

DAMAGE ASSESSMENT  
AND APPLICATION OF  
**SEMI-RIGID**  
**BASE**



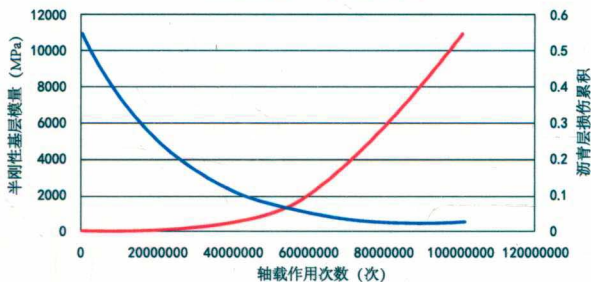
# 半刚性基层 损伤评价与工程应用

韦金城 王 林 余四新 韩文扬 马士杰 等 著



路面结构性能分析模型示例

— 半刚性基层模量 — 沥青层损伤累积



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

# 半刚性基层损伤评价 与工程应用

韦金城 王 林 余四新 韩文扬 马士杰 等 著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书对国内外半刚性基层疲劳预估模型及其参数确定的理论、方法进行了深入评析,结合试验检测分析结果,改进了半刚性材料室内疲劳损伤测试方法,建立用弯拉模量衰减率和弯拉强度比两项指标联合表征的半刚性材料疲劳损伤模型,基于室内 ALF 加速加载试验和现场实体工程观测验证,得出了反映路面结构实际损伤状态的半刚性基层结构疲劳损伤模型及其支撑参数,提出了半刚性基层沥青路面控制疲劳设计方法,并编写了相应的程序。半刚性基层沥青路面亟须突破长寿命路面结构设计的技术瓶颈,即结构性能评价中反映实际状态的疲劳损伤模型及其支持参数的建立方法和应用,这是半刚性基层沥青路面的共性关键技术。本书内容对路面结构研究、设计、半刚性材料优化设计及施工具有重要的指导意义。

本书可供相关院校师生以及路面设计、检测、施工与研究人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

半刚性基层损伤评价与工程应用 / 韦金城等著. —  
北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.12

ISBN 978-7-114-14279-6

I. ①半… II. ①韦… III. ①半刚性基层—损伤(力学)—控制 IV. ①U416.223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 258912 号

书 名:半刚性基层损伤评价与工程应用

著 者:韦金城 王 林 余四新 韩文扬 马士杰 等

责任编辑:潘艳霞 尤 伟

责任校对:刘 芹

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.25

字 数:264千

版 次:2019年4月 第1版

印 次:2019年4月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14279-6

定 价:80.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

## 本书编写组

主 任:韦金城 王 林 余四新 韩文扬

马士杰

编写人员:盛余祥 安 平 闫翔鹏 吴立强

曾国东 丁冠旭 刘甲荣 郭立成

高雪池 郭建民 李兴锋 王爱涛

陈鲁川 侯 伟 艾广建 张国宁



# 前言

沥青路面半刚性基层疲劳预估模型一直沿用单一疲劳指标模式,不能适应重载和气候环境综合作用下半刚性基层沥青路面结构性能评价的要求。半刚性基层沥青路面亟须突破长寿命路面结构设计的技术瓶颈,即结构性能评价中反映实际状态的疲劳损伤模型及其支持参数的建立方法和应用,这是半刚性基层沥青路面的共性关键技术。

本书通过理论与试验研究,改进了半刚性材料室内疲劳损伤测试方法,建立用弯拉模量衰减率和弯拉强度比两项指标联合表征的半刚性材料疲劳损伤模型,基于室内 ALF (Accelerated Loading Facility) 加速加载试验和现场实体工程观测验证,得出了反映路面结构实际损伤状态的半刚性基层结构疲劳损伤模型及其支撑参数。

路面材料参数及疲劳损伤模型的获取是进行路面结构损伤分析的基本前提。本书第 1 章、第 2 章分别阐述了路面材料参数及其损伤模型国内外研究现状、材料损伤理论。第 3 章介绍了现行半刚性基层材料不同室内疲劳试验方法、特点及其影响因素,并在此基础上,针对现行半刚性材料疲劳试验结果离散性和变异性大的技术难题,通过不同室内疲劳试验方法对比分析,提出了用同层位梁试件弯拉强度确定疲劳荷载的疲劳损伤测试方法,提高了试验结果的可靠性;针对重复加载致梁体沿长度方向模量不均匀的问题,提出

了测量梁试件中段 1/3 区域挠度差的重复加载弯拉模量测试方法,实现半刚性材料不同疲劳损伤程度弯拉模量的测试。第 4 章详细阐述了疲劳损伤模型的构建及其数值模拟。基于重复加载疲劳试验和连续损伤力学原理,建立了用弯拉模量衰减指标和疲劳方程联合表征的半刚性材料疲劳损伤模型。第 5 章介绍了半刚性材料模量参数试验方法,通过对不同试验理论与方法测试比较,提出了基于试件中段应变测量的半刚性材料单轴压缩弹性模量简单试验方法,提高了模量测试结果的可靠性,解决了现行试验方法模量参数与实际不符的技术难题。第 6 章基于理论与现场检测验证,提出了半刚性材料层设计期末疲劳损伤状态下的有效模量确定方法,为结构损伤全过程分析参数输入提供依据。综合重载 ALF 加速加载试验路与路面力学响应传感测试系统对半刚性基层疲劳损伤模型进行观测验证,明确了半刚性基层结构损伤演变过程及不同阶段的状态,提出了疲劳开裂产生阶段与裂缝扩展阶段时长的关系。第 7 章介绍了适用于半刚性材料与结构在现场环境作用下的响应测试新技术,基于该技术得到了半刚性基层结构现场温度变化引起的应力应变响应特征。第 8 章详细介绍了半刚性基层沥青路面结构控制疲劳设计方法,并列举了路面结构损伤分析实例。第 9 章综合半刚性基层材料特性及其在路面结构中的力学响应特点,提出了半刚性基层材料优化设计及施工关键技术。

作者在主持和参与多项省部级交通科技项目研究,并负责国内多条高速公路及国省道路面结构设计、检测、现场技术服务工作的过程中,经过多年的努力,进行了大量的试验和分析工作,积累了宝贵的经验和数据,部分成果已纳入国家、行业、地方标准。基于此,作者将对半刚性基层损伤理论及应用的认知撰写成书,希望本书能为业内的同仁们提供启示和帮助。

本书如有未尽善之处,希望有关院校及设计、检测、施工单位读者提出宝贵意见,以便及时修改完善。

作者

2017 年 2 月



# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.3 本书主要内容 .....	15
<b>第 2 章 半刚性基层材料疲劳损伤分析基本理论</b> .....	16
2.1 损伤力学理论 .....	16
2.2 疲劳损伤定义 .....	18
2.3 疲劳损伤特点 .....	19
2.4 疲劳累积损伤的分类 .....	19
<b>第 3 章 半刚性基层材料室内疲劳试验影响因素</b> .....	24
3.1 弯曲疲劳试验原理与方法 .....	24
3.2 疲劳荷载确定影响因素及方法 .....	29
3.3 疲劳关键参数测试的影响及方法 .....	35
<b>第 4 章 半刚性材料弯曲疲劳损伤模型及数值模拟</b> .....	40
4.1 疲劳损伤模型构建理论 .....	40
4.2 模量衰减模型理论基础 .....	42
4.3 疲劳方程构建 .....	45
4.4 模量衰变模型构建 .....	51
4.5 半刚性基层材料小梁疲劳损伤数值模拟 .....	56

<b>第 5 章</b>	<b>半刚性材料疲劳损伤模型的结构参数确定</b>	78
5.1	半刚性材料层模量简单试验方法	78
5.2	半刚性基层模量反演方法	84
5.3	沥青层反算模量与室内模量比较	93
5.4	半刚性基层损伤状态检测	98
5.5	半刚性基层结构土基模量确定	112
5.6	半刚性基层与沥青层间接触状态	119
5.7	结构分析材料强度简单确定方法	133
<b>第 6 章</b>	<b>半刚性基层结构疲劳损伤观测验证</b>	137
6.1	半刚性基层沥青路面的加速加载试验	137
6.2	半刚性基层疲劳损伤分析与验证	147
<b>第 7 章</b>	<b>沥青路面温度场及其对半刚性基层损伤影响</b>	165
7.1	沥青路面实测温度场	165
7.2	半刚性基层损伤温度场影响	173
<b>第 8 章</b>	<b>半刚性基层沥青路面结构控制疲劳设计方法</b>	185
8.1	沥青层疲劳开裂标准	185
8.2	基于模量衰减模型的参数输入	186
8.3	半刚性基层沥青路面控制疲劳设计流程	190
8.4	路面结构损伤分析实例	192
<b>第 9 章</b>	<b>半刚性基层材料优化设计及施工关键技术</b>	195
9.1	水泥稳定碎石优化设计	195
9.2	双层连续摊铺技术	196
9.3	施工技术要点	199
9.4	技术指南	207
<b>附录</b>	<b>无机结合料稳定材料室内单轴压缩弹性模量 试验方法(侧面法)</b>	221
<b>参考文献</b>		225

# 第 1 章 概 述

## 1.1 研究背景

因半刚性基层结构层板体性好,承载力大,加之原材料来源广,造价低廉,半刚性基层沥青路面结构一直是我国高速公路的主要结构形式。与欧美国家相比,半刚性基层沥青路面的大规模应用是我国的一大创举。但是,随着交通量和交通荷载的不断增加,不少半刚性基层沥青路面出现了疲劳、温缩开裂等早期结构破坏现象<sup>[1,2]</sup>。我国拥有近三十年半刚性基层沥青路面建设和使用经验,在新的形势下,有必要总结、持续研究和创新,保持该项技术的领先地位,这对提高我国沥青路面技术水平,促进行业健康持续发展有重要意义。目前,半刚性基层沥青路面亟须突破长寿命路面结构设计的技术瓶颈,即结构性能评价中的疲劳损伤模型及支撑疲劳损伤模型的参数问题。

在沥青价格持续攀升,柔性基层沥青路面造价不断提高的背景下,欧美国家越来越重视半刚性基层沥青路面的研究和应用。欧洲于 2010 年编制了《欧洲长寿命半刚性路面技术指南》<sup>[3]</sup>,但半刚性基层沥青路面结构设计技术并没有获得明显突破。美国也在其新《路面力学经验设计指南》(MEPDG)中纳入了半刚性基层沥青路面分析模块<sup>[4]</sup>,但由于没有可靠和完善的分析模型及缺乏大量实体工程的验证,至今 MEPDG 半刚性基层分析模块仍无法运行。为了改善现行的沥青路面结构设计方法,2004 年交通部西部交通建设科技项目管理中心开始立项开展研究,共经历了两个阶段,即 2004—2007 年和 2009—2011 年<sup>[5,6]</sup>,提出了我国基于多指标的沥青路面设计方法,但是在半刚性基层疲劳预估模型方面,还继续沿用单一疲劳指标模式<sup>[7,8]</sup>。

在实际工程中,半刚性材料强度变异较大,按照现行国内外疲劳试验方法进行的疲劳试验,难以得到合理可靠的基于应力比(或应力、应变比)参数的疲劳方

程<sup>[9]</sup>。现行国内外疲劳预估模型指标单一,仅有应力比(或应力、应变比)和荷载作用次数两项参数,没有考虑模量衰减对路面结构性能的影响<sup>[10-12]</sup>。通常用一个不变的初始模量或当量模量(如南非方法)代替整个基层疲劳损伤过程的模量水平,无法反映路面结构实际的受力和损伤状态,这就大大降低了沥青路面设计的可靠性,导致设计过于保守或趋于风险,对路面结构疲劳起不到有效的控制作用。

在基于力学—经验的路面结构设计中要求材料和结构模量参数与力学分析理论的结合能够计算出与路面实际受力状态相同的力学响应。由于试验方法的问题,我国采用的模量大小与材料实际刚度不一致,造成力学响应计算结果存在诸多问题,准确性难以保证,疲劳寿命分析与实际偏差较大,弯沉设计指标基本上不起控制作用<sup>[7,13]</sup>。

半刚性基层处于沥青层下面,位置隐蔽,损伤观测比较困难,因此,其材料和结构损伤模型验证和标定问题一直没有得到很好解决,导致材料和结构损伤状态及其参数与实际偏差较大。

针对上述问题,本书从半刚性基层材料疲劳损伤模型研究着手,通过理论与试验研究,建立能够反映路面结构实际损伤状态的半刚性基层材料与结构疲劳损伤模型及其支撑参数,实现材料与结构疲劳损伤的仿真和数值模拟。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 疲劳损伤研究现状

疲劳损伤模型是指结构力学响应指标与疲劳性能(荷载加载次数、开裂等)的计算关系模型。对半刚性材料疲劳损伤模型,国内外已经做了大量研究工作<sup>[6,11,14,15]</sup>。但由于影响疲劳的因素多而复杂,现有疲劳损伤模型还存在很多局限,例如,疲劳预估模型指标较单一、疲劳指标与模量衰变没有建立联系、疲劳预估模型与实际偏差大等。

半刚性材料疲劳预估模型响应指标曾经采用曲率半径、应变水平、应力水平、应力比、强度等。拉森(Larsen)和努斯鲍姆(Nussbaum)<sup>[16]</sup>最早研究了水泥稳定材料的疲劳特性。在研究中他们试图模拟水泥稳定材料在车辆荷载作用下的受力状态,通过在梁试件底部垫橡胶垫模拟土基的支撑,通过变换橡胶垫的数量模拟不同的土基承载力。研究共对三种水泥稳定材料进行疲劳试验,两种粗级配,一种细级配。疲劳方程采用曲率半径作为指标,模型见式(1-1)。疲劳试验破坏的标准是试件出现可见裂纹。研究结果的一个重要结论是土基承载力

(或强度)对疲劳没有影响(疲劳主要与曲率半径有关)。

$$\frac{R_c}{R} = aN^{-b} \quad (1-1)$$

式中:  $R_c$ ——强度试验试件破坏时的曲率半径;

$R$ ——常应力荷载作用下试件的初始曲率半径;

$N$ ——疲劳破坏时的荷载作用次数;

$a, b$ ——疲劳方程常数。

比勒陀利(Pretorius)<sup>[17]</sup>研究了一种水泥土的疲劳行为,比较了三种疲劳预估模型,即曲率半径模型、初始应变模型、初始应力模型,结果显示初始应变模型相关性最好。研究中观察到,在常应力作用下应变水平大部分时间保持相对稳定,直到破坏前才突然增大。不管初始应变水平如何,破坏应变总是在  $130 \sim 170 \mu\epsilon$  范围内,而静态荷载作用下破坏应变为  $200 \mu\epsilon$  左右。

目前,大多数研究和规范采用的是应力比疲劳预估模型,如图 1-1 所示。美国伊利诺伊州交通部(Illinois DOT)、美国煤灰协会(American Coal Ash Association)及美国最新《路面力学经验设计指南》(MEPDG)均采用以下应力比疲劳预估模型:

$$\lg N = \frac{0.9722 - S}{0.0825} \quad (1-2)$$

式中:  $N$ ——疲劳荷载作用次数;

$S$ ——应力比。

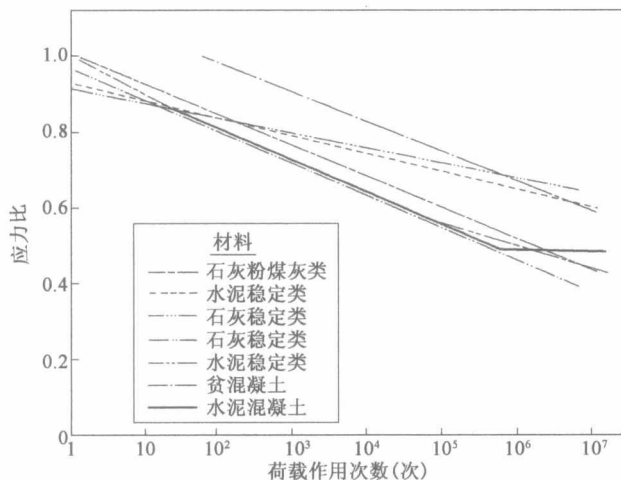


图 1-1 应力比疲劳预估模型汇总<sup>[18]</sup>

拉德(Road)<sup>[19,20]</sup>的研究显示,对于给定厚度的半刚性基层,假定弯拉强度和抗压强度不变,抗压模量与抗拉模量比( $E_c/E_t$ )减小,将增强结构层抵抗裂缝

的产生和扩展。压拉模量比( $E_c/E_t$ )对裂缝产生和扩展的影响(荷载作用超过  $10^6$  次)如图 1-2 所示。

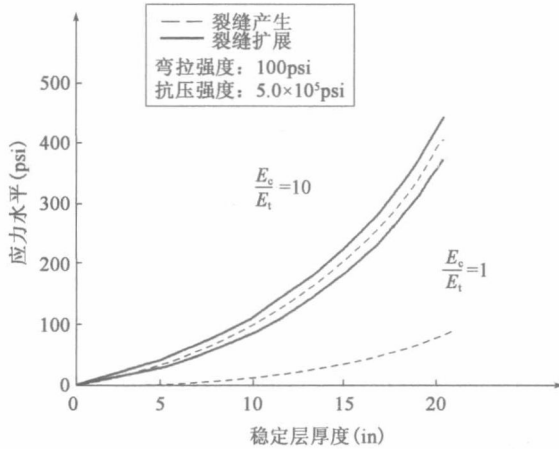


图 1-2 压拉模量比( $E_c/E_t$ )对裂缝产生和扩展的影响<sup>[20]</sup>

1psi=6895Pa; 1in=0.0254m

利特(Little)<sup>[21]</sup>建议在路面结构设计中将石灰稳定材料的弯拉应力比控制在 0.5 以内,以最大限度减小裂缝产生的可能性。由于石灰稳定材料的弯拉强度大约为抗压强度的 25%,所以荷载在石灰稳定层底产生的弯拉应力应不大于抗压强度的 12.5%。

壳牌的路面设计方法中包括弯拉应力疲劳标准,壳牌设计方法和法国所用的半刚性结合料稳定材料的典型疲劳方程为<sup>[11]</sup>:

$$\sigma = 1.332 - 0.108 \lg N \quad (1-3)$$

澳大利亚的路面设计方法以拉应变为标准,对不同的水泥稳定材料规定了设计用的疲劳方程<sup>[11]</sup>:

模量为 2000MPa

$$N = \left( \frac{280}{\mu\epsilon} \right)^{18} \quad (1-4)$$

模量为 5000MPa

$$N = \left( \frac{200}{\mu\epsilon} \right)^{18} \quad (1-5)$$

模量大于 10000MPa

$$N = \left( \frac{150}{\mu\epsilon} \right)^{18} \quad (1-6)$$

南非 Otte 等对半刚性材料提出的疲劳方程为<sup>[12]</sup>：

$$\frac{\sigma_f}{f_r} = 1.0 - 0.111N_f \quad (1-7)$$

式中： $\sigma_f$ ——弯拉应力；

$f_r$ ——弯拉强度；

$N_f$ ——疲劳破坏时的荷载作用次数。

南非路面设计方法中提出的路面行为阶段的概念与半刚性材料层的疲劳开裂有关<sup>[12]</sup>。由于水泥处治层分有效疲劳开裂、轻微破碎和大量破碎三个阶段，其模量在各个阶段也不同，路面结构分阶段进行分析。对于有一层水泥稳定碎石的结构，水泥稳定碎石在有效疲劳阶段的模量是一个固定值，当水泥稳定碎石进入破碎阶段后其模量减小到类似粒料的模量。因此路面结构承载力分两阶段分析，路面结构的寿命为两阶段寿命之和[图 1-3a)]。同理，有两层水泥稳定碎石的结构，水泥稳定碎石底基层先达有效疲劳阶段结束后，水泥稳定碎石的有效疲劳开裂阶段开始，当水泥稳定碎石的有效疲劳阶段结束后，两层水泥稳定碎石作为粒料层进行分析，因此路面分析分三个阶段进行，路面结构寿命为三个阶段寿命之和[图 1-3b)]。

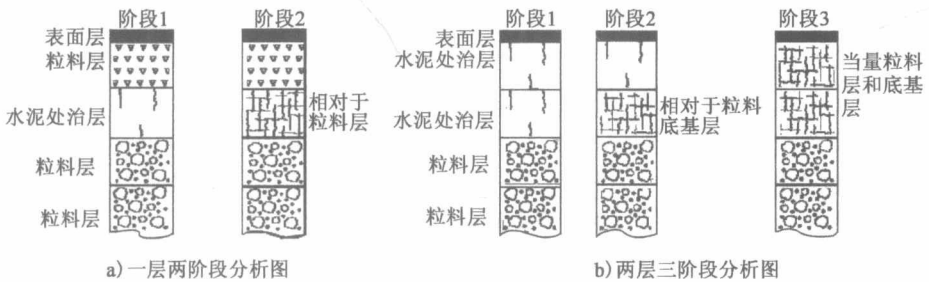


图 1-3 路面的行为阶段图<sup>[12]</sup>

我国早在“七五”期间的“高等级公路半刚性基层沥青路面结构设计和抗滑表层的研究”专题曾对 6%水泥砂砾和 20:80 石灰粉煤灰(1:4)砂砾进行了梁式试件弯曲疲劳试验，试验得出的疲劳方程如下<sup>[22]</sup>：

(1) 水泥砂砾

50%存活率

$$\lg N_f = 12.114 - 10.091\sigma/R_b$$

95%存活率

$$\lg N_f = 11.841 - 8.729\sigma/R_b$$

(2) 二灰砂砾

50%存活率

$$\lg N_f = 14.121 - 14.178\sigma/R_b$$

95%存活率

$$\lg N_f = 13.271 - 13.972\sigma/R_b$$

“八五”期间的“高等级公路半刚性基层沥青路面典型结构设计研究”专题和“沥青路面结构的可靠性研究”课题又做了四种半刚性材料的疲劳试验,试验得出的四种半刚性材料的疲劳寿命预估方程如下<sup>[22]</sup>:

(1)水泥碎石

50%存活率

$$\lg N_f = 18.315 - 15.813\sigma/R_b$$

95%存活率

$$\lg N_f = 16.645 - 15.813\sigma/R_b$$

(2)水泥土

50%存活率

$$\lg N_f = 12.797 - 11.275\sigma/R_b$$

95%存活率

$$\lg N_f = 12.229 - 11.275\sigma/R_b$$

(3)石灰土

50%存活率

$$\lg N_f = 16.114 - 14.100/R_b$$

95%存活率

$$\lg N_f = 14.254 - 14.100/R_b$$

(4)二灰土

50%存活率

$$\lg N_f = 7.107 - 4.493/R_b$$

95%存活率

$$\lg N_f = 6.250 - 4.493/R_b$$

为便于应用,将水泥碎石、水泥土、二灰砂砾的疲劳寿命预估方程用一个方程来表示,即

$$\lg N_f = 15.000 - 14.286/R_b$$

试验表明,半刚性基层材料的力学特性接近于线弹性材料,在疲劳试验过程中,残余应变随荷载作用次数的增加而增大,但与回弹应变的比值很小,特别是在中、长寿命区,残余应变更小。

我国旧版《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014—1997)将各种半刚性材料的疲劳方程按稳定集料类、稳定土类分别进行整理、回归,得出如下疲劳方程<sup>[23]</sup>:

无机结合料稳定集料类

$$\sigma/S = 2.8571N_e^{-0.11}$$

无机结合料稳定细粒土类

$$\sigma/S = 2.2222N_e^{-0.11}$$

武和平也采用弯曲疲劳试验的方法对四种半刚性基层材料的疲劳性能做了研究<sup>[24]</sup>:

水泥碎石

$$\lg N_f = 15.400 - 15.81\sigma/S$$

水泥土

$$\lg N_f = 10.99 - 11.28\sigma/S$$

石灰土

$$\lg N_f = 13.01 - 14.10\sigma/S$$

二灰土

$$\lg N_f = 5.01 - 4.49\sigma/S$$

叶国铨采用劈裂疲劳试验的方法,试件采用 10cm×10cm 的圆柱体试件对水泥砂砾(7:93)的疲劳性能做了研究<sup>[25]</sup>:

$$\sigma/S = 1.1940 - 0.0863 \lg N_f$$

王昌衡用弯曲疲劳试验对水泥土进行了疲劳性能试验研究,得到存活率 50% 的疲劳方程<sup>[26]</sup>:

$$S_f/S = 1.13199N_f^{-0.03828}$$

刘忠根对水泥砂砾和二灰碎石的疲劳性能也做了研究<sup>[27]</sup>:

水泥砂砾(5:95)

$$\sigma/S = 1.0924 - 0.09851 \lg N_f$$

二灰碎石(8:32:60)

$$\sigma/S = 1.0281 - 0.05851 \lg N_f$$

二灰碎石(10:40:50)

$$\sigma/S = 0.9917 - 0.04321 \lg N_f$$

沙爱民教授采用弯曲疲劳试验对半刚性基层材料做了大量研究(采用的试件尺寸为 100mm×100mm×400mm,采用应力加载控制方式,加载频率为 8Hz),得到的疲劳方程<sup>[28]</sup>如下:

石灰砂砾(7:93)

$$S_f/S=0.9989N_f^{-0.0104}$$

石灰砂砾(5:95)

$$S_f/S=1.0736N_f^{-0.0248}$$

水泥砂砾(5:95)

$$S_f/S=1.0137N_f^{-0.0232}$$

二灰砂砾(5:15:80)

$$S_f/S=1.0599N_f^{-0.0496}$$

## 1.2.2 损伤模型参数的研究现状

### 1) 模量确定方法

对半刚性材料,选择一个合适的模量作为路面结构设计输入参数并非易事,其难点在于模量试验。不同试验方法得到的模量不同,当加载超过强度的60%可能就表现出非线性,而且拉伸模量一般总是低于抗压模量<sup>[29,30]</sup>。因此,大量研究侧重于模量转化计算关系模型上,试图通过更简单的试验指标来计算材料的模量。

威廉姆斯(Williams)<sup>[31]</sup>对不同水泥稳定材料进行了分类,并对不同类型水泥稳定材料在给定的强度范围绘制了模量范围图。米切尔(Mitchell)<sup>[32]</sup>总结了水泥石弯拉模量和抗压强度的关系:

$$E_r=K_f(10)^{m(CSA)} \quad (1-8)$$

式中: $E_r$ ——弯拉模量(psi),1psi=6895Pa;

$K_f$ ——材料常数;

$m$ —— $0.04(10)^{-0.186C}$ ;

CSA——无侧限抗压强度(psi)。

拉德(Road)<sup>[20]</sup>研究了半刚性材料拉伸和压缩的应力应变特性,并提出抗压模量和抗拉模量比( $E_c/E_t$ )指标,指出该指标的意义在于它与材料开裂特性方面有密切关联。稳定材料的应力—应变关系是非线性的,就非线性程度而言,在同一应力水平下抗压模量( $E_c$ )大于抗拉模量( $E_t$ )。

在美国 AASHTO1993 路面设计方法中,无机结合料稳定材料模量试验根据材料类型不同分别采用 AASHTO T274 回弹模量试验方法、间接拉伸试验 ASTM D4123 法和 ASTM C469 法<sup>[33]</sup>。在 MEPDG 设计法中,贫混凝土和水泥稳定粒料弹性模量采用 ASTM C469 法,开级配水泥稳定粒料、石灰—粉煤灰—水泥稳定粒料和水泥土的弹性模量试验缺乏标准试验规程,石灰稳定土回弹模量按照 AASHTO T307 试验规程<sup>[4]</sup>。在 MEPDG 中半刚性材料回弹模量还可

通过与无侧限抗压强度建立的关系式确定,这些关系式汇总在表 1-1 中。由此可见,美国半刚性基层材料的模量试验方法并未统一,多数试验加载方式与路面结构承受车轮动载的受力状况也有很大的不同。

确定半刚性材料回弹模量的关系式<sup>[4]</sup>

表 1-1

材 料	关 系 式	试验方法	说 明
贫混凝土	$E=57000\sqrt{q_u}$	AASHTO T122	E 为回弹模量 (psi); $q_u$ 为无侧限抗压强度 (psi)
水泥稳定碎石			
水泥土	$E=1200\times q_u$	ASTM D1633	
石灰、水泥、粉煤灰结合料	$E=500+q_u$	ASTM D593	
石灰稳定土	$E=(0.124q_u+9.98)\times 1000$	ASTM D5102	

对半刚性基层材料,我国沥青路面设计模量均采用相当于静态荷载作用下测定的静态抗压模量。回弹模量的确定方法主要有承载板法和顶面法两种。试验基本步骤为逐级加载,逐级记录回弹变形。根据试验结果绘制出荷载—变形曲线散点图,然后拟合出相应的曲线,根据拟合曲线进行原点修正<sup>[9]</sup>。按下式计算回弹模量  $E_c$ :

$$E_c = \frac{ph}{l} \quad (1-9)$$

式中: $E_c$ ——抗压回弹模量(MPa);

$p$ ——单位压力(MPa);

$h$ ——试件高度(mm);

$l$ ——试件回弹变形(mm)。

实际上,路面结构承受的车轮运动荷载是连续半正弦波动态荷载。在静态模量试验中,荷载缓慢施加,时间较长,这显然与路面结构承受车轮动载的受力状况存在很大差异<sup>[13,34]</sup>。《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)提出常用半刚性基层材料静态参数参考值,如表 1-2 所示<sup>[10]</sup>。

沥青路面设计规范半刚性材料设计参数

表 1-2

材料名称	配合比或规格要求	抗压模量(MPa)		劈裂强度(MPa)
		弯沉计算用	拉应力计算用	
水泥砂砾	4%~6%	1100~1500	3000~4200	0.4~0.6
水泥碎石	4%~6%	1300~1700	3000~4200	0.4~0.6
二灰砂砾	7:13:80	1100~1500	3000~4200	0.6~0.8