

文章编号:1671-1637(2016)03-0028-07

## 半刚性基层双层连续摊铺层间结合状态

乔志<sup>1,2</sup>, 王选仓<sup>1</sup>, 张志芳<sup>3</sup>, 赵胜<sup>4</sup>, 刘祖臣<sup>5</sup>, 徐子涛<sup>1</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 内蒙古自治区交通建设工程质量监督局, 内蒙古呼和浩特 010020;  
3. 内蒙古高等级公路建设开发有限责任公司, 内蒙古呼和浩特 010050; 4. 内蒙古路桥有限责任公司,  
内蒙古呼和浩特 010050; 5. 呼伦贝尔市公路勘测规划设计有限公司, 内蒙古呼伦贝尔 021008)

**摘要:**为了提高寒冷地区道路基层使用寿命,研究了半刚性基层层间黏结机理,设计了适用于基层试件的直剪模具,对基层层间抗拉强度和抗剪强度进行试验,分析了不同摊铺方法对基层层间结合效果的影响。运用BISAR3.0软件,设定了不同的层间摩擦因数,在不同层间结合状态下计算了各结构层层底拉应力分布情况,提出了适用于北方寒冷地区沥青混合料与水稳碎石混合料的疲劳方程,计算了双层连续摊铺工艺下路面的使用寿命。计算结果表明:采用双层连续摊铺时,基层试件层间抗拉性能较传统试件提高了1.8倍,但仅达到了标准试件抗拉强度的37.9%,双层连续摊铺距离层间结合理想状态(完全连续)还有一定的差距;在抗剪强度上,双层连续摊铺相比于传统摊铺工艺提高了7.3倍,采用双层连续摊铺施工可以有效改善基层路用性能;随着层间摩擦因数的提高,各结构层层底拉应力不断减小。可见,双层连续摊铺可以有效提高半刚性基层层间结合效果,改善层底应力分布,使路面结构寿命提高了16.1%~47.4%。

**关键词:**路面工程;半刚性基层;双层连续摊铺;层间黏结;使用寿命

**中图分类号:**U416.2 **文献标志码:**A

## Interlayer combination state of double-layer continuous paving semi-rigid base

QIAO Zhi<sup>1,2</sup>, WANG Xuan-cang<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-fang<sup>3</sup>, ZHAO Sheng<sup>4</sup>, LIU Zu-chen<sup>5</sup>, XU Zi-tao<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Inner Mongolia Traffic Construction Engineering Quality Supervision Bureau, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia High-Grade Highway Construction and Development Co., Ltd., Hohhot 010050, Inner Mongolia, China; 4. Inner Mongolia Luqiao Co., Ltd., Hohhot 010050, Inner Mongolia, China; 5. Hulunbeier City Highway Investigation Planning Design Company Limited, Hulun Buir 021008, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** In order to improve the service life of road base in cold area, the bonding mechanism of semi-rigid base was studied, and the direct shear mould for base layer specimen was designed. Based on the tests of tensile strength and shear strength of base layer, the influences of different paving methods on the combination effect of base layer were analyzed. By using software BISAR3.0, different interlayer friction coefficients were set, the distributions of tensile stress at the bottom of each structure were calculated under different interlayer combination states. The fatigue equations of asphalt mixture and water stable crushed stone mixture suitable for northern cold area were put forward, and the service life

收稿日期:2016-01-08

基金项目:内蒙古自治区交通科技项目(NJ-2014-017)

作者简介:乔志(1974-),男,内蒙古和林格尔人,内蒙古自治区交通建设工程质量监督局高级工程师,长安大学工学博士研究生,从事路基路面研究。

导师简介:王选仓(1956-),男,陕西西安人,长安大学教授,工学博士。

of pavement under double-layer continuous paving process was calculated. Calculation result indicates that when using double-layer continuous paving, the tensile property of base layer specimen increases by 1.8 times compared with traditional specimen, but only 37.9% of the tensile strength of standard specimen is achieved. There is a certain gap between double-layer continuous paving and ideal state (completely continuous). For the shear strength, the effect of double-layer continuous paving increases by 7.3 times compared with traditional paving process. The performance of road base is effectively improved by using double-layer continuous paving construction. With the increase of interlayer friction coefficient, the tensile stress at the bottom of each structure decreases. Therefore, the combination effect of semi-rigid base layer can be effectively improved by using double-layer continuous paving, which can improve the stress distribution of the bottom of layer and increase the service life of pavement structure by 16.1%-47.4%. 15 figs, 25 refs.

**Key words:** pavement engineering; semi-rigid base; double-layer continuous paving; interlayer bonding; service life

**Author resumes:** QIAO Zhi(1974-), male, senior engineer, doctoral student, +86-471-6521601, 1134278342@qq.com; WANG Xuan-cang(1956-), male, professor, PhD, +86-29-82334836, wxc2005@163.com.

## 0 引言

半刚性基层双层连续摊铺工艺可以有效缩短施工期,节约施工造价,使基层具有良好的整体性,近年来逐步运用于路面施工当中,特别对于北方寒长期长的地区,有效节省了道路建设成本<sup>[1-2]</sup>。

Das等通过“热热相接”将沥青混合料紧密结合起来并进行充分压实,研究结果表明沥青层间材料压实度超百时,沥青路面结构抗变形能力仍有提高的可能<sup>[3]</sup>,这使得研究采用双层连续摊铺技术进行重载路面施工变得十分必要;Mohammad等通过层状弹性程序与有限元计算方法得到了沥青路面在不同层间接合情况下的应力、应变状态,分析结果表明沥青路面使用寿命受沥青结构层黏结状态与道路水平荷载的累计作用影响显著<sup>[4]</sup>;王选仓等通过双层连续摊铺和传统摊铺进行不同的施工方法下的等效厚度转换试验,分析了试验温度与等效厚度对沥青混合料压实度的影响<sup>[5]</sup>;任福松等通过现场检测,提出双层连续摊铺基层的芯样强度和芯样状况均满足设计和规范要求,并且利用上层对下层进行养生不仅有助于下层水份的保持,还有助于减少基层开裂<sup>[6]</sup>;丛林等对半刚性基层沥青路面结构施工阶段进行了回弹弯沉、当量回弹模量与层底应变状态等检测,研究了施工阶段半刚性基层的结构性能<sup>[7]</sup>,对路面结构的组合设计和施工合理性研究有较大的参考价值;严二虎等建立了层间接触模型,采用弹性层状理论体系计算了沥青路面结构应力应变状态与路

标弯沉值在不同层间接触状态下的变化情况,得出了荷载、路面结构与层间性能对路面力学状态的影响<sup>[8]</sup>;张久鹏等分析了不同层间接触状态对路面关键力学指标的影响,结果表明层间结合效果可以有效改善层底应力分布状态<sup>[9]</sup>。

从以上研究可以看出,目前,国内外对双层连续摊铺施工工艺的研究尚处于沥青面层摊铺阶段,对基层研究甚少,对层间结合效果的研究也仅限于基、面层间与面、面层间。本文从双层连续摊铺基层层间黏结性能入手,分析了相比传统施工方法,双层连续摊铺工艺在层间黏结性能上的优势,得出采用双层连续摊铺技术可以有效提高路面使用寿命<sup>[10]</sup>。

## 1 双层连续摊铺层间黏结性能影响因素

传统的半刚性基层施工采用分层施工的方法,即在下基层施工养生7d后才开始对上基层进行摊铺碾压,采用这种方法,其基层层间黏结力一般较小。采用半刚性基层双层连续施工技术可以有效提高基层层间的黏结性能,其影响因素有水泥胶结作用、嵌入的咬合力与级配组成3方面。

### 1.1 水泥胶结作用

在传统摊铺工艺中,下基层经过7d的养生后,其中所含的水泥已经凝结,几乎不可能产生与上基层的黏结力,部分道路施工采用铺洒水泥胶浆为层间提供黏结力,但是铺洒水泥胶浆成本高,代价大,在道路施工中鲜有应用。

双层连续摊铺技术使得上层基层摊铺时,下层水稳混合料水泥尚未完全凝结,上、下基层界面处水泥可以相互胶结,其上基层水泥部分渗透至下基层发生水化作用,上、下基层水泥同时形成强度,不易出现接缝,使得水泥凝结时上、下基层不会形成接缝。另外由于骨料相互嵌入,黏附在骨料上的水泥可以更紧密地将基层之间的界面黏结为一体<sup>[11-12]</sup>。

### 1.2 嵌入的咬合力

传统摊铺工艺中,下基层经过 7 d 的养生后,其强度已经基本形成,表面基本平整,因此,层间结合能力几乎为 0,见图 1。

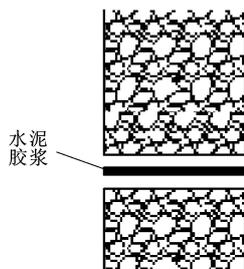


图 1 传统摊铺层间黏结状态

Fig. 1 Interlayer bonding state of traditional paving

双层连续摊铺技术将上基层摊铺时间提前到下基层未经养生时,由于下层混合料水泥尚未发生显著的胶结作用,混合料处于半稳定状态,上层压实过程中会造成上层混合料的骨料嵌入下基层混合料中,使得层间黏结更为紧密,见图 2。

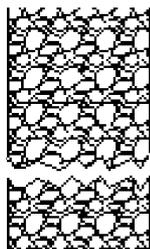


图 2 双层连续摊铺层间黏结状态

Fig. 2 Interlayer bonding state of double-layer continuous paving

目前,中国基层采用的最大粒径一般为 31.5 mm,底基层为 37.5 mm。根据观察采用半刚性双层连续摊铺技术,其骨料最大可嵌入下基层 50%,即有 15~19 mm 嵌入下基层,由此可以形成较大的构造深度,可以有效提高层间的抗剪性能,使层间具有较好的整体性。

### 1.3 级配组成

在基底表面压实水稳混合料后,混合料与基底表面紧密接触,粗级配混合料由于集料粒径大,容易形成较大的构造深度,便于双层摊铺层间嵌挤的形成,因而层间黏结效果更好<sup>[13]</sup>。

## 2 双层连续摊铺层间结合性能室内试验

### 2.1 试件制备

采用双层连续摊铺工艺,粗级配混合料由于集料粒径大,容易形成较大的构造深度,便于双层摊铺层间嵌挤的形成,故本文对双层连续摊铺层间黏结性能进行了研究。

试验分 3 组,分别模拟一体摊铺、双层连续摊铺、双层不连续摊铺的过程,均按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)制作试件,进行拉拔、剪切试验,对比不同摊铺过程对基层层间黏结力的影响<sup>[14]</sup>。

#### 2.1.1 一体摊铺试件(标准试件)

在  $\Phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的圆柱体试模中制作标准试件,标准养生 7 d。

#### 2.1.2 双层连续摊铺试件

为模拟双层连续摊铺过程,先称取一半的混合料放入试模中,垫入垫片进行压实,然后取出垫片,倒入剩余混合料压实成型,标准养生 7 d。

#### 2.1.3 双层不连续摊铺试件(传统试件)

为模拟双层不连续摊铺过程,称取所需混合料的一半制作试件,脱模后标准养生 7 d,之后将试件重新放入试模,在试模顶面倒入另一半混合料,压实成型,标准养生 7 d<sup>[15-17]</sup>。

### 2.2 层间黏结性能试验

图 3、4 为试验过程,不同试件的抗拉强度见图 5。由图 5 可知:传统试件的抗拉强度仅为 6 kPa,层间结合能力几乎为 0;双层连续摊铺试件的抗拉强度为 11 kPa,是传统试件的 1.8 倍,说明相比不连续摊铺,连续摊铺可以有效改善层间结合状态;双层连续摊铺试件的抗拉强度是标准试件(29 kPa)的



图 3 抗拉强度试验

Fig. 3 Tensile strength test

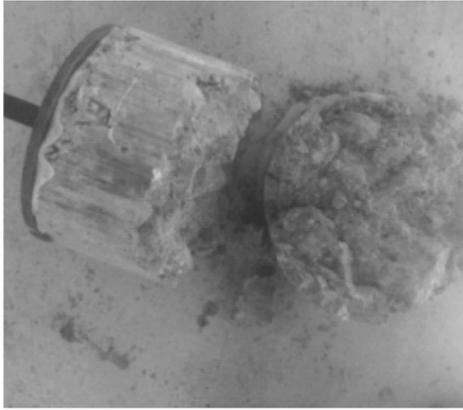


图 4 断裂后的试件  
Fig. 4 Fracture specimen

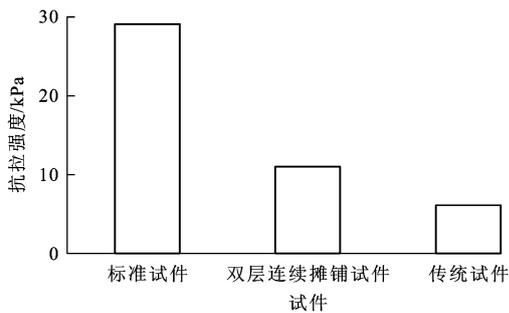


图 5 不同试件抗拉强度对比

Fig. 5 Comparison of tensile strengths of different specimens

37.9%,说明连续摊铺工艺虽然能够显著改善层间结合状态,但距离层间结合理想状态(完全连续)还有很大差距。

图 6~8 为 3 种试件拉拔破坏后的断面,可以看出:传统试件破坏后分层明显,层间结合状态差;双层连续摊铺试件破坏后与传统试件相比,层间骨料嵌挤效果明显。

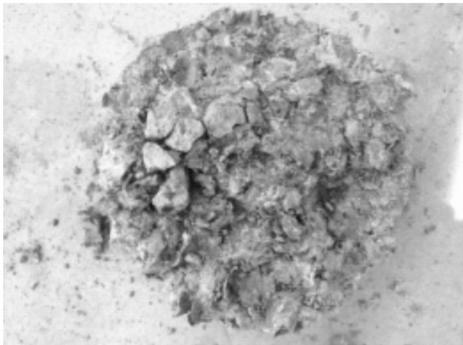


图 6 标准试件断面

Fig. 6 Section of standard specimen

### 2.3 层间剪切性能试验

考虑到水稳基层试件直径为 15 cm,而普通面层剪切仪只能对 10 cm 试件进行剪切,设计加工了一种剪切模具,见图 9。试件在养生第 6 d 浸水,

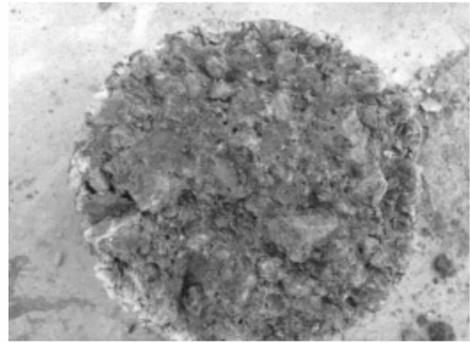


图 7 双层连续摊铺试件断面

Fig. 7 Section of double-layer continuous paving specimen

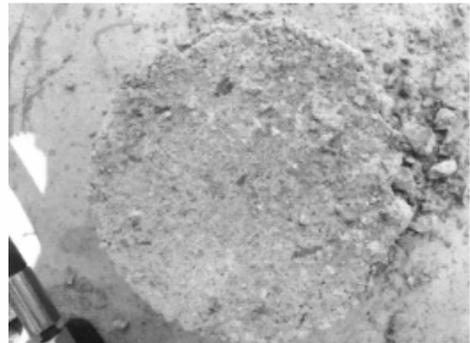


图 8 传统试件断面

Fig. 8 Section of traditional specimen

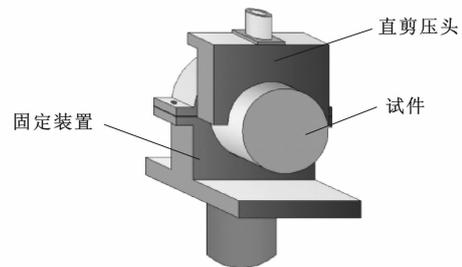


图 9 剪切模具

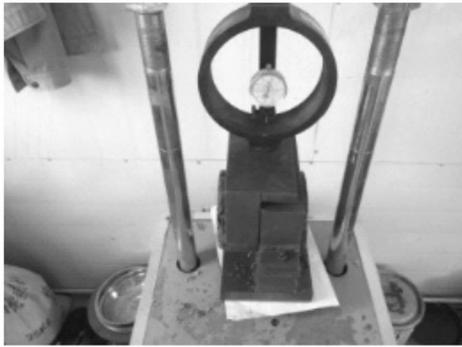
Fig. 9 Shear mould

第 7 d 龄期后取出擦干表面,固定在剪切模具上,层间位置对准试件夹口,然后将模具连同试件放入路强仪上,检测其断裂时的最大压力<sup>[18]</sup>。

图 10 为剪切试验过程。试验结果见图 11。由图 11 可以看出:2 种试件的破坏都出现在界面处,传统试件的破坏界面光滑,抗剪强度为 28 kPa,层间结合能力几乎为 0;双层连续摊铺试件的破坏界面相对粗糙,抗剪强度为 204 kPa,说明其层间黏结能力部分来自界面骨料的相互嵌挤产生的咬合力,抗剪强度为不连续摊铺的 7.3 倍。可见,相比不连续摊铺,连续摊铺可以有效改善层间结合状态。

### 3 层间结合状态对层底拉应力的影响

运用 BISAR3.0 力学分析软件,通过设定不同的



(a) 剪切试验



(b) 破坏后试件

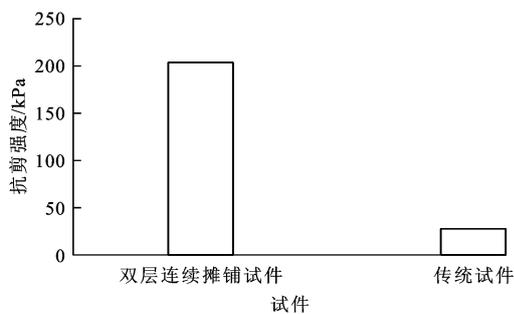
图 10 剪切试验  
Fig. 10 Shear test

图 11 不同试件抗剪强度对比

Fig. 11 Comparison of shear strengths of different specimens

层间摩擦因数,分析不同层间结合状态对路面结构层底拉应力的影响。为简化计算并突出基层层间结合状态的影响,将沥青层视为全厚式结构层,假设基层与面层之间、基层与路基之间均为完全光滑,基层分为上基层和下基层,不设底基层,计算模型见图 12。

双圆荷载当量圆直径为 213 mm,荷载集度为 0.7 MPa;沥青面层回弹模量为 80 MPa,泊松比为 0.35,层厚为 0.16 m;上基层回弹模量为 2.0 GPa,泊松比为 0.2,层厚为 0.16 m;下基层回弹模量为 2.0 GPa,泊松比为 0.2,层厚为 0.1 m;路基回弹模量为 1.5 GPa,泊松比为 0.25<sup>[19]</sup>。

基层之间摩擦因数取 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 时,各层层底拉应力变化情况见图 13,可知:随着基

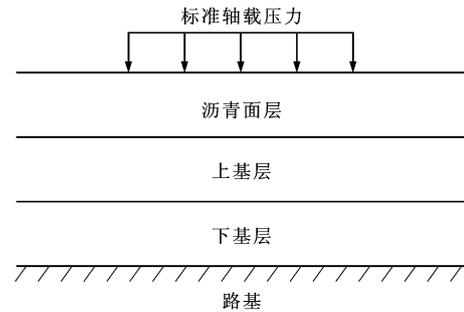


图 12 计算模型

Fig. 12 Computational model

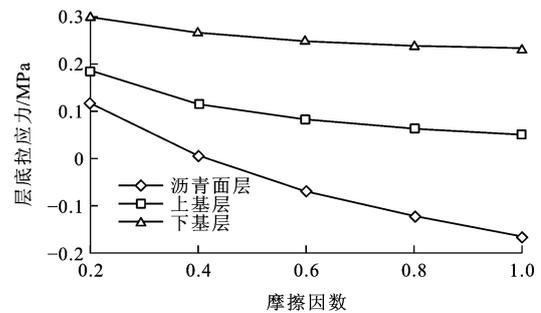


图 13 层底拉应力曲线

Fig. 13 Curves of layer bottoms' tensile stresses

层之间摩擦因数的增大,各结构层层底拉应力不断下降,其中沥青面层的下降速度最快,当摩擦因数大于 0.4 时,沥青面层层底受力状态由受拉变为受压;上基层层底拉应力随着摩擦因数的增大也有明显减小,摩擦因数为 0.2 时,其层底拉应力为 184 kPa,当摩擦因数增加到 1.0,层底拉应力为 49 kPa,说明改善基层之间的层间结合状态,能够使得整个路面结构各层的受力状态得到显著改善。

随着摩擦因数的增大,各层层底拉应力的减小幅度不断降低,在摩擦因数较小的状态下,增强层间结合能力可以显著改善各层层底拉应力。从层间结合性能试验结果可知,不连续摊铺基层之间层间黏结很弱,其抗剪强度仅为连续摊铺的 14%,其对应的摩擦因数很小,因此,将基层摊铺方法由传统的不连续摊铺改为连续摊铺,可以显著改善路面结构的受力状态<sup>[20-22]</sup>。

#### 4 双层连续摊铺对路面结构疲劳寿命的改善

由 BISAR3.0 软件计算结果可知,双层连续摊铺比不连续摊铺能够有效改善层间结合状态。沥青混合料的疲劳方程为

$$\lg(N_f) = 4.34 - 0.286\lg(\sigma) \quad (1)$$

高寒地区水稳碎石基层材料的疲劳方程为

$$\lg(N_f) = 8.099 - 6.44 \lg\left(\frac{\sigma}{s}\right) \quad (2)$$

式中: $N_f$ 为轴载作用次数; $\sigma$ 为层底拉应力; $s$ 为混凝土劈裂强度。

将层底拉应力代入式(1)、(2),可以得到疲劳寿命的改善情况,结果见图14<sup>[23-25]</sup>。由图14可知:在改变层面摩擦因数的情况下,其道路结构层的疲劳寿命变化是显著的,以上基层为例,层间摩擦因数为0.2时道路疲劳次数为 $1.9 \times 10^7$ ,当层间摩擦因数为1.0时,这一数值提高为 $9.6 \times 10^7$ 。

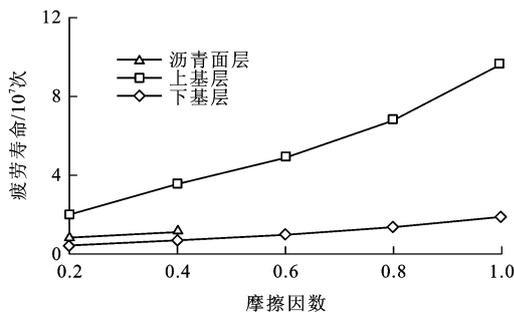


图14 摩擦因数对疲劳寿命的影响

Fig. 14 Influence of friction coefficients on fatigue lifes

为研究连续摊铺对路面结构寿命的影响,假定不连续摊铺层间摩擦因数为0.2,连续摊铺层间摩擦因数为0.3。从上文研究可知,连续摊铺层间摩擦因数取0.3是比较保守的。计算不同结构层的路面结构层疲劳寿命,结果见图15。由图15可知:在仅改变基层摊铺方式的情况下,通过改善基层之间的层间结合状态,能够大幅改善路面结构层的受力情况,其下基层寿命从 $4.1 \times 10^6$ 次提高为 $4.9 \times 10^6$ 次,疲劳寿命提高19.5%,上基层疲劳寿命从 $1.9 \times 10^7$ 次提高为 $2.8 \times 10^7$ 次,提高47.4%,沥青面层疲劳寿命从 $8.1 \times 10^6$ 次提高为 $9.4 \times 10^6$ 次,提高16.1%。

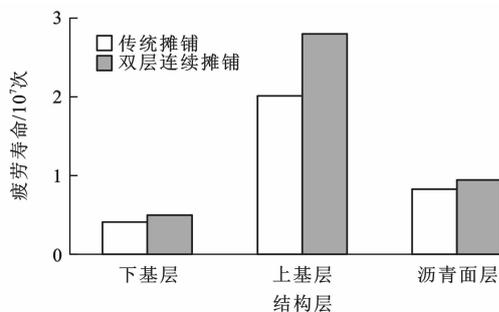


图15 摊铺方法对疲劳寿命的影响

Fig. 15 Influence of paving methods on fatigue lifes

## 5 结 语

(1)对比分析了传统摊铺与双层连续摊铺技术对基层层间黏结性能的影响,进行了室内半刚性基

层层间拉拔试验,对比了传统双层不连续摊铺与双层连续摊铺技术层间的黏结效果。双层连续摊铺工艺能够显著改善层间结合状态,但距离层间结合理想状态(完全连续)还有一定差距。

(2)考虑基层试件直径要求,设计制作了一种新型直剪模具,试验模拟传统试件和双层连续摊铺试件的抗剪能力,结论为双层连续摊铺试件在抗剪强度上远优于传统试件。

(3)通过BISAR3.0软件计算分析得出基层层间摩擦因数越高,其各结构层层底拉应力越小。通过理论计算预估了连续摊铺和不连续摊铺2种工况下各结构层的疲劳寿命,连续摊铺可以有效提高路面使用寿命。

(4)本文分析了基层层间结合效果对路面结构层使用寿命的影响,在具体工况与层间摩擦因数对应转换的模拟有待深入研究。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 平国超. 水泥稳定碎石基层双层连续摊铺施工工艺与质量控制[D]. 天津:河北工业大学,2013.  
PING Guo-chao. Construction technique and quality control of double layers continous paving of cementstabilized macadam base[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] CANESTRARI F, FERROTTI G, PARTL M N, et al. Advanced testing and characterization of interlayer shear resistance[J]. Transportation Research Record, 2005(1929): 69-78.
- [3] DAS S, HARDT S. Electric-double-layer potential distribution in multiple-layer immiscible electrolytes[J]. Physical Review E: Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics, 2011, 84(1): 1572-1586.
- [4] MOHAMMAD L N, HASSAN M, PATEL N. Effects of shear bond characteristics of tack coats on pavement performance at the interface[J]. Transportation Research Record, 2011(2209): 1-8.
- [5] 王选仓,王吉昌,杨育生,等. 沥青路面双层摊铺与传统摊铺等效厚度转换试验研究[J]. 公路交通科技,2014,31(1):21-25.  
WANG Xuan-cang, WANG Ji-chang, YANG Yu-sheng, et al. Experimental study on asphalt pavement thickness equivalent conversion between double-layer paving and traditional paving[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(1): 21-25. (in Chinese)
- [6] 任福松,傅志强. 双层连续摊铺水泥稳定碎石基层[J]. 交通标准化,2010(3):163-166.  
REN Fu-song, FU Zhi-qiang. Continuous double layer paving cement stabilized macadam base[J]. Communications Standardization, 2010(3): 163-166. (in Chinese)

- [7] 丛 林,郭忠印,暨育雄,等.半刚性基层材料性能参数的试验研究[J].建筑材料学报,2001,4(4):385-390.  
CONG Lin, GUO Zhong-yin, JI Yu-xiong, et al. Experimental study on the performance of semi-rigid base coarse materials[J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(4): 385-390. (in Chinese)
- [8] 严二虎,沈金安.半刚性基层与沥青层之间界面条件对结构性能的影响[J].公路交通科技,2004,21(1):38-41.  
YAN Er-hu, SHEN Jin-an. Structural influence of boundary condition between asphalt layer and semi-rigid base[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(1): 38-41. (in Chinese)
- [9] 张久鹏,武书华,裴建中,等.基于剪切弹性柔量的基-面层间接触状态及路面力学响应分析[J].公路交通科技,2013,30(1):6-11,16.  
ZHANG Jiu-peng, WU Shu-hua, PEI Jian-zhong, et al. Analysis of interlayer contact condition between base and mechanical response of asphalt pavement and surface course based on shear elastic compliance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(1): 6-11, 16. (in Chinese)
- [10] LIU Zhen-ya, LIU Jing-yu, WANG Qing-zhi, et al. Compressive strength and frost heave resistance of different types of semi-rigid base materials after freeze-thaw cycles[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2015, 7(4): 365-369.
- [11] 赵殿鹏,杨 平,张 豪.基层层间状态对沥青路面荷载应力与疲劳性能的影响[J].森林工程,2015,31(5):96-99.  
ZHAO Dian-peng, YANG Ping, ZHANG Hao. Effects of base course's interfacial bond on load stress and fatigue of asphalt pavement[J]. Forest Engineering, 2015, 31(5): 96-99. (in Chinese)
- [12] HERNANDO D, VAL M A D. Guidelines for the design of semi-rigid long-life pavements[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2016, 9(2): 121-127.
- [13] LI Yu-chao, CLEALL P J. Analytical solutions for contaminant diffusion in double-layered porous media[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(11): 1542-1554.
- [14] 武海燕.水稳碎石基层双层连铺技术在某高速中的应用[J].山西建筑,2011,37(34):146-147.  
WU Hai-yan. Application of water-bound foundation double-layer paving technique in Pingyang Highway[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(34): 146-147. (in Chinese)
- [15] 李炜光,彭加武,项柳福,等.层间状态对厚层水稳基层使用性能影响研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(14):53-57.  
LI Wei-guang, PENG Jia-wu, XIANG Liu-fu, et al. Research on the service performances effect of states between layers on thick cement stabilized base[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(14): 53-57. (in Chinese)
- [16] 穆 柯.沥青路面面层双层一体摊铺技术研究[D].西安:长安大学,2012.  
MU Ke. Research on double-layer paving technology for asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [17] 武书华.半刚性基层沥青路面基层间剪切疲劳特性及接触状态评价研究[D].西安:长安大学,2013.  
WU Shu-hua. Study on shearing fatigue property and evaluation of interlayer contact condition between base course and surface course for semi-rigid base asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [18] SUO Li-jun, WANG Xin-wu. Analysis of load stress for asphalt pavement of lean concrete base[J]. Physics Procedia, 2012, 24(1): 404-411.
- [19] THAI H T, UY B, KANG W H, et al. System reliability evaluation of steel frames with semi-rigid connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 29-39.
- [20] 王宏畅,黄晓明,傅 智.半刚性基层材料路用性能的试验研究[J].公路交通科技,2005,22(11):45-49.  
WANG Hong-chang, HUANG Xiao-ming, FU Zhi. Experimental study on the performance of semi-rigid base course materials[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(11): 45-49. (in Chinese)
- [21] WU Jian-min, LIANG Jia-ping, ADHIKARI S. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6): 439-447.
- [22] LI Sheng, LIU Xing-wu, LIU Zhao-hui. Interlaminar shear fatigue and damage characteristics of asphalt layer for asphalt overlay on rigid pavement[J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 341-347.
- [23] 裴旭东.沥青面层与基层层间黏结强度和耐久性变化规律研究[D].西安:长安大学,2013.  
PEI Xu-dong. Research on variation of bond strength and durability between asphalt pavement surface and base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [24] 徐 静.水泥稳定碎石基层抗弯拉性能试验研究[D].大连:大连理工大学,2013.  
XU Jing. The experimental study on flexural tensile performance of cement stabilized macadam base[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [25] 李长城,刘小明,荣 建.不同路面状况对路面摩擦系数影响的试验研究[J].公路交通科技,2010,27(12):27-32.  
LI Chang-cheng, LIU Xiao-ming, RONG Jian. Experimental study on effect of road condition on pavement friction coefficient[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(12): 27-32. (in Chinese)