

基于非线性疲劳损伤的沥青路面结构

JIYU FEIXIANXING PILAO SUNSHANG DE LIQING
LUMIAN JIEGOU SHEJI YU GONGCHENG SHIJIAN

设计与工程实践

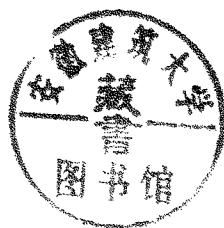
◎ 刘宏富 黄拓 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

基于非线性疲劳损伤的沥青路面结构设计与工程实践

刘宏富 黄 拓 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

·长沙·

图书在版编目 (C I P) 数据

基于非线性疲劳损伤的沥青路面结构设计与工程实践 /
刘宏富, 黄拓编著. --长沙: 中南大学出版社, 2018. 10
ISBN 978 - 7 - 5487 - 1829 - 1

I. ①基… II. ①刘… ②黄… III. ①沥青路面—路面设计—
路面衰坏—研究 ②沥青路面—道路施工—路面衰坏—研究
IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 070909 号

基于非线性疲劳损伤的沥青路面结构设计与工程实践

刘宏富 黄拓 编著

☐责任编辑 韩 雪

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

☐印 装 长沙印通印刷有限公司

☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 11.5 ☐字数 232 千字

☐版 次 2018 年 10 月第 1 版 ☐2018 年 10 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 1829 - 1

☐定 价 68.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

前 言

沥青路面是世界各国主要采用的路面结构类型,沥青混合料和水泥稳定碎石作为沥青路面的主要建筑材料,其疲劳性能直接影响路面的耐久性和使用寿命。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,损伤将不断演化累积,疲劳损伤导致路面材料和结构性能退化直至最终破坏。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,需要进一步的研究并认识路面材料的疲劳损伤过程,建立较好的数学模型来描述复杂的疲劳破坏现象。

本书系统介绍了国内外沥青路面设计方法及路面材料的疲劳损伤研究现状,以损伤力学为理论基础,开展沥青混合料和水泥稳定碎石材料的强度、模量和疲劳试验,揭示其变形特性和模量衰变规律,研究基于刚度衰变的沥青混合料和水泥稳定碎石的非线性疲劳损伤特性,建立一种能考虑损伤程度的沥青路面轴载换算方法;将相关成果应用于工程实践中,修筑试验路段并进行沥青路面结构的力学响应测试和分析。在注重基础理论知识的同时,又强调了理论、试验与工程相结合。

本书共分7章。第1章绪论,总结了国内外沥青路面设计方法、路面材料的疲劳损伤及轴载换算方法研究现状及所存在的问题。第2章基于模量衰变的沥青混合料非线性疲劳损伤特性,分析了不同应力水平直接拉伸疲劳的变形特性,揭示了动模量的幂函数衰变规律,提出了基于动模量衰变的非线性疲劳损伤修正模型;第3章水泥稳定碎石疲劳过程的变形特性及模量衰变规律,提出了考虑拉压差异的四点弯曲疲劳试验方法,揭示了四点弯曲疲劳过程中的拉压应变增长规律及动态拉压模量衰变规律,并建立了水泥稳定碎石拉压动模量幂函数衰变模型;第4章基于拉压不同模量水泥稳定碎石弯拉疲劳损伤特性,揭示了不同应力比条件下的疲劳损伤演化规律,建立了水泥稳定碎石弯曲疲劳的非线性疲劳损伤演化方程,并推导了疲劳损伤方程的解析解;第5章基于非线性疲劳损伤的轴载换算新方法,基于疲劳损伤增量等效原理,推导了基于线性疲劳损伤的轴载换算方

法,建立了一种能考虑损伤程度或加载历史影响的轴载换算新方法;第6章耐久性沥青路面结构设计与力学响应分析,计算并分析了多种工况条件下不同沥青路面结构的受力状态与静态力学响应,基于路面结构受力特征提出耐久性沥青路面结构设计;第7章沥青路面力学响应现场试验研究,开展了基于光纤光栅传感技术的沥青路面结构力学响应测试和分析,揭示了动静载条件下沥青路面各结构层底纵、横向应变演变规律。

本书各部分内容既相对独立,又紧密联系。同时,本书在内容编排和文字处理上尽量做到深入浅出,详略得当,既适合于相关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。

本书作者一直从事沥青路面结构设计与路面材料疲劳损伤特性的研究工作,主持了国家自然科学基金青年基金项目“沥青混合料宏观细观损伤变量及非线性疲劳损伤模型研究”、湖南省自然科学基金项目“基于双模量理论的水泥稳定碎石强度、刚度及疲劳损伤特性研究”及湖南省教育厅科技计划项目“基于性能时变损伤的沥青路面轴载换算新方法”等科研课题。

本书获长沙理工大学资助出版,依托国家自然科学基金项目(51608058、51608055)、湖南省自然科学基金项目(2018JJ3550)、广东省交通厅重大工程类科技项目(2013-01-002)、道路结构与材料交通行业重点实验室(长沙)开放基金项目(kfj120204)的部分研究成果撰写而成。全书凝聚了课题组在沥青路面结构设计与非线性疲劳损伤特性方面的部分研究成果,全书由刘宏富统稿,其中第3章、第4章和第6章由黄拓执笔完成。本书所涵盖的研究工作得到了钱国平教授、吕松涛副教授等的指点与支持,在此表示诚挚的感谢!长沙理工大学道路与铁道工程专业研究生欧阳志泽参与了第3章、第4章的试验工作和数据整理,夏诚东博士参与了第6章的力学响应分析及本书的编辑整理工作,潘勤学博士等参与了第7章的现场测试与数据整理,在此致以真诚的谢意!感谢所有涉及本书数据整理、研究及编写人员的辛劳付出!

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,众多基础问题仍未解决,鉴于作者水平有限且时间仓促,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。

编 者

2018年3月

目 录

第1章 绪 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 半刚性基层材料强度、模量及疲劳特性研究	(7)
1.2.3 沥青路面轴载换算方法研究	(13)
1.2.4 沥青路面设计方法研究现状及分析	(19)
第2章 基于模量衰变的沥青混合料非线性疲劳损伤特性	(23)
2.1 原材料试验及配合比设计	(23)
2.2 沥青混合料直接拉伸强度试验	(26)
2.3 直接拉伸疲劳试验结果及传统疲劳方程的建立	(28)
2.3.1 疲劳试验方法及方案设计	(28)
2.3.2 疲劳试验结果及传统疲劳方程的建立	(28)
2.4 直接拉伸疲劳变形特性分析	(31)
2.4.1 循环应力应变滞回曲线	(31)
2.4.2 应变随循环寿命比变化曲线	(35)
2.5 直接拉伸疲劳动模量衰变模型的建立	(39)
2.5.1 动模量初始值的确定	(39)
2.5.2 破坏时动模量的确定	(40)
2.5.3 动模量衰变模型的建立	(41)
2.6 基于刚度衰变的疲劳损伤模型的建立	(45)
2.6.1 以模量定义的疲劳损伤变量	(45)
2.6.2 临界疲劳损伤的计算	(47)
2.6.3 疲劳损伤修正模型的提出及验证	(50)

2.7 疲劳损伤非线性累积的试验验证	(56)
2.7.1 两级荷载疲劳试验设计	(56)
2.7.2 两级荷载疲劳试验结果分析	(57)
2.8 本章小结	(59)
第3章 水泥稳定碎石疲劳过程的变形特性及模量衰变规律	(61)
3.1 考虑拉压差异的四点弯曲疲劳试验方法	(61)
3.1.1 试件制备及前期处理	(61)
3.1.2 水泥稳定碎石四点弯曲疲劳试验	(62)
3.2 疲劳过程中的拉压应变发展规律	(63)
3.2.1 疲劳过程变形发展阶段	(64)
3.2.2 破坏极限应变值的确定	(65)
3.2.3 初始应变值的确定	(68)
3.2.4 应变稳定阶段增长速率分析	(70)
3.3 疲劳过程中的拉压模量衰变规律	(72)
3.3.1 模量衰变规律阶段划分	(73)
3.3.2 模量初始值的确定	(74)
3.3.3 破坏极限模量值确定	(74)
3.3.4 模量衰变模型的建立	(76)
3.4 疲劳过程中的中性面位置变化规律	(78)
3.4.1 中性面位置变化规律阶段划分	(79)
3.4.2 破坏时中性面的位置	(79)
3.4.3 中性面初始位置的确定	(81)
3.4.4 中性面相对位置稳定阶段增长速率分析	(83)
3.5 本章小结	(84)
第4章 基于拉压不同模量水泥稳定碎石弯拉疲劳损伤特性	(86)
4.1 四点弯曲试验条件下水泥稳定碎石疲劳方程的建立	(86)
4.1.1 疲劳方程理论	(86)
4.1.2 疲劳试验结果	(87)
4.1.3 疲劳方程的建立	(87)
4.2 基于拉压模量衰变的水泥稳定碎石疲劳损伤方程的建立	(89)
4.2.1 疲劳损伤理论	(89)
4.2.2 疲劳损伤方程的建立	(91)
4.3 矩形截面梁疲劳损伤方程的解析解推导及应用	(93)

4.3.1	疲劳损伤方程解析解的推导	(93)
4.3.2	疲劳损伤方程解析解的应用	(96)
4.4	本章小结	(98)
第5章	基于非线性疲劳损伤的轴载换算新方法	(99)
5.1	基于线性疲劳损伤的轴载换算方法	(99)
5.2	基于非线性疲劳损伤轴载换算新方法的建立	(102)
5.3	轴载换算新方法 with 规范方法的比较	(105)
5.4	应用轴载换算新方法的算例	(111)
5.4.1	按规范方法的轴载分析	(111)
5.4.2	按新方法的轴载分析	(112)
5.5	本章小结	(115)
第6章	耐久性沥青路面结构设计与力学响应分析	(116)
6.1	车载作用下沥青路面结构力学计算方法	(116)
6.1.1	圆形垂直均布荷载下多层弹性体系理论	(116)
6.1.2	多轮荷载的叠加	(117)
6.2	不同沥青路面结构力学响应分析	(119)
6.2.1	计算模型及相关参数	(119)
6.2.2	各结构层底拉应力、拉应变分析	(123)
6.2.3	各结构层拉应力、拉应变随深度变化规律分析	(135)
6.3	不同沥青路面结构力学响应的对比	(137)
6.4	本章小结	(142)
第7章	沥青路面力学响应现场试验研究	(144)
7.1	沥青路面各结构层光纤光栅传感器现场布设	(144)
7.1.1	光纤光栅应变传感器现场布设工艺	(144)
7.1.2	传感器现场布置	(146)
7.2	不同轴载下沥青路面结构静力学响应现场试验研究	(149)
7.2.1	静载试验目的	(149)
7.2.2	静载试验方案	(149)
7.2.3	静载试验结果及分析	(151)
7.3	动载下沥青路面结构动力学响应现场试验研究	(159)
7.3.1	动载试验目的	(159)
7.3.2	动载试验方案	(159)

7.3.3 动载试验结果及分析	(160)
7.4 本章小结	(170)
参考文献	(172)

第1章 绪论

1.1 问题的提出及研究意义

公路交通是为国民经济发展和人民生活服务的公共基础设施,是衡量一个国家经济实力和现代化水平的重要标志。国民经济的发展与道路发展息息相关,并促使着道路交通基础设施的建设不断走向新的篇章。截至2017年底,我国公路通车总里程477万公里,其中高速公路13.6万公里,绝大部分为沥青路面。

沥青路面是我国高速公路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,损伤将不断演化累积,疲劳损伤导致路面材料和结构性能的退化直至最终被破坏。确保沥青路面在设计年限内不发生整体性结构破坏是沥青路面设计的根本目的,然而,我国在用的高速公路沥青路面大多在使用8~10年后即出现明显的结构性破坏,须进行铣刨罩面或加铺,从而引起社会的非议,大家认为我国沥青路面设计、施工质量不高,造成路面的早期破坏。毫无疑问,我国沥青路面设计与施工水平尚有待进一步提高,但上述看法却也存在着某些偏见与认识上的误区。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的经典分析方法,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路面材料的疲劳损伤过程,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。

经典的疲劳分析,对描述沥青路面结构与材料的疲劳性能劣化准确性是有限的,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,最重要、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。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。

现有应用于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积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,一台后轴重力为 150 kN 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,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,认为两种情况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。

本书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,开展沥青混合料和水泥稳定碎石材料的强度、模量和疲劳试验,揭示其变形特性和模量衰变规律,研究基于刚度衰变的沥青混合料和水泥稳定碎石的非线性疲劳损伤特性,提出路面材料的非线性疲劳损伤演化方程,建立一种能考虑损伤程度的轴载换算方法;将相关成果应用于工程实践,修筑试验路段并进行沥青路面结构的力学响应测试和分析。研究成果对于推进沥青路面轴载换算方法的发展、改进和完善沥青路面结构设计具有重要理论意义和应用价值。

1.2 国内外研究现状

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积,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,直至最后被破坏。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和研究报告,并把这些成果用于沥青路面结构设计理论与设计规范。

国际材料与结构研究实验联合会(RILEM) TC 101 - BAT 和 TC 152 - PBM 分会组织进行了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,两个分会组织一致认为,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。

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积,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。

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。

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,由于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。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。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)。Amit Bhasin 等(2009)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。

Jaeseung Kim 和 Randy C. West(2010)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。他们提出了一种可将此模型适用于间接拉伸试验的解析方法,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。

Didier Bodin 等(2002)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。Zhi Suo 和 Wing Gun 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。

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

发生变化,如模量、韧性、强度、密度等量值的降低,可以根据这些物理力学参数的变化来度量材料的损伤。

Robert Lundstrom 等(2004)通过对三种不同针入度的沥青混合料在三种温度下的圆柱体拉压疲劳试验,结果发现: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较小,针入度较小的沥青混合料的模量衰减幅度也较小;同时对传统的应变控制疲劳试验中的模量衰减到初始模量的 50% 作为疲劳失效准则提出了质疑,并对疲劳破坏的确定提出了修正方法。

法国里昂大学 H. Di Benedetto 教授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比对试验,疲劳试验方法及参数见表 1.1。选择用动态模量衰变分析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、LCPC 模型、Partial Healing 模型、Work Potential Theory 模型。ENTPE 方法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。文献不再以线性损伤为假定,而是基于刚度衰减提出了一种非线性疲劳损伤模型:

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

式中: D ——疲劳过程中的损伤;

A 和 B ——应变幅值的线性函数;

E_0 和 E_N ——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建立的,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:

$$dD/dN = f(D) \dot{\epsilon}^\beta \quad (1.2)$$

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 ——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建立的衰变模型。

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:

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

式中: D ——基于刚度衰变的疲劳损伤;

ΔW_{dis} ——耗散能, T 为循环周期。

基于 Work Potential Theory 的损伤模型可描述为:

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

式中: W^R ——伪应变能密度函数, $W^R = W^R(\varepsilon^R, D)$;

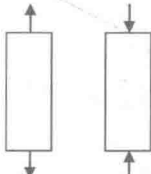
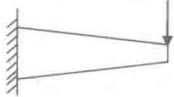
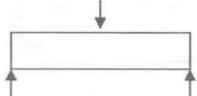
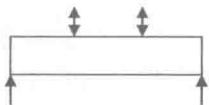
ε^R ——伪应变;

D ——损伤变量;

α ——材料常数。

H. Di Benedetto 教授研究认为, 通过建立连续损伤力学的模型能更好地描述其本质的疲劳损伤特性, 指出对连续损伤模型还需作进一步的研究, 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。

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

国内沥青混合料疲劳损伤研究起步相对较晚,但是学者们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,特别是沥青混合料非线性疲劳损伤演化和累积是研究的热点。

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。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。唐雪松教授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。周志刚教授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。吕松涛博士建立了基于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积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依据。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。

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。孙志林博士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。

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。对曲线族进行进一步分析后,归纳得出了沥青混合料疲劳损伤的非线性演化的统一模型。

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积耗散能与疲劳寿命的影响。结果表明:总累积耗散能与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。

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;刘业敏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。

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着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来描述损伤程度,目前应用最多的损伤定义是基于模量的衰减;可在疲劳试验过程中连续测量模量衰变而不会影响材料的性能,模量随着材料内部损伤的不断演化与累积而下降,因此它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。

1.2.2 半刚性基层材料强度、模量及疲劳特性研究

1. 半刚性基层材料强度

无机结合料处治材料的强度,有些是采用 CBR 指标表征的。但由于 CBR 主要为表征路基土承载力的指标,其数值一般低于 100,而无机结合料处治材料的 CBR 值往往会超出很多,因而,不宜采用这一指标来表征水泥稳定碎石的强度。

半刚性基层材料的抗压强度的获取一般通过无侧限抗压试验进行。这一指标可用于评价材料强度的高低,不适用于结构设计。而由于半刚性材料存在拉、压强度差异性,抗拉强度远远低于抗压强度,因而,宜用抗拉强度来作为表征指标。抗拉强度一般通过直接拉伸试验、间接拉伸实验和弯拉试验得到,由于直接拉伸试验过程困难,试件难于对中,甚至出现偏心受拉,导致采用者甚少。间接拉伸试验操作简单,但试验精度相对较差。弯拉试验与野外路面实际受荷状况相似,因而,采用弯拉试验测定水泥稳定碎石强度较为合适。

弯拉强度与无侧限抗压强度之间的关系研究结论不一:Otte 归纳了 7 位研究者的结果,指出二者比例为 0.12 ~ 0.43,均值约为 0.2,混合料的弯拉强度与抗压强度之间的关系受其强度值大小的影响:强度较低时,抗压强度约为弯拉强度的 3 倍;强度较高时,抗压强度约为弯拉强度的 5 倍。Mitchell 建议两者关系为:

$$\sigma_b = 0.51 (\sigma_\mu)^{0.88} \quad (1.6)$$

式中: σ_b ——弯拉强度;

σ_μ ——无侧限抗压强度, kPa。

安平等研究发现了离析对水泥稳定碎石混合料的强度有重要影响,随着离析

程度的增大,水泥稳定碎石的7 d 抗压强度和劈裂强度均近似呈线性降低。当混合料为中度离析时,水稳碎石的抗压强度降低 27.9%,由 4.3 MPa 降低为 3.1 MPa;劈裂强度降低 32%,由 0.50 MPa 降低为 0.34 MPa。

钱国平等人研究探讨了磷渣微粉代替部分水泥作为水泥稳定碎石路面基层材料的可行性,研究了磷渣微粉给水泥稳定碎石基层强度带来的影响。结果表明:用磷渣微粉代替部分水泥的水泥稳定碎石强度虽然有所降低,但仍然符合高速公路路面基层的强度要求。

2. 半刚性基层材料弹性模量

无机结合料处治材料在荷载作用下的应力-应变曲线,在应力小于弯拉强度约 35% 或应变小于断裂应变约为 25% 时出现线性关系,超出此限制时,集料同细料和水泥基质间的黏结开始逐步丧失,混合料内出现微裂隙,并产生永久应变,应力-应变曲线呈现出非线性和非弹性特性。进行结构层响应分析时,通常仍以低应力(或应变)级位时的线性关系表征其应力-应变关系,称做弹性模量。

无机结合料处治材料的弹性模量,可通过室内弯拉试验测定得到,它随混合料组成、水泥用量、龄期、密实度和养生条件的不同变动很大,从 3000 MPa(水泥处治天然砾石)到 3800 MPa(高质量水泥处治砾石)。

另外 Otte 进行了 42 组水泥处治碎石和 63 组水泥处治砾石的弯拉试验,建立了弯拉模量与弯拉强度的经验公式:

水泥处治碎石:

$$E_b = 8\sigma_b + 3500 \quad (1.7)$$

水泥处治砾石:

$$E_b = 10\sigma_b + 1000 \quad (1.8)$$

式中: E_b ——弯拉弹性模量(MPa);

σ_b ——弯拉强度(kPa);

以式(1.6)代入式(1.7)和式(1.8),可得到弯拉弹性模量和无侧限抗压强度之间的经验关系:

水泥处治碎石:

$$E_b = 4.16(\sigma_\mu)^{0.88} + 3485 \quad (1.9)$$

水泥处治砾石:

$$E_b = 5.13(\sigma_\mu)^{0.88} + 1098 \quad (1.10)$$

式中: σ_μ ——无侧限抗压强度, kPa。