

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.064

湿热山区强骨架密实型沥青混合料 FDAC 高温稳定性研究

李晓龙^{1,2}, 沈菊男^{1,3}, 杜辉², 凌天清¹

(1. 重庆交通大学, 重庆市 400074; 2. 云南省公路科学技术研究院; 3. 美国乔治亚南方大学)

摘要:为研究 FDAC 沥青混合料高温性能受粒径变化的影响,采用马歇尔稳定度试验、高温+重载车辙试验及单轴贯入剪切试验分别对 13、16、20、25 mm 共 4 种粒径的 FDAC 沥青混合料进行多指标评价研究。试验结果表明:FDAC 沥青混合料高温稳定性受粒径变化的影响相对较小;在高温+重载车辙正交试验中,采用极差分析法计算 R 值,发现 4 种粒径混合料均表现为受荷载因素的影响大于温度因素;在单轴贯入试验中,采用灰色关联度计算,得到黏聚力 c 的影响略大于内摩擦角 φ 。

关键词: 高温稳定性; 强骨架密实型沥青混合料 FDAC; 高温+重载车辙试验

FDAC 沥青混合料是针对湿热山区及河谷地带提出的强骨架密实型沥青混合料,采用断级配,利用高含量的粗集料形成骨架,较少细集料和较多矿粉进行填充,比普通沥青混凝土减少 1/4~1/5 的沥青用量,经济实用,应用价值较高。

在中国,沥青路面均为分层铺筑,各结构层由于功能、厚度的需求不同而采用不同的最大公称粒径。葛冬冬通过单轴贯入试验发现沥青混合料试件内剪应力随着公称最大粒径的增加而增加;王辉通过对 AC-13、AC-20、AC-25 共 3 种粒径沥青混合料进行三轴剪切试验发现,在最佳油石比下,同类型不同粒径级配的沥青混合料随着最大公称粒径的增大,内摩擦角 φ 呈现增大趋势,黏聚力 c 呈现减少的趋势;王富玉在对 SAC 沥青混合料高温稳定性的研究中发现,当填料相同时,粗集料含量与 DS 的相关性很好。为掌握 FDAC 沥青混合料高温稳定性随粒径大小变化的规

律,更好地指导现场施工,该文采用不同评级指标对 13、16、20、25 mm 共 4 种粒径沥青混合料进行高温稳定性试验研究。

1 沥青混合料配合比设计

不同粒径 FDAC 沥青混合料矿料级配及最佳沥青用量如表 1 所示。

2 试验方案

(1) 马歇尔稳定度试验:按标准试验方法进行。

(2) 高温+重载车辙试验:车辙试验分为初始压实、塑性流动变形(蠕变)及剪切破坏 3 个阶段,如图 1 所示。考虑到气候因素及交通荷载情况,以 60 °C 和 70 °C 作为温度条件、0.7 MPa 和 0.9 MPa 作为荷载条

- *****
- [3] 赵霄龙,卫军,黄玉盈. 混凝土冻融耐久性劣化与孔结构变化的关系[J]. 武汉理工大学学报,2002(12).
- [4] 张士萍,邓敏,吴建华,等. 孔结构对混凝土抗冻性的影响[J]. 武汉理工大学学报,2008(6).
- [5] B. B. Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature[M]. New York, W H Freeman and Company,1982:1-25.
- [6] D. A. Lange, H. M. Jennings and S. P. Shah, Relationship between Fracture Surface Roughness and Fracture Behavior of Cementpaste and Mortar[J]. J. Am. Ceram. Soc., 1993,76(3):589-597.
- [7] 谢和平,鞠杨. 混凝土微细观损伤断裂的分形行为[J]. 煤炭学报,1997(6).
- [8] 王铁成,杨建江. 混凝土结构裂缝状态及其扩展的分形几何解析[J]. 大连理工大学学报,1997(1).

收稿日期:2020-03-20

基金项目:云南省交通运输厅科技项目(编号:云交科教[2017]34号)

作者简介:李晓龙,男,博士研究生. E-mail:123496790@qq.com

表1 不同粒径 FDAC 沥青混合料的矿料级配及最佳沥青用量

级配	通过下列筛孔(方孔筛;mm)的质量百分率/%													沥青用量/%
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
FDAC-13	100	100	100	100	90.0	66.3	33.0	29.7	23.4	19.7	13.9	11.3	7.9	3.1
FDAC-16	100	100	100	94.3	80.3	55.7	31.9	28.6	22.7	19.2	13.6	11.1	7.8	3.0
FDAC-20	100	100	94.7	82.1	71.8	53.2	30.8	27.7	22.0	18.7	13.3	10.9	7.7	2.9
FDAC-25	100	97.1	77.6	62.0	54.2	41.9	30.4	27.5	22.0	18.7	13.3	10.9	7.7	2.8

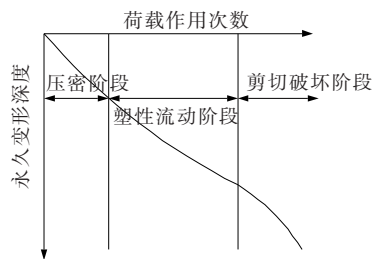


图1 沥青混合料车辙试验不同阶段示意图

件进行试验,并在标准试验条件下($60\text{ }^{\circ}\text{C}+0.7\text{ MPa}$)进行 2 520、5 040、7 560 次车辙试验,以观测不同类型沥青混合料各试验阶段的时间。

(3) 单轴贯入强度试验:为模拟沥青路面的受剪状态,采用单轴贯入剪切强度试验进行对比研究,其受力示意图如图 2 所示。试件选用 $\phi 101.6\text{ mm}\times 63.5\text{ mm}$,贯入压头选用 $\phi 28.5\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,加载速率为 1 mm/min ,贯入应力系数 $f_r=0.012h+0.22$,试验温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

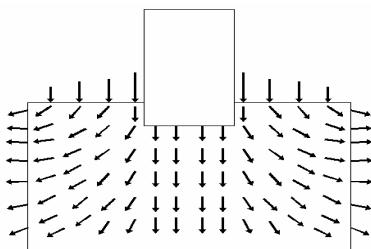


图2 单轴贯入试验试件内部剪切流动示意图

为排除空隙率的影响,马歇尔稳定度试验和单轴贯入强度试验选取空隙率为 $4\%\pm 0.2\%$ 的马歇尔试件进行,高温+重载车辙试验选取空隙率为 $4\%\pm 0.3\%$ 的车辙板试件进行。

3 不同粒径 FDAC 沥青混合料高温稳定性试验分析

3.1 马歇尔稳定度试验

不同粒径 FDAC 沥青混合料马歇尔稳定度试验

结果如表 2 所示。

表2 不同粒径 FDAC 沥青混合料马歇尔稳定度试验结果

级配类型	稳定度/kN	流值/mm
FDAC-13	14.72	2.4
FDAC-16	15.92	2.6
FDAC-20	14.65	2.6
FDAC-25	14.17	2.2

由表 2 可知:

(1) 马歇尔稳定度随粒径的增大呈现先增大后减小的趋势,并在粒径为 16 mm 时达到最高值。当粗骨料粒径增大到一定程度,荷载作用下粗骨料棱角受力状态由被动变为主动,对四周混合料的剪切作用变大,加速了混合料的整体破坏。

(2) FDAC 沥青混合料稳定度与流值受粒径大小变化的影响较小。

3.2 高温+重载车辙试验

3.2.1 不同高温+重载条件下的车辙试验

不同粒径 FDAC 沥青混合料在不同高温+重载条件下的车辙试验动稳定度、变形深度试验结果如表 3 所示。为分析各类型沥青混合料高温评价指标受温度因素和荷载因素的影响,计算得到各因素条件下的 R 值,其中 I、II 表示同种因素不同水平效应的估计值(即同种影响因素条件下的加和), K_1 、 K_2 分别为 I、II 的平均值, R 为平均值的极差,代表影响因素对结果的影响幅度。

由表 3 可知:

(1) FDAC 沥青混合料总体趋势为随着粒径增大,动稳定度增大,变形深度减小。

(2) 不同粒径 FDAC 沥青混合料的动稳定度与变形深度均为荷载 R 值大于温度 R 值,说明受荷载因素的影响大于温度因素的影响。

(3) 不同粒径 FDAC 沥青混合料动稳定度与变形深度在不同温度与荷载条件下的波动相对较小,受力

表 3 不同粒径 FDAC 沥青混合料动稳定度、车辙变形深度试验结果

级配类型	试验 编号	动稳定度			车辙变形深度		
		温度/ ℃	荷载/ MPa	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	温度/ ℃	荷载/ MPa	变形深度/ mm
FDAC-13	1	60	0.7	4 247	60	0.7	2.445
	2	60	0.9	2 386	60	0.9	3.058
	3	70	0.7	2 395	70	0.7	3.040
	4	70	0.9	1 707	70	0.9	3.801
	I	6 633	6 642		5.503	5.485	
	II	4 102	4 093		6.841	6.859	
	K ₁	3 317	3 321	10 735	2.752	2.743	12.344
	K ₂	2 051	2 047		3.421	3.430	
	R	1 266	1 275		0.669	0.687	
	FDAC-16	1	60	0.7	4 316	60	0.7
2		60	0.9	2 451	60	0.9	2.919
3		70	0.7	2 583	70	0.7	2.850
4		70	0.9	1 973	70	0.9	3.662
I		6 767	6 899		5.259	5.190	
II		4 556	4 424		6.512	6.581	
K ₁		3 384	3 450	11 323	2.630	2.595	11.771
K ₂		2 278	2 212		3.256	3.291	
R		1 106	1 238		0.627	0.696	
FDAC-20		1	60	0.7	4 462	60	0.7
	2	60	0.9	2 500	60	0.9	2.894
	3	70	0.7	2 864	70	0.7	2.747
	4	70	0.9	2 066	70	0.9	3.573
	I	6 962	7 326		4.938	4.791	
	II	4 930	4 566		6.320	6.467	
	K ₁	3 481	3 663	11 892	2.469	2.396	11.258
	K ₂	2 465	2 283		3.160	3.234	
	R	1 016	1 380		0.691	0.838	
	FDAC-25	1	60	0.7	4 459	60	0.7
2		60	0.9	2 887	60	0.9	2.699
3		70	0.7	3 063	70	0.7	2.438
4		70	0.9	2 358	70	0.9	2.979
I		7 346	7 522		4.628	4.367	
II		5 421	5 245		5.417	5.678	
K ₁		3 673	3 761	12 767	2.314	2.184	10.045
K ₂		2 711	2 623		2.709	2.839	
R		963	1 139		0.395	0.656	

状态相对均衡,高温稳定性较为稳定。

3.2.2 动稳定度与变形深度关系

将不同温度荷载条件下不同粒径 FDAC 沥青混合料动稳定度与变形深度的试验结果进行拟合,结果如图 3 所示。

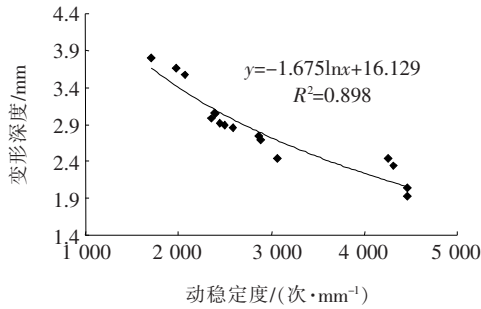


图 3 不同粒径 FDAC 沥青混合料动稳定度与变形深度关系曲线

由图 3 可知:经拟合,不同粒径 FDAC 沥青混合料动稳定度与车辙变形深度的试验结果为对数关系,相关系数达 0.898,因此可采用对数关系式: $y = -1.675\ln x + 16.129$ 进行高温性能的预测控制。

3.3 单轴贯入强度试验

不同粒径 FDAC 沥青混合料单轴贯入强度试验结果如表 4 所示,并借鉴文献[5]、[13]的研究成果计算得到 c 值和 φ 值,同时计算沥青膜厚度,结果如表 5 所示。为了研究黏聚力和内摩擦角对混合料高温稳定性影响的大小,采用灰色理论对试验结果进行关联度计算,计算结果如表 6 所示。

表 4 不同粒径 FDAC 沥青混合料单轴贯入强度

级配类型	单轴贯入强度 R_t /MPa	无侧限强度 R_c /MPa	贯入深度/mm	内摩擦角 φ /°	黏聚力 c /MPa
FDAC-13	1.575	1.650	3.212	42.709	0.361
FDAC-16	1.749	1.765	3.766	43.232	0.382
FDAC-20	1.624	1.769	2.952	42.126	0.393
FDAC-25	1.452	1.567	2.785	42.157	0.348

表 5 不同级配沥青混合料沥青膜厚度、粉胶比

级配类型	沥青用量/%	粉胶比	沥青膜厚度/ μm
FDAC-13	3.1	2.753	4.246
FDAC-16	3.0	2.816	4.171
FDAC-20	2.9	2.884	4.092
FDAC-25	2.8	2.996	3.941

表 6 黏聚力与内摩擦角灰色关联度

影响因素	灰色关联度	影响因素	灰色关联度
粘聚力	0.620 8	内摩擦角	0.571 6

由表 4~6 可知:

(1) 不同粒径 FDAC 沥青混合料单轴贯入强度随着矿料粒径的增大呈现先增大后减小的趋势,并在粒径为 16 mm 时达到最大值,其主要原因可能为随着压头的贯入,骨料颗粒将发生平动与转动,导致结构被重新排列,粒径从 13 mm 增大到 16 mm,骨料转动阻力增大,单轴贯入强度也随之增大;当粒径超过 16 mm,内部大颗粒发生转动时会牵动混合料较大空间的变形,并形成向四周施力的“小压头”,加速了侧向约束的破坏,导致单轴贯入强度的下降。

(2) 不同粒径 FDAC 沥青混合料无侧限抗压强度变化趋势与单轴贯入强度基本一致,且数值均大于单轴贯入强度。

(3) 各粒径沥青混合料内摩擦角与黏聚力的差距均较小,说明 FDAC 沥青混合料受粒径的影响较小。

(4) 不同粒径沥青混合料单轴贯入深度随着内摩擦角的增大而增加,呈良好的线性关系,如图 4 所示。

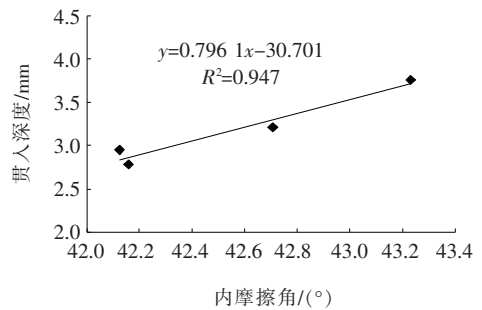


图 4 不同粒径 FDAC 沥青混合料贯入深度与内摩擦角关系曲线

(5) 沥青膜厚度与粉胶比呈线性关系,黏聚力与粉胶比呈抛物线关系,如图 5、6 所示。

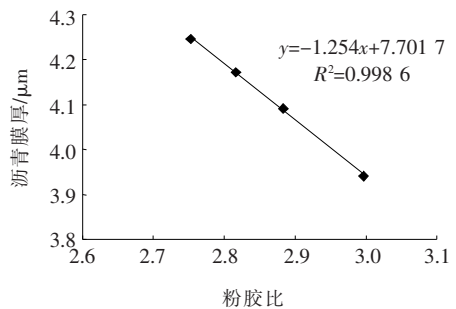


图 5 沥青膜厚度与粉胶比关系图

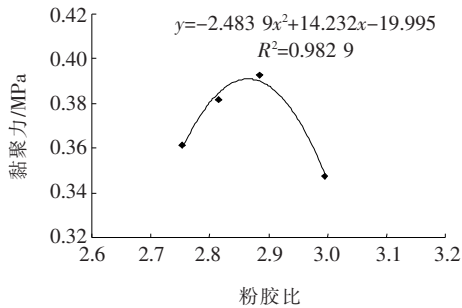


图 6 黏聚力与粉胶比关系图

(6) 由灰色关联度计算结果可知:黏聚力 c 对 FDAC 沥青混合料高温稳定性能的影响略大于内摩擦角 φ 的影响,其主要原因为沥青胶浆黏聚力随骨料表面的吸附与化学作用而增大,两者交互影响,互不可分,但在高温条件下较敏感,对高温稳定性影响较大。

4 评价方法分析

FDAC 沥青混合料通过增强骨架结构和降低沥青用量来提高沥青混合料的高温稳定性能,在采用马歇尔稳定度试验、高温+重载车辙试验、单轴贯入强度试验 3 种评价方法进行研究时,各评价指标所得出的结论并非完全一致,其中马歇尔稳定度试验与单轴贯入强度试验的相关性较好,二者的变化规律基本一致,而车辙试验结果则与其存在一定的差异。主要原因为车辙试验主要为过程破坏,而马歇尔稳定度试验与单轴贯入强度试验均为瞬时破坏,因此其评价指标并不完全冲突,而是可以相互补充,为 FDAC 沥青混合料高温稳定性能的评价提供更充分、系统的依据。

5 结论

通过对采用不同评价指标对不同粒径 FDAC 沥青混合料进行高温性能研究,得出以下结论:

(1) FDAC 沥青混合料随着集料公称粒径的增大,动稳定度增大,车辙变形深度减小,马歇尔稳定度与单轴贯入强度呈现先增大后减小的趋势。

(2) FDAC 沥青混合料各评价指标受集料粒径变化的影响有限。

(3) 在高温+重载车辙试验中,不同粒径沥青混合料均表现为受荷载因素的影响大于温度因素;经拟合,动稳定度与车辙变形深度的试验结果呈对数关系,相关系数达 0.898,可采用 $y = -1.675 \ln x + 16.129$ 进行高温性能的预测控制。

(4) FDAC 沥青混合料粉胶比与黏聚力呈抛物线关系,与沥青膜厚度成反比关系。

(5) 灰色关联度计算结果表明,黏聚力 c 对 FDAC 沥青混合料高温稳定性能的影响略大于内摩擦角 φ 的影响。

参考文献:

- [1] 葛冬冬. 沥青混合料单轴贯入试验的细观分析[D]. 湖南大学硕士学位论文,2014.
- [2] 王辉. 重载高温区沥青路面结构与材料研究[D]. 东南大学博士学位论文,2008.
- [3] 王富玉. SAC13 沥青混合料的设计与施工[D]. 吉林大学博士学位论文,2007.
- [4] 沈金安,李福晋,陈景. 高速公路沥青路面早期损坏分析与防治对策[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [5] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 1 版. 北京:人民交通出版社,2005.
- [6] 蔡旭. 沥青路面抗车辙性能评价及结构优化[D]. 华南理工大学博士学位论文,2013.
- [7] 黄东,曹帆,薛金顺,等. 冷补沥青混合料嵌锁骨架级配及其性能研究[J]. 中外公路,2018(1).
- [8] 张慧鲜. 基于抗剪强度的沥青混合料高温性能影响因素分析及改善措施研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2010.
- [9] 李洪华. 沥青路面车辙成因分析及车辙试验研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2008.
- [10] 陈杰,禚炜安,熊剑平,等. 沥青混合料高温性能评价指标研究[J]. 中外公路,2020(2).
- [11] 汤文,孙立军. 不同温度下沥青混合料的抗剪性能及其评价指标[J]. 公路,2012(3).
- [12] 刘培荣. 橡胶沥青性能对橡胶沥青混合料路用性能的影响[J]. 中外公路,2018(2).
- [13] 毕玉峰,孙立军. 沥青混合料抗剪试验方法研究[J]. 同济大学学报,2008(8).
- [14] 李曙斌. 试验条件对沥青胶浆流变特性影响研究[J]. 中外公路,2018(5).