

下封层连接状况对沥青路面疲劳寿命的影响

张丽萍¹, 吕馥宏², 张敏江², 孙兆涛³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 辽宁有色勘察研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110013)

摘要 目的 研究橡胶沥青碎石封层、乳化沥青碎石封层、稀浆封层和热沥青碎石封层的层间连接状况对路面疲劳寿命的影响. 方法 通过室内剪切试验测得不同下封层的连接状况; 并依据试验结果, 采用多层弹性体系理论方法, 计算当基面层间应用不同下封层时无机结合料稳定层的层底拉应力和疲劳开裂寿命; 最后, 在辽宁省范围内, 选取典型路线对下封层的应用状况进行实地调研和后评估. 结果 室内试验和理论分析表明下封层的连接状况越好, 沥青路面的疲劳寿命越大; 现场调研与室内试验、理论分析结果基本一致. 结论 当基面层间应用下封层技术时, 四种下封层技术的层间连接效果依次减弱, 对应路面的疲劳寿命依次减小.

关键词 下封层; 层间连接; 路面疲劳寿命; 沥青路面

中图分类号 TU391 文献标志码 A

Influence of the Lower Seal Coat Connection Effect on Fatigue Life of Asphalt Pavement

ZHANG Liping¹, Lü Fuhong², ZHANG Minjiang², SUN Zhaotao³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Liaoning Youse Investigation Institute Co. Ltd., Shenyang, China, 110013)

Abstract: The paper is to study the effect of interlaminar joint condition of rubber asphalt gravel seal, emulsified asphalt gravel seal, slurry seal and hot asphalt gravel seal on pavement fatigue life. It makes use of indoor shear test to measure the connection condition of different lower seal layers. According to the test results, the multi-layer elastic system theory method is used to calculate the layer bottom tensile stress and fatigue cracking life of subbase when different lower seal layers are applied between the base and the surface layer. Finally, within the scope of Liaoning Province, the typical route was selected to conduct on-the-spot investigation and post-evaluation of the application effect of the lower seal layer. The indoor test and theoretical analysis show that the better the connection condition of the lower seal layer, the greater the fatigue life of the asphalt pavement. The field investigation is basically consistent with the results of laboratory tests and theoretical a-

收稿日期: 2019-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608334)

作者简介: 张丽萍(1964—), 女, 高级实验师, 主要从事土木工程材料方面研究.

analysis. When the lower seal coat technology is applied between the base and surface layer, the interlayer connection effect of the above four lower seal layer technologies is weakened in turn, The fatigue life of the corresponding asphalt pavement is reduced sequentially.

Key words: lower seal coat; interlayer connection; pavement fatigue life; asphalt pavement

下封层是指设置在沥青路面基层层间,用来加强层间连接、防止水损害和延缓反射裂缝扩展的沥青混合料薄层。目前,无机结合料稳定类基层沥青路面因其强度高、抗永久变形能力强等优点,在我国高等级公路中广泛应用^[1]。但由于基层层间薄弱,路面常发生推移、疲劳开裂等病害,降低了路面的疲劳寿命。为此,我国普遍采用下封层技术来加强面层和基层的层间连接,保证沥青路面的使用性能^[2]。

近年来,关于沥青路面的层间连接状况对路面疲劳寿命的影响,国内外相关领域的学者进行了大量研究。徐真真^[3]对透层和下封层的应用效果进行了实地调研,表明封层技术的防水效果和粘结效果良好。史军强^[4]针对不同基层层间接触状态对路面疲劳寿命的影响程度进行了研究,研究表明完全滑动状况与完全连续状况相比,路表弯沉和最大剪应力控制下的路面疲劳寿命分别减小了40%和87%;张争奇等^[5]研究了沥青路面在不同基层层间连接状况下,路面疲劳寿命的变化情况,结果表明:当基层层间的连接作用减弱时,路面的疲劳寿命呈先缓慢变小、再急剧变小的趋势。龚红仁^[6]通过研究无水平力时层间状态对疲劳寿命的影响,发现层间状态由连续向非连续转变时,沥青路面的疲劳寿命急剧下降,层间半连续状态与光滑状态时的疲劳寿命无显著差异;李彦伟等^[7]研究发现,采用精铣刨、胶粉改性沥青封层可以有效改善基层层间的接触状态,极大地提高了沥青路面疲劳寿命;郭寅川等^[8]通过沥青路面下封层的力学响应分析得出,提高下封层的层间连接性能,可以大幅提高路面的疲劳寿命。刘丽^[9]选取热沥青碎石封层和稀浆封

层为研究对象,进行沥青路面下封层材料试验研究及技术性能比较,得到碎石封层的层间抗剪强度、抗拉拔强度明显大于稀浆封层。以上的研究表明沥青路面的疲劳寿命随着基层层间的连接效果增强而增加。因此下封层技术在加强层间连接的同时,沥青路面疲劳寿命也得到了提高。但上述研究对疲劳寿命随层间连接状况加强的增长规律没有统一的结论;且未针对不同下封层技术对路面疲劳寿命的影响程度开展研究。再者,我国应用的下封层技术类型主要有橡胶沥青碎石封层、乳化沥青碎石封层、稀浆封层和热沥青碎石封层,但对于四种下封层技术的层间连接性能优劣,并没有统一的结论。因此,实际工程中,对于下封层类型的选择,随意性比较大。此外,目前的研究方法均根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)的相关要求,而现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)改变了沥青路面疲劳寿命的计算方法。

基于此,笔者针对我国主要应用的4种下封层技术,即橡胶沥青碎石封层、乳化沥青碎石封层、稀浆封层和热沥青碎石封层,采用层间直剪试验方法获得4种下封层技术的摩擦系数,以此来比较不同下封层技术的层间连接性能。根据现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017),利用多层弹性体系理论方法,计算基层层间连接状况不同时水泥稳定碎石基层的层底拉应力和疲劳开裂寿命,并根据直剪试验得到的4种下封层材料摩擦系数,从理论上分析不同下封层的层间连接状况对沥青路面疲劳寿命的影响。研究表明:下封层的连接状况越好,沥青路面的疲劳寿命越大;现场调研与室内试验、理论分析

结果基本一致.当基层间应用下封层技术时,上述四种下封层技术的层间连接效果依次减弱,对应路面的疲劳寿命依次减小.

1 下封层连接性能试验

下封层连接性能试验通过室内直接剪切试验完成,将各种下封层按照工程中常用的配合比置于沥青混凝土面层和水泥稳定碎石基层之间,测得到四种下封层材料的摩擦系数 $\tan\varphi$,并比较四种下封层技术的层间连接状况.

1.1 试验原理

本试验的设备为层间直接剪切仪,如图1所示.通过直接剪切仪分别对试件施加竖向压力和水平力作用.将竖向压力设为某一定值 I_σ ,然后逐渐增大水平力.当试件达到最大抗剪强度时,试件会沿着沿固定的剪切面(下封层与水泥稳定碎石基层的接触面)发生剪切破坏,记录此时的水平压力值 I_τ ,根据式(1)和式(2)计算出作用在剪切面上的正应力 σ 和剪应力(抗剪强度) τ_f .改变竖向荷载大小,得到不同正应力下对应的抗剪强度,绘制出 $\sigma - \tau_f$ 曲线,利用最小二乘法计算得到曲线斜率,即 $\tan\varphi$. $\tan\varphi$ 值越大,则下封层技术的层间连接状况越好^[10].

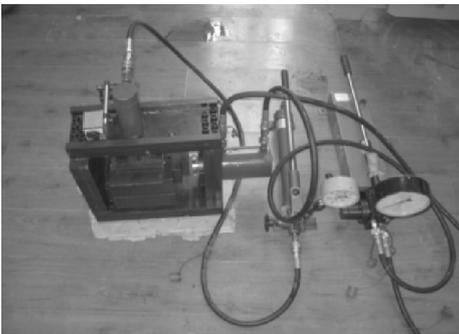


图1 层间直接剪切试验仪

Fig. 1 Inter-layer direct shear apparatus

$$\sigma = \frac{I_\sigma \cdot S_V + G}{S_j} \quad (1)$$

式中: σ 为正应力,MPa; I_σ 为竖向压力值,MPa; S_V 为竖向油缸活塞面积, m^2 ; G 为传压铁块和滚珠轴承的总重,MN; S_j 为剪切面

积, m^2 .

$$\tau_f = \frac{I_\tau \cdot S_h}{S_j} \quad (2)$$

式中: τ_f 为剪应力,MPa; I_τ 为剪切破坏时水平压力值,MPa; S_h 为水平油缸活塞面积, m^2 .

1.2 试验方案

直接剪切试验试件的长 \times 宽 \times 高为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$. 沥青混合料层为 65 mm 厚的 AC-16 沥青混凝土. 下封层厚度为 10 mm . 碎石封层采用单一粒径,大小为 $4.75 \sim 9.5 \text{ mm}$, 沥青胶结料和碎石的用量分别为 2.0 kg/m^2 和 12 kg/m^2 ; 稀浆混合料的配合比为 $m(\text{集料}):m(\text{乳化沥青}):m(\text{水泥}):m(\text{水}) = 100:15:2.5:10$. 基层为水泥稳定碎石,其厚度为 75 mm ,水泥稳定碎石材料的水泥用量为 5.5% ,含水量为 5% ^[11-14].

为使试件分别在不同的竖向压力下发生剪切破坏,通过式(1)计算得到试件受到的竖直应力依次是 0 MPa 、 0.4 MPa 、 0.8 MPa 、 1.2 MPa 、 1.6 MPa 、 2.0 MPa ,故对于每种下封层技术,需要进行 6 组不同正应力下直接剪切试验,每组试验包括 3 个平行试验.

试件成型基本步骤如下:

(1) 水泥稳定碎石基层的成型. 在长 \times 宽 \times 高为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 的模具中静压成型,养生 7 天后,脱模,放入长 \times 宽 \times 高为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的模具中.

(2) 下封层的成型. 下封层的控制厚度为 10 mm . 不同下封层技术的成型方法如下,橡胶沥青碎石封层:在基层上均匀洒布橡胶沥青后,迅速均匀撒布碎石,锤击压实,其中橡胶沥青要加热到 $180 \text{ }^\circ\text{C}$,碎石要加热到 $190 \text{ }^\circ\text{C}$;热沥青碎石封层:在基层上均匀洒布 $160 \text{ }^\circ\text{C}$ 的基质沥青后,迅速将 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 的碎石均匀撒布在沥青上,锤击压实. 稀浆封层:将充分拌合的稀浆混合料洒布在成型好的基层上,锤击压实. 乳化沥青碎石封层:将常温的乳化沥青均匀洒布在基层上后,将常温的碎

石迅速均匀地撒布在乳化沥青上,锤击压实.

(3)沥青混合料面层的成型.将拌合完毕的沥青混合料铺在下封层上,利用压力成型机在面层顶面施加竖向压力,逐渐加载至2.25 kN时,停止加载,面层厚度为65 mm.

(4)将试件放置24 h后,脱模^[15-17].

1.3 试验结果和分析

依照试验方案,依次对成型的试件进行直接剪切试验,根据试验结果绘制 $\sigma - \tau_f$ 曲线.图2~图5分别为6种下封层技术对应的 $\sigma - \tau_f$ 曲线.

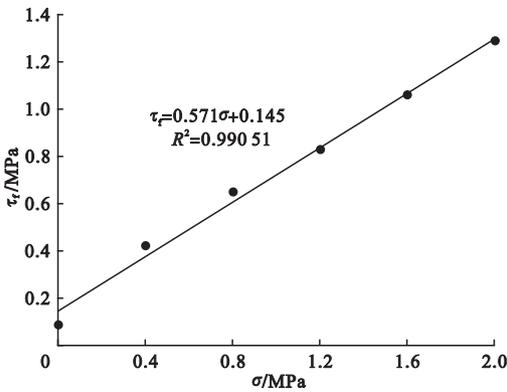


图2 橡胶沥青碎石封层下 $\sigma - \tau_f$ 曲线

Fig. 2 $\sigma - \tau_f$ curve for rubber asphalt gravel seal

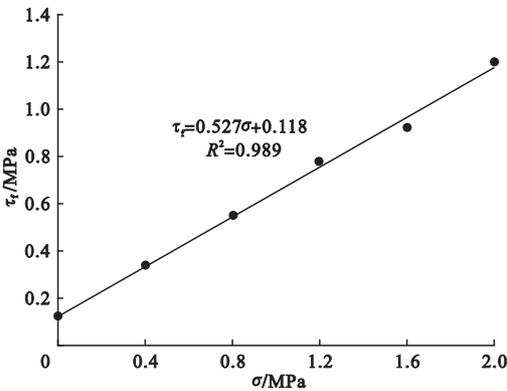


图3 乳化沥青碎石封层下 $\sigma - \tau_f$ 曲线

Fig. 3 $\sigma - \tau_f$ curve for emulsified asphalt gravel seal

由图2~图5可知,随着正应力增加,层间抗剪强度不断增大,4种下封层技术对应的 σ 和 τ_f 关系成正比例函数,根据最小二乘法计算出直线斜率,即下封层材料的摩擦系数($\tan\varphi$).表1列出了4种下封层材料的摩擦系数.

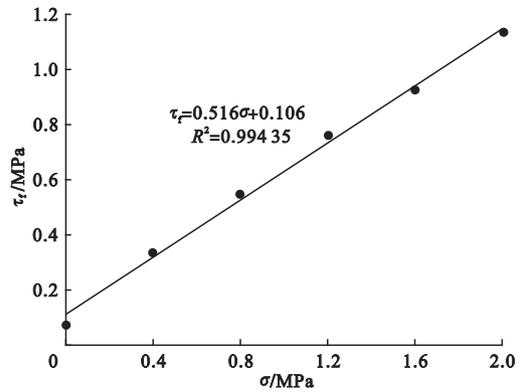


图4 稀浆封层下 $\sigma - \tau_f$ 曲线

Fig. 4 $\sigma - \tau_f$ curve for slurry seal

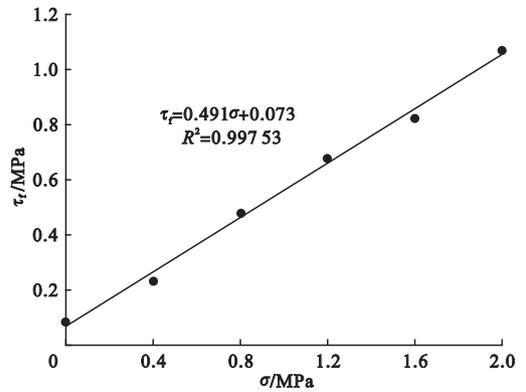


图5 热沥青碎石封层下 $\sigma - \tau_f$ 曲线

Fig. 5 $\sigma - \tau_f$ curve for hot asphalt gravel seal

表1 不同下封层材料的摩擦系数

Table 1 Friction coefficient of different lower seal coat

下封层类型	$\tan\varphi$
橡胶沥青封层	0.571
乳化沥青碎石封层	0.527
稀浆封层	0.516
热沥青碎石封层	0.491

由表1可知,热沥青碎石封层、稀浆封层、乳化沥青碎石封层、橡胶沥青碎石封层的摩擦系数依次增大,可见几种下封层技术的层间连接效果依次增强.

2 下封层对路面疲劳寿命的影响分析

为了分析下封层的层间连接效果对沥青路面疲劳寿命的影响,采用剪切弹性柔量作为层间连接状况的设置参数,视为在面层和

基层之间有一个薄层,其厚度无限小,用弹性柔量来表征其强度.剪切弹性柔量的计算方法为

$$ALK = \frac{\delta}{1 - \delta} \cdot a \quad (3)$$

式中: ALK 为剪切弹性柔量, m ; a 为标准荷载当量圆半径, m ; δ 为滑动系数, $0 \leq \delta < 1$, 当 $\delta = 0$ 时, 基层间完全连续, 当 δ 接近 1 时, 基层间完全滑动. 滑动系数 δ 与摩擦系数 $\tan\varphi$ 的关系为: $\delta = 1 - \tan\varphi$.

2.1 路面计算模型的建立

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017), 选择合适的结构层组成类型、各结构层的层厚及材料技术指标参数, 如表 2 所示.

表 2 计算模型的结构层组成类型、各结构层的层厚及材料技术指标参数

Table 2 Material technical index parameters for structural layer composition with different layer thickness

层位及材料	层厚/cm	模量/MPa	泊松比
AC-13 表面层	4	8 000	0.25
AC-16 下面层	6	10 000	0.25
水泥稳定碎石基层	20	19 000	0.25
水泥稳定碎石底基层	20	19 000	0.25
土基	—	60	0.40

层间连接设置方式: 除基层间连接状况可变外, 其余各层间完全连续.

计算荷载: 采用标准双圆垂直均布荷载, 即 BZZ-100, 荷载作用半径 r 为 0.1065 m, 轮胎与地面的接触压强为 0.7 MPa, 双轮中心的距离为 31.95 cm, 水平力系数为 0.

计算点的选取: 将坐标原点设置在轮隙中心, 道路纵断面为 X 轴, 道路横断面为 Y 轴, 路面深度为 Z 轴. 由于荷载及路面结构关于 X 轴、 Y 轴对称, 故计算点仅考虑 X 轴的正半轴和 Y 轴的正半轴, 则计算点选取方法为: 在 Y 轴正方向上, 取 6 个坐标点, 间距为

$0.5r$; 在 X 轴正方向上, 取 16 个坐标点, 间距为 $0.5r$ [18].

2.2 不同下封层技术对路面疲劳寿命影响的对比分析

根据现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017), 无机结合料稳定粒料类基层沥青路面的路面疲劳开裂验算指标为无机结合料稳定层(文中所述水泥稳定碎石底基层)的层底最大拉应力, 根据式(4)计算路面的疲劳开裂寿命.

$$N_{T2} = k_a k_{T2}^{-1} 10^{a - b \frac{\sigma}{R_s} + k_c - 0.57\beta} \quad (4)$$

改变基层间连接状态, 计算不同位置处无机结合料稳定层的层底拉应力. 图 6 展示了在不同基层间摩擦系数 $\tan\varphi$ 情况下底基层的层底最大拉应力 σ_t 以及数据的曲线拟合结果.

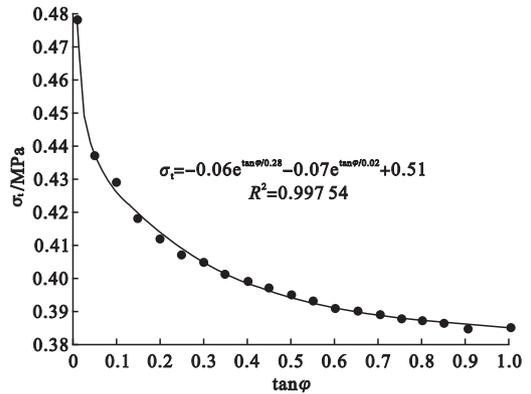


图 6 不同层间连接状况下底基层的层底最大拉应力

Fig. 6 Maximum tensile stress at the bottom of the base for different interlayer connections

由图 6 可知, σ_t 和 $\tan\varphi$ 的关系呈指数函数关系, 随着基层间的连接状况不断增强, 底基层的层底最大拉应力逐渐减小, 且变化幅度不断减小, 当 $0 \leq \tan\varphi < 0.6$ 时, 减小幅度较大; 当 $\tan\varphi \geq 0.6$ 时, 减小幅度较小, 可忽略不计. 当基层间完全连续时, 层底最大拉应力最小, 仅为 0.385 MPa, 较层间完全滑动下降了 20%.

图 7 展示了当基层间连接状况发生改

变时,路面的疲劳开裂寿命 N_f 变化情况和数据的曲线拟合结果.

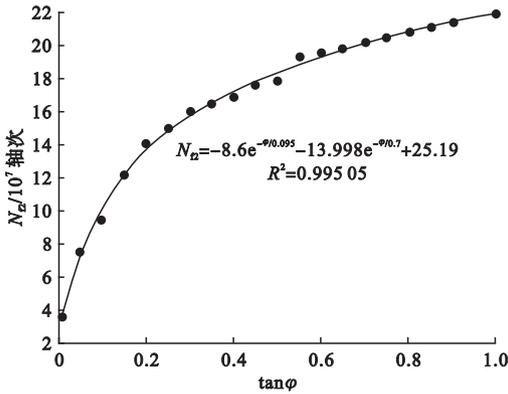


图7 不同层间连接状况下沥青路面的疲劳寿命
Fig.7 Fatigue life of asphalt pavement under different interlayer connections

由图7可知, N_f 和 $\tan\varphi$ 的关系呈指数函数关系,随着基层间的摩擦系数不断增大,路面的疲劳寿命逐渐增长,但变化幅度逐渐减小.当 $0 \leq \tan\varphi < 0.6$ 时,增加幅度较大;当 $0.6 \leq \tan\varphi \leq 1$ 时,增加幅度较小,可忽略不变.当基层间完全滑动时,沥青路面的疲劳寿命最小,为 3.6×10^7 轴次.当基层间完全连续时,沥青路面的疲劳寿命最大,为 2.17×10^8 轴次,较完全滑动增大了5倍.因此,增强基层间的连接,可以延长沥青路面的疲劳寿命.

3 下封层技术应用效果调研和后评估

为了验证室内试验和理论分析的准确性,笔者在辽宁省沥青路面干线公路中选择实施四种下封层技术的典型路线,记录调研路线的路面结构和已作用的大型客货车数量等基本信息,检测路面疲劳病害情况,根据现场调研结果,对应用不同下封层技术时对应沥青路面的疲劳寿命进行评估.

3.1 调研路线信息

为保证下封层技术应用效果调研和后评估的可信度,在辽宁省范围内充分选择具有代表性的路线,将调研路线进行汇总(见

表3).

表3 现场调研路线汇总

Table 3 Summary of site survey routes

下封层技术类型	调研路线	路线所在地区	里程/km
橡胶沥青碎石封层	十大线	新民市	2.2
	库二线	黑山县	4.5
	沈环线	铁岭市	15.0
	丹霍线	本溪市	17.8
	京哈线	黑山县	4.0
	京哈线	新民市	1.8
稀浆封层	黑大线	抚顺市	3.0
	集本线	本溪市	34.9
	彰桓线	抚顺市	62.0
	傅桓线	抚顺市	29.5
乳化沥青碎石封层	明沈线	沈阳市	1.8
	京沈线	新民市	1.2
	阜锦线	锦州市	2.3
	京哈线	新民市	1.8
	十大线	新民市	1.6
热沥青碎石封层	彰桓线	开原市	10.2
	彰桓线	昌图县	24.5
	沈海线	鞍山市	11.0
	鸡高线	鞍山市	6.0

3.2 实地调研后路面疲劳寿命评估

3.2.1 疲劳寿命评价的影响因素

沥青路面的疲劳寿命除了与实施的下封层技术类型有关外,还与调查时路面已经承受的荷载作用次数(累计交通量),面层厚度,以及下封层施工质量和地区自然气候条件有关.为此,应根据这些因素的影响程度,提出评估指标的计算方法.

3.2.2 实地调研后路面疲劳寿命评估指标

采用疲劳寿命评估指数 M_{pi} 对现场调研路线的沥青路面疲劳寿命进行评估. M_{pi} 的计算方法如式(5)所示:

$$M_{pi} = \eta_{ne} \eta_{th} S_{pi} \quad (5)$$

式中: S_{pi} 为下封层技术抑制路面疲劳开裂的效果评分; η_{ne} 为交通量影响系数; η_{th} 为面层厚度影响系数.

3.3 不同下封层技术的后评估结果

根据实地调研数据,计算路面疲劳寿命指数 M_{pi} 计算结果如表4所示。

表4 应用不同下封层技术时路面疲劳寿命指数

下封层技术类型	M_{pi}
橡胶沥青碎石封层	79.96
乳化沥青碎石封层	65.91
稀浆封层	65.45
热沥青碎石封层	61.97

由表4可知,当基层间应用不同下封层技术时,若为橡胶沥青碎石封层,沥青路面的疲劳寿命指数最大。若为热沥青碎石封层,则路面疲劳寿命指数最小,较橡胶沥青碎石封层下降了22%。若为乳化沥青碎石封层和稀浆封层,路面疲劳寿命指数分别为橡胶沥青碎石封层的82.4%和81.9%,乳化沥青碎石封层和稀浆封层的疲劳寿命指数相差不大。

3.4 现场调研与理论研究的对比分析

由现场调研可知,基层间应用不同下封层技术时,沥青路面的疲劳寿命有明显的差别,橡胶沥青碎石封层最大,其次是乳化沥青碎石封层、稀浆封层、热沥青碎石封层,这与直接剪切试验和理论分析所得的结论相一致。

3.5 不同下封层技术的应用条件

根据以上分析所得结论,笔者提出如下不同下封层技术的应用条件:当基层间应用下封层技术时,若交通等级为特重或极重,建议采用橡胶沥青碎石封层;若为重交通,建议采用乳化沥青碎石封层或稀浆封层。若交通等级为重交通以下,建议采用热沥青碎石封层。

4 结论

(1)由直接剪切试验可知,四种下封层技术的层间连接性能从高到低排序为:橡胶

沥青碎石封层,乳化沥青碎石封层,稀浆封层,热沥青碎石封层。

(2)由理论分析可知,随着基层间连接作用加强,沥青路面的疲劳寿命不断增大,但增大幅度逐渐减小。当基层间的 $\tan\varphi < 0.6$ 时,疲劳寿命随层间连接作用加强而显著增加;当 $\tan\varphi \geq 0.6$ 时,疲劳寿命的增幅较小。当基层间完全连续时,沥青路面的疲劳寿命较完全滑动时增大了5倍。因此,增强基层间的连接效果,可以延长沥青路面的疲劳寿命。

(3)由下封层技术应用效果调研和后评估可知:当在基层间应用处治技术时,若技术类型为橡胶沥青碎石封层,其对应沥青路面的疲劳寿命最大。若为热沥青碎石封层,其对应沥青路面的疲劳寿命最小,较橡胶沥青碎石封层下降了22%。若为乳化沥青碎石封层和稀浆封层,其路面疲劳寿命分别为橡胶沥青碎石封层的87%和82%。

(4)室内试验、理论分析和现场调研结果具有一致性,综合可得:下封层的层间连接状况影响沥青路面的疲劳寿命,当基层间应用不同下封层技术时,路面疲劳寿命从大到小的顺序为:橡胶沥青碎石封层、乳化沥青碎石封层、稀浆封层、热沥青碎石封层。

参考文献

- [1] 赵含. 碎石封层评价方法与层间粘结性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
(ZHAO Han. Study on gravel seal evaluation method and interlayer bonding properties[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2010.)
- [2] 王火明,凌天清,肖友高,等. 刚柔复合式路面界面层强度特性试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2009,28(6):1033-1036.
(WANG Huoming, LING Tianqing, XIAO Yougao, et al. Experimental study on interface layer strength characteristics of rigid-flexible composite pavement[J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science edition), 2009,28(6):1033-1036.)
- [3] 徐真真. 半刚性基层路面层间处治技术研究[D]. 西安:长安大学,2012.
(XU Zhenzhen. Study on interlayer treatment technology of semi-rigid base course [D].

- Xi'an; Chang'an University, 2012.)
- [4] 史军强. 基层间接触状态对路面疲劳寿命的影响分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016(5): 141-143.
(SHI Junqiang. Analysis of the influence of the contact state between the base and the surface on the fatigue life of the pavement[J]. Journal of highway and transportation technology (application technology edition), 2016(5): 141-143.)
- [5] 张争奇, 张苛, 罗要飞. 层间接触位置和状态对沥青路面力学指标的影响[J]. 公路工程, 2015, 40(5): 1-6.
(ZHANG Zhengqi, ZHANG Ke, LUO Yaofei. Influence of interlayer contacting surface and condition on mechanical indexes of asphalt pavement[J]. Highway engineering, 2015, 40(5): 1-6.)
- [6] 龚红仁, 邹晓翎, 朱洪洲, 等. 层间状态对沥青路面疲劳开裂与位移的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12): 66-70.
(GONG Hongren, ZOU Xiaoling, ZHU Hongzhou, et al. Influence of interfacial bond on fatigue crack and displacement of asphalt pavement[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2012, 34(12): 66-70.)
- [7] 李彦伟, 穆柯, 石鑫, 等. 沥青路面基层间结合状态的数值分析[J]. 天津大学学报, 2012(5): 88-92.
(LI Yanwei, MU Ke, SHI Xin, et al. Numerical analysis on cohesion between base and surface courses of asphalt pavement[J]. Journal of Tianjin university, 2012(5): 88-92.)
- [8] 郭寅川, 申爱琴, 张金荣, 等. 沥青路面下封层力学响应及抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 20-26.
(GUO Yinchuan, SHEN Aiqin, ZHANG Jinrong, et al. Shear strength test and mechanical response of lower seal coat for asphalt pavement[J]. Chinese journal of highways, 2010, 23(4): 20-26.)
- [9] 张秋福. 超薄路面层间抗剪强度研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
(ZHANG Qiufu. Research on interlaminar shear strength of ultra-thin pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.)
- [10] 刘丽, 郝培文. 沥青路面下封层材料试验研究及技术性能比较[J]. 中外公路, 2011, 31(4): 217-220.
(LIU Li, HAO Peiwen. Experimental study and technical performance comparison of asphalt pavement under sealing materials[J]. China foreign highway, 2011, 31(4): 217-220.)
- [11] 李晶. 沥青路面层间处治技术及其应用[D]. 西安: 长安大学, 2015.
(LI Jing. Interlayer treatment technology and application of asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)
- [12] 武书华, 陈华鑫, 张久鹏, 等. 半刚性基层沥青路面层间界面力学特性与黏结状态的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 406-412.
(WU Shuhua, CHEN Huaxin, ZHANG Jiupeng, et al. Experimental study on interface mechanical properties and bonding state of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2016, 46(2): 406-412.)
- [13] 林天发, 陈明, 陈景, 等. 同步加纤碎石下封层配合比设计及路用性能研究[J]. 中外公路, 2014, 34(6): 268-272.
(LIN Tianfa, CHEN Ming, CHEN Jing, et al. Study on mix design and road performance of synchronous addition and gravel stone sealing layer[J]. China foreign highway, 2014, 34(6): 268-272.)
- [14] 王俭. 同步碎石应力吸收层在层间处治中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
(WANG Jian. Application of synchronous crushed stone stress absorbing layer in interlayer treatment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)
- [15] 张俊, 武泽锋. CAPE封层设计与施工技术要点[J]. 公路, 2012(13): 166-170.
(ZHANG Jun, WU Zefeng. Key points of CAPE sealing design and construction technology[J]. Highway, 2012(13): 166-170.)
- [16] 虎增福. 道路用乳化沥青的生产与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
(HU Zengfu. Production and application of emulsified asphalt for roads[M]. Beijing: People's Communications Press, 2012.)
- [17] OH J H, CHEN D H, WALUBITA L F, et al. Mitigating seal coat damage due to super heavy load moves in Texas low volume roads[J]. Construction and building materials, 2011, 25(8): 3236-3244.
- [18] 庞婵, 黄泽国, 莫辉. 薄层橡胶沥青加铺层结构层间剪应力研究[J]. 中外公路, 2017, 37: 32-35.
(PANG Chan, HUANG Zeguo, MO Hui. Study on interlaminar shear stress of thin rubber asphalt overlay structure[J]. Chinese and foreign highway, 2017, 37: 32-35.
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)