

分类号:

学号: 20212110050

密级: 公开

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



干旱荒漠区超大粒径沥青混合料设计与性能研究

学位申请人

李龙

指导教师

王勇 副教授

刘杰 高级工程师

申请学位类别

专业硕士

专业名称

土木水利

研究领域

建筑与土木工程

所在学院

水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2024年05月

分类号:

学号: 20212110050

密级: 公开

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



干旱荒漠区超大粒径沥青混合料设计与性能研究

学位申请人	李龙
指导教师	王勇 副教授
	刘杰 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	建筑与土木工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2024年05月

**Design and performance of super large size mixture in arid desert
areas research**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Civil and Hydraulic Engineering

By

Li Long

(Architecture and Civil Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Yong

Senior Engineer. Liu Jie

May, 2024

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：李龙

时间：2024年5月5日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：李龙

时间：2024年5月5日

导师签名：王勇

时间：2024年5月5日

摘要

近年来,随着我国西北地区社会经济的快速发展,交通量增长迅速、道路车辆重载超载情况等日益突出。由于目前修筑的道路大多以半刚性基层沥青路面为主,在干旱荒漠区自然环境和半刚性材料的特性等多重因素作用下,路面车辙、裂缝等病害频发。现有柔性基层沥青路面虽然能很好的解决上述问题,但因强度不足、造价昂贵等原因难以在西北干旱荒漠地区推广。因此,本研究提出在干旱荒漠地区推广超大粒径柔性基层设计理念,初步研究表明超大粒径柔性基层沥青路面结构性能良好,能有效解决当前柔性基层的结构性损坏问题,从而延长路面使用寿命。现有设计标准及试验方法主要是针对集料公称最大粒径 $\leq 37.5\text{mm}$ 的沥青混合料,不适用于超大粒径沥青混合料 SLSM-50。因此,本文基于干旱荒漠区的气候环境特点开展超大粒径沥青混合料设计与性能研究,主要工作如下:

(1) 通过 PFC^{3D} 离散元软件建立了 SLSM-50 的三维力学强度数值试验模型,其中包括:单轴压缩和劈裂数值模型,并通过与室内试验结果对比证实了数值试验方法的可靠性;在此基础上结合室内试验探究了 SLSM-50 在不同试件尺寸下,力学强度的变化规律,并结合试件尺寸与集料最大公称粒径之间的经验关系,确定了 SLSM-50 的合理试件尺寸。

(2) 通过室内逐级填充试验以间隙率最小为标准确定了粗集料级配;研究了不同 i 值下的沥青砂浆强度,以力学强度最优为标准确定了细集料级配;探究了在沥青砂浆与粗集料不同比例下, SLSM-50 力学性能的变化规律,以力学性能最优为原则,确定了 SLSM-50 的矿料级配,并在此基础上提出了优化后满足 95% 保证率的 SLSM-50 强嵌挤骨架密实级配范围。

(3) 通过研究空隙率 VV 、沥青饱和度 VFA 及矿料间隙率 VMA 对 SLSM-50 力学性能、路用性能的影响规律,分别建立了 SLSM-50 体积参数与力学性能、路用性能的关系模型;在性能最优的基础上提出了 SLSM-50 的体积参数设计标准。

(4) 基于 SLSM-50 矿料级配及体积参数设计标准研究成果,提出了 SLSM-50 设计方法;基于干旱荒漠地区气候环境特点,对比常规大粒径 ATB-30 和 ATB-40 混合料对设计出的 SLSM-50 高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性开展了研究,验证了 SLSM-50 在路用性能上的优越性。

关键词: 公路工程; 超大粒径沥青混合料; PFC^{3D}; 骨架密实级配设计; 体积参数标准

Abstract

In recent years, with the rapid social and economic development of China's northwestern region, the rapid growth of traffic volume, road vehicles, heavy overloading and other increasingly prominent. As most of the roads built at present to semi-rigid base asphalt pavement, in the arid desert area of the natural environment and the characteristics of semi-rigid materials and other factors, rutting, cracking and other road surface diseases occur frequently. Although the existing flexible base asphalt pavement can solve the above problems well, it is difficult to be popularized in the arid desert region of Northwest China due to the lack of strength and high cost. Therefore, this study proposes to promote the design concept of oversized flexible grass-roots pavement in arid desert areas, and the preliminary study shows that oversized flexible grass-roots asphalt pavement has good structural performance, which can effectively solve the structural damage problem of the current flexible grass-roots pavement, thus prolonging the service life of the pavement. The existing design standards and test methods are mainly for asphalt mixtures with aggregate nominal maximum size $\leq 37.5\text{mm}$, which are not applicable to the super-large particle size asphalt mixtures SLSM-50. Therefore, this thesis carries out the research on the design and performance of super-large particle size asphalt mixtures based on the characteristics of the climatic environment of the arid desert area, and the main work is as follows:

(1) The three-dimensional mechanical strength numerical test model of SLSM-50 was established by PFC^{3D} discrete element software, including uniaxial compression and splitting numerical models, and the reliability of the numerical test method was confirmed by comparing the results with those of the indoor test; on this basis, the changing rule of the mechanical strength of SLSM-50 was investigated with the indoor test in different specimen sizes and the reasonable specimen size was determined by combining with the empirical relationship between the specimen size and the maximum nominal particle size of the aggregate. On this basis, the change rule of mechanical strength of SLSM-50 under different specimen sizes was investigated with indoor tests, and the reasonable specimen size of SLSM-50 was determined by combining the empirical relationship between specimen size and the maximum nominal size of aggregate.

(2) The coarse aggregate grading was determined by the indoor grade-by-grade filling test with the minimum gap rate as the criterion; the strength of asphalt mortar under different values of i was studied, and the fine aggregate grading was determined by the criterion of the optimal mechanical strength; the changing rule of the mechanical properties of SLSM-50 was investigated under the different ratios of asphalt mortar and coarse aggregate, and the mineral grading of SLSM-50 was determined by the principle of the optimization of the mechanical properties and on this basis, the optimized grading to meet the mechanical strength was proposed, and the reasonable specimen size of SLSM-50 was determined. On this

basis, the optimized SLSM-50 strong embedded skeleton compact grading range that meets 95% guarantee rate is proposed.

(3) By studying the influence of *VV*, *VFA* and *VMA* on the mechanical properties and road performance of SLSM-50, the relationship model between volumetric parameters of SLSM-50 and mechanical properties and road performance was established respectively; the volumetric parameter design standard of SLSM-50 was proposed on the basis of the optimal performance.

(4) Based on the research results of SLSM-50 mineral gradation and volumetric parameter design standard, the design method of SLSM-50 is proposed; based on the characteristics of arid desert region climate environment, the research on the designed SLSM-50 high temperature stability, low temperature crack resistance and water stability is carried out comparing with the conventional large-size ATB-30 and ATB-40 mixtures, and it verifies the superiority of SLSM-50 in road use performance.

Key words: highway engineering; super large size mixture ; PFC^{3D}; strong embedded skeleton dense gradation ; volumetric parameter criteria

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 大粒径沥青混合料试件尺寸研究现状.....	3
1.2.2 大粒径沥青混合料矿料级配设计研究现状.....	3
1.2.3 大粒径沥青混合料设计方法及设计标准研究现状.....	5
1.2.4 大粒径沥青混合料性能研究现状.....	5
1.3 研究内容及技术路线.....	7
1.3.1 研究内容.....	7
1.3.2 技术路线.....	8
第二章 超大粒径沥青混合料合理试件尺寸研究.....	9
2.1 试验方案.....	9
2.1.1 试验材料.....	9
2.1.2 试验方法.....	10
2.2 SLSM-50 力学性能数值模型研究.....	13
2.2.1 数值模型的构建.....	13
2.2.2 数值试验过程模拟.....	18
2.2.3 数值模型可靠性验证.....	19
2.3 SLSM-50 合理试件尺寸研究.....	20
2.3.1 SLSM-50 试件尺寸与集料最大公称粒径之间的经验关系.....	20
2.3.2 试件尺寸对 SLSM-50 力学性能影响研究.....	20
2.3.3 SLSM-50 合理试件尺寸的确定.....	24
2.4 本章小结.....	24
第三章 超大粒径沥青混合料矿料级配研究.....	26
3.1 SLSM-50 组成结构、级配设计方法及思路.....	26
3.1.1 SLSM-50 组成结构.....	26
3.1.2 SLSM-50 级配设计方法.....	27

3.1.3 SLSM-50 级配设计思路	27
3.2 粗细集料粒径组成划分	28
3.3 基于逐级填充法的粗集料级配研究	28
3.3.1 粗集料逐级填充试验	28
3.3.2 I级填充试验结果	29
3.3.3 II级填充试验结果	29
3.3.4 III级填充试验结果	30
3.4 基于变 i 法的细集料级配研究	31
3.4.1 细集料级配设计	31
3.4.2 沥青砂浆试件试验方法	31
3.5 粗集料与沥青砂浆比例对 SLSM-50 力学性能的影响研究	32
3.5.1 粗集料与沥青砂浆比例对骨架密实间断级配强度的影响	33
3.5.2 粗集料与沥青砂浆比例对骨架密实连续级配强度的影响	34
3.5.3 SLSM-50 强嵌挤骨架密实级配优化	37
3.6 本章小结	39
第四章 超大粒径沥青混合料体积参数设计标准研究	41
4.1 研究方案	41
4.1.1 试验方案	41
4.1.2 试验结果	42
4.2 SLSM-50 空隙率 VV 设计标准	43
4.2.1 不同级配和油石比对 VV 的影响	43
4.2.2 VV 与力学性能之间的关系	44
4.2.3 VV 与路用性能之间的关系	45
4.2.4 VV 设计标准	46
4.3 SLSM-50 矿料间隙率 VMA 设计标准	47
4.3.1 不同级配和油石比对 VMA 的影响	47
4.3.2 VMA 与力学性能之间的关系	48
4.3.3 VMA 与路用性能之间的关系	49
4.3.4 VMA 设计标准	50
4.4 SLSM-50 沥青饱和度 VFA 设计标准	51
4.4.1 不同级配和油石比对 VFA 的影响	51
4.4.2 VFA 与力学性能之间的关系	51
4.4.3 VFA 与路用性能之间的关系	52

4.4.4 VFA 设计标准	54
4.5 本章小结	55
第五章 超大粒径沥青混合料设计方法与路用性能研究	56
5.1 超大粒径沥青混合料设计方法研究	56
5.1.1 SLSM-50 设计标准	56
5.1.2 SLSM-50 设计流程	56
5.1.3 SLSM-50 设计示例	58
5.2 超大粒径沥青混合料路用性能研究	60
5.2.1 SLSM-50 高温稳定性	60
5.2.2 SLSM-50 低温抗裂性	62
5.2.3 SLSM-50 水稳定性	64
5.3 本章小结	65
第六章 结论与展望	66
6.1 结论	66
6.2 创新点	66
6.3 展望	67
参考文献	68
致谢	73
作者简介	74

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近年来,我国西北干旱荒漠地区基础设施建设取得了长足的发展,高速公路和铁路等重点交通项目的建设极大促进了西北交通运输的发展。“十四五规划”中明确提出要加快建设交通强国,加强出疆入藏、中西部地区等骨干通道建设^[1]。未来大量的道路要在西北干旱荒漠地区建设,以新疆为例,打通天山区域大通道是“十四五”新疆交通建设的关键目标之一,西北干旱荒漠区随着道路交通量的持续增加和超载现象的日益严重,对沥青路面结构强度的要求也越来越高,纵观该地区目前沥青路面建设的现状,90%以上的道路采用了半刚性基层沥青路面结构,该结构虽然有较高的强度、刚度和施工方便等优势,但在实际道路工程建设中,由于水泥稳定类基层材料的温度、湿度敏感性较强,受干旱荒漠地区大温差和干燥环境的影响,极易导致半刚性基层在强度形成和使用过程中出现较多的干缩和温缩裂缝,进而延伸到面层形成反射裂缝。加之公路运输的高速重载化,进一步导致路面结构性能劣化和病害扩展,产生严重的裂缝、车辙等病害,造成道路服役性能降低和使用寿命大幅缩减^[2]。因此,如何解决西北干旱荒漠地区沥青路面的裂缝和车辙病害,从而延长道路使用寿命,降低及节约建养费用,已成为制约该地区交通建设快速和高质量发展的主要难题之一。

为了解决上述问题,近年来我国在公路建设项目中引入了多种创新技术,包括 Superpave 沥青混合料技术、高性能多功能沥青胶砂技术、高模量耐疲劳沥青混合料技术、SMA 沥青路面技术以及改性沥青技术等^[3-6]。这些技术的应用在一定程度上提高了沥青路面的使用寿命和性能,但路面车辙和裂缝问题仍然存在。造成这种情况的原因可能是施工质量管理不够严格,但更深层次的原因可能是现有的路面设计理念及其结构无法满足快速增长的交通需求。而国外研究者为了减少沥青路面早期病害,延长路面使用寿命,多采用厚沥青混合料或全厚式沥青混合料柔性基层结构,取得了良好的应用效果^[7]。该结构路面基层主要采用开级配沥青碎石、大粒径改性沥青碎石和级配碎石等柔性材料,柔性基层材料不仅能满足基层材料的强度要求,更能有效缓解半刚性基层材料的收缩开裂问题,但由于其沥青用量大及造价高,很难在我国西北干旱荒漠地区大范围推广使用。因此,在降低柔性基层造价的同时确保沥青路面性能,是我国西北干旱荒漠地区柔性基层沥青路面研究的关键。

1.1.2 研究意义

国内外道路研究者认为通过调整集料的组成（尺寸、形状、结构和级配），能够有效增强沥青路面抗变形性能，并有助于减轻早期路面病害^[8, 9]。大粒径沥青混合料（Large Stone Asphalt Mixture，以下简称 LSAM）被定义为最大公称粒径介于 25mm 至 63mm 之间的热拌沥青混合料。该类沥青混合料通过使用较大的集料粒径，能在铺设过程中更容易地形成稳定的骨架嵌挤结构，从而提升路面性能^[10, 11]。此外，由于 LSAM 集料粒径大，实际施工过程中可实现大厚度摊铺，不仅可以加快施工进度，减少施工过程中的热量损失，还可增大沥青路面层间结合力，有效避免粗集料被压碎，延长压实时间等^[12, 13]。基于上述优点，LSAM 柔性基层有望在降低工程造价的同时提升沥青路面使用性能。但是当前国内外研究主要集中在集料最大公称粒径 $\leq 37.5\text{mm}$ 的 LSAM，因此，本研究参照国内外研究成果，并从集料尺寸的角度出发，研究集料最大公称粒径为 53mm 的超大粒径沥青混合料（Super Large Size Mixture，以下简称 SLSM-50），由于集料尺寸效应的显著影响，当前采用的沥青混合料试验方法已不适用于 SLSM-50，具体表现在以下几个方面：

①试件尺寸方面：在材料尺寸效应的影响下，传统 LSAM 使用的大马歇尔试件尺寸直径 152.4mm，高度 95.3mm 已不适用于 SLSM-50。因此，研究 SLSM-50 的合理试件尺寸对于准确预测现场混合料性能是非常重要的。

②矿料级配与路用性能方面：国内外对于 SLSM-50 矿料级配相关研究较少，已有研究表明通过调整级配使沥青混合料形成骨架密实结构，可以有效提升其抗反射裂缝和抗车辙病害能力^[9, 14, 15]。因此，SLSM-50 在级配设计时如何既能形成骨架结构，又要确保密实，是 SLSM-50 需要解决的关键问题之一。同时，对于设计出的嵌挤骨架密实级配 SLSM-50 路用性能（高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性）是否优良，有待进一步研究。

③设计标准与设计方法方面：国内外对于 SLSM-50 体积参数设计标准及设计方法的相关研究甚少。对于超大粒径沥青混合料 SLSM-50，研究出新的试件尺寸以及矿料级配，这自然会对其体积参数的设计标准提出新的要求，因此，如何确定 SLSM-50 的体积参数设计标准及设计方法，是研究 SLSM-50 又一关键问题。

针对上述问题，本文拟开展超大粒径沥青混合料设计与性能研究，研究成果有望解决西北干旱荒漠地区沥青路面频发的裂缝、车辙等病害问题，提高沥青路面耐久性并降低建养费用。此外，对大粒径沥青混合料柔性基层相关技术标准的完善具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 大粒径沥青混合料试件尺寸研究现状

沥青混合料同混凝土材料类似，具有非均质性，不同的试件尺寸所产生的尺寸效应会影响沥青混合料的力学性能及路用性能^[16, 17]。尺寸效应通常表现为当试件尺寸较小时会出现较高的强度与离散性，对于集料公称最大粒径小于 26.5mm 沥青混合料，通常采用标准马歇尔（ $\Phi 101.6\text{mm} \times h 63.5\text{mm}$ ）成型试件。而对于集料公称最大粒径超过 26.5mm 的情况，所成型的 LSAM 试件则表现出更高的强度和离散性。1970 年，美国宾夕法尼亚交通部针对标准和大型马歇尔试件（分别为 $\Phi 101.6\text{mm} \times h 63.5\text{mm}$ 和 $\Phi 152.4\text{mm} \times h 95.3\text{mm}$ ）的物理及力学特性进行了详细研究，并建议 LSAM 的公称最大粒径应控制在 37.5mm 以内，并采用大型马歇尔试验方法设计混合料的配合比^[18]。Kandhal 等^[19]通过使用大型马歇尔击实仪和旋转压实仪制备了 LSAM 试件，并对比了两种不同尺寸试件的马歇尔稳定性、间接拉伸强度和抗变形能力，发现试件直径从 101.6mm 增加到 152.4mm 时，各项指标的变异性降低，因此推荐采用直径为 152.4mm 的试模制作 LSAM。Mahboub 等^[20]同样使用直径为 152.4mm 的大型马歇尔击实仪制备试件，并通过测试其密度和空隙率，发现这些试件与现场铺设的 LSAM 在密度和空隙率上较为接近，建议采用此尺寸进行 LSAM 配合比设计。Newtson 等^[21]的数值模拟研究指出，与标准马歇尔试件相比，大型马歇尔试件的稳定性和流值分别提高了 2.25 倍和 1.50 倍。付其林等^[22]研究了试件体积规格对大粒径排水沥青碎石（OLSM）性能的影响，发现直径为 152.4mm 的试件能更真实地反映 OLSM 的压实特性和力学强度，因此推荐使用此尺寸试件进行 OLSM 的性能测定。依据我国现行的规范（JTG E20-2011），当沥青混合料的集料公称最大粒径超过 26.5mm 时，室内的物理力学性能测试应使用直径为 152.4mm、高度为 93.5mm 的大型马歇尔试件来进行。

综上所述，国内外对于 LSAM 物理力学指标测试，主要采用大马歇尔法、旋转压实法或振动成型法制备 $\Phi 152.4\text{mm} \times h 95.3\text{mm}$ 的 LSAM 圆柱体试件，且上述文献中涉及的 LSAM 集料最大公称粒径均 $\leq 37.5\text{mm}$ 。根据尺寸效应研究中，试件直径不宜小于集料最大公称粒径 4 倍的原则，大型马歇尔试件尺寸已不能满足 SLSM-50 开展力学性能试验的要求，因此，研究 SLSM-50 合理试件尺寸对于准确预测现场混合料性能是非常重要的。

1.2.2 大粒径沥青混合料矿料级配设计研究现状

沥青混合料的矿料级配设计方面，国际上主要发展了几种理论，包括最大密度曲

线理论、颗粒干涉理论、 n 值法、 K 值法和 i 值法。Fuller^[23]通过广泛的实验研究，提出了最大密度曲线理论，该理论指出，通过特定大小的颗粒以规律性排列和均匀的粗细分布，可以实现混合料的最高密实度和最低空隙率。Talbot^[24]在此基础上进一步发展了 n 值法，他认为由于矿料级配实际应用中的波动，最佳的指数应是一个变量而非固定值。前苏联 Иванов^[25]提出了 K 值法理论，指出当粗集料以 1/16 的比例递减，相邻级别集料的质量比为 0.43 时，可以获得最高的密实度，该方法虽然在提高密实度方面有显著效果，但在实际施工中容易导致离析。我国林绣贤教授在研究了 n 值法和 K 值法中存在不足的基础上，提出了基于筛余量递减系数 i 的级配设计方法，该设计方法更适合中国的实际情况^[26]。Weymouth^[27]在 1938 年提出了颗粒干涉理论，该理论基于填充理念，通过控制填充物的粒径不超过上一级矿料的空隙，实现逐级填充，达到密实效果。该理论能够确保粗集料形成稳定骨架，细集料有效填充空隙，为 LSAM 级配设计提供了重要参考。

目前，国内外对于 LSAM 矿料级配的研究具体如下：1993 年，美国 NCHRP Report 386 (National Cooperative Highway Research Program Report 386) 给出了两种级配类型（密实级配、开级配）大粒径沥青混合料的矿料级配范围^[28]。随后，英国、澳大利亚和加拿大等国家也根据本土实际情况，制定了相应的 LSAM 矿料级配标准。国内规范(JTG F40-2017)也对公称最大粒径在 26.5mm~37.5mm 范围内的 LSAM 矿料级配提出了具体要求。刘中林^[29]提出骨架密实型 LSAM-30 混合料在力学性能上优于悬浮密实型，并提出了基于矿料骨架稳定性的级配设计方法。资建民等^[30]采用均匀设计试验、体积设计法、逐级填充试验以及林氏法确定了 LSAM-30 矿料级配，并对 LSAM-30 进行室内检验及试验段现场检测对比研究，结果表明：LSAM-30 具有较好的高温稳定性、水稳定性和低温抗裂性。付其林^[31]采用变 i 法，并利用贝雷法对关键筛孔进行划分后，通过计算，分别确定了粗集料和细集料 i 值的取值范围，并利用 VCA 和 CBR 值对集料的 i 值进行了优化，最终合成了 OLSM-30 的设计级配。江晓霞等^[32]研究了 LSAM-40 的级配分形特征，提出了基于分形维数的大粒径沥青混合料设计方法。朱昆等^[33]通过逐级填充试验和单轴贯入试验确定了基于抗剪强度最优的 LSAM-30 级配，并将设计出的级配与施工现场级配进行性能试验对比，试验结果表明：LSAM-30 经过抗剪切级配设计后，其抗剪切性能得到了显著提高。邬俊峰等^[34]等引入了“预留空隙率”的概念，验证了贝雷法设计 LSAM 的可行性。罗亮^[35]根据多种理论确定了 LSAM 的关键筛孔，提出了级配计算方法。闫强^[36]采用 CAVF 分段级配设计理念，并基于贝雷法对粗细集料进行划分，通过逐级填充试验和 i 法分别确定粗、细集料级配，引入有效沥青含量计算公式和矿料吸收沥青公式对沥青用量进行计算，提出了基于目标空隙率的 OLSM-30 级配设计方法。

综上所述,国内外 LSAM 矿料级配设计方法主要包括贝雷法、逐级填充法、均匀设计法、变 i 法或 SAC 法等,且上述文献中涉及的 LSAM 集料最大公称粒径均 $\leq 37.5\text{mm}$ 。而 SLSM-50 集料最大公称粒径为 53mm ,级配设计时如何既能形成嵌挤骨架结构,又能保证密实,是 SLSM-50 需要解决的关键问题之一。

1.2.3 大粒径沥青混合料设计方法及设计标准研究现状

国内外大粒径沥青混合料的设计方法均是在马歇尔设计法和 Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) 设计法及评价体系上建立的。1969 年,美国宾夕法尼亚交通运输部的 Kandhal 博士引入了适用于 LSAM 的大马歇尔试验方法,随后被正式采纳为 ASTM D 5581 设计标准^[37-39]。进入 20 世纪 90 年代,美国的 SHRP 项目推动了 Superpave 方法的采用,极大提高了 LSAM 的道路性能,使之成为国际上重载交通道路的优选材料^[40]。德克萨斯州运输学会基于 Superpave 方法,结合体积特性指标和旋转压实成型技术,发布了 NCHRP Report 386 研究报告以进一步指导 LSAM 的设计和评价^[28]。南非沥青协会也发布了 LSAM 设计指南,推荐使用机械拌和和特定成型方法,以及侧重于体积参数和力学测试进行 LSAM 设计^[41]。

针对大粒径沥青混合料的研究在我国虽然起步较晚,但现有规范 (JTG E20-2011) 已经提出对大于 26.5mm 矿料公称最大粒径的混合料采用大型马歇尔试验。陆长兵等^[42]应用贝雷法对矿料级配进行设计,结合析漏和飞散试验,创新性地提出了排水性 LSAM 的设计方法。刘中林等^[29]通过深入分析 LSAM 的结构特性和室内道路性能,以及基于实际道路的测试结果,推出了一种全面考虑骨架接触度和稳定度的综合 LSAM 设计方法。高文阳^[43]分析了超大粒径混合料 SLSM 的结构特性和力学强度形成机理,提出了一种适合最大公称粒径不小于 37.5mm 的 SLSM 设计方法。李文良^[44]基于骨架接触度和稳定度的最优化,提出了一种最大粒径为 37.5mm 的 LSAM 设计方法。邬俊峰^[45]引入预留空隙率概念,并采用贝雷法级配设计思想,开发了一种大粒径透水 LSAM 的级配设计方法。索智等^[46]基于贝雷法和 SAC 矿料级配,提出了一种适用于最大粒径不小于 25mm 的 LSAM 级配设计方法。

综上所述,国内外 LSAM 的设计方法主要采用大马歇尔设计法,贝雷法及 Superpave 设计方法等,在上述文献中除了高文阳,其它的研究的集料最大公称粒径都不超过 37.5mm 。对于如何提出 SLSM-50 体积参数标准及设计方法,是研究 SLSM-50 需要解决的又一关键问题。

1.2.4 大粒径沥青混合料性能研究现状

在 20 世纪 90 年代,面对道路超载、重载以及交通的日益增加问题,国际上开始

重新评估和研究大粒径沥青混合料 (LSAM)。Brown 等^[8]发现沥青混合料的性能受到集料最大公称粒径的显著影响, 具体体现在稳定性和抗滑性与粒径大小成正比, 同时还能有效减少沥青的消耗量。为解决美国 Kentucky 州的沥青路面车辙问题, Mahboub 等^[47, 48]进行了室内试验, 以探究不同类型 LSAM 的性能, 其在抵抗永久形变和车辙方面表现出色, 因此推荐在承受重载交通的道路上采用 LSAM。Khosla 等^[49]等人通过车辙和回弹模量试验对 LSAM 性能的研究, 发现 LSAM 的回弹模量约为传统沥青混合料的两倍, 并且在抗车辙性能和耐久性能方面均有提升。Park 等^[50]等人对 LSAM 的力学性质及其抗车辙能力进行了深入研究, 结果表明 LSAM 在抗车辙能力上优于了传统和改性沥青混合料。南非沥青协会在四条 LSAM 试验道路上进行的路用性能重载模拟试验显示, 与传统沥青混合料相比, LSAM 的车辙变形量仅为其的 1/20~1/2, 且在高温 40°C 至 50°C 或低温条件下, LSAM 表现出更佳的性能, 证实了设计良好的 LSAM 具备优异的温度稳定性^[45, 51]。

自 2000 年起, 国内开始对大粒径沥青混合料 (LSAM) 开展研究, 并通过在实际道路上铺设 LSAM 试验段来检验其路用性能。王富玉等^[52]在石家庄至黄骅高速公路上铺设了一段 LSAM 试验路段, 经使用 1 年多的验证, 结果表明: LSAM 具有良好的路用性能, 可延长路面使用寿命。叶松等^[53]分别采用主骨架空隙体积填充法、Superpave 方法和贝雷法设计了多种 LSAM 级配, 并对 LSAM 进行了力学特性和路用性能研究。结果表明: LSAM 具有良好的力学强度和路用性能。许福等^[54]开展了 OLSM-30 大粒径沥青混合料的水稳定性研究, 并针对不同气候区域制定了相应的检测标准。陆长兵等^[55]通过在河南省商开高速公路上铺设 LSAM 试验路段, 对 LSAM 的结构设计、防止反射裂缝的能力、高温性能及抗疲劳性能进行了系统研究, 验证了其优越的性能。冯新军等^[56]结合旧水泥混凝土路面改建实体工程, 对大粒径沥青稳定碎石基层 ATB-40 路用性能进行了研究。结果表明: ATB-40 在旧水泥混凝土路面改建工程中, 可以有效减少路面裂缝的产生, 并具有良好的高温稳定性和水稳定性。翟瑞鑫等^[57]基于 overlay tester 试验研究 LSAM 抗反射开裂性能, 结果表明: 低温及温差较大时橡胶粉改性沥青大粒径混合料抗裂性更佳。赵彬强等^[14]通过车辙试验测试了不同厚度的大粒径沥青混合料车辙试件的动稳定度, 推荐了适宜的车辙试件厚度, 并测试了不同结构类型 LSAM 的动稳定度和总变形量。结果表明: 骨架型的 LSAM 高温性能优于悬浮密实型的 LSAM。李翱翔^[58]采用 FLAC^{3D} 离散元分析软件模拟分析了 LSAM 在不同条件下的抗反射裂缝效果, 并通过实际道路测试进行了验证。结果表明: LSAM 具有较好的力学性能和路用性能, 并且能有效的抑制反射裂缝的产生。魏建辉^[59]通过 overlay tester 试验模拟路面结构, 对 LSAM 裂缝扩展行为进行研究。结果表明: LSAM 的低温抗裂性能和抗疲劳性能良好, 应力和重复应变对其影响不大, 是沥青路面用于防止反射裂缝