Research on Key Construction Technologies and Quality Control for Long-Life Cement Concrete Pavements

Hao Mu

Overseas Engineering Branch of China Railway Fifth Bureau Group Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550001, China

Abstract

With the continuous increase in traffic loads and rising highway service standards, traditional pavement construction models can no longer meet the practical demands for high durability, low maintenance requirements, and lifecycle cost-effectiveness. Cement concrete long-life pavements have emerged as a critical development direction in road engineering due to their structural stability, strong load-bearing capacity, extended service life, and reduced maintenance frequency. The formation of long-life pavements relies not solely on material strength enhancement but is closely related to structural design, raw material control, construction techniques, joint treatment, curing management, and comprehensive quality control throughout the process. This study analyzes key construction technologies for cement concrete long-life pavements, explores the impact of core processes—including subgrade treatment, concrete mixing and paving, vibration leveling, joint construction, and curing management—on pavement durability, and proposes targeted control measures addressing common quality issues. The findings aim to provide practical references for improving cement concrete pavement construction standards and extending road service life.

Keywords

cement concrete pavement; long-life pavement; construction technology

水泥混凝土长寿命路面施工关键技术与质量控制研究

慕浩

中铁五局集团有限公司海外工程分公司，中国·贵州 贵阳 550001

摘　要

随着交通荷载持续增长和公路服役标准不断提高，传统路面建设模式已难以满足高耐久、低养护和全寿命周期经济性的现实需求。水泥混凝土长寿命路面因其结构稳定、承载能力强、使用寿命长、养护频率低等优势，逐渐成为道路工程建设的重要发展方向。长寿命路面的形成并非单纯依赖材料强度提升，而是与结构设计、原材料控制、施工工艺、接缝处理、养生管理和全过程质量控制密切相关。文章围绕水泥混凝土长寿命路面的施工关键技术展开分析，探讨基层处理、混凝土拌和与摊铺、振捣整平、接缝施工、养生管理等核心环节对路面耐久性的影响，并结合常见质量问题提出针对性的控制措施，以期为提高水泥混凝土路面施工水平、延长道路服役寿命提供实践参考。

关键词

水泥混凝土路面；长寿命路面；施工技术

1 引言

在公路与市政道路建设中，路面结构的耐久性直接关系到通行安全、养护成本和工程综合效益。与普通路面相比，长寿命路面更强调在长期交通荷载、环境变化和材料老化作用下保持较高的结构稳定性与服务性能。水泥混凝土路面具有抗压强度高、整体性较好、抗水损害能力强等特点，在重载交通道路、工业园区道路及高等级公路中具有广泛应用前景。然而，在实际建设中，若施工组织不合理、工艺控制不到位、材料质量不稳定或后期养生管理不足，极易引发开裂、断板、错台、脱皮、露骨和接缝损坏等病害，削弱长寿命目标的实现效果。基于此，有必要从施工全过程出发，对水泥混凝土长寿命路面的关键技术和质量控制要点进行系统研究，以提升工程建设质量和服役可靠性。

【作者简介】慕浩（1990–），男，中国宁夏固原人，本科，高级工程师，从事公路、桥梁工程研究。

2 水泥混凝土长寿命路面的施工技术基础

2.1 长寿命路面的内涵及性能要求

水泥混凝土长寿命路面并不是单纯追求设计年限的延长，而是强调在较长服役周期内保持结构功能、表面性能和行车舒适性的整体协调。其核心要求体现在高承载能力、高耐久性、低病害率和较强环境适应性等方面。从工程角度看，长寿命路面需要在反复荷载作用下具备良好的抗疲劳性能，在温湿变化和冻融环境中保持较强抗裂能力，在水侵蚀和车

辆磨耗影响下维持较好的表面完整性。这意味着施工阶段不仅要满足强度指标，还要重视材料均匀性、结构密实性、板体稳定性和表面功能性。若将长寿命目标理解为单纯增加厚度或提高标号，往往容易忽视细部施工与长期耐久之间的内在联系。实践表明，真正决定长寿命效果的，往往是基层平整度、混凝土配合比适应性、施工连续性、接缝传荷能力和养生质量等一系列细部因素。只有在施工全过程中贯彻耐久性理念，才能使路面结构具备长期稳定服役的基础。

2.2 施工技术对路面寿命形成的决定性作用

水泥混凝土路面属于典型的现场成型结构，其质量形成过程具有一次性和不可逆性特征。拌和、运输、摊铺、振捣、整平、刻纹、切缝和养生等环节相互衔接，任何一道工序失控都可能对后续性能造成连锁影响。比如，混凝土拌和不均会导致局部强度差异和离析；运输时间过长会引起坍落度损失和和易性下降；振捣不足会形成蜂窝、孔隙和局部密实度不够；切缝时间不当则容易诱发不规则裂缝。与沥青路面相比，水泥混凝土路面对温度应力和收缩应力更为敏感，施工阶段的工艺精细化程度直接决定板体成型质量和早期裂缝控制水平。尤其在长寿命路面建设中，要求施工技术不仅满足常规规范要求，还要关注长期服役中的裂缝扩展、接缝劣化、荷载传递衰减和表层损耗问题。因此，施工技术既是结构性能落地的载体，也是长寿命目标实现的关键保障。

2.3 质量控制理念由结果验收向过程管控转变

传统施工管理中，部分工程仍存在重终检、轻过程的倾向，长寿命路面的建设要求质量控制理念发生转变，由单一结果验收转向全过程动态控制。过程控制的重点在于原材料进场检验、拌和站生产稳定性、施工设备状态、现场工序衔接、作业环境监测以及关键参数实时校核等方面。只有把质量问题消除在形成阶段，才能降低后期病害风险。例如，水灰比略有偏差、含气量不稳定、基层局部松散、模板标高误差、切缝延误等问题，在竣工时可能并不明显，但会在后期服役中逐步放大，形成早期损坏。由此可见，长寿命路面质量管理应从“合格即可”转向“稳定耐久”，把过程数据作为质量控制的重要依据，以实现施工质量与服役性能之间的有效衔接。

3 水泥混凝土长寿命路面施工关键技术分析

3.1 基层与模板施工技术是路面成型的前提

基层是路面板受力和传力的重要基础，其平整度、压实度、强度和排水条件直接影响混凝土板底支撑均匀性[1]。若基层局部软弱、标高不准或表面起伏较大，混凝土板在荷载和温度作用下更容易出现应力集中，进而引发断板、脱空和错台等问题。因此，在长寿命路面施工中，基层处理必须做到强度稳定、表面密实、线形顺畅和排水通畅。对于半刚性基层或贫混凝土基层，应严格控制其压实质量和养护时间，避免过早上人上机导致结构扰动。模板施工同样不可忽视。模板的刚度、直顺度、固定牢靠程度及标高控制，会直接影响路面边缘成型、板厚精度与表面平整性。模板接缝若不严密，易造成漏浆和边部缺损；模板支撑若不稳，摊铺振捣时可能发生位移，影响整体成型质量。基于此，应在施工前对基层进行复核验收，对模板进行统一校正和加固，确保后续摊铺作业具备稳定基础。

3.2 混凝土拌和、运输与摊铺技术关系板体均匀性

混凝土材料性能是长寿命路面耐久性的基础。施工中应结合设计要求与环境条件优化配合比，使强度、和易性、收缩性及抗冻耐磨性能相互协调。各类原材料需严格检验，确保性能稳定。拌和阶段应控制计量精度与搅拌时间，避免出现离析、含水率波动或坍落度不稳等问题。运输过程应缩短时间，并根据气温采取遮盖或保湿措施，防止混凝土在到场前发生性能变化。摊铺环节直接影响结构均匀性，应保证布料连续均匀并预留合理振实系数，避免局部堆料或补料现象。采用滑模工艺时，还需协调设备行进速度、振捣频率与布料量[2]。实践表明，许多早期裂缝与表层缺陷源于材料均匀性不足与施工连续性差，因此材料生产与现场铺筑的有效衔接至关重要。

3.3 振捣整平、接缝施工与养生技术决定耐久水平

振捣与整平对混凝土路面的密实度与表面质量具有决定性影响。振捣不足会使内部孔隙增多，降低强度与抗渗性能；振捣过度则易导致骨料下沉、浆体上浮，削弱表层耐磨性。施工中应结合板厚与混凝土性能合理控制振捣参数，使结构均匀密实。整平与抹面需把握适宜时机，既保证平整度，又避免过度收浆引发表层缺陷。接缝施工关系应力释放与荷载传递，切缝时间、间距及传力构件安装精度均需严格控制，以防随机裂缝与边角破损。养生管理同样关键，保湿不足会加剧早期收缩并诱发微裂纹。上述环节相互关联，是实现路面耐久性能的关键技术基础。

4 水泥混凝土长寿命路面常见质量问题及成因分析

4.1 裂缝与断板问题的形成机理

裂缝是水泥混凝土路面最具代表性的早期病害，其产生源于材料收缩、温度变化及结构受力条件的共同作用。塑性收缩、温缩与干缩使板体内部产生拉应力，若切缝时机控制不当，应力无法在预设弱面释放，易形成不规则裂缝。同时，基层不均匀沉降或板底脱空，在车辆荷载反复作用下会诱发结构性开裂甚至断板。部分工程侧重强度指标而忽视收缩控制与施工环境影响，使板体虽满足设计要求，但耐久性明显不足。裂缝形成后，水分与杂质沿缝隙侵入，进一步引发冲刷与冻胀，导致病害持续扩展，因此需在设计与施工阶段实施全过程控制。

4.2 表层缺陷与耐久性衰减问题

表层缺陷虽不直接改变结构承载能力，但对路面使用

性能与耐久性具有持续影响。起砂、脱皮、露骨及麻面等问题，多与材料级配不当、拌和不均及养生不足有关。施工过程中若抹面过度或收浆控制不当，易导致表层浆体富集，形成结构疏松区域，在车辆磨耗与环境侵蚀作用下逐渐剥落。表层性能下降会引起抗滑能力减弱与平整度劣化，并对板体完整性产生不利影响。在寒冷地区，孔隙结构与含水状态的变化还会加剧冻融破坏。因此，长寿命路面建设需将表层视为功能关键层，从材料选择到施工工艺均加以严格控制。

4.3 接缝损坏与错台病害的演变过程

接缝作为混凝土路面调节应力与传递荷载的重要构造，其性能直接关系到整体使用效果。若传力杆安装偏差或滑动受限，会削弱板间协同受力能力，使荷载作用下变形差异加大。接缝密封不良则易引发水分下渗，导致基层冲刷与板底空隙扩大，在反复荷载作用下逐步形成缝边破损与错台[3]。错台不仅降低行车舒适性，还会引起冲击荷载集中，加速局部结构劣化。该类病害具有隐蔽性与渐进性特征，一旦形成将显著增加养护成本，因此需从设计、施工到后期维护建立系统化控制机制。

5 水泥混凝土长寿命路面质量控制措施

5.1 建立以材料稳定性为核心的源头控制体系

实现长寿命目标，必须从材料源头抓起。施工单位应建立严格的材料准入制度，对水泥品种、骨料级配、含泥量、针片状含量、外加剂适应性及掺合料活性进行系统检验，防止原材料波动对混凝土性能造成不利影响。骨料是决定体积稳定性与耐磨性的关键材料，应重点控制其强度、洁净程度和级配连续性。外加剂的使用则要经过配伍试验，避免与水泥体系产生不良反应。与此同时，应加强施工配合比的动态调整，根据气温、湿度、运输距离和现场施工节奏对用水量、外加剂掺量进行适度修正，保证混凝土到场状态稳定。源头控制不是一次性检测，而应贯穿整个施工周期，通过试验室与现场的联动机制及时修正参数，防止因材料细微波动引发质量链式反应。

5.2 强化现场施工工序协同与关键参数监测

长寿命路面施工强调连续、均衡和精细。现场管理应围绕“工序不断链、参数不失控、问题可追溯”的目标展开。拌和站、运输车辆、摊铺设备和切缝养生班组之间要保持节奏匹配，避免出现前场等待、后场积料或切缝延迟等问题。施工过程中应重点监测坍落度、振捣频率、铺筑厚度、表面平整度、切缝时间和养生覆盖状态等关键参数。对滑模施工，还需对行进速度、模板高程控制、自动找平系统精度进行复核。对于高温、大风、降雨等不利天气，应及时调整施工时间和养护措施，必要时暂停作业。质量控制不能停留在经验判断层面，而应依托试验检测、现场记录和信息反馈实现动态管理。通过工序协同和参数监测，可有效减少因施工节奏紊乱引发的质量隐患，提高成型质量的稳定性。

5.3 完善养护验收与后评估机制

长寿命路面的质量管理不应止于施工结束，还应延伸至养护验收和初期服役评估阶段。养生期间，应保证覆盖材料完整、保湿持续、养生时间满足要求，防止表面失水和温差过大引发早期裂缝。待达到规定龄期后，除常规厚度、强度和平整度检测外，还可结合接缝顺直度、表面构造深度、芯样密实度和传力构造安装情况进行综合评估。对于重点工程，应建立初期运营观察制度，对接缝状态、裂缝发展、板角稳定性和表面磨耗进行持续跟踪，及时发现潜在问题。后评估机制的意义在于把施工质量与服役表现联系起来，为类似工程积累经验，也为后续养护决策提供依据。通过形成“施工控制—竣工验收—早期评估”的闭合管理链，才能真正体现长寿命路面建设的全过程质量理念。

6 结语

水泥混凝土长寿命路面的实现，依赖于结构耐久理念、施工关键技术和全过程质量控制的协同作用。基层处理、混凝土拌和运输、摊铺振捣、接缝施工和养生管理等环节，共同决定了路面板体的成型质量和长期服役能力。实际工程中出现的裂缝、断板、表层缺陷和接缝损坏等问题，往往并非单一原因造成，而是材料波动、工艺偏差、环境影响和管理疏漏叠加的结果。要提高长寿命路面的建设水平，必须从源头材料控制入手，强化现场工序协同，重视关键参数动态监测，并建立覆盖施工、验收和早期服役阶段的完整质量管理体系。只有将耐久性要求细化到每一道工序、落实到每一项参数，水泥混凝土路面才能真正实现寿命延长、病害减少和综合效益提升的建设目标。

参考文献

[1] 陀忠雄,胡建平,余李迪.基于水泥及沥青长寿命路面结构的碳排放研究[J].西部交通科技,2025,(08):14-18.

[2] 林有贵,杜荣耀,何哲,等.长寿命水泥混凝土路面结构分析与应用[J].公路工程,2023,48(02):95-103.

[3] 刘邦一.长寿命复合式沥青路面结构状态检测与疲劳寿命研究[D].东南大学,2022.