

文章编号: 1001-4888(2009)04-0341-06

# 橡胶沥青应力吸收层力学与疲劳性能研究<sup>\*</sup>

高俊启, 季天剑

(南京航空航天大学 土木工程系, 南京 210016)

**摘要:** 防治反射裂缝是半刚性基层沥青路面新建或改建工程中的难题之一。橡胶沥青应力吸收层是一种较好的反射裂缝防治结构。本文设计了包含应力吸收层复合试件的剪切与疲劳试验, 通过室内和现场取芯试件, 研究了橡胶沥青应力吸收层及其他封层的力学和疲劳性能。聚酯玻纤布应力吸收层疲劳性能最好, 但在较高橡胶沥青洒布量下, 橡胶沥青与聚酯玻纤布应力吸收层疲劳性能接近; 橡胶沥青应力吸收层的抗剪切变形能力最大, 且其抗剪强度也比较高; 橡胶沥青洒布量对橡胶沥青应力吸收层的抗剪强度、疲劳能力影响较大。当橡胶沥青洒布量在  $1.8 \sim 3.0 \text{ kg/m}^2$  间增加时, 橡胶沥青应力吸收层的抗剪强度、疲劳能力均增加, 但不是线性关系增加。

**关键词:** 应力吸收层; 反射裂缝; 橡胶沥青; 力学性能; 疲劳性能

**中图分类号:** U416.03

**文献标识码:** A

## 0 引言

已建高速公路大部分采用半刚性基层沥青路面。半刚性基层温缩、干缩变形大, 易开裂。基于半刚性材料强度高、模量大、板体性强的优点, 我国路面设计时将半刚性基层作为承重层, 提出强基薄面的设计思想。虽然近几年面层设计也有增厚的趋势, 一些高速公路的沥青面层加厚至  $18 \sim 20 \text{ cm}$ , 但是半刚性基层的强度仍然控制在  $3 \sim 5 \text{ MPa}$ , 在施工中强度甚至更高; 同时半刚性基层材料变形小, 易断裂的缺点依然没有改变, 反射裂缝仍然是半刚性基层沥青路面主要破坏模式之一。

橡胶沥青应力吸收层是指采用橡胶沥青作为粘结材料, 铺筑于水泥稳定碎石基层与沥青路面之间或者旧路面与沥青加铺层之间, 为防止反射裂缝而设计的低模量中间层, 它能够吸收下层裂缝部位的应力集中, 防止上层沥青路面对应形成反射裂缝<sup>[1,2]</sup>。橡胶沥青应力吸收层是由橡胶沥青表面处理技术发展而来, 并在美国多个州得到广泛应用<sup>[3,5]</sup>。相比于大粒径透水性柔性基层、全厚式沥青路面、厚沥青面层, 橡胶沥青应力吸收层具有费用低、施工时间短、厚度薄等优点, 引起了我国道路工作者的注意, 参考国外橡胶沥青的技术规范, 在广东、河北、江苏等省铺筑了试验段。为了综合研究其抵抗下部结构裂缝向上部结构扩展的性能, 设计了包含应力吸收层复合试件的剪切与疲劳试验, 同时对日照市 220 省道拓宽改建工程现场取芯试样进行剪切评价。为了对比评价橡胶沥青应力吸收层的防裂性能, 中间夹层还选择了另外三种形式: 聚酯玻纤布应力吸收层、乳化沥青封层和加铺土工格栅。

## 1 应力吸收层原材料性质

### (1) 橡胶沥青

橡胶沥青生产中基质沥青采用韩国 SK70 # 道路石油沥青, 废橡胶粉细度为 20 目, 废橡胶粉掺量

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-02-25; 修订日期: 2009-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(50879034); 江苏省交通科学研究项目(07Y09)

通讯作者: 高俊启(1973—), 男, 博士, 副教授, 从事道路工程方面的研究。E-mail: junqi\_gao@nuaa.edu.cn

18%,拌和温度 175℃,拌和时间 60 分钟。

#### (2) 橡胶沥青应力吸收层集料

橡胶沥青应力吸收层集料为玄武岩,清洁、不含风化颗粒,集料粘附性均不小于 4 级。集料密度 2.947g/cm<sup>3</sup>。

#### (3) 聚酯玻纤布

聚酯玻纤布是玻璃纤维和聚酯纤维的混合物,具有良好的抗拉强度、延伸率低、高温稳定性好、与沥青及沥青混合料的相容性好,且施工方便,易回收,同时聚酯玻纤布与沥青复合夹层有良好的疲劳性能、防水性能和分散应力集中<sup>[6,7]</sup>。本研究中聚酯玻纤布选用进口产品。

#### (4) 其他材料

在制作这四种应力吸收层时,还要用到乳化沥青、热喷沥青、土工格栅和下封层细集料。乳化沥青、热喷沥青和下封层细集料的技术指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(FTG F40—2004)。乳化沥青采用镇江泰普克慢裂快凝型阳离子乳化沥青,热喷沥青采用韩国 SK70# 道路石油沥青,热沥青喷洒量 0.890kg/m<sup>2</sup>。土工格栅采用日照市 220 省道拓宽改建工程中使用的土工格栅。

## 2 应力吸收层疲劳性能

### 2.1 复合小梁试件

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000),轮碾法成型 40cm×30cm×4cm 大车辙板试件。然后在每一块车辙板表面制作应力吸收层,7 天养生后,再在其上面轮碾成型沥青混合料,下部、上部混合料均采用 AC-20I 沥青混合料。24 小时后,将复合大车辙板切割成长 381mm、宽 63.5mm、高 50mm 的小梁。切割时保证先成型沥青混凝土厚度均为 2.5cm,后成型沥青混凝土与应力吸收层厚度之和为 2.5cm,并对后成型沥青混凝土进行中间切缝,切缝深度 1cm。疲劳小梁示意图见图 1,切割试件见图 2。

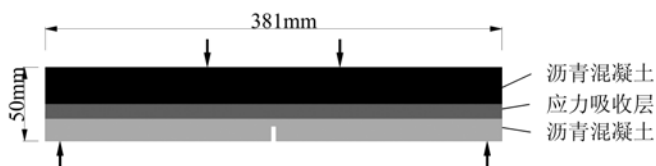


图 1 疲劳试件示意图

Fig.1 Diagram of fatigue specimen

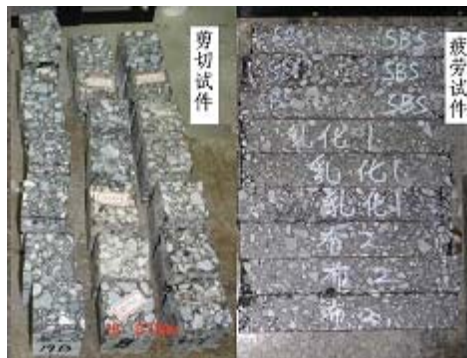


图 2 疲劳与剪切试样

Fig.2 Photograph of shearing and fatigue specimen

另外,土工格栅与乳化沥青下封层制作步骤严格按照《公路沥青路面施工技术规范》(FTG F40—2004)。橡胶沥青应力吸收层制作步骤:1) 将下承层表面清扫干净;2) 按  $2.6 \pm 0.2 \text{ kg/m}^2$  沥青用量洒布橡胶沥青;3) 撒布 9.5~13.2mm 碎石  $16 \pm 2 \text{ kg/m}^2$ ;4) 碾压或外力静压;5) 养护 7 天后,扫除多余石屑,才可铺筑沥青混合料。聚酯玻纤布应力吸收层制作步骤:1) 将下承层表面清扫干净;2) 按  $1.0 \text{ kg/m}^2$  沥青用量洒布热沥青;3) 铺筑聚酯玻纤布;4) 碾压或外力静压;5) 养护 7 天后,扫除多余石屑,才可铺筑沥青混合料。

### 2.2 试验过程及控制

共设计了 6 组复合小梁,每组至少 3 根,具体试验方案见表 1。复合小梁疲劳试验利用 UTM。加载采用应变控制( $400 \mu\epsilon$ ),加载频率 10Hz,试验温度 15℃。加载方式为三分点加载,两端支点的距离是 35.6cm。加工好的试件在试验温度下养护 6h,疲劳破坏满足劲度模量下降为初始劲度模量的 50% 或

疲劳振动 1 小时这两个条件中的任何一个,疲劳试验自动终止。

表 1 疲劳与剪切方案

Tab.1 Scheme for shearing and fatigue tests

| 夹层类型    | 集料规格        | 胶结料用量                 | 试验温度/℃ |    | 工作量 |     |
|---------|-------------|-----------------------|--------|----|-----|-----|
|         |             |                       | 疲劳     | 剪切 | 疲劳  | 剪切  |
| 橡胶沥青封层  | 9.5~13.2mm  | 1.8 kg/m <sup>2</sup> | 15     | 30 | 1 组 | 1 组 |
|         |             | 2.4 kg/m <sup>2</sup> | 15     | 30 | 1 组 | 1 组 |
|         |             | 3.0 kg/m <sup>2</sup> | 15     | 30 | 1 组 | 1 组 |
| 乳化沥青封层  | 2.36~4.75mm | 按规范                   | 15     | 30 | 1 组 | 1 组 |
| 加铺土工格栅  | 2.36~4.75mm | 按规范                   | 15     | 30 | 1 组 | 1 组 |
| 聚酯玻纤布夹层 | 不使用集料       | 1.0 kg/m <sup>2</sup> | 15     | 30 | 1 组 | 1 组 |

2.3 疲劳试验结果及分析

为减少试验误差,在设定应变水平下做了 3 个平行试件,表 2 为试件疲劳寿命试验结果。由表 2 知,聚酯玻纤布复合小梁疲劳性能最好,是乳化沥青试件疲劳寿命的 5 倍还要多。洒布量 3.0kg/m<sup>2</sup> 橡胶沥青应力吸收层复合梁疲劳寿命大于 28060 次,是乳化沥青封层复合小梁的 4 倍多。洒布量 1.8 kg/m<sup>2</sup>、2.4kg/m<sup>2</sup>、3.0kg/m<sup>2</sup> 橡胶沥青应力吸收层复合梁疲劳寿命均比铺筑乳化沥青封层的复合小梁寿命长,这说明加铺橡胶沥青应力吸收层后,沥青混凝土疲劳寿命得到大幅度地提高,其防止反射裂缝能力强。另外,也可以根据复合小梁试件累计能耗来分析其疲劳性能,但本文主要根据疲劳荷载作用次数评价其疲劳性能。

表 2 复合小梁 UTM 疲劳试验结果

Tab.2 Fatigue measurements of specimens by UTM

| 应力吸收层类型                    | 应变水平  | 疲劳寿命 N <sub>f</sub> (次) |        |        |        | 变异系数(%) |
|----------------------------|-------|-------------------------|--------|--------|--------|---------|
|                            |       | 1                       | 2      | 3      | 平均值(%) |         |
| 橡胶沥青 1.8 kg/m <sup>2</sup> | 400μϵ | 8320                    | 8730   | 10900  | 9317   | 14.9    |
| 橡胶沥青 2.4 kg/m <sup>2</sup> | 400μϵ | 13150                   | 9530   | 12230  | 11637  | 16.2    |
| 橡胶沥青 3.0 kg/m <sup>2</sup> | 400μϵ | 19100                   | 29080  | >36000 | >28060 |         |
| 乳化沥青封层                     | 400μϵ | 7690                    | 5390   | 8290   | 7107   | 21.5    |
| 加铺土工格栅                     | 400μϵ | 12950                   | 11890  | —      | 12420  | 6.0     |
| 聚酯玻纤布夹层                    | 400μϵ | 33300                   | >36000 | >36000 | >35100 |         |

从表 2 还可以看出,复合小梁疲劳性能不仅与应变水平有关,还与橡胶沥青洒布量存在一定的关系。随着橡胶沥青洒布量增加,复合小梁疲劳寿命也呈非线性增加。洒布量 3.0 kg/m<sup>2</sup> 橡胶沥青应力吸收层复合小梁疲劳寿命接近聚酯玻纤布的抗疲劳能力。因此,在较高的橡胶沥青洒布量下,更利于提高沥青路面的疲劳性能。但同时要考虑到,高橡胶沥青洒布量会增加工程早期投资,同时也可能会引起沥青路面泛油。

3 应力吸收层剪切性能

3.1 剪切试件

为研究各种应力吸收层的使用效果,设计了带沥青下面层的复合棱柱体试件。下面部分为水泥稳定碎石,尺寸为 50mm×50mm×30mm。中间为应力吸收层或下封层,上部为 30mm 的 AC-20I 沥青混合料。整个试件尺寸为 50 mm×50 mm×30 mm×2 层。剪切试验试样见图 1。试验前在试验温度下保温不少于 4 小时。

### 3.2 剪切试验方案及过程

共设计了 6 组复合剪切试件,每组至少 3 个,具体试验方案见表 1。试验采用 ELE 多极变速加载设备进行加载,加载速率为 10mm/min。试件采用空气浴,试验温度为常温  $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 。根据已有经验,试件倾角  $\alpha$  取  $40^\circ$ 。将试件放入斜面剪切夹具中,施加竖向定速率力  $F$ ,粘结层剪应力  $\tau$  可用式(1)表示:

$$\tau = \sin 40^\circ \times F/S \quad (1)$$

式中  $\tau$  为粘层界面处的剪应力,  $F$  为竖向施加定速率的荷载,  $S$  为试件剪切截面积。

### 3.3 剪切试验结果及分析

剪切试验结果见表 3。由表 3 可以看出,在  $30^\circ\text{C}$  条件下,抗剪切强度优劣次序:橡胶沥青应力吸收层( $3.0 \text{ kg/m}^2$ ) > 聚酯玻纤布应力吸收层 > 乳化沥青封层 > 铺设土工格栅乳化沥青封层。其中,橡胶沥青应力吸收层( $3.0 \text{ kg/m}^2$ )和聚酯玻纤布应力吸收层抗剪强度大约是乳化沥青封层抗剪强度的 1.2 ~ 1.3 倍。另外,在标准轴载作用下,计算出连续体系下道路罩面或路面下 5cm 处的剪切力处于 0.18 ~ 0.40MPa 之间,橡胶沥青应力吸收层和聚酯玻纤布应力吸收层的抗剪切强度均远大于 0.40MPa,满足路面使用要求<sup>[7]</sup>。

由表 3 还可以看出,对于橡胶沥青应力吸收层,在  $30^\circ\text{C}$  试验条件下,不同的橡胶沥青洒布量对应应力吸收层有一定的影响。随着橡胶沥青洒布量增加,橡胶沥青应力吸收层的抗剪强度也增加,但应力吸收层抗剪强度与橡胶沥青洒布量不是线性关系。当橡胶沥青洒布量达到  $3.0 \text{ kg/m}^2$  时,应力吸收层的抗剪强度最大,达到 1.16MPa。同时,在四种应力吸收层类型中,它的抗剪强度也是最大,比聚酯玻纤布应力吸收层的抗剪强度 1.08MPa 还大 0.08MPa。

表 3 剪切试验结果

Tab. 3 Shearing test results of specimens

| 应力吸收层类型                   | 试验温度( $^\circ\text{C}$ ) | 抗剪强度(MPa) |       |       | 平均抗剪强度(MPa) | 变异系数(%) |
|---------------------------|--------------------------|-----------|-------|-------|-------------|---------|
|                           |                          | 试样 1      | 试样 2  | 试样 3  |             |         |
| 橡胶沥青 $1.8 \text{ kg/m}^2$ | 30                       | 0.791     | 0.759 | 0.851 | 0.80        | 5.8     |
| 橡胶沥青 $2.4 \text{ kg/m}^2$ | 30                       | 0.706     | 0.849 | 0.93  | 0.83        | 13.7    |
| 橡胶沥青 $3.0 \text{ kg/m}^2$ | 30                       | 1.145     | 1.164 | 1.161 | 1.16        | 1.0     |
| 乳化沥青封层                    | 30                       | 0.900     | 0.825 | 0.988 | 0.90        | 9.0     |
| 土工格栅                      | 30                       | 0.964     | 0.768 | 0.579 | 0.77        | 25      |
| 聚酯玻纤布                     | 30                       | 0.791     | 1.377 | 1.090 | 1.08        | 27      |

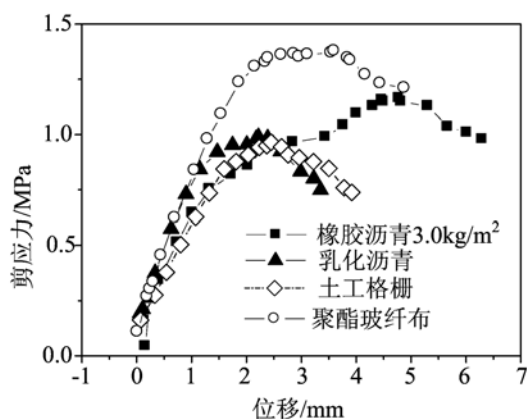


图 3 界面位移与剪应力关系曲线

Fig. 3 Relationship between shearing stress and interface displacement

图 3 为四种应力吸收层界面位移与剪应力关系曲线。由图 3 知,剪切曲线基本表现为层间剪应力随错动位移的增加线性增加。试件破坏后,土工格栅与乳化沥青封层的抗剪切能力显著降低,且基本上呈脆性破坏形式。橡胶沥青和聚酯玻纤布应力吸收层的破坏形式稍微不同,试件破坏后仍有一定的抵抗变形的能力。另外,在图 3 还可以看出,橡胶沥青和聚酯玻纤布应力吸收层的抗变形能力比较大,橡胶沥青应力吸收层破坏时变形可达 5mm,聚酯玻纤布应力吸收层破坏时变形可达 3.6mm,而乳化沥青封层破坏时变形仅仅 2.2mm,加铺土工格栅的乳化沥青封层破坏时变形也仅 2.4mm。这也是橡胶沥青和聚酯玻纤布应力吸收层具有一定的抵抗下层反射裂缝能力

的原因。

3.4 现场取芯剪切试验结果及分析

为研究室内试验结果的正确性及检验经过一年之后各种应力吸收层的粘结性能,对现场取芯芯样进行切割处理,进行剪切试验,试验结果见表 4。

表 4 现场取芯应力吸收层剪切试验结果

Tab. 4 Shearing test results of coring specimens

| 桩号       | 应力吸收层类型 | 剪切变形(mm) | 抗剪力(kN) | 抗剪强度(MPa) |
|----------|---------|----------|---------|-----------|
| K168+752 | 聚酯玻纤布   | 2.04     | 0.97    | 0.346     |
| K168+841 | 聚酯玻纤布   | 1.11     | 0.89    | 0.353     |
| K168+902 | 聚酯玻纤布   | 1.48     | 0.91    | 0.353     |
| K168+910 | 土工格栅    | 1.69     | 1.01    | 0.405     |
| K168+720 | 土工格栅    | 2.61     | 1.85    | 0.719     |
| K168+597 | 乳化沥青    | 1.69     | 2.3     | 0.915     |
| K168+575 | 乳化沥青    | 1.34     | 2.46    | 0.982     |
| K169+562 | 橡胶沥青    | 2.26     | 1.66    | 0.661     |
| K174+315 | 橡胶沥青    | 1.89     | 2.82    | 1.102     |
| K174+900 | 橡胶沥青    | 3.29     | 2.15    | 0.844     |

由表 4 可以看出,在 30℃ 试验条件下,现场取芯聚酯玻纤布应力吸收层剪切强度平均值 0.351 MPa,橡胶沥青应力吸收层剪切强度平均值为 0.869MPa,乳化沥青封层剪切强度平均值为 0.949MPa,加铺土工格栅乳化沥青封层剪切强度平均值为 0.562MPa。结合室内剪切试验结果和现场橡胶沥青洒布量可知,当现场橡胶沥青洒布量处于 2.4 kg/m<sup>2</sup>~2.6 kg/m<sup>2</sup> 时,现场取芯橡胶沥青应力吸收层剪切强度应处于 0.83MPa~1.16MPa 之间。由试验结果可以看出,现场取芯橡胶沥青应力吸收层剪切强度平均值为 0.869MPa 是合适的。另外,橡胶沥青应力吸收层剪切强度有些离散,可能是由于施工过程中存在一定差异。从抗剪性能上看,经过一年的行车荷载,橡胶沥青应力吸收层与乳化沥青封层抗剪能力接近,并且性能较好。

对于四种夹层类型,在同样的施工条件下,它们的抗变形能力也不同。在 30℃ 试验条件下,现场取芯聚酯玻纤布应力吸收层剪切变形平均值为 1.54mm,橡胶沥青应力吸收层剪切变形平均值为 2.48mm,乳化沥青封层剪切变形平均值为 1.515mm,加铺土工格栅乳化沥青封层剪切变形平均值为 2.15mm。橡胶沥青应力吸收层变形能力最好。橡胶沥青应力吸收层剪切变形是普通乳化沥青封层剪切变形的 1.6 倍,橡胶沥青应力吸收层的这种高变形特性对于其能够抵抗反射裂缝非常有利。

4 结论

本文设计了包含应力吸收层复合试件的剪切与疲劳试验,通过室内和现场取芯试件,研究了橡胶沥青应力吸收层及其他封层的力学和疲劳性能。研究结果表明:

(1) 在 15℃ 条件下,对于橡胶沥青应力吸收层、聚酯玻纤布应力吸收层、普通乳化沥青封层和加铺土工格栅乳化沥青封层,聚酯玻纤布应力吸收层疲劳性能最好,橡胶沥青应力吸收层疲劳性能稍差一些,但在较高橡胶沥青洒布量下,橡胶沥青应力吸收层与聚酯玻纤布应力吸收层疲劳性能接近。

(2) 在 30℃ 条件下,对于室内试件,橡胶沥青洒布量达到 3.0 kg/m<sup>2</sup> 时,橡胶沥青应力吸收层的抗剪强度最大,达到 1.16MPa;同时,橡胶沥青应力吸收层的抗剪切变形能力也最大,最大变形可达 5mm。

(3) 橡胶沥青洒布量对橡胶沥青应力吸收层的抗剪强度、疲劳能力影响较大。当橡胶沥青洒布量在 1.8~3.0 kg/m<sup>2</sup> 之间增加时,橡胶沥青应力吸收层的抗剪强度、疲劳能力均增加,但不是线性关系增加。

(4) 对于经过一年行车荷载作用的现场取芯试件,在 30℃ 试验条件下,橡胶沥青应力吸收层的抗剪强度可以达到 0.869MPa,且其剪切变形在四种应力吸收层中也是最大的,达到 2.48mm。

#### 参考文献:

- [1] 曹荣吉,白启峰. 橡胶沥青应力吸收层在盐通高速公路上的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2006, (10):120—122 (Cao Rongji, Bai Qifeng. Application of stress absorbing membrane interlayer-asphalt rubber on Yantong speedway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (application technology edition), 2006, (10): 120—122 (in Chinese))
- [2] 黄文元. 轮胎橡胶粉改性沥青路用性能及应用研究[D]. 上海:同济大学,2004:9—15 (Huang Wenyan. Research on performance and application of tyre rubber midified asphalt concrete[D]. Shanghai: Tongji University, 2004:9—15 (in Chinese))
- [3] Arizona Department of Transportation. Standard Specifications for Road and Bridge Construction [S]. Phoenix, Arizona, 2000.
- [4] Morris G R, McDonald C H. Asphalt-Rubber Stress Absorbing Membranes: Field Performance and State-of-the-Art [J]. Transportation Research Record, 1976, (595): 52—58.
- [5] Doty R N. Flexible Pavement Rehabilitation Using Asphalt-Rubber Combinations: Progress Report [J]. Transportation Research Record, 1988, (1196):212—223.
- [6] 倪富健,尹应梅. 聚酯玻纤布复合沥青混合料疲劳性能[J]. 交通运输工程学报,2005,5(3):31—35 (Ni Fujian, Yin Yingmei. Fatigue properties of asphalt mixture with fiberglass polyester mat [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 31—35 (in Chinese))
- [7] 尹应梅. 聚酯玻纤布在高速公路罩面工程中的应用研究[D]. 南京:东南大学,2005:50—52 (Yin Yingmei. Research on the expressway overlays application of the fiberglass-polyester paving mat[D]. Nanjing: Southeast University, 2005:50—52 (in Chinese))

## Study of Mechanical and Fatigue Properties for Stress Absorbing Membrane Interlayer in Asphalt Rubber

GAO Jun-qi, JI Tian-jian

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Reflection cracks prevention of semi-rigid base asphalt pavement is one of the unsettled issues in new construction and reconstruction highway projects. Stress Absorbing Membrane Interlayer-Asphalt Rubber (SAMI-AR) is the one of excellent layer structures to prevent reflection cracks. Specimens including SAMI-AR and other three seals were designed, the shearing and fatigue tests were implemented. Mechanical and fatigue properties of SAMI-AR and the other seal coats were studied for specimens and site core samples. Results show that the fatigue property of Stress Absorbing Membrane Interlayer- Fiberglass Polyester Paving Mat (SAMI-FPPM) is the best in the four kinds of seals, and the fatigue properties of SAMI-AR and SAMI-FPPM are considerable with the high use of asphalt rubber. The shearing deformation of SAMI-AR is the best in the four kinds of seals and its shearing strength is better. The shearing strength and fatigue capability of SAMI- AR is affected greatly by the amount of asphalt rubber and increased gradually with the increment of used asphalt rubber from 1.8 kg/m<sup>2</sup> to 3.0 kg/m<sup>2</sup>, but this relationship is not linear.

**Keywords:** stress absorbing membrane interlayer; reflection crack; asphalt rubber; mechanical property; fatigue property