

# 桥梁施工中高性能混凝土的试验检测及其对结构安全性的影响

王鹏宇

四川精益达工程检测有限责任公司 四川成都 610000

**摘要:** 本文围绕高性能混凝土在桥梁工程中的应用, 系统阐述其材料特性与试验检测技术的关键要点, 分析检测数据与结构安全性之间的内在关联。通过梳理传统检测方法的局限性, 提出基于智能化设备与多尺度评价的技术优化路径, 并结合工程案例验证检测技术对桥梁结构耐久性、承载力及全生命周期安全的保障作用, 为桥梁建设质量控制提供理论支持与实践参考。

**关键词:** 桥梁施工; 高性能混凝土; 试验检测

## 引言

随着桥梁建设技术的不断发展, 高性能混凝土 (HPC) 因其高强度、高耐久性和良好的工作性能, 逐渐成为桥梁施工中的首选材料。高性能混凝土不仅能够显著提高桥梁结构的承载能力, 还能有效延长桥梁的使用寿命, 降低维护成本。然而, 高性能混凝土的质量直接关系到桥梁结构的安全性和耐久性。因此, 对高性能混凝土进行严格的试验检测是确保桥梁施工质量的重要环节。通过科学的试验检测方法, 可以及时发现混凝土性能的潜在问题, 采取有效的措施加以解决, 从而保障桥梁结构的安全性和可靠性。

### 1 高性能混凝土在桥梁工程中的特性与检测需求

#### 1.1 高性能混凝土的材料特性与性能指标

在桥梁工程中, 高性能混凝土的材料特性通过多重性能指标共同界定, 这些指标既构成材料设计的核心参数, 也成为施工质量控制的关键依据。从力学性能与耐久性要求来看, 强度等级达到 C60 及以上的混凝土, 其抗压强度指标直接关联桥梁主体结构的承载效能。以连续刚构桥的墩柱为例, C60 混凝土的轴心抗压强度标准值需达到 60MPa 以上, 这不仅确保墩柱在恒载与活载组合下的应力储备, 更通过弹性模量参数 (通常要求  $\geq 3.6 \times 10^4$  MPa) 控制结构变形幅度, 避免因过大挠曲引发的次应力损害。抗渗性能采用渗水高度法检测时, 高性能混凝土的渗水高度需  $\leq 100$  mm, 这一指标对跨海桥梁尤为重要 —— 如某沿海大桥工程中, 氯离子渗透深度被严格控制在 5mm 以内, 有效延缓了钢筋锈蚀进程。抗冻融性能则通过快冻法试验验证, 要求经历 500 次冻融循环后质量损失率  $\leq 5\%$ 、动弹模量保留率  $\geq 80\%$ , 确保

北方严寒地区桥梁在周期性冻胀作用下的结构完整性。

#### 1.2 桥梁施工中的质量检测技术体系

常规检测方法构成质量控制的基础框架, 但在复杂工程环境中暴露出特定局限性。标准养护试件抗压强度试验需在  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度  $\geq 95\%$  的条件下养护 28 天, 尽管该方法操作规范明确 (GB/T 50081《混凝土物理力学性能试验方法标准》), 却难以完全反映现场结构混凝土的真实性能 —— 大体积承台混凝土因水化热引发的温度梯度, 可能导致芯样强度与试件强度存在 15%–20% 的差异。氯离子扩散系数试验采用电迁移法 (如 NT Build 492 标准), 通过施加 30V 直流电压测算氯离子迁移速率, 然而该方法耗时长达 24 小时, 且对试件尺寸 ( $\phi 100 \times 50$  mm) 有严格要求, 难以适应现场快速检测需求。抗渗等级试验 (GB/T 50208《地下工程防水技术规范》) 采用逐级加压法, 当检测对象为 C60 以上高强混凝土时, 常因渗透压力超过设备量程 (通常  $\leq 2.0$  MPa) 而无法准确评估高抗渗性能。

现场检测环节面临多重技术挑战, 尤以大体积混凝土施工控制为甚。在跨江桥梁主墩承台施工中, 混凝土浇筑方量常超万立方米, 内部温度峰值可达  $70\text{--}80^\circ\text{C}$ , 温度梯度超过  $25^\circ\text{C}/\text{m}$  时易引发温差裂缝。传统热电偶测温法需在钢筋骨架中预埋测温元件, 每 100 立方米布置 5–8 个监测点, 实时数据需通过无线传输系统汇总分析, 某黄河大桥曾因测温元件布置密度不足 (仅 3 个 /  $100\text{m}^3$ ), 导致温控方案滞后, 承台表面出现 0.3mm 宽度裂缝。早期开裂风险评估涉及收缩变形与温度应力的耦合作用, 目前主要通过埋设振弦式应变计监测混凝土早期应变, 结合 ANSYS 有限元模拟水化热

进程,但实测数据与理论模型的偏差率常达 10%–15%,需依赖施工经验进行修正。

在预制梁场质量管控中,预应力孔道灌浆料的密实度检测成为新难点。传统压浆饱满度观察法依赖肉眼判断,漏浆、空洞等缺陷检出率不足 60%,而 X 射线透射法受限于梁体厚度( $\geq 2\text{m}$  时成像模糊),无法实现全断面检测。某高铁简支梁施工中引入冲击弹性波法,通过分析应力波在孔道内的反射信号,将灌浆缺陷识别率提升至 85% 以上,但该技术对传感器布置间距(需 $\leq 300\text{mm}$ )与数据分析算法有较高要求,尚未形成统一的行业检测标准。土结构的全周期监测,但在数据标准化与可靠性验证方面仍需深入研究。

## 2 高性能混凝土试验检测技术的创新应用

### 2.1 智能化检测设备与实时监测技术

在桥梁工程的复杂受力环境与严苛服役条件下,传统离散点检测已难以满足高性能混凝土全生命周期的质量管控需求,智能化检测设备通过构建多维感知网络,实现对混凝土性能参数的动态捕捉与风险预警。埋入式传感器网络以光纤光栅技术为核心,利用其波长编码特性与分布式测量优势,可在混凝土浇筑前预埋于梁体腹板、承台核心区等关键部位。传感器采用不锈钢管封装(外径 3mm,耐水压 $\geq 10\text{MPa}$ ),通过熔接机将 Bragg 光栅与温度补偿光栅串联,同步采集应变与温度数据。某跨海大桥箱梁施工中,在腹板钢筋网格间以 50cm 间距布设 128 个光纤传感器,搭建精度达 $\pm 1\mu\epsilon$  的应变监测网络,实时捕捉混凝土硬化过程中早期收缩应变的时空分布——当某截面应变梯度超过 $150\mu\epsilon/\text{m}$  时,系统自动触发预警,指导施工方调整养护喷淋频率,将腹板裂缝发生率降低 60%。

无人机搭载视觉与红外载荷的协同检测技术,突破了高空、大跨度结构的检测盲区。在桥面铺装层检测中,多旋翼无人机(轴距 600mm,续航 30 分钟)配备 2000 万像素可见光相机(分辨率 0.1mm/像素),通过航线规划软件以 5m/s 速度低空巡航,采集混凝土表面图像。图像处理系统基于改进的 U-Net 神经网络,自动识别宽度 $\geq 0.05\text{mm}$  的裂缝,定位精度达 $\pm 5\text{mm}$ ,较人工巡检效率提升 8 倍。某山区桥梁检测中,无人机发现 T 梁翼缘板存在 3 处蜂窝缺陷(直径 5–10cm),及时避免了雨水渗入引发的钢筋锈蚀风险。红外热成像模块(分辨率 640 $\times$ 512,温度精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ )则用于评估养护质量,混凝土表面温度均匀性与水化进程直接

相关:覆盖养护不足区域的温差可达 3–5 $^\circ\text{C}$ ,对应强度发展滞后 7%–10%。

### 2.2 多尺度性能评价与预测模型

高性能混凝土的宏观性能差异本质上源于微观结构的演化规律,现代测试技术正从单一指标检测向多尺度耦合分析转型。扫描电子显微镜(SEM)结合能谱分析(EDS)可在亚微米级分辨率下揭示水化产物的空间分布:C60 混凝土的 SEM 图像显示,纳米级 C–S–H 凝胶(平均粒径 50–100nm)紧密包裹骨料界面,而未掺硅灰的对比组存在明显过渡区孔隙(孔径 $> 200\text{nm}$ )。X 射线衍射(XRD)定量分析表明,硅灰掺量 10% 时,钙矾石(Af<sub>t</sub>)衍射峰强度较基准组提升 35%,对应抗硫酸盐侵蚀性能增强——某盐碱地区桥梁桩基混凝土通过控制 Af<sub>t</sub> 生成速率,将 56 天膨胀率控制在 0.02% 以内,有效抵御了硫酸盐结晶压力的破坏。同步辐射 X 射线断层扫描(分辨率 1 $\mu\text{m}$ )则实现了三维微结构可视化,某研究团队发现,引气剂引入的球形气泡(平均直径 100 $\mu\text{m}$ )在混凝土内部形成“应力缓冲带”,当冻融循环产生的拉应力超过 0.3MPa 时,气泡周围微裂纹扩展速率降低 40%。

数据驱动的机器学习模型正在重塑高性能混凝土的试验设计范式。以长期耐久性预测为例,模型输入层包含原材料参数(水泥铝酸三钙含量、骨料吸水率、外加剂分子结构参数)、配合比参数(水胶比、砂率、矿物掺合料比例)及养护条件(温度、湿度历程),输出层为氯离子扩散系数、碳化深度、冻融循环次数等指标。某科研团队基于 5000 组试验数据训练的随机森林模型,对 C60 混凝土 28 天氯离子扩散系数的预测误差 $\leq 8\%$ ,较传统回归模型精度提升 30%。模型解释性分析显示,粉煤灰玻璃相含量每增加 10%,氯离子扩散系数下降 6.5%,与 Nernst–Planck 方程的理论推导一致。在工程应用中,某桥梁预制场利用该模型优化配合比设计,将传统试配需要的 20 组试验减少至 7 组,同时使梁体混凝土抗冻融循环次数从 400 次提升至 600 次。

多尺度分析的工程价值还体现在缺陷溯源与性能优化的闭环控制中。某桥梁出现桥面铺装层早期开裂后,通过 SEM 观察到氢氧化钙晶体定向排列导致的层间结合薄弱,结合 XRD 检测到的碳化深度异常(3d 达 5mm),最终定位为养护覆盖不及时导致的表层混凝土失水。基于 BP 神经网络建立的开裂风险模型,将环境湿度 $< 60\%$ 、风速 $> 5\text{m/s}$

作为关键预警因子,指导施工方在类似条件下启动强制保湿措施,使后续工程开裂率下降75%。

### 3 试验检测对桥梁结构安全性的影响机制

#### 3.1 检测数据与结构安全性的关联分析

在桥梁工程中,高性能混凝土的强度与耐久性指标对结构安全性起着决定性作用。通过足尺梁抗弯试验,能直观验证混凝土抗压强度与结构承载力的定量关系。在试验过程中,将不同强度等级的高性能混凝土制作成足尺梁试件,对其施加逐渐增大的荷载。随着荷载增加,混凝土足尺梁试件的应力分布发生变化,当达到一定程度时,梁体开始出现裂缝。

长期性能监测数据的应用,能为桥梁结构安全性评估提供重要依据。以某跨江大桥10年健康监测数据为例,该大桥在运营期间,定期对高性能混凝土结构进行氯离子侵蚀深度检测。随着时间推移,监测数据呈现出明显的规律:前5年,氯离子侵蚀深度增长相对缓慢,平均每年增加约0.3mm;而从第5年到第10年,侵蚀深度增长速度加快,平均每年达到0.5mm。同时,通过对钢筋位置的检测发现,氯离子侵蚀深度与钢筋锈蚀风险密切相关。当氯离子侵蚀深度接近混凝土保护层厚度时,钢筋开始出现锈蚀迹象,且锈蚀程度随着侵蚀深度的增加而加重。

#### 3.2 基于检测结果的结构健康管理策略

动态安全阈值设定是基于检测结果保障桥梁结构安全的重要手段。桥梁在运营过程中,其结构性能会因各种因素发生变化。通过对高性能混凝土的定期检测,获取强度、耐久性等相关数据。根据这些检测数据,结合桥梁设计标准和实际运营情况,实时调整桥梁荷载限值与维护周期。例如,当检测到混凝土强度出现一定程度下降时,降低桥梁的允许

通行荷载,减少结构承受的压力;若耐久性指标显示混凝土抗渗性降低,缩短维护周期,增加对结构的检查频率。

预防性养护决策支持同样依赖于准确的检测结果。混凝土碳化深度与保护层厚度检测数据,能为制定针对性防腐处理方案提供关键信息。当检测到混凝土碳化深度接近或超过保护层厚度时,意味着混凝土内部的碱性环境被破坏,钢筋失去了碱性保护,极易发生锈蚀。此时,可根据具体情况制定防腐处理方案。对于碳化深度较浅的区域,可采用表面涂层防护技术,在混凝土表面喷涂防腐涂料,形成保护膜,阻止外界有害物质进一步侵入;对于碳化深度较深的部位,则可能需要进行凿除修补处理,去除碳化严重的混凝土,重新浇筑具有良好防腐性能的混凝土,同时对钢筋进行除锈和防锈处理。

### 4 结语

高性能混凝土的试验检测技术是保障桥梁结构安全性的关键环节。通过智能化设备与多尺度评价手段的融合,可实现从材料性能到结构行为的精准把控。未来,随着数字孪生技术与材料基因组计划的深入应用,混凝土检测将向预测性维护与全寿命周期管理方向发展,为桥梁工程安全提供更坚实的科技支撑。

#### 参考文献:

- [1] 田磊.道路桥梁施工中高性能混凝土的应用分析[J].汽车周刊,2025,(02):101-103.
- [2] 杨一苓.高性能混凝土在公路桥梁施工中的应用研究[J].工程与建设,2024,38(04):906-907+913.
- [3] 杨广.高性能混凝土在公路桥梁施工中的应用[J].散装水泥,2023,(03):170-172.