

文章编号: 0451-0712(2005)06-0168-06

中图分类号: U414.75

文献标识码: A

高温多雨地区表面层沥青混合料级配的选择

韩海峰¹, 吕伟民²

(1. 上海市浦东新区公路管理署 上海市 201200; 2. 同济大学道路与机场工程系 上海市 200092)

摘 要: 选取 10 种级配, 以混合料的结构密实性、浸水车辙稳定性和压实性能为基础, 提出了在高温多雨地区, 满足表面层混合料结构和性能要求的连续密级配的选择方法, 研究表明: 最大密实线和 Superpave 控制点可作为了解混合料结构、压实性和永久变形特性的参数依据; 在最大密实线和控制点下限之间选取连续密级配, 可使混合料兼具良好的结构密实性、浸水车辙稳定性和压实性能, 混合料也因此更适用于环境因素复杂的高温多雨地区。

关键词: 沥青混合料; 级配; 混合料结构, 压实性; Superpave 控制点

在高温多雨地区, 理想的表面层级配应使混合料同时满足如下要求: (1) 具有良好的抗高温变形和抗水侵害能力; (2) 具有良好的施工和易性和压实性能; (3) 维护沥青结构层的整体致密性^[1]。比较而言, 连续密级配更能兼顾这些要求, 但将连续密级配用于表面层时, 需根据实际情况调整集料的分布, 以确保混合料的结构既致密又稳定、强劲。本研究以 0.45 次幂最大密度曲线、Superpave 级配控制点、禁区为主要的级配控制参数, 以 10 种表面层级配为研究对象, 探讨级配类型、级配控制参数、混合料的结构和性能之间的相互联系, 从混合料的结构密实性、浸水车辙稳定性和压实性能 3 方面, 总结在高温多雨地区, 满足表面层混合料结构和性能要求的连续密级配的选择方法。

1. 集料级配的选取与混合料试验设计

1.1 用于研究的级配及其分布特征

选取 10 种最大公称粒径为 13.2 mm 的级配, 根据级配相对于控制点的位置, 将 10 种级配划分为两个系列: 系列一为处于控制点约束范围内的级配, 包括 AC-13 I High、AC-13 II High、AK-13A High、AK-13B High、AC-13 I Low、FC-13A high; 系列二为超出控制点约束并低于控制点低限的级配, 包括 AC-13 II Low、AK-13A Low、AK-13B Low 和 FC-13A Low。所有的级配曲线均采用 0.45 次幂曲线绘制, 参考 Superpave 集料规范, 将级配禁区

(RZ)、控制点(CPs)和最大密实线(MDL)一并绘于图中^[2], 其中, 禁区和控制点的通过率限分别采用 Superpave 规范中与 12.5 mm 最大工程粒径相对应的约束范围。所有试验级配及其相应编号列于表 1。

两系列级配曲线分别如图 1 和图 2 所示, 图 1 中, AC-13 I High 高于 Superpave 禁区; AC-13 II High 和 AK-13A High 穿过禁区; AC-13 I Low 和 AK-13B High 低于禁区; FC-13A High 沿禁区低限。图 2 中, 4 种级配的分布总趋势为依次向下远离控制点低限, 其中, FC-13A Low 更接近于 Superpave 级配控制点低限。

1.2 试验材料及试件制备

试验选用 70 号泰州基质沥青, 表观相对密度为 1.029; 细集料选用石灰石屑, 表观相对密度为 2.736; 粗集料选用砂岩, 表观相对密度为 2.712, 毛体积相对密度为 2.692; 填充料选用石灰石粉, 相对密度为 2.720。沥青混合料采用初始计算沥青用量^[2], 各级配混合料的沥青用量如表 2。

混合料经短期老化后, 制成直径和高度分别为 150 mm 和 75 mm 的圆柱体试件。试件采用 Superpave 旋转压实仪(SGC)压实, 压实应力、基座底部转速分别为 600 kPa 和 30 转/min, 压实角为 1.25(°)。系统预设的初始和最大压实次数分别为 8 次和 600 次; 压实采用控制高度模式, 初始压实温度为 130~135℃。以规则试件的毛体积密度控

表 1 试验选用的集料级配

筛孔尺寸/mm	通过率/%									
	AC-13 I High(1)	AC-13 I Low	AC-13 II High	AC-13 II Low	AK-13A High	AK-13A Low	AK-13B High	AK-13B Low	FC-13A High	FC-13A Low
16.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
13.2	100	95	100	90	100	90	100	85	100	95
9.5	88	70	80	60	80	60	70	50	85	65
4.75	68	48	52	34	53	30	40	18	60	40
2.36	53	36	38	22	40	20	30	10	40	25
1.18	41	24	28	14	30	15	22	8	26	16
0.6	30	18	20	8	23	10	15	5	19	10
0.3	22	12	14	5	18	7	12	3	16	7
0.15	16	8	10	3	12	5	9	3	12	5
0.075	8	4	8	2	8	4	6	2	6	4

注: High、Low 分别表示某一级配的高、低通过率限。

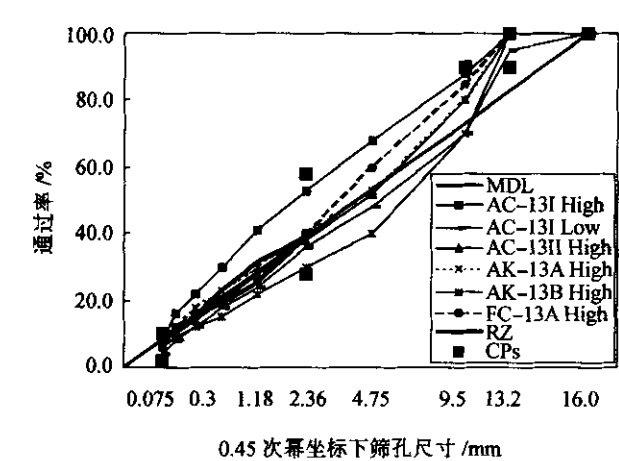


图 1 级配系列一中级配曲线

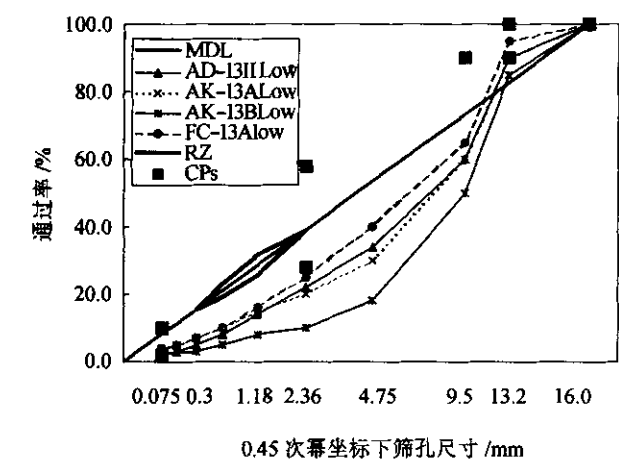


图 2 级配系列二中级配曲线

表 2 各级配混合料沥青质量百分含量 %

级配	沥青含量	级配	沥青含量
AC-13 I High	5.2	AK-13A Low	4.6
AC-13 I Low	4.7	AK-13B High	5.0
AC-13 II High	4.9	AK-13B Low	4.5
AC-13 II Low	4.5	FC-13A High	5.1
AK-13A High	4.9	FC-13A Low	4.5

制混合料试件的密实度,试件的空隙率保持在7.0%±0.5%的范围内。

1.3 试验内容

主要试验内容包括:(1)通过 SGC 数据采集系统获取混合料在目标压实高度时的旋转压实次数(N_{aim}),以此为指标评价混合料的压实性能,本研究中试件的目标压实高度为 75 mm,相应的目标空隙率为7.0%±0.5%;(2)为充分模拟高温多雨地区路面的自然环境,采用沥青路面分析仪(APA)测试试件的浸水车辙深度,以此考察温度和水对混合料永久变形特性的综合影响^[3]。

将混合料试件在 60 ℃水浴中浸泡 4 h,然后采用 APA 测试其浸水车辙深度^[3]。待测平行试件分为 3 组,分别置于 APA 的左、中、右轮道。以 8 000 次轮载作用的车辙深度值作为混合料永久变形的评价指标。通过 APA 数据采集系统,每个轮道可采集到一个车辙深度值。以 3 个轮道车辙深度的平均值作为最终的车辙深度测试结果。APA 轮压设置为 0.44 kN,软管气压为 0.69 MPa,测试温度为 60 ℃^[4]。

2 试验结果与分析

将各级配所对应的混合料试件进行切割并做截面处理,按照级配系列分析各级配混合料的实际结构特征。计算各级配混合料的平均 N_{aim} 和APA 浸水车辙深度平均值,结果一并列入表3,其中,级配AK-13B Low 所对应的混合料试件在 600 次旋转压实结束时均未达到 75 mm 的目标高度,此时试件的平均

高度为 87.9 mm。具体的试验和分析结果如下。

2.1 不同级配混合料的结构剖面分析

(1)级配系列一中各级配混合料的结构剖面如图 3 中(a)~(f)所示。

(2)级配系列二中各级配混合料的结构剖面如图 4 中(a)~(d)所示。

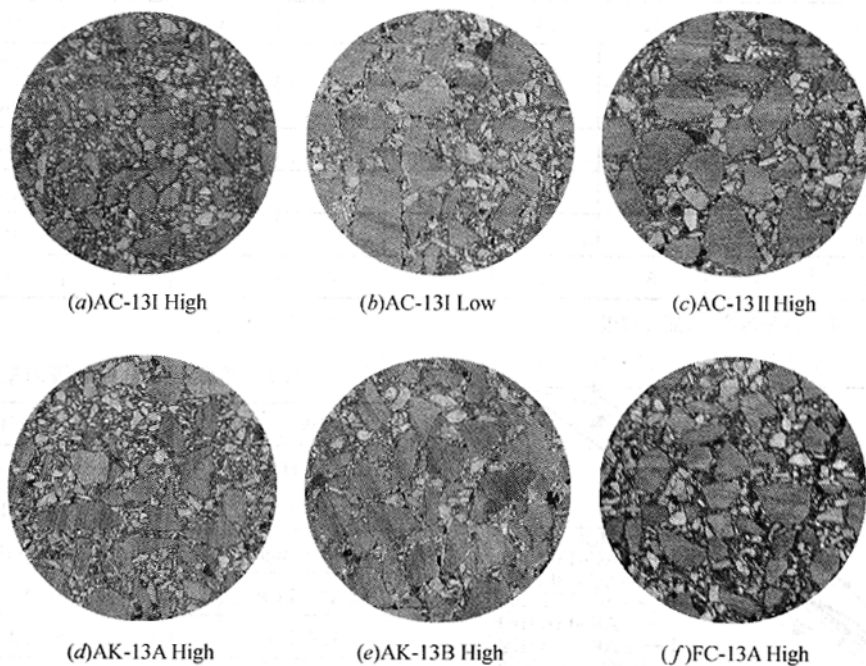


图 3 级配系列一中各级配混合料的结构剖面图

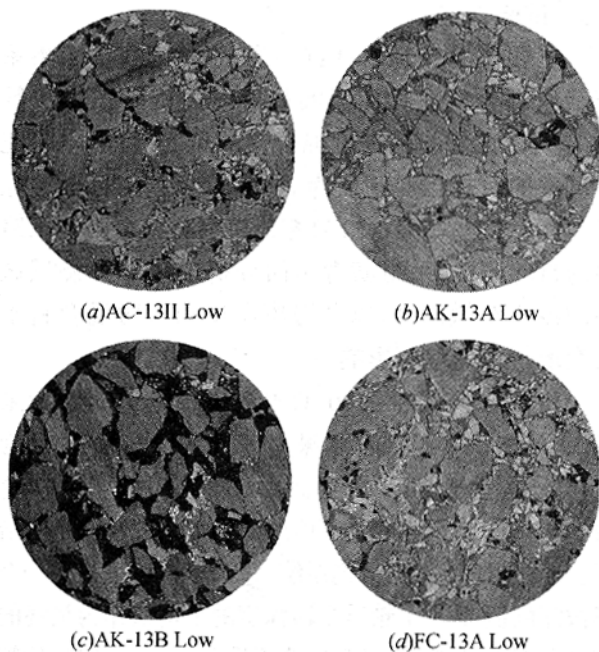


图 4 级配系列二中各级配混合料的结构剖面

分析两个级配系列中,各混合料的结构剖面特征如下。

(1)处于控制点约束范围内的连续级配,混合料均形成了致密的结构,其中,高于 Superpave 禁区并更接近于控制点高限的 AC-13 I High 级配,其混合料结构表现出明显的悬浮密实特征;穿过禁区并在细集料区(小于 2.36 mm)高于最大密实线的级配,如 AK-13A High,其混合料结构也具有一定的悬浮密实结构特征;对于其他 4 种穿过、低于禁区的连续级配,各级配所形成的混合料结构没有实质性的差异,结构剖面显示,这些级配所对应的混合料,细料含量相对较少,粗、中集料部分形成了较为明显的嵌挤作用,虽然在级配类型上存在一定的局限性,不能完全形成骨架密实结构,但混合料结构中,细集料对粗集料的排开作用已不明显,混合料具有了连续分布和嵌挤致密的特征。在这 4 种级配中,细集料区的级配曲线低于最大密实线的距离越远,级配整体越

表 3 各级配混合料平均 N_{aim} 及 APA 浸水车辙深度平均值

级配系列一	平均 N_{aim} /次	平均车辙深度/mm	级配系列二	平均 N_{aim} /次	平均车辙深度/mm
AC-13 I High	45	4.97	AC-13 II Low	586	2.18
AC-13 I Low	75	3.51	AK-13A Low	523	2.14
AC-13 II High	32	4.60	AK-13B Low	600 ⁽¹⁾	4.53
AK-13A High	48	4.28	FC-13A Low	272	1.88
AK-13B High	55	4.35			
FC-13A High	78	3.62			

注:(1)与级配 AK-13B Low 相对应的混合料在 600 次旋转压实后试件的平均高度为 87.9mm。

靠近控制点低限,混合料结构中粗集料的骨架形态及粗、中集料的嵌挤作用表现得就越明显。

(2)不处于控制点约束范围内的连续级配,混合料难以形成致密的结构;结合级配曲线分析可知:在 2.36 mm 处,距离控制点低限越远的级配,混合料结构的致密程度越差,地貌也越接近于骨架空隙结构。

2.2 不同级配混合料平均 N_{aim} 试验结果分析

根据表 3 中试验结果,在两个不同级配系列、以及同一级配系列的不同级配类型之间,混合料的平均 N_{aim} 在数值上均有差异。采用统计分析考察级配

因素对平均 N_{aim} 影响的显著性程度,具体内容如下。

(1)利用方差分析(Analysis of Variance)探讨级配系列相对于控制点的分布状况对沥青混合料压实性能的影响。其中,“平均 N_{aim} ”为响应变量,“级配系列相对于控制点分布状况”为影响因素,该因素包括“级配处于控制点约束范围内”和“级配处于控制点约束范围外”两个水平。级配 AK-13B Low 所对应混合料的平均 N_{aim} 取 600 次,方差分析预设显著性水平 $\alpha=0.05$,结果如表 4。

表 4 级配系列分布状况对平均 N_{aim} 影响的方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方	F 比	P 值
级配分布状况	1	464 112	464 112	51.98	$9.155\ 46\times10^{-5}$
误差	8	71 424	8 928		
总体	9	535 536			

根据表 4 中方差分析结果,影响因素 F 检验的显著性概率 P 值为 $9.155\ 46\times10^{-5}$,小于预设的显著性水平 α 。由此判断^[5],级配系列相对于控制点的分布状况对沥青混合料压实性能具有显著影响。

(2)用 Tukey—Kramer 方法对上述因素“级配系列相对于控制点分布状况”两个水平的平均 N_{aim} 进行均值比较(Comparison of Means),以确定两水平间 N_{aim} 均值差异的显著性。预设显著性水平 $\alpha=0.05$,结果列于表 5。如表 5 所示,两水平均值比较的置信区间,其上、下限皆为负值(区间内不包含 0), T 检验的结果表明:处于控制点约束范围内的级配系列与处于控制点约束范围外且低于控制点低限的级配系列,相应的平均 N_{aim} 间有显著差异,其中后者平均 N_{aim} 更大,即压实性能更差。

(3)采用方差分析探讨每一级配系列内不同级配类型对 N_{aim} 的影响。其中, N_{aim} 为响应变量,级配类型为影响因素。在级配系列一中,影响因素包括 4 个水平,分别为高于、穿过、低于和沿着 Superpave 禁

表 5 与级配分布状况两水平相应的平均 N_{aim} 均值比较

因素水平	均值 次	均值间差异 次	置信区间		$\alpha=0.05$ 时 显著性
			下限	上限	
级配处于控制点约束范围内	56				
级配处于控制点约束范围外	495	—439	—580.4	—299.1	显著

区 4 种级配类型;在级配系列二中,所包括的 4 种级配分别被作为影响因素的 4 个水平。两级配系列的方差分析结果分别列于表 6 和表 7。表 6 和表 7 中结果显示:在两个级配系列中,影响因素 F 检验的显著性概率 P 值均小于预设的显著性水平 α 。由此判断:级配类型对沥青混合料压实性能具有显著影响。结合图 4 和表 3 可知:级配系列二中,在 2.36 mm 筛径处,级配低于控制点低限的距离越远,混合料越难压实,相应于级配 AK-13B Low 的混合料甚至在完成预设最大旋转压实次数后没有达到 75 mm 的目标高度。

表 6 级配系列—中级配类型对平均 N_{aim} 影响的方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方	F 比	P 值
级配分布状况	3	7 724. 2	2 574. 7	34. 9	$3. 279\ 3\times 10^{-10}$
误差	32	2 358. 7	73. 7		
总体	35	10 082. 9			

表 7 级配系列二中级配类型对平均 N_{aim} 影响的方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方	F 比	P 值
级配分布状况	3	418 968. 1	139 656. 0	276. 96	$2. 220\ 5\times 10^{-18}$
误差	20	10 084. 8	504. 2		
总体	23	429 052. 9			

2. 3 不同级配混合料平均 APA 浸水车辙深度试验结果分析

应用统计分析研究不同级配混合料间浸水车辙深度差异的显著性,具体内容包括以下几点。

(1)用 Tukey—Kramer 方法对两级配系列混合料的浸水车辙深度进行均值比较,以此确定两级配系列混合料间平均车辙深度均值差异的显著性。预设显著性水平 $\alpha=0. 05$,分析结果如表 8。根据表 8 中结果,两级配系列均值比较的置信区间,其上、下限皆为正值, T 检验的结果表明:处于控制点约束范围内的级配系列与处于控制点约束范围外且低于控制点低限的级配系列,混合料的平均浸水车辙深度间有显著差异,其中前者的车辙稳定性更差。

表 8 两级配系列混合料平均浸水车辙深度均值比较

级配系列	均值 mm	均值间差异 mm	置信区间		$\alpha=0. 05$ 时 显著性
			下限	限	
系列一	4. 22				
系列二	2. 68	1. 54	0. 23	2. 85	显著

(2)采用多元均值比较分析级配系列一中 4 种混合料浸水车辙深度均值差异的显著性,预设显著性水平 $\alpha=0. 05$,结果如表 9。分析结果表明:级配系列一中,高于、穿过、低于 Superpave 禁区,以及沿禁区低限 4 种级配类型的混合料浸水车辙深度均值间无显著差异,亦即级配相对于禁区的分布对沥青混合料浸水车辙稳定性无实质影响。

(3)对级配系列二采用相似的分析,结果列于表 10。

表 10 中分析结果表明:在级配系列二中,级配 AK-13B Low 与其余 3 种级配相互间混合料的浸

表 9 级配系列—中 4 种级配类型
混合料浸水车辙深度均值比较

级配	均值 mm	均值间差异 mm	置信区间		$\alpha=0. 05$ 时 显著性
			下限	上限	
ABOVE ⁽¹⁾	4. 97				
ALONG	3. 62	1. 34	—0. 596	3. 281	不显著
BELOW	3. 93	1. 04	—0. 644	2. 714	不显著
THROUGH	4. 44	0. 53	—1. 154	2. 204	不显著
ALONG	3. 62				
BELOW	3. 93	—0. 31	—1. 986	1. 371	不显著
THROUGH	4. 44	—0. 82	—2. 496	0. 861	不显著
BELOW	3. 93				
THROUGH	4. 44	—0. 51	—1. 881	0. 861	不显著

注:(1)级配 ABOVE、ALONG、BELOW 和 THROUGH 分别代表高于、沿着(低限)、低于和穿过 Superpave 禁区的级配类型。

表 10 级配系列二中四种级配混合料
浸水车辙深度均值比较

级配	均值 mm	均值间差异 mm	置信区间		$\alpha=0. 05$ 时 显著性
			下限	上限	
AC-13 Ⅱ Low	2. 18				
AK-13A Low	2. 14	0. 04	—2. 331	2. 738	不显著
AK-13B Low	5. 05	—2. 87	—5. 569	—0. 170	显著
FC-13A Low	1. 88	0. 30	—2. 395	3. 004	不显著
AK-13A Low	2. 14				
AK-13B Low	5. 05	—2. 91	—5. 323	—0. 494	显著
FC-13A Low	1. 88	0. 27	—2. 149	2. 681	不显著
AK-13B Low	5. 05				
FC-13A Low	1. 88	3. 18	0. 760	5. 589	显著

水车辙深度差异显著,该级配的混合料具有最大车辙深度;级配 AC-13 Ⅱ Low、AK-13ALow 和 FC-13ALow 相互间混合料的浸水车辙深度无显著差异。

3 结语

(1)控制点可以作为选择连续级配混合料结构的参考依据,处于控制点约束范围内的连续级配保证了混合料结构的密实性,处于控制点约束范围外的级配,混合料的结构致密性较差;在细集料区,级配曲线越接近控制点低限(即远离最大密实线),混合料形成骨架结构的倾向越明显,当级配处于最大密实线和级配控制点低限之间的范围时,混合料的结构形态介于悬浮密实结构和骨架空隙结构之间,集料结构兼具了密实、嵌挤的特征。

(2)级配系列相对于 Superpave 控制点的分布状况对沥青混合料的压实性能有显著影响,与处于控制点约束范围内的级配相比,当级配超出控制点的约束并低于控制点低限时,混合料的压实性能较

差;处于控制点约束范围外的级配,在 2.36 mm 筛径处,级配低于控制点低限的距离越远,混合料越难压实。

(3) 在初始沥青用量下,处于控制点约束范围内的级配系列与超出控制点约束并低于控制点低限的级配系列,混合料间的平均浸水车辙深度差异显著,其中,前者的车辙稳定性相对较差;压实性能过差的混合料,其浸水车辙性能也可能较差,本文中采用 AK-13B Low 级配的混合料即为一例。

(4) 在初始沥青用量下,高于、穿过、低于 Superpave 禁区,以及沿着禁区低限 4 种级配类型,其相应混合料的浸水车辙深度间无显著差异,由此认为,在本文研究背景下,级配相对于 Superpave 禁区的分布状况对沥青混合料的浸水车辙稳定性无实质影响。

(5) 最大密实线和 Superpave 控制点可作为了解混合料结构、压实性和永久变形特性的参数依据,在最大密实线和控制点下限之间选择级配,可有效缩小连续密级配的选取范围,同时,处于该范围内的级配,混合料兼备了良好的结构密实性、浸水车辙稳

定性和压实性能,因此,在该范围内选取的连续密级配,其沥青混合料更适用于环境因素复杂的高温多雨地区。

参考文献:

- [1] 韩海峰. 高等级公路沥青材料永久变形特性研究[D]. 同济大学博士学位论文,2004.
- [2] Cominsky R J, Huber G A, Kennedy T W, Anderson M. The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays [R]. SHRP-A-307, Strategic Highway Research Program. National Research Council Washington, DC, 1993.
- [3] 韩海峰,吕伟民,何桂平. 水作用下沥青混合料永久变形特性的表现形式[J]. 中国公路学报,2003,16(3).
- [4] Brown, E R, Kandhal P S, Zhang J. Performance Testing for Hot Mix Asphalt (Executive Summary) [R]. NCAT Report No. 2001-05A. National Center for Asphalt Technology, 2001.
- [5] Fisher R A. Statistical Methods, Experimental Design, and Scientific Inference [M]. Oxford Science Publication, 1993.

A Selection Method of Gradation of Asphalt Mixture Used in Surface Course of High Temperature and Rainy Regions

HAN Hai-feng¹, LV Wei-min²

(1. Shanghai Pudong New Area Road Administrative Department, Shanghai 201200, China; 2. Road and Airport Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: On the basis of the structural compaction, the wet rutting potential, and the compactable ability of asphalt mixtures, a method is introduced to select the continuous aggregate gradations in the high temperature and rainy regions. Ten gradations are selected. Results indicate that the maximum density line (MDL) and the Superpave control points (CPs) can be used as the important parameters to learn the structure, the compactability, and the permanent deformation potential of mixtures. When the gradation is selected in the gap between the MDL and the lower Superpave CPs, the mixture has a better structural compaction, compactability and wet rutting resistance, so it is appropriate to select the continuous gradation in this range for designing mixtures used in the high temperature and rainy regions.

Key word: asphalt mixture; gradation; mixture structure; compactability; Superpave control points (CPs)