

复合式应力吸收层的性能和动态响应研究

杨三强^{1,2},李鹏飞¹,刘璐¹,曹紫龙¹

(1.河北大学 建筑工程学院,河北 保定 071002;2.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为了对比复合式应力吸收层、SBS应力吸收层和玻璃格栅应力吸收层性能差异,探究复合式应力吸收层的动态响应规律。该文基于玻璃格栅+橡胶改性沥青碎石封层构成的复合式应力吸收层,借助UTM-25等试验系统开展层间剪切、层间拉拔、低温弯曲和四点疲劳试验,采用铺设试验段并布设传感器的方法收集不同工况下应力吸收层的应变信息,发现复合式应力吸收层的黏结力为0.58 MPa,内摩擦角为12.84°,其复合层试件的拉拔强度为0.48 MPa,最大弯拉应变为3 936 $\mu\epsilon$ (-10℃);根据现场试验,提出其关于(标准轴载下)车速的动态响应模型;1年后观测该试验段,发现未产生任何道路病害。研究结果表明:由于玻璃格栅的嵌锁作用和橡胶改性沥青的黏结作用,复合式应力吸收层的黏结性能、抗剪性能、低温抗弯性能和疲劳性能优于传统应力吸收层;玻璃格栅的加筋作用使得复合式应力吸收层在低速爬坡路段的作用效果更明显。

关键词:道路工程;应力吸收层;综合性能;应变传感器;动态响应

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

0 引言

随着中国交通建设的不断发展,研究发现采用单一技术解决反射裂缝问题的作用效果具有一定局限性^[1],针对这种情况,近几年国内外研究人员开始同时采用多种抗裂技术手段^[2],逐渐向复合式应力吸收层方向发展,以应对更复杂的道路状况。欧洲研究人员对一种双层强化抗裂系统进行疲劳试验,发现该技术是提高路面寿命的有效选择^[3]。徐亚林等^[4]设计的土工布和沥青碎石封层构成的复合式应力吸收层以及薛永超等^[5]设计的环氧沥青-玻纤格栅应力吸收层性能均优于普通应力吸收层。综上所述,中国对复合式应力吸收层有一定的研究基础,但针对玻璃格栅和橡胶改性沥青碎石封层构成的复合式应力吸收层并未涉及,加之目前大多研究是针对不同材料进行的室内或软件模拟试验,无法准确反映道路内部的实际情况,容易忽视道路中应力吸收层的结构变形行为,从而导致该功能层提前失效,缩短道路使用寿命。

针对以上热点问题,本文提出一种玻璃格栅-橡胶改性沥青构成的复合式应力吸收层。为了保证应力吸收层的合理应用,同时加强对其结构和变形行为研究,本研究通过制作包含SBS应力吸收层、玻璃格栅应力吸收层与复合式应力吸收层的试验试件,同时借助UTM-25和双面环刀切割锯等手段,对试件进行切割并开展层间剪切、层间拉拔、低温弯曲和四点弯曲疲劳试验。除此之外,本研究通过铺设SBS改性沥青应力吸收层和复合式应力吸收层试验段,基于布设应变传感器的方法,采集了不同车速下两种应力吸收层的应变数据,分析并总结了(标准轴载下)车速对动态响应影响的变化规律。研究结果不但对减少半刚性路面的反射裂缝有实际意义,同时也为中国新型道路基础设施建设提供重要参考。

1 原材料指标和试件制作

1.1 原材料指标

本研究选择SBS应力吸收层、玻璃格栅应力吸收层与复合式应力吸收层进行性能对比。试验采用的

收稿日期:2022-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51808016);河北省自然科学基金资助项目(编号:E2018201106);河北大学创新基金资助项目(编号:HBU2021ss028)

作者简介:杨三强,男,教授,博士生导师.E-mail:ysq0999@163.com

改性沥青具体指标如表1所示,集料的技术指标见表2,玻璃格栅应力吸收层与复合式应力吸收层采用相同的玻璃格栅,其横向纵向断裂强度均为50 kN/m,伸长率小于10%,单位面积质量为440 g/m²,网眼尺寸为20 mm。

表1 沥青技术指标

指标	单位	橡胶改性沥青	SBS改性沥青
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	64.4	54.9
软化点	℃	63.1	60.4
延度(5℃,5 cm/min)	cm	17.8	19.3
旋转黏度	Pa·s	5 020.0	1 220.0
弹性恢复率	%	90.7	88.3
沥青质	%	26.7	25.9
芳香分	%	38.7	42.2
饱和分	%	19.2	17.3
胶质	%	15.1	14.0

表2 集料技术指标

指标	单位	结果
压碎值	%	12.0
黏附性能	级	5.0
坚固性	%	2.8
磨耗值	%	10.0
针片状颗粒含量	%	5.2

1.2 成型试件

本研究成型试件采用30 cm×40 cm×20 cm试模,计划制作3种复合层试件,下层均为5%的水泥稳定碎石,上层均为AC-25沥青混合料。中间层以复合式应力吸收层为例,在层间处理后的水稳层上部铺设一层玻璃格栅和橡胶改性沥青,沥青洒布量为2.5 kg/m²,再铺设一层9.5~13.2 mm的单一粒径玄武岩碎石,铺撒量为13.5 kg/m²;SBS应力吸收层的改性沥青洒布量和碎石撒布量与复合式应力吸收层一致;玻璃格栅应力吸收层直接在层间处理后的水稳层上铺设一层玻璃格栅,最后铺设上层的沥青混合料并用轮碾设备压实,养护完毕后,进行钻取和切割,表3为3种不同试件对应的简称。

表3 3种试件结构和简称

简称	试件结构
A	9.5 cm 水泥稳定碎石层+1 cm 复合式应力吸收层+9.5 cm AC-25
B	9.5 cm 水泥稳定碎石层+1 cm SBS 应力吸收层+9.5 cm AC-25
C	10 cm 水稳稳定碎石层+玻璃格栅+10 cm AC-25

2 应力吸收层性能分析

应力吸收层作为基层和面层之间的抗裂功能层,其必须具备良好的层间黏结性能、低温抗裂性能和疲劳性能。本研究计划进行层间拉拔试验、层间剪切试验、低温弯曲试验和疲劳性能试验。

2.1 层间黏结性能分析

道路层间的黏结性能直接影响路面结构的使用性能^[6]。本研究通过层间拉拔试验测得试件层间拉拔强度,由此来反映相应的层间黏结性能,试件规格为:直径10 cm,高度20 cm,温度为25℃,拉拔速率为10 mm/min,试验开始前需用环氧树脂胶将试件两端与压头黏结牢固,同时将试件放置在环境箱中4 h以上。试验结果如图1所示。

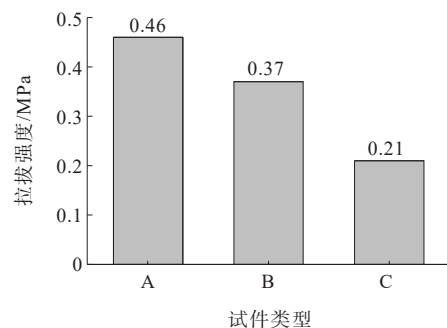


图1 3种试件的拉拔强度

由图1可知:3种试件的拉拔强度由高到低依次是A型、B型、C型,A型试件拉拔强度最大,为0.46 MPa,其中A型是B型的1.24倍、C型的2.19倍,这是由于3种应力吸收层的拉拔强度均取决于集料与沥青间的黏结力,而本研究采用橡胶改性沥青的黏度远大于SBS改性沥青,同时由于C型试件直接铺设玻璃格栅,从而导致A型层间黏结性能最好,C型黏结性能最差。

2.2 层间剪切性能分析

车辆在制动或上下坡时会对道路层间产生较大剪应力,当产生剪应力大于层间容许剪应力,会导致道路层间分离^[7],从而加速道路破坏,本试验为了测得不同剪切角度下的层间容许剪应力,即层间抗剪强度,采用1.2节制的试件进行试验,规格为5 cm×5 cm×5 cm立方体,通过SYE压力机配合剪切夹具进行试验,设置5种剪切角,加载速率为10 mm/min,试验均在25℃下进行。试件破坏时的荷载为N,此时

应力吸收层剪切界面的正应力和剪应力按下式计算:

$$\sigma = N \cdot \sin \alpha / A \tag{1}$$

$$\tau = N \cdot \cos \alpha / A \tag{2}$$

式中: σ 为垂直于黏结面的正应力(MPa); τ 为垂直于黏结面的剪应力,即抗剪强度(MPa); N 为剪切破坏荷载(kN); A 为黏结面积(m^2); α 为剪切角度($^\circ$)。

3种试件不同剪切角度下的剪切试验结果如表4所示。

表4 3种试件不同剪切角度下的剪切试验结果

试件类型	剪切角度/($^\circ$)	破坏荷载/kN	剪切位移/mm	正应力/MPa	剪应力/MPa
A	25	6.27	4.32	2.27	1.06
	35	4.23	3.89	1.39	0.97
	45	2.66	3.43	0.75	0.75
	55	2.04	2.52	0.47	0.67
	65	1.74	2.12	0.29	0.63
B	25	5.40	4.03	1.96	0.91
	35	3.39	3.69	1.11	0.78
	45	2.29	2.52	0.65	0.65
	55	1.75	1.35	0.40	0.57
	65	1.49	1.88	0.25	0.54
C	25	4.36	3.56	1.58	0.74
	35	2.64	2.73	0.86	0.61
	45	1.85	1.72	0.52	0.52
	55	1.39	0.47	0.32	0.46
	65	1.21	0.38	0.20	0.44

由表4可知:随着剪切角度的增加,3种试件的破坏荷载均逐渐减小,这是因为道路层间剪切破坏是剪应力大于层间容许剪应力导致的,随着剪切角度的增大,剪应力占破坏荷载的有效比例逐渐增大,从而使破坏荷载逐渐减小。除此之外,研究发现剪切位移和剪应力均随剪切角增大而减小,表明道路坡度越大,对应的层间抗剪强度越小,越容易发生剪切破坏。3种应力吸收层对比,发现A型试件在5种剪切角度下的破坏荷载、剪切位移、正应力和剪应力最大,表明其抗剪性能优异,该应力吸收层更适合在陡坡、制动以及转弯等剪应力较大路段应用。

根据抗剪强度思想,得到式(3):

$$\tau_f = \sigma \cdot \tan \varphi + c \tag{3}$$

式中: τ_f 为黏结面抗剪强度(kPa); σ 为剪切面上的法

向应力(kPa); φ 为黏结面的内摩擦角($^\circ$); c 为沥青混合料的黏聚力(kPa)。

根据A型试件各剪切角度下剪应力和正应力的相关性,可以求得A型试件的抗剪强度曲线: $\tau_f = 0.228\sigma + 0.58$ (图2),依据式(3)得到复合式应力吸收层的黏结力为0.58 MPa,内摩擦角为12.84 $^\circ$ 。由于橡胶改性沥青和玻璃格栅的共同作用,复合式应力吸收层的抗剪切性能最佳,分析可知其中的橡胶改性沥青提供黏结力,玻璃格栅和碎石同时作用提供内摩擦角。

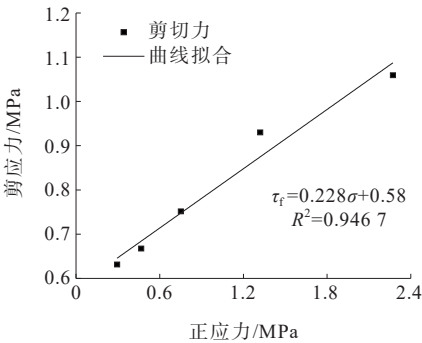


图2 各剪切角度下剪应力和正应力的相关性(A型)

2.3 低温弯曲性能分析

反射裂缝大都是由于基层材料干缩和温缩形成的^[8],这从侧面可以反映出材料的低温性能与抗裂性能密切相关。本研究借助UTM-25试验机,参照沥青和沥青混合料T0715—2011规范准备试验,试验温度选择-10 $^\circ\text{C}$ 、-5 $^\circ\text{C}$ 和0 $^\circ\text{C}$,利用1.2节制作的复合梁试件进行试验,试验结果如表5所示。

表5 3种试件不同温度下的最大弯拉应变

试件类型	温度/ $^\circ\text{C}$	最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$	弯曲劲度模量/MPa	弯拉强度/MPa
A	-10	3 936	2 127	8.37
	-5	10 421	903	9.41
	0	23 785	291	6.92
B	-10	3 181	2 386	7.59
	-5	8 199	1 082	8.87
	0	18 625	333	6.21
C	-10	1 845	2 856	5.27
	-5	6 082	1 139	6.93
	0	11 357	409	4.65

由表5可知:3种试件的最大弯拉应变均随温度下降而减小,每种温度下的最大弯拉应变均为A>

$B > C$, 表明 A 型试件具有良好的低温收缩能力。随着试验温度的降低, 试件内部的温度应力逐渐增大, 当其积累到一定程度时, 可能会对试件内部产生一定的损伤, 从而使得试件的弯拉强度降低, 这可能是 3 种试件在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对应的弯拉强度最大的原因。与其他两种试件对比, A 型试件的弯拉强度最大, 其 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最大弯拉应变为 $3\,936\text{ }\mu\epsilon$, 该结果满足规范要求 ($>3\,000\text{ }\mu\epsilon$), 表明复合式应力吸收层的低温适用范围更广。

2.4 疲劳性能分析

为了评价几种应力吸收层的疲劳性能, 本研究借助 UTM-25 试验机, 参照沥青和沥青混合料 T0715—2011 规范进行试验, 利用 1.2 节制作的复合梁试件进行试验, 试验温度选择 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 波形选用半正弦波^[9], 选择应变控制模式, 应变范围为 $300\sim 700\text{ }\mu\epsilon$, 每次间隔 $100\text{ }\mu\epsilon$ 进行试验, 当试件模量下降到初始模量的 $1/2$ 时停止试验。试验结果如表 6 所示。

表 6 3 种试件不同应变条件下的加载次数

应变/ $\mu\epsilon$	不同试件的加载次数/次		
	A 型	B 型	C 型
300	56 887	35 201	24 470
400	23 504	19 761	11 341
500	13 743	9 711	7 001
600	7 050	4 730	2 719
700	3 507	2 279	1 568

此外, 研究发现试件寿命和应变的对数取值存在很好的相关性, 所以按照式(4)将应变与疲劳寿命进行曲线拟合, 拟合结果见图 3。

$$\lg N = a + b \lg \epsilon \quad (4)$$

式中: N 为试件疲劳寿命(次); ϵ 为试验控制的应变($\mu\epsilon$); 系数 b 表示应力吸收层寿命对应变的敏感性, 系数 a 表示疲劳曲线的位置, a 越大曲线越靠上, 表示应力吸收层的疲劳性能越好。

由图 3 可知: A 型试件的疲劳曲线为 $\lg N = 12.687 - 3.192 \lg \epsilon$, 通过对比系数 a 可知: C 型试件的系数 a 最小, 说明其疲劳曲线的位置最靠下, 表征玻璃格栅应力吸收层的抗疲劳性能最差, 反之 A 型试件疲劳曲线的位置最靠上, 表征复合式应力吸收

层的抗疲劳性能最优; 通过对比系数 b 的绝对值可知: A 型试件疲劳曲线的系数 b 绝对值最小, 说明复合式应力吸收层可以显著改善道路应变对疲劳寿命的影响, 分析其疲劳寿命提升的机理为: 由于玻璃格栅和橡胶改性沥青发挥其嵌锁黏结作用, 两者共同作用可以限制集料的移动, 使其不易受外界应变条件影响, 所以疲劳试验表明沥青路面加铺复合式应力吸收层后可以有效提高道路结构的抗疲劳能力。

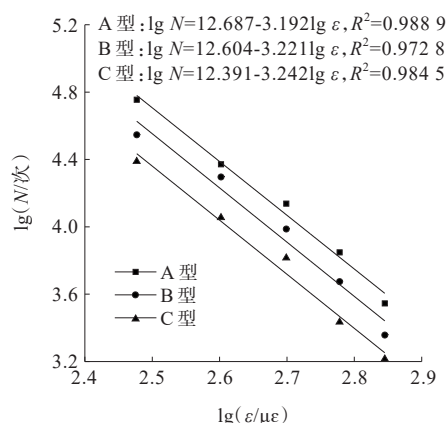


图 3 不同试件应变和加载次数的相关性

3 动态响应研究和试验路验证

目前大多研究无法准确反映道路内部的实际情况, 容易忽视道路中应力吸收层的结构变形行为, 从而导致该功能层提前失效。因此, 为了保证应力吸收层的合理应用, 加强对应力吸收层结构的变形研究, 本研究通过铺设试验段同时借助应变传感器的手段开展试验。由于玻璃格栅应力吸收层性能较差, 所以仅对复合式和 SBS 应力吸收层进行试验段铺设。

3.1 工程概况和传感器布设方案

项目位于阜平县苍山东路, 选择 200 m 布设复合式应力吸收层(称为 A 段), 同时选择 200 m SBS 应力吸收层(称为 B 段), 路面结构的上、中、下面层厚度分别为 4 cm 、 6 cm 和 8 cm , 中部为 1 cm 应力吸收层, 基层和底基层均为 18 cm , 垫层为 18 cm 级配碎石, 具体情况见表 7。传感器横向布设位置见图 4, 纵向布设位置为应力吸收层和下面层之间, 存活传感器为 A2~A4 以及 B2~B4。

表7 道路具体铺设情况

结构层	铺设类型
①上面层	AC-13
②中面层	AC-16
③下面层	AC-25
④功能层	应力吸收层
⑤基层	水稳层
⑥底基层	水稳层
⑦垫层	级配碎石

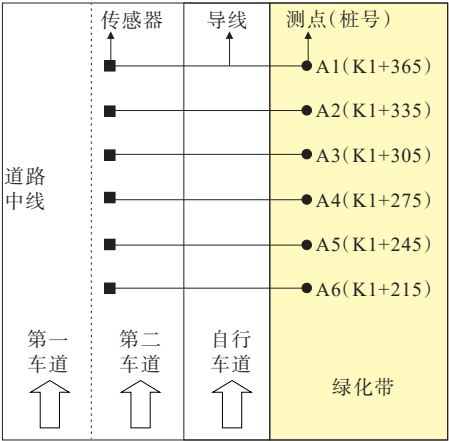


图4 传感器布设示意图

3.2 动态响应数据分析

本试验目的是归纳车速与A段动态响应规律^[10]。试验选择标准荷载车辆(10 t)进行,试验结果见图5(A4和B4)。为了总结车速对动态响应影响的变化规律,本研究将车辆产生应变与车速关系进行拟合,模型的具体参数见图6,同时为了验证模型的准确性,选取其他两个桩位实测数据与模型得出数据进行对比,并计算出实测数据和模型得出数据的偏差,具体数据见图7。

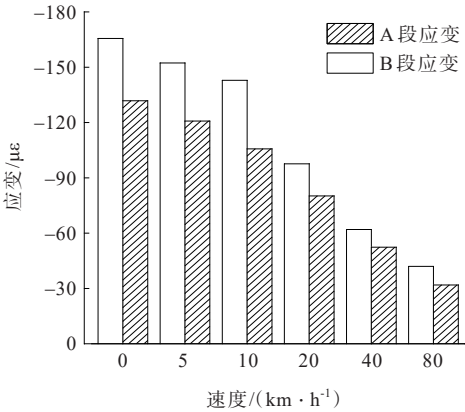


图5 动态响应随车速变化情况

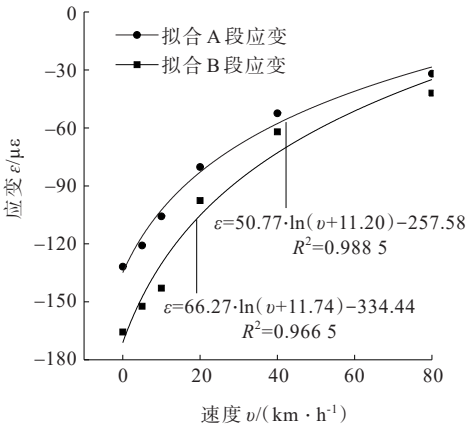


图6 动态响应与速度模型

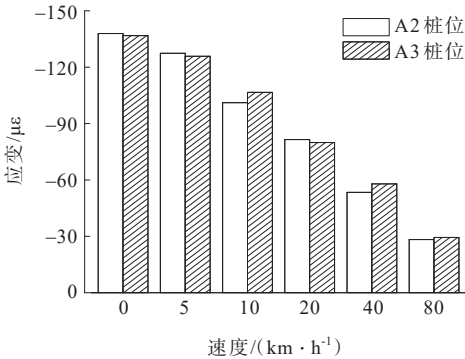


图7 A2和A3桩号实测结果

由图5、6可知:动态响应均随车速提高而下降,这是因为车速与(荷载对传感器的)作用时间成反比,这在力学上的表现为各结构层模量的增大和动态响应的减小。本研究针对A段应力吸收层提出(BZZ-100车辆)动态响应模型,该模型反映了不同车速对应的道路应变情况,拟合模型的 $R^2=0.9885$ 。图7为A2和A3桩号试验结果,与模型结果进行比较,发现实测动态响应在5 km/h时A2桩号偏差最大,此时动态响应偏差11.24 $\mu\epsilon$,偏差率为-9.67%,在40 km/h和80 km/h的偏差最小,仅为0.16%和0.42%,分析原因可能是低速车辆振动较大导致的。此外,模型中的系数50.77和66.27表示应变对车速变化的敏感程度,对比发现A段系数比B段较小,表明A段动态响应对车速敏感性较小,说明复合式应力吸收层在低速路段的路用性能更优。这是因为A段内部的格栅发挥加筋作用时,可将上部荷载的作用效果分散到更广的区域,从而减小了道路内部应变。当车辆提速时,荷载的作用时间缩短,此时格栅来不及充分发挥其加筋作用,且车速越大对应格栅的加筋作用越小,所以车速较大时两路段的动态响

应较为平缓且有逐渐接近的趋势。结合上述模型和 2.2 节剪切试验分析可知, A 段应力吸收层在低速爬坡路段作用效果更明显。

3.3 短期和长期观测调查

苍山东路属于半填半挖路段,加之道路下方铺设较多工业管线,所以该路段极易产生反射裂缝。本研究在开放交通后的首个冬季对试验段进行调查,发现应用复合式应力吸收层试验段未产生任何道路病害,铺设 SBS 应力吸收层的试验段平均每 100 m 道路有 2~3 条裂缝。说明复合式应力吸收层早期的抗裂效果显著。

通车 1 年后,又对阜平县其他 7 条新建市政道路路面进行调查,发现每 10 000 m²路面约产生 13 道宽度大于 5 mm 的裂缝、1.5 处深度超过 30 mm 的车辙雍包,铺设 SBS 改性沥青应力吸收层的路段每 100 m 裂缝增加到 8~10 条,而采用本技术施工完成的苍山东路通车 1 年后,路面整体质量良好,路面未产生反射裂缝,由此可见复合式应力吸收层的长期抗裂效果也非常显著。

4 结 论

借助 UTM-25 试验系统和现场铺设应变传感器等手段,对 3 种复合层试件进行层间拉拔、层间剪切、低温弯曲、四点疲劳和动态响应试验,得到以下结论:

(1) 由于玻璃格栅和橡胶沥青的共同作用,复合式应力吸收层的黏结性能和抗剪切变形性能最优,并求得其黏结力为 0.58 MPa,内摩擦角为 12.84°。

(2) 通过低温小梁试验得到复合式应力吸收层试件的最大弯拉应变为 3 936 $\mu\epsilon$ (-10℃),并通过对比试件的疲劳曲线,发现复合式应力吸收层的抗疲劳性能最优,不易受道路应变影响。

(3) 根据现场试验,针对复合式应力吸收层,提

出关于(BZZ-100)车速的动态响应模型,并通过现场试验和模型数据对比,验证了模型的准确性。

(4) 开放交通后对试验段进行短期和长期观测,发现采用复合式应力吸收层路面通车 1 年后未产生任何裂缝和病害,说明其路用性能优异,抗裂效果显著。

参考文献:

- [1] 孙雅珍,孙晓芳,房辰泽,等.基于三点弯曲试验的高黏沥青砂应力吸收层的裂缝扩展过程研究[J].中外公路,2019,39(2):218-222.
- [2] 樊永华.旧水泥混凝土路面沥青罩面层间处治方案对比研究[J].公路工程,2015,40(5):27-31.
- [3] ZHANG H, GAO P W, ZHANG Z X, et al. Experimental study of the performance of a stress-absorbing waterproof layer for use in asphalt pavements on bridge decks[J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119290.
- [4] 徐亚林,张辉,张志祥.复合式防水黏结应力吸收层性能试验研究[J].中外公路,2020,40(2):216-219.
- [5] 薛永超,钱振东,贾文鏢.环氧沥青土工格栅应力吸收层的设计和性能评估(英文)[J].东南大学学报(英文版),2016,32(1):93-98.
- [6] 杜宇兵,邹晓翎,阮鹿鸣,等.基于灰色关联理论的沥青薄层罩面层间剪应力影响因素研究[J].中外公路,2018,38(3):57-62.
- [7] YOON Y, PATEL S, JI R, et al. Current state of reflective cracking in the united states[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2017, 143(3): 04016099.
- [8] PASETTO M, PASQUINI E, GIACOMELLO G, et al. Innovative composite materials as reinforcing interlayer systems for asphalt pavements: an experimental study[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(sup2): 617-631.
- [9] 洪海,程培峰.HDPE-橡胶粉复合改性沥青应力吸收层混合料疲劳性能[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(12): 125-128.
- [10] 潘睿.应力吸收层温拌橡胶沥青混合料性能[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(6):49-56.