



Theory and Technology of Durability of
Rigid-Flexible Composite Pavement

刚柔复合式路面耐久性 理论与技术

李 盛 刘朝晖 著



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

Theory and Technology of Durability of Rigid-Flexible Composite Pavement

刚柔复合式路面耐久性理论与技术

李 盛 刘朝晖 著



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

内 容 提 要

本书共分 8 章,详细阐述了刚柔复合式路面的耐久性理论与技术,内容包括绪论、温度场与车辙变形分析、层间剪应力分析与层间结合技术、层间界面剪切疲劳测试与沥青面层厚度设计、黏层及抗裂夹层沥青新材料与性能评价、CRC+AC 复合式路面纵向配筋设计与施工技术、沥青面层损伤特性及开裂机理、CRC+AC 复合式路面沥青面层的裂缝扩展。

为了增强本书的实用性,作者综合部分章节的研究成果,专门编制了新建和改造工程中刚柔复合式路面结构层厚度的设计示例,并列于书后,是对现行规范很好的补充和完善,可供广大同行在研究和设计中参考。

本书可作为高等学校道路工程专业研究生和高年级本科生的教材或参考用书,也可供从事道路工程科研、教学和设计的专业人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

刚柔复合式路面耐久性理论与技术 / 李盛, 刘朝晖
著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014. 6
ISBN 978-7-114-11479-3

I. ①刚… II. ①李… ②刘… III. ①复合式路面—
耐久性—研究 IV. ①U416.224

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 128013 号

书 名: 刚柔复合式路面耐久性理论与技术

著 作 者: 李 盛 刘朝晖

责任编辑: 刘永超 潘艳霞

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)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: 11.75

字 数: 240 千

版 次: 2014 年 6 月 第 1 版

印 次: 2014 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11479-3

定 价: 35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

我国沥青路面的早期损坏较为严重,高速公路沥青路面的使用寿命经常低于设计使用期,为此,迫切需要提高道路工程的耐久性,促进我国交通运输事业又好又快的发展。刚柔复合式路面是指面层由两种不同材料类型和力学性质的结构层复合而成的路面,刚柔复合式路面一般采用刚性基层与柔性沥青混凝土(AC)面层进行复合,刚性基层主要起承重作用,沥青面层起功能作用。刚柔复合式路面结合了刚性路面和柔性路面的特点,是一种使用性能良好的结构形式,具有整体强度高、行车舒适性好、使用寿命长、维修费用低等优点,从长期使用性能来看,经济性也很好,是重载交通长寿命沥青路面结构的发展方向。

刚柔复合式路面在国外应用较早,20世纪30年代,英国首次修筑了连续配筋混凝土加铺沥青层的路面结构。从20世纪80年代开始,刚柔复合式路面在法国、西班牙、澳大利亚、巴西、日本、荷兰等国家得到了广泛应用。在美国,刚柔复合式路面的结构形式多用于旧路维护,认为沥青混合料加铺层能够保护旧路面结构免受荷载、环境等因素的破坏,延长路面的使用寿命,并提供足够的路面表面功能。20世纪50年代,美国就用沥青加铺层来修复水泥混凝土(PCC)路面、连续配筋混凝土路面(CRCP),用来改善荷载承受能力,提高路面的表面性能。

我国早期修筑了少量的碾压混凝土(RCC)复合式沥青路面,后来在原旧PCC路面改造工程中采用加铺沥青面层的方式,这种复合式路面结构主要在高速公路、国道、城市道路中应用较多。近年来,我国在重载交通路段开始修筑接缝设传力杆的混凝土复合式路面(如河南许尉路)、贫混凝土复合式路面、隧道钢纤维混凝土复合式路面等刚柔复合式路面结构。为改善CRCP的表面性能,近年来,湖南、江苏、河北、上海、山西等省市在新建高速公路中修筑了CRC+AC复合式路面试验路和实体工程。2003年湖南省长潭高速公路旧水泥混凝土路面改造工程中采用CRC+AC复合式路面结构(全长44.76km),截至2013年,路面使用性能良好。2006年长永高速公路黄花至永安段旧水泥混凝土路面改造工程中修筑了8km的CRC+AC复合式路面实体工程。2004年江苏省的沿江高速公路长寿命试验路的结构方案中有两段采用CRC+AC复合式路面结构。2008年河北省张石高速公路石家庄段修筑了40km的CRC+AC复合式路面,这是新建公路中规模较大的CRC+AC复合式路面结构。2011年湖南省长

益高速公路大修改造工程(57km)、2012年京港澳高速公路潭耒段改造一期全线(104km)、2013年京港澳高速公路潭耒段改造二期全线(65km)、2013年京港澳高速公路耒宜段大修工程部分标段(57km)均采用CRC+AC复合式路面结构,路面的结构形式与长潭高速公路的基本一致。刚柔复合式路面的在京港澳高速公路上的大面积推广应用反映出这种路面结构具有显著的优点和良好的使用性能。

国内外目前对刚柔复合式路面的研究虽然取得了一定的成果,但还有一定的局限性,对刚柔复合式路面的层间剪切疲劳、CRC+AC复合式路面的车辙变形和CRC板的纵向配筋、沥青面层的温度疲劳损伤等方面的研究基本属于空白,对刚柔复合式路面层间沥青材料、层间结合技术的研究还不够系统和全面。目前的行业设计规范关于刚柔复合式路面沥青面层的厚度设计指标与方法还很不完善,需进行不同应力水平下的层间界面剪切疲劳试验,分析提出层间抗剪强度结构系数,提出基于层间剪切疲劳的沥青面层厚度设计方法。现行规范中仍然没有CRC+AC复合式路面纵向配筋的设计方法,所以只能按CRCP的配筋方法对CRC+AC复合式路面进行配筋设计,不够科学合理,需结合CRCP纵向配筋设计方法和沥青面层厚度对温度的折减,确定沥青面层厚度对CRC+AC复合式路面纵向配筋的影响规律,提出基于不同沥青面层厚度的CRC+AC复合式路面的纵向配筋设计方法。针对贫混凝土、碾压混凝土、普通水泥混凝土等有接缝的刚性混凝土基层复合式沥青路面,以及旧水泥混凝土路面加铺沥青面层改造的路面结构都易出现反射裂缝,还需开发适用于刚柔复合式路面结构抗裂夹层的沥青材料。

本书是作者依托国家自然科学基金项目“连续配筋混凝土复合式沥青路面结构分析研究(项目批准号:50778025)”和“复合式沥青路面层间剪切疲劳破坏机理研究(项目批准号:51178062)”、国家自然科学基金项目(项目批准号:51038002)、教育部博士点基金项目(项目批准号:20114316110001)、湖南省自然科学基金资助项目(项目批准号:14JJ7041)、湖南省教育厅科学研究项目(项目批准号:14B001)的研究成果,结合湖南长潭高速公路改造工程、长永高速公路黄花至永安段改造工程、常吉高速公路CRC+AC复合式路面试验路、常吉高速公路茶庵铺连接线、京港澳高速公路潭耒段改造一期全线等实体工程的修筑实践和观测结果,对刚柔复合式路面耐久性理论与技术进行的系统总结,旨在解决修筑刚柔复合式路面的关键理论与技术以及制约其推广应用的主要问题。考虑到沥青层和刚性层的施工技术与材料的耐久性要求与普通沥青路面和刚性路面基本相同,刚性层的结构层厚度设计方法也已较为成熟,本书不再介绍这几方面

的内容,书中主要包括刚柔复合式路面的温度效应与车辙变形、层间剪切破坏特性与沥青面层厚度设计、层间结构与材料及结合技术、CRC 层纵向配筋设计、沥青面层的疲劳损伤及裂缝扩展等耐久性理论与技术等内容。

李盛撰写了第 2 章、第 4 章、第 7、8 章及第 3、第 6 章、附录的部分内容;刘朝晖撰写了第 1 章、第 5 章及第 3 章、第 6 章、附录的部分内容;全书由李盛负责书稿的修改和定稿,由长沙理工大学李宇峙教授主审。研究过程中,运用了传热学、损伤力学、断裂力学、弹性层状体系等基本理论,进行了大量的计算分析与室内外试验,得到郑健龙、周志刚、查旭东、秦仁杰、钱国平、谢军、李九苏等人的大力支持,研究生周婷、柳力、张景怡、史进、展宏图、刘兴武等做了大量试验工作,在此深表感谢。此外,感谢国家自然科学基金委、长沙理工大学对本书的出版资助。

因刚柔复合式路面结构较复杂且可供参考的已有研究成果较少,加之作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者和同行不吝指正。

李 盛

2014 年 5 月于长沙

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外研究现状	4
1.2 研究现状分析及发展趋势	11
1.3 国内外应用概况	12
第 2 章 温度场与车辙变形分析	16
2.1 温度场理论及有限元模型	16
2.2 结构层厚度对温度梯度的影响	19
2.3 高温环境中沥青层的车辙变形	24
2.4 车辙现场检测情况	27
2.5 本章小结	33
第 3 章 层间剪应力分析与层间结合技术	34
3.1 层间剪应力计算与分析	34
3.2 层间结合技术	43
3.3 层间抗剪强度对结构的影响分析	45
3.4 本章小结	50
第 4 章 层间界面剪切疲劳测试与沥青面层厚度设计	51
4.1 层间剪切疲劳测试装置及方法	51
4.2 层间剪切疲劳试验及抗剪强度结构系数	58
4.3 基于层间剪切疲劳的沥青层厚度设计	61
4.4 本章小结	62
第 5 章 黏层及抗裂夹层沥青新材料与性能评价	63
5.1 黏层沥青材料路用性能评价	63
5.2 抗裂夹层沥青新材料研发	75
5.3 抗裂夹层沥青新材料路用性能评价	81
5.4 抗裂夹层材料组成设计	87
5.5 主要指标性能及经济效益分析	94
5.6 本章小结	95
第 6 章 CRC+AC 复合式路面纵向配筋设计与施工技术	97
6.1 现行方法存在的问题及控制指标分析	97

6.2	规范设计方法分析及实例	99
6.3	基于沥青层温度效应的纵向配筋设计方法	104
6.4	配筋施工技术	109
6.5	本章小结	110
第7章	沥青面层疲劳损伤特性及开裂机理	111
7.1	疲劳损伤有限元分析方法	111
7.2	损伤模型及基本假定	120
7.3	温度疲劳损伤特性及开裂机理	123
7.4	荷载疲劳损伤特性及开裂机理	128
7.5	本章小结	132
第8章	CRC+AC 复合式路面沥青面层的裂缝扩展	134
8.1	相关理论及模型参数	134
8.2	沥青面层开裂分析	136
8.3	荷载型裂缝扩展研究	139
8.4	温度型裂缝扩展研究	143
8.5	实体工程裂缝观测与分析	147
8.6	本章小结	153
附录A	刚柔复合式路面结构层厚度设计示例(旧路改造)	155
附录B	刚柔复合式路面结构层厚度设计示例(新建路面)	166
参考文献		175

第 1 章 绪 论

复合式路面是指面层由两种不同材料类型和力学性质的结构层复合而成的路面,刚柔复合式路面一般采用刚性基层与柔性沥青混凝土(AC)面层进行复合,刚性基层主要起承重作用,沥青面层起功能作用。常用的刚性基层为普通水泥混凝土(PCC)、连续配筋混凝土(CRC)、碾压混凝土(RCC)、贫混凝土(LCC)、横缝设传力杆的普通混凝土(JPC)、钢纤维混凝土(SFRC)等。刚柔复合式路面结合刚性路面和柔性路面的特点,是一种使用性能良好的结构形式,具有整体强度高、行车舒适性好、使用寿命长、维修费用低等优点,从长期使用性能来看,经济性也很好。

在我国公路建设高速发展的同时,由于管理上的不完善及运输营运利益的驱使,汽车超载现象十分普遍。高速公路路面的使用寿命经常低于设计使用期,路面的早期损坏给国家造成了极大的经济损失和资源浪费,并引起了全社会的广泛关注,迫切需要提高道路工程的耐久性,促进我国交通运输事业更好地发展。在这种新形势下,要求公路行业走可持续发展的道路,进一步加大科技创新力度,建设运输安全型、质量效益型、资源节约型、环境友好型的公路项目。刚柔复合式路面能充分满足重载交通条件下路面结构的耐久性要求,是我国重载交通高速公路长寿命路面结构的发展方向。

近年来,我国新建与改扩建工程中修筑了较多的刚柔复合式路面,首先是早期修筑了少量的碾压混凝土复合式沥青路面,由于当时的技术水平和结构特点(沥青面层较薄),出现了较多反射裂缝和损坏;再次是原旧水泥混凝土路面改造工程中采用加铺沥青面层的方式,在高速公路和国道主干线工程中应用较多;另外是为改善连续配筋混凝土路面的表面性能,湖南、江苏、河北、上海、山西等省市在新建高速公路中采用 CRC+AC 复合式路面;近年来在重载交通路段开始修筑接缝设传力杆的混凝土复合式路面、贫混凝土复合式路面,隧道中修筑钢纤维混凝土复合式路面,刚柔复合式路面应用越来越广泛,其优点也体现得越来越明显,既充分利用了我国的水泥资源、减少了沥青用量和进口,同时又明显提高了道路的承载能力、延长了使用寿命。2003 年京港澳国家高速公路长潭段修筑了 44.76km 的 CRC+AC 复合式路面,已使用近 10 年,效果

良好。

刚柔复合式路面是弹性半空间地基上的刚性混凝土弹性薄板上覆柔性沥青混凝土弹性层的复杂结构体系,并承受交通荷载和环境温度变化等多种因素的作用。现有工程实践和研究表明,刚柔复合式路面的温度场及车辙变形、层间结构与材料、纵向配筋、沥青面层的损伤开裂、沥青层与刚性层的材料等问题是影响其耐久性的主要因素,考虑到沥青层和刚性层的施工技术与材料的耐久性要求与普通沥青路面和刚性路面基本相同,刚性层的结构层厚度设计方法也已较为成熟,本书不再介绍这些方面的内容,而主要介绍包括以下内容在内的刚柔复合式路面的耐久性理论与技术。

1) 温度效应与车辙变形

刚柔复合式路面中刚性层是主要承重层,沥青面层旨在提高路面的使用性能,但由于沥青层的存在,刚性层温度场的分布规律也与普通混凝土路面有所不同。研究复合式路面结构的温度场,对复合式路面结构的破坏机理及受力特征有重要意义。由于沥青混凝土吸收太阳辐射的能力要高于水泥混凝土,所以当沥青层厚度较小时,刚性层顶面的温度可能会高于无沥青面层时的温度,也就是说,在复合式路面中,沥青层存在一个临界厚度,这一临界厚度对沥青面层的厚度设计有重要意义。分析和研究沥青层厚度与刚性层最大温度梯度的关系,并计算和分析一定温度场下的车辙深度,可为刚柔复合式路面结构层厚度的合理化设计提供参考依据。

2) 层间剪切破坏特性与沥青面层厚度设计

由于沥青面层与混凝土基层的回弹模量相差较大,体积膨胀收缩时变形协调性差,且刚柔复合式路面沥青面层一般不如普通沥青路面的沥青层厚,有时甚至只有薄薄的几厘米,在高温和荷载的长期作用下,沥青的劲度模量降低,黏聚力减小,抗剪强度也随之减少,沥青层尤其是结合界面容易因为抗剪能力不足而引起滑移、开裂和变形等病害;长大纵坡、弯道处的车辆加速、减速频繁,轮胎对路面会产生较大的水平制动力,在沥青面层与刚性结构层之间产生较大的水平剪应力,对于长大纵坡段易出现“U”形滑动开裂(上坡路段出现倒“U”形滑动开裂,下坡路段出现正“U”形滑动开裂)、弯道路段易出现侧向滑移、纵向开裂与变形。

沥青面层的厚度对层间剪应力影响较大,需考虑层间抗剪切设计指标来确定沥青面层的厚度,尤其是考虑刚柔复合式路面在重复荷载作用下的层间剪切疲劳问题。因此,开展刚柔复合式路面的层间剪切疲劳研究,提出基于层间剪切疲劳的沥青面层厚度设计方法,具有理论意义与实用价值。

3) 层间结构与材料及结合技术

刚柔复合式路面的层间剪切破坏主要发生在高温季节,要求层间沥青材料具有良好的高温性能和疲劳性能。目前对刚柔复合式路面层间沥青材料、层间结合技术的研究还不够系统和全面,还需对层间结合技术和层间沥青材料的抗剪性能进行系统研究,并提出适宜的层间结合技术和层间沥青材料。

目前新建的贫混凝土、碾压混凝土、普通水泥混凝土等有接缝的刚性混凝土基层复合式沥青路面,以及旧水泥混凝土路面加铺沥青面层改造的路面结构都易出现反射裂缝,极大地影响路面的使用品质和寿命。为了解决反射裂缝的问题,目前国内外主要采取设置应力吸收层和加筋类材料的方法,但应力吸收层对沥青材料的性能要求很高,普通的改性沥青材料难以满足要求,且应力吸收层只适用于接缝竖向相对位移量小于 0.06mm 的路段,施工要求和条件也较高。加筋类材料主要为玻纤格栅、土工布、沥青油毡等,这些材料对应力有一定的消散作用,但防止反射裂缝的能力有限,而且这些材料如果摊铺不平整或原有的刚性基层不平整,会造成沥青混合料压实度不足等问题。因此,研发一种适用于刚柔复合式路面结构抗裂夹层的沥青材料有十分重要的意义。

4) CRC+AC 复合式路面纵向配筋设计

2011 年 12 月 1 日开始实施的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)相比原规范在连续配筋混凝土路面纵向配筋率设计的相关内容上做了较大修改,但仍然没有 CRC+AC 复合式路面的配筋设计方法。

CRC+AC 复合式路面的配筋设计是保证其使用寿命的重要因素之一,配筋率主要与气候环境和材料特性等因素有关。目前的应用研究和规范一直按 CRCP(连续配筋混凝土路面)的配筋设计方法对 CRC+AC 复合式路面进行配筋设计,未考虑沥青层的影响,其结果必定与实际情况存在着一定的偏差。实际上,由于沥青层的影响,CRC+AC 复合式路面的配筋率可低于普通连续配筋混凝土路面,但低多少还需进一步研究。

纵向配筋是修筑 CRC+AC 复合式路面的关键技术,也是 CRC+AC 复合式路面前期投资成本较高和制约其在我国推广应用的主要原因。考虑到目前 CRC+AC 复合式路面的推广应用主要受到前期投资成本高的影响,且我国仍为发展中国家,进行 CRC+AC 复合式路面纵向配筋率的研究与分析,对 CRC+AC 复合式路面的推广应用和合理设计有一定的意义,也可为桥梁工程、基础工程、岩溶和采空区路基处理工程等混凝土结构的配筋设计提供理论依据,对公路水泥混凝土路面设计规范的重新修订也有一定的参考价值。

5) 沥青面层的疲劳损伤及裂缝扩展

刚柔复合式路面结构复杂且有其自身的特点,刚性基层与沥青面层的模量相差较大,且刚性基层一般有接缝(裂缝),沥青面层易在刚性基层接缝(裂缝)处产生损伤开裂,目前还没有刚柔复合式路面沥青面层疲劳损伤特性及开裂机理等方面的研究,研究刚柔复合式路面沥青面层的疲劳损伤特性和开裂机理可为其设计、施工及日常养护方案的制订等工作提供科学依据,有一定的理论意义和现实意义。

刚柔复合式路面沥青面层在出现疲劳损伤开裂后,由于沥青层较薄,在温度和荷载的共同作用下,裂缝易贯穿整个沥青层,直接影响沥青层的使用寿命。传统的道路工程分析程序,无法解决刚性层带缝状态下复合式路面结构的力学响应,也无法模拟裂缝尖端附近应力与位移场的奇异性,还需深入研究沥青面层的裂缝扩展特征,为刚柔复合式路面沥青层的设计提供有益补充。

从提升和完善刚柔复合式路面耐久性技术的角度出发,在理论和方法上对刚柔复合式路面的温度场及车辙变形、层间结构与材料、纵向配筋、沥青面层损伤开裂等问题进行系统研究,可为刚柔复合式路面的耐久性提升和推广应用提供理论依据,也可为钢桥面及混凝土桥面沥青铺装结构、半刚性基层沥青路面结构的耐久性技术提供参考。

1.1 国内外研究现状

1) 层间剪应力与抗剪性能

国外在层间剪应力与抗剪性能方面的研究主要有:2002~2003年,美国威斯康星州交通部进行了一项课题研究,主要通过试验评估了热拌沥青混凝土的界面黏结与抗剪性能;Salman Hakimzadeh 等人对通过剪切和拉拔试验来评价路面结构层间的抗剪和黏结性能,指出层间抗剪性能对路面结构的开裂、早期疲劳损伤、层间滑移影响非常大,并通过试验提出了层间沥青材料的最佳用量;由 RILEM 组织的 Francesco Canestrari 等人通过室内试验系统研究了沥青路面的层间黏结性能,共有来自 11 个国家的 14 个实验室参与了这项研究,研究中对 1 400 个芯样的最大剪切和扭转荷载及相对位移进行了测试,并确定了层间最大剪切和扭转强度;Mohammad 等人采用旋转压实仪成型试件,利用 Superpave Shear Tester(SST)研究了黏层材料类型、喷洒率和试验温度对层间剪切强度的影响,并通过剪切试验推荐了最佳喷洒量;在英国,现场检测多采用扭剪试验,

2003年,诺丁汉大学的 Collep 等人采用扭剪试验对道路黏结强度进行了研究,并致力于室内黏结强度试验仪器的开发;联合美国交通研究委员会和加拿大安大略交通厅,加拿大卡尔顿大学的 Goodman 和 Bekheet 等人利用扭剪原理研发了一种新型、快速检测剪切强度的仪器 In-Situ Shear Stiffness Test,用来现场检测机场道路的层间黏结强度。

国外学者在计算分析方面的研究主要有:Erkens, S. 等人利用有限元法对沥青路面的层间抗剪性能进行了计算和分析;King 等人采用 BISAR 程序对不同层间接触下的级配碎石基层沥青路面进行了受力分析,认为当层间黏结强度下降 10%时,疲劳寿命将会下降 50%;Roffe 等人采用法国路面设计程序 ALIZE 也进行了类似的受力分析,认为层间接触不足可能会使路面由原来 20 年的设计寿命减少到只有 7~8 年的服务寿命。

国内学者在计算分析方面的研究主要有:胡长顺等人指出层间界面容许剪应力 τ_R 由层间抗剪强度 τ_f 与层间抗剪强度结构系数 K_T 确定,层间抗剪强度结构系数同行车荷载的作用状态有关,并分别建立了正常行驶、缓慢制动和紧急制动状态下层间抗剪强度结构系数与公路等级、累计当量轴次之间的关系式;李盛等人建立了基于裂缝模式的 CRC+AC 复合式路面剪应力有限元计算模型,对沥青面层的层底剪应力进行了计算与分析;王朝辉等人提出了基于剩余寿命的加铺层结构设计方法,完善了旧沥青混凝土路面加铺层结构的设计指标;苏凯根据山区公路沥青路面面层滑移病害的调查结果,并利用多层弹性层状体系的计算程序,分析了路面结构在行车荷载作用下层间剪应力的一般规律;姚占勇等人研究了左右轮下面层剪切疲劳破坏的差异和底基层拉伸疲劳破坏的差异,解释了在道路上总是车轮右侧路面龟裂或裂缝严重的现象。

国内学者在剪切试验方面的研究有:刘朝晖进行了刚柔复合式路面的层间界面抗剪强度试验,提出了层间界面的结构形式与材料要求;顾兴宇等人运用斜剪试验测试了层间黏结材料的抗剪强度;邵显智等人利用单轴贯入法,对沥青混合料的剪切疲劳试验进行了研究,提出了沥青混合料抗剪设计方法;刘丽等人通过直接剪切和直接拉拔试验对层间结构强度进行了研究,提出了层间容许剪应力的计算方法和考虑抗剪强度的沥青路面结构设计方法;苏凯利用课题组自行研制的 DLG-A 路面材料剪切试验仪进行了路面层间滑移的模拟试验,考察了不同的基层、面层类型以及温度条件对层间抗剪能力的影响,提出了防止面层滑移的建议;邵腊庚等人运用美国公路战略研究计划(SHRP)开发的剪切试验仪,对不同沥青混合料在 40℃ 下进行剪切试验,分析和比较了不同集料针叶片含量、沥青结合料、油石比、级配对沥青混合料抗剪性能的影响;王火明等人通过复

合板的室内剪切试验和拉拔试验,对比研究了不同水泥混凝土板界面处理方式、不同防水黏结材料以及界面层沥青用量对界面层强度的影响,得到了界面层抗剪强度与黏结强度之间的相关性。

2) 层间抗裂材料

1998年,美国在密苏里州西北部的 Holt 县铺筑了 SAF(Sand Anti-Fracture)应力吸收层试验段,主要用来减少反射裂缝和沥青加铺层的厚度。2年后,又在 DeKalb 县铺筑了另一条厚 2.5cm 的 SAF 应力吸收层试验路,用来对比分析铺筑 SAF 应力吸收层和未铺筑应力吸收层的路面在防反射裂缝及延长路面使用寿命等方面的作用。

美国科氏(Koch)公司研发的 STRATA 应力吸收层是一种适用于防止反射裂缝的路面结构层,目前已经在美国得克萨斯州、新泽西州、伊利诺伊州、威斯康星州等多个地区中应用。从 2001 年开始,美国科氏材料(中国)公司制定了应力吸收层沥青结合料的技术要求,STRATA 应力吸收层技术在我国开始得到应用。明尼苏达州推出了防反射裂缝沥青砂规范 JSP-97-10,规定了用于应力吸收层的沥青结合料应满足 PG70—34 的分级要求,并需满足测力延度比、老化后弹性恢复、离析以及溶解度等要求。

在国内,李祖仲等人根据旋转压实特性确定压实温度,指出应力吸收层特种改性沥青结合料拌和温度范围在 175~180℃、初压温度在 155~165℃是比较合理的;胡曙光等人通过采用 SBS、增塑剂、增黏剂、增容稳定剂复合改性技术对基质沥青进行改性,制备出了能够满足应力吸收层要求的高弹、高柔、高黏的改性沥青材料;郝培文等人借助荧光显微镜分析应力吸收层中拟采用胶粉沥青的微观结构形态,确定了采用 20 目胶粉制备的改性沥青其技术性能最优,并确定了胶粉的最佳掺量为 18%,胶粉沥青生产时适宜的剪切温度为 170~180℃,适宜的剪切速率是 $7\,000\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,剪切时间为 60min;谭忆秋等人指出沥青性质对应力吸收层沥青混合料的疲劳性能、抗低温开裂性能存在显著影响,沥青不同,应力吸收层混合料的疲劳寿命相差 10~400 倍,低温极限弯曲破坏应变相差 3~6 倍,并指出原样沥青的针入度、60℃黏度、软化点等指标与应力吸收层沥青混合料的疲劳性能之间存在较好的相关性,建议作为选择应力吸收层沥青的关键指标予以控制;吴旷怀介绍了选用黏弹性高的 SBS 改性沥青进行应力吸收夹层(SAMI)沥青混合料配合比设计的全过程,并通过试验研究指出这种材料模量较小、变形能力强、具有良好的防水性能和抗疲劳能力,可作为旧水泥混凝土加铺沥青层的应力吸收层,以延缓反射裂缝的产生;廖卫东通过对应力吸收层沥青混合料疲劳性能、高温车辙和水稳定性能、低温抗裂性能的试验研究,指出其具

有良好的路用性能,且没有降低沥青加铺层路面结构的整体抗车辙能力;周燕、陈拴发研发了高性能 SAMPAVE 改性沥青用作应力吸收层,基于应力吸收层的功能要求,推荐出应力吸收层改性沥青的技术要求,并推荐了应力吸收层沥青混合料高温抗剪指标;高俊启等人设计了包含应力吸收层复合试件的剪切与疲劳试验,指出橡胶沥青洒布量在 $1.8 \sim 3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 间增加时,橡胶沥青应力吸收层的抗剪强度、疲劳能力均增加,但不是线性增加。

3) 沥青面层的温度效应

由于沥青混合料吸收太阳辐射的能力要高于水泥混凝土,所以当 AC 层厚度较小时, CRC 层顶面温度有可能会高于无沥青面层时的温度,也就是说,在 CRC+AC 复合式路面中,沥青层存在一个临界厚度。日本学者认为,当沥青加铺层厚度为 5cm 时,有无沥青层混凝土面层顶面的温度几乎相同。

在理论分析和计算方面, B. Franck 等人分析了因温度变化罩面层底部引起拉应变及车辆荷载通过接缝时,两块板产生挠度引起罩面层的剪应变; H. M. Yin、W. G 等人对复合式沥青路面结构的传热模型进行了研究,提出了刚性路面沥青加铺层结构中周期性非连续传热模型的简化方法,以二元解的位移场为基础,推导出了不同深度下温度裂缝扩展情况的解析解; Minhoto Manuel J C 等人用有限元法建立了沥青路面的三维温度场有限元模型,通过太阳辐射、空气对流和路面辐射实现空气与路面结构的热交换,较精确地预测了沥青路面的内部温度。

对于 CRCP 上加铺沥青层的减薄问题,英国由国家机构颁布的《道路指示 29 号》指出,沥青面层厚度 9cm 等效于有缝混凝土板厚 2.5cm,薄的沥青面层减少了隔热作用,当面层厚度小于 4cm 时,其隔热作用则可能完全没有。

国内部分学者研究了温度对沥青混合料疲劳变形的影响,袁峻等人研究了变温下沥青混合料的剪切疲劳变形,通过典型温度变形叠加方法的比选,建立了变温下沥青混合料剪切疲劳变形的叠加模型;冯俊领提出高温条件下沥青混合料剪切疲劳方程,根据交叉口路面的实际受力状况,提出了相应的沥青混合料抗剪强度评价标准。

在温度场的计算方面,国内学者顾兴宇等人运用传热学原理和有限元方法分析了 CRC+AC 复合式沥青路面的瞬态温度场问题,提出厚度在 4cm 以上的沥青面层均能起到降低 CRCP 表面最大温度的作用;刘朝晖建立了 CRC+AC 复合式路面温度翘曲应力有限元模型,分析了随机横向裂缝条件下、不同裂缝间距时 CRC 板温度应力的最不利位置;陈锋锋分析了 CRC+AC 复合式路面温度

场的分布规律,推导出了 CRCP 最大温度梯度和温度翘曲应力的计算公式;陈志良利用非线性有限元方法,对 CRCP 在温度和湿度变化情况下引起的应力和应变变化及其导致的开裂进行了分析,并进行了应力场和开裂的图形仿真;李嘉等人应用有限元软件对夏季高温条件下 CRCP+AC 复合式路面瞬态温度场进行了模拟,利用温度和结构耦合原理计算了日周期气温下路面结构的温度应力,指出当 AC 层厚度小于 6cm 后,改变 CRC 层厚度对混凝土板温度应力影响不大;李国胜对 PCC+AC 复合式路面的温度场与温度应力进行了研究,指出 PCC+AC 复合式路面水泥混凝土板的温度应力与普通水泥混凝土路面的温度应力有较大不同,且沥青混凝土层厚度的大小直接影响水泥混凝土板温度应力的大小;倪富健等人应用有限元方法对沥青混凝土与连续配筋混凝土复合式路面进行了温度场与疲劳应力分析,提出大于 4cm 的沥青混凝土面层可以有效改善路面的温度场,在受力方面,沥青面层每增加 2cm,可满足 15%~20%的超载要求。

4) CRC 板的纵向配筋设计

AASHTO 2002 设计指南中 CRCP 以冲断和平整度作为基本的设计指标, CRC 板的温度与干缩应力要求将纵向钢筋布置在板厚的中部,同时,纵向钢筋布置得越靠近板顶,越能改善裂缝间距的均匀性和控制裂缝间距,从而减少冲断破坏。然而钢筋布置得位置高会产生施工振捣密实的问题,因此最小的钢筋埋置深度为 $3.5in(9cm)$,最大的埋置深度为中部,不推荐两层配筋结构。Kim, S. M 等人认为, AASHTO 的 CRCP 配筋设计是一种经验法,其优点在于设计变量较少,方法简单实用、结构稳定性好,缺点在于有地域性,许多设计变量未在经验公式中反应。

Hermansson Ake 的研究结果表明: CRC+AC 复合式路面较单一的 CRCP 可节省约 30% 的钢筋用量,并能减少板的温度位移,从而使板的自由边位移减少,且不需端部锚固;美国交通运输委员会的研究结果表明:在美国(主要是寒冷地区) 0.6%~0.8% 的配筋率会产生较好的裂缝开裂模式和结构性能,纵向配筋率是否合适像板厚一样依赖于施工条件和其他设计因素,增加钢筋用量会减少冲断并提高平整度; Kelly L. Smith 等人对 CRCP 作了寿命周期费用分析,指出配筋率从 0.65% 增加到 0.7%, 初期费用增加 1%~2%, 而使用寿命可增加 3~5 年; Chetana 等人针对 CRCP 的冲断破坏,采用 4 节点中厚板单元和液体地基模型,并考虑板边因翘曲及冲刷引起的脱空,提出了基于防止冲断的 CRCP 力学—经验设计法; Jeffery R. Roesler 等人对伊利诺伊州一些州际公路上的 CRCP 早期纵向开裂现象进行了调查和室内试验研究,指出这些纵向裂缝产生

于行车道和超车道,位于纵向钢筋的上方,其产生与 CRCP 施工时钢筋的沉降有关;Erwin R. Kohler 等人对 CRCP 的裂缝宽度进行了细致测量,指出在裂缝表面宽度最大,但宽度最小处既非板底,也非钢筋所在位置;Jeong 等人对混凝土路面使用性能的研究表明:基层侵蚀、集料嵌挤的损失、钢筋锈蚀、过宽的裂缝和其他类型的接缝损坏会减小裂缝的剪切刚度。

我国关于 CRCP 纵向配筋的研究较晚,规范指出:CRCP 的纵向钢筋应采用螺纹钢筋,其直径宜为 12~20mm,距面层顶面不应小于 90mm;间距不大于 250mm,不小于集料最大粒径的 2.5 倍,边缘钢筋至纵缝或自由边的距离一般为 100~150mm;横向裂缝的平均间距不大于 1.8m,钢筋埋置深度处缝隙平均宽度不大于 0.5mm;纵向配筋率根据交通等级宜为 0.6%~1.0%,冰冻地区路面的配筋率宜高于一般地区 0.1%。

在力学计算方面,国内学者黄晓明等人以三向弹簧模拟钢筋和混凝土之间的黏结,认为配筋层位、配筋率等参数对板中加入钢筋前后温度翘曲应力变化的影响可以忽略;田寅春等人将 CRCP 中纵向钢筋作连续化处理,建立了正交各向异性薄膜单元,得到了 CRCP 的两种临界荷位和配筋率等参数对板底应力的影响规律;李盛确定了不同裂缝间距下 CRC+AC 复合式路面的临界荷位,分析了配筋率、配筋位置等因素变化下,结构层厚度与 CRC 层最大主应力之间的关系;白桃等人在有限元分析的基础上,提出了单独板的温缩应力简化公式,指出 CRCP 温缩应力影响因素的重要程度从大到小依次为:温度变化、裂缝间距、板厚、黏结刚度系数、钢筋直径、配筋间距;王衍辉、张洪亮等人运用解析法分析了相邻横向裂缝间 CRCP 的收缩应力,得到混凝土最大收缩应力和裂缝处位移的计算公式和与冲断相关的不同裂缝间距板的疲劳方程,提出给定条件下 CRCP 裂缝主动控制的合理间距为 0.6~1.2m;王斌等人建立了基于有限元的早期行为预测及评价路面路用性能的计算模型,指出钢筋混凝土界面处的黏结与滑移关系对冲断破坏的发生影响显著。

在控制裂缝间距及宽度方面,国内学者左志武采用 Monte-Carlo 的方法,以凝结温度与月平均气温之差的月变化作为环境荷载,采用自编程序对 CRCP 横向开裂进行了预估;赵华等人运用 ANSYS 有限元软件,对双层钢筋混凝土路面结构进行了应力分析,并结合实体工程,指出设置双层钢筋可以有效限制混凝土的裂缝宽度,减小面层开裂;刘寒冰等人建立了 CRCP 在温度变化和混凝土干缩情况下的有限元刚度方程,得出了计算早期裂缝宽度和裂缝间距的有限元解,并指出采用小直径多根数的配筋方式较为合理,且最好在秋季施工;黄卫提出 CRCP 的初期开裂主要是受混凝土材料的物理、化学性质影响,如果在配合比设