

李丽民
蒋小玲

著

柔性基层耐久性 沥青路面设计方法



科学出版社

柔性基层耐久性沥青 路面设计方法

李丽民 蒋小玲 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍了国内外沥青路面设计研究现状和我国柔性基层耐久性沥青路面设计需要解决的关键问题;深入研究了基于动力有限元的车辙预估计算方法、柔性基层沥青路面车辙性能影响因素;从车辙和疲劳破坏机理出发,通过大量计算,系统研究了柔性基层耐久性沥青路面结构车辙与疲劳性能的影响规律;采用灰色理论、人工神经网络及分形理论,通过室内试验及大量计算,借鉴基于体积填充思想的级配设计方法,提出了柔性基层混合料骨架密实型抗车辙级配设计方法;通过动态蠕变和弯曲疲劳试验,利用 Boltzmann 叠加原理、WLF 方程和 Burgers 模型确定沥青混合料疲劳损伤的黏弹性参数,提出了基于疲劳损伤的沥青路面疲劳寿命预估方法;进而提出了基层耐久性沥青路面设计方法,并修筑了实体工程进行验证。

本书适合于高等院校道路与铁道工程、交通运输工程、市政工程等专业高年级本科生和研究生阅读,也可供道路设计、施工及科研等技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

柔性基层耐久性沥青路面设计方法/李丽民,蒋小玲著. —北京:科学出版社,2018.10

ISBN 978-7-03-059139-5

I. ①柔… II. ①李…②蒋… III. ①耐用性-柔性路面-沥青路面-路面设计 IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 241757 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:何艳萍

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年10月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年10月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:250 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

柔性基层耐久性沥青路面设计是我国道路工程亟须解决的一个关键问题。我国沥青路面设计规范主要是基于半刚性基层沥青路面结构发展起来的,对于柔性基层沥青路面具有很大的局限性,设计中难以保证路面的耐久性。在柔性基层耐久性沥青路面设计方面虽然国外形成了比较成熟的方法,但由于气候、车辆等条件的差异,难以在我国推广应用。本书基于车辆与路面的耦合作用,采用动力有限元法建立起有效的车辙预估计算方法。基于分形理论和体积指标,提出柔性基层混合料骨架密实型抗车辙级配设计方法。利用 Boltzmann 叠加原理、WLF 方程和 Burgers 模型确定沥青混合料疲劳损伤的黏弹性参数,提出基于疲劳损伤的沥青路面疲劳寿命预估方法。在此基础上,提出柔性基层耐久性沥青路面设计方法。主要创新性工作体现在以下四个方面。

(1) 采用车辆四分之一简化模型和七自由度整车模型,运用 MATLAB 软件和 ADAMS 软件,进行 ANSYS 二次开发,基于运动车辆与路面的耦合作用,提出更加符合实际的汽车动载模型、轮载累加作用时间、代表温度和加载修正系数的计算方法及合理的材料模型参数,建立基于动力有限元法的车辙预估计算方法。该方法能优选出最佳抗车辙路面结构,预估使用条件下各种因素对车辙的影响,在路面设计阶段就可以有针对性地解决路面使用中的车辙问题。

(2) 基于分形理论和体积指标,利用级配的分形本质,提出柔性基层混合料骨架密实型抗车辙级配设计方法。该方法计算简单,可轻松实现从大量级配中进行级配优选,可以大大降低级配设计的盲目性。

(3) 从车辙和疲劳破坏机理出发,得出柔性基层耐久性沥青路面车辙和疲劳性能的影响规律,为抗车辙柔性基层耐久性沥青路面结构设计提供理论依据。

(4) 通过试验和理论推导,提出基于疲劳损伤的沥青路面疲劳寿命预估方法,分析该方法的合理性,并通过室内试验进行验证。该方法通过动态蠕变和弯曲疲劳试验,利用 Boltzmann 叠加原理、WLF 方程和 Burgers 模型确定沥青混合料疲劳损伤的黏弹性参数,克服了经典弹性疲劳损伤模型的不足,反映了沥青混合料黏弹性疲劳损伤破坏的本质,并能考虑气候、交通条件、路面结构等综合因素对路面疲劳性能的影响。

本书是在已有研究成果的基础上进行补充和拓展。书中给出的柔性基层耐久性沥青路面设计方法如能对工程设计与技术人员有所借鉴或裨益,作者将倍感欣慰。

本书的出版得到了国家自然科学基金面上项目“基于行车动力作用的沥青路面车辙计算与预估方法研究”(50678183)、湖南省教育厅重点项目“使用条件下长寿命沥青路面车辙与疲劳预控一体化方法研究”(16A082)、湖南省自然科学基金面上项目“基于行车动力与细观分析的耐久性沥青路面车辙预控方法”(2015JJ2073)等项目的资助。本书由湖南科技学院李丽民、蒋小玲撰写而成,书中引用了重庆交通大学何兆益教授相关课题的部分研究成果,参考了部分相关文献,在此向何兆益教授及相关作者表示诚挚的感谢!

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2018年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外沥青路面设计研究现状	3
1.1.1 国内沥青路面设计	3
1.1.2 国外沥青路面设计	6
1.2 车辙问题研究现状	8
1.2.1 车辙影响因素	8
1.2.2 混合料组成设计	9
1.2.3 车辙预估方法	13
1.3 疲劳问题研究现状.....	16
第 2 章 基于动力有限元法的车辙预估计算方法	19
2.1 车辙预估计算方法流程.....	19
2.1.1 汽车动载模型	19
2.1.2 材料模型及参数.....	24
2.1.3 轮载累加作用时间	25
2.1.4 代表温度	26
2.1.5 加载修正系数	27
2.1.6 ANSYS 数值计算	27
2.2 二维和三维有限元对比分析.....	28
2.3 车辙预估计算方法验证.....	31
2.4 工程应用.....	32
2.5 本章小结.....	35
第 3 章 柔性基层沥青路面车辙性能影响因素	36
3.1 沥青性质的影响.....	36
3.2 柔性基层级配的影响.....	38
3.3 沥青混合料体积指标的影响.....	39
3.4 温度和交通条件的影响.....	42
3.5 本章小结.....	46
第 4 章 抗车辙柔性基层耐久性沥青路面结构研究	48
4.1 抗车辙柔性基层耐久性沥青路面结构比选.....	49

4.2	优选路面结构力学响应分析	55
4.3	优选路面结构抗车辙性能影响因素分析	58
4.3.1	厚度对路面结构沥青层内剪应变的影响	58
4.3.2	厚度对路面结构路基顶面压应变的影响	60
4.3.3	模量对路面结构沥青层内剪应变的影响	61
4.3.4	模量对路面结构路基顶面压应变的影响	62
4.4	优选路面结构抗疲劳性能影响因素分析	63
4.4.1	厚度对路面结构抗疲劳性能的影响	63
4.4.2	模量对路面结构抗疲劳性能的影响	65
4.5	荷载对优选路面结构抗车辙和疲劳性能的影响	68
4.6	本章小结	71
第5章	抗车辙柔性基层混合料设计方法	73
5.1	材料性能	73
5.2	沥青选择	76
5.3	最佳沥青用量确定方法	79
5.3.1	大马歇尔试验法	79
5.3.2	Superpave 旋转压实体积法	91
5.3.3	大马歇尔试验与旋转压实试验的比较	92
5.3.4	GTM 法及其与大马歇尔法、Superpave 旋转压实体积法的比较	94
5.4	柔性基层沥青混合料抗车辙级配设计方法	97
5.4.1	柔性基层沥青混合料抗车辙性能灰关联熵分析	98
5.4.2	柔性基层混合料疲劳性能灰关联熵分析	101
5.4.3	基于车辙性能进行柔性基层混合料设计可行性分析	102
5.5	抗车辙级配检验方法	104
5.5.1	空隙率对柔性基层混合料路用性能的影响	104
5.5.2	沥青混合料中的分形理论	108
5.5.3	沥青混合料集料粒径分布的分形模型	110
5.5.4	抗车辙柔性基层级配初选方法	111
5.5.5	抗车辙柔性基层级配优选方法	116
5.5.6	抗车辙柔性基层级配确定方法	119
5.5.7	抗车辙柔性基层级配确定方法的验证	126
5.6	抗车辙柔性基层混合料设计方法	126
5.7	本章小结	127
第6章	基于疲劳损伤的沥青路面疲劳寿命预估方法	129
6.1	疲劳损伤变量	129

6.2	疲劳损伤计算	131
6.3	基于疲劳损伤的当量疲劳温度	135
6.3.1	各月路面平均温度	135
6.3.2	模量与温度的关系	137
6.3.3	当量疲劳温度的确定	139
6.4	黏弹性疲劳损伤模型与参数	140
6.5	黏弹性疲劳模型分析	144
6.6	本章小结	146
第7章	柔性基层耐久性沥青路面设计	148
7.1	柔性基层耐久性沥青路面设计方法	148
7.2	抗车辙柔性基层耐久性沥青路面设计	149
7.2.1	实体工程概况	149
7.2.2	柔性基层混合料设计	154
7.2.3	柔性基层路面结构疲劳性能	158
7.2.4	柔性基层路面结构抗车辙性能	161
7.3	高模量沥青混凝土路用性能试验研究	164
7.4	实体工程验证	167
7.5	本章小结	167
参考文献	169

第 1 章 绪 论

随着国民经济的持续增长,我国公路建设日新月异,尤其是高速公路发展更为迅猛。半刚性基层沥青路面是我国高等级公路沥青路面的主要结构类型,并几乎是唯一结构形式^[1-3]。实践表明^[3-5],半刚性基层沥青路面的反射裂缝及由此带来的水损坏问题始终无法很好解决,随着交通量、超载、重载的增加,半刚性基层沥青路面的早期破坏日益突出,一般使用 5~8 年就需要进行大中修,更有不少路面在使用 1~2 年就出现大量的车辙、裂缝等早期损坏,严重妨碍了高等级公路的畅通。大量调查表明^[3,6],沥青路面的早期破坏主要为车辙、水损坏和开裂,见表 1.1、图 1.1~图 1.3,最为严重的是车辙损坏。车辙不仅出现在高温的南方地区,在北方地区高速公路沥青路面上也较为常见。目前,随着交通渠化程度的提高,交通量和轴载的不断增长,超载、重载的交通状况愈演愈烈,沥青路面的车辙问题日益严重,它已经成为沥青路面早期破坏的主要病害形式。据不完全统计^[7-13],在我国高等级公路维修中,车辙病害的发生率高达 80%。目前,车辙是全世界高等级沥青路面最严重的破坏类型之一^[6],车辙破坏严重影响路面的使用质量和服务水平。

表 1.1 部分省份沥青路面结构早期破坏形式

省份	水损坏	车辙	开裂	泛油	疲劳破坏	沉陷	松散
陕西省	★	★	★				
广东省	★	★		★		★	★
四川省	★	★	★		★	★	★
浙江省			★	★			
山东省	★	★	★	★			
江苏省	★	★			★		★
湖北省	★	★		★		★	
山西省	★	★	★			★	
河北省	★	★	★		★	★	★
辽宁省	★	★	★				

国外因半刚性基层材料出现开裂问题较严重,而且无法解决,很多国家最终放弃了半刚性基层沥青路面结构。20 世纪 60 年代,美国为解决重载交通沥青路面车辙、疲劳开裂等问题,开始采用大碎石沥青混合料(large stone asphalt mixes,

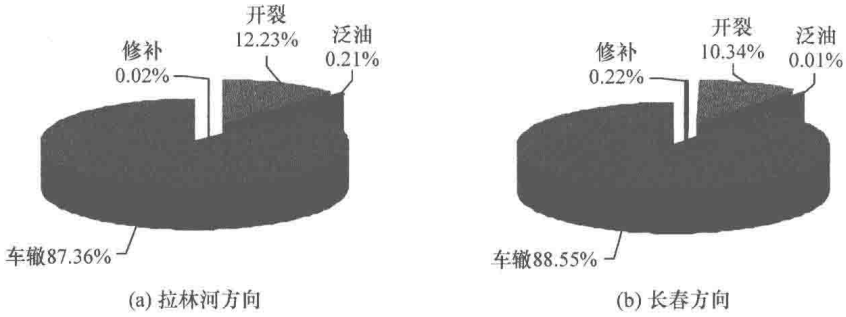


图 1.1 2005 年长余高速公路路面破损形式比例图

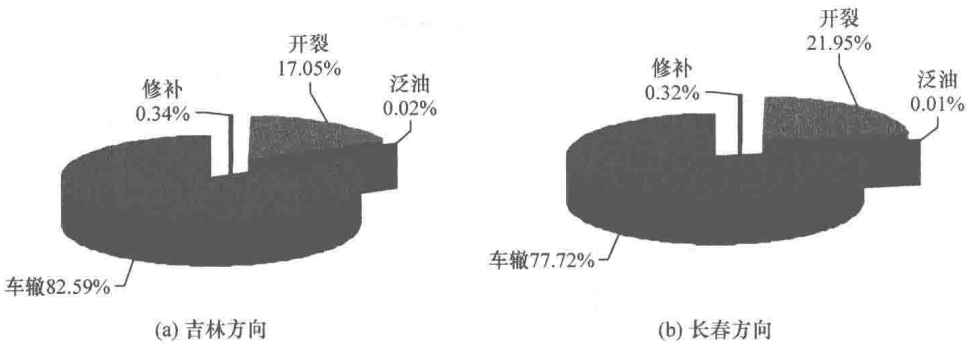


图 1.2 2005 年长吉高速公路路面破损形式比例图

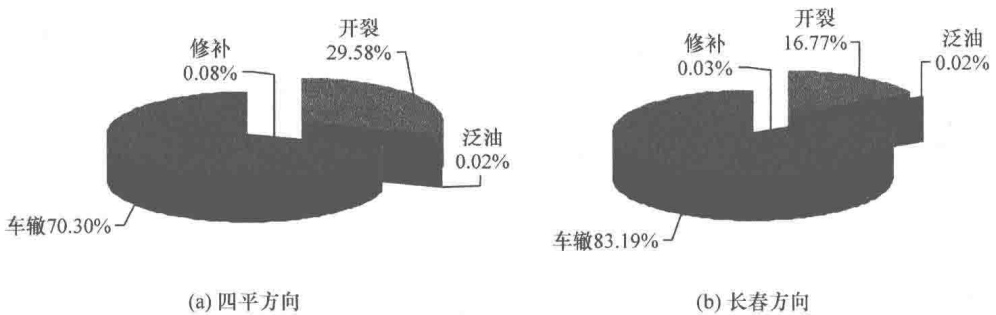


图 1.3 2005 年长平高速公路路面破损形式比例图

LSAM)作基层即沥青稳定基层(asphalt treated base, ATB),以下简称柔性基层。随后在美国、英国、加拿大、澳大利亚、日本、南非等国家得到广泛应用。在英国,目前高速公路多采用沥青稳定材料作基层;日本是采用全厚式沥青路面最多、最早的国家之一,其高速公路大都采用沥青稳定基层^[14];在加拿大,公路路面广泛采用沥青稳定基层;欧洲多数国家的高速公路沥青路面结构中均绝大部分采用了沥青稳定基层;在美国,沥青稳定基层路面是路面的主要结构形式,在 90 年代后,美国提出了“永久性沥青路面”的概念,这种永久性柔性基层沥青路面使用 40 年以上不会发生路面结构损坏也不需要进行结构性维修,只需每隔 10~20 年对路面面层进行

功能性维修^[15-18]。国外的使用经验表明^[19],沥青稳定基层沥青路面使用性能良好。日本建成通车的沥青稳定基层沥青路面使用年限10年以下占34%,10~20年占32%,20年以上占34%^[20]。美国爱荷华州 Cedar 路段修建于1962年,结构为4.5inHMA 面层+16inATB 直接放到细粒土上。使用到现在只分别在1976年、1990年进行了表面修补,根据LTTP GPS-6大量路用性能数据,绝大部分沥青稳定基层沥青路面能够使用15年以上才需要维修,很多沥青稳定基层沥青路面使用20年以上才出现明显的损坏^[13],这与我国半刚性基层沥青路面的使用寿命形成了鲜明的对比。而我国早期借鉴国外路面设计经验修建的设置沥青稳定基层的京津塘高速和广深高速公路沥青路面也很少发生早期损坏,表现出了优良的路用性能。京津塘高速公路通车使用9年后,路面基本上没有损坏,广深高速公路建成通车历经近8年的大交通量运行后,路面整体强度仍表现良好^[21-23]。

沥青路面出现早期损坏和耐久性不足的原因很复杂,其中有材料质量、施工水平、普遍的“赶工”现象以及超载超限严重等方面的原因,但半刚性基层所固有的缺陷的确是导致早期损坏的重要原因。根据调查,我国超过92%的沥青路面平均寿命是7~8年,比美国和加拿大道路的平均寿命降低了一半^[24],路面耐久性差、使用寿命短给我国道路建设带来严重的经济和社会影响,已成为阻碍我国道路建设发展的主要问题。郑健龙院士指出:提高沥青路面使用寿命已成为中国公路交通领域刻不容缓的重要任务。国外研究成果表明^[19,25-28],沥青稳定柔性基层具有较高抗弯拉强度和抗疲劳性能,抗剪强度高,抗车辙能力强,能承受重载交通的作用,与面层模量接近、粘结牢固,路面结构的受力、变形更为协调,与半刚性基层相比,不易产生收缩开裂和水损害,沥青用量小、工程造价低、路面使用性能良好,可为解决我国半刚性基层沥青路面日益严重的早期破坏提供新的思路,也是今后我国为提高路面使用寿命引入国外长寿命沥青路面的应用基础,在我国有着良好的发展和应用前景。为解决由交通量大、重载和超载严重造成的半刚性基层沥青路面车辙等早期破坏日益突出的问题,国内对沥青稳定柔性基层进行了系列研究^[4,29-49],但尚未形成系统的柔性基层耐久性沥青路面设计方法。因此,借鉴国外沥青稳定柔性基层沥青路面的成功经验,吸取国外“永久性路面”的设计理念和思路,进行“柔性基层耐久性沥青路面设计方法”研究,以解决我国半刚性基层沥青路面的早期破坏问题,提高我国沥青路面的使用寿命,对我国以及世界道路的发展都具有重要的经济和社会价值。

1.1 国内外沥青路面设计研究现状

1.1.1 国内沥青路面设计

我国现行沥青路面设计规范采用的路表弯沉主要设计指标,是1949年以来历

版设计规范在以路表弯沉为控制指标的指导思想下扩充后提出的,这种设计方法主要针对半刚性基层沥青路面结构,贯彻了“强基薄面稳土基”的思想,凝聚了几代公路技术人员的心血,对我国公路发展起到了很大的推动作用^[50-54]。但从已有研究和以往的实际应用来看,我国在沥青路面结构设计方法上主要还存在如下问题。

(1) 我国现行的路面结构设计理论^[55]在设计理念上是假定一个沥青层厚度,以基层作为承重层设计其厚度,沥青面层仅仅起到表面功能作用,路面荷载越大、交通量越大,基层强度和厚度就越大,路面破坏意味着基层破坏,与沥青面层的厚度没有关系。工程实践表明,这种理解是非常不确切的。国内外研究证实,轮载下100~150mm区域是高受力区域,是各种损坏主要的发生区域,沥青层直接承受车轮荷载作用,沥青面层发生破坏也属于结构性损坏。

(2) 沥青层疲劳控制指标基本不起作用,表面弯沉成了唯一设计控制指标。在满足设计弯沉要求后,半刚性基层上的沥青路面,在层间接触为连续的情况下,沥青面层底面的应力基本处于受压状态,见图1.4(拉应力为正、压应力为负)。在层间接触为滑动的情况下,沥青面层底面的应力虽有可能处于受拉状态,但沥青面层的疲劳寿命多数情况下大于半刚性基层,见图1.5,底面拉应力验算指标在设计中基本不起控制作用^[55,56]。

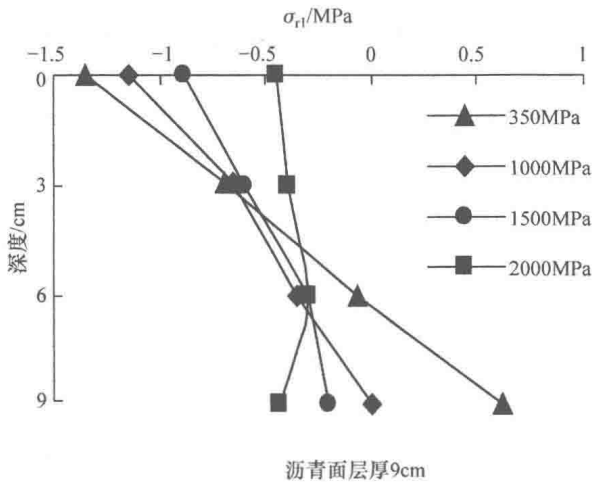


图 1.4 基层模量对沥青面层内应力分布的影响

(3) 采用的弯沉指标无法与多种破坏类型和破坏标准统一协调,路面结构设计宜采用多个单项指标,分别针对和控制相应的特定损坏类型。路面是一种多层结构,各层结构具有不同的几何和力学属性。路面结构的损坏,既可能是由于某一组成结构或整个结构的过量塑性变形,也可能起因于结构层内某处的应力或应变值超出了该处材料的疲劳强度或疲劳应变值,路表弯沉设计指标无法反映和包容路面结构的多样性及各种损坏类型,也难以协调平衡各单项设计指标,并且弯沉指

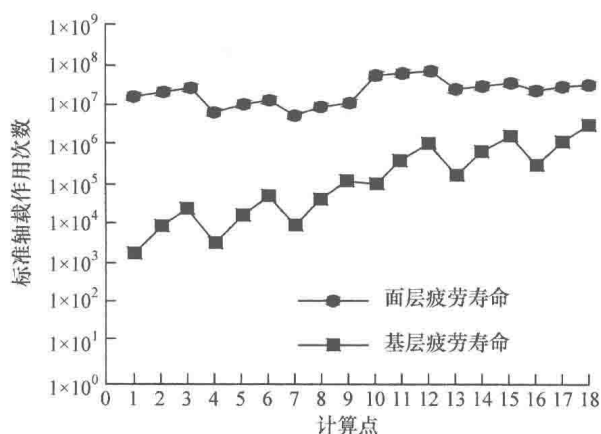


图 1.5 沥青面层和半刚性基层的疲劳寿命

标与路面破坏的相关性并不好。根据广州—佛山高速公路的弯沉和破损的调查数据^[57]绘制的路面代表弯沉与破损率的关系见图 1.6。根据四川交通厅公路局对所辖各地路况检测数据绘制的路面结构强度系数与路面状况指数的关系见图 1.7^[58]。很难在路表弯沉和表征路面使用性能的指标间建立确切的相关关系。

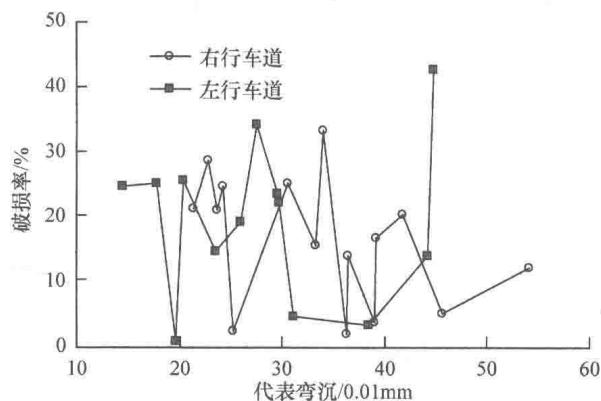


图 1.6 路面代表弯沉与破损率的关系

(4) 采用源于中、低级半刚性基层沥青路面的路表弯沉设计指标,无法控制高等级公路,尤其是柔性基层沥青路面结构整体或沥青层的永久变形量。沥青路面的车辙与路面结构、气候条件、交通条件密切相关,现行规范采用 60℃ 的动稳定度指标不能实现对车辙的控制。此外,弯沉综合修正系数 F 经验公式是半刚性基层路面结果的总结,而路面弯沉值受路面结构、环境、地理位置、人为因素等影响,不同基层路面结构弯沉测量结果见图 1.8^[59]。弯沉指标对柔性基层沥青路面具有很大的局限性。

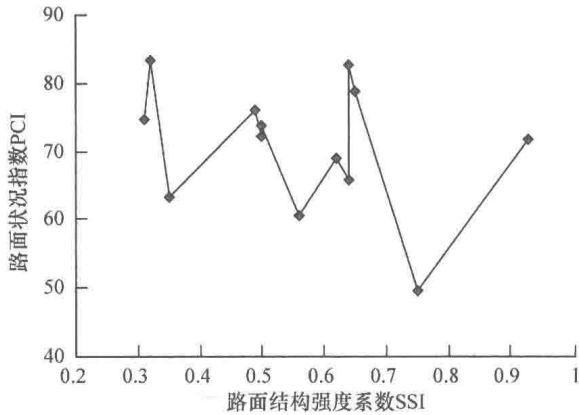


图 1.7 路面结构强度系数与路面状况指数的关系

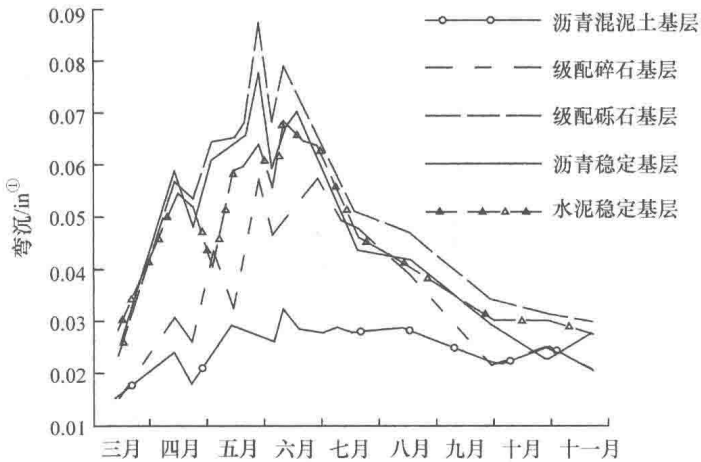


图 1.8 不同基层路面结构弯沉测量结果

总之,我国沥青路面设计采用路表弯沉设计指标难以控制路面各种破坏,路面设计中缺乏有效的车辙和疲劳控制指标,对主要破坏是车辙和疲劳的柔性基层沥青路面^[14,22,23,60-62]具有很大的局限性,设计中难以保证路面的耐久性。

1.1.2 国外沥青路面设计

国外早期路面设计主要是防止路基剪切破坏^[63-65],随着交通量和车速提高,路表弯沉被当作路面结构承载能力的定量指标^[66],但路面破坏是由过大的应力和应变引起的,而不是弯沉,路面使用性能逐渐成为了路面设计的焦点^[67]。美国地沥青协会提出的 AI 法,采用两种应变作为破坏准则,一个是沥青层底部的水平拉

① 1in=2.54cm。

应变 ϵ_y , 控制疲劳开裂; 另一个是土基表面的竖向压应变 ϵ_z , 控制永久变形, 即车辙。AI 法吸收了各国有关路面设计的重大科研成果, 并加以外延, 考虑了沥青混合料的黏弹特性及粒料的非线性^[68-70]。壳牌公司提出的 SHELL 法是考虑沥青路面疲劳开裂根据和永久变形破坏模式的代表, 设计指标中考虑了车辙和疲劳性能, 以沥青层底面拉应变作为疲劳开裂指标, 引入路基顶面压应变作为车辙控制的目的, 后来又考虑了沥青层的变形开发了专门程序来计算沥青层在使用年限内产生的车辙。根据 AASHTO 试验路的成果提出的 AASHTO 路面设计方法^[71-73], 路面设计公式反映了荷载作用次数、路面结构承载力和表征路面使用性能的服务指数之间的关系。通过 NCHRP 1-37A 项目的研究, 2004 年美国 NCHRP 提出了 AASHTO2002 力学经验设计方法^[74], 其中核心内容之一是建立路面损坏预估模型, 其损坏类型标准为永久变形、疲劳开裂、温度开裂和平整度 IRI 指数。全厚式沥青路面设计方法主要考虑沥青层车辙、路基顶面变形和沥青层的疲劳开裂, 沥青层车辙和温度开裂通过材料选择和配合比设计解决, 路基顶面变形通过限定路基应力比来控制, 沥青层疲劳开裂通过限定沥青层底最大拉应变控制^[75, 76]。2004 年, 道路联合攻关项目 NCHRP 投资开发了 NCHRP 1-37A 路面设计方法^[68, 77]。NCHRP 1-37A 方法用多层弹性理论和有限元模型计算路面结构在荷载作用下的应力、应变和位移, 用改进综合气候模型 (EICM) 预测路面结构的温度和湿度历程。路面设计中考虑了疲劳、车辙和平整度等破坏。基于控制沥青混凝土层底的弯拉应变、路基顶压应变 $\epsilon \leq 200 \mu\epsilon$ 保证沥青混凝土路面结构不出现结构性损坏, Huddleston 等提出了永久性路面设计方法^[78-79], 其设计理念是: 轮载 100~150mm 区域是高受力区域, 也是各种损坏的发生区域; 面层为 40~75mm 厚的高质量沥青混凝土, 须为车辆提供良好的行驶界面, 应具有足够的表面构造深度, 以及抗车辙、水稳定性好的特点; 中间层为 100~175 mm 厚的高模量抗车辙沥青混凝土, 起到连接和扩散荷载的作用, 应具有高模量、抗车辙的特点; HMA 基层为 75~100 mm 厚的高柔性抗疲劳沥青混凝土, 起到消除疲劳破坏的作用, 应具备高柔性、抗疲劳、水稳定性好的特点; 最大拉应变产生在 HMA 基层底部, 该区域最易发生疲劳破坏, 该区域的弯拉应变, 对于控制沥青混凝土层自下而上的疲劳开裂、防止路面过早出现结构性损坏具有特别重要的意义; 路面基础不仅为沥青混凝土层的铺筑提供良好的界面, 而且对于路面的变形、抗冻都至关重要。目前国外长寿命沥青路面的设计标准为沥青混合料层层底的弯拉应变不高于 60~70 $\mu\epsilon$, 路基顶面压应变不超过 200 $\mu\epsilon$ ^[80]。总之, 国外各种沥青路面设计方法都是针对疲劳和车辙等特定路面破坏形式进行路面设计, 国外主要路面设计方法控制破坏模式见表 1.2^[8, 81-84], 以控制路面的疲劳开裂、车辙变形等来保证路面在设计年限内的耐久性, 提供应有的使用质量, 比我国以弯沉控制路面设计更加客观。

表 1.2 国外主要路面设计方法控制破坏模式

设计方法	损坏模式
AI 法	沥青层疲劳、车辙(路基应变)
SHELL 法	沥青、水泥稳定层疲劳、车辙(路基应变、沥青层)
AASHTO 法	各结构层车辙、疲劳开裂、温度开裂和路面平整度
美国联邦公路局(FHWA)	沥青、水泥稳定层疲劳、车辙(路表 PSI)
澳大利亚力学设计方法	沥青、无机稳定材料层疲劳、路面变形和车辙(路基应变)
德国	沥青层疲劳、车辙、土基应变、平整度
法国	沥青、水泥稳定层疲劳、车辙(沥青层)、路基压应变
比利时路面设计方法	沥青、水泥稳定层疲劳、车辙
南非 NITRR	沥青、水泥稳定层疲劳、车辙(路基应变、粒料层剪切)
日本路面结构设计理论计算方法	沥青层疲劳、车辙、土基应变、平整度
英国诺丁汉大学	沥青、水泥稳定层疲劳、车辙(路基应变)

因此,柔性基层耐久性沥青路面设计不宜采用我国现有的路面设计方法,应借鉴国外经验,针对疲劳和车辙两类路面主要破坏形式,提出疲劳和车辙性能控制指标,解决好路面的车辙和疲劳破坏问题,以确保路面的耐久性。

1.2 车辙问题研究现状

由于车辙问题日趋严重,各国公路研究人员主要从车辙影响因素、混合料组成设计和车辙预估方法等方面对沥青路面车辙问题进行了大量研究工作,以解决路面的车辙问题、完善沥青路面的结构设计。

1.2.1 车辙影响因素

国内外对沥青混合料抗车辙能力影响因素进行了大量研究,一致认为其影响因素非常多,同时也得出了各自不同的研究结论,下面介绍其中一些代表性观点。Krutz 等^[85]研究表明,级配类型对沥青混合料的抗车辙能力影响最大,其中骨架型级配抗车辙能力最强。WesTrack^[86]试验结果认为,空隙率对车辙有重要的影响,低空隙含量(4%)沥青混合料抗变形能力优于中等(8%)及高空隙含量(12%)的混合料。Kandhal 等^[87]研究发现,沥青混合料抗车辙性能的优劣主要受到矿料最大公称尺寸(NMAS)、矿料间隙率(VMA)、沥青含量、沥青 PG 等级高低的重要影响,同时沥青路面层的厚度也影响车辙形成的深度。Sosnovske 等^[88]指出,与日俱增的车辆轴载、轮胎气压、荷载强度造成美国俄勒冈州道路车辙问题突出,认为级配类型是影响沥青路面抗车辙性能的重要因素,建议采用大粒径碎石混合料、开级

配沥青混合料来减小沥青路面的车辙。Sivasubranianiam^[89]发现,改性沥青混合料比普通沥青混合料有更好的抗车辙性能,沥青用量对改性沥青混合料的抗车辙能力影响较小,细级配混合料能够用于重载交通,压实度越大,路面抗车辙能力越强,粗级配混合料的抗车辙能力与压实度有较好的相关性。Zhou等^[90]通过调查分析得出,对沥青路面车辙比较重要的影响因素是:沥青 PG 分级类别、VMA、路面层厚度、沥青混合料空隙率(VV)、矿料比表面积(SA)及沥青饱和度(VFA)。彭余华等^[91]认为,集料的性质、矿料含泥量大小、沥青的软化点对沥青混合料的抗车辙性能有重要影响。路明周等^[92]发现,沥青混合料空隙率、VMA、VFA、油石比、碾压次数对抗车辙性能有不同程度的影响。向晋源等^[93]得到了沥青用量、压实度和试验温度三种因素对沥青混合料抗车辙性能的具体影响效果,为提高混合料抗车辙性能提供了具体途径。但由于影响因素众多,面临的情况确实比较复杂,以致美国的一些学者、专家认为,至目前为止,关于此领域的研究还处于未知状态。国内对车辙影响因素的研究几乎都集中在半刚性基层沥青路面,对柔性基层沥青路面的车辙影响因素研究很少。

1.2.2 混合料组成设计

国内外对如何通过混合料组成设计提高沥青混合料的抗车辙性能进行了大量研究^[94-102],但仍有很多问题尚未解决。

目前,沥青性质对沥青混合料抗车辙能力影响的评价指标^[103-105]尚无统一的公认标准。虽然 SHRP 指标体系中的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 、PG 分级指标在一定范围内得到了认可,但国外很多研究表明^[106-111],PG 分级不能准确预测沥青混凝土的车辙性能,尤其使用改性沥青时,改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 与现场试验和混合料的室内试验得到的高温性能评价结果相关性都较差,甚至一些沥青的分级结果与实际路面车辙评价相反, $G^*/\sin\delta$ 无法完全表征改性沥青在高温的抗变形能力,更无法预测改性沥青混合料的高温性能。因此,提出简单有效的沥青高温性能评价指标以选择合理的沥青,是抗车辙柔性基层混合料设计必须解决的问题。

抗车辙矿料级配设计问题仍未真正解决,国内外通过大量研究提出了许多方法,国外较著名的有贝雷法等,国内有沙庆林院士的 SAC 矿料级配设计方法、张肖宁教授提出的 CAVF 法,但都存在不同程度的缺陷。Superpave 矿料级配设计中提出了限制区和控制点,见图 1.9,级配必须在控制点以内,不能通过禁区,不同最大公称尺寸集料有不同的控制点和禁区。Superpave 矿料级配设计^[112]、贝雷法料级配设计^[113]等都是从使设计级配形成骨架的角度出发,尤其是贝雷法提出了紧排、松排骨架的判定方法,为形成骨架型混合料设计提供了很好的设计思路。但 Superpave 要求先初选三条级配曲线,通过沥青混合料配合比试验选定一条级配