

公路工程结构耐久性提升技术与材料创新

王立

甘肃公航旅路业有限公司，甘肃兰州，730070；

摘要：伴随我国公路交通建设规模持续扩大，公路工程结构耐久性问题日益凸显，已成为关乎道路使用寿命及安全性能的关键要素。复杂环境因素（如温度变化、水害、冻融循环、氯离子侵蚀等）作用下，传统施工材料和技术易出现结构老化、裂缝扩展及承载力衰减等问题，造成维修成本攀升与资源损耗。采用纤维增强混凝土、功能型防水层、再生材料复合体系及结构健康监测系统，可切实延缓结构劣化进程，增进工程的整体服役寿命及可持续发展水平。本研究的目标是为公路工程结构设计与施工阶段提供技术参考与材料创新方向，为达成“长寿命、高品质”公路建设目标供给理论依据与实践路径。

关键词：公路工程；结构耐久性；新材料；施工技术；结构健康监测

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.005

引言

伴随公路建设步入高密度与高标准发展阶段，结构耐久性问题成为行业关注的关键核心议题之一。公路结构长期身处复杂环境里，受交通荷载、气候变化、水化反应、冻融循环及化学侵蚀等多种因素影响，其物理及化学性能不断衰减，对道路的使用年限与安全性能产生直接影响。按照交通运输部数据，全国公路养护费用占新建投资比例逐年呈上升态势，其中因结构早期损伤引发的维护成本占比逾 45%。从源头强化结构耐久性，已成为增进公路全寿命周期经济效益的关键路径。

1 结构设计优化：以防护与寿命匹配为核心

公路工程结构耐久性的要义在于科学合理的设计。首要环节当属耐久性控制中的设计阶段，必须贯彻“防护优先、结构自愈、寿命匹配”的理念，达成从被动维护到主动防护的转变。当进行设计工作之际，应按照公路所处区域的气候特征、地质条件及交通荷载等因素，恰当明确结构形式与材料配置^[1]。例如，在高寒地带，频繁的冻融循环容易导致面层剥落及基层开裂，设计方面可采用双层排水结构与防冻层复合体系，杜绝水分滞留与结冰膨胀；在沿海之处，则需重点抵御氯盐侵蚀，可借助设置防渗隔离层、优化混凝土配合比以及表面防护涂层的方式，增进抗腐蚀水平。

此外，结构整体受力的协调性同样是延长寿命的关键条件。依靠有限元分析与疲劳寿命预测相关技术，设计者可预先识别结构薄弱区域，采取预应力分布调整及应力集中缓解设计等举措，杜绝裂缝早期生成。同时，寿命匹配原则规定材料、构件及防护层在设计寿命上达

成一致，防止局部部件过早老化引发系统性失效。

为进一步增进设计科学性，可引入 BIM（建筑信息模型）以及数字孪生技术，实现从虚拟设计直至实际施工的全过程可视化管理。设计人员可借助仿真模拟不同工况时的结构响应，预先做好排水坡度、接缝布局、温度应力分布等参数的优化工作，在贵州山区公路改扩建这项工程中，凭借 BIM 模型优化桥面排水体系，让积水点减少了 40%，有效推迟了结构病害的显现。

2 材料创新应用：构建高性能复合体系

2.1 高性能混凝土（HPC）的应用与优势

公路工程结构的耐久性首先基于混凝土材料的物理及化学性能。高性能混凝土（HPC）凭借强度高、抗渗性佳与耐久性优越的特质，成为现代公路结构里的关键用料。HPC 的关键在于在水泥基体系里合理加入硅灰、粉煤灰、矿渣粉等活性掺合料，这些材料可有效降低水化热，减少细微毛细孔的生成量，进而提高混凝土致密性及抗渗性能。实际工程中，HPC 已在桥梁、隧道及高寒地区道路等恶劣环境结构中广泛应用。云南某高速隧道衬砌工程采用 HPC 之后，混凝土抗渗等级自 P8 提升至 P12，让结构使用寿命延长近 20 年，同时大幅减少了渗水及冻融引发的结构破坏。HPC 不仅提升了结构本身的物理特性，还能与合理的结构设计、施工技术相配合，切实降低维护频次与成本，增进公路工程的整体经济性及可持续性。此外，高性能混凝土于高荷载及长期服役状况下能维持良好抗裂性能，为现代公路长期服役构筑了坚实的材料支撑。

2.2 纤维增强混凝土（FRC）的韧性提升作用

其目的在于进一步优化混凝土结构的韧性及裂缝控制能力，纤维增强混凝土（FRC）成为提升耐久性的关键材料。FRC 依靠在混凝土里加入钢纤维、聚丙烯纤维或玄武岩纤维，可显著改进抗拉强度、抗裂性能及延性表现，实现裂缝发展受控以及结构韧性提升^[2]。对于路面及桥面板结构而言，加入玄武岩纤维可提升材料抗疲劳性能，还能强化抗冻融循环能力，进而延缓寒冷地区道路的早期毁坏。实验数据说明，在经历 50 次冻融循环后，FRC 混凝土，残余强度相比普通混凝土提升约 20%，裂缝宽度明显变窄。FRC 的微观纤维网络能有效实现应力集中的分散，减小局部破坏的风险，此材料技术特别适配交通繁忙的高速公路、桥梁及易受环境侵蚀的道路结构，能延长路面服役的期限且降低长期维护成本。FRC 可加工性佳且适应性强，能根据工程实际需求对纤维种类、长度以及掺量进行调整，为公路工程耐久性设计赋予灵活性与可靠性。

2.3 改性沥青与纳米复合材料的应用

沥青材料于高温与低温环境中的性能，直接关乎路面结构的耐久性。SBS 改性沥青与橡胶粉复合沥青凭借其高弹性和低温抗脆裂性能，成为增强耐久性的主要途径。这类改性材料于高温状况下维持柔性，降低车辙出现比率，在低温情形下防止脆裂形成，进而增强路面的整体服役水平。SBS 改性沥青的抗车辙能力相比普通沥青提升超 30%，大幅延长了路面的寿命。同时，纳米技术跟功能型复合材料的引入进一步强化了材料性能，纳米氧化硅、石墨烯、碳纳米管等微尺度添加剂在混凝土或沥青里形成致密微观网络结构，增进界面结合强度，提高耐腐蚀性及抗老化能力。例如，纳米石墨烯被掺入沥青里，可显著降低微裂纹扩展速度，加大疲劳寿命，这些材料不仅强化了结构本体性能，也为路面于极端气候和高频交通条件下长期服役给予保障，成为未来公路工程材料创新的核心方向。

2.4 绿色再生材料与未来发展趋势

在追求耐久性的同时，公路工程材料创新还看重绿色环保与可持续发展。采用废橡胶粉、再生骨料、废塑料复合材料等再生资源，既减少了施工花费，又减轻了环境压力。例如，江苏某国道改造工程采用再生沥青混合料，节省材料成本约 25%，碳排放减少幅度达 30% 以上。再生材料的实施不仅符合绿色施工理念要求，还为乡村及低成本公路工程提供了具备经济可行性的方案，未来材料创新将朝着功能化、智能化、绿色化方向挺进，即在保障高性能的前提下，实现材料呈现自感知、自修

复及环保特性。功能型复合材料与自愈性微胶囊或纳米活性成分相结合，可于微裂缝出现之际自动修复，提升结构服役时长。智能材料跟信息化技术相结合，还可达成材料状态的实时监测，为施工及养护给予数据支撑。经由高性能混凝土、纤维增强混凝土、改性沥青、纳米复合材料及绿色再生材料的系统应用，公路结构耐久性将达成全面提高，同时达成经济性、可持续性与环境友好性的有机结合。

3 施工技术提升：从经验施工向智能建造转型

3.1 混凝土施工的标准化与耐久性控制

公路结构的耐久性受混凝土施工质量直接影响。即使选用高性能材料及优质设计方案，若施工环节有所疏漏，同样难以实现预期寿命目标。因此，在混凝土施工期间，温度控制、振捣密实与防裂养护构成核心环节。温度控制主要作用是防止大体积混凝土硬化时出现温差裂缝，可凭借循环冷却水管、分层浇筑、表面保湿养护等措施达成^[3]。振捣密实保证了混凝土内部不存在空洞与离析，进而增强结构致密性及承载力。防裂措施有设置伸缩缝、控制收缩应力以及恰当安排施工缝位置，这些举措可有效延缓裂缝出现。以某高速桥梁墩柱施工当作例，采用分层浇筑并结合表面湿润养护，混凝土早期裂缝率下降近 40%，明显提升了结构的耐久性。混凝土施工标准化不仅关乎材料性能的达成，还对结构寿命及后期维护成本产生直接影响，是耐久性保障的基础性环节。

3.2 沥青施工的精细化与耐久性提升

沥青路面施工质量是决定路面抗车辙性能、抗裂性能及使用寿命的关键要素。施工环节引入“红外热成像+智能摊铺压实系统”，达成了全过程温度及密实度监控。红外热成像系统可即时显示摊铺温度分布，保障沥青摊铺温度均匀性，防止局部冷却引发早期裂纹。智能摊铺压实系统利用 GPS 定位及自动反馈对压实参数进行调整，保证压实度及平整度满足设计要求。比如在广东汕湛高速公路项目当中，采用智能压实系统后，路面平整度增长 15%，施工误差处于±3mm 控制范围，同时路面早期剥落现象大幅减少。精细化施工不仅降低了材料浪费，还将沥青路面的服役周期延长，让路面于高温车辙、低温裂缝及重载交通状况下维持长期稳定性能，进而显著增进整体结构耐久性。

3.3 智能化施工技术的推广应用

随着工程规模的增大以及施工复杂性的提高，传统

人工施工无法满足高精度与高效率要求，智能化施工技术顺势诞生^[4]。无人驾驶摊铺机、智能压路机、自动化混凝土浇筑设备等技术的采用，达成了施工全过程的精准掌控。例如，借助无人摊铺机与激光扫描系统相结合，可实现对路面高度偏差的实时监测，使横向坡度与纵向标高精度达毫米级。此外，自动压路机可依照实时路面刚度与温度反馈对压实压力进行调整，维持路面密实度均匀一致。智能施工技术不仅可提升施工效率，还降低了人为操作误差，使材料性能充分得以发挥，结构质量稳定且可靠。在福建某高速项目里，于引入全智能施工设备后，施工周期缩短近 12%，路面密实度显著提升，结构均匀性明显增强，为公路工程耐久性筑牢了坚实的技术根基。

3.4 质量追溯体系与信息化管理

施工环节的耐久性管理离不开信息化手段及质量追溯体系。依靠建立数据化监控平台，可以实时记录诸如温度、湿度、材料配比、施工进度等关键参数，并上传至云平台，实现管理的全过程透明化。管理者凭借数据分析可快速找出异常，即刻调整施工方案，减少潜在质量风险。例如，在某高速的桥面铺装项目里，配备传感器监控混凝土湿度及温度，达成早期收缩裂缝预警，即刻调整养护方案，裂缝率降低了约 35%。此外，后期养护决策可借助施工数据，完成结构健康管理与全寿命维护的衔接。信息化管理不仅对施工质量起到提升作用，又为公路工程的耐久性评估、维修计划以及经济效益提供了可靠依据，带动传统经验施工向智能化建造转型，是现代公路工程质量与耐久性管理的必经途径。

4 健康监测与全寿命维护：构建智能化管理体系

结构耐久性并非是那种静态指标，而是动态的演化进程，公路结构施工完成后仍需承受长期荷载及环境作用，故而建立结构健康监测与全寿命维护体系极为必要。经由嵌入式光纤传感器、应变计、湿度计及加速度计等器材，可实时得到结构内部应力、温度、湿度及裂缝扩展信息，创建依托大数据支撑的健康监测网络^[5]。监测系统把人工智能算法与云计算平台相联合，可自动辨别异常趋势并发出预警，实现“早发现、早修复”这一目标。

湖南某高速桥梁结构当铺设光纤监测系统后，凭借应变监测掌握早期裂缝发展趋势，预先开展灌浆修复，让维修成本降低 30%，结构寿命延长了 25%。此外，基

于 BIM 及数字孪生技术的“虚实融合”模型，可完成公路结构全寿命周期模拟与预测维护工作，切实做到“主动养护”这一目标。

在养护阶段进程里，应创建耐久性数据库，针对不同区域、不同结构类型的劣化特征实施分类管理，拟定科学的维护策略。定期检测、结构加固与表面防护乃基础手段，而依靠数据驱动的智能养护乃未来趋势。依靠物联网与区块链技术搭建的养护管理系统，可以实现施工质量、监测数据以及维修记录的全链条可追溯，大幅提升公路工程管理的科学性与透明度。

结构健康监测及全寿命维护技术不只是耐久性保障途径，更是推动公路建设实现从“建得好”到“用得久”的战略转变。凭借构建智能感知、数据分析与预测性维护一体化体系，公路工程的安全性、经济性及可持续性会得到全面提高。

5 总结

公路工程结构耐久性与道路安全、经济效益及资源利用效率直接相关。影响结构耐久性的因素体现出系统性与长期性，仅凭借传统材料与施工手段，难以契合现代交通需求。凭借高性能材料的研发及复合应用，施工工艺的精细化及智能化把控，以及结构健康监测系统的采用，可显著增进公路结构的抗裂、防腐、抗疲劳性能。未来要进一步加大多学科融合研究力度，促进纳米材料、功能性纤维、智能感知技术与绿色再生材料协同创新。构建“设计—施工—监测—养护”一体化管理机制，实现建设至运维全寿命周期的耐久性控制。

参考文献

- [1] 程军. 隧道衬砌结构耐久性提升技术与材料应用 [J]. 建筑与施工, 2024(12).
- [2] 王凤龙. 水利工程结构耐久性与加固新技术研究 [J]. 现代工程科技, 2025(6).
- [3] 张慧君. 新型建筑材料在建筑工程中的创新应用与发展前景研究 [J]. 湖北画报 (下半月), 2024(4): 134-135.
- [4] 杨武. 碳纤维布加固修复建筑结构技术探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(003): 000.
- [5] 王俊平. 土木工程建筑中钢筋混凝土结构施工技术研究 [C]//2024 精益数字化创新大会平行专场会议——冶金工业专场会议论文集 (下册). 2024.