

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.072

引用格式:焦虎,陈玉,孙涵庚. 沥青罩面层抗反射裂缝性能的室内试验方法[J]. 重庆大学学报, 2026,49(5): 126-136.



沥青罩面层抗反射裂缝性能的室内试验方法

焦 虎¹, 陈 玉¹, 孙涵庚^{1,2}

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100029)

摘要:针对沥青罩面层抗反射裂缝性能室内试验试件尺寸偏大及疲劳试验离散性较大的问题, 开发了一种基于小尺寸复合型试件和 CSIC (composite specimen interface cracking) 新型复合型试件的试验方法来评价沥青罩面层的抗反射裂缝性能。通过疲劳试验对比分析 3 种尺寸的玻纤格栅与不加玻纤格栅对抗反性能的影响, 每个试验制作 3 个平行试件来评估试验方法的精密度, 基于 ABAQUS 有限元分析软件建立 XFEM 模型对复合型试件开裂进行模拟。结果表明, 添加玻纤格栅试件抗反射裂缝效果明显, 文中方法与标准试验反映的规律一致; 使用 CSIC 试件进行疲劳试验能够有效提高试验方法的精密度, 降低试验结果离散性; 玻纤格栅在抗反射裂缝过程中, 整体参与作用, 格栅尺寸越小, 抗反射裂缝效果越好; 基于 ABAQUS 有限元分析软件模拟疲劳试验, 有效验证了该评价方法的可行性。

关键词:反射裂缝; 玻纤格栅; 沥青罩面层; 评价方法; 离散性; ABAQUS; XFEM

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)05-126-11

Development of an indoor test method for anti-reflection cracking performance of asphalt overlays

JIAO Hu¹, CHEN Yu¹, SUN Hangeng^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China; 2. Infrastructure Business Division of China State Construction Corporation, Beijing 100029, P. R. China)

Abstract: To solve the problems of large specimen size and high dispersion in fatigue tests used to evaluate the anti-reflection cracking performance of asphalt overlays, an indoor test method based on small-sized composite specimens and CSIC (composite specimen interface cracking) specimens is developed. The effects of three sizes of glass fiber grating and the absence of grating on anti-reflection performance are compared and analyzed through fatigue tests, with three parallel specimens prepared for each condition. To evaluate the precision of the proposed method, an XFEM model is established using ABAQUS finite element software to simulate the cracking process of composite specimens and assess anti-reflection crack performance. The results show that the addition of glass fiber grating significantly improves anti-reflection cracking performance, consistent with trends observed

收稿日期: 2022-05-11 网络出版日期: 2022-07-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078047); 中国博士后科学基金资助项目(2013M542312; 2014T70897)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52078047), and China Postdoctoral Science Foundation Grant (2013M542312; 2014T70897).

作者简介: 焦虎(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事路面工程研究, (E-mail) 18764250336@163.com。

通信作者: 陈玉, 男, 副教授, 主要从事路面工程研究, (E-mail) chenyu1123@chd.edu.cn。

in standard tests. Fatigue tests using CSIC specimens effectively improve test precision and reduce result dispersion. The grid participates integrally in the crack resistance process, and smaller grid sizes provide better anti-reflection performance. The ABAQUS simulation results further verify the feasibility of the proposed evaluation method.

Keywords: reflective cracking; glass fiber grid; asphalt overlay; evaluation method; dispersion; ABAQUS; XFEM

我国公路养护过程中,常用沥青罩面对旧沥青路面、水泥混凝土路面及复合路面进行补强以改善其路用性能^[1]。随着路面使用时间延长,旧路面上的接缝、裂缝处水平位移会不断扩展(水平位移主要由温度变化及汽车荷载引起),由于罩面层与旧路面间的黏结作用,使得罩面层的水平位移受阻从而在罩面层中产生拉应力,当该拉应力超过混合料抗拉强度时,罩面层中将出现反射裂缝^[2-3]。反射裂缝作为罩面层的主要破坏形式,会大大降低其使用寿命并增加道路养护成本^[4]。玻纤格栅由于具有高抗拉模量、高强度、耐高温及耐腐蚀等优点而被广泛应用于沥青罩面层中,用来减缓或抑制反射裂缝^[5-6]。

目前,关于沥青罩面层反射裂缝方面的研究主要集中在沥青罩面层反射裂缝的产生及其发展机理^[7-8]、减缓及防止反射裂缝的技术措施^[9-10]、反射裂缝防治效果的试验检测方法^[11-12]、沥青罩面层设计等4个方面。关于玻纤格栅防止或减缓反射裂缝方面的研究主要集中在防治效果的室内试验检测方法^[13-14]、试验路防反射裂缝效果^[15]、施工工艺^[16-17]及含格栅路面结构分析^[18-19]等方面。针对试件尺寸过大和试验离散性大的问题研究较少,而试件较大对试验所需场地、试验操作、试验所需设备及人员等都会提出较高的要求,试验结果离散性大会导致试验量增加以及无法正确评价抗反射裂缝性能等问题。文中开发了一种新型沥青罩面层抗反射裂缝性能室内试验方法,制备了小尺寸的复合试件和CSIC新型复合试件,通过2种试件的疲劳试验来评价抗反射裂缝性能,每个试验制作3个平行试件来评估试验方法的精密性,以验证试验结果离散性的降低,最后基于ABAQUS有限元软件建立XFEM模型对复合型试件开裂进行模拟以进一步验证该评价方法的可行性。

1 材料和混合料

1.1 沥青

文中选用秦皇岛中石油燃料有限责任公司提供的SBS(I-C)改性沥青,其技术指标如表1所示。

表1 SBS改性沥青(I-C)技术指标

Table 1 SBS modified asphalt (I-C) technical index

技术指标	检测结果	规范指标	试验方法
针入度, 25 °C, 100 g, 5 s, 0.1 mm	66.0	60~80	T0604
延度, 5 °C, cm	35.0	≥30	T0605
软化点(环球法), °C	86.3	≥75	T0606
薄膜烘箱后残留物 163 °C, 5 h			
质量损失, %	-0.13	≤±1	T0604
针入度对比, 25 °C, %	73.50	≥70	T0604
延度, 5 °C, cm	24.00	≥20	T0605

1.2 配合比设计

依据Superpave规范,得到级配曲线如图1所示,在此级配下,得到产生4%孔隙率所对应的沥青用量为4.8%。

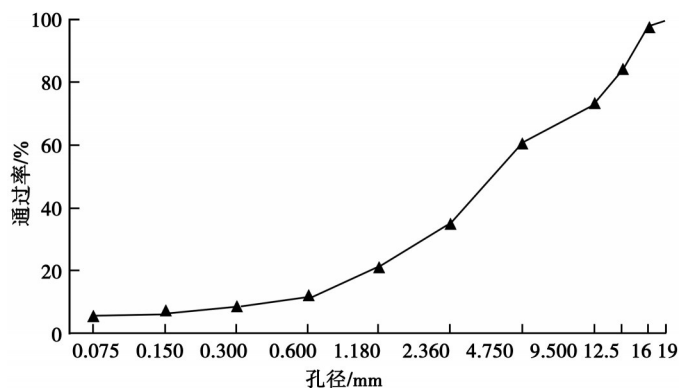


图1 级配曲线

Fig. 1 Gradation curve

2 试验方法

2.1 试件制作

2.1.1 复合型试件制作

设计一种新型复合型试件,以弥补试件几何尺寸偏大、试验结果离散性大的缺点,选用的复合型试件最大方向尺寸仅为150 mm,复合型试件制作流程如图2所示。首先,根据Superpave设计方法成型SGC试件;再将试件上下切除取中间2 cm厚,以消除试件自身对试验结果带来的误差;将试件从中间切割预制裂缝以模拟已有的反射裂缝,需注意切割方向必须是沿着中间进行切割,不得偏离中线,以减少后期对疲劳试验结果的影响;在预制裂缝处插入相应尺寸的塑性板,以防止后续旋转压实导致预制裂缝闭合;再将玻纤格栅黏到试件表面,需注意玻纤格栅要径向铺设,即较粗的方向应该垂直于裂缝布设,避免倾斜或者平行布设,影响试验结果,同时中间两相邻格栅距离中线的位置需保持一致,以确保在后期切割后,每个试件都有2根径向的玻纤格栅,从而减少试验误差;为模拟真实路面的沥青罩面层,采用相同级配沥青混合料加铺到铺设玻纤格栅的试件上,为保证层间黏结问题,先将铺设格栅的试件放入模具中进行预热,预热时间为5 min,温度为155 ℃。再将热沥青混合料倒入模具中进行旋转压实,得到包括4 cm厚沥青罩面层和2 cm厚旧路面的试件;对加铺沥青罩面层的试件沿着顶面进行切割,切割方向为垂直于预制裂缝,切割宽度为4 cm;最终得到复合型试件。

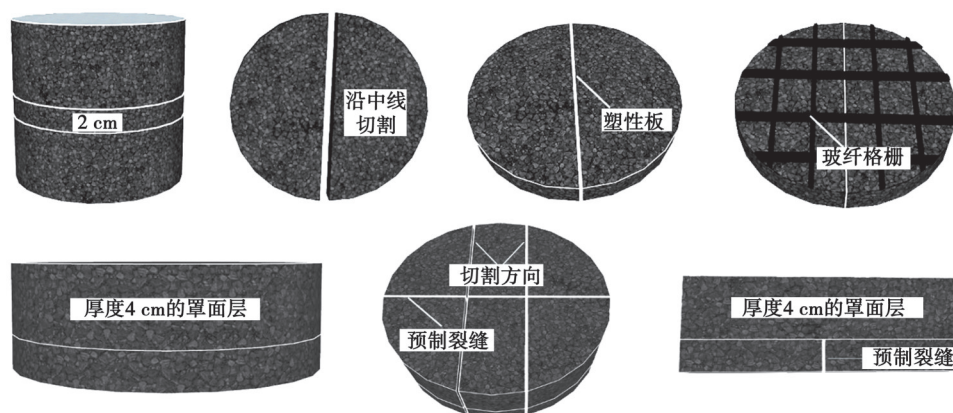


图2 复合型试件制作流程

Fig. 2 Composite specimen preparation process

2.1.2 CSIC试件制作

为减少拉伸不对称导致的复合型试件弯曲^[20]产生的离散性,将2个复合型试件中的旧路面底面相互黏结组成对称型复合试件制成CSIC试件。为防止试验过程中反射裂缝沿玻纤格栅水平方向扩展,复合型试件采

用环氧树脂将沥青罩面层与旧路面及其内部的玻纤格栅黏结在一起。为减少环氧树脂对格栅的加强作用,试件中部裂缝扩展处约 25 mm 范围内不涂抹环氧树脂。为了能使 2 个半圆柱形钢条能够穿过应力集中孔,将黏结好的 CSIC 试件进行打孔,如图 3(a)所示,孔的直径为 2 cm,垂直打穿,确保半圆柱形钢条能恰好穿过;后将定位钉贴好,如图 3(b)所示;最终得到 CSIC 试件示意图如图 3(c)所示。

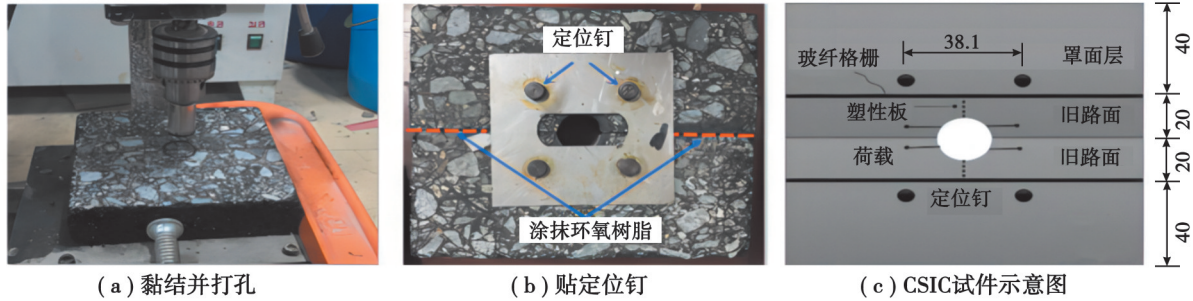


图 3 CSIC 试件制作流程

Fig. 3 CSIC Specimen preparation process

2.2 复合型试件的疲劳试验

2.2.1 不同尺寸玻纤格栅在试件中的布置

3 种玻纤格栅尺寸分别为:格栅-1(25.4 mm×25.4 mm)、格栅-2(12.7 mm×25.4 mm)、格栅-3(12.7 mm×12.7 mm),如图 4 所示。

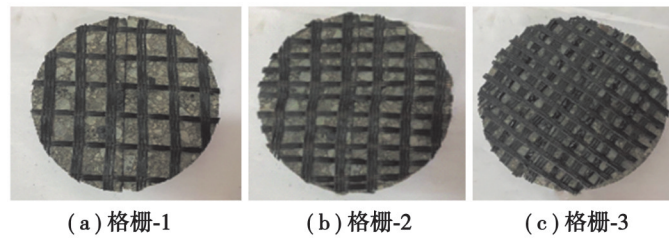


图 4 3 种不同尺寸玻纤格栅铺设示意图

Fig. 4 Schematic diagram of glass fiber grid layouts with three different sizes

2.2.2 试验条件

试验采用的尺寸为 150 mm×40 mm×60 mm(长×宽×高)的棱柱体复合型小梁试件。为验证试验方法的可靠性,需对精密度(重复性)进行评估,精密度的重复性是指几乎相同测试条件(称为重复性条件)所得到数据的一致性。因此,2 组试验各制作 3 个平行试件,3 个试件必须是同一批混合料加工切割制成,保证重复性条件;其次,试验加载前需要在环境箱保温 2 h,试验温度采用 10±0.5 °C;荷载加载方式采用循环半正矢(Haversine)波形加载,加载时间为 0.1 s,间歇时间为 0.9 s,荷载加载模式如图 5 所示。将复合型试件装上夹具,再放在环境箱中控温 2 h,本次疲劳试验温度设定为 10 °C;疲劳试验采用 ust002 软件;循环次数设定为 100 000,假定无限循环,终止条件设为劲度模量减少到初始值的 50%;最后将复合型试件装在 UTM-30 设备上,如图 6 所示。

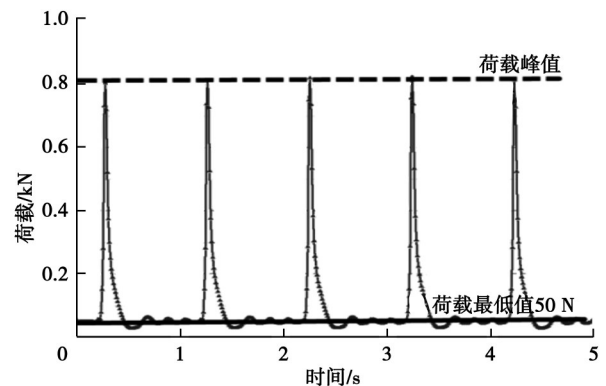


图 5 荷载加载模式

Fig. 5 Fatigue loading mode

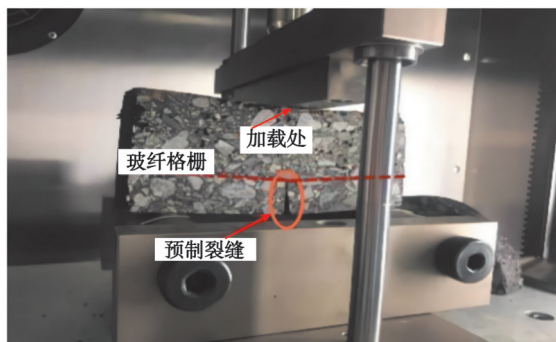


图6 复合型试件的疲劳试验装置图

Fig. 6 Equipment of fatigue test of composite specimen

2.3 CSIC改进型疲劳试验

将制作好的试件装在夹具中,如图7所示,夹具主要由加荷螺栓、调节螺栓、2个半圆柱形加载钢条、2个固位橡胶垫、固定底座构成,加荷螺栓通过和UTM-30主轴相连之后,对试件起到循环拉伸作用,2个固位橡胶垫分别起到了固定CSIC试件上下底部的作用,橡胶垫是确保在试验过程中利用其摩擦力来固定CSIC试件,装好试件之后通过调节螺栓将试件固定,固定底座是确保整个模具能够固定在加载平台上,试验开始之后,由加荷螺栓带动上部半圆柱形钢条做循环加载试验,试验加载装置如图8所示。

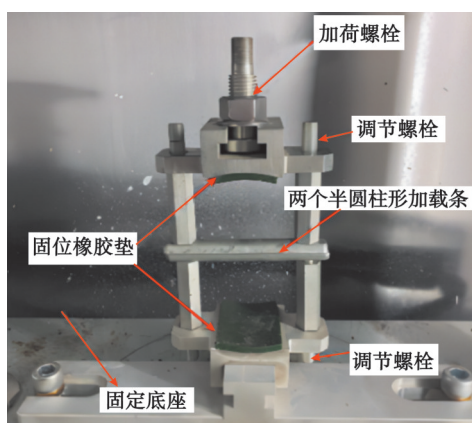


图7 试验夹具

Fig. 7 Test fixture



图8 试验加载装置图

Fig. 8 Test loading device

CSIC改进型疲劳试验与复合型试件疲劳试验区别在于加载荷载方式不一致,复合型试件疲劳试验是以复合型小梁试件加载,荷载加载的位置在于复合型试件顶部;CSIC改进型疲劳试验加载的位置在CSIC试件水平方向,通过加载钢条的反复拉伸,使得裂缝沿着CSIC中2个复合型试件的预制裂缝进行扩展。由于加载方式的不一致,试验对复合型试件层间接触要求很高,必须确保在制作试件时,保证罩面层和旧路面完整的黏合在一起;否则,会造成如图9所示情况,即加载过程中裂缝还未扩展,层间先出现了破坏。其次,荷载加载方式与复合型试件疲劳试验一致,仅荷载峰值改为0.35 kN,由于此次试验是拉伸试验,因此最大值为-0.05 kN,最小值为-0.35 kN。确定参数后,先将CSIC试件在环境箱中控温2 h,再将传感器贴在CSIC试件上等待温度到达10℃开始试验,其他设置同复合型试件疲劳试验一致。

3.1 复合型试件的疲劳试验结果

试件破坏图如图10所示,从图10(a)中可看出,试件破坏后,裂缝贯穿整个试件,试验过程中,随着循环次数增加,裂缝开始阶段扩展较为迅速。此外,裂缝经过预制裂缝并扩展至沥青罩面层4~5 mm后,试件完全

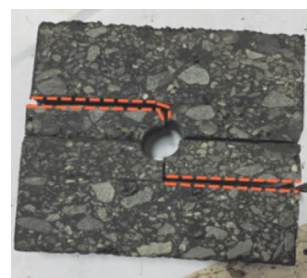


图9 层间破坏图

Fig. 9 Interlayer destruction

发生破坏且裂缝迅速穿过整个试件,不仅说明抗反射裂缝的沥青罩面层厚度只有 4~5 mm,其他厚度对抗反射裂缝效果影响不大,还说明在出现裂缝后,沥青罩面层的破坏迅速,因此,应该侧重于防止裂缝产生或者提高沥青罩面层抗反射裂缝有效厚度等来提高其抗反射裂缝性能。图 10(b)中的裂缝开始扩展之后,由于格栅的作用,裂缝扩展十分缓慢,且裂缝发生破坏时,裂缝基本扩展到顶端加载处,但未完全断开。另外,裂缝扩展至沥青罩面层 7~10 mm 处试件才发生破坏,表明抗反射裂缝沥青罩面层厚度由 4~5 mm 提升到 7~10 mm,抗反射裂缝的有效厚度明显提高。试验结果如表 2 和图 11 所示。

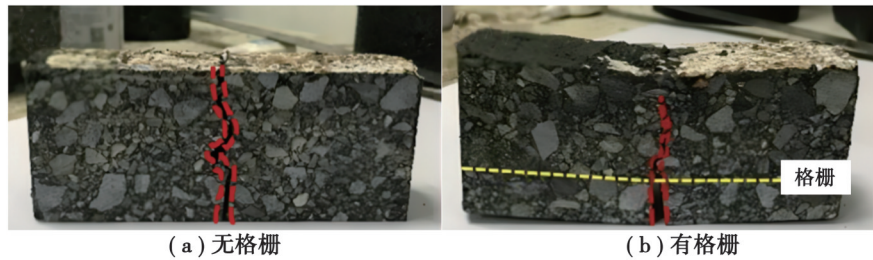


图 10 复合型试件破坏图

Fig. 10 Composite specimen damage mode

表 2 4 种类型复合型试件试验结果

Table 2 Test results of four types of composite specimens

格栅类型	试件编号	荷载循环次/次	均值/次	跨中挠度/mm	均值/mm
无格栅 (控制试件)	1-1	4 159		2.310	
	1-2	3 486	4 072	2.857	2.727
	1-3	4 571		3.013	
格栅-1	2-1	10 845		4.176	
	2-2	7 178	9 053	3.765	4.052
	2-3	9 135		4.215	
格栅-2	3-1	11 257		4.512	
	3-2	14 013	12 716	4.443	4.477
	3-3	12 879		4.475	
格栅-3	4-1	16 785		4.814	
	4-2	21 145	20 359	4.510	4.523
	4-3	23 146		4.245	

由表 2 可知,加入玻纤格栅相比不加玻纤格栅控制试件的疲劳次数均有所提升,表明加入玻纤格栅对沥青罩面层抗反射裂缝性能有一定的提升,这与众多学者的研究结果一致^[19,21-23],该方法可以评价玻纤格栅对反射裂缝的缓解作用。其中,格栅-3、格栅-2、格栅-1 3 种尺寸的复合型试件相对于控制试件分别提升了 122%、212% 和 400%,可以判断出格栅抗反射裂缝性能强弱依次是格栅-3、格栅-2、格栅-1。同时,加入玻纤格栅的复合型试件的跨中挠度也显著提高,说明沥青罩面层抗反射裂缝有效厚度明显提高,由于格栅的作用,消散了应力集中,使得裂缝扩展过程较为缓慢,整体趋势较为平缓;格栅-1 和格栅-2 试件沿着长度方向上的格栅数量

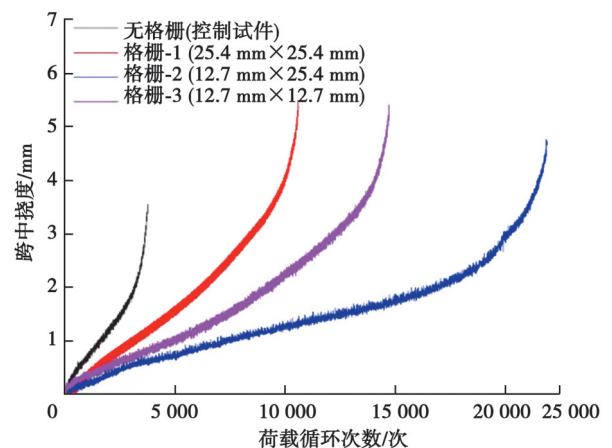


图 11 4 种试件荷载循环次数和跨中挠度关系图

Fig. 11 Relationship between the number of load cycles and the mid-span deflection of the four specimens

都为2根,区别在于试件宽度方向格栅-2数量是格栅-1的2倍,疲劳次数高了4 000次,由此得出,格栅在抗反射裂缝过程中,整体都参与作用,且格栅尺寸越小,层间受力越均匀,应力集中也相应的减小。

由图11可知,控制试件裂缝出现的时间较早,在裂缝出现之后控制试件破坏发生较快,而有格栅的试件出现裂缝时间明显较晚,在裂缝出现之后受到格栅的作用,裂缝向前扩展速度明显减慢,3种尺寸的格栅也有所区别,格栅尺寸越小,裂缝扩展速度越慢,这与表2中得出的结论一致。

此外,离散性大是疲劳试验普遍存在的问题,而试验方法由于试件制备及试验条件的优化,重复性相对较好,离散性也相对较好,但几种试件试验结果离散性提升有限,格栅尺寸为(12.7 mm×12.7 mm)的试件疲劳次数结果相差仍然超过6 000次,其他试件疲劳次数结果也相差较多,可见采用复合型试件进行疲劳试验的离散性虽有一定改善,但改善仍然不足。

3.2 CSIC改进型疲劳试验结果

图12是疲劳试验结果破坏图,图中红圈是较粗的集料,裂缝在扩展过程中,遇到该集料,绕着集料的周围继续扩展直至破坏,不加玻纤格栅与加玻纤格栅试验破坏结果图基本一致,只是破坏过程中,不加玻纤格栅试件的裂缝扩展较快且裂缝形状近似一条直线,加入玻纤格栅试件裂缝扩展很慢,由于受到格栅作用,裂缝形状是弯曲迂回形状。其次,CSIC试件中两边裂缝也基本上是对称扩展,破坏阶段也是同时断裂。

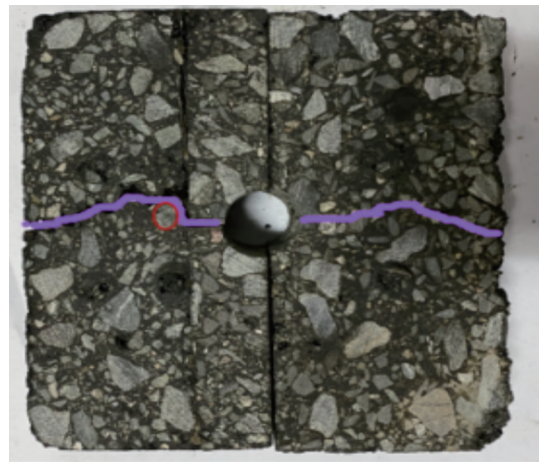
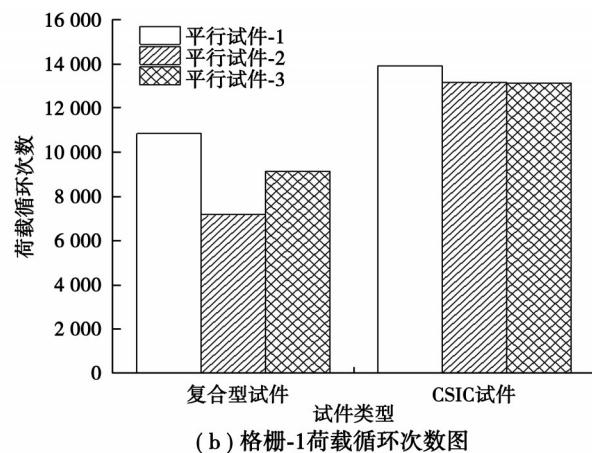
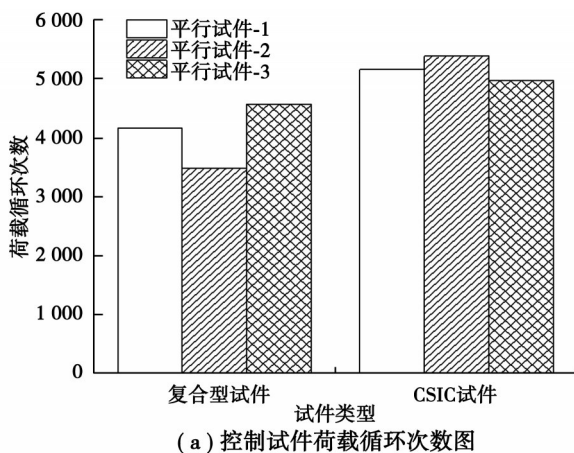


图12 CSIC试件破坏结果图

Fig. 12 CSIC specimen damage mode

图13显示了4种类型复合型试件和CSIC试件3次荷载循环次数。从CSIC试件可以看出,加入玻纤格栅比不加玻纤格栅试件的疲劳次数有了明显的提升,与众多学者的研究结果一致^[19,21-23],验证了CSIC改进型疲劳试验的可行性。其中,格栅-3的抗反射裂缝性能最强,是控制试件荷载循环次数的5倍多,与复合型试件的疲劳试验结果一致。对比复合型试件和CSIC试件的荷载循环次数结果,可以看出使用CSIC试件进行疲劳试验的重复性好、精密度高,可以有效地降低试验结果的离散性,无论是有无格栅或格栅尺寸大小,使用CSIC试件的方法精密度均有明显提升。

因此,使用CSIC试件进行疲劳试验能够有效降低试验结果离散性,解决普通疲劳试验结果离散性大的问题。



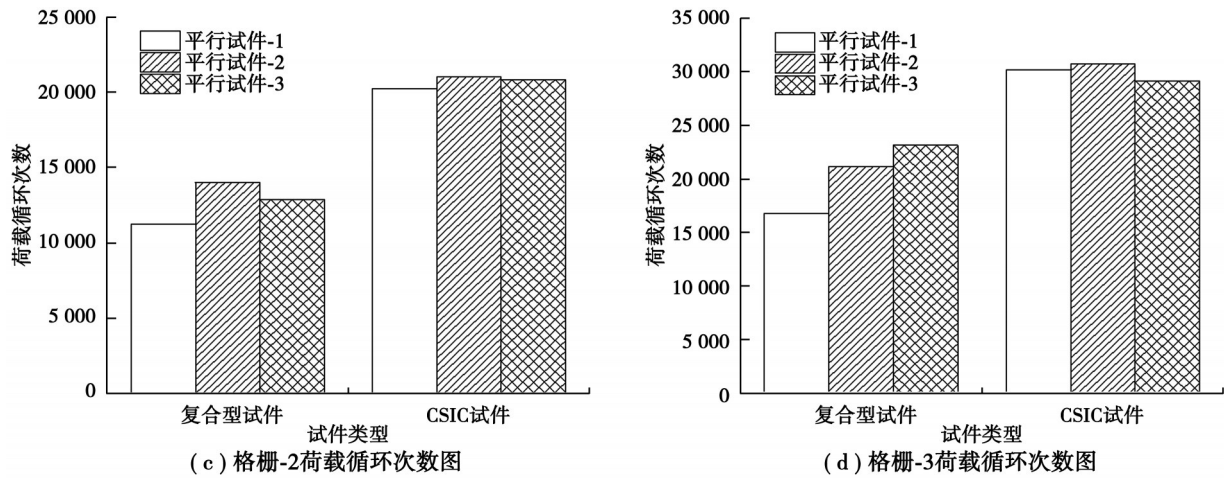


图 13 4 种类型复合型试件和 CSIC 试件荷载循环次数关系图

Fig. 13 Relationship of load cycle times of four types of composite specimens and CSIC specimens

4 沥青罩面层开裂的有限元数值模拟

4.1 扩展有限元(XFEM)理论

扩展有限元是在常规有限元框架内求解不连续问题的数值方法,以单位分解思想为基础,在位移模式中加入能够模拟裂缝界面的跳跃函数和裂缝渐近位移场函数^[24-25]。扩展有限元(XFEM)是研究初始裂缝任意扩展路径的研究,适用于三维实体模型。因此,文中使用 ABAQUS 建立 XFEM 模型来模拟反射裂缝的扩展。

4.2 XFEM 模型建立

建立有限元模型,包括 40 cm 的罩面层、20 cm 的旧路面、玻纤格栅以及预制裂缝。其中,材料物理计算参数如表 3 所示,罩面层和旧路面采用 Maxps 损伤准则;其次,选择最大主应力准则判断材料的损伤效果。

表 3 试件材料物理计算参数

Table 3 Physical properties for test materials

结构层	弹性模量/MPa	泊松比	c_1	c_2	c_3	c_4	极限断裂能释放率
罩面层	1 500	0.3	—	—	—	—	—
玻纤格栅	4 000	0.25	6 800	0.689	5.54×10^7	0.497 4	1 800
旧路面	1 500	0.3	—	—	—	—	—

玻纤格栅采用 3D 杆 Truss 单元来模拟,将玻纤格栅嵌入到罩面层,罩面层作为主区,尺寸分别是 25.4 mm × 25.4 mm, 25.4 mm × 12.7 mm, 12.7 mm × 12.7 mm。装配完部件后需要进行网格划分,类型为 C3D8R。XFEM 裂缝扩展初始位置是已经设定好的预制裂缝处,产生条件由最大主应力来定义。为了更好地模拟实际试验过程,消除层间问题,将罩面层作为主面,旧路面作为从面,均为黏弹性材料,接触类型为面与面接触。交通荷载采用和试验部分加载方式一致的 1 个周期型半正弦波形的循环荷载。

4.3 有限元计算结果及分析

4.3.1 格栅尺寸对反射裂缝的抑制作用

在前文评价反射裂缝试验中,研究了几种不同格栅网眼尺寸对复合型试件抗反射裂缝性能的影响,这里采用有限元分析格栅网眼尺寸对反射裂缝抑制效果。图 14 为建立的三维有限元模型。

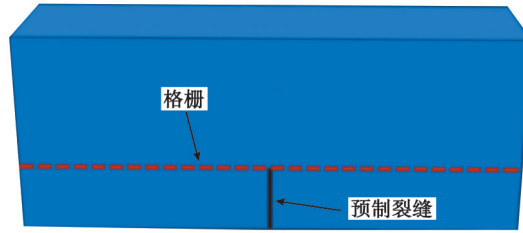


图14 三维有限元结构计算模型

Fig. 14 Three-dimensional finite element structure calculation model

采用疲劳次数为自变量,裂缝长度为因变量,以此评价格栅尺寸对抗反射裂缝效果的影响,结果如图15所示。在有限元模拟中,试件的破坏是一个完整的过程,但是无法实时监测疲劳次数和裂缝长度关系,因此,分别设定疲劳次数为2 000、5 000、10 000、15 000、20 000时的裂缝长度,进行比较,裂缝长度达到60时,说明试件已经完全发生破坏。在图15中,能够明显看出疲劳次数一致时,裂缝扩展长度从大到小依次是无格栅、格栅-1、格栅-2、格栅-3,说明加入格栅能有效抑制裂缝扩展,并且格栅尺寸越小,裂缝扩展长度越短,即抗反射裂缝效果越好,这与室内试验结果所得出的结论一致。

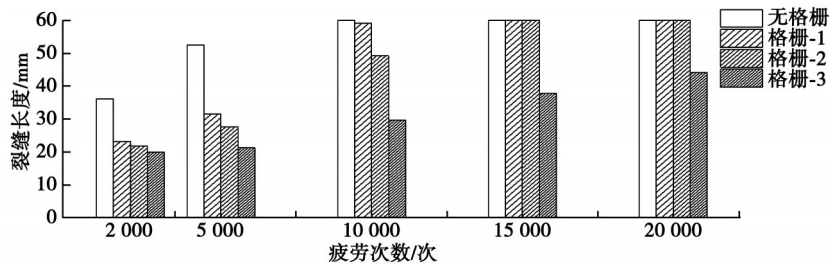


图15 疲劳次数和裂缝长度关系柱状图

Fig. 15 Relationship between fatigue life and crack length

4.3.2 有限元模拟结果的试验验证

通过现有确定的模型参数以及损伤临界值,利用建立好的有限元模型对不同类型的复合型试件进行疲劳试验模拟计算,计算结果和室内试验结果对比如表4所示,其中计算结果为有限元模拟计算出的疲劳次数,试验结果为室内试验测量出的荷载循环次数均值。

表4 疲劳次数结果验证

Table 4 Verification of fatigue results

试件类型	试验结果/次	计算结果/次	相对误差/%
控制试件	4 072	5 126	20.56
格栅-1	9 053	12 452	27.29
格栅-2	12 716	16 452	22.71
格栅-3	20 359	27 421	25.75

通过两者的比较,相对误差均在20%~30%,能够看出疲劳次数计算结果与试验结果具有一定的一致性,特别是在不加入玻纤格栅的时候。考虑到疲劳试验自身的变异性,这个误差符合预期效果。因此,通过复合型试件的有限元模拟来评价抗反射裂缝效果具有可行性。

5 结 论

1)文中开发的复合型试件疲劳试验和CSIC改进型疲劳试验结果均能够有效说明格栅抗反射裂缝效果较为明显,与真实规律一致,这是2种评价抗反射裂缝性能的有效新方法。

2)复合型试件与CSIC试件均为小尺寸试件,且2种方法的试验结果相对于普通试件离散性均有所降低,其中基于复合型试件改进得到的CSIC试件能够进一步降低疲劳试验结果的离散性,增加试验的可靠度,推荐评价抗反射裂缝性能时,采用文中开发的CSIC改进型疲劳试验以大幅度降低试验结果的离散性。

3)格栅在抗反射裂缝过程中,整体都参与作用,且格栅尺寸越小,层间受力越均匀,应力集中也相应的减小,抗反射裂缝效果越好,通过有限元数值模拟得到与室内试验相同的结论,表明能够通过有限元模拟进行抗反射裂缝效果的评价。

参考文献

- [1] 韩文珍. 高速公路沥青路面大修养护关键技术研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(12): 112-113.
Han W Z. Research on key technologies of overhaul and maintenance of expressway asphalt pavement[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(12): 112-113.(in Chinese)
- [2] 周志刚. 交通荷载下沥青类路面疲劳损伤开裂研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
Zhou Z G. A research on the fatigue damage cracking in asphalt pavement under traffic load[D]. Changsha: Central South University, 2003. (in Chinese)
- [3] Deilami S, White G. Review of reflective cracking in composite pavements[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2020, 13(5): 524-535.
- [4] 杨婉怡. 旧水泥混凝土道面沥青罩面改造的病害及处置技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
Yang W Y. Research on disease and treatment of the asphalt surface reconstruction of old cement concrete pavement[D]. Xi'an: Changan University, 2015. (in Chinese)
- [5] 吴嘉华. 浅谈玻璃纤维格栅、聚酯玻纤土工织物对路面反射裂缝的作用[J]. 科学技术创新, 2019(22): 121-122.
Wu J H. Talking about the effect of glass fiber grating and polyester fiberglass geotextile on reflective cracks in pavement [J]. Scientific and technological innovation, 2019(22): 121-122. (in Chinese)
- [6] Nejad F M, Asadi S, Fallah S, et al. Statistical-experimental study of geosynthetics performance on reflection cracking phenomenon[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(2): 178-187.
- [7] Von Q, Mallela J, Lytton R. Techniques for mitigation of reflective cracks[C]// FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, 2010: P10067.
- [8] Hou F J, Li T, Li X, et al. Research on the anti-reflective cracking performance of a full-depth asphalt pavement[J]. Sustainability, 2021, 13(17): 9499.
- [9] 羊明, 彭夔. 沥青混凝土罩面层反射裂缝产生机理与防治措施[J]. 公路交通技术, 2012, 28(5): 41-44.
Yang M, Peng K. Mechanism of production of reflection cracks in asphalt concrete overlay and treatment measures[J]. Technology of Highway and Transport, 2012, 28(5): 41-44.(in Chinese)
- [10] Liang H, Song X J, Jiang F, et al. The application of grouting sealing material in the treatment of pavement reflective cracking [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1637(1): 012020.
- [11] Chowdhury A, Button J W, Lytton R L. Tests of HMA overlays using geosynthetics to reduce reflection cracking[J]. Transportation Research Record, 2009.
- [12] Idris I I, Sadek H, Hassan M. State-of-the-art review of the evaluation of asphalt mixtures' resistance to reflective cracking in laboratory[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(9): 03120004.
- [13] Khodaii A, Fallah S, Moghadas Nejad F. Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(1): 1-8.
- [14] 廖卫东. 基于应力吸收层的旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构与材料研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
Liao W D. Research on materials and structure of asphalt overlay on old cement concrete pavement based on stress absorption interlayer[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)

- [15] 付其林, 魏建国, 王力扬. 基于MMLS3设备的OLSM抗反射裂缝性能研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 133-143.
Fu Q L, Wei J G, Wang L Y. Research on anti-reflective cracking performance of open-graded large stone asphalt mixes based on MMLS3[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(8): 133-143.(in Chinese)
- [16] 甘伟. 玻纤格栅在公路路面施工中的应用研究 [J]. 低碳世界, 2020, 10(3): 180-181.
Gan W. Research on the application of fiberglass grating in highway pavement construction [J]. Low Carbon World, 2020, 10(3): 180-181. (in Chinese)
- [17] 张晶, 付伟, 何斌, 等. 半刚性基层沥青路面防裂基布防裂效果现场试验研究[J]. 公路, 2018, 63(12): 48-52.
Zhang J, Fu W, He B, et al. Field test and research on the effects of anti-breaking geotextile on Semi-rigid base asphalt pavement [J]. Highway, 2018, 63(12): 48-52.(in Chinese)
- [18] 杨小康. 玻纤格栅防治沥青路面反射裂缝的机理与力学响应分析 [J]. 交通世界, 2020(23): 27-28, 31.
Yang X K. Mechanism and mechanical response analysis of fiberglass grating in preventing reflection cracks in asphalt pavement [J]. Traffic World, 2020(23): 27-28,31. (in Chinese)
- [19] 张胜坤. 玻纤土工格栅提高沥青路面耐久性机理及应用技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
Zhang S K. Study on mechanism of durability and application technology on asphalt concrete pavement improved by fiberglass grids[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016. (in Chinese)
- [20] Jones R M. Mechanics of composite materials [M]. Taylor and Francis;CRC Press.
- [21] 孙文圃, 白雨瓚, 张洪亮. 交通荷载作用下玻纤格栅对反射裂缝扩展的影响 [J]. 公路与汽运, 2019(6): 83-87.
Sun W P, Bai Y Z, Zhang H L. Influence of fiberglass grating on reflection crack propagation under traffic load [J]. Highway and Automobile Transportation, 2019(6): 83-87. (in Chinese)
- [22] 谭玲, 向云桂. 玻纤土工格栅在防治沥青路面反射裂缝中的试验研究 [J]. 公路, 2016, 61(11): 53-57.
Tan L, Xiang Y G. Experimental study on fiberglass geogrid in preventing and controlling reflection cracks in asphalt pavement [J]. Highway, 2016, 61(11): 53-57. (in Chinese)
- [23] 陈奕帆. 水泥混凝土路面沥青加铺罩面层反射裂缝的防治[J]. 公路, 2007, 52(5): 180-184.
Chen Y F. Prevention and treatment for reflection cracks in asphalt overlay of cement concrete pavement[J]. Highway, 2007, 52(5): 180-184.(in Chinese)
- [24] 方俊. 基于扩展有限元的沥青路面半刚性基层反射裂缝扩展模拟分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
Fang J. Numerical analysis of reflection cracks propagation in semi-rigid base of asphalt pavement by XFEM[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [25] 沈庆. 基于XFEM的半刚性基层沥青路面反射裂缝疲劳扩展研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Shen Q. Research on reflective crack fatigue propagation of asphalt pavements with semi rigid base course based on XFEM [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)