

沥青路面破坏的 多场耦合效应及控制技术

薛强 盛谦 ©著



科学出版社

www.sciencep.com

沥青路面破坏的多场耦合 效应及控制技术

薛 强 盛 谦 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以高温多雨地区高速公路建设工程为依托,紧紧围绕沥青路面破坏过程中的工程技术难题及迫切需要解决的关键科学问题,采用现场调查与定性评价相结合、理论与数值模拟研究相结合、室内试验和现场监测相结合、技术开发与工程应用相结合的方法,系统开展了多物理场耦合作用下沥青路面结构体破坏机理与规律研究,形成了一套融理论分析、试验研究、数值仿真、现场监测、材料研发与工艺设计为一体的沥青路面结构体破坏演化规律及控制技术,为高速公路沥青路面的破坏控制提供了可靠的技术支撑。

本书可供从事交通运输工程、岩土工程和材料工程的设计、施工、管理和研究人员阅读,也可供高等学校以及科研院所的教师、学生以及科研人员等参考。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面破坏的多场耦合效应及控制技术/薛强,盛谦著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025538-9

I. 沥… II. ①薛…②盛… III. 高速公路-沥青路面-破坏分析
IV. U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 161814 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 9 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2009 年 9 月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—1 500 字数:365 000

定价:66.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

前 言

长期以来,沥青路面局部开裂、纵横向裂缝、车辙以及唧浆等病害慢慢造成路面破坏,严重影响路面的使用寿命,增加了道路的维护成本,成为交通运输部门一个迫切需要解决的问题。特别是随着我国公路交通基础设施的大规模建设,对高速公路沥青路面的工程质量和耐久性提出了更高的要求。《公路水路交通“十一五”科技发展规划》对长寿命路面关键技术研究提出具体目标:从结构、材料、工艺入手解决路面早期损坏问题,形成我国重交通沥青路面的修筑技术,保证路面在使用寿命内的使用功能,降低公路的全寿命成本,通过预防性养护和不定期表层维修,路面的使用寿命力争达到10~20年。不断提高沥青路面的设计、施工和维修管理水平并防止和控制路面的早期破坏,对于促进我国公路交通基础设施的健康发展具有特别重要的意义。

路面结构体水热力耦合效应分析与评价是高温多雨地区道路设计的理论基础。在高温多雨地区修筑道路的特殊性决定了该地区道路设计理念的特殊性,即要在高温多雨地区保护修筑道路,以确保道路的稳定性和安全性。路面结构体破坏演化多场耦合效应的研究是目前国际上研究的重点和难点问题,本书基于沥青路面结构体多物理场耦合作用变形破坏的机理,建立了多场耦合条件下沥青路面结构体变形破坏规律的本构关系与数值模拟方法,开发了沥青路面结构体多物理场耦合分析系统,解决了目前沥青路面结构体多场耦合分析缺乏模型和方法的问题,率先实现了路面结构体多场耦合分析;提出了现场沥青路面结构体多场耦合效应监测与试验方法,是现阶段沥青路面结构体稳定性检测评价的一种新型的综合测试方法,成功解决了以往无法对沥青路面结构体内变形、温度和孔隙水压力之间动态变化规律同时、同步监测的问题,为沥青路面破坏过程的预测提供了可靠保障。同时,由于改性沥青及纤维的使用路面造价比普通沥青面层高25%~30%,而纤维的价格从几千元到上万元,甚至十几万元不等,其对工程成本有重要的影响,因此在保证质量的前提下选择合适的纤维可以有效降低工程造价。为此,我们自主研发了控制沥青路面破坏的路用秸秆复合纤维材料,并提出了秸秆复合纤维沥青混合料的配合比和施工工艺,有效地提高了路面的高温性能、增加抗裂能力、增强其抗变形能力,阻止或延缓反射裂缝的扩展,使路面的使用寿命得以延长,提高了路面的使用性能,降低了高速公路的建设和维护成本。研发材料的广泛应用将会取得较大的经济效益、社会效益和环境效益,实现经济发展与环境保护的共赢。

本书的出版希望对广大科研人员、高等院校学者及工程设计和施工人员提供一种路面结构体破坏分析、评价与控制的新思路,同时感谢刘磊、赵颖、易富和杨勇博士在部分研究工作中所付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中难免存在不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 沥青路面破坏的研究背景	1
1.2 沥青路面破坏的国内外研究现状	4
1.2.1 沥青路面结构体破坏形成机理	4
1.2.2 沥青路面结构体稳定性评价试验研究	5
1.2.3 沥青路面结构体耦合动力学模型	8
1.3 本书的主要内容	14
1.4 本书的总体结构框架	14
第 2 章 沥青路面结构体破坏特征及机理分析	16
2.1 沥青路面结构体的破坏特征	16
2.2 沥青路面结构体的早期破坏机理	23
2.3 应力载荷作用下沥青路面结构体的破坏机理	26
2.4 温度载荷作用下沥青路面结构体的破坏机理	28
2.4.1 高温对沥青路面的破坏作用	28
2.4.2 低温对沥青路面的破坏作用	29
2.5 水力载荷作用下沥青路面结构体的破坏机理	29
2.5.1 沥青路面结构体水损害的主要原因	30
2.5.2 沥青路面结构体水损害发生的层位	43
2.6 本章小结	45
第 3 章 沥青路面结构体破坏的多物理场数值模型	46
3.1 沥青路面结构体应力场模型	46
3.2 沥青路面结构体热传输温度场模型	49
3.2.1 路面结构体非稳态导热模型	49
3.2.2 影响沥青路面温度分布的外部因素	51
3.2.3 沥青路面结构体的热物性参数分析	55
3.3 沥青路面结构体水分渗透模型	58
3.4 沥青路面结构体耦合数值模型的建立	59
3.4.1 沥青路面耦合数学模型	59
3.4.2 耦合模型数值格式的建立	63

3.5	沥青路面结构体多物理场耦合分析系统	64
3.5.1	分析系统 MCAP 简介	64
3.5.2	MCAP 的系统功能	65
3.6	本章小结	69
第4章	沥青路面结构体应力作用下变形响应规律	70
4.1	车载对沥青路面的作用特征分析	70
4.1.1	沥青路面轮载作用分析	71
4.1.2	轴载与轮压、轮胎接地面积的关系	72
4.2	沥青路面结构体动载分析	74
4.2.1	沥青路面车辆载荷作用方式	74
4.2.2	沥青路面结构体概化模型	74
4.2.3	车载对沥青路面位移及应力分布影响规律研究	75
4.3	本章小结	92
第5章	温度-应力耦合作用下沥青路面结构体动力学行为	94
5.1	日周期条件下沥青路面温度场分布	94
5.2	模型参数对沥青路面结构体温度分布的影响	98
5.2.1	面层厚度影响分析	98
5.2.2	面层结构体热物理参数灵敏性分析	101
5.2.3	基层结构体热物理参数灵敏性分析	103
5.3	温度作用下沥青路面结构体应力场分布规律研究	105
5.3.1	温度日周期变化对路面应力场分布影响研究	105
5.3.2	热-力耦合条件下沥青路面位移和应力分布规律	109
5.3.3	热-力耦合与非耦合条件下路面位移和受力状态对比分析	115
5.4	本章小结	121
第6章	水力-应力耦合作用下沥青路面结构体动力学行为	123
6.1	水力-应力耦合作用下沥青路面孔隙水压力与应力分布规律	123
6.2	面层模量对沥青路面车载作用下水压力和应力影响分析	130
6.3	面层厚度对沥青路面车载作用下水压力和应力影响分析	135
6.4	面层渗透能力对路面车载作用下水压力和应力影响分析	140
6.5	本章小结	145
第7章	沥青路面结构体多物理场现场监测试验	147
7.1	沥青路面多场测试方案	147
7.1.1	监测目标与内容	147
7.1.2	试验段的布设	148
7.1.3	现场监测仪器	149
7.1.4	监测方法	150

7.2 沥青路面结构体多物理场现场测试结果及分析	157
7.2.1 静载条件下的试验结果	157
7.2.2 动载条件下的试验结果	171
7.2.3 试验结果与分析	184
7.3 沥青路面结构体弯沉测试试验	212
7.3.1 贝克曼梁弯沉仪路面弯沉测试	213
7.3.2 弯沉仪的选择及弯沉仪误差修正	214
7.3.3 目前弯沉测试主要存在的问题	216
7.3.4 其他测定路面弯沉的方法	217
7.3.5 实验段弯沉测试结果与分析	218
7.4 本章小结	230
第8章 沥青路面结构体破坏的秸秆纤维化控制技术	231
8.1 纤维材料在沥青混合料中的作用机理分析	232
8.1.1 沥青混合料的组成特性	232
8.1.2 沥青混合料的力学特性	233
8.1.3 沥青路面混合料的细观特征分析	239
8.1.4 纤维材料的路用性能	243
8.2 路用秸秆复合纤维用于沥青混合料的设计方法	248
8.2.1 纤维剂量的确定	248
8.2.2 混合料目标配合比设计	249
8.2.3 生产配合比设计	249
8.2.4 生产配合比验证	250
8.3 沥青混合料优化配比设计	252
8.3.1 沥青混合料原材料性能分析	252
8.3.2 沥青路面面层材料优化配比试验	255
8.4 纤维材料对沥青路面路用性能的影响	261
8.4.1 沥青路面材料高温稳定性影响	262
8.4.2 沥青路面材料低温抗裂性影响评价研究	265
8.4.3 沥青路面材料水稳定性影响评价研究	269
8.4.4 沥青混合料中最佳纤维配比分析	274
8.4.5 纤维材料拌和工艺对沥青混合料性能的影响研究	275
8.5 路用秸秆复合纤维的经济效益分析	276
8.5.1 秸秆复合纤维沥青路面与普通沥青路面的对比分析	276
8.5.2 秸秆复合纤维沥青路面与其他纤维沥青路面的经济分析	279
8.6 本章小结	279
参考文献	281

第 1 章 绪 论

1.1 沥青路面破坏的研究背景

随着我国经济建设的蓬勃兴起,基础设施建设,尤其是高速公路建设得到迅猛发展。改革开放后的 20 多年是我国公路发展速度最快、规模最大、最具活力的时期。高速公路从无到有,公路通达深度和覆盖面积有了很大提高。特别是自 1998 年以来,党中央和国务院把加快包括公路在内的基础设施建设作为扩大内需的重点,国家每年都投入巨资进行公路建设,高速公路得到迅速发展。“十五”期间,我国建成高速公路 2.47 万 km,是“八五”和“九五”建成高速公路总和的 1.5 倍,总里程达到 4.1 万 km,稳居世界第二,其中 90% 以上为沥青路面。“十一五”期间,我国公路建设将迎来新的黄金期,高速公路里程将不断增加。根据交通部 2007 年中旬公布的《国家高速公路网规划》,从 2005 年起到 2030 年,国家将斥资 20 000 亿元,新建 5.1 万 km 高速公路,使中国高速公路里程达到 8.5 万 km,其中 2008 年将建成 5000km。这一方面给我国的公路事业发展带来了相当好的机遇,同时也对道路工作者提出了更高的要求。

我国虽然已跻身高速公路大国,但并非高速公路强国,公路质量的通病仍未根除。尽管沥青路面作为一种无缝连续路面,具有整体强度高、行车平稳性好、噪声低、振动小、维修比较方便等特点,被我国及世界各国广泛采用,但在我国道路里程不断增加的同时,沥青路面的早期破坏现象也越来越突出,许多地区出现了“当年修,来年坏”的现象,沥青路面普遍无法达到设计寿命。分析其原因可知,温度、孔隙水压力和重载及其耦合作用是导致沥青路面早期破坏的主要因素。例如,炎热季节重载车辆作用会造成车辙、推拥的永久变形;在雨季及春融季节,经受交通载荷和温度应力的反复作用,水分逐渐侵入到沥青与集料的界面上,同时由于超孔隙水压力的作用,沥青膜渐渐地从集料表面剥离,并导致集料之间的黏结力丧失而造成的坑槽、松散等水损坏破坏,路表抗滑性能迅速下降,以及局部龟裂等都在一些高速公路上显现出来。沥青路面的早期破坏有三个主要特点:①损坏时间早。有些路面建成后不久甚至在建成当年就出现严重的损坏现象。②损坏范围宽。全国各地都不同程度地存在早期损坏现象。③损坏程度重。有些损坏已不限于面层,而涉及基层,导致必须进行路面重建。

越来越多的道路由于交通流量的增大、恶劣的气候条件和工程技术等方面的

原因而达到其服务极限,因此,尽快找出最经济的方式来延长路面使用寿命已显得尤为重要。路面破坏问题的严重性引起了政府、学术界、工程界、企业界及道路使用者等社会各界的广泛关注。《公路水路交通“十一五”科技发展规划》对长寿命路面关键技术研究提出了具体目标:从结构、材料、工艺入手解决路面早期损坏问题,形成我国重交通沥青路面的修筑技术,保证路面在使用寿命内的使用功能,降低公路的全寿命成本,通过预防性养护和不定期表层维修,使路面的使用寿命力争达到 10~20 年。

路面结构裂缝和车辙等破坏现象的发生是路面结构在各环境因素(应力-温度-水力)共同作用下力学行为的直接反映。尤其是在我国南方地区,沥青路面一直暴露在高温、多雨的自然环境和行车载荷的作用下,加上前期施工因素的影响,使许多沥青路面在竣工后 1~2 年内就出现了早期破坏,给交通部门和国家造成巨大的经济损失。高温、多雨的气候条件导致沥青路面结构内部的温度分布非常复杂,这种复杂性直接增大了沥青路面强度设计的困难。大量沥青路面的使用实践已经表明:沥青路面温度状况对于沥青路面结构的承载能力和使用性能有重要的影响。为了保证沥青路面结构的整体强度是柔性路面设计的优先目标,必须考虑沥青路面建筑材料的强度和性能与沥青路面温度的关系。如何利用路面周围气温变化准确地预测沥青路面内的温度分布,成为优化沥青路面结构设计的关键。

沥青路面结构体中水分场、温度场及应力场耦合效应是客观存在的,其耦合效应将直接影响路面结构体的稳定性、结构层内的水热状况动态变化,以及应力场和变形场的分布规律。因此,积极开展复杂条件下(应力-温度-水力耦合作用下)沥青路面力学行为的试验研究,研究路面结构体的多场耦合试验方法和实时监测技术,对于全面了解路面破损机理是至关重要的。同时,通过对路面结构体应力-温度-水力三场耦合效应分析,研究路面结构体的整体变形规律,进而指导路面结构的选择,推荐适合高温、多雨地区的路面结构体系,并提出相应的路面结构体破坏的控制技术,对于促进我国公路交通基础设施的健康发展具有特别重要的意义。

新建高速公路沥青路面产生早期损坏的原因,除了设计、施工方面的原因外,材料性能差是其中一个重要因素。针对现有的沥青路面状况,近几年来,许多国家采用一种新型材料——纤维加强复合材料来提高沥青路面的使用性能。由于一些纤维复合材料具有耐腐蚀能力强、质量轻、抗拉强度高、防磁、防电、耐热性、耐久性良好等特点,因此用纤维复合材料来增强沥青路面性能比采用其他方法更具有优越性。纤维作为沥青混合料的外掺物,其增强效果的优劣与其自身的性能特征关系密切。如果纤维能在沥青中黏结良好且在混合料中均匀分散,可将混合料中的拉应力通过纤维进行传递,起到桥接和阻裂作用,从而减少沥青路面裂缝的产生;

同时纤维对沥青有一定的吸附能力,可减少夏季高温沥青路面泛油。纤维加强复合材料新技术在国际上已经引起了广泛关注和重视,并已经取得较大的应用和发展,但在我国,其研究成果和应用范围相对比较薄弱。在高速公路沥青路面工程建设中,采用纤维材料无疑将会增加一些公路建设成本,但如果从长远利益来考虑,采用了纤维材料,不仅会有效地提高高速公路沥青路面的抗拉强度、抗压强度、抗冲击强度和抗裂能力,使沥青混凝土的热稳定性、泛油性提高,而且还能致使沥青路面的粘接性、稳定性、流变性和耐磨性等明显改善;进一步减少路面反射裂纹及温差收缩应力,并有效提高路面质量和使用寿命。尽管一次性投入成本增多,但可长期受益,特别是能够节约大量的公路维修成本,因此,有着十分显著的经济效益和社会效益。

目前,常用的纤维有聚酯纤维、聚丙烯纤维、玻璃纤维和木质纤维等。聚酯纤维路用性能较好,其缺点是呈化学惰性、表面光滑,因此与其他聚合物难以黏合,且造价较高,不宜推广。聚丙烯纤维与聚酯纤维相比,其基料的黏着性较好,但同时具有耐光性差、静电大、耐燃性差等缺点。玻璃纤维具有很高的初始长径比,但这类纤维较脆,在加工过程中容易断裂,因而长径比会急剧降低,补强效果也就很差,再者其表面缺乏反应性,因此很难达到与基质的良好黏合。木质纤维化学性质稳定、吸油效果良好,且价格低廉,大约是聚酯纤维的十分之一,因此被广泛应用于沥青路面中。但目前大部分木质纤维的原材料为废旧报纸或原木,以废旧报纸为原材料的路用木质纤维容易造成高速公路周围环境的铅污染,而采用原木生产的木质纤维价格较高,且不满足节能减排要求。因此,综合利用植物秸秆等廉价材料,开发一种质优价廉、绿色环保的木质纤维材料,并研究其相应的沥青路面增强技术,这对丰富与完善沥青路面性能改善技术措施、消除沥青路面早期损坏、延长路面的使用寿命,具有重要的现实意义。

为此,本书采用理论与数值模拟研究相结合、现场调查与定性评价相结合、室内试验和现场监测相结合、技术开发与工程应用相结合的方法,以国内某高速公路路面工程为依托,系统地开展了高温、多雨条件下沥青路面结构体破坏机理和规律的研究;建立了热-水-力三场耦合作用下路面结构体破坏演化的动力学数值模型;采用自行开发的沥青路面结构体多物理场耦合分析系统模拟路面结构层温度、孔隙水压力以及应力分布规律,提出了路面结构体的多场耦合试验方法和实时监测技术,为沥青路面结构体优化设计以及合理预测和防止路面破坏提供重要的理论依据;同时自主研发出一种路用秸秆复合纤维材料,并通过室内和现场一系列试验验证了该材料的有效性和经济性,其研究成果具有重要的工程实用价值。

1.2 沥青路面破坏的国内外研究现状

沥青路面结构体破坏演化规律及其相应的控制技术研究是目前道路工程界的两个研究重点和热点,其研究成果可以为道路设计和施工提供理论依据和技术支持。目前,国内外对沥青路面结构体破坏演化规律的研究主要集中在水损坏、温度载荷破坏和车载破坏等方面,而控制技术方面除了集中在相应的设计和施工技术研究外,所用材料的研究也是一个重要方向,其中,外掺纤维材料的研究是目前的一个研究热点。围绕沥青路面混合料展开的一系列研究主要集中在对沥青路面结构体的破坏机理和特征、变形本构关系、动力学模型、数值计算、室内外试验以及控制技术几个方面。

1.2.1 沥青路面结构体破坏形成机理

路面结构裂缝、脱落(stripping)和车辙等破坏现象的发生是路面结构在外界环境共同作用下力学行为的直接反映。尤其是在多雨地区,沥青路面可能长时间暴露在雨水的湿润环境和行车载荷的作用下,导致许多沥青路面在竣工后1~2年内就出现了早期破坏,造成巨大的经济损失。

许多学者相继开展了关于沥青路面破坏规律的研究。一般认为,孔隙水压力和重载及其耦合作用是导致沥青路面早期破坏的主要因素。当水分逐渐侵入到沥青与集料的界面上时,由于超孔隙水压力的作用,沥青膜渐渐地从集料表面剥离,并导致集料之间的黏结力丧失而造成的坑槽、松散等水损坏破坏,路表抗滑性能迅速下降,以及局部龟裂等都在一些高速公路上显现出来。给出相似结论的学者还包括 Hall 和 Williams(2000)及 Davies 和 Sorenson(2000)。国内外许多专家学者也尝试从断裂力学的角度对裂缝扩展问题进行分析,从而采取相应的防治反射裂缝措施用以指导工程实际。

在国外,这方面的研究工作开展得较早,主要是针对路面土工格栅防止路面反射裂缝进行研究,而且通过室内外试验等方式进行了验证,结果较好;美国得克萨斯 A&M 大学曾对土工织物、土工网做过非常系统的抗反射裂缝研究,其研究内容包括系统的室内外试验和断裂力学分析。此外,加拿大 Waterloo 大学、美国 Ohi 大学等在断裂力学用于路面反射裂缝分析方面也做过许多研究工作。

在国内,这方面的研究工作进行得较晚,长沙交通学院、东南大学、长安大学等单位开展了部分研究工作。其中,长沙交通学院周志刚等(2000)利用线弹性断裂力学的平面有限元方法模拟加筋材料的薄膜单元,对土工加筋材料阻止沥青路面反射裂缝的桥联增韧效应进行了分析;重庆交通学院易志坚等(2004)从断裂力学角度对水泥路面层与基层接触界面的破坏过程进行了分析;东南大学黄晓明等

(2002)应用权函数理论,推导出层间完全连续路面裂缝的应力强度因子计算方法;许多学者做了大量的研究及试验工作,并取得了一定的研究成果。

另外,由于路表面完全暴露于自然环境中,气候的变化对路面材料的影响是不可避免的,如太阳辐射、风速等。据报道,一些地区夏季正午时持续的日照使路表温度高达 60°C 以上,这主要是由于路面吸收的热能与外界气温相互叠加产生了可观的路表高温。高温作用改变了沥青路面材料的物性参数,直接导致路面结构体抗变形能力的减弱。此外,由于日温不断变化,沿路面厚度方向会产生较大的温度梯度,即路面材料的应力-应变关系不仅与时间有关,而且与温度有关,路面各结构层内的温度及应力分布存在不均匀和不稳定性。

当温度变化循环到相对低温季节时,沥青的抗压强度就会显著降低。加之车载作用的持续,当基层强度较低时,面层底部将出现较大的弯拉应力,这是沥青面层发生车辙的直接原因。此外,路面材料的剪切变形也是形成沥青路面的永久变形的主要原因,即车载和温度应力的循环交替作用是影响沥青路面稳定性的主要因素。因此,开展考虑温度作用下沥青路面结构体变形破坏规律的研究对于有效控制和预防路面损坏具有重要的现实意义。

1.2.2 沥青路面结构体稳定性评价试验研究

1. 沥青路面水损害试验研究

关于沥青路面水分渗透的研究主要集中在室内和现场试验方面,如 Pratico 等(2008)通过现场原位试验分析了沥青路面内部水分流动特性;Chen(2004)分别对三种类型(密集型、沥青玛蹄脂型、多孔型)沥青混合材料在水分渗透率和裂纹影响下的破坏情况进行了测试,给出了沥青混合料试样破坏的临界固有渗透率区间和裂纹宽度。

凌建明等(2002)采用室内动三轴试验模拟了车载作用下路基土体的残余应变特性和孔隙水压力变化规律,提出孔压模型。张伟等(2002)采用有限元法求解 Biot 固结方程,提出了初始孔隙水压力增量的确定方法。刘朴等(2002)对上海环线东二大道试验段进行了现场测试。测试结果显示,层间结合处的超孔隙水压力比面层表面大,表明沥青路面的水损害很可能从下面层破坏开始。

王端宜等(2005)分析了沥青混合料孔隙率对水敏感性的影响,采用数字图像技术预测了轮迹试验沥青路面的水损害及其程度。罗志刚等(2006)从微观角度尝试性地提出沥青路面的水损害模型,分析认为孔隙水压力的存在,致使路面在载荷作用下内部孔隙边缘顶部及底部出现拉应力集中,且拉应力较无水状态时大得多。

李之达等(2003)通过对超孔隙水压力的分析和疲劳试验,探讨了孔隙水对路

面结构的破坏形式和疲劳寿命的影响,对比了有水和无水状态下破坏规律的区别。

张宏超等(2002)提出了一种全程评价方法,采用短期老化和长期老化试件进行对比试验,分别模拟沥青混合料拌和过程和沥青混合料在使用过程中(光、热和载荷)引起的老化对材料的破坏作用;叶奋等(2003)通过不同程度水损害对路面结构各层材料设计参数影响的分析,提出了沥青路面排水基层和路基材料在不同水文状况下的抗压回弹模量下降规律;孙立军等(2005)通过实测沥青路表面的动水压力,提出了高速行驶、水和路面较大空隙的相互作用是路面出现早期损坏的原因;杨瑞华等(2007)以 AC-10 混合料为例,分析比较了沥青混合料水稳定性(4 种)传统评价方法即浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、沥青路面分析仪浸水车辙试验和朱丽叶试验的优缺点和试验条件。从试件性能的稳定性、试验模拟的环境条件、评价指标的有效性而言,沥青路面分析仪浸水车辙试验最好,朱丽叶试验次之,冻融劈裂试验第三,而浸水马歇尔试验最差。王抒音等(2002)和许涛等(2003)也做过类似的沥青混合材料抗评价研究。关于沥青混合料水损害开展的性能评价多为标配试验,而没有脱离传统的水稳定性评价方法和工艺,缺乏对环境因素影响模拟的考虑。

2. 沥青路面变形本构关系试验研究

在沥青路面本构模型方面的研究成果也比较多。Seibi 等(2001)等通过三轴压缩强度试验获得了沥青混凝土的力学性能指标,为建立路面响应的应力-应变关系提供了依据。Shields 等(1998)和 Krishnan 等(2005)对高温条件下沥青混凝土的应力松弛现象的本构模型进行了研究。在考虑载荷作用年份和温度梯度的基础上提出了分级黏弹性模型,并开展了热-力耦合作用下沥青路面响应分析。Kim 等(1997)在循环载荷试验基础上提出了黏弹性本构模型,可在不同应力范围和载荷模式下预测沥青混合料的破坏。

关于沥青混合材料的连续性模型研究主要集中在 Burger 和 Maxwell 两种模型的选取,其中黏塑性理论可很好地预测沥青路面的永久变形(Park et al., 1996; Lu et al., 1998; Scarpas et al., 1997)。Luo 等(2006)采用有限元法模拟了无反射(non-reflective)边界条件下不同厚度、行车速度和轮压对沥青路面动力学特性的影响。González 等(2007)对含应变率为变量的沥青混合料黏塑性本构模型进行了数值模拟研究。

除载荷作用外,路面温度差异性变化也是引发路面变形的主要因素。特别是高温条件下,车载作用使路面更容易发生剪切破坏。正确地定量描述沥青混合料的热黏弹性本构关系是进行沥青路面结构分析,特别是温度收缩应力计算的必要条件。为此,国内外进行了大量的试验研究,以便更为准确地把握沥青混合料的黏弹性特性,Shields 等(1998)和 Mehta 等(2000)通过试验分析了不同温度下沥青混合料应力松弛特性。

3. 沥青路面材料路用性能评价研究

20 世纪 70 年代以来,相继开展了以沥青混凝土水稳定性试验的评价方法研究。美国 SHRP 研究计划建立了一种能够模拟野外现场条件的方法——环境条件系统 ECS。欧洲更倾向于采用水轮辙试验进行评价,其中使用最广泛的为汉堡轮辙试验。

我国从“八五”期间起也相继开展了水稳定性指标系统的研究。随着各种评价沥青混合料水稳性试验方法的出现,关于它们的可靠性、可行性以及评比等方面的研究也在深入。但是到目前为止,还没有一种试验方法可以得到广泛认可。毕竟试验室与现场是有区别的,试验室不可能还原现场的所有因素。

美国国家沥青混凝土技术中心(NCAT)对佐治亚州 19 个工程中的离析现象研究后指出,不论离析的根源是什么,在运料车车厢尾部的离析现象是最严重的。如果这个问题能得以解决,离析将不再是一个主要问题。另外,大多数情况的施工过程中难以发现离析问题。为此,NCAT 提出了两种研究沥青混合料的方法:①采用红外温度探测器测定温度离析,它可以用来测定每一批混合料的温度差;②采用构造深度测定仪能直观地发现离析区域,确定离析程度。

为了确定低温面积导致的离析破坏的严重性,Masson 等(2005)利用振动击实仪和沥青路面分析仪 APA,对佐治亚州的典型混合料在 149℃、143℃、138℃、127℃、116℃、104℃和 93℃温度下进行压实和研究。结果表明,随压实温度的降低,混合料孔隙率增大。

沈阳建筑工程学院郭乃胜等(2004)分析了聚酯纤维沥青混合料的低温抗裂性能。研究表明,采用聚酯纤维增强沥青路面的低温抗裂性能是一种有效的方法,加入纤维后的沥青混合料的劈裂强度和劲度模量明显得到加强。河北工业大学史建方(2004)开展了软纤维加筋沥青混合料性能的研究,探讨了纤维在沥青混合料中的作用机理,并通过劈裂试验、小梁弯曲试验、车辙试验及疲劳试验评价 Dolanit AS 纤维和博尼纤维对沥青混合料性能的影响,表明在沥青混合料中掺加增强纤维可有效改善沥青混合料的高温、低温及抗疲劳性能,延长路面使用寿命。长安大学孙立兵(2002)开展马歇尔试验、车辙试验、残留稳定度、冻融试验、低温弯曲试验、压缩试验及疲劳试验评价 AC-16I 级配不掺加纤维及掺加木质素纤维和 Dolanit AS 高温稳定性能、水稳定性能、低温抗裂性能、疲劳试验性能。结果表明,掺加纤维可改善混合料高温、低温、水稳定性及抗疲劳性能。长安大学李炜光等(1998)对比评价了博尼纤维掺入 AC-16I 级配范围中值混合料中后的高温车辙性能、低温抗裂性能及疲劳性能,表明博尼纤维的掺入,可改善沥青混合料高温、低温及抗疲劳性能,延长路面的使用寿命。

1.2.3 沥青路面结构体耦合动力学模型

由沥青路面结构体的破坏机理可知,温度-载荷-水分渗透是诱发路面材料损伤的三个主要因素,这些因素是不可避免的。Kandhal 等(2001)通过对美国俄克拉何马州和宾夕法尼亚州等四个州际公路现场监测发现高孔隙率、高应力、孔隙水的存在以及高温作用是造成沥青路面黏结颗粒剥落的主要原因。因此,建立沥青路面结构体耦合动力学模型,预测沥青路面在不同外界环境作用下的变化规律是提出沥青路面破坏控制方法的前提。

1. 沥青路面结构体水-力耦合模型

沥青路面的水损害问题自 20 世纪 60 年代开始得到广泛关注。美国公路合作研究计划(NCHRP)、美国公路规划和研究计划(NP&R)、美国 SHRP 路面长期使用性能研究专家组都对沥青路面水损害问题进行了专题研究,取得了大量的应用性成果。沥青路面水损害机理研究成果主要集中在材料性质和力学分析两个方面。

从材料的性质角度看,路面混合料水损害是水进入路面后置换了石料表面的沥青薄膜,降低了沥青颗粒与石料间的黏附力,最终导致沥青剥落。黏附理论主要包括力学理论、化学反应理论、表面能理论以及分子定向理论。由于路面材料黏附性质极其复杂,因此,每种理论都无法准确说明其机理。沙庆林(1999)对半刚性基层沥青路面的早期破坏进行了较为系统的研究,针对我国高速公路归纳了水损害现象并对其破坏原因进行了分析。

力学分析理论认为,沥青路面结构层内的孔隙水在高速行车载荷作用下形成的超孔隙水压力是造成路面水损害的主要原因。有数据显示在路面孔隙率小于 8% 时,沥青面层中的水以薄膜水的形式存在,在载荷作用下一般不产生动水压力,不容易造成水损害。对于孔隙率达到 15% 以上的路面,孔隙水可迅速排走,故也不容易造成破坏。然而,当孔隙率介于 8%~15% 时,水分很难进入面层内部。另外,水分又不易排出结构体外,这样就使水能较长时间地滞留在路面内,因车载作用产生孔隙水压力进而成为流动水,从而形成了对沥青混合料的破坏。

水分渗入沥青路面结构体后,在车荷的作用下,孔隙结构发生变形,同时孔隙水压力也发生变化,如果将沥青路面材料看成多孔介质,那么介质中的应力、位移和水压力的状态变化过程可通过 Biot 固结渗流理论来描述。连续介质模型主要基于太沙基有效应力原理而建立流-固耦合模型。相应的文献报道包括:Masad 等(2002),Hunter 和 Airey(2005)利用 SEEP/W 和 FLAC 有限元软件和有限差分软件对沥青路面的流体宏观流动模式进行评价。这些建模过程把沥青路面假设成均匀、各向同性介质,并且各个方向的导水率都保持为常数。Masad 等(2003)通过

二维 SEEP/W 有限元模型研究孔隙度垂直梯度对水分流动模式的影响,将路面分成多个 10mm 子层,并把导水率值分配到各个子层中。其中不同的孔隙度可由沥青试件 X 射线 CT 成像得到,并将每一层 x 和 y 方向的导水率假设成常数。分析表明,导水率在垂直方向上呈降低趋势,大部分的流体流动都发生在水平方向上。

Hunter 等(2004)通过有限差分模型在现场渗透性试验导水率数值测试中验证流体垂直流动这个假设,并且得出这个假设不准确,随着路面基层深度的变化和现场渗透仪直径的变化,得出导水率误差数量级。当渗透仪直径很小时(如 50mm)和路面基层很厚时(如大于 250mm),导水率误差将超出一个数量级。

对于沥青路面中孔隙流体流动微观模式,只做了少量的研究。Al-Omari 和 Masad(2004)通过半隐式方法压力联动方程有限差分方法对沥青路面导水率进行了评价。他们对基于 Kozeny-Carman 方程数值模型进行垂直方向导水率比较评价,并且发现两种结果具有合理一致性。

由于沥青路面内流体引起的玛蹄脂与集料的脱离,Kringos 和 Scarpas(2005)引进一种建模方法对这种脱离进行物理和力学过程的解释,分析内容包括有脱散引起的基本过程扩散、吸附和弥散。

董泽蛟等(2007)基于饱和多孔介质理论通过轴对称有限元的瞬态动力分析,计算得到饱和沥青路面内部孔隙水压力的时程变化,分析了不同渗透性、车速和载荷条件下的孔隙水压力变化规律。肖庆一等(2007)基于表界面理论,推导得到沥青在矿料表面的黏附模型和水损坏模型。

Khalili 等(2005)孔隙水与骨架之间的相互作用作为耦合效应被考虑在数学模型中,分析了静态载荷引起的固体变形,模型的求解一般采用有限元法,而在时间层的离散上采用有限差分方法。Kettill 在考虑饱和路面水-固界面接触力的条件下,对脆性沥青和柔性沥青面的孔隙水压力及流速进行了对比分析。

Krishnan 等(2001)对比分析了沥青混合料在不同孔隙率条件下固有渗透率的变化规律,认为导致路面泛浆现象的原因在于沥青小颗粒的迁移,并采用混合理论建立了沥青颗粒运动的控制方程。

部分学者采用理论分析和数值计算相结合的方法来探讨沥青路面内水分运移特征(Dong et al., 2007; Kettill et al., 2005)。Kettill 结合达西定律和动量平衡理论分析了双层路面内孔隙水压力和流速分布,并给出了三维有限元动态分析。

综上所述,沥青路面结构体水损害机理研究主要集中在定性分析方面,提出了黏附和表面能等理论,由于沥青路面水损害的影响因素较多,任何一个因素都可能导致路面破坏,因此,对于沥青路面水损害仍停留在描述现象的阶段;室内实验条件无法满足沥青路面在交通载荷及环境作用下的工作状态;水-力耦合作用下路面结构破坏的变化过程也未能作出详细阐述。因此,开展车载作用下路面各层结构体内孔隙水压力、位移和应力变化规律以及现场试验研究是分析和解决高速公路