



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

长寿命HMAC路面结构设计与应用技术

王修山 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

长寿命 HMAC 路面结构 设计与应用技术

王修山 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对高温重载环境下新型路面结构及路面材料的特殊需求,借鉴国际先进的路面设计理念和材料,结合中国总承包的埃塞俄比亚第一条高速公路——AA高速公路的建设特点,从材料、结构到施工技术的角度,提出了目前适合中国技术规范特点的长寿命高模量沥青路面结构的设计与应用技术。

本书属于学科前沿,图文并茂,便于阅读,共三篇 15 章,主要内容包括长寿命 HMAC 路面材料与结构特性、HMAC 级配碎石基层材料与结构特性及其设计与应用技术。

本书可作为高等院校交通土建工程领域中的公路工程、市政工程、机场工程等专业的研究生教材,也可供道路设计、工程研究、施工及管理的专业技术人员和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

长寿命 HMAC 路面结构设计与应用技术/王修山著. —北京:科学出版社,2017

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-051648-0

I. ①长… II. ①王… III. ①路面设计 IV. ①U416.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 020279 号

责任编辑:裴 育 纪四稳 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 3 月第一次印刷 印张:18

字数:336 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为,博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段,而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚,但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制,成为造就高水平人才的重要途径,它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

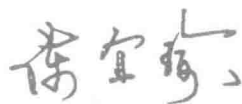
中国博士后制度实施之初,国家就设立了博士后科学基金,专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同,博士后科学基金的资助目标是“人”,也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点,通过竞争申请、独立使用基金,使博士后研究人员树立科研自信心,塑造独立科研人格。经过30年的发展,截至2015年底,博士后科学基金资助总额约26.5亿元人民币,资助博士后研究人员5万3千余人,约占博士后招收人数的1/3。截至2014年底,在我国具有博士后经历的院士中,博士后科学基金资助获得者占72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下,博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书,既是对博士后研究人员创新能力的肯定,也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情,同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播,更好地为社会所利用,进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从2013年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审,评选出博士后优秀学术著作,中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版,统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措,虽然刚刚起步,但是我们对它寄予厚望。希望

通过这项工作,使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略,服务于创新型国家的建设,也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

本书针对高温重载环境下新型路面结构及路面材料的特殊需求,借鉴国际先进的路面设计理念和材料,结合埃塞俄比亚第一条高速公路——AA 高速公路的建设特点,从材料、结构到施工技术的角度,提出目前适合中国技术规范特点的长寿命高模量沥青路面结构的设计与应用技术。全书分为三篇。第一篇共 6 章,阐述长寿命 HMAC 原材料基本性质、高模量沥青碎石专用外加剂的研发、HMAC 配合比设计及路用性能等。第二篇共 4 章,详细阐述 HMAC 级配碎石基层材料优选和级配、结构力学性能的试验验证。第三篇共 5 章,具体介绍长寿命 HMAC 的设计与应用技术,包括其路面面层和级配碎石基层施工工艺及性能检测、结构设计的控制指标以及国内外施工实例。

本书内容属于学科前沿,研究成果以及提出的理论、方法、规划在中国总承包建设的埃塞俄比亚 AA 高速公路上得以应用和验证,学术成果被认可。本书可作为高等院校交通土建工程领域中的公路工程、市政工程、机场工程等专业的研究生教材,也可作为设计、科研、施工、监理等技术人员的参考用书。

本书由浙江理工大学王修山撰写。研究期间,多次承蒙中交第一公路勘察设计研究院博士后站的两位导师——中交第一公路勘察设计研究院总工程师丁小军高工(教授级)和长安大学公路学院院长谢永利教授(联合培养)的指教。本书具体试验和实施过程中,中交第一公路勘察设计研究院原路面所同事李刚、陈团结、陈实、张涛、张桂霞、雷宇、张冬梅、李智等给予了大力配合。在本书撰写过程中,也得到了长安大学研究生部、公路学院多位老师的热心协助,在此对他们表示深深的谢意。感谢凡涛涛博士和张小民博士对本书研究的无私帮助,感谢长安大学理学院封建湖院长给予理论计算方面的指导和帮助,同时也感谢王端端、杜艳艳、黎鸣、李浩等师弟、师妹对本书所做的书写校正工作。

在本书撰写过程中,参考了有关专家、学者的论著、论文和教材,吸取了一些最新的研究成果,在此表示衷心的感谢。

由于作者学识和经验有限,书中难免存在不足之处和尚待探讨的问题,恳请有关专家、学者和广大读者批评指正。

作 者

2015 年 12 月

目 录

《博士后文库》序言

前言

绪论	1
0.1 历史背景	1
0.2 国内外概况	2

第一篇 长寿命 HMAC 路面材料与结构特性

第 1 章 原材料基本性质	11
1.1 沥青	11
1.2 集料	11
1.2.1 粗集料	11
1.2.2 细集料	12
1.2.3 矿粉	12
1.3 岩沥青	12
1.4 外加剂	14
第 2 章 高模量沥青碎石专用外加剂	15
2.1 HMAC 概况及外加剂种类的选择	15
2.1.1 HMAC 概况	15
2.1.2 制备方法 & 外加剂种类	16
2.1.3 高模量外加剂开发方向选择	19
2.2 岩沥青的化学组分与微观分析	19
2.2.1 岩沥青四组分试验	19
2.2.2 岩沥青元素组成分析	20
2.2.3 岩沥青红外光谱分析	21
2.3 改性沥青试验与性能指标研究	22
2.3.1 正交试验法确定最佳生产工艺	23
2.3.2 外加剂配方研究	24

2.3.3	外加剂最佳掺量确定	27
2.3.4	沥青性能试验结果与分析	28
第3章	HMAC 配合比设计	34
3.1	集料级配	34
3.1.1	集料的最大粒径	34
3.1.2	集料的级配选择	34
3.2	配合比设计及最佳油石比确定	35
第4章	HMAC 路用性能	37
4.1	马歇尔稳定度	37
4.2	抗压回弹模量	38
4.2.1	试验方法	38
4.2.2	试验结果与分析	38
4.3	劈裂强度	40
4.3.1	试验方法	40
4.3.2	试验结果与分析	40
4.4	动态模量	41
4.4.1	试验方法	43
4.4.2	试验结果与分析	44
4.5	高温稳定性能	47
4.5.1	试验方法	47
4.5.2	试验结果与分析	47
4.6	水稳定性能	48
4.6.1	试验方法	49
4.6.2	试验结果与分析	49
4.7	抗疲劳性能	50
4.7.1	试验方法与理论分析	50
4.7.2	试验结果与分析	53
4.8	岩沥青再生性能评价	54
4.8.1	试验原材料及方法	54
4.8.2	针入度评价再生性能	54
4.8.3	软化点评价再生性能	55

4.8.4 延度评价再生性能	56
4.9 低温性能	57
4.9.1 试验方法	57
4.9.2 试验结果与分析	60
第5章 HMAC路面疲劳断裂分析	61
5.1 开裂	61
5.2 HMAC路面结构应力强度因子计算分析	62
5.2.1 路面结构有限元计算模型	62
5.2.2 HMAC层内反射裂缝中应力强度因子的变化规律	64
5.2.3 上面层内反射裂缝中应力强度因子的变化规律	68
5.2.4 静态和动态荷载作用下应力强度因子比较	69
5.3 HMAC疲劳断裂参数分析	71
5.3.1 沥青混凝土小梁应力强度因子的计算	71
5.3.2 沥青混合料疲劳断裂参数的拟合	73
5.4 HMAC疲劳寿命预估	75
5.4.1 裂缝疲劳扩展寿命计算模型	75
5.4.2 HMAC路面疲劳寿命的计算	77
5.4.3 疲劳断裂参数对裂缝扩展寿命的影响	78
第6章 HMAC路面永久变形分析	81
6.1 车辙	81
6.1.1 车辙产生机理及影响因素	82
6.1.2 沥青路面车辙的控制指标和标准	84
6.1.3 沥青路面车辙预估	87
6.2 路面结构计算模型的建立	90
6.3 路面材料设计参数的确定	93
6.3.1 沥青混合料参数	93
6.3.2 HMAC蠕变试验	95
6.3.3 基层及土基材料参数	99
6.3.4 不同材料路面层的永久变形	99
6.4 不同轴载作用下的永久变形	102
6.5 不同行车速度下的永久变形	102

6.6	高模量沥青路面永久变形限值	103
6.7	不同路面结构类型的性能分析	104
6.7.1	路面结构参数	104
6.7.2	车辙变形量预估	105
6.7.3	疲劳寿命预估	105

第二篇 HMAC 级配碎石基层材料与结构特性

第7章	级配碎石基层材料级配	109
7.1	级配碎石	109
7.2	材料的物理技术指标	109
7.2.1	材料类型的选取	109
7.2.2	材料强度	109
7.2.3	集料形状、构造	109
7.2.4	含水量	109
7.2.5	含泥量	110
7.2.6	液限、塑限指数	110
7.3	影响级配碎石材料性能因素分析	110
7.3.1	抗压强度	110
7.3.2	剪切强度	110
7.3.3	永久变形	111
7.3.4	体积耐久性和稳定性	111
7.3.5	级配碎石和级配砾石之间的性能差异	111
7.4	级配碎石力学指标	111
7.4.1	摩尔-库仑破坏准则	111
7.4.2	力学指标	112
7.5	级配碎石级配及其范围	113
7.5.1	级配类型分析	113
7.5.2	成型方法	113
7.5.3	级配碎石级配设计原则	113
7.5.4	规范规定级配碎石级配	113
7.5.5	基于填充嵌挤的级配设计	114

7.6 试验结果及分析	117
7.6.1 原材料技术性质	117
7.6.2 一级填充试验	117
7.6.3 二级及进一步填充试验	119
7.6.4 粗、细集料级配合成	125
7.7 级配碎石的力学性能试验	126
7.7.1 不同成型方式下最佳含水量和最大干密度	127
7.7.2 成型方式对混合料 CBR 的影响	127
7.7.3 不同级配对混合料车辙的影响	128
第 8 章 级配碎石动态三轴试验研究	130
8.1 成型试件	130
8.2 试验方法	131
8.3 回弹模量试验数据计算处理	133
8.3.1 回弹模量的计算	133
8.3.2 第一应力不变量的计算	134
8.3.3 回弹模量与各应力和加载次数的关系	134
8.4 级配碎石回弹模量影响因素分析	135
8.4.1 偏应力及围压对回弹模量的影响	135
8.4.2 回弹模量与第一应力不变量的关系	136
8.4.3 级配对回弹模量的影响	138
8.4.4 回弹模量与加载次数的关系	139
8.4.5 含水量对回弹模量的影响	139
8.5 级配碎石永久变形试验结果及分析	140
8.5.1 应力对级配碎石粒料永久变形的影响	141
8.5.2 含水量对级配碎石粒料永久变形的影响	142
8.5.3 级配类型对级配碎石粒料永久变形的影响	143
第 9 章 级配碎石粒料层永久变形	145
9.1 松散粒料层永久变形预估模型	145
9.2 松散粒料层永久变形预估模型的评价	148
9.3 松散粒料层永久变形预估模型的选择	149
9.4 级配碎石粒料层永久变形预估模型的建立	149

9.4.1	永久变形试验结果分析与处理	149
9.4.2	非线性最小二乘法的应用	149
9.4.3	永久变形曲线的多参数非线性拟合步骤	151
9.4.4	永久变形曲线的多参数分析拟合	151
9.4.5	永久变形曲线的分析与拟合结果	152
9.4.6	永久变形预估结果的可靠性分析	158
9.5	级配碎石粒料层永久变形计算	158
9.5.1	粒料层永久变形计算方法	158
9.5.2	建立粒料层永久变形模型预估公式	159
9.5.3	粒料层永久变形量预估结果	160
9.5.4	粒料层永久变形量计算回归公式	163
9.6	级配碎石粒料层永久变形预估模型的修正	164
第 10 章	级配碎石基层结构受力分析	166
10.1	路面结构	166
10.1.1	计算理念	166
10.1.2	计算模型	168
10.1.3	结构参数	168
10.2	高模量沥青路面结构受力分析	169
10.2.1	各结构层受力分析	169
10.2.2	结构层影响因素关联分析	173
10.3	路面结构参数对级配碎石层回弹模量的影响	175

第三篇 HMAC 级配碎石路面设计与应用技术

第 11 章	HMAC 路面面层铺筑及性能检测	181
11.1	国内 HMAC 路面的铺筑与性能检测	181
11.1.1	荷关高速公路新建工程	181
11.1.2	乐宜高速公路新建工程	181
11.2	国外 HMAC 路面的铺筑与性能检测	182
第 12 章	HMAC 路面施工工艺控制	187
12.1	材料	187
12.1.1	沥青	187

12.1.2 集料	188
12.1.3 外加剂	189
12.2 集料的生产与储存	189
12.3 配合比设计	191
12.4 施工机械与质量检测仪器的准备	193
12.5 交通运输	195
12.6 下卧层准备	195
12.7 水准点布设	196
12.8 试验段铺筑	196
12.9 最终施工工艺的确定	196
12.10 正式施工	197
12.11 混合料的拌制	197
12.12 混合料的运输	200
12.13 混合料的摊铺	202
12.14 混合料的压实成型	203
12.15 施工缝的处理	204
12.16 施工质量管理	204
第13章 级配碎石基层施工工艺及性能检测	207
13.1 试验路工程	207
13.1.1 工程简介	207
13.1.2 试验路工程设计	207
13.2 施工前准备工作	208
13.2.1 原材料	208
13.2.2 压实机械的选择	209
13.2.3 配料流程	210
13.2.4 级配碎石的运输	210
13.3 施工工艺试验	211
13.3.1 级配碎石闷料时间的确定	211
13.3.2 级配类型的选择	212
13.3.3 碾压施工工艺确定	212
13.3.4 松铺系数的测定	213

13.4 级配碎石施工工艺	214
13.4.1 级配碎石的摊铺	215
13.4.2 级配碎石的碾压	216
13.5 成型后的管理	218
13.6 质量检测	219
第 14 章 HMAC 路面结构设计	220
14.1 现有设计方法的局限性	220
14.1.1 国内沥青路面设计方法	220
14.1.2 法国沥青路面设计方法	224
14.2 HMAC 路面主要破坏类型	228
14.2.1 疲劳开裂	228
14.2.2 车辙	229
14.3 HMAC 路面设计指标	229
14.3.1 设计指标	229
14.3.2 验算指标	230
14.4 结构层组合设计	230
14.4.1 沥青上面层	230
14.4.2 HMAC 层	230
14.4.3 基层	232
14.4.4 底基层	232
14.5 设计步骤	233
14.6 设计示例	234
14.7 HMAC 路面适用条件	237
第 15 章 设计实例——埃塞俄比亚 AA 高速公路	240
15.1 项目简介	240
15.1.1 项目概况	240
15.1.2 路面设计及施工所采用的技术规范	240
15.1.3 路面结构类型	240
15.1.4 紧急停靠带	242
15.1.5 中央分隔带及开口	242
15.2 沥青路面	242

15.2.1 主线路面	242
15.2.2 起点连接线及互通立交匝道路面	248
15.2.3 其他道路的路面结构	248
15.2.4 路缘石	250
15.3 水泥混凝土路面结构	250
15.3.1 收费站路面结构	250
15.3.2 路面各结构层的主要技术指标要求	251
15.3.3 路面结构层材料要求	251
15.3.4 路面结构层级配	252
15.3.5 水泥混凝土路面接缝	253
15.4 路面排水	253
15.4.1 一般路段路面排水	254
15.4.2 超高路段路面排水	254
15.4.3 中央分隔带排水	254
15.5 路面施工注意事项	254
15.6 中央分隔带绿化设计	255
15.6.1 中央分隔带绿化设计说明	255
15.6.2 施工要求	256
15.6.3 养护管理	256
15.7 技术特点及经济性分析	257
15.7.1 概述	257
15.7.2 高模量沥青稳定碎石基层的经济性分析	259
15.7.3 高模量沥青碎石路面综合性分析	261
参考文献	264
编后记	267

绪 论

0.1 历史背景

近年来我国公路建设在有力地推动社会和经济的发展,同时也使交通运输结构发生了巨大的变化,公路承担的交通运输量越来越多,超、重载问题越来越严重,使得路面使用寿命越来越短。很多高等级公路在刚建成通车不久就出现了病害,如车辙、断裂、拥包以及路面沉陷等,使其使用性能迅速恶化,道路服务质量受到极大影响。许多公路在运营了一定时期后都逐渐面临着养护、改建等问题^[1,2]。

日益繁重的交通量对沥青面层材料的路用性能提出了更高的要求。目前,车辙是高等级公路的常见病害类型,其主要来源于高温重载情况下,车辆行驶时会对路面结构内部产生较大的剪应力,使得路面形成流动型车辙;同时在重载车辆重复荷载作用下,路面会被过分压密而出现变形形成压密型车辙。为了解决这些问题,国内外研究人员采用了多种途径,包括研制新型道路材料和调整新的道路结构形式等。而在材料方面,如何突破使用改性沥青这种常规途径,提高道路结构的整体刚度,改善路面材料的抗车辙性能,是我国道路工程研究人员一直致力于研究的问题。

随着交通量的逐年增加,疲劳开裂也成为高等级公路的主要病害类型之一,在车辆荷载的反复作用下,沥青面层出现开裂并逐渐扩展,导致结构层发生松散、断裂。这是因为沥青面层作为柔性结构,位于路面结构的最上部,直接承受车辆轮胎的压实和冲击作用,在使用一段时期后,沥青混合料内部损伤逐渐迅速发展,致使沥青面层力学性能衰退,在反复的荷载作用下开始出现变形和开裂等病害,因此沥青层必须具备良好的抗疲劳性能,才能满足交通量的需求。

根据国外使用经验,提高沥青混凝土材料模量的途径有很多,例如,使用低标号沥青、添加外掺剂等,对于目前存在的各种方法,需要通过系统的配合比设计和路用性能验证,分析现阶段这些方法的适用性,要求沥青混凝土在模量提高的同时仍能够满足其他路用性能的要求。

在国内外研发使用的各种新型路面材料中,高模量沥青混凝土(high modulus asphalt concrete, HMA)的理念已经越来越受到人们的关注。其设计思想是增大沥青混凝土的抗压回弹模量,减少因车辆荷载作用产生的永久变形,增强路面抵抗高温变形的性能,降低车辙深度,延迟车辙病害发生的时间,增加路面的服务年限。

长寿命 HMA 路面由于采用了先进的永久性路面(perpetual pavement)设计