



重庆交通大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：李修磊

日期：2010 年 12 月 20 日

重庆交通大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本人学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并进行信息服务（包括但不限于汇编、复制、发行、信息网络传播等），同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

学位论文作者签名：李修磊

日期：2010 年 12 月 20 日

指导教师签名：李元佳

日期：2010 年 12 月 20 日

本人同意将本学位论文提交至中国学术期刊（光盘版）电子杂志社 CNKI 系列数据库中全文发布，并按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。

学位论文作者签名：李修磊

日期：2010 年 12 月 20 日

指导教师签名：李元佳

日期：2010 年

摘 要

近些年,随着交通量和车辆载重的急剧增加,再加上由于当时设计、施工及后期养护出现的问题,致使我国越来越多的水泥混凝土路面发生了不同程度的病害,有的甚至还未达到设计年限。为了满足行驶车辆节能、省时、安全以及舒适性的要求,为此急需对这些损毁的水泥混凝土路面进行彻底的改造。为了有效的利用原有的水泥混凝土路面,节约工程投资,防止资源浪费,使用沥青混凝土作为加铺层不失一种改善其使用性能的有效措施之一。但,由于原水泥混凝土路面原始接缝的存在,使得沥青加铺层出现反射裂缝就变得不可避免,反射裂缝一旦出现,即会加快沥青面层水损坏的发生,导致路面的使用功能严重下降。本课题主要是针对旧水泥混凝土路面沥青加铺层反射裂缝这一病害,寻求一种性能优良的材料及设计方法,使沥青加铺层的使用寿命得以延长。本文主要进行了以下几个方面的研究工作:

首先,本文在前人研究的基础上,继续对反射裂缝产生的机理做了进一步的探讨。考虑到试验所用试件的尺寸,决定采用 AC-10 的中值作为沥青混合料的级配曲线。然后确定了沥青混凝土加铺层的油石比为 4.8%,并验证了其高温稳定性、水稳定性等沥青混凝土的其他性能均能满足规范的要求,为下一步的试验的开展做好了准备。

其次,使用橡胶沥青应力吸收层、聚酯玻纤布、玻纤格栅、FHGS 高强玻纤复合材料土工格栅(以下简称: FHGS 格栅)铺筑于旧水泥混凝土路面沥青加铺层之间作为防裂夹层与直接加铺结构相比,采用更接近于实际的轮辙仪轮载重复加载试验。针对本课题设计了三种试验方案:一是横向接缝轮载重复试验;二是纵向接缝弯拉型轮载重复试验;三是纵向接缝剪切型轮载重复试验。综合比较着三种试验方案的试验结果,以上几种防裂夹层延缓反射裂缝的效果又高到低依次是: FHGS 格栅、玻纤格栅、聚酯玻纤布、橡胶应力吸收层、直接加铺结构。

再次,采用 Cooper 疲劳试验机,采用控制应力加载模式,在不同温度、不同应力水平下,对加铺以上防裂夹层的制作的小梁试件进行四点弯曲疲劳试验,得到的试验结果与轮载重复试验基本一致。

最后,运用 ABAQUS 有限元软件,分析了加铺层厚度对其结构内部内力、最大弯沉及接缝两侧弯沉差的影响,得到加铺层的厚度不宜超过 14 cm。另外,结果还显示, FHGS 格栅对沥青加铺层层底的应力集中消散作用最好,依次是玻纤格栅、应力吸收层、聚酯玻纤布、直接加铺结构,与轮载重复试验结果类似。然后,根据断裂力学中应力强度因子 K 这一概念结合有限元分析,提出了沥青加铺层最小厚度的计算方法。

经综合比较分析,考虑尺寸效应、施工抗割破能力等其他因素,推荐优先选用 FHGS 格栅防反射裂缝的措施,有条件的情况下可以和橡胶应力吸收层同时使用。

关键词: 道路工程; 水泥混凝土路面; 沥青加铺层; 反射裂缝; 夹层材料; 轮辙仪; 有限元分析

ABSTRACT

In recent years, with the traffic volume and vehicle load increase sharply, due to at that time the problem of design, construction and post-maintenance, more and more cement concrete pavement occurred in varying degrees of disease and some even have not get reached the design life. To meet saving energy, time, safely and comfort requirement, it urgent needs to reform the damaged cement concrete pavement thoroughly. In order to use the existing concrete pavement, saving investment and preventing resources wasted, it is the better method to use asphalt concrete overlay to improve their performance without losing of the effective. However, cement concrete pavement exists the original joints and cracks so that asphalt overlay reflective cracking becomes inevitable. Once the reflective cracking, asphalt surface occurs water damage very quickly which finally results in road function declined seriously. This issue is directed against reflective cracking of asphalt overlay which is to find one kind of material with good performance and design methods to extend the life span of asphalt overlay. This paper has mainly carried out several aspects of research work in the following:

Firstly, this paper, based on previous studies, has continued to explore the mechanism of reflective crackings. Taking into account the size of specimen, it decides to adopt the median of AC-10 asphalt concrete as grading curve and then determines the asphalt concrete overlay's aggregate ratio of 4.8% and finally verifies its high temperature stability, water stability and other properties which could meet the related specification, and ready for next tests.

Secondly, rubber asphalt stress-absorbing layer, fiberglass-polyester, warp fiberglass grating and FHGS high-strength fiberglass composite geogrid (hereinafter referred to as FHGS grid) are paved between old cement concrete pavement slab and asphalt overlay as control cracks interlayer whose performance are compared with the direct overlay structure. This study employs wheel tracking apparatus to simulate test in the lab which is closer to the actual. For this issue, this study designs three test programs: the first is transverse joint wheel load repetition test; the second is longitudinal cracks bending-type wheel load repetition test; and the third is longitudinal cracks bending-type wheel load repetition test. Comprehensive comparison with the results of the three kinds of tests, which show that FHGS grid is the best excellent to retard reflective cracking. The next sequence is followed warp

fiberglass grating, fiberglass-polyester, rubber asphalt stress-absorbing layer and direct overlay structure respectively by another high to low.

Thirdly, this study applies four-point bending fatigue tests on trabecular specimens by Cooper fatigue testing machine with stress control. The results show consistency with the above and proves that the wheel load repetition tests are feasible and excellent.

Finally, this study uses the finite element software named ABAQUS to analyze the influence of overlay's thickness on the internal stress of composite pavement structure, maximum deflection and deflection difference on both side of joints. The results show that overlay's thickness is not suitable for more than 14 cm. In addition, the results also show that FHGS grid plays the best role in stress dissipation at the bottom of asphalt overlay compared other overlay structure and are the similar with the above two tests. Then, according to stress intensity factor in fracture mechanics combine finite element analysis, the minimum thickness calculation of asphalt overlay was put forward.

Comprehensive comparative analysis, considering the effect size of specimen, the capacity of resurfacing careless cutting and other factors, therefore it is suggested that in old cement concrete repair and modification projects and in constructing semi-rigid base, FHGS grid should be considered first. Besides, if condition permits, FHGS grid should be used together with rubber stress-absorbing in that the latter, apart from helping retarding reflective cracking, can prevent rain from sinking through the cracks, thus help extend the life-span of asphalt overlay.

KEY WORDS: road engineering; cement concrete pavement; asphalt overlay; reflective cracking; interlayer material; wheel tracking apparatus; finite element analysis

目 录

第一章 绪 论.....	1
1.1 问题的提出.....	1
1.2 水泥混凝土路面病害调查概述.....	2
1.3 旧水泥混凝土路面加铺层的国内外研究现状.....	3
1.3.1 旧水泥路面加铺水泥混凝土罩面（以下简称“白+白”方案）...4	
1.3.2 旧水泥路面加铺沥青混凝土面层（以下简称“白+黑”方案）...5	
1.3.3 旧水泥路面补强后加铺沥青混凝土面层.....	9
1.3.4 碎石化后加铺沥青面层.....	10
1.4 研究的主要内容和技術路线.....	11
1.4.1 本文的研究内容.....	11
1.4.2 研究的技術路线.....	11
第二章 沥青加铺层反射裂缝的成因及作用机理	13
2.1 沥青路面开裂的基本理论.....	14
2.2 沥青加铺层反射裂缝及其扩展模式.....	16
2.2.1 反射裂缝.....	16
2.2.2 反射裂缝的扩展模式.....	17
2.3 沥青加铺层反射裂缝成因及扩展机理.....	19
2.3.1 裂纹的萌生与扩展.....	19
2.3.2 反射裂缝成因及机理分析.....	19
2.4 旧水泥混凝土板间接缝应力集中有限元分析.....	21
2.4.1 力学模型建立与计算参数.....	21
2.4.2 有限元计算结果.....	22
2.4.3 结果分析.....	27
2.5 本章小结.....	28
第三章 加铺层沥青混合料配合比设计及路用性能检验	29
3.1 原材料的选择.....	29
3.1.1 沥青.....	29
3.1.2 集料.....	29
3.2 沥青混合料配合比设计.....	30
3.2.1 沥青混合料级配组成.....	30
3.2.2 最佳油石比的确定.....	31
3.3 沥青混合料的路用性能.....	34
3.3.1 沥青混合料高温稳定性.....	34
3.3.2 沥青混合料水稳定性.....	34
3.4 本章小结.....	35
第四章 沥青加铺层反射裂缝室内轮载重复试验对比分析.....	37
4.1 试验目的及试验方案简介.....	37
4.1.1 试验目的.....	37

4.1.2 试验方案	37
4.2 试验模型的建立与试件的制备	39
4.2.1 试验模型的建立	39
4.2.2 试件的制备	41
4.3 加载方法及观测方式	44
4.4 轮载试验结果及分析	45
4.4.1 轮载试验结果	45
4.4.2 试验结果对比分析	49
4.5 本章小结	51
第五章 沥青加铺层反射裂缝室内疲劳试验研究	52
5.1 疲劳试验方法的评价与选择	52
5.1.1 疲劳试验方法概述	52
5.1.2 疲劳试验方法的选择	53
5.2 四点弯曲疲劳试验方法简介	54
5.2.1 试验设备	54
5.2.2 试件制备	55
5.2.3 荷载条件	56
5.3 试验方案	56
5.3.1 加载方式	56
5.3.2 加载频率及形式	57
5.3.3 试验温度及加载应力	58
5.4 小梁疲劳试验结果及其分析	58
5.4.1 疲劳试验结果	58
5.4.2 试验结果分析	60
5.5 本章小结	61
第六章 沥青加铺层结构有限元应力分析	62
6.1 材料的几种强度准则	62
6.2 基于层间夹层的沥青加铺层有限元计算模型和材料参数	66
6.2.1 力学计算模型	67
6.2.2 材料参数	68
6.3 荷载作用下的应力有限元分析	69
6.3.1 沥青加铺层厚度变化对荷载应力的影响分析	69
6.3.2 不同防裂夹层结构荷载应力的对比分析	72
6.4 加铺层最小厚度的确定	75
6.4.1 应力强度因子 K 与断裂韧性 K_{IC}	76
6.4.2 应力强度因子的有限元分析	77
6.4.3 确定沥青加铺层最小厚度	78
6.5 本章小结	80
第七章 主要结论与进一步研究的问题	81
7.1 主要结论	81
7.2 主要创新点	82

7.3 有待进一步研究的问题	82
致 谢.....	83
参考文献.....	84
在学期间发表的论著及取得的科研成果	87

第一章 绪 论

1.1 问题的提出

水泥混凝土路面是公路路面结构的重要形式之一,截止到 2009 年底,我国二级及以上高等级公路总里程达到 42.52 万公里,其中水泥混凝土路面占到 35.7%。特别是上世纪八十年代初到九十年代末,我国修建了大量的水泥混凝土路面,由于近些年道路交通量和汽车载重量的快速增加以及当时设计、施工和后期养护等各方面的原因,致使这一时期修建的水泥混凝土路面已经发生了不同程度的结构性或非结构性的损坏,相继进入了大中维修期。包括后来修建的水泥混凝土路面,虽然有相当一部分水泥路面还未达到设计年限,但由于上述等各方面的原因以及水泥混凝土路面的先天性缺陷,而使其出现了过早的损坏,严重影响了道路的使用性能,面临着大量的修复工作。

与沥青路面相比,水泥混凝土路面的修复工作比较困难,根据水泥混凝土路面的破坏程度,国内外一般采用四种改造措施:加铺新的水泥混凝土面层、加铺沥青混凝土面层、对旧水泥混凝土路面进行返修以及采用旧水泥混凝土路面碎石化技术。近些年,我国各地区都开始对旧水泥混凝土路面进行大量的修复整治工作,其主要措施是加铺沥青混凝土面层,来改善原有路面的使用功能,提供较为平整、舒适、安全的行车环境。另外,加铺沥青面层可以充分利用旧水泥混凝土路面的剩余强度,对交通量和环境的影响较小且具有抗滑性能好、施工周期短、维护简单、造价较低等优点,因而加铺沥青面层在旧水泥混凝土路面改造中得到了普遍的应用。由于路面结构中旧水泥混凝土路面板原始接缝和裂缝等缺陷的存在,加铺沥青面层后,在行车荷载及环境温度等因素的作用下极易产生反射裂缝,若加铺沥青面层的过程中对此处理不当,将会严重影响沥青加铺层的使用功能,从而缩短其使用寿命,并造成更大的安全隐患和经济效益的严重受损以及不良的社会影响。

如何控制沥青加铺层反射裂缝的产生和发展使加铺后的道路能继续承担交通量的增长,至今仍是道路工程界面临的一大难题,也是各国道路界学者关注的热点。目前国内外采用的防反射裂缝措施主要有增加沥青加铺层厚度、采用土工合成材料夹层、铺设大粒径沥青混合料缓解层以及铺设应力薄膜吸收层等。国外早在上世纪三十年代,就对旧水泥混凝土路面加铺沥青面层展开了研究和工程的实践,几十年来还不断借鉴力学学科发展的新成果对反射裂缝的产生和扩展机理进行研究,并尝试各种防反措施^[1-8]。国内许多专家学者近十余年也深入开展了这方面的理论研究和试验路的铺筑^[9,10],并取得了一定的成果。目前沥青加铺层

结构还没有成熟的计算模型和公认的设计方法,仍然以经验法为主,以力学计算方法作为辅助。对于基于线弹性断裂力学理论的沥青加铺层设计方法,虽然很多研究者做了大量有益的研究工作^[11-13],但由于沥青混凝土的断裂韧性及断裂特性等准确数据要基于大量试验和计算分析才能得到,因此进展比较缓慢。若采用有限元计算方法,由于所建的力学模型、边界条件及其他结构计算参数取舍不同会对沥青加铺层结构内部的应力和位移产生影响,计算出来的应力强度因子、J积分、能量释放率以及荷载疲劳作用次数等数据同样会有较大的差异,因此目前还处于理论探索阶段,与直接应用于实际工程还有一定的距离。所以,继续对水泥混凝土路面加铺沥青面层这种复合式路面的设计方法、以及加铺层结构和防反射裂缝材料的选择等方面进行深入的研究,是非常有必要且具有使用价值。

在水泥混凝土板与沥青加铺层之间设置防裂夹层,用于延长沥青加铺层的使用寿命,且同时具有防水渗透的作用,是解决这一问题的有效方法和途径。基于这一问题的复杂性,各地的交通量、气候环境、及筑路条件的差异,所取得成果之间缺乏共同的认识,给设计和施工操作部门带来了极大的困难。鉴于上述原因,本文在前人研究的基础上,继续对沥青加铺层的结构、设计方法以及在如何延缓旧水泥路面沥青加铺层反射裂缝的产生和扩展等方面的问题做进一步的研究。

1.2 水泥混凝土路面病害调查概述

水泥混凝土路面作为公路路面的重要结构形式,与沥青路面相比,具有使用寿命长、初期养护费用低等突出优点。由于这种路面结构形式对重载、超载的高度敏感性,在我国目前重载和超载现象及其严重的状况下,这些优点变得荡然无存,使用寿命急剧缩短,养护费用快速增加。当水泥混凝土路面出现开裂、断板、错台等病害后,在雨水的作用下,往往病害会快速发展,在短短的两三年内病害会成倍的增长,使路用性能急剧下降最终不能满足行车要求。水泥混凝土路面本身修复的难度要比沥青路面大,且耗费时间长,效果也难以保证,使水泥混凝土路面出现病害后成为公路养护部门的沉重负担。目前,我国水泥路面的推广应用面临着挑战,水泥路面在高等级公路中的应用日趋萎缩。若水泥路面出现病害后,如果要对其进行重建、改造或加铺,还没有统一标准的处治措施,如果全部移除会对社会环境带来不利影响,且造成经济上的浪费。

水泥路面病害的出现有其自身规律,一般水泥路面的病害可分为:断裂类、竖向位移类、接缝类和表层类四种类型。断裂类病害主要指纵、横、斜向裂缝和交叉裂缝、断板等;竖向位移类主要指沉陷和胀起;接缝类病害主要指接(裂)缝的填料损毁、唧泥、错台和拱起等;表层类病害主要指坑洞、露骨、网裂和起皮、粗集料冻融裂纹、修补损坏等。

对水泥路面的调查主要依据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2002)、《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ 073.1-2001)^[14, 15]。推荐的方法,并结合相关的科研成果。将路面破坏种类归类,采用随机抽样调查法和路面破坏逐块调查法两种方法对旧水泥路面状况进行调查。

随机调查法是先将调查路段根据路段的损坏状况分成若干调查段,每个调查段再随机分成若干调查单元进行调查。调查中将路面板的破损类型分为路面结构损坏、行驶质量丧失、外观质量状况三种类型,每种类型按轻、中、重三种损坏程度分别记录。该调查的目的主要用于路面破损状况评价,为维修整治设计提供基础参数。路面破损逐块调查时根据路面的破损情况,按不同的损坏类型并结合维修整治方案进行全线逐块调查,其目的是为了统计工程量,为工程的概预算提供参数依据。调查内容主要包括公路修建管理养护技术资料、路面破损状况、交通荷载、环境条件、路基状况、结构物损坏情况等,以求准确地评价路面板的损坏情况,找出造成路面板损坏的原因,为整治方案提供设计依据。

参照《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ073.1-2001),依据路段破损状况调查得到的断裂类病害的板块数,按断裂种类和严重程度的不同,采用不同的加权系数进行修正后,确定路段的断板率(DBL),以百分率表示^[16],得到路面破损状况的调查统计结果。并结合路面结构性破损的调查统计结果、采用雷达对路面板脱空的无损检测结果以及路面表层的病害情况,评价旧水泥路面破损的状况,以便采取适当的处治措施对其进行维修和养护。

1.3 旧水泥混凝土路面加铺层的国内外研究现状

目前,许多发达国家公路建设的重点已经从新建逐渐转向对现有公路加铺或改造。1976年,美国提出4R计划(即:罩面 Resurfacing、恢复再生 Restoration、修缮 Rehabilitation、改建 Reconstruction),已经开始非常重视旧路的加铺改造工作了。除美国之外,我国已是拥有高速公路里程最多的国家,已达6.51万公里,目前我国公路网络基本形成,高等级公路建设已经取得阶段性成果,重点也正在从新建向现有公路的修复转移^[17]。

通过国内外的调研,对旧水泥混凝土路面的加铺改造主要可以归结为以下三种结构形式:

- (1) 旧水泥路面上加铺新的水泥混凝土罩面,简称“白+白”方案;
- (2) 旧水泥路面上直接或补强后加铺沥青混凝土面层,简称“白+黑”方案;
- (3) 旧水泥路面先碎石化然后加铺新的水泥混凝土面层或沥青混凝土面层,简称“碎石化+水泥混凝土面层”或“碎石化+沥青混凝土面层”

方案。

以下就上述三种加铺方案做进一步的介绍和论述。

1.3.1 旧水泥路面加铺水泥混凝土罩面（以下简称“白+白”方案）

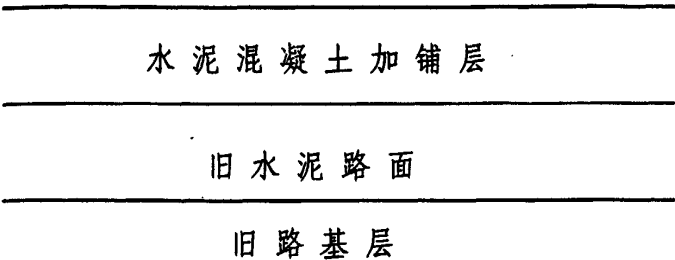
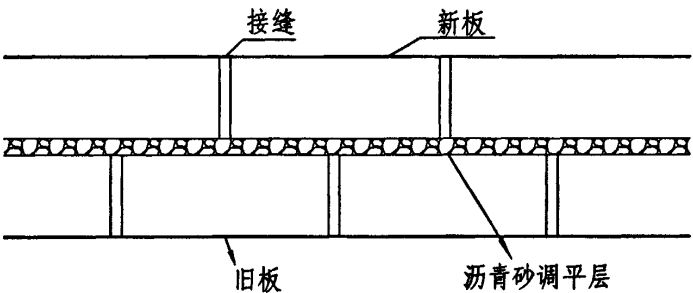


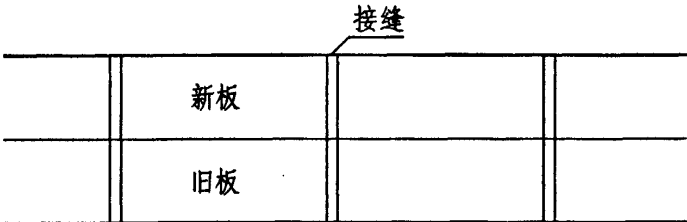
图 1.1 “白+白”结构示意图

Fig.1.1 “white +white” structural diagram

在“白+白”方案中，按罩面与原路面的层间粘结方式可以分为结合式、分离式和部分结合式（图 1.2）。也有的在加铺分离式水泥混凝土罩面后铺一层薄的沥青混凝土面层用于改善路面的使用性能。



a) 分离式水泥混凝土板铺设



b) 结合式水泥混凝土板铺设

图 1.2 水泥混凝土板铺设示意图

Fig.1.2 Schematic diagram of laying cement concrete slab

结合式加铺层对原路面的处治要求较高，原路面的评价等级须达到“良”以上，由于原路面的板间接缝，使得加铺层反射裂缝问题更加严重，从而会严重缩短加铺层的使用寿命。

而相对于结合式加铺层而言,分离式加铺层能够适用于原有水泥路面状况较差的情况。与其它加铺结构形式相比它在加铺层施工前对现有水泥路面的处治工作要求较小,只需对板低空隙较大处及活动的水泥混凝土面板等进行修复。通过这些处治,可使加铺层及隔离层的厚度适当减薄,从而使工程总体较为经济。实践证明,分离式水泥混凝土路面加铺层在路面性能退化前的较长时期内,性能和费用都优于沥青加铺层。

分离式加铺层可以避免因路面重修带来的费用大、工期长、干扰正常交通秩序等一系列问题。它可以在原有路面上直接施工,而不需要挖除全部现有的水泥混凝土路面再对基层进行处治。水泥混凝土加铺层的铺筑方法同新铺筑的水泥混凝土路面施工方法基本一样,可做成接缝设传力杆或不设传力杆的素混凝土路面,也可做成钢筋混凝土或连续式钢筋混凝土路面,施工便利。对于分离式水泥混凝土加铺层来说,由于旧水泥混凝土路面的接、裂缝或错台引起的应力集中会促使加铺层层底的弯拉应力过大,而新修的水泥板是一刚度较大结构层,因而,这类结构的设计控制指标是新加铺层板底的弯拉应力,即以新板的疲劳寿命为控制指标。

按照美国对已使用 2~39 年的分离式水泥混凝土加铺层的损坏调查,这类加铺层的主要损坏是角隅断裂和纵、横向裂缝,其错台量较新建水泥混凝土路面少得多,平均值变动于 0~5.6mm 范围内。

1.3.2 旧水泥路面加铺沥青混凝土面层(以下简称“白+黑”方案)

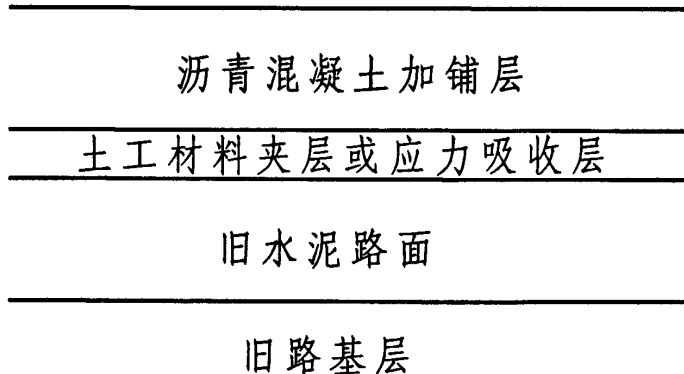


图 1.3 “白+黑”罩面结构示意图

Fig.1.3 “white +black” structural diagram

沥青加铺层反射裂缝的产生和扩展直接关系到采用怎样的防反射裂缝措施。对旧水泥路面沥青加铺层反射裂缝的产生和发展,目前学术界已基本形成共识,一般认为交通荷载和环境温度荷载是引起沥青加铺层反射裂缝的主要因素。为了防治和控制反射裂缝,《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2002)^[14]要求

只有当旧水泥混凝土路面的结构损坏状况和接缝传荷能力均评定为“优良”或“中”时,并且对旧路面存在的进展性裂缝、错台和板底脱空等病害进行修复后,才能加铺沥青面层。

沥青加铺层设计的重点在于防治和控制反射裂缝。为此,国内外学者进行了大量理论分析研究和试验路的铺筑。美国联邦公路局(FHWA)于1970年提出了一个减少沥青加铺层反射裂缝的研究计划NEEP-10,该计划包括几个方面的研究内容^[18, 19]:加铺层厚度、沥青的稠度、沥青混合料中的外掺剂、加铺前对旧混凝土路面的处理及应力消解层等。1988年美国沥青协会(AI)对减少反射裂缝的几种措施总结为:在加铺前对水泥混凝土路面板断裂及稳固、对沥青混凝土加铺层锯缝和填缝以及沥青混合料外掺橡胶粉均有很好的效果^[18, 19]。国内长安大学、东南大学、同济大学、长沙理工大学、华南理工大学等高校及一些科研单位从上世纪90年代开始也先后开展了加铺层防反裂缝措施的理论研究,并结合实体工程铺筑了大量的试验路^[20-22]。这些试验路基本包含了以下几种主要防治反射裂缝的措施:增加沥青加铺层的厚度;改善沥青加铺层材料组成;采用土工合成材料夹层;设置应力/位变吸收薄膜夹层;断裂稳固旧混凝土板;铺设大粒径沥青混合料和级配碎石裂缝缓解层;以及在沥青混合料中掺入纤维等阻裂材料;对旧水泥混凝土路面板进行灌浆处理等。

增加沥青加铺层的厚度。通过增加沥青加铺层的厚度来延缓反射裂缝的产生,这种方法在早期加铺沥青面层的工程中应用较为普遍。增加厚度可以明显增加路面的整体弯曲刚度,减少在交通荷载和温度荷载作用下加铺层底部接缝处产生的应力。增加加铺层厚度相对延长了反射裂缝的路径长度,从而延长了反射裂缝的反射时间,延长了路面的使用寿命。但当厚度增加到一定的程度后,所产生的效果就不再明显且不经济,所以这种方法并不可取。通常情况下不采用直接增加厚度的方式进行沥青面层的加铺。美国俄亥俄州的试验表明,即使采用12.7cm的沥青混凝土罩面层,在不到一年的时间内,沥青面层已出现反射裂缝。美国公路协会的研究报告指出,无论是4cm的薄面层,还是厚达25.4cm的特厚沥青混凝土面层,都出现不同程度的反射裂缝。另外研究还表明,当沥青面层的厚度在12cm以内时,增加沥青面层的厚度可以在一定程度上起到延缓反射裂缝的作用,当超过这一厚度时,再用增加沥青面层厚度的方法防治反射裂缝既不经济,而且效果也不太好。

改善沥青加铺层的材料组成。这里改善材料的组成主要是指改善沥青的特性和改善混合料中各集料的组成级配。现在道路改性沥青一般是指聚合物改性沥青,共分三类:热塑性橡胶类,如苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS),SBS具有良好的变形自恢复性和裂缝的自愈性;橡胶类,如丁苯橡胶(SBR),它是世界上应用

最广泛的改性剂之一；树脂类，如乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(EVA)，聚乙烯(PE)等。其中，SBS的高温、低温、弹性恢复性能、感温性无论从哪方面讲，都有非常突出的优点，是PE和EVA所无法比拟的；PE仅仅在高温稳定性方面显示出较好的效果，但相比SBS还有很大的差距；EVA的高温稳定性不如PE，然而低温性能较PE要好，但不如SBS。因SBS具有其它改性剂无可比拟的优点，近年来我国改性沥青主要以SBS为发展方向，应用其抵抗沥青混合料的高温车辙、低温缩裂，并达到变形的自恢复和裂缝的自愈目的。为了更好地发挥SBS的各种优良性能，其合理的剂量应为3%~5%。

沥青马蹄脂碎石(SMA)在实际工程中的应用越来越广泛，它属于粗集料断级配密实性沥青混凝土，空隙率为2%~4%，其中沥青通常使用SBS改性沥青。这种沥青混合料的特点是三多一少，即粗集料多、矿粉多、沥青用量多、细集料少。与传统的沥青混凝土相比，SMA具有以下优点：首先具有良好的表面功能、抗滑性能、抗车辙性能、噪音小等特点；其次还能提高路面的抗变形能力、且维修养护工作量少、使用寿命长等优点；同时还可以减薄表面层的厚度。最近，沙庆林院士提出了一种新型的路面结构，碎石沥青混凝土(SAC)，它同样是一种骨架密实性结构。SAC具有空隙率小、耐久性好、表面构造深度大、抗滑及抗变形能力强等优点，在实际工程中逐渐得到认可。

采用土工合成材料夹层。土工合成材料主要包括土工织物和土工格栅两大类。其中土工织物包括聚丙烯或聚酯、聚酯织物和聚乙烯、聚丙烯或聚酯无纺布。无纺布厚度为0.4mm~4mm，模量为10MPa~160MPa，临界应力5MPa~20MPa，临界应变40%~140%。织物的厚度较薄些，为0.4mm~0.7mm，模量则高些为400MPa~1500MPa，临界应力和应变相应为40MPa~140MPa和8%~15%。而织物由于模量稍高，可对加铺层起少量加筋作用。而土工格栅包括聚丙烯或聚酯土工格栅、玻璃格栅和金属格栅。土工格栅的厚度为0.8mm~11mm，模量为900MPa~2500MPa，临界应力和应变与织物相近。金属格栅的厚度为2mm~4mm，其模量可达8000MPa~10000MPa。刚度大的夹层对于降低加铺层内因温度下降而引起的应力和应变的作用不如软夹层，但对于降低荷载产生的应力应变的作用则远大于软夹层，采用复合式夹层（下层为应力吸收层，上层为金属格栅），虽然可以像软夹层那样减少温度引起的反射裂缝，但仍保留了软夹层不能降低加铺层荷载应力的缺点^[23-25]。

近些年将土工合成材料用于路面夹层的工程实例，为防治反射裂缝提供了很好的技术选择。自从20世纪70年代初，土工布、玻纤格栅等土工合成材料就开始在国外的道路和机场跑道的加铺和改造中用于防治反射裂缝^[26,27]。比如，比利时在1985~1989年期间开始在Erquelinnes、Tourpes和Wepion等13个地区大

面积应用土工布来防治加铺层反射裂缝^[26]。80~90年代,美国的德克萨斯州、宾夕法尼亚州和密西西比州也分别铺筑了土工布或土工格栅的多条试验路,并对加铺层反射裂缝发展情况进行了长期观测^[26]。近10多年来,在我国许多省市的公路与城市道路旧水泥路面沥青加铺改造中也大面积使用了土工合成材料来防止加铺层的反射裂缝^[29]。由于各地的原有道路的状况、交通组织、施工水平等条件存在的差异,土工合成材料在各路段防治沥青加铺层反射裂缝的效果也不尽相同。

设置应力/应变应力吸收薄膜夹层(SAMI)。常用的 SAMI 有橡胶沥青应力吸收薄膜、道路专用烧毛土工布等。SAMI 具有如下特性: SAMI 设置在旧水泥混凝土路面与沥青加铺层之间,一是采用的粘结材料如橡胶沥青或其他改性沥青等粘层油的抗剪强度应满足层间抗剪性能的要求;二是需要有一个适当的劲度和韧度,来分散加铺层层底接缝处的应力/应变,从而达到防治反射裂缝的效果。国内外对此类措施也展开了不少的研究、并取得了一定的成果:

(1) 橡胶沥青封层和应力吸收层(SAMI)

国外曾采用 SBS 和 EVA(乙烯醋酸乙烯)橡胶沥青应力吸收中间层(SAMI)防治反射裂缝,具有一定效果,证明其可以减少和延缓反射裂缝。但据 Francken 的分析,软夹层对距底面 3mm~5mm 以上的加铺层,以及位于接缝(或裂缝)之间的加铺层内的承载能力具有不良影响,使其应力和应变比不设夹层时反而增大。

(2) 国外还有用软沥青混凝土作为中间层,其中沥青砂应力吸收层应用比较广泛。沥青砂应力吸收层是由 0~4.75 mm 的细集料组成,其胶结料一般使用 SBS 改性沥青或橡胶改性沥青。实践表明它对气候寒冷情况下防治反射裂缝较为有效,成功的关键在于沥青粘度和中间层厚度的合理选择。

(3) 俄罗斯在 14~10cm 厚的沥青加铺层下设置乳化沥青处理集料防裂中间层或集料中间层。

(4) 美国 Koch 公司专门针对反射裂缝的问题研发了一种名为 Strata 应力吸收层系统,其胶结材料采用高弹性的聚合物材料,集料最大粒径为 9.5mm,混合料弹性模量较低,承受变形的能力较强。它在美国研究、修筑试验路并跟踪观测积累设计、施工经验后,已在美国新泽西、伊利诺斯、堪萨斯、德克萨斯、密苏里等州的多个项目中使用,均获得了成功。武黄高速公路在国内首次大面积的引进了 Strata 应力吸收层系统,从运营两年的情况来看,其防裂效果很明显。

铺设大粒径沥青混合料和级配碎石应力缓解层。在旧水泥路面与新铺沥青面层之间设置级配碎石层,该级配碎石层是由特粗式开级配沥青碎石混合料所组成,具有 20%~35% 的空隙率,同时还能充当具有排水功能的基层。沥青级配碎

石根据密实度分为三种：密级配、开级配及半开级配。密实级配沥青碎石（空隙率小于 10%）采用的集料最大公称粒径通常较大，又称为大粒径沥青碎石（Large Stone Asphalt Mixture，简称 LSM），其模量大、强度高，主要作为基层使用。作为防治反射裂缝中间层使用的沥青碎石，一般采用空隙率大于 10% 的半开级配或开级配（Asphalt Macadam，我国规范简称 AM），空隙率大，模量低，具有一定的吸收应力、应变的能力，裂缝在其内部发展缓慢。

美国沥青协会建议采用最大粒径分别为 75 mm、63 mm 及 50 mm 大粒径开级配的沥青碎石作为裂缝缓解层^[18,19]，利用混合料的多空隙结构可有效地阻断裂缝尖端的扩展路径，消弱混凝土板相对位移的传递能力，并且能消散、吸收由交通荷载及温度荷载所产生的荷载应力和温度应力。在国外，对旧水泥路面进行破裂稳固已经是比较成熟的技术^[30]，1977 年宾夕法尼亚州对 10km 的水泥路面用截断式破裂机破裂，用 40T 及 50T 轮胎压路机稳固，再铺筑 18 cm 开级配热拌沥青碎石基层和 8cm 沥青面层，直到 1981 年仍未出现反射裂缝。国内也铺筑了一些级配碎石裂缝缓解层的试验路^[22,31]，比如湖北公（安）石（首）线级配碎石裂缝缓解层及破碎板和玻纤格栅夹层对比研究、京石高速公路河北正定试验路的改性沥青应力吸收膜及级配碎石层防裂对比、宁连一级公路淮阴试验路级配碎石层及土工格栅夹层防裂对比研究等。

综上所述，这些防反射裂缝措施在实际工程中都能达到一定的防裂效果，但各种防裂措施的效果与作用机理有所不同，且每种措施的防裂效果都是有限的。因此，根据实际情况采取合理恰当的防裂措施，用以减少旧水泥路面沥青加铺层反射裂缝，延长其扩展到面层的时间及采用主动的措施对出现的裂缝进行控制仍是目前值得研究和探讨的课题。

1.3.3 旧水泥路面补强后加铺沥青混凝土面层

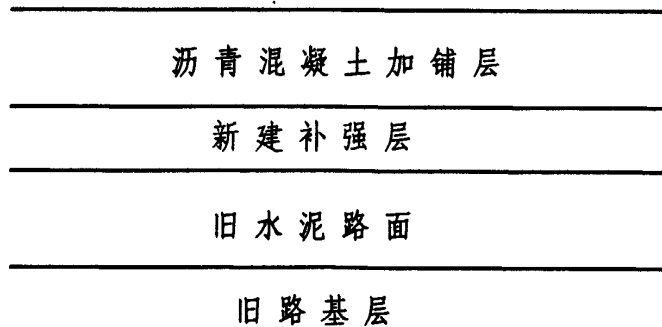


图 1.4 “白+补强层+黑”罩面结构示意图

Fig.1.4 “white + strengthening +black” structural diagram

为了消除或减小旧水泥混凝土路面板接、裂缝以及错台等对沥青加铺层的直接作用产生的应力集中，有时会在旧水泥路面上设置一半刚性基层或级配碎石基

层, 已达到补强或隔离的作用, 从而使沥青加铺层的使用寿命得以延长。

旧水泥路面上设置半刚性基层作为新建基层, 该新建基层一般采用水泥稳定碎石基层或二灰碎石基层, 对旧水泥路面补强后再加铺沥青面层。但由于半刚性基层自身的温缩和干缩特性, 容易出现早期开裂, 使沥青加铺层过早出现反射裂缝进而发生水损坏, 影响其使用性能。国内这种方法在早期旧水泥路面的改造中应用比较多, 如今已经很少使用了。

级配碎石作为旧水泥路面与新铺沥青面层之间的中间层, 在国内尚不多见。但在澳大利亚和南非等一些国家用级配碎石作为缓解沥青面层反射裂缝的一种措施实例较多, 且应用比较成功。级配碎石具有良好的力学非线性特征, 但国内的一些实例工程应用也不尽人意, 其中优质的级配碎石和一流的施工工艺是级配碎石成败的关键。

1.3.4 碎石化后加铺沥青面层

水泥路面碎石化(Rubbilization)是一种旧水泥混凝土路面破碎处治技术, 是对旧水泥路面进行大修或改造的重要手段, 主要针对大面积破坏已丧失整体承载力且通过局部挖除、压浆或直接加铺面层等处治方式已不能恢复使用功能的旧水泥路面。碎石化是对旧水泥路面采用的一种极性处理方法, 一般采用特殊的机械设备, 对基层破坏严重部位进行处治后, 将水泥混凝土板块破碎成较小的粒径($<30\text{ cm}$, 甚至更小) 然后将其压实, 并加铺新的路面结构。通常情况下, 加铺沥青混凝土面层^[32]。

当原路面的功能性和结构性损坏都非常严重时, 且路面修复需要的费用较大、周期较长时, 可以采用碎石化技术对原路面进行处理, 然后将碎石化后的粒料层充分压实作为新建路面的基层, 从而彻底的消除反射裂缝的影响。通常来说, 原水泥路面在大型破碎机械设备的作用下须达到以下几种目的:

- (1) 破碎后, 原水泥路面的病害可以彻底消除;
- (2) 原水泥路面破碎后具有一定的强度;
- (3) 破碎后, 能使原水泥混凝土板在水平面上的强度分布均匀;
- (4) 原水泥路面破碎后不会产生应力集中, 影响沥青加铺层。

原水泥路面碎石化后, 旧水泥混凝土板破碎成了粒径小于 30 cm 的碎石层, 其弹性模量降低很多, 自然相应的承载力也跟着降低很多。根据国外的工程经验, 碎石化能成功地消除反射裂缝的问题, 若破碎后的碎石层压实度不够, 再加上承载力的大量降低, 可能造成加铺后的沥青面层出现严重的车辙。碎石化技术我国还处于应用初期, 只有山东等少数省份采用过。美国曾经在第 35 号洲际公路南向车道上的钢筋混凝土路面(JRCP)做过碎石化处理, 然后加铺沥青面层。分别加铺了 10 cm 和 20 cm 面层, 六年后路面出现了明显的车辙和纵向疲劳开裂, 虽然

20 cm厚沥青加铺层的情况好于10 cm厚加铺层,但仍无法避免其发生破坏。该工程实例充分显示,碎石化后的原水泥路面,结构承载力大大降低,且强度的分布具有不均匀性。因此,在新加铺路面结构设计时,要充分考虑结构强度的降低和强度分布不均匀性,使新铺路面结构可以较长时间地承受外部荷载作用。

1.4 研究的主要内容和技術路线

1.4.1 本文的研究内容

本文结合旧水泥混凝土路面病害的调查,根据实际情况,通过室内四点弯曲疲劳试验和轮载重复试验比较不同防裂夹层抵抗反射裂缝的能力。结合有限元分析,寻求适于防治沥青加铺层反射裂缝的新材料,并对基于设置防裂夹层的沥青加铺层设计方法进行探讨。本论文主要研究内容如下:

(1) 沥青加铺层反射裂缝的成因和扩展机理

依据沥青路面线弹性断裂力学理论和有限元方法,建立三维实体模型对沥青加铺层反射裂缝的成因和扩展机理进行分析,通过力学分析揭示,旧水泥路面接、裂缝处沥青加铺层产生反射裂缝的原因。

(2) 加铺层沥青混合料的路用性能验证

为了满足室内模拟试验的条件,采用AC-10沥青混合料级配,通过马歇尔试验确定最佳油石比,然后验证其路用性能以满足规范的要求,为室内模拟试验做准备。

(3) 不同防裂夹层延缓反射裂缝的室内试验对比分析

在室内理想条件下采用轮辙仪对不同加铺层结构进行轮载重复试验分析对比其疲劳破坏的情况,模拟不同防反措施的沥青加铺层反射裂缝的产生和发展过程,评价不同防裂夹层抵抗反射裂缝的性能。然后采用疲劳试验机进行四点弯曲疲劳试验,来验证不同防反措施延长疲劳寿命的效果。

(4) 基于防裂夹层沥青加铺层厚度设计方法

通过理论计算、室内试验及实体工程现场测试,研究设置防裂夹层后沥青加铺层厚度的设计方法。根据加铺层结构破坏的机理,建立有限元三维实体模型,探讨基于防裂夹层旧水泥路面沥青加铺层结构的设计方法、设计控制指标和满足未来交通量要求的沥青加铺层最小厚度。

1.4.2 研究的技术路线

本文研究的技术路线:

(1) 对国内外旧水泥路面沥青加铺层防反射裂缝措施,理论分析方法,试验手段及设计方法进行调研,了解在国内外在该领域的最新研究成果。

(2) 基于断裂力学采用有限元方法对加铺层反射裂缝产生的机理进行分析,

并对不同沥青加铺层结构进行力学分析比较。

(3) 通过室内轮载重复试验和四点弯曲疲劳试验, 评价不同防反措施抗反射裂缝能力, 然后确定最优方案。

(4) 在理论分析和室内试验的基础上, 探讨基于防裂夹层沥青加铺层厚度设计方法。

第二章 沥青加铺层反射裂缝的成因及作用机理

目前，我国许多旧水泥混凝土路面经压浆或换板后直接加铺沥青混凝土面层，由于旧水泥路面板间接缝的存在，在车辆荷载和温度荷载的作用下，这些接缝会在沥青面层反映出来形成反射裂缝。旧水泥混凝土路面加铺沥青混凝土面层，这是一种典型的补强方法，这种复合式路面结构相应地吸收两种材料的优点，“刚柔相济”，即水泥混凝土提供了稳定、坚实的基层，而沥青面层提供了抗滑性能好、平整度较高的面层，大大提高了路面的使用性能。这种复合式路面结构涉及到刚性和柔性两种结构形式，材料性能差异很大，而且旧水泥路面上存在接缝和裂缝、错台及板底脱空等损坏现象，使得复合结构中奇异部位突出，这就会在沥青加铺层对应于旧水泥混凝土路面板间接缝、裂缝处出现反射裂缝（见图2.1～2.2）。反射裂缝本身对沥青加铺层的使用性能没有太大影响，主要是环境因素（雨水、氧化等）常常使裂缝迅速扩大，从而缩短沥青加铺层的使用寿命^[33, 34]。因此，研究反射裂缝的产生、扩展机理及防治方法对延长路面使用寿命，降低养护费用具有十分积极意义。

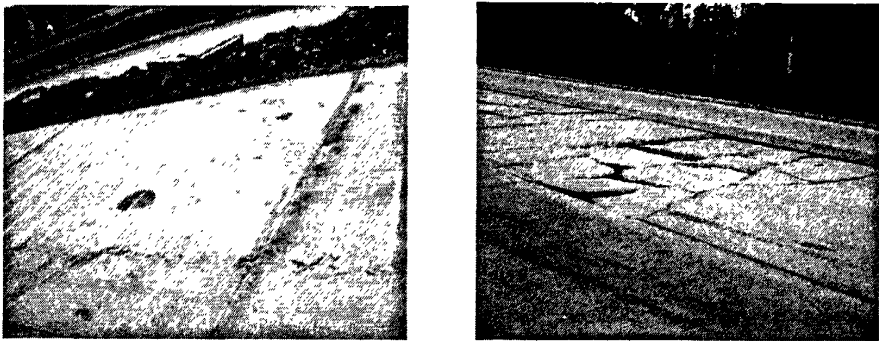


图 2.1 旧水泥混凝土路面病害

Fig.2.1 The diseases of old cement concrete pavement

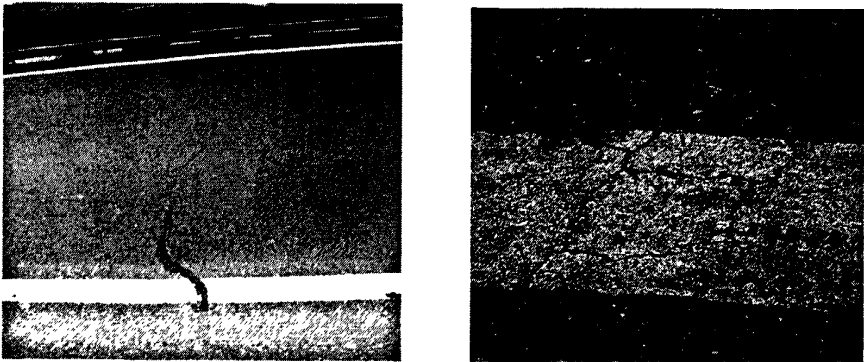


图 2.2 沥青面层反射裂缝

Fig.2.2 Reflective cracking of asphalt surface

2.1 沥青路面开裂的基本理论

关于沥青路面断裂分析的理论,国内外已展开了大量的研究^[1]。早期的研究主要是基于经验公式或传统的层状结构体系理论的计算方法。目前,断裂力学的疲劳寿命预测方法被国内外业内学者广泛采用,但总体上关于沥青混合料特性、沥青路面结构层厚度、上下结构层材料性能的差异以及结构层间的联结状态等因素对影响沥青路面裂缝扩展的机理研究尚不系统,也未提出有关沥青混合料断裂韧性参数等材料性能指标以及沥青路面抗裂设计的方法,有关的试验测试还不成熟。

1. 传统沥青路面结构破坏理论

在早期,业内学者主要是通过调查采集不同类型沥青路面的数据,然后对数据整理分析、总结并提出经验性的公式和设计方法,计算或预测沥青路面的使用寿命。后来,随着塑性力学与传统疲劳强度理论的发展及推广应用,关于沥青路面结构开裂破坏的研究开始进入了理论分析阶段。

塑性力学在道路中的应用,主要是确保结构承载力,利用材料的抗剪性能指标,运用塑性破坏理论,分析道路结构的屈服强度,并在材料选择和结构设计方面防止这种破坏的发生。随着传统疲劳破坏理论的发展,人们认识到路面的破坏是车辆荷载、温度荷载的重复作用或两者的偶合作用引起的疲劳应力超过了路面材料的抗拉或抗剪强度而引起的。美国、英国、前苏联及联邦德国等国,根据十多年的大量数据结合疲劳强度理论,在设计上做了重大改革。目前,各国沥青路面设计主要依据该疲劳强度理论,根据各国的实际情况,分别制定了自己的路面设计方法。

2. 基于断裂力学的沥青路面破坏理论

由传统疲劳破坏强度理论得知,沥青路面的破坏是荷载的反复作用在路面材料中的损伤积累造成的,但相关的分析只是针对完整连续、无缺陷、各向同性的结构体系,并没有考虑材料结构内部先天存在的缺陷或使用期内逐渐出现的缺陷对路面结构造成的不利影响。这也使得运用传统疲劳力学理论对沥青路面结构的计算结果与实际的情况存在偏差,尽管引入了不同的修正系数,但使计算的结果仍存在较大的不确定性。按照后来发展的断裂力学和疲劳断裂力学的观点,结构的破坏正是由于其内部存在缺陷引起的应力集中造成的内部损伤,当这种应力集中引起的损伤积累超过材料或结构抵抗破坏的容许值时,内部的缺陷就会继续发展,最终导致结构的整体破坏。断裂力学与疲劳断裂力学在工程上的应用,使得原有的设计理论、计算方法和验算指标等都发生了重大变革。该理论在沥青路面工程中的应用大约开始于20世纪60年代末、70年代初,至今为止大概经历了线弹性断裂力学、疲劳断裂力学与粘弹性断裂力学等几种断裂力学理论的应用

发展阶段^[11, 13, 35-37]。

(1) 线弹性断裂力学

引用线弹性断裂力学的理论对沥青路面结构内部存在缺陷(微小裂纹)进行分析,即认为裂缝是有一定宽度的,裂缝尖端的曲率并不为零,考虑裂缝尖端存在的应力集中,采用传统强度理论进行计算。如1980年,Monismith等人,用热粘弹性力学对交通荷载与温度荷载作用下的基层开裂(或旧路面)与面层(或加铺层)中的应力分布特征做了研究,并就橡胶沥青夹层对于裂缝尖端附近应力消散作用进行了分析。结果表明,软弱夹层能有效地降低裂缝尖端的应力集中,延缓反射裂缝的扩展。

严格意义上的线性断裂力学,是针对裂缝尖端曲率半径为零,宏观上可检的裂缝,准确地描述裂缝尖端应力应变场,通过断裂准则计算临界裂缝尺寸或临界荷载,并建立裂缝起裂和稳定扩展条件的计算方法。线性断裂力学在沥青路面结构开裂破坏分析中的应用,主要在于计算分析沥青路面在行车荷载和温度荷载作用下的开裂机理及各类防裂措施阻止沥青路面开裂的原理,并引入应力强度因子、能量释放率及相应的断裂韧性参数等概念,为人们提供了科学认识沥青路面开裂的方法和手段^[37-39]。

(2) 疲劳断裂力学

沥青路面结构始终受车辆荷载和温度荷载的重复作用,其破坏特征主要体现为疲劳破坏,故有必要对沥青路面内部裂缝的疲劳扩展规律进行研究。目前已公认,传统的无缺陷疲劳起裂阶段和随后的裂缝疲劳扩展阶段是沥青路面结构疲劳破坏的两个阶段,而反射裂缝是在后一阶段形成的。关于前一阶段,人们已经做了大量的疲劳破坏试验与结构分析,积累了很多经验,所得成果至今仍在沿用;而后一阶段,主要围绕疲劳断裂规律展开研究,其中还要牵涉到材料疲劳断裂规律数学模型的建立,模型参数的测试与确定以及各种对模型建立与计算有影响的参数修正等。

有关沥青路面疲劳断裂疲劳过程的描述,有的采用应力、应变或荷载等力学参数与循环加载次数的回归关系作为相应的疲劳方程。现在,人们普遍采用基于应力强度因子经验性总结出的Paris公式,描述沥青路面疲劳裂缝的扩展过程,并以此推算沥青路面的使用寿命。利用此理论结合疲劳断裂试验数据,可以得到有价值的结论,以便用于指导实际工程(包括提出沥青加铺层的设计方法)。但基于沥青混合料性质的复杂性,目前对沥青路面的疲劳断裂还处于研究阶段,离提出成熟的抗裂设计方法还有一定的距离。

(3) 粘弹性断裂力学

沥青混合料是一种粘弹性材料早已得到公认,同时也展开了不少有关沥青材

料的粘弹性分析。粘弹性断裂力学最近几年才被应用于沥青路面开裂的研究当中,其主要针对沥青材料的粘弹性与低温抗裂性等方面的试验研究以及沥青路面温度应力的计算等方面。目前,应用粘弹性断裂力学理论与方法进行理论分析研究的成果尚不多见。

综上所述,基于线弹性断裂力学,应力强度因子、能量释放率、 J 积分及相应的断裂韧性参数等概念的引入,能够较好地描述反射裂缝的产生和扩展过程,通过断裂准则能较准确地判断路面开裂的程度。

3. 有限元法

能够获得解析解的实际问题很少,数值方法中的有限元法是将力学理论用于处理实际工程问题的有效途径之一,从而使得有限元法在实际工程中得到广泛的应用,反过来又促进了有限元法自身的进一步完善。

随着学者研究的不断深入,使有限元法可用于分析不同的地基类型、不同结构层之间的接触形式及接触程度、多层路面结构体系分析、不同荷载及其不同作用位置等复杂条件下的应力、应变和位移。同时作为研究成果,出现了很多可用于分析研究和工程设计的应用软件。计算机技术的日益成熟,使得三维有限元法在路面应力状况分析中得到了广泛的应用。20世纪70年代后期开始,我国才将有限元法用于路面的应力分析。姚祖康等人应用有限元程序 CP-E1 分析了弹性半空间地基上四边自由板的挠度和应力,并依据疲劳损耗分析了临界荷载位置。王世林等人利用 ANSYS,对旧水泥路面沥青加铺层结构建立三维模型,通过对荷载位置、加铺层厚度、特种夹层材料及加铺层材料模量的变化进行多次模拟,最后总结出沥青加铺层结构优化设计方案。周富杰和孙立军利用 ADINA 程序,采用三维有限元方法,分析了半刚性基层对沥青面层荷载应力和反射裂缝的影响,为产生反射裂缝的半刚性基层沥青路面的评价方法提供了理论基础^[23-25, 40]。

2.2 沥青加铺层反射裂缝及其扩展模式

2.2.1 反射裂缝

原有开裂路面或旧水泥混凝土路面上加铺沥青面层,由于温度循环变化和车辆荷载的反复作用,原有接缝或裂缝会反射到加铺层,从而出现路面开裂,这种现象就是所谓的反射裂缝,如图 2.3 所示。

反射裂缝几乎在所有的加铺层中都会发生,旧水泥混凝土路面上的 AC 罩面或半刚性基层沥青路面上 AC 罩面反射裂缝较为普遍。当沥青混凝土加铺到旧路面上时,前者经常受后者约束,下层路面接、裂缝处任何一点点移动将在加铺层中产生应力,如果加铺层的应力超过其抗拉强度时,即会产生开裂。

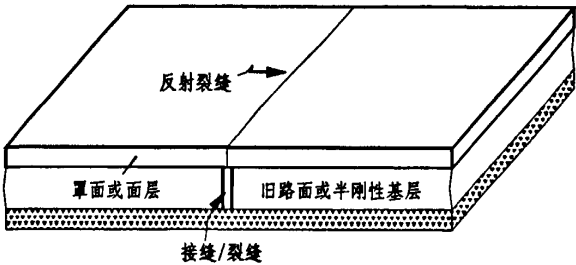


图 2.3 反射裂缝的示意图

Fig.2.3 Schematic diagram of reflective cracking

2.2.2 反射裂缝的扩展模式

旧水泥路面沥青加铺层，在相应旧水泥混凝土路面板的接、裂缝处极易出现反射裂缝。根据断裂力学的观点，主要是由于板间接缝及路面板自身裂缝等先天性缺陷的存在，在交通荷载和温度荷载重复作用下，容易在接、裂缝处产生应力集中，从而导致裂缝的产生和扩展，最终造成沥青面层反射裂缝的出现。

线弹性断裂力学中，根据结构内部裂纹受荷情况及裂纹扩展变形情况可分为三种基本类型：I型裂纹（张开型），II型裂纹（剪切型），III型裂纹（撕开型）^[36]。I型裂纹是指裂纹受垂直于裂纹面的拉应力作用，裂纹面沿反方向相对张开；II型裂纹是指裂纹受平行于裂纹面且垂直于裂纹尖端的剪应力作用，上下两裂纹面沿x轴相对滑开；III型裂纹是指裂纹既受平行于裂纹面又受平行于裂纹尖端线的剪应力作用，上下两裂纹面沿垂直于z轴方向相对撕开。这三种裂纹类型分别如图 2.4（a）～（c）所示。从旧水泥路面沥青加铺层开裂特征来看，沥青加铺层反射裂缝的扩展模式主要有张开型反射裂缝和剪切型反射裂缝两种类型。交通荷载引起的反射裂缝与I型裂纹和II型裂纹的扩展模式相对应，温度荷载与I型裂纹的扩展模式相对应，复合型反射裂缝则是I型和II型的偶合作用，III型裂纹的扩展模式在沥青加铺层结构中并不常见。

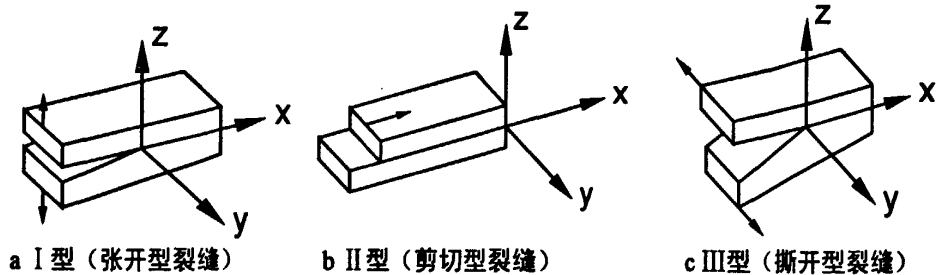


图 2.4 反射裂缝的扩展模式

Fig.2.4 Expansion mode of reflective cracking

交通荷载主要引起沥青加铺层的弯拉型反射裂缝（即，张开型反射裂缝）和剪切型反射裂缝，见图 2.5。在车轮作用在接、裂缝的顶部时，接、裂缝两侧均

出现较大弯沉且两侧弯沉差不大而引起的沥青加铺层开裂破坏,即为弯拉型反射裂缝;剪切型反射裂缝是指在车轮偏荷载的作用下,接、裂缝两侧产生的弯沉差过大而引起的沥青加铺层剪切破坏。温度变化使得路面结构产生两种变形,见图 2.6。一是由于温度的下降致使接、裂缝两侧的沥青面层及旧水泥混凝土路面板产生收缩而引起的张开型反射裂缝;二是由于四季及昼夜温差导致路面各结构层中的温度分布不均,且各结构层材料具有不同的热膨胀系数,造成旧水泥混凝土路面板和沥青加铺层的收缩与翘起使得沥青加铺层出现反射裂缝。

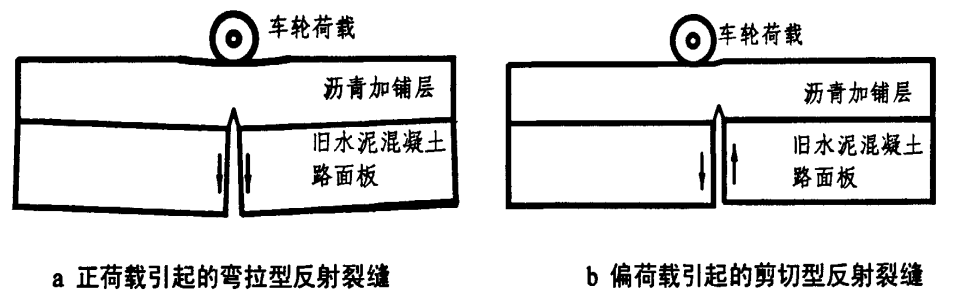


图 2.5 交通荷载引起的反射裂缝

Fig.2.5 Reflective cracking caused by traffic load

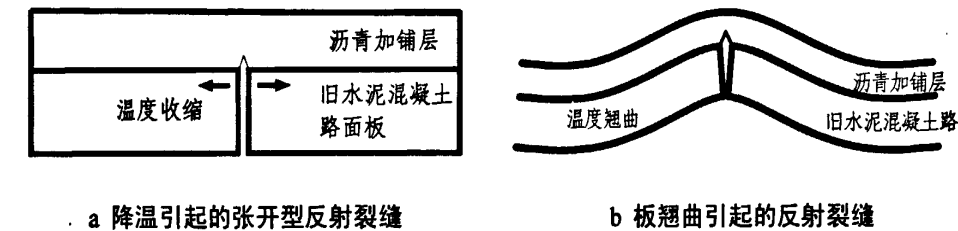


图 2.6 温度变化引起的反射裂缝

Fig.2.6 Reflective cracking caused by temperature changes

沥青加铺层反射裂缝是在交通荷载与温度荷载的循环作用下引起路面材料和结构疲劳损伤而逐渐发展形成的。沥青加铺层反射裂缝的产生经历了三个阶段:第一个阶段为起裂阶段,由于旧水泥路面存在的接、裂缝,使得加铺后的沥青面层在相应位置处同样存在原始缺陷,导致了路面结构的不完整,交通荷载和温度荷载及其耦合作用在接、裂缝处产生的位移和应力不再连续,并出现了较大的应力集中,此时会在加铺层的底部接、裂缝相对应处出现微小裂缝;第二个阶段为稳定扩展阶段,裂纹从应力集中点沿加铺层厚度方向不断扩展,同时沿接、裂缝方向发展;第三个阶段为破裂阶段,经过一段时间的运营,裂缝贯穿整个沥青加铺层厚度,最终形成反射裂缝并逐步贯穿整个路面的横断面,尤其是在冬季更为严重。

2.3 沥青加铺层反射裂缝成因及扩展机理

旧水泥混凝土路面沥青加铺层在车辆荷载和温度荷载的反复作用下,由于其不完整性,使得旧水泥路面的接、裂缝处不能承载相应的拉应力和剪应力,造成整个路面结构产生的应力和位移在其接、裂缝处不再连续,而出现应力集中现象。当应力超过路面材料所能承受的极限强度时,接、裂缝处沥青面层极易发生破坏,因此反射裂缝总与旧水泥路面的接、裂缝相对应。

2.3.1 裂纹的萌生与扩展

前面曾阐述,反射裂缝的形成包括起裂、稳定扩展、破裂三个阶段。沥青加铺层必须满足强度准则时,在其底部才能产生最初的裂纹也就是初裂状态;满足格里菲斯准则后,裂纹才能进一步扩展,最后直至破坏形成反射裂缝。完成裂缝萌生须满足下列三个条件^[4]:

- (1) 裂缝萌生前加铺层内部的拉应力或剪应力必须大于或等于路面材料所能承受的极限强度;
- (2) 裂缝形成后加铺层结构的能量释放率必须等于路面材料的断裂能;
- (3) 能量必须完全消耗在裂缝萌生过程,即所释放的总应变能应等于造成裂缝进一步扩展的断裂能。

裂纹一般起源于结构内部存在局部缺陷的应力或应变集中的区域,沥青加铺层底部的旧水泥路面存在的接、裂缝这种原始的缺陷恰好符合这一特点,此处的沥青加铺层材料极易产生疲劳破坏,成为天然的裂纹起裂中心,即所谓的裂纹起源区。最初,由于外部荷载的作用,在水泥路面板间接缝处沥青加铺层底部表面萌生了数量可观的微裂纹。这些微裂纹在较大的应力水平作用下,沿最大切应力的方向不断发展,发展到一定程度,有很多微裂纹贯通连在一起形成一个主裂纹,这就是裂纹的萌生阶段。随后进入主裂纹的扩展阶段,主裂纹在较大拉应力或剪应力作用下,沿垂直于拉应力方向或平行于剪应力继续沿厚度方向和接、裂缝方向扩展,最终贯穿整个沥青加铺层。

2.3.2 反射裂缝成因及机理分析

沥青加铺层较薄时,在日温差或行车荷载作用下,老路面的接缝或裂缝会反复张开和收缩,它产生的反复张拉应力会引起上覆沥青面层产生疲劳开裂,形成反射裂缝。反射裂缝,在国外是指已开裂旧沥青路面或旧水泥路面上在荷载的作用下反射到新加铺的沥青面层形成的裂缝,这在不同地区不同季节都可能发生。反射裂缝的轻重程度与沥青品质和加铺层的厚薄有关。在我国主要有两种形式,一是旧水泥混凝土路面接、裂缝引起的反射裂缝;二是半刚性基层温缩、干缩引起的反射裂缝。

2.3.2.1 季节温度循环变化

低温引起原有路面接、裂缝不断地收缩和开裂。由于加铺层受下层的约束,致使接、裂缝处的加铺层内产生拉应力,如图 2.6 (a)。裂缝开合仅是面层产生拉应力的部分原因,同时拉应力还与裂缝之间的宽度、季节温度变化以及路面材料的温缩系数有关。与其相对应是,因低温罩面材料产生收缩,减少了罩面的长度,在接、裂缝的一定区域内引起了裂缝的开裂和在加铺层内产生了另外的附加拉应力。

裂缝扩展到加铺层表面是拉应力发展的结果,由于裂缝的扩展,应力得到一定程度的消散,应力的减少量直接与罩面的材料有关,同时还与罩面的模量有关。上述三种因素的耦合作用,在罩面层中引起相当大的拉应力,当引起的拉应力超过加铺层的极限抗拉强度时,加铺层将会出现裂缝。

2.3.2.2 日温度循环变化

如图 2.6 (b) 所示,日温度变化同季节温度变化一样将在加铺层内产生拉应力。唯一不同点在于日温变化范围较小,但发生频率较高。此外日温变化将在路面结构内产生温度梯度。通常晚上温度下降,路面上半部分温度比下半部分低,这样上半部分较底部收缩多,因此增加了接、裂缝处加铺层开裂的几率。接、裂缝处开裂的积累导致了加铺层内部拉应力的增加,尽管相对来说很小,但日温变化比季节温度变化产生的应力更频繁,且影响更持久。因此,这两种同属于温度型反射裂缝。

2.3.2.3 交通荷载

动荷载能引起接、裂缝处不同方向的竖向位移,如图 2.5 (a、b) 所示。在车辆荷载作用下,当接、裂缝下有空隙或旧水泥混凝土路面板底出现脱空时路面结构将发生竖向位移;另外,当荷载不良或车辆超载时,路面结构同样会产生竖向位移。竖向位移将会导致路面结构内出现弯拉应力(图 2.5a)和剪切应力(图 2.5b),最终引起加铺层反射裂缝的出现。有剧烈的荷载移动或混凝土板间接、裂缝两侧底部脱空更严重时,破坏性裂缝将向上反射引起路面开裂,这就是通常所说的荷载型反射裂缝。

2.3.2.4 水

反射裂缝本身对路面的使用性能影响不大,当裂缝穿过加铺层反射到表面时,水分可渗入路面结构内部而引起路面进一步的损坏。雨水或雪水通过裂缝下渗,在旧路面的下方不断积累,造成了基层和路基含水量的增加,使其强度不断弱化。如果行车荷载在接、裂缝处产生的动载效果不明显时,将在其邻近区域发生唧浆和空隙。当动荷载效果较明显和裂缝进一步扩展时,空隙将引起路面的竖向沉降或加剧旧水泥混凝土路面板底脱空甚至导致面板断裂,相邻板块出现较大

的相对位移，随之导致沥青面层的碎裂、剥落等病害现象的发生，加速路面功能性的损坏甚至引起路面结构性的破坏，影响路面的使用性能，大大缩短路面的使用寿命。

2.4 旧水泥混凝土板间接缝应力集中有限元分析

交通荷载和温度变化都容易使旧水泥混凝土路面板间接缝处的沥青加铺层底部产生应力集中，导致沥青加铺层反射裂缝的形成和扩展，尤其是沥青面层较薄时，应力集中现象就更为明显，且加铺层底部应力比表面要大的多，所以沥青加铺层一般先在底部出现开裂，并逐渐向上扩展。沥青加铺层出现开裂后，在其裂纹的尖端会产生很大的应力集中，当应力强度因子超过路面材料的断裂韧性时，路面会继续开裂，直至裂缝贯穿整个沥青加铺层。

2.4.1 力学模型建立与计算参数

为了进一步研究分析旧水泥混凝土路面接缝处沥青加铺层底部应力集中的现象，采用 ABAQUS 有限元软件对交通荷载和温度变化对加铺层的应力影响进行分析。本文采用更加符合实际的三维有限元力学模型；另外，为了使地基为弹性半空间体，具有无限的大特性，地基采用扩大尺寸为 14.01m×8m×6.5m，混凝土板的尺寸为 5m×4m。探索不同车辆荷载形式和温度变化对沥青加铺层底部接、裂缝处应力状态的影响。

本文建立三种有限元模型，即水泥混凝土板间接缝分别在正荷载、偏荷载以及加铺层顶部两小时内降低 10℃的情况下，板间接缝处沥青加铺层底部应力状态，车辆 荷载采用 BZZ-100, 轮压 0.7 Mpa 双轮中心距 32 cm。有限元分析时将车轮荷载简化为 18.9 cm×18.9 cm 的方形均布荷载，接地面积为 357.21 cm²该复合式路面结构模型各结构层计算参数如下表 2.1。

表 2.1 各结构层计算参数

Tab.2.1 Caculation parameters of each stucture layer

物理特性 结构层	厚度 /cm	弹性模量 /Mpa	泊松比 μ	导热系数 / $W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$	线膨胀系数 / $m \cdot ^\circ C^{-1}$
沥青加铺层	10	1200	0.35	1.2	2.1×10^{-5}
水泥混凝土	24	30000	0.15	1.5	1.0×10^{-5}
水稳碎石基层	25	1500	0.25	1.4	1.2×10^{-5}
二灰土	20	800	0.3	1.2	1.5×10^{-5}
土基	-	40	0.4	1.0	0.5×10^{-5}

基本假定：各结构层为均质、连续、各向同性线弹性体，各层层间竖向、水平位移均连续，不计个结构层的自重。旧水泥混凝土路面沥青加铺层有限元模型，如图 2.7 所示。

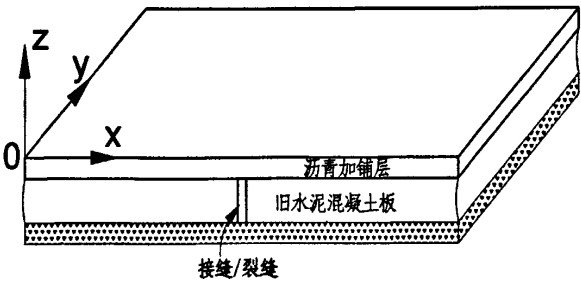


图 2.7 沥青加铺层结构示意图
Fig.2.7 Schematic diagram of asphalt overlay

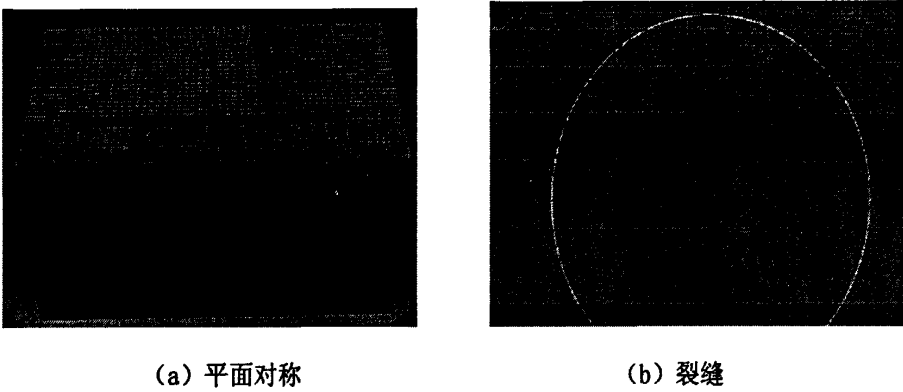
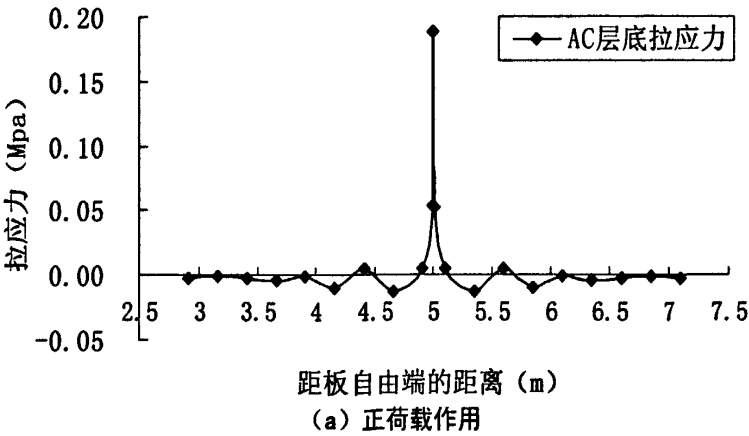


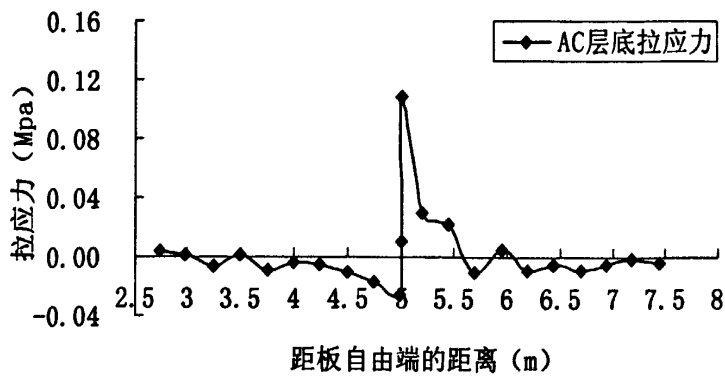
图 2.8 旧 PCC 路面上加铺 AC 面层有限元模型

Fig.2.8 Finite element model of old cement concrete pavement asphalt overlay

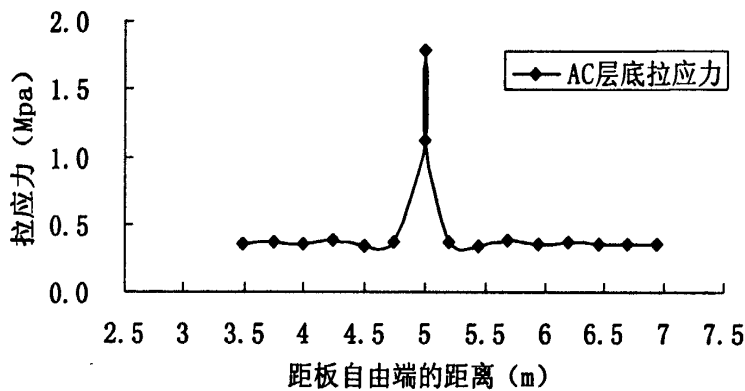
2.4.2 有限元计算结果

旧水泥混凝土路面沥青加铺层在正荷载、偏荷载以及沥青加铺层顶面降温 $\Delta T=-10^{\circ}\text{C}$ 作用下，接缝处沥青加铺层底部应力及弯沉情况见图 2.9～图 2.14。其中正荷载，即接缝顶部施加荷载；偏荷载，即接缝边缘施加荷载。





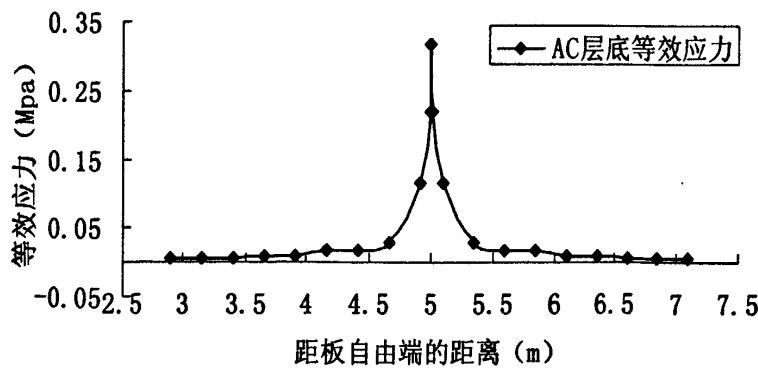
(b) 偏荷载作用



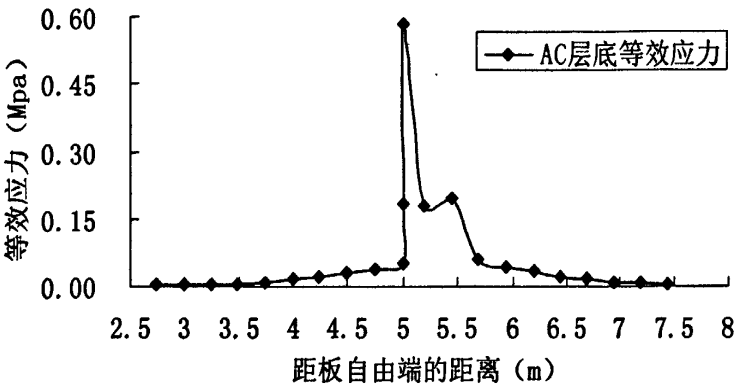
(c) 温度荷载作用

图 2.9 沥青加铺层层底拉应力 σ_1 沿 X 轴变化图

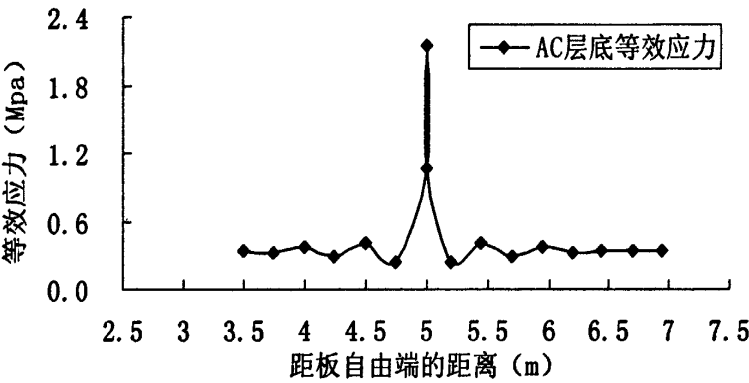
Fig.2.9 The bottom tensile stress change chart of asphalt overlayer along x-axis



(a) 正荷载作用



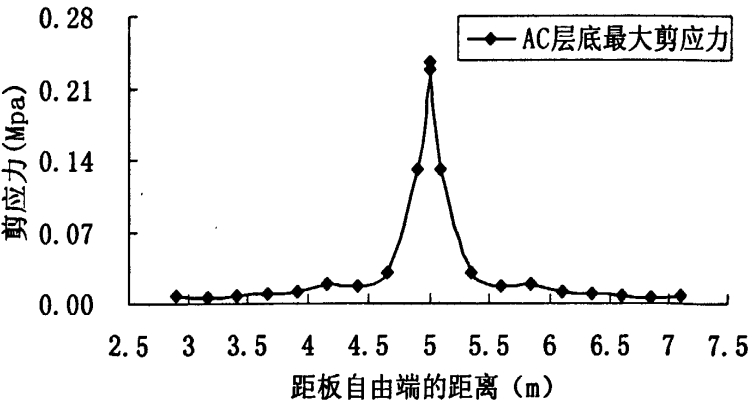
(b) 偏荷载作用



(c) 温度荷载作用

图 2.10 沥青加铺层层底等效应力 σ_e 沿 X 轴变化图

Fig.2.10 The bottom equivalent stress change chart of asphalt overlayer along x-axis



(a) 正荷载作用

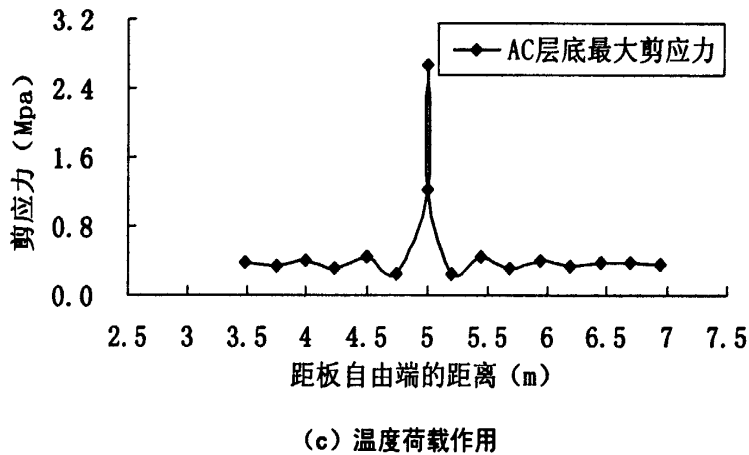
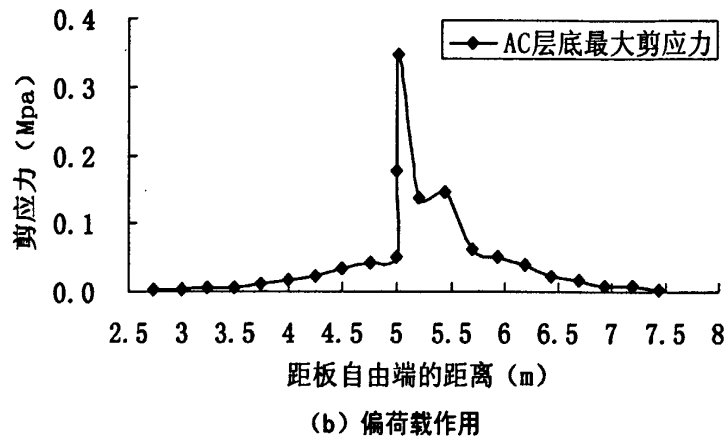
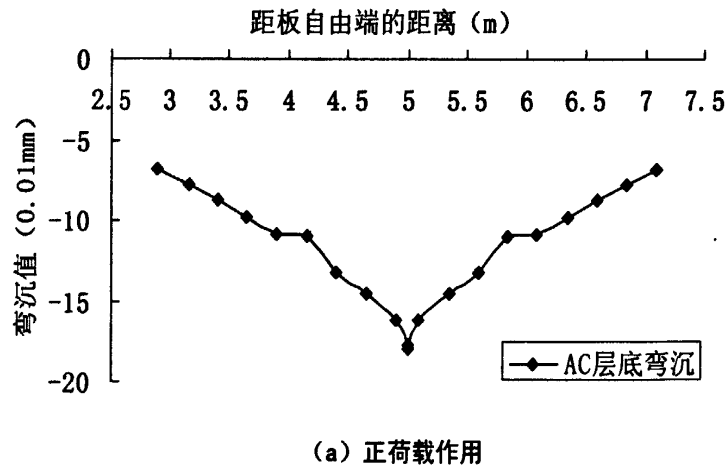


图 2.11 沥青加铺层层底最大剪应力 τ_{max} 沿 X 轴变化图

Fig.2.11 The bottom shearing stress change chart of asphalt overlayer along x-axis



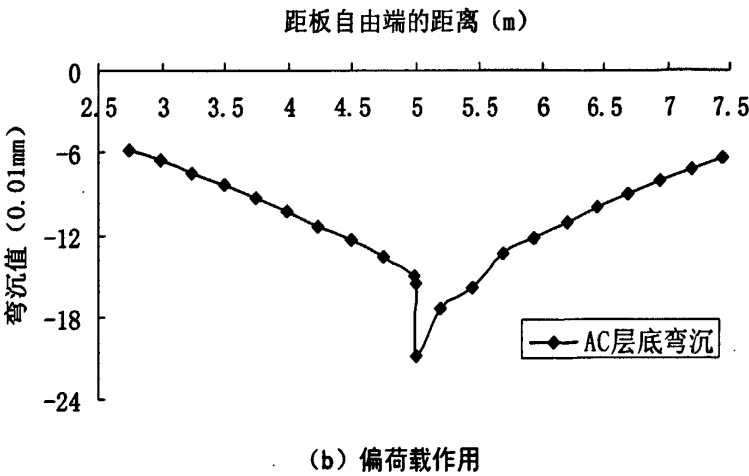
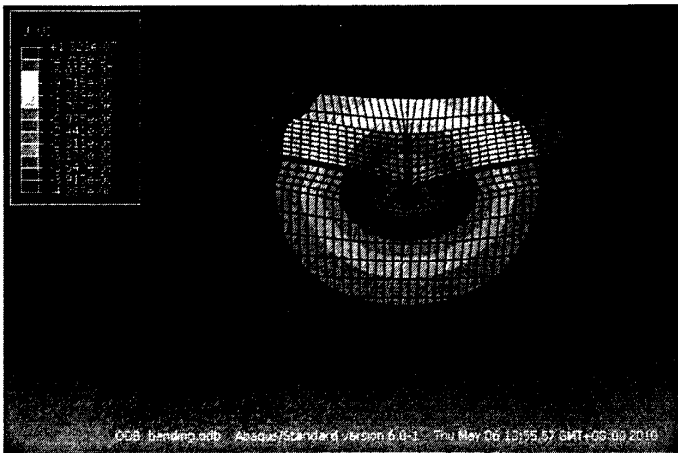
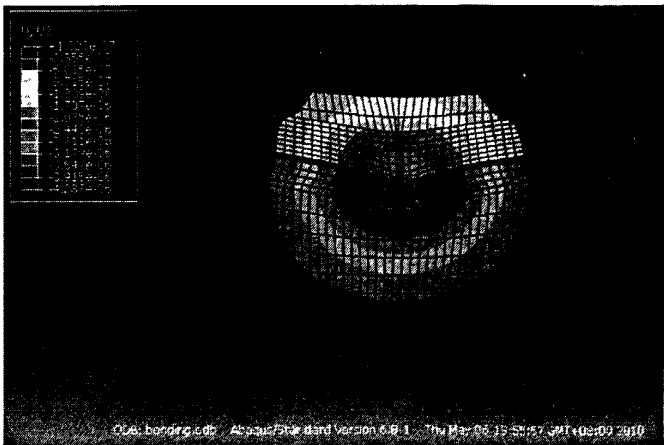


图 2.12 沥青加铺层层底弯沉沿 X 轴变化图

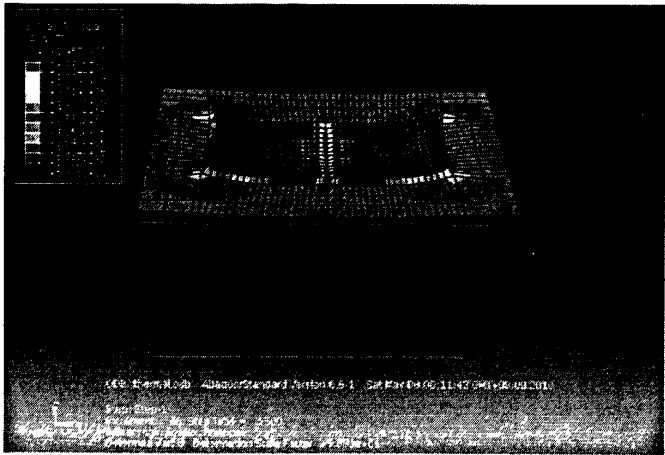
Fig.2.12 The bottom deflection change chart of asphalt overlay layer along x-axis



(a) 正荷载作用



(b) 偏荷载作用



(c) 温度荷载作用

图 2.13 路面各结构层应力的有限元计算分布图

Fig.2.13 The finite element analysis maximum stress distribution of pavement layers

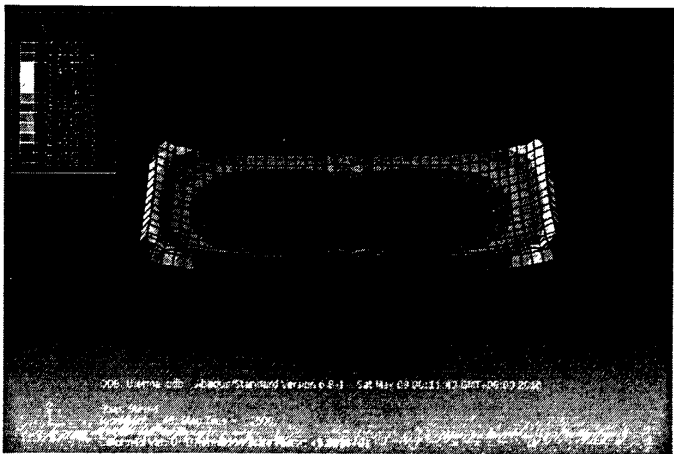


图 2.14 温度荷载作用下混凝土板翘曲示意图

Fig.2.14 Schematic diagram of concrete slab warping under temperature loading

2.4.3 结果分析

以上有限元计算计算结果表明，无论车辆荷载还是温度荷载作用，在旧水泥混凝土路面沥青加铺层的最大应力均出现在板间接缝处，即混凝土板间接缝处的沥青加铺层底部存在应力集中现象。主要分析如下：

1) 从图 2.9～图 2.11 可以看出，旧水泥混凝土路面沥青加铺层在正荷载、偏荷载以及沥青面层顶面降温 $\Delta T = -10^{\circ}\text{C}$ 作用下，其接缝处沥青加铺层底部的最大主应力 σ_1 分别为 0.188Mpa、0.101 Mpa、1.790 Mpa；等效应力 σ_e 分别为 0.316 Mpa、0.585 Mpa、2.146 Mpa；最大剪应力 $\tau_{\max}$ 分别为 0.235 Mpa、0.338 Mpa、2.674 Mpa，均远大于非接缝处的应力值，可以看出温度度变化对接缝处的沥青加铺层破坏作用最大，其次是车辆偏荷载作用，破坏作用最小的是车辆正荷载作

用。因此,特别是在北方地区冬季突然降温的情况下,温度作用对沥青加铺层反射裂缝的影响不容忽视。

2) 由图 2.12 可知,接缝处的弯沉值明显大于非接缝处,在行车正荷载与偏荷载作用下,接缝处沥青加铺层层底弯沉分别为 17.5968 (0.01 mm)、20.6526 (0.01 mm),同样行车偏荷载在接缝处沥青加铺层底部产生的弯沉值要大于正荷载。由图 2.15 可以看出,在沥青加铺层顶面降温 $\Delta T = -10^{\circ}\text{C}$ 时,水泥混凝土板边缘出现翘曲现象,也是造成了接缝处的应力集中的原因之一。

3) 行车偏荷载与正荷载相比,在接缝边缘处的等效应力、最大剪应力和沥青加铺层层底的弯沉均明显较大,虽然正荷载在接缝处产生的拉应力稍大,但可以看出剪应力是造成沥青加铺层破坏的主要原因,由此可知在偏荷载的作用下沥青加铺层下部的水泥混凝土板更容易发生断板现象,特别是混凝土路面板存在的纵向裂缝更容易受到行车偏荷载的作用。因此,在加铺沥青面层之前需对旧水泥混凝土板做好处理修补工作。

4) 计算结果表明,沥青加铺层反射裂缝是由旧水泥混凝土板间接缝处沥青加铺层层底的应力过大而引起的,且这种反射裂缝是从综合应力最大处,即沥青加铺层底部接缝处开始萌生,然后逐渐向上扩展,最后贯穿的整个沥青加铺层。

2.5 本章小结

本章主要内容可以总结为以下几点:

① 结合近些年国内外研究的成果,系统地阐述了沥青路面开裂的基本理论以及沥青加铺层反射裂缝的扩展模式;并结合实际情况分析力反射裂缝形成的机理及其影响因素。

② 采用有限元方法,证实了应力集中是造成旧水泥混凝土路面沥青加铺层出现反射裂缝的原因,且行车偏荷载与正荷载相比对旧水泥混凝土沥青加铺层复合式路面结构的破坏作用更为明显。在昼夜温差较大的地区,温度荷载缝对路面应力状态的影响不容忽视。

第三章 加铺层沥青混合料配合比设计及路用性能检验

沥青混凝土组成设计主要是为了确定用于特定工程的沥青混合料，沥青混合料级配组成对其力学性能和使用功能具有十分重要的影响。近年来，随着国民经济和道路交通事业的快速发展、道路交通量和轴载的迅速增加、车速的提高，同时要求所铺筑的道路具有良好的使用性能。沥青混合料配合比设计的主要内容包括选择适宜的原材料、确定适宜的级配、确定适宜的沥青用量以及进行必要的性能检验。本章主要根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)进行沥青混合料配合比设计。

3.1 原材料的选择

3.1.1 沥青

沥青型号，根据试验要求采用 70#普通基质沥青 (AH-70)，其技术指标：针入度 (25℃) 为 75；软化点为 47.3；60℃动力粘度为 164；延度 (15℃) >100；含蜡量为 1.9，均符合技术要求^[42]。

3.1.2 集料

1 粗集料

粗集料为石灰岩破碎的碎石，结合试验要求，粗集料的检测结果见 3.1 表，均符合规范要求。

表 3.1 粗集料指标检验结果

Tab.3.1 Coarse aggregate index test results

指标		技术要求	实测结果	检验结果
压碎值	不大于 (%)	30	24	合格
吸水率	不大于 (%)	3.0	1.8	合格
对沥青的粘附性	不小于	4 级	5 级	合格
针片状含量	不大于 (%)	20	16	合格
表观密度	不小于	2.5	2.65	合格
水洗法<0.075 mm颗粒含量	不大于 (%)	1	0.7	合格

2 细集料

沥青面层所采用的细集料为洁净、干燥、无风化、无杂质，并有适当的颗粒级配的人工轧制的机制砂，且与沥青有良好的粘结能力。细集料采用 0~4.75 mm 的人工机制砂，其检验指标表观密度为 2.611，含泥量为 3.1%，砂当量为 62%，

均符合规范的要求。

3 填料

所用填料为石灰岩磨细得到的矿粉，其技术性能指标见表 3.2。经检验各项技术性能指标均符合规范要求。

表 3.2 矿粉质量要求及检测结果

Tab.3.2 Ore powder quality requirements and test results

项目		单位	技术要求	实测结果	检验结果
表观密度,	不小于	t/m ³	2.45	2.696	合格
含水量	不大于	%	1	0.7	合格
粒度范围	<0.6 mm	%	100	100	合格
	<0.15 mm	%	90~100	95.2	
	<0.075 mm	%	70~100	81.4	
外观		—	无团粒结块	无团粒结块	合格
亲水系数		—	<1	0.7	合格
塑性指数		%	<4	3	合格
加热安定性		—	实测记录	无变化	合格

3.2 沥青混合料配合比设计

3.2.1 沥青混合料级配组成

由于本文试验的特殊性，试件模型的沥青面层的厚度只有 2 cm，考虑到面层的厚度较薄，决定沥青混合料级配组成采用 AC-10。其沥青混合料的组成级配，见表 3.3。

表 3.3 沥青混合料级配组成

Tab.3.3 Asphalt Mixture gradation composition

筛孔尺寸(mm)	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	矿粉
级配上限	100	100	75	58	44	32	23	16	8	—
级配下线	100	90	45	30	20	13	9	6	4	—
级配中值	100	95	60	44	32	22.5	16	11	6	—
采用级配	100	95	60	44	32	23	16	11	6	—
所占比例 (%)	0	5	35	24	12	9	7	5	5	6

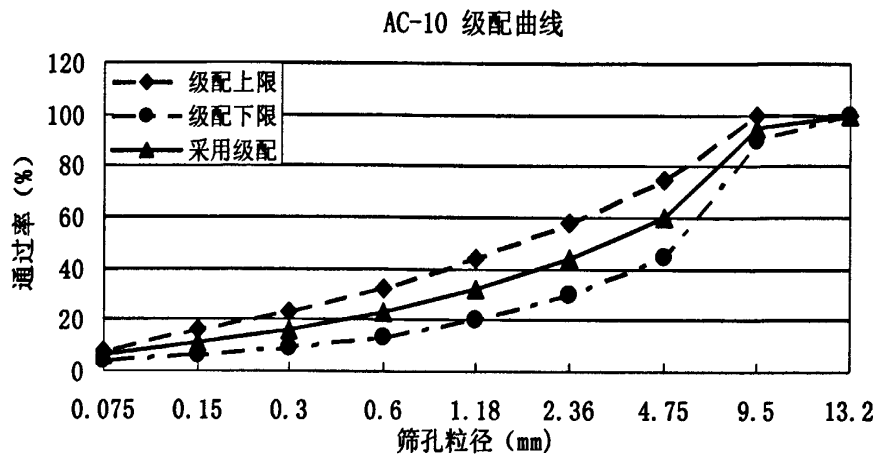


图 3.1 矿料级配曲线

Fig.3.1 Gradation curve of mineral aggregate

3.2.2 最佳油石比的确定

试验采用 70#普通基质沥青(AH-70)，根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTJ F40-2004)，同时结合实际工程经验，油石比按 0.3%的间隔变化，分别选取 4.2%、4.5%、4.8%、5.1%、5.4%等五个油石比，使用马歇尔电动击实仪对应制作五组马歇尔试件，然后对试件进行物理及力学性能指标的测定，最后得到马歇尔试件的相关技术指标，见表 3.4。

表 3.4 沥青混合料体积参数及力学性能指标

Tab.3.4 Asphalt Mixture volumetric parameters and mechanical properties

油石比 (%)	毛体积相 对密度	理论最大 相对密度	空隙率 (%)	矿料间隙 率 (%)	沥青饱和 度 (%)	稳定度 (kN)	流值 (mm)
4.2%	2.4286	2.5397	4.28	14.44	70.31	12.07	3.88
4.5%	2.4341	2.5261	3.64	14.52	74.94	12.31	3.87
4.8%	2.4394	2.5152	3.01	14.64	79.45	13.31	3.15
5.1%	2.4427	2.5045	2.47	14.85	83.36	13.49	2.90
5.4%	2.4368	2.4939	2.29	15.36	85.09	12.76	3.55
技术要求	-	-	2~4	≥14.0	65~75	>8.0	2~4.0

然后根据马歇尔试验结果，对马歇尔试验结果进行分析：以沥青用量为横坐标，以试件毛体积相对密度、稳定度、饱和度、空隙率、流值为纵坐标，绘制油石比与各项指标的关系曲线图。

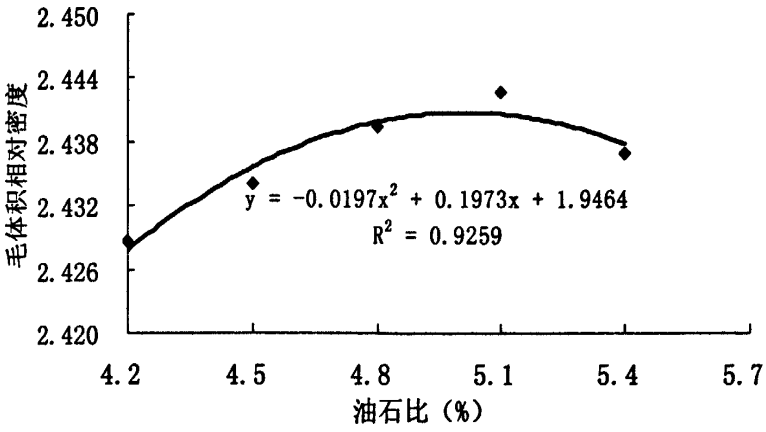


图 3.2 毛体积密度与油石比关系曲线

Fig.3.2 The relationship curve between bulk volume density and asphalt-aggregate ratio

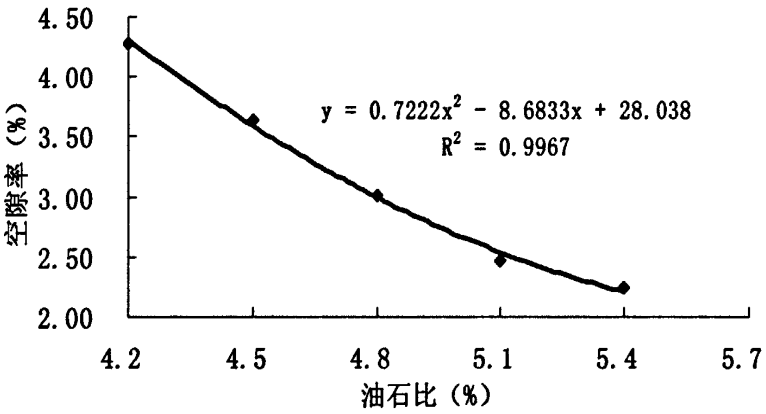


图 3.3 空隙率与油石比关系曲线

Fig.3.3 The relationship curve between percentage of voids and asphalt-aggregate ratio

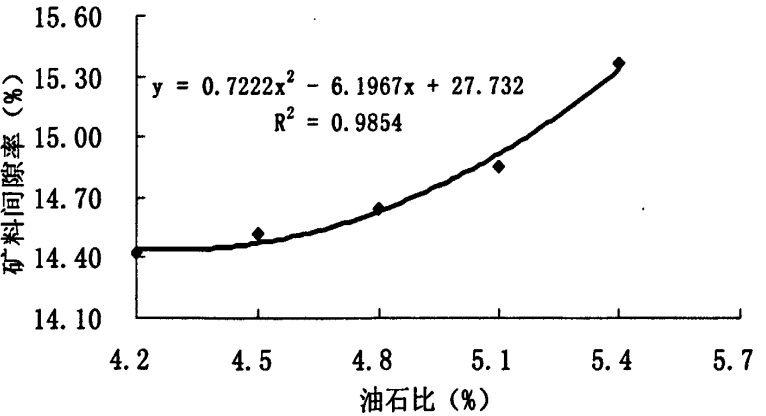


图 3.4 矿料间隙率与油石比关系曲线

Fig.3.4 The relationship curve between VMA and asphalt-aggregate ratio

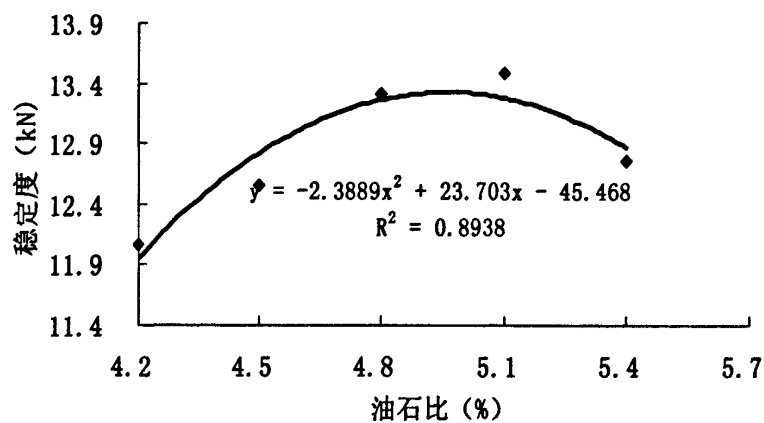


图 3.5 稳定度与油石比关系曲线

Fig.3.5 The relationship curve between stability and asphalt-aggregate ratio

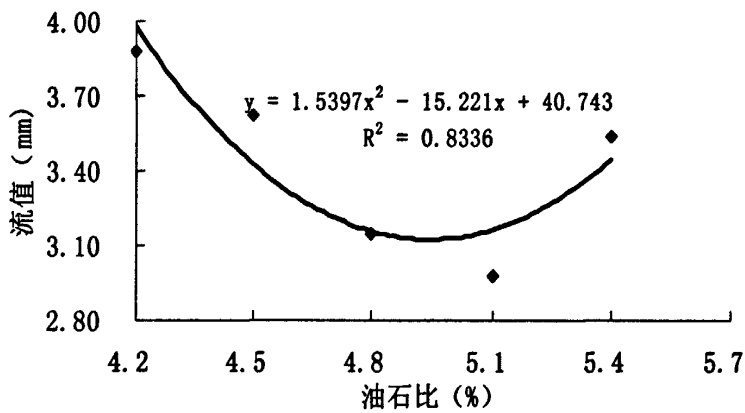


图 3.6 流值与油石比关系曲线

Fig.3.6 The relationship curve between flow value and asphalt-aggregate ratio

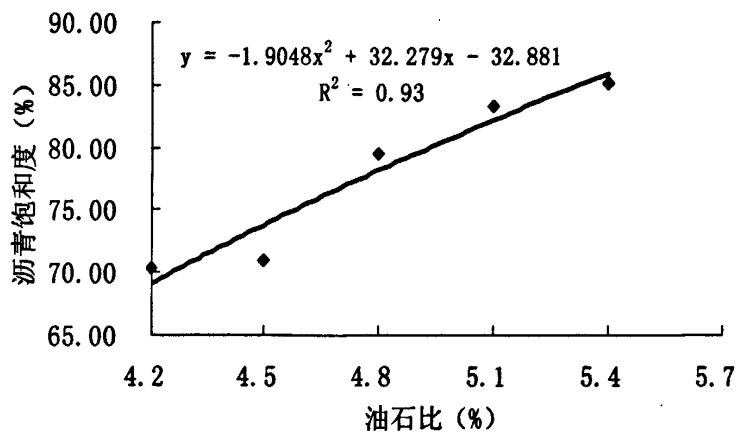


图 3.7 沥青饱和度与油石比关系曲线

Fig.3.7 The relationship curve between VFA and asphalt-aggregate ratio

根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004),按照确定最佳油石比的步骤,从图中可以得到: $OAC_{min}=4.41\%$, $OAC_{max}=5.13\%$ 。相应于密度最大值、稳定度最大值、目标空隙率 3%所对应的沥青含量分别为, $a_1=4.97\%$ 、 $a_2=5.02\%$ 、 $a_3=4.8\%$; 由于所选择的沥青用量范围未能涵盖沥青饱和度的要求范围,故取 $OAC_1=(a_1+ a_2+ a_3)/3=4.93\%$; $OAC_2=(OAC_{min}+ OAC_{max})/2=4.77\%$,所取得最佳沥青含量 $OAC=(OAC_1+ OAC_2)/2=4.85\%$ 。综合考虑,选择最佳油石比为 4.8%,各项指标均能满足规范的技术要求。

3.3 沥青混合料的路用性能

3.3.1 沥青混合料高温稳定性

沥青路面车辙是在高温季节重载车辆作用下塑性积累变形,是目前沥青路面破坏的主要形式之一。沥青路面车辙的大小与沥青和集料的性质、集料的级配、车辆轴载、路面施工及温度有关。随着交通量的日益增加和重载车辆的增多,车辙问题已成为沥青路面早期破坏的主要形式。

动稳定度作为沥青混合料抗车辙能力的指标,为了验证上述沥青混合料的配合比设计是否满足要求,本文参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JT J052-2000)进行沥青混合料的车辙试验,试验温度 60℃,试验轮压 0.7Mpa,其试验结果如下表 3.5 所示。

表 3.5 沥青混合料车辙试验结果
Tab.3.5 Asphalt Mixture wheel rut test result

试件编号	45min 变形量 (mm)	60min 变形量 (mm)	动稳定度 (次/mm)	规范要求	结论
1	4.239	4.799	1125	800	合格
2	4.336	4.952	1023	800	合格
3	4.135	4.687	1141	800	合格

结果显示,所设计的沥青混合料能够满足其高温稳定性的要求。

3.3.2 沥青混合料水稳定性

水损害是沥青路面最严重的病害之一,结合本文的研究内容旧水泥路面加铺沥青面层,沥青混合料的水稳定性显得尤其重要。由于车辆荷载和环境温度的作用沥青面层很可能会出现反射裂缝,特别是在冬季路面更容易出现低温开裂,出现反射裂缝以后,雨水就会沿裂缝向下渗透,在车辆荷载的作用下很可能产生翻浆沥青面层剥落并逐渐形成坑洞,严重影响行车安全,使路面行车质量严重下降。

3.3.2.1 浸水马歇尔试验

残留稳定度是评价沥青路面水稳定性的指标之一。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JT J052-2000）进行浸水马歇尔试验，其试验结果见表 3.6，试验结果显示满足规范的要求。

表 3.6 浸水马歇尔试验结果

Tab.3.6 Immersion Marshall test results

试件编号	浸水前 稳定度 (kN)	平均值 (kN)	浸水后 稳定度 (kN)	平均值 (kN)	残留稳定 度 (%)	规范要求
1	12.78	12.86	10.21	10.31	80.1%	80%
2	13.62		10.02			
3	12.54		11.26			
4	12.51		9.73			

3.3.2.2 冻融循环劈裂试验

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JT J052-2000）进行冻融劈裂试验，其试验结果见表 3.7，试验结果满足规范的要求。

表 3.7 冻融劈裂试验结果

Tab.3.7 The Marshall test results of freeze-thaw splitting

试件编号	未冻融 试件的 劈裂强度 (MPa)	平均值 (MPa)	冻融后 试件的 劈裂强度 (MPa)	平均值 (MPa)	残留 强度比 (%)	规范要求
1	1.2482	1.1774	0.9321	0.9098	77.3%	75%
2	1.1847		0.8863			
3	1.0867		0.8975			
4	1.1897		0.9234			

3.4 本章小结

本章首先对原材料的性质进行了检测，沥青、矿料均满足要求，然后对沥青

混合料的配合比进行了设计,采用 AC-10 中值作为沥青混合料的级配曲线,确定了最佳油石比为 4.8%。就沥青混合料的路用性能做了验证,分别对沥青混合料的高温稳定性和水稳定性做了相关的验证,结果显示均满足规范的技术要求。

第四章 沥青加铺层反射裂缝室内轮载重复试验对比分析

自上个世纪 80 年代以来,随着塑料格栅(Tensar)应用于道路工程以来,随后出现了各种各样的土工合成材料,以及近些年出现的 STRATA 应力吸收层和各类高粘沥青应力吸收层(SAMI)等材料,道路工作者开始将这些材料应用于旧路改造或新建公路的实际工程中,作为旧路面与新铺路面或半刚性基层与沥青面层之间的夹层。国内外学者开始对各类夹层材料的路用性能做了大量的理论分析和试验研究,包括铺筑了很多试验路段。大部分集中于研究土工合成材料延缓路面开裂和抵抗高温性能方面^[43-46],而目前对夹层材料延长路面疲劳寿命功能的研究还处于起始阶段,而且主要采用万能材料试验机(MTS)和沥青路面分析仪(APA)对加铺层板式试件或梁式试件进行室内疲劳试验^[47,48]。在总结国内外已有试验经验的基础上,对沥青混合料车辙试验仪系统进行改进,以实现荷载引起的旧水泥混凝土路面沥青加铺层疲劳裂缝、反射裂缝以及其他裂缝扩展的情况进行模拟,通过比较分析不同夹层材料延缓疲劳裂缝、反射裂缝及其他裂缝的效果,最后选出最优的防裂夹层材料,为理论分析及实际工程应用提供依据。

4.1 试验目的及试验方案简介

4.1.1 试验目的

本试验主要分析研究,横向接、裂缝和纵向接、裂缝分别在车轮荷载重复作用下,旧水泥混凝土沥青加铺层反射裂缝产生及扩展的情况,通过在旧混凝土路面板与沥青加铺层之间加铺各类防裂夹层材料,以比较分析其延缓反射裂缝的效果。

本试验的目的主要是研究对比分析不同土工合成材料和应力吸收层(SAMI)作为夹层材料防治反射裂缝的有效性。通过室内试验对比分析:①经编玻纤格栅(以下简称:玻纤格栅);②FHGS 高强玻纤复合土工格栅(以下简称: FHGS 格栅);③聚酯玻纤布;④橡胶应力吸收层,四种材料抵抗反射裂缝的能力。通过分别加铺此四种夹层材料与直接加铺沥青面层(即,不处理)作对比,观察旧水泥混凝土路面沥青加铺层反射裂缝产生和扩展的情况,以及路面结构变形的规律,以便提出最优的防反射裂缝措施。

4.1.2 试验方案

4.1.2.1 试验设备

本试验用到的试验仪主要有:沥青混合料拌和机、轮碾成型机、恒温室和车辙试验机。这里重点介绍车辙试验机。车辙试验机本来是用于做沥青混合料车辙试验,但由于本试验的特殊性需要对其做一定程度的改装,使其能够适用于防反

射裂缝的试验研究。车辙试验机主要有以下几部分组成:

试验轮:采用的是模拟汽车轮胎的橡胶制的实心轮胎,外径为 200 mm,轮宽为 50 mm,橡胶层厚度为 15 mm。橡胶采用国际标准硬度,20℃时为 84 ± 4 ,60℃时为 78 ± 2 。试验轮行走距离为 $230 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$,往返碾压速度 $(42 \pm 1) \text{ 次/min}$ (21 次往返/min),采用曲柄连杆驱动试验台运动(试验轮不移动)。需要注意的是,在试验前应检查轮胎橡胶的硬度,不符合要求时应及时更换,由于本试验是在同条件下做试验研究,那么此过程就可以忽略。

加载装置:试验轮与试件的接触压强在 60℃时为标准荷载 $0.7 \text{ Mpa} \pm 0.05 \text{ Mpa}$,施加的总荷重为 78kg 左右,根据实际情况可以对其进行调整。结合本试验具体情况,由于试验要在 $15^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 左右进行,且所用试件与普通的车辙成型试件也有所不同,将试验轮与试件的接触压强调整到 $0.7 \text{ Mpa} \pm 0.05 \text{ Mpa}$ 即可。

试验台:原本试验台可牢固安装长为 300 mm,宽为 300 mm,高为 50 mm 的试模,由于试验当中所用试件的特殊性,此时需要将验台做一定的调整,使其能可靠牢固的安装长×宽×高为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的试件。

试模:试模为自行加工,钢板制作,由底板和侧板组成,可以自由的拆卸和安装。试模内侧尺寸长为 300 mm,宽为 300 mm,高为 100 mm。

温度检测装置:自动检测并记录试件表面及恒温室内温度的温度传感器、温度计,精密度 0.5°C 。

变形测量装置:自动检测车辙变形并记录竖向位移曲线的装置,采用电测百分表。由于试验过程中温度需控制在 $15^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 范围内,而车辙是在高温的条件出现的,故试件不存在高温车辙变形的问题,因此试验过程中可将变形测量装置撤除。

4.1.2.2 试件

试验试件路面结构从上到下依次为:

- 1) AC-10 沥青混凝土加铺层,2 cm 厚;
- 2) 防反射裂缝措施(包括:玻纤格栅、FHGS 格栅、聚酯玻纤布和橡胶应力吸收层);
- 3) 按强度等级 C30 设计的水泥混凝土面板,6 cm 厚;
- 4) 1 cm 厚的橡胶板,垫在水泥混凝土面板的两侧,以保证接缝附近两侧出现脱空;
- 5) 2 cm 厚的橡胶板,用于模拟基层。

不考虑防裂夹层的厚度,试件的尺寸长为 30 cm,宽为 30 cm,高为 11 cm。

试件制作过程如下:

首先在试模内放置 30 cm 长、30 cm 宽、2 cm 厚的橡胶板;其次就是将水泥混

凝土面板放置于钢板上部,使板间接缝保持 0.5 cm 的宽度;然后在水泥混凝土面板上部喷洒粘层油再铺设防反射裂缝夹层(其中粘层油用热的基质沥青来代替),接着将拌制好的 AC-10 沥青混凝土铺筑于防裂夹层之上或直接加铺拌制好的沥青混凝土,最后用轮碾成型机碾压成型。

轮碾成型机碾压成型时,宜先将碾压轮预热至 100℃ 左右,然后将盛有沥青混合料的试模置于轮碾机的平台上,在沥青混合料表面覆盖一层牛皮纸或报纸,轻轻的放下碾压轮,调整总荷载为 9KN。做好准备工作后,启动轮碾机,先在平行于水泥混凝土板间接缝的方向碾压 2 个往返(4 次),卸荷,再抬起碾压轮将试件调转方向(即:沿垂直于接缝的方向),再施加相同的荷载碾压至马歇尔标准密实度的 $100 \pm 1\%$ 为止。试件正式压实前,应预先试压,确定碾压次数,由于试件的沥青面层较薄,碾压 12 个往返(24 次)即可达到要求。如果是研究纵向接、裂缝对沥青加铺层反射裂缝的影响,则需要先垂直于接缝的方向碾压 2 个往返,然后再调转方向(即:顺着接缝的方向)碾压 12 个往返。

4.1.2.3 试验步骤

试验步骤如下:

1) 将试件连同试模一起,置于已达到试验温度 $15^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的恒温室内。由于试验是在温度较低的情况下进行,且外部气温也在 15°C 左右,为了节约时间保温 2h 即可。

2) 将试件连同试模置于轮辙试验机的试验台上,根据试验的具体要求,将试验轮置于试件表面适当的位置,其行走方向与试件成型时的碾压方向或行车方向一致。若是研究横向接、裂缝对沥青加铺层反射裂缝的影响,则试验轮行走的方向须与水泥混凝土板间接缝垂直;若是探寻纵向接、裂缝对沥青加铺层反射裂缝的影响,则试验轮须与混凝土板间接缝的方向平行。

3) 启动试验机,此时不需要开动车辙变形自动记录仪,使试验轮往返行走,时间约为 5h,或 AC-10 沥青混凝土面层出现明显的裂缝,直至裂缝贯穿沥青加铺层整个断面;可根据实际情况进行调整。试验时,记录仪会自动记录试验轮往返的次数和试验的温度。

4) 同方案,平行试验至少有 2 个试件,取平均值作为试验结果,若两试验结果偏差加大,可补做一组试件作进一步验证。

4.2 试验模型的建立与试件的制备

4.2.1 试验模型的建立

为了全面研究分析各种防裂夹层材料延长旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构疲劳寿命的效果。拟建立三种试验模型,其中包括横向接缝对旧水泥混凝土沥

青面层反射裂缝的影响,纵向裂缝分别在正荷载和偏荷载的作用下对旧水泥混凝土沥青面层反射裂缝的影响。试件的总尺寸长、宽、高分别为: 30 cm、30 cm、11 cm (包括: 1 cm厚用于模拟旧水泥混凝土路面板底脱空的橡胶板, 以及 2 cm厚用于模拟基层的橡胶板, 其中忽略防反射裂缝夹层的厚度。), 具体的试验模型如图 4.1~图 4.4 所示。

横向裂缝在车轮荷载作用下的试验模型, 试验轮作用在试件的中央部位, 且垂直于板间接缝往返运动, 见下图 4.2。

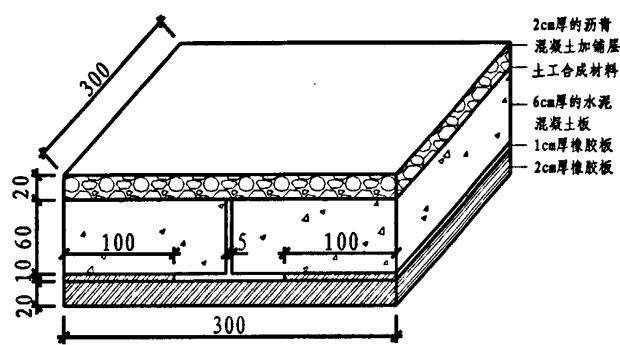


图 4.1 脱模后的试件模型 (单位: mm)

Fig 4.1 The specimen model after stripping (unit: mm)

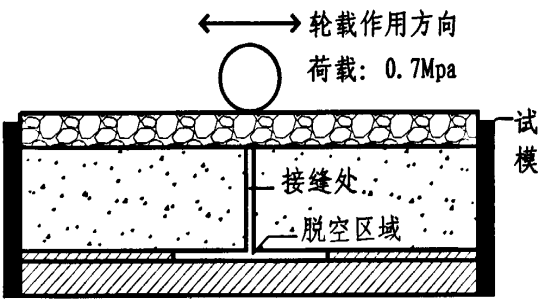


图 4.2 横向接缝室内模拟试验模型

Fig.4.2 The transverse crack model of lab simulation test

纵向接、裂缝在车轮正荷载作用下的试验模型, 试验轮作用在板间接缝的顶部, 且顺着接缝的方向往返运动, 见下图 4.3。

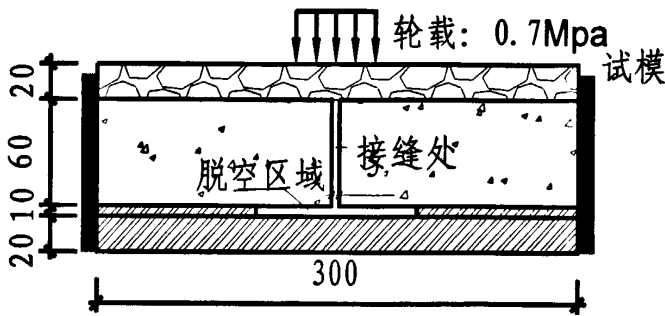


图 4.3 纵向接、裂缝弯拉型荷载作用下的室内模拟试验模型
Fig.4.3 The longitudinal cracks bending-type model of lab simulation test

纵向接、裂缝在车轮偏荷载作用下的试验模型，试验轮作用在板间接缝的一侧，且顺着接缝的方向往返运动，见下图 4. 4。

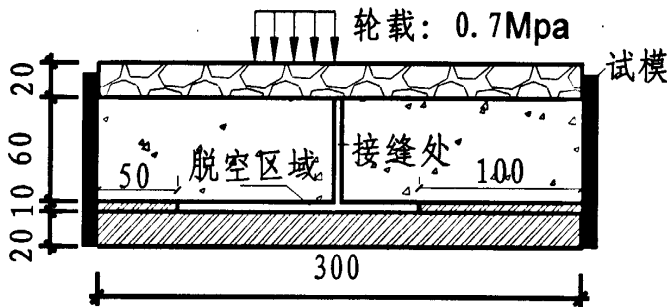


图 4.4 纵向接、裂缝在剪切型荷载作用下的室内模拟试验模型
Fig.4.4 The longitudinal cracks shearing-type model of lab simulation test

4.2.2 试件的制备

4.2.2.1 材料性质

制作试件所需的主要材料有：32.5 普通硅酸盐水泥、70#普通基质沥青 (AH-70)、石料、橡胶板以及前面提到的四种防反射裂缝夹层材料（橡胶应力吸收层、聚酯玻纤布、玻纤格栅、FHGS 格栅、），其夹层材料相关性能指标见表 4. 2～表 4. 5。

沥青为第三章中提到的确定面层沥青用量时，所使用的 70#普通基质沥青 (AH-70)。在制作试件的过程中，不但将该沥青用于拌制 AC-10 沥青混凝土用作面层和制作废橡胶粉改性沥青，另外还将其加热后作为粘层油使用，其性能指标见表 4. 1。

表 4.1 基质沥青技术性能指标

Tab.4.1 asphalt technical performance index

检测项目	单位	技术要求	实测值	结论
针入度(25℃, 100g, 5s)	0.1 mm	60~80	75	合格
软化点(环球法)	℃	≥43	47.3	合格
延度(15℃, 5 cm/min)	cm	≥100	>150	合格
60℃动力粘度	Pa·s	≥160	164	合格

橡胶沥青的制作是采用废橡胶粉改性沥青，即向加热的 70#普通基质沥青（AH-70）中加入沥青用量 18%，粒径为 20 目的废橡胶粉，拌合时的温度控制在 190℃~200℃范围内，之后用高速剪切仪剪切时间为 45min~60min，以使橡胶粉充分溶胀，然后取样测得各性能指标均满足相关技术的要求，见表 4.2。

表 4.2 橡胶沥青技术性能指标

Tab.4.2 Rubber-asphalt technical performance index

检测项目	单位	技术要求	实测值	结论
针入度(25℃, 100g, 5s)	0.1 mm	≥25	36	合格
软化点(环球法)	℃	≥54	57.4	合格
延度(5℃, 5 cm/min)	cm	≥10	>19.7	合格
25℃弹性恢复	—	≥60	76	合格
177℃粘度	Pa·s	1.5~4.0	3.5	合格

表 4.3 聚酯玻纤布技术性能指标

Tab.4.3 Fiberglass-ployester Technical Performance Indicators

纵、横向 抗拉强度 (kN·m ⁻¹)		纵、横向 断裂伸长率 (%)	弹性 模量 (Mpa)	沥青 吸收量 (g·m ⁻²)	熔点 (℃)	耐腐蚀性	单位面积 质量 (g·m ⁻²)
经向	纬向						
≥7	≥7	≤5	950	≥0.7	230	优良	≥120

表 4.4 玻纤格栅技术性能指标

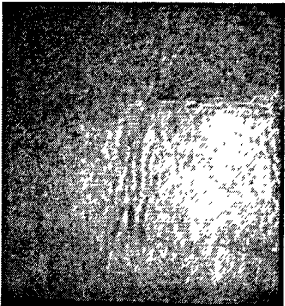
Tab.4.4 Fiberglass grating technical performance indicators

规格	网格尺寸 (mm)		纵、横向拉 伸屈服力 (kN·m ⁻¹)		纵、横 向屈服 伸长率 (%)	弹性 模量 (Mpa)	筋带宽 (mm)	耐温性 (℃)	耐腐蚀性	单位面积 质量 (g·m ⁻²)
	经向	纬向	经向	纬向						
TGS-B 50/50	25.4	25.4	≥50	≥50	≤4	67000	5	-100~ 280	优良	≥450

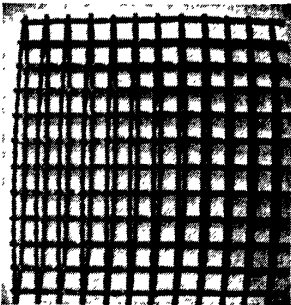
表 4.5 FHGS 高强玻纤复合材料土工格栅技术性能指标

Tab.4.5 FHGS high-strength fiberglass composition geogrid technical performance indicators

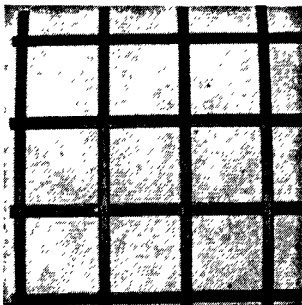
规格	网格尺寸 (mm)		纵、横向 拉伸屈服力 (kN·m ⁻¹)		纵、横 向屈服 伸长率 (%)	弹性 模量 (Mpa)	筋带宽 (mm)	耐温性 (℃)	耐腐蚀性	单位面积 质量 (g·m ⁻²)
	经向	纬向	经向	纬向						
50-50 kN/m	83	83	≥50	≥50	≤4	≥ 67000	10	≥200	优良	≥530



聚酯玻纤布



玻纤格栅



FHGS 格栅

图 4.5 三种土工合成材料

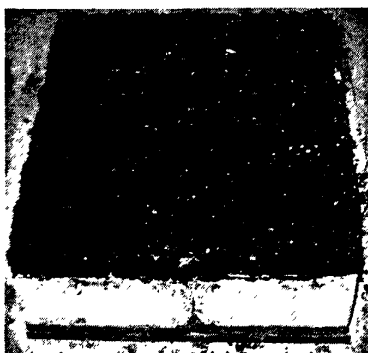
Fig.4.5 Three kinds of geosynthetics

4.2.2.2 试件的制作

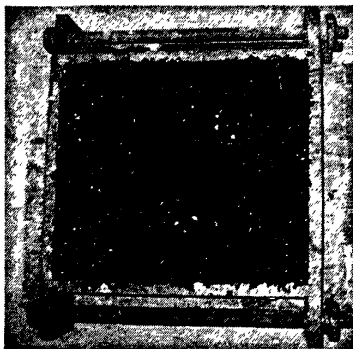
首先按照 C30 的强度等级设计长为 300 mm，宽为 295 mm，高为 60 mm 的水泥混凝土板，然后从中间切开分成两块。采用加热的 70#普通基质沥青作为粘层油，加铺玻纤格栅、FHGS 格栅和聚酯玻纤布三种土工合成材料时，需将其剪成 300 mm×300 mm 的矩形。在制作橡胶沥青应力吸收层时，橡胶沥青的撒布量控制在 2.2~2.6kg/m² 的范围内，撒布温度控制在 190℃~200℃ 的范围内^[49]，喷洒完橡胶沥青则要在其表面撒铺碎石。由于试件较小，存在尺寸效应，将原本在实际工

程中应撒铺粒径为 9.5~13.2 的碎石, 该为撒铺粒径为 2.36~4.75 的碎石, 控制在 $7.0\sim9.0\text{ kg/m}^2$ 。试件的制作过程前面已详细说明, 在此不再叙述。

按照《公路沥青混凝土路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 配置拌合 AC-10 沥青混凝土, 沥青面层所采用的沥青混合料级配见表 3.3。沥青混凝土采用 70#普通基质沥青 (AH-70), 油石比为 4.8%, 第三章已做详细论证。制作的轮碾成型试件, 见图 4.6。



(a) 脱模后的成型试件



(b) 未脱模的成型试件

图 4.6 碾压成型的试件

Fig.4.6 Compacted specimen forming

4.3 加载方法及观测方式

横向接、裂缝和纵向接、裂缝在车轮荷载的作用情况, 见图 4.1~图 4.3。横向接缝在车轮荷载的作用过程中, 当车轮行驶到接缝的边缘时, 接缝处的沥青加铺层受到剪应力的作用; 当车轮行驶到接缝的顶部时, 接缝处的沥青加铺层受到弯拉应力的作用。因此, 横向接缝在一次行车荷载的作用过程中, 接缝处的沥青加铺层受到两次剪应力作用和一次弯拉应力作用, 其中弯拉作用只是一瞬间过程, 故横向接缝处的沥青加铺层一直处于剪应力与弯拉应力的交替作用。纵向裂缝在车轮荷载的作用过程中存在两种情况: 其一, 在正荷载的作用下, 即车轮荷载作用在接缝的顶部做往返运动时, 接缝处的沥青加铺层一直处于弯拉状态; 在偏荷载的作用下, 即车轮荷载作用在接缝的一侧做往反运动时, 接缝处的沥青加铺层一直受到剪应力的作用。

将试件连同试模一块放入车辙仪内, 控制试件的温度稳定在 $15^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 采用标准试验轮, 胶轮宽度为 5 cm, 轮压调整为标准轴 0.7Mpa , 轮行速度为 $(42\pm 1)/\text{min}$, 用于模拟行车荷载作用下沥青加铺层反射裂缝扩展的情况, 进而分析夹层材料延长路面疲劳寿命的性能。加载方式如图 4.7 所示。

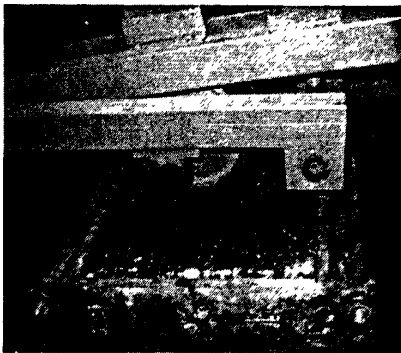


图 4.7 车辙仪加载

Fig.4.7 Wheel tracking apparatus loading

试件在重复轮载作用下，分别观察 5 组加铺层结构裂缝起裂和裂缝扩展等情况，直到裂缝最终贯穿试件整个加铺层的断面（即，终裂），若 5h 内试件的沥青加铺层没有出现明显的反射裂缝或并未终裂，试验将自动停止。在试验的过程中分别观察并记录各组试件沥青加铺层表面初裂和终裂的轮载作用次数。最后，根据得到的试验结果加以比较分析。

4.4 轮载试验结果及分析

4.4.1 轮载试验结果

4.4.1.1 横向接缝轮载试验结果

横向接缝在车轮荷载作用下，反射裂缝室内模拟试验，沥青加铺层不同防反措施重复轮载作用下的试验结果，见表 4.6。

表 4.6 横向接缝轮载重复作用试验结果

Tab.4.6The test results of transverse joints under wheel load repetition

试验方案	表面初裂有效试验结果（次）	平均值（次）	裂缝贯穿整个断面的有效试验结果（次）	平均值（次）
直接加铺结构	654	691	1456	1568
	728		1680	
橡胶沥青应力吸收层	1022	1114	4206	4085
	1206		3974	
聚酯玻纤布	1358	1407	5096	5194
	1456		5292	
玻纤格栅	1750	1834	6958	6811
	1918		6664	
FHGS 格栅	1478	1562	6132	6230
	1646		6338	

对以上试验结果做图表分析如图 4.8 所示。

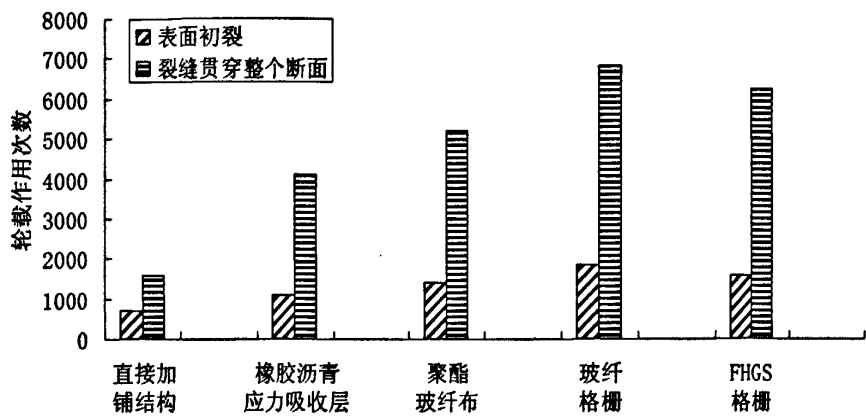


图 4.8 横向接缝轮载作用次数比较图

Fig.4.8 The comparison chart of fatigue life under wheel load on transverse joint

横向接缝在车轮重复荷载作用下的各组试件的破坏形态，如图 4.9 所示。

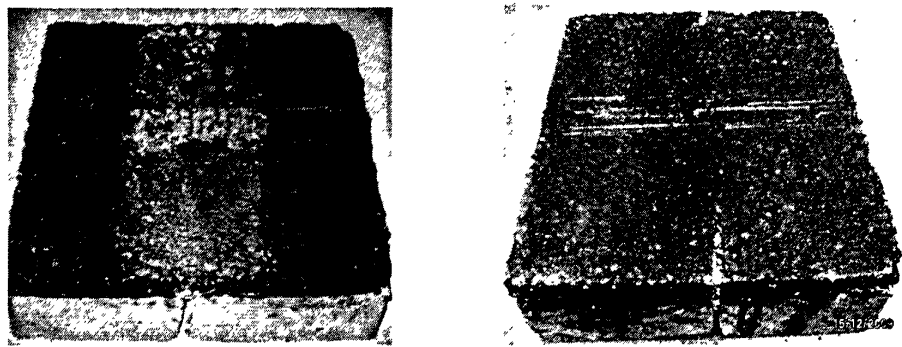


图 4.9 横向接缝轮载作用下的试件破坏形态

Fig.4.9 The failure mode of transverse joint specimens under wheel loading

4.4.1.2 纵向接缝弯拉型轮载试验结果

纵向接缝在正荷载作用下，反射裂缝室内模拟试验，沥青加铺层不同防反措施重复轮载作用下的试验结果，见表 4.7。

表 4.7 纵向裂缝弯拉型轮载试验结果

Tab.4.7 The tests results of longitudinal cracks under bending-type wheel load repetition

试验方案	表面初裂有效试验结果（次）	平均值（次）	裂缝贯穿整个断面的有效试验结果（次）	平均值(次)
直接加铺结构	1624	1554	2450	2436
	1484		2422	
橡胶沥青应力吸收层	1932	2028	5474	5328
	2124		5182	
聚酯玻纤布	2450	2580	7196	7385
	2710		7574	
玻纤格栅	3514	3591	9296	9391
	3668		9486	
FHGS 格栅	3052	3171	8512	8624
	3290		8736	

对以上试验结果做图表分析如图 4.9 所示。

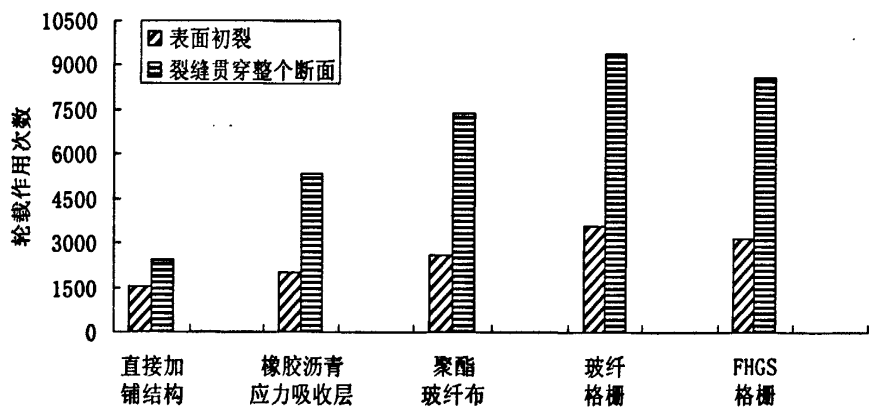


图 4.10 弯拉型模拟试验轮载作用次数比较图

Fig.4.10 The comparison chart of fatigue life under bending-type wheel Load on longitudinal cracks

纵向接缝在正荷载重复作用下的各组试件的破坏形态，如图 4.11 所示。

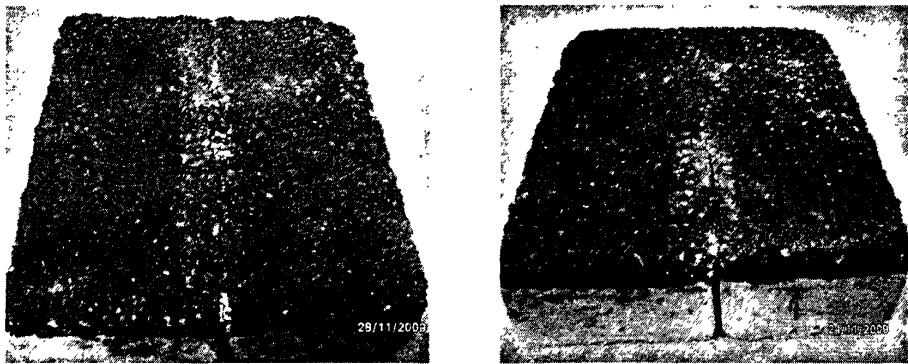


图 4.11 纵向接缝正荷载作用下的试件破坏形态

Fig.4.11 The failure mode of longitudinal cracks specimens under bending-type wheel loading

4.4.1.3 纵向接缝剪切型轮载试验结果

纵向接缝在偏荷载作用下，反射裂缝室内模拟试验，沥青加铺层不同防反措施重复轮载作用下的试验结果，见表 4.8。

表 4.8 纵向裂缝剪切型轮载试验结果

Tab.4.8 The tests results of longitudinal cracks under shearing-type wheel load repetition

试验方案	表面初裂有效试验结果（次）	平均值（次）	裂缝贯穿整个断面的有效试验结果（次）	平均值(次)
直接加铺结构	602	628	1536	1426
	653		1315	
橡胶沥青应力吸收层	1137	1078	2906	2773
	1019		2640	
聚酯玻纤布	854	915	2408	2585
	975		2762	
玻纤格栅	1316	1454	3794	3890
	1592		3986	
FHGS 格栅	1540	1493	4508	4617
	1446		4726	

对以上试验结果做图表分析如图 4.12 所示。

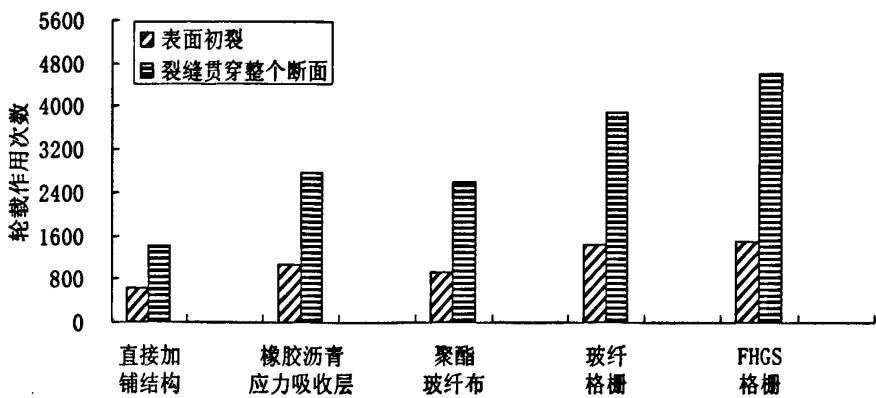


图 4.12 剪切型模拟试验轮载作用次数比较图

Fig.4.12 The comparison chart of fatigue life under shearing-type wheel Load on longitudinal cracks

纵向接缝在偏荷载重复作用下的各组试件的破坏形态，如图 4.13 所示。



图 4.13 纵向接缝偏荷载作用下的试件破坏形态

Fig.4.13 The failure mode of longitudinal cracks specimens under shearing-type wheel loading

4.4.2 试验结果对比分析

由试验结果和试验观测过程可知：

1) 由表 4.6 可知，横向接、裂缝在车轮荷载的作用下既受到拉应力的作用又受剪应力的作用，五种试验方案当中，橡胶沥青应力吸收层、聚酯玻纤布、加铺玻纤格栅、FHGS 格栅与直接加铺沥青面层相比，其初始裂缝出现在加铺层顶部时的轮载作用次数分别增加了 1.61 倍、2.04 倍、2.65 倍、2.26 倍；终裂作用次数分别增加了 2.61 倍、3.31 倍、4.34 倍、3.97 倍，因此，可以发现加铺不同防裂夹层在一定程度上均可以提高旧水泥混凝土路面沥青加铺层的疲劳寿命。

2) 由表 4.7 可知, 纵向裂缝在弯拉型重复轮载作用下, 五种试验方案当中, 橡胶沥青应力吸收层、聚酯玻纤布、加铺玻纤格栅、FHGS 格栅与直接加铺沥青面层相比, 其初始裂缝出现在加铺层顶部时的轮载作用次数分别增加了 1.30 倍、1.66 倍、2.31 倍、2.04 倍; 终裂作用次数分别增加了 2.18 倍、3.03 倍、3.86 倍、3.54 倍。由表 4.8 可知, 纵向裂缝在剪切型重复轮载作用下, 五种试验方案当中, 加铺玻纤格栅、FHGS 格栅、聚酯玻纤布、橡胶沥青应力吸收层与直接加铺沥青面层相比, 其初始裂缝出现在加铺层顶部时的轮载作用次数分别增加了 1.72 倍、1.46 倍、2.31 倍、2.37 倍; 终裂作用次数分别增加了 1.94 倍、1.81 倍、2.31 倍、3.24 倍。因此, 从中可以看出不同防裂措施均可以起到延缓沥青加铺层反射裂缝扩展的作用, 显然加铺玻纤格栅和 FHGS 格栅的效果最为突出。

3) 在横向裂缝模拟试验以及纵向裂缝模拟试验当中, 玻纤格栅延缓放射裂缝的效果最好, 其次是 FHGS 格栅, 其主要原因在于存在尺寸效应问题。从图 4.5 可以看到, FHGS 格栅的网格尺寸为 $83\text{ mm} \times 83\text{ mm}$, 与玻纤格栅的尺寸 $25.4\text{ mm} \times 25.4\text{ mm}$ 相比大很多, 而车轮的宽度只有 50 mm 。因此, 玻纤格栅与 FHGS 格栅相比对接、裂缝处的应力集中能起到更好的消散作用。考虑到实际的车轮宽度远大于模拟试验中采用的车轮宽度, 故存在尺寸效应的问题, 所以前者的轮载重复作用次数稍高于后者。

4) 聚酯玻纤布与橡胶沥青应力吸收层对延缓反射裂缝的效果较差, 主要是因为这两种夹层材料的弹性模量都较低, 变形量较大, 而沥青加铺层的变形量相对较小。在车辆荷载的作用下, 这两种夹层材料的变形量超过沥青面层所能允许的最大应变时, 沥青面层就会产生开裂, 并快速向上反射到沥青加铺层表面, 从而形成反射裂缝。

5) 由图 4.5 可以看出, FHGS 格栅的筋带宽度明显大于玻纤格栅, 因此根据断裂力学的观点, 当裂缝尖端发展到筋带边缘时, 改变了裂缝尖端的应力状态^[50], 使表征裂缝尖端附近的应力应变弹性场的应力强度因子受到了抑制, 从而使得裂缝尖端不容易穿过筋带。

6) 在试验的过程中发现, 加铺玻纤格栅的试件的试件终裂时, 对应接缝处的筋带有被剪断的现象; 加铺聚酯玻纤布试件终裂时, 夹层也有被撕裂的现象。而加铺 FHGS 格栅的试件却完好无损, 从而说明 FHGS 格栅的韧性明显优于玻纤格栅和聚酯玻纤布。根据材料的性能可知, FHGS 格栅的弹性模量明显高于其他三种材料, 因此在实际工程应用中, FHGS 格栅作为防裂夹层延缓荷载型反射裂缝的效果要好于其他三种材料。

4.5 本章小结

本章综合阐述了轮载重复试验的目的、试验方案、试验模型的建立包括试验进程中各个细节,对得到的试验结果做了详细的对比分析,并得到以下结论:

① 通过室内试验较好地模拟了荷载型反射裂缝以及评价了不同防裂夹层材料抵抗反射裂缝的性能,很好地反映了加铺层、防裂夹层与结构层的工作状态,为以后加铺层的理论分析与设计提供了参考。

② 试验结果表明,无论是土工合成材料还是应力吸收层(SAMI),均能对反射裂缝的产生和扩展起到很好的抑制作用,从而延长沥青加铺层的使用寿命。针对荷载型反射裂缝,硬性材料延缓反射裂缝的效果要明显好于软性材料。

③ 从实验结果可以看出,横缝在车轮荷载重复作用的次数是纵缝剪切型试件终裂时的 1.35 倍;纵缝弯拉型重复轮载作用次数是剪切型试件终裂时的 2 倍多,因此当沥青加铺层受到剪应力的重复作用时更容易发生破坏。

④ 就所对比的玻纤格栅、FHGS 格栅、聚酯玻纤布和橡胶应力吸收层等四种材料而言,三种试验方案均表明,聚酯玻纤布和橡胶应力吸收层放反射裂缝的效果较差,玻纤格栅和 FHGS 格栅的效果相当。考虑到 FHGS 格栅的抗车轮荷载作用下的剪切能力和抗施工割破能力要明显好于玻纤格栅,且在剪切荷载作用下 FHGS 格栅要优于玻纤格栅,因此,推荐在“白改黑”和半刚性基层的实际工程中,采用 FHGS 格栅效果会很好。有条件的情况下, FHGS 格栅可以与橡胶应力吸收层同时使用,不仅防反射裂缝的效果会更好而且能防止雨水沿裂缝下渗,防止沥青面层过早的发生破坏影响使用寿命。

第五章 沥青加铺层反射裂缝室内疲劳试验研究

对于沥青加铺层,反射裂缝并不是一次行车荷载或降温作用造成的,而是表现为疲劳破坏,在车辆荷载和温度荷载的反复作用下,结构层内部疲劳损伤逐渐积累,最终导致沥青加铺层开裂。进行疲劳试验的方法很多,归纳起来可以分为四类:第一类是实际路面在真实汽车荷载作用下的疲劳破坏试验,以美国著名的AASHO 试验路为代表;第二类是足尺路面结构在模拟汽车荷载作用下的疲劳破坏试验,主要包括环道试验和加速加载试验;第三类是试板试验法;第四类是小型试件的疲劳试验。而前三类疲劳试验方法耗资大、周期长,开展的并不普遍,因此大量采用最后一类费用小、周期短的室内小型试验。一般常用小梁疲劳试验模拟路面结构的疲劳破坏性能。

5.1 疲劳试验方法的评价与选择

按照传统的定义,材料疲劳破坏的最终结果是断裂,例如美国试验与材料协会(ASTM)公布的“疲劳试验及 数据统计分析术语(E206-72)”将其表述为“材料某点或若干点扰动力,且在足够多的循环扰动后形成裂纹或者发生完全断裂,使材料发生局部或者永久性结构变化的发展过程,称之为疲劳。”

其主要条件及特征可以表述为:

- ① 材料承受的重复应力低于一次性破坏荷载;
- ② 试件材料在足够多次数的重复应力作用下出现裂纹或者发生断裂;
- ③ 疲劳发生在材料高应力或集中应力的位置或区域;
- ④ 疲劳破坏是一个过程。

根据此定义,材料的疲劳破坏事实上是裂纹形成、发展、直至断裂的过程,可称之为疲劳断裂。

5.1.1 疲劳试验方法概述

路面在使用期间经受荷载的反复作用,长期处于应力应变交迭变化状态,致使路面结构的强度逐渐下降,当荷载重复作用次数超过一定的次数以后,在荷载作用下,路面内产生的应力就会超过强度下降后的结构抗力,使路面出现裂纹,产生疲劳断裂破坏。疲劳开裂是沥青路面破坏的主要模式之一,也是沥青路面结构设计中考虑的主要因素,为了延长路面的使用寿命,需要沥青混合料具有良好的耐疲劳性能^[61]。

沥青及沥青混合料的疲劳特性的研究已经历史悠久。1948 年 Hveem 首次提出沥青路面结构的破坏问题。多年来,由于路面材料的疲劳破坏行为极其复杂,影响因素较多并且存在交互作用,因此,路面材料疲劳特性试验研究尚有许多困

难需要克服。至今为止，还没有任何一种试验方式被作为路面材料疲劳特性试验研究的通用标准。

综合目前已有的研究成果，沥青路面疲劳特性的研究方法基本上可以分为两类：一类是现象学法；另一类是力学近似法^[62]。前者，即传统的疲劳理论方法，它采用疲劳曲线表征材料的疲劳特性；而后者，即为应用断裂力学原理分析疲劳裂缝扩展的规律以确定材料疲劳寿命的方法。现象学法和力学近似法都是研究材料的裂缝及裂缝扩展的情况，这两种方法的主要区别就在于前者的材料疲劳寿命包括裂缝的形成和裂缝扩展阶段，研究裂缝形成的机理以及应力、应变与疲劳寿命的之间的关系和各种因素对疲劳寿命及疲劳强度的影响；后者只考虑裂缝扩展阶段的寿命，认为材料一开始就有初始裂缝存在，因此不考虑裂缝的形成阶段，主要研究材料的断裂机理及裂缝扩展规律。

5.1.2 疲劳试验方法的选择

目前，用于评价沥青路面抗疲劳性能的室内疲劳试验方法众多，且各国没有统一的规定，主要有：直接拉伸法、间接拉伸法（即，劈裂疲劳试验）、三轴压力法、剪切法、四点弯曲法或中间加载法、悬臂梁弯曲法和弹性基础梁弯曲法等。其中，国内外应用比较广泛的室内疲劳试验方法主要包括：四点弯曲法、梯形悬臂梁弯曲法和间接拉伸法，见下图 5.1。

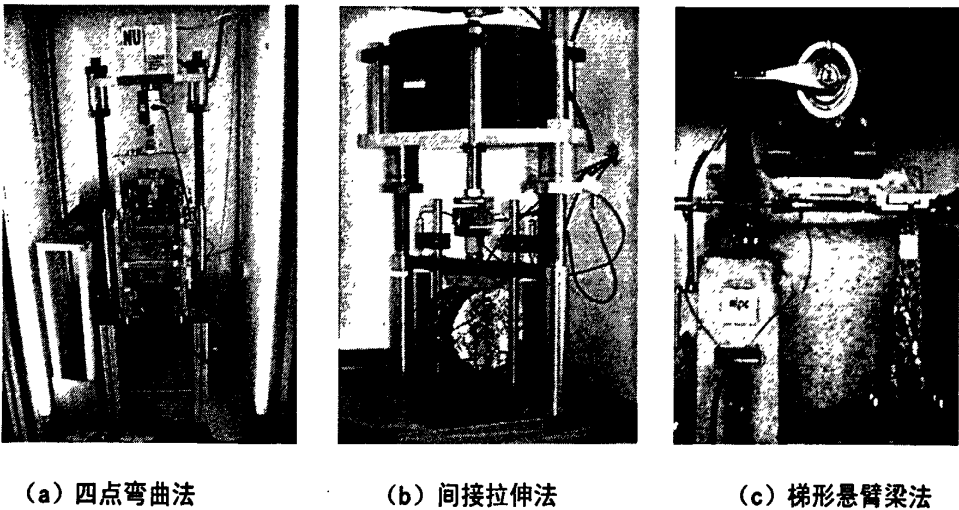


图 5.1 室内疲劳试验方法

Fig.5.1 Fatigue test method in lab

经综合分析比较后，从满足科学研究的要求出发并兼顾实际的可操作性以及应用的可行性，在本研究中，采用四点弯曲法作为评价路面材料疲劳性能的试验方法。

5.2 四点弯曲疲劳试验方法简介

5.2.1 试验设备

试验仪器采用英国 Cooper Research Technology 有限公司制造的 Cooper 疲劳试验机，如图 5.2 所示。该疲劳试验机是通过气动对试件施加荷载，根据试验方案设定试验参数，由计算机控制启动疲劳试验。试验过程中，计算机系统自动控制加载，读取力传感器和位移传感器的数据，屏幕上实时显示各参数的变化情况，大约每隔 50 个循环，由计算机自动采集一次数据。

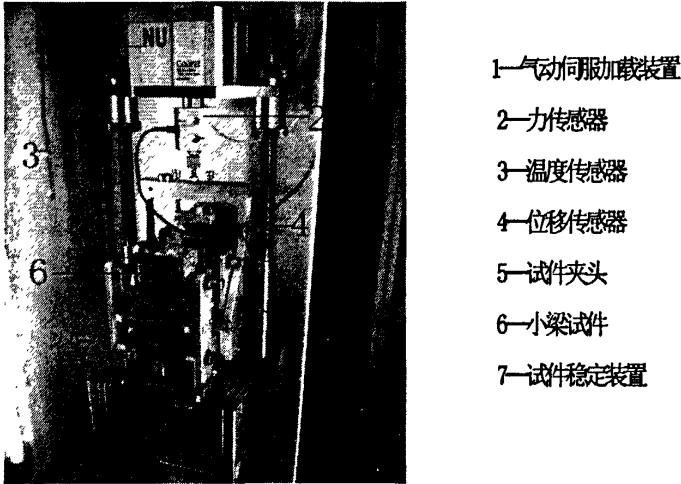
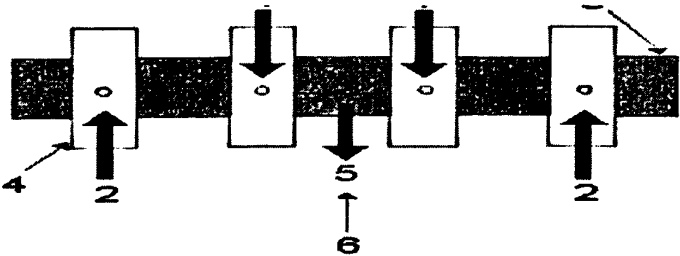


图 5.2 Cooper NU 疲劳试验机

Fig.5.2 Cooper NU fatigue test machine

根据试验方案确定试验参数，由计算机自动控制试验的进程，数据采集系统自动读取第 100 个加载循环时劲度模量，大约每隔 50 个循环自动记录一次数据。应变控制模式下的试验，当所测得的劲度模量降低到所设置的初始劲度模量的百分比时，试验自动停止；应力控制模式下的试验，当试件完全断裂时试验会自动停止。所记录的数据包括：加载次数、应力值、应变值、劲度模量、模量百分率、滞后角、耗散能等。



1-施加荷载、2-反力、3-试件、4-试件夹具、5-弯曲变形、6-恢复变形

图 5.3 四点弯曲示意图

Fig.5.3 Schematic diagram of four-point bending

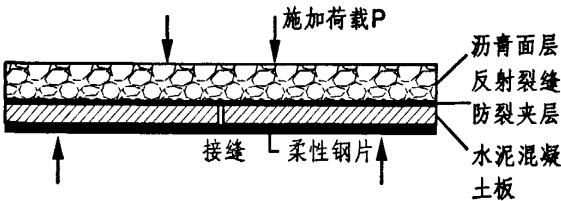
5.2.2 试件制备

所需的主要材料有，水泥混凝土板、AH-70 普通基质沥青、AC-10 普通沥青混凝土原材料，四种夹层材料。首先按 C30 的强度设计长为 30 cm，宽为 19.5 cm，高为 4 cm 的水泥混凝土板，四种夹层材料分别为：橡胶应力吸收层、聚酯玻纤布、玻纤格栅和 FHGS 格栅，相关指标如表 4.1~表 4.5 所示。加铺土工合成材料的试件，要求将土工合成材料剪成 400mm×300mm 的矩形；制作橡胶沥青应力吸收层时，橡胶沥青的撒布量控制在 2.2~2.6kg/m² 的范围内，撒布温度控制在 185~200℃ 的范围内，喷洒完橡胶沥青后应撒铺碎石，撒铺的碎石粒径为 2.36~4.75mm。

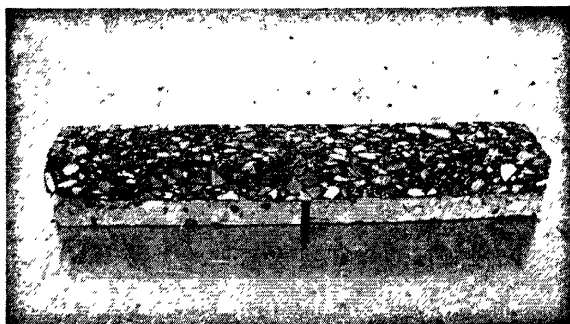
试件制作是疲劳试验的过程中的关键环节，试件的质量决定了试验结果的准确性。制作复合式结构的试件与普通的沥青混合料不同，制作试件时，要先把两块混凝土板放入试模内，中间留有 0.5 cm 的接缝，其表面喷洒一层热沥青 AH-70 作为粘层油，然后加铺一层土工合成材料或橡胶应力吸收层，接着加铺 AC-10 普通基质沥青混凝土，最后用气动碾压机碾压成型，碾压成型的试件尺寸为 400mm×300mm×75mm。用切割机将碾压成型的试件切割成长×宽×高为 400mm×60mm×50mm 的小梁试件，将面层的厚度和混凝土板的厚度均留有为 2.5 cm。由于制作水泥混凝土板厚为 4 cm，而加铺沥青面层后整个试件的厚度为 7.5 cm，因此需要将沥青面层和混凝土板分别切去 1 cm 和 1.5 cm。成型好的小梁试件，如图 5.4 所示。

在制作加铺 FHGS 格栅的小梁试件时，由于 FHGS 格栅的网格尺寸为 83 mm×83 mm 较大，为了确保切割后的每个小梁试件都包含两根荆条，须将 FHGS 格栅剪成条状，然后以间隔 3 cm 铺筑在混凝土板上，再铺筑沥青面层，最后切割成小梁试件。

本试验设计了 5 种方案的小梁试件，分别加铺了橡胶应力吸收层、聚酯玻纤布、玻纤格栅、FHGS 格栅等四组试件和一组直接加铺沥青面层的试件。



(a) 试件模型



(b) 切割成型的小梁试件

图 5.4 小梁试件疲劳试验模型

Fig.5.4 Fatigue test model of trabecular specimen

5.2.3 荷载条件

试件在承受荷载的情况下,在初始应力和应变相同的条件下,按不同的加载模式施加荷载,所得到的疲劳试验结果也不相同。原因在于控制应力加载模式中,由于材料劲度随着加载次数的增加而在逐渐减小,因而为了保持各次加载时常量应力不变,每次加载实际作用于试件的变形不断增加;而在控制应变加载模式中,为了保持每次加载的常量应变不发生变化,每次加载作用于试件的实际应力则要减小。因此,采用不同的加载模式作用于试件的实际受荷状况是不相同的。显然,对于相同的材料,在初始应力、应变相同的情况下,采用控制应力加载模式,试件达到破坏时的荷载作用次数要小于控制应变加载模式的作用次数。两者疲劳寿命的差值,随着温度的变化也有所不同,低温时差值小,高温时则差值较大^[52]。

5.3 试验方案

5.3.1 加载方式

小梁试件的疲劳寿命与控制加载模式十分相关,通常有控制应力和控制应变两种加载模式。针对疲劳试验而言,应力控制模式的再现能力较好,试验时间较短,试验结束试件断裂,疲劳破坏的定义明确,且控制应力加载模式所需的试件较少,试验结果比较集中,应力控制精度可靠,试件破坏的状态容易设定;而在控制应变模式下,试件一般不会出现明显的断裂破坏,一般以试件劲度减低到其初始劲度的 50%或更低时定为试件破坏的标准,因而具有一定的随意性,不容易判定。

由于采用的是复合式结构的小梁试件,层间加铺了不同的防裂夹层材料,因此各小梁试件的初始应力、应变也不尽相同(即,初始劲度模量也不同)。考虑到本试验是研究各防裂夹层材料抵抗反射裂缝的能力,而反射裂缝是混凝土板间接、裂缝沿沥青面层厚度方向由沥青面层底部扩展到表面从而使面层完全断裂,

恰恰符合控制应力加载模式的特点。因此，本试验研究决定采用控制应力加载模式分析不同防裂夹层的疲劳性能。

5.3.2 加载频率及形式

不少国内外成果已证明，加载频率对疲劳试验结果的影响是比较显著的，因而国内外许多学者转而研究了加载频率或时间与行车速度的关系，以此希望通过实际路面上的行车速度来确定疲劳试验当中所需要的加载频率。例如，英国路面疲劳试验设计使用了图解法，按车速和沥青层的厚度查找加载频率。许多研究者多用关系式表达车速与加载频率或时间的关系，设计时可由车速求得疲劳试验的加载频率，从而确定路面的力学特性，车速与路面受荷时间或频率的关系，见表 5.1。

表 5.1 车速与路面受荷时间或频率
Tab.5.1 Speed and road surface by loading time or frequency

作者	国别	车速 v(km/h)	加荷时间 t 或频率 f
A G klomp	英国	80	$t=1/[2 \pi (0.4v)]$
P S pell	英国	v	$t=1/v$
R I kingham	美国	v	$v=1.27f$
O T Bohn	丹麦	v	$f=0.33v$
C P Varkering	荷兰	v	$V=0.4d$
F R Giannini	意大利	v	$f=0.4v$
P R Ullidtz	丹麦	v	$t=(2 \delta +h)v$
三浦裕二	日本	4~80	$t=0.04\sim1.0$

对于室内小型试验，加载时间可参照 Vanderpoel 公式来确定：

$$t = 1/2\pi f$$

(5.7)

当加载频率为 10HZ 时，加载时间为

$$t = 1/2\pi f = 0.016s$$

0.016s 的加载时间，大致相当于实际沥青路面上 60~65km/h 的行驶车速。我国现行《公路工程技术标准》(JTG B01-2003)规定高等等级公路的计算行车速度在 60~120km/h 范围之内，可见选择 10HZ 的加载频率是可行的，国内外大多数试验研究也选用此加载频率。因此，本试验采用 10HZ 的加载频率。

材料的疲劳寿命与荷载波形有一定的关系，通常认为正弦波形比较接近于实

际路面受到的荷载波形，为了加快试验的进程，相邻波形之间不插入间歇时间。

5.3.3 试验温度及加载应力

为了比较对设置不同夹层材料的复合式路面结构疲劳性能的影响，做了 25℃和 15℃两种温度的疲劳试验。所有的小梁试件均在环境温箱内保持 3h 以上，以保证试件内部的温度达到试验的要求。

对加载应力的要求，根据 SHRP 工作者的经验，若试件的疲劳寿命低于 1000 次，则所得到的试验数据偏于不安全，因此要根据实际情况确定应力水平，进行施加荷载，以保证试件的疲劳寿命高于 1000 次或在 1000 次左右。结合本试验的特点，只是横向比较研究加铺不同夹层材料对延缓反射裂缝的效果，在试验当中只需确定直接加铺沥青层试件的施加荷载的大小或应力水平，然后以此荷载水平分别施加于不同夹层材料的小梁试件。

5.4 小梁疲劳试验结果及其分析

5.4.1 疲劳试验结果

采用控制应力加载模式，温度控制为 $25\pm0.5^{\circ}\text{C}$ ，加载频率为 10Hz，在直接加铺结构小梁试件应力比为 0.4，施加荷载为 360kpa 的情况下，对不同加铺方案的小梁试件进行四点弯曲疲劳试验得到的试验结果见下表 5.2。

表 5.2 25℃常应力下的疲劳试验结果

Tab.5.2 Results of constant stress fatigue test with 25℃

试验方案 编号	直接加 铺结构	橡胶应力 吸收层	聚酯玻 纤布	玻纤 格栅	FHGS 格栅
①（次）	22973	57663	76703	104393	112483
②（次）	26883	62253	80293	99483	117323
平均值（次）	24928	59958	78498	101938	114903

同样采用控制应力加载模式，温度控制为 $15\pm0.5^{\circ}\text{C}$ ，加载频率为 10Hz，分别以直接加铺结构小梁试件应力比为 0.4 和 0.5，施加荷载为 900kpa 和 1120kpa，对不同加铺方案的小梁试件进行四点弯曲疲劳试验得到的试验结果见下表 5.3。

表 5.3 15℃常应力下的疲劳试验结果
Tab.5.3 Results of constant stress fatigue test with15℃

试验方案	施加荷载 (kpa)	疲劳寿命 (次)	平均值 (次)	施加荷载 (kpa)	疲劳寿命 (次)	平均值 (次)
直接 加铺结构	900	17243	16428	1120	1843	1673
		15613			1503	
橡胶应力 吸收层		37083	35863		3023	2893
		34643			2763	
聚酯 玻纤布		49483	46598		3743	3663
		43713			3583	
玻纤格栅		60123	58763		5003	4768
		57403			4533	
FHGS 格栅		69103	67503		5453	5648
		65903			5843	

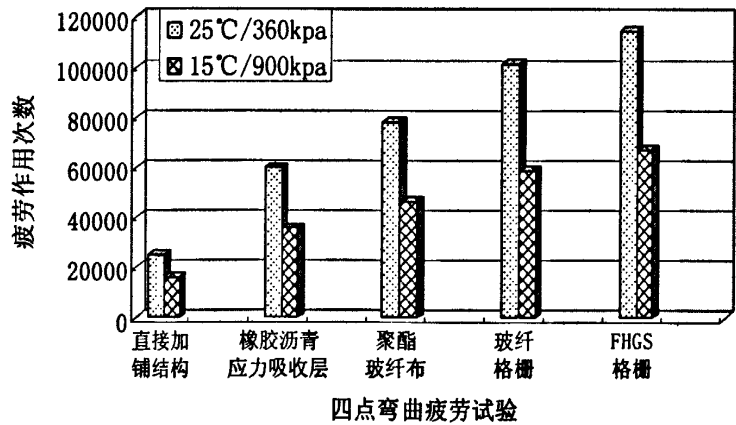


图 5.5 不同温度下各种沥青加铺层结构疲劳寿命对比图

Fig.5.5 the comparison chart of the fatigue life of
varieties of asphalt overlay structure with different temperatures

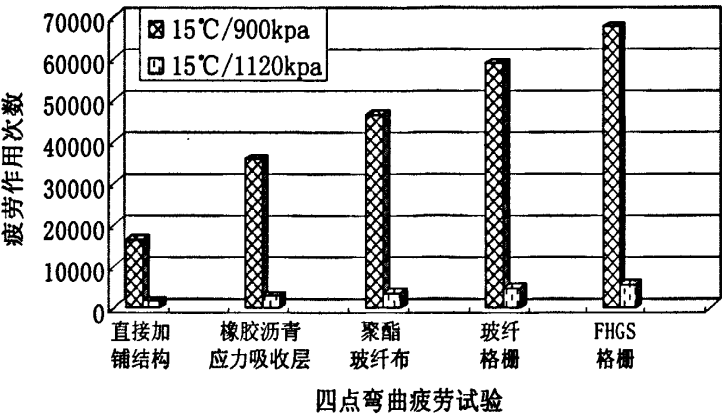


图 5.6 不同应力水平下各种沥青加铺层结构疲劳寿命对比图

Fig.5.6 the comparison chart of the fatigue life of varieties of asphalt overlay structure with different stress rates

5.4.2 试验结果分析

由四点弯曲疲劳试验结果可知：

1) 由表 5.2 可知，在控制应力加载模式下，温度控制为 25℃，加载频率为 10Hz,施加荷载为 360kpa 的情况下，五种试验方案当中，橡胶沥青应力吸收层、聚酯玻纤布、玻纤格栅、FHGS 格栅与直接加铺沥青面层相比，疲劳寿命分别增加了 2.40 倍、3.19 倍、4.09 倍和 4.61 倍。由此可见，上述四种夹层材料均能起到延长沥青加铺层疲劳寿命的作用。

2) 由表 5.3 可知，同样以控制应力为加载模式，温度控制为 15℃，加载频率为 10Hz，施加荷载为 900kpa 的情况下，五种试验方案当中，橡胶沥青应力吸收层、聚酯玻纤布、玻纤格栅、FHGS 格栅与直接加铺沥青面层相比，疲劳寿命分别增加了 2.18 倍、2.83 倍、3.58 倍和 4.11 倍；而施加荷载为 1120kpa 时，疲劳寿命则分别增加了 1.73 倍、2.19 倍、2.85 倍和 3.38 倍。因此，无论高应力比和低应力比，FHGS 格栅和玻纤格栅延长沥青加铺层使用寿命的效果要好于橡胶应力吸收层和聚酯玻纤布。

3) 由图 5.5 可知，温度分别在 25℃和 15℃，同样以各组直接加铺结构试件的应力比为 0.4 的情况下，上述五种试验方案当中，温度高的试件的疲劳寿命均远高于温度低的疲劳寿命。主要原因在于，温度愈低沥青面层的劲度模量愈高，脆性增加，同样夹层材料的劲度模量也会增加，允许变形的幅度减小，从而导致了沥青加铺层疲劳寿命的降低。因而，温度越低沥青加铺层越易发生破坏，越易出现反射裂缝。

4) 由图 5.6 可知，温度控制为 15℃，分别以直接加铺结构试件的应力比为

0.4 和 0.5 (即, 施加荷载为 900kpa 和 1120kpa), 对小梁试件采用四点弯曲疲劳试验所得到的结果显示, 虽然应力水平只是增加了 0.1, 而各种结构的小梁试件的疲劳寿命却急剧缩短, 从而反映了超载对沥青加铺层破坏作用极大。

5) 在同等应力水平的情况下, 控制温度由 25℃降低到 15℃时, 橡胶应力吸收层、聚酯玻纤布、玻纤格栅、FHGS 格栅与直接加铺沥青面层相比, 降低的幅度分别是 0.22 倍、0.31 倍、0.51 倍和 0.50 倍。原因在于橡胶应力吸收层和聚酯玻纤布相对于玻纤格栅和 FHGS 格栅而言, 随着温度的降低劲度模量增加幅度较小且延性更好, 在施加荷载的过程中更有利于试件的变形。因而推断, 前两种材料比较适于低温环境的状态下。至于随着温度的进一步降低, 前两种夹层材料对延长沥青加铺层疲劳寿命的是否优于后两种夹层材料, 还有待进一步的研究。

6) 上述结果显示, 无论高温还是相对低温, 高应力比还是低应力比, FHGS 格栅延长沥青加铺层疲劳寿命的效果最优, 然后依次是玻纤格栅、聚酯玻纤布、橡胶沥青应力吸收层。因此建议, 在年平均气温不是太低的地区并结合当地的情况, 优先使用 FHGS 格栅和玻纤格栅作为“白改黑”或“新建半刚性基层沥青路面”工程中的防裂夹层。

5.5 本章小结

本章阐述了疲劳试验方法及方法的选择, 重点介绍了四点弯曲疲劳试验的方法及试验方案的制定, 并对试验结果作了详细的对比分析, 得到了以下结论:

① 通过四点弯曲疲劳试验得知, 上述四种防裂夹层材料均能够延长沥青加铺层的疲劳寿命, 其性能优劣依次是, FHGS 格栅、玻纤格栅、聚酯玻纤布、橡胶应力吸收层, 与上一章所述的轮载重复试验所得到的结果基本一致。

② 在同等应力水平作用下, 随着温度的降低沥青加铺层的疲劳寿命呈现下降的趋势。同时证实, 像橡胶应力吸收层和聚酯玻纤布等软性材料更适于低温环境下或者年平均气温较低的地区; 而像玻纤格栅和 FHGS 格栅等劲度模量高的材料更适于年平均气温高的地区。

③ 在同一温度下, 应力水平的增加极大地影响沥青加铺层疲劳寿命, 从侧面反映了车辆超载对沥青加铺层的破坏作用极其严重。

第六章 沥青加铺层结构有限元应力分析

有限元突出的优点在于处理非线性、非均质和复杂边界等方面的问题,而路面结构应力变形恰恰就存在这些难题,因此针对这一类型的难题很适宜用有限元法。自从上世纪 80 年代将有限元引入道路工程中以来,有限元法在道路工程中的应用发展迅速,并取得了巨大的进展。

有限元法,是近似用相同形状、相同材料、相同荷载和边界条件的有限个单元体所构成的离散化结构,替代原来的连续性结构,来分析结构的应力变形,这些结构的单元体只在结点处存在力的联系,材料的应力—应变可表示为:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad \text{式 (6.1)}$$

由虚位移原理,利用应变位移关系和本构关系可建立单元体的结点力 $\{R\}$ 和结点位移 $\{\delta\}$ 之间的关系,进而写出总体平衡方程:

$$[K]\{\delta\} = \{R\} \quad \text{式 (6.2)}$$

式中, $[K]$, $\{R\}$ 和 $\{\delta\}$ 分别表示劲度矩阵, 结点位移列阵和结点荷载列阵。把荷载作用于结点, 由上式可求的位移, 进而求出应力和应变。

如果材料的应力应变关系是线性的, 则刚度矩阵 $[D]$ 是一常量矩阵, 所生成的劲度矩阵 $[K]$ 也是常量矩阵, 对于非线性的土体和路面材料, 刚度矩阵 $[D]$ 随应力而变化, 那么劲度矩阵则随荷载而变化。有限元法就是对给定的荷载 $\{R\}$, 求相应的结点位移 $\{\delta\}$ 。

6.1 材料的几种强度准则

材料的塑性变形不是在任何荷载下都能发生的, 而是荷载增加到一定程度时才会发生。材料究竟达到怎样的应力状态才发生塑性变形, 那么就需要一个评判标准, 这个标准成为屈服准则, 即是否存在塑性变形的准则。屈服是指材料发生了塑性变形, 当然材料依然存在部分弹性变形。随着荷载的逐步增加, 变形同样逐步增加, 达到某种应力状态时, 材料破坏, 此时的应力状态称之为一种极限应力状态。判断是否达到这一状态的标准, 称为破坏准则。

当结构处于单向拉压状态时, 材料从初始弹性状态进入塑性状态时的应力值, 即为拉伸或压缩屈服极限, 它们就是初始弹性状态的界限, 此弹性状态界限称为屈服条件。在常温状态和不考虑时间效应的情况下, 材料的屈服之前处于弹性状态, 应力与应变之间是一一对应的关系, 这样的屈服准则仅仅只是应力分量的函数, 可表示为^[53]:

$$f(\sigma_y) = 0 \quad \text{式 (6.3)}$$

对于沥青加铺层而言,在行车荷载和温度荷载的作用下,加铺层结构内任一点会同时存在应力、应变和应变能,沥青加铺层的破坏均与这些因素有关,按一般的塑性理论^[53,54],根据沥青加铺层这一特定结构,做如下假定^[55]:

假定复合式路面结构各层材料各项同性;

假定复合式路面结构各层竖向、水平位移具有连续性;

忽略时间因素的影响;

静水应力(平均正应力,即 $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$)部分只产生弹性体积的变化,而不影响塑性变形的规律,如不影响屈服应力 σ_s 等。

在对沥青加铺层结构进行交通荷载和温度荷载的应力分析时,主要涉及到的几种强度准则归纳如下^[53-56]:

1. Tresca 屈服准则(即,最大剪应力准则)

这一准则是假定当最大剪应力达到某一临界值时,即 $\tau_{\max} = \tau_s$,材料开始屈服(τ_s 是材料的剪切屈服强度)若以主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 表示这一准则,且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$,则最大剪应力可表示为:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad \text{式 (6.4)}$$

因此, Tresca 屈服准则可表示成:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \tau_s \quad \text{式 (6.5)}$$

在简单的拉伸状态下,由于 $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$,故最大剪应力 $\tau_{\max} = \frac{1}{2}\sigma_1$ 。

在拉伸荷载作用下,材料开始出现屈服时, $\sigma_1 = \sigma_s$, σ_s 为简单拉伸屈服应力,

那么此时最大剪应力 $\tau_{\max} = \frac{1}{2}\sigma_s$ 。与屈服准则对照, $\tau_s = \frac{1}{2}\sigma_s$ 。因此根据 Tresca 准则,材料发生屈服的条件是:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \tau_s = \frac{1}{2}\sigma_s \quad (\text{且 } \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3) \quad \text{式 (6.6)}$$

若主应力的大小次序未知,则 Tresca 屈服准则可表示为:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \max\{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|\} = \tau_s = \frac{1}{2}\sigma_s \quad \text{式 (6.7)}$$

由式(6.7)可知,主应力空间中,表示 Tresca 屈服准则是一垂直于 π 平面

的正六角柱体面, 屈服面在 π 平面上的屈服曲线是一正六边形

2. 米赛斯 (Mises) 屈服准则

米赛斯 (Mises) 屈服准则认为: 材料在复杂应力状态下形状改变能 U_d (又称畸变能), 达到了的单向拉伸屈服时的形状改变能, 材料开始屈服。由于塑性变形不产生体积改变, 也就是说静水应力对材料的屈服没有贡献, 即材料的弹性应变能 U 中的体应变能 U_v 对屈服不起作用, 因此材料的屈服只决定于 U 中 U_d 。而畸变能为:

$$U_d = \frac{1}{2G} J_2^2 \quad \text{或} \quad J_2^2 = 2GU_d \quad \text{式 (6.8)}$$

式中: G ——材料的剪切模量;

J_2 ——应力偏张量的第二偏应力不变量。

于是, 米赛斯 (Mises) 屈服准则又称畸变能屈服准则, 可表示为:

$$J_2 = k^2 \quad \text{式 (6.9)}$$

$$\text{或} \quad J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = k^2 \quad \text{式 (6.10)}$$

若 $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 < 6k^2$, 说明材料处于弹性状态, 若应力状态满足式 (6.10), 材料开始屈服。式 (6.10) 中, k 表征材料屈服特征的特征参数, 可由简单的拉伸试验确定, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为三个主应力。将简单拉伸屈服应力状态 ($\sigma_1 = \sigma_s$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) 与纯剪切应力状态 ($\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_s$, $\sigma_2 = 0$) 带入式 (6.11) 中可得到如下结果:

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s = \tau_s \quad \text{式 (6.11)}$$

因此, 根据米赛斯 (Mises) 屈服准则, 材料发生屈服的条件是

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = k^2 = \frac{1}{3} \sigma_s^2 \quad \text{式 (6.12)}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad \text{式 (6.13)}$$

如果把等效应力 σ_e 的概念 ($\sigma_e = \sqrt{3J_2}$) 引入该屈服条件, 可解释为: 当等效应力 σ_e 达到简单拉伸屈服应力 σ_s 时, 材料开始屈服。则以上屈服条件可写成:

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad \text{式 (6.14)}$$

由式 (6.14) 可知, 在主应力空间中, 表示米赛斯 (Mises) 屈服面的是一垂直于 π 平面的圆柱面, 屈服面在 π 平面上的屈服曲线是一圆曲线。

3. 最大拉应力准则 (Rankine 准则)

最大拉应力理论也成为第一强度理论。这一理论认为: 最大拉应力 σ_1 是引起材料脆断破坏的主要因素, 也就是认为不论在什么样的应力状态下, 只要构件内一点处的三个主要应力 σ_i (即 σ_1) 达到材料的极限应力 σ_u , 则材料就会发生脆性断裂破坏。至于材料的极限应力 σ_u , 则可通过简单的拉伸试验来确定。于是, 按照这一强度理论, 脆性断裂破坏判据是

$$\sigma_1 = \sigma_u \quad \text{式 (6.15)}$$

式 (6.15) 中, 极限应力 σ_u 除以安全系数, 得到材料的允许拉应力 $[\sigma]$, 因此按照这一强度理论所建立的强度条件为

$$\sigma_1 \leq [\sigma] \quad \text{式 (6.16)}$$

式 (6.17) 中, σ_1 为拉应力。在没有拉应力的三轴压缩应力状态下, 显然不能采用这一强度理论来建立强度条件, 而式中 $[\sigma]$ 为试样发生脆性断裂的允许拉应力, 当然也单纯的的理解为材料在单轴拉伸时的许用应力。

与此准则相关的屈服面是

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_u \quad \text{式 (6.17)}$$

这一准则的几何图形分别有三个垂直于 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 轴的平面组成, 其表面一般称简单拉伸破坏面。

4. Mohr-coulomb 屈服准则 (摩尔 — 库仑准则)

这一准则描述的是材料的摩擦破坏规律, 定义如下:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad \text{式 (6.18)}$$

式中: τ_f ——剪应力值;

c ——材料的内部的粘聚力;

σ ——正应力，即材料破坏面上的法向应力；

φ ——材料的内摩擦角。

在主应力空间中，若已知三个主应力的大小，即 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，此时将某一面上的抗剪强度换为达到破坏时单元体主应力之间的关系，其表达式为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi + c \cos \varphi \quad \text{式 (6.19)}$$

$$\text{或} \quad \sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2 \cot \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad \text{式 (6.20)}$$

因此，材料发生剪切破坏的条件为

$$\tau_f = [\tau] \quad \text{式 (6.21)}$$

上式中， $[\tau]$ 表征材料或界面的允许抗剪强度。

对于复合式路面结构而言，通常用式 (6.18) 和式 (6.19) 作为分析路面结构中沥青混合料强度理论。强度参数 c ，即为沥青与矿料之间的粘结力或旧水混凝土路面 (PCC) 与沥青加铺层 (AC) 界面的材料粘结力；强度参数 φ ，即为矿料之间的摩擦角或 PCC 与 AC 界面间的摩擦系数 $f = \tan \varphi$ ；材料参数 c 和 φ 需要通过摩尔—库仑理论与试验结构和方法的结合得到。

根据以上四种强度理论，对于在旧水混凝土路面上沥青加铺层，进行车辆荷载和温度荷载作用下的应力分析时，主要考虑最不利点的最大主应力 σ_1 、Mises 等效应力 σ_e 和最大剪应力 $\tau_{\max}$ 三个值。对于 PCC 板与 AC 面层层间界面及沥青混凝土材料的抗剪强度稳定性验算，主要考虑其抗剪强度 $[\tau]$ 。

6.2 基于层间夹层的沥青加铺层有限元计算模型和材料参数

本文根据弹性层状体系理论^[57-59]，对该复合式路面结构进行力学分析。研究对象是带有原始接缝的混凝土路面结构、防裂夹层和沥青加铺层组成的三维空间结构。沥青加铺层、水泥混凝土面板和基础等结构层采用 8 结点各项同性的实体单元，实体单元的每个结点有 3 个自由度—— U_x 、 U_y 和 U_z 。土工合成材料和应力吸收层采用三维薄膜单元进行应力、应变和位移分析，薄膜单元的每个结点同样有 3 个自由度—— U_x 、 U_y 和 U_z 。用薄膜单元计算时，只考虑其拉伸模量而不承受压应力。

6.2.1 力学计算模型

在复合式路面的研究当中,有限元计算方法应用较为广泛。在模型建立上有二维和三维力学模型之分,根据已有的研究^[60],为建立有限元力学模型大概总结出三条经验:① 三维有限元力学模型对计算行车荷载作用下的沥青加铺层受力状态更符合实际情况;② 路面力学中的假定,认为路基是一无限大的弹性半空间体,因此地基的尺寸应有相应的扩大;③ 沥青加铺层内部产生最大应力的荷载位置位于横向接缝且靠近纵缝边缘,偏荷载作用。考虑到纵向裂缝的受荷几率远小于横向接缝,本研究将荷载布置于横向接缝的中部,偏荷载作用。这一点在第二章已得到证实。

本研究对复合式路面的结构作如下假定:

- ① 各结构层为均匀、连续、各向同性的弹性体;
- ② 各结构层层间竖向、水平位移均连续;
- ③ 不计各结构层自重的影响;
- ④ 沥青加铺层四周侧面水平方向的位移为零;
- ⑤ 基础底面各向位移为零,基层、底基层和基础侧面水平方向位移为零;
- ⑥ 假定接缝宽度为 1 cm, 且接缝处无传荷能力。

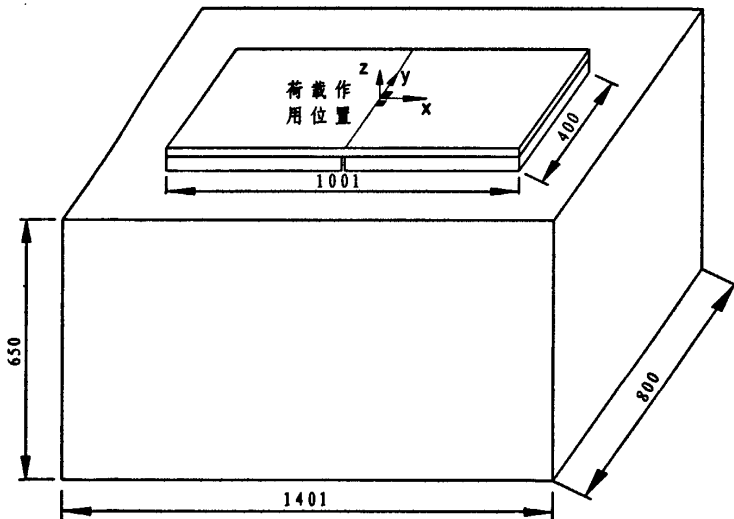


图 6.1 路面结构力学计算模型 (单位: cm)

Fig.6.1 calculating model of structural mechanics (Unit: cm)

本文拟定的路面结构物理计算参数:旧水泥混凝土路面板的长、宽、厚分别为 5.0m、4.0m、24 cm,接缝宽度为 1 cm。为了使地基为弹性半空间体,具有无限的大特性,地基采用扩大尺寸为 14.01m×8m×6.5m,该复合式路面结构如图 6.1 所示。考虑到分别对沥青加铺层和防裂夹层进行力学分析,为此建立模

型时，分别建立沥青加铺层和防裂夹层模型，然后将防裂夹层嵌入混凝土板与沥青加铺层之间，使防裂夹层只分担拉应力而不承受压应力。

交通荷载采用标准轴载 BZZ-100, 胎内压强为 0.7Mpa, 将单个轮胎作用于路面的范围简化为一正方形 18.9 cm×18.9 cm, 接地面积为 357.21 cm², 双轮中心间距为 32 cm。布载方式与计算如图 6.2~图 6.4 所示。图 6.3 和图 6.4 中 A 点表示直接加铺沥青面层或加铺防裂夹层后沥青加铺层底部的应力对比点, B 点表示防裂夹层底部的应力对比点, 1、2 点为弯沉及弯沉差的计算点。

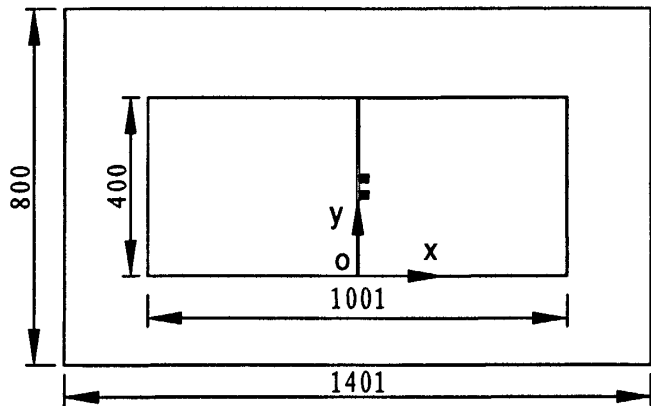


图 6.2 车轮荷载平面布置图 (单位: cm)

Fig.6.2 Plan position drawing under wheel interlayer's load

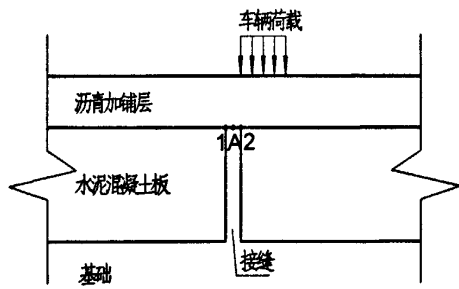


图 6.3 直接加铺 AC 层接缝处的计算图示
Fig.6.3 Caculating drawing of direct overlay's joint

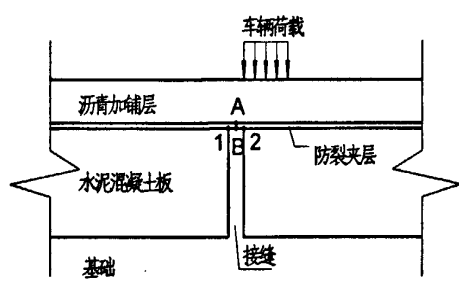


图 6.4 设置夹层接缝处计算图示
Fig.6.4 Caculating drawing of anti-crack interlayer' joint

6.2.2 材料参数

复合式路面各结构层材料的弹性模量、泊松比，按照设计规范推荐的数值作为有限元计算的参数，如表 2.1 所示。各种防裂夹层的弹性模量、泊松比的取值见下表 6.1

表 6.1 各防裂夹层计算参数

Tab.6.1 Several anti-crack interlayer's caculation parameters

夹层材料 物理特性	单位	玻纤格栅	FHGS 格栅	聚酯玻纤布	橡胶应力吸收层
厚度	cm	0.2	0.3	0.2	2.0
宽度	cm	0.5	1	—	—
弹性模量	Mpa	70000	67000	950	400
泊松比 μ	—	0.45	0.45	0.35	0.25
导热系数	$W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$	1.0	1.0	1.0	1.2
线膨胀系数	$m \cdot ^\circ C^{-1}$	0.5×10^{-5}	0.5×10^{-5}	1.0×10^{-5}	2.1×10^{-5}

6.3 荷载作用下的应力有限元分析

6.3.1 沥青加铺层厚度变化对荷载应力的影响分析

有资料显示，当水泥混凝土板与沥青加铺层之间的层间摩擦系数为 0 时，沥青加铺层层底的等效力 σ_e 和最大剪应力 τ_{max} 处于最有利的状态，随着层间摩擦系数的增大，其沥青加铺层的应力状态逐渐变差。因此，在有限元计算的过程中，忽略路面各结构层之间的摩擦，认为各结构层是一连续的整体，即层间黏结状态按连续考虑。

在沥青加铺层厚度满足不产生车辙的最小厚度时，随着厚度的增加荷载传递到加铺层层底的应力会越小，裂缝反射到路表面的时间会越长。当然沥青加铺层厚度无限度的增大也没有意义，一是经济上不合理；二是加铺层的主要受力层还是依靠原水泥混凝土路面板的残余强度。以下是沥青加铺层厚度的变化对荷载应力、弯沉及弯沉差的影响，加铺层厚度按 2 cm 的增量从 6 cm 增加到 20 cm。计算图示见图 6.1~图 6.3，板边偏荷载 BZZ-100；基本计算参数见表 2.1 和表 6.1。沥青加铺层层底的应力、弯沉、以及加铺层层底接缝处两侧的弯沉差如表 6.2、表 6.3 和图 6.5、图 6.6 所示。

表 6.2 行车荷载作用下加铺层层底应力随其厚度的变化表（A 点，Mpa）

Tab.6.2 Stress of asphalt overlayer's bottom with thickness' change
under wheel load (Point A, Mpa)

加铺层 厚度 /cm	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	σ_e	τ_{max}
------------------	------------	------------	------------	---------------	---------------	---------------	------------	------------	------------	------------	--------------

6	-0.431	-0.306	-0.219	-0.089	0.000	-0.382	0.168	-0.306	-0.732	0.779	0.450
8	-0.361	-0.273	-0.186	-0.076	0.000	-0.312	0.132	-0.273	-0.648	0.676	0.390
10	-0.296	-0.248	-0.161	-0.063	0.000	-0.250	0.101	-0.248	-0.575	0.585	0.338
12	-0.250	-0.226	-0.142	-0.054	0.000	-0.197	0.075	-0.226	-0.512	0.508	0.293
14	-0.211	-0.211	-0.125	-0.044	0.000	-0.158	0.053	-0.211	-0.458	0.443	0.256
16	-0.185	-0.201	-0.113	-0.037	0.000	-0.130	0.038	-0.201	-0.413	0.391	0.226
18	-0.169	-0.194	-0.107	-0.032	0.000	-0.116	0.027	-0.194	-0.374	0.348	0.201
20	-0.161	-0.189	-0.102	-0.029	0.000	-0.107	0.019	-0.189	-0.348	0.319	0.184

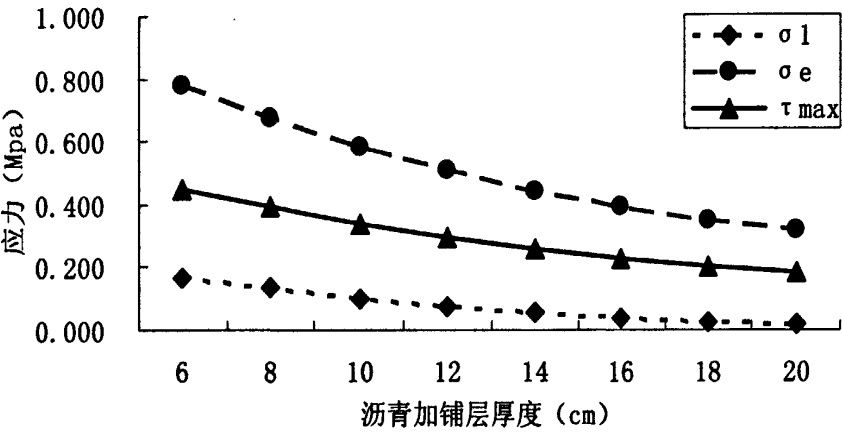


图 6.5 加铺层层底应力随厚度变化图

Fig.6.5 The chart of stress of asphalt overlayer'sbottom with thickness' change

从表 6.2 和图 6.5 可以看出,加铺层厚度的增加能够大幅度地减小加铺层底部的各个应力,其中最大拉应力 σ_1 、等效剪应力 σ_e 、最大剪应力 τ_{max} 以及竖向剪应力 τ_{xz} 均随着加铺层厚度的增加呈现减小的趋势。厚度增加 1 cm, σ_1 减小的幅度为 0.004 Mpa~0.018 Mpa,平均值为 0.011 Mpa,当加铺层厚度从 6 cm 增加到 14 cm 时,厚度增加 1 cm,减小幅度的平均值为 0.014 Mpa,而从 14 cm 增加到 20 cm 时,厚度增加 1 cm,减小幅度的平均值为 0.006 Mpa。同样,厚度增加 1 cm σ_e 、 τ_{max} 以及 τ_{xz} 减小的幅度分别为 0.015 Mpa~0.052 Mpa、0.030 Mpa~0.009 Mpa、0.005 Mpa~0.035 Mpa,平均值分别为 0.033 Mpa、0.019 Mpa、0.020 Mpa;当加铺层厚度从 6 cm 增加到 14 cm 时,厚度增加 1 cm, σ_e 、 τ_{max} 以及 τ_{xz} 减小幅度的平均值分别为 0.042 Mpa、0.024 Mpa、0.028 Mpa;均大于总体的平均值,而从 14 cm 增加到 20 cm 时,厚度增加 1 cm, σ_e 、 τ_{max} 以及 τ_{xz} 减小幅度的平均值分别为 0.021 Mpa、0.012 Mpa、0.009 Mpa,均小于总体的平均值,且远小于加铺

层厚度从 6cm 增加到 14cm 时, 厚度增加 1 cm, 各应力减小的幅度。从而说明在一定范围内, 随着加铺层厚度的增加, 其层底各应力均有大幅度的降低, 但当加铺层厚度超过 14 cm 后降低的幅度明显变缓。进而说明通过增加加铺层厚度, 消除反射裂缝的产生是不现实的, 不经济且效果也是有限的。

表 6.3 荷载作用下弯沉及弯沉差随加铺层厚度的变化表 (单位: 0.01 mm)

Tab.6.3 Deflection and deflection difference of asphalt overlayer's bottom with thickness' change under wheel laod (Unit: 0.01 mm)

加铺层 厚度 /cm	加铺层层 底 A 点弯 沉 U_z	加铺层层底弯沉及弯沉差			混凝土面层层底弯沉及弯沉差		
		受荷板 U_{z1}	非受荷 板 U_{z2}	弯沉差 ΔU	受荷板 U'_{z1}	非受荷 板 U'_{z2}	弯沉差 $\Delta U'$
6	23.3148	16.5038	20.3841	3.8803	16.3825	20.1122	3.7297
8	21.8524	16.1513	19.3802	3.2289	16.0585	19.1551	3.0966
10	20.6526	15.8521	18.5926	2.7405	15.7728	18.4012	2.6284
12	19.8162	15.6013	17.9961	2.3948	15.5088	17.8135	2.3047
14	19.1603	15.3988	17.5878	2.1890	15.3065	17.4193	2.1128
16	18.6153	15.2585	17.2620	2.0035	15.1641	17.1022	1.9381
18	18.1243	15.1492	16.9722	1.8230	15.0734	16.8322	1.7588
20	17.7029	15.0607	16.7138	1.6531	15.0075	16.5972	1.5897

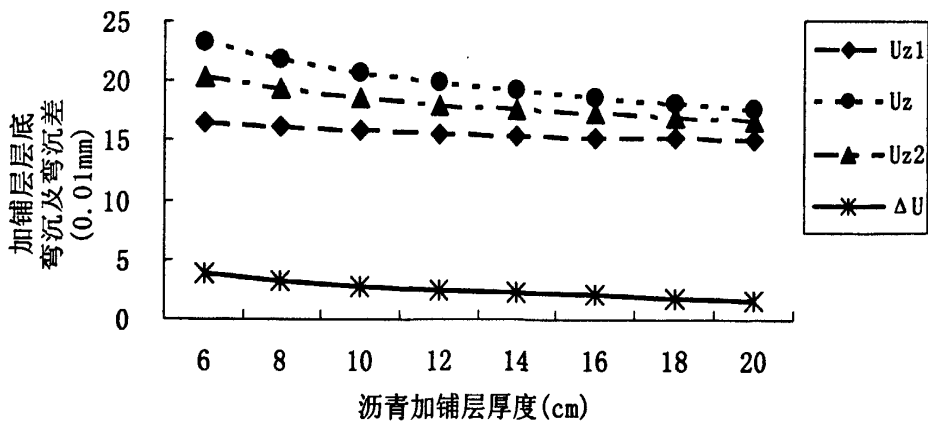


图 6.6 加铺层层底弯沉及弯沉差随厚度变化图

Fig.6.6 The chart of deflection and deflection difference of asphalt overlayer's bottom with thickness change

由表 6.3 和图 6.6 可知,直接加铺沥青面层的厚度从 6 cm 增加到 20 cm 时,加铺层底部接缝两侧的弯沉差及其底部最大弯沉值(图 6.3 中 A 点)逐渐减小。加铺层厚度为 6 cm 时,接缝两侧弯沉差为 3.8803 (0.01 mm),厚度为 20 mm 时,弯沉差为 1.6531 (0.01 mm),弯沉差减小了 57.40%,加铺层厚度平均每增加 1 cm,可减小弯沉差 0.1591 (0.01 mm),即整体平均效果为 4.10%。当加铺层厚度从 6 cm 增加到 14 cm 时,厚度平均每增加 1 cm,可减小弯沉差 0.2114 (0.01 mm),平均效果为 5.45%,大于整体平均值;加铺层厚度有 14 cm 增加到 20 cm 时,厚度平均每增加 1 cm,可减小弯沉差 0.0893 (0.01 mm),平均效果为 2.30%,远小于整体平均值。

加铺层厚度由从 6 cm 增加到 20 cm 时,加铺层底部最大弯沉值减小了 5.6119 (0.01 mm),厚度平均每增加 1 cm,最大弯沉值减小 0.5193 (0.01 mm);厚度由 6 cm 增加到 14 cm 时,厚度每增加 1 cm,最大弯沉值减小 0.4568 (0.01 mm),同样大于整体平均值;厚度由 14 cm 增加到 20 cm 时,厚度每增加 1 cm,最大弯沉值减小 0.2429 (0.01 mm),同样远小于总体平均值。进而说明加铺层厚度为 14 cm 时,是一转折点。从图 6.6 可以明显看出,当加铺层厚度超过 14 cm,接缝两侧的弯沉差和加铺层底部最大弯沉值减小的趋势逐渐变缓。因此,从沥青加铺层底部接缝处两侧的弯沉差和最大弯沉值的角度来看,加铺层厚度也不宜超过 14 cm,否则不但不经济,而且效果也不明显,还会造成资源上的浪费。

另外,由表 6.3 和图 6.6 可以看出,复合式路面结构在偏荷载作用下,不同加铺层厚度对应的底部最大弯沉值(图 6.3 中 A 点)均大于接缝两侧的弯沉值,这也是促使反射裂缝快速产生的一个因素。原因主要是,在模型建立的过程中,混凝土板间接缝没有任何填料阻止沥青加铺层的变形,因此在旧混凝土路面加铺沥青面层之前,不仅要做好旧水泥混凝土路面板修补处理工作,还需对接缝做好填缝处理,这样不仅能起到防止雨水渗透的作用,在一定程度上还可以起到延缓反射裂缝的效果。

6.3.2 不同防裂夹层结构荷载应力的对比分析

设置防裂夹层后,与直接加铺沥青面层相比,由于防裂夹层对外部荷载在路面结构内部产生的应力起到消散吸收的作用,导致加铺层内部荷载应力发生了较大的变化。不同防裂夹层的计算参数见表 6.1。基本计算参数:板边偏荷载为 BZZ-100;沥青加铺层的总厚度为 10 cm,当采用应力吸收层作为防裂夹层,其中应力吸收层厚度为 2 cm,而其上部的沥青混凝土厚度为 8 cm;原水泥混凝土路面板的厚度为 24 cm,弹性模量为 30000 Mpa;水稳基层的厚度 45 cm,弹性模量为 1500 Mpa;底基层石灰土的厚度为 20 cm,弹性模量为 800 Mpa;土基模量为 40 Mpa。计算图示见图 6.1~图 6.4。设置防裂夹层的沥青加铺层结构与直接加铺沥青混

凝土结构，在同等车辆荷载作用、沥青加铺层总厚度相同的条件下，沥青加铺层层底内力计算结果见表 6.4 和表 6.5（应力吸收层作为防裂措施时，表中结果为应力吸收层层底的内力、弯沉及弯沉差）。

表 6.4 荷载作用下各种加铺层结构其接缝处应力比较表（A 点，Mpa）

Tab.6.4 Joint's stress various overlayers under vehicular load (Point A, Mpa)

加铺层结构	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	σ_e	τ_{max}
直接加铺结构	-0.296	-0.248	-0.161	-0.063	0.000	-0.250	0.101	-0.248	-0.575	0.585	0.338
应力吸收层	-0.210	-0.212	-0.138	-0.051	0.000	-0.191	0.063	-0.212	-0.467	0.459	0.265
聚酯玻纤布	-0.237	-0.224	-0.146	-0.056	0.000	-0.203	0.081	-0.224	-0.479	0.486	0.280
玻纤格栅	-0.186	-0.186	-0.115	-0.037	0.000	-0.158	0.052	-0.186	-0.403	0.394	0.228
FHGS 格栅	-0.174	-0.172	-0.107	-0.030	0.000	-0.146	0.046	-0.162	-0.381	0.370	0.214

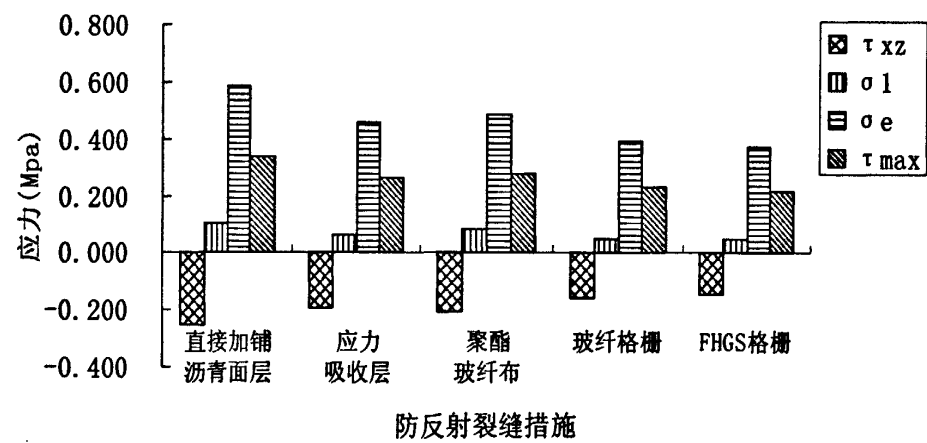


图 6.7 各种防反措施加铺层结构其接缝处应力比较图

Fig.6.7 The comparison chart of joints'stress of various anti-crack overlays

表 6.5 荷载作用下各种加铺层结构其层底弯沉及弯沉差比较表 (单位: 0.01 mm)

Tab.6.5 Deflection and deflection difference of various overlayers under wheel load (Unit:0.01 mm)

不同防反措施 加铺层结构总 厚度为 10 cm	加铺层层 底A点弯沉 U_z	加铺层层底弯沉及弯沉差			混凝土面层层底弯沉及弯沉差		
		受荷板 U_{z1}	非受荷板 U_{z2}	弯沉差 ΔU	受荷板 U'_{z1}	非受荷板 U'_{z2}	弯沉差 $\Delta U'$
直接加铺结构	20.6526	15.8521	18.5926	2.7405	15.7728	18.4012	2.6284
应力吸收层	24.1716	16.9365	21.1057	4.1692	16.3279	20.0823	3.7544
聚酯玻纤布	18.2318	14.6017	16.9804	2.3787	14.4363	16.7204	2.2841
玻纤格栅	12.9036	10.4452	12.3615	1.9163	10.2248	12.0746	1.8498
FHGS 格栅	11.0462	9.4021	10.6247	1.2226	9.0734	10.2533	1.1799

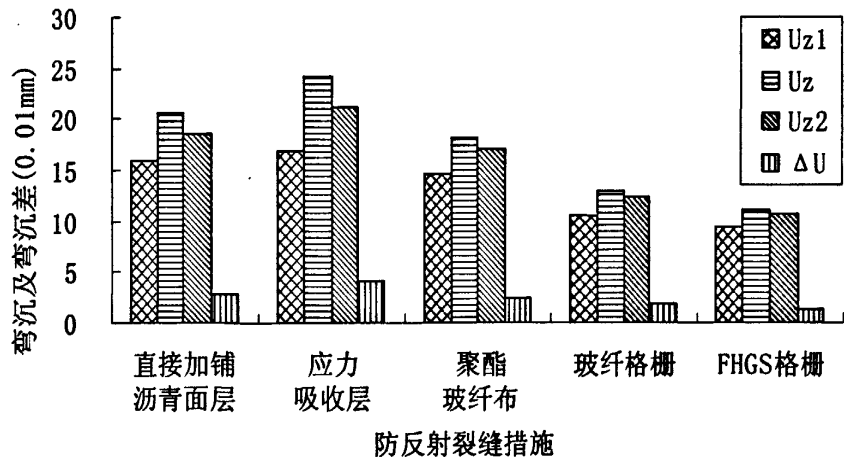


图 6.8 各种防反措施加铺层结构其层底弯沉及弯沉差比较图

Fig.6.8 The comparison chart of deflection and deflection difference of various anti-crack overlayers' bottom

由表 6.4 和图 6.7 得知,与直接加铺相比较,设置防裂夹层后,竖向剪应力 τ_{xz} 、最大主应力 σ_1 、等效应力 σ_e 及最大剪应力 τ_{max} 均有较大幅度的减小。加铺应力吸收层, τ_{xy} 、 σ_1 、 σ_e 及 τ_{max} 分别减小了 23.6%、37.6%、21.5%和 21.6%;加铺聚酯玻纤布, τ_{xy} 、 σ_1 、 σ_e 及 τ_{max} 分别减小了 18.8%、19.8%、16.9 和 17.2%;加铺玻纤格栅, τ_{xy} 、 σ_1 、 σ_e 及 τ_{max} 分别减小了 36.8%、48.5%、32.6%和 32.5%;加铺 FHGS 格栅, τ_{xy} 、 σ_1 、 σ_e 及 τ_{max} 分别减小了 41.6%、54.5%、36.8%和 36.7%。

由表 6.5 和图 6.8 可知,与直接加铺相比,加铺应力吸收层后,其层底弯沉及接缝两侧的弯沉差均有一定的增加,接缝两侧的弯沉差增加了 52.1%;而加铺聚酯玻纤布、玻纤格栅及 FHGS 格栅后,加铺层层底弯沉及弯沉差均有所减小,

其中接缝两侧的弯沉差分别减小了 13.2%、30.1%和 55.4%。

从上述可以看出,应力吸收层作为防裂夹层时,AC 面层层底接缝处内力稍小于聚酯玻纤布,主要是因为应力吸收层的具有较强的变形能力,在一定程度上对加铺层层底内力的消散作用要好于聚酯玻纤布。而轮载重复试验得知,应力吸收层作为防裂夹层的沥青加铺层结构,其疲劳寿命却稍差于聚酯玻纤布,主要原因在于应力吸收层作为防裂夹层时,其板间接缝两侧的弯沉差以及层底的最大弯沉(图 6.5 B 点)均远大于聚酯玻纤布作为防裂夹层时的最大弯沉及弯沉差。虽然,应力吸收层具有较强的变形能力,但当变形量超过沥青加铺层所承受的允许变形能力时(特别是冬季),首先就会在沥青加铺层底部出现开裂,逐步向上扩展形成反射裂缝。因此,应力吸收层作为防裂夹层时,其层底弯沉及接缝两侧弯沉差过大是其轮载疲劳寿命稍差的主要原因。

从上述还可以得知,与直接加铺结构、应力力吸收层以及聚酯玻纤布相比,玻纤格栅和 FHGS 格栅作为防裂夹层时的加铺层层底的内力、最大弯沉及弯沉差均小于前三种防裂措施,由此说明了轮载重复试验当中,加铺玻纤格栅和 FHGS 格栅后的轮载疲劳寿命明显高于其他三种方案。

加铺 FHGS 格栅后沥青加铺层底部的竖向剪应力 τ_z 小于玻纤格栅,从而说明了在纵缝轮载重复试验中,前者的轮载疲劳寿命高于后者。前者的最大拉应力 σ_1 、等效荷载 σ_e 、最大剪应力 $\tau_{\max}$ 、最大弯沉及接缝两侧的弯沉差均小于后者,主要因为前者的筋带宽度、厚度及弹性模量均大于后者所造成的。而在第四章中的横向接缝轮载重复试验和纵缝弯拉型轮载重复试验中,加铺 FHGS 格栅后的疲劳寿命却稍低于玻纤格栅,也证实了尺寸效应是确实存在的。

综合分析,有限元的计算的结果与试验所得到的试验结果基本一致。沥青加铺层总厚度为 10 cm 的情况下,加铺应力吸收层、聚酯玻纤布、玻纤格栅及 FHGS 格栅分别相当于在不同程度上增加了沥青加铺层的厚度,其中加铺 FHGS 格栅后效果是最明显的。

6.4 加铺层最小厚度的确定

目前主要是根据已有的实际经验结合现有的理论基础,对旧水泥混凝土路面沥青加铺层进行设计。设计步骤如下:

①首先对原水泥混凝土路面的损毁状况进行调查,然后评价其损坏状况和接缝的传荷能力,确定是否可以采用沥青加铺层;

②根据原水泥混凝土路面板的损坏情况,采取更换、修补、填封裂缝及压浆填封板底脱空等措施对原路面进行修缮,然后计算水泥混凝土板的应力状态;

③确定沥青混合料的类型及加铺层的厚度;

④保证层间黏结良好的情况下,选择合适的防反射裂缝措施;

⑤按照相关的规定进行施工,完成后,对施工质量进行验收。

然而,在确定加铺层厚度的过程中,基本上都是依据现有的工程经验,确定一合理的加铺层厚度,这样一是具有很大的盲目性;二是要么造成不必要的资源浪费要么质量满足不了要求。因此,探寻一种合理的沥青加铺层厚度设计方法意义深远,并且能尽可能的延缓反射裂缝扩展的速度,尽量在设计年限内不出现反射裂缝。

6.4.1 应力强度因子 K_I 与断裂韧性 K_{IC}

第二章已做证实,旧水泥混凝土路面接缝处沥青加铺层底部出现应力集中,存在应力奇异点,此应力值远远高于无裂缝相同点处的应力,从而导致接缝处沥青加铺层底部出现开裂,并逐渐向上扩展最终贯穿加铺层结构。裂缝尖端处的应力强度因子是研究裂纹扩展的基础,为研究沥青加铺层开裂和扩展的规律,以便为设计各种防反射裂缝措施提供必要的理论依据,因此有必要引入应力强度因子这一物理量。另外,文中引入应力强度因子还是为确定沥青加铺层最小厚度的设计方法提供理论支撑。

断裂力学的基本原理是结构构件中裂纹尖端的应力场能够用一个公共的参数——应力强度因子 K 来表示,这个参数 K 与场中的应力水平 σ 和裂纹的尺寸 a 有关^[61]。它表征了裂纹尖端附近应力应变弹性场的强度,裂纹尖端附近的应力与位移场均由应力强度因子来控制,它还表征了弹性应力应变整个场的能量。沥青加铺层的开裂方式以 I 型裂纹(张开型), II 型裂纹(剪切型)及两者的耦合为主,因此文中引入了应力强度因子 K_I 和 K_{II} 。

应力强度因子 K_I 是裂纹端部应力场强度的度量,断裂力学的基本原理之一是当裂纹尖端的应力强度因子 K_I 达到某一临界值 K_{IC} 时,裂纹即要向前扩展,构件发生失稳断裂。其强度准则就应该为:

$$K_I < K_{IC} \quad (6.22)$$

对于带裂纹的构件,则必须以应力强度因子代替应力来表征结构构件的受荷程度和极限状态。

临界应力强度因子 K_{IC} 表征材料抵抗裂纹尖端某一应力场强度,并表示材料阻止裂纹失稳扩展的固有能力。大量的试验表明: K_{IC} 值既与材料自身有关还与裂纹的尺寸有关。但是,对于同一种材料,存在一个 K_{IC} 最低值,它是表征材料抗断裂性能的一个常数,故将其称之为材料的断裂韧性,记作 K_{IC} ,其单位为: $\text{Mpa}\sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 。各种材料的 K_{IC} 均可由试验测得。

由上可知,临界应力强度因子 K_I 的底限就是材料的断裂韧性 K_{IC} ,因此裂纹

扩展的准则就成为:

$$K_I = K_{IC} \quad (6.23)$$

或者说当 $K_I < K_{IC}$ 时, 裂纹就不会扩展。

对于 II 型裂纹扩展与 I 型相似, 同样可以利用线弹性断裂理论求出应力强度因子 K_{II} , 此外同样也可以通过试验测得各种材料的 II 型断裂韧性, 使得 $K_{II} < K_{IIC}$, 即可满足材料不会发生 II 型断裂。

对于复合式路面结构而言, 同时受到 I、II 型的复合型荷载, 结合有关资料^[61], 得到临界表达式:

$$f(K_I, K_{II}) = K_{IC} \quad (6.24)$$

当裂纹端部的应力强度因子 K_I 、 K_{II} 满足上式时, 即裂纹达到了失稳扩展的临界状态。

对于实体工程而言, 可以采用偏于安全的直线型相关线^[61]

$$K_I + K_{II} = K_{IC} \quad (6.25)$$

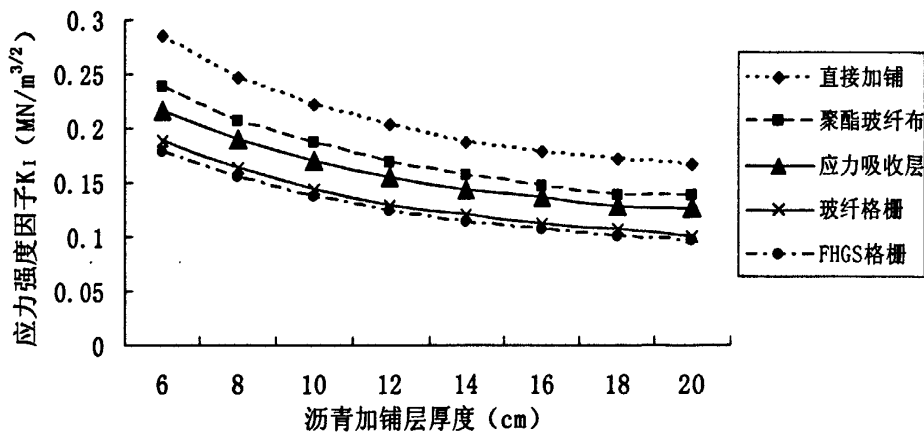
作为复合式路面是否发生开裂的判据, 也就是说只要满足 $K_I + K_{II} < K_{IC}$ 路面就不会发生开裂。根据此判据, K_I 、 K_{II} 对断裂的贡献是相同的。

6.4.2 应力强度因子的有限元分析

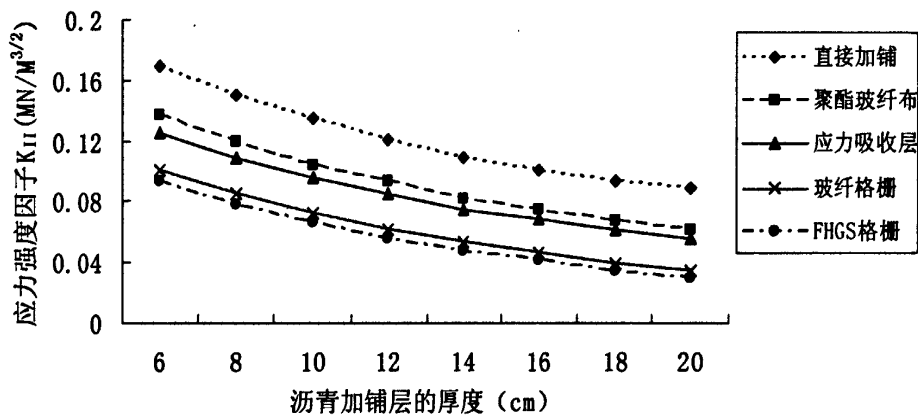
在第二章中已做阐述, 沥青加铺层反射裂缝的扩展模式主要以 I 型裂纹(张开型), II 型裂纹(剪切型)及两者的耦合为主, 利用有限元软件计算 K_I 和 K_{II} 两种应力强度因子。

假设复合式路面的使用年限为 10 年, 首先向当地的气象站调查过去 10 年间天气状况, 统计出过去 10 年间的日降温量, 取处日降温幅度最大值作为计算时的温度荷载, 根据实际情况定路表降温持续时间。采用标准轴载 BZZ-100kN, 尽可能使用更接近于实际的移动荷载, 行驶车速为实际路面的设计车速。沥青加铺层以下各结构层的计算参数, 以原有水泥混凝土路面的设计参数为准, 不确定的情况下可以对原路面钻心取样经测试后确定。由于笔者的水平有限, 以下有限元分析依然采用静荷载进行计算。

复合式路面个结构材料的计算参数, 见表 2.1; 试验中所用的几种防裂夹层材料的计算参数, 见表 6.1, 计算图示见图 6.1~图 6.4。以下是利用有限元软件 ABAQUS 计算板边偏荷载 BZZ-100 与 5 小时内路表降温 $\Delta T = -5^\circ\text{C}$ 耦合作用情况下, 加铺层的厚度由 6 cm 增加到 20 cm, 分析加铺不同防裂夹层后, 加铺层厚度对接缝处沥青加铺层底部应力强度因子的影响。



(a) 各种防反措施加铺层结构其应力强度因子 K_I 随加铺层厚度的变化图



(b) 各种防反措施加铺层结构其应力强度因子 K_{II} 随加铺层厚度的变化图

图 6.9 各种防反措施加铺层结构其应力强度因子随加铺层厚度的变化图

Fig.6.9 The chart of stress intensity factor with asphalt overlay's thickness changing in composite pavement with different anti-cracks measures

由图 6.9 (a、b) 可以看出, 在旧水泥混凝土路面与沥青加铺层之间, 无论是否加铺防裂夹层, 及加铺何种防裂夹层, 其接缝处加铺层层底应力强度因子 K_I 和 K_{II} 均随着沥青加铺层厚度的增加呈现递减的趋势, 且递减的幅度逐渐减小。得到的结果与接缝处加铺层层底应力状态相似。

另外, 从应力强度因子的角度也证实了 FHGS 格栅和玻纤格栅相对于其他两种防裂夹层能更好的起到阻止沥青加铺层开裂的效果。

6.4.3 确定沥青加铺层最小厚度

目前已公认, 沥青混合料在使用过程中, 其断裂韧性呈衰减的趋势。影响沥青混合料断裂韧性的因素诸多, 如沥青自身的性能、集料的级配组成、行车荷载、

交通量的大小及外部环境温度等。但,一旦确定了沥青混合料的类型,其初始的断裂韧性 K_{IC} 通过试验则可得以确定。目前的主要任务是通过大量的试验和理论分析,试图找出沥青混合料断裂韧性衰减的规律,以便计算出沥青混合料达到使用年限时其断裂韧性 K'_{IC} 的大小,将其称之为终止断裂韧性 K'_{IC} 。只要让上述计算得到的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 满足

$$K_I + K_{II} < K'_{IC} \quad \text{式 (6.26)}$$

则可说明,所设计的沥青加铺层在使用年限内不会产生开裂,即不会出现反射裂缝。

由 6.4.1 节可知,对给定的沥青混合料类型,其初始的断裂韧性 K_{IC} 可以通过试验容易测得,然而怎样预估沥青加铺层达到使用年限时的断裂韧性 K'_{IC} 是当前的主要任务,也是难点,更是保证沥青加铺层在使用年限内不会出现反射裂缝的关键所在。上述已做说明,既然沥青混合料在使用过程中,其断裂韧性是一变值,且与交通量和外部环境等因素有关,笔者不妨提出,用设计年限内的标准轴载累积当量轴次 N_e 和外部环境影响系数 C 将 K_{IC} 和 K'_{IC} 联系起来,便建立以下关系式:

$$\phi(N_e, C, K_{IC}) \cdot \alpha = K'_{IC} \quad \text{式 (6.27)}$$

N_e ——设计年限内的标准轴载累积当量轴次;

C ——外部环境影响系数;

α ——修正系数。

或是直接确定一合理的综合性安全系数 n , 建立 K_{IC} 和 K'_{IC} 之间的关系, 令

$$\frac{K_{IC}}{n} = K'_{IC} \quad \text{式 (6.28)}$$

n ——安全系数。

因此,无论建立上述何种关系式,均需要做大量的试验分析、理论计算及铺筑一些试验路段并长期对其进行跟踪观察,工程量可见一斑。

由 6.4.2 节分析得知,对于复合式路面,无论是否使用防裂夹层以及使用何种防裂夹层,其应力强度因子 K_I 和 K_{II} 都是随着厚度的增加呈现递减的趋势。只要求出某一厚度 d 下的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 恰能满足式 (6.26), 则该厚度 d 即可认为是沥青加铺层的最小厚度,能够保证沥青加铺层在使用年限内不会出现反射裂缝,既而会减少水损坏的发生。

以 FHGS 格栅为例,首先通过试验测得沥青混合料的初始断裂韧性 K_{IC} , 然后根据建立的式 (6.27) 或式 (6.28) 求得其终止断裂韧性 K'_{IC} 。由 6.4.2 节可

知,通过有限元软件可计算出不同沥青加铺层厚度下的应力强度因子 K_I 和 K_{II} ,假设加铺层厚度 d 为8 cm的情况下,计算得到的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 满足式(6.26),而加铺层厚度 d 为7 cm的情况下,计算得到的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 却不满足式(6.26),则说明加铺层厚度 d 为8 cm时,是FHGS 格栅作为防裂夹层时的沥青加铺层最小厚度。

由于笔者能力、水平及时间有限,且工程量较大、周期较长,只是提出这一概念,是否可行还有待今后的进一步研究。

6.5 本章小结

①通过车辆荷载作用下,沥青加铺层厚度的变化对直接加铺结构荷载应力的影响分析得知,车辆荷载在旧水泥混凝土路面板接缝处沥青加铺层底部产生的内力随加铺层厚度的增加呈逐渐减小的趋势,但此趋势随加铺层厚度的增加逐渐趋于平缓。发现当加铺层厚度超过14 cm时,加铺层厚度的增加对结构内部应力及弯沉值的影响已不再显著,其中14 cm~20 cm平均降幅仅为6 cm~14 cm平均降幅的1/3~1/2,依此得知加铺层的厚度不宜超过14cm。

②通过加铺几种防裂夹层材料与直接加铺结构相比,在车辆荷载作用下其理论计算结果表明,模量高的防裂夹层材料对应力的消散作用要优于模量低的防裂夹层材料,而加铺应力吸收层后在加铺层底部产生的弯沉值及接缝两侧的弯沉差甚至还要大于直接加铺结构,主要是由于应力吸收层自身模量低在荷载作用下产生的自压缩所造成的。

③另外,分析结果还显示,即使在车辆偏荷载的作用下,接缝处加铺层底部的弯沉值要大于接缝两侧任一弯沉值,主要是由于计算过程中没设置填缝所造成的,因此旧水泥混凝土路面板间接缝处填缝质量的优劣也是影响加铺层产生反射裂缝的一个因素。

④通过加铺不同防裂夹层材料对该复合式路面结构内部应力的影响分析得知,就车辆荷载在结构内部产生的应力和弯沉等方面来说,FHGS 格栅稍好于玻纤格栅,其次是应力吸收层,再者是聚酯玻纤布,与上述轮载重复试验和小梁疲劳试验所得到的结果基本一致。

⑤本章节最后,根据断裂力学的观点,利用有限元软件计算分析并结合工程断裂力学中应力强度因子这一概念,提出了新的旧水泥混凝土路面沥青加铺层最小厚度的设计方法。

第七章 主要结论与进一步研究的问题

本文结合现有对旧水泥路面沥青加铺层反射裂缝研究现状及评价体系存在的问题,以延缓反射裂缝和延长复合式路面的使用寿命为主要目的。通过大量的室内试验和理论研究,着重对不同防裂夹层延缓反射裂缝的效果做了系统的评价,建立了一套新的复合式路面反射裂缝评价体系,在此基础上探讨了加铺不同防裂夹层的复合式路面沥青加铺层最小厚度的设计方法。

7.1 主要结论

①通过车辆荷载和温度荷载作用下,对旧水泥路面沥青加铺层路面结构的内力做了有限元分析,得知在旧水泥路面板间接缝处沥青加铺层层底存在应力集中现象;行车偏荷载对路面的破坏作用相比行车正荷载要大;另外,温度荷载对路面内力的影响不可忽略。

②通过接缝轮载重复试验,考虑到尺寸效应的存在以及其他因素的影响,本文认为在实际工程应用中,加铺防裂夹层后与直接加铺结构相比, FHGS 格栅和玻纤格栅延缓反射裂缝的效果较好而聚酯玻纤布和橡胶应力吸收层较差。

③通过小梁四点弯曲疲劳试验,得知加铺各防裂夹层后与直接加铺结构相比,其延长沥青加铺层疲劳寿命的效果由高到低依次是: FHGS 格栅、玻纤格栅、聚酯玻纤布、橡胶应力吸收层,更充分地说明了 FHGS 格栅作为旧水泥路面沥青加铺层防裂夹层的优越性。

④通过车辆荷载作用下有限元分析,得知随沥青加铺层厚度的增加对路面结构内部的荷载应力、最大弯沉及板间接缝两侧的弯沉差逐渐减小,当厚度增加到 14 cm 以后,其应力、弯沉及弯沉差的降低逐渐趋于平缓,从而确定加铺层厚度不宜超过 14 cm。

⑤经有限元分析得知,无论是否加铺防裂夹层,在外部荷载作用下其结构内部的应力随着加铺层厚度的增加均呈现减小的趋势,且该趋势逐渐趋于平缓。当加铺层厚度超过 14 cm 时,效果已不再明显,因此认为加铺层的厚度不宜超过 14 cm。另外,还得知板间接缝的填缝质量也是导致反射裂缝产生的一个原因。

⑥在沥青加铺层总厚度为 10 cm 的情况下,经有限元分析可知,加铺不同的防裂夹层后,其应力、弯沉及弯沉差均有不同程度的减小,且 FHGS 格栅对减小荷载应力、弯沉及弯沉差的效果最好,得到了与室内试验结果基本一致的结论。

经过本文研究证明,对于温差变化不大的南方地区,使用 FHGS 格栅对延缓旧水泥路面沥青加铺层反射裂缝具有很好的效果,对于有条件的地区可以将 FHGS 格栅和橡胶应力吸收层综合使用,在延缓反射裂缝和延长沥青加铺层疲劳寿命方

面会有更好的效果。

7.2 主要创新点

①提出了用室内轮载重复试验评价防裂夹层抵抗反射裂缝能力的方法,并采用了三种试验方案,综合地评价了不同防裂夹层抵抗反射裂缝的性能,并通过小梁四点弯曲疲劳试验和理论计算得到了证实了该方法可行性,该方法不仅效果明显而且加载方式更接近于实际路面。

②根据断裂力学的观点,结合车辆荷载与温度荷载耦合作用下沥青加铺层裂缝应力强度因子有限元分析,提出了一种全新的旧水泥混凝土路面沥青加铺层最小厚度的设计方法。

7.3 有待进一步研究的问题

本文对不同防裂夹层的抵抗反射裂缝的能力进行了部分研究,由于影响旧水泥路面沥青加铺层反射裂缝的因素诸多,具有其独特的复杂性,且基于作者水平有限和研究条件的限制,本文尚有许多不完善之处,有待进一步的研究:

①鉴于旧水泥路面沥青加铺层反射裂缝成因、防治及力学分析的复杂性,需要铺筑实体工程进行长期的跟踪观测,进而从根本上证实数据的有效性,为理论研究提供依据。

②文中有限元分析是在静荷载作用及层间完全连续的情况下进行的,与实际状况有一定的差距,下一步研究时,须考虑实际移动的行车荷载及层间的滑移状态,这样与实际路面的真实情况更为接近。

③文中对旧水泥路面与沥青加铺层之间的层间剪应力涉及较少,对层间剪应力还需做进一步的研究。

④加铺 FHGS 格栅作为防裂夹层时,其使用寿命的预估还需进一步的研究。

⑤计算沥青加铺层的最小厚度,通过大量的试验确定所用沥青混合料的初始断裂韧性 K_{IC} , 然后建立其初始断裂韧性 K_{IC} 与终止断裂韧性 K'_{IC} 之间的函数关系,是下一步研究的重点。沥青加铺层厚度设计理论还有待进一步完善。

致 谢

论文完成之际，万语千言已无法表达内心的感慨之音。两年多的研究生生活即将告别，又为我的求学生涯画上了一个分号，回想这两年多的漫漫求学之路，既是知识不断积累的过程，更是心灵得到升华的过程。在此之中，既有失败后的苦闷与茫然又有收获后的欢悦与惊喜，回顾这一切都是对老师、朋友、亲人深深的谢意！

本人在导师凌天清教授的耐心指导下，最终完成了论文的写作，在此表示深深的感激之情。文章从选题到定稿都倾注了恩师凌老师的智慧与关爱，处处凝聚着凌老师大量的心血，凌老师博学儒雅、平易近人、严谨治学及对学术的专注态度值得我一生去学习。凌老师孜孜不倦的教诲，为我提供了很多锻炼的机会，在我求学和为人的道路上给我指点迷津，让我终生受益。为此，在论文完成之际，向敬爱的恩师凌天清教授深表敬意和感谢！

此外，在论文撰写的过程中得到了董强师兄和郑智能师兄的热心帮助和大力支持，用 ABAQUS 有限元软件进行路面内力分析的过程中，董师兄与清琼师兄的大力相助，让我少走了不少弯路，在此深表感谢！研一期间，金康康师兄、肖川师兄、曙光师兄、绍杰师兄对我很好的帮带作用，为我以后试验的开展打下了良好的基础，同时在试验过程中得到了周启伟、李耀楠、陈丽等同届同门好友以及下届师弟师妹的关心、支持和热心帮助，为此向你们表示感谢！祝愿你们吉祥如意、幸福一生。

在此，特别感谢我的父母，是他们夜以继日的操劳，是他们用两鬓的白丝、额上褶皱、不再挺拔的身躯和松树皮似的双手换来了我的今天。借此机会向他们表示深深的祝福：谢谢你们！你们辛苦啦！对于你们的殷切希望我会铭记于心。

最后，感谢所有关心、帮助、鼓励过我的老师、同学和朋友，祝你们一生安康！

参考文献

- [1] Egons Tons and Edward M.Krokosky. A study of welded wire fabric strip reinforcement in bituminous concrete resurfacing, AAPT,1960,Vol.29:367-506.
- [2] J.L. Vicelja. Methods to eliminate reflection cracking in asphalt concrete resurfacing over Portland Cement Concrete pavements, AAPT,1963.Vol.32:477-506.
- [3] H.W.Busching etc. A state-of-art survey of reinforced asphalt paving. AAPT. 1970. Vol.39: 477-506.
- [4] P.W. Jayawickrama, R.L. Lytton. Methodology for predicting asphalt concrete overlay life against reflecting cracking,Proc.Of6th international conference structural design of asphalt Pavements.1987.Vol.1:912-924.
- [5] J.W.Button, R.L.Lytton. Evaluation of fabrics, fibers and grids in overlays. Proe.Of 6th intimation conference structural design of asphalt pavements, 1987.Vol.1:925-934.
- [6] M.A. Caltabiano, J.M. Brunton. Reflaction cracking in asphalt overlayers,AAPT.1991.V ol.60:310-331.
- [7] I. Ishai, M.Livneh. Experimental and analytial madel for the role of reinforced asphalt membranes in retardation of reflecting cracking. AAPT. 1993. Vol.62.130-149.
- [8] H.L.Von Quintus, et al. Reflection cracking analysis for asphalt concrete overlays.Proc. AAPT. Vol.48.1979: 477-506.
- [9] 周富杰. 防治反射裂缝的措施及分析[D]. 同济大学博士学位论文. 1998. 5.
- [10] 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面设计理论与施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社. 1999.
- [11] 郑建龙, 周志刚, 张起森. 沥青路面抗裂设计理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社. 2002.
- [12] 周志刚. 交通荷载下沥青类路面疲劳损伤开裂研究[D]. 中南大学博士学位论文. 2003. 5.
- [13] 张起森. 高等路面结构设计理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社. 2005.
- [14] 中华人民共和国行业标准. 《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2002). 北京: 人民交通出版社. 2002.
- [15] 中华人民共和国行业标准. 《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ 073. 1-2001). 北京: 人民交通出版社. 2001.
- [16] 甘立刚, 青光焱, 孟云伟. 水泥路面病害调查及维修对策[J]. 公路交通技术. 2007. 9:24-28.
- [17] 符冠华. 沥青混凝土加铺层改造旧水泥混凝土路面的应用研究[D]. 东南大学博士学位论文. 2001.
- [18] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社. 1998.
- [19] 姚祖康. 路面(第三版)[M]. 北京: 人民交通出版社. 2006.
- [20] 张肖宁. 广州北环高速公路沥青加铺层试验研究. 华南理工大学道路工程研究所研究报告. 2002. 12.
- [21] 张起森, 李宇峙. 旧水泥混凝土路面上沥青加铺设计与应用研究. 研究报告. 2002. 11.
- [22] 陈栓发, 马立军. 水泥混凝土路面加铺层结构研究. 研究报告. 2004. 12.
- [23] 吴赣昌, 凌天清. 半刚性基层温缩裂缝的扩展机理分析[J]. 中国公路学报. 1998(1): 21-28.
- [24] 顾凯峰, 黄靖波, 王金昌. 温度变化对沥青混凝土路面裂缝的影响[J]. 中外公路.

2004. 3(24):41-44.
- [25] 刘荣辉, 钱国平, 郑健龙. 周期性气候条件下沥青路面温度场计算方法研究[J]. 长沙交通学院学报. 2002. (18):71-75.
- [26] Reflective Cracking in Pavements State of the Art and Design Recommendations. Proceedings of the Second International RILEM Conference. Liege Belgium. March. 1993: 10-12.
- [27] R.Kirschner. Asphalt-reinforcing polyester grids in airfield. Airport Forum. v20. Oct, 1990:8-10.
- [28] J.J.Hughes, E.Somers. Geogrid Mesh for Reflective Crack Control in Bituminous Concrete Overlays. Pennsylvania DePt of Transportation Harrisburg. Bureau of Construction and Materials. Jul 2000. 96P. RePort: PA-2000-013-86-001.
- [29] 符冠华, 卢拥军. 沥青混凝土加铺层改造旧水泥混凝土路面的 5 年实验分析[J]. 公路. 2003. 10:100-106.
- [30] YiJiang, R.S.Medaniel. Application of cracking and seating and use of fibers to control Reflective cracking. Transportation Research Record. 1993:150-159.
- [31] 王龙, 刘东亮. 沥青碎石与级配碎石过渡层在防止半刚性基层反射裂缝的对比分析[J]. 东北公路. 2002. 4.
- [32] 张玉宏, 王松根, 李昶. 国外水泥混凝土路面碎石化技术简介[J]. 公路. 2003(9): 45-49.
- [33] 武健民, 伍石生. 用三维有限元方法评价带接缝的旧水泥混凝土路面罩面[J]. 长安大学学报(自然科学版). 2002(22):10-13.
- [34] 伍贤惠, 张登良, 李德超. 沥青路面反射裂缝足尺试验[J]. 长安大学学报(自然科学版). 2003(23):4-6.
- [35] 邓学均. 路基路面工程[M]. 人民交通出版社. 2001.
- [36] 李庆芬. 断裂力学及其工程应用[M]. 哈尔滨工程大学出版社. 1998.
- [37] N.F.Coetzee. Some Consideration on Reflection Cracking in Asphalt Concrete Overlay Pavement. Ph.D.Dissertation, Univ.of California, 1979.
- [38] A.Vanealstraete, L.Fanken. Numerical Modelling of Crack Initiation under Thermal Stress and Traffic. Proceedings of the 2nd Int. RILEM Conf. 1993:136~145.
- [39] ZHOU Zhi-gang, ZHENG Jian-long. The reinforcing effects of reinforcement materials in preventing asphalt pavements from reflective cracking. In :The 1st China International Geosynthetics Conference. Shanghai, 2000.
- [40] 廖卫东. 基于应力吸收层的旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构与材料研究[D]. 武汉理工大学. 2007. 6.
- [41] 杨德生. 水泥路面沥青加铺层反射裂缝成因及分析[J]. 西部交通科技. 2009(20):52-57.
- [42] 中华人民共和国行业标准. 《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004). 北京: 人民交通出版社. 2004.
- [43] 李淑明, 许志鸿, 蔡喜棉. 土工织物复合式路面结构内力影响分析[J]. 中国公路学报. 2006(19):28-31.
- [44] 祝海燕, 王选仓, 曹宝贵. 复合式路面中夹层对旧水泥混凝土板荷载应力影响分析[J]. 公路. 2006(12):100-103.
- [45] 廖卫东, 王小雄. 沥青加铺层抗反射裂缝足尺疲劳试验[J]. 长安大学学报(自然科学版). 2006(26):9-12.

- [46] 王朝辉, 王选仓, 杨维国. 格栅加筋沥青加铺层结构轮载疲劳模拟对比试验[J]. 长安大学学报(自然科学版). 2008(28):16-20.
- [47] 王朝辉, 王选仓. 基于沥青加铺层结构疲劳寿命的夹层位置确定[J]. 中国公路学报. 2008(21):29-34.
- [48] Austin R A, Gilchrist A J T. Enhanced performance of asphalt pavements using geomembranes. 1996 (14):175-186.
- [49] 徐世亮, 张国玺, 张俊光. 橡胶沥青应力吸收层的试验研究及其工程应用[J]. 交通科技. 2008(213):66-68.
- [50] 元松, 谈至明. 沥青路面荷载型竖向反射裂缝疲劳断裂分析[J]. 同济大学学报(自然科学版). 2007(35):1352-1357.
- [51] 朱洪州, 高爽, 唐伯明. 沥青混合料常应变小梁弯曲疲劳试验[J]. 华中科技大学学报(城市科学版). 2009(26):5-8.
- [52] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社. 2001.
- [53] 殷绥域. 弹塑性力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1990
- [54] 王仁, 熊祝华, 黄文彬. 塑性力学基础[M]. 北京: 科学出版社. 1998.
- [55] 周益春. 材料固体力学[M]. 北京: 科学出版社. 2005.
- [56] 陆辉. 轮载作用下沥青路面结构三维非线性有限元分析方法的研究[D]. 上海: 同济大学博士学位论文. 2001.
- [57] 邓学均, 陈荣生. 刚性路面设计(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社. 2005.
- [58] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社. 2003.
- [59] 朱照宏, 王秉纲, 郭大智. 路面力学计算[M]. 北京: 人民交通出版社. 1985.
- [60] 李淑明. 旧 PCC 路面上 AC 加铺层设计方法的研究[D]. 上海: 同济大学博士学位论文. 2002.
- [61] 洪起超. 工程断裂力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社. 1986.

在学期间发表的论著及取得的科研成果

在学期间发表论文:

- [1] LING Tian-qing, LI Xiu-lei, LI Yao-nan, CHEN Li. Wheel Tracking Simulation Tests of Asphalt Overlay with Different Anti-cracking Interlayers: A Comparative Analysis. A Comparative Analysis. Proceedings of International Workshop on Energy and Environment in the Development of Sustainable Asphalt Pavements. XI'AN JIAO TONG UNIVERSITY PRESS.2010.6.
- [2] 凌天清, 李修磊 张剑 周启伟等. 复合式路面层间夹层抗反射裂缝能力的模拟试验. 重庆交通大学学报, 2010, 4 期.
- [3] LING Tian-qing, ZHANG Shu-guang, Li Xiu-lei. Study on Light-colored Technology of Highway Tunnel Pavement. Advanced Materials Research vols.168-170(2011)pp211-216.

在学期间参加科研情况:

- [1] 高级刚性基层沥青面层复合式长寿路面应用技术研究——重庆市交通委员会科技项目;
- [2] 高性能半柔性复合路面与基层的开放应用研究——交通部西部交通建设科技项目;
- [3] 钢渣在公路工程中的应用研究——云南省交通厅科技项目;
- [4] 隧道路面环保节能型养护技术研究——交通运输部西部交通建设科技项目;
- [5] 废旧橡胶粉改性沥青在公路沥青路面中的应用技术——西部交通建设科技项目: 重庆绕城高速公路关键技术研究及推广应用子项目。

