

# 沥青面层和层间处治措施对再生水稳基层路面反射裂缝的影响分析

张业兴<sup>1</sup>, 胡占红<sup>2</sup>, 吴禹<sup>2</sup>, 郭昱涛<sup>1</sup>, 李世敏<sup>3</sup>, 张硕周<sup>3</sup>

(1.北京建筑大学 未来城市设计高精尖创新中心, 北京市 100044; 2.河南中原高速公路股份有限公司;  
3.河南省濮阳市公路管理局)

**摘要:**反射裂缝是再生水稳基层的主要病害,沥青面层的厚度、模量以及层间处治措施如土工格栅、SBS 沥青混合料应力吸收层和橡胶沥青碎石层等是影响反射裂缝的主要因素。该文结合再生水稳基层路面结构参数,通过有限元建模计算并定量分析了面层的厚度、模量和3种层间处治措施对表征裂缝反射能力的沥青面层底部应力的影响。结果表明:在一定范围内提升沥青面层和层间处治层厚度均能有效缓解面层底部的应力集中现象,但两者模量的提高会加大面层底部的剪应力和弯拉应力;且以上层间处治措施中 SBS 沥青混合料层间处治层对降低沥青面层底部应力集中最为显著。

**关键词:**再生水稳基层;反射裂缝;沥青面层厚度与模量;层间处治措施;面层底部应力;影响分析

半刚性路面的维修过程会产生废旧半刚性基层材料,可以通过添加水泥进行再生利用。该技术能够节省矿料资源,保护环境,具有重大的社会与经济效益。但再生水稳基层由于废旧材料细料多、吸水率高,易产生开裂等问题,引发沥青层产生反射裂缝,因此,开展反射裂缝处治措施的相关研究迫在眉睫。

胡长顺利用有限元方法分析了层间处治层对旧水泥路面上沥青面层剪应力和弯沉差的影响;周富杰通过观测设置级配碎石处治层的试验路,发现设置级配碎石层后沥青路面面层反射裂缝一定程度上有所减少;谭忆秋研究发现高黏沥青混合料层间处治层抗疲劳、抗拉伸和弹性变形性能较好,可抑制沥青面层的反射裂缝;张起森基于断裂力学,利用平面有限元分析了土工加筋材料缓解路面反射裂缝的作用;Ali Khodaii 等通过试验发现土工合成材料有助于减轻沥青层反射裂缝,从而延长沥青层使用寿命。目前,在沥青面层和基层之间设置处治层能够较好地防治反射裂缝,层间处治的方式种类较多,每种层间处治措施都有其优点和适用的条件。

综上所述,国内外学者对层间处治层防治反射裂

缝有了一定研究,但未对不同层间处治措施对再生水稳基层路面反射裂缝的影响做出深入对比和分析。因此,该文结合再生水稳基层路面的实际情况,利用有限元软件对不同道路参数(沥青层厚度、模量等)和不同层间处治层(SBS 沥青混合料应力吸收层、土工格栅和橡胶沥青碎石层)下的再生水稳碎石基层路面进行抗反射裂缝性能定量定性对比和分析。

## 1 再生水稳基层路面反射裂缝有限元分析

车辆荷载、温度、湿度等外部因素以及路面结构特性等内部因素都会影响再生水稳基层路面的性能。参考国内外研究成果,在断裂力学理论的支持下,有限元分析法已成为沥青路面裂缝问题的有力数值分析方法,且综合考虑荷载下路面各结构层的力学响应,结合再生水稳基层路面典型结构,该文采用有限元软件 Abaqus 建立模型分析沥青面层厚度、模量以及层间处治层模量等因素对再生水稳基层路面反射裂缝的影响,为再生水稳基层路面抗裂能力的提升和结构设计

收稿日期:2019-10-11(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678028);北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心重大科技项目(编号:2018-02-05);北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:X18201,X18200)

作者简介:张业兴,男,硕士研究生,E-mail:935607107@qq.com

提供参考依据。

1.1 有限元模型的建立

1.1.1 回弹模量测定

依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》及初步研究数据,确定水泥掺量 5%,最大干密度 2.25 g/cm³,最佳含水率 7.5%,整体掺配 60%的水稳基层旧料成型  $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  的标准试件,养生 7 d;回弹模量利用 T0808—1994 中的顶面法测定,试验结果见表 1。

表 1 再生水稳基层 7 d 回弹模量

平均回弹模量/MPa	标准差/MPa	变异系数	样本数/个
1 225	118.72	0.096	9

1.1.2 模型条件假设

为了使道路结构模型更加便于实际分析与计算,并尽可能地符合实际路面受力情况,参考相关研究,对结构模型提出如下假设:

- (1) 各层为均匀、连续、各向同性的弹性体。
- (2) 各层为均匀连续且无相对位移。
- (3) 土基底部完全约束且侧面无水平位移。
- (4) 结构自重忽略不计。
- (5) 基层裂缝宽度为 1 cm 且无传荷能力。
- (6) 采用了扩大尺寸地基以反映半空间体地基的特性。

1.1.3 路面结构参数

(1) 再生水稳基层路面结构尺寸

根据已有成果将土基尺寸确定为 13.01 m $\times$ 10.5 m $\times$ 9 m(长 $\times$ 宽 $\times$ 高),基层及面层平面尺寸为 10.01 m $\times$ 4.5 m(长 $\times$ 宽),厚度分别为 36 cm 和 6~18 cm,如图 1 所示。

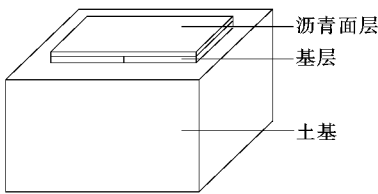


图 1 再生水稳基层路面结构

(2) 主要计算参数

根据 SBS 沥青混合料应力吸收层、土工格栅和橡胶沥青碎石层作层间处治层时的实际使用特点,结合相关室内材料力学参数试验,确定其厚度和回弹模量,主要计算参数如表 2 所示。

表 2 路面结构层主要计算参数

结构层	厚度/cm	泊松比	回弹模量/MPa
沥青面层	6~18	0.25	600~2 200
SBS 沥青混合料应力吸收层	2.5	0.35	800
土工格栅	0.5	0.25	3 500
橡胶沥青碎石层	1.0	0.25	400
再生水稳基层	36	0.20	1225
土基层	900	0.35	50

1.1.4 车辆荷载

车辆荷载采用 BZZ—100 标准轴载,轮压 0.7 MPa,轮距 1.82 m,将轮胎接触面定为矩形(18.9 cm $\times$ 18.9 cm)以便于分析,如图 2 所示。行车荷载有两种典型作用方式,分别为作用在裂缝两侧并相互对称的正荷载(图 3)和仅作用在裂缝一侧的偏荷载(图 4)。通过计算,偏荷载相比较于正荷载处于不利位置,因此仅对偏荷载作用下的情况进行分析。

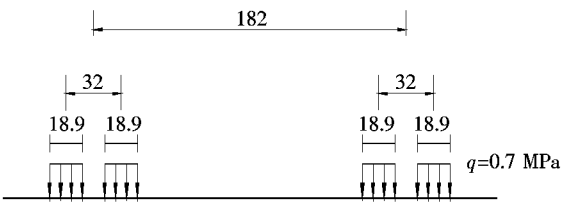


图 2 BZZ—100 标准车型(尺寸单位:cm)

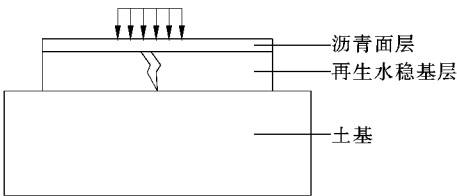


图 3 正荷载

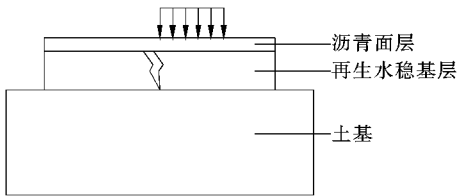


图 4 偏荷载

1.1.5 有限元模型建立

以 X 轴为行车方向建立三维 8 结点实体单元模型,如图 5 所示。有限元模型网格越密集,求解越精确,但会带来计算量和耗时的增加,因此仅对裂缝及行车荷载作用区域的网格作进一步细化。

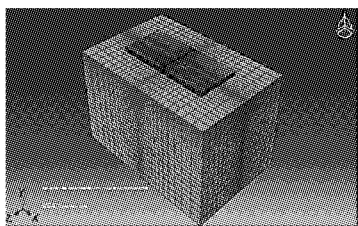


图 5 有限元模型

## 1.2 沥青面层参数影响分析

分析在车辆荷载作用下,再生水稳基层路面沥青面层厚度和模量的变化对路面结构应力和应变(该文用弯沉表现)的影响程度,为该路面的结构设计提供参考依据。

### 1.2.1 面层厚度影响

将面层厚度设置为 6~18 cm,定量分析再生水稳基层路面沥青层厚度与面层层底应力、应变的关系,结果见图 6、7。

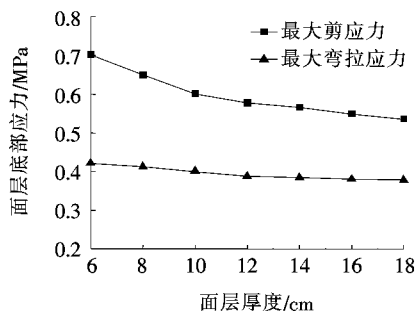


图 6 沥青面层厚度与面层底部应力的关系

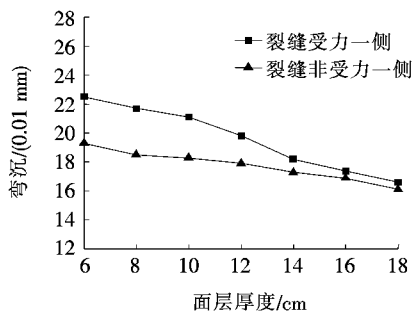


图 7 沥青面层厚度与面层底部弯沉的关系

由图 6、7 可知:面层厚度从 6 cm 增至 10 cm 时,最大剪应力降低幅度为 14.4%,最大弯拉应力降幅为 5%;面层厚度从 14 cm 提升到 18 cm 时,最大剪应力降幅为 5.3%,最大弯拉应力降幅为 1.8%;说明沥青面层底部的最大剪应力和最大弯拉应力随着面层厚度的增加不断降低,但降幅越来越小,而裂缝两侧弯沉值基本呈线性下降趋势。因此,仅通过增加沥青面层厚度来抑制反射裂缝是不经济的,也是不科学的。

### 1.2.2 面层模量影响

沥青路面的强度与模量随温度的变化而变化,加上行车作用,沥青面层底部的应力、应变也会随之改变,其与沥青面层模量的关系如图 8、9 所示。

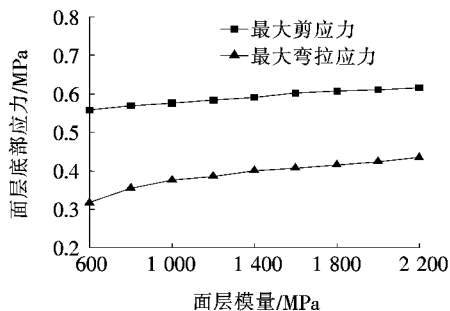


图 8 沥青面层模量与面层底部应力的关系

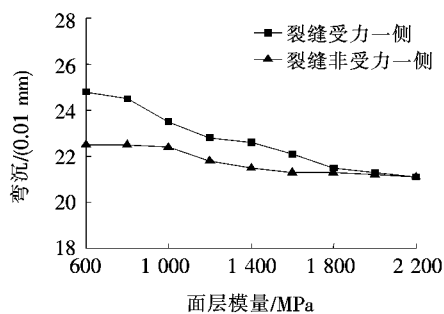


图 9 沥青面层模量与面层底部弯沉的关系

由图 8、9 可见:在沥青面层模量从 600 MPa 提升到 2 200 MPa 的过程中,沥青面层底部的最大剪应力和最大弯拉应力均增大,而裂缝两侧的弯沉和弯沉差会随之降低;说明面层模量的提升有助于降低沥青层底部的弯沉,但同时会加大面层底部的应力,所以应合理选择沥青面层模量,避免过大或过小。

## 2 设置不同层间处治层的路面结构有限元分析

用于防治半刚性基层路面反射裂缝的不同层间处治层各有其优缺点,道路适用性也有所不同。分析层间处治层厚度、模量以及不同层间处治层对再生水稳基层路面结构荷载应力的影响,以找出有效抑制该路面反射裂缝的层间处治措施。

### 2.1 层间处治层厚度影响

沥青面层底部的裂缝扩展快慢与层间处治层的厚度有关,将层间处治层的厚度设置为 1~8 cm,定量研究再生水稳基层路面层间处治层厚度与层底应力的关系,计算结果如图 10 所示。

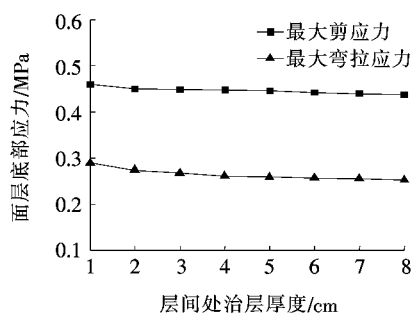


图 10 层间处治层厚度与面层底部应力的关系

由图 10 可知:随着层间处治层厚度的不断增加,沥青层底部最大弯拉应力和最大剪应力分别降低了 12.8% 和 4.8%,可见弯拉应力的降低效果相对更为明显;随着层间处治层厚度的增加,面层底部最大弯拉应力和最大剪切力减小幅度不断降低,且厚度从 1 cm 增加到 3 cm 时,弯拉应力和剪应力的降低幅度较大。因此,层间处治层并不是越厚越好,应综合分析路面结构设计具体要求以及工程经济性确定其厚度。

## 2.2 层间处治层模量影响

不同层间处治层模量下再生水稳基层沥青面层底部的应力变化如图 11 所示。

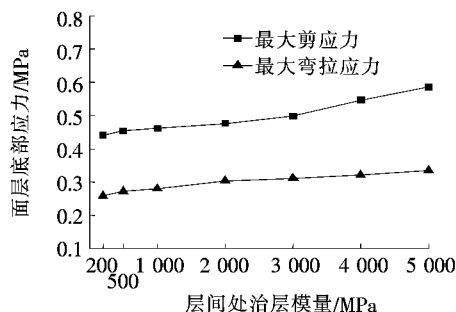


图 11 层间处治层模量与面层底部应力的关系

由图 11 可知:随着层间处治层模量的增大,面层底部最大剪应力和最大弯拉应力均有所增加,因此层间处治层模量越小,沥青面层底部的应力也越小。

## 2.3 SBS 沥青混合物应力吸收层影响

依据表 2 主要计算参数(取沥青面层回弹模量值为 1 200 MPa),对设置 SBS 沥青混合物应力吸收层的路面和未设置层间处治层的路面进行计算,结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出:设置 SBS 沥青混合物应力吸收层与未设置层间处治层相比,沥青面层底部弯拉应力降低了 27%,剪应力降低了 25.3%。这是因为基层在偏荷位作用下会发生错位,引起面层底部出现应力集中现象,而处于基层和沥青面层之间的 SBS 沥青混

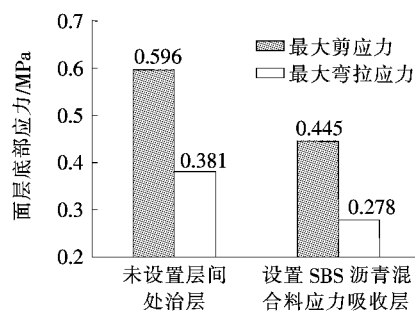


图 12 是否设置 SBS 应力吸收层对面层底部应力的影响

合料应力吸收层,依靠其较低的模量和较好的弹性变形能力,会缓解这种应力集中现象以抑制反射裂缝。

## 2.4 土工格栅影响

依据表 2 主要计算参数,对设置土工格栅的路面和未设置层间处治层的路面进行计算,结果如图 13 所示。

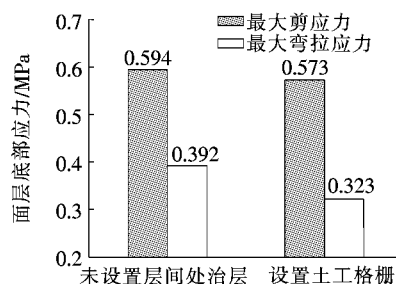


图 13 是否设置土工格栅对面层底部应力的影响

由图 13 可知:设置土工格栅与未设置层间处治层相比,沥青面层底部弯拉应力降低了 17.6%,剪应力降低了 3.5%,弯拉应力的降低幅度大于剪应力的降低幅度。这是由于土工格栅热稳定性好、抗拉模量较高,将再生水稳基层和沥青面层隔离,起到应力吸收膜的作用;并且土工格栅足够的强度和骨架的存在能起到扩散应力的作用,将裂缝处应力转向水平方向,削弱了裂缝尖端应力,从而抑制反射裂缝。

## 2.5 橡胶沥青碎石层影响

依据表 2 主要计算参数,对设置橡胶沥青碎石层的路面和未设置层间处治层的路面进行计算,结果如图 14 所示。

由图 14 可知:设置橡胶沥青碎石层与未设置层间处治层相比,沥青层底弯拉应力降低了 23.5%,剪应力降低了 7.8%,且弯拉应力的降低幅度要大于剪应力的降低幅度。这是因为橡胶沥青碎石层凭借其空隙率大、模量低的特点,可以吸收并消散裂缝处的应力和应变,延缓反射裂缝的发展速度,从而起到抑制再生水稳基层反射裂缝的效果。

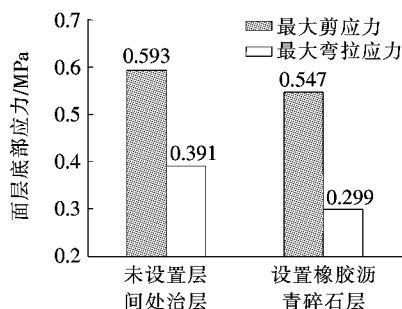


图 14 是否设置橡胶沥青碎石层对面层底部应力的影响

## 2.6 3 种层间处治措施对比分析

对比采用 3 种不同层间处治层时沥青面层底部应力的结果,如图 15 所示。

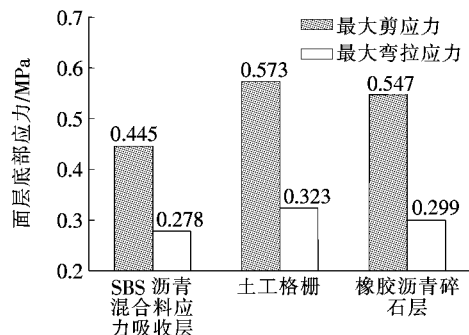


图 15 不同层间处治层下面层底部的应力值

由图 15 可知:3 种层间处治措施都不同程度降低了再生水稳基层沥青面层底部的应力,且降低面层底部弯拉应力效果均比降低剪切力的效果好;其中 SBS 沥青混合料吸收层缓解沥青面层底部应力集中的效果最好,其次是橡胶沥青碎石层,缓解应力集中效果最差的是土工格栅。

## 3 结论

利用有限元软件 Abaqus 分析计算了不同道路参数(沥青层厚度、模量等)和不同层间处治层(橡胶沥青碎石层、SBS 沥青混合料应力吸收层和土工格栅)下的再生水稳碎石基层路面沥青面层底部的应力状态,得出结论如下:

(1) 在一定范围内,提升沥青面层的厚度能有效减小面层底部的应力,超过一定范围效果降低,且仅通过加大沥青层厚度来防治反射裂缝是不科学的;而面层模量的提升虽有助于降低沥青层底部的弯沉,但同时会加大面层底部的应力。

(2) 层间处治层厚度增加都能一定程度上缓解面

层底部应力集中现象,且厚度在 3 cm 以下时效果更为显著;但其模量越小时,沥青面层底部的应力越小。

(3) SBS 沥青混合料应力吸收层、土工格栅和橡胶沥青碎石层都不同程度降低了再生水稳基层沥青面层底部的应力,且降低面层底部弯拉应力效果均比降低剪切力的效果好;其中 SBS 沥青混合料应力吸收层的效果最佳。

## 参考文献:

- [1] 胡长顺,曹东伟.有防裂夹层结构的旧水泥混凝土路面沥青加铺层力学分析[J].中国公路学报,1999(S1).
- [2] 周富杰,孙立军.防治反射裂缝的措施及其分析[J].华东公路,1996(5).
- [3] 谭忆秋,石昆磊,李丽敏,等.高粘性沥青应力吸收层防治反射裂缝研究[J].哈尔滨工业大学学报,2008(2).
- [4] 张起森.土工合成材料在沥青路面抗裂措施中的应用[C].中国水力发电工程学会全国第六届土工合成材料学术会议论文集,2004.
- [5] Ali Khodaii, Shahab Fallah, Fereidoon Moghadas Nejad. Effects of Geosynthetics on Reduction of Reflection Cracking in Asphalt Overlays[J].Geotextiles and Geomembranes,2008,27(1).
- [6] 郑健龙.沥青路面抗裂设计理论与方法[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [7] 李仕华,王修山.动载作用下半刚性沥青路面力学响应分析[J].中外公路,2016(5).
- [8] E. Giner, N. Sukumar, J.E. Tarancón, F.J. Fuenmayor. An Abaqus Implementation of the Extended Finite Element Method[J].Engineering Fracture Mechanics,2008,76(3).
- [9] 蒋应军.水泥稳定碎石基层收缩裂缝防治研究[D].长安大学硕士学位论文,2001.
- [10] 高涛涛.橡胶沥青封层防治反射裂缝的性能研究[D].长安大学硕士学位论文,2012.
- [11] 李鹏程,何文正.旧水泥混凝土路面沥青加铺层应力影响因素分析[J].公路交通技术,2014(4).
- [12] 宋健民,白鹏飞,管晓晴.半刚性基层沥青路面反射裂缝建模分析[J].公路工程,2017(3).
- [13] 郭鑫峰,徐勋倩,仇云强,等.基于应力强度因子的旧水泥路面沥青加铺层反射开裂特性研究[J].中外公路,2019(2).
- [14] 岳福青.半刚性基层沥青混凝土路面反射裂缝形成扩展机理与基层预裂技术研究[D].河北工业大学硕士学位论文,2004.
- [15] 刘凯,张祥,王芳,等.级配碎石基层沥青路面复合土工格栅最佳层位研究[J].中外公路,2018(4).