

Design and Construction Technology of Long Life Cement Concrete Pavement for Highways

高速公路水泥混凝土长寿命路面设计 与施工技术

慕浩 著



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

CIP INFORMATION

Title: Design and Construction Technology of Long Life Cement Concrete Pavement
for Highways

题目：高速公路水泥混凝土长寿命路面设计与施工技术

Author: Hao Mu

作者：慕浩

ISBN: 979-8-90040-141-6

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Design and Construction Technology of Long Life Cement Concrete
Pavement for Highways**

高速公路水泥混凝土长寿命路面设计与施工技术

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 17

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in May 2026

Printing: First printing in May 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

前言

PREFACE



随着我国经济社会的快速发展和交通强国战略的深入推进，高速公路网络日益完善，对路面结构的耐久性、安全性和可持续性提出了更高要求。传统水泥混凝土路面虽具备强度高、稳定性好等优点，但在实际服役过程中普遍存在接缝病害频发、早期开裂、养护成本高等问题，难以满足重载交通与极端气候环境下的长期性能需求。在此背景下，“长寿命路面”理念应运而生，并迅速成为全球道路工程领域的重要发展方向。

本书正是在这一时代背景下编写而成，旨在系统总结近年来我国在水泥混凝土长寿命路面领域的理论创新与工程实践成果，构建一套覆盖“材料—设计—施工—养护”全链条的技术体系。我们深知，长寿命并非简单延长使用年限，而是一种以全生命周期性能为核心、融合多学科前沿技术的系统性工程思维。它要求从源头上提升材料的抗裂、抗疲劳与耐久性能，从结构上优化层间协同与应力分布，从施工上实现工艺精细化与管理智能化，从运维上转向主动预防而非被动修复。

本书的编写遵循“理论引领、技术支撑、实践验证”的逻辑主线。第一章确立长寿命路面的基本理念，明确其与传统设计的根本区别；第二章至第四章分别聚焦高性能材料开发、基于疲劳损伤理论的结构体系构建及智能建造技术；第五章则系统阐述长期性能监测、预防性养护与快速修复策略，形成完整的闭环技术路径。书中特别强调“性能定制化”思想——即根据具体工程环境与交通荷载特征，量身定制材料配比与结构参数，从而实现资源最优配置与性能最大化。

值得一提的是，本书不仅关注技术本身，更着眼于未来交通系统的融合发展趋势。长寿命路面作为车路协同、动态无线充电、能量回收等新兴功能的物理载体，正逐步从单一承载结构演变为多功能智能基础设施平台。这一

转变对材料智能性（如自感知、自修复）、结构集成性与系统开放性提出了全新挑战，也为道路工程注入了前所未有的活力。

我们希望本书能为行业同仁提供一个兼具科学深度与实践广度的技术框架，助力我国高速公路建设从“规模扩张”向“品质提升”转型。同时，也期待激发更多关于绿色低碳、智能韧性道路基础设施的思考与探索。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

——作者

目录 CONTENTS

第一章 绪论：长寿命路面理念与发展	1
第一节 长寿命路面的内涵与核心价值	1
第二节 国际长寿命路面技术发展综述	5
第三节 我国水泥混凝土路面技术：挑战与机遇	9
第四节 本书框架与核心创新点	13

第一篇 设计理论篇：结构体系与荷载应对

第二章 长寿命路面结构体系构建	17
第一节 典型水泥混凝土路面结构解析	17
第二节 复合式混凝土路面结构体系设计	21
第三节 连续配筋混凝土路面关键技术	25
第四节 路面结构排水系统一体化设计	28
第三章 重载交通下的结构设计方法	33
第一节 重载与超载交通作用特征分析	33
第二节 重载路面力学响应与设计标准	37
第三节 基于疲劳损伤的荷载应力计算	40
第四节 重载路面结构厚度与配筋设计	44
第四章 长寿命设计标准与寿命预测	49
第一节 路面设计使用年限与可靠度理论	49
第二节 多因素耦合作用下的性能衰变模型	53
第三节 路面预测传统方法与数据驱动方法综述	57
第四节 全寿命周期设计理念与实践	61

第二篇 材料创新篇：性能提升与环境适应

第五章 高性能混凝土材料设计与制备.....67

 第一节 高强高耐久混凝土配合比设计原理.....67

 第二节 外加剂与掺合料的优化复配技术.....71

 第三节 纤维增强混凝土抗裂与增韧机理.....75

 第四节 钢筋网片与传力杆系统性能研究.....79

第六章 严酷环境下的材料适应性设计.....85

 第一节 沿海地区抗盐蚀混凝土技术.....85

 第二节 高温多雨地区抗滑与抗渗技术.....88

 第三节 严寒地区抗冻融混凝土技术.....92

 第四节 材料环境适应性试验与评价体系.....96

第七章 功能层与界面处理关键技术.....101

 第一节 基层与面层间粘结与应力吸收技术.....101

 第二节 既有路面改造中的植入技术应用.....102

 第三节 接缝材料与结构功能一体化设计.....106

 第四节 功能层施工质量与控制要点.....110

第三篇 施工技术篇：工艺革新与智能管控

第八章 现代化施工工艺创新与应用.....117

 第一节 滑模摊铺施工工艺与精度控制.....117

 第二节 大体积混凝土连续浇筑技术.....121

 第三节 钢筋网定位与自动化植入技术.....125

 第四节 接缝施工与表面纹理深度控制.....129

第九章 施工全过程质量控制体系..... 135

 第一节 原材料进场与生产过程质量控制..... 135

 第三节 常见施工缺陷成因与防治措施..... 144

 第四节 质量追溯与文档管理体系构建..... 149

第十章 机械化与智能化施工技术..... 155

 第一节 智能化摊铺与碾压设备集群应用..... 155

 第二节 施工过程信息化监控与反馈..... 158

 第三节 3D 数字化摊铺与控制技术..... 162

 第四节 建筑信息模型在施工中的应用..... 166

第四篇 工程实践篇：特殊条件与运维管理

第十一章 特殊环境下的工程应对策略..... 173

 第一节 高温多雨地区施工与养护技术..... 173

 第二节 地质复杂区域路基路面协同设计..... 177

 第三节 重载交通区域特殊结构强化措施..... 181

 第四节 海外典型区域工程案例解析..... 185

第十二章 预防性养护与快速修复技术..... 191

 第一节 路面性能监测与状况评估方法..... 191

 第二节 预防性养护决策与时机选择..... 195

 第三节 高速公路路面快速修复材料与工艺技术..... 199

 第四节 修复后性能评价与验收标准..... 203

第十三章 全寿命周期成本与管理..... 209

 第一节 全寿命周期成本分析模型..... 209

 第二节 初期投资与长期运维成本平衡..... 213

第三节 基于性能的长期合约管理模式·····	216
第四节 资产管理数字化平台构建·····	220
 第五篇 未来展望篇：绿色与智能趋势	
第十四章 新型路面结构与材料前瞻·····	227
第一节 ECC 等高延性水泥基复合材料·····	227
第二节 光伏路面与结构功能一体化·····	231
第三节 预制装配式混凝土路面技术·····	236
第四节 再生骨料与固废资源化利用·····	240
第十五章 绿色低碳与智能化发展路径·····	245
第一节 低碳混凝土技术与碳足迹评估·····	245
第二节 长寿命路面的绿色价值评价·····	249
第三节 数字孪生技术在运维中的应用·····	253
第四节 未来智慧公路系统技术展望·····	258
参考文献·····	263

第一章 绪论：长寿命路面理念与发展

第一节 长寿命路面的内涵与核心价值

一、长寿命路面的基本概念

（一）长寿命路面的定义与特征

长寿命水泥混凝土路面一般指设计使用年限达到或者超过 40 年，在全寿命期内，路面结构本身，尤其是基层及以下结构层，保持完好无损，只对表层进行功能性修复或更换的路面。路面设计之初就是打造一个永久性的基础平台，把大部分的结构破坏控制在可预见、可管理的范围内。其主要特点就是耐久性好、结构稳定性高和预见性强的长期性能。

高度的结构稳定性即路面结构具有很强的抗变形能力，能够很好地传递荷载。改良设计的结构组合和精细化的接缝传力系统，可以使行车荷载均匀地传递到坚固的下承结构上，从而有效地防止由于应力集中造成的局部破坏。稳定性是保证路面长久保持平整、舒适、安全运行的条件。可预见的长期性能依靠科学的设计理论、准确的性能预测模型、全过程的质量控制，使路面几十年的性能衰减规律一目了然，给管理者制定科学、经济的养护决策提供可靠的依据。

（二）与传统路面的主要区别

长寿命路面和传统水泥混凝土路面的设计理念、性能目标、经济评价方式都存在着根本性的不同。长寿命路面与传统路面的主要区别如表所示。

传统的路面设计一般采用 10 到 20 年作为设计年限，在设计之初就预设了达到设计寿命后要进行结构性的大修或者重建。该模式把大量的维护、重建费用推迟到将来，属于一种分期投入的建设哲学。

核心分歧就是设计理念的不同，传统设计侧重初期建设强度和规范要求，其目的就是使路面在设计年限内，损坏程度处于可以接受的范围。长寿命路面设计坚持“预防性”思想，创建一个非常坚固耐久的结构基础，从根本上杜绝或者大大延缓结构性病害的发生。它追求的是零结构性维护或者最低限度结构干预的理

想状态。为了达到此目的，材料的选择和施工控制标准也相应提高，一般采用高性能材料和精细化的施工工艺，保证每一个结构层都具有超常的耐久性。

长寿命路面与传统路面核心区别对比表

特征维度	长寿命路面	传统路面
设计理念	预防性设计，构建永久性基础结构，从根本上杜绝结构性病害	寿命周期设计，预设结构性大修 / 重建，接受设计年限内损坏
设计年限	40 年及以上	10-20 年
性能目标	全寿命周期内保持高水平服务状态，性能衰减平缓	设计年限结束时服务水平不低于标准，后期衰减快
维护策略	重点关注功能性维护（表层），极少结构性大修	频繁的结构性大修与重建
材料与施工	高性能材料，精细化施工工艺，超常耐久性	满足规范要求即可，初期建设强度优先
经济评价	强调全寿命周期成本分析，考虑用户成本	更侧重初期建设成本

传统路面的性能目标是设计年限结束时不能低于一定的标准；长寿命路面则期望整个服役期内始终保持高水平的性能状态，性能衰减曲线比较平缓。这就说明长寿命路面要具有更强的抗疲劳、抗水损、抗环境侵蚀的能力。经济评价上传统路面更多考虑的是初期建设成本，长寿命路面则普遍采用全寿命周期成本分析的方法，把建设、养护、修复、用户延误成本等所有费用都考虑进去，以此来证明它的长期经济优势。

（三）长寿命路面的结构特点

长寿命水泥混凝土路面的结构设计是保证其超长服役性能的物理基础，其构造比传统路面有明显的加强和改善。整个结构系统以协同工作的方式进行，从源头上消除可能的缺陷，保证荷载有效传递，把环境因素对结构的影响降到最低。

这种路面的结构特点可概括为以下几个关键层面：

1. 坚固耐用的下承层系统。长寿命路面设计的重点是路基、基层等下承层系统的创建。一般采用改良过的或稳定的优质路基，在其上设置一层或者多层强度高、抗冲刷性能好的基层和底基层。常用的材料有水泥富集碎石稳定层、贫混凝土或者沥青稳定基层。这些结构层一起形成一个刚度大、整体性强、几乎不会被水侵蚀的永久性平台，给上层的混凝土面层提供持续、均匀、可靠的支撑，从根本上杜绝了基层唧泥、冲刷造成混凝土板脱空、错台、断裂等严重病害。

2. 高性能混凝土面层直接承受交通荷载和环境作用，它的材料性能好坏直接影响到路面整体的表现。长寿命路面一般采用高性能混凝土，高性能混凝土水胶比低、致密度高、抗折强度高、抗疲劳性能好，抗冻融能力、抗化学侵蚀能力强。掺入硅灰、粉煤灰等优质的矿物掺合料，使用高效外加剂和纤维增强技术（钢纤维、合成纤维等），可以大大提高混凝土的韧性、抗裂性，从而延长其使用寿命。

3. 接缝、传力系统精细化。水泥混凝土路面的接缝属于结构上的薄弱部位，也是病害频发的地段。长寿命路面在传力杆、拉杆的设置、尺寸选择、防腐处理和填缝料性能方面要求非常高。高效传力杆系统可以使荷载在接缝两侧板体间平稳过渡，大大减小板边应力水平，防止错台。选择耐久性较好的密封材料，可以很好地且持久地阻止水分、杂物进入接缝，从而保护基层和路基不受破坏。

4. 完善的排水系统设计。水是水泥混凝土路面产生唧泥、冻胀、基层强度下降等病害的主要原因。长寿命路面设计非常重视路面结构的内部排水，一般在基层或者底基层中设置透水层，配合完善的纵向、横向排水设施，例如边缘排水沟、排水盲管等。这样就使得进入路面结构内部的水分可以及时排出，从而保持下基层的干燥、稳定。

二、长寿命路面的核心价值

（一）全寿命周期的经济效益

尽管长寿命路面的初期建设费用比传统路面高出 15% 到 30%，但是将时间跨度拉长到四十年甚至更长的時候，它的经济性就会充分地体现出来。传统路面在 10 到 15 年之后就需要进行大规模的结构修复或者重建，工程费用高昂，反复出现，总成本不断上升。长寿命路面依靠着坚固的结构设计，大幅度减少甚至杜绝了这些昂贵的结构性维修，其生命周期内主要支出在成本较低的表层功能性维护上，例如接缝重封、表面磨耗层修补等。

全寿命周期成本分析不能只考虑直接的建设和养护成本，还要包括因为道路维修施工而产生的用户成本。道路封闭、交通管制频繁，容易引起严重的交通拥堵，因此由此带来的车辆燃油消耗增加、时间延误、运输效率降低等间接经济损失很大。长寿命路面由于维修次数很少，道路可以长期保持畅通，为社会节约了难以估量的用户延误成本。将未来成本和用户成本综合考虑的经济评价方法，清楚地表现出了长寿命路面“一次性投入，长期受益”的经济优势，对预算有限但

是追求长期效益的政府机构来说，具有很强的吸引力。

（二）提升道路通行效率的社会效益

道路是国家经济的动脉，道路通行效率的好坏直接影响到整个社会运行效率以及公众出行质量。长寿命路面由于大幅度降低道路维修频率，给社会带来了巨大的通行效益和安全效益。一个稳定可靠、很少需要封闭维修的高速公路网络，可以保证客货运输的准时性、可预测性，对现代物流供应链的稳定、区域经济协同发展起着关键作用。

频繁的道路养护作业会造成交通拥堵，也会产生大量的移动作业区，这些区域是交通事故的高发地段。长寿命路面最大程度上缩减了工作人员、机械设备在运营路面上停留作业的时间，直接削减了交通事故的发生几率，进而保证了司乘人员和养护工人的生命安全。路面状况好、连续平整，驾乘体验会更舒适，也能降低车辆颠簸和损耗，提高公众对高速公路服务的满意程度。基础设施可靠性带来的社会稳定性提高以及公众福祉的改善，虽然不能直接用货币来衡量，但是其社会意义却非常重大。

（三）节约资源与保护环境的生态效益

可持续发展已经成为全球共识的时候，长寿命路面所具有的生态效益就显得格外珍贵。其最大的贡献就是最大程度上延长了基础设施的使用寿命，从根本上减少了对自然资源的消耗以及对环境的影响。道路建设及维修属于资源消耗型活动，消耗大量的砂石、水泥、钢材等不可再生材料，产生大量的能源消耗和温室气体排放。

长寿命路面建设思想的产生也促使再生材料的应用。坚固的下承层为再生混凝土骨料、粉煤灰、矿渣等工业废料的利用打下了良好的基础，有利于资源的循环利用，有效减轻了固体废弃物填埋的压力。施工活动越少，施工噪音、粉尘污染及对道路沿线生态环境的干扰就越小。因此发展长寿命路面不但是道路工程技术的进步，更是践行绿色发展理念、建设资源节约型和环境友好型社会的重要举措，对促进人与自然的和谐共生有深远的战略意义。

第二节 国际长寿命路面技术发展综述

一、国际长寿命路面技术发展历程

（一）欧洲国家技术发展特点

欧洲是现代公路工程发源地之一，水泥混凝土路面技术体系成熟，并且有独特的长寿命水泥混凝土路面技术。德国的技术路线最明显，其设计理念就是用建造厚度大、刚度强的普通无筋混凝土板（一般厚度大于三十厘米）来抵抗交通荷载和环境作用的长期影响。重型结构的设计思想，配合严格的原材料选择、混凝土配合比控制和精细化的施工质量控制，从根本上提高了路面结构的初始承载能力、耐久性，最大限度地减少了全生命周期内结构性维修的次数。德国对于路基路床的处理也十分严格，以保证路面结构得到均匀稳定的支撑，从而保证路面板的长期平整度和工作性能。

法国复合式路面技术取得的成果很多，长寿命路面设计大多采用半刚性基层上铺设水泥混凝土面层，或者在旧混凝土路面上加铺沥青层。该种结构形式把水泥稳定材料的强度、混凝土的耐久性以及沥青罩面的功能性结合起来，从而达到结构承载和使用性能的最佳配合。欧洲的比利时等国在连续配筋混凝土路面技术方面有丰富的经验，在板内设置纵向钢筋，从而控制裂缝，取消横向接缝，得到极好的行车平顺性，减少由于接缝损坏而引起的维护问题。欧洲对材料本构性能、施工工艺的标准化非常重视，依靠高质量的工程实体来保证长久的使用寿命。

（二）北美地区技术发展特点

美国的长寿命路面技术发展，是受美国国土辽阔、气候条件多样、联邦公路系统庞大维护需求等影响而发展的。最具里程碑意义的成果就是美国战略公路研究计划的实施，之后发展出的路面设计指南。该体系的建立标志着路面设计由以前的经验型方法变成了以力学、经验原理为基础的性能预测型方法。这种方法不再只是依靠经验公式来确定路面厚度，而是把交通荷载谱、气候数据、材料力学参数和路面结构响应综合考虑进去，利用复杂的模型预测路面在设计寿命内可能出现的断裂、错台、平整度衰减等性能指标，从而实现更加科学、可靠、经济的设计。

根据性能预测的设计思想，美国提出了永久性路面或者长寿命路面的概念，

其主要思想是设计一个足够坚固的下层结构,使下层结构在使用寿命内不会发生结构性破坏(疲劳开裂),路面的老化主要是表层功能的退化。水泥混凝土路面要承受数以亿计次的荷载作用而不发生疲劳破坏,这就要求设计出厚的混凝土板和耐久的基层。维护工作主要是表层周期性的修补,即接缝封合、板底灌浆或者表面磨损层恢复,而不是昂贵且会中断交通的结构性大修。这个理念把设计重心从防止破坏转移到管理性能上,由此引起现代路面工程思维方式的变化,全生命周期成本分析方法得到广泛应用。

(三) 亚洲国家技术发展特点

在亚洲国家当中,日本在长寿命路面技术方面的发展是最为突出的。日本高密度、大轴重交通流、地震多发、气候湿热的特殊国情下,混凝土路面技术的发展重点是提高耐久性、抗震性能和快速施工维养技术。日本工程师对混凝土材料长期性能做了大量的研究,开发出了高性能混凝土、优化传力杆和接缝构造等设计,来减小繁重的交通荷载以及频繁的地震影响。路面结构设计重视疲劳韧性,保证结构长期在荷载反复作用下不破裂。

由于国土面积小,道路养护维修常常会面临很大的交通压力,因此,快速修复技术在日本得到了很高的重视并得到迅速的发展。预制混凝土板快速更换技术、超早强混凝土材料的应用等,都是为了最大限度地缩短施工时间,减少交通受到影响的时间。由于日本对时间效率极为重视,在路面保养技术方面走在世界前列。韩国等其他亚洲国家在经济迅速发展的时期,积极引进并本土化改造了欧美国家的先进技术,根据本国的气候、交通特点,在材料性能提高、施工质量控制等方面取得明显进步,逐步形成了符合本国需要的技术体系。

二、国际先进技术经验借鉴

(一) 典型国家技术路线分析

国际上长寿命水泥混凝土路面技术路线虽然目标一致,但是实现途径却大相径庭,大体可以归结为几种典型模式。选择不同的模式是由于各国工程哲学、客观条件的不同而产生的。

1. 德国的强基固本路线就是结构一次性到位。采用大厚度素混凝土板、高质量基层和垫层,形成一个非常坚固的初始结构。其设计哲学就是依靠高质量的材料、强大的结构来抵抗大部分的外部荷载和环境侵蚀,把路面全生命周期内的维

修干预降到最低。优点是结构可靠度高，长期养护成本低，缺点是初始投资大、施工质量要求高。

2. 美国的“科学预测”路线，以 MEPDG 为代表，主要是“基于性能的精细化设计”。它不追求绝对的“永不损坏”，而是用科学模型来预测路面在一定条件下性能演化的过程，在设计之初就充分考虑初始投资和未来养护成本之间的关系。本方法最大的优点是灵活性高、经济性好，可以根据不同的项目进行量身定制，但是对输入数据（交通、气候、材料参数）以及预测模型的准确性有较大的依赖。

3. 法国的“刚柔并济”路线，其特点就是复合式路面，核心就是结构功能的分层优化。依靠半刚性基层和混凝土板来提供主要的结构承载力，同时利用表层的沥青材料来提供良好的行车舒适性、低噪声以及易于修复等特点。此种设计将不同材料的优点结合起来，既可以保证结构耐久性又可以满足使用功能，适应性强。

（二）关键技术成果与应用实例

国际长寿命路面技术的发展要依靠一系列关键技术成果的应用。高性能混凝土是基础的基础，通过优化集料级配、使用高效外加剂、降低水胶比，大幅度提高了混凝土的密实度、强度、抗裂性、抗环境侵蚀性，从根本上保证了路面的耐久性。在很多要求混凝土 28 天弯拉强度达到 5 兆帕以上的公路工程中，对氯离子渗透性等指标也做了严格的规定。

纤维增强技术可以有效地提高混凝土的韧性。在混凝土中加入钢纤维或者合成纤维，可以抑制微裂缝的发展，提高板体的抗冲击性以及疲劳寿命。在机场道面、重载路段、检查井周围等应力集中区使用纤维增强混凝土可大大减少早期的开裂、板角断裂等病害。因此路面结构承受超重荷载时，会表现出较好的延性而不是脆性断裂。

无损检测技术同信息化管理相结合，给长寿命路面的质量把控以及状态评定赋予了强有力的手段。施工阶段用探地雷达测量板厚和钢筋位置，运营阶段用落锤式弯沉仪定期检测路面承载能力，都是应用技术对路面全生命周期健康监测的体现。德国 A5 高速公路部分路段、美国伊利诺伊州长寿命路面试验路等项目，都是先进技术综合运用的典范，它们长期良好的使用性能也证明了这些技术路线是成功的。

长寿命路面关键技术及其作用

技术类别	关键技术示例	主要作用	应用场景
材料优化	高性能混凝土	提高强度、耐久性、抗裂性、抗侵蚀性	所有混凝土路面结构
	纤维增强混凝土	抑制微裂缝发展，提高韧性、抗冲击性、疲劳寿命	机场道面、重载路段、应力集中区
结构设计	大厚度素混凝土板	抵抗长期荷载和环境影响，减少结构性维修	德国“强基固本”路线，初始承载力高
	半刚性基层与混凝土面层复合	结合不同材料优势，优化承载与使用性能	法国“刚柔并济”路线，兼顾结构与功能
	连续配筋混凝土路面	控制裂缝，消除横向接缝，提高行车平顺性	比利时等欧洲国家，要求高平顺性路段
细部构造	优化传力杆系统	确保荷载有效传递，防止错台病害	所有带接缝的混凝土路面
	高效排水系统	迅速排出结构内部水分，防止基层软化	各类路面结构，尤其潮湿地区
管理与评估	性能预测设计	科学预测路面性能，实现经济可靠设计	美国“科学预测”路线，适应性强
	无损检测 与健康监测	全生命周期质量把控和状态评估	施工质量检查，运营期承载力评估

从表中可以看出，长寿命路面的成功离不开材料、结构、细部构造和管理评估等各方面的发展。

（三）对我国的启示与借鉴意义

国际长寿命路面技术发展经验给我国交通量不断增大、路网规模不断扩大的国家带来了深刻的启示。我国的高速公路正从大规模建设阶段进入建设、养护并重的阶段，发展长寿命路面技术是交通可持续发展的必然要求。借鉴国际经验，必须使设计理念发生根本性的转变，即由传统的依靠规范的定型化设计，转变为依靠全生命周期成本效益分析和性能预测的科学化、个性化设计。这就需要建立符合中国国情的路面性能预测模型，建立完备的交通、气候、材料等数据库。

技术路线不能照搬任何一国的模式，而应该采取“兼收并蓄、融合创新”的方式。根据各个区域自然环境特点、交通荷载特性、经济发展水平来选择合适的技术路线。东部经济发达、交通流量大地区可以选择德国重型结构方案，西部则更多的可以采用美国的灵活且经济的模式。另外还应该大力发展复合式路面等形式来满足复杂维修改造的要求。

最终实现路面长寿命的方法就是创建一个包含设计、施工、养护全过程的质量保证体系。不但要研发高性能建筑材料，还要创新施工工艺、装备，推广精细化、智能化施工管理方法，用长期性能观测计划不断检验和修正我们的设计理论和技术标准。只有把先进的设计理念、关键核心技术、严格的质量管理体系三者结合起来，才能建成经得起时间考验、经得起交通磨砺的百年公路工程。

第三节 我国水泥混凝土路面技术：挑战与机遇

一、我国水泥混凝土路面发展现状

（一）技术应用与建设成就

我国高速公路建设始于上世纪八十年代末，很快进入高速发展时期。在建设的热潮中，水泥混凝土路面由于有很强的承载能力、稳定性好、原材料来源广而成为早期高速公路建设的首选。从第一根高速公路开始，到遍布全国的骨架网络，水泥混凝土路面为我国的现代化交通体系的建立立下了汗马功劳，建设总里程在相当长的时间里占据主导地位，有力地支撑了国民经济的腾飞。

伴随着工程实践的深入，我国水泥混凝土路面技术体系也不断更新。技术体系由最初的普通混凝土路面发展为钢筋混凝土路面、连续配筋混凝土路面等多样化的结构。高性能混凝土、钢纤维混凝土等新型材料的出现，使路面抗裂性、抗疲劳性得到提高。我国水泥混凝土路面技术体系的发展变化，从下表中可以一目了然地看出来

我国水泥混凝土路面技术发展演变表

路面类型	发展阶段	主要特点	应用场景举例
普通混凝土路面	早期	结构简单，施工技术相对基础	低等级公路，早期高速公路
钢筋混凝土路面	发展中期	通过配筋提升抗拉、抗弯强度	重载交通路段，易受冲击区域
连续配筋混凝土路面	发展中期	消除横缝，减少养护需求，提升行车平稳性	高速公路主线，高等级公路
高性能混凝土	近期	高强度、高韧性、高耐久性，减小厚度	桥面铺装，长寿命路面关键部位
超高性能混凝土	近期	极高强度、韧性，优异抗裂与耐久性	特殊结构连接，超长寿命路面
钢纤维混凝土路面	近期	提高抗裂、抗疲劳性能，抑制裂缝扩展	机场跑道，港口重载交通，工业地坪

大型滑模摊铺机的大规模使用实现了施工的机械化、高效化,精细化的质量控制保证了路面初始平整度和结构整体性的好状态。

从总体上看,我国的水泥混凝土路面对于服务重载交通、保证港口集疏运通道等起着不可替代的作用。高刚度、高温稳定性好,特别适合于南方高温多雨地区和重载轴线密集的工业走廊。数十年大规模建设所积累的设计经验、施工技术、管理模式,给我国长寿命路面技术发展留下宝贵的工程实践遗产。

(二)存在的主要技术问题

虽然取得了很好的成果,但是随着时间的推移,大量的水泥混凝土路面已达到或者超过了设计使用年限,各种结构性、功能性病害集中爆发。严重地影响行车舒适性、安全性,给养护工作带来沉重的负担。路面在实际使用中寿命达不到设计要求,暴露出现有的技术体系不能适应现代交通和环境变化的弊端。

路面板开裂为最常见的病害形式,横向、纵向、角隅断裂等都属于它。接缝处传荷能力降低所引起的错台、唧泥现象也十分严重,严重破坏了路面的平整度。病害产生机理比较复杂,一般是由交通荷载和环境因素耦合作用造成的。重载车辆的反复冲击是造成结构疲劳破坏的外部原因,混凝土板在温湿度梯度的作用下产生的翘曲应力,又会加重板体开裂、接缝损坏。

深入剖析其根源,主要可归结为以下几个层面:

1. 设计理论的局限性,传统的设计方法大多依靠静力学模型,没有考虑到动态荷载、环境耦合效应以及材料长期性能退化等,造成设计的可靠性不能满足实际的要求。

2. 材料固有性能缺陷:水泥混凝土为脆性材料,抗拉强度小,极易开裂。材料内部的微观缺陷、早期收缩、长期疲劳累积等都是造成其性能劣化的主要原因。

3. 施工质量控制难题在于施工过程中存在离散性、变异性,容易造成路面耐久性降低。从基层平整度、混凝土振捣、接缝构造以及养护等任何环节的疏忽都会埋下长期的质量隐患。

4. 养护策略相对滞后,长期以来我国水泥路面养护多采用事后补救的被动方式,缺少预防性养护的理念,小病拖成大病,加大了养护难度和成本。

上述问题一起形成了我国水泥混凝土路面实现长寿命化的主要障碍,必须从全生命周期的角度寻求技术上的突破。

（三）当前面临的发展挑战

进入新时代之后，我国水泥混凝土路面技术的发展面临更加复杂严峻的挑战。最直接的影响就是交通需求的急剧变化。目前高速公路的交通特点为大流量、高轴载、渠道化，重型货车所占比例不断增大，给路面结构造成的疲劳损伤比以前的设计标准要严重得多。由于超负荷的工作状态使得传统的结构设计理论已经力不从心，怎样科学合理地应对极端交通荷载，成为了路面实现长寿命化的前提条件。

另外资源、环境约束也越来越严。水泥生产是重要的碳排放源，在国家双碳战略目标下，传统水泥的大规模使用正受到很大压力。优质天然砂石等骨料资源的日趋稀少，也会给混凝土材料的可持续供应造成影响。因此，开发和应用低碳胶凝材料、推动工业固废资源化利用技术，建立绿色循环的路面材料体系，已经成为行业发展的必然选择，但是在这个过程中必然会遇到许多技术难题。

现有道路养护改造工作也遇到很大的困难。我国大部分水泥混凝土路面已进入中后期养护阶段，如何经济、高效、环保地进行功能恢复和结构延寿，成为迫切需要解决的问题。传统的沥青罩面法应用范围广，但反射裂缝的问题一直得不到解决。彻底“打掉重建”方案投资大、交通阻塞严重、建筑垃圾多。因此研发快速、耐久、微创的修复加固技术来保证路网畅通，已经成为迫切的需求。

二、我国长寿命路面发展机遇

（一）国家政策与市场需求

国家宏观战略的指导，给长寿命路面的发展赋予了顶层设计和根本遵循。交通强国建设纲要及其他一系列重要文件都把高质量发展放在首位，提出要建设安全、便捷、高效、绿色的现代化交通运输基础设施。这样一种战略导向，使得基础设施建设的评价标准由以前只注重建设速度、规模转变为更多地考虑全生命周期性能、耐久性。长寿命路面是实现基础设施高质量发展的关键，重要性被提升到前所未有的战略高度，也获得了强有力的政策支持。

同时不断增长的市场需求又直接促使长寿命路面技术的发展。随着经济的发展和社会的进步，人们对出行的品质要求越来越高，安全可靠、舒适顺畅的行车体验成了最基本的要求。频繁的道路维修不但会降低通行效率，还会造成安全隐患。对于高度依赖公路运输的现代物流业来说，稳定畅通的交通走廊就是它的生

命线。对于路网高可用性的强烈需求，就产生了对“少养护”路面技术的庞大市场需求。

（二）技术积累与创新基础

我国长寿命路面技术不是凭空产生的，是在几十年的工程实践积累和不断的技术创新的基础上发展起来的。大规模的高速公路建设给我们提供了一个全球规模最大、条件最复杂的试验场。广阔的实践平台为各种气候环境适应性研究、各类结构形式长期性能观测和无数次成败经验的总结提供着宝贵资源，保证研究同工程实际紧密结合。

材料科学的发展，已经成了长寿命路面技术取得突破的重要推力。近些年来，超高性能混凝土、高延性纤维增强水泥基复合材料等新型高性能材料不断出现。这些材料在强度、韧性、抗裂性、耐久性等各方面比传统的混凝土都要好得多，为百年路面梦想的实现打下了坚实的基础。低碳胶凝材料体系研究、纳米技术应用、工业固废高效利用，正在使路面材料向着绿色、可持续发展的方向。

信息技术同传统交通工程的深度交融，给长寿命路面装上了智慧的翅膀。大数据、人工智能、物联网等前沿技术正在全方位地渗透到路面工程的设计、施工、检测、养护等各个环节。根据大量的数据进行精细的设计，可以更加准确地预测路面性能，智能建造技术可以对施工质量进行实时的监测，嵌入式监测元件可以让路面具有“自我感知”的能力，能够对结构健康状态进行实时的诊断和预警，建筑信息模型的应用，可以建立起路面全生命周期的数字化档案，为科学决策提供强有力的数据支持。

（三）未来发展的广阔前景

我国水泥混凝土长寿命路面的发展前景十分广阔，它已经不再是一个传统的单一承载结构，而是一个集多功能、智能化、绿色化为一体的新型基础设施平台。核心愿景就是实现设计使用年限 40 年以上，在全生命周期内只需要少量的功能性维护，而不需要进行大量的结构性维修，从根本上改变传统的养护模式，走向近零养护的新阶段。

未来技术的发展会越来越重视系统性、前瞻性。从材料上来说，具有自修复、自感知等智能功能的混凝土将会成为研究的重点，实现从被动抵抗损伤到主动延长寿命的转变。在结构设计方面，精细化接缝设计、高性能复合式结构会成为重点，从源头上消除结构的薄弱环节。就建造而言，以机器人、自动化为依托的智

能建造体系将大幅度提高施工质量的均一性。用数字孪生、人工智能驱动的预测性维护决策系统来管养路面状况，可达到精确控制的目的。

长寿命的路面将会成为交通改变的主要承载者。它可以和新能源汽车技术进行深度融合，用铺设无线充电线圈的方式给电动汽车提供动态充电。还可以集成能量收集装置，把车辆的动能转化为电能，打造出自供能公路。长寿命路面是车路协同系统物理基础，给自动驾驶车辆提供高精度的定位、实时的路况信息，从而全面提高交通系统的安全性、效率。

第四节 本书框架与核心创新点

一、本书主要内容与框架

（一）各章节核心内容安排

书中的章节安排是以理论到实践、从宏观到微观的逻辑顺序组成的，其主要目的就是建立一套完整的理论体系。本书对长寿命路面基本概念、设计原则及在现代公路建设中所具有的重要价值进行论述，为全书理论基础打下基础。该部分内容将会明确长寿命路面不是简单的延长设计年限，而是一种包含全生命周期的综合性能提升理念。

下一章主要对长寿命水泥混凝土路面的关键技术进行阐述。内容包含高性能混凝土材料设计和制备，重点对新型外加剂、高品质集料、钢纤维等增强材料的应用技术进行分析。本书还会对基于疲劳损伤累积理论的结构组合设计、接缝设计优化和连续配筋混凝土的应用做详细的论述。书中主要阐述了滑模摊铺施工工艺、精细化质量控制标准、智能化施工技术的应用，保证设计理念的精准落地。

本书最后设置了专章对路面的长期性能监测、预防性养护和快速修复技术进行讨论。具体有无损检测技术的应用、路面脱空板底灌浆、裂缝修复、功能性罩面技术的选择与实施等，形成一个从建设到养护的闭环。全书各章节环环相扣，共同组成一套完整的高速公路水泥混凝土长寿命路面技术方案，目的在于给行业提供一个科学、实用、前瞻的技术指南。

（二）全书技术路线阐述

本书的技术路线是以提高耐久性、保证长寿命为目标，贯穿材料、设计、施工、养护四个主要方面，形成了一条清晰的主线。本条技术路线的出发点是建立

科学、系统的长寿命路面设计理论体系，摒弃了传统的以承载能力为主的设计思路，把路面结构的长期耐久性、服役性能放在第一位。

本书对于材料的要求是高性能化、精准化。通过优化水泥、集料、外加剂以及各类纤维增强材料等性能，并加以科学配比，从而得到高抗裂、高耐磨、高抗疲劳的混凝土材料。这既是材料自身性能的要求，也是对材料在特定环境、荷载状况下进行准确预测和控制的过程，从而为路面结构长期稳定打下物质基础。

技术路线在设计上要达到“结构优化”、“协同工作”的目的。利用疲劳累积损伤的力学模型来优化路面结构组合和层间设计，加强基层、底基层稳定性和排水性的设计要求。对路面接缝传荷能力、钢筋配置等关键构造做细致的设计，使路面板、基层、路基共同承受荷载，形成整体稳定的结构体系，有效地抵御环境和荷载的作用。

施工养护阶段的技术路线重点为“工艺精细化”和“管理智能化”。书中对从原材料进场质量控制、混凝土拌和、摊铺振捣到养生切缝的全过程精细化施工工艺做了详细的阐述。利用信息化和智能化的检测手段对施工质量实施动态控制与反馈。养护阶段重视从被动修复到主动预防的转变，依靠定期检测评价，科学制定养护计划，延长路面实际使用寿命，形成完整的建养一体化技术路线。

（三）内容组织逻辑说明

本书内容组织按照理论引领、技术支撑、实践验证的逻辑线，使读者可以由浅入深、由表及里掌握高速公路水泥混凝土长寿命路面的核心知识体系。全书以长寿命路面的基本理念和设计哲学作为逻辑起点，阐述长寿命路面同传统路面的区别，从宏观上给读者提供认知基础。

长寿命路面与传统路面设计理念对比表

对比项	传统路面设计	长寿命路面设计
设计目标	满足短期承载，达到设计年限	延长使用寿命至 30-50 年，全生命周期高性能
设计寿命	通常 15-20 年	30-50 年以上
关注重点	承载能力、初期建设成本	结构耐久性、抗疲劳、功能性、全生命周期成本
材料选择	常规材料，满足规范即可	高性能混凝土、新型增强材料（如钢纤维、UHPC）
结构设计	经验公式、静态荷载分析	疲劳损伤累积理论、结构协同、优化接缝和基层
养护策略	被动修复、周期性大修	主动预防、智能监测、快速修复、建养一体
成本考量	注重初期建设成本	考虑全生命周期成本

从上表可知，长寿命路面在设计理念上存在较大差异。在此基础上，书籍的内容按照路面建设的过程进行展开，包含了材料科学、结构设计、施工工艺、养护管理等内容。此种组织方式符合工程实践内在逻辑，有利于工程技术人员把书本知识同实际工作结合起来。每一章从阐述基本原理开始，然后对技术方法、工艺参数和规范要求加以说明，最后用典型工程案例进行分析，从而形成一个完整的知识链条，即什么、为什么、怎么做，既保证理论深度的掌握又保证实践广度的覆盖。

二、本书特色与核心创新点

（一）内容特色与亮点提炼

本书不同于传统的路面工程教材，具有很强的时代性、实践性，全面地反映了目前长寿命路面技术最新发展的状况。

1. 理论体系的前瞻性、系统性，本书除了常规的设计、施工方法外，更在于形成以长寿命为目标的性能化设计理论体系。它把路面看作一个在长期服役过程中性能不断变化的复杂系统，重视从材料耐久性、结构抗疲劳性、施工质量可靠性等各方面开展综合设计，打破了传统依靠静态荷载和固定设计年限的局限。

2. 技术内容的先进性、实用性本书收录了近几年来出现的新技术、新材料、新工艺。就材料而言，主要介绍了超高性能混凝土、钢纤维增强混凝土等新型材料在路面工程中的应用。施工方面主要介绍了以物联网、传感器技术为基础的智能施工监控与管理系统、滑模摊铺等先进的施工技术。这些内容同工程实际紧密联系，具有很强的可操作性以及应用价值。

3. 案例分析的典型性、全书穿插许多国内外成功的长寿命路面工程实例，对不同的气候区、不同的交通荷载等级下的工程实践都做了详细的分析。通过对设计理念、技术手段、施工难点及长期运行情况的总结给读者提供了宝贵的经验，使以后工作中遇到的各种复杂情况可以应对。

（二）技术创新点总结

本书在技术理论以及工程实践方面提出了许多新的观点，这些新观点一起构成了本书的主要价值。本书提出了全生命周期成本分析为基础的综合设计方法。该方法把建设初期投入和未来几十年的养护成本、用户延误成本等都考虑在内，目的是在路面结构方案决策时达到最佳经济效益，使路面设计理念由传统的单纯

追求“技术最优”向追求“经济社会综合最优”转变。

本书就高性能混凝土材料的性能化设计理念进行了论述。其思想就是根据路面上各结构层的要求来调整材料配比,从而实现抗裂、耐磨、抗冻等主要性能的定制化设计。打破了传统的依靠固定配合比的方式,使材料性能和结构要求更加匹配,从源头上改善了路面的耐久性。

结构设计上,本书加强了路面结构整体协调性、长久稳定性。书中对基层对顶层的长期性能决定性影响做了详细的分析,提出了增强型基层、排水型基层等优化方案。就路面板块尺寸、接缝构造、传力杆布置等方面做了系统的优化设计,目的是使温度应力、荷载应力综合的影响减小,抑制路面早期病害的发生与发展。

本书记载了数字化、智能化施工质量控制的思想。用集成的传感器技术、BIM技术、大数据分析平台对混凝土拌合、运输、摊铺、养护等全过程的重要参数实施实时监控和智能预警。这样一种智能化管理方式大大地增强了施工质量的一致性、可靠性,也使长寿命路面设计的目标得以准确实现,是对传统施工管理方式的重大革新。

(三) 实践应用价值体现

本书最终的价值落脚在其实践应用上,为我国高速公路建设、养护提供一套行之有效的技术方案,其价值主要表现在以下几个方面:设计单位将根据本书所给的基于性能化、全生命周期理论的设计方法、参数和典型结构,摆脱传统经验设计的束缚,制定出更加科学、经济、耐久的路面设计方案,有效应对重载交通、复杂气候环境带来的挑战。

施工单位按照书上所写的精细化施工工艺、智能化质量控制体系和各种新型材料应用技术指导现场施工。利用书中所述的先进技术可以明显改善工程质量,降低早期病害发生概率,进而提高市场竞争力。对于业主和管理单位,本书有关预防性养护、快速修复技术、路面性能长期监测评估等内容为业主和管理单位制定科学的养护决策、合理安排养护资金提供依据,有利于路产价值的最大化和可持续发展。

第一篇 设计理论篇：结构体系与荷载应对

第二章 长寿命路面结构体系构建

第一节 典型水泥混凝土路面结构解析

一、传统路面结构形式与特点

（一）普通混凝土路面结构

普通混凝土路面又称为素混凝土路面或接缝式混凝土路面，其主要结构特点是混凝土板内不配置钢筋，或者仅在局部区域（如边角、胀缝处）设置少量构造钢筋。为了有效地控制温度、湿度变化引起的混凝土收缩、翘曲应力，该种结构形式采用密集布置的横向、纵向接缝，把路面分割成若干个独立的矩形板。横向缩缝间距较小，一般为4 - 6米，目的是规定裂缝出现的位置，防止出现不规则裂缝。

传统水泥混凝土路面结构特点对比

特点 / 结构类型	普通混凝土路面	钢筋混凝土路面	连续配筋混凝土路面	预应力混凝土路面
内部配筋	无或少量构造筋	有钢筋网	纵向连续大量钢筋	高强度钢筋（束）施加预压应力
典型接缝间距	4-6 米	10 米以上	无横向接缝	100 米以上或无横向接缝
承载机理	板体刚度与强度	钢筋抗拉控制开裂	钢筋约束微裂缝，骨料嵌锁传荷	预压应力抵消拉应力
主要优点	初期成本低，施工简便	整体性强，减少接缝病害	行车平顺，承载力高，寿命长	抗裂抗疲劳，寿命长，极少接缝
主要缺点	接缝多，易生病害，行车颠簸	钢筋用量适中，仍有接缝	初投资高，端部结构复杂	施工复杂，技术要求高，初期投资高
适用场景	轻交通等级公路	中等至重交通等级公路	重交通、特重交通高速公路	机场跑道、港口堆场、极端重载路段

从上表传统水泥混凝土路面结构特点对比中可以看出，该种路面结构设计的

基本思路就是依靠混凝土板自身的刚度、强度来承受行车荷载，把行车荷载应力有效传给下方的基层和路基。因此其承载能力很大程度上取决于混凝土材料的抗折强度、基层、路基支承的均匀性、稳定性。由于没有或者很少设钢筋，初期建造成本较低，施工工艺成熟、简便。普通混凝土路面刚度大、水稳定性好、耐久性好，在中国早期的高速公路及各等级公路建设中被广泛使用。

（二）钢筋混凝土路面结构

钢筋混凝土路面是在混凝土板内设置钢筋网或钢筋的结构形式。按接缝设置方式分为接缝式钢筋混凝土路面和连续配筋混凝土路面。两种结构的主要目的都是利用钢筋抗拉作用控制混凝土板的开裂，进而提高路面整体性能及耐久性。

接缝式钢筋混凝土路面虽然还设有横向缩缝，但是由于配置了钢筋网，能有效抑制板内不规则裂缝的产生和发展，使温缩和干缩产生的裂缝保持紧密闭合。钢筋的存在使板体具有较好的整体性，因此可以明显增大横向接缝的间距，一般可达到 10 米以上，减少接缝数量，提高行车舒适性，降低因接缝过多造成的病害风险。

连续配筋混凝土路面又更进一步，在纵向上连续配置大量钢筋，完全取消了横向缩缝和胀缝。其设计原理是混凝土在温度、湿度的作用下自然产生裂缝，但是利用强大的纵向钢筋将裂缝宽度控制在很小的范围内（一般小于 0.5 毫米），保证裂缝两侧骨料有效嵌锁，从而达到高效荷载传递的目的。该结构几乎消除了接缝的各种弊病，具有很好的行车平顺性、舒适性，承载能力强、结构寿命长，是实现长寿命路面的重要结构形式之一。但是连续配筋混凝土路面的缺点是钢筋用量大、初投资高、端部结构与施工有特殊要求（防止路面板纵向移动）。

（三）预应力混凝土路面结构

预应力混凝土路面是先进的路面结构，用在混凝土板内施加预压应力来提高其抗裂性、承载力。基本原理就是，在混凝土受外力之前，先对高强度钢筋（钢丝、钢绞线或者钢筋束）进行张拉，使混凝土板体内部提前产生一个压应力场。预加的压应力可以抵消大部分由于行车荷载、温度梯度等引起的拉应力，使混凝土板在正常运行时始终处于受压或者微拉状态，大大提高了混凝土板的抗疲劳开裂能力。

结构形式的最大优点就是明显减少甚至完全取消了常规的横向接缝，板长可以达到百米以上，从根本上解决了由于接缝造成的各种路面病害，提供了无可比

拟的行车舒适性。由于预应力的作用，面板可以减薄，节约混凝土材料，其优异的抗裂性能保证了极长的使用寿命和极低的维护成本。

预应力混凝土路面施工工艺较复杂，技术要求高，必须配备专门的张拉设备、锚固体系。预应力损失的准确计算和控制是预应力设计的技术难点，预应力损失由混凝土收缩徐变、钢筋松弛、锚具变形等因素造成。其初期建设费用比其它类型的混凝土路面要高，在处理复杂的交叉口、端部过渡段和后期维护上存在技术和经济上的困难。

二、典型结构适用条件分析

（一）不同交通等级的适用性

1. 对于交通量小、重型车辆比例低的轻交通等级公路来说，普通混凝土路面由于低初始建设成本、成熟施工技术，经济实用。在这样的交通条件下，荷载应力水平较低，只要路基路面排水设计及施工质量得到保证，普通混凝土路面就可以满足设计使用年限的要求。

2. 中等及重交通等级公路车流量增加，重型货车比重增大，路面结构受荷次数多、荷载大。此时接缝式钢筋混凝土路面更为适用。钢筋增加，板整体性、抗疲劳性能提高，板长加长，行车舒适性得到改善。对交通量大、特重、极重的高速公路主干道和交通枢纽，连续配筋混凝土路面有很好的性能。可以有效抵抗重载交通的反复冲击，不会产生接缝错台等病害，给用户持久、平顺的行车表面，是重载交通的理想结构。

3. 预应力混凝土路面由于具有极高的承载力和抗疲劳性能，被特别地应用在了机场跑道、重型车辆通道、港口堆场、重载路段。虽然它的初期投资较大，但是在极端荷载的情况下，由于它的超长寿命和极低的维修频率，从全生命周期成本上看它具有明显的竞争优势。

（二）不同环境条件的适用性

环境条件，尤其是温度、湿度的改变，对水泥混凝土路面性能有着非常大的影响。昼夜温差、季节性温差大的地方，混凝土板会产生较大的温度翘曲应力和收缩应力。普通混凝土路面应力主要依靠密集的接缝释放，但是也增大了接缝处发生病害的风险。钢筋混凝土路面，尤其是连续配筋混凝土路面，由于钢筋的约束作用，可以更好地控制温度裂缝的宽度，因此对温度变化具有更强的适应性。

潮湿多雨或者地下水位较高的地区，路面结构的排水性能、基层材料的抗冲刷能力是决定路面耐久性好坏的主要因素。大量的普通混凝土路面接缝成为地表水下渗的通道，如果排水系统设计不合理，很容易造成基层软化、唧泥。接缝少或者没有接缝的钢筋混凝土路面、预应力混凝土路面有天然的防渗优点，可以更好地保护基层和路基的稳定性。寒冷地区有冻融循环的混凝土抗冻耐久性十分重要。钢筋可以抑制冻融裂缝的扩展，预应力混凝土因为结构致密、抗裂性好，一般具有更好的抗冻性能。

（三）不同结构形式的经济性比较

比较路面结构经济性的时候，不能只看初期建设费用，而应该用全生命周期成本分析的思想，把建设成本、养护维修成本、用户延误成本、结构最终残值都纳入考虑范围。

普通混凝土路面初期建设成本最低，因为钢筋材料费用可以节省，施工也较简单。钢筋混凝土路面的钢筋用量适中，初期造价居中。连续配筋混凝土路面、预应力混凝土路面因为使用了大量的高强度钢材、复杂的施工工艺，所以初期建造成本最高。

但是从全生命周期成本的角度来说，情况就不同了。普通混凝土路面由于接缝多，接缝维护、局部板体修复的频次高，养护成本高，使用年限增加，维修费用会越来越高。接缝式钢筋混凝土路面接缝少，养护工作量和成本也随之减少。连续配筋混凝土路面、预应力混凝土路面的设计目的就是尽可能减少结构性维修，在正常使用年限内一般只需做少量的功能性修复，养护成本非常低。考虑到重交通条件下由于维修而封道给社会带来的巨大延误成本，长寿命、少维修的结构形式的综合经济效益更加明显。因此对于高等级、重交通的高速公路，虽然连续配筋混凝土路面或者预应力混凝土路面的初始投资较高，但是从长远来看，它们往往是最具经济性的选择。

第二节 复合式混凝土路面结构体系设计

一、复合式路面结构组成与特点

（一）面层结构特点与功能

复合式路面的面层结构一般分为上下两部分，上部为沥青混凝土罩面层，下部为水泥混凝土板层。两者一起承担交通荷载，抵御环境侵蚀。这样一种“柔性+刚性”的组合，给面层带来了特别的性能优势，也是复合式路面与传统单一结构路面最明显的不同。

沥青混凝土罩面层直接面对行车荷载和自然环境，它的主要作用就是给行车提供最好的舒适性和安全性。采用高性能改性沥青混合料，如沥青玛蹄脂碎石混合料等，可以达到很好的抗滑、降噪和平顺的效果，大大改善驾乘舒适度。同时沥青罩面层具有良好的防水性能，可以有效地阻止地表水下渗，保护下部结构不受水的损害，对保证路面结构长期稳定、耐久性十分重要。

下部水泥混凝土板层是路面的主要承重结构，依靠自身的高刚度、高强度来扩散、传递车辆荷载到基层、路基。与传统的水泥路面不同，复合式路面的混凝土板受到上部沥青层的保护，轮载磨耗、剧烈温变对它影响很小，工作条件得到明显改善。该保护作用减缓了混凝土板的疲劳损伤累积，减小了板体翘曲变形、开裂的风险。连续配筋混凝土由于没有横向接缝、整体性好，常被用作复合式路面的下部承重层，能更好地控制裂缝，提高结构的整体性、耐久性。因此双层复合的面层结构把功能性、承载性完美地结合在一起，既保证了优良的行车品质，又为整个路面结构打下了牢固可靠的承重基础。

（二）基层结构特点与功能

基层位于面层下面，底基层上面，它的主要作用是承受和分散面层的荷载，给面层提供坚实、稳定、均匀的支撑。复合式混凝土路面体系中基层性能的好坏，直接影响水泥混凝土板的工作状态及整个路面结构的使用寿命。因此对基层材料的选择和结构设计有很高的要求，必须使其具有足够的强度、刚度、良好的水稳定性，防止重载作用下产生唧泥、冲刷、永久变形。

高速公路长寿命复合式路面设计当中，半刚性基层属于应用较为广泛的基层类型之一。以水泥稳定碎石为代表的半刚性基层，板体刚度大、强度高、荷载扩

散能力强，可以减小水泥混凝土板底的拉应力，提高路面的承载能力及抗疲劳性能。另外，良好的整体性可以有效减少由于基层不均匀沉降引起的面层开裂。为改善半刚性基层的性能，减小开裂程度，延长使用寿命，要采用合理施工工艺，即严格控制水泥剂量和优化材料级配。

另一种常用的基层为贫混凝土基层。由于贫混凝土的水化反应完全，水稳定性极好，强度、刚度均优于水泥稳定碎石，能给上部结构提供更强的支撑。对于特重交通路段来说，这一点尤其重要，可以较好地控制路面结构的整体变形。采用贫混凝土基层可以防止由于基层强度不够而产生的各种病害。但是贫混凝土基层也存在干缩、温缩开裂的风险，裂缝会反射到上部结构层。因此，在贫混凝土基层和水泥混凝土面层之间一般设置隔离层或应力吸收层，来减弱裂缝反射。不论采用哪类基层，其结构设计都要同面层、下卧层紧密结合成一个整体，一起抵抗交通荷载以及长期的环境作用。

不同类型基层在复合式路面结构中发挥着关键作用，其性能特点和适用场景各有侧重，详见下表：

基层类型性能对比表

特性	半刚性基层（水泥稳定碎石）	贫混凝土基层
强度与刚度	较大，能减小板底拉应力	优于水泥稳定碎石，支撑力更强
荷载扩散能力	强，提高承载力与抗疲劳	更强，有效控制整体变形
水稳定性	良好	极好（水化反应充分）
抗冲刷能力	需要足够	优异
开裂风险	抗干缩、抗温缩开裂能力需改善	干缩、温缩开裂风险，需隔离层
适用场景	广泛应用，一般高速公路	特重交通路段，需强支撑

（三）功能层设置要求与作用

在复合式混凝土路面的多层结构体系中，为了协调各材料层之间的作用，防止某些病害发生，提高整个结构的耐久性，根据实际需要可以设置一个或者多个功能层。虽然这些功能层的厚度不大，但是它们的作用却十分重要，是实现路面长寿命不可缺少的技术手段。功能层的布置要根据预定的作用精心设计，保证材料的性能和施工质量符合要求。

功能层的设置主要基于以下几点考虑及其作用：

1. 防水粘结层，在沥青罩面和水泥混凝土板之间设置防水粘结层，是复合式路面设计的重要环节。此层主要作用有二，第一是防水，阻止水分渗入结构内部

缝隙；第二是粘结，保证沥青保护层与混凝土板粘结牢固、结合紧密。良好的粘结性能可以有效地传递水平剪应力，防止沥青罩面在车辆制动或者加速时产生滑移、推移等病害。常用改性沥青、沥青碎石封层、高粘高弹防水材料等作为防水粘结层。

2. 应力吸收层：为了有效延缓或者阻止下层混凝土板的裂缝、接缝向沥青罩面层反射，可以在沥青罩面层内部或者下方设置应力吸收层。应力吸收层一般采用应变能力强、弹性恢复性好的材料制成，橡胶沥青、聚合物改性沥青混合料、土工复合材料等。当下部混凝土板由于温度变化而产生水平位移时，应力吸收层可以依靠自身较大的变形来吸收、消散裂缝尖端的应力集中，从而延长沥青罩面抗反射裂缝的寿命。

3. 隔层是在半刚性基层或者贫混凝土基层与水泥混凝土面层之间设置的。主要目的就是减小基层和面层之间的粘结力，使混凝土板在温度、湿度变化时能自由伸缩，减小板体内部的约束应力，从而降低开裂的风险。同时隔离层又起到隔水作用，阻止基层裂缝向上发展。常用的隔离材料有土工布、塑料薄膜等。

二、复合式路面结构优势体现

（一）结构受力特点与优势

复合式路面结构的受力优势是由于它特有的组合形式。下层高刚度水泥混凝土板是主要的承重结构，利用它优异的抗弯刚度，把车轮荷载应力扩散到大范围内，大大降低传递到基层和路基的应力水平。因此路基顶面的应力集中现象大大减弱，路基的累积永久变形速率明显降低，为整个路面结构的长期稳定性打下了根本的基础。复合式路面与柔性路面相比，对路基的依赖性小，对路基承载力变化的敏感度也小。

上覆的沥青混凝土层对结构承载的贡献不大，但是它的作用也不能忽视。柔性的沥青层改善了荷载与刚性板的接触状态，使轮载不能直接撞击混凝土板，起到缓冲保护的作用。沥青层对温度变化比较敏感，其存在可以调节、减缓温度向下传递的速度，减小混凝土板内部的温度梯度，从而大大减少温度翘曲所引起的附加应力。这对控制混凝土板的疲劳开裂有重要意义。

（二）耐久性能提升效果

复合式路面结构设计思想同长寿命路面目标高度一致，耐久性得到了全方位

的提高,主要是抗疲劳性能、抗环境因素影响能力、综合抗病害能力的明显提高。结构耐久性提高,是由于科学的组合设计克服了传统路面结构固有的缺陷。就抗疲劳性能而言,因为高刚度的水泥混凝土板承担了大部分荷载和扩散应力,所以使结构的重要部位(如混凝土板底、路基顶面)应变很小,远小于材料的疲劳强度极限。这就意味着在结构的设计使用年限内,结构主体不会由于重复荷载的作用而发生疲劳破坏,这是实现长寿命的关键。

复合式路面有很强的抵御不良环境影响的能力。上层的沥青罩面层构成了一道有效的防水屏障,大大减少了地表水渗入路面结构内部的可能性,从而有效地防止了水损害造成的基层软化、唧泥、混凝土材料的冻融破坏。沥青层对下部混凝土板起到温度保护作用,减小了混凝土板的温度变形和温度应力,降低了混凝土温度疲劳开裂的风险。对于最普遍的反射裂缝问题,设置高效的应力吸收层或者使用连续配筋混凝土板,在层间起到阻断或者延缓基层和混凝土板裂缝向上传递的作用,保证路表面的长期完好。多种防护机制的运用使复合式路面能较好地适应各种复杂的气候条件,保证长期稳定的路用性能。

(三) 后期维护便利性分析

养护维修成本在整个路面全寿命周期内占有重要的位置。复合式路面结构后期维护比单一类型路面更方便、经济。其设计很好地将路面的功能性需求与结构性需求区分开来,大部分磨耗、老化、行车直接造成的轻微损坏都集中在表层沥青罩面上,而作为主体承重结构的水泥混凝土板由于受到良好的保护,很少出现结构性损坏。因此,该种病害的模式就决定了其养护维修方法具有根本性的优势。

当路面服务性能下降,出现表层裂缝、车辙、平整度下降等状况时,养护工作一般只需对表面的沥青层进行处理。现代化的铣刨和摊铺设备可以快速高效地去除老化的沥青罩面,重新铺设新的面层,整个过程对交通影响小,施工方便。维修工作不涉及下层主体结构,不需要做深挖、结构重建等作业,维修难度和成本都大幅度下降。表面更新式的养护模式可以多次重复使用,每次维修之后路面都能恢复到接近新建道路的服务水平。相比传统水泥混凝土路面需要断板、换板甚至整体重建,复合式路面养护维修更经济、更灵活、更便捷,全寿命周期成本优势明显,完全符合长寿命路面可持续发展的理念。

第三节 连续配筋混凝土路面关键技术

一、连续配筋路面技术特点

（一）配筋方式与构造特点

连续配筋混凝土路面的主要结构特点就是沿道路纵向连续布置高强度变形钢筋。这样的配筋不是完全消除混凝土板由于温湿度变化产生的横向裂缝，而是使裂缝大量、间距紧密地出现。纵向钢筋穿过这些微裂缝，依靠与混凝土之间牢固的粘结锚固作用，把裂缝宽度精确控制在极小的、无害的范围内（一般小于 0.5 毫米）。这就保证了裂缝处骨料之间的嵌锁作用得到充分的发挥，从而维持了路面板的结构整体性以及荷载传递能力。从根本上杜绝普通混凝土路面因裂缝张开过大导致的错台、唧泥等各种常见的病害。

纵向配筋率是 CRCP 设计中的一个关键参数，一般取 0.6%~0.8%。其具体的选择要结合气候状况、混凝土材料性质、基层种类、交通荷载等诸多因素。配筋率过低会造成裂缝宽度得不到有效的控制；配筋率过高会使裂缝间距变小，应力集中严重，结构长期耐久性受到影响，同时还会大大提高工程造价。钢筋一般设在板的上部（板厚三分之一到一半处），抵抗温度、湿度梯度引起的弯曲应力。路面上还要布置一定数量的横向钢筋，它们的主要作用不是直接承受荷载，而是用来精确固定纵向钢筋的位置，保证保护层厚度、间距满足设计要求，为混凝土浇筑提供稳定的钢筋骨架。

连续配筋混凝土路面典型设计参数

参数类别	典型范围 / 说明
纵向配筋率	0.6% ~ 0.8%
裂缝宽度控制	通常小于 0.5 毫米
纵向钢筋位置	板厚三分之一至一半深度
横向钢筋作用	固定纵向钢筋，保持间距与保护层
端部处理方式	宽翼缘梁式胀缝、强力锚固系统等

（二）接缝处理与设置特点

连续配筋混凝土路面最大的特点是彻底取消了横向缩缝。传统的混凝土路面每隔 4 到 6 米就要设一道缩缝来释放温度应力，防止不规则开裂。但是这些接缝都是路面结构中最薄弱的一环，使用时间长了很容易出现裂缝、错台等现象，严

重影响行车舒适度和路面使用寿命。CRCP 用纵向钢筋控制裂缝,把应力分散到无数小裂缝中,所以不需要设置横向缩缝,形成一个平整连续的行车面,大大提高了行车的平顺性、安全性。

虽然取消了横向缩缝,但是 CRCP 还需要设置必要的其它接缝。横向施工缝一般设在一天施工结束的地方,施工缝处要保证纵向钢筋的连续性,通常采用搭接或预留钢筋的方式处理,设置传力杆保证接缝两侧荷载传递能力。在桥梁、隧道等构造物衔接处,或者在极长的路段上,都必须设置胀缝或者专门处理装置。因为路面板作为一个整体在季节性温差作用下,其伸缩变形量很大。如果不妥善处理巨大的推力,就会对邻近的构筑物造成损害。常用的端部处理方式有宽翼缘梁式胀缝、多根大直径传力杆强力锚固系统、设置数块短钢筋混凝土板作为过渡锚固段等,目的是约束路面板端部的自由位移,保证构造物的安全。

(三) 整体施工工艺特点

连续配筋混凝土路面的施工工艺对连续性、精确性要求很高,保证设计性能的充分实现。与普通混凝土路面可以分段、分块浇筑不同,CRCP 一般需要一次性、长距离连续摊铺。一般需要使用大型滑模摊铺机,该设备集布料、振捣、提浆、整平、抹光于一体,目的是实现高效、高质量的连续施工。该种作业方式不但能大大提高施工效率,而且能保证路面板的整体性、均匀性,有效地减少由于施工中断过多而产生的潜在薄弱环节。

钢筋的定位、安装在 CRCP 施工过程中起着举足轻重的作用。纵向钢筋位置的准确度直接影响到它对于裂缝控制的作用。施工中主要采用两种钢筋固定方法:一是支架法,即在基层上设置专用钢筋支架(俗称“铁马”),将钢筋网格稳固地固定在支架上,摊铺机在钢筋网上方进行作业;二是植入法,即摊铺机在摊铺混凝土的同时,通过其自带的钢筋植入装置将纵向钢筋精确压入新浇筑混凝土的预定深度。不论用哪一种方法,钢筋的平面位置和高程都必须严格控制,保证钢筋保护层厚度满足规范要求。对混凝土的性能要求也很高,需要良好的工作性、低收缩性、稳定的质量,以适应连续摊铺作业,保证路面长期耐久性能。

二、连续配筋路面工程应用

(一) 适用路段选择条件

由于 CRCP 初始建造成本较高,不是所有的公路项目都适合使用。其使用必

须有明确的目的性，适合的路段主要有交通量大、重型车辆比例高的高速公路主线、长坡路段、城市快速路。路面在这些路段上经常受到重载荷的作用，普通的路面接缝很容易被破坏，维修次数多，交通受到影响。CRCP 无缝、高承载力的特点可以大大减少养护次数，保证交通的畅通无阻、安全。

隧道内路段、机场道面、重要的桥梁连接段等也属于它的理想使用场合。隧道内环境封闭，路面维修作业难度大、风险高，并且对交通影响很大，采用长寿命的 CRCP 可以实现一次建成、长期免维的目标。由于桥梁、路基过渡段不均匀沉降，普通路面的接缝处容易出现跳车现象，采用 CRCP 并结合恰当的端部处理，可以达到平顺过渡的目的，提高行车舒适性。该项技术应用的前提是必须要有稳定、均匀的基层和路基，任何明显的不均匀沉降都会造成钢筋应力集中，导致结构破坏。

（二）关键技术实施要点

连续配筋混凝土路面工程的成功实施，依靠对一系列关键技术的准确把握和严格控制。这些技术要点存在于设计、材料、施工的全过程当中，任何一处出现疏忽都会对路面最终性能产生影响。

1. 钢筋系统配置以及安装精度控制。钢筋配置是设计的重中之重，钢筋直径、间距、配筋率、搭接长度等都必须经过科学计算。钢筋保护层厚度控制是施工难点也是重点，偏差会直接影响裂缝的控制效果和钢筋耐久性。因此必须使用先进的定位技术以及质量监测手段，保证纵向钢筋的高程误差不大于 $\pm 10\text{mm}$ ，平面位置偏差小于 25mm 。

2. 高性能混凝土的配合比设计及质量控制。CRCP 所用混凝土除了要满足强度标准外，还要具有良好的长期性能。配合比设计以控制收缩为主要目的，选用低收缩水泥、优质集料，掺入减水剂、引气剂等外加剂，有效降低混凝土自收缩、干燥收缩，减少早期开裂。生产时要严格控制原材料质量、计量精度、搅拌均匀性，保证混凝土性能稳定一致。

3. 路面端部特殊构造的设计和施工。路面端部处理的好坏，直接影响路面板在温度变化时的位移控制效果。常用的锚固系统有地下锚碇梁，尺寸、间距、埋深等均需精心设计，以保证板端有足够的被动土压力约束。施工时锚碇梁基坑开挖、钢筋绑扎、混凝土浇筑等工序要同主体路面施工紧密配合，保证整体性以及锚固效果。

4. CRCP 早期养护要精细化。由于板体连续,早期温湿度变化引起的应力较大,如果养护不当,很容易产生早期病害。混凝土浇筑完成后应立即使用自动化喷洒设备均匀喷洒高质量养护剂,形成致密保护膜,锁住水分。极端气候条件下还要采取覆盖土工布、洒水等措施,严格控制混凝土内外温湿度梯度,保证混凝土强度稳定增长,使早期应力处于安全范围内。

(三) 应用效果与效益评估

连续配筋混凝土路面的应用效果十分明显,主要是由于它具有很好的路用性能以及明显的长期经济效益。就使用性能而言,它给用户带来的最直接好处就是无与伦比的行车舒适性。由于完全取消了横向接缝,车辆行驶时异常平稳,彻底消除了传统水泥路面由于接缝跳车而引起的振动和噪声,大大改善了驾乘体验。国际平整度指数的测试结果表明新建的 CRCP 平整度可以达到甚至超过沥青路面的水平,在长期使用后平整度衰减很慢。

从耐久性和维护成本的角度看,CRCP 是有利的。传统水泥路面常见的接缝碎裂、错台、唧泥等各种病害几乎都和接缝有关。CRCP 从根本上克服了这一结构上的缺陷,其养护工作大部分集中在少量大的裂缝上进行密封,定期检查端部胀缝,工作量远远小于普通水泥路面。虽然其初期建造成本一般比普通水泥路面高出 20% 到 30%,但是由于其具有长达 30 年甚至 40 年的使用寿命,在全寿命周期内养护维修费用很少,因此其综合经济效益是非常可观的。

第四节 路面结构排水系统一体化设计

一、排水系统组成要素与功能

(一) 路面内部排水系统

路面内部排水系统是长寿命设计的关键,它的主要作用就是迅速将渗透到路面结构内部的水分排出,避免水分滞留在结构层内。该系统一般设置在混凝土面层之下,由高渗透性材料层和相关的收集排放设施组成。高渗透性材料层即排水基层,一般用大孔隙沥青稳定碎石、水泥稳定碎石或者级配碎石。其下一般设有一层致密、不透水底基层,防止水分继续渗透到路基里。

为了有效地收集并导出排水层中的水分,系统内一般会设置纵向集水管或盲

沟,这些设施一般设在路肩或者中央分隔带下面。渗入结构的水分在重力作用下,经排水层横向流动,汇集到集水管,再通过横向出水管排出到路基外的边沟或者排水管道中。设计时要保证排水基层的渗透系数足够,在排水基层与土基或其它细粒材料层之间设置反滤层(土工织物),防止细颗粒堵塞排水通道,保证系统长期有效运行。

整个内部排水系统的设计要遵循系统性的原则,排水层材料、厚度选择、集水、排水管道布置、尺寸计算等各个环节都必须精确计算、协调。其主要目的就是保证所有渗入结构的水分能在最短时间内排出,对年降雨量大、地下水位高或者受冻融循环影响的地区尤为重要,也是防止唧泥、错台、板底脱空等水损害病害的根本保证。

(二) 路表排水设施设置

路表排水系统的主要任务就是迅速排除降落在路面上的雨水,防止积水,保证行车安全和舒适。主要依靠设置合理的道路路拱横坡和纵坡来实现。高速公路行车道横坡度一般根据地区降雨情况和行车安全要求来确定,保证雨水可以顺利流向路面边缘。硬路肩的横坡度可以适当增大,排水方向应朝向远离行车道一侧,防止硬路肩水流汇入行车道增大行车风险。

路表排水设施有沿路缘带设置的拦水带、缘石、边沟、排水沟等。在路堤较高或者边坡容易受到冲刷的地段,沿路肩外侧可设置拦水带收集路表径流,利用泄水口和急流槽将水流引导到坡脚。在超高路段的中央分隔带或者道路低洼处,可以设置碟形浅沟或者缝隙式集水管来拦截和排除路面径流。所有这些设施布置、尺寸均需经水力计算,保证设计暴雨强度时积水范围不侵入行车道,保障高速行驶安全。

(三) 路基排水协调要求

路基作为路面结构的基础,它的稳定决定着路面长期的性能以及寿命。路面排水系统与路基排水系统的协调设计,是实现长寿命路面目标不可缺少的一环。一体化设计的目的就是防止地表水、路面内部水侵入路基,同时给路基本身的排水提供通道,保证路基始终处于相对干燥稳定的状态。任何来自路面内部排水系统中的水,都必须可靠地引导到路基范围以外,不得直接排入路基或在路肩积存,以防路基含水量增加,使路基承载能力下降。

路面内部排水系统出水口要和路基边沟或者更远的排水系统有效连接。底基

层为不透水层，起着承托排水基层的作用，防止水分下渗。密实度和完整性对施工质量有很重要的作用。挖方地段或地下水位高的地段除了路面排水外，还要考虑路基本身的排水要求，即设置纵向渗沟或盲沟来降低路基地下水位、防止毛细水上升对路基和路面结构造成不利影响。

协调性还体现在施工环节的整体规划当中。路基和路面排水设施的施工顺序、接口处理要统一规划。填筑路基时应预留排水管道位置；或在路基顶面施工完成后，保证其横向坡度准确，以便与上部排水基层良好衔接。

二、排水系统功能与实现

（一）排水效率与能力要求

排水系统的主要功能就是排水效率，也就是将水分从结构中迅速排出的能力。排水系统必须比渗入到路面结构中的水量大，这是设计排水系统最基本的要求。该要求贯穿于整个排水网络的设计之中，下游排水设施的泄水能力要大于上游，防止出现系统性瓶颈。就具体的量化指标而言，规范一般会对渗入水在路面结构内所允许停留的时间做出规定。

排水系统水停留时间要求

区域类型	允许水停留时间
冰冻地区	不应超过 1 小时
其他地区（重交通道路）	不应超过 2 小时

从上表可知，为了达到有效的排水目的，必须进行严格的水文、水力计算。即分析项目所在地的降雨强度、历时、频率等数据，确定设计径流量，根据计算出的流量来设计各个排水组件。

1. 路表排水，根据路面设计的降雨强度计算出路表径流量，按此径流量确定边沟、排水沟的尺寸和纵坡，保证水流畅通，不溢流。

2. 内部排水系统，排水基层的渗透性以及集水管道的输水能力是最关键的。排水基层的渗透系数应大于面层接缝或裂缝的渗水速率；集水管的管径和坡度设计要保证能及时排出汇集的水量，防止排水层内水位过高。

系统排水路径不宜过长，因为渗流路径越长排水效果就越差。一般内部排水系统中水的最大渗流路径长度不大于 45m 到 60m。在路幅较宽的地方，中央分隔带和两侧路肩都应设置排水设施，以缩短排水时间，达到排水要求。精细化的

量化设计一起保证排水系统可以快速响应降雨事件，从而将水对路面结构的影响降到最低。

（二）对结构稳定性的保障

水是水泥混凝土路面结构破坏的主要原因之一。车辆荷载和水的耦合作用会造成唧泥、板底脱空、错台、断板等严重病害，从而大大缩短路面的使用寿命。高效的排水系统可以保证路面结构，尤其是基层和路基的干燥，直接保证结构的稳定。当基层和路基土含水量增大时，其抗剪强度、承载力都会明显降低，在行车荷载的作用下很容易产生永久变形甚至破坏。

一体化排水系统采用多种途径来保证结构的稳定性。快速的路表排水可以减少雨水通过接缝、裂缝下渗的量。高效的内部排水系统可以及时排出已经渗入的水分，防止水分在板底或者基层顶面形成自由水膜，对防止动水压力造成的材料冲刷和流失起着重要的作用。设计好路基排水可以有效地控制地下水位、路基含水量，从而达到保证路基稳固稳定的根本目的。因此一个功能完备的排水系统是防止水引发链式反应的坚固防线，也是延长路面疲劳寿命、实现长期稳定服役的必要条件。

（三）系统自身的耐久性要求

长寿命的路面必须具备相应的持久耐久性。排水系统一旦失效或者功能降低，就无法起到保护路面结构的作用。系统自身耐久性包含材料耐久性、结构稳定性、抗堵塞能力这三个方面。

材料选择为基本，排水系统中使用的管材、土工织物、混凝土等都必须具有足够的强度、抗老化性、抗腐蚀性和抗冻性。地下集水管要用强度高、耐腐蚀的材料，以保证在土壤和水的作用下不发生性能衰减。寒冷地区排水设施的所有材料、结构都必须具备抗冻融循环破坏的能力，地下管道应埋设在最大冻深线以下。

系统抗堵塞能力的好坏决定着长期排水效果的好坏。排水基层、渗沟、盲沟等排水设施很容易被土体中的细颗粒物所堵塞。因此在设计中必须采取反滤措施，一般是在排水体周围包裹一层或多层土工织物或者设置级配反滤层。反滤结构可以允许水通过，阻止细土颗粒进入排水通道，保证排水系统在设计使用年限内一直畅通。

第三章 重载交通下的结构设计方法

第一节 重载与超载交通作用特征分析

一、重载交通荷载作用特点

(一) 轴载谱与分布特征

重载交通的轴载谱与传统设计假设有很大差异，最突出的特点就是大轴载车辆所占比例高，还有一部分严重超载车辆。传统的路面设计一般用标准轴载来换算，在重载交通条件下，用这种方法会低估大轴载实际产生的破坏效应。根据实际调研数据可知，在很多货运主通道上，远大于 100 千牛标准轴载的车辆出现的频率很高，形成了向大轴重区间偏移的“肥尾”分布。该分布形状表明路面板受一次性荷载作用下的应力超过了预期的范围，疲劳损伤累积的速度成几何级数增加。

轴载的横向分布也是重载交通不能忽视的一个特征。因为重车驾驶员为了得到行驶平稳的效果，会不自觉的选取一定的轮迹轨迹，造成荷载作用区域非常集中，形成所谓“渠道化的交通状况”。这就会导致路面板上轮迹带区域受到高强度应力的反复作用，使该区域疲劳损伤加重。随着时间的推移，集中荷载的作用会使板出现纵向裂缝、板底脱空等病害，轮迹带以外的地方则可以保持完好。因此结构设计时要充分考虑轴载谱实际分布和轮迹横向集中效应，用更能反映实际情况的荷载输入参数。

多轴重载车辆轴组形式会对路面受力状态造成复杂的影响。双轴，三轴甚至更多的使用，使得相邻车轴产生的荷载应力在路面板内叠加。当轴间距过小时，后轴作用点会落在前轴引起的应力恢复区内，路面板一直保持受拉状态，应力叠加效应增大，疲劳裂缝的萌生和扩展就会加快。掌握实际交通流轴载谱、横向分布和轴组特征，是进行水泥混凝土路面长寿命设计的前提。

(二) 荷载作用频率分析

重载交通条件下荷载作用频率分析不能只考虑交通量的多少，而应该研究车

辆荷载作用于路面结构的时间特性。高速公路上车辆行驶所引起的荷载是高频、短时脉冲式的作用在路面板上的。重载车辆的脉冲荷载峰值大,对路面结构的冲击也越大。荷载作用频率同混凝土材料的黏弹性响应、疲劳损伤累积速率之间存在直接关系。高速、高频荷载下混凝土材料不能及时进行应力松弛,于是内部微裂纹产生并发展。

行车速度属于决定荷载作用频率的重要变量。车速越快,作用在路面某一部位的时间就越短,作用频率就越高。据研究显示,高速行驶的重载车辆所产生的动荷载效应会更大,这样就加大了路面板瞬时应力的大小,而且还会改变应力波在板体中传播和衰减的规律。长寿命路面设计需要分析不同车速等级下重载交通所占的比例,根据路面平整度状况来评价高频荷载对结构疲劳寿命的折减效应。上下坡、收费站广场等车速变化频繁的路段荷载频率复杂多变,对路面结构的适应性提出了更高的要求。

(三) 动态荷载效应影响

重载车辆行驶时对路面所施加的压力并不是一个恒定不变的静压力,而是一直在由于各种因素的作用不断变化的动态压力。动态荷载效应一般定义为静态轴载和动态放大系数的乘积,此效应使路面受力水平大大增加,是路面板产生疲劳开裂乃至断裂的主要原因。动态效应的产生是由于车辆振动系统与路面不平整之间的相互影响,哪怕是微小的路面不平整,在重载高速行驶的条件下也会激发出很大的冲击力。

影响动态荷载效应的因素错综复杂,主要可归纳为以下几方面:

1. 路面平整度是激发动态荷载最直接、最重要的因素。路面初始平整度以及在使用过程中因各种原因产生的不平整(错台、沉陷、坑槽等),都会使车辆行驶时产生剧烈的垂直振动,并把巨大的冲击荷载传递给路面。路面越平整,动态荷载系数越小;反之则会急剧增大。

2. 行车速度同动态荷载之间存在着非线性复杂的联系。当某一个不平整波长与车辆悬挂系统的固有频率相匹配时,就会出现共振速度,此时动态荷载会突然增大。一般来说,车速越快,动态荷载越大,在经过接缝或者裂缝等典型的不平整处的时候,高速冲击效应越明显。

3. 车辆悬挂系统特性,车辆自身的悬挂系统(钢板弹簧、空气悬架等)对动态荷载的衰减和传递起着非常重要的作用。性能良好的悬挂系统可以吸收大部分

路面不平整所引起的振动能量，减小路面受到的冲击。反之，老旧或者性能较差的悬挂系统会加重这种冲击效应。

二、重载交通对路面的影响

（一）对路面结构受力的影响

重载交通从根本上改变了水泥混凝土路面板受力状态，使它长期处于高应力工作状态。巨大的轴载使板内弯拉应力大大增大。根据弹性地基板理论，荷载应力随作用荷载的增大而成比例增大，轴载倍增会使板内关键部位（如板中、板边、板角）的荷载应力远远大于一般的设计值。在反复的高应力作用下，路面结构很容易达到疲劳极限，产生疲劳裂纹的萌生与扩展。在接缝传荷能力不足或者板底脱空时，板角、板边应力集中现象将更加明显，重载车辆的作用极易引起板角断裂、边角破坏等病害。

重载交通还会加大路基、基层的永久变形。过大的荷载应力作用在路面表层的同时，也会通过板体传递到下面的基层、路基上，引起这些结构层产生不可逆的塑性变形。累积变形最后以路面表面沉陷、不平整或者板底脱空的形式表现出来。一旦出现脱空，混凝土板就会失去下方结构的有效支撑，处于局部悬臂状态，在重载作用下很容易发生断裂。重载作用下产生的唧泥现象也很普遍，即在动水压力的作用下，基层或者路基的细颗粒从接缝或者裂缝中被泵出，进一步掏空板底，形成恶性循环，最终加速路面结构的失效。

（二）对路面材料性能的要求

重载交通给路面带来了严峻考验，对构成路面的各种材料性能要求更高。对于面层的水泥混凝土来说，高抗弯拉强度和良好的抗疲劳性能是它的两个主要要求。抗弯拉强度直接体现的是路面板对抗荷载作用下弯曲破坏的能力，只有拥有足够的强度储备，才能在高应力反复作用下不会发生结构损坏。良好的抗疲劳性能保证混凝土经过上百万次甚至数千万次重载作用后，仍然能保持原来的性能而不会发生疲劳破坏。因此需要从配合比设计、原材料优选等几个方面入手，开发出韧性、耐久性更好的高性能混凝土。各种路面材料在重载交通下重要的性能要求见下表。

重载交通下路面材料性能要求表

材料类型	关键性能要求	具体表现 / 目的
水泥混凝土 (面层)	高抗弯拉强度	抵抗高应力下的弯曲破坏, 增加强度储备
	高抗疲劳性能	在数百万次重载作用下不发生疲劳破坏
	更高韧性与耐久性	优化配合比, 优选原材料, 适应严苛环境
	良好抗冲刷能力	防止动水压力下细颗粒流失, 避免唧泥
基层材料	足够自身强度	提供稳定均匀支撑, 防止塑性变形
	良好抗裂性能	减少温缩、干缩裂缝, 防止反射裂缝
	高且均匀的回弹模量	减小结构体系整体变形, 提供稳定基础
垫层与路基	足够强度与长期稳定性	严格控制填料与压实工艺, 应对长期作用

从上表可知基层材料性能要求也非常高。基层要给面层提供稳定均匀的支撑, 还应该具有良好的抗冲刷能力以及足够的自身强度。重载和动水压力同时起作用时, 基层材料防止细颗粒的流失, 避免唧泥现象的发生, 防止板底脱空。因此选用强度高、水稳定性好的贫混凝土、碾压混凝土等半刚性材料, 或者具有较好排水能力的大孔隙沥青稳定碎石等柔性基层, 已成为重载交通下路面结构设计的重要因素。为了防止半刚性基层因为温缩、干缩产生大量的裂缝, 反射到面层, 还应对它的抗裂性能提出明确的要求。

垫层、路基属于路面结构的基础, 承载能力及稳定性十分重要。重载交通需要路基有更高的回弹模量来减小整个结构体系的变形。路基填料选择及压实工艺要严格控制, 保证填料有足够的强度和长期稳定性。有冻胀、湿陷性等问题的不良土质路基应采取换填、化学改良等方法来处理, 保证路面结构基础的可靠, 承受重载交通作用。

(三) 对路面使用寿命的影响

重载交通是造成水泥混凝土路面寿命最短、最直接、最主要的因素。路面的疲劳寿命同荷载应力水平成指数关系, 一般符合著名的四次方定律, 即路面疲劳损伤同轴载的四次方成正比。这说明轴载增大一倍, 路面疲劳损伤就会增大十六倍。在重载、超载车辆比例较高的情况下, 路面实际累积的当量标准轴次远大于设计预期, 路面在未到设计年限的时候就出现严重的结构性破坏, 比如断板、错台、大面积破碎等病害。

重载交通明显加快了路面各种使用性能的衰减速度。平整度下降, 重载反复碾压造成路基路面不均匀沉降, 接缝处错台量越来越大, 行车舒适性急剧下降。

其次是路面抗滑性能的降低：重载车辆轮胎对路面表面的磨损作用更加明显，加快磨损路面表层微观、宏观构造，降低抗滑能力，影响行车安全。多种病害的并发、快速蔓延使路面养护维修成本急剧上升，常规局部修复措施常常无效，最后只能进行大规模的结构修复或者重建，造成巨大的经济损失。

第二节 重载路面力学响应与设计标准

一、重载路面力学响应规律

（一）板底应力分布特点

水泥混凝土路面在车辆荷载作用下，板体出现弯曲变形，板底主要承受拉应力。与柔性路面逐层传递荷载的扩散角模式不同，刚性路面板由于具有较高的抗弯刚度，把集中车轮荷载分散到更大的地基区域上，形成盆状应力分布形态。此分布可以显著降低地基顶面的压应力，但是代价就是板体要承受较大的弯拉应力。

行车荷载下最大拉应力一般出现在板底，具体位置由荷载作用点来确定。当荷载作用在板中央时，最大拉应力在荷载正下方的板底；作用在板的纵向接缝边缘时，最大拉应力在板的纵向边缘底部；作用在板角区域时，最复杂的、应力最大的地方可能是板角的顶部或沿着角隅平分线的板底。长寿命路面设计要控制板底疲劳拉应力来防止结构开裂、保证承载能力。路面板的厚度、混凝土弹性模量、地基支承刚度（常用地基反应模量 K 来表示）是决定板底应力大小的三个主要因素。增加板厚是最直接有效的降低应力水平的方法，稳定、均匀的地基层支撑，可以明显改善板体的受力情况，防止局部应力集中。

（二）接缝处应力集中现象

水泥混凝土路面的接缝，尤其是横向接缝，是路面结构的薄弱环节，也是应力集中现象的高发区。接缝设置是为了适应混凝土收缩和温度变形，但是也破坏了板体的连续性，使荷载板间的传递效率降低。当车辆荷载从一块板传到另一块板时，如果接缝传荷能力不足，荷载板边缘就会产生较大的竖向变形，而相邻非荷载板不能分担荷载，那么荷载板边缘和角隅处的应力就会急剧增大，产生明显的应力集中。

应力集中现象的严重程度主要是由接缝传荷效率决定的，它的定义是接缝处

非荷载板的变形量与荷载板的变形量之比。高效传荷装置如传力杆,可依靠其抗剪、抗弯性能将部分荷载(最好为 50%)传递给相邻板,两块板共同变形受力,极大减小单块板边缘应力水平和变形幅度。传力杆直径、间距、平直度、与板面平行度、周围混凝土支撑强度都会影响传荷。长期使用中传力杆锈蚀、松动或者混凝土局部破坏等都会使传荷效率逐渐降低,造成接缝处应力进一步集中,产生错台、唧泥、角隅断裂等病害。因此保证接缝处长期高效率的荷载传递能力,就是控制应力集中、保证路面长寿命的关键技术环节。

(三) 温度应力耦合效应

水泥混凝土路面承受车辆荷载的同时还会受到温度变化的影响。温度变化所引起的应力即温度应力与荷载应力相加产生复合效应,它就是路面产生疲劳破坏的主要驱动力之一。温度应力主要是由两方面造成的,一是混凝土板整体伸缩受到邻板或者结构约束而产生的轴向应力,二是沿板厚方向的温度梯度,即板顶和板底温差造成板体翘曲变形产生的翘曲应力。

日照下板顶温度比板底高,产生正温度梯度,板体中部向上拱起,边缘、角隅向下卷曲,严重时会与基层脱离。当车轮荷载作用于脱空的板缘或者板角时,板体必须产生更大的弯曲变形才能把荷载传给地基,这时产生的荷载应力会远远大于正常支承状态。温度翘曲加上车辆荷载产生的叠加应力,是造成路面板出现纵向裂缝和角隅断裂的一个原因。

夜间或者气温骤降的时候,板顶温度低于板底,形成负温度梯度,板体边缘和角隅向上翘起,板中心部分与地基接触。这时车辆荷载作用于板中央时,支承条件变化也会产生额外的应力。

二、重载路面技术标准与要求

(一) 结构强度要求

结构强度是长寿命路面性能的根本保证,其主要要求就是路面结构在设计使用年限内,可以有效地抵抗重复交通荷载和环境因素造成的疲劳破坏。这就要求路面板要有足够的抗弯拉强度和较好的抗疲劳性能,在设计基准期内,在荷载和温度耦合作用下积累的疲劳损伤不能大于临界值。

为实现此目标,技术标准必须明确以下几个关键指标,详见下表:

长寿命水泥混凝土路面结构强度关键指标

参数	具体要求	备注
混凝土 28 天标准弯拉强度	不低于 5.0 MPa	关键 / 特重路段不低于 5.5 MPa
疲劳应力比	不高于 0.45	确保低损伤累积, 延长疲劳寿命
路面板厚度	经严密力学计算确定	重载高速公路常见 28-34 cm, 或更高

1. 混凝土设计弯拉强度：长寿命路面应使用高性能混凝土，其 28 天标准弯拉强度不低于 5MPa；部分关键路段或者特重交通路段，其 28 天标准弯拉强度不低于 5.5MPa。弯拉强度是路面板抵抗荷载应力最核心的力学性能。

2. 疲劳应力比控制：设计时必须严格控制最大荷载应力和混凝土弯拉强度之比，即疲劳应力比。长寿命路面一般要求这个比值不大于 0.45。较低应力比就意味着每次荷载作用对材料造成的损伤小，路面可以承受的荷载重复作用次数呈指数级增长，为长寿命打下了坚实的基础。

3. 结构厚度保证：路面板厚度是控制板底拉应力最有效的参数之一。根据交通量预测、轴载谱分析、材料性能等，通过力学计算来确定所需的板厚。重载高速公路水泥混凝土路面厚度一般介于 28cm 到 34cm 之间，甚至更厚，保证最不利荷载和环境组合下，应力水平仍在可控范围内。

（二）抗变形能力要求

长寿命路面设计不单要追求强度，更强调稳定性，即具有很好的抗永久变形的能力。水泥混凝土路面主要的永久变形病害有接缝错台、唧泥以及地基不均匀沉降引起的板体开裂。这些病害不但会降低行车的安全性舒适性，还会加快路基整体的破坏。

抗变形能力主要是对路面基层、地基进行控制。基层材料必须有高强度、高稳定性、抗冲刷性能好。一般用贫混凝土、水泥稳定碎石等胶结材料来稳定基层，这是提高路面结构整体刚度、有效防止唧泥的重要措施。基层顶面应设置沥青或者土工布隔离层，防止水分渗透和基层材料挤出。

对路基路床的强度和均匀性有更高的要求。路基压实度、回弹模量必须严格按照规范要求执行，全程动态检测，保证均匀性。对软土地基等不良地质路段，必须彻底处理，从根子上杜绝不均匀沉降的发生。

通过精细化接缝设计来保证变形协调。采用高效率传力杆系统，可以保证板间荷载平稳过渡，减小接缝处相对变形。选用优质接缝密封材料，做好密封工作，

防止地表水渗入基层、路基引起侵蚀，对于保证路面长期平整稳定十分重要。综合抗变形能力要求，就是建立路基、路面整体稳定、层间协调的结构体系。

（三）耐久性能要求

耐久性指的就是路面结构能够长期使用，在受到物理、化学以及环境等各种侵蚀因素的影响下仍然保持其设计功能和性能。长寿命路面设计之初就要满足强度、稳定性要求，还要在服役期内保持较低的性能衰减率。耐久性能要求可以从材料、结构、功能这三个主要方面考虑。

从材料角度讲，混凝土要具备良好的抗冻融性、抗碳化性、抗除冰盐化学侵蚀性以及抗碱骨料反应性。主要通过改善混凝土配合比来实现，采用低水胶比、引气技术、掺加粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料。原材料的选择也十分严格，特别是对骨料的物理化学性质有严格的限制，从源头上杜绝耐久性风险。

结构层面耐久性，在细节构造长期有效性上体现出来。接缝传荷、密封系统在数千万次荷载作用，上百次温度循环之后还应保证设计功能。路面排水系统应当高效并且不容易被堵塞，可以很快把渗入结构中的水分排出去，避免基层和路基因为受水软化或者侵蚀而受损。这些构造措施的耐久性，就是路面整体性能长久稳定的保证。路面表面抗滑耐磨性属于耐久性的一个部分，与行车安全直接相关，所以应该选用耐磨骨料，采取特殊的刻槽、压纹等表面处理方法来保证。

第三节 基于疲劳损伤的荷载应力计算

一、路面材料疲劳损伤机理

（一）微裂缝产生与扩展机理

水泥混凝土材料在初始状态下就存在大量的微裂缝、孔隙等缺陷，主要是由于水泥水化、温度变化、干缩等原因造成的。在交通荷载的反复作用下，初始缺陷的尖端就会出现应力集中的现象。当局部拉应力大于材料的抗拉强度时，微裂缝就会产生，并从骨料与水泥石界面过渡区向薄弱处扩展。从微观上看，裂纹尖端的应力场和位移场发生复杂的改变，当应力强度因子大于材料的断裂韧度时，裂缝就会失稳扩展。动荷载的长期作用使材料内部的微裂缝不断扩展，每一次扩展都要消耗能量，这就是疲劳损伤整个发展的过程。

微裂缝产生机理比较复杂，它和荷载大小、循环次数有关，也和材料本身的组成和结构有关。混凝土内骨料和水泥浆体形成的界面过渡区是力学上较薄弱的区域，在循环应力的作用下，此处更易成为裂缝萌生的地方。施工过程中水灰比控制不当、振捣不密实等因素会使混凝土内部留下更多的初始缺陷，在荷载作用下会变成疲劳裂缝的隐患。微裂缝的扩展不是简单的线性过程，它受到骨料阻裂、桥接等效应的影响，具有随机性和不规则性，因此很难对它进行准确的定量描述。

（二）裂缝发展规律分析

水泥混凝土路面在疲劳荷载作用下，裂缝的发展演化有规律可循，大体上可以分为萌生阶段、稳定扩展阶段和失稳扩展阶段。具体的特征请见下表。

裂缝发展阶段特征表

阶段	主要特征	损伤累积速率	宏观性能变化	裂缝扩展速度
萌生阶段	微裂缝初期形成	缓慢	不明显	极慢或无
稳定扩展阶段	微裂缝持续扩展， 部分连通	线性稳定	逐渐退化	相对恒定
失稳扩展阶段	主裂缝快速扩展， 结构失稳	非线性快速	显著退化，直至破坏	急剧加快

裂缝刚开始产生时，损伤累积的速度比较慢，材料宏观的性能没有太大的变化。随着荷载循环次数的增加，微裂缝开始稳定扩展，这时疲劳寿命的主要部分才被体现出来，裂缝扩展速度相对恒定。当裂缝达到临界尺寸的时候，就进入失稳扩展阶段，裂缝扩展速度急剧增大，最后导致脆性破坏。

裂缝发展规律具有很强的随机性、离散性，即使相同的材料、加载条件，疲劳寿命也会大相径庭。离散性是由混凝土材料组分复杂、内部微观结构不均一造成的。影响裂缝发展的因素很多，除了外部荷载的特性之外，环境因素也起着重要的作用。冻融循环环境下，裂缝中的水分反复结冰、融化，产生很大的冻胀应力，从而大大加快裂缝的发展。化学侵蚀，氯离子引起的钢筋锈蚀，会改变材料性质，从而影响裂缝的发展规律。钢筋锈蚀后体积变大，会对周围的混凝土产生张力，造成混凝土开裂，大大缩短结构的疲劳寿命。

（三）损伤累积过程描述

疲劳损伤是不可逆的累积过程，每一个周期荷载的作用都会使材料产生一定程度的损伤，随着时间的推移，损伤不断积累，最终造成材料性能的下降，结构的失效。对这个过程的正确描述就是疲劳寿命预测的关键所在。目前应用最广、

最经典的一个损伤累积模型就是 Palmgren-Miner 线性累积损伤准则。该理论认为,在不同的应力水平下,总的疲劳损伤是各个应力水平下损伤的线性叠加。当总损伤累积到临界值(一般取 1)的时候,结构就会出现疲劳破坏。

Miner 法则的数学表达式简单,物理意义清楚,在工程实践中得到了广泛的应用。它假定每次循环造成的损伤和加载历史无关,各个应力水平之间互相独立。但是大量的试验研究证明,真实的损伤累积过程不是严格的线性关系。加载顺序、荷载之间的相互影响等都会对疲劳寿命造成影响,但是线性损伤理论不能很好地考虑这些因素。高应力荷载优先作用造成的损伤,一般比低应力荷载优先作用要大。尽管存在这些不足,但 Miner 法则因为简便,仍然被用作处理随机载荷、特别是高周疲劳问题时的一个工程近似的方法。

为了更准确的描述损伤累积的过程,研究者提出了很多非线性损伤累积模型。这些模型考虑了荷载次序效应和荷载之间的相互作用,一般用连续损伤力学、材料物理性能退化或者能量耗散等概念来建立。以连续损伤力学为基础的模型,把材料刚度的退化(即弹性模量的衰减)看作是损伤的量度,用损伤演化方程来表征累积的过程。这些模型的物理基础更扎实、逻辑更严密,但是参数较多,需要大量的试验来确定,在一定程度上影响了工程中广泛的应用。因此探索能够反映复杂的物理机理、又便于工程应用的损伤累积模型,仍然是疲劳研究领域的重要发展方向。

二、疲劳荷载应力分析方法

(一) 疲劳试验方法介绍

疲劳试验是研究水泥混凝土材料疲劳性能、获得疲劳设计参数最直接有效的方法。其目的就是测定材料在循环荷载作用下所具有的疲劳强度和疲劳寿命,建立应力和寿命之间的关系曲线。混凝土疲劳试验一般在电液伺服疲劳试验机上进行,对试件施加一定波形、频率和应力水平的循环荷载,记录试件达到破坏时的循环次数 N 。试验可以采用单轴受压、单轴受拉、弯曲或者拉压交变等不同的加载方式,来模拟路面板在实际工况下所受的各种受力状态。

疲劳试验时必须严格控制荷载,并实时对材料的反应进行监测。一般用最小应力水平、多个最大应力水平来研究不同应力幅值对疲劳寿命的影响。利用应变片等传感器对试件的变形进行实时测量,得到残余应变随循环次数增加而变化的

规律。混凝土残余应变的发展大体上可以分为三个阶段，初期缓慢增长、中期线性稳定增长、最后非线性快速增长直到破坏。这一规律给疲劳损伤的定义以及评价赋予了重要的准则。

（二）应力幅值与循环次数关系

应力幅值与材料破坏循环次数的关系，是疲劳分析的核心，一般用 S-N 曲线来表示。S-N 曲线是根据大量的疲劳试验数据绘制的，横坐标一般取对数坐标下的疲劳寿命（循环次数 N），纵坐标取应力幅值 S 或者最大应力 S_{max} 。曲线清楚地表现出一个基本的规律：应力幅值越小，材料所承受的循环次数就越多，即疲劳寿命越长。

典型的 S-N 曲线可以分为低周疲劳区、有限寿命疲劳区、高周疲劳区。低周疲劳区应力水平较高，材料在较少的循环次数（ $10^4 \sim 10^5$ 次）下就会发生破坏，而且会伴随较大的塑性变形。有限寿命疲劳区是曲线的主要部分，双对数坐标系下此区域的 S-N 关系大体呈一条直线，即应力与寿命之间存在幂函数关系。对某些材料，如铁素体钢，当应力幅值低于某个阈值时，该材料就能承受无限多的循环而不会破坏，该阈值叫做疲劳极限或高周疲劳强度。

S-N 曲线的建立是做结构疲劳寿命评价的基础。获得应力谱之后，就可以用雨流计数法等对复杂的荷载历史进行统计分析，得到不同应力幅值下的循环次数。根据 S-N 曲线以及 Miner 线性累积损伤法则，就可以得到结构的总损伤度和剩余疲劳寿命。S-N 曲线受多种因素的影响，并且具有统计性特征，所以在工程应用中，常使用 S-P-N 曲线来考虑一定的保证率，以保证设计的可靠性。

（三）影响疲劳寿命的因素

水泥混凝土路面的疲劳寿命不是固定不变的材料常数，它受许多内在、外在因素的共同影响，这些因素相互作用，共同决定着路面结构实际的耐久性能。对这些影响因素进行深入的分析，对于疲劳设计以及性能预测都是十分重要的。

荷载特性也是重要因素之一，应力水平、应力幅值、加载频率、加载波形等都属于荷载特性。应力水平越高，疲劳寿命越短，这正是 S-N 曲线反映出来的基本规律。平均应力也不能忽略，平均拉应力会大大降低材料的疲劳抗力，平均压应力一般能提高材料的疲劳性能。加载频率在一定的范围内对于混凝土疲劳寿命影响不大，但是频率过高会引发热效应，频率过低又会加大徐变效应的影响。

材料自身的属性起着关键作用。

1. 水泥品种、用量、骨料类型和级配、水灰比及外加剂用量都会影响混凝土的密实度、强度以及内部微观结构,从而影响其抗疲劳性能。良好的配合比可以减小初始缺陷,提高界面过渡区强度,从而提高疲劳寿命。

2. 龄期和养护条件:随着龄期的增加,水泥水化反应会持续进行,混凝土的强度、密实度会持续提高,抗疲劳性能也会随之提高。充分而良好的养护是水泥水化的充分条件,对提高早期和长期疲劳性能都起着至关重要的作用。

环境因素的影响不能忽视,温度、湿度的改变会使混凝土内部出现应力,内部应力同荷载应力相结合时,疲劳损伤就会加快。风速会影响混凝土表面水分的蒸发速度,在施工初期,如果水分蒸发过快,就容易引起塑性收缩开裂,从而形成疲劳破坏的薄弱环节。冻融循环、化学介质侵蚀等恶劣环境的作用,直接造成材料性能的劣化,大大降低疲劳寿命。

结构尺寸以及应力状态也会起着重要的作用。尺寸效应指的是构件尺寸越大,内部存在严重缺陷的可能性越大,疲劳强度也就越小。多轴应力状态下的疲劳行为比单轴应力状态要复杂。围压的存在一般会提高混凝土的受压疲劳强度。路面板厚度、接缝设置、基层接触状况等都会对板内应力分布造成影响,从而影响到整体疲劳性能。

第四节 重载路面结构厚度与配筋设计

一、重载路面厚度确定方法

(一) 厚度影响因素分析

重载长寿命水泥混凝土路面厚度设计,是一项要综合考虑诸多变量的复杂工程决策。交通荷载无疑是最主要而且决定性的因素。现代高速公路交通重载化、渠道化特征明显,轴载谱组成也越发复杂。设计时要准确预测设计年限内累计当量轴次,充分考虑重型货车的比例、轴载大小和增长率。重车的作用不断会使路面产生反复弯拉应力,这是路面产生疲劳开裂的主要原因。因此准确的交通流预测和分析是厚度设计的基础,任何低估都会导致路面过早破坏,不能达到长寿命的目的。

路面材料本身性质以及下卧层支撑能力,是决定厚度的又一重要因素。混凝

土的弯拉强度是直接反映其抵抗荷载、温度应力的能力，高强度混凝土可以减小面板厚度，但是需要综合考虑脆性增大、成本增加等问题。基层及土基的回弹模量或地基反应模量（K 值）就反映它们对面板的支撑刚度。稳定、均匀、高强度的基层和土基，可以大大减小面板在荷载作用下产生的弯拉应力，减小板底脱空的可能性，使面板设计更薄。长寿命路面设计中，加强基层、改良土基同优化面板厚度一样重要。

环境因素对于路面厚度的影响也不能忽略。环境因素主要是以产生温度应力的方式对路面结构产生影响。混凝土板顶面、底面由于日照、温度变化产生的温度梯度，会引起面板翘曲变形，从而产生应力。荷载应力和翘曲应力叠加之后，就会形成路面板的主要应力状态，在板角、板边等处尤为明显。湿度的变化还会造成混凝土的干缩湿胀，产生湿度应力。寒冷地区冻融循环作用会损坏混凝土材料本身以及土基的稳定性。设计时必须考虑项目所在地的气候特点，分析最不利的温度梯度下产生的应力组合，保证设计厚度能抵抗综合应力的作用。

（二）厚度确定方法与步骤

目前重载长寿命水泥混凝土路面厚度确定大多采用力学 - 经验设计法。克服了传统纯经验法的不足，根据荷载、应力、疲劳寿命三者之间内在的关系指导设计，使设计过程更加科学透明。主要思想就是计算交通荷载和环境因素共同作用下路面板的临界应力，根据混凝土材料的疲劳特性，校核设计年限内路面结构累计疲劳损伤是否在允许范围内。一般通过专业的路面设计软件或者用有限元法编写的计算程序来完成，使路面结构工作状态的模拟更加精确。

具体的设计步骤通常遵循一个系统化的流程，以确保所有关键因素都被纳入考量。

1. 基础数据输入，全面收集整理项目所需的设计参数，设计年限、年平均日轴次、轴载谱、交通增长率、混凝土弯拉强度、弹性模量、泊松比、基层、垫层及土基回弹模量或 K 值、地区温度场、湿度场资料、接缝类型、传荷能力等。

2. 设定初始厚度：根据工程经验或相关规范，初步拟定一个或多个混凝土面板的试算厚度。

3. 结构响应分析：使用韦斯特加理论或者有限元模型，在板中心、板边、板角等最不利荷载位置以及最大温度梯度组合下，计算混凝土板底的最大组合弯拉应力。

4. 疲劳损伤验算, 将计算得到的最大组合弯拉应力与混凝土设计弯拉强度相比较, 得到应力比。依据预设的混凝土疲劳方程, 确定在该应力比下路面可以承受的允许荷载作用次数。

5. 累积损伤评价, 用迈纳线性累积损伤准则, 根据预测的交通轴载谱, 计算设计年限内不同级别轴载造成的疲劳损伤, 然后加起来得到总累积疲劳损伤度。

6. 设计厚度确定: 看总累计疲劳损伤度是否小于等于 1。如果满足条件, 则初步选定的厚度可以认为满足结构强度要求; 如果不满足, 则需要增加板厚, 重复步骤 3 到 5, 直到找到满足疲劳寿命要求的最小厚度为止。

(三) 经济厚度优化选择

满足疲劳寿命要求的厚度不一定是最佳的设计方案。长寿命路面设计最终目的就是使全生命周期的费效比最优。因此, 经济厚度优化选择就成为设计流程中不可缺少的重要环节。这就需要应用全寿命周期成本分析的理念, 把视角从只考虑建设费用扩大到建设、养护、维修、用户使用等各方面的综合费用。

经济厚度优化时, 要对经过疲劳验算的各个厚度方案加以比较。较厚的路面板初始投资较高, 但是结构储备充足, 抵抗疲劳和环境侵蚀的能力更强, 未来服役期养护维修需求会减少, 大修或者重建的时间也会延后。反之选用满足设计要求的 minimum 厚度经济型方案, 初期投入少, 但是寿命后半段需要更多的、更昂贵的维修活动。养护维修活动本身就会造成交通延误, 给使用者带来较大的成本。全寿命周期成本分析利用一定的折现率, 将将来不同时点发生的费用折算成现值, 对不同的厚度方案总成本进行公平比较, 选择总成本最低的厚度作为最优经济厚度。决策过程体现出了可持续发展和资产管理先进的理念, 保证公共投资长期效益。

二、重载路面配筋方案选择

(一) 钢筋类型与规格选择

水泥混凝土路面所用的钢筋, 按其功能分为传力杆、拉杆、分布钢筋网。本节主要讨论连续配筋混凝土路面或配筋接缝板中主要的受力钢筋, 即纵向分布钢筋。此类钢筋的主要作用并非直接提高板的抗弯承载力, 而是通过与混凝土的粘结作用, 把由温度、湿度变化所引起的混凝土收缩应力分散成许多间距很小、宽度极小的细微裂缝, 并用它的轴向拉力把这些裂缝紧紧地“捆绑”在一起, 保持

裂缝两侧骨料嵌锁作用，从而达到高效荷载传递的效果。

钢筋类型一般采用带肋钢筋，即热轧带肋钢筋。带肋钢筋表面的月牙肋或者人字肋，能大大增加钢筋与混凝土之间的机械咬合力，保证钢筋和混凝土共同工作，有效传递应力，这是实现裂缝有效控制的前提。带肋钢筋的粘结锚固性能比光圆钢筋好得多。钢筋材质应选用强度高、塑性好、焊接性能好的钢材。

（二）配筋率确定与优化

配筋率即纵向钢筋总横截面积与混凝土板横截面积的比值，是连续配筋混凝土路面设计的重要参数。配筋率的大小影响路面开裂情况，裂缝间距、裂缝宽度都是评价连续配筋路面性能的重要指标。合理的配筋率，可以使路面产生良好的裂缝形态，使裂缝处具有良好的荷载传递能力，防止水分、除冰盐渗透，避免钢筋锈蚀。

配筋率的确定，是考虑各方面因素的复杂过程。配筋率过小，钢筋的约束力不能抵消混凝土的收缩应力，裂缝间距大、裂缝宽度超限，骨料嵌锁作用消失，甚至造成钢筋屈服断裂。反之，配筋率过高，虽然可以减小裂缝间距，但是过于密集的裂缝会削弱路面板的整体性，增加碎裂的风险，同时也会大大提高工程造价，经济性差。因此设计时必须找到一个最佳的配筋率区间。其计算一般采用应力平衡理论，考虑混凝土抗拉强度、干燥收缩系数、温缩系数、钢筋屈服强度、弹性模量、板底摩阻力等。目前已有比较成熟的设计模型和公式，美国 AASHTO 设计指南中给出的计算公式可以用来计算出满足预设裂缝间距、宽度的最小配筋率，设计者在此基础上进行优化选择。

以上所提到的配筋设计关键参数，即纵向钢筋类型、直径、理想的裂缝间距和宽度、钢筋网布置位置及搭接长度等具体内容见下表。

重载路面配筋设计关键参数表

参数项	典型值 / 范围	设计要求 / 备注
纵向钢筋类型	HRB400, HRB500	高屈服强度，节约材料，与混凝土粘结良好
纵向钢筋直径	16mm - 25mm	重载高速公路连续配筋路面常用范围
理想裂缝间距	1.0m - 2.5m	确保骨料嵌锁和高效荷载传递
理想裂缝宽度	< 0.5mm	防止水分、除冰盐渗透，避免钢筋锈蚀
钢筋网布置位置	板厚 1/3 - 1/2	位于板厚中部或稍偏上，有效控制裂缝
钢筋搭接长度	25 - 35 倍钢筋直径	确保应力有效传递，搭接位置需错开

从上表可见,这些参数的合理选择是实现长寿命混凝土路面配筋设计的核心。

(三) 钢筋布置方式与要求

钢筋在混凝土板内空间布置方式及精度的好坏,对配筋设计意图的实现起着决定性的作用。布置不当就会大大削弱甚至抵消配筋所带来的好处。连续配筋混凝土路面中,纵向钢筋是主要的受力构件,沿道路行进方向连续铺设。横向钢筋的主要作用是固定纵向钢筋的位置,保证混凝土浇筑过程中纵向钢筋不发生位移,同时也有利于控制纵向裂缝。

钢筋施工布置有严格的技术要求。为了保证钢筋的连续性,纵向钢筋要搭接。所有的搭接位置在长度方向上要错开,防止同一横截面上形成薄弱断面。钢筋保护层厚度要符合规定,钢筋距离板顶面、底面、侧边最小净距要满足设计要求,防止钢筋锈蚀,保证粘结力足够。施工时需要使用足够多、足够强度的钢筋支架(俗称马凳)把钢筋网固定在预定的高度上。

施工过程中的质量控制是保证钢筋布置符合要求最后一道防线。混凝土浇筑前,必须对钢筋网的型号、规格、间距、搭接长度、位置、保护层厚度等进行检查验收。混凝土摊铺、振捣时要随时观察钢筋网的情况,防止施工机械、振捣棒等造成钢筋网下沉或者移位。特别是内部振捣器的使用,操作人员必须经过专门培训,不能使振捣器直接接触到钢筋网。只有通过精心设计、严格施工才能使钢筋系统真正发挥出它的作用,给长寿命路面的实现提供结构保障。

第四章 长寿命设计标准与寿命预测

第一节 路面设计使用年限与可靠度理论

一、路面设计使用年限概念

（一）设计年限定义与内涵

路面设计使用年限，一般指在正常的设计、施工、使用、养护条件下，路面结构或者主要承重构件不需进行结构性大修或更换，仍能满足预定使用要求的年限。设计年限是在一系列正常的前提之下设定的预期的服务年限。主要内容包括两个方面：第一，从技术上讲，路面结构要能够承受交通荷载和环境因素的反复作用，具有足够的承载力和稳定性；第二，从经济上讲，在设计寿命期内，路面的养护维修成本要处于一个合理的范围之内，不能因为过早地进行大修而使全生命周期成本急剧增加。

长寿命路面设计年限比传统路面长得多。一般认为设计寿命超过 40 年的路面可以称为长寿命路面。该类路面的设计思想是在设计使用年限内不发生结构破坏，其损坏主要集中在可以定期更换的表层功能层。高速公路水泥混凝土路面设计基准期一般取 30 年，长寿命设计的目标是将其提高到 40 年、50 年甚至更长。设计年限的延长，对路面结构的耐久性、材料性能和施工质量控制提出了更高的要求，也促使传统的“建养并重”的思想发生转变，逐渐形成了重建设、轻养护的建养一体化新模式。

（二）功能寿命与结构寿命要求

路面寿命分为功能寿命和结构寿命，二者一起决定路面的综合服务质量以及全生命周期。长寿命水泥混凝土路面的设计要同时达到这两个高标准要求，保证路面长时间服役的安全可靠、舒适高效。功能寿命是指路面使用性能，即行车舒适性、安全性、快捷性等，它的评价指标主要是路面平整度、抗滑性、噪声水平和排水能力等。对长寿命路面来说，损坏主要是表层的，即功能性损坏比结构性损坏先发生。设计要求在 15~20 年的养护周期内，只需要对表面功能层进行维护

或者更换,就可以使它恢复良好的服务功能。

结构寿命指的是路面主要承重结构(混凝土板等)在荷载及环境反复作用下的抗破坏能力,是路面安全性的根本保证。结构性破坏一般会表现为板底疲劳开裂、断板、错台等,一旦出现就会造成巨大的修复费用,并且严重影响交通安全。长寿命路面的核心设计思想就是保证路面主体结构在设计寿命期内(比如40年左右)不出现结构破坏。因此设计上要求路基具有很高的稳定性和承载力,给上部结构提供持久均匀的支撑;路面结构层要有足够的厚度,减小荷载应力和温度应力,减缓疲劳损伤的累积。优良的材料性能及完善的排水系统对结构长期寿命起到决定性的作用。

(三) 设计年限确定依据

路面设计使用年限的确定属于综合决策过程,其依据繁杂,须要全面考量技术、经济、社会等诸多因素,从而保证所决定的年限科学合理且切实可行。

1. 公路等级以及功能定位是确定设计年限的首要因素。不同的公路在国家或区域路网中所起的作用、所处的地位不同,所以设计年限也有所不同。高速公路、一级公路因为对服务水平和耐久性要求较高,其设计年限一般最长,水泥路面设计基准期最长的可达30年。次干路、支路等低等级公路交通量小、重要性低,设计年限也较短。

2. 交通量的大小会直接决定路面结构的疲劳损伤,因此设计年限内累计交通量的准确预测就显得非常重要。这就需要对未来年平均日交通量、车型构成、轴载分布特征、重载交通的发展趋势做出科学的分析与预测。当交通量大、重车比例高时,路面损耗加快,在相同的结构条件下使用年限就会缩短。长寿命路面设计更需要对远期交通状况做出准确的预测。

3. 设计年限的确定既受到工程技术条件的限制,也受到经济条件的限制。虽然高标准设计、高质量材料、精良施工工艺可以大大提高路面的使用寿命,但是也会带来更高的初期建设投资。因此需要在工程全生命周期成本(初期投资、养护维修费用、用户延误成本等)和预期收益之间进行权衡,用经济分析的方法来确定最优的设计年限。地区经济发展水平、资金筹措能力、养护管理水平等也是必须要考虑的现实因素。

4. 相关法规、政策导向,国家及行业发布的有关技术标准、规范等是确定设计年限的直接依据。例如《公路工程技术标准》就对各等级公路的设计年限作出

明确规定或给出指导范围。国家对于绿色交通、可持续基础设施的倡导，也将会使设计朝向寿命更长、环境影响更小的方向发展，进而影响到设计年限的选择。

二、可靠度理论在路面工程中的应用

（一）可靠度基本概念

结构可靠度就是指结构在规定的条件下、规定的时间里，能够完成预定功能概率。在路面工程中，它指的是路面结构在设计基准期内各项性能指标（应力、弯沉、平整度等）都在允许范围内的概率。和可靠度相对应的就是失效概率，即结构不能完成预定功能的概率。可靠度的概念把设计重心由追求绝对的安全，转变为把失效的风险控制在一个可接受的、经济合理的水平之内，更符合工程实践的客观规律。

路面设计可靠度分析一般用极限状态设计法。极限状态指路面结构或者构件功能失效或者承载能力失效的临界状态。水泥混凝土路面极限状态一般和疲劳断裂有关。当荷载应力、温度应力的累计效应达到或超过混凝土的抗弯拉强度的时候，结构就达到了其承载能力极限状态。可靠度分析的关键是建立功能函数（又叫极限状态方程），一般用抗力和效应的差来表示，即 $g = R - S$ 。当 R 大于 S 的时候，结构处于可靠状态；当 R 小于 S 的时候，结构处于失效状态；当 R 等于 S 的时候，就是极限状态。抗力和效应都受到随机变量的影响，因此功能函数本身也是一个随机变量。经过概率统计分析之后，就可以得到结构的失效概率，再进一步推导出可靠度。

（二）可靠度指标与水平

可靠度指标又叫可靠指标，是用来衡量结构可靠性的数量指标，一般用 β 表示。它表示功能函数均值和标准差的比值，从几何意义上来说，在标准正态坐标系下，它是坐标原点到极限状态面的最短距离。可靠指标 β 和失效概率之间存在一一对应的关系， β 值越大，失效概率越小，结构就越可靠。相比直接使用可靠度（一个接近 1 的数字），可靠指标 β 数值上更加敏感直观，方便设计中应用比较。

目标可靠度指标（或称目标可靠度）是设计规范中预先规定的结构设计应该达到的最低可靠性水平。它的确定是一个综合性的决策过程，要考虑结构的重要性、破坏所造成的后果、经济承受能力、社会可以接受的风险水平等许多因素。

我国现行规范一般采用校准法确定目标可靠度指标，即通过对已有成功设计案例所隐含的可靠度水平进行分析，结合工程经验来确定。

不同等级的公路有不同的目标可靠度。高速公路、一级公路由于其重要性高，安全等级也最高，目标可靠度一般为 95%，对应的目标可靠指标为 1.64。随着公路等级降低，其目标可靠度、可靠指标也随之降低。二级公路的目标可靠度为 90%，三级公路的目标可靠度为 85%。具体的目标可靠度水平如下表所示：

不同公路等级的目标可靠度水平

公路等级	目标可靠度	目标可靠指标 (β)
高速公路	95%	1.64
一级公路	95%	1.64
二级公路	90%	1.28
三级公路	85%	1.04
四级公路	80%	0.84

分级可靠度水平体现的是资源最优化配置原则，也就是按照结构的重要程度，在不同的结构上投入相应比例的安全储备。

（三）基于可靠度的思路方法

基于可靠度的路面设计方法，其基本思想就是把设计过程中涉及到的交通荷载、材料强度、结构尺寸、环境影响、计算模型等主要不确定因素都看作随机变量，利用统计学理论进行概率分析，使路面结构在设计年限内失效的概率低于规范规定的允许值。从根本上改变了传统定值设计法采用单一安全系数、对所有的不确定因素都考虑在内的做法，使设计过程更加透明、科学、精细。

具体流程一般为，确定影响路面性能的主要随机变量，利用大量的试验数据和现场观测得到这些变量的概率分布类型（正态分布、对数正态分布等）以及统计参数（均值、标准差、变异系数）。再者根据路面破坏模式来建立极限状态方程，该方程能够很好地体现结构抗力和荷载效应之间的关系。选择合适的可靠度计算方法（一次二阶矩法、蒙特卡洛模拟法、响应面法等），对建立的极限状态方程进行求解，从而得到当前设计方案下的可靠指标 β 。

计算出的可靠指标 β 和规范规定的目标可靠指标 β_T 进行比较。若计算出的 β 值大于或等于目标 β 值，则表明设计方案满足可靠性的要求，反之则要对设计参数进行调整，例如增加混凝土板厚度、提高材料强度等级或者改善基层支

承条件等,并重新做可靠度计算,直到符合要求为止。设计中引入的可靠度系数,是考虑目标可靠度和各个参数变异水平的综合系数,可以简化设计计算过程,方便工程技术人员使用。基于可靠度的设计思路可以对结构的安全性进行量化控制,也可以给路面结构优化设计、全生命周期管理提供坚实的理论基础。

第二节 多因素耦合作用下的性能衰变模型

一、路面性能衰变影响因素

(一) 交通荷载作用影响

交通荷载是造成水泥混凝土路面性能衰退最直接、最主要的外部因素。车辆荷载反复产生的弯曲拉应力,就是造成混凝土板疲劳损伤累积的主要原因。轴载大小、荷载频率、行驶速度、轮胎压力等都是决定路面寿命的主要因素。重型货车特别是超载车辆的每次应力超过轴载值许多倍,路面疲劳寿命衰减的速度呈指数上升,对路面的损害非常大。因此,交通荷载的累积效应用等效单轴累计作用次数来量度,是路面设计、寿命预测的重要参数。

交通流的动态性以及渠道化现象,增大了荷载的破坏效应。车辆行驶速度影响荷载作用时间,更重要的是路面不平整会引起冲击荷载的大幅增加,峰值可达静态荷载的数倍,大大加快了疲劳裂缝的萌生和发展。由于车辆行驶轨迹较为固定的渠道化交通特点,所以荷载应力集中在某一轮迹带上。应力集中效应使轮迹带区域的疲劳积累速率比其它地段高很多,是形成纵向裂缝等病害的主要原因。接缝或者裂缝边缘处,荷载作用下应力集中更明显,是结构最薄弱的环节。

交通荷载、路面结构的弱点、环境因素三者互相影响,会产生各种典型的结构性病害。当车辆荷载作用在板底脱空或者基层软弱的板角、板边上的时候,会产生很大的弯拉应力,极易造成板角断裂、边角破碎。有水时,荷载作用下板体的压缩和回弹会产生高压水流,将基层或者垫层的细颗粒物质从接缝或者裂缝处冲出,形成“唧泥”现象。唧泥既掏空了板底支撑造成严重脱空,又引发接缝错台,形成恶性循环,使路面结构很快丧失承载能力。

(二) 环境因素作用影响

环境因素对水泥混凝土路面造成的影响是持久而深刻的,它通过物理、化学

作用直接或者间接引起材料性能退化、结构应力变化。温度是最活跃的因素，日变化、季节变化使混凝土板内形成复杂的温度应力场。白天阳光照射板顶温度高于板底形成正温度梯度，板体中部向上拱起，边角向下卷曲；夜晚相反，板顶温度低于板底形成负温度梯度，板体边角向上翘曲。温度梯度造成的翘曲变形被板体自重和基层摩阻力所约束，在板内产生很大的拉应力，即翘曲应力。叠加在行车荷载上的应力，当行车荷载作用在翘起板角上的时候，会产生极高的应力峰值，成为横向开裂和角隅破坏的主要原因。

水分的影响是普遍的、复杂的。路面结构内部和地基的水分含量变化，都会对土基、基层材料的强度和模量产生影响。降雨、融雪等造成水分入渗，会使基层饱和，承载力急剧下降，形成弹簧板。水分的存在是产生唧泥、错台的必要条件。在水分和荷载的作用下，板底产生空隙，支撑条件变坏。湿度变化还会使混凝土材料产生干缩湿胀，从而产生体积变形应力，在约束状态下容易造成表面网裂。

寒冷地区冻融循环对混凝土耐久性来说是一种考验。当水分在混凝土孔隙中结冰时，体积就会膨胀 9% 左右，产生很大的冰胀压力。反复冻融循环使混凝土内部的微裂缝不断扩大、连通，造成混凝土的强度、弹性模量持续降低，表面出现剥落、露骨、层裂等。某些特殊骨料，比如砂子、贝壳等，在冻融作用下很容易受到破坏，会产生 D 型裂缝，也就是沿接缝和自由边出现紧密排列的弧形裂缝，最后导致路面结构整体性遭到破坏。

化学侵蚀也是不能忽视的长期破坏因素。冬季撒布路面除冰盐溶液，主要成分是氯化物，会渗透到混凝土里。一方面会加重冻融破坏的物理过程，另一方面氯离子还会引发钢筋（传力杆）锈蚀，使其膨胀开裂。某些地方，骨料中活性二氧化硅会和水泥碱性物质发生碱集料反应，生成吸水膨胀的凝胶，从内部使混凝土膨胀开裂，属于一种难根治的“癌症型”病害。

（三）材料自身性能影响

水泥混凝土属于非均质复合材料，自身组成、结构及性能是决定路面耐久性、抗衰变能力的内在基础。高质量的原材料，科学的配合比设计，精湛的施工工艺，共同构成了路面抵抗外部荷载和环境侵蚀的第一道、最关键的防线。即便是在同样的外部环境下，由于材料性能的好坏不同，路面寿命也会有很大的差别。

材料性能的影响体现在多个层面，具体阐述如下：

1. 水泥和掺合料系统中水泥品种、标号、水化活性直接关系到混凝土早期、

长期强度。水灰比是决定混凝土密实度、强度和耐久性的主要参数；水灰比过高会产生很多毛细孔隙，成为水分和侵蚀性离子入侵的通道。采用适量的粉煤灰、矿渣粉等优质矿物掺合料，可以利用二次水化反应填充孔隙，改善界面结构，大大提高混凝土的抗渗、抗冻、抗化学侵蚀能力。

2. 骨料的质量：骨料在混凝土中占 70% 的体积，骨料质量好坏直接影响路面的质量。粗骨料硬度、耐磨性、抗压强度决定路面抗磨光能力及承载基础。细骨料级配、空隙率影响混凝土的和易性及密实度。骨料的物理稳定性（抗冻性）和化学稳定性（有无碱 - 集料反应活性）要严格控制，不合格骨料在内部造成混凝土破坏。

3. 水泥石和骨料之间界面过渡区是混凝土微观薄弱环节。该区域水灰比偏高，富集取向性强的氢氧化钙大晶体，孔隙率也比本体砂浆大得多。界面区强度、致密性决定混凝土宏观力学性能、渗透性。利用物理和化学的方法改善界面区，是提高混凝土整体性能的重要技术途径。

影响水泥混凝土路面性能衰变的主要因素及机制可见下表。

水泥混凝土路面衰变主要影响因素

因素类别	关键子因素	核心影响
交通荷载	轴载、频率、速度、超载	疲劳损伤、冲击破坏、应力集中
环境因素	温度、水分、冻融、化学侵蚀	翘曲应力、材料退化、冰胀破坏
材料自身	水灰比、骨料质量、ITZ、施工养护	强度耐久性、抗渗抗冻性、早期开裂

二、路面性能衰变规律描述

（一）平整度衰变规律

路面平整度是反映行车舒适性、安全性的重要性能指标，一般用国际平整度指数来表示。它的衰减不是简单的线性下降，而是一个典型的多阶段演化模式。路面建成通车之后会有一个短暂的平整度提高期或者稳定期。由于施工后微小不平整在早期车辆碾压下得到一定程度的压实、磨合，路基、路面结构还没有出现明显的永久变形。

服役时间增长、交通荷载累积后路面才开始慢慢进入衰老的漫长过程。此期间平整度劣化主要是由于路基路面长期不均匀压实沉降、温度变化造成的板体微小翘曲变形、接缝处初始微小错台等缓变因素所驱动的。这些因素造成 IRI 增长

率较低且比较稳定,衰变曲线为斜率较平缓的直线或者微凸曲线。这一阶段是路面主要有效服务期,路面状况好,只需要做少量的预防性养护。

当累积交通荷载和环境损伤达到临界值的时候,路面结构就会出现明显的病害,平整度进入加速衰变期。标志性事件就是结构性病害大规模出现,比如接缝严重错台、唧泥造成板底脱空、板角断裂、贯穿性裂缝的形成及错断等。这些病害对平整度的影响是剧烈的,是非线性的。几毫米的错台,在车辆通过时会产生强烈冲击,使IRI值急剧上升。病害之间存在着正反馈效应,错台加大了冲击荷载,冲击荷载又加快了裂缝扩展和唧泥的速度,形成恶性循环。此阶段的IRI值增加速率加快,衰变曲线斜率陡,当路面服务水平不能接受时必须大修或者重建。

(二) 抗滑性能衰变规律

路面抗滑性能保证各种天气下车辆的安全行驶,在湿滑路面制动性能更好。其衰变机理主要是由路面表面微观构造、宏观构造变化引起的。新铺设的水泥混凝土路面表面一般都会有一层很细的水泥砂浆。开放交通初期,车辆轮胎的摩擦作用很快将浮浆磨掉,把内部质地坚硬的粗骨料暴露出来。这个过程可以改善路面表面的纹理,特别是微观构造,因此短期抗滑性能有可能会不降反升。

之后长期使用中抗滑性能进入持续衰减阶段,它由两个主要过程控制。其一是骨料磨光作用,车辆轮胎行驶、制动、转向时会对路表粗骨料不断进行摩擦和抛光,使骨料表面的微小棱角被磨圆、磨平。这就直接破坏了提供主要摩擦力的微观构造,使路面摩擦系数系统性下降。骨料抗磨光值是决定这个衰减速率的主要材料参数。其二就是宏观构造污染和磨损,轮胎磨耗产生的橡胶屑、空气中尘土等杂质会逐渐填充到粗骨料之间的缝隙里,压实后堵塞排水通道。这就使路面在雨天时轮胎与路面之间很容易形成一层完整的水膜,产生水滑现象,大大降低了湿路面的抗滑性。

抗滑性能衰变速率受诸多因素综合影响,不是固定不变的。交通量,特别是重型货车比例,是磨光作用的主要动力。在坡道、弯道、交叉口等车辆经常要进行加减速或者转向的地方,轮胎与路面的剪切作用更大,抗滑性衰减也就会更快。另外抗滑性能存在季节性变化,夏季由于路面温度高,沥青质和橡胶类污染物会软化粘附,填充纹理,抗滑性能低;冬季雨水冲刷、低温使污染物硬化脱落,抗滑性能恢复。波动的叠加是在长期趋势不断下跌的时候出现的。

（三）结构承载能力衰变规律

水泥混凝土路面结构承载能力衰变，是材料内部微观损伤累积到宏观结构功能退化的过程，核心就是板体刚度衰减、接缝传荷能力丧失。该过程是逐步且不可逆的。在板体受力初期处在弹性阶段，所受载荷造成的形变完全恢复到原来的位置上，承受能力比较稳定。但是每一次荷载作用都会在应力集中区域产生微小、不可逆的损伤。

疲劳损伤累积就是承载能力衰变的主要途径。在交通荷载和温度应力的共同作用下，混凝土内部的微裂缝就会不断地产生、扩大、连通。该过程按照疲劳损伤理论，当累积损伤达到材料疲劳极限时，宏观裂缝就会产生。裂缝出现表示板体有效截面的削弱和整体刚度的降低，在荷载作用下路面弯沉值开始增大。随着裂缝的发展，特别是在出现贯穿板厚的裂缝之后，板体被分成若干小块，作为结构梁板整体的承载能力大大降低，这时承载能力进入快速下降通道。

接缝式水泥混凝土路面结构整体性很大程度上取决于接缝传荷能力。接缝传荷能力是指荷载作用在一块板上时，通过接缝传递给相邻板体共同承担荷载的能力，一般用传荷效率来表示。新的路面传力杆系统或者骨料嵌锁可以提供很高的传荷效率。但是，在长期车轮荷载冲剪的作用下，传力杆周围混凝土会发生塑性变形、压碎或者剥落，造成传力杆松动，传荷效率大大降低。靠骨料嵌锁缩缝，张开和骨料磨损都会使它传荷能力逐渐丧失。传荷效率降低后荷载几乎全部由受荷板板边、板角承担，造成该区域应力、弯沉急剧增大，既加快了板边、板角的疲劳破坏，又容易造成错台、唧泥，形成承载能力下降恶性循环，最终导致结构失效。

第三节 路面预测传统方法与数据驱动方法综述

一、传统路面寿命预测方法

（一）经验公式预测法

经验公式预测法依靠长时间路面性能观测及统计分析，用经验公式来预测。它利用大量的实际路面在一定的交通、材料、环境条件下性能变化的数据来拟合出反映路面使用性能（平整度、破损率）随时间或荷载作用次数变化的数学表达

式。最具代表性的就是美国公路官员协会设计指南中提出的性能方程，该方程形式简单、参数容易获得，工程初期曾被广泛使用。

该方法最大的缺点就是地域性很强、经验依赖性很大。由于公式是依据一定地区的资料而建立的，所以如果直接把它应用到地质条件、气候环境、材料特性、交通组成完全不一样的新项目中，其预测精度就会大打折扣。它对新型路面结构或者新型材料的适应性较差，因为它不能从力学机理上揭示路面损坏的根本原因，本质上是一种只知其表象而不明其机理的“黑箱”模型。

（二）力学经验预测法

力学经验预测法，也叫机理经验法，是传统方法走向科学化的重要一步。该方法试图把路面的力学响应同实际性能退化联系起来，用理论计算和经验统计相结合的方法来提高预测的合理性。它不再只是依靠宏观现象的观察，而是对路面结构内部的应力应变进行深入的分析。

基本流程就是用弹性层状体系理论或者更复杂的有限元模型，计算标准轴载作用下路面结构关键位置（板底、板顶）的最大拉应力或者拉应变。这是力学分析的重要部分，主要用来定量分析路面结构在荷载作用下所产生的内部应力。

（三）回归分析预测法

回归分析预测法依靠数理统计手段，目的在于创建路面性能同其他各类影响要素之间的定量联系。该方法把路面的某一个性能指标（如国际平整度指数IRI、裂缝面积率等）作为因变量，把交通荷载、路面结构参数、材料性质、环境因素、路龄等作为自变量，收集大量的数据，建立自变量与因变量之间的一个或者多个回归方程。

该方法可以是线性回归、非线性回归、逐步回归等，并且还可以通过统计检验来量化地体现出来，地表性能衰减受到的影响最大的因素以及它影响的程度。在数据充分支持的基础上，回归模型可以得到比较客观的预测结果，随着统计软件的发展，建模过程也愈发简便。其解释性好，可以清楚地反映出各个变量的权重。但是主要的问题在于回归模型所揭示的只是变量之间的相关性，而不是必然的因果关系，有时会出现伪相关，从而误导决策。模型的预测能力受到建模所用数据范围的限制，对于数据范围之外的情况进行外推预测时，其结果往往是不可靠的；模型的形式需要人为地预设，本身就存在较强的主观约束。

二、大数据驱动的使用寿命预测方法

（一）多源数据采集与整合技术

大数据驱动的路面寿命预测，它的基础就是全面、高质量、多维度的海量数据。新方法与传统方法相比，不是依靠少量样本来解决问题，而是更加注重各种异构数据的大量收集以及深入整合。数据源包括路面全生命周期各方面信息，共同组成立体多维的数据网络。主要数据类型为：路面性能数据（由自动化检测设备高频采集的平整度、车辙、构造深度、裂缝等指标）；结构承载能力数据（落锤式弯沉仪获取的弯沉盆数据）；交通荷载数据（动态称重系统获取的实时轴载谱、车流量等信息）；环境气象数据（沿线气象站记录的温度、湿度、降雨、冻融循环）；施工质量控制数据及后期养护维修历史记录。

现代数据采集技术正飞速向自动化、高精度、高时空分辨率方向发展。埋植光纤光栅、压电陶瓷等物联网传感器在路面中可以对路面的内部应力、应变、温度等进行长时间的连续监测。以智能手机或者车载设备为载体的移动感知技术，可以以众包的方式低成本、大范围地获取路面平整度信息。遥感技术，如高分辨率卫星影像、无人机航拍等，给大范围路网宏观状态评价提供了一种新的有效的途径。

只有把来自不同的数据源进行高效整合并加以治理之后，才能发挥出数据本身所具有的潜在价值。这无疑会牵扯到许多重要的技术环节。

1. 数据标准化、清洗要创建统一的数据模型，把不同来源、不同结构的数据转为统一格式并规范处理。同时使用异常检测、插值等算法来清洗数据中噪声、缺失值、错误等，保证数据质量。

2. 时空对齐和数据融合，利用地理信息系统和精确的时间戳，在时空维度上将分散在各个系统中关于路面性能、交通、环境等各方面的数据进行精准匹配，形成以路段桩号和时间索引、具有统一索引的综合数据库，为后续的关联分析和模型训练打下坚实的基础。

（二）数据挖掘与机器学习方法

大数据给路面寿命预测带来了前所未有的丰富信息，数据挖掘和机器学习就是从海量信息中提取知识、建立高精度预测模型的关键引擎。它们可以自动发现数据中复杂的非线性关系和变量之间的相互影响，并且可以克服传统统计模型需

要事先指定函数形式的局限性，从而使数据驱动模式从模型驱动模式中真正地得到实现。路面寿命预测领域中各种先进的机器学习算法有着广阔的应用前景，其特点和应用场景见下表。

机器学习算法在路面寿命预测中的应用特点

机器学习算法	适用场景 / 优势	典型应用
人工神经网络	擅长处理复杂非线性关系，泛化能力强，对大数据有良好学习能力	路面性能指标（如 IRI、病害率）预测、劣化趋势模拟
支持向量机	适用于小样本、高维度、非线性分类与回归问题，具有较好的理论基础	路面状况等级分类、短期性能预测、异常检测
随机森林	鲁棒性强，不易过拟合，可评估特征重要性，处理混合数据能力强	路面病害类型识别、寿命影响因素分析、多因素综合评估
梯度提升决策树 (GBDT/XGBoost)	预测精度高，处理混合数据能力强，在数据科学竞赛中屡获殊荣	综合路面性能预测、劣化趋势建模、决策支持系统

人工神经网络是应用最广的一种模型。它模仿生物神经系统的结构和功能，构造出多层神经网络，可以以很高的精度逼近任意复杂的非线性函数关系。将路面结构、交通、环境等作为输入，路面性能指标作为输出，神经网络通过对大量的历史数据进行“学习”，从而准确地找到各种因素对路面性能衰减的综合影响。

支持向量机是统计学习理论中一个非常强的算法，它对小样本、高维度、非线性问题具有很好的处理能力，不仅可以预测具体的性能指标，也可以判断路面状况等级。

集成学习方法，随机森林、梯度提升决策树等近几年来被广泛应用。随机森林通过生成大量的决策树，并综合这些决策树的预测结果来降低单个决策树过拟合的风险，模型的鲁棒性较强，可以给出各个输入特征的重要程度排序。梯度提升决策树以及它的变种（XGBoost 等）都是采用迭代的方式，每一轮迭代都集中于修正上一轮的预测误差，可以构建出非常强大的预测模型，在数据科学竞赛中屡获殊荣。这些模型可以处理数值型和类别型变量混合的数据，适用范围广。

（三）预测方法的建立与验证

可靠的大数据驱动的路面寿命预测方法是由数据处理、模型建立、性能评价、持续改进组成的复杂的系统工程。流程严密，目的是使模型具有科学性、准确性和工程实用性。

首先要确定预测任务是回归问题、分类问题还是生存分析问题。任务目标的

明确会直接影响到后面特征选择、模型选择以及评价指标的确定。紧跟其后就是数据准备和特征工程阶段。在数据整合的基础上，需要从大量的原始变量中选出与预测目标最相关的特征，用相关性分析、互信息、递归特征消除等方法选择，从而达到简化模型复杂度、提高训练效率、防止过拟合的目的。有时还要通过组合或者变换原始变量，得到新的、更具表征能力的特征。

模型训练和调优是核心。选择一个或者多个候选机器学习算法，用训练数据对它进行训练。为了找到最佳的模型配置，需要做超参数优化，即改变神经网络的层数、节点数或者随机森林中决策树的数量等。网格搜索、随机搜索或者贝叶斯优化属于超参数优化的常用技术，一般会 and 交叉验证联合起来使用，从而得到稳定可靠的最优参数组合。

模型性能评价和验证非常重要，是判断模型是否可靠的标准。回归任务常用来评价的指标有平均绝对误差、均方根误差和决定系数 (R^2) 等。均方根误差会将大的预测误差加大惩罚，决定系数 (R^2) 度量的是模型对数据变异性的解释能力。除了在独立测试集上进行一次性评价之外，更稳健的做法就是用 K 折交叉验证。该方法把数据集分成 K 个子集，轮流把其中一个子集作为测试集，其余 K-1 个子集作为训练集，循环 K 次，取 K 次评估结果的平均值来得到对模型泛化能力更加无偏的估计。对时间序列数据来说，使用时序交叉验证就显得尤为重要，因为其更符合真实世界的应用场景。

第四节 全寿命周期设计理念与实践

一、全寿命周期理念内涵

(一) 概念内涵与核心思想

高速公路水泥混凝土路面全寿命周期理念，是一种综合性管理哲学，把路面看作需要长期经营的战略资产。要求在路面的规划、设计、施工、运营养护到最终报废的全生命周期里，从经济性、安全性、耐久性和环保性四个方面进行统筹考虑，用最小的整体费用获得最大的道路使用价值。该理念打破了传统工程只看重工程本身的成本的局限，将目光放在了未来的几十年里道路的质量表现、所花费的持续性投入上，重视动态的、前瞻性的系统思维。

其主要思想就是追求价值最优、系统整合。价值最优并不是单纯地追求初始投资的最低化，而是要实现全生命周期成本的最小化。全寿命周期成本由设计建造成本、养护维修成本、路面维修造成的交通延误等使用者成本、最终的环境处置成本等组成。用科学的方法在初始投资与以后支出之间找到最佳的平衡点。系统整合就是打破各个阶段、各个部门之间的壁垒，把设计、施工、养护看成一个有机的整体，通过信息共享、协同工作，使所有的决策都有利于路面长期的效益。

（二）全寿命周期阶段划分

为了系统有效地开展全寿命周期管理，就必须对它的整个过程进行阶段性的划分。有利于针对各个阶段的特点和任务分项规划，从而制定出具体的目标、成本控制方法和技术方案，保证各个环节紧密衔接、相互配合，达到协同增效的目的，为路面长寿命目标的实现奠定良好基础。

高速公路水泥混凝土路面全寿命周期一般可以划分为四个相互联系、依次递进的关键阶段。这些阶段的概述见下表：

高速公路水泥混凝土路面全寿命周期阶段划分表

阶段名称	核心任务与影响
决策设计阶段	确定项目可行性、技术方案、结构及材料标准，奠定路面性能“先天基因”和大部分全寿命周期成本。
施工阶段	将设计蓝图转化为实体工程，通过原材料把控、拌合、摊铺、养生等环节，确保工程质量达标。
运营维护阶段	路面寿命最长且最不确定的阶段，通过巡查、检测、预防性养护、修复性养护等手段延长寿命。
废弃与处置阶段	路面达到寿命极限后，进行拆除、旧料再生利用及场地恢复，注重绿色化、可持续性。

从表中可以看出，决策设计阶段对整个路面全寿命周期的影响最大。项目可行性研究、环境影响评价、技术方案比选、结构及材料设计等都属于前期工作。本阶段做出的决策，即结构形式、材料标准、排水设计等，基本上就决定了路面性能的先天基因以及未来的养护需求量级，从而锁定了全生命周期总成本的大头。

施工阶段是把设计蓝图变为实体工程的重要环节，主要任务是实现设计意图，保证工程质量。它包括原材料采购及质量控制、混凝土拌合、摊铺、振捣、养生、竣工验收。施工质量的好坏决定着路面能否达到预期的使用寿命，任何施工缺陷都可能成为未来路面早期病害的诱因。

运营维护阶段是路面寿命最长的阶段，但又不确定性最大的阶段。它由日常巡查、路面性能检测、预防性养护、修复性养护和大中修等组成。经过科学养护可以减缓路面性能退化速度、延长路面使用寿命、保证行车安全、提高行车舒适度。

废弃和处置阶段在路面达到经济或者技术寿命极限的时候开始。它主要是路面拆除、旧料再生利用、场地恢复。现代全生命周期的理念非常重视本阶段绿色化与可持续性的发挥，提出最大限度的对废旧混凝土材料进行回收再利用，节约资源，减少污染。

（三）全寿命周期管理要求

全寿命周期管理要得以有效实施，对传统的工程管理提出了更高的要求，需要建立一个强大的支撑系统。核心就是建设跨阶段、跨部门的信息整合和协同工作平台，保证数据流通通畅、决策科学统一。管理过程不再是一个孤立的点状控制，而是一个贯穿始终的链式管理，所有的参与者都必须有长远的眼光和全局的意识。

数据化、信息化是全生命周期管理的技术基础。必须建立并保持路面性能数据库，对设计参数、施工质量数据、每年养护记录、交通量等详细记录。利用该数据库，通过路面管理系统可以建立准确的路面性能衰变预测模型，对不同的养护方案进行长期效果及经济性的量化分析，为决策提供依据。建筑信息模型技术（BIM 技术）可以将路面信息与时间、成本结合起来，给可视化管理提供方便。

组织保障和制度创新也不能缺少。全寿命周期管理要冲破部门壁垒，创建起可以协调设计、施工、养护等各方面利益的机制。财务上要创建起同长期养护规划相匹配的稳定资金投入机制，防止由于短期预算波动造成必要的预防性养护中断。推行以性能为依据的合同形式，把承包商的报酬同路面的长期性能联系起来，激励承包商在施工阶段更多地投入到路面的长久耐用性上，使全寿命周期理念转变为市场行为。

二、全寿命周期理念实践应用

（一）设计阶段的统筹考虑

设计阶段是决定路面“先天体质”的关键环节，践行全寿命周期理念最根本的地方也在于它。此阶段的决策对以后的建设成本、养护要求、使用性能起到决

定性的影响。设计工作应该跳出传统的模式,以路面长期性能和全寿命周期成本最小化为目标来进行前瞻性的设计。

材料的选择和结构的设计要经过深思熟虑、放眼长远。在选择原材料时,不能只看价格,还应该综合考虑耐久性、抗疲劳性和对某些环境的抵抗能力。高性能材料虽然会增加初始投资,但是耐久性提高可大幅度减少以后的维修费用。结构设计时要充分考虑远期交通量的增长,对板厚、接缝等重要构造做细致的设计,提高路面的抗病能力。

设计的统筹性还表现在对排水系统等有关系统的考虑上。水害是造成路面过早破坏的一个主要因素。一个好的排水系统能够大大提高路面的寿命。设计时,应把排水系统和路面结构作为一个整体来考虑,保证水分可以快速排出。同时设计方案还要考虑施工的可行性以及未来养护的方便性。

(二) 施工阶段的过程控制

施工阶段是实现长寿命设计意图、保证路面实体质量最根本的保证。即使设计方案再完美,施工过程中控制不严、存在质量缺陷,路面长期性能和预期寿命也无法达到。全寿命周期理念在施工阶段的运用,核心就是依靠细致化、标准化的过程控制,保证最终建成的路面实体与设计目标高度一致,给路面耐久性赋予坚实的物理基础,避免由于施工质量问题造成的先天不足,从而减少整个生命周期内的养护费用以及交通中断次数。

过程控制要渗透到施工的每一个环节中,形成一条完整的闭环质量控制链条。从原材料进场检验开始,必须对水泥的安定性、砂石骨料级配与洁净度、钢筋力学性能等进行严格检验,从源头上杜绝不合格材料。混凝土生产过程中对配合比进行严格的动态控制和实时调整,保证拌合物工作性、均匀性、稳定性。摊铺、振捣是保证路面板体最终密实度的重要工序,必须严格控制摊铺厚度、平整度、振捣频率、时间,防止出现空洞、离析。关键的养生环节一定要用科学的养生工艺,保证足够的养生时间和适宜的温湿度条件,使混凝土强度和耐久性得到充分发展。所有施工数据都应该被详细记录、数字化存档,成为路面的出生证明,为以后的养护管理提供原始依据。

(三) 运维阶段的科学管理

运营维护阶段是路面全寿命周期最长的阶段,也是长期投入资金、直接关系到使用者感受的阶段。全寿命周期理念下运维管理改变了以前被动维修的亡羊补

牢方式，转而采用根据路面性能监测和预测进行的主动、预防性的科学管理模式。其目的就是当路面性能明显下降之前就采取干预措施，以最小的成本保持路面良好的服务水平，有效延长路面使用寿命。

科学管理的实现依赖于一套完整的工作体系，它将监测、分析、决策和实施融为一体。

1. 系统监测和评价，用自动化路面检测设备对路面的平整度、破损程度、接缝传荷能力等主要性能指标做系统的数据采集。通过对数据的深入分析来客观评价路面的技术状况，发现潜在的病害。

2. 预测性分析，根据长期监测数据，结合交通量、环境因素等各方面的影响，建立路面性能衰变预测模型。此模型可以预测未来路面性能的变化趋势，使管理者可以预见养护需求，从而达到事前规划的目的。

3. 预防性养护，当路面还没有严重恶化的时候，应立即采取接缝填封、板底灌浆等成本较低的预防性养护措施。这些措施可以有效控制病害的发展，减缓结构性破坏的速度，投入产出比远远大于大修工程。

4. 优化决策：使用路面管理系统，从路况、可用资金、不同养护措施的效果及成本等各方面入手进行系统优化分析，得出最佳的养护计划，使养护资金得到最有效的利用。

第二篇 材料创新篇：性能提升与环境适应

第五章 高性能混凝土材料设计与制备

第一节 高强高耐久混凝土配合比设计原理

一、高强高耐久混凝土配合比原理

（一）原材料选择与要求

原材料品质是高性能混凝土性能的根基，任何一种材料的缺陷都会成为制约高性能混凝土最终性能的短板。因此原材料的选择必须建立在对原材料物理、化学性质有全面了解并严格控制质量的基础上。应选用低碱硅酸盐水泥或者普通硅酸盐水泥，其碱含量必须严格控制，防止有害的碱骨料反应。同时，水泥还应具有较好的安定性和较高的后期强度增长率。优质的Ⅰ级粉煤灰、硅灰、磨细矿渣粉等矿物掺合料是高性能混凝土不可缺少的组分。不仅可以改善混凝土的工作性，还可以通过火山灰效应、微集料填充效应改善孔结构、提高密实度、提高后期强度，并且可以大大增强对氯离子渗透、硫酸盐侵蚀等环境作用的抵抗能力。

骨料选择的重要性不亚于胶凝材料。粗骨料应选用质地坚硬、颗粒形状良好、级配合理的连续粒级碎石，严格控制针片状含量、含泥量、压碎指标，保证骨架的强度和稳定性。细骨料宜采用级配优良、质地洁净的中粗砂，细度模数、含泥量都应符合规范要求，以保证混凝土拌合物有良好的和易性及填充性能。化学外加剂，尤其是聚羧酸系高性能减水剂和引气剂，是解决高性能混凝土低水胶比和高工作性矛盾的有效方法。减水剂需要有较高的减水率和较好的坍落度保持性，引气剂应能在混凝土中产生大量小气泡、均匀、稳定、封闭的气泡，从而大幅度提高混凝土的抗冻融能力。

（二）配合比参数确定

高强高耐久混凝土配合比设计是一个不断试配、优化的过程，其主要参数

的确定要兼顾强度、耐久性、工作性、经济性等目标。水胶比是决定混凝土强度和耐久性的主要因素。在保证工作性的同时，应尽量降低水胶比，一般控制在0.30~0.40。低水胶比可以有效地减少硬化后水泥石中毛细孔的数量和孔径，是获得高致密性结构的基础。单位用水量会影响混凝土拌合物流动性和收缩性。使用高效减水剂能在较低的用水量下达到所需的工作性，可以有效地控制干缩裂缝、温度裂缝的产生。

胶凝材料总量的确定要平衡强度发展、水化热、收缩和成本。过多的胶凝材料用量会造成水化热集中，增大早期开裂的风险，同时也不经济。复合使用粉煤灰、硅灰等矿物掺合料，在保证或提高性能的同时可以适当减少水泥用量，优化胶凝材料体系。砂率大小对混凝土的和易性、粘聚性、泌水性都有影响。合适的砂率能使得粗骨料颗粒被砂浆充分包裹，减小颗粒间的摩擦和离析，使拌合物更容易泵送和摊铺。砂率的确定要根据骨料级配、形状、施工方法等因素，通过试配得到最佳的密实度与工作性。

外加剂掺量要通过试验确定。高性能减水剂掺量应以达到目标坍落度、扩展度所需要的最小掺量为准，还要考察其与所选水泥、掺合料的适应性，防止出现异常凝结、过度引气等问题。引气剂掺量要根据目标含气量调节，保证引入的气泡结构符合抗冻耐久性要求。这些参数之间互相影响、互相制约，所以要采用系统正交试验或者经验迭代的方法，结合拌合物性能和硬化后混凝土性能的全面测试，找到最优的配合比方案。

（三）混凝土性能要求

为保证高速公路路面长期使用性能，高性能混凝土要达到一系列严格的性能指标，这些指标从拌合物状态到硬化后结构的全过程都有涉及。既要求它有较高的极限承载能力，又要求它在各种环境因素的影响下表现出良好的稳定性，是实现长寿命目标的技术保障。高性能混凝土主要性能指标如下表所示。

高性能混凝土关键性能指标概览表

性能类别	具体指标	关键要求
工作性能	和易性（流动性、粘聚性、保水性）	良好
	坍落度	符合滑模摊铺工艺要求
力学性能	抗压强度	28 天达设计等级
	抗折强度	28 天达设计等级

续表

性能类别	具体指标	关键要求
耐久性能	抗疲劳性能	极强
	抗冻融性能	极强
	低渗透性	优异
	抗收缩性能	低干燥收缩、低自收缩
	耐磨性	良好

良好的工作性能是施工质量的前提。混凝土拌合物要具有良好的和易性，即流动性、粘聚性和保水性，以保证运输、摊铺、振捣时不出现离析、泌水。坍落度应在滑模摊铺工艺允许的范围内，具有较好的坍落度保持性，满足施工要求。力学性能是结构材料最基本的性能。

1. 抗压强度、抗折强度：28 天龄期强度达到设计等级，3 天、7 天的早期强度也应符合标准，有利于早期开放交通、缩短施工工期。还要注意 90 天及更长时间的强度发展，保证长期承载力的稳定性。

2. 抗疲劳性能：路面混凝土在长期受到车辆荷载反复作用的情况下，必须具有很强的抗疲劳性能，在承受数千万次甚至上亿次的应力循环作用下不能产生疲劳破坏。

耐久性能是长寿命路面的核心要求，直接关系到路面的使用寿命。

1. 抗冻融性：在有季节性冰冻的地区，混凝土需要具有很强的抗冻融性能。一般用动弹性模量损失、质量损失来衡量，冻融循环试验后性能衰减很小。

2. 低渗透性：包括抗氯离子渗透性和抗水渗透性。致密的内部结构可以阻止氯离子、水分、其它有害介质侵入，防止钢筋锈蚀、材料劣化。

3. 抗收缩性能：混凝土应具有低干燥收缩、低自收缩的特性，减少收缩应力，控制路面板早期、长期裂缝的产生。

4. 耐磨性，路面直接与车轮接触，所以需要有良好的耐磨性，能承受轮胎的长期磨耗，保证路面平整、抗滑。

二、高强高耐久混凝土制备工艺

（一）搅拌工艺控制要点

搅拌是保证混凝土各组分均匀混合的关键步骤，在低水胶比、高掺合料掺量的高性能混凝土中，搅拌的作用更加明显。搅拌质量的好坏直接关系到混凝土的

工作性、强度和耐久性。为了保证搅拌均匀性,推荐使用强制式搅拌机,尤其是行星式或双卧轴搅拌机,其强大的剪切、对流作用可以有效地分散胶凝材料颗粒及纤维,防止团聚。搅拌时间以及加料顺序属于工艺控制的主要内容。采用预拌砂浆法或者二次投料法等工艺,可以明显改善搅拌效果。先将水泥、掺合料、砂、部分水搅拌成均匀的砂浆,再投入粗骨料、剩余水搅拌,使胶凝材料浆体均匀地包裹在骨料表面,改善界面结构。

搅拌时间一定要严格控制,搅拌时间过短,则物料分散不均,混凝土的匀质性不好;搅拌时间过长,则会造成骨料过度磨损、坍落度损失过快或者产生假凝。最佳搅拌时间应通过试验确定,在生产中必须严格遵守,一般比普通混凝土的搅拌时间适当延长。搅拌时要实时观察搅拌机功率或者电流的变化,数值的稳定可以作为混凝土拌合物均匀性的辅助指标之一。掺入钢纤维的混凝土为防止纤维结团,应该用专用输送设备将纤维均匀地撒入已经初步拌匀的混凝土中,继续搅拌直到纤维完全分散。

(二) 浇筑工艺控制要点

混凝土浇筑是将合格拌合物最终成型为路面板的关键步骤,其主要目的就是保证混凝土在摊铺、振捣过程中均匀密实,不产生初始缺陷。高速公路路面一般采用大型滑模摊铺机连续作业,对混凝土的供应连续性、工作性稳定性要求很高。混凝土从搅拌站运到施工现场的时间要尽量短,并严格控制,防止长时间运输造成坍落度损失过大或者温度升高。卸料前需要再次短时搅拌混凝土,使混凝土恢复均匀性。

滑模摊铺时,布料装置应保证混凝土均匀、连续地分布在摊铺机前方,不能出现局部堆积。摊铺机行进速度要匀速、稳定,与混凝土供应能力、后方振捣、抹平能力相适应。速度忽快忽慢会造成路面板厚度不均、密实度不同。振捣是保证混凝土密实的重要工序,必须使用高频插入式振捣棒,合理布置振捣棒间距和插入深度,使振捣能量均匀作用在板厚范围内。振捣要快插慢拔,振捣棒周围混凝土不再冒泡、浮浆即可,严禁漏振、过振。过振会造成粗骨料下沉、浆体上浮,出现表面泌水、分层现象,对路面强度和耐久性造成严重影响。

(三) 养护工艺控制要点

养护是混凝土性能充分发展的重要最后一步,对高性能混凝土而言更是如此。俗语说,三分在拌,七分靠养。不恰当的养护会使精心设计的配合比、精确施工

的努力付之东流,造成表面开裂、强度不够、耐久性急剧下降。高性能混凝土由于水胶比较小、胶凝材料用量大,早期水化速度快、水化热高,内部易产生自干燥,因此对早期养护依赖性很强。养护的关键在于保湿保温,在混凝土强度发展的关键时期给它创造适宜的温湿度环境。

浇筑完毕并完成表面处理之后,必须立即开始养护,防止水分过快蒸发造成表面出现塑性收缩裂缝。最有效的方法就是立即喷洒质量好的成膜养护剂。养护剂要形成一层均匀、连续、致密的薄膜,把内部水分紧紧锁住。喷洒要分两次进行,纵横交错不留死角。喷洒养护剂后,尤其是日照强烈或者风速较大时,建议再用塑料薄膜覆盖或者覆盖湿润的土工布、麻袋等材料进行复合养护,以达到更好的保湿效果。湿养护状态应保持7天以上,对要求高的长寿命路面应保持14天。

温度控制是养护的又一关键因素。高性能混凝土的早期水化热大,散热过快,则板体内外温差过大,容易产生温度应力集中而开裂。因此,尤其在昼夜温差大的季节更要做好保温工作。用塑料薄膜或者保温被覆盖可减慢表面散热速度,减小内外温差。养护期间应严密观测混凝土内外的温度变化,使温差控制在可控范围之内。养护期结束之后,应逐渐撤掉覆盖物,防止环境发生突然变化而引起温度冲击。完善的养护工艺是保证混凝土微结构致密、减少早期缺陷、实现设计强度和耐久性的最后保证。

第二节 外加剂与掺合料的优化复配技术

一、混凝土外加剂种类与作用

(一) 高效减水剂的应用

高效减水剂,特别是聚羧酸系产品,它的作用机理是它所具有的特殊分子结构。它们依靠静电斥力和空间位阻效应来有效分散水泥颗粒,释放被团聚体包裹的水分,从而大大提高混凝土拌合物的流动性。在不需要增加用水量的前提下大幅度提高混凝土的坍落度;在工作性能不变的条件下大幅度减少单位用水量。这种强大的减水作用,给配制低水胶比、高强度、高耐久性混凝土打下了良好的基础。

在长寿命路面混凝土中使用高效减水剂,其主要目的就是得到一个致密、低

孔隙率的硬化水泥石基体。将水胶比控制在 0.35 以下,可以大幅度提高混凝土的抗压强度和抗折强度,这是抵抗行车荷载和环境应力的基本保证。水胶比降低后,混凝土内部毛细孔数量减少、孔径变小、连通性变差,渗透性降低。从而使得融雪盐中的氯离子、酸雨中的硫酸根离子等外部侵蚀性介质很难渗透到混凝土内部,减缓了钢筋锈蚀和材料劣化的过程,从根本上提高了路面的耐久性及其使用寿命。

(二) 引气剂的应用

引气剂是一种表面活性物质,它的主要作用就是在混凝土搅拌的过程中产生大量的稳定的、微小的、均匀的封闭气泡。气泡直径一般在几十到几百微米之间,互不连通,孤立存在于水泥石基体中。引气剂分子吸附在气泡表面形成一层薄膜,使气泡的稳定性增加,在搅拌、运输、振捣过程中不容易破裂消失。长寿命的路面混凝土对冻融耐久性要求很高,而合理地控制微气泡结构是达到这一目的的最有效的方法,其评价指标一般包括含气量、气泡间距系数、比表面积等。

引气剂提高路面混凝土抗冻耐久性的机理是:当混凝土中的毛细孔水结冰时,体积膨胀约 9%,会产生很大的结冰压力,反复的冻融循环会使混凝土结构疲劳破坏。引入的微小气泡硬化之后就相当于预设的“压力缓冲器”或者“膨胀空间”。结冰压力出现的时候,毛细孔中液态水可以很方便地流到相邻没有水的气泡里去,有效释放了压力,防止基体材料产生微裂纹。因此,混凝土可以承受数百次甚至更多的快速冻融循环而损伤很小,对于处在严寒、寒冷地区的公路路面来说,引气剂的使用是保证其长寿命服役的必要条件。微气泡具有滚珠效应,可以改善拌合物的和易性、粘聚性和保水性,减少泌水和离析现象,有利于施工。引入气泡会损失强度,因此必须把含气量控制在设计范围内(一般 4%~6%)才能在耐久性、强度之间取得最佳平衡。

(三) 其他功能外加剂的应用

为适应复杂的施工环境,满足长寿命路面混凝土各方面性能指标的要求,除高效减水剂、引气剂外,常需复配使用其它功能性外加剂,对混凝土性能进行精细化、多方面调节。外加剂针对性地解决某一类问题,是实现高性能化的重要补充。多种功能外加剂的共同作用就构成了现代路面混凝土的技术保证。

常见功能外加剂及其作用

外加剂类型	主要作用	适用场景	注意事项
缓凝剂	延缓水泥水化，延长凝结时间	高温施工、长距离运输	确保凝结时间控制在合理范围
早强剂	加快水泥早期水化，提高早期强度	低温施工、快速通车要求	需与水泥类型匹配，避免过快凝结
膨胀剂	补偿混凝土收缩，减少开裂风险	配制补偿收缩混凝土，提高抗裂性	膨胀量需精确控制，避免过大膨胀
阻锈剂	抑制钢筋腐蚀，延长结构寿命	钢筋混凝土路面、海洋或融雪剂区域	需与钢筋和环境相适应

如上表所示，不同外加剂发挥着特定功能：

- 1. 缓凝剂主要用于高温季节施工或者长距离运输的混凝土。它能够延缓水泥的水化反应，尤其是铝酸三钙的初期水化，从而延长混凝土的凝结时间，保证浇筑、整平工作有足够的时间完成，防止冷缝的产生，保证路面面板的整体性。
- 2. 早强剂适合于低温施工或者需要马上开放交通的路面修复工程。可以加快水泥早期水化，使混凝土在较短时间内达到规定强度，缩短养护周期和工期。
- 3. 膨胀剂：配制补偿收缩混凝土。在水泥水化过程中形成钙矾石或者氢氧化钙晶体，产生微膨胀来补偿混凝土硬化过程中产生的化学收缩和干燥收缩，有效地降低收缩应力，大大减少路面早期开裂的风险，提高结构的抗裂性及整体水密性。
- 4. 阻锈剂对于使用钢筋的连续配筋混凝土路面，或者处于沿海、融雪剂撒布区域的路面，掺加阻锈剂可以抑制氯离子对钢筋的腐蚀。它可以在钢筋表面形成钝化膜或者改变孔溶液环境，提高钢筋的抗腐蚀性，保证结构安全，延长使用寿命。

二、混凝土掺合料优化复配技术

（一）粉煤灰应用技术

粉煤灰是燃煤电厂排放的一种工业副产品，经过收集、处理后成为一种优质的混凝土掺合料。其颗粒多为玻璃质球体，该形态效应（也称滚珠效应）可以明显改善新拌混凝土的工作性。微小球珠在水泥颗粒与骨料间起润滑作用，减小颗粒间的摩擦阻力，使混凝土在水胶比相同时有更好的流动性、泵送性、可塑性，减少泌水、离析的趋势，有利于获得表面均匀、密实的路面。

粉煤灰对混凝土长期性能的贡献主要是火山灰反应。粉煤灰本身不具有或只有微弱的水硬性,在有水的条件下,它会和水泥水化生成的氢氧化钙发生二次反应,生成更多的水化硅酸钙凝胶。新生成的凝胶填充到水泥石的孔隙里,尤其是填充到骨料和水泥石浆体之间的界面过渡区,使混凝土的微观结构更加致密,孔径分布更加合理。该过程不仅可以持续提高混凝土的后期强度,而且可以大大降低混凝土的渗透性。同时消耗碱性氢氧化钙,能抑制有害的碱骨料反应的发生,提高混凝土抵抗硫酸盐侵蚀的能力。

（二）矿渣粉应用技术

矿渣粉又叫磨细高炉矿渣粉,是将炼铁过程中产生的副产品高炉矿渣经过淬冷、干燥、粉磨等工序制成的具有潜在水硬活性的材料。主要化学成分和硅酸盐水泥熟料相同,含有较多的氧化钙、二氧化硅、氧化铝。矿渣粉在混凝土中代替部分水泥作为胶凝材料,其水化反应需要水泥水化产生的氢氧化钙等碱性物质来激发。矿渣粉被激发之后,就会持续发生水化反应,生成与水泥水化产物相同的C-S-H凝胶,给混凝土的长期性能发展提供动力。

矿渣粉可以明显提高路面混凝土的耐久性,对抵抗氯离子渗透和抗化学侵蚀有较好的效果。矿渣粉水化时会消耗氢氧化钙形成致密凝胶,可以很好地细化堵塞混凝土毛细孔道,使孔隙率、连通性降低,形成物理屏障有效地阻止外部氯离子等有害介质的进入。对于使用融雪剂的北方地区和沿海地区的高速公路,其防腐效果更好。矿渣粉掺入可明显提高混凝土抵抗硫酸盐侵蚀的能力,同时也可以抑制碱骨料反应。由于矿渣粉的水化放热速率比水泥平缓,掺入矿渣粉可以降低混凝土的水化热,减小大体积混凝土或者高温环境下路面板的内外温差,从而降低温度裂缝产生的风险。长寿命路面设计时,矿渣粉掺量根据耐久性要求可以在20%~50%甚至更高范围内选择,与粉煤灰等其他掺合料复配可实现性能互补,获得最佳的技术经济效益。

（三）硅灰应用技术

硅灰又称微硅粉,在工业硅或者铁合金的生产过程中产生,主要成分为无定形的二氧化硅。硅灰有三个显著特点,颗粒非常细小,平均粒径比水泥颗粒小两个数量级;比表面积大;二氧化硅含量高,火山灰活性强。这三大特点使其成为改善混凝土性能最好的掺合料之一。硅灰在长寿命路面混凝土中的应用主要是对那些对抗压强度、耐磨性、抗冲刷性、抗渗透性要求极高的表层结构或者特殊路段。

硅灰在混凝土中起到双重作用。首先是微填充作用，超细颗粒可以填充到水泥颗粒之间的空隙中，形成最密实的堆积结构，大大减少新拌混凝土的泌水、离析。其次就是强大的火山灰效应，硅灰可以迅速与水泥水化所产生出的氢氧化钙发生反应，形成大量的高强度 C-S-H 凝胶。不但消耗了强度低、化学稳定性差的氢氧化钙晶体，而且生成的凝胶大大提高了骨料和水泥浆体之间界面过渡区的强度（普通混凝土中相对薄弱的部位）。经过硅灰改良后，混凝土的微观结构变得异常致密、均匀，抗压强度、抗折强度、耐磨性、抗渗透性都得到了革命性的提高。掺加硅灰的混凝土抗氯离子渗透能力比普通混凝土高出几倍到几十倍。因为硅灰比表面积很大，会增加用水量，所以需要和高效减水剂配合使用，掺量为水泥质量的 5% 到 10%。

第三节 纤维增强混凝土抗裂与增韧机理

一、常用纤维种类与特性

根据材料来源及物理化学性质的不同，工程中常用的纤维有钢纤维、合成纤维和植物纤维等。它们在弹性模量、抗拉强度、与水泥基体的相容性等各方面都存在差异，这些差异直接决定了它们在混凝土中起到的作用以及最终的增强效果。

常见纤维种类、特性与应用一览表

纤维种类	典型弹性模量	典型抗拉强度	与水泥基体相容性	主要作用	常见应用
钢纤维	200	> 1000	良好	提高硬化混凝土力学性能、抗裂、增韧	高速公路路面、桥面铺装、重载区域
聚丙烯纤维	2-5	300-700	良好	抑制塑性收缩开裂、提高早期抗裂能力	混凝土面层、抗渗结构
聚乙烯醇纤维	20-30	800-1500	优异（亲水性）	提高硬化混凝土抗拉强度、韧性	高性能混凝土、抗震结构
聚丙烯腈纤维	10-18	400-800	良好	增强耐候性、抗紫外线性能	苛刻环境下的混凝土结构
植物纤维（未经改性）	5-20	100-800	较差（亲水、易降解）	提供一定增强作用（需改性）	探索阶段、非结构性应用

从上表中可以看出,不同纤维种类具有其独特的性能优势和适用场景。

(一) 钢纤维特性与应用

钢纤维是目前应用最广、技术最成熟的一种高性能纤维。抗拉强度、弹性模量均较高,抗拉强度一般能达到 1000 兆帕以上,弹性模量与高强混凝土相近。由于它优越的力学性能,钢纤维可以同混凝土基体产生良好的应力协同效应。为了提高纤维和水泥石之间的机械咬合力以及锚固性能,钢纤维表面一般会进行处理,或者加工成波浪形、弯钩形、压棱形等异形,使纤维在混凝土开裂后不容易被轻易拔出,从而持续发挥桥接作用。

钢纤维在混凝土中无序分布,形成三维乱向的支撑体系。当混凝土受到荷载作用,尤其是拉伸、弯曲荷载的时候,钢纤维能很好地承担并传递拉应力,防止内部微裂缝的产生和发展。一旦出现宏观裂缝,横跨裂缝的钢纤维就会立即承担起大部分荷载,抑制裂缝的迅速失稳扩展,把混凝土的脆性破坏模式转变为具有一定延性的破坏模式。因此钢纤维混凝土具有较好的抗弯、抗剪、抗疲劳、抗冲击性能。

由于钢纤维混凝土的增强增韧作用十分明显,在高速公路路面工程中具有非常重大的应用价值。它被广泛地用在对抗磨耗、抗冲击、抗疲劳要求极高的地方,如收费站广场、长大纵坡路段、隧道进出口、重载车辆通道等。使用钢纤维混凝土在桥面铺装层、路面接缝传力杆处和旧路面上罩面修复工程,能有效提高结构使用寿命,降低养护次数,得到非常大的经济效益和社会效益。

(二) 合成纤维特性与应用

合成纤维是以高分子聚合物为原料制成的一类纤维,种类繁多,性质各异。在路面工程中常用的合成纤维有聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维、聚丙烯腈纤维等。与钢纤维相比,合成纤维密度小、化学性质稳定、耐酸碱腐蚀能力强,在混凝土中更容易均匀分散,而且不会生锈。

聚丙烯纤维是合成纤维中应用最广的一种,主要用作抑制混凝土在塑性阶段收缩开裂。由于聚丙烯纤维的弹性模量较低,因此它在提高硬化混凝土的力学性能方面作用不大。但混凝土加水搅拌之后,由于聚丙烯纤维数量上的优势,迅速形成一个三维乱向的支撑网络。水分蒸发的时候,该网络可以有效地抵抗由于失水过快而产生的塑性收缩应力,大幅度地减少早期表面龟裂现象的发生。

聚乙烯醇纤维和聚丙烯腈纤维属于性能更好的合成纤维。聚乙烯醇纤维的弹

性模量高,亲水性较强,表面基团可以和水水泥水化产物发生化学键合。因此,它除了可以抑制塑性开裂外,还可以提高硬化混凝土的抗拉强度和韧性。聚丙烯腈纤维由于具有良好的耐候性以及抗紫外线性能,常被用在受环境影响较大的混凝土结构中。

合成纤维,尤其是聚丙烯纤维,由于其良好的抗裂性以及经济性,在高速公路水泥路面中主要用作面层混凝土,从而提高路面的早期抗裂能力以及表面完整性。可以大大提高混凝土的抗渗性、抗冻融性,对提高路面的耐久性有积极的作用。在喷射混凝土、薄层修补、预制构件中,合成纤维也发挥着重要的作用,有助于提高构件的质量和可靠性。

(三) 植物纤维特性与应用

植物纤维是从自然界中提取的可再生的绿色纤维材料,有剑麻、黄麻、竹纤维、椰壳纤维等。该类纤维最突出的优点就是资源丰富、成本低、密度小、环保,符合可持续发展的工程理念。从力学角度看,植物纤维本身有一定的抗拉强度,能给混凝土基体带来一定的增强作用。

植物纤维的应用存在一些固有的困难。其主要成分为纤维素、半纤维素、木质素,因此具有很强的吸水性,在搅拌过程中会吸收大量拌合水,影响混凝土的工作性能。更重要的是,植物纤维在水泥高碱性环境中很容易被降解和腐蚀,使它长期的增强作用减弱,影响结构耐久性。因此在使用植物纤维前一般需要对其进行改性处理,比如碱处理、乙酰化处理或者和憎水性聚合物复合,以提高植物纤维的化学稳定性和与水泥基体的相容性。

目前,植物纤维在高速公路等高等级路面结构中的运用还处在研究阶段,大规模工程应用很少。其研究方向主要是解决耐久性差的问题,采用有效的预处理技术,常和钢纤维或合成纤维等混杂使用,以达到性能互补的目的。在一些非结构性的或者耐久性要求不高的情况下,经适当处理的植物纤维增强混凝土有应用前景,有望成为未来绿色建筑材料的重要组成部分。

二、纤维增强混凝土作用机理

(一) 纤维的抗裂机理

纤维在混凝土中起到的抗裂作用是复杂的,它并不是完全阻止裂缝的产生,而是主要抑制裂缝的扩展和贯通。当混凝土基体由于收缩或者荷载作用产生拉应

力,当拉应力达到混凝土抗拉强度极限时,微裂缝就产生了。这时,乱向分布于基体中大量的纤维起着关键的控制作用。

其具体机理可以概括为以下几点:

1. 裂缝桥接作用,当微裂缝试图张开的时候,就会遇到横跨裂缝的纤维。这些纤维就如无数的小桥,通过自身的拉应力来连接已经分离的基体,从而给裂缝继续扩大的闭合应力提供一个阻止的应力。这就要求纤维具有足够的强度,和基体之间要有足够的粘结力。

2. 应力传递和重新分布,裂缝尖端是应力高度集中的地方,也是裂缝扩展的驱动力。纤维的桥接作用把裂缝尖端集中起来的应力,有效地传给了裂缝周围更广阔的基体区域,从而实现应力的重新分布。从而降低了裂缝尖端的应力强度因子,使得裂缝不能达到驱动裂缝失稳扩展的临界值。

3. 能量吸收机制:混凝土开裂是释放能量的过程。纤维的存在为能量耗散机制增添了新的形式。裂缝扩展要克服纤维与基体之间的粘结力,还要使纤维产生弹性变形甚至断裂。纤维变形、滑移、拔出等过程都会消耗大量的能量,使材料的断裂能大大增加,从而提高材料抵抗开裂的能力。

(二) 纤维的增韧机理

增韧是纤维增强混凝土最核心的性能改善之一,也是材料由脆性向延性转变的根本。普通混凝土达到抗拉或者抗弯强度峰值之后,就会很快开裂并丧失承载能力,表现出典型的脆性破坏特征。纤维的加入彻底改变了这一过程,使混凝土在开裂之后仍然可以继续承受相当大的荷载,并产生较大的变形,这种特性就称为韧性。

增韧机理的关键就是裂后性能的保证。混凝土基体开裂以后,荷载并没有全部卸除掉,而是通过桥接纤维继续传递给裂缝面。纤维此时成为主要的承力构件,承担全部的拉力。随着裂缝宽度的增大,纤维在基体中就会发生滑移,并且逐渐被拔出。纤维的拔出过程就是增韧效应的主要能量来源。

纤维拔出时有复杂的力学行为。纤维和基体之间化学粘结力被破坏之后,拔出时,纤维表面与周围水泥石之间会产生摩擦力。异形纤维(弯钩钢纤维等)由于末端有机械锚固作用,拔出时消耗的能量更多;基体在锚固点附近会受到挤压产生微小的破碎,拔出过程中纤维自身也会产生明显的塑性变形。断裂能被有效地转化成了摩擦耗能和纤维变形能,所以材料具有了良好的韧性。

（三）纤维对耐久性的提升

纤维对混凝土耐久性提升的作用，是纤维力学性能改善的自然延伸和重要补充，提升是综合性的，表现在抗渗性、抗冻融性、耐磨耗、抗冲击等各个方面。纤维在混凝土内部形成三维乱向的网状结构，从微观上改变材料的孔隙构造，从宏观上提高材料抵抗外部环境侵蚀和物理破坏的能力。

掺入纤维，特别是微纤维，可以大大降低混凝土的渗透性。它们可以在基体里隔断、分割毛细孔道，使水分、氯离子、硫酸根离子等有害介质的渗透路径更加曲折复杂。迷宫效应可以有效地减小内部钢筋锈蚀的速度，也可以减小混凝土本身的化学侵蚀程度，对高速公路路面处于复杂环境中的路段，如融雪剂撒布区、沿海地区等，其作用更加明显。

第四节 钢筋网片与传力杆系统性能研究

一、钢筋网片性能与应用

（一）钢筋网片力学性能

钢筋网片的力学性能是它发挥作用的根本，主要表现为抗拉强度、屈服强度和良好的延伸率。混凝土是抗压强度高、抗拉强度低的脆性材料，在硬化过程中及环境温湿度变化时会产生收缩、翘曲变形，从而产生板内很大的拉应力。当拉应力大于混凝土自身的抗拉强度时，就会产生裂缝。布置于板内的钢筋网片能承受这些拉应力，在混凝土的粘结作用下，将大裂缝分散成多条细小裂缝，裂缝宽度控制在一定范围内，防止水、腐蚀性物质渗透进来，保证板的完整性。

钢筋网片对于承受行车荷载起着非常重要的作用。当车辆荷载作用在路面板上的时候，会在板底处产生拉应力，而在板中和接缝边缘等应力集中区域拉应力更大。钢筋网片的存在可以大幅度提高板体的抗弯承载能力以及抗疲劳性能。它可以很均匀的将局部荷载分散到周围混凝土里，从而大大减小了板底的峰值拉应力，延缓疲劳裂纹的产生和扩展。对于长寿命路面来说，在其设计寿命内要承受数亿次的荷载重复作用，所以钢筋网片与混凝土形成的复合结构必须具有良好的抗疲劳耐久性，在长期循环荷载作用下不能发生粘结失效或者钢筋疲劳断裂。

（二）钢筋网片耐腐蚀性能

高速公路路面在自然环境中不可避免地会受到雨水、化学物质，尤其是冬季除冰盐的侵蚀，因此对钢筋网片的耐腐蚀性能提出了非常严格的要求。钢筋腐蚀属于导致钢筋混凝土结构过早破坏的主要原因。当氯离子等侵蚀性介质渗透到混凝土内部，到达钢筋表面的时候，就会破坏钢筋表面的钝化膜，引起电化学反应。腐蚀产物（铁锈）的体积远远大于反应物，它所造成的膨胀力会使混凝土保护层开裂、剥落，钢筋截面变小，失去受力能力，严重危及道路结构的安全和使用寿命。

为保证长寿命路面中钢筋网片的耐久性，必须做好防腐工作。这些方法大体可以分为两大类，一是对普通碳素钢筋表面进行涂覆保护层；二是采用本身耐腐蚀性能较好的特种钢筋。常见的钢筋防腐方法及特点见下表。

钢筋防腐措施特点对比表

防腐策略 / 材料	主要特点	优点	缺点	适用场景
普通碳素钢	基础钢材	成本低廉	耐腐蚀性差，易锈蚀	对腐蚀要求不高或干燥环境
环氧树脂涂层	表面有机薄膜	有效隔离腐蚀介质	涂层完整性要求高，易破损	需严格控制施工质量的情况
热浸镀锌	锌层物理 / 电化学保护	物理隔离兼牺牲阳极保护	锌层可能受损，保护期有限	一般腐蚀环境，非极端盐害区
不锈钢	含铬镍合金	极佳耐氯离子腐蚀能力	初始成本高	严酷腐蚀环境，长寿命设计
纤维增强复合材料	轻质高强，完全不锈	无腐蚀问题，电绝缘	成本相对高，力学性能与钢不同	对腐蚀要求极高，特殊工程

1. 表面涂层技术是一种重要的防腐手段，目前使用较多。环氧树脂涂层钢筋就是在钢筋表面涂上了一层致密的有机薄膜，把钢筋和外界的腐蚀环境隔离开来。涂层防腐效果在很大程度上取决于涂层完整性，施工中任何磕碰、划伤都会成为腐蚀的突破口。热浸镀锌是一种常用的涂层方法，锌层可以提供物理隔离也可以提供牺牲阳极的电化学保护。涂层破损很小，锌也会优先腐蚀，保护内部钢筋。

2. 采用高性能耐腐蚀钢筋是最彻底的解决办法。由于不锈钢钢筋含铬、镍较多，所以有较好的抗氯离子腐蚀能力，是最适合严酷腐蚀环境的材料之一。虽然初始成本较高，但是从全生命周期成本的角度来看，由于其具有良好的耐久性，所以后期的维修养护费用可以大大降低。近些年来，由于玻璃纤维筋和玄武岩纤

维筋轻质、高强、不锈的特性越来越被重视，给长寿命路面提供了一个全新的材料选择。

（三）钢筋网片连接性能

钢筋网片在路面中一般是大面积铺设。单片网的尺寸受到生产和运输的限制，现场必须要有效的连接起来，才能构成一个能够协同工作、增强作用的体系。钢筋网片连接性能的好坏，直接影响力在各个网片间能否顺利传递，也是实现配筋设计意图的重要一环。连接不严密会使应力不能传递，造成结构弱点，使局部应力增大、控制不良，从而降低钢筋网片整体增强的作用。

最常用的连接方式是搭接，两片钢筋网在连接处互相重叠一段长度。搭接长度是保证连接有效的关键参数，搭接长度的取值要根据钢筋直径、强度等级、混凝土强度、钢筋表面形态（光圆或带肋）等因素，按照有关设计规范计算确定。足够的搭接长度能够使应力通过周围混凝土的粘结、剪切作用，把一根钢筋的应力平稳有效地传递到另一根钢筋上。搭接长度不够，在高应力下钢筋就会产生相对滑动，造成连接失效。搭接区域施工质量也不能忽视，钢筋间距、保护层厚度、混凝土密实度都要严格保证，不能出现孔洞、离析现象。

二、传力杆系统性能与应用

（一）传力杆传荷效率

传力杆系统的主要性能指标就是传荷效率，一般用非承载板的挠度与承载板挠度的比值来表示，以百分数表示。理想状态下，当传荷效率达到百分之百的时候，荷载就会由两块相邻板平分。传荷效率较高的时候，单块板在接缝边缘的荷载应力、挠度都会明显下降，接缝处的结构性破坏，如唧泥、剥落、板角断裂等，可以得到缓解。长寿命路面设计时，一般需要接缝系统在设计使用寿命内始终具有比较高的传荷能力。

传力杆的传荷机理实际上是杆体在混凝土中受剪切和弯曲作用。当车轮荷载作用在接缝一侧的承载板上时，该板端向下弯曲变形，通过嵌入混凝土中的传力杆把一部分剪力传递给相邻的非承载板，使其共同变形。传力杆本身的刚度、传力杆与混凝土之间的相互作用、接缝的张开宽度等因素一起参与了传荷过程。

影响传力杆传荷效率的因素很多，且互相联系。传力杆自身的物理性质有直径、长度、材料弹性模量等。传力杆直径越大，其抗剪、抗弯刚度就越高，传递

的荷载量越大,传荷效率也就越高。传力杆间距越小,轮迹带下面布置的传力杆数量越多,整体荷载传递能力就越强。

传力杆与周围混凝土之间相互作用的状态,决定传荷效率的好坏。传力杆一端固定于混凝土中,另一端涂有润滑剂并加装套管,使板体可以自由伸缩。传力杆周围的混凝土如果密实度不够或者长期荷载作用下出现压碎、松动,就会产生所谓孔洞效应或者椭圆形孔洞,使得传力杆在传递荷载前产生一段无效位移,造成传荷效率急剧下降。因此,保证传力杆周围混凝土的支撑刚度和密实度,对保证长期高效的荷载传递十分重要。

(二) 传力杆耐久性

传力杆系统耐久性能的好坏,直接影响路面接缝在设计寿命内能否一直发挥其作用。传力杆所处的工作环境恶劣,接缝是水分、除冰盐最容易侵入的通道,腐蚀是影响传力杆耐久性的主要因素。传力杆一旦发生严重腐蚀,就会产生两种主要的破坏模式,一是腐蚀产物使传力杆与周围混凝土锈蚀粘结,限制了板体的正常热胀冷缩,使板内产生很高的约束应力,造成板体非预期的横向开裂,二是腐蚀使传力杆有效承载截面积减小,承载能力降低,最终由于不能有效地传递荷载而发生剪切断裂。

为有效应对腐蚀挑战,长寿命路面设计对传力杆材料的选择提出了更高要求。

1. 传统的普通光圆钢棒成本低,但是耐腐蚀性差,在含有除冰盐的环境中,一般几年就会生锈。

2. 防腐涂层是提高传力杆耐久性常用的技术。环氧树脂涂层传力杆可以有效地减缓腐蚀,但是涂层的完整性非常重要,在运输、安装的过程中哪怕一点点的损伤都会成为腐蚀的起点。

3. 耐腐蚀合金钢(不锈钢传力杆等)的使用是实现长效耐久的好方法。不锈钢材料本身就具有很强的抗氯离子侵蚀能力,从根本上解决了腐蚀问题,保证传力杆在设计寿命内功能的稳定,特别适合于可靠性要求高或者环境恶劣的工程。一些新型复合材料传力杆,比如玻璃纤维增强复合材料传力杆,由于具有完全不锈钢、轻质高强等特点,也具有广阔的应用前景。

(三) 传力杆施工适应性

传力杆系统设计性能的好坏很大程度上取决于施工质量,尤其是杆体安置的精度。施工适应性不单是安装是否方便,更是指在实际施工条件下将传力杆准确

地布置到设计位置的能力。传力杆的对中、对直和平行是三个最重要的几何控制指标，任何偏差都会给路面性能造成严重的不利影响。

传力杆施工偏差主要是竖向偏转、水平偏转和整体移位。如果传力杆竖直或者水平倾斜，混凝土板热胀冷缩时，倾斜的杆体会对板的自由移动产生约束，如同锁住了板体，在板的端部附近会产生巨大的拉、压应力，造成板体不规则开裂。由于施工偏差造成接缝锁定，属于早期路面破坏的常见原因之一。传力杆群整体偏离设计竖向位置也会使传荷效率下降。

为了保证传力杆安装精度，现代化施工工艺就显得尤为重要。传统的做法是用传力杆支架（俗称传力杆篮）把传力杆固定成组，摊铺机经过时再将其植入混凝土中。由于支架稳定和安装准确度的限制，该种方式精度受制于支架的稳定性和安装的准确性。近些年来，由于滑模摊铺技术的普及，自动传力杆植入机的应用也越来越广泛。自动传力杆植入机与滑模摊铺机摊铺混凝土同步进行，用液压振动把传力杆准确插入新浇筑混凝土的指定位置，大大提高安装精度、施工效率，是实现长寿命路面高质量施工的重要设备。不论采用何种安装方式，必须严格控制施工过程的质量，抽检传力杆的位置、间距、方向，保证传力杆的布置符合设计规范的要求。

第六章 严酷环境下的材料适应性设计

第一节 沿海地区抗盐蚀混凝土技术

一、沿海地区混凝土盐蚀破坏机理

（一）氯离子侵蚀机理

氯离子侵蚀造成沿海地区混凝土结构耐久性失效。大气或者海水中的氯离子通过渗透、毛细吸附、扩散等途径进入混凝土内部。干燥环境下，混凝土表面的微裂缝、毛细孔隙会因为毛细作用很快吸收含盐溶液。持续的干湿交替作用，氯离子由表及里不断向混凝土内部富集。

侵入混凝土内部的氯离子和水泥水化产物发生化学反应，生成氯铝酸钙水合物。这部分氯离子叫结合氯离子。另外一部分以自由离子的形式存在于孔隙溶液中，这些自由氯离子是引起钢筋锈蚀的主要因素。当钢筋表面自由氯离子浓度达到临界值的时候，即使混凝土仍处于较高的碱性环境中，钢筋表面的钝化膜也会被局部破坏，从而引起钢筋的电化学腐蚀。

混凝土的孔隙结构、裂缝状况、外界环境的温湿度变化都会对氯离子侵蚀速度产生很大影响。孔隙率越高、连通性越好，氯离子的扩散系数越大，侵蚀速度也越快。温度升高时，离子布朗运动加快，因此氯离子的扩散也会加快，使夏季以及热带地区盐蚀破坏更加严重。

（二）混凝土碳化作用

混凝土碳化是指大气中的二氧化碳与水泥石中的氢氧化钙、其它碱性水化产物发生化学反应生成碳酸钙和水。该反应会使混凝土孔隙溶液的 pH 值明显降低，由原来的 12.5 以上降到 9.0 左右。在没有氯离子的侵蚀下，高碱性的环境能够使钢筋产生一层致密的、稳定的钝化膜，从而达到防止钢筋腐蚀的效果。

当碳化深度达到钢筋表面时，原来的高碱性环境被破坏，钢筋表面的钝化膜溶解失效，钢筋直接暴露在富含氧气和水的腐蚀性环境中，容易发生锈蚀。沿海地区碳化作用和氯离子侵蚀常常一起出现，二者有协同破坏作用。碳化过程中会

释放出原本被固化在里面的氯离子,使孔隙液中自由氯离子的浓度增大,降低诱发钢筋锈蚀的临界氯离子浓度阈值,加快了锈蚀的进程。

(三) 钢筋锈蚀破坏过程

钢筋锈蚀属于一种典型的电化学反应。钝化膜被氯离子或者碳化作用破坏后,钢筋表面就会形成腐蚀微电池。局部钢筋表面是阳极区,铁在此失去电子被氧化,钝化膜完好的地方是阴极区,氧气在此得到电子被还原。混凝土的孔隙水就成为阴阳两极间的电解质溶液,形成完整的腐蚀回路。

钢筋锈蚀的产物主要是疏松多孔的氧化铁、氢氧化铁,体积可比原来钢材膨胀 2 到 6 倍。体积膨胀会对周围混凝土产生巨大的挤压力,当膨胀应力大于混凝土的抗拉强度时,就会造成混凝土保护层沿钢筋方向开裂。随着锈蚀不断发展,裂缝就会越来越大,越来越长,最后造成混凝土保护层顺筋开裂、起皮,大面积剥落,严重削弱路面板的有效截面和承载能力。一旦出现就会形成恶性循环,裂缝给氧气、水、氯离子等有害物质更多的入侵通道,加速钢筋锈蚀,造成结构功能失效。

二、沿海地区混凝土抗盐蚀技术措施

(一) 原材料选择技术

原材料为混凝土耐久性提供物质基础,选择高性能、高抗渗性的材料是形成抗盐蚀防线最基本的措施。

1. 水泥的选择十分重要,应采用氯离子渗透性小、抗硫酸盐侵蚀性能好的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。严格控制水泥中 C3A 的含量,高 C3A 含量的水泥早期强度高,但是容易与氯离子反应生成弗氏盐,后期因盐类结晶膨胀压力导致混凝土开裂,其水化产物结构也比较疏松。同时应选用低碱水泥来抑制碱骨料反应。

2. 掺加优质矿物掺合料是提高混凝土抗盐蚀性能最经济有效的方法之一。常用的掺合料有粉煤灰、磨细矿渣粉、硅灰。矿物掺合料具体特性及对抗盐蚀的益处见下表。

常见矿物掺合料特性与抗盐蚀益处表

矿物掺合料	主要作用机制	对抗盐蚀的益处
粉煤灰	火山灰效应（二次水化），填充效应	降低孔隙率，细化孔结构，提高密实度与抗渗性；改善后期强度
磨细矿渣粉	火山灰效应（二次水化），填充效应，固化氯离子	显著降低渗透性，提高密实度，固化自由氯离子，改善后期强度
硅灰	极细颗粒填充效应，高火山灰活性	大幅提高密实度、早期强度，显著提升抗氯离子渗透能力

粉煤灰、矿渣二次水化作用能消耗水泥水化时产生的氢氧化钙，生成更多的C-S-H凝胶，使混凝土孔隙结构更加紧密，渗透性显著降低。硅灰颗粒极细，有明显的填充效应和高火山灰活性，能大幅度提高混凝土的密实度和早期强度，抗氯离子渗透能力提升效果尤为明显。

3. 骨料应选用质地坚硬、级配良好、杂质少、氯离子含量极低的河砂和碎石。严禁使用未经处理的海砂，必须经过淡水冲洗，氯离子含量达到规范要求之后才可使用。

（二）配合比优化技术

配合比设计是实现混凝土高性能化的重要环节，它的目的在于得到和易性良好、强度满足要求、内部结构高度密实、渗透性极低的混凝土体系。降低水胶比是提高混凝土密实度、抗渗性的根本方法。水胶比较小就意味着水化时自由水含量少，硬化后毛细孔隙数量和大小都会减少，从而大大阻碍氯离子的运输途径。在沿海恶劣的环境当中，路面混凝土水胶比应控制在 0.40 以下。

为了在低水胶比下保证混凝土有足够流动性、可泵性，则必须使用高性能减水剂。高性能减水剂凭借良好的分散作用使水泥颗粒均匀地悬浮在拌合水中，在保持用水量不变的情况下大大提高混凝土的施工和易性，避免施工中随意加水给质量带来的隐患。合理的砂率对于混凝土的粘聚性、密实性起着非常重要的作用。砂率过低容易造成混凝土泌水离析，砂率过高会增加用水量和收缩，需要通过试验确定最佳砂率。

保证足够的胶凝材料用量也不可缺少。充足的胶凝材料可以保证强度，也是填充骨料空隙、形成致密基体的基础。矿物掺合料的掺量也需要做优化设计，一般使用双掺或三掺技术，用不同的掺合料在不同的龄期发挥各自的优势，从而达到最好的长期耐久性能。矿渣能有效地固化氯离子，粉煤灰改善后期孔结构的效果更明显。

（三）表面防护措施

在优化混凝土本体的基础上给混凝土路面施加表面防护措施，就相当于给混凝土路面穿上了一件坚固的防护衣，成为阻止外部侵蚀介质的第一道、也是最关键的一道防线。目的是有效地阻隔水分和氯离子直接接触混凝土表面。

常用的表面防护措施有涂覆渗透型防护剂、形成表面涂层。渗透型防护剂，比如硅烷、硅氧烷类浸渍剂，其分子尺寸很小，可以渗透到混凝土表层几毫米深处，和水泥基材反应，形成一层憎水膜。这层膜分布在毛细孔壁上，但不会堵塞孔隙，既能有效阻止液态水及溶解盐的渗入，又能让混凝土内部的蒸气散发出来，从而使混凝土有“呼吸”作用。该类防护措施耐久性好，不改变混凝土原貌。另一种是成膜型涂料，环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸酯类涂料等。形成一层致密的物理隔离膜，将有害物质完全隔绝在外。选择涂层的时候需要考虑耐磨性、抗紫外线能力、与基层的粘结强度和裂缝桥接能力。不管采取何种防护措施，施工前的基层处理都十分重要，必须保证表面干净、干燥、坚实，才能使防护材料有效地渗透或者牢固地粘结。

第二节 高温多雨地区抗滑与抗渗技术

一、高温多雨环境对路面性能影响

（一）高温环境的影响

高温条件会对水泥混凝土路面产生多方面的作用。高温会加快混凝土水泥的水化反应速度，使早期强度增长过快，但不利于长期强度稳定增长和微观结构致密。水分蒸发过快会造成塑性收缩开裂，给后期病害埋下隐患。服役期间混凝土板体由于高温产生温度梯度，当板顶温度高于板底时形成负温度梯度，板中产生拉应力，容易造成板体中部开裂；反之形成正温度梯度，板角、板边向上翘曲，在车辆荷载作用下容易造成板角断裂。日复一日的温度应力循环，就是造成混凝土疲劳破坏的主要原因。

高温环境还会使路面材料的物理性质发生变化。填缝用的沥青类密封材料在高温下黏度变小，容易流失，粘到车轮上，失去防水密封作用。高温会加剧混凝土板的热胀效应，如果胀缝设置不当或者缝内存在不可压缩的异物，巨大的膨胀

应力就会使路面板挤压破坏,甚至出现啃边、断裂、胀板等更严重的破坏,严重危害行车安全。

高温还会对路面性能以及车路相互作用造成影响。持续高温会加快路面表面构造的磨损,尤其是对某些类型的路面构造来说,高温会使材料具有更大的塑性,在轮胎的反复碾压下更快地失去棱角,从而降低抗滑性能。轮胎在高温路面行驶时内部压力增大,一定程度上增大了轮胎对路面的接触应力,加快了路面表层磨损速度。

(二) 多雨环境的影响

多雨环境下,水泥混凝土路面受到的最大危害就是水分的侵蚀。雨水将透过路面板的裂缝、接缝、混凝土的孔隙而渗入到路面里。当水分在板底和基层之间形成积水层时,行车荷载的压力作用会产生很大的动水压力,将基层中的细料连同水一起从接缝或裂缝处泵出,这就是“唧浆”。唧浆不仅会掏空板底,使板体失去均匀支撑,造成板体脱空、错台、断裂,而且被泵出的泥浆还会污染路面,降低抗滑性能。

水分的存在是多种材料劣化反应的催化剂。如果混凝土中使用了碱活性集料,水多了会使碱集料反应更剧烈,生成的凝胶吸水膨胀,在混凝土内部产生巨大的膨胀应力,造成网状开裂、结构破坏。酸性雨水和水泥石中的氢氧化钙反应,使钙离子减少、混凝土孔隙变大,混凝土强度下降、耐久性变差。反复的干湿循环会使混凝土物理性能变坏,引起表面剥落、强度衰减。

(三) 温湿综合作用影响

高温加多雨的耦合作用,对于路面的破坏比单一因素简单叠加要严重得多。温湿度交替的环境造成混凝土板体内部产生复杂的温度、湿度应力场,加重了材料的疲劳损伤。炎热的白天,路面经暴晒后温度迅速上升,如果这时突然下起暴雨,板体表面温度骤降,而内部和底部仍处于较高的温度,形成剧烈的温度梯度,产生的拉应力足以使表面开裂。冷热交替频繁地起作用,是造成路面早期开裂的主要原因。

温湿耦合效应会大大加剧唧浆等水损害的程度。高温使得板底积水变成高压水蒸气,车辆荷载的作用下,高压的水蒸气瞬间被压出,它对基层材料的冲刷剥蚀能力比常温下液态水强得多,因此板底脱空更快。高温会加快接缝密封材料的老化、变脆和失效,而频繁的降雨又把砂石等杂质带入了失效的接缝里。由于温

度变化引起热胀冷缩的作用，不可压缩的杂物会阻止板体正常的伸缩，产生很大的挤压力，最终造成接缝处混凝土挤碎、破坏，形成板体破坏和水汽入侵的恶性循环。

二、高温多雨地区混凝土适应性技术

（一）路面抗滑技术

多雨地区的路面抗滑性能对于交通安全来说十分重要。优良且持久的抗滑性能，核心就是形成并保持可以迅速排除轮胎和路面之间积水的表面结构。路面构造一般分为宏观构造和微观构造两种，宏观构造给雨水快速排泄提供通道，有效防止水滑，微观构造能刺破残留的水膜，使轮胎橡胶和集料颗粒之间产生直接摩擦。

为了得到理想的路表构造，可以使用各种先进的施工技术。露石混凝土技术属于其中一种非常有效的手段。该技术在混凝土初凝前用凝缓剂喷洒表面，然后在合适的时机用高压水枪冲去表层水泥砂浆，使抗磨性高的粗集料暴露出来，形成丰富的宏观和微观构造。刻槽技术，横向刻槽和纵向刻槽，都可以明显提高抗滑性能。尤其是纵向刻槽，对于提高车辆操纵稳定性、防止水滑有明显的效果。

抗滑性能设计同材料的选择有密切联系。设计阶段要确定路面在使用过程中以及长期的抗滑标准，也就是构造深度、摩擦系数最小的数值。为了达到上述目的，必须对材料进行严格的筛选，如下表所示。

路面抗滑性能关键材料选择与技术概要

技术 / 材料	作用与要求	关键指标 / 示例
宏观构造	快速排除水膜，防止水滑	露石混凝土、纵向刻槽、横向刻槽
微观构造	刺破残留水膜，提供摩擦	露石混凝土、高磨光值粗集料
集料选择	保证微观构造的耐久耐磨性	粗集料：高磨光值的硬质岩石（如玄武岩、辉绿岩）；细集料：洁净的硬质机制砂或河砂
配合比设计	提高强度、耐磨性及粘结力	降低水胶比，加入高性能外加剂
养护措施	维持和恢复抗滑性能	定期检测（摩擦系数、构造深度），修补工艺（抛丸处理、精铣刨、重新刻槽）

从上表可以看出，在集料的选择上，粗集料应该用高磨光值的硬质岩石如玄武岩、辉绿岩等来保证路面微观构造的耐久耐磨性。细集料应选用洁净的硬质机制砂或河砂。配合比设计上要优化混凝土配合比，降低水胶比、加入高性能外加

剂来提高水泥砂浆强度、耐磨性和与集料的粘结力，防止行车荷载下集料过早松动或者脱落。

长寿命路面设计还要充分考虑抗滑性能的衰减，制订相应的养护措施。需定时检测路面的摩擦系数，构造深度，在性能降至临界值之前，采取抛丸处理，精铣刨，重新刻槽等修补措施，使路面抗滑性能得以恢复，保证道路全生命周期的安全行驶。

（二）路面抗渗技术

路面抗渗技术的主要目的就是防止水分渗透到路面结构内部，从而保护基层、底基层和路基不受水汽的侵蚀。为了达到这一目的，需要从两方面入手，一方面要形成低渗透性混凝土板体，另一方面要保证接缝系统和排水系统长期有效。其中致密、低渗透性的混凝土是防止水分进入的第一道，也是最重要的一道防线。

降低混凝土的渗透性，主要依靠配合比的精细化设计。采用低水胶比（一般控制在 0.40 以下），可以减少硬化水泥石中毛细孔的数量和连通性。在此基础上，掺入粉煤灰、硅灰或矿渣粉等矿物掺合料可以进一步提高混凝土的抗渗性能。掺合料所具有的火山灰效应或者微集料效应，可以改善孔隙结构，把连通的大孔隙转变为不连通的小孔隙，从而使混凝土的渗透系数明显降低。高温施工中及时有效的养护十分重要，可以保证混凝土早期有足够的水分进行水化，最终形成致密的微观结构。

（三）整体耐久性提升技术

提高高温多雨环境下路面整体的耐久性不能只考虑抗滑、抗渗等单一性能，而应该采取一种综合性的设计方法。该方法把材料科学、结构工程、施工质量控制等各方面因素融合起来，目的是使路面结构长期承受温度应力、水损害、交通荷载的共同作用，最终达到预期的长寿命目标。

材料的选择和优化给路面的耐久性打下了基础。为了避免高温高湿环境下容易出现的碱集料反应，应选择低碱水泥，并对集料的碱活性进行严格的检测。如果不可避免地使用了潜在碱活性集料，则必须在混凝土中掺入足够多的优质粉煤灰（F 类）或者矿渣粉等辅助性胶凝材料，从而有效地抑制碱集料反应的发生。同时采用引气法在混凝土中加入大量的均匀微小气泡，可显著提高混凝土抵抗干湿循环等环境作用的能力，并且改善新拌混凝土的工作性。

从结构设计上来讲，要充分考虑到高温所造成的大量温度应力。可以采用更

厚的混凝土板提高抵抗荷载和温度翘曲应力的能力；合理设计传力杆、拉杆保证接缝间荷载传递效率和板体连接的整体性；优化板平面尺寸、接缝间距，科学控制裂缝的产生和发展。施工过程的精细化管理，对于保证设计意图得以实现起着重要的作用。必须严格控制混凝土入模温度，用喷淋、覆盖等方法及时有效地进行养护，接缝切割时机、尺寸、密封质量符合要求。这些技术的综合运用，就形成了长寿命路面的保证体系。

第三节 严寒地区抗冻融混凝土技术

一、严寒地区混凝土冻融破坏机理

（一）冻胀破坏作用

混凝土内部孔隙结构在有水的情况下才会产生冻胀破坏。当环境温度低于冰点时，混凝土毛细孔隙里的水结成冰，体积膨胀 9% 左右，会对孔壁产生很大的结晶压力。该过程受到混凝土临界饱和度的限制，只有当孔隙中水分含量超过一定值的时候，结冰产生的膨胀效应才会引起结构损伤。尤其在水位变动区或者经常接触融雪剂的路面上，其表层混凝土很容易达到饱和状态，从而大大增大冻胀的风险。

静水压力理论认为，孔隙中的水分结冰时，就会把还没有冻结的液态水挤到较小的孔隙或者未冻结的区域。液态水在狭小的孔道中流动时会产生很大的液压。当此压力超过混凝土本身的抗拉强度时，就会在微观层面上产生材料开裂。渗透压理论还给出了另一种解释，冰晶形成之后，周围液相中溶质浓度增大，与远处未结冰孔隙中的低浓度溶液形成浓度梯度。由于渗透压的作用，水分被推向冰晶处，造成该处压力增大。连续不断的内应力导致微裂缝产生、发展。

这两种压力同时作用在混凝土的微观结构上。反复的冻融循环使这些微损伤不断积累、扩展、连通，宏观上就表现为混凝土表面逐层剥落、起砂、开裂。对高速公路路面来说，表层出现的微小破坏会直接影响路面的平整度和抗滑性，同时给水分和侵蚀性介质的深入渗透创造了有利条件，从而加快了整个结构的劣化速度。

（二）融沉破坏作用

冻融循环中“融化”阶段对混凝土的破坏也不能忽略。温度升高的时候，孔隙里的冰晶融化成了水，此时混凝土内部处于完全饱和的状态，并且结构由于冻胀已经有所松弛。融水可以填充冻胀所形成的微裂缝，也能溶解并带走水泥石中可溶性物质（例如氢氧化钙），从而使孔隙结构进一步粗化，最终增大混凝土的渗透性。

更严重的是，融化后的饱和混凝土结构，在承受交通荷载的时候，强度和刚度都会明显下降。车辆荷载作用在削弱结构上的时候，会增大应力集中效应，进而造成更大的变形。路面结构在荷载反复碾压时，孔隙水压力会突然增大，造成孔壁被冲刷、剥蚀，加快材料破坏的速度。路基、基层发生融沉作用，就会造成其承载力大幅下降，造成路面出现不均匀沉降以及结构性的开裂，给行车的安全性和舒适性带来非常大的影响。融化、饱和、承载的循环作用使路面结构在每个解冻期都受到一次严峻的性能考验，损伤也就在不知不觉中累积起来。

（三）疲劳破坏作用

把每一个冻融循环看作混凝土材料所受的一次低周疲劳荷载，有利于理解其长期性能退化的过程。单个冻融循环产生的内部应力可能不足以立即造成宏观破坏，但是经过上万次循环作用后，微观损伤不断积累的过程和材料的疲劳损伤机理十分相似。每次结冰时，胶凝体和骨料之间或者水泥石基体内都会产生拉应力，这会促使新的微裂纹产生或者原有微裂纹亚临界扩展。

累积效应是渐进的，在路面服役的漫长岁月中，它的力学性能，比如抗压强度、抗折强度、弹性模量等都会不断降低。经过一定的冻融循环次数以后，混凝土的相对动弹性模量就会明显减小，这是内部结构损伤不断累积的直接反映。冻融循环引起的疲劳效应同交通荷载引发的疲劳效应叠加起来，两者明显削减了路面结构的使用寿命，致使原本结实的路面板因为材料疲劳而出现脆性断裂。

二、严寒地区混凝土抗冻融技术

（一）混凝土引气技术

在混凝土中引入微小、均匀、稳定、封闭的气泡，是抵抗冻融破坏最直接、最有效的方法。该技术是掺加引气剂实现的，在混凝土中预先设置了很多微型的压力释放阀。当孔隙水结冰产生膨胀压力的时候，富有弹性的微气泡给受压的毛

细管水提供缓冲的空间,有效地消解了静水压力和渗透压力,使内部应力不致于达到混凝土抗拉强度的极限,从而从根本上保护了水泥石结构。

引气技术成功的决定性因素就是形成高质量的气泡结构体系。这不仅仅是个总含气量的问题,更主要是气泡的大小、气泡分布是否均匀、气泡间距。理想的气泡系统应该具有最小的平均直径和最大的比表面积,保证水泥石基体中任意一点都距离某个气泡很近。气泡间距系数小于 $200\mu\text{m}$ 时,才能有效且及时的释放内部压力。气泡过大或者分布不均不但不能起到保护作用,反而会成为结构中潜在的缺陷。

所以引气剂的选择及掺量的控制就显得尤为重要。不同种类的引气剂(松香树脂类、合成表面活性剂类)其引气效果和气泡稳定性是不一样的。根据水泥、掺合料、骨料等原材料的性质以及施工条件,用试验确定最佳的引气剂种类和掺量。含气量每增加 1%,混凝土强度就会降低 3%~5%。因此,要在抗冻性和力学性能之间找到一个最佳的平衡点,以达到耐久性与承载力相协调的目的。

正确的使用引气技术可以成倍提高混凝土的抗冻等级,对严寒地区长寿命路面的设计来说是非常重要的。施工期间对混凝土拌合物含气量的实时监测和精确控制,是保证引气技术达到预期效果的基本保证。严格控制,保证最终硬化路面混凝土中具有设计要求的理想气泡结构,这是抵御严寒的第一道防线,也是最关键的一道防线。

(二) 配合比优化技术

优化混凝土配合比设计,从根本上形成一个致密、低渗透性的基体环境,减少水分进入的可能性,从而提高混凝土本征抗冻能力。配合比优化的核心就是严格控制水胶比,科学合理地选择优质原材料和矿物掺合料。

降低水胶比可以明显提高混凝土的抗冻性。较低的水胶比意味着用于水泥水化的自由水少,硬化后形成的毛细孔隙网络连通性差、孔径小,使水分不容易渗透到混凝土内部。饱水情况下可供冻结的水量减少,冻胀压力也随之减小。为了在低水胶比下仍能保证混凝土必要的施工和易性,一般要掺入高性能减水剂。减水剂能有效地分散水泥颗粒,使水泥颗粒间的包裹水得以释放,在不增加用水量的情况下,可以大大提高混凝土的流动性,为实现低水胶比和良好的工作性提供可能。

原材料的选择也十分重要,骨料作为混凝土的骨架,自身抗冻性、孔隙率、

吸水率都会对混凝土整体性能产生较大影响。因此必须选用坚硬、纯净、级配合理的、抗冻检验合格并证明其抗冻性能优良的骨料。

在胶凝材料体系中加入粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等矿物掺合料，是提高混凝土长期耐久性的主要方法。活性掺合料的“火山灰效应”和“微集料填充效应”，可以改善水泥石的孔结构，使孔隙更细、更曲折，从而大大降低混凝土的渗透性。同时掺合料还可以消耗水泥水化时产生的部分氢氧化钙，生成更稳定、更致密的C-S-H凝胶，从而提高基体的强度和抗侵蚀性。几种常用的矿物掺合料对混凝土抗冻融性能的主要作用如下表所示。

常用矿物掺合料及其抗冻融作用

掺合料类型	主要成分	抗冻融主要作用
粉煤灰	SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、Fe ₂ O ₃ 等	活性火山灰效应，改善孔结构，降低渗透性
磨细矿渣	CaO、SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、MgO 等	潜在水硬性，细化孔隙，提高密实度
硅灰	高活性 SiO ₂	微集料填充效应，极细化孔隙，显著降低渗透性

（三）施工过程控制技术

再好的设计方案，也必须经过严格的施工过程控制，才能最终变成高品质的工程实体。抗冻融混凝土从原材料进场到最终养护的每一个环节都不能疏忽大意，否则都会对它的长期耐久性造成不可逆的损害。因此建立一个全过程的质量控制体系，是保证路面长寿命的关键。

施工控制的第一步就是对原材料进行严格把关，准确计量。进场的水泥、骨料、外加剂等每一批次都必须经过严格的检验，保证其性能稳定，符合设计要求。特别是引气剂、减水剂的掺量要由电子计量设备来准确控制，任何一点的波动都会影响到混凝土的工作性能和最终含气量。搅拌时间需要通过试验确定，既要保证外加剂及各组分分布均匀，又不能搅拌过度造成气泡破裂、含气量减少。

1. 振捣环节，对混凝土的密实度和气泡结构能否保留起决定性的作用。振捣不足会造成混凝土出现蜂窝、麻面等缺陷，给水分入侵留下通道；而过度振捣又会导致混凝土离析，更严重的是，它会把本来为抗冻精心引入的微小气泡从表层混凝土中排出，使其失去应有的抗冻保护作用。因此必须按照快插慢拔的原则，合理布置振捣点，使混凝土均匀密实并最大限度地保留有效的气泡结构。

2. 收光抹面：混凝土的收光、抹面工作更应格外注意。反复抹压会使得表层

的水泥浆浮上来,形成水灰比高、强度低的水泥浆表面,而且很容易破坏表层气泡。而这个地方,就是冻融破坏最先出现的地方。应尽量减少不必要的抹压次数,在混凝土初凝后进行最后处理。

第四节 材料环境适应性试验与评价体系

一、材料环境适应性试验方法体系

(一) 室内加速试验方法

室内加速试验方法的核心思想,就是人为地加强单一或者多种环境因素,模拟出比自然环境更为苛刻的条件,在较短的时间内再现材料在长期服役过程中出现的劣化现象。此法周期短、成本低、条件可控,是快速筛选、比较材料性能的有效方法。常用的试验项目有抗冻融循环试验、盐雾腐蚀试验、紫外老化试验、化学侵蚀试验等。抗冻融循环试验模拟寒冷地区冬季的冻融作用,用快速温变来使材料内部的水分反复冻结、融化,产生交变应力,用来检验材料抵抗冻融破坏的能力。盐雾腐蚀试验主要是为了模拟沿海地区或者使用除冰盐的地区,在高浓度盐雾环境下加快氯离子渗透,来考察材料抵抗钢筋锈蚀和盐类结晶破坏的能力。

紫外老化试验可以模拟强烈的日光照射对材料表面性质造成的影响,特别是对于含有组分的功能性外加剂或者养护剂来说,长时间的紫外照射会造成分子链断裂、性能下降。化学侵蚀试验根据具体的工程所在地的土壤、地下水化学成分来模拟硫酸盐、碳酸盐等化学介质对水泥石的侵蚀过程,评价材料的化学稳定性。用质量损失率、强度保留率、相对动弹性模量等宏观性能指标来度量材料性能的衰减。

室内加速试验存在着固有的局限性。试验过程往往忽略了实际环境里各种因素耦合作用的复杂性,试验条件被过度强化之后,就容易产生与实际不符的特殊破坏模式。因此,加速试验结果与材料实际服役寿命之间没有直接关系,必须通过大量的现场数据进行标定、验证,不能直接把试验结果等同于实际服役年限。科学地使用室内加速试验,首先要正确识别目标环境中主要的劣化因素,合理地设定试验参数,使试验结果更能反映材料在该环境中的主要性能。

（二）现场暴露试验方法

现场暴露试验是在自然环境中将材料试件或修筑一小段试验路段，对材料性能进行长时间连续的观察。该方法可以最真实的反映材料在多因素、长周期、随机性环境作用下综合性能的表现，试验结果被普遍公认为评价材料环境适应性的最终标准，同时也是检验其他试验方法的标准。试验场地选择十分重要，一般选取具有典型地域特征的严寒地区、滨海盐雾区、西北干旱区、高海拔强紫外线区等地进行试验，以保证试验结果具有广泛的代表性。

现场暴露试验是一项耗时长、投入大的工程。在试验期间，对试件或者试验路段要定期、多方面地做性能检测。监测内容除了对宏观表观状况做详细的记录，即裂缝产生和发展、表面剥落、泛碱、错台等病害的详细测绘外，还要采用无损检测技术来评价材料内部结构的状态，比如用超声波法检测内部损伤累积，用电阻率法评价内部密实度和离子渗透性。不同服役年限内，还要钻取芯样带回实验室做详细的物理力学性能测试和微观结构分析，以研究材料宏观到微观的演变机理。虽然现场暴露试验周期很长，但是获得的数据对建立准确的材料性能衰变模型、修正室内加速试验方法、指导长寿命路面材料研发和应用等都具有不可替代的战略意义。

（三）模拟环境试验方法

模拟环境试验方法用以弥补室内加速试验和现场暴露试验之间的差距，在实验室内用大型、多功能的综合环境模拟系统，更逼真的再现出实际环境的复杂性以及多因素耦合效应。相比传统室内加速试验来说，它模拟的环境条件更接近实际，可以精确控制温度、湿度、光照、降雨、盐雾、气体浓度等变量，按照事先设定的程序进行循环，研究各种因素共同作用下材料的劣化规律。此方法在模拟精度上比前者高很多，在试验效率上比后者低很多。

现代化的模拟环境试验设备，如大型环境模拟仓或者是足尺路面加速加载系统，是该方法体系的主要设备。大型环境模拟仓能容纳大尺寸试件或者结构构件，能模拟酷暑严寒、干旱湿润等季节性气候变化。足尺路面加速加载系统更进一步，把复杂的环境模拟和真实交通荷载结合在一起，可以深入研究车、路、环境三者相互作用下路面性能的变化，对于揭示疲劳荷载和环境侵蚀共同作用下路面损伤机理有独特优势。例如，研究冻融循环环境里动态荷载怎样加快路面板接缝处的疲劳破坏。

通过模拟环境试验可以系统分析各种环境因素对材料性能的影响权重，找到主要的劣化驱动因素，验证为抵抗某种环境而设计的特种混凝土材料的有效性。试验所获数据可用来改进混凝土配合比设计，改进施工工艺，也可为建立考虑环境因素影响的精细化路面设计理论、性能预测模型提供重要的试验参数。它成为理论研究与工程实践之间的桥梁，对长寿命路面技术的发展与创新起了很重要的作用。

各类材料环境适应性试验方法的特性对比可见下表。

材料环境适应性试验方法对比表

试验方法	试验地点	模拟真实性	试验周期	主要优点	主要缺点
室内加速试验	实验室	较低	短	周期短、成本低、可控性高	真实性不足、破坏模式可能失真
现场暴露试验	真实环境	极高	长	最真实、结果权威	耗时久、投入大、不可控
模拟环境试验	实验室	较高	中	兼顾真实性与效率、多因素耦合	设备复杂、成本高

二、材料环境适应性评价标准

（一）评价指标体系建立

建立评价指标体系的首要原则就是它的科学性、全面性和可操作性。指标选择要紧密围绕高速公路水泥混凝土路面主要的破坏模式，能很好地反映出在目标环境因素下，材料性能衰减的特点。根据各地的环境特点，指标体系要有所侧重，体现因地制宜的设计思想。北方地区要突出抗冻融性能指标，南方湿热地区要突出材料的抗碳化、温湿稳定性。

一个完善的指标体系通常包含多个层次的指标，主要可划分为以下几类：

1. 物理力学性能指标：是评价材料基本承载能力、结构稳定性等最基本的标准。主要为抗压强度、抗折强度、弹性模量等，环境模拟试验后强度保留率或者损失率。这些指标同路面的承载能力，抵抗荷载变形能力直接有关联。
2. 耐久性核心指标：这类指标可以体现材料对某种环境侵蚀的抵抗能力，是评价材料环境适应性的主要标准。抗冻性（动弹性模量损失和质量损失）、抗氯离子渗透性（电通量或者扩散系数）、抗硫酸盐侵蚀性（膨胀率和强度腐蚀系数）、抗碳化性能（碳化深度）以及抑制碱—骨料反应的能力。

3. 体积稳定性指标, 水泥混凝土的体积变形是造成路面开裂的主要内部原因。此类指标主要是干燥收缩、温度收缩(热膨胀系数)和徐变特性。有效控制这些指标可以减少非荷载裂缝, 保证路面平整度和长期服役性能。

除了上面提到的宏观性能指标, 微观结构分析指标也被加入到评价体系当中。使用扫描电子显微镜、X 射线衍射、压汞法等先进的检测手段可以对材料孔隙结构、水化产物组成、微裂缝扩展形态等进行定量表征。微观指标可以更深层次地探究材料性能劣化的原因, 从而给材料的改进和优化提供更好的依据。在建立完善评价体系的时候, 还需要根据各项指标对路面长期性能的贡献度和影响程度, 用专家打分法或者熵权法确定各指标的权重系数, 为以后的综合评价打下坚实的基础。

(二) 综合评价方法

材料的环境适应性是由很多性能指标组成的一个复杂的综合体, 单一指标的好坏不能完全反映材料的性能。因此必须采用科学的综合评价方法, 把分散的评价指标整合成总体的、可量化的评价结果, 从而对不同的备选材料方案进行系统的排序和优选。从而建立起一个综合考虑各种因素的评价体系, 避免因为过于重视某一个因素而做出过于简单的判断, 提高评价的客观性、可靠性。

长寿命路面材料评价常用的综合评价方法有层次分析法、模糊综合评价法、灰色关联分析法等。层次分析法是把定性与定量相结合的一种决策方法, 把复杂的评价目标分解为目标层、准则层(如耐久性、力学性能等)、指标层, 通过构造判断矩阵来确定各个层次元素的相对权重, 最后得到各方案的综合得分。该方法逻辑清楚、系统性较强, 但是权重确定过程带有一定主观性。模糊综合评价法利用模糊数学理论, 可以很好地解决评价过程中的模糊性、不确定性。通过隶属度函数来表达各项指标对评价等级的符合程度, 再结合指标权重做模糊矩阵运算, 得出最后的综合评价结果, 特别适合评价标准界限不清楚的情况。灰色关联分析法属于多因素统计分析范畴, 以数据序列的几何相似度为基础, 计算备选方案性能指标序列与理想最优方案序列之间的关联系数, 判定其接近最优方案的程度, 适合样本数据量少或者信息不完整的情况。在实际运用当中, 依照评价目的的具体要求, 数据信息的完备状况以及评价人员的喜好, 可选取一种或者多种办法来综合评定, 从而改善评价成果的精确度和鲁棒性。

（三）适应性等级划分

综合评价的最终目的是指导工程实践，把复杂的评价分数转化成直观易懂的适应性等级，这是评价流程的最后一步，也是评价结果实用性的直接体现。等级划分之后，可以给材料的准入、使用范围和设计参数选择提供明确的技术参照，从而极大地方便设计、施工人员做出决策。

适应性等级一般用综合评价方法得出的量化分值来划分。首先要确定出各个等级的分值范围，即设置不同等级的分值上下限。阈值的确定不能是凭空想象出来的，而必须有大量试验数据、长期工程实践经验以及相关规范标准作依据，并且还要符合长寿命路面性能目标的预期。一般可以将材料的环境适应性分为优、良、中、差四个等级。每个等级都有具体的性能说明，并且指明了适用范围。I级材料在恶劣的环境下具有很强的抵抗能力，适用于最高设计寿命、最高交通等级的高速公路；IV级材料适应性差，不适合用在长寿命路面工程中。

适应性等级划分体系建立以后，就成为材料供应链管理和工程质量控制的重要工具。在项目招标、材料采购阶段，可以规定供应商提供的水泥、外加剂、掺合料等要达到一定的适应性等级。设计阶段设计人员可以依据项目所在地环境分区、设计年限直接选用相应适应性等级的材料体系进行配合比设计。该等级划分体系应该是一个动态发展的系统。新材料、新技术不断出现，对材料长期性能的认识不断加深，评价指标及等级划分标准要定期检查、修订，保证科学性、前瞻性，促进高速公路水泥混凝土长寿命路面技术不断发展、创新。

第七章 功能层与界面处理关键技术

第一节 基层与面层间粘结与应力吸收技术

一、基层与面层间粘结机理

（一）物理粘结作用

物理粘结作用主要源于分子间的范德华力（Van der Waals forces），它是一种普遍存在于所有分子间的、非特异性的吸引力。在路面结构中，当粘层材料（如乳化沥青或改性乳化沥青）以液态或半固态形式喷洒于基层表面时，其分子能够渗透进基层表面的微小孔隙和裂缝中。随着溶剂（水）的蒸发或破乳，沥青分子与基层集料颗粒表面的分子间距缩短到纳米级别，范德华力便开始发挥作用，从而产生一定的粘结效果。

这种粘结作用的强度相对较弱，且极易受到环境因素的干扰。例如，基层表面的灰尘、水分或油污会形成一层隔离膜，显著增大分子间距，导致范德华力急剧衰减甚至失效。因此，在施工前对基层进行彻底的清扫、干燥处理，是保证物理粘结作用得以充分发挥的前提条件。尽管物理粘结力本身有限，但它为后续更强的化学粘结和机械咬合作用提供了基础接触面，是整个粘结体系中不可或缺的组成部分。

（二）化学粘结作用

化学粘结作用是指粘层材料中的活性成分与基层材料（特别是集料）表面发生化学反应，形成化学键而产生的强大结合力。与物理粘结相比，化学粘结具有更高的键能和更强的稳定性，是层间粘结强度的主要贡献者。

在沥青路面中，化学粘结的机理主要体现在沥青与集料之间的酸碱反应。沥青中含有大量的酸性组分（如沥青质、胶质），而集料根据其岩性可分为酸性集料（如花岗岩）和碱性集料（如石灰岩）。当沥青与碱性集料接触时，沥青中的酸性官能团（如羧基、羰基）会与集料表面的碱性活性位点（如 Ca^{2+} ）发生化学反应，形成稳定的沥青酸盐类化合物，从而产生牢固的化学吸附。

然而，当基层集料为酸性集料时，其表面缺乏足够的碱性活性位点，与沥青的化学亲和力较差，导致粘结强度不足。为了解决这一问题，工程实践中常采用掺加抗剥落剂（如胺类、酰胺类化合物）的方法。这些抗剥落剂作为“桥梁”，其一端能与酸性集料表面结合，另一端能与沥青组分反应，从而显著增强化学粘结效果。因此，根据基层材料的化学特性选择合适的粘层材料和添加剂，是激发和强化化学粘结作用的核心技术手段。

（三）机械咬合作用

机械咬合作用是一种宏观与微观相结合的物理锁定现象，它通过粘结材料填充基层表面的凹凸不平，形成犬牙交错的嵌挤结构，从而抵抗层间的剪切滑移。这种作用力的大小直接取决于基层表面的宏观构造深度和微观纹理状况。

一个理想的基层表面应当是粗糙且多孔的。在施工过程中，流动性较好的粘层材料能够充分浸润并贯入基层表面的开口孔隙、微裂缝和集料间的空隙中。待粘层材料固化后，便在基层与面层之间形成了一个“销钉”或“楔子”网络。当路面承受行车荷载（尤其是水平剪应力）时，这些固化的沥青楔子将有效地传递和分散应力，阻止面层相对于基层发生位移。

机械咬合作用的强弱与施工工艺密切相关。例如，对基层进行“拉毛”处理，可以人为制造出理想的宏观构造，为机械咬合提供有利条件。反之，如果基层表面过于光滑、致密，或在施工过程中被过度碾压，其表面纹理被破坏，那么机械咬合作用将大打折扣。因此，控制基层的施工质量，确保其具有适宜的粗糙度，是最大化机械咬合作用、提升层间抗剪能力的关键。

第二节 既有路面改造中的植入技术应用

一、既有路面改造主要技术类型

根据既有水泥混凝土路面不同的病害状况、结构承载力和交通条件，发展出了多种改造技术。选择合适的改造方案是保证路面长期性能的前提，也是植入技术发挥作用的重要场景。常见的既有路面改造技术类型如下表所示：

既有路面改造主要技术类型对比表

技术类型	核心原理	优点	缺点 / 适用限制	典型应用
直接加铺	在局部修复后的旧路面上直接铺设新面层	施工方便快捷，交通影响小	沥青加铺易产生反射裂缝；对旧路结构病害程度要求较高	提升道路使用功能与承载能力
破碎稳固	将旧混凝土板破碎成嵌挤块体，作为基层或底基层	彻底消除反射裂缝，提供均匀稳定支撑，材料利用率高	需要专用破碎压实设备，施工复杂度相对较高	旧水泥混凝土路面改造为长寿命沥青路面
再生利用	将旧路材料铣刨、破碎、掺配胶结料后重新铺筑	资源节约，环境友好，降低工程造价	对旧料评估、配合比设计及施工质量控制要求高	大规模路面改造，路面拓宽工程

下文将对这些主要技术类型进行详细阐述。

（一）直接加铺改造技术

直接加铺技术就是在已经局部修复过的旧路面上直接铺设新面层，目的是恢复道路使用功能、提高承载能力的一种快速修复方法。该技术因为施工方便、对交通影响小而被广泛使用，加铺层材料可以采用沥青或者水泥混凝土。沥青加铺层可以改善行车舒适性，但是旧板接缝处容易产生反射裂缝，从而影响加铺层的耐久性，通常需要设置应力吸收层等措施来有效缓解。水泥混凝土加铺层可以大幅度提高结构的刚度和承载能力，是达到长寿命目的的重要措施。

根据新旧混凝土层之间结合方式的不同，水泥混凝土加铺可分为结合式和无结合式。结合式加铺对旧路面要求严格，新旧层面要牢固粘结、共同受力，但其施工工艺要求高。无结合式加铺是在中间设隔离层，使新旧板独立工作，可有效地防止反射裂缝，但缺点是可能会增加加铺层厚度，从而提高成本。

在决定直接加铺之前必须对旧路面的结构状况进行详细的评价，评价的内容包括板底脱空、断板率和基层稳定性。对于结构病害严重、承载力衰减严重的旧路，如果不做充分的预处理，直接加铺很难达到预期的长寿命效果。因此加铺前的断板修复、脱空灌浆等工作十分重要，局部修复环节就是植筋、锚固等植入技术的应用领域，为加铺层长期稳定打下了基础。

（二）破碎稳固改造技术

破碎稳固技术是彻底解决旧水泥混凝土路面反射裂缝问题的方法。其核心就是用专用设备破碎旧混凝土板，破碎成尺寸受控的嵌挤块体，压实后形成高质量

的料料基层或底基层,再加铺新面层。从根本上消除了旧板存在的板块效应,有效杜绝了由于接缝活动造成的反射裂缝,给新建面层提供均匀、稳定的支撑,是创建长寿命路面结构的重要工艺。根据破碎程度的不同,分为碎石化技术、打裂压实技术等。

碎石化技术是最彻底的一种,用多锤头破碎机将旧混凝土板完全破碎,形成紧密嵌挤的料料层,结构性能与优质级配碎石基层相似。用振动压路机碾压多遍,使碎块嵌挤密实,形成高强度、稳定的基层。最大限度地利用了旧路材料,避免了废弃混凝土处理问题,有良好的环保效益,为上部长寿命面层提供可靠的保障。打裂压实等技术破碎程度较小,主要是形成细小的裂纹来释放旧板的温缩应力,减小板块的有效尺寸,从而减少反射裂缝的产生。

(三) 再生利用改造技术

再生利用技术是体现可持续发展理念的重要手段,它充分利用已有的路面材料来达到节约资源、减少污染的目的。该技术是将旧路面材料铣刨、破碎,按设计要求掺入新集料、水泥或者乳化沥青等胶结料,重新拌和成混合料,铺筑新的基层或底基层。这样既可以降低工程造价,又可以减轻大型改造工程的环保压力,是未来高速公路改造的重要方向。按照施工方法可分为厂拌再生和就地再生。厂拌再生即将旧料运到拌和厂集中处理,有利于控制产品质量。就地再生就是利用专用设备在现场完成全部工序,施工效率高。

在实施再生利用技术时,有几个关键环节需要严格控制以确保再生层的质量:

1. 旧路材料评估:需对旧料的成分、强度等进行详细检测,判断其再生利用的适宜性。
2. 再生配合比设计,通过室内试验确定新旧材料、胶结剂的最佳掺配比例,满足再生层性能要求。
3. 施工过程质量控制:必须严格控制拌和均匀性、碾压密实度和养生条件,使再生结构层达到预期的性能。

再生技术一般与植入技术配合使用。路面拓宽时新铺的部分与旧路重新利用的结构之间要设置拉杆等,使新旧两部分共同受力形成整体,防止产生纵向裂缝,提高再生改造路面的长期使用性能。

二、既有路面改造中植入技术应用

（一）植筋技术应用

植筋技术是在既有混凝土结构上钻孔，用高强度结构胶把钢筋植入孔内，使其与原结构形成整体的加固技术。在高速公路路面改造工程当中，植筋技术常被用于修复局部的破损板、改善接缝传荷能力以及连接新老板面等情形，可以很好地保障修复部位的长久稳定。当路面板边角出现裂缝时，就要将损坏的部分挖掉后重新浇筑混凝土。此时在修复区边界处植入钢筋，使它与原完好板体中延伸出来的钢筋连接起来，新浇筑混凝土的钢筋深入旧混凝土内部，有效地连接新旧部分，恢复板块的连续性及传荷能力。

植筋施工质量直接影响加固效果，其施工流程主要有定位、钻孔、清孔、注胶、插筋等。钻孔孔径、深度要符合锚固长度的设计要求。清孔十分关键，要使用高压气枪和毛刷反复清洗孔内粉尘，使孔壁干净，否则会大大影响结构胶的粘结效果，导致锚固失效。结构胶的选择也十分重要，必须选用专用的、性能经过严格检验的高强度植筋胶，其抗拉拔强度、耐老化性、耐久性等均要符合长期使用要求。

长寿命路面设计思想里，任何一个局部的薄弱之处，都有可能成为整个结构失效的引子。植筋技术正确使用，可以使修复后的局部区域达到或者超过原来的设计标准。在对旧路面进行加铺之前，必须清除断板、裂缝并进行植筋修补，这是保证旧板整体承重功能不受破坏、防止反射裂缝产生、保证加铺层长期稳定工作的重要方法。从而最大程度地保持和利用旧路结构。

（二）锚固技术应用

锚固技术在路面改造工程中的适用范围较广，一般是指用锚栓或者锚固件把路面附属设施、新建结构单元和原有路面结构连接起来，从而达到可靠连接目的的技术。主要功能就是给连接部位提供强大的抗拔、抗剪能力，保证连接部位的稳定性、耐久性，是保证交通安全设施功能和路面结构整体性的重要手段。高速公路改扩建时新增加的护栏、龙门架基础、各种交通标志牌基础等都必须用后置锚栓与已有路面牢固连接。后置锚栓技术因为灵活性高、施工方便而被广泛使用。

后置锚栓分为机械锚栓和化学锚栓。机械锚栓通过其楔形结构在锚孔内产生机械锁紧力来达到锚固的作用，并且安装方便。化学锚栓采用特制化学粘合剂将

螺杆与孔壁粘接,利用化学键合作用形成强固的锚固,承载力大,而且对混凝土基材的挤压应力小。选择锚固方案时要考虑荷载种类、荷载大小、基材状况、环境情况等各方面因素。对于车辆冲击荷载下的护栏等安全设施来说,锚固系统的抗疲劳性能、耐久性就是设计中主要的控制指标。

(三) 新旧结构连接技术

新旧结构连接技术是高速公路改扩建及维修工程的一项关键技术,主要目的就是使新建部分和保留的旧结构形成一个稳定、耐久的整体,共同受力。连接技术的优劣直接决定改造工程是否成功,也决定路面长期服役性能的好坏。植入技术,特别是传力杆、拉杆的植入,是目前实现旧混凝土结构和新结构之间有效连接的主要技术。在路面拓宽的时候,在新旧路面的结合处横向埋入拉杆,以防止新旧板块之间出现横向位移或者分离,避免纵向接缝开裂。

对水泥混凝土路面局部全厚度挖补修复时,新浇筑的混凝土板与相邻旧板之间应设置传力杆,以保证接缝处的荷载传递能力。传力杆一般为光滑的圆钢筋,一端用植筋的方式固定在旧板内,另一端涂上润滑剂之后伸入新浇筑的混凝土中。传力杆允许板块之间有一定的纵向移动,当荷载作用时又能有效地传递荷载,大大减小板边应力、挠度,防止接缝处错台。传力杆的植入精度非常重要,它的位置、角度必须准确无误。

除植入钢筋外,新旧结构界面处理也属于连接技术的重要组成。对于新旧混凝土的竖向连接面一般需要进行凿毛处理,增大粗糙度,提高机械咬合力。在浇筑新混凝土前,可以在界面上涂刷界面剂来提高化学粘结力。对于新旧沥青层或者沥青混凝土混合层之间的连接,应保证接触面干净并喷洒粘层油。只有将界面处理与植入技术综合起来使用,才能达到新旧结构无缝对接、一体化工作的目的。

第三节 接缝材料与结构功能一体化设计

一、路面接缝材料性能要求

(一) 填缝料性能要求

填缝料是隔绝外部环境侵蚀的第一道防线,主要起密封防水、适应板体位移的作用。为了满足长寿命路面严苛的要求,填缝料必须有很好的粘结性、高弹性、

良好的耐久性。粘结性是填缝料与混凝土板缝壁牢固结合，从而有效阻止水分下渗的基础。优质的填缝材料应该在板体反复温胀、荷载位移的情况下，始终与缝壁紧密贴合，不能出现脱粘、开裂的现象。经过实践证明，填缝料和混凝土槽壁的剥落性破坏，主要是由于车辆荷载通过接缝时产生剪切力造成的。

高弹性是填缝料适应板体水平位移、保持自身结构完整的条件。路面板受到季节及昼夜温差的影响，会发生显著的伸缩变形，所以填缝料要具有较大的拉伸量和高弹性复原率，在低温环境下被拉伸时不易脆裂，在高温下被压缩时也不会发生永久变形或者挤出。填缝料还应具有良好的耐候性、抗老化性，能较好地抵御紫外线、油污、化学融雪剂等侵蚀性的环境因素，保证填缝料长时间内物理化学性质的稳定，避免由于材料的老化、降解过早失效。

高速公路、一级公路等重要路段上使用高性能树脂类，橡胶类或改性沥青类填缝材料。其中聚氨酯和硅酮类填缝料由于弹性好、粘结性好而被广泛使用。这些高性能材料在比较宽的温度范围里可以保持稳定的性质，有效地阻止水分、杂物等进入接缝里，从而保证基层、路基的稳定，减缓路面结构破坏的速度。

接缝构件的典型参数与性能要求可见下表：

路面接缝主要构件参数与性能要求表

构件名称	主要功能	典型材料 / 形式
填缝料	密封防水，适应板体位移	树脂类、橡胶类、改性沥青类 (如聚氨酯、硅酮)
传力杆	传递车辆荷载，减小板边应力，防错台	光圆钢筋
拉杆	限制纵缝张开，保证接缝紧密	变形钢筋 (螺纹钢)

（二）传力杆性能要求

传力杆是横向接缝传荷能力的重要保证，它的主要作用就是将车辆荷载从受荷板边缘平稳地传递到相邻板上，减小荷载作用下板边缘和角隅的应力和变形，防止接缝错台病害的发生。为了达到此目的，传力杆材料必须要有足够的强度、刚度以及良好的防腐性能。传力杆一般用光圆钢筋，直径、长度、间距要根据路面厚度、交通荷载等级进行设计。对于厚度为 260mm 的面层，典型的传力杆设计参数可以参考上表。

为了保证传力杆在其设计寿命内一直发挥其作用，传力杆的防腐蚀性能就显得尤为重要。由于长期处在接缝内潮湿并且可能含有融雪剂等腐蚀性介质的环境

中,传力杆很容易生锈。钢筋一旦锈蚀,就会减小钢筋的有效截面积,降低传荷能力,锈蚀产物体积膨胀还会限制板体自由伸缩,使接缝处产生巨大的约束应力,最终造成板体胀裂。因此,对传力杆进行有效的防腐处理就显得十分重要,一般采用涂刷一层防锈涂层的办法,例如环氧树脂或沥青。为了使板体可以自由伸缩,传力杆一般会在其中一半长度上涂去粘结材料或者加装光滑套管,防止其与混凝土粘结,从而保证板内自由滑动。

(三) 拉杆性能要求

拉杆主要布置在纵向接缝和部分横向施工缝处,其主要作用是阻止混凝土板因为温度降低、湿度变化或者荷载作用而发生横向分离,保证纵向接缝紧密贴合,共同分担荷载。与传力杆截然不同,拉杆要和两侧的混凝土板牢固地粘结在一起,依靠自身的抗拉强度来有效地约束板体的相对位移。因此拉杆一般用变形钢筋,即螺纹钢来增大与混凝土的锚固力。

拉杆主要性能有抗拉强度、屈服强度、耐久性。它必须有足够的强度来抵抗混凝土板收缩时产生的拉应力,防止纵缝张开。其直径、长度、间距等参数也需要根据路面宽度、厚度和预期的温度应力做周密的设计。一般拉杆都设置在板体中央,以保证受力均匀。拉杆耐久性同传力杆一样重要。纵缝的密闭性较好,但为了防止水分侵入,在拉杆中部一定范围内进行防锈处理,仍然是必要的预防性措施,有利于提高拉杆的使用寿命,保证纵向接缝的长期稳定。

二、接缝结构功能一体化实现

接缝结构的功能一体化设计,就是利用合理的构造组合和材料匹配,使接缝系统在防水、传荷、变形协调这三个主要功能上达到有机统一和高效协同。这就要求设计者不能只满足于单一的功能,而应该从系统工程的角度出发,全面考虑各个功能之间的相互影响、相互作用,从而形成一个稳定、耐久、高效的整体结构。

(一) 接缝防水功能实现

接缝的防水作用就是阻止地表水通过接缝下渗,侵蚀基层和路基,从而保证路面结构的承载力不降低,防止出现唧泥、脱空等病害。要想达到持久的防水效果,就必须建立多层次、复合型的密封体系。

1. 第一道防线是填缝材料有效密封。这是最直接也是最重要的防水措施。选

择粘结力强、弹性大、耐久性好的填缝料，并且配合合理的嵌缝构造，才能保证防水效果。在高速公路等对路面性能要求严格的地方可以采用二次锯切工艺，形成上宽下窄的储料槽，在槽底设置背衬材料，槽内上部灌注高性能填缝料。不仅可以改善填缝料的形状系数，减小填缝料在拉伸、压缩时的内部应力，而且可以大大提高密封的可靠性、耐久性。

2. 第二道防线是接缝构造的排水设计。单纯依靠填缝料来实现长期的完全防水，在工程实践中是不可行的。必须考虑到填缝料局部失效的极端情况，所以必须设置此辅助防线。核心就是设计出有效的排水通道，使路面结构内部有排水通道。在路面基层中设置透水性良好的材料层，将该材料层与横向排水系统连接起来，一旦有水渗入接缝，就能迅速排出路面结构之外，避免水分在基层内滞留。

3. 基层防水层的辅助隔离，在一些对防水要求极高或者降雨量充沛的地区，在混凝土面层板下方、基层之上再加一层防水隔膜，作为最终的保障。虽然此法成本较高，但是它可以从根本上杜绝水分渗入路基深层，对保证路面结构在恶劣环境中长期稳定起到非常重要的作用。采用材料密封、构造排水、辅助隔离三者相结合的多重防水设计，可以保证接缝的防水功能在全寿命周期内一直有效。

（二）接缝传荷功能实现

接缝的传荷作用对于保证路面结构的整体性、行车平顺性起着非常重要的作用。高传荷能力可以明显减小板边、板角处的应力，有效地防止错台、断角等结构破坏的发生。该功能的完成主要是靠传力杆系统和基层支撑相互配合。

传力杆系统是横向接缝传荷的主要装置。光圆钢筋组成的传力杆，由于本身具有抗剪、抗弯能力，可以将荷载从受力板传给相邻板，使两块板共同受力、同步变形。其传荷效率受到多种因素的综合影响，直径、间距、顺直度、与缝壁的垂直度、防腐涂层的完好性等都会影响传荷效率。精确的施工是保证传力杆系统正常运转的根本保证，任何微小的安装偏差都会使传荷效率大大降低，甚至造成严重的应力集中。

骨料嵌锁作用同样具有一定的传荷能力，接缝张开度较小时更为明显。当横向缩缝早期用假缝引导开裂时，其凹凸不平的骨料颗粒可以啮合来传递部分剪力。但是随着时间的推移以及接缝反复开合，嵌锁作用就会磨损退化。因此，在长寿命路面设计中，不能完全依靠骨料嵌锁，必须设置传力杆作为主要传荷装置。稳定而牢固的基层对传荷功能的实现也起到辅助的作用。高强度的半刚性基层或者

贫混凝土基层,能为板边缘提供更加均匀、可靠的支撑,减小板的挠度,从而间接提高接缝整体传荷性能。

（三）接缝变形协调功能实现

接缝的变形协调功能,就是让混凝土板在温度、湿度变化的时候,能相对自由地伸缩,同时利用内部构件的巧妙约束,把变形控制在合理范围之内,避免产生过大的内应力。该功能的实现就是接缝设计当中最困难的一环,它要求在“自由伸缩”和“有效约束”两者之间寻找完美的平衡。

横向缩缝、胀缝的设计就是控制混凝土板温度变形的�主要方法。缩缝是预设假缝,人为削弱板体断面,使混凝土收缩时在此处产生有规律的断裂,把无序、宽大的收缩裂缝变成有规律、均匀的控制性接缝。胀缝是设置在桥梁、构造物等处的较宽缝隙,填塞可压缩的胀缝板,为板体高温膨胀时留出足够的空间,防止路面拱起、挤碎破坏。传力杆在胀缝、缩缝处均需保证一端可以自由滑动,不能影响板体的正常伸缩变形。

纵向接缝的变形协调主要依靠拉杆来实现。拉杆设置在一定程度上可以控制纵缝的过大张开,但是拉杆自身的设计也必须充分考虑变形协调性。拉杆的长度、直径必须经过计算,保证其有足够的抗拉力,同时拉杆自身也应具有一定的弹性变形能力,不能因完全刚性的约束而在混凝土板内产生过大的应力集中。采用引导释放与柔性约束相结合的方式,可以很好地协调混凝土板的变形,把潜在的破坏性能量以可控的方式释放和管理起来,从而保证整个路面结构长期稳定、安全。

第四节 功能层施工质量与控制要点

水泥混凝土路面的功能层直接承受行车荷载和环境作用,功能层质量的好坏直接影响路面使用性能、耐久性和行车安全舒适性。因此,在长寿命路面建设中,必须对功能层各项质量指标进行精细化控制,并且要贯穿施工全过程。

一、功能层施工质量要求

为了使长寿命路面达到设计使用寿命和性能要求,功能层施工必须达到严格的质量要求。这些要求是后续所有施工控制措施的最终目的,是对于路面的几何形状、结构尺寸、材料内部性能等主要方面具体的要求。

（一）平整度控制要求

路面平整度是反映行车舒适性、安全性好坏的重要指标，也是决定路面结构动荷载大小的关键因素，对路面的使用寿命起着长远而深远的影响。良好的平整度能大大减小车辆行驶时的冲击荷载，有效地减缓路面结构疲劳损伤的积累速度。在长寿命路面设计思想中明确提出初始即平顺、长期保平顺的要求，即施工阶段就要创造出极高的初始平整度，为路面性能的长期保持打下坚实的基础。

具体的控制要求一般用国际平整度指数来作为评价标准。对于高速公路等高等级道路，新建水泥混凝土路面的国际平整度指数要求非常高，一般初始值不大于 1.0m/km，示范工程中要求达到 0.8m/km 或更低。这就要求路面在纵向上要具有很高的平顺性，不能出现影响车辆平稳行驶的颠簸、跳动。激光引导的滑模摊铺机等高精度摊铺设备，是达到高标准的技术保证。

局部平整度的控制也不能忽视。一般用 3m 直尺检测，任意位置的最大间隙不能超过规定的允许值，如 2mm 或 3mm。该控制措施能消除短波长凹凸不平的现象，防止瞬间冲击的出现，对接缝、构造物连接处平整度的控制更显得重要。施工过程中模板安装精度、摊铺后精细抹面、振捣提浆的均匀性控制，都是保证局部平整度达到要求的重要环节。

（二）厚度控制要求

功能层厚度的保证，是路面结构具有足够的承载能力、抗疲劳性所必需的条件。厚度直接影响板体的刚度和应力分布情况，哪怕是厚度上的微小偏差也会给路面长期性能带来不利的影响。因此，对功能层厚度的精确控制是长寿命路面施工质量控制的重要环节之一，其目的就是满足设计要求的基础上，实现厚度均匀、准确。

厚度控制要求就是严格控制设计厚度的偏差。施工时绝不允许出现负偏差，即实际厚度小于设计厚度。负偏差直接削弱板体结构强度，使板在荷载作用下产生的弯拉应力增大，超过板的抗弯拉强度，大大缩短路面的疲劳寿命，是造成路面早期开裂、断板等严重病害的主要原因。规范中一般规定厚度负偏差为零或者很小的值。厚度不足处必须做专业评定，严重时应进行返工。过大的正偏差也不应该出现。虽然厚度增加在一定程度上可以提高结构强度，但是会大大增加工程成本，影响路面标高，给排水设计以及与其它构造物的衔接带来不便。因此，规范一般会规定一个合理的正偏差允许范围。厚度的均匀性也十分重要，厚度不均

匀会造成板内应力分布不均,形成应力集中区,成为结构的薄弱环节。

(三) 强度控制要求

混凝土强度是反映材料性能好坏的重要指标,也是路面抵抗车辆荷载、环境因素侵蚀能力的主要体现。功能层强度要达到设计要求的强度,并保持稳定,才能保证路面结构的安全性和耐久性。长寿命路面所用混凝土除了要达到标准龄期强度外,还要保证强度的均匀性、稳定性和长期发展的潜力。

强度的主要控制指标一般为抗压强度、抗折强度。抗压强度体现的是混凝土材料本身致密程度和综合品质,是配合比设计及施工质量控制的基本依据。抗折强度是决定混凝土板在行车荷载下抵抗弯曲破坏能力的重要因素,也是路面结构设计、疲劳寿命分析的主要参数。对长寿命路面一般要求设计抗折强度达到 5.0MPa 以上,以保证有足够的安全储备。

强度评定不能只看单个测试点的结果,而应该用统计学的方法对总体质量做出综合评价。验收标准一般要求一组试件的强度平均值不低于设计强度等级,单个试件的最低值也不得低于某一个限值。这就要求混凝土生产过程中的质量必须高度稳定,离散性小。为了达到这一目的,必须从原材料的选择、配合比的准确控制、搅拌均匀、振捣密实、后期精心养护等每一个环节都必须精益求精,保证混凝土质量的均质化,使整个路面结构具有稳定的承载能力。具体功能层施工质量控制要求如下表所示。

功能层施工质量控制要求概览表

质量要求	主要控制指标	典型控制值 / 要求
平整度	国际平整度指数	高速公路新建路面 ≤ 1.0 m/km; 示范工程 ≤ 0.8 m/km
	3 米直尺检测	最大间隙 $\leq 2\text{-}3$ mm
厚度	设计厚度偏差	不允许负偏差; 合理正偏差范围
	厚度均匀性	杜绝不均匀现象
强度	抗折强度	通常 ≥ 5.0 MPa
	强度均匀性	离散性小, 统计合格率高

二、功能层施工控制要点

高质量的功能层需要有一套系统化、全方位的施工控制体系。该体系包含从材料进场到最终验收的全部过程,在关键点处进行严格控制,以达到最小化质量风险的目的,保证工程实体达到长寿命的设计要求。

（一）原材料质量控制

原材料是构成混凝土的基础单元，其质量好坏直接决定混凝土最终性能的来源和基础。严格控制原材料的质量并做好检测工作，是保证长寿命路面功能层高性能的前提。控制要点主要有如下几点：

1. 水泥应选用质量稳定、与外加剂适应性好的高品质水泥，低碱硅酸盐水泥或专用道路硅酸盐水泥。进场水泥必须批批检验强度、安定性、凝结时间等主要指标，保证其符合国家标准和设计要求。水泥储存要做好防潮工作，并严格按先进先出的原则，严禁使用过期或结块的水泥。

2. 粗骨料应选用质地坚硬、耐磨性好、颗粒形状接近立方体、针片状颗粒含量少的玄武岩、辉绿岩或优质石灰岩等。必须对骨料的级配、压碎值、针片状颗粒含量、含泥量、泥块含量等进行严格检测。稳定的连续级配是保证混凝土工作性、密实度、最终强度的重要因素。

3. 细骨料：宜选用质地坚硬、颗粒洁净的天然河砂或者机制砂。主要控制细度模数、级配、含泥量和有害物质含量。细骨料的级配、细度模数对混凝土拌合物的和易性、泌水性及强度都有较大影响，所以应保持其稳定性。

4. 外加剂和水必须进行水泥相容性试验，严格控制外加剂掺量，保证外加剂性能稳定可靠。拌合用水必须使用饮用水或者检验合格的洁净水源，不得含有影响水泥正常水化作用的有害杂质。

（二）施工工艺控制

施工工艺是把合格的原材料转化成优质工程实体的关键过程，也是实现设计意图的过程。长寿命路面功能层施工更加强调机械化、标准化、精细化的作业，主要对工艺流程中的重要环节进行控制。混凝土拌合是质量控制链条上的第一道重要工序。必须使用自动化程度高的强制式拌合站，严格按照经过试验验证的施工配合比进行生产。利用计算机系统对各种原材料的称量进行精确控制，保证投料顺序和搅拌时间的准确，从而保证拌合物的均匀性、稳定性。出厂前应对和易性、含气量等进行检测，不合格的拌合物严禁出厂。

混凝土的运输、摊铺过程对于路面成型来说十分重要。运输过程中要采取措施防止混凝土离析和水分蒸发，保证运到摊铺现场的混凝土仍具有良好的工作性。摊铺作业是保证路面平整度、结构密实度的主要工序。应采用大型高功率的滑模摊铺机进行连续不间断摊铺。施工中必须准确控制摊铺机行驶速度、振捣棒振动

频率和插入深度、螺旋布料器运转状态,使混凝土在全宽、全深范围内得到均匀、充分振捣,排出内部空气,最终达到高度密实。

摊铺成型后表面处理、养护对路面表观质量及耐久性有重大影响。混凝土初凝前必须用专用设备对表面进行精细抹平处理,以获得极高的平整度。之后必须在合适的时间对表面进行拉毛或者刻槽,形成规定的构造深度,满足抗滑性能的要求。混凝土的养护工作十分重要,必须在表面处理完成后立即开始,必须保证足够的湿润养护期,一般不少于 14 天。用喷洒养护膜或者覆盖土工布洒水等方法防止表面水分过快蒸发,保证水泥充分水化,使混凝土早期强度正常发展,有效抑制早期收缩裂缝的产生。

切缝是水泥混凝土路面施工中不可缺少的重要技术步骤,其核心目的就是人为地设置薄弱截面,使混凝土由于温度、湿度的变化产生的收缩应力在这里释放,形成规则的接缝,避免不规则裂缝的产生。切缝时间、深度、宽度必须严格控制。切缝过早,会导致缝壁啃边、骨料松动;切缝过晚,混凝土内部已经形成较大的拉应力,就会出现不规则裂缝,此时切缝就失去了其应有的意义。因此必须根据混凝土强度发展、气温、湿度等条件准确判断最佳切缝时机,一般应在混凝土达到一定强度后立即进行。切缝深度一般取板厚度的四分之一到三分之一,以确保能够引导裂缝。

(三) 施工验收控制

施工验收是对施工成果进行检验、评定工程质量,确保长寿命路面功能层各项指标符合设计和规范要求的最后一个关键环节。它既是检验最终产品的方法,又是施工全过程的有效控制和记录审查。验收工作要系统、全面,依据科学的检测数据。施工过程中必须严格地检验工序。钢筋位置、数量、固定情况的检查,模板安装平面位置、高程的复核,新拌混凝土性能(坍落度、含气量)的随机抽检等。这些过程控制措施可以保证问题及时发现并加以纠正,防止缺陷带入下一道工序,是保证最终工程质量的前提。

工程竣工后要进行全面的竣工验收检测。检测内容主要是前面所提到的各类质量要求。厚度采用钻芯法检测,路面按随机取样原则钻取芯样,测量实际厚度,以此评定厚度代表值和合格率。强度也用芯样试件的抗压或者劈裂抗拉试验来评定。平整度用激光平整度仪等自动化设备连续测量,计算国际平整度指数,用 3 米直尺检查局部平整度。还要检测路面抗滑性能、接缝施工质量、外观质量,查

看有无裂缝、掉角、错台等病害。所有的检测项目结果都要同设计规范标准进行对比，来评定合格性。对不符合要求的区段要根据严重程度采取相应的处理措施，功能性修复或者结构性返工。一套完整的竣工验收资料包括所有的原材料试验报告、混凝土配合比、施工记录、过程检测数据、最终验收报告等，都是评定工程质量、进行质量追溯、指导后期养护工作的重要依据。

第三篇 施工技术篇：工艺革新与智能管控

第八章 现代化施工工艺创新与应用

第一节 滑模摊铺施工工艺与精度控制

一、滑模摊铺施工工艺特点

（一）连续作业特点

滑模摊铺施工工艺最突出的特点就是连续性。与传统固定模板施工中分段立模、浇筑、拆模的间歇式作业方式不同，滑模摊铺机在施工过程中按照预设路线匀速前进，整个路面结构一次性连续浇筑成型。不间断的作业方式，从根本上消除了施工中断造成的横向施工冷缝。施工冷缝是传统工艺的薄弱部位，很容易受车辆荷载和环境因素的影响产生早期开裂、破坏，造成路面整体性、耐久性的损害。连续摊铺可形成均匀完整的混凝土板体，结构应力传递更顺畅，整体承载能力明显提高，为路面长期使用性能打下了良好的结构基础。

连续作业对施工组织和管理提出了更高的要求，它很大程度上依靠高效的后台保障系统。必须保证混凝土的稳定供应，即大型自动化搅拌站持续生产性能稳定、拌合均匀的混凝土，其坍落度、含气量等重要指标的波动极小。其次为运输环节的无缝对接，配备足够数量的混凝土运输车，合理调度，保证前方摊铺机始终有足够的混凝土摊铺，防止因等混凝土而停机。任何一个环节出现问题都会造成摊铺中断，影响作业连续性，最终影响路面质量。

连续作业模式对于基层质量的要求非常严格。摊铺机在基层上连续行进，基层平整度、承载力均匀性影响面层混凝土的厚度、密实度。平整、坚实、均匀的基层是滑模摊铺机稳定工作，保证路面结构尺寸准确的前提。因此，在滑模摊铺施工前必须对基层做精细化处理并严格验收，保证基层各项指标符合设计要求，为连续、高质量的摊铺作业创造有利条件。

（二）自动化程度高

滑模摊铺技术最大的优点之一就是高度集成的自动化控制系统。现代滑模摊铺机已经发展成一种复杂的机电液一体化设备，施工过程中精度控制主要依靠先进的传感器技术、强大的计算机处理系统、精密的液压自动调节机构。摊铺机上装有多个传感器，可实时检测摊铺机行驶方向、水平高程、横向坡度以及工作装置的状态。传感器采集的数据传送到车载中央控制计算机，计算机根据事先设置的路面设计参数，通过精确的算法进行实时运算，并与传感器反馈信号进行比对。一旦出现偏差，控制系统就会立刻给液压执行机构发出指令，自动调节摊铺机行驶轨迹、模板提升高度或者倾斜角度，在动态施工过程中保持很高的几何精度。

高度自动化并不只是路面线形、标高的控制，更是混凝土摊铺、振捣过程的智能化。摊铺机内部布料螺旋、振捣棒、熨平板等重要部件的工作参数，例如螺旋输送速度、振捣棒的振动频率、振幅等可以由控制系统事先设定并且自动调节。系统可以按照混凝土供应情况、摊铺速率来自动调节到最合适的参数，保证混凝土摊铺宽度上分布均匀、全厚度范围内振捣密实，避免欠振或者过振。全过程自动化控制最大程度地减少了人为因素的干扰，施工质量的稳定性、均匀性、可靠性得到了前所未有的提高，有效地避免了由于操作手经验不同造成的质量波动。

（三）施工效率优势

由于滑模摊铺工艺具有连续作业、高度自动化等特点，因此具有很高的施工效率。最直接的表现就是摊铺速度快、单日产量高。传统的固定模板施工工艺包含支立模板、浇筑混凝土、振捣、表面修整、养生、拆除模板等多道工序，工序之间互相制约，施工周期长。滑模摊铺将立模、拆模等工序整合成一个连续、移动的作业流程，去掉了复杂的立模、拆模过程，大大缩短了工序转换时间。大型滑模摊铺机理想的情况下，摊铺的速度可以达到每分钟一米至二米左右，单日可铺筑数公里长度的路面，施工效率比传统工艺高很多。

不仅施工速度效率很高，资源利用也更加集约。施工速度加快，项目总工期大幅缩短，对缓解交通压力、使高速公路尽快发挥社会效益有重大意义。机械化、自动化水平的提高极大地降低了现场施工人员的数量，尤其是对模板工、抹面工等技术要求较高的工种的需求大幅度减少，从而降低了人工成本，缓解了熟练技术工人短缺的问题。施工机械高度集成化也使得现场管理更加集中高效，减少了多工种交叉作业所造成的协调困难和安全风险。

施工效率提高也就产生了间接的质量效益。施工进度加快，混凝土在不利环境条件下的暴露时间变短，减少了由于天气突然变化给新浇筑的混凝土带来的不利影响。一次性快速成型可以保证整个板体在水化硬化过程中同步进行，减小了混凝土内部温度应力、湿度应力的不均匀性，对控制混凝土早期收缩裂缝的产生有积极作用。因此滑模摊铺的效率优势和质量优势是互相促进的。

二、滑模摊铺施工精度控制技术

滑模摊铺质量很大程度上取决于施工精度，精准的控制是路面平整、厚度均匀、线形顺畅的前提。现代滑模摊铺机的精度控制技术已经比较成熟，主要从高程、平整度、厚度三个方面来控制，以保证路面成品达到长寿命的设计要求。

滑模摊铺关键精度控制技术概览

控制目标	核心技术要点	实现方式	优势
高程	1. 传统基准线控制 < br > 2. 无基准线三维智能控制	1. 拉钢丝绳，探杆感应 < br > 2. GPS/ 全站仪定位，数字模型比对	1. 技术成熟，可靠 < br > 2. 精度高，适应复杂路段，减少人工
平整度	1. 原材料稳定与拌合物均匀 < br > 2. 摊铺机参数优化与稳定运行 < br > 3. 整平抹光装置精加工	1. 自动化搅拌站，坍落度监控 < br > 2. 匀速摊铺，振捣频率 / 振幅控制 < br > 3. 整平梁、浮动抹光板，二次精加工	减少行车动荷载，提升舒适度
厚度	1. 精确的基层控制 < br > 2. 精确的摊铺机高程控制 < br > 3. 实时监测与后期检验	1. 基层精平，高精度摊铺设备 < br > 2. 前述高程控制技术 < br > 3. 钻芯取样或无损检测	确保结构强度，避免材料浪费

（一）高程控制技术

高程控制是滑模摊铺精度控制的关键，它影响路面纵向平整度以及设计标高是否满足要求。精确的高程控制技术可以保证路面同桥梁、隧道等构造物顺利衔接，也可以满足道路排水设计要求。目前主流的高程控制技术分为传统基准线控制、现代无基准线控制两种。传统的基准线控制技术，即拉钢丝绳法，是在路面一侧或者两侧，按照设计高程准确设置引导基准线。摊铺机上装有高程传感器，

探杆一直与基准线接触,实时检测偏差。当检测到偏差时,控制系统就会使液压油缸动作,自动调节摊铺机模板的高度,保证路面高程始终跟随基准线。该方法技术成熟、可靠性高,但是基准线架设工作量大,精度容易受外界环境影响,在复杂互通立交等区域布设困难。

伴随着全球卫星定位系统、全站仪技术的迅速发展,无基准线三维智能控制技术应运而生,并已经成为高精度施工的发展方向。该技术摆脱了物理基准线的束缚,主要的工作流程有以下几个部分

1. 创建数字模型: 施工前将道路设计的三维数字模型输入摊铺机车载计算机,该模型包含路面上任意点的坐标和高程信息。

2. 实时精确定位, 在施工现场布置多台自动跟踪全站仪或者高精度 GPS 基站,对摊铺机上的接收装置进行连续测量,实时获取摊铺机在三维空间中的精确位置。

3. 偏差计算和反馈控制, 车载计算机实时测量摊铺机位置,与数字模型的设计位置进行对比,准确得到高程、坡度、平面位置偏差。

4. 自动调节: 控制系统根据偏差量,通过电液伺服阀,对摊铺机液压系统进行自动、快速地调节,使摊铺模板高度、摊铺机横坡和摊铺机方向都实时调整到三维设计模型。从上表高程控制技术来看,自动化程度高、精度不受物理线影响的高程控制技术适用复杂线段路段施工,是路面高精度、数字化的施工典范。

(二) 平整度控制技术

平整度是评价路面使用性能和行车舒适性的主要标准,对于长寿命路面来说,良好的初始平整度可以减小车辆行驶时的动荷载,延缓路面结构的疲劳破坏。滑模摊铺的平整度控制是系统工程,从备料到成型全过程都需要控制,不能只靠摊铺机末端抹平来完成。

混凝土原材料稳定、拌合物均匀是保证平整度的基础。混凝土坍落度微小的变化都会对摊铺机推送时的堆放状态、通过模板的流动性造成影响,从而引起路面局部凸起或凹陷。因此必须严格控制原材料质量,采用自动化搅拌站生产混凝土,连续检测坍落度,保证每一车混凝土的和易性一致,为摊铺机提供性能稳定的口粮。

摊铺机自身工作参数的设置以及稳定运行十分重要。摊铺机前进速度要保持匀速,与混凝土供应速度相匹配,防止速度突然变化造成混凝土堆积或者断供,

引起路面颠簸。摊铺机内部的振捣系统是保证平整度的重要环节,振捣棒的频率、振幅以及插入深度要根据混凝土特性及摊铺厚度进行优化设置,从而达到内部均匀密实的效果,避免因过度振捣造成混凝土离析。

摊铺机后方的整平抹光装置是平整度最后的保证。摊铺机后部固定着整平梁和浮动式抹光板,对初步成型的路面进行最后的精加工。整平梁的角度、压力要准确设定,刮除多余混凝土,填补低洼处。对于一些对平整度要求很高的工程,摊铺机后面还会配备纵向或者横向抹光机做二次精加工,从而最大程度地提高路面平整度。

(三) 厚度控制技术

路面厚度是决定路面承载能力、使用寿命的根本性结构参数,厚度不够会大大削弱路面的结构强度,厚度过大又会造成材料浪费、工程成本增加。滑模摊铺厚度控制技术,实质上是对路面顶面高程和基层顶面高程之间“差值”的准确控制。因此,该项技术的成功实施必须以施工精度、摊铺机高程控制精度为基本保证。

基层平整度、标高的准确性是保证面层厚度均匀的前提条件。即使摊铺机可以保证路面顶面高程绝对准确,由于基层表面不平整,铺设出的混凝土面层厚度还是会出现波动。因此,在滑模摊铺施工前必须使用高精度摊铺设备对基层材料进行摊铺,利用激光或者 3D 技术进行精平,使基层顶面平整度、高程误差控制在很小范围内。严格的基层验收是控制面层厚度的第一道关口。在此基础上结合前面提到的高精度高程控制技术,准确控制摊铺机模板的绝对高程。通过“一个精确的底”和“一个精确的面”的结合,就可以保证夹在中间的混凝土层厚度均匀。施工时会采用随机钻芯取样或者无损检测技术,对已经成型路面的厚度进行实时检测、后期检验,形成一个完整的“事前控制、事中调整、事后验证”的厚度控制闭环管理体系。

第二节 大体积混凝土连续浇筑技术

一、大体积混凝土浇筑技术要点

(一) 分层浇筑技术

分层浇筑是大体积混凝土施工的基本原则,核心就是薄层浇筑、循序渐进、整体连续。每层虚铺厚度要严格控制,一般根据振捣设备的性能及混凝土配合比

来定,一般为30~50cm。铺层过厚容易造成振捣不密实,底层容易产生空隙、薄弱层;铺层过薄会增加施工难度,还容易造成过振。科学合理地确定分层厚度,是保证混凝土内部均匀密实的关键步骤。

分层浇筑的关键是控制好上下两层混凝土的浇筑衔接时间。后一层混凝土必须在前一层初凝前浇筑完成,用振捣使之融为一体,形成没有明显界面的整体结构。间隔时间过长,前一层混凝土一旦初凝就会形成施工冷缝,严重影响结构的整体性、抗渗性,成为路面结构破坏的隐患源头。因此施工组织必须十分严密,保证混凝土供应和浇筑速度精确匹配。振捣采用快插慢拔的方法,振捣棒插入下层混凝土5cm至10cm处,以消除层间界面。振捣标准为混凝土表面不再下沉、不再冒气泡、泛出水泥浆,不能漏振和过振。

严格实行分层浇筑技术,可以防止混凝土由于自重造成骨料下沉、水分上浮等离析现象,明显提高混凝土的均匀性。逐层振捣可以有效排除混凝土内包裹的空气,提高密实度,进而提高混凝土的抗压、抗拉强度和耐久性。这是大体积混凝土浇筑作业中最基础、最重要的质量控制环节,它的执行效果直接决定长寿命路面目标能否最终实现。

(二) 连续浇筑技术

连续浇筑技术是在时间上和空间上对分层浇筑原则的延伸与保证,它的目的是在结构单元或者施工段内实现不间断的浇筑作业,彻底消除施工冷缝,保证结构的整体性和连续性。施工前要制定详细的周密的施工组织方案,对混凝土生产、运输、泵送、浇筑等环节进行统筹安排,实现无缝对接。混凝土搅拌站应具有足够生产能力,并备有备用机组以应付不时之需。运输车辆数量和调度计划要按运距、路况、浇筑速度等具体情况计算确定,使现场始终有混凝土可使用,避免因材料供应中断而造成工期延误。

浇筑作业现场组织一般用全面分层或者分段分层。大面积路面结构常用斜面分层浇筑法,即从低处开始,形成自然倾斜坡面,之后混凝土沿坡面不断推进,逐层覆盖,始终保持连续的浇筑工作面。此方法有利于气泡的排出,也利于上下层混凝土的良好结合。浇筑时泵送设备布置要合理,减少管道移动次数,保证混凝土出料点均匀覆盖整个浇筑区域。现场应备足施工人员和振捣设备,并备有备用设备,以备不时之需,保证浇筑过程连续稳定,直至该浇筑单元完工。

（三）温度控制技术

大体积混凝土的主要技术难题是来源于水泥水化反应放出大量的热量。热量在结构内部积聚，中心温度迅速升高，而混凝土表面与外界环境热交换快，散热也快。内外温差会产生巨大的温度应力，当温度应力大于混凝土早期抗拉强度时，就会产生贯穿性的裂缝，对路面的耐久性造成严重影响。

温度控制技术主要目的在于主动干预混凝土从浇筑至养护全过程的温度场变化，核心措施为“降温与保温”并施，以降低混凝土内部最高温升和内外表面温差。浇筑前降温措施是降低混凝土入模温度。具体方法有：砂石骨料喷水或遮阳覆盖以降低日晒温度；拌合时用冷却水或直接加入片冰，这是最直接有效的降温途径。

浇筑过程中温度控制依靠混凝土中预埋冷却水管网来完成。循环水流可以持续带走水化反应所产生的一些热量，有效抑制混凝土内部温度的峰值。冷却水管布置、循环水流量、水温等均要通过热工计算来确定。施工中采用埋设温度传感器的方法，对温度进行实时监测，动态调整冷却方案，保证核心温度一直处在设计控制范围之内。

浇筑完成后保温主要控制混凝土降温速度，特别是表面降温速度，以减小内外温差和温度梯度。一般用多层塑料薄膜、土工布、保温棉被等材料严密覆盖混凝土表面，减小热量损失。保温养护时间较长，混凝土内外温差降到安全范围（一般小于二十五摄氏度）时，才能逐步去除保温层。经过这些综合措施之后，温度场就会得到有效的控制，从而避免温度裂缝的产生。

二、大体积混凝土裂缝控制措施

（一）温度控制措施

温度控制是大体积混凝土防止裂缝的主要、最直接的方法。本质就是利用主动技术手段控制混凝土内部温度场，使产生的温度应力始终小于混凝土在相应龄期的抗拉强度。这就需要从减少热量来源、控制温度变化两个方面入手，建立一套完整的温控体系，并贯穿于施工的全过程。

具体的温度控制措施可系统地归纳为以下几个关键方面，详情见大体积混凝土温度控制措施表：

大体积混凝土温度控制措施表

措施类型	实施阶段	主要方法与作用
降低水化热	原材料优化	选择低热水泥，掺入粉煤灰、矿渣粉等，延缓放热速率。
降低入模温度	浇筑前 / 拌合时	骨料遮阳、喷淋降温，使用冷却水或片冰拌合，夜间浇筑。
主动散热	浇筑中	预埋冷却水管网，循环带走内部水化热，抑制温度峰值。
保温保湿	养护期	表面覆盖保温材料，控制降温速度，减小内外温差，避免表层裂缝。

大体积混凝土裂缝的有效控制要依靠全方位的温度控制手段，包括优化原材料以减少水化热、准确控制浇筑时的入模温度、在浇筑时主动散热和养护期加强保温保湿。这些措施要贯穿混凝土浇筑和养护的全过程，才能有效地控制温度场，从而达到精确控制裂缝的目的。

（二）材料优化措施

优化混凝土原材料组成和配合比是实现低收缩、高抗裂性能的内在基础。精心选择并合理配伍不同的组分，从源头上降低混凝土的收缩潜能，提高混凝土的抗裂能力。重点是水泥、掺合料、骨料和外加剂的系统优化。水泥品种上，应选用水化热低、收缩性小的水泥，如中热硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥。控制水泥用量，在保证强度、耐久性的基础上尽可能减小单位体积混凝土水泥用量，这是降低水化热和化学收缩的根本途径。

配合比设计时，要加入足够数量的优质矿物掺合料，Ⅰ级或者Ⅱ级粉煤灰、S95 级以上的磨细矿渣粉等。掺合料不仅能部分代替水泥，减少水化热，还能明显改善混凝土的工作性，减少泌水，提高后期强度和抗化学侵蚀的能力，并有效降低干缩、温度收缩。骨料的优化也不能忽略，应选择级配良好、粒形圆润、质地坚硬的粗骨料，尽可能提高粗骨料的粒径和含量，形成坚固的骨架结构，有效约束水泥石的收缩变形。砂率的选择要经过精心的试配，达到最好的密实度和工作性。

化学外加剂的使用，给配制高性能抗裂混凝土提供了一种行之有效的途径。采用高效减水剂或者聚羧酸系高性能减水剂，可以降低水胶比，在保证流动性的前提下，大大减少水分蒸发引起的干燥收缩。适量加入微膨胀剂，可以在混凝土硬化初期产生补偿收缩作用，在早期建立微压应力来抵消或者减小收缩拉应力，从而成为预防收缩裂缝的关键技术方法。复合使用聚丙烯纤维或者钢纤维，能在混凝土内部形成三维乱向支撑体系，有效地抑制塑性收缩裂缝的产生和发展，明显提高混凝土的韧性以及抗冲击能力。

（三）构造措施

构造措施就是通过合理的结构布置，即设置钢筋、接缝等来适应或引导混凝土的变形，把不可避免的收缩、温度应力转化为无害或者可控的裂缝。高速公路水泥混凝土路面中，合理设置构造钢筋能较好地控制裂缝宽度，保证传力。路面板中，尤其是板的中上部，应布置足够数量的温度收缩钢筋网。这些钢筋本身不能阻止裂缝产生，但当混凝土开裂的时候，它们能承受拉应力，把裂缝分散成许多细小无害的裂缝，使裂缝宽度不再增大，保持骨料嵌锁作用，从而维持路面板整体承载力。

设置合理的接缝也是一种重要的构造措施，其本质就是人为制造一个薄弱断面，事先设定裂缝出现的位置，使板中产生有规律的、可控的裂缝，而不是随机的裂缝。普通水泥混凝土路面要根据气候条件、混凝土性能、板厚等条件科学计算，合理设置横向缩缝和纵向缩缝。缩缝间距和深度要精心设计，使板体在该处自由收缩，释放大部分收缩应力。连续配筋混凝土路面采用相反思路，在路面板中布置高比例（0.6%至0.8%）的纵向钢筋，迫使路面板产生许多间距很小的（1米到2米）细小横向裂缝。这些裂缝被钢筋强力约束，宽度很小，不会影响路面性能，从而达到以裂止裂的效果，取消了常规的横向接缝，给人们提供更平顺舒适的行车体验。

第三节 钢筋网定位与自动化植入技术

一、钢筋网定位方法与技术

（一）支架定位法

支架定位法又叫垫块法，是钢筋网定位最传统、最直观的方法。此方法在浇筑混凝土之前，先在基层上放置一定数量的水泥砂浆垫块、塑料支架或者专用的钢筋支架（俗称“马凳”），然后将预制好的钢筋网片架设在支架上，使它达到设计标高。该方法操作简便，设备要求低，技术普及率高，成本低，适合施工规模小或者不具备大型机械化设备的工程项目。施工人员可以直接观察、调整钢筋网的位置，操作比较灵活。

但是支架定位法的固有缺陷也很明显。支架在混凝土板内形成不连续界面，

会成为应力集中点或者潜在的薄弱处。在重载交通的作用下,支架处容易产生微裂缝,并且会蔓延。在混凝土浇筑和振捣时,钢筋网、支架很容易发生位移、倾倒或下陷,造成最后钢筋保护层厚度不达设计要求,不能保证其定位的准确性、一致性。布设支架属于劳动密集型作业,会增加人力成本,影响整体施工进度,不能满足高速公路大规模、快节奏的建设需求。

(二) 悬挂定位法

悬挂定位法属于精度较高的钢筋网布置方法。一般使用可移动龙门架或者横跨模板上方的桥式结构作为作业平台,在平台上设置吊钩、卡具或者可调节悬挂装置,将整张钢筋网片按照设计标高悬吊在预定位置。待钢筋网位置准确调整并固定之后,再从钢筋网下方或侧面泵送浇筑混凝土。此方法把钢筋网定位和基层状况完全分离,从而有效地避免了由于基层不平整或者支架位移造成的定位偏差。

该方法最大的优点就是定位精度高、定位稳定。钢筋网是被动悬吊的,在混凝土浇筑过程中不容易发生较大位移,能较好地保证保护层厚度的均匀性、准确性。同时由于板体内部无预设支架等异物,使混凝土结构整体性、均质性得到保证,对提高路面结构耐久性大有裨益。

悬挂定位法定位精度高,但是也存在不足。此方法需要使用龙门架或者桥式悬挂设备,增大了设备投入以及现场安装调试的复杂性。悬挂定位法是分段、静态的,浇筑时需要配合悬挂装置的移动,施工效率低,影响工程进度。与连续作业的滑模摊铺工艺相比,悬挂定位法是分段、静态的,浇筑时需要配合悬挂装置的移动,施工效率低,影响工程进度。设备的存在会对混凝土的布料、振捣作业造成一定的影响。

(三) 自动定位法

自动定位法是伴随着滑模摊铺技术的发展而产生的先进定位工艺,一般与自动化植入技术相结合,代表了目前路面施工技术的前沿。该技术装备在大型滑模摊铺机上,用机载自动化控制系统完成钢筋网铺设位置的实时检测和动态调整,保证高速、连续摊铺过程中钢筋网一直处于理想位置。

自动定位技术高度依赖于先进的传感与控制系统。

1. 传感与测量系统,滑模摊铺机上装有激光、超声波或者全球定位系统等高精度传感器,这些传感器实时测量摊铺机相对于基准线(或者数字地形模型)的

位置和高程，同时监测新浇筑混凝土的表面标高。这些数据给钢筋网定位提供准确的空间参照。

2. 控制和执行系统，中央控制器根据传感器采集的数据以及预先设定的钢筋网设计深度，通过液压或者电力驱动的执行机构，自动调节钢筋网送入或者植入装置的高度和姿态。闭环控制系统可以对基层的不平整、摊铺的微小变化进行实时补偿，从而实现钢筋保护层厚度的厘米级或者毫米级精准控制。

此方法最大的创新之处在于，把钢筋网的定位工作由静态、离散的人工操作转变为动态、连续的自动化流程，极大地提高了施工效率和定位精度，明显减少了人为错误。它与自动化植入技术相结合使用，是建设高质量、高效率、长寿命高速公路水泥混凝土路面所必须采取的途径。

二、钢筋网自动化植入技术

（一）自动化植入设备选择

自动化植入装置一般作为大型滑模摊铺机的一个功能模块。选择时必须与摊铺机型号、摊铺宽度、摊铺速度和工程设计的钢筋类型（焊接钢筋网片或连续钢筋）相适应。目前主流设备分为两类，钢筋网压入装置和传力杆自动插入装置。对于长寿命路面所用的连续配筋或者结构钢筋网，主要采用前者。

选择自动化植入设备要考虑以下几点。首先是设备的兼容性，植入装置必须能和主机的液压系统、电气控制系统无冲突的对接，实现同步控制。其次就是设备的植入能力，即最大植入深度、对不同规格、间距钢筋网的适应性、振动系统克服不同坍落度混凝土阻力的能力。设备的结构刚度和稳定性也不能忽略，在连续作业高频振动下不能出现变形，否则会影响植入精度。

现代植入装置一般都有较高水平的智能化。它们一般带有独立的控制单元，可以接受摊铺机发出的位置、标高等信号，再通过自身的振动框架、导向机构来控制钢筋网的下沉。部分先进的设备还装有自动送料系统，可以从前方的料车上自动抓取整张钢筋网片送到摊铺区，使施工更加连续、自动化，大大减少人工操作。

（二）植入工艺参数

精确控制植入工艺参数，才能使钢筋网植入成功，不破坏混凝土的匀质性。主要的工艺参数有混凝土拌合物性能、植入装置的振动频率和振幅、植入速度。这几个参数相互影响、相互制约，必须协调调节才能达到理想的植入效果。

混凝土拌合物工作性，特别是坍落度，对植入工艺有直接影响。坍落度过小，混凝土太干，植入阻力大，不但耗能大，还会使钢筋网弯曲变形甚至无法达到设计深度；坍落度过大，混凝土流动性太强，植入阻力小，但是钢筋网容易在自重和振动作用下下沉过多，植入后孔洞难以有效填充，在钢筋下方形成空隙，严重影响钢筋与混凝土的握裹力。所以混凝土的坍落度必须在一定的范围之内。

振动频率和振幅是植入装置最重要的两个工作参数。高频、低幅的振动才能取得最好的植入效果。高频振动能使钢筋周围的混凝土瞬间产生局部液化，形成一个短暂的流态区，大大减小下行阻力，使钢筋顺利下沉。较低的振幅只对钢筋周围的小范围产生影响，不会对大范围的混凝土造成扰动，防止骨料离析，保证混凝土整体均匀性。这些参数要依照混凝土实际配合比，环境温度，钢筋规格，经由现场试验来精确确定并加以改良。

植入速度要和滑模摊铺机行驶速度相一致。植入框架垂直下插速度和水平移动速度要和摊铺速度保持动态同步，使钢筋网垂直方向平稳下沉、水平方向与路面中心线保持平行。如果植入速度跟不上摊铺速度，会造成钢筋网拖拽、变形；反之，则会干扰前方混凝土摊铺作业。

钢筋网植入工艺关键参数调节表

参数类别	具体参数	影响效果	调节要点
混凝土性能	坍落度	过小: 阻力大, 易变形; 过大: 易下沉, 握裹差	严格控制在设计范围, 兼顾施工性和植入性
振动装置	振动频率	过低: 液化效果差; 过高: 可能影响周边	宜采用高频, 实现局部液化, 降低阻力
	振动幅度	过大: 扰动大, 骨料离析; 过小: 效果不佳	宜采用低幅, 局限振动影响范围
植入过程	植入速度	过慢: 影响效率, 可能固化; 过快: 拖拽变形	与摊铺速度同步, 保证平稳下沉和精确对位

从上表可见，钢筋网植入工艺参数的精准调节对保证植入质量至关重要，需要综合考虑各方面因素。

（三）植入质量控制

钢筋网自动化植入质量控制属于施工全过程的一项系统性工作，其目的在于保证钢筋网最终位置的精度、结构的完整以及周围混凝土的密实。控制要点是包含设备调试、施工过程监控和成果检测的全部过程。

施工前准备及调试属于质量控制的前提。正式摊铺前,必须对滑模摊铺机及其植入系统传感器、控制器、执行机构进行全面标定、测试。在试验段上进行试铺,用开挖检查或无损检测的方法,检验在一定的工艺参数下,钢筋网最终的植入深度和位置是否符合设计要求。这时就要反复调节振动频率、振幅、速度等参数,找到最合适的组合。同时还要检查钢筋网片平整度、焊接点强度、尺寸等,以保证符合规定要求。

施工过程中实时的检测对保证质量稳定起着非常重要的作用。操作人员应该时刻注意摊铺机控制界面显示的各种参数,例如植入深度、振动状态和设备运行姿态等等,一旦发现有异常的数据或者趋势,就要立即做出反应并作出相应的调整。还应派专人到植入装置后面去检查混凝土表面,观察有无因为植入而产生的裂纹、拖痕或者浆体异常泌水等现象。这些表面现象就是内部植入质量出现问题的直接反映,及时发现和处理可以避免大量质量缺陷的产生。最后,采用地质雷达等无损检测手段,在混凝土初凝后,对钢筋网埋设深度进行大面积、快速的扫描,得到连续的深度剖面图,对钢筋网埋设质量进行全面评价并做好记录。

第四节 接缝施工与表面纹理深度控制

一、路面接缝施工工艺

(一) 切缝施工工艺

切缝是形成路面接缝的第一步,主要是控制切缝时间、深度,诱导裂缝,防止不规则裂缝的出现。切缝作业一般用湿切法,用大功率切缝机操作,保证切口平直、边缘完整。切缝时机的选择是工艺控制的关键,过早切割会造成切口边缘出现啃边现象,破坏骨料和水泥砂浆的结合;过晚则混凝土内部已经形成了较大的拉应力,在预定位置之外出现随机裂缝,使切缝失去意义。一般情况下,当混凝土强度达到设计强度的25%~30%时,是切缝的最佳时间。现场可采用指压、观察等经验方法进行综合判断,切割时不掉边、不啃边为标准。

切缝的深宽也要严格控制。缩缝的切割深度一般取板厚的 $1/3 \sim 1/4$,且不小于最小值,以使应力集中于此处,形成一条规则的断裂面。纵缝的切割深度要求同缩缝一样。对高速公路等要求较高的路面有时采用二次切缝工艺,即先进行一次窄缝切割诱导裂缝产生,待混凝土强度提高后再做第二次扩缝形成设计要求填

缝槽口。该方法可获得比较规整的缝壁。切割时要保证切缝的平直度和连续性，切缝线应与路面中心线垂直或者平行。切割完成后要立即用高压水枪冲刷干净缝槽内的混凝土残渣和泥浆，并用压缩空气吹干，为之后的填缝工序提供干净干燥的作业面。

整个切缝过程必须连续进行，不能有间断。施工时应制定详细的切缝计划，对大面积摊铺的作业面采取跳刀法等方法合理安排切割顺序，尽快释放大面积板块的内应力，将随机裂缝的风险降到最低。切缝机刀片的磨损情况要实时监控并及时更换，防止由于刀片磨损造成切缝深度不够或者切口质量下降。质量控制人员对切缝时间、位置、深度、宽度、切口质量实行全过程跟踪检查，保证每一项工序都符合设计及规范要求。

（二）填缝施工工艺

填缝是接缝工艺中的关键部分，它的主要目的就是封缝防雨、防杂物侵入，从而防止路基侵蚀产生唧泥、脱空等毛病。并且可以防止硬物在缝隙里被挤压，造成板边热胀冷缩时破裂。填缝质量的好坏直接关系到路面的水密性及耐久性，因此必须使用性能优良的填缝料并严格按照施工程序进行。高速公路常用填缝料为聚氨酯类或硅酮类常温施工型密封胶，这些材料弹性好、位移能力强、耐候性好，能很好地适应板体的胀缩变形。

填缝前的准备工作至关重要，它直接影响填缝料与混凝土缝壁的粘结效果。

1. 对已切好的缝槽进行二次清理，用钢丝刷清除缝壁上浮浆和杂物，再用高压无油压缩空气将缝槽内尘土吹干净，保证缝壁坚硬、干净、干燥。

2. 在缝槽底部装入直径合适的闭孔泡沫塑料背衬杆。背衬杆的作用是控制填缝深度，形成理想的“上窄下宽”的填缝料形状，使填缝料在拉伸、压缩时具有最佳的力学性能，节约填缝料用量。背衬杆的直径要比缝宽大 20% 到 30%，这样才能嵌入缝内，保证规定的深度。

3. 在要求粘结性能高的地方，还要在缝壁上涂刷专用底漆，以增大填缝材料与混凝土的粘结力。

准备工作完成之后就可以开始灌缝。用专用灌缝枪或灌缝机，把填缝料均匀、连续地灌入缝槽中。施工时必须保证枪嘴或者泵嘴深入缝槽底部，由下至上缓慢移动，防止裹入空气形成气泡。填缝料要填充饱满，表面比板面略低 1~3mm，防止车辆碾压时被磨损或混凝土膨胀时凸出板面。灌注完成后要立刻将填缝料表面修整成平滑、微凹的弧面。

整个填缝工作在干燥、温度适宜的天气下进行,严禁在雨天或预计有雨的天气下施工。双组分填缝料必须严格按照厂家说明的比例混合,搅拌均匀,混合后的材料必须在规定的时间内使用完毕。施工完毕后填缝料需要有一段固化养护期,在此期间不得有车辆荷载作用在其上,直到其完全固化、达到设计性能为止。

(三) 接缝养护工艺

水泥混凝土路面接缝是整个路面结构中最薄弱的地方,它的长期性能的保证,必须依靠系统、及时的养护。接缝养护的主要目的就是保证填缝料完整、有效,防止接缝损坏,从而保证路面整体结构的稳定性。接缝养护工作要贯穿整个公路运行的全过程,并实行定期检查、维护制度。检查的重点是看填缝料有无老化、开裂、脱落、下沉、与缝壁脱粘等现象,接缝边缘混凝土有无剥落、啃边、挤碎等损伤。

若发现填缝料有轻微破损或者功能降低的情况,就要对局部进行修补。修复工作就是清除失效的填缝料和缝内杂物,然后按照标准填缝工艺重新灌缝。破损范围大、填缝料普遍老化的路段应该做全面的接缝重灌处理。清除旧填缝料时可以使用专用工具或者机械,在操作过程中要保护好接缝边缘的混凝土不被破坏。对已经出现轻微啃边、掉角的接缝,先用专用的环氧树脂砂浆等修补材料修补破损处,待修补材料强度足够时再做填缝。及时养护可以有效地延长接缝和整个路面结构的使用寿命,也可以减少后期大范围维修的费用。

二、路面表面纹理深度控制技术

(一) 纹理深度要求

路面表面的纹理按波长、振幅不同分为微观构造和宏观构造。微观构造由集料表面粗糙度决定,宏观构造是在混凝土硬化前通过施工工艺在表面制作而成的。长寿命路面所关注的纹理深度,主要是宏观构造深度。合适的构造深度可以形成轮胎和路面之间的快速排水通道,减小雨天行驶水膜的产生,从而避免水滑的发生,保证高速行驶的安全。足够的纹理深度可以给摩擦提供良好的摩擦力。

按照有关规范的要求,高速公路水泥混凝土路面的构造深度一般控制在0.7~1.1mm。该范围的确定是考虑了抗滑性、行车噪音、轮胎磨损、路面耐久性等多方面因素后得出的。构造深度过小,抗滑性能和排水能力差;构造深度过大,则会大大增加行车噪音和轮胎磨损,构造凸起部分也更容易被磨耗,从而影响其

耐久性。施工时一般用铺砂法或者激光构造深度仪来检测评定纹理深度，保证它满足设计要求。

（二）纹理均匀性控制

获得合格的纹理深度固然重要，但保证路面宽度和长度方向上纹理的均匀性也十分重要。纹理不均匀会造成路面各处抗滑性能的不同，给行车安全埋下隐患。实现纹理均匀性的重要因素就是控制好混凝土的工作性能，对纹理制作工艺进行精细化管理。混凝土的坍落度、泌水率、凝结时间等各项指标要一致，这是形成均匀纹理的前提。如果混凝土拌合物的稠度波动大或者出现严重的离析、泌水等现象，后续纹理制作工序就很难得到均匀的效果。

目前，高速公路水泥混凝土路面表面纹理制作主要有拉毛、刻槽两种。拉毛工艺是用特制的拉毛帚，在混凝土表面还没有完全凝结时，沿与行车方向垂直或者顺着行车方向匀速拉动，使表面形成细密的纹理。为了保证拉毛纹理的均匀性，必须严格控制拉毛的时间。过早拉毛时新浇筑的混凝土表面砂浆会回流，不能形成有效的纹理；过晚时混凝土表面已硬化，很难拉出足够深的纹理。拉毛帚的宽度、刷毛的硬度、长度、拉毛时的角度和速度都必须保持不变。使用机械化的拉毛设备可以降低因人的因素所产生的不确定性。

刻槽工艺就是使用专门的刻槽机，在混凝土强度达到一定值之后，在路面上刻出一定深度的沟槽。该方法形成的宏观纹理更深，排水效果也更好。刻槽的均匀性是由机械设备的精度、稳定性决定的。施工时应控制槽的深度、宽度、间距，保证其符合设计要求。

拉毛与刻槽两种工艺在特点、适用性上各有侧重，具体差异可见下表所示。

路面表面纹理制作方法比较表

特性 / 方法	拉毛工艺	刻槽工艺
施工时机	混凝土初凝前，尚有塑性时	混凝土达到设计强度后
成型原理	塑性状态下表面拉刷	混凝土硬化后切割成型
纹理深度	0.7~1.1mm (宏观构造)	3~6mm 深，6~9mm 宽 (视设计)
耐久性	相对较差，易磨损	较好，纹理持久
排水性能	良好	优异，有效抗水滑
施工成本	较低	较高
特点	操作灵活，设备简单，适用于初期抗滑需求	长期抗滑性能卓越，噪音控制效果好，但对施工精度要求高

不管采用拉毛还是刻槽，施工区域都应有良好的组织和规划，保证作业的连续性和一致性，不能在路面上留下杂乱无章的纹理过渡区。

（三）抗滑性能保证

路面抗滑能力就是纹理控制的目的。优良的抗滑性能是由宏观构造和微观构造共同作用形成的。宏观构造就是拉毛或者刻槽形成的一系列纹理，其主要作用就是在雨天迅速排出路面积水，保证轮胎与路面凸起部分接触良好。微观构造就是由粗骨料表面粗糙度所直接产生的摩擦力。所以要想保证路面长期稳定的抗滑性能就需要从这两方面着手。

宏观构造耐久性是由混凝土表面强度、耐磨性决定的。高质量的混凝土配合比、充分的振捣密实、严格的养护工艺是保证表层强度的基础。养护及时有效，可以防止混凝土表层失水过快产生微裂缝，从而大大提高混凝土的耐磨性、抗剥落能力。微观构造的保持要依靠使用高品质、高磨光值的粗骨料。磨光值就是指骨料抵抗车辆荷载反复磨光作用，保持表面棱角、粗糙度的指标。长寿命路面中应选用磨光值高、硬度大的玄武岩等硬质岩石作粗骨料，保证路面使用多年后仍能保持一定的微观构造，达到持久抗滑的目的。

第九章 施工全过程质量控制体系

第一节 原材料进场与生产过程质量控制

一、原材料进场质量检验

为确保原材料质量的可靠性，主要原材料的进场检验项目和控制要点可见下表。

主要原材料进场检验项目一览表

材料类型	关键检验项目	主要控制指标 / 要求	备注
水泥	品种、强度等级、出厂日期	符合设计及规范要求；出厂 3 个月需复验	优先选用硅酸盐水泥，关注碱含量
	强度 (3d/28d 抗压抗折)	符合设计强度等级	
	安定性、凝结时间	安定性沸煮法合格；初、终凝符合规范	安定性不合格严禁使用
粗骨料	颗粒级配、压碎值、磨耗值、冲击韧性	连续级配；压碎值符合高强要求	优先选用两三级破碎，控制有害物质
	含泥量、泥块含量、针片状含量	符合规范要求；针片状颗粒越少越好	影响和易性与耐久性
	细度模数、含泥量、泥块含量、云母含量	细度模数 2.3-3.0；杂质含量低	影响强度与粘结，关注碱活性
	含水率	动态调整拌合用水量；雨季高频检测	实时补偿，确保水胶比稳定
外加剂	减水率、含气量、凝结时间差、强度比	符合产品说明及规范；批次复验	氯离子、碱含量是禁忌；需相容性好
	密度、pH 值、外观 (沉淀 / 分层)	液体外加剂特有，确保无异常	储存条件严格，防误用混用

(一) 水泥质量检验

水泥是混凝土中最重要的胶凝材料，水泥性能稳定与否，直接关系到混凝土强度、耐久性、工作性的好坏。高速公路长寿命路面项目宜选用质量稳定、信誉良好的大企业水泥，以硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥为优。水泥进场时必须核对

品种、强度等级、包装或散装仓号、出厂日期等信息。施工单位要认真核对水泥的出厂合格证、检验报告,报告中必须包含强度、安定性、凝结时间等主要项目。

所有进场的水泥均需复验,复验取样应符合规范要求,袋装水泥以不超过 200 吨为一批,散装水泥以不超过 500 吨为一批,每批次均应取样。为了保证代表性,应从不少于二十个不同的部位取等量的样品混合,总取样量不得少于 12 千克。复验项目主要是水泥强度(3 天、28 天的抗压、抗折强度)、安定性、初凝、终凝时间。安定性检验一般用沸煮法,出现裂缝或变形即为不合格,不得使用。对于出厂日期超过三个月的水泥,即使有合格证也要复验,根据复验结果决定是否使用或是否降级;对于已经结块、变质的水泥,必须作废。

实际使用中还要注意水泥的碱含量。工程区域存在碱骨料反应风险时,必须使用低碱水泥。不同厂家、品种、批号的水泥要分别存放,并应有明显的标记,不能混用,保证混凝土性能的均一性。建立水泥进场台账,对每一批次水泥的来源、数量、进场时间、检验结果、使用情况等都进行记录,实现质量全过程可追溯。经由上述系统的检验与管理,可以有效地保证水泥这种重要材料的质量,为配制高性能混凝土打下可靠的基础。

(二) 骨料质量检验

骨料在混凝土中所占的体积比例高达 70%~80%,骨料的物理化学性质对混凝土强度、耐久性、变形性能乃至经济性都有很大的影响。高速公路长寿命路面混凝土对骨料要求很高,除了自身要有高强度、高洁净度、良好的级配外,还要具有抗磨耗、抗冻融、低碱活性等性能。骨料进场检验是保证骨料这些特性的重要步骤,必须严格控制。

粗骨料(碎石)应该用质地坚硬、耐磨、抗冲击性强的岩石经轧制加工而成。为了得到更好的颗粒形状,最好采用两级或三级破碎工艺生产的碎石。检验项目主要有

1. 颗粒级配,应采用连续级配,使骨料颗粒能紧密堆积,减小空隙率。这不仅可以提高混凝土的密实度、强度,还可以有效地节约水泥用量。

2. 物理力学性能中压碎值是衡量骨料抵抗压碎能力的指标,高强度等级混凝土对它要求更严格。同时还要检测磨耗值、冲击韧性等其它重要的性能。

3. 有害物质含量:严格控制含泥量、泥块含量、针片状颗粒含量。针片状颗粒会大大降低混凝土的和易性,增加拌合用水量,从而对硬化混凝土的强度和耐

久性产生不良影响。

细骨料（砂）应选用洁净、质地坚硬、级配良好的中砂，细度模数宜控制在 2.3 到 3.0 之间。检验项目为：

1. 控制砂的含泥量、泥块含量和云母含量。杂质会削弱水泥石和骨料之间界面的粘结力，从而降低混凝土的整体强度。

2. 碱活性：存在碱骨料反应风险地区，骨料必须做碱活性试验，并选用非活性骨料。

3. 砂的含水率是影响混凝土拌合物和易性、用水量稳定性的重要因素之一。因此需要对砂的含水率进行频繁检测，雨季检测频率应提高到每小时一次，甚至每两小时一次，根据检测结果及时调整施工配合比中的拌合用水量。

所有骨料按照不同的级配、规格分批放置在硬化场地，设置有效的隔离设施防止不同规格的骨料混杂。雨季应该用覆盖的方法防止含水率剧烈变化。严格的骨料筛选与检验保证骨料质量稳定可靠，是实现混凝土高性能、长寿命的重要保证。

（三）外加剂质量检验

外加剂是现代高性能混凝土不可缺少的一部分，可以显著改善混凝土的和易性、力学性能和耐久性。高速公路长寿命路面混凝土一般会用到高性能减水剂、引气剂、缓凝剂等许多种外加剂。由于外加剂掺量虽然小，但是作用大，其品质的微小波动都会对外加剂性能产生巨大影响，因此进场检验十分重要。

外加剂进场时必须核对产品合格证、出厂检验报告、有效期。报告中应包含减水率、含气量、凝结时间差、抗压强度比值、氯离子含量、碱含量等各项主要性能指标。对液体外加剂还要检测其密度、pH 值，有无沉淀、分层、结晶等异常现象。施工单位对每批次的外加剂都应进行复验，复验项目应根据外加剂的种类确定。减水剂需要复验其减水率以及坍落度保持能力；引气剂要检验在标准试验条件下含气量的情况；缓凝剂检验它延缓凝结时间的效果。

抽样、组批应按照相关标准严格进行。掺量较大的外加剂一般以 50 吨或 100 吨为一检验批，掺量较小的相应缩减批次。取样后应当密封保存，一份用作试验，另一份作为备查留样。复验中若出现氯离子含量超标、减水率不够、与水泥相容性不好等任何一个指标不符合规范要求的情况，该批次外加剂一律不准使用，必须立即清退出场。外加剂储存时应放在密闭容器内，做好防晒、防冻、防

潮等防护工作,标识清楚品名、批号,防止误用、混用。严格进场验收、复验、储存,保证外加剂质量及性能稳定,给混凝土性能优化提供有力的技术保障。

二、混凝土生产过程质量控制

(一) 配合比控制

混凝土配合比是决定混凝土强度、耐久性、和易性的主要技术参数,相当于混凝土的配方。长寿命路面混凝土配合比设计除了强度之外,还要考虑低水胶比、高密实度、良好的和易性、长期耐久性。配合比控制要从试验室精确设计、试配开始,再到生产过程中严格控制并进行动态调整。

生产前技术人员要将经过试配验证、批准的理论配合比准确无误地录入到搅拌站的中央控制系统中。输入时应该由专人进行二次校核,杜绝任何人为的输入错误。生产过程中配合比控制的重点就是计量的精确性。所有的计量设备,即水泥、骨料、水、外加剂的称量系统,必须定期由法定计量部门检定、校准,保证精度在允许误差范围之内。操作人员要对计量数据实施实时监控,一旦出现超出范围的情况,就要立即停止生产,找出原因,加以改正。

骨料含水率的补偿属于一个十分重要的动态控制点。搅拌站必须有可靠的含水率测定设备,专人定时检测砂、石骨料的含水率;天气变化时应提高检测频率。检测结果要及时反馈给控制室操作员,以便调整拌合用水量,准确扣除骨料所含水分,使实际水胶比与设计值一致。根据实时数据动态调整,是保证混凝土批次之间性能稳定的关键措施,对于保证长寿命路面的均匀性具有非常重要的意义。

(二) 搅拌过程控制

搅拌是使混凝土各组分材料均匀混合,形成具有良好和易性的拌合物的重要工序。搅拌质量的好坏直接影响混凝土的均匀性、强度、耐久性。长寿命路面混凝土多用强制式搅拌机生产,搅拌过程的控制点主要是投料顺序、搅拌时间、过程监控等。

为了保证搅拌均匀,必须要制定合理的投料程序。常用方法为砂裹石工艺,一般做法是先投入部分水、粗骨料、水泥,搅拌均匀后,再投入砂、剩余水泥、外加剂,最后补充剩余水分。这样的顺序使水泥浆更好地包覆骨料表面,显著提高拌合物的均匀性。搅拌时间也是一个重要的控制参数,需要通过试拌来确定最佳的搅拌时间。搅拌时间过短会造成物料混合不均,容易造成混凝土离析、强度

离散性增大；搅拌时间过长会增加能耗，还会造成骨料过度破碎或者引起不必要的坍落度损失。搅拌时间要严格按照施工规范、试配结果设定，由控制系统自动执行，操作人员不得随意更改。

搅拌过程中操作员应随时注意搅拌机的工作情况，即搅拌电流、声响等，以判断搅拌是否正常。生产前、生产中应检查搅拌机，及时清除搅拌筒壁及叶片上粘附的混凝土硬块，保证搅拌效率及有效容积。生产第一盘混凝土时，试验员必须进行开盘鉴定，检测坍落度、含气量、拌合物外观等，待各项性能指标合格后方可继续生产。依靠标准化的操作程序以及严格的过程控制，保证每一盘混凝土都达到均匀、稳定的高质量状态。

（三）运输过程控制

混凝土从搅拌站出机到浇筑地点需要运输。此过程质量控制的核心就是保质和保时，保证混凝土拌合物均匀性、和易性不劣化，并按时完成运输和卸料。长寿命路面工程施工路线长，运输组织与协调要求更高。

运输车辆应优先选用密封性好、搅拌能力强的混凝土搅拌运输车。运输过程中搅拌罐应保持 2~4 转 / 分钟的慢速匀速转动，防止混凝土离析、泌水和沉淀。严禁在运输途中随意给罐内加水，这是造成混凝土强度降低、耐久性变差最常见的、最严重的违规操作之一。调度部门应按照施工现场浇筑速度、路况、天气等各方面的情形，科学规划好发车顺序和间隔，保证车辆到达现场之后能快速完成卸料工作，防止因为长期停置造成混凝土坍落度过大。

运输时间属于控制的重要指标。混凝土出机到卸料完毕的时间必须在规定的时间范围内，一般为 90 分钟到 120 分钟；高温季节或者远距离运输时，应缩短时间。当环境温度超过 30 度或者运输距离较远时，在配合比设计阶段就要加入缓凝剂或者高效保坍剂，以延长混凝土的可操作时间。每辆运输车均应随车携带运输小票，小票上必须注明出机时间、配合比编号、方量等信息，供现场管理人员核对和控制卸料时间。通过建立高效的调度系统、严格的时间管理，使混凝土在最好的状态下到达浇筑现场。

一、主要施工工序质量标准

（一）模板安装质量

模板是混凝土路面板的模具，模板的安装质量好坏直接影响路面板的几何尺

寸、边缘强度、相邻板块的传荷能力。模板安装必须牢固、准确,才能保证浇筑出的混凝土板边缘整齐、线形流畅,为后续接缝施工提供良好的条件。模板安装的质量好坏直接决定着路面平整度和结构的完整程度,哪怕有一丁点的偏差也会造成路面啃边、错台的问题,对行车舒适性和路面寿命造成影响。

模板安装质量标准首先要体现在模板自身物理性能上。施工时应采用刚度大、平直度高的钢模板,模板表面应平整光滑,无锈蚀,无变形。使用前模板应彻底清理,均匀涂刷隔离剂,防止混凝土粘结,保证拆模后板体边缘光洁。模板之间要紧密牢固地连接,接缝处用合适的材料封堵,防止混凝土浇筑、振捣时漏浆造成蜂窝、麻面等表面缺陷。

模板的几何位置精度是控制的重点。模板安装时平面位置、高程均应按照设计图纸精确放样。顶面高程允许误差范围很小,直接影响路面平整度。模板线形应保持平直,直线段的平直度偏差必须符合规范要求,以保证路面边缘线形美观、行车视线诱导效果好。模板的稳固性也很重要,必须用足够的支撑桩进行固定,在摊铺和振捣设备的冲击下不能产生任何位移、变形或者下沉,从而给混凝土板的精确成型提供坚实的边界约束。

(二) 钢筋安装质量

长寿命水泥混凝土路面结构里,钢筋的恰当布置对控制裂缝、提高板块整体性、改善荷载传递效率起决定性的作用。钢筋安装质量同路面板抗裂性能、耐久性有关系,也会影响接缝的传荷能力以及路面长期的服务水平。因此钢筋选材、加工、现场绑扎定位等每一个环节都必须严格按照质量标准执行,保证钢筋在混凝土板中起到预期的结构作用。

钢筋的安装质量控制涵盖了材料、加工和定位三大方面。

1. 材料及加工

进场钢筋无论是传力杆还是拉杆,其品种、规格、强度等级及力学性能均应符合设计要求和国家有关标准,必须有出厂合格证和复试报告。钢筋表面应清洁,无锈蚀、无油污等。传力杆必须平直,加工时切口应平整,无毛刺。

2. 钢筋安装位置的准确性

这是质量控制的关键所在,也是结构功能得以实现的前提。传力杆必须平行于路面中心线和路面表面安装,其中心位置应处于板厚中央。间距、水平度偏差要在规定的许可范围内。拉杆要准确定位在板厚中央,与接缝垂直。为了保证位

置准确，在施工中一般会使用专门的支架或者安装设备进行固定，保证混凝土浇筑时不发生位移。

3. 钢筋的混凝土保护层厚度

这是决定钢筋耐久性的主要因素。保护层太薄，钢筋容易生锈甚至导致混凝土胀裂；保护层太厚又削弱了它的结构作用。因此施工时必须保证钢筋网片及各种杆件的保护层厚度符合设计要求，一般通过设置足够数量和强度的垫块来保证。

（三）混凝土浇筑质量

混凝土浇筑是水泥混凝土路面施工的重要环节，混凝土浇筑质量好坏直接决定路面强度、耐久性、平整度、抗滑能力等各项指标。从混凝土拌合物的生产运输、到现场摊铺、振捣、做面、养护，整个过程是连续的，环环相扣的作业流程。任何一个步骤的疏忽都会造成路面出现裂缝、蜂窝、麻面、平整度差等永久性的缺陷，不能达到长寿命路面的设计预期。

混凝土拌合物质量是基础。拌制混凝土所用的水泥、砂、石等原材料必须检验合格，配合比要经过严格的试配确定，保证其工作性、强度、耐久性符合设计要求。混凝土应采用集中搅拌站进行搅拌，搅拌时间要足够，保证拌合物均匀一致。运输时防止离析、水分蒸发，运输时间要控制在初凝前。

摊铺应力求均匀、连续。使用滑模摊铺机或者轨道式摊铺机时，要保持匀速前进，保证摊铺厚度的均匀性。摊铺时要随时注意混凝土的坍落度变化，根据现场情况微调，保证摊铺后的混凝土密实、平整。在摊铺钢筋混凝土板时，应特别注意不要扰动已经安装好的钢筋。

振捣是保证混凝土密实度的重要工序，必须做到快插慢拔，防止过振或者漏振。振捣应在混凝土中产生均匀的振动波，把内部的气泡排出，使骨料均匀分布，从而得到最大的密实度和强度。振捣完毕后立即表面整平、抹光。第一次抹光是为了找平，消除高低不平之处；二次抹光在混凝土接近初凝时进行，目的是进一步提高表面平整度和密实度。

表面拉毛处理是路面抗滑构造的最后一步。在合适的时间里，用专用拉毛机对路面表面进行构造，保证构造深度均匀，纹理清晰，才能获得持久的抗滑能力。拉毛后应立即养护，采用喷洒养护剂或者覆盖塑料薄膜等方法防止水分过快蒸发，保证水泥的水化作用充分进行，这是控制早期收缩裂缝、保证强度正常增长的必要措施。

二、施工质量验收标准要求

施工质量验收是对已完成的、水泥混凝土路面成品进行的最后检验与评定，是判断工程是否达到设计要求和使用寿命的决定性环节。验收标准是对路面各项性能指标的量化要求，主要从外观质量、尺寸偏差、核心性能指标三个方面对路面进行全方位的评价，以保证交付使用的高速公路路面具备安全、耐久、舒适的品质。

高速公路水泥混凝土路面主要验收项目及标准示例

验收项目	主要内容	典型要求	检测方法
外观质量	表面平整度、有无裂缝、蜂窝麻面等	无明显缺陷，裂缝宽度、数量在允许范围内	目测、三米直尺
尺寸偏差	平整度、板厚、宽度、高程、接缝构造	路表最大间隙、板厚负偏差、宽度、高程偏差符合规范	三米直尺、钻芯法、全站仪
性能指标	弯拉强度、抗冻融性、抗磨耗性、抗滑性	达到设计弯拉强度、抗冻融循环次数、磨耗量、构造深度 / 摆式摩擦系数	抗折试验、快冻法、磨耗试验、构造深度仪 / 摆式仪

（一）外观质量要求

外观质量是路面施工水平最直接的反映，它和行车的安全、舒适、耐久性有直接的关系。高质量的外观可以给驾驶员带来良好的视觉感受，也可以反映出路面结构本身的缺陷较少，从而具有更强的抵抗环境侵蚀和荷载破坏的能力。因此，路面外观验收标准要求非常高，目的就是消除所有影响使用功能和寿命的表面病害。

验收标准中规定混凝土路面板表面要平整、坚实，不能有影响结构性能和使用功能的缺陷。板面不能有裂缝，无论是收缩裂缝还是结构裂缝，因为裂缝会成为水分、有害物质进入的通道，加快路面结构的破坏。表面不应有蜂窝、麻面、露筋、脱皮、起砂等现象，这些缺陷说明混凝土施工质量存在问题，振捣不实、浆体流失、养护不当等都会严重影响路面的强度和耐久性。板块边角应完好无损，不得有啃边、掉角等现象，保证接缝处的传荷能力及结构完整性。接缝切割应平直，缝壁完整，填缝料应饱满、平顺，与板面基本齐平，以保证接缝的水密性及正常的伸缩功能。

（二）尺寸偏差要求

尺寸偏差是评价路面施工质量的标准，也是决定路面平整度、行驶舒适度、

结构受力均匀性的关键。严格控制尺寸偏差，对路面板几何形状达到设计意图、避免应力集中、防止早期损坏都有很重要的作用。如上方高速公路水泥混凝土路面主要验收项目及标准示例所示，验收标准对路面各项几何尺寸的允许偏差范围都做了明确规定，这些标准是保证长寿命路面实现其设计功能的前提。

尺寸偏差的验收标准涵盖了多个方面，每一项都有明确的量化指标。

1. 平整度

这是衡量汽车行驶舒适性的主要标准。一般采用 3 米直尺或者连续式平整度仪检测，要求路面最大间隙不能大于规范规定的限值。高速公路平整度标准更加严格，保证高速行车平稳安全。

2. 板体厚度

直接决定混凝土板的承载力。用钻芯法随机抽取芯样进行测量，厚度不得小于设计值，允许有一定的负偏差，但不能超过规范的限制，防止路面由于强度不够而过早破坏。

3. 宽度、高程

路面宽度、纵断高程也必须达到一定的精度。宽度不能小于设计值，保证车道的通行能力。纵断高程偏差控制对路面整体纵坡、排水效果有影响。

4. 接缝构造

接缝的顺直度、切缝深度、宽度为验收重点。接缝不直会破坏美观，也会对传力杆的工作状态产生影响；切缝深度不够则不能有效地引导裂缝产生，从而可能会导致板体开裂；缝宽不合适则会使填缝料的作用不能充分发挥。

（三）性能指标要求

性能指标是评定水泥混凝土路面内在质量及长期服务能力的基本依据，也是判断其是否达到“长寿命”标准的主要标准。外观、尺寸等属于外部特征，性能指标直接反映混凝土材料的力学性能和耐久性。验收时必须使用标准的试验方法检测评定这些指标，保证路面结构具有足够的承载能力以及抵抗各种破坏因素的能力。

最主要的性能指标就是混凝土的强度。路面混凝土强度一般用 28 天龄期弯拉强度来评定，因为该强度最能直接反映板体抵抗行车荷载引起的弯曲破坏的能力。验收时，用现场制作或钻取的试件做抗折试验，检验其是否达到或大于设计弯拉强度值。抗压强度属于间接控制指标，也需要做检测评定。强度评定结果必

须达到统计学意义上合格的标准，单组试件达标还不行，整体强度分布要稳定、均匀。

耐久性长寿命路面的又一主要性能指标，尤其对严寒或者特殊环境地区来说。抗冻融性、抗磨耗性都属于这一类。抗冻性一般用快冻法进行评定，要求混凝土在经过一定次数的冻融循环之后，相对动弹性模量和质量损失率都在允许范围内。抗磨耗性即路面在长时间的行车摩擦下，其表面质感和抗滑性维持的时间。路面的抗滑性也是一项重要的使用功能指标，一般通过检测路表的构造深度或者摆式摩擦系数来评定，以保证路面在潮湿的情况下仍能有足够的摩擦力，保证行车安全。

第三节 常见施工缺陷成因与防治措施

一、路面常见施工缺陷类型

（一）裂缝类缺陷

裂缝是水泥混凝土路面最常见的、危害性最大的一种缺陷。根据其形成时间和原因可以分为塑性收缩裂缝、沉陷裂缝、干燥收缩裂缝和结构性裂缝等。

塑性收缩裂缝大多发生在混凝土终凝前，即在塑性阶段，多为龟甲网状，没有明显的规律，深度比较浅。直接原因是混凝土表面水分蒸发速度大于泌水速度，使混凝土表面产生拉应力。高温、低湿、大风等恶劣气候条件都会加大水分蒸发，是造成此类裂缝的主要外部因素。混凝土水灰比过大、水泥用量过多、骨料含泥量高等配合比问题都会增加其发生的风险。

沉陷裂缝一般在混凝土浇筑后几小时内出现，走向与钢筋或者预埋件位置大体一致。由于新浇筑的混凝土在自重作用下会沉降，当受到钢筋、模板或者硬化下层混凝土的约束时，在约束物上方就会产生拉应力，形成裂缝。基层或垫层不均匀沉降、钢筋保护层厚度不足、振捣不密实造成局部沉陷，这些都会导致沉陷裂缝。此类裂缝虽然出现较早，但是会贯穿整个板厚，对路面结构的整体性造成危害。

干燥收缩裂缝是混凝土硬化以后，内部水分慢慢减少，体积收缩变形被限制而产生的。裂缝发展比较缓慢，但是持续时间长，一般呈贯穿板厚的横向或纵向

裂缝。其严重程度受混凝土配合比、水泥品种、骨料性质、养护条件、环境温湿度等的影响。水灰比大、水泥用量多、细骨料中石粉含量高都会增大混凝土的收缩倾向。养护不到位或者不及时，都会造成表面水分迅速蒸发，加剧收缩裂缝的产生和发展。

结构性裂缝主要是由于荷载作用、温度应力、地基不均匀沉降等外界因素所引起的，一般是在路面通车运营后才出现，形态与应力分布状态有关，是路面结构承载能力不足或者设计不当的直接体现。

（二）蜂窝麻面类缺陷

蜂窝麻面类缺陷主要影响路面外观质量及表面耐久性。

蜂窝指混凝土结构内部或表面出现的蜂巢状孔洞，孔洞内部部分或者全部被石子占据，没有水泥砂浆填充。主要原因是混凝土拌合物离析。运输距离过长、运输工具颠簸、卸料高度过大等都会导致砂浆和石子分离。施工操作不当也是原因之一，振捣不密实或者漏振，使部分区域的气泡和水分不能排出，骨料堆积；模板支撑不牢固或者有缝隙，浇筑振捣时水泥砂浆流失。蜂窝缺陷会使混凝土的密实度、强度降低，减弱钢筋的锚固力，让水分和腐蚀性介质渗透进来，进而大幅度降低路面结构的耐久性。

麻面就是混凝土表面出现了大小不等、分布不均的小凹坑，形成了粗糙的麻点状外观。麻面一般深度较浅，不会出现粗骨料裸露的情况，与蜂窝不同。其形成原因有：模板表面不清理干净，有干硬水泥块或者杂物；模板隔离剂涂刷不均匀或涂刷过多，形成油污隔离层；混凝土拌合物中气泡太多，振捣时不能完全排出而聚集在模板表面。尤其是当混凝土的黏聚性差、含气量不大的时候，气泡就容易在表面上积聚起来。麻面虽然对结构强度的影响远小于蜂窝，但是它破坏了路面的平整度和美观性，降低了表层的抗磨耗能力、抗冻融能力，还会影响路面标线的附着效果。

（三）平整度差缺陷

路面平整度是评价高速公路服务质量好坏、行车舒适度好坏的主要指标。平整度不合格缺陷对行车安全、舒适性都会造成不利影响，同时还会增大车辆和路面之间的冲击力，使得路面寿命缩短。该缺陷指路面局部凹陷、凸起或者有波浪起伏超过规范允许的偏差。

造成平整度差的原因贯穿于施工的全过程，是一个系统性问题。

1. 基层平整度控制不严, 基层平整度是面层平整度的基础, 基层本身存在较大的凹凸不平, 即使面层施工再精细, 也很难完全消除影响, 最终导致路表出现相应的起伏。

2. 模板安装固定不到位: 模板标高控制不准、线形不顺直、接头不平顺, 或者混凝土浇筑时支撑不牢造成模板移动、下沉, 都会导致路面板边缘或接缝处出现高差。

3. 摊铺和振捣设备性能和操作问题: 滑模摊铺机传感器失灵、基准线设置错误、摊铺速度与振捣频率不匹配等都会造成路面标高、厚度的波动。采用轨道摊铺机时, 轨道安装精度非常重要。

4. 混凝土拌合物均匀性差: 不同批次的混凝土坍落度波动大, 摊铺时虚铺厚度不均, 经振捣密实后产生不同的沉降量, 从而造成不平整。

5. 收面、抹光工艺控制不严: 人工收面时, 操作人员技术水平及责任心都会产生影响。刮尺使用不当、过度抹压或抹压时机不准确, 都会造成局部凹凸不平。

平整度缺陷的控制要从基层做起, 对模板、摊铺、振捣、收面等每一道工序都要进行精细化管理。采用激光摊铺机、三维控制系统等先进的设备, 可以大幅度地提高平整度控制的水平, 减少人为因素的影响。事后精细打磨只能做一定的修补, 成本高、效果差, 所以过程控制才是保证平整度的根本方法。

二、常见施工缺陷防治措施

(一) 缺陷预防措施

预防是控制施工缺陷最经济、最有效的手段, 要从原材料、配合比设计、施工工艺、养护等全过程进行严格把关。

原材料是混凝土质量的源头, 必须实行严格的进场检验制度。复核水泥的安定性、强度等级; 对砂、石的级配、含泥量、针片状含量、压碎值等指标进行系统检测, 保证其满足长寿命路面混凝土的要求。不同种类的原材料要分类堆放, 不得混用, 保证材料供应的稳定性。

混凝土配合比的设计是避免产生缺陷的主要技术。应采用低水灰比、低水泥用量的原则, 改善砂率。保证工作性、强度的前提下, 通过科学试验选择出最优配合比来减小混凝土的收缩潜能。合理使用高效减水剂、引气剂等外加剂, 改善混凝土的和易性、抗泌水性、抗冻融性能, 从根子上减少裂缝、蜂窝麻面的出现。

施工前必须进行配合比的现场验证，根据现场原材料实际状况微调配合比，保证拌合物性能稳定。

施工过程精细化管理，是落实预防措施的保证。从拌合开始就要保证计量准确、搅拌均匀。运输过程中要防止离析及水分蒸发。摊铺环节无论是滑模摊铺还是固定模板施工，都必须保证摊铺均匀、连续，不能出现厚薄不均的情况。振捣是保证混凝土密实度的重要工序，振捣器插入间距、振捣时间和深度要严格控制，快插慢拔，防止欠振或者过振。平整度控制要保证基准线或者轨道的准确稳定，摊铺机匀速前进，收面工序紧跟其后，用长刮尺做初步找平，再进行精细抹光。

养护是混凝土强度增长、性能形成的保证，也是防止早期裂缝的手段。混凝土终凝后应立即开始养护，保证养护的持续性、有效性。喷洒养护膜的方法会形成一层致密薄膜来阻止水分蒸发。高温、大风天气下还需配合覆盖、搭设防风棚等方式，创造一个稳定的、湿润的养护环境。养护时间必须满足规范要求，不小于 14 天，长寿命路面建议养护 28 天以上使混凝土性能得到充分发展。

（二）缺陷修补方法

对已经产生的施工缺陷要根据缺陷种类、严重程度及对路面性能的影响选择合适的修补方法，及时恢复路面功能。修补工作的基本原则是找出原因、对症下药、选用相容性好的材料、施工工艺可靠、保证修补质量及耐久性。

常见路面缺陷修补技术一览

缺陷类型	严重程度	常用修补方法	主要材料
裂缝	宽度 < 0.2mm	表面封闭	环氧树脂，聚氨酯
	宽度 0.2~1.5mm	压力灌浆	环氧树脂，聚氨酯浆液
	宽度 > 1.5mm 或错台	开槽填缝	高弹性密封胶，聚合物砂浆
	网状裂缝 / 局部破碎	局部挖除重浇	混凝土
表面缺陷	浅层麻面	聚合物砂浆薄层修补	聚合物水泥砂浆
	较深蜂窝	凿除、填补	无收缩灌浆料，环氧砂浆
平整度差	局部凸起	专用打磨机磨平	金刚石磨盘
	局部凹陷	薄层罩面	聚合物改性水泥砂浆，薄层罩面材料
	较长路段普遍存在	大面积精铣刨或超薄磨耗层罩面	沥青混合料，特种薄层材料

针对不同缺陷，可见上表，可采用以下具体的修补技术：

1. 裂缝修补: 宽度小于 0.2mm 的表面无害裂缝不做处理或者只做表面封闭, 防止水分下渗。宽度在 0.2~1.5 毫米的裂缝采用压力灌浆法, 注入环氧树脂或聚氨酯浆液使裂缝重新粘结。宽度大于 1.5mm 的严重裂缝或已经错台的裂缝一般采用开槽填缝法, 在裂缝处开挖一定深度和宽度的沟槽, 清理干净后, 填入高弹性密封胶或者聚合物砂浆。对网状裂缝或者局部破碎处, 需要局部挖除, 重新浇筑混凝土, 即小板块修复。

2. 表面缺陷修补: 浅层麻面用聚合物水泥砂浆薄层修补, 刮涂、抹平恢复表面平整光滑。对较深的蜂窝必须将疏松的混凝土、骨料全部凿除, 直至露出坚硬密实的基层, 再用高压水或压缩空气将界面清洗干净, 界面用环氧树脂处理, 最后用与原混凝土强度等级相匹配的无收缩灌浆料或环氧砂浆填充、压实、抹平。

3. 平整度差的修复: 局部凸起最常用的方法是用专用打磨机磨平。金刚石打磨机可以准确地去除高出的部分, 也可以改善表面的抗滑性能。局部凹陷用薄层罩面法, 先对凹陷处拉毛或铣刨, 涂刷界面剂, 再铺一层高性能聚合物改性水泥砂浆或薄层罩面材料, 精细找平。平整度差的问题如果分布在较长路段, 则需要大面积的精铣刨或超薄磨耗层罩面处理, 从而全面提高路面的行驶质量。

修补工作结束后, 也应对修补部位进行养护, 使修补材料强度、性能充分发展, 保证修补结构与原路面结构良好结合。所有的修补工作都应该有详细的记录, 供以后的质量评价和技术改进使用。

(三) 质量改进措施

质量改进是持续的、系统的, 依靠经验的总结、问题的剖析来不断改进管理体系、施工技术, 从根本上杜绝和减少缺陷的发生。这就需要创建起一个闭环的质量管理与反馈机制。施工单位应建立完善的质量保证体系, 确定各级管理人员和操作人员的质量责任, 将质量目标逐级分解到人。

推行标准化施工、首件认可制是重要的改进手段。把成熟的施工工艺、操作规程、质量标准等固化为标准作业指导书, 对所有施工人员进行培训考核, 保证各项操作的规范性、一致性。每道关键工序展开前都必须做首件工程或者试验段施工。对首件工程各项质量指标进行全方位检测和评价, 总结施工参数, 检验施工组织及工艺的可行性, 发现问题及时调整优化方案, 待所有指标均达到要求后再全面展开施工。这样做可以有效地防止施工过程中出现系统性的、重复性的质量问题。

采用先进的技术和信息化管理手段来提高质量控制水平,是行之有效的办法。混凝土生产中使用全自动控制,对原材料的计量、拌合时间进行精确控制,在摊铺时使用三维摊铺控制技术,对路面标高、平整度进行精确的自动化控制,用无损检测技术,如探地雷达,对路面内部结构均匀性、缺陷进行快速评价。同时建立施工质量信息管理系统,在施工过程中对混凝土坍落度、温度、振捣参数、环境温湿度等数据进行实时采集、整理和分析,使质量问题可以追溯,给以后工艺优化提供数据支持。通过对缺陷数据进行统计分析,找出主要矛盾和薄弱环节,制定出针对性的改进计划,形成实践、分析、改进、再实践的良性循环,不断促进高速公路水泥混凝土路面施工技术的发展。

第四节 质量追溯与文档管理体系构建

一、工程技术文档管理体系

(一) 技术档案管理

技术档案属于工程项目重要的知识资产,对技术档案进行系统的、完整的管理是项目成功的重要保证。高速公路水泥混凝土长寿命路面工程的技术档案管理,要从项目开始直到竣工验收为止的整个过程,对档案进行收集、整理、分类、归档、保管等。核心是保证所有的设计文件、技术规范、施工方案、图纸会审记录、设计变更、技术交底等技术文件全部保存完整,形成有条理、便于查找的档案目录。管理过程中要指定专人或者专门部门负责,采取实体档案和电子档案相结合的方式进行管理,保证档案的物理安全和信息安全。

技术档案的管理不是静态的资料存放,而是动态的更新和利用的过程。工程进行中应当建立完善的档案借阅、复制、归还规定,所有的档案流转均需详实记录,不能遗漏重要技术信息或者被改动。项目结束之后,这些技术档案就会成为重要的历史资料而被移交。它们既是工程竣工验收必须具备的条件,也是以后路面维修、加固、改扩建等工作的重要依据。查阅以前的设计参数、材料选用、施工工艺等信息可以为后期的养护工作提供准确的数据支持,真正实现对路面全生命周期科学化控制。

为了提高技术档案的管理效率,应该积极地使用信息化管理方法。创建项目

专属技术档案数据库,采用关键词、时间轴、工程部位等多种索引方式对海量档案资料进行快速查询、精准定位。同时利用云存储技术授权项目各参建方(业主、设计、施工、监理)在网上共同查阅、更新技术文档,打破信息壁垒,提高沟通效率。现代化的管理方法保证了技术档案的完整性、准确性、一致性,并为以后的大数据分析与知识挖掘打下了基础,使历史数据持续给未来的工程实践创造价值。

(二) 质量记录管理

质量记录是证明施工过程符合质量要求、评价施工活动有效性的主要依据,它渗透到长寿路面施工的各个环节中。质量记录管理的重点就是保证记录的真实性、同步性和完整性。原材料进场检验报告、混凝土配合比设计及试配记录、施工过程中温度、湿度、振捣、养护等重要参数的监控记录、每一道工序自检、互检、交接检记录,均应使用标准化格式,详细、清晰地填写。这些记录是过程控制的直接体现,也是判定工程质量是否合格的法定凭证。

质量记录的管理责任要落实到岗、到人。项目部应设立专门岗位,负责质量记录表格的收集、核查、整理、汇总。要求现场施工员、质检员等一线人员在完成相应的工作之后,必须即时填写相关记录,保证记录的内容和现场实际情况完全一致,不得事后补填或者伪造数据。监理工程师对施工单位提交的质控资料进行复核并签字确认,形成监督闭环。所有质量记录应按分部分项工程进行系统编目,保证其逻辑性,便于随时查阅,为日常质量检查、阶段性验收和最终质量问题分析提供可靠的第一手资料。

(三) 验收资料管理

验收资料是工程从开工到竣工各阶段质量评价的成果,也是判定工程是否达到设计和规范要求的最终凭证。管理的核心就是系统性、规范性、完整性。长寿路面工程验收资料管理要形成全过程、分层收集、审核、组卷的体系,保证所有的验收活动有据可查,所有的质量结论有充分依据。该体系的创建是项目合法合规交付的保证,也为之后运营维护提供可靠的历史依据。

验收资料管理工作应贯穿施工全过程,而不能只是在竣工前一次性整理。具体的管理措施应包括以下几点:

1. 资料分类和清单化管理:项目开始后,按照国家及行业有关标准,结合工程实际情况编制单位、分部、分项工程验收资料清单。该清单要明确每一个验收

所包含的具体文件，即质量检验评定表、隐蔽工程验收记录、功能性试验报告、影像资料等，并分发到各个相关责任单位，使他们从一开始就明确资料收集的标准和方向。

2. 过程同步收集与审核，项目管理部门要创建定时（每周或者每月）的资料上报及审核制度。施工单位按期提交已经完成的工序的验收资料，监理单位审核其完整性、规范性以后，再交建设单位复核。可以及时发现资料缺少或者填写不规范的情况，立即纠正错误，防止问题到竣工阶段再累计发生，提高竣工验收的效率和质量。

3. 隐蔽工程验收特别管理：路基、基层、传力杆设置等隐蔽工程验收资料的管理十分重要。必须实行旁站监理，隐蔽工程覆盖前都应联合检查验收，形成文字说明、测量数据、多角度照片、视频等完整的记录。这是保证隐蔽部位施工质量最有效的证据，应作为重点加以专项管理。

4. 竣工资料的系统化组卷，竣工阶段所有的过程验收资料都要进行系统的整理和组卷。根据档案管理规范的要求，把所有的文件资料分类、排序、编页码、装订成册，并编制详细的卷内目录。并且完成全部验收资料的数字化扫描，创建电子档案库，形成纸质档案和电子档案双重备份，方便长期保存和高效检索利用。

经过上述系统的管理，验收资料可以真实、完整地反映工程建设质量，也可以成为一份宝贵的工程履历。履历中详细记录了路面从“诞生”到“成熟”每一个关键节点的质量状况，为以后几十年的“健康”监测、“精准养护”提供不可替代的基础信息，是实现长寿命目标不可缺少的一环。

二、工程质量追溯系统

高速公路水泥混凝土长寿命路面建设中，传统的质量管理方式已经不能满足精细化、全过程控制的要求。工程质量追溯系统属于现代化的信息管理手段，依靠物联网、大数据、移动通信等技术的集成运用，对工程质量实施全方位、全时段的动态监控和回溯，给创建经久耐用的路面赋予了强大的技术支持。

常见质量追溯信息采集技术及应用场景

技术类型	典型应用	采集对象	采集内容
二维码 /RFID	人员识别、材料溯源	操作工人、原材料	岗位信息、作业时间、来源批次、检验状态
GPS/ 传感器	机械设备监控	摊铺机、压路机、运输车	速度、振捣频率、碾压遍数、轨迹、路线、温度
自动化系统对接	拌合站生产	混凝土拌合物	配合比、拌合时间、出料温度
移动终端	现场数据录入	施工日志、检查记录	各类现场检查、测量数据

（一）质量信息采集

工程质量追溯系统的基础就是对质量信息进行全方位、准确、及时的采集。对于长寿命水泥混凝土路面来说，信息采集范围涉及人、机、料、法、环等所有重要的要素。质量追溯信息采集技术及应用场景中，采集技术已经由原来的依靠人工手动录入转变为自动化的、智能化的。采用带有身份识别功能的芯片或者二维码技术，可以对每一个操作工人所在的岗位以及作业时间进行准确的记录。在施工机械上安装传感器和全球定位系统模块，可以实时采集摊铺机的速度、振捣器的频率和振幅、压路机的碾压遍数、轨迹等重要的作业参数。

对原材料以及混凝土拌合物的管理，信息采集就显得尤为重要。在水泥、集料、外加剂等原材料包装或者仓储处加装电子标签，可以实现对原材料来源、批次、检验状态全程追踪。混凝土拌合站的生产系统同追溯平台直接对接，对每一盘混凝土的实际配合比、拌合时间、出料温度等数据进行采集并上传，保证生产过程的透明化。运输环节中给混凝土运输车装设定位、温度感应装置，可以对运输路线、途中耗时、混凝土温度变化进行实时监测，防止由于运输延误或者温度异常造成混凝土质量下降。海量、多维的实时数据汇聚成了质量追溯的基础，给后面的数据分析、问题追溯提供真实可靠的输入。

（二）质量数据管理

质量数据管理是连接信息采集与信息应用的中心枢纽，其主要目的就是建立一个结构化、标准化、安全可靠的中心数据库，把采集到的各种异构数据进行有效的存储、处理和分析。系统平台要有很强的数据整合能力，可以接收来自不同前端采集设备（传感器、扫描枪、移动终端）以及不同业务系统（试验室管理系统、拌合站控制系统）的数据流。利用统一的数据接口、协议，对数据实施清洗、转换、标准化的处理，保证数据的一致性、可比性。

系统不单存储数据，还对数据进行数据挖掘和统计分析处理，从中发现有价值的信息。系统可以自动把某路段的混凝土板同其对应的原材料批次、生产盘号、施工班组、当天气候条件等组成一条完整质量信息链。设定好预警阈值以后，系统就会对上传的实时数据进行动态监测，当出现混凝土坍落度异常、摊铺温度过低、养护时间不够等偏差情况时，就会立即发出报警信号，把信息传递给相关管理人员，从而实现质量风险的主动预控。

数据安全、权限管理属于数据管理体系的重要部分。需建立严格的数据访问控制机制，根据项目经理、总监理工程师、施工员等不同角色及职责授予不同的查询、录入、修改权限，避免数据被越权访问或者恶意篡改。使用先进的数据加密技术，定时备份以保证核心质量数据的保密性、完整性和长期可访问性。强大的数据管理中心就如同工程的“数字大脑”，给精准的质量控制、高效的责任追溯、科学的决策分析提供核心动力。

（三）质量信息查询应用

质量信息查询应用是工程质量追溯系统价值的最终体现，它把后台庞大复杂的数据以前端友好、直观易懂的方式呈现给各级管理人员，为其日常工作提供决策支持。系统一般会提供很多查询入口，用户可以根据时间、空间（桩号）、工序、班组、材料批次等各种条件快速查找到对应的质量信息。若需要查看某一块路面板的质量档案，只需要输入该块路面板唯一的编码，系统就会显示该块路面板从原材料、混凝土生产、运输、摊铺、养护到最终实体检测的全部数据记录，形成一个清晰的“数字身份档案”。

该系统应用范围广，施工时可以利用移动终端随时查看现场作业的实时监控数据，对各个班组的施工质量进行比较分析，从而优化施工组织和工艺参数。当出现质量争议或者缺陷的时候，追溯系统可以快速找到问题的原因，明确责任主体，给处理决策提供客观公正的依据，避免了传统模式下互相推卸责任的现象。对业主、监管部门来说，利用宏观统计分析功能可以对项目整体质量状况、重要质量指标合格率分布有全面的了解，实现“看得见”的远程监管效果。从长远来看，积累起来的全生命周期质量数据，对于开展路面性能长期观测、预测模型研究、养护策略制定来说是一笔宝贵的财富，给长寿命路面的科学化、精细化管理提供前所未有的数据支撑。

第十章 机械化与智能化施工技术

第一节 智能化摊铺与碾压设备集群应用

一、智能化摊铺设备集群应用

（一）设备配置方案

智能化摊铺设备集群的配置方案要综合考虑工程规模、路面结构、工期要求、技术标准等许多因素，其主要目的就是创建起一个高效的协同作业体系。核心设备一般是大型多功能滑模摊铺机，具有自动导航和三维找平功能，不需要架设引导线就可以实现高精度的三维空间定位，自动控制摊铺厚度和坡度。辅助设备集群是以摊铺机为轴心，形成一条流畅的流水作业线。

前端配置混凝土布料设备，侧向输料皮带机或者布料螺旋负责把运输车卸下的混凝土均匀、连续地喂给摊铺机，保证摊铺作业的连续性。摊铺机内部或者侧方可以集成传力杆和拉杆自动插入装置，在摊铺过程中按预设的接缝位置精准植入钢筋，保证板块间的荷载传递效率。后端布置路面纹理加工和养护设备，自动拉毛机、喷膜养护车等紧随摊铺作业之后对路面进行抗滑构造处理和初期养护，形成一条龙式的自动化施工流程。整个集群还要配备移动式混凝土搅拌站以及足够的混凝土运输车，保证前端混凝土的稳定供应，防止由于物料中断而影响摊铺的连续性以及整体质量。

智能化摊铺设备集群配置一览

设备类型	主要功能	关键技术
核心设备	大型多功能滑模摊铺机	自动导航、3D 找平、厚度坡度自动控制
前端辅助	混凝土布料设备（输料皮带机 / 布料螺旋）	均匀连续喂料，保障作业连续性
集成装置	传力杆和拉杆自动插入装置	精准植入钢筋，提高荷载传递效率
后端辅助	路面纹理加工与养护设备（自动拉毛机、喷膜养护车）	路面抗滑构造处理、初期养护
物料保障	移动式混凝土搅拌站、混凝土运输车	稳定供应混凝土，避免中断

从表中可以得出智能化摊铺设备群依靠各个设备相互配合,达到水泥混凝土路面施工的自动化、高精度控制。

(二) 设备协同作业

智能化摊铺设备集群的协同作业是发挥最大效能的重要保障,必须要有中央控制和数据交互平台的支持。依靠物联网、5G通信和北斗高精度定位等技术,整个集群就可以成为一个有机的整体,达到信息实时共享以及作业指令同步下达。

协同作业流程具体如下:

1. 任务规划与数据下发,在施工前技术人员将路面三维设计模型、摊铺参数(速度、厚度、平整度标准)、接缝信息等施工任务包导入中央控制系统。系统随即对数据进行解析,把数据分解成各个设备具体的作业指令,通过无线网络下发到每一台智能设备的车载终端。

2. 主从协同、动态调整:摊铺时,主摊铺机根据三维设计数据及自身高精度位置信息自主导航进行摊铺。布料机、传力杆插入机等其他辅助设备以主摊铺机位置、速度为基准进行跟驰协同作业。中央控制系统根据摊铺机实际运转速度,准确控制运输车的到场时间和卸料顺序,保证混凝土供应的及时性,从而减少现场的等待、物料的堆积。

3. 状态监控和实时预警,各个设备上的传感器不断地采集摊铺速度、摊铺位置、振捣频率、混凝土温度、平整度等作业数据,并且实时上传到中央控制平台。管理人员可以借助平台的可视化界面,对施工进度和质量状况有全局的认识。当摊铺速度超限、平整度偏差过大或者物料供应出现异常等状况发生时,系统就会发出警报,促使现场管理人员迅速采取措施,从而达到对施工过程闭环控制的目的。

(三) 施工效率提升

智能化摊铺设备集群的应用大大提高了水泥混凝土路面的施工效率,在各个方面都有体现。高精度自动化控制大大地减少了传统的测量放样工作。基于三维控制技术的摊铺机不需要架设基准线,省去了繁杂的线路测量、钉桩、挂线等准备工作,大大缩短了施工准备时间,同时也减少了测量误差。从而施工队伍可以把更多的精力用在摊铺质量的控制上。

设备集群的协同作业方式改善了施工过程,保证各道工序之间衔接无缝。混凝土进场、布料、摊铺、振捣、整平、切缝、养护,整个过程如行云流水一般流

畅,最大限度地减少了工序间等待的时间。中央调度系统可以对物料运输、设备配合做出准确安排,防止了传统施工中常见的窝工现象,也防止了因为某一个环节脱节造成整个施工停滞的情况,从而保证施工的连续性、稳定性。智能化设备可以做到 24 小时不间断工作,在工期紧迫的项目里,它的高效作业能力可保证项目按时或者提前完成,从而带来巨大的经济效益和社会效益。智能系统可以对施工数据进行记录、分析,为以后施工组织改进、工艺参数调整提供数据支持,形成良性循环,从而系统性地提高项目整体管理效率、施工效率。

二、智能化碾压设备应用

(一) 智能碾压技术

智能碾压技术的核心就是利用高精度的 GNSS、加速度传感器、红外温度传感器和车载计算机处理系统等,对碾压过程进行实时监控、记录和指导。其基本原理是在振动压路机的振动轮上安装加速度计,测量压实过程中振动轮的振动响应信号,计算出与材料压实程度有关的智能压实值(Compaction Meter Value, CMV)或者其它相关指标。这些指标可以反映材料目前的密实情况。

同时 GNSS 系统用厘米级精度实时记录压路机的位置坐标,把位置信息与对应的智能压实值、碾压速度、振动频率、振幅、材料表面温度等数据绑定在一起。数据被实时传送到驾驶室内的车载显示终端上,用彩色轨迹图的形式直观地显示在操作手面前。不同的颜色代表不同的碾压遍数或者压实度水平,使操作手可以清楚地看到已经压过的区域、待压的区域和碾压不足或者过压的区域,就如同玩游戏一样按照导航图进行精准作业,有效地避免了漏压和过压。施工区域压实数据被完整记录,形成一张精细的数字化施工质量地图,给后续质量评定和追溯提供全面的数据支撑。

(二) 压实度控制

智能碾压技术可以对压实度进行全过程的、精细化的控制。传统的压实度控制一般通过试验段确定碾压工艺(碾压组合、速度、遍数),施工后随机抽点检测来验证,存在覆盖率低、结果滞后等缺点。智能碾压系统把压实度控制提前到施工过程中,实现了从点控制到面控制的转变。

系统依靠创建智能压实值同材料物理指标(压实度,模量等)之间的联系,把抽象的压实质量要求转变为具体的数字指标。试验段标定后可以得出达到压实

度 98%（或者设计要求的其它值）所需的智能压实值阈值。在正式碾压作业时，操作手的主要工作就是控制碾压遍数，保证整个作业区域的智能压实值达到或者超过该阈值。车载显示屏上显示出的压实云图能直观地体现出压实度的完成情况，未达标处一目了然，操作手可以立即补压，直至整个区域颜色一致，表明压实度达标。实时反馈机制保证压实度的均匀性，有效地克服了由于操作手经验不同、疲劳、视野盲区等原因造成的薄弱环节，保证路面基层或者碾压混凝土面层在宽度、深度上都具有相同的承载能力，为上层结构提供稳定的支撑。

（三）压实质量保证

智能碾压系统给压实质量提供多重可靠的保证。它对碾压过程中涉及到的碾压轨迹、碾压遍数、行驶速度、振动情况等主要参数进行全过程的记录和监督。管理平台可以对各项参数的合理范围进行设定，当碾压速度过快或碾压遍数不够时，系统马上会发出警报，提醒操作手、后台管理人员及时纠正不规范的操作。从源头上杜绝了影响压实质量的人为因素，即全过程控制。

系统生成的数字化压实质量地图给质量验收提供有力的依据。该图详细记录了每平方米路面压实的过程和结果，可以代替或者补充传统的抽样检测，对施工质量进行全方位的评价。监理、业主单位可以随时通过网络远程查看施工进度和质量数据，使管理透明化、高效化。所有的施工数据都会被永久的保存在云服务器上，形成完整的施工档案。不仅可以实现工程质量的终身追溯，也可以为以后道路养护维修提供重要的原始数据。当路面出现局部病害的时候，调阅该位置的原始压实数据，可以分析出病害产生的原因，从而制定出更有效的修复方案，真正实现长寿命路面全生命周期信息化管理。

第二节 施工过程信息化监控与反馈

一、施工过程信息化监控技术

（一）施工参数实时监测

施工参数的实时监测是信息化监控体系中的第一道工序，它的主要作用是用先进的传感设备、物联网技术来实现对重要施工工艺参数的连续、自动采集。水泥混凝土路面施工监测系统包含从原材料制备、摊铺压实的全部过程。在拌合站，高精度称重传感器、湿度传感器和温度传感器实时监控水泥、骨料、水、外加剂

的精确配比、含水率及拌合温度,保证每批混凝土的生产质量都能达到设计要求。数据采集频率可以达到秒级,大大保证了配比的精确性,将误差降到最低。

混凝土运输阶段在运输车辆上加装 GPS、温度探测器,全程跟踪车辆行驶轨迹、运输耗时、罐内混凝土温度变化。有效避免了运输时间过长或途中搅拌不当造成混凝土离析、初凝等问题的发生,保证混凝土到达摊铺现场时仍然保持良好的工作性能。

摊铺机、压路机均装有高精度定位模块、红外测温阵列、振动传感器、速度传感器,可以实时获取摊铺厚度、摊铺速度、摊铺温度、压实遍数、压实速度、振动频率等大量关键参数。丰富数据依靠 5G 或者专用无线网络即时上传到云端监控平台。因此工作人员无论身处中央控制室还是使用移动终端,都可以对现场每一个环节的动态有全面、细致的了解,把传统施工过程中不可见的部分,彻底转变为数字化的呈现。

（二）施工质量数据分析

施工质量数据分析属于信息化监控系统的主要智囊。它把前端采集到的大量的、多维的施工参数,转变成对施工质量状况的科学评判和深入认识。建立大数据分析平台,用先进的算法模型对实时和历史数据进行深度挖掘,从而达到施工质量动态评价、准确预测的目的。

数据分析平台首先把采集得到的原始数据清洗、整理、结构化,去除掉异常值和噪声,创建质量数据库。之后,系统会使用各种统计和机器学习算法进行分析,主要有以下几种算法

1. 离散度分析:用拌合料级配、混凝土坍落度、压实度等主要参数的标准差、变异系数来评价施工质量均匀性和稳定性。离散度越小,施工过程控制就越稳定,路面的均质性就越好。

2. 趋势分析,即对摊铺温度、压实后表面温度等参数随时间或者空间的变化情况的分析。有利于及时发现设备性能下降、材料供应不稳定、施工人员操作技能波动等潜在问题,给质量隐患的预测提供数据支撑。

3. 关联性研究:挖掘各个施工参数之间存在着怎样的内在关系,比如摊铺速度、振动频率、最终压实度这三个因素之间的多元关系,从而创建起以数据为基础的质量预测模型。不但可以加深对复杂工艺背后作用机理的认识,而且给参数优化提供科学依据。

数据可视化手段,即 GIS 地图、热力图、多维图表等,可以把复杂的分析结果直观、易懂地展示给项目管理者。在 GIS 地图上,路面压实遍数或者摊铺温度分布可以实时用不同的颜色来渲染,管理人员就能一眼看出漏压、过压或者低温摊铺的区域。可视化能力大大提高了管理人员的决策效率和准确性,使质量控制从原来的事后检测转变为事中控制、事前预防。

（三）施工风险预警系统

施工风险预警系统属于一种依靠实时监测、数据处理的主动式风险控制手段。核心目标就是提前发现造成质量缺陷或者安全事故的风险,通过多渠道、分级告警的方式,快速触发相应的干预措施。该系统按照科学设定的风险阈值对施工过程中各个参数指标进行监控,当检测数值超出或者低于设定的安全范围时,系统就会发出警报。

为了达到全方位的风险控制,就建立起多维的风险指标体系。具体的风险大类和主要风险点见下表。每一个风险指标用规范、设计标准、历史数据来确定预警阈值等级。当系统检测到某个参数达到相应阈值的时候,就会立即通过短信、手机应用程序推送、现场声光报警等多种方式,将预警信息准确地发送给现场管理人员、监理工程师乃至操作手。信息详尽,包含风险种类、超标数值、发生地点、处置方法等各方面内容,保证问题可以被及时重视并得到解决。

施工风险预警指标体系

风险大类	具体风险点 / 异常情况
材料风险	原材料指标异常,混凝土拌合比超差
设备风险	摊铺机速度不稳定,压路机振动频率异常
工艺风险	摊铺温度过低,碾压延迟时间过长
环境风险	突发降雨,气温骤降

二、施工过程反馈控制机制

（一）施工参数动态调整

施工参数动态调整就是反馈控制机制最直接、最核心的应用。它打破了以前施工参数设定后一成不变的局面,可以依靠实时数据反馈进行精细化、自适应调节。该机制目的在于形成快速闭环控制,保证施工过程一直处在最佳参数区间内,从而达到路面结构均质、耐久的目的。

当信息化监控系统检测到摊铺温度因为环境风速增加而下降过快时,反馈控制系统会立刻向摊铺机操作手或者自动控制系统发出指令,建议适当提高摊铺速度来缩短混凝土暴露时间,或者协调压路机提前开始碾压。压实度检测数据表明某处压实不足时,系统可以实时指导压路机操作手进行补压,在其驾驶室显示屏上显示补压轨迹和遍数,直到压实度满足要求为止。对于更先进的智能化施工设备,可以实现部分参数的自动调节,系统根据实时监测到的混合料离析情况,自动调节摊铺机的螺旋布料器转速,从而提高材料的均匀性。

动态调整机制有两层意思,数据辅助的人工决策调整,自动化闭环控制。目前技术阶段前者应用更广,即系统给出精确数据和优化建议,由有经验现场工程师和操作手做最终决定并执行。随着人工智能技术以及设备自动化程度的不断提升,以算法驱动的自动化闭环控制将会成为未来的一种发展趋势,它可以用更高的效率和精度去应对施工现场的复杂变化,最终达到施工过程的自愈合、自优化。

（二）施工工艺持续优化

施工工艺不断改进,就是反馈控制机制更深一层的应用。它充分利用整个项目周期内积累起来的大量的施工数据,对施工数据进行系统的复盘、深入的分析,从中提炼出可以被推广的经验和知识。不仅可以促使施工工艺、工法、管理流程不断改进升级,解决单次施工中具体问题,还可以提升整个企业乃至整个行业的整体技术水平,积累起宝贵的数字资产。

项目结束之后,信息化系统保存的所有过程数据就构成了一份完整的“数字档案”。技术团队能够对这些数据做更深层次的分析,并且可以比较不同的班组、不同的设备组合在同样的工况下的施工效率和施工质量来判断好坏,并从中发现最佳做法。通过对某类质量问题(早期微裂缝等)和施工参数(养护措施、切缝时间等)之间的联系进行分析,可以准确地找到工艺中的薄弱环节,从而对施工技术方案以及质量控制要点进行修订。依靠海量数据证据的工艺改良比单纯依靠个人经验总结更加科学可靠。最终建立企业级施工工艺知识库,把经过验证的优化成果固化成标准作业指导书、培训案例及专家系统,新项目就可以继承和利用这些宝贵的经验,站在更高的技术起点上。

（三）施工质量改进

施工质量改进属于反馈控制机制的最终目的。它依靠一套系统化的程序,保证施工中出现的任何质量问题都能够被及时纠正,并采取有效措施防止再次出现,

形成持续改进的良性循环。不仅重视对已经出现的问题进行处理,而且从根本上完善整个质量管理体系。

当信息化监控系统发出预警或者事后检测发现质量不合格点的时候,首先要启动的是质量追溯程序。由于系统记录了从原材料到路面成型全部过程的数据,所以可以迅速准确地追溯出具体哪一车材料、哪一段摊铺、哪一台设备的操作出现问题。如果某段路面强度不达标,就能立刻找到该段混凝土生产批次、水灰比、外加剂用量、现场振捣和养护记录等关键信息,从而准确找出问题根源。

查明原因之后,应当立即采取纠正措施,对不合格的部分进行修复或者返工,使其达到设计要求。更应该提出预防措施。这就需要对问题产生的根本原因进行分析,判断是由于偶然因素还是系统性缺陷所导致。如果系操作手技能不足,则应进行有针对性的培训;如果系设备维护不到位,则应完善设备保养制度;如果系施工方案存在疏漏,则必须对施工方案进行修订。

所有质量问题处理过程都会被完整地记录到质量管理平台上,就形成了一个动态更新的质量案例库。为后续质量策划、风险评估、人员培训打下了基础。至此,施工质量管理不再是静态的符合性检查,而是一个依靠数据反馈,不断进行“计划、执行、检查、处理”循环,不断自我完善、螺旋式上升的动态过程,为长寿命路面的高品质实现奠定了最坚实的基础。

第三节 3D 数字化摊铺与控制技术

一、3D 数字化摊铺技术应用

(一) 三维建模技术

三维建模技术是 3D 数字化摊铺的基础,也是 3D 数字化摊铺的灵魂。核心就是创建一个包含所有路面设计信息的高精度数字化三维模型。它不是单一的几何线,而是包含大量数据,对高速公路上每一寸路面都精确定义了它的空间坐标、设计高程、横坡、纵坡、超高、加宽及板块厚度等主要参数。模型的建立一般以计算机辅助设计软件生成的原始设计文件为依据,经过专业数据处理软件的转换和优化,最后得到摊铺设备可以直接读取并执行的格式。

模型精度的好坏直接影响到最终路面成品的质量。建模时对设计数据进行严

格校核,保证所有几何参数连续、平顺。对于路线中的缓和曲线、竖曲线、匝道等复杂几何路段,在建模的时候就要进行细密的处理。高质量的三维模型可以准确无误地把设计意图传达给施工机械,从源头上消除传统施工中图纸理解、测量放样等人为因素造成的误差。它代替施工现场所用的拉钢线、挂线等物理基准线,节约了人力物力,减少了基准线被破坏或者变形的危险,使复杂线条路面可以实现高平整度和高精度结构尺寸的施工。

数字模型给施工全过程提供唯一的指挥依据,贯穿于摊铺、压实、切缝等各个工序之中。摊铺机上的控制系统得到自身位置和模型数据并进行比对,进而控制执行机构进行精确作业。因此模型完整性、准确性、适用性是 3D 数字化施工顺利进行的前提。项目启动前技术人员要花费大量时间去创建、验证并优化模型,使之完全符合设计要求并且适配现场施工设备的实际性能参数,从而达成设计和施工的无缝对接。

（二）摊铺自动控制

摊铺自动控制就是 3D 数字化技术把设计蓝图变成现实的主要执行过程。其基本原理就是车载中央控制器把预先加载的三维设计模型,与高精度定位系统实时得到的摊铺机位置信息进行毫秒级运算比对。控制器不断计算出摊铺机熨平板当前位置的实际高程、坡度与设计模型的差值。系统检测到任何偏差时,就会立刻产生调节指令,通过电液伺服系统自动、精确地控制液压油缸的伸缩,使熨平板的高度和角度始终严格按照三维模型的轨迹运动。

由此就形成一个高效闭环控制系统。传感器是系统的眼睛,感知位置;控制器是大脑,计算决策;液压执行机构是手脚,执行调整动作。整个控制回路反应速度很快,可以对地面基础不平、摊铺机行驶姿态变化等引起的扰动做出快速补偿,保证摊铺出的水泥混凝土面层始终在设计厚度和平整度公差范围内。该自动化控制方法,摆脱了操作手依靠基准线凭经验判断并手动调节的传统方式,大大减少了人为因素对施工质量的影响,使施工过程具有连续性、稳定性,实现了摊铺厚度的精确控制、路面高程的精确控制,是获得优良路面平整度的关键。

（三）施工精度保证

3D 数字化技术对于施工精度的保证是革命性的,把路面施工精度由厘米级提高到了毫米级。高精度实现要依靠完整的、从数据源头到最终执行的各个环节技术体系,保证设计意图准确实现。

高精度首先在于它摒弃了物理基准。传统拉线法施工中,由于钢线本身的自重、温度变化会产生挠度、伸缩,支点设置也会产生误差,这些都会对最终路面标高产生影响。3D 数字化施工用虚拟的、不受物理环境影响的数值模型为基准,从根本上消除了这类误差源。摊铺机的水平位置、熨平板的垂直高程和横坡均是由高精度定位系统和传感器直接测量、控制的,精度稳定可靠,在长距离、大坡度路段施工时,更明显。

为确保这种高精度能够稳定实现,需关注以下几个关键方面:

1. 设备精密标定:在摊铺机及其搭载的 3D 控制系统投入使用前,必须对摊铺机进行静态、动态标定。即测量传感器在机身上的准确安装位置、确定液压系统响应特性等。准确的标定是保证控制系统发出指令后,机械结构能够准确无误地执行的前提。

2. 定位信号质量,无论采用全球导航卫星系统还是全站仪进行定位,稳定、连续、高质量的定位信号是保证精度的生命线。施工时应合理布置基准站,避免信号被遮挡或干扰,保证定位数据流的准确性,防止信号丢失或者跳变造成摊铺中断或者质量缺陷。

3. 系统协同作业:整个系统是一个有机整体,三维模型精度、定位系统精度、摊铺机控制系统响应速度、液压系统执行精度环环相扣。任何一个环节出现问题都会影响到最后的施工精度。因此必须保证各个子系统之间良好的兼容性以及协同工作,形成合力,共同保证毫米级的施工精度。

二、3D 控制技术应用

(一) 导航定位技术

导航定位技术是 3D 控制系统空间感知的核心,给摊铺设备提供三维空间中的准确坐标,使摊铺设备知道自己在什么地方。目前高速公路路面施工中常用的高精度导航定位技术有两种,即基于全球导航卫星系统的实时动态差分技术和自动跟踪全站仪技术。

全球导航卫星系统的实时动态差分技术是最常采用的定位方式。在施工场区内设置基准站,将基准站天线架设在已知精确坐标点上,基准站不断接收卫星信号并计算出其与真实坐标的误差,产生差分改正数据。之后,无线电台将这些改正数据实时广播给摊铺机上的移动站接收机。移动站接收机在接收卫星信号的同

时，也接收并应用了这些改正数据，消除了大气电离层延迟、卫星轨道误差等影响定位精度的因素，使定位精度由米级提高到 2~3 厘米，满足了路面施工的精度要求。该技术的优势就是覆盖面积大，设备架设灵活，适合开阔、无遮挡的公路施工环境。

自动跟踪全站仪技术又称为机器人全站仪，是实现高精度定位的方法。该技术是在施工场地一侧的控制点上架设一台全站仪，全站仪能自动锁定并连续跟踪摊铺机上安装的特制棱镜。全站仪不间断地测量棱镜的距离、水平角、垂直角，可以即时得到棱镜的三维坐标，定位精度达到毫米级，比常规的全球导航卫星系统实时动态差分技术还要高。该技术最大的优点是精度高，不受卫星信号遮挡的影响，在隧道、高架桥下、城市楼宇密集区等全球导航卫星系统信号不好区域有不可替代的优势。缺点是需要保证全站仪和棱镜之间通视，单台仪器控制范围小，长距离施工要频繁迁站。

根据工点环境、精度要求、成本效益选择或组合使用两种技术。开阔路段采用全球导航卫星系统实时动态差分技术大范围快速施工，结构物密集、精度要求高的地方切换为全站仪模式。可靠的导航定位技术是整个 3D 控制系统准确控制和引导的前提。

这两种导航定位技术的特点对比详见下方的导航定位技术特点对比表。

导航定位技术特点对比表

特性	全球导航卫星系统的实时动态差分技术	自动跟踪全站仪技术
定位原理	基于卫星信号差分改正	基于光学测量与跟踪
精度	2-3 厘米	毫米级
覆盖范围	广，适合开阔区域	单机覆盖范围小，需通视
适用环境	开阔、无遮挡区域	信号不佳区域（隧道、桥下、市区）
设备架设	灵活	需频繁迁站（长距离）
主要优势	覆盖广，架设灵活	精度高，不受卫星信号影响
主要劣势	易受信号遮挡干扰	需通视，单机范围小，迁站频繁

（二）自动找平技术

自动找平技术是 3D 控制系统实现路面高程、平整度精确控制的主要功能。它把导航定位系统给出的高程和三维设计模型中的设计高程即时比较，利用闭环控制逻辑，自行调节摊铺机熨平板的作业高度，保证铺筑出的混凝土层面严格遵

照设计要求。这项技术是决定路面纵向平整度的重要因素。

工作流程十分精确,摊铺机上控制器以很高的频率(每秒几十次)读取定位系统测得的熨平板上两个液压油缸连接点的实时高程 Z 值。同时根据摊铺机在平面上所处的位置 X 、 Y 值,控制器从三维数字模型中找到该点对应的设计高程 Z' 。经过运算得出两者的差值 $\Delta Z=Z-Z'$,即得到当前时刻的施工高程偏差。该偏差值被立即送入控制算法中,控制算法根据偏差大小、方向来决定熨平板需要调整多少,并产生相应的电信号指令。这些指令传送到电液比例阀上,控制液压油缸内油液的进出和方向,从而驱动油缸活塞杆伸长或缩短,实现熨平板的升降。过程瞬间完成,实现高程动态、连续、精确调节,有效克服了基层不平整等因素对摊铺厚度、顶面高程的影响,保证路面纵向剖面平顺。

(三) 实时调整技术

实时调整技术属于3D控制系统的延伸和融合,不仅实现垂直方向自动找平,也在水平方向上实现了摊铺机在三维空间内全方位的自动导引与控制。保证路面在平面线形、横向坡度等各方面施工质量,是实现复杂几何设计精准复现的保证。

水平方向上,系统根据导航定位技术得到的摊铺机实时平面位置和前进方向,与三维模型中设定的道路中心线或者边线进行比较。当摊铺机偏离预定行驶路线的时候,控制系统就会给摊铺机的转向系统发送指令,微调履带的差速或者转向角度,使得摊铺机按照设计路线准确行驶。取代了传统施工中驾驶员依靠视线、参考线操纵的方式,大大提高平面线形的准确性,特别是对复杂的缓和曲线、圆曲线等,可以实现平滑过渡。系统同时对熨平板两侧的高度进行监测,根据三维模型中对应位置的横坡度设计值来控制熨平板两侧液压油缸,使熨平板倾斜角度准确。直线段的常规路拱坡度、曲线段高程渐变都可以准确调整,保证路面排水性能、行车舒适性好。

第四节 建筑信息模型在施工中的应用

一、建筑信息模型建立

(一) 建模标准

建模标准的统一是保证模型数据可以在各个阶段、各个参与者之间传递和复用的先决条件。缺乏统一标准会造成信息孤岛,阻碍协同工作。因此,一旦高速

公路水泥混凝土路面项目开始实施,就必须建立一套覆盖整个项目生命周期的建模标准。该标准应该对模型的几何精度等级做出规定,即不同设计阶段路面结构层、接缝、钢筋等构件应达到的细节程度。同时标准中要明确非几何信息的组成和深度,即材料特性、供应商信息、施工工艺要求、养护周期等,使模型不单单是一个可视化的三维几何体,更是一个包含丰富信息的数据库。

为了保证标准的正确执行,项目组需要对所有的建模人员进行系统的培训,使他们理解并且掌握规定的各个方面。该标准体系中还要包含命名规则、坐标系、数据分类编码等。所有的模型文件、内部构件要采用统一的命名规则来管理,便于查询。统一的坐标系统可以保证路基、路面、桥梁、涵洞等各个专业模型准确无缝地拼装在一起,形成一个完整的项目级模型。数据分类编码为后面工程量统计、成本核算、物资采购等自动化应用打下了基础。

制定标准不能闭门造车,要充分借鉴国家、行业 and 地方的相关标准,根据高速公路长寿命路面建设的技术特点进行细化补充。水泥混凝土路面传力杆、拉杆、角隅钢筋等特殊构造要定义专门的构件类型和信息参数。创建这样的有目的、有预见性的建模标准,可以最大限度地发挥模型中蕴含的数据价值,给精细化、智能化的施工管理提供高质量的数据源。

(二) 工程信息集成

建筑信息模型最根本的价值就在于它的信息集成能力,把过去分散在各种图纸、文件、系统中的工程信息整合到一个统一的数字模型当中,实现了数据同源和信息共享。高速公路项目包含的信息种类繁多,勘察设计、施工运维等各个方面都有。既包含路基的土方数据、路面的结构层厚度、混凝土配合比、钢筋布置等几何和物理信息,也应包含进度计划、成本数据、质量记录、安全规范等管理信息。

工程信息集成过程是动态的、不断完善的过程。在设计阶段地形勘测数据、地质钻孔信息、路线设计参数、结构计算结果等被集成到模型里。施工阶段模型还要集成深化设计图纸、施工组织方案、材料进场记录、构件预制信息、现场施工日志等。将每块混凝土板的浇筑日期、养护记录、强度检测报告等信息同模型中对应的构件进行关联。因此管理人员只需点选模型中的任意一个构件,就可以方便的查询到该构件的属性及历史信息,大大提高了信息检索的效率和准确性。

要实现有效信息整合,必须要有稳定的可靠的中央数据环境平台作为支撑。

这个平台是项目信息的唯一的来源，可以保证各方面的参与者都可以看到最新的数据，防止因为信息不一致导致的错误以及返工的情况发生。利用该平台可以整合所有的专业信息，例如排水设计和路面设计模型叠加后就可以判断排水设施标高、位置与路面设计有无冲突。跨专业信息集成和碰撞检查，是二维图纸模式无法相比的优势，也是工程设计的合理性以及施工可行的保证。

（三）多方协同设计

高速公路为大型复杂工程，专业众多，有路线、路基、路面、桥涵、交安、绿化等各专业，各专业之间必须互相配合。建筑信息模型技术以共享可视化模型为基础，搭建起高效的各方协同设计平台，彻底改变了传统设计过程中各个专业相对独立、用图纸传递信息、串行的工作方式，转变成以统一模型为基础的并行协同工作方式。

所有设计相关的方，即业主、设计单位、咨询单位等，都在同一个模型中进行协同工作。一方对设计做出修改时，其它各专业可以在模型中立即看到更新，并评估其影响。透明、即时的信息交流方式使设计冲突可以在早期阶段就被发现并解决。例如，路面设计团队可以实时检查其设计的路面结构厚度与桥梁设计团队的梁板顶面标高是否精确衔接，从而避免施工阶段出现标高不符的问题。前置的问题解决模式，大大减少了后期设计变更和工程洽商的数量，保证设计质量，节约时间和成本。

1. 实时碰撞检测即协同平台可以对不同专业的模型进行硬碰撞检测（结构和管线之间存在冲突）和软碰撞检测（安全间距不够），并且给出详细的碰撞报告。设计团队可以根据报告，在三维环境中直观地找到问题所在，相互商讨解决办法，达到“所见即所得”的沟通效果。

2. 可以在平台上快速创建并对比各种设计方案的模型。对于复杂的互通立交区，可以模拟不同的匝道线形、路面拼宽方案下通行能力及施工难度，选择综合效益最好的设计方案。

3. 提高沟通效率，传统的审图会议依靠大量的二维图纸进行沟通，效率低并且容易产生误解。基于建筑信息模型的协同设计，使所有的相关方都围绕三维模型展开讨论，信息传递更加直接、明确，决策过程也因此更加科学、高效，保证各方对设计意图的理解完全一致。

二、建筑信息模型在施工阶段应用

项目进入施工阶段以后，模型的价值就由设计协同转变为对现场施工过程的精细化管控。完备的模型是施工过程可视化、施工进度动态化、施工成本精确化的实现途径。它把施工管理的颗粒度从宏观层面推演到每一个构件、每一道工序之中，推动了施工管理的现代化转型。施工阶段建筑信息模型的主要维度及应用特点如下表所示。

建筑信息模型主要维度及其应用特点表

BIM 维度	核心信息	主要应用	价值体现
3D	几何、物理、功能	可视化设计、碰撞检测、协同建模	提升设计质量，减少返工
4D	时间（进度计划）	施工过程模拟、进度跟踪与控制	优化施工方案，保障工期
5D	成本（预算信息）	成本预算、动态核算、成本控制	精确成本管理，提高经济效益

（一）施工过程模拟

建筑信息模型的施工过程模拟一般称为 4D 模拟，即把三维模型和施工进度计划(时间维度)结合起来,用可视化的方式动态地表现整个高速公路的建设过程。该模拟可以提前演练场地清理、路基开挖、结构体浇筑、路面铺设等全部的施工步骤，使项目组在工程开工前就能发现会遇到的困难及潜在的风险。通过模拟可以看到各工序在时间上、空间上的配合关系，从而检验施工方案的逻辑性、可行性。可以模拟大型摊铺机、运输车辆行驶路线，优化现场交通组织、材料堆场布置，防止施工高峰期出现工作面冲突或者交通堵塞，保证施工流程的顺利进行。

施工过程模拟对于复杂的工序安排、资源规划有着非常高的价值。在水泥混凝土路面施工过程中可以模拟滑模摊铺连续作业的过程，准确安排好混凝土供应车辆到场的的时间和频率，保证摊铺工作连续进行，避免不必要的停顿，从而保证路面成型质量。还可以模拟不同的分段、不同的工作面同时施工的情形，合理安排人力、设备和材料等资源，达到施工效率的最大化。施工预演可以使得管理者对以后的施工情况有预判，进而制定出更加科学、高效的施工组织方案。

4D 模拟也是很好的沟通、培训工具。一线施工人员、班组负责人观看施工模拟动画，能更加形象的领会自身任务、施工顺序和技术要求，减少因图纸理解

错误而造成失误。对业主、监理等管理者来说,4D 模拟是展示项目进度和施工计划的一扇窗,有利于各方就施工方案达成一致意见。从安全角度来讲,采用模拟高空作业、大设备吊装等高危作业方式提前发现隐患,制订出相应安全措施来减少施工现场安全隐患。

（二）施工进度管理

将模型同施工进度计划软件进行深度集成,使用 Microsoft Project 或者 Primavera P6 等软件来实现精细化的进度管理。将进度计划中的每个任务和模型中对应的构件或者构件集进行关联,就形成了动态的 4D 模型。该模型不但是项目空间的表示,也包含了时间信息,传统的甘特图进度表也变得生动直观。项目管理者不再面对抽象的表格,在三维模型上随时可以看到每日、每周、每月计划完成的工程形象以及实际完成的情况。

施工时将已经建好的工程实际进度数据输入系统,平台就会自动生成实际进度和计划进度的对比模型。通过用不同的颜色高亮显示(绿色代表按期完成,蓝色代表计划施工,红色代表滞后)来展示项目的进度状况,管理者可以一眼看出整个项目的进度情况,也可以迅速找到滞后的工作面或者构件。可视化偏差分析可以让进度偏差的原因更容易被发现,材料供应延误、设备故障、劳动力不足等问题都能被及时识别出来。项目经理可以借助准确的情报快速纠正偏差即调整以后的施工顺序、增加人力物力或改进工序,从而把进度偏差所造成的不良影响降至最低程度,保证整个工程的完工时间符合要求。主动式、以数据为基础的进度控制方式远远超过了传统的滞后、依靠经验来判断的管理模式。

（三）施工成本控制

施工成本控制方面的应用即为 5D,在 4D 模型的基础上加上了成本信息,使工程成本的预算、跟踪、控制更加精确。它的最大优点就是模型里自带精确的工程量数据。因为模型是由构件参数化建立的,所以可以快速、准确地得到任何构件的尺寸等数据,并且能自动生成详细的工程量清单。改变了传统手算或者软件算量模式下存在的错算、漏算等问题,为高质量工程预算的编制打下了坚实的基础。

施工过程中 5D 平台可以将实际发生的成本数据同模型中的构件进行关联。当一个构件(路面板等)施工完毕之后,其对应的人工、材料、机械等实际成本就被记录下来。系统可以比较已经完成的工程实际成本和预算成本的差异,并以

图形化的方式显示出来。管理者可以借助模型来看到各个部分的成本超支、节约情况，从而对造成成本偏差的原因进行分析，比如由于材料价格上涨、施工效率低下工时增加或者其它原因造成的等。

精细化的成本跟踪能力可以提高设计变更、工程签证的控制水平。设计变更可以直接在模型上修改，并且可以即刻得到设计变更带来的工程量以及成本的变化。给业主、承包商快速准确地作出变更费用的决策提供依据，避免传统模式下变更计价争议、延误。

全过程动态成本控制和析使 5D 可以对成本实行精细化、透明化管理。提高了成本估算的精度，更重要的是给施工过程中的成本主动控制提供有力的工具，通过持续的计划、执行、检查、调整的循环，保证项目最终的投资收益，为高速公路长寿命路面建设全生命周期价值最大化打下坚实的基础。

第四篇 工程实践篇：特殊条件与运维管理

第十一章 特殊环境下的工程应对策略

第一节 高温多雨地区施工与养护技术

一、高温多雨地区施工技术要点

（一）高温季节施工技术

高温季节进行水泥混凝土路面施工，主要问题就是控制混凝土的水分蒸发速度和内部水化热。夏季气温高，不但会直接提高混凝土原材料温度，还会使拌合物在运输、摊铺过程中水分损失加大。快速失水会使混凝土的凝结时间大大缩短，工作性能变差，给摊铺、振捣、抹面等工序带来极大的困难。同时表层水分蒸发过快是造成塑性收缩裂缝的主要原因，风速大时，裂缝问题更加严重。

为避免高温，混凝土浇筑时尽量选择一天中气温较低的时候，如清晨或者晚上。对砂石骨料堆场要搭设遮阳棚，定时喷水降温，优先使用料堆内部低温骨料。运输过程中搅拌运输车要采取遮盖措施，减少途中水分蒸发、温度升高，缩短运输时间，保证混凝土及时运抵施工现场。浇筑前对基层及模板进行洒水降温，可以降低支承物的温度，减缓新浇混凝土的温升速度，这对控制温度应力十分重要。配合比设计时可以加入高效减水剂、缓凝剂，改善混凝土高温工作性，延长可操作时间，降低水灰比，提高混凝土自身密实度和抗裂性。

施工时必须保证各个环节紧密衔接，缩短从摊铺到开始养护的时间间隔。混凝土的摊铺、振捣、抹面等工序要快速高效完成，避免因操作延误而造成表面结硬或产生冷接缝。切缝作业时间要准确，过早或者过晚都会造成不规则裂缝。一般应在混凝土强度达到一定程度之后立即进行，不宜迟于次日完成，切缝深度要足够。综合这些技术措施，就是保证高温季节混凝土路面施工质量、防止早期裂缝发生的保证。

（二）雨季施工技术

雨季施工重点在于防和排，即防止雨水冲刷新浇筑的混凝土，及时排除作业面的积水，保证基层稳定和施工的连续性。施工前要密切关注天气预报，合理安排施工计划，尽量避开预报有暴雨、大雨等大范围降水的时段进行混凝土浇筑。施工现场应常备足量的塑料薄膜、土工布等防雨材料，在突然出现阵雨的时候可以立即对新浇筑的路面进行覆盖保护。

雨季开挖路基或整平基层的时候，一定要注意排水问题。作业区域周围应设置有效的临时排水沟，保证雨水可以迅速排出，防止长时间浸泡造成基层软化或者承载力降低。对于已完成的基层，如果浇筑面层之前遭遇降雨，必须等到基层表面水分全部蒸发，含水率符合要求之后才能继续施工。材料的防护也不能忽视，水泥应储存在防雨防潮的库房内，砂石骨料堆场要有良好的排水设施并加以覆盖，以防雨水冲刷造成含泥量增大或者含水率剧烈波动。

如果浇筑混凝土时突然下雨，必须停止施工。对已经浇筑完成但还没有初凝的混凝土，应立即用防雨布严密覆盖，防止水泥浆流失和表面被雨点击打产生麻面。雨季施工结束后，对临时形成的施工缝认真处理，清除薄弱浮浆层、污染物，保证新旧混凝土结合牢固。雨季施工要加强对现场用电安全的管理，所有的电气设备和线路都应具有防雨和接地措施，防止发生触电事故。雷雨天气严禁一切室外作业，特别是吊装等高处作业，保证人员和设备的安全。

（三）综合应对措施

在高温多雨、天气变化复杂的气候条件下，应该制定出一个综合的应对办法，把各个独立技术措施进行有机地整合。该策略的主要内容就是建立反应迅速、决策科学的管理体系。施工单位应成立气象应对小组，及时了解天气变化情况，根据天气预报和现场实际，合理安排每日施工计划，把混凝土浇筑等关键工序安排在气候条件比较温和的时段。

应急预案的制定以及演练属于综合突发事件应对的重要组成部分。预案应当对各种天气预警级别下的应对流程、人员职责、物资储备和调配方案作出具体的规定。现场应准备防雨布、塑料薄膜、水泵、发电机、降温喷淋设备等。当天气突然变化的时候，现场能够按照预案迅速采取相应的措施，比如对新浇筑的路面进行快速覆盖、开启排水系统等，从而将恶劣天气对工程质量造成的不利影响降到最低。

材料的选择、配合比的改善也属于重要的应对方法。在高温多雨的地区,应该采用低水化热或中水化热的水泥来减小混凝土内部的温度升高。掺入高性能外加剂,如缓凝高效减水剂,可以在保证强度的同时改善混凝土的和易性,延长高温下可施工时间,提高抗泌水、抗离析能力,对于应对突发性降雨非常有利。建立完善的混凝土质量监控体系,及时测量与调整各种重要的控制参数,对提高多变气候下混凝土的质量稳定性非常重要。

二、高温多雨地区混凝土养护技术

(一) 混凝土早期养护

混凝土早期养护是决定路面质量好坏的关键环节,其主要目的就是保持适宜的温湿度条件,保证水泥水化作用顺利进行,防止水分过快散失引起的塑性收缩裂缝。高温多雨地区养护工作尤为重要。混凝土浇筑完毕并完成表面抹光后,必须立即开始养护,不能有任何时间间隔。

常用的有效方法包括:

1. 喷洒养护剂,混凝土终凝后立即在表面均匀喷洒一层养护剂。养护剂能很快形成一层致密薄膜,有效阻止内部水分蒸发,适合于大范围、快节奏的滑模摊铺工艺。使用时必须保证喷洒均匀,形成完整连续的膜,保水率应符合有关标准要求。

2. 塑料薄膜覆盖法简单、经济、效果好,是防止水分早期蒸发的有效方法。混凝土表面收光后应立即用塑料薄膜覆盖,薄膜要铺设严密,接头处重叠宽度足够,并用重物压实边缘,防止被风吹起,形成封闭的湿气环境。此法可利用混凝土本身析出水分和水化热蒸发的水分,保持表面高湿度。

高温天气下强烈的阳光会使混凝土表面温度迅速升高,内外温差增大,产生温度应力。因此除覆盖塑料薄膜外,在薄膜上再覆盖一层湿润的土工布或草袋以达到隔热保湿的目的。早期养护要一直持续到混凝土具有足够的初始强度,能够承受收缩应力为止。对早期养护的疏忽,很容易造成表面出现网状裂缝,从而影响路面的耐久性和美观性。

混凝土早期养护方法对比

养护方法	优点	缺点	适用场景
喷洒养护剂	施工效率高，薄膜保水性好	喷洒不均影响效果，对后期装饰有影响	大面积、快速施工的滑模摊铺
塑料薄膜覆盖	简便经济，保水效果显著	薄膜易破损或被风吹起，影响美观	各种规模工程，对美观要求不高
湿润覆盖物	隔热保湿效果好，利用旧材料	需人工频繁洒水保持湿润，成本较高	温度波动大，有充足水源及人工

从上表中可以看出，不同的早期养护方法各有侧重和适用条件。

（二）混凝土保湿养护

度过脆弱的早期养护阶段之后，混凝土就进入了强度稳定增长的重要时期。持续的保湿养护对于水泥充分水化、提高后期强度和耐久性起着非常重要的作用。高温天气会加速水分的蒸发，仅靠早期形成的养护膜或者覆盖的薄膜很难保持数周之久的湿润环境，因此必须采取更持久的保湿措施。该阶段养护时间不应少于 7 天，对重要的工程或特殊水泥应延长到 14 天以上。

洒水养护是最传统、最直接的保湿方式。当混凝土达到初凝强度，表面能够承受洒水而不被破坏的时候，就可以开始了。洒水的关键在于使混凝土表面一直保持潮湿，避免干湿交替。炎热干燥的白天，洒水次数要增加，每天数次；夜间或湿度大的阴天可适当减少。为了提高保水效果，洒水一般和覆盖物一起使用。在混凝土表面覆盖湿润的麻袋、草帘或者土工布，定时给覆盖物洒水，可保证养护期间始终保持湿润。

除传统的水养护外，现代技术也给出了其他养护方法，使用节水保湿养护膜就是其中之一。膜内含有高吸水性材料，第一次浇水之后可以长时间保持自身湿润，并持续向混凝土表面供水。不仅节省了大量的水资源，而且可以减少现场养护的人工和机械投入，特别适合缺水地区或者环保要求高的工程。无论采用哪种方法，保湿养护的主要目的都是给水泥颗粒提供足够的水分，使水泥颗粒尽可能多地参与水化反应，从而形成致密、高强的微观结构。

（三）混凝土温度控制

温度控制属于长寿命水泥混凝土路面养护的关键技术之一，其主要目的就是减小混凝土内外温差和温度变化速率，从而有效地防止温度裂缝的产生。混凝土水化时会释放出大量的热量，使内部的温度升高；在高温季节，环境温度本身就

比较高，两者叠加，导致混凝土的温度更高。当后期环境温度降低，尤其是在昼夜温差较大时，混凝土表面冷却收缩，而内部仍保持较高的温度，这样不均匀的变形就会产生巨大的拉应力，如果超过了混凝土当时抗拉强度，就会产生裂缝。

控制温度的第一步就是源头控制，也就是尽量降低混凝土的入模温度。可以通过骨料喷水降温、用冷却水或冰屑代替部分拌合水、选用低水化热水泥等方式来实现。这些措施可以降低混凝土的初始温度和水化热峰值温度，从根本上减少后期降温造成的收缩量。

养护阶段温度控制的重点是保温，即减缓混凝土散热的速度。混凝土浇筑完成后应立即用多层土工布、岩棉被或专用保温材料覆盖。保温措施能减小混凝土表面和大气之间热交换，使混凝土缓慢、均匀地降温，从而大大减小表面和心部的温度梯度。摊铺后前3天水化热释放集中，温度变化最大，这时的保温养护尤其重要。科学的温度控制可以保证混凝土结构在强度逐渐形成的过程中，不会受到有害温度应力的破坏，给路面的长期稳定和耐久性打下良好的基础。

第二节 地质复杂区域路基路面协同设计

一、地质复杂区域路基处理

路基处理是协同设计的第一步，也是保证路面结构稳定的最根本措施。针对复杂地质所特有的工程性质来选择合适的处理技术，消除路基潜在的病害，提高路基的承载力和均匀性，为长久的路面服务打下基础。常见的特殊地基类型和相应的处理措施如表所示。

特殊地基类型及其处理措施表

特殊地基类型	主要特点	常见处理措施
软土地基	含水量大、压缩性大、强度低	堆载预压、真空预压、塑料排水板法
湿陷性黄土地基	遇水湿陷，结构破坏，产生沉降	强夯法、石灰/水泥化学改良
膨胀土	胀缩性、裂隙性，体积反复变形	控水（排水、防水）、改良（石灰等）、换填法

（一）特殊地基处理

软土地基具有含水量大、压缩性大、强度低的特点，是造成路堤失稳、工后沉降过大的主要原因。为了保证长寿命路面基础的稳定，必须有效地控制其沉降。

常用的技术有堆载预压、真空预压、设置塑料排水板。堆载预压就是利用超载来加速地基的固结，待沉降趋于稳定之后再进行路面施工。真空预压和塑料排水板法可以缩短排水路径，快速排走孔隙水，使地基固结速度加快。综合使用这些技术，可保证大部分沉降在路面施工前完成，给上部结构提供均匀稳定的支撑。

湿陷性黄土地基的突出特点就是遇水浸湿后结构迅速破坏，产生巨大沉降，即所谓湿陷，对路基的水稳定性造成严重威胁。其处理的中心在于完全消除湿陷性。强夯法利用巨大的冲击能破坏黄土的宏观孔隙结构，提高密实度，适合于处理较厚的地基。填方路基常采用石灰或者水泥进行化学改良，利用其胶结作用改善土体的工程性质，提高水稳定性和强度。根据黄土的湿陷等级及现场具体条件，综合选择处理方案，保证路基浸水时不发生大沉降。

膨胀土由于具有明显的胀缩性、裂隙性，在含水率变化时会产生体积变形，造成路基顶面不均匀抬升或者收缩，从而引起水泥混凝土面板的翘曲、开裂，严重影响路面的平整度和耐久性。处理膨胀土的主要办法是“控水”和“改良”。控水措施主要是建立完善的排水系统，设置防水隔离层来保持土体含水率的相对稳定。改良措施主要是掺入石灰等稳定剂，降低土的亲水性、塑性指数，抑制土的胀缩潜能。在特殊情况下，采用换填法彻底消除胀缩源也是一种有效的办法。

（二）路基加固技术

当地基处理后强度或稳定性仍不能满足长寿命路面的严格要求，或者在填挖结合部、高填方路堤等容易产生不均匀变形的部位，就需要采用路基加固技术来提高路基的整体性能。路基加固的本质就是向土体中加入具有抗拉性能的材料或者构件，形成复合土体，以提高路基的承载能力、限制路基的侧向变形、改善应力分布、提高抗震性能和整体稳定性。现代工程实践中土工合成材料是路基加固的主流技术，种类繁多，功能各异，可以针对不同的工程问题进行精准的应用。

常见的路基加固技术手段多样，具体应用时需因地制宜。

1. 土工格栅加固：土工格栅由于抗拉强度高，有良好的嵌锁作用，铺在路基填土层上以后可以约束土体侧向滑动，使车辆荷载更均匀地传递到地基中，从而提高路基的承载能力。特别是在软土地基上修筑路堤，在底部设置高强度土工格栅，可以形成筏板效应，有效抵抗不均匀沉降。

2. 土工布的应用主要有隔离、反滤和加筋三种。在路基和基层之间设置土工布，可以防止不同材料混合，保证各结构层完整，符合设计厚度。同时其良好的

透水性也能做反滤层，保证排水通畅，防止细土粒流失。

3. 桩式加固法，适用于极软弱地基或者高填方路堤，一般用水泥粉煤灰碎石桩、刚性桩等。桩体穿越软弱土层，把上部荷载直接或者间接地传给深部坚硬的持力层，从根本上解决了地基承载力不足、沉降过大的问题，形成了稳定的复合地基。

（三）路基排水系统

水是造成路基路面结构产生各种病害的主要因素。路基土含水量增大，强度会急剧下降，承载力随之降低，在动载作用下很容易发生唧泥、冻胀等问题。因此设计合理、施工得当、维护及时的排水系统是路基长期稳定、路面长寿命的生命线，在任何地质条件下都不能忽视。

表面排水系统的关键任务就是迅速拦截和排除降落在路面、中央分隔带和边坡上的地表水，阻止它下渗。该系统一般由路面横坡、边沟、排水沟、截水沟等组成。设计时必须保证各部分高程衔接顺畅、坡度和过水断面足够，以承受设计暴雨径流，防止积水浸泡路基，这是路基防护的第一道防线。

地下排水系统主要作用就是控制路基范围内的地下水位，排出侵入路基内部的渗透水。其主要设施有渗沟、渗水管、排水垫层。地下水位较高的路段，路基两侧应设纵向渗沟，控制地下水位在安全深度以下。对有山坡渗水问题的挖方路段设置边坡渗沟或者仰斜钻孔，可以有效拦截侧向来水，从源头上切断补给。

在复杂的地质条件下，山区或者多雨地区排水设计要采取综合措施，将地表排水与地下排水系统有机结合，形成全方位的立体防护网。截水沟除了拦截坡面径流外，还要拦截浅层地下水。排水系统材料选择、施工质量控制、防堵塞措施等都是保证排水系统长期有效运行的重要环节。完善的排水系统可以保证路基干燥，给路基强度、稳定性提供最可靠的保证。

二、地质复杂区域路面结构适应

（一）路面结构选型

地质条件复杂的地方，即使路基处理得当，也难免会发生一定程度的不均匀沉降。因此路面结构类型的选择就显得十分重要。相对于普通路段来说，应选择对地基变形适应性更好的结构形式。连续配筋水泥混凝土路面，用密集的纵向钢筋把不可避免的温缩裂缝分散成许多细小的微裂缝，靠钢筋保持裂缝紧闭状态和

荷载传递能力。其整体性很强,没有横向缩缝,从根本上杜绝了传统混凝土路面接缝病害的发生,并且对地基不均匀沉降有较高的容忍度,是地质不良路段实现长寿命的理想选择之一。普通水泥混凝土路面虽然建设成本较低,但是其接缝部位是结构上的薄弱环节,在地基发生变形时容易出现错台、唧泥等现象,因此需要对它的适用性进行审慎的评估。

路面结构中的基层和底基层属于承上启下的关键层位,它们的好坏直接影响到路面结构的应力分布以及水稳定性。在复杂的地质条件下,应采用强度高、刚度大、水稳定性好的半刚性基层或者贫混凝土基层。贫混凝土基层整体性好,抗冲刷能力很强,可以为混凝土面层提供非常均匀稳定的支撑,防止唧泥现象发生,是长寿命水泥混凝土路面设计的首选方案。水泥稳定碎石等半刚性基层材料应用较多,但是干缩、温缩裂缝容易反射到混凝土面层,设计时应通过设置应力吸收层、优化施工工艺等措施加以控制。在基层下面设置级配良好的粒料底基层或者土工布隔离层,能改善排水状况,防止基层材料被污染,从而提高整个路面系统长期的性能。

(二) 路面结构优化

路面结构优化设计是实现长寿命目标的精细化手段,应该从传统的经验设计方法向现代的力学-经验设计方法转变。用有限元等数值分析软件建立精细的路基路面耦合模型,可以模拟出复杂地质条件下路面结构在车辆荷载、温度梯度和地基不均匀沉降共同作用下真实的应力状态和变形响应。用模型参数化分析可以对路面疲劳寿命的影响进行系统评估,找出最佳结构组合,从而达到安全性、经济性一体化的目的。

材料性能的改善给结构改善打下了良好的基础。长寿命水泥混凝土路面要求面层混凝土除了要具备高抗折强度外,还需要具有优良的抗疲劳性、低收缩性、高耐磨性、良好的抗冻融性。通过改善集料级配、采用高性能外加剂、严格控制水胶比、掺入纤维等多种方法,可以制备出满足上述综合性能要求的高性能混凝土。接缝传荷装置传力杆、拉杆尺寸、间距、防腐处理等也应进行优化设计。传力杆要有足够的刚度和光滑度,才能把荷载有效传递出去,同时又可保证板体自由伸缩。拉杆要具有足够的拉力来防止纵缝张开。

结构优化的过程中,对特殊部位的注意就显得更加重要。填挖交界处、桥涵连接处等处由于路基刚度突然变化,路面很容易出现附加应力,从而引发早期破

坏。在这些过渡段上应该采用渐变设计,逐步加厚基层、设置钢筋混凝土搭板等,使刚度变化平缓,减小路面弯沉梯度。对这些重要的部位做细致的力学分析、结构加固,就是路基路面协同设计理念的体现。

(三) 路面效果评估

长寿命水泥混凝土路面设计施工,复杂地质条件下是一项系统工程,其最终效果要靠科学、长期检测来检验、确认。效果评价是当前工程质量客观评价的基础,也是今后类似工程设计参数修正、设计方法改进的数据来源。评价工作要贯穿施工全过程以及运营阶段,用动态、多维的评价体系从结构响应、功能状况、长期耐久性等几个方面进行综合考虑。

路面效果的具体评估方法主要涵盖以下几方面:

1. 嵌入式仪器监测,即在施工过程中,在路面结构内部埋设应变、位移、温湿度等各种传感器。这些传感器可以对路面在实际的交通荷载和环境的影响下内部反应、性能衰减规律进行监测,给设计理论的验证和寿命预测模型的研究提供最直接、最宝贵的第一手资料。

2. 运营期内定期专业设备检测:用落锤式弯沉仪来评价路面的整体承载能力和接缝传荷效率;用探地雷达探测结构层厚度和内部缺陷。无损检测技术可以在不破坏路面的情况下,对路面结构的健康状况做全面的掌握。

3. 长期性能跟踪观测,在具有代表性的路段上设置长期性能观测断面,定时对路面破损状况、平整度、抗滑性能等指标实施人工或者自动化调查。通过对这些指标随时间变化趋势的分析,可以直接反映出路面的耐久性及服务水平的好坏,从而检验长寿命设计目标是否实现。

第三节 重载交通区域特殊结构强化措施

一、重载交通区域路面结构强化

(一) 路面厚度增加

增加水泥混凝土面层厚度,无疑是抵抗重载交通最直接、最有效的方法。从结构力学的角度来讲,路面板的抗弯刚度与厚度的三次方成正比,即稍微增大一点厚度就能使抗弯能力大大增强。重载车辆荷载作用下,加厚的板体可以更好的

分散应力,使板底拉应力水平大大降低。根据弹性地基板理论,荷载应力是引起路面疲劳开裂的主要因素,减少拉应力幅值,会使路面疲劳寿命呈指数增长。

路面厚度的确定要在设计阶段,根据预期的交通量、轴载谱、环境条件、材料参数等各方面因素综合分析、权衡。重载路段设计规范一般推荐使用比常规路面更厚的面层。对于特重或者极重交通荷载等级的路段,混凝土面层的设计厚度可以由原来的 26 厘米增加到 28 厘米以上,甚至达到 30 厘米以上。增加厚度不仅可以提高结构整体承载能力,而且可以改善荷载在接缝处传递效率,从而减少因接缝传荷能力降低而造成的错台、唧泥等病害。较厚的路面板热惯性大,可以减缓内部温度梯度变化的速度,减小温度引起的附加应力的影响,对提高路面耐久性也有很大的帮助。

(二) 路面配筋加强

在重载交通条件下,只增大混凝土板的厚度,不能完全防止裂缝的产生和发展。因此,在混凝土板中设置钢筋网或者钢筋骨架,成为另一项必不可少的加固措施。路面配筋不像结构混凝土那样主要承受拉力,它主要起控制裂缝张开程度、保持裂缝两侧骨料锁定作用、保证路面板整体性、传递荷载的作用。

根据配筋方式和配筋密度的不同,路面配筋分为普通钢筋混凝土路面和连续配筋混凝土路面。普通钢筋混凝土路面在板中布置一定数量的钢筋网,主要用来控制温度和湿度变化引起的非荷载裂缝,提高路面板的抗冲击性。重载交通频繁的路段上工程实践中更多使用连续配筋混凝土路面。该类路面不设横向缩缝,只设大量的纵向连续钢筋,使路面主动产生微小裂缝。裂缝宽度被钢筋严格控制在很小的范围内,几乎不影响路面的平整度和行车舒适性,又有效释放了混凝土的收缩应力,从根本上避免了大切缝的设置,消除了接缝错台、边缘剥落等病害,大大提高了路面的长期服务质量。在板的边缘、角隅等应力集中处增加局部加强配筋,也可以有效地防止板角开裂等病害的产生。

(三) 路面材料优化

要达到长寿命路面的目的,根本就是使用高性能、高耐久性的建筑材料。为了适应重载交通的特殊需求,对水泥混凝土材料组成做深层次的优化是不可缺少的强化手段,它包括从水泥、集料的选择到外加剂、辅助胶凝材料的应用等各个方面。关于常见混凝土材料强化手段及主要作用见下表。

常见混凝土材料强化手段及其主要作用表

强化手段	主要作用	适用场景
高性能减水剂	降低水胶比，显著提高强度和密实度	需高强高密实度混凝土的路面工程
引气剂	形成均匀闭合气泡，明显提高抗冻融性	季节性冰冻地区的路面，抵抗冻胀破坏
硅粉 / 粉煤灰 / 矿渣微粉	改善微观结构，填充孔隙，增强界面粘结，提高抗渗、耐磨、长期强度	需提升综合性能和耐久性的混凝土
钢纤维 / 玄武岩纤维 / 合成纤维	有效抑制微裂缝，提高抗裂、抗冲击韧性和疲劳寿命	承受冲击、疲劳荷载，或易开裂的路面

1. 高性能水泥和优质集料为材料优化打下了基础。应该选用低碱、高强度硅酸盐水泥或道路硅酸盐水泥，以保证混凝土具有良好的力学性质和化学稳定性。集料，尤其是粗集料，应该使用质地坚硬、耐磨、吸水率低、抗压强度高的玄武岩、花岗岩等优质石材。合理的级配可以形成更紧密的骨架结构，使混凝土密实度增大、抗压强度提高、收缩变形减小。

2. 多种外加剂和辅助胶凝材料的复合使用，是提高混凝土综合性能的关键。掺入高性能减水剂，可以在保持施工所需工作性的基础上，大幅度降低水胶比，使混凝土强度、密实度得到提高。加入引气剂之后混凝土就会形成许多细小、均匀且封闭的小气泡，从而大幅度提高其抗冻融能力，在经常有季节性冰冻的地区尤为明显。掺入硅粉、优质粉煤灰、矿渣微粉等辅助胶凝材料可以改善水泥石的微观孔结构，填充内部孔隙，加强界面过渡区的粘结强度，从而全面提高混凝土的抗渗透性、耐磨性及长期强度。

3. 纤维增强技术的应用，给混凝土材料韧性提高开辟了新途径。在混凝土中掺入一定量的钢纤维、玄武岩纤维或者合成纤维，可以有效地抑制微裂缝的产生和发展，大大提高了混凝土的抗裂性、抗冲击韧性和疲劳寿命。纤维在混凝土基体中形成三维乱向支撑体系，当裂缝出现的时候，纤维可以跨越裂缝面，承担并传递拉应力，阻止裂缝继续发展成宏观破坏。对承受重载冲击荷载的路面来说，该效果更加明显。

二、重载交通区域特殊结构应用

（一）双层路面结构

双层水泥混凝土路面结构也被称为分离式双层板结构，即在已经存在的旧水泥混凝土路面或者新建的基层上，铺设一层新的水泥混凝土面层。两层间一般设沥青砂、土工布等隔离层，防止其粘结。该结构在旧路改造、新建重载道路中都有应用。其主要优势就是上、下两层混凝土板可以共同分担荷载，大大减小单层板所承受的应力。车辆荷载作用于上层板的时候，荷载应力通过隔离层部分地传到下层板，形成双板共同受力的良好局面，结构整体的承载力远大于相同厚度的单层板。

双层路面结构设计要准确计算两层板的应力分布，保证各层都在允许的疲劳应力范围内安全工作。隔离层的选择以及设计不能忽略。它应该具有一定传剪能力，但是不能形成刚性连接，允许两板间产生微小位移，有效释放部分温度应力。该结构非常适用于把现有的水泥路面改造成可以承受重载交通的路面。加铺新混凝土面层不仅可以修复旧路面上存在的表层病害，而且能大幅度提高整个路面结构的承载能力及耐久性，是经济、高效、长寿命的路面解决方案。

（二）复合路面结构

复合路面结构指在刚性或半刚性基层（如水泥稳定碎石、贫混凝土）或者旧水泥混凝土板上，铺设一层或者多层的沥青混合料面层的结构形式。该结构把水泥混凝土路面高承载力、稳定性好和沥青路面行车舒适、低噪声、易维护的优点巧妙地结合在一起，达到优势互补的效果。

在重载交通路段，刚性基层给整个路面结构提供坚实的支撑，可以减小车辆荷载作用下路面整体的变形，把荷载应力分散到路基，从而降低路基的应力水平。上部沥青面层直接承受行车荷载的磨耗和环境因素的侵蚀，良好的弹塑性可以吸收一部分冲击能量，并具有优秀的抗滑性能以及舒适的驾乘体验。一个重要的设计难点就是沥青层和刚性基层之间存在层间结合的问题。为有效防止温度变化、荷载作用下沥青面层在刚性基层接缝、裂缝处产生反射裂缝，应设置应力吸收层，例如高弹性改性沥青混合料、橡胶沥青应力吸收层或者土工复合材料等。可以有效地防止或者延缓反射裂缝的发生和发展，从而保证复合路面结构整体性能和耐久性的充分发挥。

（三）增强型路面结构

增强型路面结构是指用非传统材料或者特殊构造，显著提高路面性能的新型结构。重载交通领域中，结构设计的目标就是追求最大承载能力以及良好的抗疲劳耐久性。

灌入式复合路面属于增强型路面的一种。它先铺一层大空隙的沥青混合料骨架，再把高流动性特种水泥砂浆或者灌浆料填充到空隙里。由此形成沥青骨料和水泥基材料互相穿插、嵌锁的空间网络体系，既有沥青材料的柔性又有水泥材料的刚性，具有很强的抗车辙、抗疲劳、抗水损害能力，适合用作港口、矿区等超重载运输通道。

另一个发展方向就是用超高性能混凝土来修复路面或关键部位。超高性能混凝土的抗压强度、抗折强度、韧性均比普通混凝土要高得多，而且其微观结构致密，因此具有很好的抗渗、耐磨性能。尽管成本较高，但是对于收费站、长纵坡、公交专用道等承受高强度剪切、冲击、磨耗作用的重载路段，局部使用超高性能混凝土作为面层，可以从根本上解决车辙、推移、磨光等顽固性病害，真正实现“一次投入、长期无忧”的超长寿命周期。将这些增强型结构用到具体的路段上，就是实现高速公路整体长寿命目标精细化、差异化设计理念的生动体现。

第四节 海外典型区域工程案例解析

一、海外典型区域工程特点分析

（一）东南亚地区工程特点

东南亚地区的高速公路项目大多都会遇到高温、高湿、强降雨的恶劣气候。湿热环境会加快路面材料老化速度，也给路基稳定性和排水系统提出很高的要求。暴雨频发、高水位持续时间长，路基长时间处在浸水或者高含水率的状态，容易出现唧泥、板底脱空等病害，对水泥混凝土路面的长期性能造成严重威胁。因此，在该地区，长寿命路面设计要以水损害防治为重。

从设计上来说，路基路面排水系统要加以强化。应设中央分隔带、路侧排水设施（边沟、排水沟、渗沟等），使地表水及渗入水尽快排出。年降水量大、多雨地区的路基如果是透水性差的细粒土，那么路面结构内部水的及时排出就变得

更为重要。因此常在基层或垫层中设计能排水的结构,配合横向排水管,使进入结构内部的水分能够迅速排出,防止它对基层及土基产生浸润软化作用。对于普遍存在的软土地基,必须采用换填、桩基、土工合成材料加固等方法进行处理,从根本上提高路基的承载力和稳定性,为上部结构的长寿命路面提供可靠的支撑。

从材料及施工的角度来看,要选用抗水损害能力强水泥混凝土配合比。掺加高效减水剂、引气剂等外加剂来改善混凝土的和易性及密实度,降低渗透性,提高抗冻融、抗冲刷能力。施工时特别是在雨季,必须制定周密的施工计划及防雨措施,防止雨水直接冲刷新浇筑的混凝土。同时加强对原材料的质量控制,特别是骨料的含泥量和级配,保证混凝土质量的均匀性,这些都是东南亚地区水泥混凝土路面长寿命不可缺少的技术保证。

（二）非洲地区工程特点

非洲大陆的公路工程项目的地域多样性、复杂性比较明显。主要特点就是地质地貌变化复杂、地域性建筑材料缺乏、技术标准和后勤保障的限制。从北非撒哈拉沙漠、中非雨林、东非大裂谷等地的地质条件都千差万别,风成沙、红土、膨胀土等各种特殊土质给路基处理和路面设计带来了巨大的复杂性。大部分地区缺少优质的石料、砂砾等常规筑路材料,增大了材料选择及使用的难度。

为了应对上述的挑战,长寿命水泥混凝土路面技术在非洲的应用要根据当地的实际情况,追求技术经济性。在材料方面大力推广使用当地材料。对红土或者性能较差的天然砂砾进行水泥或者石灰稳定处理,以满足基层或底基层强度和耐久性的要求,在非洲项目中已经成为了常规的做法。在没有优质粗骨料的地区,探索使用破碎性能好的替代岩石或者优化混凝土配合比,在保证性能的前提下减少高级别骨料的使用。同时施工技术的选择应根据当地实际情况,考虑到机械化程度的不同,部分项目还需要人工或小型机具来完成,所以施工工艺的制定要兼顾效率和质量可控性。

（三）中东地区工程特点

中东地区以极端高温、干旱少雨、风沙频发、土壤盐碱化等为特征,给高速公路水泥混凝土路面设计与施工造成很大困难。夏季地表温度可以高达六七十摄氏度,强烈的日照和干热风使得混凝土水分蒸发过快,很容易产生塑性收缩裂缝和干缩裂缝,严重影响路面早期性能和长期耐久性。昼夜温差大引起的温度应力、土壤和地下水中高浓度的硫酸盐、氯盐都会侵蚀混凝土,加快混凝土的劣化。

在这种极端环境下，实现水泥混凝土路面的长寿命，必须采取一系列特殊的技术措施。

1. 混凝土配合比设计时首先要考虑其抗裂性、抗侵蚀性。一般采用中低热水泥或抗硫酸盐水泥，掺入粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，以降低水化热，改善孔结构，提高混凝土密实度，提高混凝土抵抗化学侵蚀的能力。同时加入高效减水剂和保水剂，改善混凝土的工作性，减少拌合用水量，降低收缩开裂的风险。

2. 施工工艺控制对于保证路面质量有着关键性的作用。为了避免白天高温，混凝土浇筑工作一般在夜间或者清晨进行。拌合时用预冷骨料、加入冰屑或用冷却水等方式控制混凝土出机温度和入模温度，是防止混凝土过早凝结的有效手段。浇筑完成后应立即进行覆盖保湿养护，用土工布、塑料薄膜等多层覆盖，并不断洒水，防止水分散失过快，保证水泥充分水化。在大风天气中还需要设置防风墙，减小表面风速，保证养护效果。

（一）案例一：柬埔寨金港高速公路项目

柬埔寨金港高速公路为该国第一条高速公路，连接首都金边和重要港口城市西哈努克港，全长 187 公里，在建设过程中采用了中国的规范和标准。项目所在热带季风气候区常年高温多雨，沿线软土路段分布较多，给水泥石混凝土长寿命路面提出了很高的技术要求。根据上述特点，在项目的设计与施工中集成了一系列的新技术，给湿热地区建设高品质混凝土路面提供宝贵经验。

在路面结构设计时充分考虑到了当地重载交通、湿热环境两种因素的影响。为了提高路面结构的耐久性、稳定性，采用水泥稳定碎石做基层。项目在柬埔寨首次使用了水泥稳定碎石双层连铺的新施工工艺。该工艺在下层基层碾压完成后立即铺设上层基层，两层之间紧密嵌锁、粘结，大大提高基层的整体性、抗冲刷能力，有效防止雨水渗透造成层间分离，给上部混凝土面层提供更加稳固、均匀的支撑。

项目施工期间，根据高温多雨的气候特点，对质量实行精细化的控制。为保证混凝土拌合物的质量，项目设置了中心实验室，对原材料进行严格筛选，不断改进混凝土配合比。施工期间使用数字化监控系统，对拌合站生产参数、运输车辆、车辆在途信息进行实时采集，保证混凝土从生产到浇筑的每一个环节都在严密的控制之下。雨季施工时，项目制定了详细的方案，合理地安排工序，配置充足的防雨设施，保证工程进度和质量不受恶劣天气的影响，为创建“平安百年品质工程”打下良好的基础。

对于金港高速项目软土地基的挑战,根据各个地段地质条件不同而采取不同的地基处理技术。项目实行样板引路、首件先行的制度,每一个新的施工工艺都要经过充分验证以后才进行大规模推广。严谨的工程管理方法、先进的施工技术、智慧化工地系统,克服了自然环境带来的不利影响,保证了路基的长期稳定,为整个高速公路水泥混凝土路面长寿命性能打下了基础。

(二) 案例二:阿尔及利亚南北高速公路项目

阿尔及利亚南北高速公路是该国重要的交通干道,我国承包其中 53 公里的一标段。该段线路穿越阿特拉斯山脉,地质条件十分复杂,是整个项目里最困难的部分。项目地势险峻,桥隧比高,有特大桥和特长隧道多处,沿线地质又被称为“地质灾难博物馆”,给混凝土路面设计及施工带来巨大困难。

在复杂的地形地质条件下,路面结构的适应性设计就显得更加重要。因为线路频繁穿越山体,大量的开挖、填筑工作造成路基的稳定性问题。设计时要根据详细的地质勘察资料,对高边坡和易滑坡地段做专项加固设计。对桥梁与隧道连接段的路面结构要进行特殊处理,以适应结构物与路基之间可能产生的差异沉降,防止接头处出现错台或者开裂。项目组对各种复杂的衔接构造处做了细致的设计,以达到路面平顺性及长久耐久性的目的。

该项目在材料使用和施工技术上都具有很好的在地化适应性。阿尔及利亚的建筑材料,尤其是骨料的质量同我国的标准有差别。为此项目技术团队进行了大量试验研究,通过优化混凝土配合比,调整水泥、砂、石和外加剂掺量,成功地利用当地材料配制出符合高速公路长寿命要求的混凝土。施工过程中面对险峻的施工环境、巨大的作业难度,项目组采用先进的机械设备、施工方法,对施工人员进行严格的培训,在高差大、空间狭小的复杂环境中,仍然保证混凝土路面施工质量达到高标准。项目成功经验,给在类似复杂山区环境下修建长寿命水泥混凝土路面提供范例。

(三) 案例三:沙特阿拉伯吉达-麦地那高速铁路配套公路项目

沙特阿拉伯吉达到麦地那的高速铁路是连接两大圣地的交通干线,其配套公路项目也面临中东地区典型的极端气候。该地区夏季气温高、日照强、气候干燥,对新浇筑水泥混凝土性能影响极大。在这种情况下,控制混凝土水分蒸发和温度裂缝,就成为实现路面长寿命设计的主要任务。该项目建设过程中积累的经验,给沙漠高温环境下混凝土路面施工提供了一份宝贵的实践指南。

为了应对极端高温，本项目对混凝土施工的各个环节都做了严密的温控。在原材料阶段就进行降温处理，骨料堆放在遮阳棚下，避免阳光直射；混凝土拌合时，使用冷却水或者直接掺入片冰，降低混凝土的初始温度。施工时间的选取也非常讲究，一般把混凝土浇筑时间安排在温度较低的夜晚或者清晨，避开白天的酷热。这些措施共同保证了混凝土在运输、摊铺过程中工作性能，延缓凝结时间，为后面振捣抹面作业创造有利条件，从而有效地防止了塑性收缩裂缝的产生。

浇筑完成后养护阶段对干热环境混凝土强度、耐久性的形成起着决定性的作用。项目采用了高效的保湿养护工艺，混凝土初凝后立即用自动喷雾设备对混凝土表面喷洒养护剂，形成一层致密的薄膜把内部水分封闭起来。同时立即用多层土工布和塑料膜严密覆盖，尽量减少水分蒸发。在整个养护周期内，根据需要洒水，使混凝土表面一直处于湿润状态，以保证水泥的水化反应充分进行，这对提高路面表层的耐磨性、抗裂性及长期耐久性起着决定性的作用。

海外典型区域工程特点对照表

区域特点	东南亚地区	非洲地区	中东地区
主要环境特征	高温、高湿、强降雨	地质多样、材料缺乏、后勤受限	极端高温、干旱、风沙、盐碱化
路面主要病害	唧泥、板底脱空、水损害	路基不稳定、材料性能不足	塑性收缩裂缝、干缩裂缝、化学侵蚀
设计应对措施	加强排水、可排水基层、软基处理	因地制宜、适应性设计、地质勘察	抗裂、抗侵蚀配合比、中低热水泥
施工应对措施	质量控制、防雨、原材料把控	本地化材料、先进设备、严格培训	温控（预冷、夜间施工）、高效保湿养护、防风

从海外典型区域工程特点对照表中可以发现，各个地区的自然条件给高速公路水泥混凝土路面的设计、施工提出了不同的要求，需要工程师们因地制宜地采取相应的技术措施。

第十二章 预防性养护与快速修复技术

第一节 路面性能监测与状况评估方法

一、路面性能监测方法

（一）人工定期检测方法

人工定期检测是路面养护管理中最传统、最基本的检测方法，主要依靠有经验的工程技术人员，利用目视观察和简单的便携式工具对路面状况进行检查和测量。该方法的核心就是看、敲、量、钻，即观察路面有无裂缝、错台、剥落等病害，用敲击声判断板底是否脱空，用三米直尺等工具测量路面平整度、错台高度，必要时钻芯取样，分析混凝土材料强度、结构层厚度。

人工检测的另一个重要部分就是用落锤式弯沉仪来评价路面的承载能力。该设备模拟车辆荷载对路面的冲击，得到的动态弯沉盆数据再反算路面各个结构层的模量，进而科学评价路面的承载能力以及接缝传荷能力。该方法可以获得准确的结构强度信息，对路基路面病害诊断以及结构性修复方案的制定起着不可替代的作用。

尽管人工检测方法直观、灵活，能对局部病害做深入诊断，但是它固有的缺点也十分明显。检测结果的准确性很大程度上取决于检测人员的经验和主观判断，不同检测人员之间存在着较大的差异。检测过程劳动强度大、作业效率低，不能满足高速公路大范围、快速普查的要求。同时在开放交通路段人工检测作业，作业人员存在较大安全风险，也容易对正常交通产生干扰。

（二）自动化连续检测方法

自动化连续检测技术属于长寿命路面性能监测的发展趋向。利用集成了多种高精度传感器的多功能路面检测车，在正常行驶速度下快速、连续、无损地采集路面各项性能指标。此方法大大提高了检测的效率和安全性，并且由于它具有客观、可重复等特点，已经成为现代路网养护管理主要的数据来源。

自动化检测系统通常融合多种先进技术, 以实现对面路面多维度性能的同步测量:

1. 用高分辨率线阵相机或者面阵相机对路面进行连续扫描, 用人工智能图像识别技术自动识别路面表面缺陷的种类、程度、位置。

2. 路面平整度、构造深度检测, 用激光传感器测量路面的纵向剖面, 计算国际平整度指数, 评价行车舒适性。同时用激光纹理扫描法测量路面宏观构造深度来评价路面的抗滑性。

3. 路面几何参数测量: 用激光扫描测量路面横断面, 准确地获取车辙深度、路面宽度、横坡度等几何参数, 为路面永久变形和排水性能分析提供数据支持。

4. 结构内部状况探测, 车载式探地雷达可以像给道路做“CT”一样, 无损地探测路面结构层厚度、内部缺陷(脱空、疏松)和基层含水情况, 为结构性病害诊断提供直观依据。

自动化连续检测的优点就是高效、数据量大、客观。它可以在不中断交通的情况下完成数百公里的检测任务, 所采集到的数据带有准确的地理坐标信息, 方便的存到数据库里, 形成路面性能的时间序列数据, 为分析路面性能衰变规律和预测未来状况奠定坚实的基础。

(三) 综合检测评定方法

单个检测方法都具有它的适用范围与不足之处。人工检测精度高、针对性强, 但是效率低、主观性强; 自动化检测高效、客观, 但是对复杂病害的成因诊断和微观分析不足。因此, 在高速公路水泥混凝土长寿命路面性能监测实践中, 一般采用人工检测和自动化检测相结合的综合评定方法, 以达到相互补充、获得最全面可靠的路面状况信息的目的。

综合检测评定方法的应用模式一般是: 用自动化检测车对路网进行普查, 快速获取路面平整度、破损情况、车辙等宏观性能指标, 对路网整体技术状况做出初步评价, 找出性能较差或者存在异常的路段。宏观普查可以快速找到问题区域, 给后续养护决策指明方向。

对普查中出现的重点路段, 组织有经验的工程技术人员进行人工徒步详细调查并加以核实。本阶段检测人员可以对自动化检测出的病害进行现场核实, 并对病害产生的原因进行分析, 根据裂缝的形态、开合情况来判断它是荷载裂缝还是温度裂缝。采用落锤式弯沉仪等设备对路段结构的承载能力进行精确测量, 从而

判断有无板底脱空、接缝传荷不足等问题。

采用宏观普查和重点详查相结合的方法，可以充分发挥自动化检测高效、覆盖面广的特点，也能依靠人工检测得到深入的发现，从而使评价结果全面、准确。综合检测方法获得的数据成果可以给路面管理系统提供高质量的输入，从而制定出更加科学、经济、前瞻性的预防性养护方案，是实现长寿命路面管理目标的必要的技术保障。

二、路面状况评估技术

（一）评估指标体系

为了全方位地体现高速公路水泥混凝土路面的技术状况，必须创建起一个结构合理、指标齐全的评价体系。体系一般以路面的功能性、结构性这两大主要性能为研究对象，根据相关规范标准（中国的公路技术状况评定标准 JTG 5210 等）来建立。

该指标体系可分为三层，其详细内容如下表所示：

路面状况评估指标体系

层次	指标名称示例	数据来源 / 构成	评价侧重
第一层：单项检测指标	裂缝长度、宽度、接缝错台高度、国际平整度指数、弯沉值等	通过各类检测手段直接获取的原始数据	最直接、细致的路面性能表现
第二层：分项性能指数	路面破损状况指数、路面行驶质量指数、路面结构强度指数	基于单项指标计算得出，综合反映某一方面的性能	某类特定性能的综合量化指标
第三层：综合性能指数	路面技术状况指数	对各项分项指数进行加权组合	路面整体服务水平的宏观评价

从表中可以看出第一层为单项检测指标，它们是用各种检测手段直接得到的原始数据，如裂缝长度、宽度、接缝错台高度、国际平整度指数、弯沉值等。中间层是从单项指标计算得到的各个分项性能指数，主要有路面破损状况指数，反映各类表面病害的程度；路面行驶质量指数，由国际平整度指数转化而来，用来评价行车舒适性；路面结构强度指数，根据弯沉测试数据来评定路面的承载能力。顶层是综合性能指数，路面技术状况指数，它是将各个分项指数加权求和得到的，是表征路面整体服务水平的最终评价结果。

（二）状况评估方法

路面状况评价方法的核心就是用数学模型把多源、异构的检测指标数据转换成统一的、有物理意义的状况指数。评价方法由原来的单一指标评价发展到现在的综合指数评价，而今，数据驱动的智能化分析方法越来越受到重视。

1. 单项指标评价：即把某个关键检测指标的数值同预先设定的阈值相比较，判断其是否达到使用要求。将测得的接缝传荷效率与规范规定的最小值比较，或者将国际平整度指数与不同的服务水平界限值比较。此法简单明了，但是不能全面地反映路面的整体情况。

2. 综合指数评价法是目前应用最广泛的评价方法，其中路面状况指数的计算最为典型。该方法根据检测到的路面病害（裂缝、断板、错台等）的类型、严重程度、数量等查阅相应的扣分曲线或表格，得到每种病害的扣分值。对所有病害扣分值进行修正、汇总，用 100 分减去总扣分值得到 PCI 值。类似地，给 PCI、RQI 等各个分项指数赋予不同的权重，求和得到路面技术状况指数，进而对路面整体性能进行综合评价。

伴随着大数据和人工智能技术的发展，新的评价方法也不断涌现出来。采用机器学习模型把路面检测数据、交通荷载数据、气象环境数据、历史养护记录等多源信息融合起来，可以对当前的路面状况做出更准确的评定，也可以预测路面未来的发展趋势。依靠以数据为基础的预测性评价手段，给实现由被动修理向主动预防养护模式的转变提供有力的支持。

（三）状况等级划分

状况等级划分就是把量化评估指数转化为管理者容易理解、应用的定性等级，也是养护决策的直接依据。根据不同的指数区间分界值来确定路面技术状况，将路面技术状况分成不同的等级，每一个等级对应着不同的服务水平描述和养护对策建议。

按照中国公路技术状况评定标准等规定，路面技术状况一般分成优、良、中、次、差五级。具体划分标准为：路面技术状况指数 PQI90 分以上为优；80 至 90 分为良；70 至 80 分为中；60 至 70 分为次；60 分以下为差。这样划分的标准给路网尺度的养护规划提供明确的指引。

不同的状况等级对应不同的养护措施。路面处于“优”或“良”等级的时候，性能状况较好，一般只需要做预防性的日常养护工作，例如接缝密封、局部罩面

等，以减缓路面衰变的速度。当路面状况降至中等时，就表明其性能已经明显下降，必须要通过板底灌浆、裂缝修补等方式进行修复性养护来恢复路面的使用功能。当路面状况为次级或者差级的时候，则说明路面已经出现了严重的结构性和功能性损坏，需要采取大中修或者改建等结构修复措施，比如更换板体、加铺层等，来保证路面的安全使用。

第二节 预防性养护决策与时机选择

一、预防性养护时机选择

（一）路面性能阈值确定

路面性能阈值的确定，就是判断是否需要预防性养护的直接依据。此过程是从路面性能衰变规律的认识开始的。水泥混凝土路面路面状况指数 PCI、平整度 IRI、抗滑性能 BPN 和接缝传荷能力等各项性能指标的退化不是线性的，一般经过一个较长的缓慢衰减期之后才会进入快速恶化阶段。预防性养护的目标就是在性能快速下降的“拐点”到来之前加以干预。

阈值的确定一般要综合考虑多种因素，它应该以长期监测数据建立的路面性能预测模型为基础，分析各项关键指标随时间、交通荷载作用的变化曲线，找到性能开始加速衰减的临界点。阈值的确定要联系道路的功能等级，交通量，气候环境以及养护目的。交通量大的路段性能临界值应严格控制，交通量小的路段可以放宽。一些规范性文件也给出了一些阈值的参考，比如裂缝板率小于 5% 或者面板脱空率小于 5% 的时候，一般认为是进行预防性养护的合适区间。把规范标准同具体的路段性能衰减模型结合起来，就可形成起一套动态的、因路制宜的性能阈值体系。

阈值的确定还要是一个反馈修正的闭环过程。预防性养护过后应该连续跟踪路面性能改善状况和衰减速度，据此来判定阈值设定的好坏。大部分路段达到预设阈值时已经出现明显的早期损坏，说明阈值设置过松，可以提高；反之则可以降低。经过实践的不断修正，能使性能临界值更加精确地反映启动预防性养护的最适时，进而取得最大的养护效果。

（二）养护经济性分析

养护经济性分析，特别是全生命周期成本分析，就是决策者对众多的养护方案和养护时机进行量化的选择工具。核心思想就是道路成本不应该只考虑初期建设投资，而应该包括设计、施工、运营、养护、废弃处置全过程的总成本。预防性养护短期内会增加一定的开支，但是它能够有效减缓路面的性能退化，从而延缓大修或者重建路面高额的费用，在路面整个生命周期内大幅度降低总费用。

经济性分析时一般要建立预防性养护有无两种情况下的费用模型。在没有采取预防性养护措施的情况下，路面性能会自由衰退到某一严重的损坏状态，这时只能采用高成本的矫正性或者修复性养护，费用支出曲线呈现出若干个间隔较短、峰值极高的脉冲形态。而当采取预防性养护的时候，路面性能好的时候所付出的养护费用较少，可以减缓性能下降的速度，费用曲线为一系列低幅度、平稳的支出。两种情况在分析期内（一般为20年或40年）所有成本的现值总和进行比较，就能看出哪一种方案更经济。研究表明，及时采取的主动预防性养护措施比被动的“破了再补”的方式要经济得多。

（三）养护决策方法

在确定性能阈值、完成经济性评价之后，养护决策方法就为选择具体的养护时机和方案提供了一种系统的途径。传统的决策大多依靠工程师个人经验，虽然在一定程度上有效，但是缺少系统的、可以重复的方法。现代养护决策正在向更加客观、数据驱动的智能化方向发展，主要有基于专家系统的方法、多目标决策分析法、使用数学模型的优化方法。

1. 基于专家系统的决策方法：该方法把资深路面养护专家的知识、经验以及推理过程编成计算机程序，形成一个知识库和推理机。系统接收到某一路段的路面检测数据、交通状况、环境信息之后，可以模拟专家的思维过程，分析病害产生的原因，提出合理的养护时机和措施组合。该方法对那些不能完全量化的模糊性问题有很好的适用性。

2. 多目标决策分析法，路面养护决策一般要兼顾成本最低、路况最好、交通影响最小等许多甚至相互矛盾的目标。多目标决策分析法，例如层次分析法，把复杂的决策问题分为目标、准则、方案等层次，并请专家对每个层次的要素两两比较、打分，最后得出各个养护方案的综合优先级。该方法结构清晰，可以将定量数据与定性判断很好地结合起来，使决策过程更加透明、科学。

3. 基于优化模型的决策方法：利用数学规划理论将养护决策问题转化成求最优解的数学模型。模型的目标函数为全生命周期成本最小化或者路网总体性能最大化，约束条件有预算限制、路面性能最低要求、资源限制等。通过求解该模型可以给路网或者某一条路在接下来的几年内，每个时刻应该采用什么养护措施提供最好的策略，从而达到总体目标的最优。

实际上，这几种方法不是互相排斥的，而是常常结合使用。从宏观上利用优化模型进行养护计划制定以及预算分配，在微观上通过多目标决策分析法或者专家系统细化养护方案，从而建立起层次分明、完整科学的决策体系。

二、预防性养护措施选择

（一）表面处治类措施

表面处治类措施主要是对路面表层早期功能性病害，即轻微磨损、抗滑性变差、小面积网裂等采取的措施。主要目的就是恢复路面使用功能、改善外观、有效封闭水分渗透途径，从而保护路面结构。该类措施一般不会使路面结构承载力得到明显的提高。常用的有薄层罩面、稀浆封层、微表处、表面纹理恢复等。

薄层或超薄层罩面，是在原有混凝土板上铺设一层很薄的沥青混合料或高性能水泥基材料，厚度一般在 2 至 4 厘米。能改善路面的平整度、抗滑性，封闭表层裂缝，防止水分下渗。对于交通量大的高速公路一般会采用聚合物改性沥青、环氧沥青等高性能材料来保证罩面层的耐久性、抗车辙性。

另一种常用的表面处治技术就是精铣刨或者抛丸处理。当路面表现为抗滑能力不足但是结构完好时，可以采用专用设备对路表进行 3 到 5 毫米左右深度的铣刨，或者采用高速钢丸冲击路面，改善宏观和微观构造，提高摩擦系数。该类施工速度快、对交通影响小、成本低，是功能恢复的一种有效方法。选择什么样的表面处治措施要根据路面具体性能衰退指标、交通条件、预期使用寿命等因素来决定。

（二）裂缝修补类措施

裂缝属于水泥混凝土路面常见的早期病害。如果不能及时解决的话，雨水就会顺着裂缝渗透到基层、路基当中，进而造成唧泥、错台、断板等一系列的结构性病害。因此，对达到一定宽度的裂缝进行及时有效的封堵修补，属于预防性养护工作。裂缝修补主要看选用什么样的材料和工艺，使得密封材料与缝壁粘结紧

密并且能够适应因温度引起的接缝张缩。

对宽度小于 3mm 的静态裂缝，用低粘度环氧树脂或者聚合物浆液进行压力灌注或者重力渗透，把裂缝完全填塞并连接起来，使板面恢复完整。对于较宽的活动性裂缝或者工作接缝一般用开槽、清缝、填充的方法处理。用专用机械沿裂缝处切割出形状规则的“V”形或者矩形槽口，深度、宽度按裂缝情况及材料要求而定。然后用高压空气将槽内碎屑和尘土全部清除干净，保证缝壁干燥、清洁。将加热过的聚合物改性沥青基密封胶或者常温施工的聚氨酯、硅酮类密封胶灌入槽内，使密封胶与缝壁紧密结合，形成一道柔性的防水屏障。

（三）局部加固类措施

当路面出现小范围的结构性或半结构性病害，如板底脱空、板角断裂、局部破碎等，可用局部加固法恢复板块的稳定性和承载能力，防止病害进一步发展。此类措施的干预深度大于表面处治，但范围小于全厚度的板块更换，一般具有较好的效费比。

常见局部加固措施对比表

措施类型	适用病害	主要功能	施工特点	注意事项
板底脱空注浆	板底脱空、唧泥	恢复板与基层密实接触，提高承载力	钻孔、高压注浆	浆液强度不宜过高，避免形成硬点
局部深度修补	板角断裂、啃边、小面积剥落	恢复路面完整性，提高局部承载力	切割、凿除、填充高性能混凝土	基底处理、界面剂应用、养护
全厚度修复	板块完全破碎、严重多裂	彻底更换损坏板块	移除旧板、基层处理、浇筑新板	传力杆处理、养护、接缝功能

1. 板底脱空注浆（灌浆稳板）是由于行车荷载长期作用下，路基或者基层局部沉降造成混凝土板与下承层之间出现空隙，即板底脱空。脱空会使得板体悬空，大大增加了行车荷载作用下的板体弯拉应力，极易引发断板。处理方法是钻孔，然后用流动性好、微膨胀、终凝后具有一定强度的水泥基或化学基浆液灌入空隙中，重新建立板与基层之间的紧密接触，使板块稳定。所选浆液强度不能过大，以免形成硬点。

2. 局部深度修补：对于板角断裂、啃边严重、小面积表面剥落等病害采用局部深度修补。先切出损坏区域，挖到一定深度，形成规则的修补区，侧壁垂直。清理干净基底，涂刷界面剂以提高新旧混凝土的粘结力。采用早强、微膨胀高性能混凝土或聚合物砂浆填充、捣实、养护。如上方“常见局部加固措施对比表”

所示,此方法可以迅速恢复路面的完整性以及使用功能。

3. 全厚度修复(更换破碎板):当某板块出现了多条严重的裂缝,或者已经完全破碎,超过预防性养护修复范围的时候,就只能更换整块破碎板。虽然属于修复性养护,但是作为预防性养护失败后的补救措施,施工质量的好坏直接影响到临近板块的长期性能。施工时需要将整块板破碎并移除,处理好基层,在旧板的传力杆和拉杆上涂刷防粘材料,然后浇筑新混凝土,精心养护,使新旧板块之间接缝功能良好。

第三节 高速公路路面快速修复材料与工艺技术

一、路面快速修复材料

(一) 快硬水泥类材料

快硬水泥类材料是路面快速修复中应用最广的无机胶凝材料。其最大的优点就是水化速度快,可以在很短的时间内达到较高的强度,从而很快恢复交通。这类材料一般是以特种水泥为基料,经过精确调整组分,并加入高效减水剂、早强剂等各种外加剂来达到快速凝结硬化的目的。

常见的快硬水泥有硫铝酸盐水泥、高铝水泥和经过特殊改性的通用硅酸盐水泥。其中硫铝酸盐快硬水泥由于早期强度发展迅速、后期强度稳定、微膨胀以及良好的抗冻融性能,在紧急抢修工程中占有很重要的地位。

快硬水泥在实际使用时一般会 and 精选骨料、高效减水剂等混合,制备成快硬混凝土或者快硬砂浆。这些材料体系可以几小时内达到通车强度要求,快硬水泥基修补料 8 小时抗压强度可达到 20 兆帕以上,24 小时后可达到设计强度的 70% 以上,完全可以满足高速公路快速开放交通的需要。通过改变配合比,可以调节材料的凝结时间,在不同的温度、湿度下都能有良好的施工性能。目前材料研发的重点是如何解决后期强度出现的倒缩现象,并大幅度提高新旧混凝土的粘结力,保证修复结构可以和原路面形成共同工作整体。

快硬水泥类材料的另一个发展方向就是磷酸镁水泥。该类材料通过酸碱中和反应很快形成高强度的磷酸盐陶瓷体。其反应过程不需要水分蒸发,凝结硬化速度快,最短几分钟初凝,1 到 3 小时强度可达 20 到 40 兆帕。磷酸镁水泥与混凝

土粘结性好,具有良好的耐磨、抗化学腐蚀性能,适合于机场道面、桥梁伸缩缝、重载路段快速修补。虽然成本高,但是由于磷酸镁水泥具有极快的修复速度,在对应急抢修时效性要求极高的场合下,磷酸镁水泥具有不可替代的技术优势。

(二) 聚合物类材料

聚合物类材料是以高分子聚合物为主要粘结剂或者改性剂的修复材料。主要优点为粘结强度高、韧性好、抗渗性好、耐化学腐蚀性好。常用的聚合物材料有环氧树脂、聚氨酯、甲基丙烯酸甲酯等。这些有机材料可以渗透到混凝土的微小孔隙、裂缝中,固化后形成致密的网络结构,进而达到增强、保护受损结构的目的。

环氧树脂是该类材料中最具代表性的一种,对混凝土、钢材等多种基材都有很强的粘结力,固化后力学强度可以超过高标号混凝土。环氧树脂灌浆料流动性好,可以用来修补宽度小于0.5毫米的微小裂缝;环氧砂浆多用于较大体积的坑槽、断角等病害的修补。聚氨酯材料由于具有较好的弹性及变形能力,常被用在活动裂缝、接缝等处,可以吸收温度变化、荷载作用所产生的位移,防止修复层再次开裂。将环氧树脂进行聚氨酯增韧改性后,可制备出强度高、韧性好的修复材料,大大改善了传统环氧树脂固化后偏脆的特性。

甲基丙烯酸甲酯是反应活性极高的树脂材料,它的最大特点就是固化速度快。即使在零度以下的低温环境里,也能在一到两个小时之内固化并达到通车强度。MMA材料具有耐磨、抗冲击、抗紫外线老化的优点,并且与沥青、水泥混凝土有良好的粘结性,所以广泛用于桥面铺装、停车场地面和严寒地区应急抢修。聚合物类材料性能好,但受施工环境温度、湿度的影响大,成本高,热膨胀系数与水泥混凝土存在一定的差异,在大面积修复时必须考虑温度应力的影响。

(三) 复合修复材料

复合修复材料就是通过科学的配比将无机材料的刚度、耐久性以及有机材料的粘结性、韧性结合起来,达到优势互补的效果,从而获得更好的修复效果。这类材料种类繁多,其中应用最广的是聚合物改性水泥基修复材料,另外还有纤维增强复合材料等。

聚合物改性水泥基修复材料,即在快硬水泥砂浆或者混凝土中加入一定比例的聚合物乳液(如丙烯酸乳液)或者可再分散乳胶粉。聚合物的加入,在水泥水化产物之间形成连续的聚合物膜,有效地填充并封堵砂浆内部的毛细孔隙,从而

大大提高材料的粘结性、抗渗性、抗裂性、耐磨性。聚合物改性水泥砂浆与旧混凝土粘结强度一般比普通水泥砂浆高几倍。

聚合物改性水泥基修复材料类型及其特点

类型	主要成分	主要特性	典型应用
水泥基聚合物复合砂浆	高分子聚合物、水泥、细骨料、外加剂（预干混）	操作方便，质量稳定，兼具粘结性和耐久性	路面表层薄层修补、起皮、麻面、细微裂缝
纤维增强复合砂浆 / 混凝土	水泥基复合砂浆 + 合成纤维（聚丙烯、聚乙烯醇）或钢纤维	提高抗裂性能和韧性，阻止塑性收缩裂缝，增强抗冲击性、疲劳寿命	需提高材料延展性和变形能力的修复体

水泥基聚合物复合砂浆是将高分子聚合物、水泥、细骨料以及多种添加剂预先干混包装的一种材料。施工时只需要加水搅拌即可使用，操作简便，质量稳定。它既有有机材料的优良粘结性，又无机材料良好的耐久性，特别适合于路面表层薄层修补、起皮、麻面、细裂缝等病害的修补。

为了提高修复材料的抗裂性、韧性，一般会在修复材料中加入合成纤维（聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维）或者钢纤维。纤维在材料中呈三维乱序分布，可以阻止塑性收缩裂缝的产生和发展，大大提高修复体的抗冲击性以及疲劳寿命。高强高模聚乙烯醇纤维对提高材料延展性、变形能力有很大帮助。

复合修复材料的设计具有很高的灵活性，通过改变聚合物种类及掺量、纤维种类及长度、水泥品种以及外加剂的组合等，可以满足各种修复场景下不同的性能要求。对需要快速恢复交通的薄层罩面修复，可以开发出早强、高粘结、抗裂、耐磨等多种性能的聚合物纤维复合砂浆。从上表可以看出，该类材料既可以保证修复层和基层之间牢固结合，又可以赋予修复结构良好的长期服役性能，是实现水泥混凝土路面长寿命修复的重要技术途径。

二、路面快速修复工艺

（一）局部修补工艺

局部修补工艺主要是对路面板块上孤立的、小范围的病害，即坑槽、断角、啃边、裂缝等进行修补。主要思想是，在不更换整块板的情况下，保证路面的平整度和结构完整性，精准去除损坏的部分，然后利用高性能修补材料填充。本工艺的关键在于新旧界面之间必须牢固粘结，不能在荷载或者环境的作用下再次脱落或者开裂。

施工流程一般为,先确定病害区,用切割机沿病害区外缘垂直切割,形成规则、槽壁平整、无松动的修补槽。随后将破损的混凝土凿除,把切割区域里的混凝土全部清除干净,清理槽底,去除所有碎屑、浮尘。然后进行界面处理,用高压水枪冲洗清理好的槽壁、槽底,涂刷专用界面剂或者环氧树脂浆液以增加新旧混凝土间的粘结力。然后进行材料的浇筑与振捣,将搅拌好的快速修复材料填入槽内,充分振捣密实,保证无空洞。最后一步为表面抹平和养护,抹平后应立即用土工布覆盖或喷洒养护剂养护,直到材料达到开放交通所需的强度为止。

裂缝类病害一般采用扩缝灌浆法或者压力注浆法进行处理。扩缝灌浆法适合较宽的裂缝,即在裂缝处开凿一定深度和宽度的沟槽,清理干净后填入改性环氧砂浆或者聚合物砂浆。压力注浆法适合于微细裂缝,在裂缝表面设置注浆嘴,用压力将低粘度的环氧树脂或化学浆液注入裂缝内部,填充裂缝,保证板块整体性。局部修补工艺施工方便,用料少,对交通影响小,是日常养护中常用且高效的修复方法。

(二) 整体修复工艺

当路面病害表现出普遍性、大面积分布的特点,网裂、严重磨损、平整度急剧下降等,局部修补已无法从根本上解决问题的时候,就需要使用整体修复工艺。这类工艺是对整个路面结构层或者至少是对表层进行系统处理,从而全面提高路面的服务性能和承载能力。主要的整体修复工艺有超薄罩面技术、共振破碎技术等。

超薄罩面技术是在对旧路面进行预处理后,在其上加铺厚度一般为 1-3 厘米的高性能聚合物混凝土或者沥青混合料薄层。该技术的关键就是保证罩面层和旧路面板之间牢固粘结,不出现层间剥离。施工前需对旧路面做彻底的清扫、修补局部严重病害,涂刷粘结力很强的界面剂。超薄罩面可以改善路面的平整度和抗滑性,同时还可以起到防水、阻止病害向下发展的作用,是一种经济高效的路面功能性恢复手段。

共振破碎法属于更加彻底的结构修复方案。用专门的高频低幅振动能量破碎旧的水泥混凝土板,形成大小可控的嵌挤颗粒,但是不会破坏下方的路基、基层。破碎后的路面经过压实,形成高强度稳定的基层,可以直接加铺沥青罩面。“白改黑”工艺从根本上解决了旧水泥板接缝或者裂缝向上反射的问题,把刚性路面改造成半刚性路面,大大提高了行车的舒适性。共振破碎技术施工速度快、环保

（旧路面材料可就地再生利用）、对路基扰动小等优点，特别适合于已经达到设计寿命末期，结构性病害严重的水泥混凝土路面的升级改造。

（三）应急抢修工艺

应急抢修工艺是指突然出现并且严重影响行车安全的严重路面病害（大面积坑洞、破碎板、沉陷等）所采取的超快速修复措施。其主要目的就是尽快恢复道路基本通行条件，修复速度远远大于一般修复。因此应急抢修一般在夜间或者车流量极小的时候进行，必须使用凝结硬化速度快、早期强度发展非常快的抢修材料。

破碎板快速更换属于应急抢修中典型的工艺。当某块路面板块发生贯通性断裂，结构完全失效的时候，需要将该块路面板全部挖除后重新浇筑。工艺流程为快速切割、破碎破损板，清理现场，处理暴露出的基层（必要时进行补强），吊装预制混凝土板或者现场浇筑超早强混凝土。现场浇筑时所用的混凝土修复材料应在 1~3 小时内达到通车强度要求。此类材料一般采用硫铝酸盐水泥或磷酸镁水泥的特种混凝土，配合高效外加剂，以达到强度迅速增长的目的。

应急抢修的另一个难题就是恶劣天气条件下的施工问题。低温时，常规水泥基材料的水化反应变慢，不能很快硬化。此时只能使用温度不敏感的修复材料甲基丙烯酸甲酯树脂砂浆。即使在零下 20 度的低温环境中，MMA 材料也可以迅速完成固化。由于它的极佳的低温施工性能，所以被作为北方冬季应急抢修的首选材料使用。应急抢修工艺很大程度上依靠材料先进性以及施工组织科学性，通过使用特种材料配合高效施工流程来最小化道路封闭时间，从而保证高速公路路网的通行安全。

第四节 修复后性能评价与验收标准

一、修复后路面性能评价方法

（一）短期性能评价

短期性能评价主要对修复工程完成之后短时间内路面状况进行评价，目的是验证修复区是否达到初步设计所要求的功能，为工程交工后立即开放交通提供数据支持。本阶段评价的重点是结构的稳固性以及表面功能的恢复情况。评价工作

一般在修复体养生期结束、开放交通前或者开放交通初期进行,以迅速反馈施工质量。

从结构性能上主要检测修复体和旧混凝土板的结合性能、修复板的荷载传递能力。一般用落锤式弯沉仪对修复区板角、板边、接缝处进行检测,根据弯沉盆数据计算接缝荷载传递效率。该指标可以判断修复之后板块是否协同工作,防止出现错台病害。也可以用拉拔试验或者钻芯取样后的斜剪试验,直接测定新旧混凝土界面的粘结强度,保证修复材料和原结构形成牢固的整体。

表面性能主要是指路面的平整度、抗滑性。平整度是决定行车舒适性的主要因素,一般用三米直尺或连续式平整度仪来检测,计算国际平整度指数。长寿命路面的修复区域 IRI 值应达到和新建路面相当的水平。抗滑性能直接关系到行车的安全性,在潮湿的环境里更加明显。可以采用摆式摩擦系数测定仪、激光纹理深度仪等仪器对修复表面的宏观构造、微观构造进行量化测定,保证其摩擦力足够。

(二) 长期性能评价

长期性能评价是短期评价的延续和深化,它的目的就是跟踪修复区域在交通荷载、自然环境的作用下所表现出的性能演变规律,检验修复技术与材料的耐久性,判断修复技术是否真正实现了长寿命的目标。这是个长期的动态监测过程,所得到的数据将是以后改进修复设计、技术的重要依据。

长期性能评价的首项工作就是定期开展路面损坏情况的调查。这包括对修复区域及其周边部分进行目视检查或使用自动路面病害检测车采集数据,重点考察修复界面处有无新的裂缝、修复材料有无剥落或磨损、接缝处有无错台或唧泥等病害。对裂缝板率、损坏面积等指标进行连续跟踪可以得到性能衰减曲线,进而可以预测修复体的使用寿命。

材料性能的长期衰减也被当作评价的重要方面。修复后服役几年之后,在不影响结构安全的位置钻取芯样,送至实验室进行一系列检测。测试项目包括抗压强度、抗折强度、弹性模量等力学性能指标,还有抗冻融循环能力、抗氯离子渗透性能等耐久性指标。把测试结果和修复初期基准数据对比,能定量分析修复材料在长期使用中性能保持状况,从而给材料长久可靠性提供最直接的证明。

(三) 综合性能评价

综合性能评价是为了克服单一指标不能反映路面真实状况的局限性而提出的

一种系统化评价方法。它采用多层次、多指标的评价体系，把短期评价、长期评价中得到的路面结构、功能、损坏状况等各方面信息综合起来，得出一个可以反映修复区域整体服务水平的综合指数。

建立综合评价体系通常遵循特定的技术流程，该流程确保了评价结果的科学性与可比性。

1. 数据采集与标准化：对短期和长期性能评价所得到平整度 IRI 值、抗滑性能 BPN 值、接缝传荷效率、各种病害密度及严重程度等各项指标数据进行采集。由于各个指标的单位 and 取值范围不同，需要用数学函数把各项指标转换成无量纲的 0 到 100 之间的评分。

2. 确定权重系数：按照各项性能指标对路面总体服务能力影响程度的不同，给不同的指标赋予不同的权重。影响行车安全的抗滑性能指标、体现结构承载能力的指标一般会赋予较高的权重，而表面外观微小的缺陷所占的权重比较低。权重确定可以采用层次分析法或者专家打分法。

3. 综合评价指数 = 各分项指标标准化评分 * 权重系数，最后得到路面状况指数（Pavement Condition Index, PCI）或其他综合评价值。该指数可以直接体现修复后路面的总体健康状况，有利于管理部门进行横向比较和养护决策。

二、修复工程验收标准要求

（一）外观质量要求

外观质量是修复工程最直观的体现，也是质量验收的第一步。它不单关系到路容路貌的好坏，也是施工质量问题的预兆。验收时应在光线好的地方进行细致的目视检查，再用简单的测量工具进行辅助。外观质量要求修复后的路面具有均匀、整洁的视觉效果，不能存在影响行车安全和路面耐久性的明显缺陷。

修复区域的表面要平整、无明显色差，和周围旧路面过渡平顺。修复材料应密实，不得出现露石、蜂窝、麻面、脱皮等现象。严禁出现任何收缩裂缝、结构性裂缝。修复区边缘要整齐、线条流畅，与旧路面切割线要符合设计要求。接缝修复时，局部板更换后的接缝应顺直，宽度、深度一致，填缝料饱满、连续，与板壁粘结牢固，缝口无污染、无缺损。

（二）使用性能要求

使用性能直接关系到驾乘体验和行车安全，也是评价修复工程是否达到服务

水平的主要标准。验收时必须使用专业的检测设备进行定量检测，其结果必须符合规范规定的合格标准。一般按照公路等级、设计速度确定标准，其中高速公路要求最严格。

使用性能的验收标准主要包含以下几个关键指标：

1. 平整度：采用连续式平整度仪测定国际平整度指数，修复段的 IRI 值必须不大于设计要求限值。局部区域可用 3 米直尺进行检查，最大间隙在允许范围内。

2. 抗滑性能，修复路面达到规定龄期后，用摆式仪测定路表抗滑值或者用激光构造深度仪测定构造深度。对于高速公路来说，在潮湿的情况下抗滑值不能低于验收标准所规定的最小值，构造深度也要符合要求，保证雨天行车安全。

3. 接缝传荷能力：全厚度修复或者换板修复工程，必须检测新旧接缝的荷载传递效率。用落锤式弯沉仪测量的荷载传递系数不能小于规范要求的最小百分比，一般不得低于 70%，否则修复板在荷载作用下就会发生很大的独立变形。

（三）耐久性要求

耐久性是检验修复工程是否能达到“长寿命”的标准。验收标准是用来检验修复材料本身的质量是否符合要求，以及它与原结构结合后能否经受住长时间的交通、环境侵蚀。耐久性检验主要是通过材料试件试验和结构结合面现场检测来完成，是对内在质量的深入检验。

修复工程耐久性能验收关键指标

指标类别	检测项目	验收要求（示例）	检测方法	备注
材料性能	抗压强度	达到或超过设计强度等级	试件破坏试验	28 天龄期试件或芯样
	抗折强度	达到或超过设计强度等级	试件破坏试验	28 天龄期试件或芯样
	抗冻性能	冻融循环后质量损失率、强度损失率符合规范	实验室冻融试验	依据工程所在地气候条件确定
	抗氯离子渗透性能	符合相应技术标准	快速氯离子扩散试验	适用于沿海或除冰盐使用区域
结构粘结	新旧界面粘结强度	不低于规范限值	现场拉拔试验	评估修复体与原结构的整体性
			芯样劈拉 / 斜剪试验	对钻取的包含新旧结合面的芯样进行检测

材料性能是耐久性的基础，见上表。验收时应该检查施工同期所做的修复材料试件，或者从非关键部位钻取的芯样。试件的 28 天抗压强度、抗折强度要达到或超过设计规定的强度等级。根据工程所在地气候条件还会对冻融循环后的质量损失率、强度损失率等提出具体要求，检测结果必须符合相应的技术标准。

结构粘结性能决定修复效果是否长久。新旧混凝土间界面的粘结属于修复工程中的薄弱环节，它的质量好坏影响修复体的整体性与稳定性。验收时可以在修复区做现场拉拔试验测定粘结强度。或者对钻取包含新旧结合面的芯样进行劈拉或斜剪切试验，测得的界面粘结强度不得低于规范限值。良好的粘结力是修复区长期承压后不会出现脱空、开裂等二次破坏的前提。

第十三章 全寿命周期成本与管理

第一节 全寿命周期成本分析模型

一、全寿命周期成本构成

（一）初期建设成本

初期建设成本就是指高速公路水泥混凝土路面项目在投入使用之前，所发生的一切一次性费用总和。本部分成本属于全寿命周期成本分析的起点，它的核算是否准确会直接影响到最终决策是否科学。它包含直接的工程实体建设费用，也包含为了实现项目功能而支付的各种间接费用，是项目投资评价中直观、确定性最强的部分。

此成本的主要构成部分为工程建安费，即路基工程、路面结构层工程、排水工程、安全设施、沿线绿化等全部土建工程的费用。水泥混凝土路面本身的材料费用，即高品质水泥、骨料、外加剂、钢筋等材料的采购和运输费用占的比例较大。施工过程中所用的机械设备使用费、租赁费、现场施工人员的劳务费等也属于建安费。施工工艺选择，用滑模摊铺机还是固定模板，都会对机械、人工成本产生很大影响。

除建安费外，初期建设成本还要考虑其他的费用。包括项目前期的可行性研究费、勘察设计费、工程监理费等技术服务费；项目管理机构的行政费用及管理人员薪酬；为取得项目建设权支付的土地征用费和拆迁补偿费，在人口密集地区的公路项目中，这部分开支是巨大的。建设期间筹措资金的成本，比如贷款利息，还有用来应对不可预见风险的基本预备费、涨价预备费等，也都应该包含在初期建设费用的计算中。

（二）运营养护成本

运营养护成本指的就是在分析期内，路面建成通车后，为了保证其正常的使用功能和服务水平而发生的一切费用。虽然长寿命路面设计目的就是减少养护需求，但是这部分成本在全寿命周期成本中仍然是个重要变量，并且是反映设计方

案耐久性、经济性的主要指标。

这部分费用主要是日常养护和预防性养护的费用。日常养护是指为了保持路面良好状态而经常进行的清扫、检查、标线维护、接缝密封材料局部修补或者更换等作业。预防性养护是在路面还没有出现明显损坏之前所采取的主动措施,目的是减缓性能的衰退、延长路面的使用寿命,比如混凝土板表面的功能性修复处理、裂缝灌浆、板底脱空压浆等。这些活动的频次及花费同路面设计水准,材料品质,交通环境状况等有着联系。

当路面性能衰减到一定程度的时候,就需进行大中修。这一般是较大的处置,如断板修补、错台处理、局部或整块板更换、设置罩面层等。该类活动的成本高,影响交通大。长寿命路面设计的主要优势之一,就是通过提高结构的承载能力、耐久性,使首次大修推迟,从而减少分析期内大修次数和规模。

运营养护成本中还要包含用户成本。用户成本并不是由路产管理部门直接支付的,而是由道路使用者来承担的额外费用,主要由养护作业期间交通延误成本、车辆绕行成本以及车辆运营成本增加组成。养护施工过程中封闭车道或者实行交通管制会造成交通拥堵,增加车辆行驶时间及燃料消耗,这些社会成本在评价路面方案综合经济效益的时候不能忽略。长寿命路面因为养护次数少、干预少,全生命周期用户成本会大幅度下降,因此具有巨大的社会经济价值。

(三) 拆除回收成本

拆除回收成本指的是路面达到设计寿命或者功能寿命终点,需要重建或者废弃时所发生的费用。这部分成本是对路面身后事所做出的经济考虑,也是对资源循环利用、可持续发展的体现。路面结构拆除、废料运输、处理和可能产生的回收价值都属于该范围。

具体的成本项目包括用冲击锤、共振破碎设备等破碎旧混凝土路面所用的机械和人工费用;破碎后的混凝土废料、钢筋等的运输费用;废料处置所支付的费用,例如填埋费等。由于长寿命路面结构一般较厚、强度大,所以拆除难度和费用都比较高。但是利用现代回收技术,旧水泥混凝土路面材料有很高的再利用价值。破碎后的混凝土块可以做成再生骨料,用到新路面的基层、底基层或混凝土中,废旧钢筋也可以回收出售。这部分回收收入在成本计算中应该用负值(残值)来处理。因此拆除回收成本就是拆除处置费用减去材料回收价值之后的净值,在某些情况下甚至会出现负值,也就是产生净收益。

二、全寿命周期成本分析方法

（一）分析参数确定

分析参数的确定是开展全寿命周期成本分析的前提,分析参数取值是否合理、准确,直接影响分析结果是否可靠、有参考价值。这些参数就构成了分析模型的骨架,给成本计算提供了一个统一的度量衡和预测依据。关键的分析参数有分析期、贴现率、交通量预测、路面性能预测模型等。

分析期是指进行成本计算的时间范围,分析期的选择要和路面的设计寿命相适应。对于寿命长的水泥混凝土路面,分析期一般取 40 年、60 年或更长,充分体现出其长期服务的经济性。确定合理的分析期,才能保证设计方案在远期低养护成本优势被完整地纳入评价范围,防止因为分析期过短而给长寿命方案做出不公平的评价。

贴现率又叫折现率,是全寿命周期成本分析中的主要经济参数。它体现了资金的时间价值,将未来不同时段发生的成本折算成现在的价值,即现值。贴现率的选取对分析结果影响很大,较高的贴现率会使远期成本在总成本中所占的比重变小,不利于初期投资大、寿命长的方案;而较低的贴现率更能体现长寿命方案后期的优势。贴现率一般参照国家或者行业发布的基准收益率、社会平均资金回报率或长期国债利率来确定,再结合项目的风险情况作出相应的调整。

交通量以及增长率的预测,是计算运营养护成本和用户成本的重要的输入。交通量数据,尤其是重载轴载交通量的预测,会直接影响到路面性能衰减的速度,从而决定养护维修工作何时进行、规模多大。路面性能预测模型是路面平整度、破损情况指数等各性能指标随时间、交通荷载、环境变化的规律。准确的性能预测是制定养护维修计划、估算养护费用的前提,也是联系路面设计与经济分析的桥梁。

（二）成本计算方法

成本计算是将已经识别出来的各个成本构成、确定下来的分析参数,通过一定的数学模型进行综合,最终得到各个方案全生命周期成本总值的过程。最常用的方法是净现值法,可以科学地处理发生在不同时间点的现金流,使之具有可比性。

净现值法的基本思想就是根据资金时间价值理论,将分析期内所有预期发生

的成本,用选定的贴现率统一折算成项目初期的现时价值。路面方案全寿命周期成本净现值是路面方案初期建设成本、分析期内所有的运营养护成本现值之和,再减去分析期末路面残值的现值。该种计算逻辑就体现了对未来支出的前瞻性考虑。

具体的计算步骤通常如下:

1. 确定分析期(N 年)和贴现率(r)。
2. 估算初期建设成本(SC_{IS}),该成本发生在第0年,无需折现。
3. 依据路面性能预测模型及养护策略,确定分析期内每年的养护成本($SC_{\{Mi\}}$)。
4. 将每年的养护成本折算成现值,即 $SC_{\{Mi\}}/(1+r)^i$,再把所有年份的养护成本现值相加。
5. 估计期末(第 N 年)路面残值(S_V),折算成现值 $S_V/(1+r)^N$ 。残值可以是期末路面结构剩余价值,也可以是拆除回收净收益。
6. 将以上各项相加得到全寿命周期成本净现值。即 $LCCNPV = CI + \sum C_{\{Mi\}}/(1+r)^i - SV/(1+r)^N$ 。

分别对各个设计方案进行上述计算,就可以得到各个设计方案的全寿命周期成本净现值。在其他性能指标相同的情况下,净现值最小的方案就是经济上最优的方案。除了净现值法,等额年成本法也是一种常用的方法,把全寿命周期的总成本分摊到分析期内的每一年的等额年费用上,便于比较不同寿命周期的项目。

常用全寿命周期成本分析参数及影响因素

参数名称	定义 / 作用	主要影响因素	对长寿命方案有利 / 不利
分析期	成本计算的时间范围,应与路面设计寿命匹配	项目类型、设计寿命、政策要求	越长越有利
贴现率	体现资金时间价值,将未来成本折算成现值	国家基准利率、行业回报率、项目风险	越低越有利
交通量预测	估算运营养护成本及用户成本的输入	地区经济发展、规划路网、车辆类型	交通量增长平稳对预测有利
路面性能预测模型	反映路面性能随时间、荷载、环境变化规律	材料性能、施工质量、气候条件、养护水平	预测准确性高则成本估算可靠

从上表可以看出,全寿命周期成本分析包含了很多重要的参数,这些参数的合理选取对分析结果是否准确、决策是否科学起着至关重要的作用。

（三）敏感性分析

敏感性分析在全寿命周期成本分析当中起着举足轻重的作用，其主要目的就是対关键的输入参数不确定性以及结果稳定性进行评价。全寿命周期分析需要预测未来几十年内成本、路面性能等，而预测本身就存在不确定性。敏感性分析就是系统地改变一个或者多个关键参数的取值，观察它对最终成本排序结果的影响，以此来检验决策的稳健性。

进行敏感性分析的时候，一般选择那些影响结果最大、不确定性高的参数，比如贴现率、养护成本增长率、交通量增长率、初期建设成本估计误差等等。分析方法就是保持其它参数不变，让选定的某个参数在其可能取值范围（高、中、低三种情景）内变化，重新计算各方案的全寿命周期成本，并观察方案优劣排序是否发生变化。

分析结果可以帮决策者认识项目的经济风险。如果一个方案在多个关键参数发生较大变化时，其全寿命周期成本仍然最低，那么选择该方案的决策就是非常稳健的。相反，如果方案优劣排序对某个参数的微小变动很敏感，即贴现率由 4% 变 5% 就会改变最优方案，那么就说明决策存在较大不确定性风险。此时决策者要更加谨慎，可以收集更准确的数据来减少该参数的不确定性，也可以根据主要参数变化较小的次优方案来获得更好的长期效益。敏感性分析把静态的成本计算变成了动态的风险评估，使得全寿命周期成本分析的实用性得到了极大的提高，也对决策起到了更大的支持作用。

第二节 初期投资与长期运维成本平衡

一、路面初期投资控制

（一）设计方案优化

设计方案优化是控制路面初期投资的源头与核心，其目标是在满足设计年限内交通荷载和使用功能的前提下，寻求技术可靠性与经济合理性的最佳平衡点。这并非简单地进行结构减薄或材料降级，而是基于全寿命周期成本理念的系统性工程。具体而言，优化设计需从多个维度入手：首先，应进行精细化的交通量预测与轴载分析，避免因过度保守设计而造成的结构冗余和资源浪费；其次，可引

入基于性能的设计方法,如力学-经验法,对不同路面结构组合进行长期性能模拟,选择在预期寿命内总成本最低的方案;再者,应充分考虑路基、排水等附属工程与面层结构的协同设计,一个稳定、排水良好的路基能够显著降低面层的应力水平,从而允许采用更为经济的面层厚度与材料。此外,设计方案的优化还应结合当地的气候条件、材料供应和施工工艺水平,选择最适宜的结构形式,例如在重载交通路段采用长寿命路面设计,虽然初期投入可能略高,但能大幅减少未来的维修次数和成本,从而实现全寿命周期内的总成本最优。

(二) 材料合理选择

材料的合理选择是控制初期投资并影响长期性能的关键环节,其决策需超越单纯的价格比较,转向基于性能与耐久性的综合评估。在路面工程中,沥青混合料、水泥混凝土、基层与底基层材料的选择直接决定了工程造价和后期养护频率。例如,在沥青面层材料选择上,虽然普通沥青混合料的初期采购成本较低,但对于交通繁重或气候恶劣的路段,选用 SBS、PE 等聚合物改性沥青,或添加纤维、抗车辙剂等,虽然增加了单位成本,但其卓越的高温稳定性、低温抗裂性和耐疲劳性能,能够有效延缓车辙、裂缝等早期病害的出现,从而在长期运营中节省大量的维修费用。同样,在基层材料选择上,采用水泥稳定碎石、石灰粉煤灰稳定碎石等半刚性基层,相比传统的级配碎石,虽然增加了水泥等胶凝材料的成本,但其形成的板体结构具有更高的整体强度和刚度,能有效扩散荷载,保护路基。因此,材料选择应建立成本-性能分析模型,将材料的初始成本、预期使用寿命、养护周期、维修难度等纳入考量,选择性价比最高的材料组合,实现投资效益最大化。

(三) 施工组织优化

施工组织优化是通过科学管理手段,在保证工程质量与安全的前提下,最大限度地降低施工过程中的直接和间接成本,从而有效控制初期投资。这要求在项目实施前制定详尽且高效的施工组织设计,涵盖资源配置、工序衔接、工期安排和质量控制等多个方面。首先,在资源配置上,应通过合理的机械设备选型与组合,提高施工效率,避免设备闲置或性能不足造成的浪费。例如,采用大型、高效的沥青摊铺机和压路机组,可以保证摊铺的连续性和均匀性,减少接缝,提高压实质量,从而减少因返工带来的成本增加。其次,在工序衔接上,应运用网络计划技术,优化施工流程,实现各工序的无缝衔接,减少不必要的等待时间和窝

工现象。例如，合理安排基层、透层、粘层和面层的施工间隔，确保每一层在最佳状态下被上层覆盖，避免层间污染或过度养护导致的工期延误。最后，通过精细化的进度管理和质量控制，可以有效预防施工缺陷，避免因质量问题导致的返工和材料浪费，这本身就是对初期投资最直接的控制。高效的施工组织不仅能降低直接成本，还能缩短工期，减少管理费、设备租赁费等间接支出，实现投资效益的整体提升。

二、路面长期运维成本优化

（一）科学养护计划

科学养护计划是实现路面长期运维成本优化的基石，其核心思想是从被动修复转向主动预防，通过系统性的规划与投入，以较小的、定期的养护成本来避免或推迟昂贵的、大规模的维修工程。一个科学的养护计划应基于对路面性能的持续监测和准确预测。首先，需要建立路面管理系统，定期采集路面平整度、车辙、抗滑性能和路面破损状况等数据，利用科学的性能预测模型，准确评估路面当前的技术状况并预测其未来衰变趋势。其次，根据预测结果，在路面性能下降到临界水平之前，适时采取预防性养护措施，如在沥青路面出现轻微裂缝时进行灌缝处理，或在表面出现轻微松散时采取雾封层、稀浆封层等技术。这些预防性养护措施的单位成本远低于矫正性维修（如铣刨重铺），但能有效延缓病害的进一步发展，显著延长路面的使用寿命。通过制定一个覆盖全路网、分阶段、有重点的长期养护规划，将有限的养护资金投入到的最需要、效益最高的路段，从而实现“花小钱、省大钱”的运维成本优化目标。

（二）合理维修策略

合理维修策略是在路面出现功能性或结构性病害后，基于“成本 - 效益”原则选择最适宜的维修技术与时机，旨在以最低的全寿命周期成本恢复路面服务性能。这要求决策者超越“头痛医头、脚痛医脚”的传统模式，对不同维修方案进行综合评估。当路面出现轻微至中度病害时，可优先考虑就地热再生、厂拌热再生等修复技术。这些技术能够充分利用旧路面材料，不仅减少了新材料的使用和废弃料的处理成本，符合绿色环保理念，而且施工速度快、交通干扰小，综合经济效益显著。对于病害较为严重但基层完好的路段，可采取铣刨上面层或中面层再加铺新结构层的方案，相比于全部铣刨重铺，能大幅节约工程成本。而对于结

构性损坏严重的路段,则必须进行彻底的结构重建,此时应结合长远规划,考虑是否提升路面结构等级,避免短期内再次进行大规模投资。因此,合理维修策略的制定,需要建立在对病害成因的精准诊断、对不同维修技术成本与效益的量化分析以及对未来交通需求的科学预测之上,确保每一次维修投入都物有所值。

(三) 适时更新改造

适时更新改造是路面全寿命周期管理的最终环节,也是实现长期成本优化的战略性决策。当路面通过多次维修已无法满足使用要求,或其继续维修的成本效益比急剧下降时,进行彻底的更新改造便成为必然选择。关键在于“适时”,即决策时机的把握。过早进行更新改造,意味着未能充分利用现有路面的残余价值,造成投资浪费;过晚则可能导致路面状况严重恶化,不仅增加了行车安全风险,还可能因基层或路基的损坏而使更新改造的工程量和成本急剧攀升。因此,需要借助路面管理系统进行动态评估,当路面技术状况指数(PCI)等综合评价指标低于某一阈值,或年度养护成本超过更新改造年分摊成本的某个临界点时,即应启动更新改造的规划与决策。在更新改造方案设计中,应充分考虑未来的交通发展和技术进步,适度提高设计标准,采用更耐久、更环保的新材料、新结构和新工艺,如长寿命路面结构、高性能改性沥青、再生材料应用等,确保新路面在下一个设计寿命期内具有更低的养护需求和更优的全寿命周期经济效益,实现基础设施的可持续发展和投资价值的最大化。

第三节 基于性能的长期合约管理模式

一、长期合约管理模式选择

(一) 传统管理模式

传统的管理方式一般是指设计、招标、施工。在委托承包模式下,项目业主把道路工程全部的设计工作委托给设计单位,然后通过公开招标的方式,选择报价最低或者综合评分最高的施工单位来完成建设任务。项目竣工验收之后,一般由业主下属的养护单位或者短期养护招标确定的单位,对路面进行日常的维护和修复。该模式权责分明,市场竞争充分,在常规公路项目中被广泛使用。

但是,在这种模式下,设计、施工、养护三者之间被人为地割裂。施工单位

的主要目的就是按照合同规定的时间内完成建设，顺利通过竣工验收，对于项目长期性能表现没有直接责任和动力。设计方虽然有路面寿命的理论预期，但是不参与施工过程的质量控制以及后期养护的实际效果评价。养护单位只能在已建成的路面实体上进行维护，对于先天的设计缺陷或者施工隐患却力不从心。由此造成的环节间的脱节，有可能在追求短期建设成本最小化的同时，牺牲掉一部分长期耐久性，从而增加全生命周期的养护成本和管理难度，与长寿命路面追求长期性能保障的目标存在内在矛盾。

（二）PPP 模式

政府和社会资本合作模式给长寿命路面项目提供了一种新的长期管理方式。PPP 模式的本质就是政府和社会资本建立长期合作关系，通过特许经营权等方式把长寿命路面的设计、投资、建设、运营、维护等环节整合在一起，由社会资本方组成的项目公司在合同期内（一般为 20 到 30 年）承担全生命周期的责任。该模式按照利益共享、风险共担的原则，把建设期质量同运营期绩效联系起来，使社会资本方从全生命周期成本最优的角度出发，主动使用耐久性更好的材料、先进的工艺、科学的养护方式。

PPP 模式在高速公路的应用方式有多种，可以根据项目的收费方式、政府参与程度、风险分担状况来选择合适的运作方式。

1. 建设、运营、移交模式：即我们经常所说的 BOT 模式，是 PPP 模式中最经典的一种。项目公司负责项目的投资、融资和建设，建成之后在一定期限内拥有项目的运营权和收费权，依靠通行费等收入收回投资并获得收益。特许经营期满后，项目资产无偿交还政府。该模式很好地发挥了社会资本的资金和管理效率。

2. 建设 - 拥有 - 运营 - 移交模式：该模式与 BOT 模式类似，项目公司在特许经营期内不但拥有运营权，而且合法拥有项目资产的所有权，给项目公司提供更强的融资保障。期满后所有权仍归政府所有。

3. 设计、建造、融资、运营模式：此种模式把项目前端的设计和后端的运营高度整合起来。社会资本方从项目设计之初就参与进来，可以将施工和运营维护需求前置考虑，达到全流程优化的目的。政府一般用购买服务的方式根据路面性能、可用性等指标给项目公司支付费用，不单靠使用者付费。

PPP 模式可以克服传统模式下建养分离的弊端，依靠长期合同把各方的利益牢牢地绑在一起，促使各方面的参与者去考虑长期利益。项目公司为降低长期运

营期内的维修费用,保证项目达标,必然会产生强烈的内驱力去建造高质量、高标准长寿命路面,这与项目的最终目标是一致的。

(三) 其他创新模式

随着公路建设管理理论和实践不断发展,除了主流 PPP 模式之外,也出现了一些值得注意的创新管理模式。这些模式也重视长期性能和全生命周期管理,给长寿命路面项目提供更多的选择。将设计、采购、施工总承包和长期养护合并起来的 EPC 长周期养护模式,是传统模式的一种改进。该模式把设计施工总承包与 10 年或更长时间的养护期一起进行招标。承包商除了要对建设成果负责以外,在养护期内还要保证路面性能达到合同约定的标准,养护费用也和考核结果挂钩。

该模式比传统模式多了一条承包商的责任链条,在设计、施工阶段就考虑后期养护的方便和耐久性。与结构复杂的 PPP 模式相比,此模式的操作流程比较简单,更适合于以政府投资为主,但是希望通过市场化力量提高养护效率的项目。在数字化的影响之下,基于数字孪生的全生命周期管理也成为了可能。设计施工阶段创建高精度的公路信息模型,后期运营中埋设的传感器数据同实体公路平行,创建数字孪生体,可以对路面性能状态实施实时监测、准确评价并进行预测性养护,给长期合同的绩效考核赋予客观、量化的数据支撑。

二、长期合约管理要点

(一) 风险合理分担

长寿命路面项目的周期长,不确定因素多,会受到政策、市场、技术、自然环境等各方面风险的影响。公平合理,有前瞻性风险分担机制,对于长期合同有效履行起决定性作用。风险分担的基本原则是,把某项风险分配给最能承担风险、最有能力控制风险的一方。此机制的建立目的是防止任一方承担其不能控制或者不能承受的风险,从而避免由于风险爆发造成项目失败或者陷入无休止的争议。

风险分担要依靠严密的合同条款来确定。一般情况下,政策法规变更、征地拆迁、不可抗力等风险更多地处于政府的控制范围内,一般应该由政府方承担主要责任。由于国家环保标准提高而产生的成本增加,应由政府来承担。与设计、施工、技术创新有关的风险,比如施工进度延误、工程质量缺陷、新技术应用效果不达标等,主要应该由社会资本方或者承包商承担,因为他们对这些环节拥有最直接的控制力。

融资风险以及市场风险（交通流量远低于预期）的分担更加繁杂，一般情况下需要政府与社会资本方共同承担。政府可以采用最低交通流量保障、可行性缺口补贴等方式来降低社会资本的风险，社会资本方需要依靠准确的财务测算、多样的融资渠道来控制自身的财务风险。设计良好的风险分担矩阵，可以确定各种风险在各个参与主体之间所占比例及处理程序，给各方提供稳定的预期，增强投资者的信心，是长期合约达成的重要保证。

经过详细的识别、评估、分配之后，合同才有可能成为一种动态的管理手段，而不仅仅是一份静态的法律文书。它给未来几十年的不确定性提供了一条清晰的途径，保证项目在遇到困难的时候有足够的韧性。合理的风险分担既可以保护各方面的根本利益，也是调动社会资本方主动承担风险、进行技术创新的必要条件。

（二）绩效激励机制

绩效激励机制属于基于绩效的长期合约的“指挥棒”，它的设计是否科学，直接影响到合约目标能否达成。核心是把付款和产出（路面质量）挂钩，由传统的按工程量付费转变为按服务质量付费，使承包商由完成工程向提供优质服务转变。有效的激励机制不应该只有对未达标的处罚，还应该有对超额完成目标的奖励，形成奖优罚劣的闭环，促使承包商不断提高管理水平和技术水平。

绩效指标的确定是激励制度的基础，科学、量化的、可以测量的。对长寿命水泥混凝土路面来说，关键绩效指标一般包含如下几类

长寿命水泥混凝土路面关键绩效指标

指标类别	具体指标示例	衡量目标	重要性
路面结构性能指标	弯沉值、结构完整性	反映路面承载能力及长期耐久性	核心指标，保障路面基础功能
路面功能性指标	平整度、抗滑系数、车辙	影响行车舒适性与安全性	关键体验指标，直接影响用户感受
服务运营效率指标	车道开放率、交通事故 / 病害应急修复时间	体现运营管理响应速度和效率	提升公众出行便利性与道路可用性
用户满意度指标	定期社会调查评估结果	衡量公众对道路使用体验的评价	综合评价指标，反映社会效益

按照上述指标确定合同中各指标的基准值、目标值、底线值。承包商的收入将根据实际测量的绩效水平来做出相应的调整。当路面平整度优于目标值时获得一定奖励；低于基准值扣减本期服务费；连续多周期低于不可接受底线值时会触

发更严重的处罚, 暂停支付或者终止合同。与绩效强相关的支付机制, 促使承包商在日常养护中采取预防性、主动性的措施, 以最低的全生命周期成本将路面保持在最好的状态, 从而达到合同的目的。

(三) 有效监督机制

为了保证绩效激励机制公正透明地运行, 防止由于信息不对称造成的道德风险, 就必须建立一个独立、权威、高效的监督机制。这是合约双方互信的基础, 也是保证公共利益、保证项目质量符合预期的一道重要防线。有效的监督贯穿项目全过程, 设计施工阶段的质量抽检, 运营阶段的性能监测、评价都要有制度保障。

监督机制的创建应该重视多层次以及独立性。项目业主方或者政府监管部门要设立专门的监管团队, 对合约总体执行情况实施宏观控制。聘请独立的第三方专业机构就显得十分重要。这些机构可以是有公信力的工程咨询公司、科研院所或者专业的检测机构, 由它们对关键绩效指标进行定期或者不定期的独立检测和评价。第三方检测报告将成为绩效支付的主要依据, 独立性有利于防止业主和承包商之间的争议, 保证考核结果的公正。

监督过程的透明化也不能缺少。所有绩效检测数据、评估报告、支付调整记录等都应当向社会公开, 接受社会和媒体的监督, 形成社会评价体系。开放透明的做法, 一方面可以对承包商形成强大的外部约束力, 促使其不敢忽视服务质量; 另一方面也可以提高政府项目管理公信力。在数字化时代, 可以利用物联网、自动巡检车、无人机等智能技术手段, 对路面状况进行连续、动态、自动化的监测, 并将数据实时上传到共享云平台。一方面提高了监督的效率和覆盖面, 另一方面使数据造假几乎不可能, 给建设高效、透明、可信的长期合约监督体系提供强有力的技术支持。

第四节 资产管理数字化平台构建

一、资产管理平台功能设计

(一) 数据管理功能

数据是数字化平台的基础和核心, 强大的数据管理功能是平台有效运转的前提。该模块主要完成路面资产全生命周期内各种数据的采集、整合、存储和维护, 建立路面资产数据中心, 使之成为一个全方位、精确的、唯一的路面资产信息中

心。它不只是路面的物理性质和状态信息,也包括与之有关联的交通、环境、养护活动等各种各样的数据,从而形成一个多元的数据视图。

平台需要有很强的异构数据融合能力,可以接入整合各种数据源。数据源有设计阶段BIM模型、图纸文件;施工阶段材料试验数据、质量控制记录、竣工资料;运营养护阶段路面平整度、破损状况、构造深度等定期检测数据,自动化监测设备实时采集数据、交通流量数据、气象环境数据、历次维修养护工程详细记录。利用统一的数据模型,对多源异构数据实施清洗、转换以及关联处理,冲破数据孤岛,给上层分析应用赋予强有力的支撑。

数据管理还要包含完善的数据治理机制,保证数据的完整性、一致性、安全性。因此平台需要建立数据权限管理体系,根据用户的角色和职责给用户授予不同的数据访问和操作权限。同时建立数据版本控制和历史追溯,记录所有的数据修改历史,保证数据可以追溯。最后创建起安全可靠的、高效的数据仓库,给长寿命路面资产的数字孪生体系打下坚实的数据基础。

（二）分析决策功能

分析决策的功能为资产管理平台的重中之重,其主要任务是把庞大的、静态数据转化成可以辅助科学决策的动态信息和智慧洞见。用先进的数据分析模型、算法深入研究路面性能演化的规律,将养护从事后补救转变为事前预测和主动干预,给养护策略的制定提供定量依据。

平台的核心分析能力在于建立路面性能预测模型。它把历史检测数据、结构参数、材料属性、交通荷载、环境因素等多元信息结合起来,用机器学习、深度学习等人工智能算法,建立可以准确预测路面关键性能指标(如国际平整度指数、路面状况指数)未来衰变趋势的模型。可以模拟不同的交通、环境条件下路面性能演化的过程,为管理者提供潜在的风险点以及未来的养护需求时间窗口,实现预防性养护的最佳时机判断。

在此基础上,平台会用多目标优化决策模型智能地选择出适合的养护维修方案。当系统发现某路段未来性能将低于预设阈值的时候,就会自动产生一种或者几种养护方案。决策模型会把工程成本、路面性能改善效果、交通干扰影响、全生命周期成本等各方面因素综合考虑进去,用优化算法(遗传算法、模拟退火算法等)进行权衡分析,向决策者推荐在给定预算约束下效益最好的养护方案。用数据作为决策基础可以大大提高养护资金使用效率和决策的科学性。

平台还要装备强有力的数据可视化分析工具。利用地理信息系统可以将路面性能数据、病害分布、养护历史等信息以地图的形式直观地表现出来,形成资产全景图。管理者可以借助交互式仪表盘、趋势图、关联分析图等可视化工具来对整个路网健康情况有清晰的了解,迅速找到性能最差的路段,比较不同的养护策略的模拟结果,使复杂的决策过程更加透明高效。

(三) 信息共享功能

信息共享功能就是打破组织内外部信息壁垒,创建起协同高效的办公环境。建立统一的信息门户以及标准的数据交换机制,保证各个相关方在自己的权限范围内,及时、准确地获取到所需要的道路资产信息,使设计、施工、养护、运营等各个阶段的业务可以无缝对接、高效协同,从而提高整体的管理效能。

平台要支持多级用户管理和信息分发。高层管理者可以借助平台获得宏观统计报告和决策仪表盘,从而知晓路网大体资产状况以及养护资金投入产出效益。一线养护工程师和施工技术员可以借助平台获得路段技术档案、历史病害数据、性能预测曲线和建议养护措施,进而便于进行日常巡查、制定养护方案以及实施养护工程。平台还要有移动应用端,外业人员可以任意时刻查询数据、上报病害信息、记录养护情况,实现内外业数据流实时闭环。

信息共享不仅仅要包含组织内部,也应该包括和外部合作伙伴之间进行的协作。平台可以给设计单位提供某路段长期性能监测数据,为以后路面设计改进提供数据支持;也可以同施工单位共享养护工程的技术要求和质量验收标准;还可以同科研机构合作,共享脱敏数据,进行路面新材料、新技术的研发验证。开放式的协同模式可以调动各方面的智慧,促进长寿命路面技术的发展。同时平台也可以通过标准的 API 接口同其他的业务系统(财务管理系统、交通监控系统等)进行对接,从而达到跨系统数据联动、业务协同的目的,构建起更加广泛的智慧交通生态系统。

二、资产管理平台构建技术

(一) 平台系统架构

平台系统架构是整个技术体系的结构,它的设计好坏直接影响系统性能及发展潜力。为应对高速公路资产管理数据量大、种类多、处理复杂的特点,应该采用以微服务和云计算为依托的现代化分层架构。该架构把复杂的一个应用分解成

许多小型的、自给自足的服务，每个服务只做一项业务功能，并且用轻量级的通信方式互相协作。

典型的分层架构有数据感知和接入层，数据存储和处理层，应用服务层，用户展示层等部分。数据感知与接入层通过各种协议和接口，从传感器、检测设备、业务系统等数据源获取数据。数据存储和处理层使用的是数据湖和数据仓库混合的模式，用分布式文件系统存储原始的海量多源异构数据，再用 ETL 工具清洗、整合之后高质量的数据加载到数据仓库中，为上层分析提供支持。大数据处理引擎这一层对海量的数据进行实时和离线的计算。平台的系统架构一般采用现代化、分层化的设计，主要分层以及技术特点如下表所示。

平台系统架构核心分层与技术特征表

架构分层	核心功能	典型技术
数据感知与接入层	数据采集与汇聚	传感器、检测设备、业务系统接口
数据存储与处理层	海量数据存储、清洗、计算	数据湖 + 数据仓库、HDFS、ETL、Spark
应用服务层	核心业务逻辑实现	微服务架构、独立部署、弹性伸缩
用户展示层	用户交互与呈现	Web/ 移动端、前后端分离、Vue/React、BIM/GIS

应用服务层是平台的核心，用微服务架构来构建。每一个核心的功能，即数据管理、性能预测、决策优化、可视化分析等都被封装成了单独的微服务。该种设计有以下几点优势，第一，独立部署和扩展，根据不同的服务负载情况弹性伸缩，提高资源利用率。技术异构性，不同的服务可以采用最适合其业务场景的技术栈来开发，提高开发效率。3. 高容错性，单个服务出现故障不会使整个系统崩溃。

用户展示层主要负责和用户进行交互，提供 Web 端、移动端等各种终端统一的访问入口。该层用前后端分离技术方案，前端用现代化框架（Vue 或者 React）创建丰富多彩的用户界面和交互体验，后端用 RESTful API 提供数据和服务。BIM 和 GIS 技术在此层次深度的融合在一起。系统内置 BIM 引擎和 GIS 引擎，把 BIM 模型同地理空间信息对接起来，创建起可视化的路面资产三维数字孪生模型，给管理决策赋予直观的空间维度支撑。

（二）数据标准规范

数据标准规范是保证平台内数据一致性、准确性、可交换性的基础，也是实现数据互联互通的通用语言。平台创建之初就要投入足够的时间，创建起一套完

备、统一、可执行的数据标准规范体系。该体系覆盖数据从产生、采集、处理到应用的全部过程，是实现高质量数据管理以及有效数据分析的前提。

数据标准规范的制定主要涵盖以下几个方面：

1. 数据分类与编码标准，对高速公路路面资产及其它要素进行分类，给每类对象（路线、构造物、路面结构层、病害类型、养护措施等）赋予唯一的标准化编码。统一编码体系是各个系统之间数据自动关联、汇总分析的前提。

2. 数据元标准就是对平台所包含的每一个数据项的名称、数据类型、长度、取值范围、计量单位等属性进行详细的定义。路面平整度数据类型是浮点型，单位是米每公里（m/km），从而保证录入和交换数据格式的统一。

3. 数据交换格式标准，即规定平台同外部系统之间进行数据交换时所采用的数据格式，比如 XML、JSON 等，对数据包的结构及内容也作了详细的说明。这可以保证各个系统之间数据交换的顺畅性和可靠性，也可以降低系统集成所遇到的复杂度和成本。

4. 数据质量标准：建立数据质量评价指标体系以及校验规则，包括数据的完整性、准确性、一致性、及时性等。平台自带的数据质量监控模块会对入库数据进行自动校验，并且会把不符合标准的数据及时处理。

此标准规范的制定要参照国家及行业的有关标准，结合高速公路管理业务的实际情况进行细化完善。标准的推行依靠强有力的组织保障和制度约束，使所有参与方严格遵守，从源头上保证平台数据的“健康度”，真正发挥数据资产的价值。

（三）系统接口设计

系统接口是资产管理平台同外部系统、设备展开数据交流与功能调用的通道，同时也是创建开放、协同的数字化生态系统的重要环节。好的接口设计要遵循标准化、安全性、松耦合、易用性这四个原则，才能使平台同越来越多的内外部系统实现高效可靠的集成。接口设计不能只满足当前数据交互的需求，还应该有良好的前瞻性来适应以后业务的发展和技术的变化。

接口设计要覆盖平台同各种系统之间数据交互的所有情形。同前端采集系统（自动检测车、无人机、物联网传感器等智能设备）建立接口，可以实现在线数据上传以及系统数据分析。同时要设计后端业务管理系统接口，和财务管理系统对接，实现养护工程预算和实际费用联动管理；与施工管理系统对接，同步工程进度和质量验收数据。还应该给第三方开发者提供开放的 API 接口，鼓励生态伙

伴利用平台数据开发新的应用和服务。

主流接口使用 RESTful 风格的 Web API。RESTful API 使用标准的 HTTP 协议来通信，以 JSON 为主要的数据交换格式，具有轻量、灵活、跨平台等特点，已经成为现代系统集成的首选方案。所有接口都必须进行统一规划和管理，给出详细的接口文档，说明接口的功能、请求参数、返回格式以及调用示例。为了保证数据交换的安全，所有的接口调用都必须经过身份认证、权限校验，并且使用 HTTPS 等加密传输协议来保证数据在传输的过程中不会被窃取、篡改，保证整个数据链路的安全可靠。

第五篇 未来展望篇：绿色与智能趋势

第十四章 新型路面结构与材料前瞻

第一节 ECC 等高延性水泥基复合材料

一、ECC 材料基本特性

ECC 是高性能纤维增强水泥基复合材料，其基本特性是由材料组分和微观结构共同决定的。纤维和基体之间相互配合，宏观上表现出与传统混凝土完全不同的力学响应、变形模式、耐久性，这些都是其工程应用价值的体现。

ECC 材料与普通混凝土性能对比

特性	ECC 材料	普通混凝土
延展性	极高，具有应变硬化特性	脆性，开裂后迅速丧失承载力
极限拉伸应变	可达 3% 至 7%	约 0.01%
抗压强度	可通过配合比调节，满足需求	较高，但脆性强
弯曲韧性	极高，类似金属塑性变形	较低，易折断
裂缝模式	多重微裂缝（宽度 < 100 微米）	少数宏观大裂缝
自愈合能力	显著	基本无
耐久性	优异，抗渗透、抗侵蚀能力强	易受裂缝影响，耐久性较差

从上表中可见，ECC 材料在延展性、变形能力和裂缝控制方面相较于普通混凝土具有显著优势。

（一）力学性能特点

ECC 的力学性能与普通混凝土明显不同，主要特点就是实现了脆性到高延性的转变。普通混凝土达到抗拉强度以后就会迅速开裂，丧失承载能力，出现脆性破坏。ECC 是在基体中掺入少量（体积掺量一般只有 2% 左右）经过特殊表面处理的聚合物纤维（如 PVA 纤维），在拉伸过程中产生应变硬化。受到拉力时不会出现单一的宏观裂缝，在基体内部产生许多均匀分布的微小裂缝，纤维像桥

梁一样把两岸连在一起,继续传递应力,使材料能承受更大的荷载。特殊的纤维桥接方式使 ECC 极限拉伸强度可以达到普通混凝土的数倍。

虽然抗压强度不是其最突出的优点,但是通过调节配合比、掺入硅灰等矿物掺合料可以提高其抗压强度,满足不同的工程结构要求。受弯时,ECC 具有类似金属的塑性变形能力,能承受很大的弯曲变形而不折断,弯曲韧性比传统混凝土和纤维混凝土要高得多。由于 ECC 的优异力学性能,在受到复杂应力,如拉、弯、剪共同作用的时候,能表现出较好的整体性及结构安全性,避免局部应力集中引起的突然破坏,提高了结构的安全系数。

(二) 变形性能特点

ECC 最大的优点就是具有很强的延性,即变形能力。传统水泥基材料极限拉伸应变一般为 0.01% 左右,ECC 极限拉伸应变可以达到 3% 至 7%,是前者的几百倍。巨大的变形能力来源于它的应变硬化特性。拉伸荷载作用下,当应力大于初始开裂应力之后,材料不会立即破坏,而是进入一个应力不断增大、应变不断增大的阶段,并伴随着产生多重微裂缝。

多重开裂行为就是 ECC 高延性微观机理的中心。由于基体的断裂韧性小于纤维桥接裂缝的能力,所以裂纹在扩展之前会产生更多的微裂隙。微裂缝的宽度一般控制在 100 微米以下,在较大的应变下仍能保持 60 微米左右。小裂缝、多裂缝的损伤模式有很重要的意义:

1. 能量耗散:大量的微裂缝产生和扩展过程可以消耗外力,使材料整体有很高的韧性,在冲击或者地震等动荷载作用下有更强的抵抗力。

2. 变形协调:ECC 与钢筋等增强材料一起工作时,能更好的实现变形协调,有效防止混凝土保护层大裂缝剥落造成的钢筋过早屈服或者粘结失效。

3. 损伤可控:材料即使进入非弹性变形阶段,其损伤也是以弥散的微裂缝形式存在,结构整体性得以保持,没有发生灾难性的断裂,给结构的监测和修复争取了时间。

正因为具有这样的变形性能,ECC 才能适应结构大变形的要求,在桥梁连接处、抗震结构的塑性铰区、路面等承受反复荷载和温度变形的地方,表现出传统材料无法比拟的优势。

(三) 耐久性能特点

长寿命路面的设计对材料耐久性有很高的要求,ECC 在这方面比其他材料

表现更好。其超长耐久性主要依靠良好的裂缝宽度控制能力以及自愈合能力。对混凝土结构而言,裂缝是其劣化的主要途径。有害介质(水、氯离子、硫酸盐等)经裂缝进入内部而引起钢筋锈蚀、冻融破坏、化学侵蚀等耐久性问题。普通混凝土在荷载或者环境的作用下产生的裂缝宽大、不均匀,因此劣化速度很快。

ECC 受力后产生的微裂缝宽度非常小,一般小于 100 微米。研究表明,当裂缝宽度小于某个值时,裂缝对水的渗透性、离子的扩散速度影响很小,可以近似为没有开裂的混凝土。内在的裂缝自闭合效应大大阻止了有害物质的侵入,从根本上提高了材料的抗渗透性、抗侵蚀性。干湿交替的环境里,这些微裂缝给未完全水化的水泥颗粒和矿物掺合料(粉煤灰等)赋予了同水分接触的反应场所。水化反应持续发生时会产生新的水化物,水化物可以填充、愈合微裂缝,这就是自愈合现象。自愈合不仅可以恢复材料密实性,而且在一定程度上恢复材料力学性能,就像生物体对于伤口的自我修复一样,大大延长结构使用寿命,减少全生命周期维护费用。

二、ECC 材料工程应用前景

(一) 适用场景分析

ECC 所具有的特点使它非常适合用于高速公路的重要路段或者特殊问题。由于温度应力与行车荷载的作用,路面板块接缝处容易产生接缝传荷能力下降、错台、唧泥、边缘破损等病害。采用 ECC 材料构建无缝路面或者作为传力杆区域增强材料,可以利用 ECC 材料的高延性来吸收温度变形,利用 ECC 材料的高韧性来抵抗荷载冲击,从而消除或者大大减轻接缝病害,实现路面结构的连续化,提高行车舒适性和安全性。

桥头搭板处由于存在沉降差异,容易发生跳车现象,严重影响行车安全和舒适性,还会对结构造成冲击损伤。使用 ECC 作为搭板材料,其较好的变形能力可以更好地适应不均匀沉降,使路面平顺过渡,减小冲击效应,延长搭板和桥梁结构的使用寿命。重载交通线路、长大纵坡、收费站广场等受严酷荷载作用的路段, ECC 可以作为高强韧的罩面层或者结构层,有效抵抗疲劳开裂和车辙变形,大大提高路面的抗破坏能力。在旧水泥路面修复加罩工程中,采用 ECC 薄层罩面技术可很好地阻止反射裂缝出现、迅速恢复旧路面的性能。

隧道进出口、特殊地质路段等结构变形适应性要求高的地方, ECC 有巨大

的应用前景。其应用范围除了新建工程外,还可以对桥梁伸缩缝、砌体结构进行预防性养护以及结构维修加固。ECC 的使用场景覆盖了长寿命路面建设、维修维护中的很多重要环节,是提高路面性能的重要选择。

(二) 技术优势分析

ECC 在高速公路长寿命路面中的应用,技术优势很多,共同指向了更安全、更耐久、更经济的基础设施。

1.ECC 最好之处就是极佳的抗裂性能和耐久性。宏观裂缝变为无害的微观裂缝,且具有一定的自愈合能力,ECC 从根本上解决了传统混凝土因开裂造成的耐久性快速下降的问题。由此可以得出,用 ECC 路面结构可以有效抵御环境侵蚀及荷载疲劳,减少修补次数、延长使用年限。

2. 提高结构的安全性、可靠性: ECC 的高韧性和高延性使得在受到冲击荷载或者超载的情况下,可以产生大的塑性变形来吸收能量,而不出现突然的脆性断裂。这样可以给路面结构提供更高的安全冗余度,也可以在地震、车辆事故等突发情况下保证结构的完整性。

3. 简化结构、降低维护成本: ECC 可以简化或者取消路面横向接缝、传力杆体系,或者减少配筋率。结构简化会直接导致施工工序减少,工程效率提高。从全生命周期来说, ECC 的初始材料成本比普通混凝土要高很多,但因为它的超长寿命以及极低养护要求,后期养护、维修甚至重建所支出的费用都会减少,从而实现全生命周期的花费减少。

4. 促进绿色和可持续发展, ECC 配方中大量使用粉煤灰、矿渣等工业副产品代替水泥,既可以降低材料成本,更重要的是可以减少水泥生产过程中碳排放,符合当前建筑行业绿色低碳发展的趋势。更长的结构寿命本身就是对资源的最大节约,减少了由于维修和重建所消耗的资源以及造成的环境影响。

(三) 未来发展前景

ECC 属于平台型材料技术,具有广阔的发展空间,在高速公路长寿命路面建设中将发挥越来越重要的作用。目前的研究方向和未来的发展方向大体上可以归纳为以下几个方面。首先就是成本的持续优化。ECC 的全生命周期成本有优势,但是较高的初始造价仍是阻碍其大规模推广的主要因素。未来配合比设计改进、纤维材料降本增效、多种工业固废的利用、生产施工工艺的改进,将会使 ECC 材料成本更低,更具市场竞争力。

其次是性能的定制化、智能化,根据路面不同的结构层、不同的功能区,未来 ECC 会朝着功能化方向发展。通过材料设计开发出耐磨性更好的表层 ECC、变形协调性更好的基层 ECC,甚至是具有自感知、自诊断能力的智能 ECC,主动监测自身的健康状况。根据需要设计材料性能,将会使 ECC 的应用更加精准、高效。

再者就是施工技术的标准化、高效化。目前 ECC 的施工工艺还在不断的研究和完善中,喷射 ECC、自密实 ECC 等技术已经在一些工程中得到了应用。未来要创建起一套成熟的、标准的施工技术与质量控制体系,研发出相应的高效机械设备,保证 ECC 材料性能在实际工程中能够稳定发挥,促使 ECC 材料从实验室和示范工程走向规模化应用。

最后就是同其它前沿技术的深度整合。采用 ECC 和 3D 打印技术相结合的方式,可以快速、准确地建造出复杂的路面构件,与超高性能混凝土等其它先进材料相结合,形成优势互补的新型路面结构体系,最大限度地发挥各种材料的潜力。随着研究的不断深入和技术的不断发展,ECC 在创建安全、耐久、智慧、绿色的新一代高速公路体系中将起着不可替代的作用。

第二节 光伏路面与结构功能一体化

一、光伏路面技术特点

(一) 发电功能特点

光伏路面的核心功能就是将大面积的路面变成分布式太阳能发电站,从而实现“路面即电站”的创新理念。其发电功能最主要的特征就是能源就地生产,就地消纳。在路面结构中埋入光伏发电单元,可以将太阳能直接转化为电能,给高速公路沿线的照明系统、交通标志、监控设备、隧道通风、信息情报板等提供持续的绿色电力,大大减少对传统电网的依赖和长距离输电的损耗。电力富余时可以将电能储存或者并入国家电网,以达到能源优化配置、提高经济效益的目的。

光伏路面的发电过程是动态的,并且受到环境因素的影响很大。发电效率受光照强度、日照时长、天气状况(阴雨、雾霾)、季节变化、地理纬度等许多自然因素的影响。路面属于交通载体,车流遮挡、轮胎印记、尘土覆盖等动态交通

因素，都会对光伏组件的受光面积以及透光率造成瞬时或者累积性的影响，从而引起发电功率出现波动。因此其发电系统必须具有智能化的功率跟踪和管理能力，才能适应各种复杂的实际运行环境，最大限度地获取太阳能。

光伏路面属于新型分布式能源，为将来交通能源网络的形成打下了基础。可以和储能系统、电动汽车无线充电技术等深度结合，形成一个动态的发储用一体化的微电网。行驶中的电动汽车可通过地面嵌入的无线充电线圈来充电，可以消除里程焦虑，也可以推进交通电动化。交通流与能源流的有机结合，是创建可持续智慧交通体系的重要环节，有巨大的应用潜力和战略价值。

（二）路面结构特点

光伏路面结构设计要平衡好传统路面承载功能和新增发电功能，其结构形态具有典型的多层复合特征。光伏路面主要结构层及功能特点见下表。典型的光伏路面结构一般从上到下由三个主要层次组成，即表面保护层、光伏电池层、基层结构。三个层次互相配合，保证路面在复杂的交通荷载、多变的环境中，长期保持稳定，发挥应有的功能。

光伏路面主要结构层及其功能特点

结构层	主要材料 / 组成	核心功能	关键性能要求
表面保护层	特种高分子复合材料或高强度特种玻璃	保护内部组件，提供车辆通行面	高透光率 (> 90%)，高承载力，高耐磨性，高抗滑性，耐候性
光伏电池层	特殊封装光伏电池单元	将太阳能转化为电能	高光电转换效率，优良封装（防水、防潮、抗振、电绝缘），模块化
基层结构	水泥混凝土或级配碎石	提供承载基础，保护内部线路	强度高，稳定性好，预留线槽接口，与电气工程无缝对接

表面保护层直接接触车辆轮胎和自然环境，所以它的材料性能要求非常高。它必须要有 90% 以上的透光率，保证足够的阳光照射到下层光伏电池上，还要有足够的抗压、抗冲击强度和耐磨性能，承受重载交通反复碾压和摩擦，良好的抗滑性能也是行车安全的基本前提。目前该层大多采用特种高分子复合材料或者高强度特种玻璃，配方、工艺是这项技术的核心。

光伏电池层就是光电转换的功能层。与传统的屋顶光伏板不一样的是，路用光伏组件经过特殊的封装，可以适应路面内部特殊的应力环境以及温湿度的变化。其单元多为模块化设计，方便生产铺设，又利于单体更换维护。组件的封装技术

要解决防水、防潮、抗振动、电绝缘等一系列问题,保证光伏电池在长达几十年的设计寿命里稳定工作。基层结构是整个光伏路面系统的根基,给整个光伏路面系统赋予稳固的承载根基。它既要承受并传递上部结构传来的交通荷载,防止路面产生过大的变形或者结构上的破坏,又要给光伏组件、电缆线路、传感器等电子元器件提供一个稳定、安全的空间。该层一般采用传统的水泥混凝土或者级配碎石等材料进行施工,但是在设计的时候需要预留出相应的线槽和接口,使土木工程和电气工程可以无缝对接。

(三) 技术难点分析

光伏路面技术走向大规模工程应用,面对的是材料、结构、电气、经济等各方面严峻的技术挑战和难题。问题存在各个材料、结构、电气、经济等各个方面。从核心技术难点来说,主要表现为如下几个方面,它们相互关联,互相制约。

1. 材料性能矛盾和统一问题首先浮现。路面材料主要要求是高承载力、高耐磨性、高抗滑性,光伏材料要求高透光性。怎样在单一材料或者复合材料体系中,达到这些看起来相互矛盾的性能指标的完美结合,目前仍是研究的焦点。表面保护层材料既要有玻璃一样的透明度,又要有沥青或混凝土一样的坚固耐久性,还要能长期抵御紫外线老化、高低温循环、化学腐蚀等,这对材料科学提出了很高的要求。

2. 发电效率的保证与提高受复杂环境的影响。道路环境比屋顶等传统应用环境要恶劣得多,灰尘、泥水、油污、轮胎橡胶磨损物等等都会很快污染路面,透光率下降严重,发电效率急剧下降。开发出具备优异自清洁性能的表面材料或者建立高效率、低成本的自动化清洗维护系统,对于保持其长期稳定的发电能力来说是非常重要的。车辆行驶时会产生的瞬时阴影遮挡会造成光伏组件出现热斑效应,导致发电量减少,严重的时候会烧毁电池片。因此精妙的电路设计、智能化的功率管理成了解决问题的关键。

3. 结构安全、电气安全的长期可靠性为工程应用底线。嵌装了光伏组件、复杂电路系统等的路面结构,其力学性能、耐久性如何能达到和传统路面相当甚至更优的程度,属于一个重要的结构设计问题。不能有长期动载后出现的层间剥离、部件损坏、电缆断裂等。电气系统防水绝缘设计十分重要,即使是小的渗漏也会造成短路、漏电等严重的安全事故。雨雪天气下保证整个系统的电气安全是不可逾越的底线。

4. 高昂的初始建设成本以及全生命周期的经济性,是它不能被广泛采用的主要障碍。目前光伏路面的单位面积造价是传统水泥混凝土路面的几倍,经济合理的因素主要是发电收益、碳交易价值和社会效益。依靠技术创新、依靠规模化生产、依靠优化设计、依靠降低生产成本、依靠建立科学的全面的全生命周期成本效益评价模型,这是决定该技术能否由示范走向实用的关键。

二、结构功能一体化实现

(一) 结构一体化设计

结构功能一体化设计的核心思想就是,从项目开始就将路面的力学性能和光伏系统的物理需求、电气性能有机地结合起来,使得多学科能得到深度融合。不再只是材料的堆砌或功能的简单叠加,而是对路面系统的一种重新构建。设计过程要先建立精细化的多物理场耦合分析模型,用有限元等数值模拟方法综合分析车辆动荷载、温度应力、光伏组件内应力、电热效应等因素的耦合作用。通过模拟可以预测路面在长期服役过程中的应力分布、变形规律及薄弱环节,从而优化结构层厚度、材料参数、组件布置,保证系统力学性能的安全可靠。

一体化设计在模块化、标准化上体现得最为明显。将光伏路面设计成标准化的预制模块单元,是保证高质量、高效率施工和便于维护的关键所在。每个模块单元内部都有表面保护层、光伏电池、底层支撑架构以及相应的电气连接器。即插即用的设计理念既可以在工厂里精确控制产品质量,又可以大大减少现场施工时间,降低对交通的影响。当某一模块出现故障时可以快速的整体进行更换,大大提高可维护性。模块之间连接处属于关键部位,其接缝处要符合荷载传递、防水密封、电气联通的要求。

结构一体化设计还要考虑与其它道路基础设施的衔接。路侧排水系统、电缆沟等应和光伏路面统筹规划。路面内电缆走向、汇流箱、逆变器的布置等在结构设计阶段就应确定,防止施工冲突。只有这样,才能形成结构牢固、功能高效的整体光伏路面系统。

(二) 多功能集成实现

结构功能一体化的实现,并不是发电功能的加入,而是把路面当作一个平台,集成更多的智能化功能,使路面成为智慧高速公路的神经末梢。多功能集成的道路不再只是一个被动的交通载体,而是一个主动的信息交换和服务供给平台,因

此其内涵和价值也得到了极大的扩展。

最直接的扩展就是将各种传感器集成到一起，实时获取交通、环境信息。在光伏路面模块内埋设压电传感器、光纤光栅、地磁线圈等就可以精确获取交通流量、车辆速度、轴重、车型等信息数据，可以为交通管理与控制提供实时信息。集成温度、湿度传感器可以对路面情况进行实时监测，给冬季道路结冰预警提供可靠的依据。数据依靠车辆无线通信模块及时传送到云端控制中心，从而变成车路协同和自动驾驶技术中重要的车端感知单元。

另一个主要的集成方向，就是实现道路的主动服务功能。在光伏路面结构中植入电热膜或者电热电缆，利用光伏系统自身产生的电能，在冬季对路面进行加热，实现路面积雪和薄冰的自动融化，保证冬季行车安全，减少融雪剂对环境的污染以及对路面结构的侵蚀。在路面上安装可以改变颜色、可编程的 LED 发光模块，形成动态车道标线、交通指示标志或者可变信息板。发光单元会随着实时的交通状况、天气情况或者突发事件而改变显示内容，在出现拥堵的时候可以引导车辆换道，事故发生后可以向后方车辆发出警示，大大提高道路交通安全性和通行效率。

（三）系统协调运行

结构一体化设计、多功能集成之后，怎样保证整个复杂的系统长期、稳定、高效地协调运行，才是光伏路面技术成功的最终保证。这就需要一个强大的“大脑”，即智能化的综合管控系统，来统一调度管理路面发电、感知、服务等各个子系统，实现各个功能模块之间信息互通、协同联动。

系统协调运行的核心就是能源管理。光伏路面产生的电能是间歇的、波动的，必须依靠先进的能源管理系统才能得到精确的控制。该系统要对各个路段的发电量、用电设备的能耗需求、储能单元的状态进行实时监测，用智能算法来实现能量流的最佳分配。光照充足时为路灯、标志牌等本地负载供电；多余电能可以为储能系统充电或者并网；夜间或阴雨天由储能系统或者电网为负载供电。对融雪、动态充电等高功率应用，能源管理系统要事先做好负荷预测，制定合理运行策略，保证电力供求平衡。

数据融合和协同控制属于另一环。路面集成的一系列传感器会产生大量异构多源的数据，管控平台要具备很强的数据处理和融合分析能力，把原始数据里提取出有价值的交通状况、路面健康等数据。在此基础上可以实现各种功能之间

的相互协调。当温度传感器检测到路面温度低于冰点且湿度较大时,系统就会自动开启融雪功能;当交通流量传感器检测到前方出现拥堵的时候,系统就会控制LED动态标线提前进行车道指引。以实时数据为依据的闭环控制,使路面根据实际情况做出智能响应,实现主动式的交通管理与服务的智慧路面系统,保证智慧路面系统作为一个有机的整体安全、高效、协调运转。

第三节 预制装配式混凝土路面技术

一、预制装配式路面构件特点

预制装配式路面构件最大的优势就是工厂化生产的特性,由此带来了许多与传统现浇路面不同的特点。不仅构件自身就具有这些特性,生产、运输、安装等过程中也体现着这些特性,所有这些都形成了该技术体系技术先进性以及明显的经济社会效益。

(一) 标准化生产特点

预制装配式混凝土路面板的标准化生产,是预制装配式混凝土路面板实现高品质、高性能的前提。在专业预制厂内路面板块生产不受现场恶劣天气和复杂环境影响,实现全流程的工业化管理。采用高精度、可重复使用的模具来保证每一块面板的尺寸一致、精度非常高,即长度、宽度、厚度、企口、传力杆孔道等所有的细节构造都能够预先设定。尺寸高度一致,给现场快速精准拼装打下了良好的基础。

混凝土的制作过程也被严格控制。工厂化生产模式下可以使用先进的自动化计量、搅拌设备,准确控制水胶比、外加剂掺量等关键参数,保证混凝土拌合物的均匀性、稳定性。与现场搅拌相比,工厂环境更有利于使用高性能混凝土、超高性能混凝土等特种材料,通过优化配合比设计制造出强度更高、耐久性更好、抗裂性能更好的路面板。

养护条件的精确控制对于混凝土性能的发展来说十分重要。工厂内可以提供理想的、标准的养护环境,比如蒸汽养护、恒温恒湿养护等。受控的养护措施不但可以加快混凝土早期强度的发展,还可以使水化反应更加充分,从而形成更致密的微观结构,获得更好的长期力学性能和耐久性。标准化生产流程不仅可以提

高单个构件的质量,也可以保证整条路面性能的一致性,从根本上杜绝现浇施工中常见的离析、泌水、表面收缩开裂等质量通病。

(二) 快速安装特点

预制装配式路面最显著的优点之一就是施工速度非常快,对交通影响很小。路面板在工厂已经预制好并达到设计强度,现场作业就简化为基层处理、板块吊装、接缝处理等几个工序。搭积木式的施工方法大大缩短了现场作业时间。在高速公路养护维修工程中,可以在夜间车流量少的“窗口期”内施工,实现“连夜铺设,清晨通车”,对社会交通的影响降到最低,社会效益和经济效益都十分显著。

由于该技术施工速度快,因此在应急抢修工程中具有不可替代的作用。在路面出现破损塌陷或者急需抢修的情况下,预制板技术都能迅速的做出回应,使得道路尽快回复正常通行。施工过程几乎不受季节和恶劣天气的影响。传统现浇混凝土路面在冬季或者雨季施工时常常会遇到诸多困难,养护周期也会大大延长。预制板安装对环境温度、湿度要求不高,基层满足施工条件即可进行铺设,有效施工时间范围扩大,有利于保证工程进度。

(三) 质量可控特点

预制装配式路面技术的质量可控性,是存在于原材料到最终产品整个生命周期的各个环节之中。因为生产集中在工厂里,给实行严格的、系统的质量控制程序创造了极为有利的条件。整个质量控制体系可以拆解成几个重要的部分,从而保证最终产品具有良好的性能

1. 原材料控制,所有进场的水泥、砂、石、外加剂、钢筋等原材料必须经过严格检验,只有符合技术规范的材料才能用于生产。源头控制是保证混凝土性能的基础,可以有效防止现场施工中由于材料质量波动造成的工程隐患。

2. 生产过程控制,配合比执行、搅拌时间控制、振捣工艺标准化操作、钢筋及预埋件定位准确性、养护制度严格遵守等每一个环节都在质量管理体系的监督之下。对生产过程中重要的参数进行实时监测和记录,可以使得质量问题具有可追溯性。

3. 成品检验:每块预制板在出厂前都要做外观质量检查、几何尺寸复核、无损探伤检测内部缺陷、芯样抗压、抗折强度测试等。只有合格的产品才进行编号出厂,运往施工现场。该种“产品化”的质量控制理念,把路面工程从工程性质转变为工业产品性质,从根本上改善了路面结构的可靠性和耐久性。

二、预制装配式路面工程应用

(一) 构件连接技术

构件连接技术是预制装配式路面的关键，也是核心，构件连接技术的好坏直接决定路面板块之间荷载传递是否顺畅，路面结构整体性是否良好。有效的连接技术要保证相邻板之间有良好的嵌锁作用，能够很好地传递车辆荷载所引起的剪力，防止产生板角处独立翘曲、错台等缺陷。目前工程中使用的连接技术有传力杆连接、企口键槽连接、后张预应力连接等。

其中传力杆连接应用最广。在板接缝处预留孔道，安装时插入涂有防粘结材料的光面钢筋，即传力杆，再向孔道内压注特制的高强度、无收缩灌浆料，使传力杆与板体牢固锚固。该种连接方式能很好地传递垂直于接缝的剪力，保证相邻板竖向平整，是保证路面平顺度和承载能力的重要措施。

企口键槽连接是通过在板侧面预制凹凸几何形体，用机械嵌锁的方式实现的一种连接。当相邻板块拼接之后，在键槽内灌注高性能灌浆材料，固化后便形成一个连续的剪力键。该结构可以有效地抵抗板之间竖向剪切位移，提高路面整体作用。为了获得更好的连接效果，一般将传力杆技术与企口键槽技术结合在一起，形成互相补充、互相配合工作的复合式连接体系。

对技术要求较高、目的是完全消除横向接缝影响的连续预制路面，则采用后张预应力连接技术。把高强度钢绞线穿入预制板上的穿束孔道里，在路段板块铺设完成后对钢绞线进行张拉、锚固。预应力施加后所有板块被紧密地串联在一起，压合在一起，形成一个连续的整体结构，彻底消除了接缝的开合，从根本上解决了接缝处的应力集中、渗水问题，同时大大提高了路面板的抗裂性能和承载能力，是实现超长寿命路面的理想技术途径。

预制装配式路面常见连接技术对比

连接方式	传力原理	优点	缺点	适用场景
传力杆连接	剪力传递	结构简单、施工方便，有效传递剪力	依赖灌浆质量，接缝可能仍有微小位移	常见路面、快速修复
企口键槽连接	机械嵌锁	增强整体性，抵抗剪切位移	企口精度要求高，不单独使用时传力有限	与传力杆结合使用
后张预应力连接	整体压合	完全消除横缝，高抗裂、高承载，超长寿命	成本高、施工复杂，对预制板要求高	超长寿命路面、重载交通路段

正如上表所显示的,不同的连接技术传力原理、优点、缺点和适用场合不同。因此在工程应用中根据需要选择最适宜的连接方式。

(二) 快速施工工艺

预制装配式路面快速施工工艺,是现场作业流程化、体系化的一整套系统工程,各个环节必须紧密衔接、相互配合,才能实现高效。典型的工艺流程从现场准备开始,对现有路面进行铣刨或者对路基进行处理,形成平整、坚实、高程准确的基层或者垫层。一般用水泥稳定碎石、沥青稳定碎石或贫混凝土作为调平层,并用激光摊铺机等先进设备进行精细摊铺和压实,为预制板铺设提供理想的支承面。

接下来就是核心的吊装铺设环节。预制板用专用运输车辆运到现场,然后用配有真空吸盘吊具或专用吊钩的起重设备进行吊装。吊装过程中必须平稳、准确,严禁对板体产生撞击损伤。操作人员按照事先确定的铺装顺序和位置,把路面板准确地放在基层上,保证路面板的位置、方向、高程符合设计要求。板与板之间拼接要准确对位,接缝宽度要一致。铺设时要随时测量高程、平整度,发现偏差及时调整。铺设完毕后立刻接缝处理,安装传力杆、灌注接缝料等。如果采用预应力技术,则在板块铺设完毕后进行钢绞线穿束、张拉、锚固工作。施工过程组织严密,像流水线一样作业,最大限度地缩短了现场占用时间。

(三) 质量控制要点

预制装配式路面工程应用的质量控制,是施工准备、安装、后期处理全过程的系统工程,控制要点直接影响路面最终使用性能和寿命。现场施工阶段质量控制要一丝不苟。基层平整度、压实度是首要的控制点,高质量的基层是路面板均匀受力、防止后期脱空和断裂的前提。必须用精密仪器检测基层顶面的高程,误差不能大于毫米。

构件在运输、吊装时应做好保护工作。必须编制吊装方案,选用适宜的吊具,严格禁止粗鲁地装卸,避免发生碰撞、冲击造成板体裂纹或者边角开裂。任何有损伤的构件都不能用来铺设。安装精度属于质量控制的内容,包括平面位置、高程、相邻板之间错台。施工中应使用全站仪等测量设备对施工过程进行全程跟踪定位,用水平尺等工具随时检查平整度,保证路面最终平顺性符合规范要求。

接缝处理质量的好坏直接关系到路面的耐久性。传力杆安装位置要准确,灌浆料性能指标(流动性、强度、微膨胀率)必须合格,灌注时必须饱满密实,不

能有空洞。预应力体系中钢绞线张拉力和伸长值应双控,锚具安装、封锚要规范,保证预应力有效、持久。施工结束后,要对路面平整度、接缝错台、结构强度等做最终检测,形成完整的质量验收文件,以保证交付的路面工程达到长寿命的设计要求。

第四节 再生骨料与固废资源化利用

一、再生骨料在路面中的应用

(一) 再生骨料性能特点

再生骨料的性能同它的来源以及处理工艺有密切关系。最明显的特点就是表面附着一层多孔、低强度的旧水泥砂浆。旧砂浆造成再生骨料比天然骨料吸水率高、表观密度低、压碎值高。高吸水性会影响再生混凝土拌合物的工作性能,也使水胶比的精确控制更加困难。旧砂浆界面是再生骨料的薄弱处,旧砂浆界面的存在会减弱骨料颗粒与新水泥石之间的粘结力,从而使再生骨料的力学性能如抗压强度、弹性模量一般低于同粒径的天然骨料。

尽管再生骨料有性能上的固有缺陷,但是利用先进的破碎、筛分、强化处理工艺可以大大提高其性能。利用多级破碎、整形设备可改善骨料颗粒形状,采用风选、水洗等方法可以去除轻物质、尘土等杂质。性能强化技术,机械研磨法去除部分旧砂浆,或者用聚合物乳液处理骨料表面,可以有效地降低吸水率,提高表面硬度,填充微裂缝,改善新旧界面过渡区的微观结构,全面提升再生混凝土的整体性能。因此准确评价再生骨料的性能,并选择性使用,才是再生骨料在长寿命路面工程中得以成功应用的前提。

(二) 再生骨料应用技术

再生骨料在高速公路路面的应用技术已经比较成熟,涉及路基、面层等各方面的结构层次。基本原则为“分级利用、优质优用”,即根据再生骨料质量的不同来选择配置到最合适的地方。质量较低的再生骨料一般用于对承载、耐久性要求较低的路基、底基层;经过精细处理的高品质骨料可以部分替代天然骨料,用于要求较高的基层或者混凝土面层。

在基层和底基层中,再生骨料多用来做水泥稳定碎石等半刚性材料。设计时

要考虑高吸水率对最佳含水量的影响,改进施工工艺以保证压实度和均匀性。水泥混凝土面层中应用难度大,一般只能用高品质再生粗骨料,取代率控制在30%以内。为了保证路面性能,必须对再生混凝土的配合比进行精细化设计,通过调节砂率、用水量、外加剂来弥补再生混凝土对混凝土工作性、强度、耐久性的影响。

通过使用先进的工艺来提高再生混凝土的综合性能。两阶段搅拌法,即先将骨料预吸水再搅拌,可明显改善新旧界面区的粘结质量。对再生骨料进行表面处理,用水泥浆体或聚合物包裹形成强化层,可以降低吸水率、提高强度,为再生骨料在路面面层中更大比例的应用提供强有力的技术支持。

(三) 再生混凝土质量控制

再生混凝土质量控制是保证再生混凝土路用性能的重要环节,必须从原材料、生产、施工全过程严格控制。原材料控制要建立完善的再生骨料准入标准和检测制度,对级配、压碎值、吸水率、氯离子、硫酸盐等有害物质含量进行系统检测。追溯并分类管理骨料来源,优先选择单一、高强度废弃混凝土源,可以保证其质量的稳定性。

生产环节质量控制的主要内容就是配合比的准确执行以及动态调整。由于再生骨料吸水率高且波动大,生产前必须准确测定其含水状态,然后根据含水状态精确调节拌合用水量,保证有效水胶比的准确性。搅拌时适当延长湿拌时间,可以保证物料混合均匀。施工时要加强对混凝土坍落度的现场实时监测,精细摊铺、振捣工艺,防止离析、泌水现象。养护是决定再生混凝土最终性能的关键环节,必须做好保湿工作,延长养护时间,保证强度和耐久性充分发展,最终满足长寿命路面的严格要求。

二、固废资源化利用途径

(一) 工业固废利用

工业固废中粉煤灰、矿渣、钢渣在路面工程中使用较多。粉煤灰、磨细矿渣粉等属于优质的矿物掺合料,可取代部分水泥。它们所含的火山灰活性物质在后期还会继续反应,生成更多的水化产物,填充孔隙,改善微观结构。不仅可以降低水化热,减少混凝土早期温缩开裂的风险,还可以明显提高混凝土的后期强度、密实性、抗氯离子渗透、抗硫酸盐侵蚀等耐久性,对配制高性能长寿命路面混凝土有重要的意义。

钢渣质地坚硬，耐磨性好，可作为高性能路面骨料。但是其中含有游离氧化钙、氧化镁等成分，存在体积安定性不良的风险，会造成路面后期出现膨胀破坏。因此钢渣在使用前必须经过热闷法、陈化法等严格的预处理，保证其化学成分、体积稳定性符合要求。处理过的钢渣可以作为沥青或者水泥混凝土中的粗骨料，大大提高路面抗滑、耐磨性能。硅灰可以配制超高强度混凝土，而经过处理的磷石膏则可以用作路基稳定材料。

（二）建筑垃圾利用

建筑垃圾资源化属于一项复杂的系统工程，它的范畴远不止于废弃混凝土的再造。由于建筑垃圾成分复杂，有混凝土、砖瓦、砂浆、沥青块、金属等，所以高效利用的前提就是精细化的源头分类和现场分拣。经过专业的处理生产线进行破碎、筛分、风选、磁选等一系列除杂工艺后，最后得到不同组分、不同规格的再生产品。全组分利用模式就是最大程度发挥建筑垃圾资源价值的理念。

高速公路建设过程中，建筑垃圾各组分有各自不同的用途。除再生混凝土骨料外，破碎的废砖瓦也可用作级配骨料用于路面基层。废弃沥青路面铣刨料是一种重要的资源，经过再生技术处理后，可以作新沥青混合料的组分，从而节约沥青和石料。废弃渣土、泥浆经固化稳定处理后可用作路基填筑。因此多元化的应用途径使建筑垃圾接近于达到零废弃，把城市矿产转化为高质量的工程用料，给长久路面建设打下坚实的物质基础。

其他固废在路面工程中的利用示例

固废类型	主要特点	应用方式	潜在效益 / 注意事项
焚烧底灰	数量巨大,成分复杂,可能含重金属	经预处理（高温烧结、化学稳定化）后，作路基垫层或基层细集料	需确保重金属固化达标，避免环境风险
疏浚淤泥	数量巨大，含水量高	经固化处理后，作路堤填筑材料	需评估其承载力和稳定性
废旧轮胎	韧性好，弹性强	破碎成胶粉或胶粒掺入沥青或水泥混凝土	提高材料韧性、抗疲劳、减振降噪；橡胶沥青路面提升舒适度、安全性
废玻璃	清洗破碎后可作集料	替代天然砂	需抑制碱硅酸反应活性（如采用低碱水泥、掺粉煤灰）
煤矸石	煤炭开采伴生废料，具火山灰活性	煅烧处理后作水泥混合材料；未经处理可作路基轻质填料	需严格评价自燃性、浸出物，确保环境安全

（三）其他固废利用

除了工业固废和建筑垃圾，一些成分复杂、处理难度大的固废也被逐渐纳入到路面工程资源化利用的范畴中，为可持续发展开辟了新的途径。城市生活垃圾焚烧底灰、工程疏浚淤泥等数量众多，处理起来比较困难。但是经过高温烧结、化学稳定化等科学的预处理技术之后，可以有效地固化重金属等有害物质，大大降低其环境风险。经过处理并达标后，焚烧底灰可以作为路基垫层或基层细集料使用，疏浚淤泥固化后可用作路堤填筑材料，从而达到废物安全处置和资源化利用的双重目的。

正如上表所示，一些具有特殊性能的固废也展现出独特的应用价值：

1. 废旧轮胎：破碎成胶粉或者胶粒后掺入沥青或水泥混凝土中，可以大大提高材料的韧性和抗疲劳性，也可以改善减振降噪的效果。使用橡胶沥青铺设的路面在某段路程内可以提高行车舒适度、安全性，延长路面使用寿命。
2. 废玻璃：清洗、破碎后，可用作集料代替天然砂。为了抑制其潜在的碱硅酸反应活性，一般采用低碱水泥或者掺入粉煤灰等方法。
3. 煤矸石是煤炭开采的伴生废料，经过煅烧后具有火山灰活性，可以作为水泥混合材料。它本身也可用作路基的轻质填料，但是必须对其自燃性、浸出物等进行严格评价，以保证环境安全。

第十五章 绿色低碳与智能化发展路径

第一节 低碳混凝土技术与碳足迹评估

一、低碳混凝土技术路径

（一）胶凝材料优化

减少水泥熟料用量属于低碳混凝土技术的重要方面。水泥生产过程中的碳酸盐分解、燃料燃烧为二氧化碳排放的主要来源，其中熟料煅烧环节排放最多。因此掺入粉煤灰、磨细高炉矿渣、硅灰和石灰石粉等大掺量辅助性胶凝材料来替代部分水泥，是实现混凝土低碳化最直接有效的途径。这些材料大多为工业副产品，利用这些材料可以减少对水泥熟料的依赖，降低混凝土的隐含碳，改善混凝土的工作性能和长期耐久性，实现经济效益和环境效益的统一。粉煤灰的火山灰效应、矿渣的潜在水硬性，在水泥水化后期继续反应，产生更多的水化产物，改善孔隙结构，明显提高路面抵御氯离子渗透、硫酸盐侵蚀的能力。

主要低碳胶凝材料特点对比表

材料类型	来源 / 特性	碳减排机制	性能提升 / 应用
粉煤灰	工业副产品	替代水泥熟料	火山灰效应，改善耐久性、抗氯离子渗透
磨细高炉矿渣	工业副产品	替代水泥熟料	潜在水硬性，改善孔隙结构、抗硫酸盐侵蚀
硅灰	工业副产品	替代水泥熟料	改善工作性及长期耐久性
石灰石粉	天然矿物	替代水泥熟料	改善工作性及长期耐久性
碱激发胶凝材料	工业废料 + 碱激发	完全替代水泥	具有胶凝性能，可完全替代水泥
硫铝酸盐水泥	特种水泥，低烧成温度	单位产品碳排放低	更多绿色选择
镁质胶凝材料	特种水泥，低烧成温度	单位产品碳排放低	更多绿色选择

从上表可知，不同的辅助性胶凝材料和新型低碳胶凝材料，各有各的优势以及碳减排机制。复合胶凝材料体系的建立与完善属于技术发展的主要途径。采用两种或者两种以上辅助性胶凝材料进行复掺，形成三元或者多元胶凝材料体系，

可以发挥各种材料之间的协同效应和形态效应,取长补短,达到性能最优的目的。新型低碳胶凝材料研发应用有较大的潜力。碱激发胶凝材料(又称为地聚物),是利用粉煤灰、矿渣等工业废料,在碱性激发剂的作用下发生聚合反应,生成具有胶凝性能的固化体,可以完全代替水泥。硫铝酸盐水泥、镁质胶凝材料等特种水泥,由于烧成温度低、化学组成特殊,单位产品碳排放比普通硅酸盐水泥低得多,给长寿命路面混凝土提供了更多的绿色选择。

(二) 生产工艺改进

混凝土生产工艺绿色化改进,就是搅拌站能源效率、资源利用率、污染排放全方面优化的过程。采用高效节能的搅拌设备,优化投料顺序、搅拌时间,在保证混凝土性能的前提下,尽可能提高水泥替代率。推广废水、废浆回收再利用系统,使生产用水达到闭路循环的目的,既节约了水资源又防止了水体污染。建立完善的粉尘收集处理系统,减少生产过程中颗粒物排放,改善周边环境质量,体现现代化混凝土生产的环保责任。

水泥生产环节源头减碳的主要途径为工艺革新。推广带有预分解炉的新型干法水泥生产线,可以大大提高热量利用率。采用工业废渣、城市污泥等部分替代原料,用生物质燃料、废轮胎等部分替代传统化石燃料,可以大大降低原料消耗和燃料燃烧产生的碳排放。碳捕获、利用和封存技术属于前沿科技,正在被尝试应用于水泥工业。其目的就是捕集生产过程中产生的二氧化碳,并对其进行资源化利用或者永久封存,有望从根本上改变水泥工业的碳排放格局,为未来实现零碳混凝土提供最终解决方案。

(三) 能源结构优化

优化混凝土生产能源结构,使它向清洁方向转变,已经成为降低碳排放的必然选择。在混凝土生产、施工等各个过程中,减少化石能源的使用,转而采用可再生能源,是实现深度脱碳的一种重要方式。混凝土搅拌站可安装光伏发电系统,利用厂房屋顶和闲置场地发电,部分生产用电可以由光伏发电系统提供,从而减少对外购电的依赖和电网电力消耗造成的间接碳排放。在条件允许的时候可利用风能、地热能等清洁能源来形成多样的绿色能源供应结构,从根源上消除生产活动中产生的碳排放。

原材料和成品的运输,现场施工的能源优化也十分重要。合理规划原材料供应地和搅拌站布局以缩短运输距离,推广使用电动或者氢燃料重型卡车等新能源

运输车辆，可以减少物流环节的碳排放。逐步淘汰高耗能、高排放的传统柴油动力设备，推广使用电动或者混合动力摊铺机、振捣器、压路机等施工机械。可以减少施工过程中温室气体、大气污染物的排放，降低现场噪声污染，提高施工文明环保水平，是创建绿色工地的重要措施。

二、混凝土碳足迹评估

（一）评估方法与标准

混凝土碳足迹评价的主要方法就是生命周期评价，生命周期评价是评估产品从原材料获取、生产、运输、使用到最终废弃处置整个生命周期内对环境造成的影响。评价过程一般按照 ISO14040、ISO14044 等国际标准系列来保证评价的科学性、规范性、可比性。对于混凝土产品一般会编制环境产品声明，环境产品声明是标准化的报告，用来公开产品的环境信息，其中包含全球变暖潜能值（即碳足迹）。

评估的系统边界就是确定评价的范围。路面混凝土碳足迹评价一般采取“从摇篮到坟墓”的全生命周期视角，可以分为如下几个阶段

1. 原材料获取和生产阶段包括砂石骨料的开采加工、水泥熟料的煅烧粉磨、粉煤灰等辅助胶凝材料的收集处理、外加剂的化学合成等所有上游过程的资源能源消耗和环境排放。

2. 运输阶段：指所有原材料从产地到搅拌站，以及预拌混凝土从搅拌站到施工现场的运输过程。

3. 施工及使用阶段：包括路面摊铺、养护等施工过程中所消耗的能源，以及路面在长期使用过程中，路面和车辆之间的相互作用对车辆燃油效率的影响；还要考虑混凝土材料自身碳化作用吸收二氧化碳的过程。

4. 废弃处置阶段即路面达到设计寿命之后，对其进行的破碎、拆除、运输、回收利用或者填埋等过程。

创建正确的碳足迹评价模型，不能缺少优质的基础数据库。数据库中应该包含各种原材料、能源、运输方式的碳排放因子。因子数据要具备时效性、地域性，才能真实的反映某一地区能源结构、生产技术和运输效率。因此本土化生命周期基础数据库对于提高评价结果的准确性、可靠性起到了非常重要的作用，也是实现行业碳足迹核算标准化、精细化的基础。

（二）影响因素分析

影响混凝土路面碳足迹的因素错综复杂，其中胶凝材料的选择和配比起着决定性的作用。水泥熟料是碳排放的主要来源，胶凝材料中熟料的比例（即熟料系数）直接影响混凝土初始的隐含碳。在保证路面性能的前提下，尽可能提高粉煤灰、矿渣等低碳辅助性胶凝材料的掺量，是降低碳足迹最有效的途径。骨料来源也会对碳排放造成较大影响，主要是由于运输距离造成的。选用当地优质骨料可以减少长距离运输所消耗的燃油和二氧化碳排放。

生产工艺以及施工管理水平也属于影响变量。水泥生产技术水平，即采用新型干法窑、余热发电比例等都会影响单位水泥的碳排放强度。混凝土搅拌站的能源利用效率、水资源循环利用率、生产管理精细化程度，都会直接体现在最终产品碳足迹上。施工阶段的能源消耗主要是大型机械的燃油消耗，是施工环节碳排放的主要来源。设计方案是否合理也起到重要的作用。经过优化的长寿命路面设计，虽然初始材料投入略高，但是由于使用寿命长、维修养护需求少，所以其全生命周期总碳排放和资源消耗将大幅降低，符合全生命周期成本最优原则。

（三）减排措施

对于混凝土路面全生命周期的碳排放，可以从材料、设计、施工、运维等各方面系统地采取减排措施。从材料角度来说，核心就是不断推进胶凝材料的低碳化革新，大力推广高掺量辅助胶凝材料的绿色混凝土，积极探索碱激发胶凝材料等近零碳胶凝材料在路面工程中的应用。发展再生骨料技术，将废弃混凝土路面粉碎成新的路基骨料使用，从而可以形成循环经济。不但可以减少天然砂石资源的开采，还可以降低建筑垃圾填埋造成的环境问题，综合减排效益明显。

设计、施工层面的减排策略是以全生命周期的优化为主。在设计阶段要采用基于性能的设计方法，放弃传统的单纯强度指标，以耐久性、长期性能为设计目标，准确设计混凝土配合比，避免材料浪费。推广路面结构优化设计技术，如薄层罩面、预制拼装板等，以达到节约材料的目的。施工期间，应优化物流运输路线，推广使用新能源施工机械和车辆。经过精细化的施工过程管理可以提高材料利用率，减少现场浪费。应将碳汇效应考虑进去，认为混凝土在其服役的整个生命周期以及废弃之后，会通过碳化作用自然吸收大气中的二氧化碳。虽然吸收量比较少，但将其纳入全生命周期碳足迹核算，可以更全面地评价混凝土路面的环境影响，并促使行业去探索强化碳化技术，最终使路面结构从碳源转变为潜在的碳汇。

第二节 长寿命路面的绿色价值评价

一、长寿命路面绿色价值评价体系

（一）评价指标选择

评价指标的选择是评价体系的基础，其科学性、全面性直接决定评价结果是否准确，能否起到指导作用。指标的选择是以全生命周期理论为依据，从原材料开采、加工、路面施工、运营维护、废弃处理等全部过程。从环境、社会、经济三方面反映长寿命路面对系统的影响，保证评价的深度和广度。

指标体系一般分为环境效益指标、社会效益指标、经济效益指标三类。环境效益指标主要针对路面建设、运营过程中对自然生态系统造成的影响，包括全生命周期能源消耗量、温室气体排放量（以二氧化碳当量计）、水资源消耗量、固体废物产生量、土地占用情况以及施工、运营过程中产生的噪声污染程度等。这些指标直接和资源节约、环境保护目标的实现有关，是衡量路面绿色程度的标准。

社会效益指标考察的是路面项目给公众带来的福祉，也考察的是路面项目对区域发展所做出的贡献。主要是由于维修次数减少而带来的交通拥堵延误时间减少、行车安全性提高、驾驶舒适度提高、沿线社区生活品质的改善等。长寿命路面由于施工占用道路时间较短，有效地提高了道路网络通行能力与可靠性，有很高的社会价值。经济效益指标采用全生命周期成本分析的理念，把初始建设投资、未来几十年的养护、维修、大修、重建等费用以及交通中断造成的用户延误等外部成本都考虑在内，从而更真实的反映项目的长期经济效益。

（二）指标权重确定

指标权重的确定属于评价体系当中承前启后的关键步骤，它既表现出各个评价指标在综合评价中所占的相对重要程度，又体现出决策者对于不同价值维度的重视以及政策导向。权重的分配要保证科学性，也要考虑合理性，尽量减少主观臆断的影响，保证评价结果的客观公正。常用的权重确定方法大致可以分为主观赋权法、客观赋权法和主客观组合赋权法。下表是对这些方法的对比分析。

常用指标权重确定方法对比表

方法类型	具体方法	主要特点	优缺点
主观赋权法	层次分析法	基于专家经验和判断，通过两两比较确定相对重要性。	逻辑清晰，系统性强；易受主观因素影响。
	德尔菲法	匿名咨询专家意见，通过多轮反馈达成共识。	可避免群体思维，但过程耗时。
客观赋权法	熵权法	根据指标数据变异程度（信息熵）确定权重。	结果客观，排除人为干扰；要求数据质量高。
	主成分分析法	通过降维提取主要信息，根据贡献率确定权重。	可处理多维数据，减少信息重叠；结果解释性较弱。
主客观组合赋权法	层次分析法 - 熵权法结合	结合专家经验与数据特性，平衡主客观因素。	兼顾决策意图和数据支撑，结果更全面可靠。

主观赋权法主要依靠专家的专业知识、经验判断，典型的代表有层次分析法、德尔菲法。层次分析法通过建立递阶层次结构，把复杂问题分解成不同层次和若干因素，再用两两比较的方式来确定各个指标的相对重要性，逻辑清楚，系统性强。客观赋权法则是按照指标数据本身的规律和变化程度来确定权重，熵权法、主成分分析法等都属于此类。熵权法按照指标的信息熵大小来度量它的数据变异程度，变异程度越大，提供信息量越多，那么该指标得到的权重也就越高，能够有效地排除人为因素的影响。为了把主观经验同客观数据有效地结合起来用于实践，一般会采用主客观组合赋权的方法，例如层次分析法与熵权法相结合，使权重分配既符合决策战略意图，又有数据支撑，从而使整个评价体系更有说服力、更可操作。

（三）综合评价方法

在确定了评价指标和权重之后，需要选择合适的方法把各个分项指标的评价值综合起来，得到一个能够定量表示长寿命路面绿色价值的综合指数或者排序结果。综合评价方法的选择直接影响评价结果的科学性、可解释性，是达到评价目的的重要技术环节。

常用的综合评价模型有模糊综合评价法、灰色关联分析法、物元可拓模型等。模糊综合评价法对评价过程中出现的模糊性、不确定性问题有较好的处理能力。它利用模糊数学的隶属度理论，把定性评价指标转化为定量数值，有效地解决了舒适性、社会影响等很难精确量化的指标评价难题。建立评价因素集和评语集，确定各个因素的权重，进行单因素模糊综合评价以及多级模糊综合评价，最后得

出项目综合评价等级。

具体的操作流程一般为确定评价对象的因素论域,即所有的评价指标的集合;建立评价等级论域,优、良、中、差等;通过专家打分或者实测数据分析建立单因素评价矩阵,确定各个指标对于不同评价等级的隶属度;将权重向量和模糊关系矩阵合成得到最终的模糊综合评价向量。向量很清楚地展示出各种绿色价值等级的可能性分布,给不同的路面设计方案的选择提供了直观、科学的依据,使复杂的、多维的绿色价值评价过程系统化、规范化。

二、长寿命路面绿色价值体现

(一) 环境价值体现

长寿命路面的绿色价值最明显的地方就是其对环境的积极作用,该作用在路面整个生命周期中始终存在,从源头就减少了自然资源的消耗和对生态系统的破坏。其设计理念的核心就是提高初始建设标准,以达到长期低维护或者零维护的状态,从根本上打破传统路面建设、破坏、再建设的循环模式,从而达到对环境的持久性保护。

其环境价值最直接的表现就是节约资源、节约能源。传统水泥混凝土路面在设计使用年限内一般要进行多次大修或者重建,每一次的修复都会消耗大量的水泥、砂石骨料、钢材、水等宝贵的不可再生资源。长寿命路面使用高耐久性材料和优化结构设计,可以将路面使用寿命提高到40年以上,大大减少维修工程量,从而大幅度降低全生命周期材料总消耗量。建材生产及维修工程实施过程中所伴随的能源消耗也会明显降低。矿山开采、材料运输、现场施工等各个过程的能耗因工程频次降低而得以控制,对缓解能源紧张、实现节能减排目标有重要的意义。

长寿命路面对污染物排放的减少有明显的效果。水泥生产过程本身就是主要的碳排放源,施工机械的运行也会排放大量的二氧化碳、氮氧化物和颗粒物。长寿命路面由于低干预性,即施工活动的次数少,所以污染物的排放总量就减少了。其环境效益表现在如下几个方面,

1. 建筑废弃物减少:因为大修、重建次数锐减,所以产生的混凝土等建筑垃圾被有效控制,不仅可以减轻垃圾填埋场的压力,还能避免在废弃物处理中可能造成的二次污染。

2. 生态扰动降低, 频繁的道路施工会对沿线土壤、植被、野生动物栖息地等造成不断的干扰。长寿命路面因为施工范围小、施工频率低, 有利于保护道路周边生态环境、维护生物多样性。

3. 交通运行阶段间接减排, 平整、完好的路面可以减小车辆行驶阻力, 从而提高燃油经济性。长寿命路面由于具有较好的长期服务性能, 可以持续为车辆提供低滚阻的行驶表面, 从而间接推动整个交通系统的节能减排。

(二) 社会价值体现

长寿命路面的社会价值核心是给公众提供一个稳定、可靠、高效的交通基础设施, 从而大幅度改善公众出行体验和社会运行效率。高速公路是国民经济的命脉, 任何一点通行能力的下降都会造成广泛的社会影响。长寿命路面是保证大动脉畅通的必要的技术保证。

最直接的社会价值就是大大减少因为道路养护维修而造成的交通拥堵。在车流量大的高速公路上, 任何形式的施工都会造成车道的封闭, 形成交通瓶颈, 造成长时间的拥堵。既浪费了司乘人员时间、增大出行成本, 又容易引起焦躁情绪, 甚至导致二次事故的发生。长寿命路面的设计理念是把维修需求降到最低, 保证道路长期开放, 保证交通流的连续性、可预测性, 对提高整个路网服务水平、公众满意度有不可估量的价值。

安全性提高是它的又一重要的社会贡献。道路施工区域历来是交通事故的高发地段, 复杂的交通组织、人机交叉作业以及驾驶员注意力分散都会使事故风险大大增加。长寿命路面最大限度地减少施工区域的设置, 从源头上减少此类风险的发生, 保障了道路使用者和一线养护工人的生命安全。同时能保持路面平整完好, 避免坑槽、裂缝等病害的发生, 给车辆提供更好的行驶条件, 减少路面状况不好造成的事故。内在的、持久的安全性是传统路面所不能相比的。形成畅通、安全、可靠的高速公路网络, 能很好地支撑区域物流体系高效运转, 促进经济要素自由流动, 缩短城乡间时空距离, 为社会经济协调发展、人民生活品质提升奠定坚实的基础。

(三) 经济价值体现

长寿命路面的经济价值要从全生命周期成本的角度去评价。虽然最初建设费用比传统路面高出 10% 到 20%, 但是它是战略性投资, 换取的是几十年以后明显的好处。传统的项目评价方法一般只考虑初始建设成本, 而没有考虑到长期运

营维护的巨额支出。而长寿命路面最大的经济优势就在于它极低的全生命周期总成本上。

全生命周期成本分析是评判它的经济价值的主要手段。分析不仅包含建设阶段的直接费用,而且把运营阶段的所有费用也包括在内,主要包括日常养护费、周期性中修大修费和设计寿命结束时的重建费等。由于长寿命路面耐久性很强,周期性的大修可以被延迟甚至取消,日常的养护工作也得到了极大的简化。这就意味着道路管理机构可以在几十年内节省大量的维修资金。将这些未来节约的费用按一定的折现率折算成现值,总和一般会超过初始建设时增加的投资,因此充分证明了它在直接成本上具有长期经济性。

更重要的是长寿命路面可以大幅度地减少间接的社会经济成本,即用户成本。繁忙的高速公路由于施工造成的延误,所带来的经济损失、燃料消耗等一般是工程直接成本的数倍。长寿命路面可以保证交通的连续性,社会因此避免了巨大的隐性成本。车辆在平坦的路面上行驶的时候,轮胎、悬置系统受到的压力会变小,从而减少汽车的使用成本。虽然这些用户成本节约不能直接体现在道路管理部门的账目上,但是它们是衡量基础设施项目社会经济效益的重要指标。

从资产管理的角度来说,长寿命路面更体现的是长期投资的思想。它把道路基础设施当作一项要长期保值增值的优质资产。一次性高质量的投入可以保证资产在很长一段时期内保持良好的性能,不会因为频繁的维修而使资产的价值迅速降低。一次建成、长期受益的模式可以提高公共财政资源的使用效率,为以后交通的发展打下坚实的基础,其综合经济价值远远不能用短期成本来衡量。

第三节 数字孪生技术在运维中的应用

一、数字孪生技术原理概述

(一) 概念内涵与特征

数字孪生不是单一的技术,是物联网、大数据、云计算、人工智能、三维建模等多种先进技术的融合。核心内涵就是创建一个完全对应、动态演化的、在虚拟信息空间里对物理世界中的高速公路路面实体的数字化模型。该模型不仅可以保存路面几何形状、路面结构组成、路面材料性质等静态信息,而且可以采集

各种传感器数据, 从而对路面实际的服务状况、荷载变化、环境影响做出准确的反映。

数字孪生路面模型呈现出以下几个显著特征:

高保真性: 虚拟模型在几何、物理、行为等各个层面都力求真实地再现物理路面。

实时同步性: 依靠物联感知网络, 确保虚拟模型的状态与物理路面保持动态一致。

数据驱动性: 海量的监测数据和历史数据为模型的分析、预测与决策提供了坚实依据。

闭环控制性, 在虚拟空间里对养护方案实施仿真并加以优化, 把最佳决策反馈给物理路面养护作业, 从而创建起从感知、分析、决策到执行的智能闭环管理系统。

由此, 数字孪生路面系统就具备了虚实融合、实时交互的特点。管理者可以安全、低成本地在虚拟环境中对路面结构内部细微变化进行仔细观察, 推断在各种荷载、环境条件下路面性能的演变规律。完全打破传统运维手段的时空限制, 达到路面健康状况的“透明化”管理和“预测性”维护的目的, 给长寿命路面性能保持赋予了前所未有的技术支撑。

(二) 技术架构组成

建立数字孪生路面系统要依靠清晰、稳健的技术架构。一般是由四个互相联系、逐层递进的层次构成的, 保证从物理感知到智能应用的整个流程顺利通行, 共同支撑起路面运维管理的智能化转型。

一个典型的数字孪生路面技术架构包含以下组成部分:

1. 物理实体层是数字孪生的基础, 实际的高速公路水泥混凝土路面本身以及部署在上面的前端感知设备。这些设备包括: 可以监测应力、应变、温度、湿度等信息的嵌入式传感器; 采集路表病害、平整度、构造深度等信息的移动检测车; 用来宏观巡检的无人机; 沿线部署的环境监测站和交通流检测器等。物理实体层是所有数据的来源, 它的感知网络是否完备、是否精确, 直接决定了数字孪生系统能达到怎样的上限。

2. 数据支撑层指的是把物理实体层上采集到的大量、多样的、非结构化的数据有效地进行传输, 可靠地存储, 统一化地处理的过程。它依靠 5G、物联网这

些无线通信技术完成数据的即时回传，利用分布式数据库、云存储创建路面全生命周期数据库，采用数据清洗、对齐、融合等方式，给上层模型的建立和分析赋予优质的数据支撑。

3. 孪生模型层是数字孪生的核心，主要是创建物理路面的虚拟模型集。即高精度三维几何模型（BIM 模型），材料力学行为物理模型，荷载 - 结构响应行为模型，以及用历史数据和人工智能算法建立起来的性能演化预测模型。这些模型互相联系、不断发展变化，一起形成了路面的数字孪生体。

4. 应用服务层：数字孪生价值实现的主要途径，给运维管理人员提供各种可视化、智能化的应用服务。它把孪生模型层的分析和预测结果用图形化的界面、三维可视化的场景和数据报表等形式呈现出来，提供路面状态实时监测、性能衰变预测预警、养护维修方案仿真比选、应急管理支持等功能，从而帮助管理者做出科学的决策。

（三）实现路径分析

建立高速公路水泥混凝土路面的数字孪生系统是一项复杂的系统工程，要按照一定的路径，分阶段、有重点地推进。其实施过程就是顶层设计、技术落地、持续改进优化的完整循环，目的是保证技术可以有效地服务于长寿命路面运维管理的目的。

第一步就是确定目标 and 需求，对路面运维管理的痛点和难点进行分析，确定数字孪生系统要解决的问题，例如早期病害精准识别、长期性能趋势预测、养护决策成本效益优化。根据已经确定的开发目标来确定孪生系统的覆盖范围、孪生精度、功能模块、业务目标等，最终形成完整的顶层设计方案。

第二步就是多源数据采集和融合，按照顶层设计制定全面的数据采集策略，布置各种传感器，整合路面检测数据、施工竣工数据、交通流数据、气象环境数据等。关键在于创建起一套标准化的数据治理体系，解决不同来源数据在格式、精度、时空基准等方面的差异问题，利用数据融合技术创建起统一、完整、准确的路面全生命周期数据库，为后续建模打下良好的基础。

第三步：多维孪生建模与验证，为技术实现的关键步骤。用 BIM 等技术创建路面高精度的三维几何模型。通过集成材料力学理论和有限元分析方法，建立能够模拟荷载响应的物理模型。使用机器学习、深度学习等人工智能算法，挖掘历史数据规律，建立可预测路面性能衰变的行为模型。模型建立之后，必须用实

测数据对模型精度进行反复标定和验证,保证虚拟模型能够真实的反映物理路面的状态和行为。将模型集成到一个平台之上,使得虚实之间的数据进行实时的、同步地驱动与演化,从而达到形成完整的数字孪生体来进行部署。

二、数字孪生在路面运维应用实践

(一) 路面状态监测

传统的路面状态检测依靠周期性的手工检查以及专业的检测车辆,监测频率低,数据分散,不能及时反映路面的动态变化。数字孪生技术的运用,创建起全时域、全空域、全要素的“透明路面”,从根本上改变了以往的情况,实现了对路面健康状况的全方位、动态、可视化的精准监测。

数字孪生系统中路面状态的信息不是孤立的数据点,而是综合起来放到了一个统一的真实的三维可视化的平台上。该平台把路面内部嵌入式传感器(应变计、位移计、温湿度传感器)采集到的结构内部响应数据集成起来,可以实时反映路面在交通荷载和环境作用下真实的受力情况。系统还整合了周期性移动检测设备采集的路表信息,即国际平整度指数、车辙深度、构造深度、高分辨率路面病害图像等。无人机航拍高清影像用来快速识别并定位路面宏观病害。

所有的多源监测数据在时空基准对齐之后,就会被实时映射到数字孪生模型上。运维人员可以在办公室的屏幕前,利用缩放、旋转、剖切等交互操作,直观地查看任意位置的路面板应力分布、温度梯度变化,还可以点击某一块路面板调阅其历史病害记录、平整度衰变曲线等详细信息。用上帝视角来进行监测的方法极大地提高了监测的效率和范围,更重要的是把分散的数据转化为一幅情景化的路面健康画像,使管理者可以及时发现隐患,为性能预测、养护决策提供前所未有的数据洞察力。

(二) 性能预测预警

长寿命路面最关键的,就是长期性能的可靠。数字孪生技术最突出的应用价值之一,就是把“事后评估”变为“事前预测”,给路面性能的长久发展赋予了科学的预见性,从而可以提前发出预警,争取到预防性养护的时间窗口。

数字孪生系统由于具有很强的数据整合和分析能力,可以对路面性能做出准确的预测。系统底层有一个庞大的数据库,里面存有历史施工质量数据、材料参数、历年交通荷载数据、环境因素记录、长期监测数据等。在此基础上,孪生模型层除

了使用传统的力学-经验衰减模型之外,还大量使用了最新的 LSTM、CNN 等人工智能算法,对路面性能在各种因素耦合作用下复杂的变化规律进行了深入的学习。

新的实时监测数据持续输入到系统中,就会使预测模型被不断地驱动和校准。系统可以模拟未来各种交通增长情景、极端气候事件下路面关键性能指标(断板率、错台、平整度)的变化趋势,并用概率分布的形式给出预测结果。系统可以预见某个路段在两年内出现疲劳开裂的概率,经过一个冻融循环剧烈的冬季之后,接缝传荷能力将会大大降低。

依靠数据驱动、模型仿真来预测预警,路面运维就不再完全依靠经验。管理者可以根据系统给出的量化预测报告,清楚地知道路面将来健康的风险点以及风险时间段,从而把养护资源准确地投入到最需要的地方。既可以避免由于病害大范围爆发造成的昂贵的修复费用,又可以最大程度上保证高速公路的安全畅通,真正体现了治未病的智慧运维理念。

(三) 养护决策支持

传统路面养护决策多用固定的技术规范、工程师个人经验来完成,不能针对不同路段的特征、未来的发展趋势做出全局最优、成本效益最好的决策。数字孪生系统依靠仿真推演、优化的长处给养护决策赋予了一个科学智能的虚拟实验室,使决策更准确、更经济。

当性能预测预警模块发出某个区域存在风险预警的时候,养护决策支持模块就得以被激活。运维人员可以输入多种备选养护方案,对预测将出现接缝错台的路段,可以设置接缝填料更换、传力杆植入、板底注浆等不同的方案。数字孪生系统会对它的虚拟模型中每一种方案做仿真推演。它可以模拟实行此方案后路面结构响应的变化,用性能预测模型推算出 5 年、10 年乃至更长时间内的长期效益,即延缓病害发展的效果、路面使用寿命的提高、全生命周期成本的变化。

系统不仅能评价单个养护措施的效果,还可以做多目标优化。管理者可以设置养护预算上限、交通中断影响最小化、路面性能提高最大化等各项约束条件以及优化目标。系统用智能优化算法在成千上万份养护时机和养护措施的组合里,找到一份年度、中期或者长期的最优养护计划。这份计划会说明在什么时间、对哪一段路、采取什么样的养护措施,才能用最少的投入获得最好的路面性能。按照仿真做出的决策来安排养护资金的使用,养护资金更加科学、前瞻,每一笔资金都用在了刀刃上,为长寿命路面的可持续养护打下了坚实的基础。

第四节 未来智慧公路系统技术展望

一、智慧公路技术发展趋势

（一）智能化发展趋势

智能化是智慧公路的核心特征，意在赋予道路基础设施感知、分析、决策的能力。此趋势主要是依靠物联网、大数据、人工智能这些前沿技术来完成的。在长寿命路面结构内部及沿线，布设光纤光栅、压电陶瓷、微机电系统等高耐久性传感器，使公路系统可以对自身健康状况以及外部交通环境进行全天候、高精度的监测。可以实时采集路面应力、应变、温度、湿度、振动、车辆轴载、流量、速度等重要数据的传感器。

常见智慧公路传感器类型及其应用表

传感器类型	监测对象	主要优势	典型应用
光纤光栅传感器	路面应力、应变、温度、振动	抗电磁干扰、长寿命、可分布式布设	路面结构健康监测、桥梁结构健康监测
压电陶瓷传感器	车辆轴载、振动、压力	自供能（部分）、响应速度快、耐久性好	车辆计数、轴载检测、能量收集
微机电系统传感器	路面微振动、倾斜、位移	体积小、成本效益高、易于集成	基础设施形变监测、环境参数监测
视频监控	交通流量、事件（事故、抛洒物）、异常行为	直观可靠、覆盖范围广、多功能	交通事件检测、流量统计、异常行为分析
毫米波雷达	车辆速度、距离、位置	抗恶劣天气（雨雪雾）、精度高	交通流参数采集、防撞预警
激光雷达	三维环境建模、高精度定位、障碍物识别	三维感知能力强、精度极高	自动驾驶环境感知、路侧障碍物检测

上表给出了常见的智慧公路传感器类型及其应用，这些传感器一起组成了智慧公路强大的感知能力。海量数据经过边缘计算单元初步处理之后，就会汇聚到云端数据中心。云端的人工智能算法对数据加以深度挖掘并加以分析，由此就形成了准确的数字孪生模型。与物理高速公路实时同步的虚拟模型，可以直观地显示路网运行情况，更重要的是可以做态势研判、风险预测。根据路面内部应力变化的数据来预测疲劳裂缝的规律和发展，使养护单位在病害出现之前就进行预防性的养护，大大延长路面的使用寿命。

同时融合视频监控和雷达的智能感知设备可以对交通事故、异常停车、抛洒

物等交通事件进行精准识别，并且自动生成预警信息，推送到管理中心以及周边车辆，把事故发生时间缩短到分钟级。基于数据的智能决策能力使高速公路由被动式管理变为主动干预，对路网中道路设施与交通运营进行精细化、科学化管理，进而提升了整个路网的通行效率和安全性。

（二）网联化发展趋势

网联化就是打破信息孤岛，建立车与路、车与车、车与云之间实时、可靠的交互网络，为协同式交通管理和高级别自动驾驶打下基础。该趋势的主要内容就是蜂窝车联网通信技术的大规模应用。以其低延时、高可靠性和大带宽为特点的这项技术成了交通要素之间的神经网络。

网联化的发展主要体现在以下几个层面：

1. 车路信息交互程度的提高，在路侧智能感知设备如摄像头、毫米波雷达和激光雷达能够实时获取前方交通拥堵、交通事故、道路施工及恶劣天气等路况情况，并通过路侧单元广播给网联车辆范围内所有车辆。车辆接收到超视距信息之后，可以为驾驶员或者自动驾驶系统提前做出决策，从而避免危险。

2. 车云协同能力得到加强。车辆借助 5G 等高速移动网络同云控平台相联，可以得到大范围交通态势信息，动态高精地图服务以及最优路径规划，同时把自身数据上传至云端。云控平台采集区域内所有车辆、路侧设施的数据，从全局的角度把握交通状况，用协同计算和调度来提高区域交通流的效率，例如帮助车队编队行驶来减少风阻、降低能耗。

建立全面的通信网络以后，高速公路就会成为一个信息交流和服务平台。道路已经不单单是交通的载体，它更加深入地参与到交通流的组织与管理当中。“聪明的路”和“智能的车”之间的深度融合，是提高整个交通系统安全性和效率的关键。

（三）绿色化发展趋势

绿色化是公路建设、运营可持续发展的内在需求，也是解决全球气候变化、能源问题的必然选择。在长寿命路面的基础上，将新能源和环保技术深度融合，就是智慧公路绿色化发展的大方向。目的在于减小公路全生命周期碳排放及环境影响，达到交通与自然和谐共生的目的。

其中路面能源自洽技术属于绿色化发展的一种表现。光伏路面技术是用高强度、高透光率材料将光伏发电组件封装起来，作为路面结构层的一部分。路面既

可以承载交通,又可以利用太阳能发电,给沿线的监控设备、照明、情报板以及电动汽车充电桩提供清洁电力。一些试点项目采用动态无线充电技术,在路面下铺设电磁感应线圈,实现行驶中电动车边走边充的目的,从根本上解决里程焦虑。

除了能源开发,压电能量收集技术也得到人们的关注。路面埋设压电材料,可以将车辆行驶压力和振动能转换成电能,驱动低功耗传感器或者存储。这些绿色技术不仅可以给智慧公路信息设备提供长久的能源供应,而且可以使公路由单纯的能源消耗者转变为能源生产者。新材料、新工艺的应用也是绿色化发展的一部分,低碳胶凝材料、工业废料水泥混凝土、降噪路面、海绵路面等一起描绘出未来智慧公路绿色发展蓝图。

二、未来智慧公路应用场景

(一) 自动驾驶场景

高级自动驾驶的实现不仅仅依靠车辆自身强大的感知、决策能力,更需要智慧道路提供的比车辆本身所能获得的信息更加丰富的信息。智慧公路能为自动驾驶车辆提供全方位环境感知增强和协同决策辅助,起到全知视角引导者及终极安全冗余作用。这将使自动驾驶更加安全、可靠和可以行驶更远的距离。

在智慧公路上,自动驾驶车辆不再单打独斗。路侧全息感知系统可以覆盖所有的单车视觉盲区,包括弯道、坡道后、大型车辆遮挡的地方等地方的动态信息实时上传到车辆上。当汽车由于故障停在了弯道盲区时,路侧单元就会立即向后方驶来的自动驾驶车辆发出预警信号,给车辆预留足够的时间和空间来作出反应。智慧公路能够提供车道级定位以及动态更新的高精度地图,使车辆在任何时刻都清楚自己的坐标在道路系统上所处的位置,也能根据实时的交通管制信息(临时车道关闭)来改变行驶路线。可见通过这些途径公路基础设施把单车的智能压力分散开,降低对车载传感器的性能和算力的要求,加快自动驾驶技术的商业化进程。

(二) 车路协同场景

车路协同是智慧公路网络效应的集中体现,它创建万物互联的交通环境,使交通参与者即时交流信息、互相配合,从而达到全局最优的交通效率和安全。不单是车路简单通信,更包括车、路、人、云等各个要素之间动态、智能的交互与协作系统。

典型车路协同场景下，交叉口或者匝道汇流区的碰撞预警功能就显得尤为重要。路侧感知设备可以探测各个方向的车辆轨迹，然后经过边缘计算单元来预测碰撞风险。当系统检测到两车有碰撞可能时，会立即向双方车辆发送警告信息，必要时还可以和车辆控制系统配合来防止侧向碰撞事故。货车编队行驶也属典型应用。低时延通信使多辆货车组成一个紧密衔接的队列，头车负责控制加减速，后车紧跟前车。该方式可以大幅度降低车队的空气阻力，节省燃油消耗，提高道路容量。

以全量交通数据为基础的信号灯协同优化、紧急车辆优先通行、行人“鬼探头”预警等都会使交通运行更加顺畅、安全。车路协同把交通管理从宏观的、被动的带入微观的、主动的、精细化协同的新阶段，最终达到零伤亡、零拥堵的交通愿景。

（三）智慧服务场景

未来智慧公路不仅仅是高效的、安全的通行载体，也是提供丰富多彩、个性化的移动空间的场所。依靠高速泛在通信网络、大数据平台，公路运营方和第三方服务商可以给出行者提供前所未有的智慧化服务，极大提高出行体验的舒适度和便捷性。

智慧服务区就是该场景的集中体现。车辆接近服务区的时候，车载系统或者手机应用会收到服务区内停车位、充电桩、餐厅空位等实时信息，驾驶员可以提前预定所需服务。进入服务区之后，系统可以给出准确的室内导航，使车辆直接到达指定的停车位。整个服务区将会是集餐饮、购物、休闲、车辆维修保养为一体的智能商业综合体。伴随式信息服务也会成为标配，根据车辆的位置以及用户的喜好来推送沿途的旅游景点介绍、天气预报、特色文化活动等。智慧公路能给长途货运司机提供物流园区的仓储、装卸资源信息，利于运输路线与时间计划的调整，从而提高物流效率。以人为主体的智能服务，每一次出行都会成为舒适、愉悦、有探索趣味的旅程。

参考文献

- [1] 朱永领, 王德勇. 高温重载长寿命沥青复合路面施工技术研究[J]. 公路, 2025, (6): 1-8.
- [2] 黄万身, 叶圣洪, 曾健, 等. 环保型高性能沥青混合料在高速公路长寿命路面中的应用与性能评估[J]. 公路交通科技, 2025, 42(待定): 1-7.
- [3] 牟压强. 环氧沥青超薄罩面关键技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [4] 周恒超, 门豪. 公路工程连续配筋混凝土路面施工技术研究[J]. 汽车世界, 2020, (15): 1-5.
- [5] 贾向宇. 公路路面施工中沥青摊铺的施工技术[J]. 汽车世界, 2019, (3): 13-14.
- [6] 郑健龙, 吕松涛, 刘超超. 长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J]. 科学通报, 2021, 66(30): 3219-3229.
- [7] 汪立峰. 公路路面级配碎石垫层技术分析[J]. 人民交通, 2023, (待定): 1-6.
- [8] 杨小永. 基于长寿命周期沥青路面的结构设计研究[J]. Materials Sciences, 2025, 15(1): 9-17.
- [9] 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]. 南京: 东南大学, 2022.
- [10] 朱国辉. 农村公路水泥混凝土路面施工技术及养护技术[J]. 工程技术研究, 2023, 8(4): 7-9.
- [11] 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(2): 95-103.
- [12] 周恒超, 门豪. 公路工程连续配筋混凝土路面施工技术研究[J]. 汽车世界, 2020, (15): 1-5.
- [13] 贾向宇. 公路路面施工中沥青摊铺的施工技术[J]. 汽车世界, 2019, (3): 13-14.
- [14] 曹东伟, 邱文利, 张明明, 等. 高掺量胶粉改性沥青及其长寿命路面结构应用研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(S2): 1-9.
- [15] 秦逸轩, 许斌. 大掺量胶粉改性沥青长寿命路面工程应用研究[J]. 公路, 2025, (2): 1-8.

- [16] 郑健龙, 吕松涛, 刘超超. 长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3219-3229.
- [17] 谭强, 王伯全, 刘永胜, 等. 长寿命沥青路面长期性能监测现状分析与应用[C]//2023年全国工程建设行业施工技术交流会论文集. 北京: 中交一公局集团有限公司, 2023: 1-10.
- [18] 于宏军. 道路硅酸盐水泥混凝土路面结构设计分析[J]. 黑龙江科技信息, 2019, (16): 152-153.
- [19] 朱玉虎. 干线公路沥青路面“长寿命”关键技术应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, (2): 3-7. DOI:CNKI:SUN:GLJJ.0.2020-02-028.
- [20] 吕松涛, 赵霏, 鲁巍巍, 等. 面向长寿命的既有高速公路沥青路面延寿设计综述[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(2): 20-49.
- [21] 彭红卫, 吕绍文, 孙剑峰. 全柔性长寿命沥青路面轴载影响规律研究[J]. 湖南交通科技, 2023, 49(1): 48-51.
- [22] 牟压强, 郭大进, 孙武云, 等. 水泥混凝土路面-环氧沥青超薄罩面层间黏结性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(5): 1-9.
- [23] 李瑞杰, 罗廷赤, 司旭, 等. 宁夏某省道旧水泥混凝土路面共振碎石化技术应用研究与评价[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(6): 24-31.
- [24] 蒲江云. 碾压混凝土刚性基层长寿命路面设计[J]. 建材发展导向, 2020, 18(1): 150-152.
- [25] 于来生, 王豪. 连续配筋混凝土复合式沥青路面施工技术研究[J]. 工程建设与设计, 2020, (2): 469-473.
- [26] 谢恩连, 聂忆华, 黄新摇, 等. 大厚度柔性基层长寿命沥青路面试验研究[J]. 森林工程, 2024, 40(2): 198-207.