

文章编号:1671-6833(2010)03-0082-05

## 级配对开级配大粒径沥青碎石路用性能的影响

付其林<sup>1</sup>, 陈拴发<sup>2</sup>, 陈华鑫<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘 要:** 为了分析集料级配对开级配大粒径沥青碎石路用性能的影响, 采用变*i*法设计开级配大粒径沥青碎石(OLSM)的集料级配, 通过浸水大马歇尔试验、冻融劈裂试验、车辙试验和低温弯曲试验等性能试验, 研究 OLSM 集料级配与其空隙率、强度、水稳定性、高温稳定性和低温抗裂性等路用性能的关系。结果表明: 随着*i*值的减小、粗集料含量的增加, OLSM 的空隙率增大, 强度、水稳定性和高温稳定性降低, 低温抗裂性先提高后降低; 并基于路用性能的技术要求, 推荐了满足各项性能的 OLSM 集料级配。

**关键词:** 道路工程; 开级配大粒径沥青碎石(OLSM); 集料级配; 路用性能

**中图分类号:** U416.217

**文献标识码:** A

### 0 引言

开级配大粒径沥青碎石(Open-graded Large Stone Asphalt Mixes, 简称 OLSM)是指集料公称最大粒径在 25~63 mm 之间嵌挤骨架-空隙型结构的热拌沥青混合料, 它主要适用于柔性基层或旧路加铺改造的下面层, 以起到抗车辙、排除路面内积滞水以及延缓反射裂缝的作用<sup>[1-3]</sup>。目前, 国内外道路工作者已经对 OLSM 进行了一定的研究<sup>[4-5]</sup>, 并推荐了 OLSM 集料级配范围。文献[6]研究表明, 集料级配是影响沥青混合料路用性能的主要因素之一。然而, 目前针对集料级配对 OLSM 路用性能的影响研究不足<sup>[7]</sup>。因此, 笔者采用变*i*法对 OLSM 集料级配进行了设计<sup>[8-9]</sup>, 通过不同级配混合料性能试验, 分析了集料级配与空隙率、强度、水稳定性、高温稳定性和低温抗裂性等性能的关系, 并基于路用性能的技术要求, 推荐了满足各项性能的 OLSM 集料级配, 为其组成设计及施工控制提供了参考依据。

### 1 试验材料

#### 1.1 沥青

沥青采用盘锦 90#道路石油沥青, 其主要技术性质见表 1。

表 1 沥青的技术性质试验结果

Tab.1 Technological oroperties of asphalt

试验项目	技术标准	试验结果
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	80~100	96.5
延度(5 cm/min, 10℃)/cm	≥30	93.4
延度(5 cm/min, 15℃)/cm	≥100	>150
软化点(R&B)/℃	≤44	44.0
闪点(COC)/℃	≤245	276
TFOT(163℃, 5 h)质量损失/%	±0.8	-0.389

#### 1.2 集料与级配

集料为石灰岩, 矿粉为石灰岩磨制的石粉, 其主要物理性能指标见表 2。参考国外开级配大粒径沥青碎石级配范围和变*i*法设计思想<sup>[9]</sup>, 按照粗集料含量逐渐增多, *i*值逐渐变小的方法设计了 8 种 OLSM 级配, 见表 3。

#### 1.3 最佳沥青用量的确定

参考开级配沥青混合料确定沥青用量的方法, 通过析漏试验确定各级配最大沥青用量, 通过飞散试验各级配最小沥青用量, 确定的 8 种级配油石比范围, 见表 4。在各自级配油石比范围的基础上, 通过大马歇尔试验, 采用体积法测定试件的密度和空隙率, 结合大马歇尔稳定度、流值、毛体积相对密度、空隙率等指标, 综合确定出 8 种级配的最佳油石比, 见表 4。

收稿日期: 2010-01-07; 修订日期: 2010-02-03

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200631800005)

作者简介: 付其林(1982-)男, 安徽界首人, 长安大学博士研究生, 主要从事路面结构与材料方面的研究, E-mail: fuqilin100@163.com.

表 2 集料的物理性能指标试验结果  
Tab.2 Physical properties of aggregate

项目	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	压碎值 /%	洛杉矶磨耗损失 /%	针片状含量 /%	小于 0.075 mm 的含量 /%	亲水系数 /%
集料	2.713	24.8	22.3	7.1	0.2	—
矿粉	2.706	—	—	—	—	2.5

表 3 OLSM 试验级配  
Tab.3 Gradation component of OLSM

级配 编号	i 值	通过下列粗级配筛孔 (mm) 的百分率							i 值	通过下列细级配筛孔 (mm) 的百分率				
		31.5	26.5	19.0	13.2	9.5	4.75	2.36		1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1#	0.630	100	98	80	62	49	31	20	0.680	17	11	8	6	4
2#	0.604	100	94	74	57	45	27	16	0.653	14	9	6	4	3
3#	0.579	100	90	70	52	40	23	14	0.626	11	7	4	3	2
4#	0.553	100	86	65	47	36	20	11	0.599	8	5	3	2	2
5#	0.527	100	82	60	43	32	17	9	0.572	7	4	3	2	1
6#	0.502	100	78	56	39	28	14	7	0.545	5	3	2	1	1
7#	0.476	100	74	52	35	25	12	7	0.517	4	2	1	1	0
8#	0.450	100	70	48	31	21	10	5	0.490	3	2	1	0	0

表 4 OLSM 的沥青用量  
Tab.4 Asphalt content of OLSM

级配编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
油石比范围	2.7~3.6	2.6~3.5	2.6~3.4	2.5~3.3	2.4~3.2	2.4~3.1	2.3~3.0	2.3~2.9
最佳油石比	3.35	3.25	3.15	3.05	2.95	2.85	2.75	2.65

2 试验方法

2.1 浸水大马歇尔试验

采用大马歇尔击实仪,在 140~150℃ 温度下,双面各击实 75 次成型  $\Phi 152.4$  mm 的试件;采用体积法确定试件的密度和空隙率;在试验温度 60℃、加载速度 50 mm/min 条件下进行浸水大马歇尔试验,分别测定浸水 45 min 试件和浸水 48 h 试件的稳定度,以残留稳定度作为评价水稳定性的指标。

2.2 冻融劈裂试验

采用大马歇尔击实仪,在 140~150℃ 温度下,双面各击实 75 次成型  $\Phi 152.4$  mm 的试件;采用体积法确定试件的密度和空隙率;在试验温度 25℃、加载速度 50 mm/min 下进行冻融劈裂试验,分别测定未冻融循环试件和冻融循环试件的劈裂抗拉强度,以冻融劈裂强度比作为评价水稳定性的指标。

2.3 车辙试验

以大马歇尔成型试件密度  $100\pm 1\%$  作为控制标准,在 140~150℃ 温度下,采用轮碾仪成型 300 mm×300 mm×100 mm 试板,在试验温度

60℃、轮压 0.7 MPa 下进行车辙试验,以动稳定度作为评价高温稳定性的指标。

2.4 低温弯曲试验

在 140~150℃ 温度下,采用轮碾仪成型 300 mm×300 mm×50 mm 试板,切制成 250 mm×50 mm×50 mm 的棱柱体小梁试样;跨径 200 mm,中点加载,加载速度 50 mm/min,在试验温度 -10℃ 进行低温弯曲小梁试验,以最大弯拉应变作为评价低温抗裂性的指标。

3 试验结果与分析

3.1 集料级配对 OLSM 空隙率的影响

空隙率是沥青混合料设计的重要指标,对 8 种不同级配在各自的最佳油石比下,分别做大马歇尔试验,采用体积法确定试件的密度和空隙率,试验结果见图 1。

从图 1 可以看出,1~8#级配的空隙率,随着 i 值的逐渐减小、粗集料的逐渐增多呈逐渐增大趋势,1#和 2#级配的空隙率小于 15%,3~8#级配的空隙率大于 15%。文献[10]研究表明,当沥青混合料空隙率大于 15% 时,能够将渗入路面结构的雨水通过其内部的连通空隙及时排出,具有较好的

排水性能.这说明,集料级配对 OLSM 空隙率影响显著,且 3~8#级配 OLSM 具有良好的排水性能.

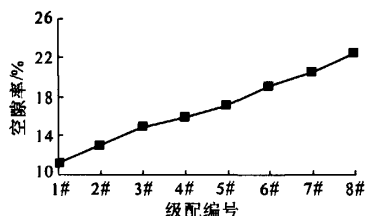


图1 级配与空隙率的关系

Fig.1 Relation of gradation and porosity

### 3.2 集料级配对 OLSM 强度的影响

强度是沥青混合料设计的重要指标,对 8 种不同级配在各自的最佳油石比下,分别做大马歇尔试验,稳定度、流值和劈裂强度的试验结果见图 2~4.

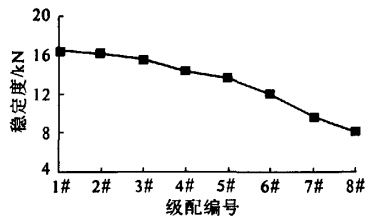


图2 级配与稳定度的关系

Fig.2 Relation of gradation and stability

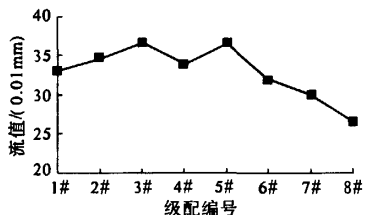


图3 级配与流值的关系

Fig.3 Relation of gradation and flow value

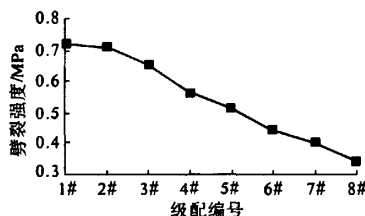


图4 级配与劈裂强度的关系

Fig.4 Relation of gradation and cleavage strength

从图 2~4 可以看出,1~8#级配的大马歇尔稳定度和劈裂强度,随着  $i$  值的逐渐减小、粗集料的逐渐增多呈逐渐降低趋势;随着级配的变化,流值的变化幅度不大.这主要是因为 OLSM 是嵌挤

骨架-空隙型结构,随着粗集料的增多、细集料的减少,混合料中没有足够的胶浆联结骨架和填充骨架间的空隙,从而不利于形成稳定的结构体.这说明,集料级配对 OLSM 的强度有显著影响,且随着  $i$  值的逐渐减小、粗集料的逐渐增多,强度呈逐渐降低趋势.

### 3.3 集料级配对 OLSM 水稳定性的影响

水稳定性是沥青混合料重要的路用性能之一,对 8 种不同级配在各自的最佳油石比下,分别做浸水大马歇尔试验,冻融劈裂试验,结果见图 5,6.

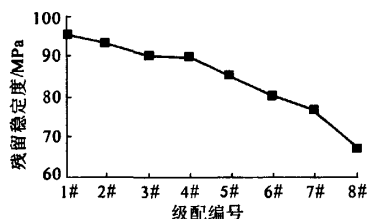


图5 级配与残留稳定度的关系

Fig.5 Relation of gradation and residual stability

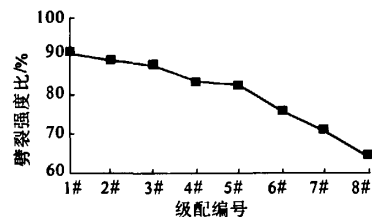


图6 级配与劈裂强度比的关系

Fig.6 Relation of gradation and tensile strength ratio

从图 5,6 可以看出,1~8#级配的残留稳定度和冻融劈裂强度比,随着  $i$  值的逐渐减小、粗集料的逐渐增多呈逐渐降低趋势;且 1~7#级配的残留稳定度均大于 75%、冻融劈裂强度比均大于 70%,8#级配的残留稳定度小于 75%、冻融劈裂强度比均小于 70%。这说明,集料级配对 OLSM 的水稳定性有显著影响,OLSM 的水稳定性随着  $i$  值的减小、粗集料的增多而降低,且 1~7#级配 OLSM 具有良好的水稳定性,8#级配的水稳定性较差.

### 3.4 集料级配对 OLSM 高温稳定性的影响

高温稳定性是沥青混合料重要的路用性能之一,对 8 种不同级配在各自的最佳油石比下,分别做车辙试验,结果见图 7.从图 7 可以看出,1~8#级配的动稳定度,随着  $i$  值的逐渐减小、粗集料的逐渐增多呈逐渐降低趋势,1~7#级配的动稳定度均大于 800 次·mm<sup>-1</sup>,8#级配的动稳定度小于

800次 $\cdot\text{mm}^{-1}$ 。这说明,集料级配对 OLSM 的高温稳定性有显著影响,OLSM 的高温稳定性随着  $i$  值的减小、粗集料的增多而降低,且 1~7#级配 OLSM 具有良好的高温稳定性,8#级配的高温稳定性较差。

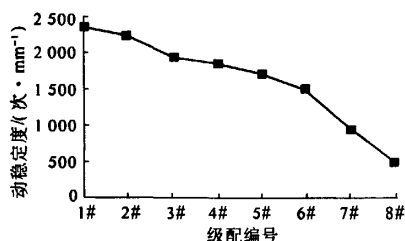


图7 级配与动稳定度的关系

Fig.7 Relation of gradation and dynamic stability

### 3.5 集料级配对 OLSM 低温抗裂性的影响

低温抗裂性是沥青混合料重要的路用性能之一,对 8 种不同级配在各自的最佳油石比下,分别做低温弯曲小梁试验,结果见图 8。

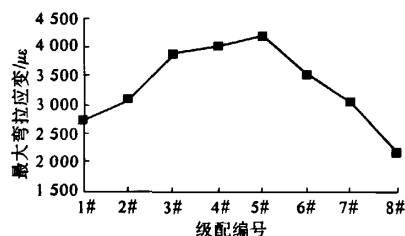


图8 级配与最大弯拉应变的关系

Fig.8 Relation of gradation and flexure tensile strain

从图 8 可以看出,从 1~5#级配,随着  $i$  值的逐渐减小、粗集料的逐渐增多最大弯拉应变呈逐渐增大趋势,且 5#级配的最大弯拉应变值最大;从 5~8#级配,随着  $i$  值的逐渐减小、粗集料的逐渐增多最大弯拉应变呈逐渐降低趋势。这主要是因为随着粗集料的增多,OLSM 空隙率逐渐增大,较大的空隙率降低了其劲度模量,从而有利于增大其变形能力;当空隙率过大时,混合料中没有足够的胶浆联结骨架,从而降低了其变形能力。这说明,集料级配对 OLSM 的低温抗裂性有显著影响,其低温抗裂性随着  $i$  值的减小、粗集料的增多呈先提高后降低的变化规律,且 2~7#级配 OLSM 低温抗裂性相对较好。

## 4 结论

(1)集料级配对 OLSM 空隙率和强度影响显

著。随着  $i$  值的减小、粗集料含量的增加,OLSM 空隙率呈逐渐增大趋势,OLSM 强度呈逐渐降低趋势,其流值的变化幅度不大。

(2)集料级配对 OLSM 路用性能有显著影响。随着  $i$  值的减小、粗集料含量的逐渐增加,OLSM 水稳定性和高温稳定性均呈逐渐降低趋势,其低温抗裂性呈先提高后降低趋势。

(3)在目前 OLSM 集料级配参考范围内设计的 8 种级配中,3~8#级配具有较好的排水性能,1~7#级配具有较好的高温稳定和水稳定性,2~7#级配具有较好的低温抗裂性。综合平衡考虑各个方面的性能,推荐 3~7#级配为满足各项路用性能的 OLSM 集料级配。

## 参考文献:

- [1] BAOSHAN H. Fundamental characterization and numerical simulation of large stone asphalt mixes[D]. Louisiana: Louisiana State University, 2000.
- [2] WILLIAMS E G. Design and construction of large stone HMA bases in kentucky [J]. Hot Mix Asphalt Technology, 1988,31(1):37-42.
- [3] COREE B, BUTTON J W. Full-scale rutting tests of large stone asphalt mixes[J]. Transportation Research Record, 1997(1):62-72.
- [4] NCHRP REPORT386. Design and Evaluation of Large Stone Asphalt Mixes[R]. Transportation Research Board National Research council, 2000.
- [5] 刘中林,王富玉,郝培文,等.大粒径沥青混合料组成结构的研究[J].土木工程学报,2004,37(7):59-63.
- [6] 申爱琴,蒋庆华,祁秀林.矿料级配对沥青混合料路用性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(6):1-4.
- [7] 王松根,房建果,王林,等.大碎石沥青混合料柔性基层在路面补强中的应用研究[J].中国公路学报,2004,7(17):10-15.
- [8] 林绣贤.沥青混凝土合理集料组成的计算公式[J].华东公路,2003,1(2):82-84.
- [9] 彭波.基于变  $i$  法理论的级配组成设计方法[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2005,29(5):751-754.
- [10] 马翔,倪富健,王艳,等.排水性沥青混合料渗透性测试与分析[J].建筑材料学报,2009,12(2):168-172.

## Influence of Aggregate Gradation on Pavement Performance of Open - graded Large Stone Asphalt Mixes

FÚ Qi - lin<sup>1</sup>, CHEN Shuan - fa<sup>2</sup>, CHEN Hua - xin<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of aggregate gradation on pavement performance of open - graded large stone asphalt mixes (OLSM), the numerical calculation method of varying I is used to design aggregate gradation of OLSM, and based on the results of immersion large - scale Marshall test, freeze - thaw split test, rutting test and bending test at low temperature, the relationships between the porosity, strength, water stability, high temperature stability, and low - temperature crack resistance of OLSM and aggregate gradation are analyzed in this paper. Research shows that with the value of I decreasing and content of coarse aggregate increasing, the porosity of OLSM increases, the strength, water stability and high temperature stability of OLSM decrease, and low - temperature crack resistance of it increases first and then decreases. Based on the technical requirements, the reasonable aggregate gradation of OLSM is recommended.

**Key words:** road engineering; open - graded large stone asphalt mixes (OLSM); aggregate gradation; pavement performance

(上接第 72 页)

- |   |  |
|---|--|
| <p>[3] LI T Q, CHOO B S, NETHERCOT D A. Connection element method for the analysis of semi - rigid frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 32(2): 143 - 171.</p> <p>[4] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.</p> | <p>[5] GB 50017 - 2003 钢结构设计规范[S].</p> <p>[6] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.</p> <p>[7] 佟晓利, 赵国藩. 一种与结构可靠度分析几何法相结合的相应面法[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 51 - 57.</p> |
|---|--|

## Reliability Analysis of System Stiffness of Semi - rigid Steel Frame

HOU Ying, HUO Da

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Gradient optimization method is combined with finite element method to solve reliability problem with implicit performance function. By giving examples, dominant failure modes of system stiffness of semi - rigid steel frame are analyzed and compared with that of its corresponding rigid frame. The PNET method is adopted to discuss the effect of connection stiffness and P -  $\Delta$  effect on the reliability of system stiffness of semi - rigid frame. The results show that dominant failure mode of system stiffness of semi - rigid steel frame is the interstorey drift and the same as that of its corresponding rigid frame; the semi - rigid connections have an important effect on the reliability of structural system stiffness and increase the effect of P -  $\Delta$  effect on system reliability.

**Key words:** semi - rigid joint; steel frame; system stiffness; reliability; P -  $\Delta$  second order effect