

基于多目标加权的不同集料沥青砂浆性能评价研究^{*}

陈鑫, 姚佳良

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为研究不同集料对沥青砂浆混合料性能的影响, 基于等体积换算原则, 在 AC-13 沥青混合料的基础上, 计算并成型沥青砂浆试件, 通过研究石灰岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆的高温性能、低温性能、水稳定性和疲劳性能, 基于灰色系统理论中的多目标加权决策模型, 对 4 种集料类型沥青砂浆的综合性能进行评价。结果表明, 玄武岩和辉绿岩沥青砂浆的高温性能优于石灰岩和钢渣沥青砂浆; 钢渣沥青砂浆的低温抗裂性能和疲劳性能优于其他 3 种集料沥青砂浆; 石灰岩沥青砂浆的水稳定性优于其他 3 种集料沥青砂浆; 4 种集料沥青砂浆中, 玄武岩沥青砂浆的综合性能最优。

关键词: 公路; 沥青砂浆; 路用性能; 集料; 多目标加权

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)01-0038-07

沥青砂浆作为沥青混合料的重要组成部分, 其性能直接影响沥青混合料的路用性能。钱国平等通过抗拉和抗压强度试验, 研究了集料粒径对沥青砂浆力学性能的影响, 发现沥青砂浆的力学性能随着集料最大公称粒径的减小而变差。Tan Y. 等研究了细集料特性对沥青砂浆黏性的影响, 结果表明沥青砂浆的抗变形能力随着集料形状的扁平 and 棱角结构的减少而降低。Nejad F. M. 等研究了水泥乳化沥青砂浆的力学性能、耐久性、疲劳性能和流变特性, 发现采用低火山灰活性矿渣对其单轴抗压强度无显著影响, 间接抗拉强度略有降低。崔亚楠等采用正交试验对沥青砂浆的愈合性能进行研究, 得到老化程度对沥青砂浆愈合度的影响显著。Fu Q. 等研究了 CA 砂浆在不同初始应变水平下的应力松弛行为, 建立了基于热力学的应力松弛模型, 发现 CA 砂浆的松弛应力随着应变水平的增加而增大。Riara M. 等研究了温度和湿度对 AC-13 沥青混合料及砂浆长期老化后裂缝愈合能力的影响, 结果表明温度升高会增加沥青材料的裂缝愈合程度。目前关于沥青混合料性能单一指标评价的研究较多, 而关于其综合性能评价的研究较少。黄晓明等基于灰色理论模型, 从多个角度评价了沥青砼与水泥砼两种路面的适用性, 找到了适用于隧道环境的路面结构类型。张华等对 4 种掺加不同纤维的沥青混合料进行试验, 采用加权灰色理论优选性能最佳的纤维沥

青混合料。于新等利用有限元法分析多因素对桥面防水黏结层的力学响应, 采用灰色理论优选最佳防水黏结层材料。宋亮等基于灰色决策方法, 评价了不同种类玄武岩纤维沥青碎石封层的黏结性能。沥青砂浆的性能与沥青路面的使用性能紧密相关, 且综合性能评价直接影响沥青混合料原材料的优选。该文基于等体积换算原则, 在 AC-13 SBS 沥青混合料的基础上, 根据规范计算并分别成型石灰岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆试件, 对其进行高温性能、低温性能、水稳定性和疲劳性能测试, 对比研究不同类型集料沥青砂浆的性能, 为沥青路面原材料选择提供参考。

1 原材料

1.1 沥青

试验所用沥青为 SBS (I-D) 改性 70[#] 沥青, 其性能参数测试结果见表 1。

1.2 集料

选用石灰岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣 4 种集料, 填料均采用磨细的石灰岩矿粉, 其技术性能见表 2、表 3, 均符合相关要求。

2 沥青砂浆配合比设计

2.1 级配设计

以 AC-13 沥青混合料的级配为基础 (见表 4), 去除沥青混合料中的粗集料部分, 剩余 4.75 mm

^{*} 基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目 (201930); 长沙理工大学研究生实践创新项目 (SJCX201914)

表 1 SBS 改性沥青的基本性能指标

项目	试验结果	技术要求
针入度(25℃)/(0.1 mm)	55	30~60
针入度指数	0.321	0~1.0
延度(5℃)/cm	41	≥20
软化点/℃	87.7	≥60
软化点差/℃	1.6	≤2.5
运动黏度(135℃)/(Pa·s)	2.33	≤3
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	1.035	—
旋转薄膜烘 质量损失/%	0.14	±1.0
箱老化后 残留针入度比/%	72	≥65
(163℃,5 h) 残留延度(5℃)/cm	17	≥15

表 2 矿粉的基本性能指标

项目	试验结果	技术要求
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.73	≥2.50
含水量/%	0.2	≤1
外观	无团粒	无团粒
亲水系数	0.7	<1
塑性指数	3.6	<4
热稳定性	无明显变化	实测值
<0.6 mm	100	100
粒度范围/% <0.15 mm	96.8	90~100
<0.075 mm	78.3	75~100

表 3 集料的表观相对密度和毛体积相对密度

集料规格/mm	表观相对密度				毛体积相对密度			
	石灰岩	玄武岩	辉绿岩	钢渣	石灰岩	玄武岩	辉绿岩	钢渣
2.36~4.75	2.774	2.758	2.861	3.280	2.737	2.714	2.819	3.245
1.18~2.36	2.763	2.725	2.852	3.165	2.712	2.682	2.807	3.124
0.6~1.18	2.761	2.728	2.855	3.071	2.711	2.654	2.804	3.028
0.3~0.6	2.768	2.726	2.841	2.947	2.715	2.637	2.791	2.901
0.15~0.3	2.759	2.729	2.837	2.749	2.708	2.642	2.783	2.802
0.075~0.15	2.757	2.728	2.838	3.122	2.706	2.639	2.779	3.076
<0.075	2.751	2.745	2.832	3.091	2.700	2.649	2.776	3.042

表 4 AC-13 沥青混合料的设计级配

级配类型	下列筛孔(mm)的通过率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
规范范围	100	90~100	68~85	38~68	24~50	15~38	10~28	7~20	5~15	4~8
实际级配	100	95	76	51	35	24.5	16	12	8.5	6

以下部分,计算沥青砂浆矿料级配。假定沥青砂浆中集料筛余百分率与原 AC-13 沥青混合料一致,计算得到沥青砂浆的级配(见表 5)。

基于等体积换算原则,分别计算石灰岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆的各档集料用量,结果见表 6、表 7。

表 5 沥青砂浆的级配

筛孔尺寸/mm	原 AC-13 筛余百分率/%	沥青砂浆中集料筛余百分率 P_i /%
4.75~2.36	16.0	31.4
2.36~1.18	10.5	20.6
1.18~0.6	8.5	16.7
0.6~0.3	4.0	7.8
0.3~0.15	3.5	6.9
0.15~0.075	2.5	4.9
<0.075	6.0	11.7

表 6 等体积换算公式

粒径大小/mm	设计配合比/%	毛体积相对密度	质量比/%	换算后质量比/%
1	P_1	γ_1	$P_1\gamma_1$	$\frac{P_1\gamma_1}{\sum P_i\gamma_i} \times 100$
...
i	P_i	γ_i	$P_i\gamma_i$	$\frac{P_i\gamma_i}{\sum P_i\gamma_i} \times 100$

2.2 沥青砂浆中沥青用量

根据马歇尔击实试验结果,结合依托工程沥青路面沥青混合料配合比,确定 AC-13 SBS 改性沥青混合料最佳油石比为 5.2%。根据 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》,先计算沥青混合料中有效沥青含量 P_{be} 、被集料吸收的沥青含量 P_{ba} 和粉胶比 F_B 。假设沥青砂浆中粉胶比与其对应的沥青混合料相同,计算不同沥青砂浆试件中有效

表7 等体积换算后沥青砂浆各档用量

粒径/ mm	设计配合 比/%	石灰岩沥青砂浆			玄武岩沥青砂浆			辉绿岩沥青砂浆			钢渣沥青砂浆		
		毛体积 相对 密度	质量 比/%	换算后 质量 比/%	毛体积 相对 密度	质量 比/%	换算后 质量 比/%	毛体积 相对 密度	质量 比/%	换算后 质量 比/%	毛体积 相对 密度	质量 比/%	换算后 质量 比/%
2.36~4.75	31.4	2.737	85.94	31.6	2.714	85.22	31.8	2.819	88.52	31.6	3.245	101.89	33.1
1.18~2.36	20.6	2.712	55.87	20.5	2.682	55.25	20.6	2.807	57.82	20.7	3.124	64.35	20.9
0.6~1.18	16.7	2.711	45.27	16.6	2.654	44.32	16.5	2.804	46.83	16.7	3.028	50.57	16.4
0.3~0.6	7.8	2.715	21.18	7.8	2.637	20.57	7.7	2.791	21.77	7.8	2.901	22.63	7.4
0.15~0.3	6.9	2.708	18.69	6.9	2.642	18.23	6.8	2.783	19.20	6.9	2.802	19.33	6.3
0.075~0.15	4.9	2.706	13.26	4.9	2.758	13.51	5.0	2.779	13.62	4.9	3.076	15.07	4.9
<0.075	7.0	2.700	18.90	7.0	2.639	18.47	6.9	2.776	19.43	6.9	3.042	21.29	6.9
矿粉	4.7	2.700	12.69	4.7	2.700	12.69	4.7	2.700	12.69	4.5	2.700	12.69	4.1
总计/%	100.0		271.80	100.0		268.26	100.0		279.88	100.0		307.79	100.0

沥青含量,进而计算沥青砂浆试件中沥青含量。各种沥青混合料的相关参数见表8。

表8 各种集料组成的AC-13沥青混合料的参数

沥青混合料类型	P_b /%	P_{ba} /%	P_{be} /%	F_B
石灰岩	5.2	0.492 7	4.73	1.268
玄武岩	5.2	0.637 9	4.60	1.306
辉绿岩	5.2	0.480 8	4.74	1.265
钢渣	5.2	0.302 0	4.91	1.221

以石灰岩沥青砂浆为例计算其最佳沥青含量 P'_b 和油石比 P'_a :

$$P'_b = \frac{P_{0.075}/F_B + P_{ba}}{1 + P_{ba}/100} = \frac{11.7/1.268 + 0.492\ 7}{1 + 0.492\ 7/100} = 9.7$$

$$P'_a = \frac{P'_b}{100 - P'_b} = \frac{9.7}{100 - 9.7} = 10.7$$

式中: $P_{0.075}$ 为级配中0.075 mm筛孔通过率(%)。

同理可计算得到各种沥青砂浆最佳油石比和最佳沥青用量(见表9)。

表9 沥青砂浆最佳油石比和最佳沥青用量

沥青砂浆类型	最佳沥青用量 P'_b /%	最佳油石比 P'_a /%
石灰岩	9.7	10.7
玄武岩	9.5	10.5
辉绿岩	9.4	10.4
钢渣	9.3	10.2

3 沥青砂浆路用性能评价

3.1 高温性能

结合沥青砂浆的性能特点和级配设计,重点研究不同类型集料对沥青砂浆高温稳定性的影响,通

过单轴压缩试验和三轴重复荷载压缩蠕变试验对沥青砂浆的高温性能进行评价。

3.1.1 单轴压缩试验

采用旋转压实仪成型直径100 mm×高度100 mm沥青砂浆试件,利用UTM试验机(万能材料试验机)进行单轴压缩试验,选用压缩荷载模式,加载速率1 mm/min,预加载荷载0.05 kN,预加载时间20 s,试验温度40℃。每组设置3个平行试验,以其平均值作为试验结果(见图1)。

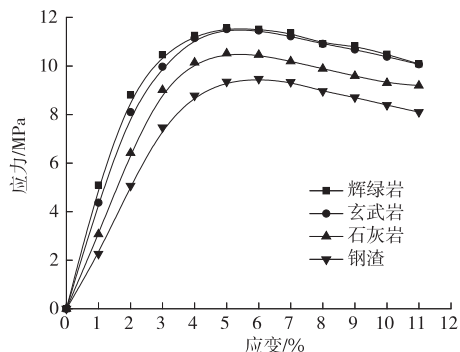


图1 不同细集料类型沥青砂浆的应力—应变曲线

由图1可知:4种沥青砂浆的抗压强度曲线变化规律相近,均为先迅速增大,到达峰值后减小,最后趋于平缓。辉绿岩和玄武岩沥青砂浆的应力—应变关系相差不大,均在应变5%时应力达到最大值,分别为11.56和11.52 MPa,峰值后曲线基本重合;石灰岩沥青砂浆在应变5%时应力最大,为10.52 MPa;钢渣沥青砂浆在应变6%时应力最大,为9.47 MPa。峰值应力后,砂浆试件的承载能力已达到极限,继续加载后发生破坏,并产生裂缝。相比工业废渣类细集料(钢渣),机制砂类细集料(石灰岩、玄武

岩和辉绿岩)对沥青砂浆抗压能力的影响较小。

3.1.2 三轴重复荷载压缩蠕变试验

采用 UTM 试验机,对不同集料类型沥青砂浆进行三轴重复荷载压缩蠕变试验,试验围压取 138 kPa,加载应力 500 kPa,试验温度为 40、50、60 ℃,分析温度对沥青砂浆应变的影响,结果见图 2。

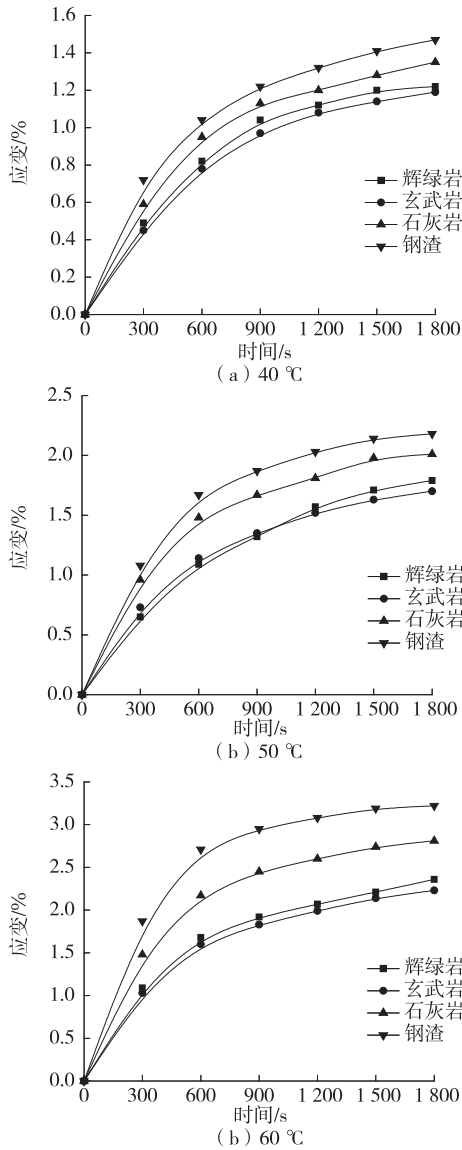


图 2 不同温度下沥青砂浆的时间—应变曲线

由图 2 可知:试验温度为 40 ℃时,蠕变曲线随时间的延长先增大后趋于平缓,玄武岩沥青砂浆的

蠕变曲线变化最小,其次是辉绿岩沥青砂浆,钢渣沥青砂浆的蠕变变形最大;试验温度为 50 ℃时,钢渣沥青砂浆的变形仍最大,石灰岩沥青砂浆次之,玄武岩沥青砂浆的蠕变曲线与辉绿岩沥青砂浆相当;试验温度 60 ℃时,钢渣沥青砂浆的变形最大,石灰岩沥青砂浆居中,玄武岩和辉绿岩沥青砂浆依旧最不易发生变形。

3.1.3 高温性能评价

综上,在相同试验温度下,玄武岩和辉绿岩沥青砂浆的稳定性比石灰岩和钢渣沥青砂浆的好;随着温度的升高,钢渣沥青砂浆的蠕变增长幅度最大,其次为石灰岩沥青砂浆,辉绿岩和玄武岩沥青砂浆的增长幅度最小。4 种沥青砂浆高温稳定性的排序为玄武岩沥青砂浆≈辉绿岩沥青砂浆>石灰岩沥青砂浆>钢渣沥青砂浆。

3.2 低温性能

沥青砂浆的低温抗裂性能直接影响沥青路面的使用性能。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,对各集料类型沥青砂浆进行小梁弯曲试验,沥青砂浆采用 25 mm×25 mm×150 mm 棱柱形试件,试验温度 -10 ℃,加载速度 50 mm/min,分析各集料类型沥青砂浆的低温性能,试验结果见表 10 和图 3。

由表 10 和图 3 可知:1) 玄武岩沥青砂浆的弯拉强度最大,其次是辉绿岩和钢渣沥青砂浆,石灰岩沥青砂浆的弯拉强度最小。其中玄武岩与辉绿岩沥青砂浆的弯拉强度相差不大;玄武岩与石灰岩沥青砂浆的弯拉强度相差 10.4%;玄武岩与辉绿岩沥青砂浆的弯拉强度相近,相差约 3.3%,且小于石灰岩和钢渣沥青砂浆;钢渣沥青砂浆的弯拉应变比石灰岩的高 11.3%。2) 石灰岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆的劲度模量分别为 1 032、1 154、1 167 和 982 MPa。其中玄武岩与辉绿岩沥青砂浆的劲度模量相近,相差约 1.1%;石灰岩与钢渣沥青砂浆的劲度模量相差约 5.1%;模量最大的辉绿岩沥青砂浆与最小的钢渣沥青砂浆相差约 18.8%。说明钢渣和石灰岩沥青砂浆比玄武岩和辉绿岩沥青砂浆具有更好

表 10 沥青砂浆小梁弯曲试验结果

沥青砂浆类型	破坏荷载/N	破坏挠度/mm	弯拉强度/MPa	弯拉应变/ ϵ	劲度模量/MPa
石灰岩	860	0.533	8.26	0.008 00	1 032
玄武岩	950	0.526	9.12	0.007 90	1 154
辉绿岩	930	0.510	8.93	0.007 65	1 167
钢渣	910	0.593	8.74	0.008 90	982

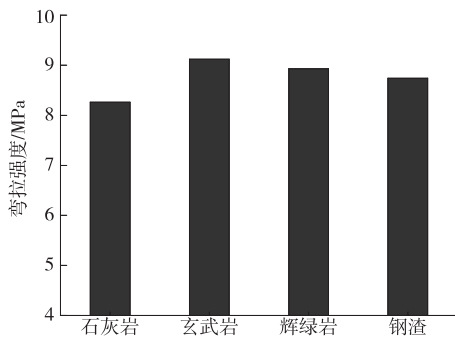


图3 沥青砂浆弯拉强度试验结果

的柔韧性,可更好地抵抗低温开裂破坏。低温抗裂能力排序为石灰岩沥青砂浆>钢渣沥青砂浆>玄武岩沥青砂浆≈辉绿岩沥青砂浆。

3.3 水稳定性

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,通过冻融劈裂试验对 4 种类型集料沥青砂浆进行水稳定性评价,每组设置 3 个平行试验,试验结果见表 11 和图 4。

由表 11 和图 4 可知:1) 在未冻融情况下,石灰

表 11 沥青砂浆的冻融劈裂试验结果

沥青砂浆类型	试件类型	编号	最大荷载/kN	劈裂强度/MPa	劈裂强度均值/MPa	冻融劈裂抗拉强度比/%
石灰岩	冻融	1	2.62	0.254	0.263	79.5
		2	2.89	0.270		
		3	2.78	0.265		
	未冻融	1	3.14	0.326		
		2	3.29	0.337		
		3	3.24	0.331		
玄武岩	冻融	1	2.46	0.253	0.249	71.8
		2	2.39	0.239		
		3	2.43	0.255		
	未冻融	1	3.37	0.348		
		2	3.28	0.337		
		3	3.43	0.356		
辉绿岩	冻融	1	2.88	0.268	0.262	75.3
		2	2.63	0.255		
		3	2.78	0.263		
	未冻融	1	3.52	0.358		
		2	3.36	0.338		
		3	3.45	0.347		
钢渣	冻融	1	2.49	0.256	0.258	76.1
		2	2.45	0.251		
		3	2.74	0.267		
	未冻融	1	3.41	0.340		
		2	3.26	0.331		
		3	3.48	0.346		

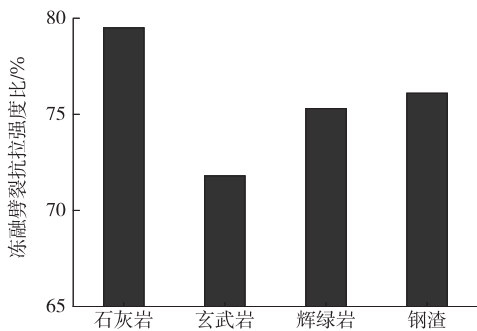


图4 沥青砂浆的冻融劈裂抗拉强度比

岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆的劈裂强度均值分别为 0.331、0.347、0.348 和 0.339 MPa,辉绿岩沥青砂浆的劈裂强度最大,玄武岩和钢渣沥青砂浆的劈裂强度相近且大于石灰岩沥青砂浆。冻融循环后,沥青砂浆的劈裂强度均明显下降,其中石灰岩沥青砂浆的劈裂强度最大,玄武岩沥青砂浆的劈裂强度小于辉绿岩和钢渣沥青砂浆。2) 石灰岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆的冻融劈裂抗拉强度比分别为 79.5%、71.8%、75.3%和 76.1%,石灰岩沥

青砂浆的冻融劈裂抗拉强度分别比玄武岩、辉绿岩、钢渣沥青砂浆提高 10.7%、5.6%、4.5%。在水和温度共同作用下,石灰岩集料与沥青的黏附性优于辉绿岩和玄武岩,沥青与石灰岩集料结合更紧密,故在劈裂荷载作用下其抗拉强度较大,水稳定性较优。

石灰岩沥青砂浆的水稳定性即抗水损害能力优于玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆,4 种沥青砂浆的水稳定性排序为石灰岩沥青砂浆>钢渣沥青砂浆>辉绿岩沥青砂浆>玄武岩沥青砂浆。

3.4 疲劳性能

采用 MTS 试验机进行四点弯曲疲劳试验,分析不同集料类型沥青砂浆的疲劳性能,试验温度 5、15 ℃,加载频率 10 Hz,应变水平为 700 和 1 000 $\mu\epsilon$,试验结果见表 12。

表 12 沥青砂浆四点弯曲疲劳试验结果

沥青砂浆类型	温度/℃	应变/ $\mu\epsilon$	平均疲劳寿命/次
石灰岩	5	700	183 501
		1 000	42 817
	15	1 000	153 610
玄武岩	5	700	202 879
		1 000	473 96
	15	1 000	167 160
辉绿岩	5	700	198 693
		1 000	46 202
	15	1 000	165 717
钢渣	5	700	219 142
		1 000	49 358
	15	1 000	167 736

由表 12 可知:在 5 ℃、700 $\mu\epsilon$ 的条件下,石灰岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆的疲劳寿命分别为 183 501、202 879、198 693 和 219 142 次,相对于石灰岩、玄武岩和辉绿岩沥青砂浆,钢渣沥青砂浆的

疲劳寿命分别增加 19.4%、8% 和 10.3%;在 5 ℃、1 000 $\mu\epsilon$ 的条件下,石灰岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆的疲劳寿命分别为 42 817、47 396、46 202 和 49 358 次,相对于石灰岩、玄武岩和辉绿岩沥青砂浆,钢渣沥青砂浆的疲劳寿命分别增加 15.3%、4.1% 和 6.8%;在 15 ℃、1 000 $\mu\epsilon$ 的条件下,石灰岩、玄武岩、辉绿岩和钢渣沥青砂浆的疲劳寿命分别为 153 610、167 160、165 717 和 167 736 次,相对于石灰岩、玄武岩和辉绿岩沥青砂浆,钢渣沥青砂浆的疲劳寿命分别增加 9.2%、0.3% 和 1.2%。沥青混合料疲劳开裂始于沥青砂浆结构,且大部分裂缝处于沥青砂浆结构中,沥青混合料的疲劳性能在一定程度上可通过沥青砂浆的疲劳性能来表征,改变沥青混合料中细集料类型对提高沥青路面耐疲劳性能有一定作用。

综上,钢渣沥青砂浆的疲劳寿命最大,玄武岩和辉绿岩沥青砂浆的疲劳寿命相近,石灰岩沥青砂浆疲劳寿命最小。4 种沥青砂浆疲劳性能排序为钢渣沥青砂浆>玄武岩沥青砂浆≈辉绿岩沥青砂浆>石灰岩沥青砂浆。

4 基于多目标加权的沥青砂浆性能评价

基于不同集料类型沥青砂浆的高温性能、低温性能、水稳定性和疲劳性能,采用灰色系统理论中的多目标加权决策模型,分析集料类型对沥青砂浆综合性能的影响。三轴重复荷载压缩蠕变以 60 ℃ 最大变形结果为例,疲劳性能以应变水平 1 000 $\mu\epsilon$ 的疲劳寿命为例,不同集料类型沥青砂浆的性能指标参数见表 13。

表 13 不同集料类型沥青砂浆的性能指标参数

沥青砂浆类型	高温性能		破坏弯拉应变/ ϵ	冻融劈裂抗拉强度比/%	疲劳寿命 N_f /次	
	抗压强度/MPa	60 ℃ 时最大应变/%			5 ℃	15 ℃
石灰岩	10.52	2.81	0.00 800	79.5	42 817	153 610
玄武岩	11.52	2.23	0.00 790	71.8	47 396	167 160
辉绿岩	11.56	2.36	0.00 765	75.3	46 202	165 717
钢渣	9.47	3.22	0.00 890	76.1	49 358	167 736

(1) 建立事件集、对策集及决策方案集。以哪种集料类型沥青砂浆路用性能最优作为事件 a_i ,则事件集 $A = \{a_i\} = \{a_1\}$;选择石灰岩、玄武岩、辉绿

岩、钢渣分别作为对策 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 ,则对策集 $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$;由事件集和对策集构成决策集 $S = \{S_{ij} = (a_i, b_j) | a_i \in A, b_j \in B, i = 1, j = 1, 2, 3, 4\} =$

$\{s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}\}$ 。

(2) 确定决策目标。将沥青砂浆高温性能(抗压强度和 60 °C 时最大应变)、破坏弯拉应变、水稳定性和疲劳性能(5 和 15 °C)共 6 个指标作为决策目标。

(3) 确定决策目标的决策权重。设置各决策目标的权重分别为 0.125、0.125、0.25、0.25、0.125、0.125。

(4) 求决策目标效果样本矩阵。根据表 13 得目标效果样本矩阵如下:

$$U^k = u_{ij}^k = \begin{bmatrix} u_{11}^{(1)} & u_{12}^{(1)} & u_{13}^{(1)} & u_{14}^{(1)} \\ u_{21}^{(2)} & u_{22}^{(2)} & u_{23}^{(2)} & u_{24}^{(2)} \\ u_{31}^{(3)} & u_{32}^{(3)} & u_{33}^{(3)} & u_{34}^{(3)} \\ u_{41}^{(4)} & u_{42}^{(4)} & u_{43}^{(4)} & u_{44}^{(4)} \\ u_{51}^{(5)} & u_{52}^{(5)} & u_{53}^{(5)} & u_{54}^{(5)} \\ u_{61}^{(6)} & u_{62}^{(6)} & u_{63}^{(6)} & u_{64}^{(6)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.52 & 11.52 & 11.56 & 9.47 \\ 2.81 & 2.23 & 2.36 & 3.22 \\ 0.008 & 0.007\ 9 & 0.0076\ 5 & 0.008\ 9 \\ 79.5 & 71.8 & 75.3 & 76.1 \\ 42\ 817 & 47\ 396 & 46\ 202 & 49\ 358 \\ 153\ 610 & 167\ 160 & 165\ 717 & 167\ 736 \end{bmatrix}$$

(5) 设定目标效果临界值。抗压强度、弯拉应变、水稳性能、疲劳性能均为效益型目标,临界值分别设置为 $u_{i0j0}^{(1)} = 9.4$ 、 $u_{i0j0}^{(3)} = 0.007$ 、 $u_{i0j0}^{(4)} = 71$ 、 $u_{i0j0}^{(5)} = 42\ 817$ 、 $u_{i0j0}^{(6)} = 153\ 610$ 。60 °C 最大应变为成本型目标,临界值设置为 $u_{i0j0}^{(2)} = 3.3$ 。

(6) 求效果测度矩阵。测度矩阵是决策目标效果样本矩阵经过量纲化处理后的矩阵。根据效益型目标效果函数测度公式[见式(1)]和成本型目标效果函数测度公式[见式(2)],结合步骤 5 设定的目标效果临界值,对效果样本矩阵 U^k 进行效果测度矩阵计算,得到测度效果矩阵[见式(3)]。

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{ij}^{(k)} - u_{i0j0}^{(k)}}{\max_i \{u_{ij}^{(k)}\} - u_{i0j0}^{(k)}} \quad (1)$$

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{i0j0}^{(k)} - u_{ij}^{(k)}}{u_{i0j0}^{(k)} - \min_i \{u_{ij}^{(k)}\}} \quad (2)$$

$$R^k = r_{ij}^k = \begin{bmatrix} r_{11}^{(1)} & r_{12}^{(1)} & r_{13}^{(1)} & r_{14}^{(1)} \\ r_{21}^{(2)} & r_{22}^{(2)} & r_{23}^{(2)} & r_{24}^{(2)} \\ r_{31}^{(3)} & r_{32}^{(3)} & r_{33}^{(3)} & r_{34}^{(3)} \\ r_{41}^{(4)} & r_{42}^{(4)} & r_{43}^{(4)} & r_{44}^{(4)} \\ r_{51}^{(5)} & r_{52}^{(5)} & r_{53}^{(5)} & r_{54}^{(5)} \\ r_{61}^{(6)} & r_{62}^{(6)} & r_{63}^{(6)} & r_{64}^{(6)} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.519 & 0.981 & 1 & 0.032 \\ 0.458 & 1 & 0.879 & 0.075 \\ 0.526 & 0.474 & 0.342 & 1 \\ 1 & 0.447 & 0.506 & 0.6 \\ 0 & 0.7 & 0.518 & 1 \\ 0 & 0.959 & 0.875 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(7) 计算综合效果测度矩阵。根据式(4)计算综合效果测度矩阵,结果见式(5)。

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^4 \eta_k \cdot r_{ij}^{(k)} \quad (4)$$

$$R = [r_{11} \ r_{12} \ r_{13} \ r_{14}] = [0.503\ 6 \ 0.685\ 3 \ 0.618\ 8 \ 0.663\ 4] \quad (5)$$

(8) 决策。由步骤 7 的计算结果,得到各沥青砂浆的靶心距离(见表 14)。

表 14 不同类型沥青砂浆综合性能的靶心距离

集料类型	靶心距离	集料类型	靶心距离
石灰岩	0.503 6	绿辉岩	0.618 8
玄武岩	0.685 3	钢渣	0.663 4

由表 14 可知:4 种集料类型沥青砂浆中,玄武岩沥青砂浆的综合性能最优,钢渣沥青砂浆次之,石灰岩沥青砂浆的综合性能最差。

5 结论

(1) 4 种集料类型沥青砂浆的综合性能排序为玄武岩沥青砂浆>钢渣沥青砂浆>辉绿岩沥青砂浆>石灰岩沥青砂浆。

(2) 根据不同集料类型沥青砂浆的路用性能,在重交通和夏季多高温的地区,应优先选择玄武岩或辉绿岩集料;在重交通和多低温的地区,可优先选择钢渣集料;在降雨量大的地区,应优先选择石灰岩集料。

参考文献:

- [1] 钱国平,李岷,李辉忠.沥青砂浆力学性能的粒径效应试验研究[J].公路交通科技,2017,34(2):1-6+14.
- [2] TAN Y,ZHANG H,XU H,et al.Effect of fine aggregate form,angularity and texture on the viscoelastic properties of asphalt mortar[M].Asphalt Pavements. CRC Press,2014:661-672.
- [3] NEJAD F M,HABIBI M,HOSSEINI P,et al. Investigating the mechanical and fatigue properties of sustainable cement emulsified asphalt mortar[J].Journal of Cleaner Production,2017,156:717-728.

(下转第 49 页)

强度满足规范要求;随着龄期的延长,8%、14%水泥掺量钢渣水泥稳定混合料的干缩量呈上升趋势,但整体偏小。

(5) 钢渣代替砂石应用于路面基层水泥稳定材料可行。

参考文献:

- [1] 许远辉,陆文雄,王秀娟,等.钢渣活性激发的研究现状与发展[J].上海大学学报(自然科学版),2004,10(1):91—95.
- [2] 施惠生,黄昆生,吴凯,等.钢渣活性激发及其机理的研究进展[J].粉煤灰综合利用,2011(1):48—53.
- [3] 潘凯.钢渣碳化固定二氧化碳及制备建材产品应用研究[D].南宁:广西大学,2014.
- [4] 乔军志,胡春林,陈中学.钢渣作为路用材料的研究及应用[J].国外建材科技,2005,26(4):22—30.
- [5] 马睿,王景琪,张宏.钢渣材料在国内道路工程中的应用现状[J].焦作大学学报,2016,30(1):78—80.
- [6] WANG Shige, LI Xinming, REN Kebin, et al. Experimental research on steel slag stabilized soil and its application in subgrade engineering[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020(12):1—13.
- [7] 交通部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [8] 赵海晋,余其俊,韦江雄,等.钢渣矿物组成、形貌及胶凝活性的影响因素[J].武汉理工大学学报,2010,32(15):22—26.
- [9] DING Qingjun, LI Chun, PENG Bo, et al. Study of the practicability of asphalt concrete conected by steel slag [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, 23(6): 11—15.
- [10] 交通部公路科学研究院.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [11] GU Xingyu, YU Bin, DONG Qiao, et al. Application of secondary steel slag in subgrade: Performance evaluation and enhancement[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181(20):102—108.
- [12] 全国钢铁标准化技术委员会.钢渣中游离氧化钙含量测定方法:YB/T 4382—2012[S].北京:中国钢铁工业协会,2012.
- [13] 武汉市市政工程设计研究院.钢渣石灰类道路基层施工及验收规范:CJJ 35—90[S].武汉:武汉市市政工程设计研究院,1990.
- 收稿日期:2020—05—29
- *****
- (上接第44页)
- [4] 崔亚楠,于庆年,韩吉伟,等.沥青砂浆多次损伤自愈合性能[J].复合材料学报,2018,35(8):2158—2156.
- [5] FU Q, XIE Y, NIU D, et al. Integrated experimental measurement and computational analysis of relaxation behavior of cement and asphalt mortar[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120:137—146.
- [6] RIARA M, TANG P, MO L, et al. Evaluation of moisture and temperature effect on crack healing of asphalt mortar and mixtures using healing agents[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177:388—394.
- [7] 黄晓明,许涛,曾磊.基于灰靶理论的隧道路面结构类型选择[J].公路交通科技,2008,25(8):1—5.
- [8] 张华,杜小虎,汪德才,等.基于加权灰靶理论的纤维沥青混合料综合性能评价[J].江苏大学学报(自然科学版),2016,37(5):616—620.
- [9] 于新,李英涛,刘云.基于力学分析的桥面铺装防水黏结层材料灰靶优选[J].西南交通大学学报,2012,47(6):1086—1091.
- [10] 宋亮,安传峰,黄美.玄武岩纤维沥青碎石封层黏结性及评价[J].建筑材料学报,2019,22(3):440—445.
- [11] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [12] 应荣华,王育刚,吴婷.细集料级配对沥青砂浆影响的单轴压缩蠕变试验研究[J].公路与汽运,2011(4):115—119.
- [13] 王进,应荣华.沥青砂浆的抗拉压试验研究[J].公路与汽运,2010(2):62—65.
- [14] 吕泽华,程永春,马桂荣,等.硅藻土—玄武岩纤维复合改性沥青的低温流变性能试验研究[J].公路工程,2019,44(1):44—50.
- [15] 赵伟,韩飞飞.沥青砂浆剪切力学性能影响因素研究[J].中外公路,2017,37(5):276—281.
- [16] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [17] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990:86—103.
- 收稿日期:2020—06—02