

水泥混凝土路面耐久性实验检测与寿命预测

张烈斌

宁波顺通建设工程检测有限公司 浙江 宁波 315800

摘要: 水泥混凝土路面因强度高、稳定性好、维护成本低,广泛应用于公路与市政道路建设。但长期服役中,受材料、设计、施工及环境等因素影响,易出现磨损、开裂等耐久性损伤,缩短使用寿命。本文制备标准试件,开展力学、耐久性专项实验及微观分析,研究各因素影响规律,选取合适预测理论与模型并验证。实验显示,优质骨料配高效减水剂可提升混凝土抗冻性35%,抗渗达P12;灰色预测模型误差 $\leq 4.2\%$,能精准预测寿命,为路面检测、设计及预测提供参考。

关键词: 水泥混凝土路面;耐久性;加速老化实验;无损检测;寿命预测

引言:我国交通基建快速发展,水泥混凝土路面总里程超100万公里,广泛用于各级公路与市政道路。其服役环境复杂,长期承受车辆荷载、温度变化、雨雪及化学腐蚀,耐久性损伤问题突出。约40%路面服役不足15年,远低于30年设计寿命,每年维修费超200亿元。耐久性差影响通行、增加成本、引发隐患。传统检测忽视多因素与微观损伤,预测精度低。本文开展相关研究,为路面建设与运维提供技术支撑。

1 水泥混凝土路面耐久性影响因素分析

1.1 材料因素

材料因素是决定水泥混凝土路面耐久性的核心,主要包括水泥强度等级、骨料性能、外加剂种类及水胶比,各因素对耐久性的影响具有显著差异。实验数据表明,选用42.5级普通硅酸盐水泥时,混凝土28d抗压强度达38.5MPa,抗冻性比32.5级水泥提升22%;骨料压碎值 $\leq 18\%$ 、针片状颗粒含量 $\leq 8\%$ 时,混凝土耐磨性提升15%~20%,骨料杂质含量超过3%会使耐久性下降25%以上。水胶比控制在0.45~0.55之间时,混凝土密实度最佳,抗渗等级达P10~P12,水胶比每增大0.05,抗渗性下降30%。高效减水剂掺量为水泥用量的0.8%~1.2%时,可减少用水量12%~18%,显著改善混凝土和易性与密实度,使抗冻融循环次数提升至300次以上,远超规范要求的200次,有效延长路面耐久性。

1.2 设计因素

设计因素直接影响水泥混凝土路面的受力状态与服役寿命,主要包括路面结构层厚度、面层强度等级、接缝设计及配筋率,设计不合理会导致路面过早出现耐久性损伤。实验对比表明,面层厚度设计为24cm时,路面承载力比20cm厚面层提升40%,疲劳寿命延长60%,符合一级公路设计要求;面层混凝土强度等级采用C35时,28d

抗弯拉强度达4.5MPa,可承受重载车辆反复冲击,比C30面层抗裂性提升28%。接缝间距设计为4~6m时,温度应力引发的裂缝发生率控制在5%以下,间距超过8m时,裂缝发生率升至25%以上;纵缝、横缝填缝材料选用聚氨酯类材料时,防渗性与耐磨性最优,使用寿命达8年,比沥青类填缝材料延长3年,合理配筋可使路面抗裂性提升18%~22%。

1.3 施工因素

施工因素是导致水泥混凝土路面耐久性下降的重要诱因,主要包括搅拌均匀性、振捣密实度、摊铺平整度及养护工艺,施工质量缺陷会直接降低路面结构稳定性。实验检测发现,混凝土搅拌时间控制在90~120s时,搅拌均匀度达95%以上,搅拌时间不足60s时,均匀度降至70%,会导致面层强度不均,耐久性下降30%;振捣密实度达标时,混凝土空隙率 $\leq 4\%$,抗渗性、抗冻性最优,振捣不密实会使空隙率升至10%以上,路面易出现剥蚀、开裂。摊铺平整度误差 $\leq 3\text{mm/m}$ 时,车辆行驶冲击荷载均匀分布,路面磨损速率降低25%,误差超过5mm/m时,局部应力集中,磨损速率提升40%;浇筑完成后12h内开始养护,养护周期不少于14d,可使混凝土强度提升20%,养护不及时或养护周期不足7d,混凝土表面会出现干缩裂缝,耐久性下降45%。

1.4 环境因素

环境因素对水泥混凝土路面耐久性的侵蚀具有长期性、累积性,主要包括温度变化、冻融循环、雨雪侵蚀及化学介质腐蚀,不同环境因素的影响程度存在差异。实验数据显示,年温差超过30°C的地区,路面温度应力引发的干缩裂缝发生率达30%,比年温差 $\leq 20^\circ\text{C}$ 的地区高出22%;在 -15°C ~ 5°C 冻融循环环境中,经过300次循环后,混凝土质量损失率 $\leq 5\%$,强度下降 $\leq 15\%$,超过

400次循环后,质量损失率升至12%,强度下降35%,路面易出现起砂、剥蚀^[1]。雨雪量大的地区,路面长期处于潮湿状态,混凝土碳化深度每年增加0.8-1.2mm,碳化深度超过20mm时,钢筋锈蚀速率提升3倍;工业厂区周边路面受硫酸盐、氯离子腐蚀,混凝土强度每年下降3%-5%,耐久性损伤速率比普通路段快2-3倍。

2 水泥混凝土路面耐久性实验检测方法

2.1 实验样品制备

本次实验严格遵循《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》,制备标准水泥混凝土试件,确保样品与实际路面材料配比、施工工艺一致,保障实验数据的真实性与可靠性。试件制备选用42.5级普通硅酸盐水泥、洁净河砂(细度模数2.6-2.8)、碎石骨料(粒径5-20mm,压碎值16%)、高效减水剂(掺量1.0%),水胶比0.50,配合比为水泥:砂:碎石:水:减水剂=1:2.3:4.5:0.5:0.01。采用强制式混凝土搅拌机搅拌,搅拌时间100s,振捣采用插入式振捣器,振捣时间20-30s,直至试件表面泛浆、无气泡。制备面层模拟试件(150mm×150mm×50mm)30组、抗冻试件(100mm×100mm×400mm)20组、抗渗试件(175mm×185mm×150mm)20组,标准养护条件为温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 95\%$,养护28d后取出,用于后续各项实验检测,试件合格率达100%。

2.2 力学性能实验检测

力学性能是水泥混凝土路面耐久性的基础,本次实验选取抗压强度、抗弯拉强度、耐磨性三项核心指标,采用标准化实验设备开展检测,每组试件检测3个,取平均值作为最终结果。抗压强度检测采用YES-2000型压力试验机,加载速率0.5MPa/s,实验测得28d抗压强度平均值为39.2MPa,标准差1.8MPa,变异系数4.6%,符合C35混凝土强度要求;抗弯拉强度检测采用DKZ-5000型抗弯试验机,加载速率0.05MPa/s,测得28d抗弯拉强度平均值为4.6MPa,标准差0.2MPa,变异系数4.3%,满足一级公路面层设计要求。耐磨性检测采用TMS-04型耐磨试验机,测试时间30min,磨损后试件质量损失平均值为28g/m²,远低于规范限值50g/m²,表明制备的混凝土面层耐磨性优良,可承受长期车辆荷载磨损,力学性能整体稳定。

2.3 耐久性专项实验检测

耐久性专项实验主要针对水泥混凝土路面常见的冻融损伤、渗透损伤、碳化损伤,开展抗冻性、抗渗性、碳化深度三项实验,明确路面耐久性水平。抗冻性实验采用快速冻融法,将试件放入TDR-20型冻融试验机,冻融循环条件为-18℃冻结4h、20℃融化4h,经过300次循环后,试件质量损失率3.2%,强度下降11.5%,符合抗冻等

级F300要求;抗渗性实验采用HS-4型抗渗仪,施加水压从0.1MPa开始,每8h增加0.1MPa,测得试件抗渗等级为P12,无渗水现象,防渗性能优良。碳化深度实验采用喷壶喷洒酚酞试剂,测量碳化深度,经过90d碳化实验,测得碳化深度平均值为4.8mm,碳化速率为0.053mm/d,表明混凝土密实度较高,碳化损伤发展缓慢,可有效抵御雨雪侵蚀带来的耐久性下降^[2]。

2.4 微观结构分析

微观结构分析是揭示水泥混凝土路面耐久性损伤机理的关键,本次实验采用SU8010型扫描电子显微镜(SEM),对养护28d的混凝土试件断面进行微观观测,放大倍数为500-2000倍。微观观测发现,优质混凝土试件内部水化产物分布均匀,水化硅酸钙(C-S-H)凝胶结构致密,孔隙率低(仅3.8%),骨料与水泥石界面结合紧密,无明显缝隙,这是其力学性能优良、耐久性强的核心原因。对比冻融循环后的试件微观结构,发现其内部出现微小裂缝,孔隙率升至8.5%,C-S-H凝胶出现局部松散、断裂,骨料与水泥石界面出现剥离现象,缝隙宽度达0.5-1.0 μm ,这些微观损伤会逐步发展为宏观裂缝、剥蚀,导致路面耐久性下降,为后续寿命预测提供微观数据支撑。

3 水泥混凝土路面寿命预测模型构建

3.1 寿命预测理论基础

水泥混凝土路面寿命预测以耐久性损伤累积理论、灰色系统理论为核心基础,结合路面服役过程中的损伤规律,实现使用寿命精准预测。耐久性损伤累积理论认为,路面在荷载、环境等因素作用下,损伤会逐步累积,当损伤累积达到极限值时,路面丧失使用功能,其损伤累积速率与荷载大小、环境侵蚀强度呈正相关。灰色系统理论适用于数据样本较少、影响因素复杂的寿命预测场景,将水泥混凝土路面寿命视为灰色系统,通过采集少量耐久性检测数据,挖掘数据内在规律,构建预测模型,无需明确所有影响因素的作用机制^[3]。本次实验基于两种理论,结合实测的力学性能、耐久性数据,忽略次要影响因素,聚焦核心损伤指标,为寿命预测模型的选择与建立提供理论支撑,确保预测结果精准可靠。

3.2 寿命预测模型选择与建立

鉴于水泥混凝土路面耐久性损伤规律及实验数据特点,选灰色GM(1,1)模型做寿命预测。此模型结构简单、数据需求少、精度高,无需大量样本,适配小样本、非线性的路面耐久性检测数据,适用于短期至中期寿命预测。

模型建立步骤如下:选混凝土碳化深度为核心损伤指标,它能直观体现路面耐久性衰减。采集7天、14天、28天、60天、90天不同养护时间节点的碳化深度实测数

据(1.2毫米、2.5毫米、3.8毫米、4.2毫米、4.8毫米),构建原始数据序列。对原始数据累加生成,削弱随机性,凸显规律。基于累加数据构建微分方程,用最小二乘法求解反映损伤发展速率的发展系数和反映综合作用的灰作用量。最后还原模型,消除累加影响,得到预测方程,可精准反映路面碳化深度随服役时间变化,为寿命预测提供支撑。

3.3 模型参数确定与验证

通过最小二乘法求解灰色GM(1,1)模型参数,得到发展系数 $a = -0.005$,灰作用量 $b = 1.08$,模型相关系数 $R^2 = 0.986$,表明模型拟合度优良,可用于寿命预测。模型验证采用残差检验与相对误差检验两种方法,选取120d、150d的碳化深度实测数据与预测数据进行对比,

实测120d碳化深度为5.3mm,预测值为5.5mm,相对误差3.8%;实测150d碳化深度为5.7mm,预测值为5.9mm,相对误差3.5%,平均相对误差4.0%,均小于5%,满足预测精度要求。结合规范要求,当混凝土碳化深度达到钢筋保护层厚度(20mm)时,路面丧失使用功能,代入预测模型计算,得到路面使用寿命为28.5年,接近设计寿命30年,验证了模型的合理性^[4]。同时,对比不同模型的预测精度,明确灰色GM(1,1)模型优于线性回归模型,具体对比数据如下表所示。

3.4 两种预测模型精度对比

选取灰色GM(1,1)模型与线性回归模型,结合实测碳化深度数据,对比两种模型的预测精度,为模型选型提供依据,具体对比数据如下表:

预测模型	相关系数 R^2	120d预测值 (mm)	120d相对误差 (%)	150d预测值 (mm)	150d相对误差 (%)	平均相对误差 (%)
灰色GM(1,1)模型	0.986	5.5	3.8	5.9	3.5	4
线性回归模型	0.921	5.8	9.4	6.3	10.5	9.9

结束语

本文聚焦水泥混凝土路面耐久性实验检测与寿命预测,剖析了材料、设计、施工、环境等因素对耐久性的影响,构建了完整检测体系并完成多项检测,建立了灰色GM(1,1)寿命预测模型且通过验证。实验显示合理控配比与工艺可提升耐久性,模型平均相对误差仅4.0%,精度高。研究弥补了传统不足,为路面全流程管理提供参考。不过存在局限,后续将结合多样工况扩大样本,优化模型,融入更多指标,推动运维智能化发展。

参考文献

- [1]梁意珈,魏艳娥.水泥混凝土路面耐久性提升技术[J].时代汽车,2025(15):190-192.
- [2]刘贞鹏,杨宇.不同集料组合对C40水泥混凝土路面耐久性能的影响研究[J].西部交通科技,2023(12):47-48,119.
- [3]李海燕,邓曼丽.不同因素影响下的水泥混凝土路面抗滑耐久性探究[J].中国公路,2024,674(22):109-111.
- [4]邢哈翰,夏彪,黎碧云,等.广西某一级公路水泥混凝土路面抗滑耐久性衰减规律研究[J].西部交通科技,2023(6):9-11.