

公路工程混凝土原材料试验检测关键点及质量控制策略

张杭

新昌县连峰检测技术有限公司，浙江绍兴，312500；

摘要：公路工程混凝土原材料的质量直接影响结构安全与耐久性，本文系统梳理了水泥、骨料及外加剂等关键材料的试验检测要点，在质量控制策略上提出从采购阶段的供应商审查与批次抽样，到进场检验的台账管理与留样复测，再到储存环节的防潮分级管控，形成全流程闭环管理体系，基于案例分析及信息化技术应用，强调动态监控与数据驱动在提升质量控制效能中的作用，为公路工程混凝土原材料的标准化提供理论支撑与实践参考。

关键词：公路工程；混凝土原材料；试验检测

DOI：10.69979/3029-2727.25.03.006

引言

混凝土作为公路工程的核心材料，其性能取决于原材料的质量稳定性，随着交通荷载与环境侵蚀的加剧，传统粗放式管理已难以满足长寿命路面与桥梁的建设需求，现有研究多聚焦单一材料检测技术，缺乏系统性质量控制框架且对信息化技术的融合应用探索不足，本文基于现行规范与工程实践，从检测要点与管控策略双维度切入，构建覆盖采购、检验、储存及生产全链条的质量控制体系，旨在为提升混凝土工程质量提供科学方法论，推动行业从经验管理向数据化、精细化转型。

1 混凝土原材料试验检测关键点

1.1 水泥

水泥作为混凝土的胶凝材料，其性能直接影响结构的强度与耐久性，检测需围绕物理性能与化学稳定性展开，其中物理性能检测的核心在于细度、凝结时间及强度等级的精准控制，细度通过比表面积测定或筛余法评估，其直接影响水泥水化速率与早期强度发展，凝结时间则需结合标准稠度用水量试验，确保初凝与终凝时间符合工程需求，避免施工过程中因凝结异常导致的开裂或泌水，强度等级的验证需依托抗压与抗折试验，试件养护条件（如水养箱水温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ）的严格遵循是结果可靠性的基础，尤其在高温或低温环境下，需额外考虑养护条件对强度发展的非线性影响。另一方面，化学成分检测需重点关注氯离子与碱含量的潜在风险，氯离子超标可能引发钢筋锈蚀，检测需采用硝酸银滴定法或电位滴定法并结合水泥来源针对性加强筛查频率，碱含量则需通过火焰光度法测定，若水泥中碱（ $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ ）超过 0.6%，在骨料存在碱活性成分时可能诱发碱骨料反应，导致混凝土膨胀开裂，例如：某滨海公路项

目曾因水泥氯离子含量未严格检测，通车三年后出现梁体锈胀裂缝，后期修复成本远超初期管控投入，此类案例凸显了化学指标检测在预防长期病害中的必要性^[1]。

1.2 骨料（粗、细骨料）

骨料占混凝土体积的 60%–75%，其性能检测需兼顾力学特性与有害物质控制，对于粗骨料，粒径级配与压碎值的检测是确保混凝土密实度和抗压能力的关键，级配检测需通过筛分试验绘制连续或间断曲线，优化空隙率以减少水泥用量并提升抗渗性，压碎值试验则模拟骨料在荷载下的破碎程度，若骨料母岩强度不足（如风化岩或页岩），需通过多次破碎工艺改善粒形。细骨料的检测重点在于细度模数与有害物质含量，细度模数通过标准筛分确定，中砂（细度模数 2.3–3.0）最适于配制泵送混凝土，而细砂或粗砂需调整配合比以避免离析或泌水，含泥量检测需采用筛洗法，超过 3% 的泥分将显著削弱水泥浆体与骨料界面粘结力，云母含量则需借助显微镜观察，其层状结构易导致应力集中，特殊环境下，如北方冻融地区，需增加坚固性试验（硫酸钠溶液浸泡法），评估骨料抵抗环境侵蚀的能力；对碱活性骨料，需通过岩相法或快速砂浆棒法判定活性成分（如蛋白石、玉髓），并采取掺加矿物掺合料或低碱水泥等抑制措施。

1.3 外加剂

外加剂的检测需以性能验证与适应性评价为核心，确保其与水泥、骨料的协同作用满足工程需求，其中关键功能性指标的检测是质量控制的基础，减水剂的减水率需通过净浆流动度试验对比基准样与掺加样，高效减水剂要求减水率 $\geq 20\%$ ；含气量检测则需借助气压法或体积法，引气剂的含气量宜控制在 3%–5%，过高会降低强度，过低则无法有效改善抗冻性，凝结时间差需结合

水泥品种评估,缓凝剂在高温季节可延缓凝结 4~6 小时,但过量掺加可能导致强度倒缩,需通过贯入阻力仪动态监测初凝与终凝节点。除此之外,外加剂与胶材的相容性检测是避免工程事故的关键环节,相容性试验需模拟实际生产条件,通过净浆流动度经时损失、砂浆减水率保留值等指标判定外加剂与水泥的适应性,例如:某项目使用聚羧酸减水剂时,因水泥中 C_3A 含量过高导致流动度半小时内损失 50%,后通过调整缓凝组分掺量或更换水泥品种解决。

1.4 掺合料

掺合料作为混凝土的改性组分,其性能检测需围绕活性效应与有害成分控制展开,以平衡经济性与耐久性需求,对于粉煤灰,需水量比与烧失量是评价其品质的核心指标,需水量比通过对比基准胶砂与掺粉煤灰胶砂的流动度确定,Ⅰ级粉煤灰的需水量比需 $\leq 95\%$,若检测值偏高,表明其多孔结构或未燃碳含量较高,将增加混凝土实际用水量,导致强度降低或收缩加剧;烧失量检测需采用高温灼烧法,超过 8%的烧失量意味着粉煤灰中残碳含量超标,将大幅削弱界面粘结力,还可能吸附外加剂分子造成坍落度异常损失。除此之外,矿渣粉的活性指数与比表面积检测则是保障其胶凝贡献的关键,活性指数需通过对比矿渣粉与基准水泥的 7 天、28 天抗压强度比进行评价,S95 级矿渣粉的 28 天活性指数需 $\geq 95\%$,若检测结果不达标,表明其玻璃体含量不足或粉磨工艺存在缺陷,无法有效发挥火山灰效应;比表面积检测需采用勃氏透气法,控制在 $400\sim 500\text{ m}^2/\text{kg}$ 范围内,过低的比表面积会延缓水化反应速率,影响早期强度发展,过高则易加剧混凝土黏度,不利于泵送施工。

2 混凝土原材料的质量控制策略

2.1 采购阶段控制

在公路工程原材料的采购管理中,供应商资质审查与材料认证是确保质量源头可控的核心环节,供应商的资质审查需从生产资质、质量管理能力及历史合作表现三方面展开,生产资质需核查企业是否持有有效的生产许可证、环境评估认证及行业准入证明,这些文件是供应商合法经营的基础要件,质量管理能力则需评估其是否通过 ISO 9001 等国际标准认证并重点考察实验室设备配置、检测人员资质及内部质量控制流程的规范性,例如:某高速公路项目曾因未严格审查某水泥厂的环境评估报告,导致施工后期发现其采用高污染工艺,被迫更换供应商并延误工期。针对水泥、外加剂等关键材料,必须要求供应商提供与工程需求匹配的第三方检测报告,

如水泥的氯离子含量检测需符合 GB/T 176 标准,外加剂的减水率需满足 GB 8076 要求,以此规避技术参数虚标或检测数据造假的风险。除此之外,批次抽样与进场验收流程的规范化设计是采购阶段质量控制的另一支柱,抽样方法需依据材料的物理形态与检测目的科学选择,对于袋装水泥,可采用系统抽样法,按固定间隔从不同堆层抽取样本;对于散装骨料,则需采用分层抽样法,在运输车辆的前、中、后部多点取样,确保样本代表整批材料的真实状态,进场验收需建立快速检测机制,例如采用自动凝结时间测定仪对水泥进行初凝检测,20 分钟内即可获得结果;骨料含泥量则通过筛洗法结合电子天平快速测定,避免因检测滞后影响施工进度,对于检测结果临界或异常的批次需启动“双盲复检”程序,即由不同检测人员使用备用样品独立操作并通过统计学方法判定结果显著性,这种分层递进的验收策略能大幅提升检测效率,且可最大限度降低误判风险^[2]。

2.2 进场检验管理

检测台账与留样制度的系统性构建是进场检验管理的基石,检测台账需实现全要素覆盖与全流程追溯,每批材料的检测数据除包含常规项目(如水泥强度、骨料级配)外,还需记录环境温湿度、检测仪器编号及操作人员签名,形成完整的质量追溯链,电子化台账管理系统可通过区块链技术对数据进行加密存储与时间戳标记,防止后期篡改,例如:某特大桥项目采用 RFID 芯片绑定材料样本,实现从进场到使用的全程数据自动采集,显著提升了管理透明度。留样管理则需遵循“分类保存、定期复测”原则,水泥留样需密封于防潮容器中,存放于恒温恒湿库房并在 28 天、90 天等关键龄期进行复测,验证强度发展规律,液态外加剂的留样需避光保存,每月检测 pH 值及有效成分含量,防止因化学降解导致性能衰退,这种动态留样机制能够为质量争议提供不可篡改的实物证据。另一方面,不合格材料的闭环处置机制是拦截质量风险的关键防线,当检测发现材料不合格时,需立即启动“物理隔离-技术评估-溯源整改”三级响应程序,物理隔离要求将问题材料转移至独立封锁区域,并悬挂醒目标识牌来避免误用,技术评估需组织由材料工程师、检测人员及供应商代表组成的专项小组,通过 X 射线衍射、扫描电镜等微观分析手段定位问题根源,例如:某项目骨料碱活性超标事件中,通过岩相分析发现供应商混入了含蛋白石的碎石,最终追溯至采石场爆破分选工艺缺陷。对于系统性风险(如同一供应商连续三批材料不合格),需启动供应链重构程序,包括重新招标、调整技术规格书或引入替代材料,

同时所有不合格案例需录入质量管理数据库,通过数据挖掘识别高频风险点,如冬季外加剂结晶问题,进而在后续采购合同中增设针对性条款^[3]。

2.3 储存与保管控制

水泥防潮与外加剂稳定性控制是储存管理的首要任务,水泥仓储需采用“双层防护”策略,外层为全封闭钢结构仓体,内层铺设高分子防潮膜并配备除湿机将相对湿度控制在 55% 以下,对于拆封后的水泥应采用氮气置换包装技术,即在开封后立即向袋内注入惰性气体并密封,延缓水泥与空气中水分的反应,例如:某跨海大桥工程通过此法将水泥储存周期从常规的 45 天延长至 90 天,降低了高频补货带来的质量波动风险。液态外加剂的储存则需建立“温度-光照”双控体系,在高温地区,储罐需加装循环水冷系统,使温度稳定在 5-30℃;光敏性外加剂(如萘系减水剂)需使用黑色遮光罐储存,避免紫外线引发分子链断裂,基于物联网传感器实时监控储存参数自动触发预警并启动应急调控,如检测到温度超限时自动启动制冷机组。除此之外,骨料堆场的分级分区管理是保障材料均质性的核心措施,粗骨料堆放需实施“三维管控”,水平方向按粒径(如 5-10mm、10-20mm)分仓,垂直方向采用斜坡式堆积(倾角 $\leq 30^\circ$)防止离析,空间上设置 GPS 定位系统监控堆位坐标,防止机械作业时混仓,某智能化拌合站利用激光扫描仪自动识别骨料粒径分布并与配合比设计系统联动,实时调整配料参数,细骨料管理需构建“防尘-排水-防污”一体化体系,堆场顶部安装喷雾降尘装置,底部铺设卵石滤层与盲沟排水系统,侧方设置混凝土挡墙防止泥土侵入,在雨季需采用防水篷布全覆盖,并通过含水率在线检测仪动态调整混凝土用水量,这种精细化管理可将骨料含水率波动控制在 $\pm 0.3\%$ 以内,显著提升混凝土工作性稳定性^[4]。

2.4 生产过程动态监控

混凝土生产过程中的动态调整能力是质量控制的核心竞争力,其中配合比设计与验证需实现科学性与灵活性的统一,实验室应根据原材料特性(如粉煤灰需水量比、骨料吸水率)设计基准配合比并通过试拌验证其工作性与强度,在实际生产中需建立配合比动态调整机制,例如根据砂石含水率变化实时修正用水量,或依据气温调整外加剂掺量。另一方面,实时检测拌合物性能是确保生产一致性的必要手段,坍落度、含气量等指标需每 2 小时检测一次并依据结果微调搅拌参数,对于异常数据(如坍落度骤降)需立即追溯原因(如骨料含水率突变或计量设备故障),另外可采用红外光谱仪等快

速检测设备,对拌合物的氯离子含量、碱含量进行在线监测,避免因原材料波动引发耐久性问题,这种“检测-反馈-调整”的闭环模式能够显著提升生产过程的可控性。

2.5 信息化技术应用

信息化技术的深度融合为质量控制提供了新的范式,试验数据管理系统(LIMS)的部署可实现检测流程的数字化重构,LIMS 可将原材料检测、配合比设计、生产监控等环节的数据自动关联并生成可视化质量趋势图,例如:通过统计水泥 3 天强度与 28 天强度的相关性,可提前预判强度发展规律、优化养护方案,系统还可设置自动预警阈值,当检测值偏离控制范围时触发警报,督促相关人员介入处理。除此之外,大数据分析技术能够挖掘质量控制的潜在规律,通过整合历史工程数据,可建立材料性能-环境参数-工程表现的关联模型,例如:分析不同地域骨料碱活性与混凝土开裂概率的关系,可为新项目选址提供参考,而机器学习算法则可对海量检测数据进行聚类分析,识别异常模式(如某供应商水泥强度标准差持续偏大),为供应链优化提供数据支撑。这种从“经验驱动”到“数据驱动”的转变标志着质量控制进入了智能化新阶段。

3 结束语

公路工程混凝土原材料的质量控制是一项贯穿设计、施工与运维的系统工程,本文通过明确水泥、骨料及外加剂的检测关键指标,建立从源头采购到动态生产的全周期管理策略,揭示了规范化检测与精细化管控对工程耐久性的核心价值,随着绿色低碳材料的推广与人工智能技术的深度融合,原材料质量控制将向智能化、标准化方向加速演进,建议进一步整合跨学科技术资源,推动质量控制从被动纠偏转向主动预防,为交通基础设施的长寿命发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李怀金. 公路工程水泥混凝土原材料试验检测及质量控制[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(11): 111-113+118.
- [2] 陈正. 公路工程水泥混凝土原材料试验检测方法 with 质量保障措施[J]. 散装水泥, 2024, (04): 205-207.
- [3] 李梅芳. 公路工程中水泥混凝土原材料试验检测技术[J]. 运输经理世界, 2024, (22): 153-155.
- [4] 王峥. 公路工程水泥混凝土原材料的试验检测及质量控制[J]. 交通世界, 2024, (19): 98-100.