

文章编号:1005-0523(2017)01-0014-07

基于灰色关联的环氧沥青混合料疲劳性能影响因素分析

凌建明¹, 纪更占¹, 孔二春², 梁国焱³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中交机场勘察设计院有限公司, 广东 广州 510000;
3. 广东省长大公路工程有限公司, 广东 广州 514445)

摘要:采用应力控制的小梁弯曲疲劳试验方法, 分析空隙率、摊铺等待时间、油石比对环氧沥青混合料疲劳性能的影响, 依次给出各因素最佳取值范围, 并通过灰色关联分析法计算各因素与疲劳寿命的关联度, 为环氧沥青混合料设计提供参考。试验结果表明: 最佳空隙率为 3%, 最佳摊铺时间为 40 min, 最佳油石比为 5%, 对于环氧沥青混合料疲劳性能的影响程度为: 油石比 > 空隙率 > 摊铺等待时间。

关键词:环氧沥青; 空隙率; 摊铺等待时间; 油石比; 灰色关联

中图分类号:U414

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.003

环氧沥青混合料是采用环氧沥青和集料拌合而成的热固性材料, 具有抗松散能力强、材料强度高、耐久性好、环境适应性强等优点, 是优良的道面铺装材料^[1]。在 19 世纪 60 年代首次应用于美国空军基地, 主要是为提高道面的耐腐蚀性和耐高温尾喷^[2], 但由于技术不成熟和成本问题, 推广应用受到限制^[3]。但近年来在大跨度桥面铺装领域已经得到系统研究和广泛工程应用^[4-7], 对应用于钢桥面铺装的环氧沥青混凝土疲劳特性进行了诸多研究^[8-12], 然而由于环氧沥青混合料作为机场道面新型材料, 在支撑结构、道面结构、承受荷载类型等与钢桥面均有所不同, 同时在机场加铺过程中, 为实现不停航施工, 需要考虑其摊铺时间的影响, 其疲劳性能也有所不同。

基于此, 本文考虑工程实际以及环氧沥青混合料设计过程中其力学性能与各因素之间的不敏感性等问题, 将主要影响环氧沥青混合料疲劳性能的摊铺等待时间、油石比、空隙率 3 种因素, 从疲劳性能的角度分析各影响因素的推荐值, 通过灰色关联方法确定环氧沥青混合料疲劳性能与主要影响因素直接的关联性, 为机场道面环氧沥青混合料设计提供参考。

1 混合料设计

1.1 级配设计

本次试验所用集料为上海宝山生产的道面专用玄武岩集料, 根据需求将集料分为以下 4 档: 1#(4.74 mm 以下)、2#(2.36~4.74 mm)、3#(4.5~9.5 mm)、4#(9.5~16 mm)。根据规范^[13-14], 测试各档集料基本性能如表 1 所示。用方孔标准筛对四档集料和矿粉进行筛分, 试验结果如表 2 所示。根据配合比计算, 1 到 4 号集料以及矿粉的用量分别为 53%, 5%, 17%, 22% 和 3%, 配合比曲线如图 1 所示。

收稿日期: 2016-06-14

基金项目: 空军后勤科研项目(KJYZ0991)

作者简介: 凌建明(1966—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为道路与机场工程。

通讯作者: 纪更占(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为道路工程。

表 1 集料技术指标
Tab.1 The technical index of aggregate

集料指标	1#	2#	3#	4#	要求
小于 0.07 mm 的含量/%	0.4	0.3	0.2	0.2	≤0.8
针片状颗粒含量/%	—	—	1.1	1.4	≤5
表观相对密度/(g/m ³)	2.721	2.724	2.886	2.875	—
毛体积相对密度/(g/m ³)	2.721	2.724	2.810	2.815	—
吸水率/%	0.41	0.38	0.32	0.34	≤1.5
抗压强度/MPa	—	—	120	—	≥120
洛杉矶磨耗值/%	—	—	10.7	—	≤18
磨光值(BPN)	—	—	60	—	≥48
压碎值/%	—	—	8.5	—	≤12

表 2 集料筛分结果
Tab.2 The results of aggregate screening

集料类型	筛孔/mm									
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16
4# 集料	0	0	0	0	0	0	0	12.3	81.2	100
3# 集料	0	0	0	0	0.1	1.6	16.7	95.6	100	100
2# 集料	0	0	0	0	0.1	2.5	90.8	100	100	100
1# 集料	7.9	12.4	18.1	32.6	50.6	71.5	97.3	100	100	100
矿粉	76.3	95.7	100	100	100	100	100	100	100	100

1.2 环氧沥青性能

本次试验中采用句容宁武化工有限公司生产的 2910 号环氧沥青(HLJ-2910),由环氧沥青 A 组分和 B 组分组成,其中 A 组分为环氧树脂,B 组分为添加了固化剂的沥青,工业配比为 1:2.9。A 组分环氧树脂技术指标如表 3 所示,环氧沥青性能检测结果如表 4 所示。

2 试验方法及条件

2.1 试验方法确定

疲劳试验的荷载控制模式主要包括应变控制和应力控制,学者对应变控制的研究结果为:沥青用量的减少会降低混合料的疲劳寿命,但应变控制的结果只适用于薄沥青面层^[10]。环氧沥青混合料是一种热固性的脆性材料,如果采用应变控制,则会导致试件底部的拉应变过大,当应力超过试件的抗拉强度而提前破坏,不能准确评价其疲劳性能,以应力控制疲劳试验研究环氧沥青混合料疲劳性能更符合实际。因此采用应力控制的小梁弯曲疲劳试验作为环氧沥青混合料疲劳特性研究方法。

2.2 疲劳试验条件

根据规范^[15],采用 15℃作为本次小梁疲劳弯曲试验的试验温度。加载波形为接近于实际路面所受的正弦波形,荷载频率为 10 Hz,加载应力水平选择 6 个($n=0.3\sim0.8$),从较大的加载水平开始,再往低选取。试验

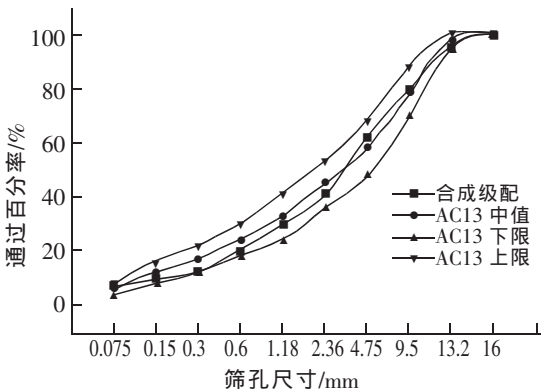


图 1 环氧沥青混合料级配曲线
Fig.1 Epoxy asphalt mixture grading curve

表 3 NJ 环氧沥青 A 组分技术指标
Tab.3 The technical index of A component of NJ epoxy asphalt

项目	指标
外观	淡黄色粘稠液体
120℃粘度/(MPa·s)	20±10
含水量/%	≤0.15
色度	≤4
20℃密度/(g/ml)	1.15±0.15
闪点/℃	200

表 4 环氧沥青性能检测结果
Tab.4 The properties of epoxy asphalt

项目	HLJ-2910
重量比(A : B)	100 : 290
抗拉强度(23℃)/ MPa	5.72
断裂延伸率(23℃)/%	264
吸水率(7天,23℃)/%	几乎为 0
热固性(300℃)	不融化

期将小梁试件放入 15℃恒温箱中保温 6 小时后,利用 MTS-810 材料测试系统进行强度试验,得到小梁准静载条件下的破坏荷载 P 。根据破坏荷载和应力水平计算各条件下的荷载值,以试件断裂破坏作为疲劳试验结束的标志,对应的加载次数为疲劳寿命。

3 环氧沥青混合料疲劳性能影响因素

3.1 空隙率的影响

选取空隙率为 3%、4%、5%和 6%的环氧沥青混合料成型车辙板试件,并切割成标准尺寸的小梁进行疲劳试验,试验结果如图 2 所示。

从图 2 中可以清楚地看出,随着空隙率的增大,环氧沥青混合料的疲劳性能显著降低。根据沥青混合料疲劳理论,在应力控制疲劳试验中,应力与疲劳寿命成双对数关系,应力控制疲劳方程为

$$\lg N_f = a + b \lg \sigma \tag{3-1}$$

其中: N_f 为疲劳寿命(次); σ 为弯拉应力,MPa;斜率 b 的绝对值表示疲劳寿命对应力的敏感性。从图中可以看出,斜率 b 随着空隙率的逐渐增大而增大,说明疲劳寿命随着空隙率的提高对应力的敏感性逐渐提高。在四个梯度空隙率中,空隙率为 3%的疲劳寿命曲线最靠近上方,而且在常见的应力水平条件下,其斜率和截距都优于其他空隙率对应的疲劳寿命曲线。因此在进行环氧沥青混合料设计时,从提高疲劳寿命角度考虑,空隙率应尽量靠近 3%。

3.2 摊铺等待时间的影响

环氧沥青混合料的路用性能不仅与环氧树脂的适用期有关,还与其摊铺等待时间、施工可操作时间有关^[16]。环氧树脂与固化剂混合之后尚未出现凝固的时间称为适用期。将环氧树脂作为改性沥青添加剂混合到含有固化剂的沥青里后,环氧沥青 A、B 组分发生化学反应,形成空间网络结构,使环氧沥青粘度增加,粘度达到 1 000 MPa·s 之前的这段时间称作施工可操作时间。规范^[17]中要求的施工最佳拌合粘度为 170 MPa·s 左右,最佳碾压粘度在 280 MPa·s 左右。对于给定的环氧沥青,其混合料施工可操作时间一般是固定的,其结合料粘度达到 170 MPa·s 和 280 MPa·s 的时间是固定的,如果从出料到摊铺碾压的时间间隔过长,必然导致环氧沥青混合料中环氧沥青结合料的粘度超过 280 MPa·s 甚至 1 000 MPa·s,导致施工困难,碾压效果下降,最终无法保证压实度,使铺面空隙率过大,影响环氧沥青混凝土道面的性能。本试验中在空隙率为 3%

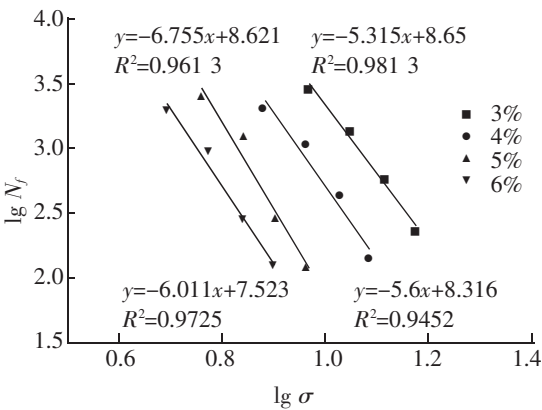


图 2 不同空隙率试件疲劳寿命与应力的双对数曲线
Fig.2 The double logarithmic curve between fatigue life and stress with different porosities

的条件下,选取 100,80,60,40 和 20 min 5 个基准时间作为摊铺等待时间,成型车辙板并切割成标准尺寸的小梁进行疲劳试验,实验结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,随着摊铺等待时间的增加,环氧沥青混合料的疲劳性能得到提升,当时间超过 40 min 之后,疲劳寿命明显减小,疲劳性能显著下降,且 40 min 对应的疲劳曲线具有较低的敏感系数,由此可知,存在一个最佳摊铺等待时间使得环氧沥青混合料在该条件下具有最优越的疲劳性能,以 40 min 左右为宜。

这主要是由于在拌合早期,环氧沥青粘度较低,较易发生自由流动,若在较短摊铺等待时间内成型混合料,环氧沥青不能均匀粘附于集料表面,试件内部油石比沿重力方向逐步增加,空隙不均匀分布明显,导致试件疲劳性能降低;若摊铺等待时间过长,环氧沥青粘度较高,混合料难以压实,空隙率增加,同样使得疲劳性能降低,因此,存在一个合适的摊铺等待时间使得环氧沥青混合料具有较好的疲劳性能。

3.3 油石比的影响

对于热固性环氧沥青混合料来说,当环氧树脂和含有固化剂的沥青发生固化反应之后,并不存在自由沥青问题,提高油石比时,集料之间过多的环氧沥青一方面会发挥加筋的作用,使得环氧沥青混合料的性能增强;而另一方面,过多的环氧沥青将增加集料之间的接触距离,降低集料之间的接触面积,这又使得环氧沥青的性能下降。选取结合料含量(环氧树脂和含有固化剂的沥青混合物的含量)分别为 4%,4.5%,5%,5.5%,6%的环氧沥青混合料,成型不同油石比的车辙板,然后切割成标准尺寸的小梁试件,在 15℃ 条件下进行三点小梁疲劳试验,实验结果如图 4。

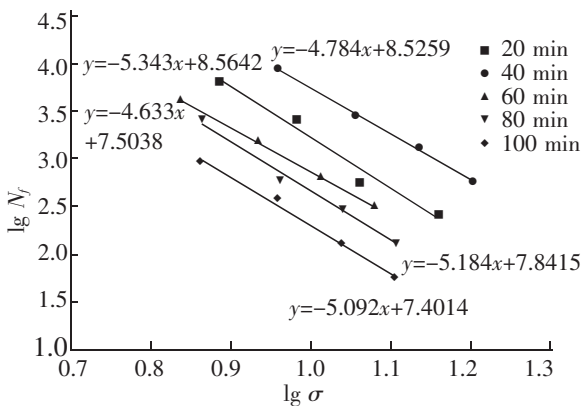


图 3 不同摊铺等待时间环氧沥青混合料疲劳曲线
Fig.3 The fatigue curve of epoxy asphalt mixture for different paving waiting time

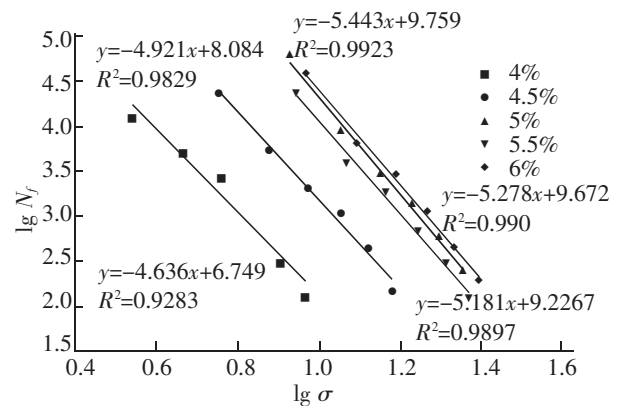


图 4 不同油石比环氧沥青混合料疲劳曲线
Fig.4 The fatigue curve of epoxy asphalt mixture for different aggregate ratio

从图 4 中可以看出,在应力控制模式下,不同于普通热塑性沥青混合料,环氧沥青混合料最大疲劳寿命并不存在一个最佳沥青用量。在一定的油石比区间内,随着油石比的增加,环氧沥青混合料疲劳疲劳寿命增加,疲劳性能增强,当油石比达到一定程度之后,其疲劳性能并没有出现单调递增,而表现出一定的波动效应。油石比从 4% 增加到 5%,沥青混合料疲劳性能明显增强;当油石比在 5% 以上时,疲劳性能并未明显增加,疲劳曲线出现波动,5% 以上油石比小梁试件疲劳曲线分布在 5% 油石比试件的疲劳曲线附近。

出现波动效应是因为环氧沥青混合料并不存在过多自由沥青的问题,而过多的固化后的环氧沥青一方面起着加筋的效果,使集料之间粘结紧密,另一方面增加了集料的接触距离,降低的集料之间的接触面积,这两方面正反效果使环氧沥青混合料在疲劳性能方面出现了震荡效应。

从上可知,环氧沥青混合料疲劳性能在 5% 油石比时取得了较好的效果,虽然增加油石比会在一定程度上提升其疲劳性能,但提升效果并不明显。故从疲劳性能和工程实际角度考虑,推荐环氧沥青混合料油石比设计值尽量接近 5%,而此时混合料的空隙率在 3% 左右,同时也验证了空隙率对疲劳性能影响的结论。

4 疲劳性能影响因素灰色关联分析

空隙率、油石比和摊铺等待试件是环氧沥青混合料设计过程和成型过程中影响其性能的重要因素。本文将用灰色关联分析法进一步分析各因素与疲劳寿命之间的关联度大小,以此确定环氧沥青混合料设计过程中优先考虑的因素,具体计算方法可参考文献^[18]。为保证各因素与疲劳寿命之间的关联度大小不因个别试件的差异而导致偶然变异,选择 10 组试件在 4 个应力水平条件下的疲劳试验结果作为关联度计算原始数据,如表 5 所示。由于空隙率与疲劳寿命之间的逆相关性,对空隙率的初始化过程中使用其倒数作为参考数据,各参数初始化结果如表 6 所示。通过关联度分析,各因素与不同应力比下环氧沥青混合料疲劳寿命之间的关联度大小如表 7 所示。

表 5 环氧沥青混合料疲劳实验结果
Tab.5 The results of epoxy asphalt mixture fatigue test

影响因素	序号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
疲劳寿命($r=0.7$)	292	437	584	301	450	265	309	133	57	573
疲劳寿命($r=0.6$)	1 249	1 086	1 354	693	1 190	574	659	301	128	1 323
疲劳寿命($r=0.5$)	2 593	2 037	2 887	1 901	2 959	2 635	1 564	609	390	2 578
疲劳寿命($r=0.4$)	5 020	5 320	8 811	3 856	6 507	6 599	4 525	2 575	951	8 718
空隙率/%	5.52	4.0	3.45	2.19	1.64	3.31	5.8	6.6	7.3	3.6
油石比/%	4	4.5	5	5.5	6	5	5	5	5	5
摊铺等待时间/min	10	10	10	10	10	20	60	80	100	40

表 6 环氧沥青混合料疲劳寿命和各因素初始化结果
Tab.6 The initialization results between the factors and fatigue life of epoxy asphalt mixture

影响因素	序号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
疲劳寿命($r=0.7$)	0.856	1.281	1.712	0.880	1.319	0.776	0.906	0.390	0.167	1.712
疲劳寿命($r=0.6$)	1.454	1.265	1.577	0.807	1.386	0.669	0.767	0.350	0.149	1.577
疲劳寿命($r=0.5$)	1.273	1.000	1.418	0.934	1.453	1.294	0.719	0.299	0.192	1.418
疲劳寿命($r=0.4$)	0.948	1.004	1.663	0.728	1.228	1.246	0.854	0.486	0.180	1.663
空隙率/%	0.656	0.906	1.050	1.655	2.210	0.990	0.625	0.549	0.496	0.863
油石比/%	0.800	0.900	1.000	1.100	1.200	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
摊铺等待时间/min	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.571	1.714	2.286	2.857	1.143

表 7 各因素与不同应力比下疲劳寿命关联度
Tab.7 The correlation degree between the factors and different stress ratio

应力比	$r=0.4$	$r=0.5$	$r=0.6$	$r=0.7$	平均关联度
空隙率/%	0.779	0.833	0.796	0.787	0.799
油石比/%	0.784	0.837	0.807	0.825	0.813
摊铺等待时间/min	0.562	0.615	0.637	0.621	0.609

从表 7 中可以看到,在 4 种应力比下,空隙率、油石比和摊铺等待时间与疲劳寿命之间的关联度均存在一致的大小顺序,即油石比>空隙率>摊铺等待时间。各关联度均大于 0.6,说明各因素均与疲劳寿命之间具

有较高的关联性,但环氧沥青混合料油石比与其疲劳寿命的关联性高于空隙率,这与一般性沥青混合料得出的结论相反。主要原因是在一定的油石比条件下,在不同的摊铺等待时间压实可以得到不同空隙率的试件,而环氧沥青混合料存在一个最优的摊铺等待时间,使得此条件下压实得到的混合料的疲劳寿命较优,这使得环氧沥青混合料空隙率的态势在某一区间远离疲劳寿命的发展态势,最终出现了油石比与疲劳寿命的关联性略大于空隙率。

5 结论

1) 环氧沥青混合料疲劳性能随着空隙率的增加而降低,空隙率为 3% 时其应力-疲劳寿命方程曲线的斜率和截距都优于其他空隙率对应的疲劳方程曲线,推荐混合料设计空隙率为 3% 左右。

2) 摊铺等待时间为 40 min 对应的疲劳寿命最大,随着时间的推移,环氧沥青混合料疲劳寿命降低,推荐的摊铺等待时间为 40 min 左右。

3) 随着用油量的增加,环氧沥青混合料疲劳寿命增加,不同于普通沥青混合料,环氧沥青混合料并不存在一个最佳油石比使其具有最大的疲劳寿命。但其疲劳寿命增长率存在一个拐点,油石比超过 5% 时增长率开始降低,因此推荐 5% 作为混合料的油石比设计参考值。

4) 在 4 种应力比下,空隙率、油石比和摊铺等待时间与疲劳寿命之间的关联度均存在一致的大小顺序,即油石比>空隙率>摊铺等待时间,在设计混合料时优先考虑推荐的油石比,并选择推荐的摊铺等待时间成型试件。

参考文献:

- [1] PEILIAN C, JIANYING Y, SHUANFA C. Effects of epoxy resin contents on the rheological properties of epoxy-asphalt blends [J]. Journal of applied polymer science, 2010, 118(6): 3678-3684.
- [2] JOSEPH A H. Behavior of Epoxy-asphalt airfield pavements, 1963 Inspections[R]. [S.L.] Army Engineer Water Ways Experiment Station Vicksburg MS, 1965.
- [3] 冉武平, 凌建明, 赵鸿铎. 环氧沥青道面高温足尺加速加载动力响应[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(12): 1823-1828.
- [4] 张肖宁, 张顺先, 徐伟, 等. 基于使用性能的钢桥面铺装环氧沥青混凝土设计[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 40(7): 1-7.
- [5] 张思桐. 环氧沥青在桥面铺装中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2010: 16.
- [6] 李宇峙, 吴国平, 邵腊庚. 环氧沥青混凝土材料在钢桥面铺装中的应用[J]. 中南公路工程, 2005, 30(3): 168-170+74.
- [7] 王胜, 叶奋, 武金婷, 等. 钢桥面环氧沥青防水粘结层耐久性影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(1): 39-42.
- [8] 薛连旭. 基于疲劳特性的环氧沥青混合料设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 83-96.
- [9] 张付军. 大型钢桥面铺装用环氧沥青混合料的疲劳性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 23-35.
- [10] Y MANSARAY A, 黄明. 加载模式与夹具对环氧沥青混合料疲劳性能检测的影响 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(6): 891-895.
- [11] 庞渊. 环氧沥青混合料钢桥面铺装疲劳性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2010: 19-64.
- [12] 张顺先. 基于使用性能的钢桥面铺装环氧沥青混合料设计与疲劳寿命预测[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 79-104.
- [13] 交通部公路科学研究所. JTG F42-2005, 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [14] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG E41-2005, 公路工程岩石试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [15] 中交公路规划设计院. JTG D50-2006, 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [16] 黄明, 黄卫东. 摊铺等待时间对环氧沥青混合料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 122-125.
- [17] 交通部公路研究所. JTG E20-2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [18] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1987: 61-92.

Analysis on Influence Factors of Fatigue Performance for Epoxy Asphalt Mixture Based on Grey Relation Degree Theory

Ling Jianming¹, Ji Gengzhan¹, Kong Erchun², Liang Guoxi³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. CCCC Airport Investigation and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

3. Guangdong Provincial ChangDa Highway Engineering Co., Ltd., Guangzhou 514445, China)

Abstract: Effects of porosity, paving waiting time and aggregate ratio on epoxy asphalt mixture fatigue performance were researched through the three-point flexure fatigue tests controlled by loading. The recommended value of each factor was respectively given and the correlation degree of each factor associated with the epoxy asphalt mixture fatigue life was analyzed by the grey relation degree theory, which could provide reference for the design of epoxy asphalt mixture. Results showed that: the optimum porosity was 3%, the optimum waiting time was 40 min and the optimum aggregate ratio was 5%. The influence degree on the fatigue performance of epoxy asphalt mixture was arranged and the sequencing was aggregate ratio > porosity > paving waiting time.

Key words: epoxy asphalt mixture; porosity; paving waiting time; aggregate ratio; grey relation degree theory

(责任编辑 王建华)