其深度、宽度和面积，按缺陷严重程度分类处理：轻微缺陷可采用修补材料封闭，严重缺陷需凿除后重新浇筑。耐久性项目如抗渗抗冻不满足设计要求时，应分析原因并采取表面涂层、灌浆等补救措施，但所有处理方案均须经设计和监理认可。事后控制还应包括竣工资料的整理归档，形成完整的检测报告和质量评价结论。

4.4 质量追溯与信息化管理

传统人工记录方式难以满足全链条追溯需求，信息化管理成为趋势。建议建立混凝土质量数据库，将原材料检验编号、配合比参数、每盘生产记录、现场检测数据、养护温度记录和验收评定结果进行编码关联，形成“一物一码”的数字化档案。利用物联网技术，可在拌合站安装传感器自动采集称量数据和含水率，并上传至云平台，实现远程监控和异常报警。信息化系统还应具备统计分析功能，自动计算强度变异系数、合格率趋势图，为质量动态评估提供决策支持。质量追溯机制在发生质量争议时尤其重要，可快速定位问题批次和责任环节。

结语

水利混凝土质量控制是复杂系统工程，试验检测是贯穿始终的技术主线。本文基于水利混凝土的特殊性，系统阐述原材料检测、配合比验证、施工过程检测及非破损检测等关键技术，并构建“事前—事中—事后”全流程质量控制框架。强调检测不应仅满足合规要求，而应作为动态反馈与持续改进的核心驱动力，唯有嵌入生产流程，确保频次充足、操作规范、数据真实、分析深入，方能真正保障质量。面对工程大型化、结构复杂化趋势，未来检测需向智能化、自动化、标准化发展，在线监测、大数据与AI等新技术将提升效率与精度。同时，亟需统一检测标准，推动检测与设计、施工、运维深度融合，以技术精进与管理从严筑牢水利工程混凝土质量根基，保障国家水安全基础设施长效可靠运行。

参考文献

- [1] 王志强,李建伟,张洪.水工混凝土耐久性检测方法及其应用研究进展[J].水利水电技术,2022,53(6):45-54.
- [2] 陈明,刘涛,杨华.大体积混凝土配合比设计中的热力学参数控制[J].水力发电学报,2023,42(4):78-87.
- [3] 赵立新,孙晓峰,周敏.骨料特性对水工混凝土抗冻性能影响的试验研究[J].建筑材料学报,2021,24(3):512-519.
- [4] 黄国强,刘晓东,林峰.掺合料与外加剂协同作用下水工混凝土抗渗性能提升策略[J].混凝土,2024,40(2):122-129.