



水泥稳定碎石基层 沥青路面开裂机理研究

王 艳 ◎ 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

本专著获江苏省交通科学研究计划项目“水泥稳定碎石基层合理强度指标及反射裂缝防治技术深化研究”(05Y09)资助。

水泥稳定碎石基层沥青路面开裂机理研究

王 艳 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书将试验和理论相结合,深入分析水泥稳定碎石基层沥青路面在温度荷载和车辆荷载作用下的开裂机理。全书共分为8章:第1章介绍了研究目的、研究意义及研究现状;第2章通过试验对水泥稳定碎石混合物和沥青混合物进行了参数测定;第3章至第5章分别进行了温度场分析、温度荷载及车辆荷载作用分析、裂缝扩展分析;第6章为实际工程的裂缝调查与评价;第7章至第8章在前面章节的研究基础上,提出了水泥稳定碎石基层沥青路面抗裂设计方法。本书所有内容的研究工作曾得到江苏省交通科学研究计划项目“水泥稳定碎石基层合理强度指标及反射裂缝防治技术深化研究”资助。

本书可供从事道路工程材料性能研究、道路结构设计理论与设计方法研究的工程师参考,也可作为这一领域博士、硕士学位研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水泥稳定碎石基层沥青路面开裂机理研究/王艳
著. —南京:河海大学出版社,2012.11
ISBN 978-7-5630-3258-7

I. ①水… II. ①王… III. ①碎石—水泥混凝土路面—沥青路面—路面开裂—研究 IV. ①U416.214

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第302450号

书 名	水泥稳定碎石基层沥青路面开裂机理研究
书 号	ISBN 978-7-5630-3258-7/U·6
责任编辑	毛积孝
责任校对	李元松
装帧设计	黄 煜
出版发行	河海大学出版社
地 址	南京市西康路1号(邮编:210098)
电 话	(025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)
排 版	南京理工大学资产经营有限公司
印 刷	南京玉河印刷厂
开 本	787毫米×960毫米 1/16
印 张	13
字 数	247千字
版 次	2012年11月第1版
印 次	2012年11月第1次印刷
定 价	28.00元

前 言

我国高速公路事业发展迅速,截至 2011 年底,全国高速公路通车里程已达 8.5 万 km,其中 90% 以上采用半刚性基层沥青路面,水泥稳定碎石基层则是半刚性基层结构的主要类型之一。半刚性基层在温度和湿度变化下容易产生收缩开裂,车辆荷载和温度、湿度条件循环作用会使基层裂缝向上反射到沥青面层,产生反射裂缝,同时,沥青面层在温度和行车荷载综合作用下也会产生表面裂缝,并随着使用时间的增加逐渐往下层结构中发展。工程实践表明,水泥稳定碎石基层沥青路面结构的裂缝病害已成为该种路面结构的主要缺陷,所以有必要对基层收缩裂缝、反射裂缝和表面裂缝进行深入研究,掌握其形成和扩展机理,并在此基础上提出相应的路面结构抗裂设计方法。

本书在江苏省交通科学研究计划项目“水泥稳定碎石基层合理强度指标及反射裂缝防治技术深化研究”(05Y09)基础上,综合了课题组的部分研究成果——“半刚性基层沥青路面反射裂缝控制指标研究”、“水泥稳定碎石混合料路用性能及指标相关性研究”,并通过查阅大量国内外相关文献,结合大量试验和理论计算,对水泥稳定碎石基层内、沥青面层内不同形式裂缝的产生及扩展机理进行了系统深入的分析,并提出了抗裂设计指标与方法,为完善水泥稳定碎石基层沥青路面设计方法提供了指导。

首先,笔者通过沥青混合料蠕变试验和数学方法确定了多种沥青混合料的粘弹性参数,为进行粘弹性有限元分析提供了准确的输入参数,从而可以较好地模拟沥青混合料的粘弹性特性;通过水泥稳定碎石混合料无侧限抗压强度、劈裂强度、干缩和温缩等性能试验对比了不同水泥稳定碎石材料的抗裂性能,基于试验结果建立了相应的收缩性能预估方程,同时得到了基层材料的有限元输入参数;根据试验得到的沥青面层和水泥稳定碎石基层参数,结合单元类型、边界条件、网格密度等因素对不同的有限元模型做了比选,确定了相应的车辆荷载和温度荷载分析模型;根据水泥稳定碎石基层沥青路面结构的热工参数,对无裂缝、含基层和表面裂缝结构的温度场进行了数值模拟,根据计算结果建立了路表温度和路表平均温差的预估模型,并对含裂缝道路结构的温度场进行了修正。

其次,采用弹性断裂力学方法,建立了不含裂缝、含基层裂缝及含表面裂缝的水泥稳定碎石基层沥青路面结构有限元计算模型,运用静力学分析方法,分别计算不同含裂缝结构在车辆和温度荷载作用下的应力/应变响应,以及裂缝尖端的断裂

参数变化规律。一方面,通过对各结构层选取不同的应力和断裂参数进行分析,揭示水泥稳定碎石基层沥青路面结构的开裂和扩展机理,并根据计算结果建立了不同结构的温度应力、荷载应力、裂缝扩展寿命预估模型;另一方面,采用粘弹性动力有限元方法,对不同面层材料的影响做了分析。在对水泥稳定碎石基层沥青路面进行裂缝现场调查的基础上,分析不同结构的裂缝发展情况,并探求现场实际开裂状态与结构应力间的关系,为抗裂设计指标的选择提供参考。

最后,分析水泥稳定碎石基层沥青路面结构在温度和车辆荷载作用下的应力特征,指出了现行沥青路面设计指标的不足之处,提出了以水泥稳定碎石基层沥青路面力学特性为依据、以裂缝病害的控制为目标、可以减少和延缓基层和面层裂缝病害的水泥稳定碎石基层沥青路面结构抗裂设计方法。

本书分为8章:第1章介绍了研究的目的、意义及研究现状;第2章通过试验对水泥稳定碎石混合料和沥青混合料进行了参数测定;第3章至第5章分别进行了温度场分析、温度荷载及车辆荷载作用分析、裂缝扩展分析;第6章为实际工程的裂缝调查与评价;第7章至第8章在前面章节的研究基础上,对现有规范所采用的沥青路面设计指标与方法进行了分析与评价,进而提出了考虑裂缝产生与扩展的水泥稳定碎石基层沥青路面抗裂设计方法。

相较于以往的研究成果,本书的理论分析参数来自于试验结果而不是经验或理论值,其理论分析结论经由实际工程的检验和修正,所提出的水泥稳定碎石基层沥青路面抗裂设计方法有一定的独创性。希望这些成果能为道路工程领域科技工作者提供一些参考,共同推动道路工程学科的发展,同时为道路结构设计、建造提供新的理论基础,使水泥稳定碎石基层沥青路面这种道路结构形式能充分发挥其优点,提高抗裂性能,更好地服务于现代化交通运输。

在研究工作和本书撰写过程中,得到了东南大学陈荣生教授、倪富健教授及多位老师的悉心指导,同时得到了东南大学马翔高工、厦门市公路桥隧维护中心李再新高工、南京林业大学李强讲师等多位同门的大力帮助,在此一并表示感谢。

著 者

2012年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 反射裂缝	2
1.2.2 表面裂缝	5
1.3 研究的目的与意义	7
1.4 研究的内容与技术路线	8
第 2 章 参数测定及选择	10
2.1 面层材料的模型选择及有限元参数转化	10
2.1.1 面层材料本构模型选择	10
2.1.2 Prony 级数转化方法	14
2.1.3 原材料性能及级配选择	16
2.1.4 蠕变试验及参数获取	22
2.1.5 其他面层材料参数	27
2.2 基层材料参数测定	27
2.2.1 原材料性质与级配设计	27
2.2.2 强度试验	28
2.2.3 收缩性能试验	31
2.2.4 疲劳性能试验	35
2.2.5 基层材料参数选择	38
2.3 有限元模型的参数选择与验证	38
2.3.1 荷载场的确定	38
2.3.2 有限元模型的建立和验证	42
2.4 本章小结	48
第 3 章 水泥稳定碎石基层沥青路面温度场分析	49
3.1 温度场数值模拟	49

3.1.1	路面材料的热特性参数	49
3.1.2	太阳辐射及地面有效辐射	50
3.1.3	对流换热	51
3.1.4	底部边界条件	53
3.2	无裂缝结构	53
3.2.1	不同面层厚度	55
3.2.2	不同基层厚度	55
3.2.3	不同基层材料	56
3.3	含基层裂缝的结构	59
3.4	含表面裂缝结构	61
3.5	水泥稳定碎石基层沥青路面温度场预估	64
3.6	本章小结	65
第4章	水泥稳定碎石基层沥青路面受力分析	66
4.1	基本假定	66
4.2	正交试验设计	67
4.3	无裂缝结构受力分析	70
4.3.1	湿度、温度变化	70
4.3.2	车辆荷载作用	79
4.4	含基层裂缝结构受力分析	87
4.4.1	温度荷载作用	87
4.4.2	车辆荷载作用	92
4.5	含表面裂缝结构的受力分析	102
4.5.1	温度荷载作用	102
4.5.2	车辆荷载作用	109
4.6	不同开裂结构的应力对比分析	116
4.6.1	温度应力	116
4.6.2	荷载应力	117
4.7	本章小结	119
第5章	水泥稳定碎石基层沥青路面裂缝扩展分析	120
5.1	裂缝扩展机理	120
5.1.1	基层裂缝向上扩展	120
5.1.2	表面裂缝向下扩展	122
5.2	动力粘弹性有限元法	123

5.2.1 阻尼的定义	124
5.2.2 面层材料参数	126
5.2.3 结构频率提取	127
5.3 疲劳寿命分析	129
5.3.1 疲劳寿命计算方法	129
5.4 基层裂缝扩展分析	133
5.4.1 温度作用	134
5.4.2 荷载作用	135
5.4.3 粘弹性分析	139
5.5 表面裂缝扩展分析	143
5.5.1 温度作用	144
5.5.2 荷载作用	145
5.5.3 粘弹性分析	147
5.6 疲劳寿命预估	151
5.6.1 自下而上的裂缝	151
5.6.2 自上而下的裂缝	152
5.7 本章小结	153
第 6 章 路面裂缝状态调查和评价	155
6.1 综合裂缝状态调查	155
6.2 芜宣路调查	156
6.2.1 概况	156
6.2.2 第一次裂缝调查	157
6.2.3 第二次裂缝调查	160
6.3 沥青路面裂缝评价	163
6.4 本章小结	167
第 7 章 沥青路面抗裂设计指标与方法	168
7.1 水泥稳定碎石基层沥青路面结构的应力特征	168
7.1.1 温度荷载作用	168
7.1.2 行车荷载作用	169
7.2 现行沥青路面设计指标	171
7.2.1 沥青路面结构总厚度设计指标	171
7.2.2 沥青面层的设计指标	173
7.2.3 基层设计指标	174

7.3 沥青路面结构的开裂及疲劳验算	175
7.3.1 开裂验算	175
7.3.2 温度疲劳验算	176
7.3.3 荷载疲劳验算	180
7.4 水泥稳定碎石基层沥青路面抗裂设计方法	180
7.4.1 抗裂设计指标及流程	181
7.4.2 设计实例	183
7.5 本章小结	187
第8章 结论与展望	188
8.1 主要结论	188
8.2 创新点	190
8.3 展望	191
附录1 温度分布函数子程序	192
附录2 回归分析程序	193
参考文献	194

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景

水泥稳定碎石材料作为一种半刚性基层混合料已被广泛地应用于我国高等级公路基层建设中,它具有强度高、稳定性好、抗冲刷能力强以及工程造价低等优点。这种材料的缺点在于抗变形能力低、脆性大,在湿度或温度变化时易产生开裂,如果在施工期间失水过多或者温度过低,基层内会产生微裂纹或宏观裂缝,铺筑完面层后,在温度和车辆荷载的反复作用下,基层中的裂缝就会向上发展形成反射裂缝。随着车辆荷载作用、路表雨水渗入、环境温度交替变化等因素联合作用下,裂缝进一步扩大,逐渐发展成横向裂缝、纵向裂缝乃至局部的网裂,并最终产生结构性破坏。

沥青混合料的各项性能受温度影响显著,即使基层不开裂,在急剧降温的情况下,沥青面层也会开裂;同时,在车辆荷载的反复作用下,沥青面层会产生疲劳裂缝。通常将引起路面开裂的主要原因归纳为两大因素:气候因素与荷载因素。所谓气候因素主要指温度、湿度的影响。路面结构是一种建筑在野外的结构物,不可避免地受到环境温度、湿度变化的直接作用,而气候变化既具有年周期性变化的特点,又呈现出日周期性变化的规律,在温度下降的过程中,由于热胀冷缩的原因,沥青路面材料不可避免地产生温度收缩。由于路面在其纵向可认为是连续的无限长结构,纵向的温度收缩因受到约束而无法实现,从而导致了路面结构中温度收缩应力的产生,使得路面横断面受到沿纵向的拉应力作用。当温度较高、降温速度较慢时,由于沥青混合料的热粘弹性特征,温度收缩应力会因应力松弛而部分卸载,不会对路面造成严重的损伤;然而,当温度较低、降温速度较快时,沥青混合料的粘弹性特征减弱,弹性特征增强,路面中的温度收缩应力会因来不及松弛而累积,并将结构在薄弱部位拉裂,进而使得积蓄的能量得到释放。所谓荷载因素是指道路营运期间,交通车辆的载重对路面结构的破坏作用。在交通荷载的反复作用下,路面结构内将产生随机的、呈不规则周期变化的应力-应变响应,从而使得路面材料受到疲劳损伤作用,当疲劳损伤的累积达到材料的极限承受能力时,路面结构内部便

会产生细观裂纹,随着交通荷载作用次数的增加,裂纹将不断扩展,最终在路表形成可见的疲劳裂缝。

裂缝是水泥稳定碎石基层沥青路面的主要破坏形式之一,它破坏了路面结构整体性和连续性,并在一定程度上导致结构强度的削弱(如裂缝处弯沉增大、回弹模量降低等)。因此,结合力学分析,掌握基层和面层裂缝形成和扩展的机理,继而从材料和结构角度提出开裂控制指标,完善沥青路面结构设计方法十分必要。

1.2 国内外研究现状

国外早在 1932 年就开始了针对反射裂缝的研究,包括现场试验、室内试验和理论研究,并取得了一定成果^[1]。但是,直到 20 世纪 60 年代,在减少沥青路面开裂方面的研究才开始有较大的进展,此时对路面裂缝的研究主要针对反射裂缝,认为即使表面存在裂缝也是反射裂缝促成的。随着设计理论、结构形式以及计算机技术的不断进步,人们对裂缝的研究也更为细化和深入,分别探究不同形式裂缝的成因、发展,并将室内计算机模拟与实际路面的观测性能很好地结合起来^[2~3]。

针对沥青路面裂缝研究,我国也开展了大量的工作。仅在八五交通部重点科研项目—半刚性沥青路面的研究中,所涉及的内容就包括几个方面^[4]:(1)半刚性基层材料开裂机理、温缩、干缩规律;抗裂性能的评价方法;材料的最佳组成设计和改善措施;(2)沥青面层低温缩裂机理,开裂温度的预估方法,沥青材料抗裂性能的评价方法和集料的合理组成;(3)反射裂缝产生条件与三维光弹模型试验,防裂措施的途径等。在大量的实践基础上,沙庆林院士提出把半刚性路面中的裂缝区分为表面裂缝和反射裂缝^[5],并给出了不同影响因素所占比例的定性说明,深化了对道路中裂缝产生因素的认识,同时指出,路面裂缝主要是温度型裂缝。国内目前的研究大都侧重分析某一种形式裂缝的开裂机理、抗裂方法等,其中以反射裂缝的研究居多。

1.2.1 反射裂缝

对反射裂缝的产生及其扩展机理的认识直接关系到反射裂缝的防治及路面结构的设计,进而直接影响到整个道路的投资。虽然各国研究人员对反射裂缝的产生机理进行了多方面的研究,但至今“我们仍需进一步研究反射裂缝的产生机理和实用的防治方法”(Brown,1997)。

Ang 等(1963)采用傅立叶级数给出了含有半无限裂纹的路面在荷载作用下应力强度因子的理论解。Folias(1970)推得了含有半无限裂纹体的路面在恒定弯矩作用下的应力强度因子解析解。Ramsamooj 等(1998)采用加权函数法获得了

含裂缝高速公路和机场路面在静荷载作用下的应力强度因子,并将加权法得到的解分别与 Westgard 解、现场实测结果进行了对比,通过与现场实测结果的比较发现板中的弯曲变形与弯沉符合得较好。

反射裂缝广泛存在于半刚性基层沥青路面结构及旧水泥混凝土路面的罩面中,由于半刚性基层沥青混凝土路面材料的干缩和温缩特性,使得路面结构往往在建设初期就产生了温缩裂缝和干缩裂缝。面层铺设完成以后,在温度和行车荷载的作用下,半刚性基层中的裂缝就有可能向上反射形成反射裂缝。对于旧水泥混凝土路面,由于自身存在接缝,若不加以适当处置,在其上铺设沥青罩面时,接缝也会很快反射到路表。

Rigo 等(1993)应用 SAPL15 程序模拟温度应力作用下反射裂缝的扩展路径,发现裂缝几乎是垂直向上扩展的。Button 等人(1987)的“罩面试验”结果表明,当气温非常低时,裂缝将在罩面的顶面和底面产生,而后向罩面层中间扩展。Brown (1985)和 Caltabiano(1991)等人通过室内试验证实:在对称荷载作用下裂缝垂直向上扩展。Ramsamooj 等(2001)研究了机场混凝土路面加铺罩面层,为了消除反射裂缝而在罩面层与接缝混凝土直接加铺玻璃纤维复合材料,根据裂缝处及连接处应力强度因子与弯沉间的关系推得裂缝处罩面层内的应力及弯沉,该设计方案通过对温度、弯曲、剪应力以及疲劳周次参数的计算说明了在罩面层与旧水泥混凝土板间增铺玻璃纤维层优于单纯增铺沥青混凝土罩面层。

Ahmed Abdelazim Eltahan(1996)采用断裂力学方法,提出了基于力学-经验法的反射裂缝预估随机模型。2000 年, Fedde Tolman 等人对中心含有裂缝的沥青混合料试件进行了拉伸试验和四点弯曲断裂试验,研究了试件在不同断裂破坏方式下裂缝尖端的应力强度因子。

在第二届反射裂缝国际会议上关于反射裂缝产生和发展的机理达成如下共识(J. M. Rigo, 1993):

- (1) 温度应力引起反射裂缝的产生,并“参与”了其最初的扩展;
- (2) 荷载应力加速了裂缝的进一步扩展。

Eltahan, Ahmed Abdelazim^[6]采用断裂力学和经验方法分析反射裂缝,认为沥青面层性能的耐久性研究不能独立于下部结构完成,研究结果表明,随着土基模量的增加,罩面耐久性增加;罩面厚度增加,施工变异性减小,并且建立了具有足够的精度的模型用以预测裂缝第一次产生的时间及可见裂缝的数量。

对于反射裂缝的防治, Scullion, Tom^[7]提出预开裂(微裂纹)技术来减少水泥稳定土基层的收缩量,从而减少反射裂缝,并在多条试验路上进行验证,现已形成规范草稿。Kim, Jiwon 等^[8]采用三维粘弹性方法,考虑层间加入及未加格栅的结构,评价不同结构路面的抗反射裂缝能力,结论指出,加入高强、高弹的层间材料可

提高路面抗反射裂缝寿命。Kim, Kwang W. 等^[9]采用多种聚合物改性沥青混凝土制作试件,其下采用水泥混凝土材料作为基层,中间预留缝,在层间添加聚丙烯膜和格栅材料,通过水压动力系统施加往复轴载,评价各种沥青混合料抵抗 I 型反射裂缝的能力,试验指出,某些改性和高强沥青混凝土可大大延缓反射裂缝的发展。

国内很多学者针对我国半刚性基层沥青路面及旧水泥混凝土加铺沥青面层的结构形式,也进行了大量反射裂缝形成和扩展机理方面的研究。

西南交通大学毛成、邱延峻等^[10](2004)编写了能同时处理四边形 8 结点等参单元和三角形 6 结点奇异等参单元的二维沥青路面裂纹扩展路径模拟程序——APCPPS。程序能同时考虑交通荷载和温度荷载的单独或共同作用,能同时模拟结构中多条裂纹的扩展行为,能够较好地模拟 I 型、II 型和 I-II 复合型裂纹的扩展行为。通过对沥青路面裂纹扩展行为的分析表明,裂纹扩展的主要是受拉应力作用,无论荷载的位置如何,剪应力对控制裂纹的发展并不重要。即使裂纹尖端处于 I-II 复合型应力状态下,拉应力仍然是裂纹扩展的主要驱动力。

浙江大学王金昌^[11]通过引入弹性损伤理论,分析了软土地基上含反射裂缝半刚性基层路面结构体的工作性状,模拟了半刚性路面反射裂缝在变温作用下的扩展过程,并预测了面层的疲劳寿命。

中南大学张起森^[12、13]课题组针对反射裂缝所做的研究主要包括:(1)应用线弹性以及界面断裂力学和平面有限元模型研究了沥青罩面层内的应力强度因子,并据此讨论了夹层类措施的防反射裂缝的效果;(2)通过带裂缝梁的纯弯曲试验,研究了沥青混合料的热粘弹性断裂参数;(3)通过三维光弹试验研究了带裂缝的半刚性基层沥青面层内的应力场分布情况及裂缝尖端的应力强度因子;(4)对旧水泥混凝土路面沥青混凝土加铺层疲劳开裂寿命及其影响因素进行了系统研究。

长安大学王秉纲等^[14](2006)分析了不同结构组合形式对含反射裂缝的刚性基层沥青路面受力状态的影响,利用三维有限元模型,分析了沥青面层厚度、基层厚度、基层模量和地基模量等参数对刚性基层的荷载应力、温度应力及两者之间耦合应力的影响规律及其显著性,得出了标准轴载作用下基层应力以及不同轴轮型荷载作用下混凝土基层底面的荷载应力、温度应力及耦合应力的实用计算公式。

武汉理工大学廖卫东^[15](2003)比较了不同应力吸收层材料对防治反射裂缝的效果,并研发了 SamPave 应力吸收层新材料,在试验路跟踪观测的基础上,提出了基于应力吸收层的沥青加铺结构弯沉-交通量设计方法,以及设计双控指标和满足设计年限内交通量要求的加铺层最小厚度。

东南大学倪富健课题组在半刚性基层沥青路面抗反射裂缝方面做了大量的理论研究和室内外试验^[16]。其研究包括:采用室内试验方法模拟和观测层间加设聚

酯玻纤布材料的沥青混凝土试件抵抗反射裂缝的能力,对对称荷载和非对称荷载分别进行比较^[17],结果表明,设计的室内模型能较好地模拟荷载型反射裂缝和评价不同混合料的抗反射裂缝能力,而聚酯玻纤布夹层材料能有效地延缓反射裂缝的出现,从而延长沥青加铺层的使用寿命;分析材料的组成结构类型、集料级配以及沥青、矿粉、纤维和橡胶粉对混合料抗反射裂缝能力的影响^[18],试验结果表明,矿料 4.75 mm 筛孔的通过率与混合料的疲劳寿命有良好的相关性。通过将室内外试验和有限元方法相结合,对不同水泥剂量的水泥稳定碎石基层结构内因失水或降温引起的收缩应力与材料强度进行比较^[19],提出在满足强度的基础上降低水泥剂量以减少水泥稳定碎石基层的横向裂缝量。

1.2.2 表面裂缝

沥青混凝土路面的表面裂缝主要是温度型裂缝,由于道路结构横向尺寸远小于纵向尺寸,其纵向温度应力较大,由此产生横向分布的表面裂缝。荷载反复作用下导致轮迹带附近产生纵向表面裂缝,路幅较宽的路面在温度作用下也会产生纵向分布的温度型表面裂缝。表面裂缝的存在会导致三个方面的问题:(1)直接影响到路面的平整度;(2)会使裂缝边缘处折断和路面网裂不断发展;(3)随着裂缝深度的增加,深度足够时,雨水会沿裂缝渗入土基,使其承载力降低,从而加速路面的破坏。温度型裂缝的研究日益受到道路工程研究者的关注。Hass 等(1987)描述了温度型表面裂缝形成的力学机理。很多研究者(Fromm 等,1972; Chang 等,1976;Hass 等,1987)基于现场和试验室提出经验模型用于预估裂缝间距。许多学者基于断裂力学,提出了分析模型,借以研究温度型表面裂缝(Carpenter 等,1975; Lytton 等,1983; Hiltunen 等,1994)。Roque 等(1990)通过试验研究了面层材料、层间结合状况及变温速率对含表面裂缝道路结构体的影响。Weixin Shen (1999)将沥青混凝土面层简化为一维问题,将基层对面层的作用通过摩擦约束来表征,认为一维沥青混凝土面层的材料参数、强度和初始损伤服从随机分布,预测了沥青混凝土面层的开裂并预估了相邻横向裂缝的间距,与实际检测结果符合较好。

Timm, David Harold^[20]采用力学方法预估沥青路面温度型裂缝开裂间距,并对明尼苏达州的试验路进行现场跟踪观测,从而修正其理论模型,得到基于路面性能规范的温度裂缝间距模型。Tjan, Aloysius^[21]通过在假定材料是完全弹性的基础上建立三维模型,分析沥青路面裂缝的扩展,模型建立时考虑了面层-基层间及裂缝两个面上的摩擦接触情况,分析表明,车辆驶近和驶离裂缝的过程中,Ⅰ型应力强度因子先增加后减小至零,Ⅱ型应力强度因子的变化规律与Ⅰ型类似,但是不会减小至零。Shin, Hee Cheol^[22]通过对 AASHTO 试验路的跟踪观测数据建立模型,分析沥青路面裂缝的起裂和扩展情况,起裂寿命的预估模型比 AASHTO 方

法中已有的模型要准确,建立了一系列非线性模型分析沥青面层中的裂缝扩展,扩展分析中考虑了具有不同起裂寿命的裂缝。

基于佛罗里达州交通部的项目,Mei, Xiaoyu 等^[23]采用高精度激光位移传感器对 95 个路段的表面裂缝进行了检测,并采用神经网络方法对裂缝深度进行预测。Jitprasithsiri, Siriphan^[24]建议采用新的量化指标评价面层裂缝,通过图像处理方法,将裂缝量与表面积比值作为统一的裂缝指标。Kohler, Erwin Rafael^[25]对连续配筋混凝土路面表面横向向裂缝处的传荷能力进行了研究,结论指出,裂缝宽度小于 0.15 mm 时,无论荷载形式与温度荷载如何周期变化,其传荷能力均不受影响。

Nishizawa, Tatsuo 等^[26]采用有限元方法分析沥青路面在高温条件、荷载作用下轮胎边缘处的应力响应情况,以分析表面纵缝的形成。Tao Xie^[27]采用 CT 成像技术,观测在轴压荷载作用下沥青混合料内部裂缝的发展,研究结论指出,裂缝开始于局部密度的改变,应力及密度曲线的拐点就是裂缝失稳破坏开始的位置。

由于加铺沥青面层后的结构,其基层内温度场分布能得到较大的改善,因此,对于结构形式较好的沥青路面,温度型表面裂缝甚至比反射裂缝更易产生,对结构产生的破坏也更为严重。

Chiasson, A. D.^[28]采用瞬态、二维有限元方法对沥青路面的温度场分布做了分析,有限元模型采用刚度指数来表征沥青混合料的流变性能,分析结果表明,面层材料自身的温度属性是造成较大温度应力的最主要原因。Timm, D. H.^[29]建立了一维温度裂缝间距预估模型,分析时将基层设置为弹塑性材料,面层为弹性材料,面层-基层间设置粘结摩擦单元,并与二维模型计算结果、现场观测值进行比较,对模型的有效性进行了验证,试验路现场观测的裂缝间距均值约为 340 m,模型对间距的预估比实际小约 60 m。

近年来,国内的研究人员也逐渐开始重视对面层表面裂缝的研究。周志刚^[30](1992)考虑了界面结合状况对表面裂缝尖端应力场特征方程的影响。由于环境与施工因素的影响,路面结构中含有不同的裂缝形式,彭达仁^[31]等(1998)就路面结构层在对称荷载作用下,裂缝出现在结构层内、扩展到界面、穿越界面三种情况,对裂缝尖端的应力强度因子进行了解析分析。曾梦澜、马正军^[32](2005)采用有限元方法,分析比较沥青路面自上而下裂缝的扩展情况,并从断裂力学角度进行含表面裂缝的沥青路面疲劳分析。

对温度型裂缝分析关键在于确定路面结构的温度场。吴赣昌^[33](1995)对半刚性基层沥青路面温度场和温度应力的确定进行了详细的研究,计算了有效辐射对温度场的影响。吴赣昌^[34](1997)运用积分变换和广义解析函数的边值理论,确定了路面体内随路面温度变化的温度场,再根据弹性力学理论确定了温度应力。

他在分析的过程中考虑了线膨胀系数沿深度方向的变化,探讨了不同的面层厚度、结构层线膨胀系数的变化对路面体内部温度应力的影响,从而为路面结构层的调整和材料的选择,即路面的优化设计提供了依据。当路表发生变温时,路表温度变化量最大,可能形成表面裂缝并向下扩展。基于此,郑健龙等^[35]根据线弹性断裂力学的理论和平面有限元法,探讨了不同的温差、不同裂缝深度以及材料参数的变化对应力强度因子的影响,并得出为减少温度型裂缝,面层的粒料直径不应超过2 cm的结论。吴赣昌^[36](1993)等根据同样的模型进一步分析了路面温度场和材料参数对应力强度因子的影响,分析中考虑了基层中反射裂缝对沥青路面的影响。

沥青路面结构建成未通车以前,只考虑温度裂缝是可行的。公路交付使用之后,路面体就经受温度和荷载的共同作用。有些研究者考虑了二者对路面体的耦合作用。浙江大学王金昌对温度和行车荷载下含表面裂缝的路面体与软土地基的相互作用进行研究,并对表面裂缝的扩展过程进行数值模拟,得出变温次数与表面裂缝扩展长度的关系式。

由于裂缝尖端的奇异性,已有的理论研究以有限元方法为代表的数值模拟为主,就不同的外界因素、不同结构组合、不同的材料参数对应力强度因子的影响进行分析,并得出相应的结论。

根据理论分析,一些预防裂缝的方法已经在工程实际中得到应用,如在路面体中加入纤维材料或土工织物,抗裂集料级配设计、混合料配合比设计与施工等方面,其中比较有代表性的是近年来对基层施工工艺的研究。陈敏等^[37]采用振动成型法铺筑试验路,通过检测,7天无侧限抗压强度从4.18 MPa提高到7.90 MPa,经过一个寒冬后进行裂缝调查,发现比传统施工段的裂缝量减小了近一半,即平均裂缝间距从15 m增加至30 m左右。对于半刚性基层的振动成型方法,东南大学倪富健教授课题组也做了一定的尝试,在盐淮高速上铺筑了试验路,检测表明混合料强度有一定提高,铺筑面层后,后期检测并没有发现反射裂缝,但其更长期的效果有待进一步跟踪观测。从施工角度上看,这种施工方法对施工机械损伤较大,养护时间越长,施工越困难,对机械损伤也越大。因此,该技术的应用有待进一步研究改进,特别是施工机械的改进。但无论是理论分析还是路用性能研究,仍未能很有效地解决半刚性基层沥青路面的裂缝病害,如何准确预估和控制半刚性基层沥青路面中的各类型裂缝,仍然是需要深入研究的问题。

1.3 研究的目的是与意义

本书在对国内外大量研究成果和参考文献进行查阅的基础上,从弹性、粘弹性角度,采用静、动力学方法对含不同裂缝形式的水泥稳定碎石基层沥青路面受力机

理进行了系统的研究,研究目的包括:

(1) 进行冬季低温条件下不同结构的温度场分析,并建立相应的路表温度场预估模型,为后面的温度应力分析做准备;

(2) 分析含裂缝结构在温度和车辆荷载作用下的应力-应变响应情况,确定基于抗裂性能的合理结构形式;

(3) 建立不同工况下温度应力和荷载应力的预估模型;

(4) 分析基层裂缝和表面裂缝的扩展规律,建立裂缝扩展寿命预估模型;

(5) 考虑面层材料的粘弹性属性,分析含裂缝结构在动载作用下其裂尖断裂参数的变化规律,选择合适的沥青面层混合料;

(6) 结合水泥稳定碎石基层沥青路面结构在温度和荷载作用下的应力特征,力学分析和现场调查结果,提出开裂控制指标,并形成抗裂设计方法,从而完善现有的沥青路面结构设计方法。

裂缝是水泥稳定碎石基层沥青路面的最主要破坏形式之一,并会由此引发其他类型病害,直接影响路面的使用寿命。因此,深入研究水泥稳定碎石基层沥青路面的开裂机理,分析具有不同形式裂缝结构的受力情况,确定结构和材料的开裂控制指标,优化路面结构设计方法,从而有效地减少路面开裂率,对于延长道路使用寿命及改善其使用性能具有十分重要的实际意义。

1.4 研究的内容与技术路线

本书在室内试验和现场调查的基础上,研究水泥稳定碎石沥青路面结构在温度和荷载作用下的工作性状。主要研究内容及技术路线如下:

(1) 国内外相关研究状况的调研

查阅国内外沥青路面结构设计的文献资料和相关技术规范,调查半刚性基层沥青路面实际路用状况,针对现行控制指标和设计方法的不足寻求解决方案;同时,查阅各种理论分析方法以及有限元方法在路面工程中的应用情况,建立有效的分析模型。

(2) 室内试验

采用不同面层混合料进行蠕变试验,不同水泥剂量、配合比的水泥稳定碎石材料进行室内强度、收缩性能等试验,结合试验路检测结果确定有限元模型的输入参数,并对计算结果的合理性进行验证。

(3) 无裂缝及含裂缝路面结构的有限元分析

分别采用弹性、粘弹性有限元方法,对无裂缝、含基层和面层裂缝的不同路面结构组合进行静、动载响应和温度场分析,比较各种结构内部的受力及裂缝扩展情