

李清富 张 鹏 刘晨辉 著

聚丙烯纤维半刚性基层 抗裂性能研究

J UBINGXI XIANWEI BANGANGXING JICENG
K ANGLIEXINGNENG YANJIU

11416.217



黄河水利出版社

聚丙烯纤维半刚性基层 抗裂性能研究

李清富 张 鹏 刘晨辉 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书对半刚性基层沥青路面裂缝的形成机理及防治措施进行了详细的阐述,系统地研究了聚丙烯纤维水泥稳定碎石半刚性基层材料的基本力学性能、干燥收缩性能、温度收缩性能及断裂性能,详细分析了聚丙烯纤维对水泥稳定碎石半刚性基层的抗裂机理及影响规律。

本书可供从事公路工程的研究人员及工程技术人员参考,也可作为有关专业研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

聚丙烯纤维半刚性基层抗裂性能研究/李清富,
张鹏,刘晨辉著. —郑州:黄河水利出版社, 2010.6
ISBN 978-7-80734-847-4

I.①聚… II.①李… ②张… ③刘… III.①半刚性
基层-沥青路面-抗裂性-研究 IV.①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 119939 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhslwlp@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:8.25

字数:200 千字

印数:1—1 150

版次:2010 年 6 月第 1 版

印次:2010 年 6 月第 1 次印刷

定价:26.00 元

前 言

由于半刚性基层材料具有强度高、水稳性和冰冻稳定性好、刚性较大等优点，因而在我国高等级公路中越来越多地采用了半刚性材料基层和底基层。然而，随着半刚性基层沥青路面的大量应用，在实际使用过程中出现了不少问题，尤其是裂缝问题日益突出，并成为该结构的主要缺陷。这些裂缝主要是由半刚性基层干燥收缩(简称干缩)和温度收缩(简称温缩)开裂而引起的反射裂缝和对应裂缝。半刚性基层材料在外界温度、湿度变化下产生干缩、温缩裂缝，这种具有裂缝的基层在干缩、温缩应力进一步作用下，裂缝顶端产生较大拉应力集中，这是造成基层裂缝沿面层底部向上反射直至贯通的主要原因。路面裂缝的产生不仅影响了路面的美观，而且严重影响了道路的使用性能。因此，为了延长高等级公路沥青路面使用寿命，避免或减少半刚性基层的开裂，防止面层反射裂缝的产生，就必须采取措施限制半刚性基层的开裂。

从 20 世纪 60 年代开始，国外的一些研究者开始将聚丙烯纤维作为混凝土增强用纤维，并进行了大量的试验研究和应用。结果表明，聚丙烯纤维可以有效阻止水泥基体中原有微裂缝的扩展并延缓新裂缝的出现，可以提高水泥基体的变形能力，从而大大改善混凝土的冲击及弯曲韧性等。我国关于合成纤维混凝土的研究和应用起步较晚，20 世纪 90 年代中期随着美国几家纤维生产厂家相继来我国开拓市场，国内许多科研院所才开始对聚丙烯纤维在水泥基材料中的应用进行系统研究。从目前国内的研究成果来看，主要集中于对聚丙烯纤维混凝土的物理、力学性能的研究，而聚丙烯纤维能否增强或改善公路半刚性基层材料的力学性能和路用性能，特别是抗裂性能，关于这方面的研究资料国内外报道较少。为了弥补当前研究的不足，本书在大量试验成果基础上，较为深入地研究了聚丙烯纤维半刚性基层材料的各种力学性能、收缩性能及抗裂性能，以期为该新型基层材料在我国公路工程中的推广应用提供参考。

本书共分八章，主要内容包括：推导了半刚性基层收缩应力的计算公式，对影响最大收缩应力的各因素及半刚性基层收缩裂缝产生的规律进行了分析，提出了相应的裂缝防治措施；通过聚丙烯纤维水泥稳定碎石击实试验，确定了每组配合比试件的最大干密度和最佳含水量；对聚丙烯纤维水泥稳定碎石抗压强度、劈裂抗拉强度、抗压回弹模量、抗弯拉强度、抗弯拉弹性模量、平均干缩系数和平均温缩系数等力学性能及收缩性能指标进行了测试，得出了试验龄期、纤维掺量、水泥掺量对各种性能参数的影响规律；采用三点弯曲法对聚丙烯纤维水泥稳定碎石试件的断裂韧度、断裂能、裂缝嘴张开位移和裂缝尖端张开位移进行了测试，得出了试验龄期、纤维掺量、水泥掺量对各断裂参数以及聚丙烯纤维水泥稳定碎石失稳断裂前切口前缘应变场分布的影响规律；采用灰色关联分析法对几种常用的抗裂性评价指标体系

进行了对比分析,得出了干缩能抗裂系数和温缩能抗裂系数是评价半刚性基层抗裂性的最佳指标;运用纤维间距理论和乱向不连续纤维复合材料理论以及断裂力学的相关知识分析研究了聚丙烯纤维对水泥稳定碎石的增强抗裂机理等。

本书在编写过程中得到了河南省公路工程局集团有限公司、河南省交通科学技术研究院有限公司、河南省工程材料和水工结构重点实验室以及郑州西南绕城高速与机场高速互通立交项目经理部等单位的大力支持和帮助,许多同志参与了本书的试验工作。另外,本书编写过程中还引用了大量的文献资料。在此,谨向为本书的完成提供支持和帮助的单位、参考文献的原作者及所有试验人员表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中尚有不妥之处,敬请各界读者朋友批评指正。

作 者

2009 年 12 月于郑州

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究的目的与意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(4)
1.3 本书研究的主要内容	(10)
第 2 章 半刚性基层沥青路面裂缝形成机理及防治措施	(12)
2.1 引 言	(12)
2.2 半刚性基层沥青路面裂缝的主要类型	(12)
2.3 半刚性基层沥青路面裂缝形成机理	(13)
2.4 防治高等级公路半刚性基层路面裂缝的措施	(22)
2.5 结束语	(25)
第 3 章 试验方案、原材料及试件制备	(26)
3.1 试验研究方案	(26)
3.2 试验原材料	(27)
3.3 试件的制备	(32)
3.4 结束语	(39)
第 4 章 聚丙烯纤维水泥稳定碎石基本力学性能试验研究	(40)
4.1 引 言	(40)
4.2 基本力学性能试验方法	(41)
4.3 试验结果与分析	(47)
4.4 聚丙烯纤维水泥稳定碎石强度形成机理	(56)
4.5 结束语	(59)
第 5 章 聚丙烯纤维水泥稳定碎石收缩性能试验研究	(61)
5.1 引 言	(61)
5.2 收缩试验方法	(61)
5.3 试验结果与分析	(64)
5.4 结束语	(72)
第 6 章 聚丙烯纤维水泥稳定碎石断裂性能试验研究	(73)
6.1 引 言	(73)
6.2 聚丙烯纤维水泥稳定碎石断裂性能试验方法	(74)
6.3 断裂韧度试验结果与分析	(77)
6.4 断裂能试验结果与分析	(81)
6.5 聚丙烯纤维对裂缝嘴和裂缝尖端张开位移的影响	(86)

6.6	失稳断裂前切口前缘应变场分布	(90)
6.7	结束语	(92)
第 7 章	抗裂性评价的灰色关联分析及聚丙烯纤维抗裂机理	(94)
7.1	引 言	(94)
7.2	现有的抗裂性评价指标	(94)
7.3	灰色关联分析法	(97)
7.4	半刚性基层材料抗裂性评价指标的灰色关联分析	(98)
7.5	聚丙烯纤维水泥稳定碎石抗裂性分析	(100)
7.6	聚丙烯纤维水泥稳定碎石的抗裂机理分析	(104)
7.7	结束语	(106)
第 8 章	结 论	(108)
8.1	本书工作的总结	(108)
8.2	进一步研究的展望	(110)
参考文献		(112)

第1章 绪论

1.1 研究的目的是与意义

随着国民经济的迅猛发展,我国在近几十年开展了大规模的交通基础建设,给广大人民群众的生活和生产带来了极大的方便,产生了巨大的经济效益。1988年全国高速公路通车里程仅为147 km,截至2002年底,我国高速公路通车里程已达到2.52万 km,跃居世界第二位,2008年突破了6万 km(见图1.1)。从2005年起到2030年,国家将斥资两万亿元,新建5.1万 km高速公路,使我国高速公路里程达到8.5万 km。新中国成立以来,我国的公路建设经历了三个阶段,每个阶段无不是在公路里程增长、交通量和载重量日益增大的形势下对路面和基层提出了更高的要求。为适应交通快速发展的需要,路面结构也不断完善。在这三个阶段里,路面代表结构的发展经历了由适应轻交通的泥结碎石路面、级配砾石路面,到适应中型交通的渣油表面处治路面、沥青贯入路面、沥青碎石路面,直到目前适应重交通的半刚性基层沥青混凝土路面以及水泥混凝土路面等形式,基层的发展也经历了手摆片石基层、石灰土基层、级配碎石基层、水泥稳定砂砾基层、二灰碎石基层、水泥稳定碎石基层等形式^[1, 2]。

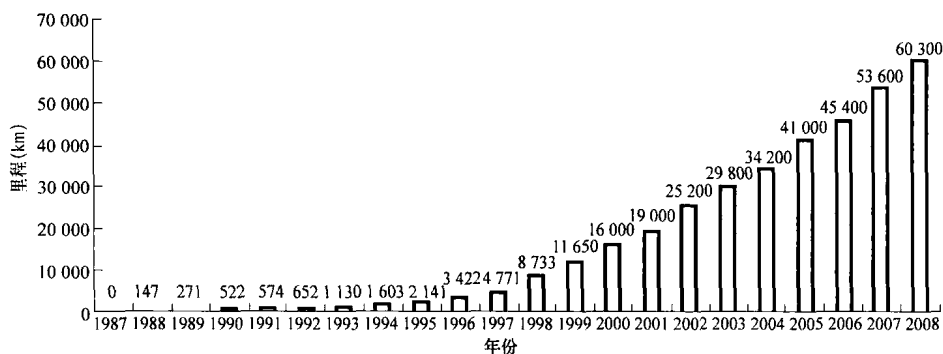


图 1.1 中国高速公路历年通车里程

20世纪80年代中期以来,由于交通量大增,以及轴载和重车比例增大,对路面的整体强度和平整度提出了更高的要求,相应地,对基层的要求也提高到了一个更高的水平。由于原有的级配碎石基层暴露出很大的弊端,即容易导致新建或改建的高等级公路沥青路面发生一些严重的早期损坏现象,于是普遍采用无机结合料稳定粒料(土)类基层,即在路面材料中掺入一定比例的石灰、水泥、粉煤灰或其他工业废渣等结合料,加水拌和形成混合料,经摊铺压实及养生后形成路面基层。进入20世纪90年代以后,沥青混凝土为面层的半刚性基层路面被广泛地应用于国内二级以上公路(含高速公路)^[3]。半刚性

基层材料在国外一般都用水泥稳定,称为CTB(Cement Treated Base),最早应用于对软弱地基的处理,随后发展并应用于基层和底基层路面结构设计。与传统的全柔性路面基层(级配碎石、级配砾石、填隙碎石等)相比,石灰、水泥、粉煤灰等结合料都具有很高(或一定)的活性,与水及土、砂、石等筑路材料拌和后,产生一系列的理化反应,经摊铺压实及养生后形成的路面基层,具有较高的强度、刚度及良好的板体性、水稳性,并具有一定的抗冻性,大大提高了路面的承载能力。半刚性基层材料还具有一定的抗弯拉强度、抗压强度以及抗压回弹模量,它们都具有随龄期而不断增长的特性,因此半刚性沥青路面通常具有较小的弯沉和较强的荷载分布能力。我国大多数高速公路路面结构在使用期内不同时期的代表弯沉值均在0.2 mm以内,甚至在0.1 mm内^[1]。已有试验证明^[4]:半刚性基层沥青路面的承载能力完全可由半刚性基层予以满足,沥青面层可仅起功能层的作用,再加上半刚性基层较大的刚度使得其上沥青面层弯拉应力值较小(一般小于0.17 MPa),从而提高了沥青面层抵抗行车疲劳破坏的能力,这就使得设计者可以考虑去减薄面层^[2],降低工程造价。鉴于半刚性基层沥青路面强度、平整度及抗行车疲劳性能较好这一特点,再加上半刚性基层板体性好,利于机械化施工且工程造价低,因此它实际上已成为目前我国高等级公路路面结构的主要形式。半刚性基层厚度一般为15~40 cm,对于厚度较大的基层工程多采取两层施工,分为上基层和下基层,下基层的下面是底基层,厚度一般为15~25 cm。

目前,我国高等级公路路面设计中通常采用石灰粉煤灰类稳定粒料基层和水泥稳定粒料基层,具有代表性的是二灰碎石和水泥稳定碎石。而无机结合料稳定土通常只做高等级公路的底基层,其原因主要有以下几点^[5]:

(1)无机结合料稳定土的干缩性和温缩性一般都较稳定粒料的干缩性和温缩性大得多,因而当无机结合料稳定土用做基层时,可能产生的收缩裂缝较稳定粒料类要严重得多。单位长度内裂缝的条数多,缝的宽度大,特别是在铺筑沥青面层前就已经产生的收缩裂缝,迟早会由于当地的气候条件和交通状况的影响,逐渐反映到沥青面层上来,成为反射裂缝,而沥青面层的裂缝对沥青路面的使用性能和寿命有很大的影响。

(2)在我国北方冰冻地区,由于我国目前使用的沥青大多数质量不甚理想,沥青含蜡量高,延度过低,因而避免不了使沥青面层本身产生收缩裂缝,在南方的非冰冻地区也是如此,只是情况稍微好一些。沥青面层一旦产生了收缩裂缝,当雨季来临时,会对面层下的基层产生很不利的影响。如果基层为稳定土,则雨水将渗入裂缝(包括反射裂缝和对应裂缝)内,使裂缝两端的稳定土浸水甚至饱和,也会使稳定土层下裂缝附近的土基局部变软。由于无机结合料稳定土的抗冲刷能力较差,在车辆荷载的反复作用下,稳定土浆通过裂缝被唧至沥青面层表面,产生唧浆现象。唧浆一旦产生,裂缝处的面层就逐渐下降,从而导致新的裂缝出现,沥青面层进一步破坏。

(3)在新铺沥青面层的情况下,降水总会通过不同的途径进入路面结构层。实践证明,自由水进入沥青路面结构层容易,而要蒸发出来则比较难,需要较长时间。进入的自由水容易使强度较低的无机结合料稳定土基层表层软化,一旦出现这种情况,就会在沥青面层下形成一软弱夹层,在行车荷载作用下沥青面层很快龟裂破坏,甚至产生推移。

半刚性基层沥青路面有着其他路面结构不可替代的优越性,然而,随着半刚性沥青

路面的大量使用,逐步发现它也有着一些严重的问题,这就是在半刚性基层,特别是水泥稳定类基层沥青路面的早期出现了比柔性基层沥青路面多而频繁的裂缝,这个问题在国外也比较普遍^[6~10]。这是由于受温度和湿度的影响,这种半刚性基层的材料、结构特性容易形成原始的微裂缝和宏观裂缝,使得路面面层铺设完成通车使用后不久,基层中的裂缝就在温度场和荷载场的单独或共同作用下向路面反射形成反射裂缝,从而进一步导致或加速路面的破坏。我国地处世界欧亚大陆板块的东部,是季风气候最典型、最强烈的大陆,特别是在北方地区,裂缝十分普遍和严重。调查表明,无论是南方还是北方,通车后一年,最迟第二年均出现大量裂缝^[1, 11]。

路面开裂的原因和裂缝的形式是多种多样的,影响裂缝轻重的主要因素有:沥青和沥青混合料的性质、基层材料的性质、气候条件、交通量和车辆类型以及施工因素等。但就沥青路面开裂的主要原因而论,可以分为两大类,即荷载型裂缝和非荷载型裂缝。由于采用的半刚性基层有足够的强度,荷载型裂缝不是主要的,而主要是非荷载型裂缝。非荷载型裂缝的大部分为横向裂缝,主要是沥青面层自身的温度收缩裂缝以及由半刚性基层温度收缩开裂或干燥收缩开裂所引起的反射裂缝和对应裂缝。在半刚性基层沥青路面上现场钻芯取样观测表明,裂缝中相当数量为半刚性基层先开裂而导致沥青面层开裂的反射裂缝(reflective-cracking),这一比例常超过 50%^[12]。

初期的裂缝对行车无明显影响,但影响路面美观,降低平整度。大量裂缝(反射裂缝或对应裂缝)的产生,不仅使车辆行驶质量下降,而且破坏了路面结构整体性和连续性,并在一定程度上导致了结构强度的削弱,例如,使裂缝处弯沉增大从而加速面层弯曲破坏。同时,试验还表明,裂缝处半刚性基层弹性模量明显降低,从而影响了路面结构的整体强度。裂缝的出现,也会对路面性能和耐久性产生不利的影响,这些不利影响包括^[13~17]:

(1)会使路面系统防水性降低。裂缝为雨水进入路面结构提供了通道,水分通过裂缝浸入到路面基层、底基层,水进入路面基层后可能顺着基层裂缝继续下渗,甚至进入对湿度敏感的路基土中,软化土基,危及整个路基路面结构。

(2)易引起沥青面层较快地出现龟裂、网裂等。通过裂缝进入路面结构内部的水大部分由于缺乏适当的排水通道而滞留于面层与基层间,在大量行车荷载反复作用下产生极大的动水压力而冲刷基层造成唧浆,使裂缝加宽,裂缝两侧的沥青路面破碎。这一过程的反复作用,最终导致基层丧失支撑及与面层的联结,从而使沥青面层出现网裂等破坏,加速沥青路面的破坏,从而影响公路使用质量和寿命,对以水泥稳定碎石材料为基层的高等级公路建设造成了潜在的危险,在某种程度上也限制了水泥稳定类半刚性基层的应用。

(3)引起路基过大压应力。由于存在裂缝,造成路面板体不连续,在行车荷载作用下将增大板体边缘的变形,从而在裂缝处传递过大压力至路基顶面。

(4)路面结构板体边缘的变形会在路面结构内(尤其基层)产生很大的应力和变形,在行车荷载作用下将缩短这些结构层的寿命。

(5)在车辆、水分、霜冻等因素的综合作用下,磨耗层常会沿裂缝发生骨料或小块沥青的剥落。

基于以上原因,一些人开始怀疑我国普遍使用的半刚性沥青路面结构,认为以半刚性路面结构为主的高等级公路路面结构过于单一,应该研究使用柔性路面结构,认为柔性路面结

构才能解决当前半刚性路面的问题,延长路面使用寿命,降低大修成本。同时,目前国内还有一种倾向,为了减少半刚性路面的反射裂缝或对应裂缝,半刚性基层的强度普遍有降低的趋势,这是十分危险的。众所周知,随着经济的发展,我国公路运输呈现车流量大和轴载重(大型货运车辆自重加运输货物有的每辆达 60 t 以上,汽车轮胎的气压已增大到 1.0 MPa 以上)的情况,我国公路上的超载运输现象十分普遍和严重,这是摆在我们面前的客观现实。对于这样大的交通荷载柔性路面结构能否承受,国内外均没有相关的研究成果可以证明,因此更无从谈起用柔性路面结构代替半刚性路面的优越。没有足够的基层强度就无法满足我国较大的交通荷载对承载力的使用要求,就会大大影响半刚性基层与沥青面层的层间黏结状态,就无法提高路面的耐久性和使用寿命。可见,选择半刚性沥青路面结构是一个技术上可行、经济上合理的技术方案,我国选择半刚性路面结构作为高等级公路的主要结构形式有其历史的必然性和现实的可行性。十多年来我国高等级半刚性沥青路面的使用经验证明,从承载能力角度看,这种路面结构是适合我国交通环境的。

综上所述,能否解决半刚性基层材料的裂缝问题是当前困扰我国高等级公路建设的一个重要问题,这将直接影响到高等级公路的使用寿命,关系到能否减少高等级公路的大修成本。对于我国半刚性沥青路面来说,造成路面裂缝较多的原因,主要是来自半刚性基层的反射裂缝和对应裂缝。延长沥青面层使用寿命的核心问题就是延长基层的使用寿命。半刚性基层材料在外界温度和湿度变化下产生干缩、温缩裂缝,这种具有裂缝的基层在干缩、温缩应力进一步作用下,裂缝顶端产生较大拉应力集中,这是造成基层裂缝沿面层底部向上反射直至贯通的主要原因^[12, 18~22]。保证基层具有足够的强度是提高基层质量、延长基层使用寿命的关键措施之一,而无机结合料稳定粒料基层强度愈高,往往产生干缩和温缩开裂的可能性愈大。怎样在保证基层强度的前提下,避免或减少半刚性基层的开裂,防止面层反射裂缝和对应裂缝的产生就成为一个急需解决的重要课题,本课题的研究就是基于此开展的,即在水泥稳定碎石中掺加一定量的聚丙烯纤维,以此降低其回弹模量,减小其干燥收缩和温度收缩,增强基层的抗裂性能。因此,该项研究有着非常重要的现实意义,研究成果对于我国高等级路面的设计、施工和管理具有重要的理论价值和广阔的应用前景。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 半刚性基层材料收缩性能

1.2.1.1 试验研究

国内外对半刚性基层温缩和干缩性能及规律进行了大量的研究工作,取得了一些成果。美国 K.P.George 等研究了水泥稳定土的干缩特性,并论述了影响水泥稳定土收缩应变的因素^[23~26],他们认为:水泥稳定土的收缩随着土中小于 0.002 mm 黏粒含量的增多而增大,而且干缩量增加的速度大于黏粒含量增加的速度,蒙脱土的干缩量明显大于高岭土的干缩量;水泥稳定土试件成型时含水量愈大,试件干缩应变愈大,因而在基层施工中要严格控制含水量;试件的密实度愈大,其干缩应变愈小,因而对于收缩率可以用

改进压实的方法使其减小;水泥剂量存在着一个可以使收缩最小的最佳剂量。澳大利亚的 R. E. Rawlings 研究了水泥稳定粒料的干缩特性^[27],取 4%水泥用量,研究了不同添加剂对干缩应变的影响,通过大量试验得出水泥稳定粒料土的干缩应变与粒料土类型、粒料土的塑性、含水量以及水泥剂量有关的结论。美.姆.下迈斯.拉曼等人对石灰粉煤灰材料的热膨胀性做过研究,并认为硬化后的 LFA(石灰、粉煤灰、骨料)材料的热膨胀系数主要受这种材料中骨料含水量的影响,当含水量相近时,典型的热膨胀系数与水泥混凝土的大约相同,约为 $\alpha=6\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[28]。由于国外通常认为柔性基层沥青路面的温缩裂缝一般是沥青面层本身的温缩裂缝,而半刚性基层沥青路面的非荷载型裂缝通常是反射裂缝,且认为这种反射裂缝是由半刚性基层材料的干缩引起的,因此国外文献中很少能看到有关半刚性基层材料温度收缩特性的资料^[4]。张洪华通过对水泥稳定细粒土、水泥稳定中粒土和水泥稳定粗粒土的温缩性的研究,得出了影响稳定粒料土温缩系数的决定因素,并且比较了四种半刚性基层材料温缩性的大小^[29]。长安大学的张登良和郑南翔^[30]在对半刚性基层材料收缩机理分析的基础上,对石灰稳定类、水泥稳定类及二灰稳定类等三种典型基层材料分别在饱水状态、最佳含水量状态、半风干状态、风干状态和烘干状态等五种不同状态下做了大量温度收缩与干燥收缩试验,得出了一些重要结论:水泥稳定材料基层中掺加集料,可以明显降低温缩性和干缩性;水泥稳定粒料类的温缩性和干缩性小于石灰粉煤灰稳定粒料的温缩性和干缩性,也小于石灰稳定粒料类的温缩性和干缩性;为了有效减小收缩,水泥最大剂量不宜超过 6%;对于烘干试件,温缩系数随龄期增大而不断增大,初期增大较快,后期增大较慢;在接近最佳含水量状态且在 0~10℃温度区内,温度收缩较大;封闭状态下各种半刚性材料的温缩系数明显小于自由状态下。重庆交通学院的杨锡武和梁富权^[31, 32]研究了养生条件对半刚性基层材料收缩特性的影响以及石灰粉煤灰碎石、水泥粉煤灰碎石和水泥碎石等几种半刚性基层材料的收缩应变与龄期之间的变化规律,并得出了一定环境条件下,其收缩应变与龄期的回归方程。此外,谭鹰、李彬等^[33~37]都对半刚性基层材料的温缩和干缩性能进行了类似的试验研究。

1.2.1.2 收缩开裂机理

路面收缩开裂机理的理论研究,大多侧重于利用有限元法以及断裂力学理论对路面结构层的应力应变进行计算分析,得出应力或应变的解析解。吴赣昌^[38~41]以热弹性力学理论为基础,采用偏微分方程组的边值理论和二维奇异积分方程理论,对半刚性路面中基层已产生贯穿厚度的裂缝时的温度应力场进行了研究,分析了温度场对路面体的影响,通过积分变换和广义解析函数边值理论获得温度场作用下含裂缝道路的解析解以及裂缝尖端应力强度因子的理论解,并以此对半刚性基层温缩裂缝的扩展机理进行了定量分析。河北工业大学的岳福青^[42]根据西尔斯和不里恩公式计算了半刚性基层中的温缩应力和干缩应力,指出它们是导致基层首先开裂的主要原因,在此基础上运用断裂力学观点阐述了沥青路面反射裂缝的两种开裂模式:剪切型和拉裂型。Jiwon 等^[43]采用改进的三维有限元法分析了在不同的荷载条件下,反射裂缝对罩面层的作用,并对为了抑制反射裂缝向上反射而在罩面层和面层之间加入的土工织物的效能进行了分析。彭妙娟等^[44]针对基层中含有贯穿横向裂缝的道路层状模型,考虑车辆荷载和温度的作用进行了三维有限元断裂力学分析。梁乃兴等^[45]采用三维有限元法和断裂力学理论判据分析了荷载和温度作用

下, 沥青路面结构的力学状态随水泥粉煤灰碎石基层性能变化的规律。D.V.Ramsamooj 等^[46]采用权函数法, 基于线弹性断裂力学理论, 获得了机场和高速公路路面接缝处的应力解析解, 并与有限元法解、现场实测结果进行了对比, 结果吻合较好。郑健龙等^[47]将基层中含有贯穿横向裂缝的道路结构简化为二维模型, 以应力强度因子作为表征参量, 探讨了车辆荷载(简化为静荷载)对称作用和非对称作用下基层和面层之间加入软弱层对防止裂缝向上扩展的效果, 得出软弱层可以防止基层中裂缝向上扩展的结论。杨成忠和陈万祥^[20]通过对半刚性基层沥青路面材料性能、反射裂缝形成机理分析, 介绍了该路面结构的三种开裂模式, 并给出有效的技术措施。刘善平、白琪峰等^[48-53]采用有限元分析方法和其他理论方法对半刚性基层沥青路面的温缩裂缝以及温度应力状况也进行了相关的研究。

1.2.2 半刚性基层材料力学性能试验

由于强度和回弹模量是半刚性基层沥青路面结构设计的核心参数, 其取值大小的合理与否, 不仅决定公路的质量, 而且直接关系到建设的经济可行性, 因而目前国内外对半刚性基层力学性能试验研究的资料大多是针对抗压强度、劈裂抗拉强度以及回弹模量的。国外虽没有国内的研究资料多, 但对半刚性基层也进行了一定的研究, 并且取得了一定的成果。20 世纪 60 年代初期, H.B.Seed 等^[54-58]对粒料基层的劲度特性做了大量卓有成效的研究工作, 为路面设计方法提供了非常有用的资料。英国有关研究者提出通过维持良好的集料嵌锁, 不增大沥青面层厚度, 将裂缝宽度控制在一定范围内, 使荷载传递能力达到最大的所谓开裂控制方法^[59]。1964 年, A.Herzog、R.Bock 研究了影响二灰稳定土强度的一些因素; 1988 年, B.R.A.Akofo 通过对二灰稳定土无侧限抗压强度的室内试验, 得出最佳的石灰和粉煤灰含量。冲刷病害也是半刚性材料的一种常见病害, 郝培文和胡长顺等^[60]在室内利用冲刷试验仪研究了不同半刚性材料的抗冲刷特性, 结果表明, 对于稳定土类, 水泥土的抗冲刷性最好, 石灰土、二灰土相对较差; 对于稳定粒料类, 水泥粉煤灰要优于二灰类; 滕旭秋和陈忠达等^[61]对二灰碎石混合料的冲刷性能进行了试验研究, 结果表明, 集料的级配是影响二灰碎石混合料抗冲刷性能的主要因素; 而长安大学的沙爱民和胡力群^[62]在分析评价现有试验方法的基础上, 提出了半刚性基层材料抗冲刷试验新的试验装置和试验方法。目前, 在国内外的研究资料中, 关于半刚性基层材料抗弯拉(抗折)强度和弹性模量试验的比较少, 支喜兰和王亚玲等对用土工格栅加筋的水泥稳定碎石材料进行了中梁的抗弯拉和弯曲疲劳室内模型试验, 分析了土工格栅位于半刚性基层材料底面时对材料受力、变形及疲劳寿命的影响^[63, 64]; 同济大学的研究结果表明, 半刚性基层材料抗压模量和弯拉模量存在差异, 动态模量远远大于静态模量, 材料的抗压强度、劈裂强度和弯拉强度等指标随试验方法的不同而存在显著差别^[65]。长沙交通学院的习应祥和朱梦良^[66, 67]通过几种常用半刚性基层材料的抗压、劈裂、应力—应变全曲线等力学试验, 并结合材料在实体路面工程中的应用, 综合评价了这些材料的性能, 还用应变能密度公式计算了这几种基层材料的应变能密度, 为基层材料的选用提供了一种新的评价方法。半刚性基层在产生裂缝后, 裂缝的发展以及产生裂缝后的应力和变形状况可以通过断裂试验来得到, 然而目前这方面的研究特别欠缺^[68]。文献[28]和文献[69]~[74]对二灰稳定碎石基层材料的抗压强度、抗拉强度以及抗冻性等进行了研究。

李雨晖和张北瑞等^[75, 76]通过不同配合比试验,从抗压强度、压缩模量、劈裂强度及劈裂模量等方面,系统研究了水泥粉煤灰碎石基层的力学性能。在我国目前的高等级公路建设中,水泥稳定碎石所占的比重最大,文献[13]和文献[77]~[81]对水泥稳定碎石基层及水泥稳定砂砾的强度等力学性能进行了研究。杨红辉等人对水泥稳定碎石中掺加膨胀剂、纤维、减水剂及减缩剂等材料的力学性能进行了研究^[82~85]。

1.2.3 半刚性基层沥青路面防裂措施

国内外道路工程领域一直把沥青路面的抗裂性研究作为一项重要研究内容,几乎都是针对以下几个方面对防治裂缝提出措施的,即沥青面层、半刚性基层以及面层与基层之间的联结。

1.2.3.1 针对沥青面层

就沥青面层来说,可以通过两种途径来增强路面的抗裂性,一种途径是在路面结构设计时适当增加沥青面层的厚度,另一种途径是可以改善沥青面层的材料。采用较厚的沥青面层不仅可以增加路面的弯曲刚度,减小层内的弯曲应力和剪切应力,而且可以延长裂缝反射到面层的时间,如日本东名高速采用 25~30 cm,奥地利 Brenner 高速公路采用 40 cm,均取得了较好的效果,但经济代价高^[13]。就我国目前的高速公路建设状况来看,高速公路的沥青面层一般分上、中、下三层,总厚度在 15~20 cm,很少采用增加沥青面层厚度的措施,有少部分高速公路的面层厚度虽超过了 20 cm,如京津唐高速公路面层总厚度为 23 cm,但从使用情况来看,与其他薄面层的高速公路相比,路面裂缝问题并没有明显改观。为了提高沥青路面结构的服务性能,减少其病害,美国沥青路面联合会(APA)在全厚式和加厚式沥青路面的基础上,提出了使用永久性路面的概念,国内也叫长寿命沥青路面^[86~93]。全厚式路面是一种直接修筑在土基上的沥青路面结构;加厚式路面是在土基与路面间加入一个相对较薄的粒料基层。这类路面的主要优点是总厚度比有常规基层的沥青路面结构更薄,同时可以减少产生疲劳裂缝的可能性,并使路面可能发生的破坏限制在路面结构的上部,这样,当路表面的破坏达到某一临界水平时,只需更换表面层,而不需要改变路面标高。由于永久性路面工程造价高,且对从底层到表层的施工工艺要求比较严,因而目前在国内仍未被采用。

国内外对沥青面层抗裂性能的研究普遍都侧重于改善沥青面层材料,在改善沥青混合料抗裂性能上有三大研究方向:一是改善矿质混合料的级配来提高沥青混合料的高温抗变形能力,形成了不同的沥青混合料新技术,如沥青玛蹄脂碎石 SMA、大粒径沥青混凝土 LSAM、多碎石沥青混凝土 SAC 等;二是通过改善沥青性能品质来提高其抵抗永久变形能力并减小温度敏感性,例如 SBS 改性沥青、SBR 改性沥青、PE 改性沥青等;三是在沥青混合料中加入纤维加筋材料以增强其抗裂性。自 20 世纪 60 年代, N.M.Davis、Tons 和 Egons、D. A.Tamburro、G.H.Zuehlke 等采用石棉纤维和金属丝等材料来改善沥青路面的抗反射裂缝性能以来,国内外对纤维增强沥青混合料进行了大量的研究。美国、加拿大、德国等采用纤维修筑了高速公路以及其他大交通量的公路,如形成专利商品的美国产品 Bonifiber、Fiberpave 等^[94]。由于石棉纤维对环境有污染而被禁用,金属不耐腐蚀,因而聚合物纤维(如聚酯纤维、聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维和芳纶纤维)、木质素

纤维和玻璃纤维等得到了广泛应用^[95~103]。

1.2.3.2 针对半刚性基层

针对基层材料本身的抗裂措施,实际上就是采取措施减小半刚性材料的收缩性能,增强其抗拉性能,可以通过掺加添加剂或者是加筋材料来限制其收缩,也可以通过改善半刚性基层材料各组成成分的性能来增强基层的抗裂性能。在半刚性基层材料中掺入短纤维可有效地提高稳定土的抗裂性能,苏州科技学院的董苏波等^[104]对玻璃纤维二灰稳定碎石的强度和刚度进行了试验,结果表明,玻璃纤维可提高二灰碎石半刚性基层的强度,降低其刚度,并且可有效改善二灰碎石基层的韧性。长沙交通学院的陈晔在试验的基础上探讨了聚丙烯短纤维增强二灰稳定土的性能^[105],而徐剑则通过在水泥稳定土中掺加格网碎片来增强基层的抗裂性能^[106]。在日本,采用水泥和特殊沥青乳剂综合稳定的方法使水泥与沥青混合以防水分的蒸发,而沥青乳剂中的水分则供水泥硬化,使收缩系数随沥青剂量的增加而减小^[107]。长安大学的戴经梁和蒋应军等^[12, 13, 108]通过大量试验认为,改善半刚性材料的级配,采用骨架密实结构能显著减小半刚性基层的收缩量,增强基层的抗裂性。对于组成半刚性基层的材料来说,诸多的研究都表明:在满足设计强度的基础上应限制水泥用量,并且尽量选用低标号、水化热小、干缩性小的水泥,适当加入缓凝减水剂、缓凝阻裂剂、减缩剂等外加剂^[84, 85, 109, 110],为提高后期强度,减少收缩裂缝可用粉煤灰代替部分水泥剂量等。在我国高等级公路基层稳定材料中,二灰稳定粒料要比水泥稳定粒料抗收缩开裂能力强,而且能大量利用工业废料(粉煤灰),经济性好,因而应用非常广泛。但是,由于二灰稳定粒料早期强度低,施工进度受到限制,且表面松散,不利于层间结合,逐渐被水泥稳定粒料基层所代替。

在基层施工中所采取的一个重要的防止裂缝产生的措施就是对基层采取“预裂”措施,在沥青面层铺筑之前,人为地制造规则的裂缝或不规则的裂纹网。德国1986年新规范规定,当沥青罩面层的厚度小于或等于14 cm时,不管基层厚度多大,只要基层抗压强度超过12 MPa,基层必须预先切纵缝和横缝^[111]。前苏联有关规范指出,为了减少裂缝的破坏作用,避免薄沥青面层下水泥稳定土基层产生不规则的裂缝反射到沥青面层上,建议基层每隔8~12 m做一假缝,缝深6~8 cm,缝宽10~12 mm;锯缝后立即用沥青玛蹄脂填缝,并对沥青面层产生的规则且较整齐反射裂缝也采用沥青玛蹄脂填缝。目前,在我国该工艺已得到广泛应用,许多实际应用的工程实例都表明此项工艺对防治半刚性基层的收缩裂缝确有成效。许多研究者针对不同半刚性材料基层设置预锯缝的计算以及具体工艺过程都进行了一定的研究探讨^[12, 112~115]。国外很多学者认为微细裂缝的传荷能力好,会大大减轻甚至完全消除宽缝的出现,如前捷克斯洛伐克在水泥稳定材料硬结过程中,用反复碾压的方法人为地创造微细裂缝网;科威特在新铺的水泥土基层上用重型钢轮压路机碾压,故意使水泥土基层预先开裂^[13]。基层的施工质量是决定基层是否开裂的关键,要保证基层有足够的压实度,严格控制基层的含水量,并且为降低温差适当安排基层施工的季节和时间。

1.2.3.3 针对面层与基层之间的联结

在半刚性基层和沥青面层之间加铺一层弹性模量低、韧性较好、能承受较大应变的应力吸收中间层,能使基层裂缝向上反射而产生的结构应力在该层的界面上被消散,吸

收了半刚性基层的收缩应力或应变,从而达到减少面层开裂的目的。国内外用得较多的应力中间层有橡胶粉沥青、级配碎石、土工织物等。有资料表明,采用橡胶沥青、改性沥青应力吸收中间层防止反射裂缝,具有一定效果^[116]。土工织物中间层的研究,国内始于1985年,目前仍在积累资料和经验。国外有多位研究者报道了以层铺土工织物作为增强料的水泥基产品^[117~120],但在道路工程上,则多用于具有大量裂缝的旧路面上加铺新沥青罩面时,其防裂效果有好有坏^[117, 121],土工织物中间层对于垂直差动位移和水平位移较大的情况,效果并不理想^[3]。在美国、澳大利亚及南非沥青路面结构中采用级配碎石缓冲层,即所谓的倒装结构较多,厚度为10~15 cm,具有一定效果^[122~125]。俄罗斯在10~14 cm厚的沥青混凝土下设置乳化沥青处理集料防裂中间层或集料中间层;英国采用高抗拉强度的聚合物网作为半刚性基层与沥青层的中间层以延缓缝向上传播^[117]。采用软弱夹层将能有效地降低裂缝顶端的应力集中,延缓反射裂缝的扩展。Monismith等^[126, 127]用热弹性力学,对交通荷载与温度荷载作用下的开裂基层与加铺层中的应力分布特征进行了研究,并就橡胶沥青夹层对裂缝尖顶端附近应力集中的消散作用进行了分析。为了寻求合适的夹层材料以阻止或延缓反射裂缝的扩展,Coetzee等也做过类似的研究^[128~137],研究表明,夹层材料的刚度越大,止裂作用越明显,如果层间的黏结强度不高,有可能使得基层上的裂缝沿界面扩展,但如果层间黏结强度足够高,不会导致脱胶现象发生,则裂缝将会沿垂直方向扩展。由于玻璃纤维格栅具有高抗拉强度和低延伸率,并且有较好的热稳定性,与沥青混合能很好地相容,在半刚性基层与沥青面层之间设置玻璃纤维格栅对于减少路面裂缝也有很好的成效^[138, 139],它可以设置在半刚性基层与下封层之间,也可以设置在下封层与沥青面层之间。

1.2.4 聚丙烯纤维的应用现状

国外对聚丙烯纤维的研究是从20世纪60年代开始的,Goldfein研究了体积掺量为0.5%的聚丙烯纤维增强混凝土的特性,建议用聚丙烯纤维作为掺合料加入混凝土建造美军工兵部队的防爆建筑,成为合成纤维混凝土的首创^[140]。有关试验结果表明,若在混凝土中掺加体积率为0.1%~0.3%的聚丙烯纤维,可使混凝土的塑性收缩减少12%~25%^[141]。20世纪70年代初,美、英等国已经开始将聚丙烯单丝纤维用于混凝土制品与工程中,到70年代中期,美国成功开发了聚丙烯膜裂纤维,研究发现,使用这种纤维不仅有助于降低单丝的直径,并且可以使纤维的体积率减少到0.1%~0.2%。国外的诸多研究均发现^[142~145],聚丙烯纤维对混凝土的作用主要是限制了混凝土早期裂缝的生成与发展,增强了混凝土抗裂性。聚丙烯纤维的阻裂效应主要体现在消除或减轻了早期混凝土中原生裂隙的发生和发展,钝化了原生裂隙尖端的应力集中,使介质内的应力场更加持续和均匀。文献[146]~[149]的研究发现,聚丙烯纤维对混凝土抗拉强度的提高可达到90%,劈裂抗拉强度可达到20%;聚丙烯纤维对混凝土的抗压及弯曲强度提高不明显,但可以大大提高混凝土的冲击及弯曲韧性;在高温环境下,低熔点的聚丙烯纤维混合能显著提高混凝土的高温特性。目前,在国外应用较广泛的聚丙烯纤维为美国希尔兄弟化工公司生产的杜拉纤维(Durafiber),它能有效地控制混凝土或砂浆的塑性收缩、干缩、温差变形等因素引起的微裂缝,防止及抑制裂缝的形成及发展。

我国关于合成纤维混凝土的研究和应用起步较晚,20世纪90年代中期美国几家纤维生产厂家相继来我国开拓市场,其纤维产品广泛应用于水泥基材料的结构工程,如水工、桥梁、桥面、路面及建筑物和构筑物的地下围护结构等,此后,国内很多科研院所开始对聚丙烯纤维在水泥基材料中的应用进行系统研究。从目前国内的研究水平来看,主要集中于对聚丙烯纤维混凝土的物理、力学性能的研究。天津市市政工程研究院曹诚等的研究表明,聚丙烯纤维能有效降低混凝土塑性裂缝的宽度,随着纤维的细度和掺量的增大,均能进一步降低混凝土中纤维的间距,增强阻裂效应^[150, 151]。华渊等^[152]的研究表明,与基准混凝土相比,随着纤维体积率的增加(0~15%),纤维混凝土抗压强度变化很小,抗折强度提高了12%~26%,韧性也随之增加,他们提出了聚丙烯纤维混凝土的裂缝发展规律,定性分析了增韧机理。大连理工大学戴建国和黄承逵等^[153, 154]研究了网状聚丙烯纤维混凝土的施工性能,抗压、抗弯性能,弯曲韧性、抗渗性能,热老化稳定性及收缩性能等,说明了低弹模纤维混凝土不仅可以防止塑性收缩裂缝,而且可以改善结构的延性和韧性。此外,文献[155]~[158]的研究均表明,聚丙烯纤维能有效地抑制混凝土材料的塑性收缩。

聚丙烯纤维不但可以用在混凝土或砂浆中增强其各种性能,应用于桥梁、地下室工程结构性防水、外墙抹灰、仓库地板及楼顶面防水、垃圾池及游泳池、停车场、水泥预制件等方面,而且可以用在其他工程材料里面,如沥青混合料、公路半刚性基层稳定粒料等。目前,国内外大量的研究资料都是关于聚丙烯纤维增强混凝土的,而关于聚丙烯纤维增强半刚性基层稳定粒料的研究资料较少。聚丙烯掺入半刚性基层稳定粒料主要是为了减弱基层材料的收缩性能,减小其刚性,从而提高基层的抗裂性能^[82, 83, 159~163]。此外,在半刚性基层里面掺加聚丙烯纤维,施工工艺简单,在保证基层强度的情况下,可以使整个路面的厚度减小,从而可以大大节省总体的工程造价,而且可以节省大量用于治理由半刚性基层开裂而引起沥青路面裂缝的费用。因而,聚丙烯纤维增强半刚性基层材料在我国具有较大的实际应用潜力。进一步深入地研究聚丙烯纤维半刚性基层材料各种力学性能、收缩性能及其抗裂性能将会推进该新型基层材料在我国公路工程中的应用。

1.3 本书研究的主要内容

基于国内外研究现状,为提高高等级公路沥青路面半刚性基层的抗裂性能,本书在分析半刚性基层裂缝形成机理的基础上提出了通过改善基层材料本身性能来提高半刚性基层抗裂性的措施,即在水泥稳定碎石中掺加聚丙烯纤维,对聚丙烯纤维水泥稳定碎石各种力学性能及抗收缩开裂性能进行了系统的试验研究,主要开展了如下几个方面研究:

(1)在分析半刚性基层收缩开裂的基础上,推导出半刚性基层收缩应力及最大收缩应力的计算公式,对影响最大收缩应力的各种因素进行分析,从最大收缩应力的影响因素出发,提出相应的路面裂缝防治措施;根据所推导出的半刚性基层最大收缩应力公式探讨了半刚性基层裂缝产生的规律。

(2)通过聚丙烯纤维水泥稳定碎石击实试验确定每组配合比试件的最大干密度和最佳含水量。由于目前规范中没有对半刚性材料抗弯拉试验、收缩试验和断裂试验试件规