

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.08.009

# 微裂技术在基层快速修复中的应用

郝冠军<sup>1</sup>, 田波<sup>2</sup>, 侯荣国<sup>2</sup>

(1. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014;  
2. 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088)

**摘要:** 结合国内外预裂缝技术特点, 提出一种不加入早强性材料的基层修复技术, 只是在通车早期重来实施, 此时的基层被碾压成空间的网状微细裂缝, 和较宽的横向裂缝相比, 沥青路面产生反射裂缝的概率降低, 沥青路面力学状态也有所改善; 采用有限元方法, 模拟理想的裂缝类型, 对两种裂缝形式下的的沥青路面的力学响应进行对比分析, 并计算出采用微裂技术的沥青路面的面层寿命。研究发现: 微裂技术在一定程度上降低了沥青面层的寿命, 但解决了常规修复技术中的容易产生反射裂缝的问题, 并实现了快速修复的技术要求, 因此微裂技术在基层快速修复中具有一定的可行性。

**关键词:** 道路工程; 微裂技术; 有限元; 基层快速修复; 疲劳寿命

中图分类号: U416.042

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)08-0051-07

## Application of Micro-cracking Technique in Base Quick Repair

HAO Guan-jun<sup>1</sup>, TIAN Bo<sup>2</sup>, HOU Rong-guo<sup>2</sup>

(1. China Design Group Co. Ltd., Nanjing Jiangsu 210014, China;  
2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Combining with the technical characteristics of the pre-cracking techniques at home and abroad, a base quick repair technology without addition of early strength material is proposed. It only limits heavy traffic in early period of road service. In this period, the base is rolled into the space mesh micro-cracks, the probability of reflective cracking of asphalt pavement decreases and the mechanical state of asphalt pavement status is also improved compared with the wider transverse cracks. The ideal type of crack is simulated by finite element method, the mechanical responses of asphalt pavement in 2 types of crack are analyzed, and the life of asphalt pavement surface layer using micro-cracking technology is calculated. It is found that micro-cracking technique reduced the life of asphalt surface to some extent, but it solves the problem of reflective cracks easily occurred in conventional repair techniques, and can achieve the technical requirement of rapid restoration, so micro-cracking technique has certain feasibility in base quick repair.

**Key words:** road engineering; micro-cracking technique; finite element; base quick repair; fatigue life

## 0 引言

由于具有较高的强度、刚度和稳定性, 半刚性基层在我国高等级路面中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>, 根据我国公路建设的发展速度、经济能力以及各地公路的建设情况, 半刚性材料在今后相当长的时期

内仍然会在基层中大量使用。半刚性基层损伤普遍采用经验型作业方式, 需要较长的封闭养生时间, 对交通干扰较大, 随着交通量的增长, 半刚性基层材料损坏后, 采取快速的修复方式显得日益重要。针对路面使用现状, 国内外提出采用半刚性基层快速修复技术, 其中绝大多数是通过使用快硬水泥、

收稿日期: 2015-09-15

作者简介: 郝冠军(1989-), 男, 山东济宁人, 硕士。(haoguanjun123@163.com)

掺入早强性材料<sup>[4]</sup>或者加入土工织物<sup>[5]</sup>等材料来实现基层的快速修复,但是由于结合料化学反应过快,导致放热速率以及消耗水的速率大大增加,这时半刚性材料很容易产生早期开裂现象,进而引起半刚性基层沥青路面其他病害,严重影响半刚性基层沥青路面的承载力和寿命。

针对早强型材料易开裂的缺点,提出不加入早强性材料的基层快速修复技术,在通车前期对行车荷载进行限制,防止沥青路面被压坏,此时基层产生了空间网状微细裂缝。由于空间裂缝对荷载具有分散作用,基层在外界荷载作用下,裂缝扩展速度极为缓慢,只有当基层裂缝扩展到一定程度时,基层裂缝才会反射到面层上来,因此基层产生空间网状微细裂缝的沥青路面发生反射裂缝的概率很低。基层修复施工技术后,经过较短时间的养生再铺筑面层,通车时间提前,基层的模量较低,沥青路面会产生一定的疲劳损伤,需确保沥青路面由于基层模量低而损失的疲劳寿命在一定的范围内,才可以使用微裂技术进行基层快速修补。因此,有必要对采用微裂快速修补基层技术的沥青路面疲劳寿命进行计算。

为验证微裂技术用于半刚性基层快速修复中的可行性,结合具体沥青路面实例,对采用微裂技术的快速修复基层开展以下研究:

- (1) 半刚性基层材料模量增长规律;
- (2) 半刚性基层沥青路面疲劳寿命计算;
- (3) 半刚性基层快速修复技术分析。

## 1 沥青路面结构

为验证微裂技术用于基层快速修补技术的可行性,选取3种(A、B和C;面层厚度不同)半刚性基层沥青路面为研究对象,沥青路面结构模型具体参数见表1。

表1 沥青路面结构参数(采用二灰碎石基层)

Tab. 1 Parameters of asphalt pavement structural (using lime fly-ash base course)

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比
上面层	5, 6, 7	2 000	0.25
中面层	7, 8, 9	1 800	0.25
下面层	9, 10, 11	1 400	0.25
基层	20	—	0.35
底基层	35	1 600	0.35
土基	—	50	0.4

## 2 半刚性基层“三阶段”模量增长规律

微裂技术在基层快速修复中的要求:半刚性基层材料摊铺后,养生1~3 d内铺筑面层,沥青路面提前通车。在外界荷载作用下,快速修复的沥青路面会产生一定的疲劳损伤。为验证微裂技术的可行性,需要计算出提前通车对沥青路面造成的疲劳损伤,具体计算中需要基层的模量增长规律。鉴于此,对半刚性材料模量增长规律进行研究。

采用文献[6]和文献[7]中关于水泥稳定碎石混合料、水泥粉煤灰碎石混合料随龄期增长规律的数据,得到它们的回弹模量随龄期的增长规律图,其中部分数据见表2、表3和图1。

表2 不同种类水泥稳定碎石基层混合料抗压回弹模量随龄期增长规律

Tab. 2 Laws of resilient modulus of different types of cement stabilized gravel base mixture varying with age

材料名称	不同龄期(d) 抗压回弹模量/MPa			
	7	28	90	180
水泥稳定碎石 A	1 344	1 460	1 584	2 530
水泥稳定碎石 B	1 354	1 572	1 617	2 880
水泥稳定碎石 C	763	854	1 253	2 501

表3 不同种类水泥粉煤灰稳定碎石基层混合料回弹模量随龄期增长规律

Tab. 3 Laws of resilient modulus of different types of cement fly-ash stabilized gravel base mixture varying with age

材料名称	不同龄期(d) 抗压回弹模量/MPa				
	7	14	30	60	90
水泥粉煤灰稳定碎石 A	561	762	924	1 080	1 294
水泥粉煤灰稳定碎石 B	406	620	712	918	1 089
水泥粉煤灰稳定碎石 C	617	750	810	1 031	1 150
水泥粉煤灰稳定碎石 D	650	693	747	9 23	1 042

从图1中可以看出不同种类半刚性材料模量的增长趋势大致相同,按照半刚性材料的模量增长规律,可以将半刚性材料的刚度增长分成3个阶段,即半刚性基层的“三阶段”理论。所谓“三阶段”是指随着龄期的增长,半刚性基层物理力学性能发生的变化规律,理论具体介绍如下:

(1) 反应初期,化学反应生成的胶结料不足以使混合料联接成整体结构,即混合料处于松散状态,因此此时的半刚性材料早期力学性能主要由材料组成的结构形式和原材料本身力学性能所决定。前期半刚性基层还处于“散粒体”状态。

(2) 随着龄期的增长,化学反应逐步进行,强

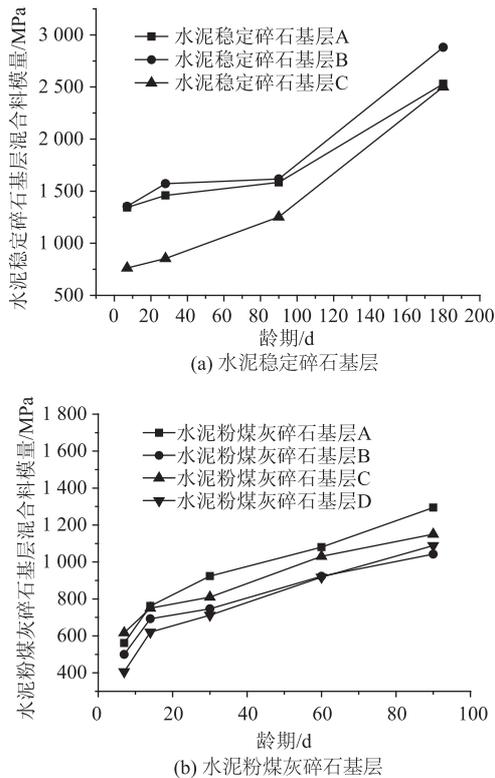


图 1 不同种类半刚性基层材料回弹模量随龄期增长规律

Fig. 1 Laws of resilient modulus of different types of semi-rigid base material varying with age

度和模量增加。但是由于半刚性材料的温缩、干缩特性,使得半刚性基层在外界的环境下产生裂缝,此时半刚性基层处于“带有裂缝的强度增长”状态,由于物理力学性能的不同,不同的半刚性材料产生宽度、间距和深度等参数均不相同的裂缝。

(3) 3 个月或者更长龄期之后,随着化学反应的基本完成,半刚性基层混合料的强度刚度基本不再增长,此时基层处于带有裂缝的“板体”状态。

微裂技术中的基层增长过程也可以相应分成 3 个阶段:在第 1 阶段,半刚性基层处于成型初期,提前通车会对半刚性材料压密,导致半刚性材料的强度和刚度增长变快。由于第 1 阶段龄期较短和模量较小,此时的半刚性基层的模量增长规律同标准养生条件下基层的模量增长规律一致。在第 2 和第 3 阶段中,半刚性结构由于荷载和外界环境产生较多的网状裂缝。根据国内外文献和实际路况调查发现,当半刚性基层形成尺寸小于 1 m 的网状裂缝时,半刚性基层沥青路面的受力形式发生了改变,半刚性基层路面应力应变状态趋近于柔性路面状态;当网状裂缝尺寸大于 1 m 时,路面结构为半刚性路面状态;网状裂缝尺寸大于 1 m 时,沥青路面弯沉、面

层层底拉应力和基层层底拉应力变化均较小<sup>[8]</sup>。通过弯沉等效计算基层模量发现:包含大量网状裂缝的基层模量与完整无裂缝基层的模量大体一致。因此,用半刚性基层快速修复技术的基层,其模量随龄期的变化规律可以用半刚性材料模量增长规律代替。

### 3 有限元计算模型和分析

采用 ABQUS 有限元软件,能较好地模拟裂缝分布对沥青路面力学响应的影响。针对基层快速修复技术要求,本文对基层分别为横向裂缝和网状裂缝进行模拟分析。

#### 3.1 基本假设

(1) 路面结构分为面层、基层、底基层和土基共 4 层,各层均由均质、弹性和各向同性材料组成。

(2) 土基在水平方向和向下方向均为无限,土基之上各层结构的厚度均为有限,但水平方向为无限。

(3) 路面上层表面作用有垂直均布荷载,在无限远处和无限深处应力<sup>[9]</sup>和位移为 0。

(4) 实际采用基层快速修复技术时,基层产生网状微裂缝深度不一,位置和形状也复杂多变,但研究的目的是为了反映网状微裂缝和横向裂缝相比减小对沥青路面力学状态的影响,为了便于单元剖分,基层裂缝深度选择基层厚度。

#### 3.2 几何模型

综合考虑边界条件的影响以及有限元计算的精度和时间,本结构模型中沥青路面网格尺寸采用 16, 12 m 和 6 m (见图 2),基层产生的横向裂缝和网状微裂缝深度均选取为基层厚度。为了方便起见,横向裂缝方向假定为垂直于行车方向,横缝间距为 4, 6 m 和 8 m。与横向裂缝相比较,网状微细裂缝较为复杂,网状微细缝的宽度较小,且方向各异。为方便有限元计算,拟定网状裂缝为规则的正方形,其边长为 4, 6 m 和 8 m,本文只列出尺寸为 4 m 的情况。

#### 3.3 荷载及其边界条件

为了研究裂缝对沥青路面力学状态影响,采用平面应变有限单元法,交通荷载采用标准轴载 BZZ - 100,将当两圆荷载图式等效转化为 26.73 cm × 26.73 cm 的正方形荷载,荷载集度为  $P = 0.7$  MPa,等效线荷载为 0.187 MPa/m。对于横向裂缝,根据计算,当荷载作用于裂缝的一侧时,对路面结构的受力影响最大<sup>[10]</sup>,故仅考虑荷载作用于横缝一侧的情况,采用平面 4 节点等参单元计算,在裂缝处加密

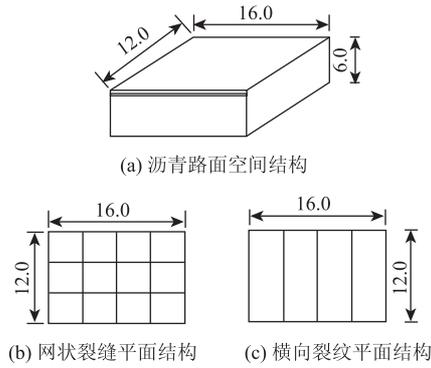


图2 计算几何模型(单位:m)

Fig. 2 Computational geometry model (unit: m)

网格划分;对于网状裂缝,界定荷载作用于基层裂缝的正上方位置。边界条件取在非对称横断面上完全约束,对称面上限制垂直于对称面方向的位移,土基底部完全约束,面层表面为自由面,不进行任何约束,具体见图3。

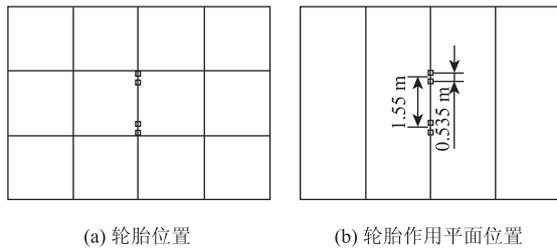


图3 荷载作用位置

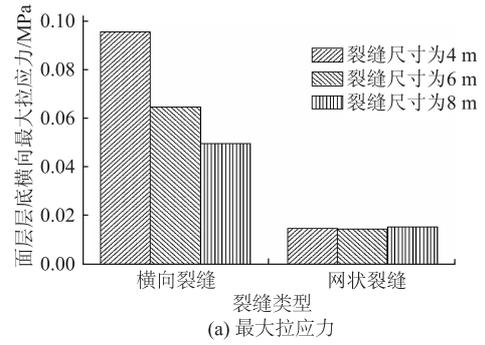
Fig. 3 Loading position

### 3.4 数值模拟计算结果分析

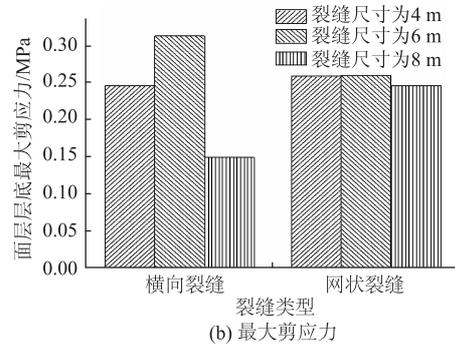
采用有限元软件,针对沥青路面结构类型计算出不同类型基层裂缝状态下的面层层底拉应力(层底剪应力)和基层层底拉应力(层底剪应力),具体见图4和图5(注:裂缝尺寸为横向裂缝间距或者网状裂缝边长)。

在行车荷载和温度荷载综合作用下,基层中产生的横向拉应力大于纵向拉应力,并且基层在行车方向受到的约束较大,基层层底拉应力超过抗压强度,基层就会开裂。无论是养生期间还是通车后,基层产生的裂缝多为横向裂缝。

为缓解交通压力,基层养生时间缩短,沥青面层提前铺筑,本实例要求基层养生1天后铺筑面层,通车后,基层在荷载和外界荷载作用下多产生网状裂缝。由图4和图5可以看出,基层处于网状裂缝状态时,沥青面层层底拉(剪切)应力和基层层底拉(剪)应力均小于基层处于横向裂缝时产生的应力,因此从减少横向裂缝对沥青路面力学状态的不



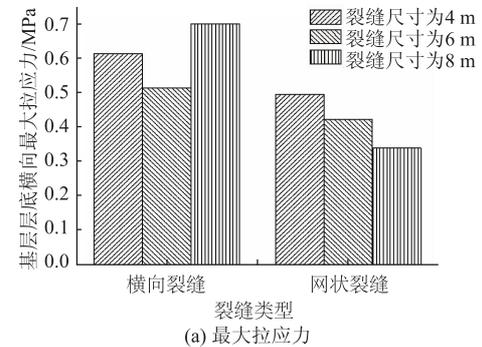
(a) 最大拉应力



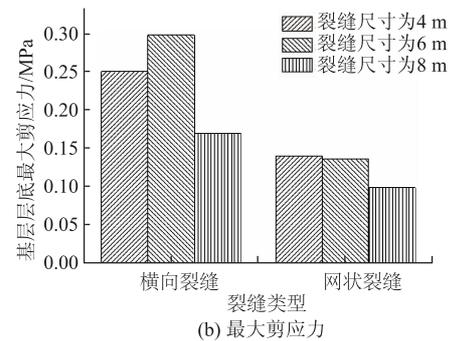
(b) 最大剪应力

图4 沥青面层层底拉应力和剪应力

Fig. 4 Tensile stress and shear stress on bottom of asphalt surface layer



(a) 最大拉应力



(b) 最大剪应力

图5 半刚性基层层底拉应力和剪应力

Fig. 5 Tensile stress and shear stress on bottom of semi-rigid base

利影响考虑,采用微裂技术对于实现基层快速修复具有一定的可行性。

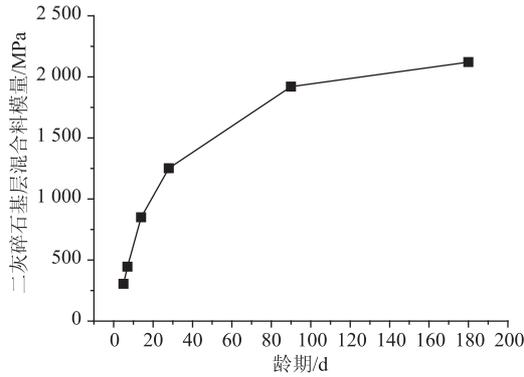


图 6 二灰碎石基层混合料回弹模量随龄期变化规律

Fig. 6 Laws of resilient modulus of lime-flyash mixture varying with age

#### 4 沥青面层疲劳寿命计算

沥青路面寿命包括 3 种: 第 1 种是表面车辙过大, 路面损坏; 第 2 种是沥青面层疲劳破坏; 第 3 种是半刚性基层的疲劳破坏。面层竖向应力大小是造成车辙的主要原因。相关研究表明, 基层模量对不同深度位置的竖向应力影响较小, 且随着基层模量的增加, 沥青面层的竖向应力增大, 沥青车辙增大, 采用微裂缝技术有利于对沥青路面抗车辙性能的提高; 未采用微裂缝技术的沥青路面, 其基层形成较宽的横向裂缝, 此时基层的疲劳寿命为横向裂缝形成贯穿裂缝的寿命, 它显然小于采用微裂缝技术的沥青路面的基层寿命。对于采用微裂缝技术的沥青路面, 在基层模量较小时, 沥青面层的层底拉应力较大, 对沥青面层产生了一定的疲劳损伤, 采用微裂缝技术的沥青路面面层的疲劳寿命要小于普通沥青路面面层的疲劳寿命。综上所述微裂缝技术对沥青面层的疲劳寿命的损失影响较大, 鉴于此本节计算采用微裂缝技术的沥青路面的面层疲劳寿命及普通沥青路面面层的疲劳寿命。

选用第 1 节的沥青路面结构 (A、B 和 C), 进行沥青路面疲劳寿命计算, 基层选用二灰碎石混合料, 选用文献 [6] 中二灰碎石混合料的配合比, 结合室内试验和文献 [6] 得出二灰碎石基层混合料的模量增长规律, 其中具体数据见表 4。在第 2 节的半刚性基层“三阶段”模量增长规律介绍中, 网状微细裂缝尺寸大于 1 m 时, 模量的增长与正常养生状态下的增长规律大致相同, 因此只要控制住网状微细裂缝的尺寸大于 1 m, 对微裂缝技术的相关计算就可以参考相同龄期下标准养生状态下基层的模量。

表 4 不同龄期段二灰碎石基层混合料回弹模量

Tab. 4 Resilient moduli of lime-flyash gravel base mixture in different ages

龄期/d	3	5	7	14	28	90	180
模量/MPa	34.6	305	445.29	850	1252.1	1920.4	2121.3

#### 4.1 采用微裂技术的沥青路面面层疲劳寿命计算

由于基层的空间网状微细裂缝分散荷载能力较强, 基层裂缝扩展极为缓慢, 这时沥青路面很少产生反射裂缝, 因此对采用快速修复基层技术的沥青路面寿命计算时, 可以忽略反射裂缝的影响, 基层模量增长规律采用文献 [6] 中的数据。

为防止通车前期荷载过大而压坏路面, 因此对沥青路面早期限重时, 面层的层底拉应力与面层底部劈裂强度的比值, 即应力比不能太大, 否则沥青面层会提前发生疲劳开裂<sup>[11]</sup>, 根据经验选取低应力比 0.5。本案例中下面层为粗粒径沥青混凝土, 劈裂强度 0.8 MPa, 因此沥青面层层底拉应力不应该超过 0.4 MPa, 否则沥青面层会在荷载作用下, 在较短时间内发生疲劳破坏。本实例中对基层养生 1 天, 铺筑面层 1 天, 因此通车时间为第 3 天, 为安全考虑, 需要计算基层最小模量下面层层底拉应力, 这样才能保证通车早期沥青路面不被压坏。计算 3 种沥青路面的层底拉应力为 0.4 MPa 时, 3 种沥青路面的极限荷载分别为: 17.25, 20.3 MPa 和 24 MPa, 为安全考虑, 3 种沥青路面设计荷载定为 17.25 MPa, 此时轴载为 70 kN。

将 BZZ-100 轴载计算出的疲劳寿命换算成单轴双轮组轴总重为 70 kN 的疲劳寿命<sup>[12]</sup>, 计算出此时标准荷载对沥青面层的疲劳损伤, 然后计算出换算荷载对沥青面层的疲劳损伤, 我们由上面的轴载换算公式可以得到:  $N_{70} = 4.72N_{100}$ 。

根据文献 [6] 中二灰碎石基层模量增长规律, 得到二灰碎石基层混合料在不同龄期段的回弹模量, 具体数据见表 5。利用有限元 ABQUS 软件, 对典型二灰碎石基层沥青路面进行计算, 得到不同龄期段沥青面层层底拉应力, 结合沥青混合料的疲劳方程<sup>[13]</sup>:  $N = 280d\delta^{-4.5}$ , 计算出对应不同龄期段的沥青面层疲劳寿命; 在疲劳寿命等效的原则下, 计算出沥青路面在不同龄期段的疲劳损伤; 最后计算出沥青面层的疲劳寿命, 其中不同龄期段内, 沥青面层层底拉应力和沥青面层疲劳寿命见表 5。(其中有 A、B 和 C 共 3 种沥青路面)

表5 不同龄期段沥青面层层底拉应力和沥青面层疲劳寿命

Tab.5 Tensile stresses on bottom of asphalt surface layer and fatigue lives of asphalt surface layer in different ages

龄期段/d		①3~5	②5~7	③7~14	④14~28	⑤28~90	⑥90~180	⑦>180
模量/MPa		169.8	375.2	647.7	1 051.1	1 586.3	2 020.9	2 121.3
沥青面层层底拉应力/MPa	A	0.344	0.247 6	0.194 2	0.155 7	0.128 9	0.115 4	0.112 9
	B	0.290 6	0.207 9	0.164 2	0.133 0	0.111 4	0.100 6	0.098 56
	C	0.252 2	0.182 3	0.144 2	0.117 6	0.099 70	0.090 90	0.089 29
沥青面层疲劳寿命/( $\times 10^6$ 次)	A	0.034	0.150	0.447	1.21	2.83	4.65	5.129
	B	0.073	0.33	0.95	2.45	5.45	8.62	9.45
	C	0.138	0.594	1.705	4.269	8.975	13.6	14.7

按照疲劳等效原则计算出每个龄期段“板体”状态下二灰碎石基层沥青路面的疲劳损伤,二灰碎石基层沥青路面在前3个月的的疲劳损伤分别为:

$$2 + 2 + 7 + 14 + 62 + 90 = 1.19 \text{ a};$$

$$2 + 2 + 7 + 14 + 62 + 90 = 1.14 \text{ a};$$

$$2 + 2 + 7 + 14 + 62 + 90 = 1.01 \text{ a}。$$

3条沥青路面设计年限均为15a,在正常通车时交通量年平均增长率为10%。最后计算出该条采用基层快速修复技术沥青路面的最小疲劳寿命分别为:

$$\text{沥青路面 A: } 5.129 - 0.72 = 4.4 \times 10^6 \text{ 次}。$$

$$\text{沥青路面 B: } 9.45 - 1.29 = 8.16 \times 10^6 \text{ 次}。$$

$$\text{沥青路面 C: } 14.7 - 0.72 = 12.93 \times 10^6 \text{ 次}。$$

#### 4.2 未采用微裂技术的沥青路面疲劳寿命计算

为验证快速修复基层技术的可行性,本小节采用4.1节相同的沥青路面结构,其中二灰碎石基层混合料的模量取2 121.3 MPa,采用有限元计算出此时的沥青面层层底拉应力和沥青面层疲劳寿命见表6。

表6 沥青路面疲劳寿命

Tab.6 Fatigue lives of asphalt pavement

沥青路面类型	沥青面层层底拉应力/MPa	沥青面层疲劳寿命/( $\times 10^6$ 次)
A	0.112 9	5.129
B	0.098 56	9.45
C	0.089 29	14.7

#### 4.3 基层快速修复技术分析

根据有限元软件计算出的采用和未采用微裂技术的沥青面层疲劳寿命结果,作出图7。3种半刚性基层沥青路面中采用微裂技术的沥青面层疲劳寿命和未采用微裂技术相比分别减少了14.2%,13.6%和12%,由此可以看出沥青面层越厚,采用快通基层技术的沥青面层寿命损失越少,采用微裂技术实现基层快速修复的可行性越高。

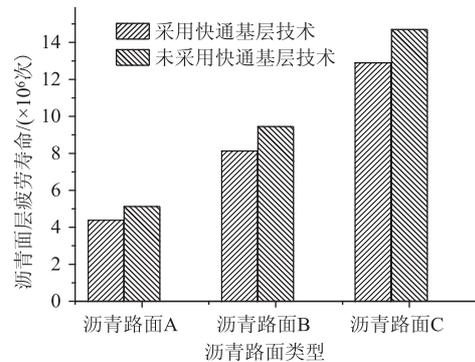


图7 沥青路面的疲劳寿命对比

Fig.7 Comparison of fatigue lives of asphalt pavement

## 5 结论

对拟定的理性模型下沥青路面的相关计算发现:

(1) 基层裂缝为尺寸为微细网状状态时,沥青面层(基层)层底拉应力和剪应力均小于基层裂缝为横向状态沥青路面的层底拉应力和剪应力。

(2) 采用微裂技术的沥青路面与未采用微裂技术的沥青路面相比疲劳寿命有所降低,但是降低较少,即微裂技术对沥青路面寿命影响不大。

由于空间裂缝对荷载的分散能力,空间网状微细裂缝的扩展速度极为缓慢。由此可以看出,微裂技术在实现基层快速修复的同时,还可以减少发生反射裂缝的概率,并且对沥青路面的寿命影响不大,因此,微裂技术作为一种基层快速修复的方式是可行的。

需要注意的是:文中网状微细裂缝的形式为了方便计算而拟定的,微裂缝技术在实际沥青路面应用中会出现很多不同的形式,如不同的宽度、不同的距离等,而不同的微裂缝形式对沥青路面力学响应有一定的影响,因此其他的微细裂缝形式下的沥青面层疲劳寿命有待研究。网状微细裂缝的形成是

通过沥青路面提前通车和限重来完成的,而具体如何去限定和控制裂缝的尺寸等参数有待于进一步的研究,但是能确定的是裂缝尺寸不是定值而是一个范围。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性 [J]. 中国公路学报, 2008, 21 (1): 1-5.  
SHA Ai-min. Material Characteristics of Semi-rigid Base [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (1): 1-5.
- [2] 李海滨. 基于半刚性基层适应性的沥青路面结构研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.  
LI Hai-bin. Study of Asphalt Pavement Structure Based on Adaptability of Semi-rigid Base [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [3] 韦金城. 沥青路面半刚性基层材料与结构疲劳损伤研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.  
WEI Jin-cheng. Research on Fatigue Damage of Semi-rigid Base Material and Structure of Asphalt Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [4] 李文辉. 应用土工织物防治复合式路面荷载型反射裂缝的试验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.  
LI Wen-hui. Experimental Research on Composite Pavement using Geotextiles to Reflection Cracking Caused by Loads [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [5] 蒋应军, 戴经梁. 土工织物在道路工程防裂中的应用 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27 (4): 18-22.  
JIANG Ying-jun, DAI Jing-liang. Application of Geotextile in Preventing Reflection Cracks in Asphalt Pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27 (4): 18-22.
- [6] 祝新念. 沥青路面二灰碎石基层应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.  
ZHU Xin-nian. The Application Study on Lime Flyash Crush Stone Base Course of Asphalt Pavements [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [7] 熊向辉. 高速公路沥青路面半刚性基层研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.  
XIONG Xiang-hui. Study on Semi-rigid Base of Expressway Asphalt Pavement [D]. Dalian: Dalian University, 2009.
- [8] 姚占勇, 练继建, 任宪勇. 半刚性路面基层开裂的力学响应 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (12): 2250-2254.  
YAO Zhan-yong, LIAN Ji-jian, REN Xian-yong. Mechanical Responses of Base Cracking in Semi-rigid Pavement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (12): 2250-2254.
- [9] 刘敬辉, 王端宜. 采用半刚性基层预裂缝技术减少反射裂缝的方法研究 [J]. 中外公路, 2009 (3): 70-75.  
LIU Jing-hui, WANG Duan-yi. Application of Pre-Cracking in Semi-rigid Base to Mitigate Reflective Cracking [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009 (3): 70-75.
- [10] 王宏畅, 黄晓明. 高等级沥青路面基层底裂缝三维数值分析 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (12): 1-4.  
WANG Hong-chang, HUANG Xiao-ming. Three-dimensional Numerical Analysis for Crack at Bottom of Asphalt Pavement Base Course [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 27 (12): 1-4.
- [11] 陈东鹏, 童申家. 倒装结构沥青路面面层底拉应变分析 [J]. 公路工程, 2010, 35 (1): 79-81.  
CHEN Dong-peng, TONG Shen-jia. Tensile Strain Analysis of Inverted Bituminous Pavement Structure at the end Surface Layers [J]. Highway Engineering, 2010, 35 (1): 79-81.
- [12] 王辉, 武和平. 半刚性基层沥青路面按弯沉等效的轴载换算公式的研究 [J]. 公路, 2002 (4): 19-21.  
WANG Hui, WU He-ping. Research on Axle Exchange Formula Based on Deflection Equivalent for Semi-Rigid Base Asphalt Pavement [J]. Highway, 2002 (4): 19-21.
- [13] 赵磊. 沥青混合料疲劳性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.  
ZHAO Lei. Fatigue Performance of Asphalt Mixes [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.