

改进型 SMA13 在桂柳高速水泥路面沥青 加铺层中的应用

王小华¹, 马进²

(1. 柳州高速公路运营有限公司, 广西 柳州 545005; 2. 广西交投科技有限公司)

摘要:为了保证 SMA13 沥青混凝土路面能够更好地适应不同地域交通情况和自然环境,减少原材料变异性导致的路用性能变化,依托桂柳高速公路路面改造工程,提出了一种改进型 SMA13 沥青混凝土,利用提高马歇尔击实功的方法模拟车辆荷载对压实混合料的实际作用,通过在目标配合比设计中考虑原材料级配波动的影响保证沥青混合料处于较低的变异水平。结果表明:所设计的改进型 SMA13 沥青混凝土具有十分优异的路用性能,抽检得到的油石比、矿料级配、压实度和路用性能等均处于较低的变异水平,施工质量控制和工程应用效果良好。

关键词:道路工程;改进型 SMA13;沥青加铺层;级配优化

1 前言

桂(林)柳(州)高速公路为水泥混凝土路面,自1997年通车以来,由于交通流量较大、超载重载车辆比例高、又地处桂北山区,水泥路面损坏严重。为了改善路况,桂柳高速公路于2015年开始实施水泥路面加铺沥青面层的旧路改造工作。针对桂柳高速公路沿线夏季炎热、高温多雨,交通量大、荷载重,长大纵坡较多

等工程特点,经过多方论证,沥青加铺结构的表面层最终设计为 SMA13 沥青混凝土。

目前,国内外研究人员针对 SMA 路面开展了大量的试验研究和工程应用,JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》也对其如何设计做出了相应的规定。既有研究中,SMA 在进行材料组成设计时,通常使用 50 次马歇尔击实试验结果来确定最佳油石比,并据此进行路用性能评价。这种设计思想对于中、轻交通等级的道路具有一定的合理性,但对于桂柳高速公

- *****
- [3] David J. T, Webb. Y. Stabilised Soil and the Built Environment[J]. Renewable Energy, 1994, 5(5-8): 1 066-1 080.
- [4] 朱伟,张春雷,高玉峰,等.海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J].浙江大学学报(工学版),2005(10).
- [5] 周永祥,閔培渝.不同类型盐渍土固化体的干缩与湿胀特性[J].岩土工程学报,2007(11).
- [6] 邵玉芳,龚晓南,徐日庆,等.腐殖酸对水泥土强度的影响[J].江苏大学学报(自然科学版),2007(4).
- [7] 张铁军,洪振舜,邓东升,等.水泥固化粉质土的无侧限抗压强度预测[J].东南大学学报(自然科学版),2008(5).
- [8] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等.水泥基土壤固化剂固化土的微观结构特征[J].建筑材料学报,2010(5).
- [9] Medina J, Guida H N. Stabilization of Lateritic Soils with Phosphoric Acid[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1995, 13(4): 199-216.
- [10] Helene Tremblay, Josee Duchesne, Jacques Locat, et al. Influence of the Nature of Organic Compounds on Fine Soil Stabilization with Cement[J]. Canada Geotech. J., 2002, 39: 535-546.
- [11] 汪益敏,贾娟,张丽娟,等. ISS 加固土的微观结构及强度特征[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002(9).
- [12] 董邑宁,张青娥,徐日庆,等. ZDYT-2 固化软土试验研究[J]. 土木工程学报, 2002(3).
- [13] 杨爱武,周金,孔令伟. 天津滨海新区吹填软土固化试验研究[J]. 岩土力学, 2013(9).
- [14] 黎冰. 动荷载下粘土与 EPS 颗粒混合轻质土的变形和强度特性试验研究[D]. 河海大学博士学位论文, 2007.

路这种重载交通、长大纵坡路段多的山区道路而言,由于击实次数偏低、击实功较小,不能很好地模拟重载交通的实际情况,碾压完成后 SMA 沥青混凝土路面的现场实际空隙率会明显小于设计值,导致压实度超 100% 的现象十分普遍,相应地,路用性能也会与设计结果出现较大偏差。由于桂柳高速公路地处华南湿热山区,夏季气温高,加上重载交通严重,长大纵坡处货车车速低、行驶缓慢,对沥青加铺层的材料组成设计也提出了更高的要求。

此外,由于原材料生产加工时不可避免地存在变异性,当原材料级配的变异水平过大时,会引起合成级配曲线发生明显波动,沥青混合料的材料组成会受到较大影响,从而导致路用性能降低。如果能在材料组成设计时对原材料的级配波动给予充分重视,并考虑到这一波动对路用性能所产生的不利影响,对于施工质量控制而言,具有重要意义。

针对上述问题,该文依托广西桂柳高速公路水泥路面改造工程,提出在材料组成设计中提高 SMA13 沥青混合料的击实功并充分考虑原材料级配波动范围对路用性能产生影响的技术思路,对 SMA13 沥青混合料的设计方法进行优化,得到改进型 SMA13 沥青混凝土路面,通过在桂柳高速公路中的应用,以检验其路用性能。

2 原材料

改进型 SMA13 沥青混合料,沥青使用 SBS 改性沥青 I-D,其性能指标如表 1 所示。粗集料使用辉绿岩,规格为 10~15、5~10 mm,其物理力学性能指标如表 2、3 所示。细集料使用石灰岩机制砂,规格为 0

表 1 沥青性能检测结果

项目参数	单位	试验结果	要求值
针入度(25 ℃,5 s,100 g)	0.1 mm	53	40~55
软化点(环球法)	℃	91.5	≥75
延度(5 cm/min,5 ℃)	cm	29.4	≥20
弹性恢复(25 ℃)	%	95.7	≥90
密度(25 ℃)	g/cm ³	1.029	实测
运动黏度(135 ℃)	Pa·s	2.9	≤3
质量损失	%	0.3	±1
老化 试验	针入度比(25 ℃)	79.2	≥70
	延度(5 ℃)	22.3	≥20

表 2 粒径 10~15 mm 辉绿岩粗集料性能检测结果

指标	单位	检测 结果	指标 要求	试验方法
洛杉矶磨耗值	%	7.2	≤28	T0317—2005
表观相对密度		合格	≥2.50	T0304—2005
吸水率	%	合格	≤3.0	T0305—2005
与沥青的黏附性	级	5	≥4	T0616—1993
针片状颗粒含量	%	6.3	≤12	T0312—2005
<0.075 mm 颗粒 含量(水洗法)	%	0.5	≤1	T0310—2005
软石含量	%	0.5	≤5	T0320—2000
压碎值	%	4.9	18	T0316—2005

表 3 粒径 5~10 mm 辉绿岩粗集料性能检测结果

指标	单位	检测 结果	指标 要求	试验方法
洛杉矶磨耗值	%		≤28	T0317—2005
表观相对密度		合格	≥2.50	T0304—2005
吸水率	%	合格	≤3.0	T0305—2005
针片状颗粒含量	%	10	≤18	T0312—2005
<0.075 mm(水洗法)	%	0.5	≤1	T0310—2005
软石含量	%	1.0	≤5	T0320—2000

~3 mm,其性能指标如表 4 所示。矿粉为普通矿粉,纤维使用德国进口颗粒状木质素纤维,其性能指标如表 5、6 所示。由表 1~6 可以看出:使用的原材料均符合相关技术要求。

表 4 石灰岩机制砂性能检测结果

指标	单位	检测 结果	技术 要求	试验方法
表观相对密度		2.756	≥2.60	T0328
亚甲蓝值	g/kg	1.5	≤2.5	T0349
棱角性(流动时间)	s	37	≥30	T0345

3 改进型 SMA 沥青混合料的优化设计方法

3.1 设计参数优化

桂柳高速公路水泥路面改造工程地处夏炎热区,交通荷载为特重交通等级。通过前面的调研可知,目前 SMA13 通常使用 50 次马歇尔击实试验结果来确定最佳油石比,这对于特重交通等级、长大纵坡路段多

表 5 矿粉性能检测结果

项目	单位	检测结果	要求	试验方法
表观密度	g/cm ³	2.704	≥2.50	T0352—2000
含水量	%	0.24	≤1	T0103 烘干法
<0.6 mm	%	100.0	100.0	T0351—2000
粒度范围<0.15 mm	%	98.5	90~100	T0351—2000
<0.075 mm	%	93.5	75~100	T0351—2000
外观		无团粒 结块	无团粒 结块	
亲水系数		0.77	<1	T0353—2000
塑性指数		1.6	<4	T0354—2000
加热安定性		与加热 前矿粉的 颜色一致	实测 记录	T0355—2000

表 6 纤维性能检测结果

项目	单位	检测结果	要求
灰分含量	%	15.4	18±5
pH 值		7.0	6.5~8.5
吸油率		5.4	不小于纤维质量的 5 倍
含水量	%	3.8	<5
耐热性 (210℃,2 h)		合格	颜色、体积基本无变化, 热失重不大于 6%

的桂柳高速公路而言,由于击实功较小,不能很好地模拟实际交通状况。为此,将击实功提高:由 SMA13 室内配合比试验时的 50 次马歇尔击实提高至 75 次,使得室内试验的击实功与现场的压实水平、交通荷载水平更加匹配。此外,考虑到桂柳高速公路地处夏炎热区,沥青路面的高温性能十分关键,为此将车辙试验温度由 60℃提高为 70℃,并引入相对变形指标,综合保证 SMA13 沥青混合料的高温稳定性。同时,沥青混合料的部分设计参数也根据规范要求进行了相应调整,将矿料间隙率(VMA)要求调整为不小于 16.5%、空隙率(VV)范围调整为 3.0%~4.5%,调整后的 SMA13 材料组成设计及路用性能技术要求见表 7。

3.2 目标配合比设计优化思路

目前目标配合比设计中沥青混合料的合成级配曲线,主要根据各档原材料矿料级配筛分结果的平均值进行合成后而获得,在设计阶段最终只以某一条单一的级配曲线进行体积指标及路用性能验证,如果原材料矿料级配的变异性过高,在各档冷料比例不变的情

表 7 改进型 SMA13 材料组成设计及路用性能技术要求

设计参数	单位	技术要求
击实次数	次	双面击实各 75 次
矿料间隙率 VMA	%	≥16.5
空隙率 VV	%	3~4.5
沥青饱和度 VFA	%	70~85
70℃车辙试验动稳定度	次/mm	≥5 000
70℃车辙试验相对变形	%	≤2.5
残留稳定度	%	≥85
冻融劈裂强度比	%	≥80
飞散损失率	%	≤15
析漏损失率	%	≤0.1

况下,会引起合成级配曲线发生显著波动,从而影响到沥青混合料的级配组成,并最终导致路用性能的降低,这将直接导致施工质量控制难度增大。而如果能在目标配合比设计阶段,对原材料级配波动所引起的路用性能变化给予充分重视,使得变异性导致的性能降低在可控的范围之内,对于保证工程质量具有重要意义。为此,在借鉴柳(州)南(宁)高速公路路面改造工程成功经验的基础上,提出桂柳高速公路表面层 SMA13 设计的改进思路,即:在目标配合比设计阶段,充分考虑矿料级配变异对合成级配曲线和路用性能产生的影响,并通过对均值合成级配、上控制线合成级配和下控制线合成级配的性能验证,评价原材料变异性的可接受程度,当无法接受时,需要进一步控制原材料的加工质量,以保证混合料的耐久性。采用这一思路进行改进后的 SMA13 目标配合比优化设计方法简述如下。

(1) 对原材料中的各档矿料进行多次取样筛分,获得各档矿料筛分结果的平均值、变异系数、标准差等统计参数。

(2) 按照各档矿料筛分结果的平均值加 k 倍标准差,获得各档矿料筛分结果的上波动线;按照各档矿料筛分结果的平均值减 k 倍标准差,获得各档矿料筛分结果的下波动线;由上、下波动线组成各档矿料筛分结果的波动范围,用于反映原材料的变异性。

(3) 根据各档矿料筛分结果的平均值,参考设计级配要求,确定各档矿料的合理比例,得到基于筛分结果平均值的合成级配曲线,称为均值合成级配,据此开展配合比设计工作,确定最佳油石比以及路用性能验证结果。

(4) 根据各档矿料筛分结果的上、下波动线,采用(3)中确定的各档矿料比例,进行级配合成,得到的两

条级配曲线分别称为:上控制线合成级配、下控制线合成级配,开展配合比设计工作,确定两条级配曲线的最佳油石比和路用性能验证结果。

(5) 当均值合成级配、上控制线合成级配和下控制线合成级配的路用性能均满足要求时,可选择均值合成级配曲线作为目标配合比设计的最终结果,用于指导生产。否则,说明原材料变异性过大,应调整矿料的生产加工工艺,提高质量控制水平,降低变异性。

4 桂柳高速公路改进型 SMA13 沥青混合料的优化设计

4.1 目标配合比设计优化

桂柳高速公路路面改造工程路面 1 标使用的 SMA13 设计级配要求如表 8 所示。根据工程特点, SMA13 由 10~15、5~10 mm 辉绿岩粗集料、0~3

mm 石灰岩机制砂、石灰岩矿粉共 4 档矿料组成,目标配合比优化设计流程按照下述几个步骤进行。

表 8 SMA13 沥青混凝土设计级配

筛孔尺寸/ mm	通过百分率/ %	筛孔尺寸/ mm	通过百分率/ %
16	100	1.18	19.3
13.2	95.0	0.6	16.5
9.5	63.4	0.3	13.9
4.75	27.0	0.15	11.8
2.36	22.8	0.075	10.0

(1) 获取 4 档矿料的级配变异性统计参数

对 4 档矿料进行多次取样,开展 20 次以上的平行筛分试验,计算 4 档矿料筛分结果的平均值、变异系数、标准差等统计参数,结果如表 9 所示。

表 9 4 档矿料筛分试验结果统计

粒径/ mm	10~15 mm 辉绿岩/%		5~10 mm 辉绿岩/%		0~3 mm 机制砂/%		矿粉/%	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数
16	100	0.00						
13.2	92.4	9.59	100	0.00				
9.5	9.3	10.61	97.7	16.33				
4.75	0.9	8.50	2.3	18.19	100	5.42		
2.36			0.7	20.11	82.0	8.98		
1.18					51.7	10.51		
0.6					33.9	8.77	100	0.00
0.3					21.8	9.75	99.4	0.00
0.15					15.3	12.91	95.2	4.10
0.075					9.8	15.33	85.4	1.68

(2) 获取 4 档矿料的级配变异区间

按照 4 档矿料筛分结果的平均值加、减两倍标准差,获得每档矿料筛分结果的上、下波动线,得到 4 档矿料筛分结果的级配变异区间,用于反映原材料的变异性,结果如表 10 所示。

(3) 确定基于均值合成级配的 4 档矿料合理比例

根据 4 档矿料筛分结果的平均值,参考表 8 设计级配要求,确定 4 档矿料的合理比例,得到均值合成级配。经试配,桂柳高速公路路面改造工程路面 1 标使用的 SMA13 矿料的合理比例如表 11 所示。

(4) 开展基于均值合成级配的材料组成设计和路用性能验证

采用表 11 中的级配开展配合比设计工作,确定最

佳油石比,验证路用性能。根据 3.1 节的设计参数优化思路,试验时将 SMA13 的击实功提高,由室内配合比试验时的 50 次马歇尔击实提高至 75 次,将车辙试验温度由 60℃ 提高为 70℃,并引入相对变形指标。同时,沥青混合料矿料间隙率(VMA)要求调整为不小于 16.5%、空隙率(VV)范围调整为 3.0%~4.5%。SMA13 材料组成设计结果如图 1 所示。

根据图 1 的试验结果,结合表 7 中的设计参数要求,可确定最佳油石比为 5.6%。开展最佳油石比下的相关路用性能验证,结果如表 12 所示。

由表 12 可知:均值合成级配下混合料的路用性能优异,满足技术指标要求,不用对 4 档矿料比例做出调整。

表 10 4 档矿料的级配变异区间

粒径/ mm	10~15 mm 辉绿岩/%		5~10 mm 辉绿岩/%		0~3 mm 机制砂/%		矿粉/%	
	上波动线	下波动线	上波动线	下波动线	上波动线	下波动线	上波动线	下波动线
16	100	100						
13.2	100	74.7	100	100				
9.5	11.3	7.3	100	65.8				
4.75	1.1	0.7	3.1	1.5	100	89.2		
2.36			1.0	0.4	96.7	67.3		
1.18					62.6	40.8		
0.6					39.8	28.0	100	100
0.3					26.1	17.5	100	99.4
0.15					19.3	11.3	100	87.4
0.075					12.8	6.8	88.3	82.5

表 11 均值合成级配的矿料比例及级配

粒径/ mm)	10~15 mm 辉绿岩/%	5~10 mm 辉绿岩/%	0~3 mm 机制砂/%	矿粉/ %	目标合成 级配/%	设计级 配/%
16	100	100	100	100	100	100
13.2	92.4	100	100	100	97.0	95
9.5	9.3	97.7	100	100	63.8	63.4
4.75	0.9	2.3	100	100	27.1	27
2.36	0.9	0.7	82	100	23.3	22.8
1.18	0.9	0.7	51.7	100	18.4	19.3
0.6	0.9	0.7	33.9	100	15.4	16.5
0.3	0.9	0.7	21.8	99.4	13.4	13.9
0.15	0.9	0.7	15.3	95.2	11.8	11.8
0.075	0.9	0.7	9.8	85.4	9.9	10
比例	39	35	17	9		

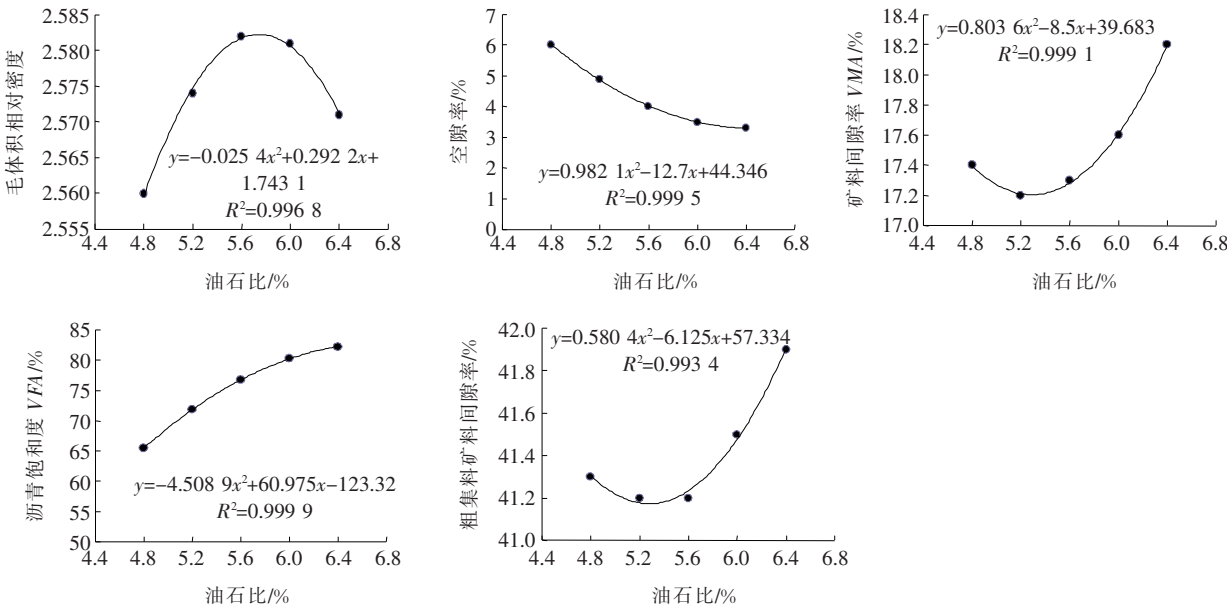


图 1 SMA13 材料组成设计结果

表 12 SMA13 路用性能验证

设计参数	单位	试验结果	技术要求
70℃动稳定度	次/mm	5 984	≥5 000
70℃相对变形	%	2.3	≤2.5
残留稳定度	%	95.2	≥85
冻融劈裂强度比	%	89.5	≥80
肯塔堡飞散试验	%	3.0(20℃)	≤15
飞散损失率		3.9(60℃)	
析漏损失率	%	0.05	≤0.1

(5) 上、下控制线合成级配的性能验证

根据 4 档矿料筛分结果的上、下波动线,采用(4)中确定的各档矿料比例,进行级配合成,得到上控制线合成级配、下控制线合成级配,结果如表 13 所示。

从表 13 可以看出:受矿料级配变异性的作用,上、下控制线的一些筛孔,与表 8 中的设计级配要求相比,存在一定偏差,会给材料组成带来较大影响。

采用表 13 中的级配开展配合比设计和路用性能验证工作,主要试验结果如表 14 所示。

表 13 上、下控制线合成级配组成

粒径/ mm	上控制线/ %	下控制线/ %	设计级配/ %
16	100	100	100
13.2	100	90.1	95.0
9.5	65.4	51.9	63.4
4.75	27.5	25.0	27.0
2.36	26.2	20.9	22.8
1.18	20.4	16.4	19.3
0.6	16.5	14.2	16.5
0.3	14.2	12.4	13.9
0.15	13.0	10.2	11.8
0.075	10.9	9.0	10.0

表 14 上、下控制线配合比设计及性能验证结果

最佳油石比/ %		车辙试验		水稳定性试验	
		60℃动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	相对变 形/%	残留稳定 度/%	冻融劈裂 强度比/%
上控制线	5.7	5 153	2.4	88.2	87.2
下控制线	5.4	5 263	2.3	93.6	85.1
设计要求		≥5 000	≤2.5	≥85	≥80

由表 14 可知:虽然上、下控制线合成级配的路用性能符合技术指标要求,但总体上二者的性能都不如均值合成级配,由原材料级配变异性所引起的沥青混合料路用性能的降低还是比较显著。所以,为了保证工程质量,对于原材料的级配控制一定要给予充分重视,使其处于较低的变异水平,将合成级配曲线控制在上、下控制线之间。

通过上述试验研究发现,对于桂柳高速公路路面改造工程路面 1 标而言,均值合成级配、上控制线合成级配和下控制线合成级配 3 条级配曲线的路用性能均可通过验证,最终可以选择均值合成级配所确定的 4 档矿料比例作为最终的优化设计结果。

4.2 设计结果

综合上述试验结果,可以确定用于该工程的 SMA13 沥青混合料的目标配合比冷料比例为(10~15 mm):(5~10 mm):(0~3 mm):矿粉=39%:35%:17%:9%,最佳油石比为 5.6%。

5 工程应用效果

改进型 SMA13 在桂柳高速公路路面改造工程中共铺筑 96.025 km,施工过程中对其进行了大样本量的路用性能抽检试验,路面 1 标的抽检试验结果如表 15 所示。

从表 15 可以看出:①改进型 SMA13 沥青混合料路用性能的变异性较低,油石比、矿料级配、压实度和路用性能等均处于较低的变异水平,工程质量控制良好;②改进后 SMA13 的 70℃车辙试验动稳定度抽检结果可达 6 354 次/mm,高温性能十分优异,对于地处夏炎热区、交通荷载重的桂柳高速公路而言,有利于保证路面的高温耐久性,工程应用效果良好。

根据前面的试验研究和工程应用可知:桂柳高速公路使用的改进型 SMA13 之所以具有较低的施工变异性,是由于在目标配合比设计阶段充分考虑了矿料

级配变异对合成级配曲线和路用性能所产生的影响,并通过对均值合成级配、上控制线合成级配和下控制线合成级配的性能验证,评价原材料变异性的可接受程度,以保证混合料的耐久性,对施工质量控制而言更加有利。

表 15 桂柳高速公路路面改造工程路面 1 标 SMA13 路用性能抽检结果

抽检指标	样本量/个	变异系数/%	抽检结果平均值
油石比	37	3.1	5.68%
0.075 mm 通过率	37	6.7	9.7%
2.36 mm 通过率	37	5.4	22.2%
4.75 mm 通过率	37	7.2	26.2%
70 ℃ 动稳定度	21	6.2	6 354 次/mm
70 ℃ 相对变形	21	3.5	2.5%
压实度	55	0.8	99.2%

6 结语

为了保证 SMA13 沥青混凝土路面能够更好地模拟实际交通情况和自然环境,减少原材料变异性所引起的路用性能降低,依托桂柳高速公路路面改造工程,提出了一种改进型 SMA13 沥青混凝土设计思想,利用提高马歇尔击实功的方法模拟车辆荷载对压实混合料的实际作用,通过在目标配合比设计中考虑原材料级配波动的影响保证沥青混合料处于较低的变异水平。所设计的改进型 SMA13 沥青混凝土在桂柳高速公路中实现了规模化应用,抽检得到的油石比、矿料级配、压实度和路用性能等均处于较低的变异水平,路用性能优异,取得了较好的工程应用效果。研究成果可为同类工程提供一定的借鉴和参考。

参考文献:

[1] 王小华. 广西水泥路面加铺沥青面层反射裂缝防治技术研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2017.

[2] 卢永贵,赵可,张登良. SMA 骨架标准研究[J]. 长安大学学报,2002(1).

[3] 朱春福,程培峰,赵广宇. 荷载与温度耦合作用下“白加黑”复合式路面沥青加铺层的受力分析[J]. 中外公路,2020(2).

[4] 杨彦海,卞旺奎,董帅,等. 基于 SOM 聚类的不同纤维掺量下 SMA—13 路用性能对比研究[J]. 中外公路,2018(5).

[5] 邱颖峰,梁亚军,许志鸿. 对骨架密实结构判断标准的改进研究[J]. 公路交通科技,2008(2).

[6] 郭贺贺,沙海洋,仇云强,等. 旧水泥路沥青加铺层反射裂缝影响区域分析及加固方法[J]. 中外公路,2018(4).

[7] 郭鑫峰,徐勋倩,仇云强,等. 基于应力强度因子的旧水泥路面沥青加铺层反射开裂特性研究[J]. 中外公路,2019(2).

[8] 朱梦良,张起森,陈强. 沥青玛蹄脂碎石混合料的集料级配优化[J]. 中国公路学报,2001(2).

[9] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].

[10] 沈金安. 论压实沥青混合料的密度、空隙率与压实度问题[J]. 公路,1996(6).

[11] 吴旷怀,张肖宁. 沥青混合料设计的主骨料空隙体填充法研究及应用[J]. 中南公路工程,2004(29).

[12] Xudong. Wang, Lei. Zhang, Optimal Bitumen — Aggregate Ratio Selection Method of Hot Mix Asphalt Based on Closest Compaction Condition[J]. Journal of Testing and Evaluation,2009,37(5):490.

[13] 黄建有,周兴业,谢国瑞. 基于原材料变异性的沥青混合料目标配合比级配范围确定方法[J]. 公路交通科技(应用技术版),2014(8).

[14] 马士宾,徐文斌,许艳伟,等. 基于可靠度的旧沥青路面加铺混凝土结构优化设计研究[J]. 中外公路,2018(3).

[15] 郭贺贺,沙海洋,仇云强,等. 旧水泥路沥青加铺层反射裂缝影响区域分析及加固方法[J]. 中外公路,2018(4).

[16] 郭鑫峰,徐勋倩,仇云强,等. 基于应力强度因子的旧水泥路面沥青加铺层反射开裂特性研究[J]. 中外公路,2019(2).