

# 高原山区高速公路施工材料质量缺陷对结构耐久性的影响评估

蔡宇镭

云南交投集团公路建设有限公司 云南 昆明 650100

**摘要：**高原山区高速公路服役环境兼具高海拔冻融、强紫外线、大温差及高湿度等特殊特点，施工材料质量缺陷对结构耐久性的侵蚀效应被显著放大。本文聚焦云南高原山区工程场景，系统剖析水泥、钢材、沥青、集料四类核心材料的典型质量缺陷表征及地域化成因，深入揭示缺陷材料对混凝土结构、钢结构及沥青路面耐久性的劣化机制，构建包含通用指标与地域特色指标的评估体系，提出适配高原环境的材料管控、施工优化及全生命周期养护方案。研究成果为提升高原山区高速公路结构稳定性、降低运维成本提供技术支撑，也为同类复杂环境工程提供实践参考。

**关键词：**高原山区；高速公路；施工材料；质量缺陷；结构耐久性；评估控制

引言：随着云南省“五纵五横”高速公路网建设向纵深推进，云南交投集团承建的诸多项目多穿越滇西北高原山区、滇东南岩溶峡谷等典型复杂地质单元，面临着昼夜温差普遍达15-20℃、部分高海拔区域冻融循环频繁、雨季集中（6-9月为主，年降水量800—1200mm）及局部区域存在岩溶水、硫酸盐等腐蚀性介质的特殊地域环境挑战。高速公路结构耐久性直接决定全省路网服役安全与生命周期成本，而施工材料作为工程建设的物质基础与核心支撑，其质量缺陷正是诱发结构开裂、钢筋锈蚀、构件破损等病害的关键诱因。相较于平原地区，云南高原山区受地形限制，本地原材料品质波动大、外调材料运输成本高且时效性差，加之雨季绵长导致施工窗口期极短，使得材料质量缺陷的表现形式更复杂、隐蔽性更强，对结构耐久性的负面影响也更为突出。因此，结合云南高原山区独特的地质环境与气候特征，系统开展施工材料质量缺陷研究，建立适配本地工况的科学评估体系并制定精准管控措施，对云南交投集团践行“建养并重”理念、保障高原山区高速公路长期安全稳定运营，乃至推动全省路网高质量发展均具有重要现实意义。

## 1 常见施工材料质量缺陷类型及地域化成因

### 1.1 水泥质量缺陷

水泥质量缺陷集中表现为强度不足、安定性不良及凝结时间异常三类。强度不足体现为标准养护28d后抗压强度未达设计等级，如云南某隧道衬砌所用42.5级水泥，部分批次实测强度仅38MPa，导致混凝土承载能力下降10%—15%，为结构长期服役埋下隐患；安定性不良表现为水泥硬化后产生不均匀体积膨胀，当膨胀率超过0.5%时，混凝土构件表面会出现0.2—0.5mm微裂缝，在

雨季雨水渗透作用下持续扩展；凝结时间异常，初凝短于45min会造成山区桥梁墩柱振捣不充分，终凝超过10h则延长养护周期2~3天，契合云南山区施工窗口期有限的痛点。地域化成因显著：原材料方面，云南部分山区石灰石矿碳酸钙含量低于85%标准值，粘土质原料硅铝率偏离2.0-3.5合理区间，直接干扰熟料矿物构成；生产工艺上，省内中小型水泥企业煅烧温度低于1450℃的情况<sup>[1]</sup>。

### 1.2 钢材质量缺陷

钢材缺陷主要包括强度不达标、韧性不足及表面锈蚀。强度不达标表现为屈服强度与抗拉强度未满足设计规范，导致桥梁钢结构承载能力不足；韧性不足使钢材在高原冬季低温（-10℃至-5℃）及动荷载作用下易发生脆性断裂；表面锈蚀最为常见，表现为氧化铁皮、红锈或蚀坑，既降低钢材力学性能，又破坏其与混凝土的粘结性，在云南雨季（6-9月）高湿度环境中锈蚀速率显著加快。成因与地域环境深度关联：冶炼环节，部分钢厂钢水脱氧不充分，残留氧、硫、磷等杂质，导致钢材内部产生气孔与夹杂物；加工过程中，轧制温度控制不合理（过低引发加工硬化，过高导致晶粒粗大），成品冷却速度不当改变金相组织；此外，云南部分工业区域存在的腐蚀性气体与高湿度环境叠加，加速露天桥梁钢结构的锈蚀进程<sup>[2]</sup>。

### 1.3 沥青质量缺陷

沥青缺陷主要体现为针入度、软化点、延度等指标不合格，以及老化、含蜡量过高等问题。针入度过高导致高温稳定性差，在高原白天高温（30-35℃）、山区公路坡度大、车辆制动频繁的场景下易产生车辙；针入度过低则增强低温脆性，夜间低温时易开裂；软化点过低引发夏季流淌，过高降低低温延展性；延度偏小表明塑

性不足,难以适应昼夜温差大的气候。沥青老化在强紫外线照射下进程加快,比平原地区快30%以上。表现为变硬、变脆、粘结力下降;含蜡量过高源于本地原料特性及脱蜡工艺不彻底,进一步加剧高低温病害。

#### 1.4 集料质量缺陷

集料缺陷主要包括粒径不均匀、含泥量过高及级配不合理。粒径不均匀表现为颗粒级配离散性大,缺乏连续梯度;含泥量过高即粒径小于0.075mm的泥质颗粒超标;级配不合理涵盖连续级配中断、粗细集料比例失衡等情况,这些缺陷会降低混合料密实度与强度,增强吸水性。地域化成因贯穿全流程:开采环节,云南山区多采用爆破开采,部分采石场炸药用量过大,产生过多针片状颗粒;加工环节,小型企业破碎设备选型不当、筛分精度不足,导致粒径与级配偏差;运输环节,山区道路崎岖,集料运输车辆难以完全封闭,易混入泥土,且露天堆放受雨水冲刷与风化影响,质量进一步下降;此外,部分区域天然集料级配先天不足,人工调整不充分,加剧缺陷问题。

### 2 施工材料质量缺陷对结构耐久性的影响机制

2.1 对混凝土结构耐久性的影响水泥与集料缺陷通过多重路径劣化混凝土耐久性。水泥强度不足时,硬化过程中胶结力不足,导致混凝土强度发展滞后,隧道衬砌等承受围岩压力的结构易加速变形;安定性不良引发的不均匀体积膨胀,会在混凝土内部形成应力集中,产生的裂缝在冻融循环与雨水渗透作用下持续扩展,破坏结构完整性;凝结时间异常导致振捣不密实或雨水冲刷,直接降低混凝土强度。集料缺陷的影响同样显著:粒径不均、含泥量高、级配不合理会增加混凝土孔隙率,为水分与硫酸盐离子等有害介质提供侵入通道。高海拔地区冬季,孔隙水结冰膨胀,反复冻融循环破坏内部结构;河谷地区地下水丰富,含泥量高的集料增强吸水性,加速钢筋锈蚀与混凝土碳化;长期车辆荷载作用下,集料质量差导致混凝土耐磨性不足,表面易磨损剥落<sup>[1]</sup>。

2.2 对钢结构耐久性的影响钢材缺陷直接威胁钢结构安全。强度不达标使桥梁主梁、隧道钢支撑等关键部位易发生塑性变形甚至断裂;韧性不足在低温与动荷载耦合作用下,易引发脆性断裂事故;表面锈蚀不仅减少有效截面面积,还会产生应力集中,加速裂纹扩展,在高湿度与腐蚀性介质环境中,锈蚀速率比平原地区高20%—30%。环境与缺陷的叠加效应显著:酸雨、工业腐蚀性气体与高湿度协同作用,加速钢材表面氧化,锈蚀产物体积膨胀引发涂层脱落,形成“锈蚀—暴露—再锈蚀”的恶性循环;车辆荷载反复作用下,锈蚀部位易产生疲劳

裂纹,扩展至一定程度引发结构破坏;此外,钢材与混凝土粘结性能下降,导致钢混组合结构荷载传递不均,局部应力集中,进一步劣化耐久性。

2.3 对沥青路面结构耐久性的影响沥青与集料缺陷共同加剧路面病害。沥青针入度不合格时,高温车辙深度可达10—15mm,低温易产生横向裂缝;软化点不达标导致夏季流淌或冬季开裂;老化与含蜡量过高使沥青粘结力下降30%—40%,抗裂性显著降低。集料缺陷放大沥青路面劣化:粒径不均、含泥量高、级配不合理降低混合料密实度,增加空隙率,水分易侵入破坏黏结界面,导致路面松散剥落;山区车辆荷载集中,密实度不足的混合料易产生车辙与沉陷;雨水冲刷与荷载耦合作用下,含泥量过高引发坑槽、唧浆等水损害。高原强紫外线加速沥青老化,昼夜温差大导致混合料反复热胀冷缩,产生疲劳应力,使缺陷材料铺筑的路面使用寿命缩短5—10年。

### 3 影响评估方法与指标体系

3.1 评估方法选择基于理论分析的评估方法。结合高原山区环境特征,以材料科学与结构力学为基础,分析缺陷材料强度、刚度等核心参数变化规律,结合隧道、桥梁等结构受力特点,建立考虑冻融、腐蚀等因素的力学模型,量化缺陷对承载性能的影响程度。模拟试验评估方法:室内模拟试验设置高温60℃、低温-10℃循环、相对湿度90%、5%硫酸盐侵蚀等工况,制备含缺陷材料试件,测试性能演化数据;计算机模拟依托有限元法,构建材料—结构耦合模型,设定温差荷载、地下水压力等边界条件,仿真隧道衬砌开裂、钢结构锈蚀等过程。对比研究评估方法:选取集团已建工程典型路段与结构,制备合格材料与缺陷材料平行试验,在相同环境与荷载条件下长期追踪。如相邻路段分别采用合格与缺陷沥青铺筑,监测车辙、裂缝等指标;相近地质条件桥梁采用不同品质钢材,监测锈蚀速率与承载能力变化,精准判定缺陷影响范围与程度<sup>[4]</sup>。

3.2 指标体系构建通用指标包括强度衰减率、裂缝发展速率、变形量及耐久性寿命预测值。强度衰减率以混凝土28d抗压强度、钢结构屈服强度、沥青路面马歇尔稳定度为基准;裂缝发展速率表征0.1—0.5mm宽度、1—5m长度裂缝的年扩展规律,云南环境下混凝土裂缝宽度扩展速率0.02—0.06mm/年,长度达0.2—0.6m/年;变形量涵盖弹性变形(1—5mm)、塑性变形(5—10mm),缺陷材料路面车辙深度可达10—15mm。地域特色指标针对高原环境设置:抗冻融循环次数(-10℃-20℃循环50次后,强度损失率≤20%)、抗硫酸盐侵蚀能力(5%硫酸盐溶液浸泡6个月,强度损失率<15%)、抗紫外线老化

能力(沥青延度保留率  $\geq 60\%$ )、抗湿热锈蚀能力(钢结构年锈蚀速率  $\leq 0.05\text{mm}/\text{年}$ )。各指标与材料缺陷直接相关,通过持续监测可系统反映耐久性劣化进程,为维护加固提供依据。

#### 4 缓解与控制措施

4.1 材料质量控制措施建立全流程管控体系。采购环节,建立本地合格供应商名录,优先选用工艺先进的大型企业产品,实地考察石灰石矿、采石场等产地,要求供应商提供抗紫外线老化、抗冻融等专项检测报告;加工阶段,优化生产工艺,水泥企业调整熟料矿物比例,沥青企业完善脱蜡工艺,集团成立专项小组,旁站监督水泥煅烧、钢材轧制等关键节点;运输储存环节,水泥采用封闭防潮车辆,储存垫高30cm以上;钢材防雨包装、垫高储存并定期刷漆;沥青用保温罐车运输与储存;集料运输安装封闭装置,分类堆放并加盖篷布;检测环节,增加抗硫酸盐侵蚀、抗湿热锈蚀等专项检测,执行“双检测”制度,进场批次检测覆盖率100%,不合格材料严禁使用。

4.2 施工过程控制措施优化适配性施工工艺。混凝土浇筑选用小型灵活振捣设备,振捣时间20—30s/点,浇筑间隔  $\leq 1.5\text{h}$ ,高海拔地区添加早强剂,隧道衬砌养护  $\geq 14$ 天;沥青摊铺根据海拔调整温度,高海拔140-160℃、平原130-150℃,压实度  $\geq 95\%$ ,山区弯道与坡度路段增加压实遍数,摊铺后封闭交通至完全冷却。强化工序交接检验,建立常态化监督机制,重点监测混凝土裂缝、钢材锈蚀、路面车辙等隐患,发现问题立即整改复核。

4.3 结构与养护措施优化地域适配性设计。混凝土结构采用冗余设计,隧道衬砌保护层厚度  $\geq 50\text{mm}$ ,桥梁墩柱  $\geq 40\text{mm}$ ,高海拔地区选用抗冻融配合比并添加引气剂,硫酸盐区域采用抗硫酸盐水泥;钢结构采用“底漆

+中间漆+面漆”三层涂层(厚度  $\geq 200\mu\text{m}$ ),搭配阴极保护技术,优化结构形式减少应力集中;沥青路面选用改性沥青,采用骨架密实型级配,增加路面厚度与排水设施。制定全生命周期养护策略:混凝土结构定期检测裂缝,采用压力灌浆修补,高海拔地区冬季涂刷防冻涂层;钢结构每年除锈补漆,每3年检测阴极保护系统;沥青路面雨季前灌缝,车辙严重路段铣刨重铺,定期检测平整度与抗滑性能。建立养护档案,每年全面检测、每3年专项评估,动态调整养护方案,延长结构寿命。

#### 结束语

高原山区特殊环境放大了施工材料质量缺陷对高速公路结构耐久性的负面影响,水泥、钢材、沥青、集料的各类缺陷通过复杂机制劣化混凝土结构、钢结构及沥青路面的服役性能。本文结合云南工程实际,系统剖析缺陷类型、成因与影响机制,构建针对性评估体系,提出全流程控制措施。通过落实材料管控、施工优化与全生命周期养护,可有效降低缺陷影响,提升结构耐久性。未来需结合物联网技术与新型高性能材料,进一步优化评估体系与控制措施,为高原山区高速公路建设提供更坚实的技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 郑海东.高速公路隧道施工技术 with 质量安全控制策略研究[J].运输经理世界,2024,(11): 80-82.
- [2] 窦晨阳.高速公路隧道施工技术 with 质量控制分析[J].工程建设与设计,2023,(22): 149-151.
- [3] 肖荣兵.公路隧道工程质量控制过程中的关键问题分析[J].低碳世界,2021,11(11): 129-130.
- [4] 贾伟超,彭海燕,张狄龙,等.现浇混凝土结构工程常见施工质量缺陷浅析[J].工程质量,2023,41(12): 50-54.