

LOADING EFFECT ANALYSIS AND
FATIGUE DESIGN OF ASPHALT
MIXTURE

沥青混合料荷载效应分析与 抗疲劳设计

吕松涛 刘宏富 郑健龙 著



非
外
借



科学出版社

沥青混合料荷载效应分析 与抗疲劳设计

吕松涛 刘宏富 郑健龙 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书分8章。第1章总结国内外关于沥青混合料疲劳试验方法与疲劳方程研究的现状及存在的问题。第2章通过对比分析国内外现行常用的沥青混合料不同疲劳试验方法,选出本书开展研究的主要疲劳试验方法,同时便于读者了解不同疲劳试验方法。第3章介绍传统的 $S-N$ 疲劳方程,肯定其贡献也分析其不足,并在此基础上提出真实应力比概念,建立基于真实应力比的沥青混合料疲劳方程,提出抗拉强度结构系数。第4章通过引入材料刚度参数,以模量为损伤因子,考虑在疲劳加载过程中模量的衰变,建立基于模量衰变的沥青混合料疲劳损伤模型。第5章通过引入材料强度参数,考虑在疲劳加载过程中强度的衰变,建立基于强度衰变的沥青混合料疲劳损伤模型。第6章基于沥青路面中沥青混合料层真实的应力状态——同时承受拉与压应力,以及拉、压模量的差异性,提出沥青混合料拉压模量同步测试方法,并建立考虑拉压差异性的沥青混合料疲劳损伤模型。第7章通过开展不同应力状态下沥青混合料的疲劳试验,对试验结果进行归一化分析处理,建立不同应力状态下沥青混合料疲劳损伤归一化模型。第8章为结论与展望。

本书既适合于道路工程领域的研究人员和技术人员阅读,又可供相关专业研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

沥青混合料荷载效应分析与抗疲劳设计/吕松涛,刘宏富,郑健龙著. —北京:科学出版社,2018.6

ISBN 978-7-03-057618-7

I. ①沥… II. ①吕… ②刘… ③郑… III. ①沥青拌和料-荷载效应-分析 ②沥青拌和料-疲劳强度-设计 IV. ①U414.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 111405 号

责任编辑:赵敬伟/责任校对:邹慧卿
责任印制:张 伟/封面设计:耕者工作室

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年6月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:230 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

沥青路面具有优越的使用性能,是我国目前高等级公路主要采用的路面结构类型,沥青混合料作为路面的主要建筑材料之一,在道路工程中得到了广泛应用。疲劳开裂是沥青路面结构的主要破坏形式之一,因此,研究沥青混合料的疲劳特性,建立准确的疲劳损伤预估模型非常重要,这项工作一直受到国内外道路工作者的高度重视。

常见的沥青混合料疲劳试验方法主要有弯拉疲劳、间接拉伸疲劳、直接拉伸疲劳、压缩疲劳等,国内外道路工作者根据不同的疲劳试验方法与试验条件建立了相应的疲劳预估模型。为了客观地揭示沥青混合料的抗疲劳性能,有必要对不同疲劳试验方法、试验条件等进行系统的比较分析,建立不同疲劳试验条件下能客观反映材料抗疲劳性能的预估模型,并合理地测定沥青混合料的抗疲劳设计参数,从而为科学地建立沥青路面的预防性养护决策模型提供依据,对提高沥青路面的路用性能、延长沥青路面的使用寿命将起到积极的作用。

本书的作者一直从事耐久性沥青路面结构设计与沥青混合料疲劳损伤特性的研究,主持了国家自然科学基金项目“老化沥青路面荷载效益非线性分析与抗疲劳设计关键技术研究”(51578081)、“弯剪组合作用下沥青混合料非线性疲劳损伤特性研究”(51208066)、“沥青混合料宏细观损伤变量及非线性疲劳损伤模型研究”(51608058)等科研课题。本书在调研国内外关于沥青混合料疲劳试验方法与疲劳寿命预估模型的基础上,系统地介绍了十多年来,作者所在的科研团队关于沥青混合料疲劳特性表征方面的研究成果,具体包括沥青混合料真实应力比下的疲劳方程、基于刚度衰变的沥青混合料疲劳损伤模型、基于强度衰变的沥青混合料疲劳损伤模型、考虑拉压差异性的沥青混合料疲劳损伤模型以及不同应力状态下沥青混合料疲劳损伤模型的归一化等。

本书内容在注重基础理论知识的同时,又强调理论与试验相结合。本书上篇分8章。第1章概论,总结国内外关于沥青混合料疲劳试验方法与疲劳方程研究的现状及存在的问题。第2章沥青混合料疲劳试验方法,介绍并比较现行的沥青混合料不同疲劳试验方法。第3章沥青混合料疲劳方程,在传统的疲劳方程的基础上,提出真实应力比概念,并建立基于真实应力比的沥青混合料疲劳方程,提出抗拉强度结构系数。第4章基于刚度衰变的沥青混合料疲劳损伤模型,通过引入材料刚度参数,考虑在疲劳加载过程中刚度的衰变,建立基于刚度衰变的沥青混合料疲劳损伤模型。第5章基于强度衰变的沥青混合料疲劳损伤模型,通过引入材料

强度参数,考虑在疲劳加载过程中强度的衰变,建立基于强度衰变的沥青混合料疲劳损伤模型。第6章考虑拉压差异性的沥青混合料疲劳损伤模型,基于沥青路面中沥青混合料层真实的应力状态——同时承受拉与压应力,以及拉、压模量的差异性,提出沥青混合料拉压模量同步测试方法,并建立考虑拉压差异性的沥青混合料疲劳损伤模型。第7章不同应力状态下沥青混合料疲劳损伤模型的归一化,通过开展不同应力状态下沥青混合料的疲劳试验,基于屈服准则思想,对疲劳试验结果进行归一化处理,建立不同应力状态下沥青混合料疲劳损伤的归一化模型。第8章为结论与展望。

本书内容在研究过程中得到国家自然科学基金项目(51578081, 51208066, 51608058)、交通运输部建设科技项目(2015318825120)、中国工程院咨询研究项目(2017-XY-17)的大力支持,在此表示由衷的感谢。长沙理工大学刘宏富主要撰写了第1、2、4、5章,长沙理工大学道路与铁路工程专业博士刘超超和樊喜雁参与本书中试验数据的整理及论文的整理汇总。

本书所涉及的部分内容仍为目前国内外道路工程界研究的热点与难点问题,尽管提出了一些疲劳分析方法,仍存在不小差距与问题。鉴于作者水平有限,书中的缺点和不足在所难免,恳请各位专家、学者和读者批评指正。

吕松涛

长沙理工大学

2017年11月

目 录

前言	
第 1 章 概论	1
1.1 问题的提出及研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 沥青混合料疲劳损伤特性研究	2
1.2.2 沥青路面轴载换算方法研究	8
参考文献	14
第 2 章 沥青混合料疲劳试验方法	17
2.1 沥青混合料疲劳试验方法确定	17
2.1.1 目前国内外沥青混合料主要疲劳试验方法	17
2.1.2 对主要疲劳试验方法的评述	17
参考文献	21
第 3 章 沥青混合料疲劳方程	22
3.1 原材料试验及配合比设计	22
3.2 不同加载速率下直接拉伸强度试验	24
3.3 直接拉伸疲劳试验结果及传统疲劳方程的建立	28
3.3.1 疲劳试验方法及方案设计	28
3.3.2 疲劳试验结果及传统疲劳方程的建立	29
3.4 真实应力比疲劳方程的建立	31
3.5 沥青面层抗拉强度结构系数计算新方法	34
参考文献	35
第 4 章 基于刚度衰变的沥青混合料疲劳损伤模型	36
4.1 以模量定义的疲劳损伤变量	36
4.2 直接拉伸疲劳变形特性分析	38
4.2.1 循环应力应变滞回曲线	39
4.2.2 应变随循环寿命比变化曲线	43
4.3 直接拉伸疲劳动模量衰变模型的建立	46
4.3.1 动模量初始值的确定	47
4.3.2 破坏时动模量的确定	47
4.3.3 动模量衰变模型的建立	48

4.4 基于刚度衰变的疲劳损伤模型的建立	52
4.4.1 临界疲劳损伤的计算	53
4.4.2 疲劳损伤修正模型的提出及验证	56
4.5 疲劳损伤非线性累计的试验验证	62
4.5.1 两级荷载疲劳试验设计	62
4.5.2 两级荷载疲劳试验结果分析	63
参考文献	65
第 5 章 基于强度衰变的沥青混合料疲劳损伤模型	67
5.1 疲劳剩余强度试验设计和试验结果	67
5.2 疲劳剩余强度衰变模型的建立	70
5.3 基于剩余强度衰变的损伤模型的建立及验证	74
5.3.1 以剩余强度定义的损伤变量	74
5.3.2 基于剩余强度的损伤失效的判断	77
5.3.3 基于剩余强度衰变损伤模型的建立	78
5.4 刚度和剩余强度定义的损伤变量比较	81
5.5 刚度和剩余强度定义的损伤变量的统一	83
5.6 本章小结	86
参考文献	87
第 6 章 考虑拉压差异性的沥青混合料疲劳损伤模型	89
6.1 沥青混合料四点弯曲疲劳试验拉、压模量衰变规律	89
6.1.1 拉、压模量初始值随应力水平变化规律	89
6.1.2 拉、压模量临界值随应力水平变化规律	95
6.1.3 临界疲劳损伤随应力水平变化规律	96
6.1.4 基于拉、压模量衰变规律的沥青混合料疲劳损伤特性	97
6.2 疲劳试验过程中沥青混合料拉、压、弯模量差异性分析	99
6.3 沥青混合料拉、压、弯模量衰变特性对比分析	100
6.4 基于沥青路面各点实际应力状态确定结构设计参数的新思想	104
6.5 本章小结	105
参考文献	105
第 7 章 不同应力状态下沥青混合料疲劳损伤模型的归一化	107
7.1 基于屈服准则强度屈服面的建立	108
7.1.1 Desai 强度屈服面模型	108
7.1.2 不同加载速率下不同应力状态的沥青混合料强度试验及结果	109
7.1.3 不同加载速率下强度屈服面的建立	110
7.2 基于屈服准则思想不同应力状态下沥青混合料疲劳特性的归一化	111

7.2.1 不同应力状态下沥青混合料疲劳试验	111
7.2.2 不同应力状态下沥青混合料疲劳试验结果及基于 $S-N$ 疲劳方程的结果 分析	112
7.2.3 基于屈服准则与真实应力比思想的不同应力状态下沥青混合料疲劳特性 的归一化模型的建立	114
7.3 与真实应力比疲劳方程的比较	120
7.4 结论	121
参考文献	121
第 8 章 结论与展望	123
8.1 主要结论	123
8.2 创新点	125
8.3 不足与进一步工作构想	125
附录	126

第1章 概 论

1.1 问题的提出及研究意义

交通运输部统计公报显示：截至 2011 年底，我国公路通车里程已达 408 万公里，其中高速公路 8.5 万公里。沥青路面是我国目前主要采用的路面结构类型，沥青混合料作为沥青路面的主要建筑材料，其疲劳性能是非常重要的，直接影响路面的使用性能和使用寿命。疲劳开裂是沥青路面结构的主要破坏形式之一，在道路运营过程中，受外界环境和交通荷载的反复作用，沥青路面结构内部将会出现损伤；随着荷载作用次数的增加，损伤将不断演化累计，疲劳损伤导致路面材料和结构性能的退化直至最终破坏。沥青路面常常远没达到设计寿命就出现大范围疲劳破坏，不能简单地归因于施工质量和超载重载，现有沥青路面设计方法中以路面疲劳特性作为基本设计原则，而基于传统疲劳方程经典的分析方法，在描述沥青路面结构和材料的疲劳破坏时其作用是有限的，还需要进一步地研究并认识沥青混合料的疲劳损伤过程，建立较好的数学模型来描述复杂的疲劳破坏现象。

以疲劳设计为主的沥青路面设计方法存在的一些问题还没有得到解决：

一是现有设计方法中沥青面层抗拉强度结构系数推导过程中，规范将传统疲劳方程后延到 $N_f = 1$ ，并认为此时的拉应力就是极限抗拉强度，缺乏足够的论据和试验验证；将极限抗拉强度引入疲劳方程，这表明在疲劳试验过程中，沥青混合料的极限抗拉强度是个常数，不随环境温度和加荷速率变化，不能反映沥青混合料黏弹性材料的本质特征。因此现行设计方法中沥青面层抗拉强度结构系数的推演不合理，有必要建立一种新方法。

二是经典的疲劳分析，对准确描述沥青路面结构与材料的疲劳性能劣化是有限的，损伤力学的发展为材料在重复荷载作用下的力学行为研究提供了新的手段，首要和最基本的问题是要选择恰当的损伤定义来描述材料的损伤状态。基于等效应变假说的经典损伤定义的弹性模量法，尽管具有计算方便和测量简单等优点，但用于研究沥青混合料具有黏塑性变形的非弹性损伤，理论上不完善，并且基于弹性模量衰变的定义难以表示损伤对材料组织敏感特性的影响。因此有必要针对沥青混合料开展损伤定义方法的研究，以期提出一种普适性、可靠性更好的损伤变量表示方法。

三是现有对不同交通荷载进行标准化处理过程中的模型太过简单，在考虑交

通荷载的重复作用效应时也是一直沿用 Miner 线性疲劳损伤理论和方法,没有考虑交通荷载历史和非线性累计对路面结构破坏的影响,可能低估了交通荷载特别是重载车辆的破坏作用。在此举一个例子更能说明问题,一台后轴重 150kN 的重车在一条新建路面上行驶一百次与在使用末期破损严重的路面上行驶一百次,两种状态下对路面造成的损伤和破坏明显是不一样的。而现有设计方法一直沿用 Miner 线性疲劳损伤理论和方法,认为两种状态下使用初期和使用末期得到的标准轴载作用次数是相同的,这显然是不合适的,没有考虑交通荷载历史和材料在疲劳作用下性能的时变损伤衰减对轴载换算的影响。因此需要建立能考虑加载历史或损伤历史影响的、基于非线性疲劳损伤的沥青路面轴载换算新方法。

针对上面提出的三个问题,本章在调研国内外已有研究成果的基础上,以损伤力学为理论基础,结合沥青混合料室内直接拉伸疲劳试验和剩余强度试验,分别选择刚度和剩余强度为损伤变量,开展沥青混合料非线性疲劳损伤特性的研究,建立基于非线性疲劳损伤的沥青路面轴载换算新方法。研究内容对于推进沥青路面轴载换算方法的发展,完善沥青路面设计方法,提高沥青路面耐久性和设计水平有重要意义。

1.2 国内外研究现状

针对以上提出的需要研究的问题,本节主要涉及沥青混合料疲劳损伤特性和沥青路面轴载换算方法两方面的内容。在查阅国内外大量相关参考文献和调查的基础上,现对这两方面研究现状分别综述如下。

1.2.1 沥青混合料疲劳损伤特性研究

在每次车辆通过时沥青路面材料遭受短期荷载作用,随着重复荷载作用的累计,沥青路面逐渐疲劳,沥青混合料的刚度和强度不同程度地衰减,直至最后导致破坏。路面结构的疲劳性能是非常重要的,世界各国沥青路面设计方法均以路面材料的抗疲劳特性作为确定设计寿命的依据。因此,国内外一直十分重视沥青混合料疲劳特性的研究,已经发表了大量关于试验方式、试验条件、材料组成、荷载特性、环境因素等对于沥青混合料疲劳寿命影响的专门著作^[1,2]和研究报告^[3],并把这些成果用于沥青路面结构设计理论与设计规范^[4,5]。

由国际材料与结构研究实验联合会 (RILEM) TC 101-BAT 和 TC 152-PBM 分会组织进行的沥青及沥青混合料疲劳性能联合试验研究,于 1996 年完成。研究结论指出,经典的疲劳分析对准确描述沥青路面结构与材料的疲劳性能劣化是有限的,并一致认为,为了认识沥青混合料疲劳损伤现象并对其复杂的疲劳损伤过程建立数学模型,还需进一步的研究^[6]。

损伤力学的发展为材料在重复荷载作用下的力学行为研究提供了新的手段。在重复荷载作用下材料内部分布的缺陷也将不断演化导致材料破坏,这类损伤可以称为损伤累计,在广义条件下也称之为疲劳损伤。疲劳损伤主要注重研究损伤的过程与损伤失效的判断标准 [7]。

用损伤力学理论分析材料受力后的力学行为时,首要和最基本的问题是要选择恰当的损伤定义来描述材料的损伤状态。损伤变量 $D(*)$ 作为描述材料劣化状态的参数,其自变量 $(*)$ 常是一些材料响应参量,如弹性模量、损伤面积等,其中有的是宏观性能参量,有的是细观状态参量。据此,可将损伤变量分为宏观损伤变量和细观损伤变量 [8]。

沥青混合料是一种典型的黏弹性材料,在重复荷载作用下的疲劳损伤过程是一个能量耗散的过程。因此很多道路工作者从耗散能的角度分析了沥青混合料的疲劳损伤过程。Carpenter 和 Jansen 利用能量耗散率的概念研究沥青混合料的疲劳问题,这种方法认为不是所有的能量都对材料的损伤产生作用。对每个荷载循环,由材料的机械功和环境的影响导致的能量耗散将保持不变。因此,如果能量耗散开始显著变化,则说明损伤在发展 [9]。Ghuzlan 和 Carpenter 检验了该方法并进行了修正。他们发现能耗率 (DER) 与疲劳寿命之间有很强的相关性,而且与荷载水平、荷载模式、混合料类型没有关系 [10,11]。Shen 和 Carpenter 后来进一步发展了该方法,并将能量率重新定义为能量耗散变化率 (RDEC) [12,13]。Bhasin 等 2009 年应用能量耗散的方法去评估沥青混合料的疲劳开裂,提供了关于能量方法论上的关键性解析:① 对相同材料的应变控制和应力控制模式试验的结果进行统一;② 准确地预估不同材料的疲劳开裂寿命 [14]。

Kim 和 West 2010 年基于 Schapery 的相关原则和连续损伤原理发展建立了黏弹性连续疲劳损伤模型,但是由于这个模型基于单轴拉伸试验,因此在现场的应用受到了限制。根据开发的一种可将此模型适用于间接拉伸试验的解析方法论,此方法在间接拉伸试验中能够利用黏弹性连续疲劳损伤模型评价沥青混合料的损伤演化 [15]。

Bodin 等 2002 年为了预测路面疲劳开裂,建立了疲劳损伤模型来预测路面的疲劳开裂,用循环疲劳试验评估沥青混合料的疲劳性能。在加载正弦曲线的试验中,材料复合模量的演化被定义为与微观裂缝形成机理相关的损伤变量。在疲劳试验中它的演化被描述为基于弹性基础的非局部损伤模型。这个损伤模型的参数是通过单轴疲劳试验确定的。在试件局部损伤之前的破裂过程中,数值模拟结果和试验数据有很好的相关性 [16]。Zhi 和 Wong 利用三种不同类型的沥青混凝土材料进行间接拉伸疲劳试验,建立疲劳损伤模型和破坏准则;利用基于连续损伤的方法,用疲劳损伤模型描述了微裂纹的形成和裂纹的扩展;结合疲劳损伤模型进行了有限元分析,模拟路面结构层的裂缝贯穿 [17]。

同时,在疲劳损伤过程中,由于缺陷的聚集与扩展,伴随有材料宏观物理量的变化,如模量、韧性、强度、密度等量值的降低;可以使用这些物理力学参数的变化来度量材料的损伤。

Lundstrom 等 2004 年通过对三种不同针入度的沥青混合料在三种温度下进行圆柱体拉压疲劳试验发现:随着疲劳损伤的发展,模量逐渐衰减,并且在低温条件下的沥青混合料的模量衰减幅度要小,针入度较小的沥青混合料的模量衰减幅度也较小;还对传统的控制应变疲劳试验中以模量衰减到初始模量的 50% 作为疲劳失效提出了质疑,并对疲劳破坏的确定提出了修正方法^[18]。

法国里昂大学的 Benedetto 教授等总结了不同的疲劳试验方法,并用同一种沥青混合料进行了对比试验,疲劳试验方法及参数见表 1.1^[19]。选择用动态模量衰变分析了沥青混合料的疲劳损伤特性;综述了几种不同的损伤模型,介绍了各自在分析沥青混合料疲劳损伤规律时的特点,如 ENTPE 模型^[20]、LCPC 模型^[21]、Partial Healing 模型^[22]、Work Potential Theory 模型^[23]。

ENTPE 模型假定疲劳过程中的一段时间内,模量的衰减随疲劳次数呈线性变化规律,这种方法的特点是确定了每个疲劳循环过程中“真实”损伤所占比例,剔除了“伪应变”的疲劳损伤,不再以线性损伤为假定,基于刚度衰减提出了一种非线性疲劳损伤模型:

$$dD/dN = B[A(1-D)]^{(B-1)/B} / A^{(B-1)}, \quad D = (E_0 - E_N)/E_0 \quad (1.1)$$

式中, D 表示疲劳过程中的损伤, A 和 B 是应变幅值的线性函数, E_0 和 E_N 分别是初始刚度和在循环次数 N 时的刚度。

LCPC 模型是基于损伤力学而形成的,其特点是能描述疲劳试验的性能劣化的全过程。损伤增长率定义为关于等效应变率的一个函数:

$$dD/dN = f(D)\tilde{\varepsilon}^\beta \langle \dot{\tilde{\varepsilon}} \rangle \quad (1.2)$$

其中

$$f(D) = \frac{\alpha_2}{\alpha_3 \alpha_1} \left(\frac{D}{\alpha_2} \right)^{1-\alpha_1} \exp \left(\frac{D}{\alpha_2} \right)^{\alpha_1} \quad (1.3)$$

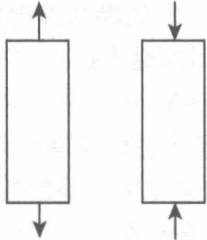
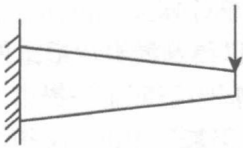
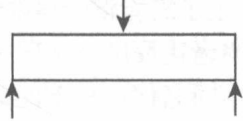
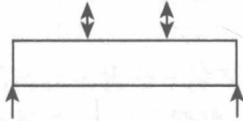
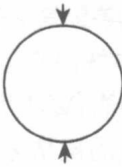
式中, α_1 、 α_2 、 α_3 和 β 为材料参数, β 与疲劳曲线的斜率相关。 $f(D)$ 是疲劳试验中基于模量分三阶段的衰变模型。

Partial Healing 模型能描述疲劳试验过程的刚度演化规律,在不同荷载、试验条件下能预测刚度衰变规律,基于刚度衰变的损伤变量 D 与疲劳损伤耗散能有关:

$$dD/dt = d\delta \cdot \Delta W_{\text{dis}}/dt \approx \delta \frac{\Delta W_{\text{dis}}}{T} \quad (1.4)$$

式中, D 为基于刚度衰变的疲劳损伤, ΔW_{dis} 为耗散能, T 为循环周期。

表 1.1 疲劳试验方法及参数

疲劳试验方式	加载方式	应力状态/应力区	幅值/(10 ⁻⁶ m/m 或 MPa)
拉/压		单轴拉压/“均匀”	应变水平: 80, 100, 140, 180 应力水平: 0.9
梯形悬臂梁两点弯曲		单轴向/“不均匀”	应变水平: 140, 180, 220 应力水平: 1.4
三点弯曲		单轴向/“不均匀”	应变水平: 140, 180, 220 应力水平: 1.4
四点弯曲		单轴向/“均匀”	应变水平: 140, 180, 220 应力水平: 1.4
间接拉伸		双轴向/“不均匀”	应变水平: 25, 40, 65 应力水平: 1.4

基于 Work Potential Theory 的损伤模型可描述为

$$dD/dt = \left(-\frac{dW^R}{dD} \right)^\alpha \tag{1.5}$$

其中, W^R 是伪应变能密度函数, $W^R = W^R(\epsilon^R, D)$, ϵ^R 为伪应变, D 为损伤变量, α 为材料常数。

Benedetto 教授等研究认为, 通过建立连续损伤力学的模型能更好地描述疲劳损伤特性的本质, 并指出关于连续损伤模型还需进一步的研究, 建立一个合理的疲劳损伤特性力学模型, 对于未来进行更有效的沥青路面设计是非常重要的。

国内沥青混合料疲劳损伤研究起步相对较晚, 但是逐渐认识到研究重复荷载作用下的疲劳破坏的重要性, 近年来相关研究单位对沥青路面的疲劳损伤更加关

心,其中沥青混合料非线性疲劳损伤演化和累计是研究的热点。

长沙理工大学从 20 世纪 80 年代以来,开展了大量的沥青混合料疲劳损伤方面的研究。郑健龙教授在国内外率先开展沥青混合料的黏弹性损伤特性的研究,1995 年率先应用损伤力学的原理,研究了沥青混合料的黏弹性损伤特性,通过引入损伤因子,建立了等应力疲劳和等应变疲劳的相互关系^[24]。在后续研究中创建了沥青混合料非线性疲劳损伤理论与分析方法^[25]。唐雪松教授等克服了经典弹性损伤理论存在的缺陷,直接由热力学第二定律出发,建立了完整的各向同性弹性损伤理论,采用损伤力学方法研究了沥青混合料的疲劳失效问题^[26]。周志刚针对现有沥青混合料疲劳损伤试验时直接依据刚度或模量计算损伤值而无法真实反映材料微观损伤特性的不足,提出了应用反分析方法以得到沥青混凝土的疲劳损伤演化规律。疲劳寿命的数值模拟结果与试验结果较吻合,证明了所提出的沥青混凝土疲劳损伤模型的合理性和有效性^[27]。吕松涛建立了基于 Burgers 模型的老化沥青混合料黏弹性疲劳损伤模型,通过直接拉伸试验确定了沥青混合料的黏弹性参数,求出了损伤演化方程,提出了一种考虑疲劳过程中老化程度对疲劳损伤影响的累计疲劳损伤计算的理论与方法,为沥青混合料在不同老化过程下的疲劳寿命预估提供了依据^[28]。杨毅进行了不同加载频率下的沥青混合料动态拉伸模量衰变规律的研究^[29]。

东南大学黄卫与邓学钧教授研究了应变控制下沥青混合料的能耗与荷载作用次数的关系,建立了基于能耗的新型疲劳响应模型^[30]。孙志林运用疲劳损伤有限元方法分析半刚性基层沥青路面在交通荷载与温度荷载下的疲劳损伤行为与疲劳寿命的关系,揭示了半刚性基层沥青路面的疲劳破坏机理^[31]。

吴旷怀和张肖宁教授通过相同条件下一组大样本沥青混合料应变控制小梁弯曲疲劳试验,将弯曲疲劳循环次数和对应循环次数的模量无量纲化后,拟合得到了一组疲劳损伤和对应循环次数比的关系曲线,发现各曲线之间非常相似,尽管各试件的疲劳寿命相差较大。对曲线族进一步分析,归纳得到了沥青混合料疲劳损伤的非线性演化的统一模型^[32]。

重庆交通大学严恒等针对 AC-13 沥青混合料进行了不同试验条件下的疲劳试验;分析了每次加载下的耗散能与荷载作用次数之间的关系;利用数理统计的方法研究了试验条件对总累计耗散能与疲劳寿命的影响。结果表明:总累计耗散能和疲劳寿命之间的关系与荷载作用模式有关,与试验温度及加载频率无关^[33]。

重复荷载作用下材料和结构的刚度衰变规律,是研究内部损伤演化特性的重要手段之一。长安大学沙爱民和武建民教授研究了半刚性材料动态弯拉模量的衰变^[34,35];刘业敏等通过控制应变的小梁疲劳试验,研究了沥青混合料疲劳过程中弯拉劲度模量随应变水平的变化情况,应变水平的变化模拟了实际路面厚度变化对层底拉应变的影响。结果表明:当应变水平较高时,弯拉劲度模量随荷载作用次

数的增加而急剧减小;随着应变水平的降低,衰减趋势逐渐变缓;通过研究发现,弯拉劲度模量可以用于表征应变疲劳过程中沥青混合料试件力学状态变化,并由此推算混合料的疲劳寿命^[36]。

损伤理论中的“弹性模量法”是一种基于应变等效性假说,以损伤前后材料弹性模量的变化来定义或量度损伤的方法。值得注意的是,等效性假说和以此为基础的“弹性模量法”实质上是一种弹性损伤描述方法。但在描述或测量具有不可逆塑性变形特征材料的损伤行为时,多数研究也利用“弹性模量法”,并将材料受力过程中的卸载刚度取作受损材料的瞬时弹性模量,去描述或测量此类材料的损伤演化行为并建立理论模型。严格讲,这种处理方法是不完全正确的,用此种近似方法来描述和测定具有塑性变形特征材料的损伤过程将显著简化或掩盖材料真实的损伤行为。实际上,一些弹塑性材料的损伤试验研究已发现了用这种方法刻画损伤演化时所存在的问题,并得出了“弹性模量法”并不总是有效等类似性结论,出现了材料损伤描述方法的不确定现象。

损伤不是材料的一种独立的物理性质,它只能作为一种“劣化因素”被结合到弹性、塑性和黏性介质中。谢和平等从等效应变假说的基本原理出发,研究了弹性模量法损伤定义中材料弹性模量的物理概念,指出了弹性模量法的局限性和适用条件,以及用于描述弹塑性材料损伤行为时存在的问题,并通过损伤实验结果,分析了由此造成对材料真实损伤行为的误判。弹性模量法描述损伤演化过程,其实质为弹性受损材料的卸载模量不断减小的过程,但具有弹塑性变形及弹黏塑性变形的材料的损伤演化过程,其卸载模量的变化与材料特性、加载条件有密切关系。许多试验结果表明,一定加载条件下,只有当内部损伤积累至一定程度后,测得的卸载模量才开始衰减,而此前某损伤状态下的卸载模量可能不低于材料的初始弹性模量。

肖建清等利用再生混凝土的疲劳试验结果,分析了常用的几种损伤变量定义法的优缺点;超声波速法、弹性模量法、最大应变以及残余应变法都能够反映再生混凝土的疲劳损伤演化规律,而残余应变法由于概念明确,考虑了疲劳初始损伤,拟合得到的损伤演化方程与试验数据高度相关,而理论分析得出的疲劳寿命的变化规律与试验结果也一致,因此肖建清等认为采用残余应变法定义损伤变量描述再生混凝土的疲劳损伤更为合适^[37]。

Guan 等通过沥青混合料高频和低频的疲劳试验,采用应变幅值、残余应变、动模量和耗散能四种不同损伤变量定义方法,分析了沥青混合料的疲劳损伤演化规律,结果表明不同定义方法所描述的疲劳损伤演化过程和临界损伤值均不相同,基于耗散能的定义方法得到的疲劳损伤演化曲线与其他三种十分不同,认为基于耗散能的疲劳损伤定义方法是最合适的^[38]。

迄今,已有不少研究人员根据具体情况选用不同的损伤变量来研究损伤,但所

选变量的普适性、可靠性等方面的研究还很有限,各损伤变量之间的相关性研究就更少见了。具体损伤过程的损伤规律是确定的,描述该过程的几个损伤变量的变化规律在理论上应是一致的,据此,为了更好地定义、筛选损伤变量,从不同角度对同一损伤过程进行定义,观测其损伤发展规律并进行分析对比。

总结沥青混合料疲劳损伤方面的研究,虽然有很多道路研究者已经开展了大量工作,也各自通过损伤力学理论和疲劳试验提出了相应的疲劳损伤模型,但是这些研究成果也表明,由于沥青混合料的疲劳破坏行为极其复杂,影响因素较多,因此,沥青混合料疲劳特性试验研究尚有许多困难需要克服。

由于损伤演化通常伴随材料某些物理力学性能的退化,常采用一些表征材料宏观物理力学性能的状态变量描述损伤程度,目前应用最多的损伤定义是基于模量的衰变;模量衰变可在疲劳试验过程中连续测量而不会影响材料的性能,它随着材料内部损伤的不断演化与累计而下降,因此模量是一个常用的宏观检测参数,能够描述沥青混合料疲劳过程中的损伤状态。由于疲劳过程中沥青混合料强度的衰减是造成结构疲劳破坏的直接原因,测量剩余强度也是一种分析疲劳损伤的手段,其优点在于剩余强度的工程测量十分简便,精度也较高,并且强度模型的破坏准则非常简明,便于破坏失效的判断;但是由于剩余强度试验不能连续测量,不同疲劳次数后的剩余强度需要大量的试件,耗时耗力;对于不同损伤状态下沥青混合料的剩余强度衰减规律的研究,在国内外文献中鲜有报道。基于这两种定义的损伤变量在描述材料的疲劳损伤特性上的差异,需要提出一种普适性好、可靠性高的损伤变量定义方法,以更好地描述沥青混合料的疲劳损伤特性。本书拟开展沥青混合料的直接拉伸疲劳试验和剩余强度试验研究,建立以刚度和剩余强度为损伤变量的沥青混合料非线性疲劳损伤方程,为更合理地描述沥青混合料非线性疲劳损伤特性奠定基础。

1.2.2 沥青路面轴载换算方法研究

交通量即荷载重复作用次数是路面设计的重要因素。由于轴载和交通量变化很大,且其对路面的影响难于处理,目前所用的设计方法是将不同轴载换算成标准轴载下的重复作用次数。在设计年限内,所有轴载当量作用的总和用累计当量轴次 N_e 表示,该值是沥青路面设计需要的交通参数。

下面对国外沥青路面设计中的轴载换算方法作一归纳小结^[39]:

美国 AASHTO 的轴载换算公式是当今世界大多数路面结构设计方法的基石,AASHTO 方法根据试验路结果回归分析确定当量轴载系数 (EALF),当量系数取决于路面类型、厚度或结构性能及认为路面破坏时的最终状况。计算公式为

$$\lg \left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}} \right) = 4.79 \lg(18 + 1) - 4.79 \lg(L_x + L_2) + 4.33 \lg(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (1.6)$$

其中

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081 \times (L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} \times L_2^{3.23}}, \quad G_t = \lg \left(\frac{4.2 - P_t}{4.2 - 1.5} \right)$$

式中, L_x 为单轴或复轴 (10^3lb); L_2 为轴号 (单轴为 1, 复轴为 2); SN 为结构数; P_t 为路面服务指数允许最低值。

通过对 AASHTO 轴载换算计算公式 (1.6) 的分析和对 AASHTO 给定的换算系数表的统计, 将其简化归纳为

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^4 \tag{1.7}$$

式 (1.7) 与式 (1.6) 有等效性且形式简单, 因此被很多路面设计法所采用。

澳大利亚设计方法确定的标准轴载为单轴双轮、轴重 80kN 的荷载, 造成与标准轴载同样损伤的不同轴型的轴重见表 1.2, 不同路面结构形式的破坏类型不同, 相应的轴载换算公式的指数也不同, 不同指数值见表 1.3。标准轴载重复作用次数 SAR_m 的计算公式为

$$SAR_m = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i} \right)^m \tag{1.8}$$

式中, SAR_m 即造成 m 类损伤等于 i 型轴载 L_{ij} 作用一次相对于标准轴载的作用次数; SL_i 即 i 型轴组的标准荷载, 其大小见表 1.2; L_{ij} 为轴组总荷载; m 对应于 K 种破坏类型的指数见表 1.3。

表 1.2 造成与标准轴载同样损伤的不同轴型的轴重

轴组类型	SAST	SADT	TAST	TADT	TRDT
轴组荷载/kN	53	80	90	135	181

表 1.3 对应于不同破坏类型的损伤指数

设计方法	路面类型	破坏类型	幂指数 m
力学方法	含一层或多层整体性材料路面	沥青层疲劳	5
		无机结合料稳定材料层疲劳	12
		路面变形和车辙	7
经验方法	薄沥青层粒料路面和罩面层	综合破坏	4

日本沥青路面结构设计经验法和理论计算法轴载换算方法相同, 都是计算时将不同轮重换算为 49kN 标准轮重, 求出一天单向 49kN 换算轮数 (N_{49}), 然后计算设计年限内的累计 49kN 换算轮数。轴载换算公式为

$$N_{49} = \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{P_j}{49} \right)^4 \times N_j \right] \tag{1.9}$$