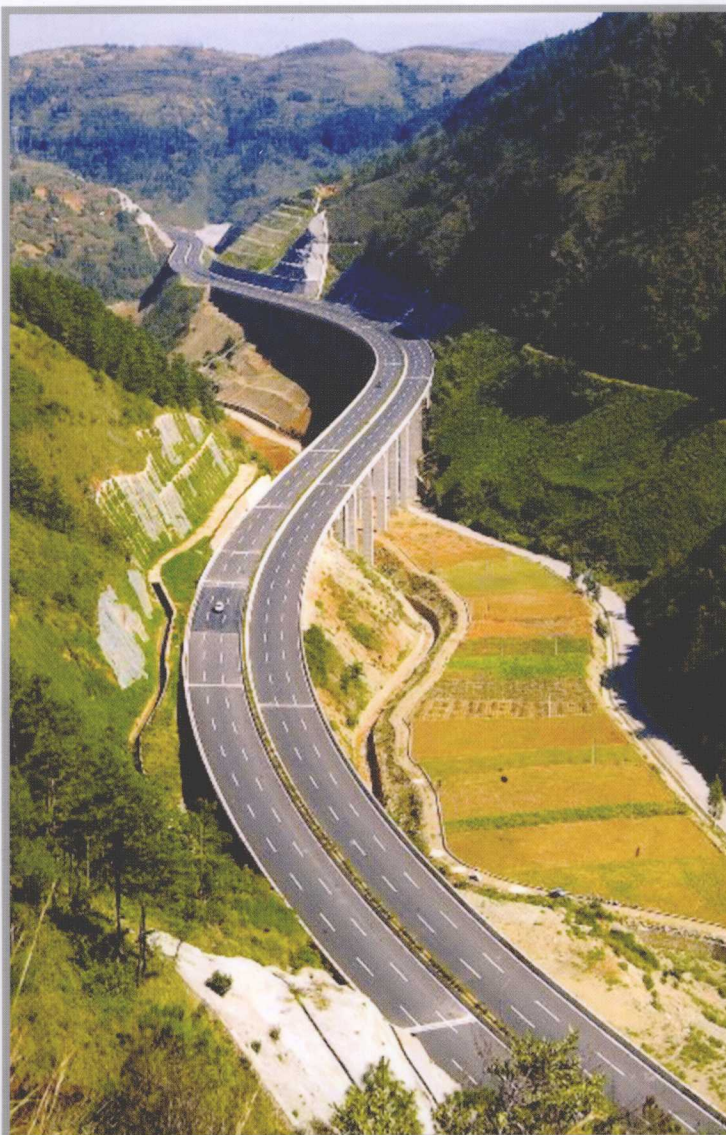


Banrouxing Fuhe Lumian Sheji yu Shigong

半柔性复合路面设计与施工

吴国雄 梅迎军 李力 编著



人民交通出版社
China Communications Press

Banrouxing Fuhe Lumian Sheji yu Shigong
半柔性复合路面设计与施工

吴国雄 梅迎军 李 力 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

作为一种新型的路面结构,半柔性复合路面兼有刚性路面和柔性路面的优点。为了加快推广这种新型复合路面结构的研究与应用,本书在总结和参考国内外有关文献和现有研究成果的基础上,以水泥胶浆灌注大空隙沥青混凝土形成的半柔性复合路面结构为例,对半柔性复合路面的材料组成,路用性能,路面设计、施工和养护以及有关理论研究等进行了系统的介绍。全书系统性、针对性和实用性较强,对于工程技术人员进行半柔性复合路面的设计、施工和养护有较强的指导意义。

本书可作为道路与铁道工程、市政工程专业研究生的专用教材或阅读材料,也可作为交通、水利、建筑等行业科研人员和工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

半柔性复合路面设计与施工/吴国雄等编著. —北京:
人民交通出版社, 2009.8
ISBN 978-7-114-07825-5

I.半... II.吴... III.①路面-设计②路面-工程施工
IV.U416.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第100682号

书 名: 半柔性复合路面设计与施工

著 者: 吴国雄 梅迎军 李 力

责任编辑: 沈鸿雁 王文华

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)59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 14.25

字 数: 355千

版 次: 2009年8月 第1版

印 次: 2009年8月 第1次印刷

印 数: 0001—2000册

书 号: ISBN 978-7-114-07825-5

定 价: 32.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 半柔性复合路面概述	1
1.2 半柔性复合路面的类型及其特点	1
1.3 国内外研究及应用概况	3
1.4 本书的主要内容	4
第 2 章 大空隙基体沥青混合料配合比组成设计	6
2.1 沥青混合料设计理论	6
2.2 沥青混合料的组成结构理论与特性.....	14
2.3 影响基体沥青混合料强度的因素.....	15
2.4 大空隙基体沥青混合料最佳沥青用量确定.....	18
2.5 大空隙率基体沥青混合料空隙率测量方法.....	29
2.6 大空隙率基体沥青混合料配合比设计.....	30
第 3 章 水泥胶浆填充料配合比设计	48
3.1 材料组成与技术性能要求.....	48
3.2 外加剂的作用与选取.....	56
3.3 水泥胶浆流动度的影响因素及分析.....	67
3.4 水泥胶浆配合比设计.....	72
3.5 水泥胶浆技术性质及表征方法.....	78
3.6 填充胶浆的灌注及半柔性路面的形成.....	82
第 4 章 半柔性复合路面混合料路用性能研究	84
4.1 半柔性复合路面混合料力学性质.....	84
4.2 半柔性复合路面混合料的高温稳定性.....	93
4.3 半柔性复合路面混合料的低温抗裂性	106
4.4 半柔性复合路面混合料的疲劳特性	117
4.5 半柔性复合路面混合料的水稳定性	123
4.6 半柔性复合路面混合料耐磨耗性能	134
4.7 半柔性复合材料的收缩性能	137
4.8 半柔性复合路面混合料的综合路用性能	138
第 5 章 半柔性复合路面混合料理论研究	140
5.1 沥青混合料的结构组成及强度理论	140
5.2 半柔性复合路面材料结构组成及强度理论	143
5.3 半柔性复合路面混合料强度形成机理	145
5.4 半柔性复合路面混合料强度的影响因素	149

第 6 章 半柔性复合路面结构设计理论与方法	152
6.1 半柔性复合路面的破坏及其机理分析	152
6.2 传统路面结构设计理论与方法	155
6.3 半柔性复合路面结构设计理论	167
6.4 半柔性复合路面设计参数	170
6.5 半柔性复合路面组合设计	177
6.6 半柔性复合路面设计	179
第 7 章 半柔性复合路面施工与养护	184
7.1 半柔性复合路面施工工艺	184
7.2 半柔性复合路面的维护	195
7.3 施工质量控制指标与评定标准	196
7.4 半柔性复合路面经济分析评价	197
第 8 章 复合路面综述	200
8.1 聚合物改性水泥混凝土路面	200
8.2 橡胶轻集料混凝土(RLC)路面	205
8.3 纤维+改性沥青混凝土路面	208
8.4 水泥乳化沥青混合料复合路面	212
8.5 橡胶沥青混凝土路面	217
参考文献	220

第 1 章 绪 论

1.1 半柔性复合路面概述

我国公路正处于一个大规模建设高等级公路的发展时期。交通量和轴载的迅速增长,对公路路面结构的强度和稳定性提出了更高的要求;使用者对行车速度和舒适性的要求也在不断提高。公路路面是道路工程最主要的结构物之一,对于修建和营运的经济性、行车安全以及行驶质量等有着至关重要的影响,提高和改善路面使用性能是高等级公路建设的重要任务。

我国现有道路路面基本分为两大类,即沥青混凝土路面(柔性路面)和水泥混凝土路面(刚性路面)。目前已建成的沥青混凝土和水泥混凝土路面都存在不少问题。沥青路面在行车荷载的反复作用下,轮迹处沥青层厚度逐渐变薄,永久变形积累后道路表面出现车辙,削弱了面层及路面结构的整体强度,并易诱发其他病害。由于沥青材料所具有的黏弹性特征,使得沥青混凝土路面的强度和流变性质均易受到温度的影响。在夏季高温情况下,沥青混合料会因沥青的黏度降低,集料间黏结力减弱而使路面的强度和抗变形能力降低,在车辆起步、加速、减速、制动等垂直和水平荷载作用下,沥青路面会出现波浪、拥包之类的剪切变形或垂直变形,尤其是在公路收费口、码头、货运站等场所以及陡坡路段更为突出。在冬季低温情况下,沥青变硬,黏度增强,沥青混合料的强度增大,抵抗变形能力大大降低,表现出脆性,由于混合料所铺筑的面层材料收缩,车辆荷载作用或半刚性基层产生收缩裂缝,使面层内产生过大的拉应力而导致开裂。水泥混凝土路面强度高、承载能力强,但由于接缝的存在,行驶舒适性差,接缝处易产生啃边、错台、唧泥等病害。水泥混凝土路面一旦破坏,修复困难,维修施工周期长并影响交通。

随着道路交通事业的发展,高等级公路和城市快速道路对路面的要求不断向多元化、功能化方向发展。为适应道路建设的发展要求,克服上述两种路面结构的不足,半柔性复合路面这一新型结构形式应运而生。

以水泥灌浆沥青混凝土形成的半柔性复合路面为例,它是指以开级配大空隙率基体沥青混合料磨耗层作为基料,在其空隙中灌入以水泥为主要成分的特殊浆体或其他材料复合而成的一种路面。该路面综合了沥青混凝土和水泥混凝土各自的优点,具有高于水泥混凝土路面的柔性和高于沥青混凝土路面的刚性,可以广泛用于各等级公路、城市道路、收费广场、停车场的路面。

1.2 半柔性复合路面的类型及其特点

通常所说的半柔性路面,根据施工工艺和材料可分为三种类型:水泥灌浆沥青混凝土路面、水泥沥青混凝土路面和乳化沥青水泥混凝土路面。

(1)水泥灌浆沥青混凝土

水泥灌浆沥青混凝土是指在开级配的大空隙(空隙率一般为 20%~35%)基体沥青混合料中,灌入以水泥为主要成分的特殊浆体复合而成的一种路面。半柔性复合路面与普通沥青混凝土路面不同,属于密实—骨架嵌挤型结构。填充于沥青混合料骨架空隙的水泥混合胶浆,在胶结后形成了具有一定强度的密实胶体,该胶体与沥青混合料骨架结构形成一个整体,共同抵抗汽车荷载的作用,并具有防水功能。由于水泥混合胶浆凝结硬化后具有水泥混凝土路面的特性,表面色泽接近于白色,不易吸热,因此,半柔性复合路面的高温稳定性能大大优于普通沥青混凝土路面,又由于以具有一定柔性的沥青混合料作为骨架结构,其低温抗裂性能也优于普通水泥混凝土路面,而且可以不设或少设温度缝,行车平稳舒适。半柔性复合路面的组成特点表明,该路面结构不仅具有水泥路面的柔韧性和无缝的特点。而且具有水泥混凝土路面较高的承载能力、抗磨耗性能以及耐久性。总之,这种复合路面具有水泥路面优良品质的方面有:较高的承载能力、良好的抗车辙性能及抗磨耗性能、服务寿命长、不透水、抗油侵蚀性能好。具有沥青路面优良品质的方面有:路面无缝、抗冻融性能好、施工快捷、开放交通时间短等优点。

水泥灌浆沥青混凝土半柔性复合路面的断面形式及材料组成如图 1-1 所示。

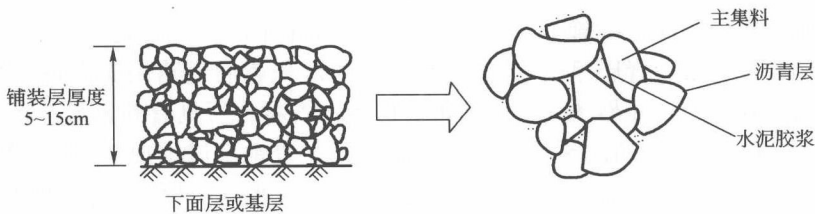


图 1-1 灌浆式半柔性复合路面的断面形式及材料组成

(2)水泥沥青混凝土

水泥沥青混凝土也是按照“柔变刚”的思路开发的一种半柔性路面材料,是在热拌沥青混合料中直接掺入拌和好的特种水泥砂浆,在高温下拌和、摊铺、碾压而形成的路面结构。这种半柔性路面材料与水泥灌浆沥青混凝土具有类似的优点,它虽然比水泥灌浆沥青混凝土施工方便,但是在高温时引入水泥浆,容易带来沥青与集料黏附性不好等问题。

(3)水泥—乳化沥青混凝土

水泥—乳化沥青混凝土是在冷拌乳化沥青混合料母体中掺入水泥或水泥砂浆,经冷拌、冷铺而形成的路面结构。此路面材料利用水泥水化吸水加速乳化沥青破乳,以及水泥水化物和沥青交织裹覆矿料形成的立体网络结构,提高了乳化沥青混合料的早期强度和高温稳定性。

这种结构具有以下优点:乳化沥青破乳后的水分可供水泥硬化凝结,较好地解决了乳化沥青破乳“憎水”和水泥水化“需水”的矛盾;水泥—乳化沥青混合料以乳化沥青和水泥这两种性质差异很大的材料作为结合料,其强度和刚度均比普通沥青混凝土高,但比水泥混凝土低,其力学特点在于刚柔并济,以柔性为主,兼具刚性。同时,水泥—乳化沥青混凝土施工采用冷拌、冷铺工艺,既能降低能耗,节省能源,还能减少环境污染,降低有害气体的排放;相对热拌沥青混凝土而言,水泥—乳化沥青混凝土的施工要简单易行。

以上三种类型的半柔性复合路面,虽然其施工工艺和组成材料有着很大的不同,但均应遵循一个原则,即扬沥青路面和水泥混凝土路面之长,补其之短,刚柔相济,其路用性能优良,可适用于高等级公路和城市道路,尤其是高速公路的爬坡路段、收费站路面,以及城市的货运站、港口、码头、加油站等。半柔性路面除做普通高级路面结构外,还适用于隧道内铺装以提高路面亮度,或用于小半径弯道、公共汽车停靠站场、收费道口等处以提高识别性。

1.3 国内外研究及应用概况

半柔性复合路面最早在法国开展了应用研究,法国专利称为“Salviacim”施工法,即“灌浆开级配沥青混凝土路面施工法”。1954年该工法应用于法国科涅雅克航空港的喷气式飞机跑道上,作为耐热路面进行了试验铺筑。20世纪70年代初,英国、美国、前苏联等国也相继对这一课题进行了研究,发表了有关半柔性复合路面材料的力学性能和路面结构设计计算方法的论文与报告,证实半柔性复合路面可以提高路面的高温稳定性并延长路面使用寿命,且费用增加不大。为了提高混合料的温度稳定性,英国是在摊铺后的开级配沥青碎石路面空隙中灌入树脂——水泥灰浆;前苏联则把水泥砂浆作为第二结合料加入沥青混凝土中进行了拌和压实。科威特 H. R. Guirguis 的研究表明,用水泥处置后的集料铺筑的沥青路面,其强度和稳定性大大提高,路面泛油和抗水性能也有相当大的改善。R. W. Heaad 对冷拌沥青混凝土的研究表明,当加入1%的水泥后,混合料的马歇尔稳定度能提高2.5~3.0倍。在亚洲,日本最早进行了这种半柔性复合路面的研究。1961年以“半柔性路面和半柔性路面施工法”为名申请了专利。1962年该工法在东京高速公路上进行了应用,后来制定了设计标准加以推广应用,每年都有20多万平方米的施工面积。日本大林道路株式会社、鹿岛道路株式会社以及日本铺道株式会社等多家施工企业在获得此项施工方法的专利权后,各自独立地继续对半柔性复合路面进行了多项研究。特别在20世纪80年代和90年代初,各项研究都取得了引人注目的成果。现在日本许多高速公路的收费站、停车场、加油站、爬坡路段以及集装箱码头和公共汽车专用线等场所,半柔性路面都有相当规模的应用(图1-2)。同时,日本充分利用了半柔性混合料易着色的特点,建成多条使用彩色半柔性复合路面的道路,仅在东京市区就有数条专供公共汽车行驶的彩色道路;同时,还有相当数量的停车场、公园及游乐场等场所使用了半柔性复合路面。

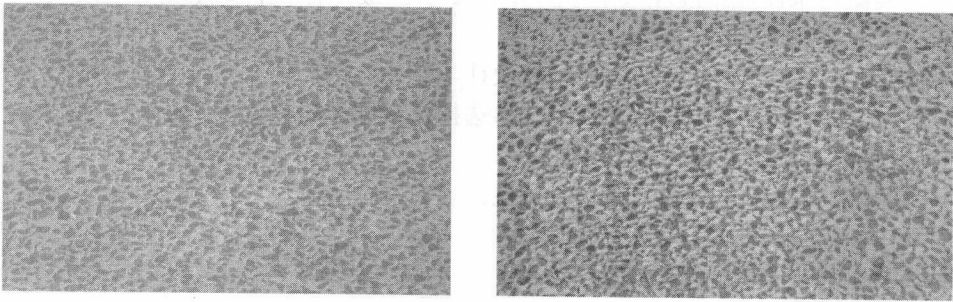


图1-2 日本灌浆式半柔性复合路面

国内于20世纪90年代开始对半柔性复合路面及半柔性复合路面用混合料进行研究,并已经取得了初步的研究成果。1986年,同济大学道路与交通工程研究所林绣贤教授等主持了国家自然科学基金课题《新型路面的复合材料——特种沥青混合料的研究》。该课题针对国产普通沥青混合料,使用拌和法研究特种沥青混合料,即在密级配的沥青混合料中,用拌和方法,掺加水泥砂浆作为第二结合料而形成的混合料,进行了各种物理力学试验,比较了高低温条件下的力学性质,并于1986年底,在广东省惠深线上修建了试验路,经过近两年的行车试用,使用效果良好。1990年湖北宜昌地区公路总段在总结国内外经验的基础上,铺筑了试验路,介

绍了水泥沥青混凝土路面的技术性能和施工方法(图 1-3)。上海市政工程研究院就水泥灌浆半柔性复合路面混合料的性能进行了相关试验研究。黑龙江省交通科学研究所及长安大学等单位就半柔性沥青混合料的设计方法和路用性能进行了比较系统的研究。

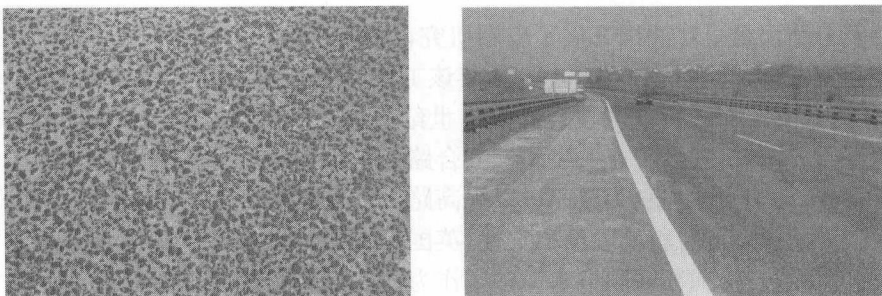


图 1-3 武汉—孝感高速公路灌浆式半柔性复合路面

由于半柔性复合路面施工工艺及配套设施复杂,使得这种新型复合路面结构一直未得到大范围推广,仅在部分公路上做过一些探讨性试验,并在一些低等级道路上进行了应用,对于交通量大,启动、制动频繁的交叉口和停车场尚未见工程应用实例的报道,在高等级公路上尚未得到全面充分的应用。

目前,国内的相关研究中,基体沥青混合料的配合比设计主要依据经验,尚未提出系统的配合比设计方法并且未确定配合比和混合料性能之间的关系;路面结构设计时也是根据经验拟定结构厚度,没有建立相关的设计理论与设计方法;对相应的施工方法和施工工艺未进行系统的研究,缺乏相关的施工技术指南。

1.4 本书的主要内容

本书主要阐述水泥胶浆灌注大空隙沥青混凝土形成的半柔性复合路面结构,其主要内容如下。

- (1)大空隙基体沥青混合料配合比组成设计与优化。
- (2)大空隙基体沥青混合料填充胶浆材料选择及其配合比设计。
- (3)半柔性复合路面混合料的力学性能。
- (4)半柔性复合路面混合料的温度稳定性。
- (5)半柔性复合路面混合料的水稳性。
- (6)半柔性复合路面结构的疲劳特性。
- (7)半柔性复合路面混合料有关理论研究。
- (8)半柔性复合路面结构的设计方法。
- (9)半柔性复合路面结构的施工方法与工艺。
- (10)其他复合路面。

在参阅和总结国内外研究的基础上,本书从研究基体沥青混合料配合比设计和填料胶浆配合比设计为突破口,获得了新的行之有效的配合比设计方法,并研究半柔性复合路面结构的力学性能和路用性能。通过大量的试验获得试验数据,在此基础上进行理论分析和评价,并对半柔性复合路面材料强度形成机理和疲劳特性进行了研究和分析,提出了半柔性复合路面结构的设计方法和施工工艺。

半柔性复合路面是一种新型路面形式,没有现行的设计方法和规范可供参考。参考国内外的有关资料和经验,以一定的指标为参照,把基体沥青混合料和胶浆分开,依据试验单独进行设计,然后把胶浆灌入基体混合料,进行路用性能的有关试验研究和数据分析,从而最终确定最优的基体沥青混合料及水泥胶浆的配合比,为半柔性复合路面的其他研究奠定良好的基础。

基体混合料(大空隙沥青混合料)设计,使用正交法进行试验,采用 L25 正交表设计试验,以空隙率为主要指标,稳定性和流值作为次要指标,确定各因素与目标指标的关系,从而设计出符合期望空隙率的沥青混合料。

水泥胶浆设计也用正交法,采用 L9 正交表设计试验,以强度为指标。通过分析试验结果,选出 5 组配合比,以强度、抗收缩性能和流动度作为指标进行试验,分析试验结果,结合水泥胶浆试灌情况,最后选出 3 个配合比,用以对基体灌浆做整体评价。

在成型后的沥青混凝土试件中,灌入水泥胶浆或其他空隙填充料,并在标准条件下养护,然后进行马歇尔试验。根据试验结果,对沥青混合料基体和水泥胶浆的配合比进行调整,对半柔性复合路面材料进行马歇尔试验、浸水马歇尔试验、车辙试验、冻融劈裂试验、低温劈裂试验、疲劳试验等,以评价该复合路面结构的路用性能。

沥青与矿料之间的相互作用,沥青与水泥水化颗粒之间的相互吸附,水泥水化晶体穿过沥青膜与矿料的结合以及水泥浆体对沥青混凝土的作用这四方面是半柔性路面材料结构形成的决定性因素,直接关系到半柔性路面材料的强度、稳定性、水稳定性和耐久性等一系列重要性能。因此,必须从这四方面着手研究半柔性路面材料的强度形成机理。

本书从半柔性复合路面的弹性模量研究入手,分析现有的两种路面设计理论和设计方法在半柔性复合路面设计中的适用性,研究并提出合理的路面结构设计理论和相应的设计方法。

本书根据试验研究和工程应用情况,结合已有的研究成果,研究并提出半柔性复合路面施工方法及施工工艺。

第2章 大空隙基体沥青混合料配合比组成设计

2.1 沥青混合料设计理论

2.1.1 矿质混合料的级配理论

现行矿质混合料的级配,可以分为连续级配和间断级配两种。连续级配就是矿料中各级粒径的粒料由小到大逐级按一定的重量比例组成;间断级配是指在矿料组成中大小颗粒不是连续存在的,而是在某一个或某几个粒径范围内没有或仅有很少矿料颗粒所组成的一种矿质混合料。一般只能间断一个或两个分级。目前,许多国家虽然将间断级配应用于沥青混合料,但只是针对特定的使用目的,凭经验进行设计,尚未形成较成熟的设计方法。

国外提出了一种沥青混合料设计方法——体积法。体积法的基本思路是实测主骨架矿料的空隙率,计算其空隙体积,使细集料体积、矿粉体积、沥青体积及沥青混合料的最终设计空隙体积之和等于主骨架空隙体积。其优点是强调主骨架的充分嵌挤作用,同时,充分利用细集料的填充和黏结作用。

1) 密实型混合料的级配设计理论

(1) 富勒—泰波级配设计方法

富勒(Fuller)根据试验提出了一种级配设计理论,认为“矿质混合料的颗粒级配曲线愈接近抛物线,则其密实度愈大”;其后泰波(Talbol)认为富勒曲线是一种理想曲线,实际矿料的级配应允许有一定的波动范围,并建立了如下的公式:

$$P_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^n \times 100\% \quad (2-1)$$

式中: P_i ——粒径为 d_i 的矿料通过百分率;

D ——矿质混合料的最大粒径,mm;

n ——试验指数。

式(2-1)中当 $n=0.5$ 时即为富勒曲线。根据泰波的理论分析和试验认为 $n=0.3\sim 0.7$ 时,具有较好的密实度。日本通常取 $n=0.35\sim 0.45$,美国 Superpave 中则直接取 $n=0.45$ 。

与富勒—泰波级配设计理论类似的还有:鲍洛米曲线、瑞士标准曲线、歌德特曲线以及诺丁汉大学曲线等多种近似的曲线形式。

鲍洛米曲线:

$$P = A + (100 - A)(d/D)^{0.5} \quad (2-2)$$

瑞士标准曲线:

$$P = 50[d/D + (d/D)^{0.5}] \quad (2-3)$$

歌德特曲线:

$$P = 103(d/D)^{0.5} - 32 \quad (2-4)$$

诺丁汉大学曲线:

$$P = \frac{(100 - P_{<0.075})(d^n - 0.075^n) + P_{<0.075}}{D^n - 0.075^n} \quad (2-5)$$

(2) 粒子干涉级配设计理论

魏矛斯(Weymouth)研究认为:为了达到最大密度,前一级颗粒之间空隙,应由次一级颗粒所填充,其所余空隙又由再次级小颗粒所填充,但填隙的颗粒粒径不得大于其间隙之距离,否则大小颗粒粒子之间势必发生干涉现象。因此,为避免干涉,大小粒子之间应按一定数量分配,从而导出混合料的级配设计公式:

$$\psi_s = \frac{\psi_0}{\left(\frac{d}{D} + 1\right)^3} \quad (2-6)$$

式中: d ——次粒级的粒径,mm;

D ——前粒级的粒径,mm;

ψ_0 ——次粒级的理论实积率(实积率即堆积密度与表观密度之比);

ψ_s ——次粒级的实用实积率。

(3) 筛余量递减系数 k 法级配设计方法

前苏联 B. B. 奥浩饮和伊力诺夫等认为:下一级矿料颗粒尺寸为上一级颗粒尺寸的 1/16 时,且其质量为上一级质量的 43% 时,矿质混合料能达到最大密实度。但由此配制成的混合料极易出现离析。为此,可将上述参数开 4 次方,即当粒径比为 1/2 时,下一级的质量为上一级质量的 81% 时,混合料可以达到最大密实度。实践表明,其参数可在较宽的范围内波动,即 $k=0.6\sim 0.9$,由此得到级配计算公式:

$$P_x = 100 \left(1 - \frac{1 - k^n}{1 - k^x}\right) \% \quad (2-7)$$

式中: P_x ——筛分试验中,以最大粒径为第 0 个筛子时,第 x 个筛子的通过百分率;

n ——筛子的总数;

k ——筛余量递减系数。

同济大学的林绣贤教授是较早将 k 法引入到我国的,并在此基础上,于 20 世纪 70 年代提出了通过率递减系数 i 法级配设计方法,其计算公式为:

$$P_x = P_0 i^x \quad (2-8)$$

式中: P_x ——筛分试验中,以最大粒径为第 0 个筛子时,第 x 个筛子的通过百分率;

P_0 ——最大公称粒径时的通过率,以 90%~100% 控制;

i ——通过率递减系数。

i 法公式是对 k 法公式的简化,即当 k 法中的 n 足够大时, $k^n \rightarrow 0$, k 法就演化为 i 法。

上述传统的级配设计理论都是建立在简单模型基础上并通过试验而得出的,虽然可以用于计算级配,但实际上由上述理论计算的级配曲线很难用于工程实践。这是因为,一方面计算得到的级配范围很难适用于所有筛孔;另一方面,在实际使用中往往需要根据路面的结构组成和混合料的使用部位对级配作不同的调整,这就使上述理论中的 n 、 i 、 k 等参数的选择变得困难。

2) 骨架型混合料的级配设计理论

由于传统的级配设计理论过于理论化和单一化,不能真正指导实际的配合比设计,因此,近年来国内外研究机构,结合对混合料骨架结构认识的逐步深入和目前重载交通的实际需要,不断对级配的设计理论进行研究和完善,先后提出了一些更具实际指导意义和应用价值的级配设计理论,其中典型的代表就是“贝雷法”。

(1) 贝雷法级配设计理论

“贝雷法”沥青混合料级配设计理论是由美国伊利诺州交通部 Robert D. Bailey 发明的一套确定沥青混合料级配的设计方法。该法经过 Heritage Research Group 近 10 年的内部使用和普渡大学的进一步研究、实践和验证,认为采用该方法设计的沥青混合料具有良好的骨架结构,同时可以达到密实的效果。

贝雷理论认为,沥青混合料矿料组成中可以分为形成骨架的粗集料和形成填充的细集料。根据平面模型,形成填充的粒径与集料直径的关系根据圆形与片状的不同,大致系数为 0.15~0.29。统一考虑,形成第一级填充的细集料平均直径为最大尺寸的 0.22 倍,即最大尺寸乘以 0.22 为主要控制粒径,其设计原理是级配要求细集料的体积数量等于粗集料空隙的体积。同样,细集料也按照此原理分成细集料中的粗集料与细集料中的细集料,并形成依次的填充状态。贝雷法级配设计理论如图 2-1 所示。

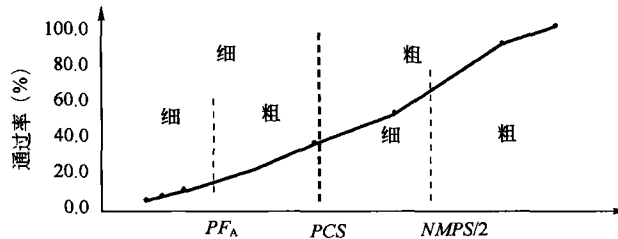


图 2-1 贝雷法级配设计理论

P_{FA} : 矿料中细集料的含量百分率(%) ; P_{CS} : 与公称最大粒径的 0.22 倍最近的筛孔,即粗细集料的分界点;
 $NMPS/2$: 公称最大粒径的 1/2

按照通常的划分,一般以粒径大于 2.36mm 的集料称为粗集料,小于该值的集料称为细集料。“贝雷法”根据最大尺寸(NMPS)的 0.22 倍所对应的相近尺寸的筛孔孔径作为粗细集料的分界点。将粗细集料的分界点作为第一个控制筛孔,首先确定细集料含量。细集料含量确定的基本原则是:

细集料的体积 \leq 粗集料空隙率的体积

粗集料的体积 + 细集料的体积 = 单位体积

为进一步约束粗集料的不同粒径,采用 $CA_{比}$ 指标对粗集料的级配进行约束,主要是从集料的离析和压实方面进行考虑。“贝雷法”要求 $CA_{比}$ 为 0.4~0.8。根据美国的经验,如果 $CA_{比}$ 大于 1,则混合料不能形成良好的骨架结构,如果 $CA_{比}$ 小于 0.4,则混合料容易产生离析并难以压实。

$$CA_{比} = \frac{P_{NMPS/2} - P_{PCS}}{100 - P_{NMPS/2}} \quad (2-9)$$

式中: $P_{NMPS/2}$ —— 最大尺寸的 1/2 所对应的筛孔的通过率;

P_{PCS} —— 关键筛孔的通过率。

为确定细集料中较粗部分与较细部分的比例关系,将 PCS 点乘以 0.22 对应的筛孔作为细集料中的粗细分界点 FA_C ;将 FA_C 乘以 0.22 再分为 FA_F 点,然后根据 $FA_{C比}$ 和 $FA_{F比}$ 确定各部分的组成含量。一般要求 $FA_{C比}$ 和 $FA_{F比}$ 小于 0.5。

$$FA_{C比} = \frac{P_{FA_C}}{P_{PCS}}, FA_{F比} = \frac{FA_F}{P_{FA_C}} \quad (2-10)$$

“贝雷法”设计有一个非常复杂的计算和修订过程,需要计算每一种原材料在混合料中可能形成的状态,以及根据原材料级配的不均匀性修正集料的分布和数量,整个过程需要有相应的试验规程和计算机设计程序完成。“贝雷法”最早由山东省交通科学研究院引进,并在此基础上发展成为多级嵌挤理论。

(2) 主集料空隙填充法级配设计方法

为了发挥粗集料作为主集料的嵌挤能力,细集料、矿粉、沥青和设计空隙率应该以不超过 VCA_{DRC} 的体积来填充主集料紧密堆积的空隙率,将这样的设计方法称为主集料空隙填充法(course aggregate void filling method,记为 CAVF 法)。CAVF 法的完整设计方法最早由张肖宁教授于 1991 年提出。

CAVF 法基于 2 个基本假定:

- ①假定细集料的颗粒不对粗集料的嵌挤结构形成干涉;
- ②细集料与沥青混合的胶浆也不对粗集料的嵌挤结构形成干涉。

根据 CAVF 设计方法,设计时先根据实际使用的沥青混合料最大粒径情况和施工需要,预先选择连续的 1~3 档粗集料作为主骨架,主骨架粒径越单一均匀,得到的沥青层表面越均匀,构造深度越大。

为避免细集料对主骨架的干涉,最好采用间断级配,以避免细集料颗粒干涉主集料的骨架结构,造成主集料空隙增大。按照这样的体积关系,粗集料、细集料、矿粉以及沥青用量的质量百分率分别为 q_c 、 q_f 、 q_p 、 q_a ,主骨架紧装空隙率及沥青混合料设计目标空隙率 VCA 、 V_{vs} 之间具有如下的组成关系:

$$\begin{cases} q_c + q_f + q_p = 100 \\ \frac{q_c}{100\rho_{sc}}(VCA - V_{vs}) = \frac{q_f}{\rho_{ff}} + \frac{q_p}{\rho_{fp}} + \frac{q_a}{\rho_a} \end{cases} \quad (2-11)$$

式中: ρ_{sc} ——粗集料紧装密度, g/cm^3 ;

ρ_{ff} 、 ρ_{fp} ——分别为细料、矿粉的表现密度, g/cm^3 ;

ρ_a ——沥青的密度, g/cm^3 。

通常,材料密度和 VCA 可以通过试验测定得到,可以在 q_c 、 q_f 、 q_p 、 q_a 和 VCA 5 个变量中预先确定 3 个变量的设计值,利用上式计算得到其余 2 个变量的设计结果。为方便计算,一般将粗、细集料质量百分率 q_c 、 q_f 作为未知变量进行设计。

严格来讲,CAVF 设计方法并不属于级配设计理论,而是一种混合料组成的设计理念。通过上述设计方程仅能对粗细集料的含量进行限定,而无法对具体的级配进行计算。

由现有的级配设计理论可以看出,沥青混合料的结构类型,正逐步由传统的悬浮密实型混合料向骨架密实型混合料方向发展。目前,工程中常用的 SMA、Superpave 等类型的混合料都具有较为典型的骨架结构。

目前,比较完整的关于混合料骨架结构的判断方法是 SMA 混合料配合比设计方法。1994 年美国联邦公路局(FHWA)和美国国家沥青路面协会(NAPA)技术工作团队(TWG)共

同提出的“SMA 混合料配合比设计方法”，在该设计方法中明确提出了粗集料间隙率 VCA 的概念，并规定以 $VCA_{mix} < VCA_{DRC}$ 作为判断粗集料形成骨架状态的判断依据。由于目前尚未有其他关于骨架构成标准的新的研究成果，因此，在一定程度上，该标准成为判断混合料骨架结构状态的唯一标准。但基于贝雷设计法的多级嵌挤理论，揭示了矿质混合料构成的复杂性，矿质混合料内各级粒径颗粒间的咬合状态，都会对混合料的性能产生明显影响。

2.1.2 沥青混合料设计方法

沥青路面使用的沥青混合料一般由沥青、碎石、砂、矿粉、添加剂以及适宜的空隙组成。由这些材料组成的沥青混合料必须满足的路面功能要求包括：

- (1) 优良的力学特性，包括抗疲劳能力、抗高温变形能力、抗低温开裂能力等；
- (2) 足够的耐久性，主要是对于如老化、冻融、浸水等自然环境因素影响的抵抗能力；
- (3) 合理的结构适应性，指在沥青路面结构中，不同层位对于沥青混合料具有完全不同的功能要求，不同特性的材料被应用于不同的结构层位；
- (4) 优异的表面功能，包括平整性、抗滑能力、降噪防眩能力、排水特性、可辨识性等；
- (5) 适宜的工艺特性，主要指拌和、运输、摊铺、碾压及维护等施工过程中的施工和易性。

1) 传统的沥青混合料配合比设计方法

关于沥青混合料配合比设计方法，到 20 世纪 50 年代末，先后出现了马歇尔设计方法、维姆设计方法、Smith 三轴法和得克萨斯旋转法等。其中马歇尔设计方法影响最广，目前被世界上大多数国家所采用。马歇尔设计方法最早是由 Brue Marshall 提出的，1948 年美国陆军工程兵部队对马歇尔试验方法加以改进，并增加了一些性能测试，最终发展成为沥青混合料配合比设计标准。马歇尔设计方法选择沥青时采用针入度作为控制指标，设计者根据经验及气候条件，选用合适的沥青，在混合料矿料级配的选择上一般采用中值法。混合料的成型采用马歇尔标准击实成型方法，其技术要求主要由稳定度、流值、空隙率、沥青饱和度和残留稳定度等指标组成。

传统的沥青混合料设计方法包含四个主要内容。

(1) 原材料选择

原材料的选择是沥青混合料质量的关键，为此，所有沥青路面工程都对用于沥青混合料的原材料质量做出了具体的规定或规范。从使用情况看，目前的原材料指标体系是合理的，问题主要存在两个方面：①指标水平选择的经验性；②具体指标与路面性能的相关性。

(2) 确定矿质集料的级配和施工配比

这一过程的内容包括：①在规定的级配范围内基于经验确定目标级配范围；②调整各档集料的掺配比例，使混合料级配满足目标级配范围。

(3) 确定最佳沥青用量

确定沥青混合料最佳沥青用量主要有马歇尔方法以及维姆设计方法等方法，但目前使用最广泛的还是马歇尔方法。这些方法实际上原理是相同的，类似于通过压实或击实的方式确定土壤最佳含水率和最大干密度的“土工击实原理”。在这里土被换成了混合集料、水被换成了沥青。这一原理决定了马歇尔方法适用于密实型沥青混合料。对于骨架型和骨架密实型沥青混合料，多数情况在正常的沥青用量范围沥青含量—密度曲线不会出现峰值。这表明，继续应用马歇尔方法确定最佳沥青用量实际上有些过于勉强，此时，经验的成分可能更大一些。

马歇尔方法的优点是:方法简单、设备价格低廉,非常方便用于工地检测。但马歇尔方法的缺点也是显而易见的:力学概念不明确、与路面实际性能相关性差、混合料类型适用面窄、过分依赖经验的模式化设计过程。马歇尔方法最大的问题是马歇尔试件成型方法与路面受轮胎搓揉碾压的实际情况相差较大,野外路面与室内马歇尔试件的沥青混合料的内部矿料、胶浆油膜和空隙率排布等存在差别。其次,马歇尔试件的稳定度和流值达两个经验性指标,与实际路用性能间没有明确的相关性。通常认为,马歇尔设计方法不适用于开级配混合料和大粒径混合料。

(4) 沥青混合料性能评价

鉴于工程界对于采用马歇尔方法设计的沥青混合料路用性能的担忧,世界各国陆续对这一方法加入路用性能评价的内容。目前比较常用的评价内容有:利用沥青混合料试件浸水前后的强度比进行水敏感性评价,如美国 AASHTO T283 方法;利用重复碾压的轮迹深度评价沥青混合料的抗车辙能力,如英国、日本和中国等国家使用的车辙试验机方法,德国、北美采用的汉堡轮迹试验方法等。由于试验条件的差异,这些评价方法与路面实际性能的相关性并不好。还有一些科研单位对所设计的沥青混合料进行诸如疲劳、低温、动模量等方面的评价,由于各种各样的原因,目前还无法形成比较统一的试验评价方法。近 20 年发展起来的路面足尺加速加载试验应该说是比较好的路面性能评价方法,但由于价格昂贵,作为沥青混合料的常规评价方法是不现实的。

2) Superpave 沥青混合料设计方法

Superpave 沥青混合料设计法是根据沥青混合料的空隙率、矿质集料间隙率、沥青饱和度等体积特性参数进行设计的。要求根据工程所在地的气候和设计交通量,进行材料的选择和混合料的配合比设计,并充分考虑在服务期内温度对混合料路用性能的影响。该方法主要涉及功能选择、沥青混合料的拌和、沥青混合料体积分析以及沥青混合料水敏感性分析。沥青混合料体积设计主要由 4 部分组成:材料的选择、确定级配结构、确定最佳沥青用量以及验证在最大压实次数下的密实度参数并评估其水敏感性。

在服务期内温度对沥青混合料路用性能的影响主要指:沥青路面在最高设计温度时能满足高温性能要求,不产生过量的车辙;在常温范围内能控制疲劳开裂;在最低设计温度时,能满足低温性能的要求,避免或减少低温开裂。为此,Superpave 要求:对于沥青胶结料,采用旋转薄膜烘箱试验来模拟沥青在拌和过程中的短期老化,采用压力老化容器模拟沥青在路面使用过程中的长期老化。对于集料,在进行沥青混合料集料级配设计时,采用控制点和限制区的概念来限定、优选试验级配设计;对于沥青混合料,在拌和好后,采用短期老化模拟沥青混合料在拌和与摊铺压实过程中的老化,沥青混合料在压实成型后采用长期老化模拟沥青混合料在路面使用过程中的老化。沥青混合料成型试件采用旋转压实机制备,在试件成型过程中,记录旋转压实次数与试件高度的关系,从而对沥青混合料的体积特性进行评价。

Superpave 沥青混合料体积设计的级配选择是通过控制点和限制区来进行的,要求级配须通过各筛号控制点范围且不得经过限制区,级配的控制点及限制区依最大尺寸而有不同的规定。控制点分别设于最大尺寸筛、中等尺寸(2.36mm)和最小尺寸(0.075mm)处;限制区处于沿最大理论密度线,在中等尺寸和 0.3mm 尺寸筛之间级配不得通过的区域。设置限制区的目的有两个:一是为了限制砂的用量,减少永久变形;二是为了提供足够的矿料间隙率 VMA。多数情况下,限制区的驼峰级配表示为一种多砂混合料,或相对总砂量来说细砂太多的混合料,这种级配的混合料在施工期间常会出现压实问题,并表现为在使用期间抗永久变形

的能力不足。而且,集料级配通过限制区容易造成矿料间隙率 VMA 过小,这种级配对沥青含量过分敏感。因此,设计集料结构时,应使设计级配处于控制点间并避开限制区,以满足 Superpave 的要求。沥青混合料的控制点和限制区由混合料的最大公称尺寸所确定,Superpave 用集料公称最大尺寸来界定混合料级配。

Superpave 设计体系是美国 SHRP 的主要研究成果,该体系包括如下三种纵向组合的设计等级。

I 级设计称为混合料体积设计法,与此相对应的设计交通量是换算为 80kN 的标准累积轴载次数小于 1×10^6 。在该设计方法中,集料特性和混合料体积性质,如空隙率(VV)和矿料间隙率(VMA)是选择沥青等级和沥青用量的控制标准。

II 级设计是中等路面性能水平的混合料设计,与此相应的交通量是累积标准轴载(80kN)次数小于等于 1×10^7 ,此部分设计包括体积设计和主要路面性能试验,并能预测路面性能。在 II 级设计中,测试的混合料力学性能包括采用荷载剪切试验预测永久变形、采用频率扫描试验测试混合料疲劳开裂性能、采用拉伸蠕变试验和间接拉伸强度试验预测混合料的低温开裂性能。上述性能测试分别是在有效温度下进行的,有效温度是根据当地的气象数据计算得到的。依据预测的永久变形(车辙深度)、疲劳开裂(路面损坏面积百分率)和低温开裂(裂缝间距)来选择最佳沥青用量。

III 级设计是最高路面性能水平的混合料设计,与此相应的设计交通量是累积标准轴载(80kN)次数大于 1×10^7 次,此部分设计包括体积设计和更广泛的路面性能设计,对路面性能的预测更为严格。III 级设计有赖于较多的沥青混合料性能试验,需要用一组路面温度代替有效温度进行性能预测。

目前,由于设计水平 II 级和 III 级较为复杂尚未到实用阶段,而设计水平 I 概念清晰,方法实用,被普遍接受。特别是该设计方法中提出的沥青胶结料性能等级、级配控制点和禁区、集料的有效密度和有效沥青用量、旋转压实成型方法和混合料的体积参数等概念,在世界范围内影响了沥青和沥青混合料研究的发展方向。

3) SMA 沥青混合料设计方法

(1) 欧洲国家 SMA 设计方法

SMA 是起源于德国的一种新型沥青路面结构材料,因此,德国的 SMA 设计方法对其他各国的方法形成、发展有重要影响。

德国是以浇筑式沥青混凝土为传统沥青路面结构形式的国家,流动态的沥青混合料必然要求较高的沥青含量,但这是与德国夏季气温不高(7 月份平均气温为 $14 \sim 19^\circ\text{C}$)的特点相适应的,由此德国的 SMA 规定了较高的最小沥青用量(油石比大于 6.95%)。

意大利 SMA 设计仍采用马歇尔设计方法,但要求马歇尔稳定度不小于 13kN,劲度不小于 2000N/mm,意大利规定 SMA 必须使用聚合物改性沥青 PmB50,最小油石比也降低为 5.5%,对 SMA 使用的改性沥青结合料还提出了较高的技术要求,比如要求 25°C 针入度为 45~55,环球软化点高达 $75 \sim 85^\circ\text{C}$,针入度指数为 +1/+5 等。另外,意大利规定的 SMA 粒径(SMA0/10 和 SMA0/15)较德国的(SMA0/8 和 SMA0/11)大,而 SMA 铺筑层相对厚度较德国的小,意大利 SMA 铺筑层厚度仅为 2.0~3.0cm,德国 SMA 铺筑层厚度为 3.0~4.0cm。研究表明,SMA 粒径大、铺筑厚度薄有利于发挥 SMA 混合料的骨架作用,提高高温抗车辙能力。