

# 基于 MMLS3 设备的土工布防治反射裂缝效果研究

钱劲松<sup>1</sup>, 陈欣然<sup>1</sup>, 郑毅<sup>2</sup>, 付伟<sup>3</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088;  
3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:** 应用 MMLS3 设备对 1/3 比例路面结构模型进行加速加载试验, 模拟车辆荷载造成的弯拉-剪切复合作用, 并进行应变和裂缝扩展情况的跟踪监测, 研究在面层和基层间铺设土工布防治反射裂缝的效果。结果表明: 有布组在面层初裂和裂缝贯穿时所对应的加载次数分别为无布组的 3.55 倍和 3.25 倍。初裂前, 土工布由于削弱层间黏结, 使面层总应变和弹性应变大于无布组, 但可通过提高与沥青层结合后的复合断裂能延缓面层开裂; 初裂后, 土工布逐渐拉伸而承受更大拉伸力, 协助面层抵抗弯拉和剪切作用, 使得有布组总应变、弹性应变逐渐减小; 贯穿后, 土工布仍可保持裂缝两侧结构的联结, 抑制裂缝加宽和结构错动, 使得总应变和弹性应变稳定在  $180 \times 10^{-6}$  和  $9 \times 10^{-6}$ , 而无布组由于裂缝继续加宽, 总应变和弹性应变超过  $600 \times 10^{-6}$  和  $8 \times 10^{-6}$  并持续增长。

**关键词:** 道路工程; 反射裂缝; 加速加载试验; 土工布; 半刚性基层

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

## MMLS3-Based Research on Anti-Reflective Cracking Performance of Geotextile

QIAN Jinsong<sup>1</sup>, CHEN Xinran<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>2</sup>, FU Wei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. CCCC Highway Consultants Co. Ltd., Beijing 100088, China; 3. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056, China)

**Abstract:** An accelerated pavement test using 1/3 model mobile load simulator (MMLS3) on a 1/3 proportional pavement structure model has been conducted to study the anti-reflective cracking performance of geotextile under the combination of tensile and shear effect due to traffic load. The strain and crack propagation has been monitored during the test. Results show that: for geotextile group, the load cycles of crack initiation and penetration are 3.55 and 3.25 times as much as non-geotextile group, respectively. The total strain

and elastic strain of geotextile group are higher than non-geotextile group before crack initiation because of the reduction of interlayer adhesion. However, geotextile can help retard crack initiation by increasing the composite fracture energy combined with surface layer; after cracking, geotextile assists surface layer to endure the tensile and shear effect under traffic load with its increasing tensile deformation and tensile resistance, so the total strain and elastic strain of geotextile group decrease; after crack penetration, geotextile suppresses the horizontal propagation of the crack and the vertical displacement of the pavement structure by maintaining the connection of structure across the crack. Therefore, the total strain and elastic strain of geotextile group remain stable at  $180 \times 10^{-6}$  and  $9 \times 10^{-6}$  respectively. By contrast, the total strain and elastic strain of non-geotextile group exceed  $600 \times 10^{-6}$  and  $8 \times 10^{-6}$  respectively and continue to grow with the expansion of crack.

**Key words:** highway engineering; reflective cracking; accelerated pavement test; geotextile; semi-rigid base layer

半刚性基层沥青路面的反射裂缝防治(后文简称防反)问题一直是困扰工程界的一大难题。在沥青面层和水稳基层间铺设土工布是一种经济而实用的防治方法<sup>[1]</sup>。造成反射裂缝的原因主要为车辆荷载和温度变化<sup>[2-3]</sup>, 车辆荷载对沥青层造成弯拉和剪切作用, 而温度变化主要引起张拉作用。根据国内外研究的结论, 土工布对于防治张拉型反射裂缝效果良好<sup>[4-5]</sup>, 但对于防治剪切型反射裂缝的效果, 研究者们尚未达成共识<sup>[6-7]</sup>。胡长顺<sup>[6]</sup>通过足尺疲劳试验, 认为土工布虽然无法阻止剪切型反射裂缝的产生, 但可延缓其扩展; 李淑明<sup>[7]</sup>通过有限元模拟分析, 认为铺设土工布并未降低沥青层最大剪应力, 因此对延缓剪切型反射裂缝作用不大。

收稿日期: 2017-12-05

基金项目: 西藏自治区交通科技项目(XZJTKJ[2015]01); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120170129)

第一作者: 钱劲松(1980—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: qianjs@tongji.edu.cn

国内外对土工布防反问题的试验研究中,模拟车辆荷载的占大多数. 这些研究通常采用固定点竖向加载单独模拟车辆荷载的弯拉或剪切作用<sup>[8-10]</sup>,或采用车轮在较短的距离往复滚动加载模拟移动荷载对路面结构的影响<sup>[11]</sup>. 然而,这两种加载方式相对于道路的实际情况均存在不足之处. 前者无法同时模拟车轮滚动引起的弯拉-剪切作用,后者在加载距离上受到小型加载仪器限制,且往复加载模式与实际道路中车辆单向行驶不一致. 南非开发的 MMLS3 (1/3 model mobile load simulator) 加速加载设备<sup>[12]</sup>使用单方向的滚动车轮模拟车辆荷载弯拉-剪切共同作用,加载长度为 130cm,可避免上述两种方法的不足之处,并可模拟车辆荷载重复作用下水平力对路面的推移作用及车辙的产生过程. Pirmohammad<sup>[13]</sup>指出,弯拉-剪切共同作用将显著加速路面的开裂,故研究土工布在此情况下的抗裂效果更具实际意义.

为此,本文使用 MMLS3 进行室内疲劳试验,模拟单向移动荷载的重复作用,以研究车辆荷载弯拉、剪切共同作用下土工布防治反射裂缝的效果,并对使用 MMLS3 研究反射裂缝问题的可行性和有效性进行判定.

## 1 试验方法

### 1.1 路面结构模型设计

试验结构模型基于拉萨至工布江达段高速公路实际情况进行设计,其路面结构组合如表 1 所示. MMLS3 试验轮胎的直径为 300 mm、宽度为 80 mm,约为标准轮胎尺寸的 1/3. 其最大轮压为 2.7 MPa,相当于标准轴载 BZZ-100 的 1/9. 苏志翔<sup>[14]</sup>通过理论分析和有限元模拟指出,为保证试验模型与实际路面具有相似的材料和力学性能,必须保持试验模型的材料与实际相同,且厚度缩放为实际路面结构的 1/3. 在这一缩放比例下,试验模型在最大轮压作用下面层层底拉应力、拉应变与实际路面在标准轴载 BZZ-100 作用下的对应值相同.

为使缩减厚度后的结构模型容易制作,将原道路上、中、下面层合为一个结构层考虑,参照实际道路选用 90 号基质沥青,油石比 4%. 级配依照下面层选择 AC25. 沥青面层平面尺寸的确定需考虑 MMLS3 实际加载区域大小、裂缝观测和传感器布设的需求,基层则需要考虑与试槽固定的需要以及面层施工的便利性. 为允许基层在加载过程中的竖

向位移和错动,以模拟车辆荷载弯拉-剪切作用下路面结构的变形,在路面结构下方设置土基,尺寸与试槽一致. 各结构层尺寸见表 1 及图 1.

表 1 原路面及试验模型尺寸

**Tab.1 Dimensions of real road and test model**

结构层	厚度/cm	类型	模型尺寸/cm		
			长	宽	高
上面层	4	AC13			
中面层	6	AC20	160	15	5
下面层	7	AC25			
基层	20	4.5%水稳碎石	180	73	7
土基	—	—	300	93	28

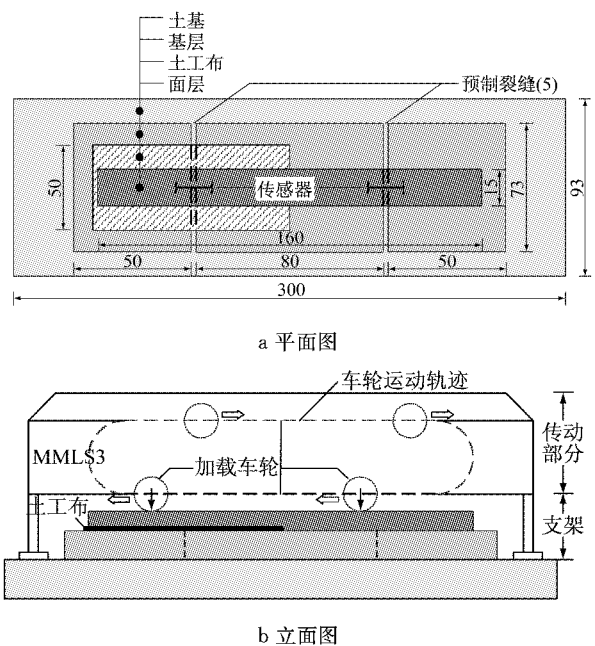


图 1 试验结构模型(单位:cm)

Fig.1 Scheme of test model (Unit: cm)

试验土工布为聚丙烯无纺布 ( $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ). 在浸润乳化沥青后,进行宽条拉伸试验,测得其纵向拉伸性能见表 2.

为使裂缝在指定位置开裂以便观测和数据采集,对基层进行预锯缝处理. 有布组和无布组各设置一条预制裂缝,宽度按国内外研究经验<sup>[8-10]</sup>取 0.5 cm,切割后 3 块基层长度为 50 cm、80 cm 和 50 cm.

表 2 土工布力学性能

**Tab.2 Mechanical properties of geotextile**

伸长率/%	拉伸力/kN	拉伸强度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	最大负荷下的伸长率/%
2	1.93		
5	3.22	13.54	59
10	4.96		

为观测裂缝处拉应变,在面层内靠近层底位置跨缝埋设光纤光栅应变传感器,有布组和无布组各

一个,方向垂直于预制裂缝,如图 1a 所示. 传感器测量值与面层层底应变的关系如图 2 所示. 面层开裂前,传感器测量值  $S_1$  与沥青层自身应变  $E_1$  相等,面层开裂后,传感器测量值  $S_2$  为沥青层自身应变  $E_2$  与反射裂缝在该位置的张开宽度  $\Delta S$  之和. 出于反射裂缝发展各阶段对比分析的便利性,后文对面层开裂前后的传感器测量值统称为总应变.

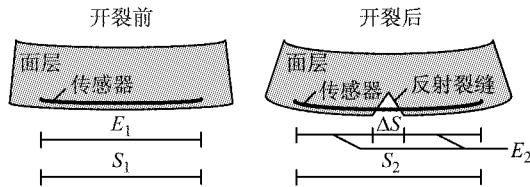


图 2 传感器测量值与实际应变关系

Fig. 2 Relation between real strain and sensor measurements

## 1.2 路面结构模型制作与加载

依次制作土基和基层并养生完成后,在基层上锯切预制裂缝. 对预制裂缝和基层四周进行临时约束,以免施工过程中发生位移. 基层布置完成后,对有布组,在基层顶面洒布  $1.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  的乳化沥青,在其上方铺设土工布,再在土工布表面洒布  $1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  乳化沥青黏层油和石屑. 对无布组,直接洒布  $1.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  的乳化沥青. 在摊铺沥青面层同时埋设传感器,摊铺完成后用小型压路机压实.

面层养生后,脱模并撤去基层临时约束,将 MMLS3 架设在路面结构模型上. 将支架与试槽固定并调平仪器后,调节仪器高度以使加载车轮的轮压达到预设值. 在裂缝上方的面层侧面涂抹石灰,以便肉眼观察裂缝开展情况. 架设完成后如图 1b 所示.

启动 MMLS3 开始加载,通过传动装置使装有 4 个车轮的环形轨道转动,从而对试验模型进行单向等间隔的加载,加载速度为  $3600 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$  (1Hz). 其模拟车辆荷载弯拉-剪切作用的原理如图 3 所示. 当车轮位于预锯缝一侧时,对路面结构施加剪切作用,当车轮位于预锯缝正上方时,施加弯拉作用. 车轮驶过预锯缝后,再次施加剪切作用.

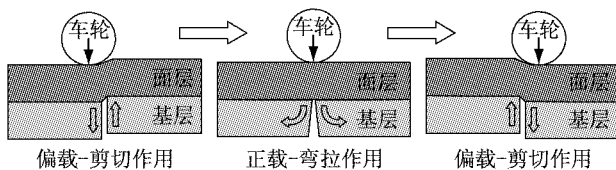


图 3 车辆荷载弯拉-剪切作用示意

Fig. 3 Scheme of tensile-shear effect of traffic loading

试验共进行了 54 万次加载,其中前 33 万次为不间断加载,期间两试验组反射裂缝均贯穿面层. 在此之后,由于面层产生了较明显的车辙,导致 MMLS3 加载车轮对路面结构的压力降低,因此,调低加载车轮,观察裂缝形态的进一步变化. 加载至 54 万次时,裂缝形态已趋于稳定,试验结束. 试验全过程中拍照记录面层侧面裂缝发展状况.

## 2 面层层底应变分析

加载 33 万次之后,传感器因经历大量重复加载而损坏,故仅对前 33 万次加载的应变数据进行分析.

传感器记录的面层层底总应变如图 4 所示. 图中黑色圆点为反射裂缝初裂及贯穿面层时对应的总应变. 计算每次加载产生的应变波形内波峰波谷的差值,即弹性应变,绘制如图 5,考察重复加载过程中面层层底应变的波动情况. 反射裂缝初裂及贯穿所对应的加载次数由肉眼观测和应变数据共同判断. 根据反射裂缝的发展阶段,具体分析如下.

### 2.1 面层开裂前

面层开裂前,两试验组的总应变和弹性应变均随加载过程逐渐增加,有布组的总应变和弹性应变均大于无布组. 这是由于此阶段结构变形较小,土工布尚未产生足够的拉伸变形以协助面层承受拉力,而铺设土工布将削弱面层与基层的层间黏结<sup>[15-16]</sup>,导致总应变、弹性应变均较大.

### 2.2 面层初裂

无布组和有布组依次在加载 0.9 万次和 3.2 万次时出现开裂,如图 4a 和 5a 所示. 有布组在面层初裂时的加载次数为无布组 3.55 倍,且初裂时的总应变和弹性应变均大于无布组.

根据刘燕燕<sup>[17]</sup>、张海伟<sup>[18]</sup>的研究,在基层和面层间铺设抗裂夹层后的复合结构具有更大的断裂能. 本试验在外荷载相同的情况下,有布组初裂时的总应变大于无布组,则对应的断裂能也更大. 因此,铺设土工布虽然会增加沥青层底拉应变,但仍可起到延缓面层开裂的作用.

### 2.3 反射裂缝扩展

反射裂缝初裂后,两试验组总应变增长速度均高于初裂前,其中无布组较有布组增速更快,总应变超过有布组并逐渐拉大差距. 这是由于无布组在开裂后结构整体强度逐渐下降,每次加载之下的变形和裂缝扩展越来越大;而有布组在面层层底出现裂

缝后,土工布通过自身拉伸变形协助面层受力的作用逐渐得以体现<sup>[19]</sup>,使得变形量增速较无布组有所减小,延缓了裂缝的扩展。

两试验组的弹性应变自开裂之后均经历了先减小后增大的过程,区别在于无布组稍有减小后很快增大并超过开裂时的弹性应变值,而有布组下降后长时间维持在较低水平,直到反射裂缝接近贯穿时

才重新开始增大,且始终小于初裂时的对应值。Sangpetgnam<sup>[20]</sup>指出,裂缝的扩展是应变能逐渐积累的过程,应变能随着重复加载累计至某阈值时,裂缝即扩展一定长度,并在新的裂缝尖端再次随加载累计能量。因此,试验过程中弹性应变会随裂缝扩展出现数次波动。

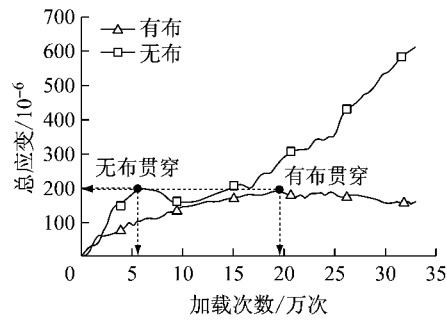
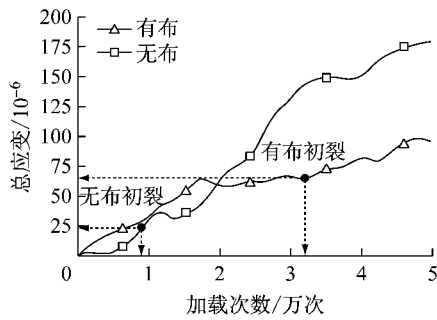


图 4 总应变对比

Fig.4 Comparison of total strain

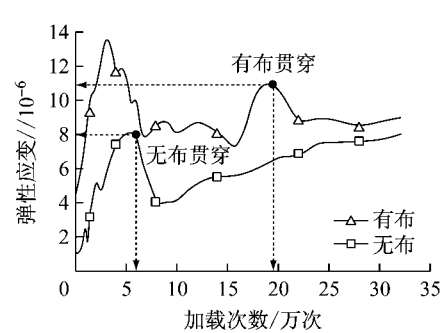
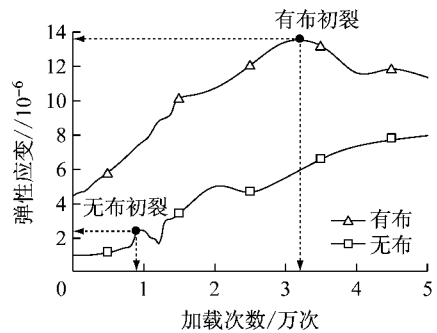


图 5 弹性应变对比

Fig.5 Comparison of elastic strain

反射裂缝在面层内扩展时的结构受力状况可分为以下几个阶段:反射裂缝刚刚初裂时如图 6a 所示,由于面层底面不再连续,裂缝两侧沥青层受力减小,因而其弹性变形量  $L_1$  和  $L_3$  减小;而反射裂缝刚刚开裂,裂缝宽度  $L_2$  很小,在荷载作用下的开合不明显。因此,初裂后两试验组弹性应变均减小。

随着裂缝的继续扩展,无布组和有布组的应力传递范围如图 6b 和图 6c 所示,由于无布组仅由裂缝尖端区域受力,剪切效应造成的裂缝两侧竖向错动越来越大<sup>[6]</sup>,因而弹性应变很快增大并超过初裂时的对应值。有布组除裂缝尖端受力外,土工布仍保持着裂缝两侧面层底面的联结,将应力传递到两侧的面层,并抑制剪切作用造成的错动。此外,由表 2 可知,土工布拉伸变形越大,可承受的拉力就越大,因而对错动的抑制作用越来越强,使得有布组

弹性应变持续减小。

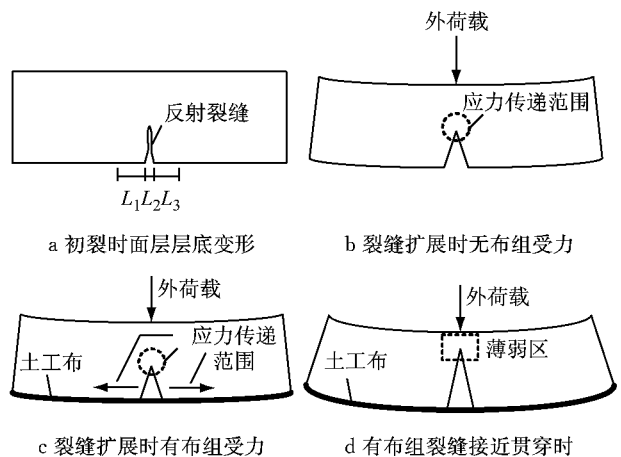


图 6 初裂后面层受力

Fig.6 Force diagram of surface layer after cracking

在反射裂缝接近贯穿面层时,有布组的受力情况如图 6d 所示,裂缝上方的面层未开裂区域逐渐减小而形成薄弱区,因而对车辆荷载剪切效应下竖向错动的抵抗能力变弱,使得有布组的弹性应变再次增大。

#### 2.4 裂缝贯穿

无布组和有布组的反射裂缝依次在加载 6 万次和 19.5 万次时贯穿面层,有布组在反射裂缝贯穿时的加载次数为无布组的 3.25 倍,如图 4b 和图 5b 所示。裂缝贯穿时,两试验组的总应变值基本相当,均为  $200 \times 10^{-6}$  左右。有布组的弹性应变为  $11 \times 10^{-6}$ ,仍大于无布组的  $8 \times 10^{-6}$ 。此时,两试验组的总应变和弹性应变均达到峰值。

分析可知,土工布通过协助面层受拉,显著延缓了反射裂缝的贯穿。总应变值相当,说明两试验组的裂缝贯穿时,在面层层底位置的裂缝张开宽度相近。有布组弹性应变仍较大的原因与开裂阶段相同。

#### 2.5 裂缝贯穿后

反射裂缝贯穿后,两试验组的总应变和弹性应变均经历了一段减小期。在此之后,无布组总应变和弹性应变开始继续增长,超过  $600 \times 10^{-6}$  和  $8 \times 10^{-6}$  且无收敛趋势;而有布组的总应变和弹性应变基本稳定在  $180 \times 10^{-6}$  与  $9 \times 10^{-6}$ 。

两试验组总应变、弹性应变减小的原因主要有以下两点:① 反射裂缝贯穿后,裂缝两侧的面层相互分离,传感器位置几乎不受弯拉作用,仅存在剪切作用;② 随着加载的进行,沥青层车辙逐渐加深,使得外荷载较裂缝贯穿之前有所减小。

继续加载之下,无布组由于裂缝两侧的面层已经分离,在车辆荷载剪切作用下的竖向错动和水平力作用下的纵向推移越来越强,裂缝宽度进一步增加,因而总应变和弹性应变均增大。由表 2 可知,土工布可承受较大的拉伸变形。试验中土工布在裂缝贯穿后的伸长率远小于其最大负荷下的伸长率,因而有布组裂缝两侧的面层仍由土工布维持联结,并

承受车辆荷载造成的弯拉和剪切作用,使总应变和弹性应变趋于稳定。

### 3 裂缝开展状况分析

图 7 为反射裂缝在沥青面层内竖向扩展长度对比图。由图可见,裂缝竖向扩展长度随加载次数不断增长,但其扩展速度存在与应变类似的波动。与无布组相比,土工布显著延缓了裂缝竖向扩展速度,且其效果随裂缝扩展长度的增加而愈加明显。

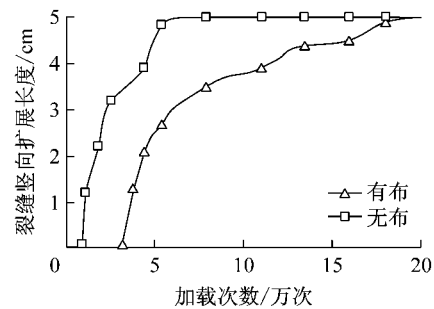
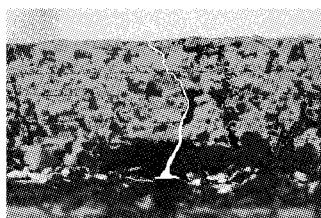


图 7 裂缝竖向扩展长度对比

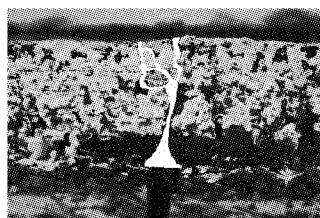
Fig. 7 Comparison of vertical crack lengths

图 8 和图 9 分别为无布组、有布组在加载不同阶段的裂缝开展状况图,其中反射裂缝用白色标出。由于两试验组的裂缝在贯穿面层前宽度均较小,且随加载过程变化不大,因此从两试验组裂缝贯穿后开始分析。

可以看出,反射裂缝贯穿面层时(图 8a、图 9a),有布组和无布组的裂缝宽度均较小。当加载继续进行至 33 万次时(图 8b、9b),无布组裂缝宽度显著增大,且在主裂缝加宽同时,裂缝上部产生多条较细的裂缝,在不同位置延伸到面层顶面,面层侧面呈龟裂倾向,面层顶面也因裂缝的扩展和裂缝两侧路面结构的竖向错动带来的剪切效应变得不再水平。与之相比,有布组裂缝宽度变化较小,面层侧面仍具有较好的整体性;除一条主裂缝外,其他位置微裂缝很少。继续加载至 54 万次时(图 8c、图 9c),无布组裂缝宽度增长较大,面层几乎完全断开;而有



a 6 万次



b 33 万次



c 54 万次

图 8 无布组裂缝横向扩展

Fig. 8 Horizontal propagation of crack without geotextile

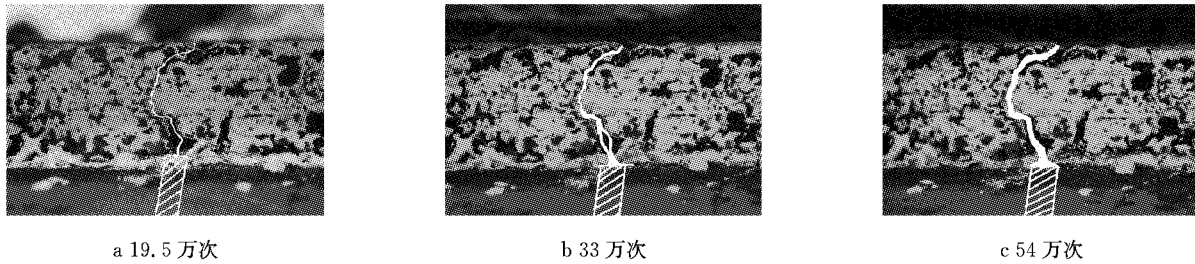


图 9 有布组裂缝横向扩展

Fig.9 Horizontal propagation of crack with geotextile

布组裂缝宽度及面层整体性较加载 33 万次时均变化不大。

从裂缝宽度的变化可以看出,由于土工布仍保持着两侧结构的联结,对裂缝的横向扩展起到了显著的抑制作用,使结构呈现“裂而不断”的状态,有利于延长路面结构的使用寿命。而无布组则会因为裂缝贯穿后面层两侧分离,导致裂缝在车辆荷载造成的剪切错动和水平推移作用下逐渐加宽,加速路面结构的破坏。

## 4 结 论

运用 MMLS3 设备对路面结构模型进行了加速加载试验,对比了有无土工布路面结构的抗裂性能,得到以下结论:

(1) 运用 MMLS3 设备进行加速加载试验可以较为全面的模拟实际路面车辆荷载造成的弯拉-剪切复合作用,以及重复加载过程中的水平推移作用和车辙形成过程,并可研究土工布在此情况下防治反射裂缝的效果。

(2) 铺设土工布可以显著延缓张拉-剪切复合型反射裂缝的初裂和贯穿。试验中,有布组在反射裂缝初裂时的加载次数为无布组 3.55 倍,在反射裂缝贯穿时的加载次数为无布组的 3.25 倍。

(3) 在加载初期,有布组面层层底总应变大于无布组。土工布随结构发生一定拉伸变形后,其协助面层受力的作用逐渐得以发挥,使有布组总应变增长速度变慢,总应变逐渐小于无布组对应值。在反射裂缝贯穿面层后,有布组的总应变稳定于  $180 \times 10^{-6}$ ,而无布组总应变将继续增大,超过  $600 \times 10^{-6}$  且无收敛趋势。

(4) 由于土工布对层间粘结的削弱,有布组弹性应变始终大于无布组。但随着土工布拉伸变形的增大,对车辆荷载弯拉和剪切作用的抑制逐渐增强,使得有布组弹性应变有所减小并在反射裂缝贯穿后稳定于  $9 \times 10^{-6}$ 。无布组的弹性应变由于逐渐增强的

剪切和水平力作用,在裂缝贯穿后持续增大,超过  $8 \times 10^{-6}$  且无收敛趋势。

(5) 土工布在加载不同阶段具有不同的作用:在面层开裂前,通过提高与沥青层结合后的复合断裂能,延缓面层开裂;在反射裂缝扩展过程中,通过自身受拉以提高可承受的拉伸力,协助面层抵抗外力作用,延缓裂缝扩展;在裂缝贯穿后,依靠较大的容许伸长率,仍然保持着裂缝两侧结构的联结,抑制裂缝的继续加宽和结构错动,延缓路面结构的进一步损坏。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周富杰, 孙立军. 五种措施防治反射裂缝效果的试验室评价 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 1998, 26(2): 166. ZHOU Fujie, SUN Lijun. Laboratory evaluation of five measures for asphalt overlays on existing concrete pavements [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 1998, 26(2): 166.
- [3] CLEVELAND G S, BUTTON J W, LYTTON R L. Using geosynthetics in overlays to minimize reflection cracking[M]. College Station: Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 2004.
- [4] CORREIA N D S, BUENO B D S. Effect of bituminous impregnation on nonwoven geotextiles tensile and permeability properties [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(2): 92.
- [5] NEJAD F M, NOORY A, TOOLABI S, *et al.* Effect of using geosynthetics on reflective crack prevention[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2015, 16(6): 477.
- [6] 胡长顺, 曹东伟, 刘悦, 等. 土工织物在 PCC-AC 结构中应用的理论与实践 [J]. *公路*, 2000, 45(9): 1. HU Changshun, CAO Dongwei, LIU Yue, *et al.* Theory and practice of applying geotextiles in PCC-AC structure [J]. *Highway*, 2000, 45(9): 1.
- [7] 李淑明, 许志鸿, 蔡喜棉. 土工织物对复合式路面结构内力影响分析 [J]. *中国公路学报*, 2006, 19(1): 28. LI Shuming, XU Zhihong, CAI Ximian. Analysis of impact of

- geo-textile on stress of composite pavement structure [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(1): 28.
- [8] ZAMORA-BARRAZA D, CALZADA-PÉREZ M A, CASTRO-FRESNO D, *et al.* Evaluation of anti-reflective cracking systems using geosynthetics in the interlayer zone [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(2): 130.
- [9] 周富杰, 孙立军. 反射裂缝的足尺疲劳试验研究及其力学分析[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(3): 78.  
ZHOU Fujie, SUN Lijun. Laboratory study on the reflective cracking in asphalt overlays [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3): 78.
- [10] GONZALEZ-TORRE I, MIGUEL A. CALZADA-PÉREZ M A, *et al.* Experimental study of the behaviour of different geosynthetics as anti-reflective cracking systems using a combined-load fatigue test[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(4): 345.
- [11] PRIETO J N, GALLEGO J, PÉREZ I. Application of the wheel reflective cracking test for assessing geosynthetics in anti-reflection pavement cracking systems [J]. *Geosynthetics International*, 2007, 14(5): 287.
- [12] 苏凯, 王春晖, 周刚, 等. 基于加速加载试验的沥青路面车辙预估研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(4): 493.  
SU Kai, WANG Chunhui, ZHOU Gang, *et al.* Rutting prediction model for asphalt concrete pavements based on accelerated pavement test[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(4): 493.
- [13] PIRMOHAMMAD S, AYATOLLAHI M R. Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 53: 235.
- [14] 苏志翔, 李淑明, 吴小虎. MMLS3 加速加载试验模型路面结构相似性设计[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 11(1): 16.  
SU Zhixiang, LI Shuming, WU Xiaohu. Design of model pavement structure under the MMLS3 load by similarity theory [J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2014, 11(1): 16.
- [15] SARIDE S, KUMAR V V. Influence of geosynthetic-interlayers on the performance of asphalt overlays on pre-cracked pavements [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45(3): 184.
- [16] NORAMBUENA C J, GONZALEZ T I, FERNANDEZ A D, *et al.* Mechanical damage evaluation of geosynthetics fibres used as anti-reflective cracking systems in asphalt pavements[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 109: 47.
- [17] 刘燕燕, 凌天清, 黄中文. 基于断裂能的沥青路面应力吸收层抗裂性能试验研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(5): 966.  
LIU Yanyan, LING Tianqing, HUANG Zhongwen. Experiment study on crack resistance performance of asphalt pavement stress absorbing layer based on fracture energy[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2012, 31(5): 966.
- [18] 张海伟, 郝培文, 张强, 等. 土工布应力吸收层对沥青路面性能影响试验评价[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(4): 508.  
ZHANG Haiwei, HAO Peiwen, ZHANG Qiang, *et al.* Experimental evaluation of the influence of geotextile stress absorbing interlayer on asphalt pavement performance [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2016, 39(4): 508.
- [19] CORREIA N D S, BUENO B D S. Effect of bituminous impregnation on nonwoven geotextiles tensile and permeability properties [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(2): 92.
- [20] SANGPETGNAM B, BIRGISSON B, ROQUE R. Development of efficient crack growth simulator based on hot-mix asphalt fracture mechanics [J]. *Transportation Research Record*, 2003, 1832(1): 105.