

DAWENCHA DIQU BANGANGXING JICENG LIQING LUMIAN TUGONGBU JIACENG DE
KANGLIE XIAONENG YU JIZHI

大温差地区半刚性基层沥青路面 **土工布夹层的** **抗裂效能与机制**

付 伟 钱劲松 何 斌 陈欣然 / 著

张外信



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

大温差地区半刚性基层沥青路面 土工布夹层的抗裂效能与机制

付 伟 钱劲松 何 斌 陈欣然 著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书通过对半刚性基层沥青路面土工布夹层防治反射裂缝问题较为系统的分析研究,主要阐述了大温差地区铺设土工布夹层防治反射裂缝的抗裂效能与机制。本书共7章,重点介绍针对土工布夹层的室内中、小尺度模拟试验,现场长期监测和三维仿真分析方法,以及不同温度和交通荷载作用下,土工布所体现的不同抗裂效能及其抗裂机制。本书对我国大温差地区半刚性基层沥青路面土工布夹层的应用具有重要的指导意义。

本书适合公路设计、施工、养护及管理人员在具体工作中使用,也可作为相关专业本科生、研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大温差地区半刚性基层沥青路面土工布夹层的抗裂效能与机制 / 付伟等著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017.9

ISBN 978-7-114-14222-2

I. ①大… II. ①付… III. ①半刚性基层—沥青路面—抗裂性—土建织物—研究 IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 239336 号

书 名:大温差地区半刚性基层沥青路面土工布夹层的抗裂效能与机制

著 作 者:付 伟 钱劲松 何 斌 陈欣然

责任编辑:李 沛 李学会

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:720×960 1/16

印 张:12

字 数:226 千

版 次:2017 年 11 月 第 1 版

印 次:2017 年 11 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14222-2

定 价:80.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前言

QIANYAN

“十三五”期间,我国西藏、新疆、内蒙古和青海等地区将面临大规模的公路交通基础设施建设任务。例如,西藏公路交通基础设施建设计划投资 5431 亿元,内蒙古公路交通基础设施建设预计完成投资 4500 亿元。面对如此艰巨的建设任务,如何提高公路建设水平,保障结构设施长效耐久,成为工程投资、管理和建设者日益关心的问题。大温差条件下,如何应对半刚性基层沥青路面的反射裂缝问题,则是其中的共性难题之一。

本书在中交第二公路勘察设计研究院有限公司承担的国内外大量公路勘察设计项目基础上,开展了相关专题研究,通过室内模拟试验、1/3 比例缩尺加速加载试验、现场足尺试验和多因素数值模拟等研究手段,对土工布夹层的防反效果和作用机理进行了较为系统的分析研究。

本书由付伟、钱劲松撰写和统稿,参加本书撰写的还有中交第二公路勘察设计研究院有限公司何斌、同济大学陈欣然等设计和研究人员。感谢陶泽峰,为项目研究和本书撰写所进行的室内试验和数值分析工作;感谢颜玉进、吴钊、李宁、严胜红为本书撰写提供的部分室内试验数据;感谢刘帅、谷利宙对全书的校核;同时感谢西藏自治区交通运输厅、招商局重庆交通科研设计院有限公司和西藏自治区交通勘察设计院在专题研究过程中给予的关心与支持。

本书适合公路设计、施工、养护及管理人员在具体工作中使用,也可作为相关专业本科生、研究生的教学参考书。土工布夹层的防反效果不仅受气候条件、交通荷载、路面结构组合等诸多因素的影响,其现场实施效果更受到施工工艺和质量控制水平的制约,有很多问题还需要时间的检验和进一步完善。限于作者的研究时间和认识水平,本书不足之处在所难免,请广大读者不吝赐教。

作者

2017 年 6 月

目 录

MULU

第1章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书的主要内容	14
第2章 土工布的基本材料性质	15
2.1 土工布的物理力学性质	15
2.2 强辐射条件下土工布的耐久性	23
2.3 土工布的水力学特性	28
2.4 本章小结	32
第3章 大温差地区土工布抗裂效能的小尺度室内试验分析	34
3.1 模拟车辆荷载作用的疲劳试验	34
3.2 模拟温度作用的疲劳试验	41
3.3 模拟荷载—温度耦合作用的疲劳试验	47
3.4 荷载—温度耦合作用对土工布效果的影响	55
3.5 本章小结	70
第4章 大温差地区土工布抗裂效能的中尺度室内试验分析	72
4.1 试验设计	72
4.2 试验过程	78
4.3 试验结果分析	80
4.4 交通荷载作用下土工布抗裂机制分析	89
4.5 本章小结	91
第5章 大温差地区土工布抗裂效能的现场足尺试验分析	93
5.1 试验路设计	93
5.2 试验路实施	101
5.3 第一试验段监测数据分析	103

5.4	第二试验段监测数据分析	112
5.5	本章小结	115
第6章	大温差地区土工布抗裂机制的仿真分析	117
6.1	土工布对于温度型反射裂缝的抗裂效能分析	117
6.2	土工布对于荷载型反射裂缝的抗裂效能分析	135
6.3	土工布对于温度—荷载耦合作用反射裂缝的抗裂效能分析	155
6.4	大温差作用下土工布的抗裂机制分析	160
6.5	本章小结	168
第7章	总结	169
参考文献		172
索引		182

第1章 绪 论

1.1 背景

近年来,随着国家对西部地区交通战略意义的不断重视,投资力度不断加大,西部地区的公路建设不断取得长足发展。川藏公路、青藏公路、新藏公路、滇藏公路等国道的整治改建和黑色化改造,使得当地公路交通网络规模日益扩大。由于西部地区地域广阔、基础薄弱,其交通基础设施网络仍有待进一步完善,公路建设任务仍十分繁重。

在青海、西藏等西部高海拔地区,年温差和日温差较大,给公路建设带来了严峻挑战。以西藏地区为例,冬季最低温度可达 -20°C ,夏季最高温度可达 30°C ,年温差可达 50°C ,平均日温差达 15°C ,历史最大单日升降温幅度可达 30°C ,明显高于年温差 30°C 、日温差 10°C 的全国平均水平。低温条件下,沥青变得脆硬,沥青混合料的劲度模量提高,变形能力和应力松弛性能下降,较常温时更容易开裂。更为重要的是,在大温差作用下,目前较多使用的半刚性基层沥青路面,易因基层产生的温缩或干缩开裂诱发自下而上的反射裂缝。此外,该地区太阳辐射较强,沥青老化加剧,黏性降低,从而使沥青混合料的抗裂性能下降,路面裂缝率提高。根据对西部大温差地区在役公路的调查可知,裂缝为最典型的路面病害。在广泛采用半刚性基层沥青路面的公路建设背景下,如何应对反射裂缝问题,成为工程技术人员非常关心的问题。

目前,减少或延缓半刚性基层沥青路面反射裂缝的措施包括设置土工合成材料夹层、设置应力吸收层、基层预切缝,以及增加沥青面层厚度、减少半刚性基层水泥剂量等。根据既有研究和实践,设置土工合成材料夹层,对减缓温度型反射裂缝具有较好的效果,但对减缓荷载型反射裂缝的效果相对有限。对于大温差地区,温度是导致路面开裂的重要因素,故设置土工合成材料夹层可作为路面防裂的措施。

但是,由于路面结构层间力学行为复杂,各地荷载和环境条件差异显著,土工合成材料夹层的应用机理、效果和施工工艺尚未得到全面统一的认识,相关研究仍有待进一步深入。例如,土工合成材料夹层对于不同的温差条件适应性如何,交通

荷载耦合作用下,土工合成材料夹层是否能发挥预期效果,土工合成材料夹层是否会引起层间黏结性能的下降,进而导致路面的推移和剪切损坏。为此,中交第二公路勘察设计研究院有限公司、同济大学等单位,对大温差地区半刚性基层沥青路面土工布夹层应用技术进行了深入研究。本书为项目研究成果的部分总结,重点介绍针对土工布夹层的各种模拟试验和数值分析方法,以及在不同温度和交通荷载作用下,土工布夹层的抗裂效能及其机制。

1.2 国内外研究现状

半刚性基层沥青路面是我国“七·五”期间,经大量的科学研究和生产实践提出推广应用的一种路面结构。目前,国内大多数高等级公路均为沥青混凝土路面,而基层则采用水泥稳定碎石、二灰稳定碎石等半刚性材料,极少数采用碾压混凝土、素混凝土等。半刚性基层沥青路面由于具有强度高、造价低、整体性及水稳定性好等优点,在我国公路建设中得到了广泛的应用。

然而,由于半刚性基层属于水硬性材料,其强度和刚度的发展需要经历一段相当长的时间,因此对温度和湿度的变化都较为敏感,且容易产生干缩和温缩裂缝。一旦半刚性基层开裂,裂缝处易产生应力集中,在车辆荷载和温度变化的作用下,半刚性基层会产生较大的应力,并且由于半刚性基层与沥青面层的黏结状况良好,这种应力会传递到沥青面层中。当半刚性基层与面层层间裂缝处的应力超过沥青层的抗拉强度后,就会使得沥青面层底面开裂,而后,在行车荷载和温度应力的共同作用下,裂缝将在沥青面层中延伸,最终贯穿整个面层,形成反射裂缝。对国内已建高速公路的调查表明,无论南方还是北方,通车后一年最迟第二年均出现了裂缝,裂缝率最高达 $640\text{m}/1000\text{m}^2$,现场钻芯取样观察表明,50%以上的裂缝为半刚性基层开裂导致的反射裂缝^[1]。

反射裂缝一旦产生,不仅影响路面的美观和行车舒适性,更严重的是大大地缩短了路面的使用寿命。因此,如何防治反射裂缝一直是道路工程的一大难题。常用的防治反射裂缝措施主要有三种:设置土工合成材料夹层、设置应力吸收层、增加面层厚度^[1-6]。其中,设置土工合成材料夹层是一种经济而实用的防治方法,在实际工程中得到了广泛的应用^[7-9]。

1.2.1 反射裂缝的成因和分类

一般来说,反射裂缝产生和发展的直接原因是半刚性基层的位移。而造成半刚性基层位移的原因主要是温度变化、行车荷载及二者的耦合作用。从这一角度,

可将反射裂缝分为两类:由温度变化作用引起的反射裂缝,称为温度型反射裂缝;由行车荷载引起的反射裂缝,称为荷载型反射裂缝^[10]。

温度型反射裂缝是由低温收缩和温度反复变化导致^[11]。在寒冷的冬季,半刚性基层会因低温产生收缩变形,因而在沥青面层内产生拉应力,如图 1.1a) 所示。在日变化温度的作用下,半刚性基层会随着温度变化膨胀或收缩。由于温缩系数不同,沥青面层或加铺层长度变化存在差异,从而在裂缝处的沥青层底部产生应力集中,拉压作用反复变化引起沥青面层的开裂。

荷载型反射裂缝是由于车辆荷载反复驶过接缝或原有裂缝造成的疲劳作用而产生的。按车轮驶过裂缝时路面结构的受力特点,可分为三个过程:

(1) 轴载位于接缝或裂缝一侧,裂缝两侧产生较大的竖向相对位移,在沥青面层中产生较大的剪切应力,如图 1.1b) 所示。

(2) 轴载位于裂缝或接缝顶端时,裂缝两边相对位移较小,主要作用为竖向荷载下产生的弯拉应力,如图 1.1c) 所示。

(3) 轴载驶离裂缝时,在沥青面层内产生与过程(1)方向相反的剪切应力,如图 1.1d) 所示。

因此,在整个过程中,沥青层受到连续两次相反方向的剪切作用和一次弯曲作用。

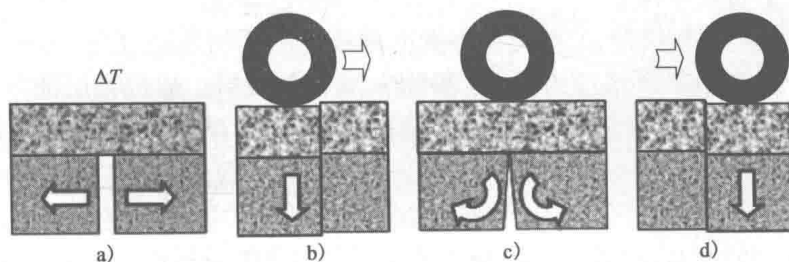


图 1.1 反射裂缝作用图示^[12]

断裂力学认为,裂缝的扩展有三种位移模式,即张开模式、剪切模式和撕开模式,如图 1.2 所示。

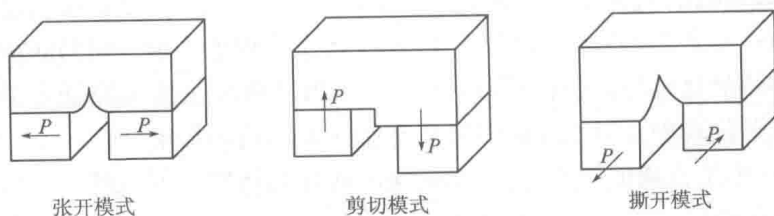


图 1.2 裂缝扩展的三种模式^[11]

其中,温度应力引起的反射裂缝为张开模式。车辆荷载对应的主要模式是张开模式和剪切模式。车轮经过裂缝正上方时以张开模式引起反射裂缝,在驶经裂缝的前后,则以剪切模式引起反射裂缝^[13-14]。

对于车辆荷载, Kim 和 Buttlar 指出,车辆荷载在通过裂缝上方时引起的较高拉力和变形,加速反射裂缝向上扩展^[15-16]。Cleveland 指出,车辆荷载重复作用下,结构变形量逐渐增长,加剧了裂缝发展^[17]。对于温度荷载, Minhoto 等人的研究表明,环境温度的变化导致了反射裂缝的显著增加^[18-19]。Yin 通过足尺试验观测了温度型反射裂缝的发展过程,发现一旦反射裂缝达到一个临界高度,裂缝的发展速度会大大加快^[20]。

为防治车辆荷载和温度变化引起的反射裂缝,国内外进行了大量的理论分析、试验研究和现场应用。

1.2.2 土工材料基本性质及其在防治反射裂缝中的应用

土工布作为防治反射裂缝常用的材料,具有较好的抗拉能力、抗老化能力等^[21]。土工布的铺设将在一定程度上削弱层间黏结,因此其削弱程度也是判别适用性的指标之一。

(1) 土工布基本特性

道路工程中常用的土工布类型为聚丙烯或聚酯无纺布,厚度为 0.4 ~ 4mm,模量为 10 ~ 160MPa,临界应力为 5 ~ 20MPa,属于软夹层。通过黏层油与上下结构层黏结,其自身性质及浸润沥青后的性质变化将会对防治反射裂缝的效果产生影响^[22-23]。

De Souza Correia N(2011)^[24]通过室内试验研究了各土工材料浸润于沥青黏层油前后性质的变化,以评价实际应用中土工材料能够发挥出的性能。结果表明,浸润黏层油后,土工材料的强度、刚度、防水性均有提升。

Correia N S(2014)^[25]使用类似的方法进行了研究,并对黏层油用量的影响进行了进一步分析:若黏层油用量超过最佳值,将引起明显的强度、刚度衰减;而当黏层油达到一定用量后,抗渗性变化很小。

土工布在施工前的阶段和施工阶段均存在老化现象。第一阶段主要为环境温度所产生的热氧化,以及阳光导致的光氧化。第二阶段主要为热沥青的高温引起的热老化。老化现象会对土工布的性质产生一定的负面影响,且受土工布种类、当地气候条件、施工方法的影响,这是选择土工布作为防治反射裂缝夹层所需考虑的因素之一。

目前,评价土工布老化的研究主要分为自然老化试验和人工加速老化试验,通

常对其老化前后的物理特性、力学特性进行比较分析。

Koerner R M(1989)^[26]通过现场观测对聚丙烯土工织物的老化性能进行研究,结果表明其耐光和耐热老化能力较差,但耐化学老化和生物降解性能很好。

张清平(2006)^[27]利用室内材料试验研究了土工布在沥青层施工过程中热老化对性能的影响,发现土工布在施工后发生老化,变脆、变硬、韧性变差,厚度略有增加,且防渗透能力也会减弱。

杨旭东(2007)^[28]对聚丙烯土工布在不同老化条件(如大气自然老化、沙土掩埋和水下老化)下的老化行为进行了现场试验研究,结果表明:在大气自然老化条件下,紫外线的作用会使聚丙烯织物强度下降,其下降程度与接收的累计紫外辐射量呈线性关系;而另两种老化条件对织物老化无显著影响。

大温差地区多数伴有较强的光氧化作用,需考虑其对土工布的老化作用,此外还需考虑施工阶段的高温对土工布的性能影响。

在评价铺设土工材料的结构抗剪性能方面,国内外近年来也采用了其他的试验方法,主要研究如下:

David Zamora-Barraza(2010)^[29]使用如图1.3所示的三层式试件和竖向加载方式,对土工材料(3种格栅,2种土工布)与沥青层的黏结性能进行了评估。结果表明,所有土工材料均会降低层间黏结性能,其中土工格栅的黏结性能相对较好。土工格栅对黏层油用量不敏感,土工布抗剪强度受黏层油影响较大,存在最佳用量,且需要的用量较前者高。

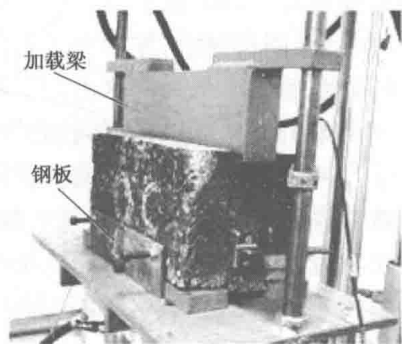


图1.3 David Zamora-Barraza 的剪切试验装置^[29]

侯荣国(2011)^[30]通过试验路与现场斜剪试验,分析了铺有土工布的水泥混凝土面板与沥青混凝土层之间的抗剪能力。结果表明土工布满足层间抗剪要求,但抗剪富余系数不大,因此铺有土工布的路面结构容易发生推移破坏。

Stefania Vismara(2012)^[31-32]使用直剪试验和劈裂试验来研究土工材料的层间黏结性能,试验温度为5~25℃,结果表明土工材料虽然会降低层间黏结能力,但能够避免上下层面的过大滑移,此增益效果在5℃下更为显著。

Delbono H L(2014)^[33]使用直剪试验和拉伸试验研究土工材料对层间黏结的影响,使用改性沥青作为黏层油。结果表明,若土工材料能够被改性沥青部分融

入,则层间黏结较无土工材料时增强,反之则会削弱。

(2) 土工材料现场试验及应用

在土工材料现场应用方面,国外研究起步较早。从 20 世纪 70 年代开始,土工布、玻璃纤维土工格栅(简称玻纤格栅)等土工合成材料就在很多实际工程中得到了应用^[34]。1974 年,美国达科他州铺筑试验路,研究无纺聚丙烯土工织物防治反射裂缝的效果,认为无纺聚丙烯土工织物不仅能起到减少反射裂缝的作用,而且还能有效防止路表水下渗。经过三年的使用,这种土工织物依然保持完好,增设土工织物路段的反射裂缝宽度比不设土工织物的路段要小得多^[35]。

1982 年, S. F. Brown 介绍了北美、欧洲和远东 Tensar 格栅的使用效果,认为可明显减少车辙病害,可防止出现反射裂缝,并可使沥青面层设计厚度减少 36%^[36]。

1991 年,美国 Portland 市在旧水泥混凝土路面上铺筑了土工格栅用于防治沥青加铺层的反射裂缝^[37]。1980—1990 年,美国的得克萨斯州、宾夕法尼亚州和密西西比州也分别铺筑了多条土工布和土工格栅的应用试验路,对加铺层反射裂缝发展情况进行了长期观测对比^[38-40]。

2001 年,在美国的密苏里州沥青路面加铺中,采用土工织物防治反射裂缝,应用效果良好;同年,在佛罗里达州旧水泥混凝土路面加铺沥青中采用土工织物防治反射裂缝,调查显示,加铺土工布的沥青路面两年后基本没有裂缝出现,而未加铺的沥青路面在 3 个月内就出现不同程度的裂缝^[41]。

山东 104 国道修筑不同加铺结构试验路,原路面为水泥混凝土路面,基层为石灰土,自 1997 年补强改建通车三年内,使用状况良好。观测结果表明,就防治反射裂缝效果而言,铺设土工布优于铺设水泥稳定碎石,无纺土工布优于有纺土工布,全幅铺设土工布优于接缝处局部铺设^[9]。

1999 年,青岛市香港路加铺改造中采用聚酯无纺土工布作为防裂措施,并与其他路段进行对比,通车一年后,采用土工布夹层的路段没有出现开裂,而没有采用土工布的路段不同程度地出现反射裂缝^[8]。

2000 年,西安交通大学的胡长顺等使用大型疲劳设备,模拟车辆荷载与温度荷载,进行了足尺疲劳试验研究。结果表明,在层间铺设土工布防裂层,对抑制温度型反射裂缝有较好的效果;而对于车辆荷载引起的剪切型反射裂缝,其作用主要是阻碍新裂缝的产生,阻碍原有裂缝的扩张,延缓裂缝的发展,但并不能防止反射裂缝的产生^[9]。

2003 年,在沪宁高速公路镇江支线改建工程试验路,原路面为沥青路面,主要病害是裂缝、松散和变形。该工程使用了聚酯玻璃纤维土工布(简称聚酯玻纤布)作为防治反射裂缝的材料,经过观察发现,未铺设聚酯玻纤布的路段 3~6 个月均

出现裂缝,而铺设聚酯玻纤布的路段,直到2005年使用状况良好。

聚酯玻纤布在沪宁高速公路拓宽改造工程中主要布设于新、旧半刚性基层纵向拼接缝,收缩裂缝,旧沥青路面横向反射裂缝,旧基层的纵向裂缝。通过钻芯取样发现,聚酯玻纤布与沥青混凝土下面层、稀浆封层均能很好地黏结在一起,有机地结合形成整体^[42]。

2003年,蒙蚌高速公路改造中使用聚酯玻纤布防治半刚性基层上方的反射裂缝,经过2003—2004年的观测,发现聚酯玻纤布比玻纤格栅能有效地防止反射裂缝,防止雨水下渗,并且与沥青混凝土的黏结力好,耐高温性、整体性、抗拉强度与耐久性等性能优良^[43]。

另外,京唐公路、京哈一级公路、津沽公路、沪嘉高速公路等都采用土工织物处理反射裂缝,效果比较明显。

对于其他类型的防反措施,国内外也进行了许多应用和现场试验,如铺设应力吸收层^[44-46]、铺设级配碎石层等^[47-49],均在不同程度上延缓了反射裂缝的产生。但现场试验的影响因素较多且难以控制,导致各种抗裂措施的效果难以进行横向对比。因此,许多研究者借助实验室试验和仿真模拟等手段,尽可能地控制无关变量,对土工材料的抗裂效能、机制和影响因素进行了一系列的研究。

1.2.3 土工材料防治反射裂缝效果的试验研究

在国内外对土工材料防治反射裂缝的研究中,行车荷载和温度变化被作为两个最为重要的因素予以考虑,很多研究者指出,温度变化引起的作用较行车荷载更为重要。这些试验可以按照施加的荷载进行区分,分别是单独模拟行车荷载、温度变化的试验以及模拟二者耦合作用的试验。研究者通过这些试验,研究了在各种情况下土工合成材料防治反射裂缝的效果及其影响因素等。

(1) 室内试验

① 模拟行车荷载的试验

模拟行车荷载作用的试验有以下两种类型:一是在试件表面施加滚动的车轮荷载,二是在固定位置施加竖向荷载。1993年,Livneh等人^[50]开发出了车辙试验,随后,其他研究者使用相同的试验方法,通过改变试件的支撑情况和边界条件进行研究^[51-52]。对于第二类施加竖向荷载,一些研究者^[53]分别应用静载和动载试验研究不同土工合成材料的防反效果,以决定其在路面结构中的最佳位置。其他研究者^[54-55]只在试件的顶面中心施加了动荷载,以使加铺层的底部产生水平向变形。也有研究者在做这一类试验时考虑了剪切效应,因而在试验中施加了偏心荷载^[56]。

2011年, David Zamora-Barraza 等人^[55]使用如图 1.4 所示的试验装置, 通过竖向中心疲劳加载, 分析对比了土工织物(2种)、土工格栅(3种)和应力吸收层的防治反射裂缝效果, 并研究了黏层油用量对其防治反射裂缝效果的影响。试验结果表明, 各土工材料均增加了试件的疲劳寿命, 其中土工格栅类的防治反射裂缝效果最优, 且模量越大效果越好。

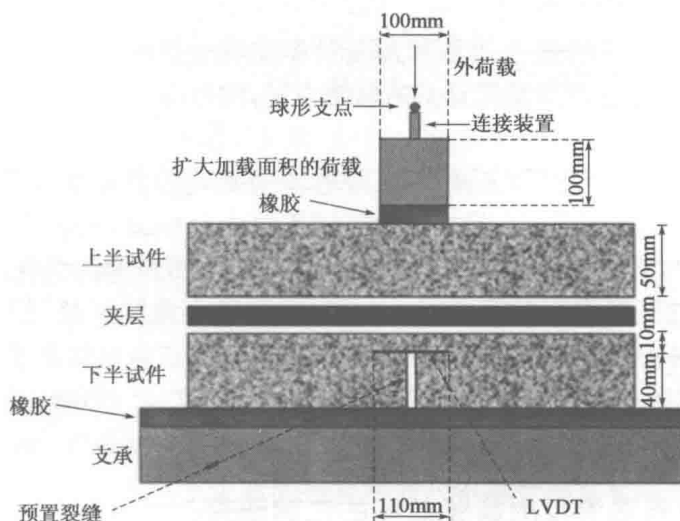


图 1.4 David Zamora-Barraza 的试验装置^[55]

②模拟温度作用的试验

模拟温度作用的试验通常采用力学装置使一条预置的裂缝在水平向反复开合来模拟这种作用。如比利时道路实验室开展的 BRRC 试验^[57]、ENTPE 试验^[58], 伊利诺伊大学的试验^[59]和 TTI 的 overlay 试验等^[60]。Gregory S. Cleveland 设计的试验平台可作为此类试验的典型^[17], 如图 1.5 所示, 底部由两块可横向运动的铁板组成, 以此作为旧路面, 将层间的土工合成材料和加铺的沥青混凝土粘在底座上, 通过操作底座的位移模拟路面在温度应力影响下的拉伸作用。然而, 这种试验方法需要专门定制的机械运动装置, 且对其位移速率、大小必须严格控制, 试验工艺较为复杂。

③模拟荷载—温度耦合作用的试验

另一方面, 一些实验室试验通过施加竖向荷载和水平向的位移, 同时模拟了车辆荷载和温度变化的作用。比如 Autun 实验室的反射裂缝试验设备^[61-62], 可同时施加一个缓慢的水平位移和高频率的竖向重复荷载。

2007年, Prieto 等人^[12]开展模拟荷载—温度耦合作用的疲劳试验, 试验装置如

图 1.6 所示。通过将试件放在一个活动支承上,可同时模拟弯曲、拉伸和剪切应力。温度效应通过试件下方支承的水平开合运动来模拟,行车荷载则通过一个在试件表面滚动的车轮来模拟。对 3 种土工布进行了对比,结果表明:土工布的使用显著提高了试件的疲劳寿命,并且铺设土工布对疲劳寿命的提升作用明显大于改善沥青层本身性质带来的提升效果。



图 1.5 Gregory S. Cleveland 的试验装置^[17]

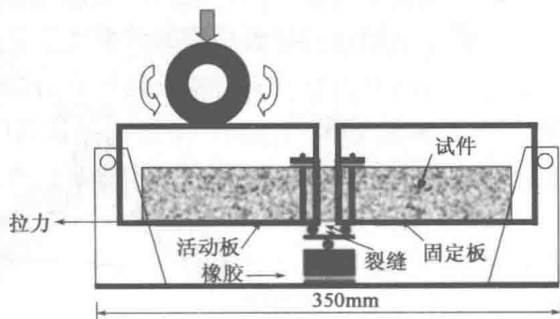
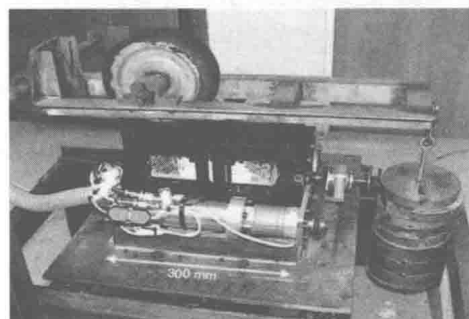
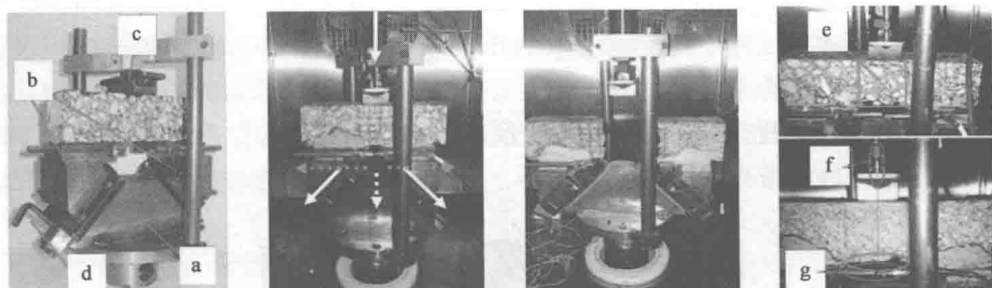


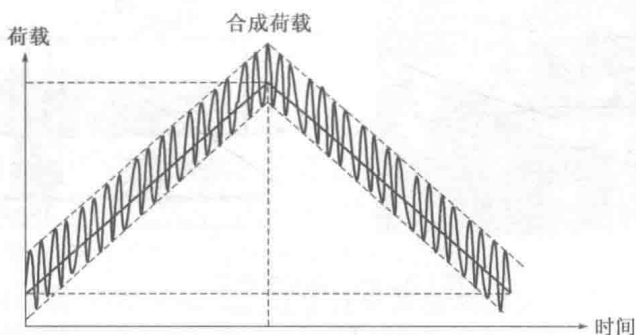
图 1.6 Prieto 的试验装置^[12]

2013 年,Moreno-Navarro 和 Rubio-Gamez 发明了 UGR-FACT 试验方法^[63]。他们通过使用一种新的试验设备研究了行车荷载带来的拉伸和剪切应力和代表温度收缩的拉应变,该方法中使用的仪器如图 1.7 所示,主要由底座(a)、两个滑动托盘(b)、压头(c)和距离固定螺栓(d)组成。底座两边为倾斜状,安装有导轨,可供两个滑动托盘竖向运动,安装竖向 LVDT(f)和水平向 LVDT(g)量测试验中的位移。试件用环氧树脂粘贴在托盘上,在荷载作用下,试件两端受拉伸作用,在试件中间区域(e)模拟路面的张拉型开裂。他们还在 2014 年使用这种试验方法研究了不同防治反射裂缝系统的效果^[64]。

图 1.7 Moreno-Navarro 的试验装置^[63]

2015 年, Gonzalez-Torre 等人^[65]开发了一种包含有不同频率和应力水平的竖向荷载动力学试验,仅通过固定点竖向荷载同时模拟了车辆荷载和温度变化的作用,加载波形如图 1.8 所示。同时模拟车辆荷载和温度变化作用的试验可以仅通过简单的试验装置进行,大大简化了试验。同年,他使用上述试验方法对不同土工材料(6 种)的防治反射裂缝效果进行了对比分析^[66]。分析得出:

- a. 土工材料的种类对其防治反射裂缝效果影响很大。
- b. 土工材料的模量并不是防治反射裂缝效果的唯一决定因素。
- c. 土工格栅防治反射裂缝的效果优于土工布,因为前者的层间黏结更好。

图 1.8 Gonzalez-Torre 使用的加载波形^[65]

(2) 加速加载试验

加速加载试验(Acceleration Pavement Test)是目前国际上先进的路面现场试验手段,通过可控的试验轴载对路面结构进行连续加载,模拟汽车轮胎在路面上的运动状态。试验能检测表征路面结构使用性能的指标,在较短的时间内建立其变化规律,从而得到对沥青路面结构长期使用性能的评价。

加速加载试验设备分为足尺和小尺度两种类型。小型加速加载设备 MMLS3

由南非研制,具有体积较小、运输方便的优点,且与足尺加速加载设备相比大大节约了试验经费。此设备的加载速度可达 7200 次/h,可显著减少试验所需的时间。

目前,国内外针对 MMLS3 的试验方法,对相关参数做了许多研究,并在此基础上使用 MMLS3 对水稳定性、高温稳定性等进行了试验。

Epps 等人在 Westrack 上用 MMLS3 进行了现场和室内的加速加载试验,试验结果表明室内的试验结果和现场测试结果具有较好的一致性,并给出了 MMLS3 试验参数的建议^[67]。Hugo 等对不同环境条件下(如干/湿、加热/常温)的沥青路面用 MMLS3 进行了现场加速加载测试,测试结果表明,在室内运用 MMLS3 进行相同路面材料的加速加载试验,车辙结果为现场测试结果的 50%~80%。Sugjoon Lee 等人用 MMLS3 对沥青混合料的疲劳寿命进行了模型和试验研究,表明采用合理的预估模型、MMLS3 室内试验结果和现场测试结果,可以准确地预估路面的服务寿命。Hugo 等用 MLS10 和 MMLS3 对同一段路进行了现场测试,测试结果表明,在荷载水平相近的情况下,考虑温度补偿作用,MMLS3 和 MLS10 的现场测试结果具有较好的相关性,相关系数为 0.9~1.3^[68]。Rossman 在莫桑比克做过测试,历经 100 万次加速加载作用,路面产生的最大车辙为 4mm,通过车辙增长趋势的对比,可区分沥青混合料的抗车辙性能。通过实际路面的测试和室内 MMLS3 试验结果的对比,认为 MMLS3 在试验室可以很好地模拟实际路面产生车辙的过程,车辙的发展趋势高度相同。得克萨斯州运输局和联邦交通部公路管理局在内华达州的西部环道用 MMLS3 做了对比性的试验,在 60℃时各加载 20 万次,结果证明 MMLS3 能够较好地地区分西部环道 4 个截面的车辙表现,大部分室内的 MMLS3 结果与现场试验结果有着较好的一致性。试验指出对于材料的车辙预估以及车辙的模拟,都可以用 MMLS3 和 MLS10 进行,但用 MMLS3 的室内试验结果来预测室外足尺试验尚需全面考虑交通条件和材料参数等。

国内由于 MMLS3 设备较少,有关 MMLS3 加速加载的研究刚刚起步。交通运输部公路科学研究院孟书涛等对不同温度下的沥青混合料进行了 MMLS3 的试验研究^[69]。结果表明 MMLS3 加速加载试验仪可以有效地评价沥青混合料的抗变形能力,通过测定沥青混合料在重复荷载作用下的总变形,能够更准确地评价沥青混合料抗变形能力。赵倩倩等对 MMLS3 的试验参数进行了详细的分析,经过不同混合料的对比,推荐了适用于国内的 MMLS3 试验参数^[70]。张宏超等将 MMLS3 试验应用于实际路面,对比了实际路面和室内试验结果^[71]。申爱琴等利用 MMLS3 分别对吉珲高速沥青路面上面层(SMA-16)和中面层(AC-20)进行加速加载试验研究,研究了不同施工空隙率离析及不同重复荷载作用次数对中、上面层长期高温车辙的影响规律^[72]。刘刚等以 MMLS3 为基础试验平台,通过室内加速加载试验研