



交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

王旭东 张 蕾◇著

基于骨架嵌挤型原理的

Multi-performance Design of
Hot Mix Asphalt Based on
Stone Interlock Structure Theory

沥青混合料均衡设计方法



人民交通出版社
China Communications Press



交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

王旭东 张 蕾◇著

基于骨架嵌挤型原理的

Multi-performance Design of
Hot Mix Asphalt Based on
Stone Interlock Structure Theory

沥青混合料均衡设计方法



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书作者及所带领的课题组十多年来承担了一系列国家及省部级科研项目,先后在北京、广东、广西、山东、河北、内蒙古、黑龙江、四川、贵州、武汉、浙江等地区修建了一系列的试验路和实体工程,在这些科研项目和实际工程中,针对不同岩性的矿料、不同品质的沥青和不同粒径的矿料级配,以粗集料断级配沥青混合料为代表,进行了大量的配合比设计研究和应用。本书在此基础上以体积设计为核心,探讨沥青混合料的设计规律,主要内容有矿料级配的构成规律、混合料体积指标的试验方法、新型体积设计方法——最紧密状态设计方法、相关混合料体积性能和路用性能的关系,以及针对特殊使用功能的特殊沥青混合料设计方法的优化。

本书适合从事沥青路面材料与结构研究的人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

基于骨架嵌挤型原理的沥青混合料均衡设计方法/

王旭东,张蕾著. — 北京:人民交通出版社,2014.5

(交通运输行业高层次人才培养项目著作书系)

ISBN 978-7-114-11363-5

I. ①基… II. ①王…②张… III. ①沥青拌和料—设计 IV. ①U414.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 073885 号

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

书 名: 基于骨架嵌挤型原理的沥青混合料均衡设计方法

著 作 者: 王旭东 张 蕾

责任编辑: 周 宇 黎小东

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 25

字 数: 580 千

版 次: 2014 年 5 月 第 1 版

印 次: 2014 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11363-5

定 价: 75.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系 编审委员会

主 任:杨传堂

副主任:戴东昌 周海涛 徐 光 王金付
陈瑞生(常务)

委 员:李良生 李作敏 韩 敏 王先进
石宝林 关昌余 沙爱民 吴 澎
杨万枫 张劲泉 张喜刚 郑健龙
唐伯明 蒋树屏 潘新祥 魏庆朝
孙 海



书系前言

Preface of Series

进入 21 世纪以来,党中央、国务院高度重视人才工作,提出人才资源是第一资源的战略思想,先后两次召开全国人才工作会议,围绕人才强国战略实施做出一系列重大决策部署。党的十八大着眼于全面建成小康社会的奋斗目标,提出要进一步深入实践人才强国战略,加快推动我国由人才大国迈向人才强国,将人才工作作为“全面提高党的建设科学化水平”八项任务之一。十八届三中全会强调指出,全面深化改革,需要有力的组织保证和人才支撑。要建立集聚人才体制机制,择天下英才而用之。这些都充分体现了党中央、国务院对人才工作的高度重视,为人才成长发展进一步营造良好的政策和舆论环境,极大激发了人才干事创业的积极性。

国以才立,业以才兴。面对风云变幻的国际形势,综合国力竞争日趋激烈,我国在全面建成小康社会的历史进程中机遇和挑战并存,人才作为第一资源的特征和作用日益凸显。只有深入实施人才强国战略,确立国家人才竞争优势,充分发挥人才对国民经济和社会发展的重要支撑作用,才能在国际形势、国内条件深刻变化中赢得主动、赢得优势、赢得未来。

近年来,交通运输行业深入贯彻落实人才强交战略,围绕建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通的战略部署和中心任务,加大人才发展体制机制改革与政策创新力度,行业人才工作不断取得新进展,逐步形成了一支专业结构日趋合理、整体素质基本适应的人才队伍,为交通运输事业全面、协调、可持续发展提供了有力的人才保障与智力支持。

“交通青年科技英才”是交通运输行业优秀青年科技人才的代表群体,培养选拔“交通青年科技英才”是交通运输行业实施人才强交战略的“品牌工程”之一,1999 年至今已培养选拔 282 人。他们活跃在科研、生产、教学一线,奋发有为、锐意进取,取得了突出业绩,创造了显著效益,形成了一系列较高水平的科研成果。为加大行业高层次人才培养力度,“十二五”期间,交通运输部设立人才培养专项经费,重点资助包含“交通青年科技英才”在内的高层次人才。

人民交通出版社以服务交通运输行业改革创新、促进交通科技成果推广应

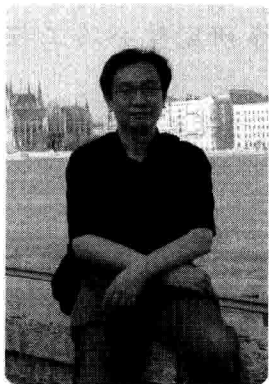
用、支持交通行业高端人才发展为目的,配合人才强交战略设立“交通运输行业高层次人才培养项目著作书系”(以下简称“著作书系”)。“著作书系”面向包括“交通青年科技英才”在内的交通运输行业高层次人才,旨在为行业人才培养搭建一个学术交流、成果展示和技术积累的平台,是推动加强交通运输人才队伍建设的重要载体,在推动科技创新、技术交流、加强高层次人才培养力度等方面均将起到积极作用。凡在“交通青年科技英才培养项目”和“交通运输部新世纪十百千人才培养项目”申请中获得资助的出版项目,均可列入“著作书系”。对于虽然未列入培养项目,但同样能代表行业水平的著作,经申请、评审后,也可酌情纳入“著作书系”。

高层次人才是创新驱动的核心要素,创新驱动是推动科学技术发展的不懈动力。希望“著作书系”能够充分发挥服务行业、服务社会、服务国家的积极作用,助力科技创新步伐,促进行业高层次人才特别是中青年人才健康快速成长,为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通作出不懈努力和突出贡献。

交通运输行业高层次人才培养项目
著作书系编审委员会
2014年3月

作者简介

Author Introduction



王旭东,交通运输部公路科学研究院研究员,博士生导师,1991年毕业于上海同济大学公路与城市道路专业,同年考入交通部公路科学研究所,师从沙庆林院士,1995~1998年,于东南大学获道路与铁道工程专业博士学位,师从邓学钧教授。

20余年来,一直从事沥青路面材料与结构的研究工作,对沥青混合料材料设计、沥青混合料动态响应行为有较深入的研究。先后承担了30余项相关重大科研攻关课题,领导团队完成奥运工程、国庆长安街改造工程、交通运输部科技示范工程、国家科技支撑建设工程以及西部省份跨越式发展建设项目等。制定了我国首部橡胶沥青技术标准,形成自主知识产权的中国高性能橡胶沥青路面修筑成套技术,取得了显著的社会经济效益。出版《沥青路面材料动力特性与参数》、《橡胶沥青及混合料应用成套技术》2部学术专著,主持编制行业标准5项,行业规范2项。

2003年入选交通部首批“新世纪十百千人才工程”第一层次人选,2006年获得第一届中国公路学会“青年科技奖”,2007年荣获第十届“中国青年科技奖”。现为中国公路学会会员,交通运输部青年专家委员会委员。

作者简介

Author Introduction



张蕾,交通运输部公路科学研究院公路工程研究中心副研究员,博士。

主要研究方向为沥青混合料设计理论、沥青混合料及其原材料的图像采集分析及动态性能研究,橡胶沥青混凝土技术研究。

参加工作以来,先后主持交通运输部西部建设科技项目1项,交通运输部应用基础研究项目(重点平台)1项,中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目1项,北京市交通委员会科研项目1项。参与国家科技支撑项目2项,省部级科研项目5项。获省部级奖励4项,其中一等奖1项,二等奖2项,三等奖1项。发表论文20余篇,获国家发明专利6项。



前 言

Foreword

沥青混合料作为沥青路面结构中的重要材料,对改善沥青路面使用性能,提升路面结构整体的耐久性起到关键性作用。然而,由于使用环境的复杂和交通荷载的变化,加之沥青混合料本身固有的黏弹塑性的力学响应特征,导致其路用性能的变化是多样的。当在严寒的冬季,沥青混合料表现出较高的劲度和脆性损伤,在高温的夏季,又表现出明显的黏弹特性和塑性损伤;当用于表面层时,抗滑、抗车辙、抗开裂、降低行车噪声是其基本的性能要求,当用于中下面层时,抗变形、抗水损坏、抗疲劳是其典型的技术要求。因此,沥青混合料服役行为的设计研究是一个复杂的多学科交叉的科学技术问题。

沥青混合料是一种多孔、离散、非均质的材料,它是由具有典型非牛顿流体特征的沥青和不同尺寸,不同物理、力学性质的无机矿料组成的。其作为沥青路面的主要结构、功能型材料,在长期的使用过程中,承受着繁重、随机的荷载以及复杂多变的自然环境的作用,其力学响应和环境响应状态十分复杂,对其力学本构关系至今仍没有十分清晰的描述。

同时,为了满足沥青路面安全、舒适、耐久、环保等服役功能的要求,需要沥青混合料具有良好的抗疲劳能力、高温稳定性、低温抗裂性和抗水损坏等多元化的技术性能,从而导致沥青混合料性能要求的多元化。

对于相同的沥青混合料,由于使用环境和交通条件的不同,其技术性能的要求存在显著的差异。例如,对于一般交通和重载交通,相同类型混合料的高温稳定性要求是不同的;在我国北方严寒地区和南方高温潮湿地区,混合料的性能要求也是不同的。因此,沥青混合料应根据实际需求,改进设计方法、调整设计指标。

另一方面,实践表明,由于材料的非线性和性能要求的多样性,任何一种沥青混合料都难以实现各种性能的最优化,一是经济上并不合理,二是技术难度也很大,也没有这个必要。对于不同地区、不同工程的沥青混合料,其技术要求各有侧重,即使对于同一地区的同一个路面结构,由于混合料所处的层位不同,其使用功能要求也有所差别。因此,针对实际使用功能的需求,平衡多元化的材料



性能要求,实现混合料性能的均衡设计是沥青混合料设计发展的主要方向之一。

国际上沥青混合料设计方法的研究及应用已有近百年的历史。不同国家和地区根据自身的技術需求和經驗,提出了多种具有不同技术特点的沥青混合料设计方法,如马歇尔设计方法、维姆设计方法、法国沥青混合料设计方法、美国 Superpave 设计方法、GTM 设计方法等。

在我国,伴随着我国公路建设的快速发展,近 30 年来沥青混合料设计技术水平快速提升。20 世纪 80 年代,我国刚开始修建京津塘高速公路时,采用了马歇尔设计方法,由于该方法操作简单、工程概念清晰,至今仍是我国沥青混合料设计的主要方法。

到了 90 年代中后期,美国 Superpave 的沥青混合料设计技术被引入我国,其中一系列的新理念、新方法、指标被我国沥青路面设计人员学习、使用。经过近 10 余年的实践检验和评价,其方法中的设计空隙率概念和旋转压实试验对我国沥青混合料设计产生显著的影响。

与此同时,产生于 20 世纪 50 年代的美国工程兵的旋转压实设计方法 (GTM) 也被引入我国,这是一种基于力学指标的混合料设计方法。其抗剪强度指标的概念对我国重载交通条件下沥青混合料设计方法的完善起到积极的促进作用。

21 世纪初,美国“贝雷 (Baily)”级配设计和检验方法也被引入我国,其中矿料级配间断性的检验方法进一步完善了粗集料断级配在实际工程中的应用。

从 20 世纪 80 年代末开始,沙庆林院士以粗集料断级配密实性沥青混合料为对象,开展适用于我国重载交通使用环境的沥青混合料设计方法研究,到 2003 年,最终提出了“SAC 型沥青混合料”的设计方法。此外,90 年代末,张肖宁教授还提出了主集料空隙填充的 CAVF 沥青混合料级配构成和设计方法。

总体来说,随着我国高速公路建设的发展,在汲取国外先进经验的同时,我国沥青混合料的设计理论和方法得到了长足的发展。然而,由于沥青混合料本身性能的复杂性和使用要求的多元化,沥青混合料设计方法的研究仍将是未来几十年国际道路工程界主要的研究方向之一。例如:美国 NAPA 在沥青路面技术发展路线图中,仍将新型的沥青混合料设计方法的研究作为未来 50 年的主要研究目标之一。

当前国内外沥青混合料设计方法大致可分为两大类:一是体积设计方法,二是力学设计方法,其中体积设计方法是主流。所谓的体积设计方法,是以混合料体积性能分析为基础,进而评价、预估混合料的各种路用性能。尽管这些设计方法的原理、指标不同,设计结论也不尽相同,但所有这些设计方法都有一个共同点,就是在一个“标准状态”下评价沥青混合料的性能指标,进而进行比选和优化。

体积设计方法是以混合料的体积性能指标表示混合料的“标准状态”。而确定混合料体积标准状态的前提是混合料密度的测量。然而,无论从理论分析还是实际操作都证明,目前的试验和计算方法都只能得到一个近似的混合料密度,其真实值是多少还难以确定。再者,随着粗集料断级配沥青混合料的广泛使用,混合料骨架嵌挤问题引起广泛重视,但是什么是混合料的“骨架”与“嵌挤”、其内在含义是什么、两者之间的相互关系是什么等这一系列的基础概念和技术指标至今仍不明确。另外,目前国内外不少设计方法采用设计空隙率评价混合料的标准体积状态,进而确定油石比,然而,设计空隙率的随意性和矿料级配的影响,导致混合料油石比的确定缺乏一个客观的标准。针对这些问题的探讨与研究,将有助于完善我国沥青混合料的设计方法,提升混合料的技术性能。

此外,需要客观看待混合料体积性能与路用性能之间的辩证关系。尽管当前体积设计方法是国际上沥青混合料设计的主流方法,但是大量的实践表明,混合料体积指标的最佳并不意味着混合料路用性能的最佳。因为混合料体积性能的“最佳”是相对的,不同的体积指标可以表征不同的体积最佳状态,而路用性能的“最佳”则是绝对的,不同的性能要求所对应的体积状态是不同的。关于这方面的问题至今还没有明确的结论,这也是沥青混合料设计复杂性的另一个表现。

因此,面对复杂、多变的使用环境要求,应树立沥青混合料均衡设计的思想。鉴于目前的设计水平,还难以实现沥青混合料各项性能指标都达到最优化的目标,实际上也没有必要。关键是针对客观使用要求,在提升混合料某个技术性能的前提下,保证其他技术指标不降低。以矿料级配的优化为出发点,完善混合料设计方法为手段,是实现沥青混合料均衡设计的有效措施。

本书以沥青混合料体积设计为核心,以其相关体积指标和参数的试验分析为基础,以沥青混合料两类体积状态划分和表征为重点,提出了一种基于最紧密状态的改进型沥青混合料体积设计方法,并以此为基础,研究探讨了几种典型沥青混合料的性能均衡设计方法。

本书主要分为以下几个部分:

第一部分,从矿料的几何特征分析出发,系统提出了“三控制点、双曲线”的间断级配构成模型,探讨了级配间断性的评价手段,进而分析了矿料结构的骨架表征以及相关矿料间嵌挤能力的评价方法与指标。

第二部分,主要讨论了沥青混合料的各项体积指标特性,将描述沥青混合料体积性能的指标分为三个层次——一次体积指标、二次体积指标和三次体积指标。对于一次体积指标——理论密度和毛体积密度,分析了当前各种主要的密度测量方法,从测量原理、测量方法及其可靠性等方面进行比较,确定了相对标准的测试方法。对于混合料的二次体积指标,将其分为描述混合料密实性(以空

隙率为代表)和紧密性(以矿料间隙率为代表)的两大类;研究了描述沥青与矿料之间相互作用的三次体积指标。对于每一项内容,书中都通过大量的试验数据,分析了压实方法、压实功、试验温度、矿料级配等对混合料体积指标特性的影响。

第三部分,根据以上研究的结论,提出了一种新型的沥青混合料体积设计方法——基于最紧密状态的混合料设计方法。这种方法与传统的基于设计空隙率的设计方法相比,更为客观地反映了矿料级配的特征。在此基础上,详细探讨了混合料典型路用性能——高温性能、水稳定性、低温抗裂性以及抗疲劳特性。最后,建立了较为完整的粗集料断级配沥青混合料的设计体系,提出相应的低强度等级、大粒径高模量沥青混凝土,改进 SMA,橡胶沥青混凝土,应力吸收层沥青混凝土,多孔隙沥青混凝土,超薄沥青混凝土等特殊功能沥青混合料的设计方法。

在本书的编写过程中,周兴业博士等做了大量的辅助工作,李福建、刘小滔、张晨晨硕士提供了一些必要的基础试验数据,同时,张宇、薄京喜、沈国辉、谢国瑞、赵禧等同志为本书中的有关试验提供了帮助,在此一并表示感谢。

作 者
2014 年 3 月

符号与代号

Symbols

- P_{ca} ——粗集料含量(以质量计,%)
 P_{fa} ——细集料含量(以质量计,%)
 P_{fi} ——矿粉含量(以质量计,%)
 γ_i, γ_{sb} ——矿料毛体积(相对)密度
 γ_{sg} ——矿料表干(相对)密度
 γ_i', γ_{sa} ——矿料表观(相对)密度
 P_i ——各种矿料成分的比例(%),其和为100%
 $\gamma_{sb,ca}$ ——粗集料的毛体积(相对)密度
 γ_{DRC} ——粗集料的干捣实密度(g/cm^3)
 $\gamma_{sb,fa}$ ——细集料的毛体积(相对)密度
 $\gamma_{sa,fi}$ ——矿粉的表观(相对)密度
 γ_b ——沥青(相对)密度
 γ_{se} ——矿料有效(相对)密度
 γ_{sb} ——矿料合成毛体积(相对)密度
 γ_{sa} ——矿料合成表观(相对)密度
 C ——矿料的沥青吸收系数
 W_x ——合成矿料的吸水率(%)
 w ——矿料的吸水率(%)
 P_a ——油石比(%)
 P_b ——沥青含量(%)
 P_s ——混合料中的矿料含量(%)
 AC_{opt} ——最佳油石比(%)
 G_b ——沥青混合料的(相对)理论密度
 G_m ——混合料的毛体积密度(g/cm^3)
 $G_{m,s}$ ——混合料中全部矿料的毛体积密度(g/cm^3)
 $G_{b,ca}$ ——混合料中粗集料的毛体积密度(g/cm^3)
 $G_{g,m}$ ——混合料的干密度(g/cm^3)
VMA——矿料间隙率(%)
VV——空隙率(%)

- VV_{in} ——混合料试件的闭口空隙率(%)
 VV_{out} ——混合料试件的开口空隙率(%)
 VV^D ——设计空隙率(%)
 S_a ——试件的吸水率(%)
 S_{a-u} ——试件非饱和状态下的单位吸水率(%)
 S_{va} ——试件真空饱水状态下的吸水率(%)
 S_{va-u} ——真空饱水后的单位吸水率(%)
 VA ——混合料中沥青的体积(cm^3)
 VA_a ——有效沥青的体积(cm^3)
 ω_a ——混合料的有效沥青的油石比(%)
 ω_b ——矿料吸附沥青的油石比(%)
 DA ——沥青膜厚度(mm)
 SA ——集料比表面总和(m^2/kg)
 VFA ——饱和度(%)
 VCA_{mix} ——粗集料矿料间隙率(%)
 VCA_{mix}^C ——最紧密状态下的粗集料矿料间隙率(%)
 VCA_{DRC} ——捣实矿料间隙率(%)
 P_{ba} ——矿料吸附沥青的吸入量(%)
 P_{bc} ——混合料中有效沥青含量(%)
 D ——矿料的当量直径(mm)
 VCA_{DRC}^T ——特征矿料间隙率(%)
 W_0 ——锥入能(MPa)
 Φ_{ab} ——粒径 a 与粒径 b 的组合当量粒径(mm)
 β ——混合料骨架程度系数
 TSR ——冻融劈裂强度比
 DS ——动稳定度(次/mm)
 δ ——相对变形(%)
 W_p ——累计耗散能(MPa)
 R ——目标可靠度(%)
 β ——可靠性指标



目 录

Contents

第一篇 矿 料

第一章 矿料的特征	3
第一节 矿料的物理、力学指标	3
第二节 矿料的形态分析	7
第三节 矿料的工程指标分析	16
第四节 小结	16
第二章 矿料的级配构成	17
第一节 连续级配的构成及发展	18
第二节 一种改进型连续级配——Superpave 级配	23
第三节 贝雷法间断级配的构成与检验	24
第四节 典型间断级配的构成	28
第五节 级配间断性的评价	38
第六节 小结	58
第三章 矿料的骨架与嵌挤	59
第一节 评价矿料骨架结构的试验方法	60
第二节 单粒径与多粒径组合矿料的 VCA_{DRC} 变化规律	72
第三节 矿料骨架嵌挤能力的评价	81
第四节 不同矿料间比例关系的骨架嵌挤能力分析	83
第五节 小结	88
本篇总结	90
本篇参考文献	91

第二篇 混合料的体积特征

第四章 混合料的一次体积指标	94
第一节 混合料的理论密度	94
第二节 混合料的毛体积密度	112

第三节 小结	135
第五章 混合料的密实与紧密状态	137
第一节 混合料的密实特性	137
第二节 混合料的紧密特性	145
第三节 小结	151
第六章 沥青与矿料相互关系的指标	152
第一节 饱和度	152
第二节 有效沥青含量	156
第三节 沥青膜厚度	159
第四节 小结	164
第七章 混合料体积性能的影响因素	165
第一节 成型方法对体积性能的影响	165
第二节 压实功对混合料体积性能的影响	168
第三节 试验温度及其他因素的影响	176
第四节 胶结料的影响	179
第五节 小结	180
第八章 级配差异对体积性能的影响	181
第一节 粗集料对体积特性的影响	181
第二节 细集料对体积性能的影响	193
第三节 级配不确定性分析	210
第四节 小结	214
本篇总结	216
本篇参考文献	219

第三篇 基于最紧密状态的沥青混合料均衡设计

第九章 简述	221
第一节 混合料的性能要求与设计方法的发展	221
第二节 典型混合料设计方法介绍	225
第三节 小结	229
第十章 最紧密状态设计方法	230
第一节 最紧密状态的设计原理	230
第二节 影响混合料最紧密状态的因素	238
第三节 最紧密状态的设计流程	249
第四节 混合料的最紧密状态与骨架结构	259
第五节 小结	264
第十一章 沥青混合料路用性能的初步认识	266
第一节 高温性能指标	267

第二节	低温性能指标	281
第三节	水稳定性能指标	287
第四节	疲劳性能指标	297
第五节	小结	310
第十二章	几种典型混合料的均衡设计	313
第一节	低标号、大粒径高模量沥青混合料设计	314
第二节	SMA 混合料设计的改进	328
第三节	应力吸收层混合料设计	338
第四节	超薄沥青混凝土设计	353
第五节	橡胶沥青混合料设计的完善	371
本篇总结		374
本篇参考文献		375
结束语		378
索引		382