

基于长寿命周期沥青路面的结构设计研究

杨小永

中铁一局集团第五工程有限公司, 陕西 宝鸡

收稿日期: 2024年11月29日; 录用日期: 2025年1月4日; 发布日期: 2025年1月15日

摘要

长寿命路面结构设计对于提升道路基础设施的持久性和经济效益至关重要。本文综合分析了长寿命路面的设计指标、设计指标、路面结构类型以及路面结构设计方法。首先, 概述了长寿命路面的设计理念, 强调了结构设计、施工技术、经济性和环境可持续性的重要性。其次, 探讨了设计指标, 需综合考虑路基路面的结构设计、排水系统和力学性能等多个方面。接着, 描述了国内外常见的长寿命路面结构组合, 并讨论了它们的设计考虑和适用性。此外, 详细列出了沥青路面结构设计方法。最后, 对当前的研究现状进行了总结, 并对长寿命路面设计的未来趋势提出了见解。

关键词

长寿命路面, 路面设计, 耐久性, 经济性, 可持续性

Study on Structural Design of Asphalt Pavement Based on Long-Life Cycle

Xiaoyong Yang

The Fifth Engineering Co., Ltd., China Railway First Group, Baoji Shaanxi

Received: Nov. 29th, 2024; accepted: Jan. 4th, 2025; published: Jan. 15th, 2025

Abstract

The design of long-life pavement structure is crucial to improve the durability and economic efficiency of road infrastructure. In this paper, the design index, design index, pavement structure type and pavement structure design method of Long-Life pavement are analyzed comprehensively. Firstly, the design concept of long-life pavement is summarized, and the importance of structural design, construction technology, economy and environmental sustainability is emphasized. Secondly, the design index is discussed, which should consider the structural design, drainage system and mechanical properties of roadbed and pavement. Then, the common combinations of long-life pavement structures at home and abroad are described, and their design considerations and applicability are discussed. In addition, the design method of asphalt pavement structure is listed in detail. Finally, the current research status is summarized, and the future trend of Long-Life

pavement design is put forward.

Keywords

Long-Life Pavement, Pavement Design, Durability, Economy, Sustainability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在交通基础设施领域，路面结构设计是确保道路长期性能和经济效益的核心环节。长寿命路面设计的目标是通过精心的结构设计，实现路面在预期寿命内的稳定性、耐久性和可靠性，同时兼顾成本效益和环境影响。这要求设计师不仅要关注路面的初始建设，还要考虑长期的运营维护以及最终的使用寿命。

从路面结构设计的角度来看，长寿命路面设计的复杂性在于需要综合考虑多种因素。首先，交通荷载的预测是设计的基础，它决定了路面结构必须承受的应力和应变，进而影响结构层的厚度和强度设计。美国联邦公路管理局(FHWA)在其路面设计指南中强调了交通荷载对路面设计的重要性。其次，路面材料的选择至关重要，高性能的沥青、骨料和添加剂可以显著提高路面的耐久性和稳定性。聚合物改性沥青在欧洲被广泛应用于提高路面的耐久性[1]。此外，结构层的相互作用也不容忽视，合理的结构组合和层次设计可以确保路面在不同环境条件下的性能表现。中国的研究者们开展了大量的研究工作，探索了不同结构组合对路面性能的影响[2]。例如，Wang 等[3]基于香港的长寿命柔性路面设计、施工和养护实践，讨论了与长寿命柔性路面相关的四个问题：成本和收益、苦恼、粘结剂老化和维护策略。Han 等[4]在其研究中提出了基于性能的沥青路面设计方法，以提高路面的耐久性。Ma 等[5]评估了沥青-橡胶混合料的性能，并探讨了其在长寿命路面中的应用。Mohammed 等[6]在沥青中添加纤维可以提高其韧性，从而改善沥青疲劳性能，为提高路面耐久性提供了新的途径。

环境因素的适应性是长寿命路面设计中另一个重要的考虑点。路面结构必须能够适应温度变化、湿度条件、紫外线照射以及化学侵蚀等环境因素，以防止过早老化和损坏。施工技术的选择也是影响路面结构长期性能的关键，先进的施工设备和工艺可以确保施工质量，减少施工过程中的变异性。智能施工技术的发展为提高施工质量提供了新的可能性。

为了实现长寿命路面的设计目标，设计师还需要采用先进的分析工具和方法。有限元分析、性能预测模型和寿命周期成本分析等工具和方法可以帮助设计师评估不同设计方案的性能，优化结构设计，实现成本效益最大化[7]。例如，有限元分析在路面结构设计中的应用已经被广泛研究[8]。性能预测模型如MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide)为路面设计提供了科学的预测工具[9]。

此外，长寿命路面设计还涉及到对现有路面的评估和改造。利用无损检测技术如落锤式弯沉仪(FWD)和探地雷达(GPR)对路面结构进行评估，可以帮助设计师更好地理解现有路面的状况，并制定相应的改造方案[10]。

总之，长寿命路面结构设计是一个涉及多学科、多因素的系统工程。它要求设计师不仅要具备深厚的专业知识和丰富的实践经验，还要能够运用现代科技手段，进行综合性的分析和判断。通过精心的设计和严格的施工管理，可以显著提高路面结构的耐久性和可靠性，延长其使用寿命，满足现代社会对交通基础设施的高标准要求。

2. 长寿命沥青路面设计理念

2.1. 长寿命沥青路面的发展

长寿命沥青路面的设计代表了路面工程中集成创新和可持续性原则的前沿方向。这种路面设计依托于高性能的结合料和骨料、精细的施工工艺，以及综合考量力学性能和长期耐久性的深入分析。长寿命沥青路面的演进反映了从经验驱动的方法向科技集成方法的转变，其中现代设计策略融合了先进的力学模型、计算机辅助设计和环境适应性分析。

在路面结构设计领域，早期的设计侧重于施工速度和成本效益，但随着交通负载的增加和对道路性能要求的提升，工程师们开始采用更为科学和系统的设计方法。现代设计方法涉及到对交通荷载的精确预测、环境因素的综合评估，以及对材料性能的深入研究。例如，有限元分析(FEA)作为一种数值方法，被广泛应用于预测路面结构在不同荷载和环境条件下的力学行为[7]。性能预测模型，如 MEPDG，提供了一种基于性能的方法来优化路面结构设计，确保其满足长期服务的需求[11]。

长寿命沥青路面的未来发展将继续朝着更高效、更智能和更环保的方向发展，以适应日益增长的交通需求和对可持续基础设施的全球追求。这将涉及到进一步的材料创新、设计优化、施工技术改进和维护策略的智能化。当前各国长寿命沥青路面设计年限见表 1，对于长寿命沥青路面，设计寿命均在 20 年以上，美国甚至达到了 50 年。

Table 1. Design life of long-life asphalt pavement structures

表 1. 长寿命沥青路面结构设计年限

国家	设计使用寿命/年	标准轴载/kN
英国	40	80
德国	30~40	100
法国	30~40	130
加拿大	30~40	-
美国	50	80
日本	20~40	80
澳大利亚	20~40	80
中国	30	100

2.2. 长寿命沥青路面的理念

长寿命路面设计理念就是基于疲劳极限的提出，选用厚面层进行沥青路面的面层设计，使沥青面层底部的拉应变水平不超过层底极限弯拉应变(疲劳极限)，减少路面出现损坏的情况，从而提高道路服务寿命、降低全生命周期成本、增强环境可持续性以及提升道路网络的运营效率。这一理念的提出是为了应对日益增长的交通量、重型载重车辆的普及、极端气候事件的频发以及对环境影响的日益关注。以下是长寿命沥青路面设计的几个关键方面：

1) 结构设计的优化

长寿命沥青路面的结构设计采用多层面的方法，每层材料根据其功能进行精心选择和设计。表面层通常采用密级配沥青混合料，以提供优异的抗滑性和耐久性，同时减少噪音和提高行车舒适性。中间层和底基层则可能采用高模量材料，以提供足够的承载能力和分散荷载，防止永久变形的发生。此外，排水层和隔离层的设计也至关重要，以确保路面的长期稳定性和防止水损害。

2) 施工技术的先进性

施工过程是实现长寿命沥青路面设计的关键环节。先进的施工技术,如智能压实监控系统,确保了每一层的压实度达到设计要求,从而避免了由于压实不均匀而引起的早期损坏[12]。自动化摊铺设备的应用,提高了施工速度和摊铺质量,确保了路面的均匀性和平整度,这对于提高路面的耐久性和行车安全性至关重要。

3) 维护策略的科学性

长寿命沥青路面的设计同样强调科学的维护策略。定期的路面状况评估,如使用无损检测技术(NDT)进行的定期检查,可以及时发现潜在问题并采取预防性维护措施。快速响应和修复策略,如采用快速修复材料和技术,可以最大限度地减少交通中断和维护成本。

4) 材料的高性能化

长寿命沥青路面在材料选择上追求高性能,这包括使用改性沥青以提高抗变形能力和抗老化性,选择耐久性骨料以增强路面的整体稳定性,以及可能使用纤维或其他添加剂来提高混合料的内聚力和抗裂性。

5) 环境适应性的考量

长寿命沥青路面的设计考虑到了气候变化、温度波动和湿度条件等环境因素,确保路面能够在各种环境条件下保持性能。这包括使用能够抵抗紫外线降解和化学侵蚀的材料,以及设计能够适应冻融循环和温湿度变化的结构。

通过上述设计理念的实施,长寿命沥青路面不仅在物理上持久耐用,而且在经济、环境和社会层面实现了长期效益,为现代交通基础设施提供了一个高效、可靠和可持续的解决方案。

3. 长寿命沥青路面设计指标

综合考虑后,可以认为一条合格的长寿命沥青路面应该具备以下几个关键特点[13]:设计使用寿命应至少达到 40 年;在设计使用年限内,路面结构应保持稳定,不产生结构性破坏,任何道路病害应仅局限于路表面功能层;尽管长寿命沥青路面的初始建造费用可能较高,但由于其耐久性,后期养护和维修成本将显著降低,只需针对功能层进行必要的维护。

针对这些特点,长寿命沥青路面的结构形式并非一成不变,实际应用中包含多种型式。因此,它的设计指标也应根据具体结构形式而异。通常,主要控制指标的参数是主要承重层和路表面功能层的使用寿命[14]。除此之外,不同结构形式的长寿命沥青路面也可以根据相应规范和标准来验算各结构层,以确保设计满足预期的性能要求。

1) 路基稳定性

路基作为路面结构的根基,其稳定性是保证道路整体耐久性的关键。设计时需确保路基具备充足的承载力,以支撑上层结构和交通荷载。路基材料需展现出优异的工程性质,包括适度的强度、刚度及耐久性。设计还必须考量地基条件、地下水位以及冻胀性等环境因素,并采取相应的加固与稳定措施,确保路基长期稳定,为沥青路面提供坚实的支撑基础。

2) 路面结构设计

长寿命沥青路面的结构设计需综合考量交通荷载、材料属性、环境因素及施工技术。设计通常采用多层结构系统,包括表面层、中面层、底面层及基层,每层根据其功能和承载需求选用适宜的材料和厚度。整个路面结构必须设计有适当的刚度和强度,以抵御交通荷载引起的应力和变形,确保路面在设计年限内保持结构完整和功能正常。

3) 结构面层厚度

沥青层厚度是影响路面耐久性和承载能力的关键设计参数。设计时应基于预期交通量、荷载类型及设计寿命,精确确定沥青层的厚度,以保证路面能够承受长期交通负荷而避免结构性损坏。表面层厚度对于路面

的力学性能、抗裂性和抗变形能力具有显著影响,合理确定厚度是实现长寿命沥青路面设计目标的重要条件。

4) 排水系统

排水系统的设计对于防止水损害和维持路基稳定性至关重要。有效的排水系统需综合考虑路面排水和路基排水,确保雨水能迅速有效排除,避免积水和侵蚀。路面设计应精心规划排水设施的布局,包括边沟、排水管等,以实现高效排水,保障路面结构的长期稳定性和耐久性。

5) 力学性能分析

力学性能分析是路面设计的重要组成部分,涉及应力、应变和位移等关键参数的计算。通过应用力学模型,如弹性层状体系模型或有限元分析,设计师能够预测路面在不同交通和环境条件下的响应,评估结构的耐久性和可靠性。这种分析有助于优化路面结构设计,确保其在预期设计寿命内的性能表现,并为施工和后期维护提供科学依据。

4. 长寿命沥青路面结构类型

4.1. 国外长寿命沥青路面结构

起源于 1980 年代欧洲的长寿命沥青路面概念,代表了道路工程在提升耐久性和经济效益方面的重大进步。欧洲的研究者们通过增加沥青层厚度和优化材料模量,成功发展了全厚式沥青路面结构[15]。此外,部分欧洲国家在半刚性基层的长寿命沥青路面上也进行了探索,形成了一套典型的路面结构设计,如表 2 所示[16]-[18]。

美国在长寿命沥青路面的发展上,继承并扩展了欧洲的理念,早期虽未明确按照长寿命理念设计,但许多路面的实际表现已满足长寿命要求,尤其是广泛使用的全厚式和深厚式沥青路面[19]。美国的设计倾向于采用柔性基层,并在良好路基条件下优先选择全厚式沥青路面结构,如表 2 所示。美国的设计方法特别注重工程所在地的气候和交通特点,并采纳了层位分工的概念,这种设计理念不仅优化了路面性能,还显著提升了全寿命周期的经济性。

综合来看,欧洲和美国在长寿命沥青路面的设计和实施上均取得了显著成就,为全球道路工程提供了重要的经验和参考。随着技术的持续进步,预计长寿命沥青路面将继续向更高效、智能化和环境友好的方向发展,以满足不断增长的交通需求和对可持续基础设施的追求。

Table 2. Typical long-life asphalt pavement structures in foreign countries
表 2. 国外典型长寿命沥青路面结构

国家	道路名称	路面结构组合类型
英国	M6	RA 集料(3.8 cm) + 粗粒式 AC (6.8 cm) + HRA 集料(6.3 cm) + FDAC (19 cm) + 级配砂砾(20 cm)
德国	A5	GA (3.7 cm) + AC (20 cm) + 稳定底基层(15 cm)
法国	Perich	OGFC (40 cm) + HMB 基层(22 cm) + 原路面
奥地利	Brenner	细粒式 AC (27 cm) + 粗粒式 AC (75 cm) + GRH (14 cm) + ATB (16 cm)
意大利	DelSole	中粒式 AC (3 cm) + 粗粒式 AC (7 cm) + ATB (15 cm) + 级配砂砾(36 cm)
加利福尼亚州		2.5 cm OGFC + 7.5 cm 聚合物改性沥青混凝土 + 15 cm 高模量沥青混凝土 + 20 cm 处置后的水泥破碎板 + 15 cm 水泥处治层
俄亥俄州州际		3.8 cm 聚合物改性沥青混凝土 + 22.9 cm 大粒径碎石混合料 + 10.2 cm 富沥青混凝土 + 15.2 cm 级配碎石
得克萨斯州		12 cm OGFC + 5 cm PmBSMA + 8 cm PmBSUP-19 + 25 cm PmBSUP-19 + 10 cm 沥青混合料基层
马里兰州		5 cm 沥青混凝土磨耗层 + 30.5 cm PmBSUP-19 + 15.2 cm 级配碎石

4.2. 国内长寿命沥青路面结构

中国的长寿命沥青路面设计理念已经成熟并形成了一个综合性的技术框架。这一框架从早期的概念起步，逐渐演进，深受“强化基础、减薄表面层、稳定路基”这一核心理念的影响。沙庆林院士带领的团队最早提出了半刚性基层的长寿命沥青路面结构，该结构因其出色的承载和耐久特性而得到广泛实施[20]。此后，为了满足多样化的交通和环境需求，发展出了全厚式长寿命沥青路面，该结构通过沥青层厚度和材料配比的优化，有效提升了路面的整体性能。

Table 3. Structural information of typical long-life asphalt pavement test roads in China
表 3. 国内典型长寿命沥青路面试验路结构信息

单位	高速	路面结构形式	路面总厚度/cm	沥青层厚度/cm
同济大学	云浮高速公路	组合式基层	72	32
		柔性基层	55	32
交通运输部公路科学研究院、东南大学	江苏沿江高速公路	刚性组合式基层	76	10
		柔性组合式基层	76	25
		全厚式	39	39
苏交科集团股份有限公司、同济大学、东南大学	沪宁高速公路	柔性基层	56	37
		半刚性基层	42	27
		刚性基层	58	12
山东省交通运输厅、山东省交通科学研究院	滨大高速公路	全厚式	50	50
		复合式基层	67	27
		刚性复合式	73.5	6
长安大学	尉许高速公路	半刚性基层	88	28
		柔性基层	98	38
		半刚性基层	74	18
辽宁省交通科学研究院	室内加速加载	柔性组合基层	74	30
			81	64
哈尔滨工业大学	鹤大高速公路	组合式基层	84	34
		半刚性基层	70	22
		复合基层	61	31
山东省交通科学研究院	青临高速公路	倒装结构	60	30
		复合基层	127	27
		复合基层	65	29
交通运输部公路科学研究院	试验环道	柔性基层	86	34
		结构类型一	72	12
		结构类型二	58	18
		结构类型三	68	28/24
		结构类型四	100	36/48/52
		结构类型五	72	18

进一步地, 为了增强路面的适应性和成本效益, 研发了复合式长寿命沥青路面结构。这种结构融合了多种材料的优势, 通过精心设计的基层和面层厚度及材料选择, 实现了性能与成本的最佳组合。同时, 鉴于其出色的抗变形和适应能力, 柔性基层长寿命沥青路面结构也成为了一个重要发展方向, 尤其适合于交通负荷重或地质条件欠佳的路段。

总体而言, 中国的长寿命沥青路面结构设计思想已经发展成为一个涵盖材料选取、结构规划到施工技术的全面体系。这一体系不仅注重路面结构的承载力、耐用性和经济效益, 还兼顾了环境适应性、可持续性以及智能化管理等现代道路工程的关键要素。随着技术的持续进步和实践经验的不断积累, 预计中国的长寿命沥青路面设计将持续优化, 为打造更安全、高效、环保和智能化的交通基础设施贡献力量。中国长寿命沥青路面试验路结构汇总见表 3。

5. 长寿命沥青路面结构设计方法

5.1. 理论分析

沥青路面动力响应的理论分析是确保道路工程设计合理性的基础。研究首先集中在建立精细的力学模型, 这些模型详尽地描述了路面结构的层状体系, 包括沥青层、基层和路基等。模型中的每一层都被赋予了特定的材料属性, 如弹性模量、泊松比和屈服强度, 这些属性决定了材料在荷载作用下的响应。

进一步的研究涉及荷载分析, 其中包括对交通荷载的详细考察, 如车辆重量、速度和荷载分布, 以及它们如何影响路面结构。应力和应变分析是动力响应研究的核心, 它不仅评估了路面结构在重复交通荷载作用下的疲劳损伤累积, 还预测了永久变形的发展, 如车辙。此外, 温度效应分析也至关重要, 因为它关系到沥青路面在不同气候条件下的性能。沥青材料的非线性行为, 如由 Varma 等[21]所研究的, 他们以线粘弹性沥青混凝土(AC)顶层为基础层, 以应力相关(非线性)基层为基础层, 建立了一种计算效率高的柔性路面分析模型。为层状粘弹性-非线性轴对称系统制定了本构方程。

理论分析的最终目标是通过多尺度分析, 从微观的骨料间作用到宏观的路面结构响应, 全面理解路面的力学行为, 并利用这些理论分析结果对路面结构设计进行优化。这包括调整层厚、材料类型和施工工艺, 以确保设计的耐久性、经济性和环境适应性。

5.2. 数值模拟

在进行长寿命沥青路面的结构分析时, 数值模拟提供了一种强有力的工具, 它允许工程师精确地模拟和预测路面在各种复杂条件下的性能。这种分析着重于沥青材料的复杂行为, 包括其粘弹性和非线性, 这通常通过复杂的本构方程来描述。同时, 必须考虑沥青层与其他路面层之间的相互作用, 如粘结和摩擦, 这些因素对路面的整体性能至关重要。

荷载模拟是数值分析中的另一个关键组成部分, 它需要考虑交通荷载的多样性和动态性, 以及环境因素, 如温度和湿度, 这些因素都会影响路面的响应。通过多尺度分析, 可以从微观层面的骨料到整个路面结构的宏观层面, 全面理解路面的力学行为。此外, 应力和应变的分布分析对于识别潜在的损坏区域至关重要, 而排水系统的模拟则有助于评估水对路面可能造成的损害。

通过数值模拟, 工程师能够进行可靠性和敏感性分析, 这些分析有助于评估模型参数的不确定性, 并确定影响路面性能的关键因素。这些分析结果有助于优化路面结构设计, 选择最合适的材料组合、结构层厚度和施工技术。例如, 研究指出, 增加沥青层的厚度是实现沥青路面长寿命的关键[22]。此外, 路基的竖向压应变对路面结构的稳定性有显著影响[2]。结合特定地区的气候和交通特点, 对不同结构的力学响应进行分析, 有助于选择最适合当地条件的路面结构[23]。

数值模拟还使得工程师能够在施工前预测路面的性能, 从而优化设计方案, 确保长寿命沥青路面的

实现。这包括分析刚性基层上的应力分布，对比数值模拟与现场实测的动力响应，以及考虑沥青混合料的粘弹性特性。此外，复合式长寿命沥青路面在多种因素耦合作用下的动力响应，以及乳化沥青层的破坏机理分析，都为路面设计提供了宝贵的信息。

总之，数值模拟在长寿命沥青路面的设计和分析中发挥着至关重要的作用。通过这些模拟，工程师可以更深入地了解路面结构的力学行为，预测其在各种环境和荷载条件下的性能，并制定出更有效的设计和施工策略。

6. 结论展望

在道路工程领域，长寿命沥青路面结构设计的研究已经取得了显著的进展。通过数值模拟和现场测试，研究者们成功开发并验证了多种路面结构组合的性能。这些研究不仅涉及了传统的路面材料，还包括了高性能材料的应用，如改性沥青和新型骨料，这些材料显著提升了路面的耐久性。此外，MEPDG 的引入，为路面设计提供了更为科学和系统的分析工具，使得设计过程更加精确和高效。

然而，长寿命沥青路面结构设计领域仍存在一些不足之处。现有设计方法可能还没有充分考虑极端气候条件和复杂交通条件下的路面性能。对于新材料的长期性能和施工技术的研究仍然不足，需要更多的长期性能数据来支持新材料的广泛应用。此外，环境因素如温度、湿度、紫外线照射以及化学侵蚀对路面性能的影响需要更深入的评估。最后，全寿命周期成本分析和可持续性评估在设计过程中的应用还不够广泛，这限制了对路面长期经济效益和环境影响的全面理解。为了克服这些不足，未来的研究需要在以下几个方面进行深入探讨：

1) 极端条件适应性。随着全球气候变化的加剧，沥青路面面临着更加极端的温度和天气条件。未来的研究将致力于开发能够适应极端气候，如极端高温、低温、干旱、湿润以及极端降水等条件下的路面结构。这可能涉及到新型路面材料的开发，以及路面结构设计的创新，以提高路面的抗冻融性、耐热性和耐水损害能力。

2) 新材料研究。随着科技进步，新型材料不断涌现。未来的研究将深入探讨这些材料的长期性能，包括它们的耐久性、稳定性和环境适应性。这可能包括高性能沥青、新型骨料、聚合物改性剂、纤维增强材料以及工业副产品在路面中的应用。

3) 环境影响评估。环境可持续性是现代道路设计的重要考虑因素。未来的研究将更加注重评估不同环境因素对路面性能的影响，并探索减少环境影响的设计策略。这可能涉及到使用环境友好材料、优化施工工艺以及开发生态友好的路面系统。

4) 全寿命周期设计：为了实现成本效益最大化，未来的研究将推广全寿命周期成本分析。这包括从设计、施工到维护的每个阶段的成本分析，以确定最具成本效益的路面结构方案。

5) 智能化技术应用：智能化技术的发展为道路工程带来了新的机遇。未来的研究将探索如何利用物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)等技术进行路面状态的实时监测、性能预测和维护决策支持。

6) 多尺度模拟：为了更精确地预测路面结构的长期行为，未来的研究将进一步发展多尺度模拟技术。这包括从微观到宏观尺度的模拟，以更好地理解材料行为和结构响应。

参考文献

- [1] Zaumanis, M., Poulikakos, L., Arraigada, M., Kunz, B., Schellenberg, U. and Gassmann, C. (2023) Asphalt Recycling in Polymer Modified Pavement: A Test Section and Recommendations. *Construction and Building Materials*, **409**, Article 134005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134005>
- [2] Duan, S. (2020) Research on Structural Design of Long-Life Asphalt Pavement. 2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT), Nanchang, 15-17 May 2020, 474-477. <https://doi.org/10.1109/icectt50890.2020.00109>

- [3] Wang, Y. and Chong, D. (2015) Long-Life Flexible Pavement: Myth, Reality, and the Way Forward. *New Frontiers in Road and Airport Engineering*, Shanghai, 26-28 October 2015, 268-283. <https://doi.org/10.1061/9780784414255.026>
- [4] Han, D. (2017) Optimal Overlay Thickness to Ensure Design Life of Pavements Based on Empirical Deterioration Characteristics. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **21**, 1213-1221. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0621-3>
- [5] Ma, T., Wang, H., He, L., Zhao, Y., Huang, X. and Chen, J. (2017) Property Characterization of Asphalt Binders and Mixtures Modified by Different Crumb Rubbers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001890](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001890)
- [6] Mohammed, M., Parry, T. and Grenfell, J. (2018) Influence of Fibres on Rheological Properties and Toughness of Bituminous Binder. *Construction and Building Materials*, **163**, 901-911. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.146>
- [7] Wu, Y. and Zhao, Y. (2023) Study on Mechanical Characteristics of BRT Asphalt Pavement Structures Based on Temperature Field and Traffic Load. *Applied Sciences*, **13**, Article 3423. <https://doi.org/10.3390/app13063423>
- [8] Al Assi, A., Sadek, H., Massarra, C., Sadeq, M. and Friedland, C.J. (2021) Development of an Analysis Tool for Deterministic and Probabilistic Viscoelastic Continuum Damage Approach. *Construction and Building Materials*, **306**, Article 124853. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124853>
- [9] Jayarathna, K.A.R.N., Premarathne, R.P.P.K. and Mampearachchi, W.K. (2020) Validation of Mechanistic-Empirical Pavement Design Approach for Flexible Pavement Design. 2020 *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, Moratuwa, 28-30 July 2020, 395-400. <https://doi.org/10.1109/mercon50084.2020.9185356>
- [10] Calhoon, T., Zegeye, E., Velasquez, R. and Calvert, J. (2022) Using Falling Weight Deflectometer (FWD) and Ground Penetrating Radar (GPR) to Monitor the Effects of Seasonal Moisture Variation on the Structural Capacity of Pavements. *Construction and Building Materials*, **351**, Article 128831. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128831>
- [11] Zhang, L.N., He, D.P. and Zhao, Q.Q. (2022) Asphalt Pavement Rutting Model in Seasonal Frozen Area. *Magazine of Civil Engineering*, **112**, Article 11205. <https://doi.org/10.34910/MCE.112.5>
- [12] Ma, Y., Zhang, Y., Zhao, W., Ding, X., Wang, Z. and Ma, T. (2022) Assessment of Intelligent Compaction Quality Evaluation Index and Uniformity. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, **148**. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000368>
- [13] 王旭东, 肖倩. 长寿命路面技术发展与实践[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3217-3218.
- [14] 汪双杰, 马涛, 张伟光, 等. 沥青路面长期性能研究的经验与挑战[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3228-3237.
- [15] van Blerk, P.G.L., Costello, S.B., Henning, T.F.P. and Alabaster, D.J. (2024) Full-Scale Accelerated Load Testing of a New Mechanised Cement Bound Macadam (MCBM) Pavement. *Construction and Building Materials*, **413**, Article 134759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134759>
- [16] Hernando, D. and del Val, M.A. (2016) Guidelines for the Design of Semi-Rigid Long-Life Pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **9**, 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.03.003>
- [17] Rasol, M.A., Pérez-Gracia, V., Fernandes, F.M., Pais, J.C., Solla, M. and Santos, C. (2020) NDT Assessment of Rigid Pavement Damages with Ground Penetrating Radar: Laboratory and Field Tests. *International Journal of Pavement Engineering*, **23**, 900-915. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1778692>
- [18] Ferne, B. (2006) Long-Life Pavements—A European Study by ELLPAG. *International Journal of Pavement Engineering*, **7**, 91-100. <https://doi.org/10.1080/10298430600619059>
- [19] Monismith, C.L., Long, F. and Harvey, J.T. (2001) California's Interstate-710 Rehabilitation: Mix and Structural Section Designs, Construction Specifications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **70**, 762-799.
- [20] 谭炯, 刘朝晖, 沙庆林. 重载交通长寿命半刚性基层沥青路面浅析[J]. 西部交通科技, 2007(6): 1-5.
- [21] Varma, S. and Kutay, M.E. (2016) Viscoelastic Nonlinear Multilayered Model for Asphalt Pavements. *Journal of Engineering Mechanics*, **142**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001095](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001095)
- [22] 宋波, 张金喜, 薛忠军, 等. 既有半刚性基层沥青路面大修处治策略[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(8): 1212-1219.
- [23] 黄优, 潘宇, 肖滨, 等. 考虑温湿度作用的粒料基层沥青路面结构非线性力学行为[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(1): 24-35.