

公路工程水泥混凝土原材料试验检测方法与质量保障措施

张丽华

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要:在现代公路工程建设中,水泥混凝土作为核心结构材料,其性能稳定性直接决定了道路工程的安全性、耐久性与服役寿命。而混凝土性能的优劣,从根本上取决于其组成原材料的质量控制水平。本文立足于工程实践视角,系统梳理了公路工程中水泥、集料、拌合水、外加剂及矿物掺合料等五大类原材料的关键技术指标及其对应的标准化试验检测流程,并重点剖析了当前原材料质量控制中存在的典型问题。在此基础上,创新性地提出“预防—监控—追溯—反馈”四位一体的全过程质量保障体系,强调从供应链源头到施工现场的闭环管理,并引入信息化、智能化手段提升质量管控效能。研究表明,唯有将科学检测、规范管理和技术创新深度融合,方能有效规避原材料质量风险,为高质量公路建设提供坚实支撑。

关键词:公路工程;水泥混凝土;原材料;试验检测;质量控制;全过程管理;信息化

引言

随着“交通强国”战略的深入推进,我国公路建设正由“规模扩张”向“品质提升”转型。在此背景下,对工程结构的长期性能、安全冗余和全生命周期成本提出了更高要求。水泥混凝土作为公路路面、桥梁下部结构、涵洞及防护工程中最广泛应用的材料,其质量稳定性已成为衡量工程质量的核心指标之一。然而,工程实践中因原材料质量问题引发的混凝土强度不足、早期开裂、碱骨料反应、钢筋锈蚀等病害屡见不鲜。究其原因,往往并非配合比设计或施工工艺存在重大缺陷,而是原材料本身存在隐性或显性质量问题——如水泥安定性不良、集料含泥量超标、外加剂与胶凝体系不相容、拌合水氯离子含量过高等。这些问题若未在材料进场阶段被有效识别和拦截,将对后续结构性能造成不可逆的损害^[1]。因此,建立一套科学、高效、可操作的原材料试验检测与质量保障机制,不仅是技术层面的要求,更是工程管理现代化的必然选择。本文旨在突破传统“重检测、轻管理”的局限,将试验检测置于全过程质量控制框架下,系统阐述检测的技术要点,并构建以风险预防为导向的综合保障体系,为公路工程质量提供新思路与实践路径。

1 公路混凝土原材料质量风险识别

在探讨检测与保障措施前,有必要明确各类原材料可能引发的质量风险,以实现“靶向”控制。

1.1 水泥:安定性与凝结异常风险

水泥若存在游离氧化钙(f-CaO)或氧化镁(MgO)

含量超标,水化后期体积膨胀,将导致混凝土开裂甚至崩解。此外,水泥与外加剂的相容性不良,可能引发异常凝结(闪凝或过度缓凝),严重影响施工节奏与结构完整性。

1.2 集料:级配失衡与有害杂质风险

天然砂石资源日益紧张,机制砂广泛应用,但其石粉含量、颗粒形状控制难度大。粗集料若针片状颗粒过多或压碎值偏高,将削弱混凝土骨架强度;细集料含泥量超标不仅增加用水量,还会在界面形成薄弱层,降低粘结力。更严重的是,某些地区集料含有活性二氧化硅,可能诱发碱-硅酸反应(ASR),造成膨胀开裂。

1.3 拌合水:化学侵蚀风险

使用未经处理的河水、地下水或再生水拌合混凝土,若其中氯离子、硫酸盐或碱含量超标,将直接威胁钢筋耐久性 or 引发硫酸盐侵蚀、碱骨料反应等化学劣化过程。

1.4 外加剂:效能衰减与相容性风险

外加剂种类繁多,质量参差不齐。劣质减水剂减水率低、保坍性差;含氯盐外加剂会加速钢筋锈蚀;不同厂家外加剂与特定水泥或掺合料之间可能存在相容性问题,导致混凝土离析、泌水或强度倒缩。

1.5 矿物掺合料:活性不足与稳定性风险

粉煤灰若烧失量高,未燃碳会吸附外加剂,导致工作性损失;低品质矿渣粉活性指数不达标,无法有效发挥后期强度贡献;硅灰若储存不当吸潮结块,将影响其分散性和火山灰效应。

识别上述风险，是制定针对性检测方案与保障措施的前提。

2 原材料标准化试验检测方法体系

针对上述风险点，我国已形成以《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》（JTG3420-2020）为核心的检测标准体系。以下按材料类别详述关键检测方法。

2.1 水泥检测：聚焦安定性与相容性

水泥检测除常规的胶砂强度、凝结时间与细度测定外，应特别强化安定性与相容性的双重控制。雷氏夹法是判定安定性的标准方法，通过测量沸煮前后雷氏夹指针间距的变化来量化体积安定性，必要时辅以试饼法进行直观观察，确保结果可靠^[2]。同时，为预防施工过程中出现凝结异常，应在材料进场阶段开展水泥与拟用外加剂的相容性试验，通常采用净浆流动度经时损失或砂浆扩展度保留率等指标进行快速评估，提前筛选出匹配性良好的组合。

2.2 集料检测：突出级配优化与有害物筛查

集料检测需突出级配优化与有害杂质筛查。传统的筛分试验虽能获得级配数据，但应结合计算机辅助分析，将实测级配曲线与理想级配模型（如富勒曲线）进行对比，为配合比设计提供精细化依据。对于细集料中的黏土类有害杂质，砂当量（SE）试验比水洗法更能真实反映其对混凝土性能的负面影响，应作为机制砂质量控制的关键指标。此外，对来源不明或地质背景复杂的集料，必须进行碱活性筛查，先通过岩相法识别是否存在活性矿物，再视情况采用砂浆棒快速法或混凝土棱柱体法进行定量评估，从源头规避碱骨料反应风险。

2.3 拌合水检测：严控侵蚀性离子

拌合水的检测重点在于控制侵蚀性离子浓度。依据《混凝土用水标准》（JGJ63），必须严格测定氯离子、硫酸根离子及pH值。氯离子含量应控制在500mg/L以下，以防止钢筋锈蚀；硫酸根离子浓度过高则可能引发硫酸盐侵蚀；而pH值偏离中性范围可能影响水泥正常水化。这些指标虽看似简单，却是保障混凝土长期耐久性的关键防线。

2.4 外加剂检测：强调效能与稳定性

外加剂检测应超越单一减水率的评价，转向综合效能与批次稳定性评估。除按标准测定减水率、含气量、凝结时间差和抗压强度比外，还应关注其工作性保持能力，即通过60分钟甚至90分钟的坍落度或扩展度保留值来评价保坍性能。对于液体外加剂，还需检测密度、pH值和固含量等匀质性指标，确保不同批次产品性能一致。尤为重要的是，必须对每批次外加剂进行氯离子专

项检测，严禁含氯产品用于钢筋或预应力混凝土结构。

2.5 矿物掺合料检测：关注活性与需水性

矿物掺合料的检测则需聚焦其活性与需水特性。粉煤灰应严格控制烧失量（通常 $\leq 5\%$ ）和需水量比（ $\leq 95\%$ ），以确保其对工作性无负面影响；矿渣粉则需保证足够的比表面积（ $\geq 400\text{m}^2/\text{kg}$ ）和活性指数（28天 $\geq 95\%$ ），以发挥其火山灰效应；硅灰虽掺量少，但对其 SiO_2 含量（ $\geq 85\%$ ）和比表面积（ $\geq 15,000\text{m}^2/\text{kg}$ ）的要求极为严苛。所有检测均应由具备资质的试验室执行，并确保样品代表性与检测过程的规范性，使数据真实可信、可追溯。

所有检测均应由具备资质的试验室执行，确保数据真实、准确、可溯源。

3 公路工程水泥混凝土原材料全过程质量保障体系构建

在当前公路工程建设高质量发展的背景下，水泥混凝土作为核心结构材料，其原材料质量直接关系到工程的强度、耐久性与服役寿命。仅依赖传统的抽样检测手段，难以从根本上杜绝“送检样品合格、实际供货劣质”等质量隐患。因此，亟需构建覆盖“供应链—进场—存储—使用”全过程的质量保障体系，实现从源头控制到终端应用的闭环管理。

3.1 供应链源头治理：建立“白名单”与飞行检查机制

源头治理是保障原材料质量的第一道防线。应建立供应商“白名单”制度，依据历史供货质量稳定性、出厂检测合格率、履约能力、环保合规性等多维度指标，对水泥、砂石、外加剂等关键原材料供应商实施分级管理（A、B、C三级）。优先选用A级供应商，并通过季度评估动态调整名录，淘汰连续不合格或存在诚信问题的企业。同时，引入“飞行检查”机制，由建设单位或第三方机构不定期突击检查供应商的生产现场、原材料采购台账、出厂检验记录及仓储条件，重点核查是否存在以次充好、混掺劣质料等行为。该机制可有效打破“样品送检”与“批量供货”脱节的行业潜规则，倒逼供应商提升质量自律意识。

3.2 进场智能验收：推行“一码通”与快速筛查

原材料进场环节是质量控制的关键节点。应全面推行“一码通”溯源系统，每批次材料出厂时绑定唯一二维码，扫码即可实时调取出厂检测报告、运输轨迹、温湿度记录、供应商资质等信息，实现全流程透明化、可追溯。同时，在拌合站或工地入口设立智能化快速检测站，配备便携式含水率测定仪、激光粒度分析仪、含泥

量快速筛分装置等设备,对砂石的含水率、含泥量、细度模数,以及水泥的初凝时间、安定性等关键指标进行10分钟内初筛。对不符合技术要求材料立即拒收并自动记录,杜绝不合格材料流入施工环节,大幅提升验收效率与准确性。

3.3 存储与使用动态管控

原材料进场后,若存储不当仍可能导致性能劣化。应推广智能料仓管理系统,采用带称重传感器、湿度监测及自动通风除湿功能的封闭式料仓,实时监控库存量、环境温湿度及物料状态,一旦发现受潮、结块或离析风险,系统自动预警并联动管理人员处理。在混凝土拌制阶段,基于集料实时含水率数据,通过智能拌合控制系统自动修正配合比中的用水量,确保水胶比恒定——这是控制混凝土强度与耐久性的核心技术参数^[3]。该动态调整机制可有效应对天然骨料含水波动带来的质量风险,实现“精准配比、稳定输出”。

3.4 质量追溯与闭环反馈

建立“材料—构件—结构”三级质量追溯链,将每立方米混凝土所用原材料的批次编号、检测数据、拌合时间、浇筑部位、养护条件及后期强度评定结果全部关联入库。一旦某结构部位出现强度不足、裂缝或耐久性问题,可通过信息系统迅速反向追溯至具体材料批次,精准锁定责任源头。同时,实施月度质量反馈会议制度,由施工单位牵头,组织监理单位、材料供应商、检测机构共同参与,通报当月原材料检测合格率、典型质量问题案例、工艺偏差分析及改进建议,形成“计划—执行—检查—改进”(PDCA)的持续优化机制,推动质量管理水平螺旋上升。

3.5 强化人员能力建设与责任落实

人是质量体系运行的核心要素。所有试验检测人员必须持交通运输部或省级交通质监机构颁发的有效上岗证书,并定期参加新规范、新技术、新设备的操作培训,确保检测数据真实、准确、可比^[4]。同时,在项目中明确原材料采购、验收、存储、使用各环节的责任主体,严格落实工程质量终身责任制。对因使用不合格原材料导致结构安全隐患或返工损失的,依法依规追究供应商、施工单位及相关管理人员的法律责任,形成“不敢劣、不能劣、不想劣”的质量文化氛围。

4 工程应用案例与效果分析

某高速公路改扩建项目在建设过程中全面推行上述全过程质量保障体系,取得了显著成效。项目针对机制砂质量波动大的问题,创新采用砂当量与亚甲蓝(MB)值双控策略,使细集料含泥类杂质合格率由初期的82%提升至98%以上。在水泥与外加剂管理方面,项目建立了相容性数据库,对所有拟用组合提前进行匹配性试验,施工期间未发生一起因材料不相容导致的异常凝结事件。通过部署智能拌合系统,实现了基于集料含水率的用水量自动修正,混凝土28天抗压强度的标准差由4.2MPa显著降低至2.8MPa,均匀性大幅提升。尤为关键的是,在一次桥墩实体强度检测偏低的事件中,项目通过二维码追溯系统,仅用48小时便锁定问题源于某批次矿渣粉活性指数不达标,及时更换供应商并调整配合比,避免了更大范围的返工损失。该案例充分验证了全过程质量保障体系在提升原材料稳定性、降低质量风险方面的实用价值。

5 结语

公路工程水泥混凝土原材料的质量控制,是一项系统工程,不能孤立地依赖实验室检测。本文通过识别典型质量风险,梳理标准化检测方法,并创新性地构建了以“预防—监控—追溯—反馈”为核心的全过程质量保障体系,强调技术手段与管理机制的协同发力。未来,随着人工智能、大数据、区块链等技术的发展,原材料质量管理将向更智能、更透明、更高效的方向演进。例如,利用AI算法预测原材料质量波动趋势,基于区块链技术实现不可篡改的质量数据存证,都将为公路工程高质量发展注入新动能。唯有持续创新、系统施策,方能筑牢公路工程的质量根基,助力交通强国建设行稳致远。

参考文献

- [1]罗家文.公路工程水泥混凝土原材料试验检测探究[J].中国建筑金属结构,2025,24(17):47-49.
- [2]高峰,项阳.公路工程水泥混凝土原材料试验检测方法 with 质量保障措施分析[J].运输经理世界,2025,(09):157-159.
- [3]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.
- [4]李晓芹.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].工程技术研究,2023,8(12):115-117.