

CPC-AC 复合路面层间结合系数研究

郭寅川^{1,2}, 申爱琴¹, 李博成¹, 赵耀辉¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 路易斯安那州立大学
路易斯安那州交通研究中心, 路易斯安那 巴吞鲁日 LA70803)

摘要:为了研究新型复合路面 CPC-AC(斜向预应力水泥混凝土+沥青混凝土复合路面)的层间结合行为,并探究其层间结合状态的表征及求解,提出以中性轴间距变化来表征层间结合状态,并推导了部分结合 CPC 与 AC 双层梁的层间结合系数 η 的计算公式;设计了室内单层梁(沥青混合料和水泥混凝土)的小梁三点弯曲试验以及双层梁低温弯曲模拟试验,确定了单层小梁的弹性模量和部分结合双层梁抗弯刚度等计算参数;为分析层间结合系数 η 表征 CPC-AC 复合路面层间结合的能力,在 CPC 板表面设置了植石、刻槽以及凿毛 3 种处理方式,其层间黏结分别采用不同洒布量的 SBS 改性沥青及 SBS 改性沥青同步碎石封层,通过剪切试验论证了层间结合系数 η 表征 CPC-AC 复合路面层间黏结行为的可行性。研究表明:通过室内双层梁弯曲模拟试验和双层梁的抗弯刚度计算公式成功求得层间结合系数 η ;不同层间处理方式下,层间结合系数的变化规律与芯样剪切试验结果一致,说明层间结合系数 η 可表征 CPC-AC 复合路面的层间结合状态;采用不同处理方法,使用不同层间黏结时层间结合系数差异较大,当 CPC 板采用植石+SBS 改性沥青黏层方案,且沥青洒布量为 0.4 kg/m^2 时,其结合状态最好,层间结合系数达到 0.463。

关键词:道路工程;复合路面;弯曲试验;层间结合系数;部分结合双层梁

中图分类号:U416.01

文献标志码:A

Study on interlayer bonding coefficient of CPC-AC composite pavement

GUO Yin-chuan^{1,2}, SHEN Ai-qin¹, LI Bo-cheng¹, ZHAO Yao-hui¹

(1. Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Louisiana Transportation Research Center, Louisiana State University, Baton Rouge LA70803, Louisiana, USA)

Abstract: To study interlayer bonding behavior and explore the representation and solution of the interlayer bonding state of CPC-AC (cross-tensioned prestressed concrete and asphalt concrete composite pavement), the spacing changes of neutral axis were proposed to characterize interlayer bonding state, and the calculation formulas of interlayer bonding coefficient η of partially bonded CPC-AC was derived. The three-point bending tests and simulation tests of double-layer beam at low temperature of indoor single beam were designed, and calculation parameters such as elasticity modulus of signal beam and flexural rigidity of partially bonded double-layer beam were determined. In order to analyze the interlayer bonding coefficient η , representing interlayer bonding ability of composite pavement, three treatments such as grooving, chiseling and crash

stone were set on the CPC deck. Interlayer bonding adopted SBS modified asphalt and SBS modified asphalt synchronous chip sealing layer with different spraying volume, respectively. The feasibility of the interlayer bonding coefficient η representing interlayer bonding behavior of composite pavement was proved by shear test. The results show that η can be obtained by the indoor bending simulation test of double-layer beam and calculating formula of the flexural rigidity of double-layer beams. With different interlayer treatments, the change rules of η are in agreement with the result of shear tests, and therefore the η has the capability to characterize interlayer bonding state of CPC-AC composite pavement. The interlayer bonding coefficient is largely different with different treatment and interlayer bonding. The best bonding state for CPC is using crash stone and SBS modified asphalt tack coat, the spraying volume amount of asphalt is 0.4 kg/m^2 , and the interlayer bonding coefficient is 0.463. 4 tabs, 5 figs, 28 refs.

Key words: road engineering; composite pavement; bending test; interlayer bonding coefficient; partially-bonded two-layered beam

0 引言

斜向预应力水泥混凝土(cross-tensioned prestressed concrete, CPC)是近年来研发的一种无缝或少缝的刚性路面^[1-3],为了克服这种路面刚性过大、行车舒适性不足等问题,本文提出一种 CPC-AC 新型复合路面,即在斜向预应力水泥混凝土之上铺筑一层 4~6 cm 厚的沥青混凝土(AC)层。这种路面不仅兼顾了斜向预应力水泥混凝土路面整体刚度大、承载能力强的优势,更是凸显了沥青路面行车舒适及维修方便等特点。由于 CPC 路面在 100~200 m 间不设缝,避免了沥青层出现反射裂缝,特别适用于沟壑纵横的短路基路段。与普通沥青混凝土路面相比, CPC-AC 复合路面具有更好的协调变形能力,行车舒适,且使用寿命较长^[4-5]。进行复合路面设计时, Nunez 等认为应假设各结构层之间处于完全连续状态^[6],但由于 CPC 与 AC 材料性能差异以及分阶段施工等,其不可能处于完全连续,这种假设条件与实际情况不符,将导致计算的沥青层应力值偏小,对路面结构层受力造成不利影响,加速早期病害的发生,可见,复合路面层间结合状况对路面的疲劳寿命和服务质量有很大影响^[7]。

目前,国内外关于路面层间结合状态的研究大多集中在沥青面层、水泥层之间或沥青面层与半刚性基层之间^[8-9]。Yu 等研究了水泥双层板的中性面位置对其性能的影响^[10]; Li 等研究了沥青层间黏结状况,但是对于刚-柔复合路面的层间结合研究较少^[11]。因此,为了保证 CPC-AC 复合路面结构的安全性,必须对 CPC-AC 复合路面的层间结合状态进行深入研究,为复合路面结构设计、层间黏结材料和

层间处理技术的选择提供可靠的理论依据。以往的研究中,多采用剪切、拉拔试验测得的层间剪切强度和黏结强度来表征复合路面层间结合状态的优劣,并依据这些试验进行层间处理方式以及材料的优选^[12-17]。但这类试验结果主要取决于层间界面状况以及层间所用材料,与复合式路面上、下结构层自身材料性能关联不密切,另外,这些试验结果易受到试验环境的影响,误差较大。罗作芬等通过理论分析推导了部分结合式双层梁层间结合系数的计算公式,但是并未针对不同类型的双层梁进行系统的试验及求解^[18-19]。

本文针对 CPC-AC 新型复合路面的特点,提出 CPC-AC 复合路面层间结合状态的评价指标,即层间结合系数。首先通过理论推导得到 CPC-AC 双层梁层间结合系数的计算表达式,然后通过不同 CPC 表面处理条件下的 CPC 与 AC 双层模拟梁弯曲试验获取计算参数,并将其代入层间结合系数表达式,进而求得不同结合状态下的层间结合系数,同时还通过剪切试验验证层间结合系数的可行性及科学性。本文成果可为 CPC-AC 复合路面结构设计提供理论依据,以期对 CPC-AC 复合路面层间处理及材料选择提供技术支撑。

1 CPC 与 AC 双层梁层间结合状态及层间结合系数推导

1.1 层间结合状态

在求解复合路面层间结合系数的过程中,将复合路面简化成双层梁结构,从层间结合系数的本质出发^[20-22],若双层梁是完全连续的状态,则其仅有 1 个中性轴,中性轴以上是受压状态,中性轴以下是受

拉状态,如图 1(a)所示。当双层梁处于完全分离状态时,则有 2 个中性轴,分别为 2 个梁各自的中性轴,如图 1(b)所示。所以当双层梁处于半结合状态时,其中性轴也有 2 个,随着结合状态的变化而上下移动,如图 1(c)所示。若结合状态越好,则 2 个中性轴越接近,用 α 表示部分结合双层梁中性轴位置的变化系数,即可以通过参数表征 2 个中性轴之间的轴距,如图 2 所示。

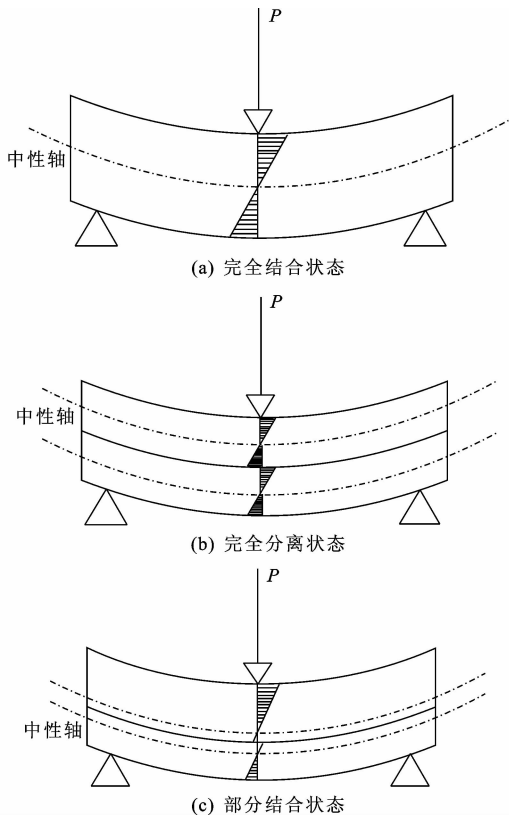


图 1 层间结合状态

Fig. 1 Interlayer bonding states

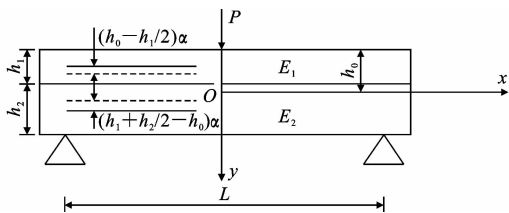


图 2 部分结合双层梁计算模型

Fig. 2 Calculation model of partially-bonded two-layered beam

如图 2 所示: x 轴为完全连续状态下中性轴; y 轴表示竖直方向; h_1 、 h_2 分别为上、下层梁的厚度; h_0 为完全连续状态下中性轴距顶面的距离; E_1 、 E_2 分别为上、下 2 层梁的弹性模量; L 为梁的跨径; P 为施加荷载;上、下层梁距完全连续中性轴的距离分别为 $(h_0 - h_1/2)\alpha$ 和 $(h_1 + h_2/2 - h_0)\alpha$ 。

由图 2 可知:当 $\alpha=0$ 时,表示上、下层梁距完全连续中性轴的距离都为 0,即此时双层梁处于完全结合状态;当 $\alpha=1$ 时,上、下层梁距完全连续中性轴的距离分别为 $(h_0 - h_1/2)$ 和 $(h_1 + h_2/2 - h_0)$,即此时双层梁处于完全分离状态;当 $0 < \alpha < 1$ 时,表示双层梁处于半结合状态。本文采用 η 表示双层梁层间结合系数, $\eta = 1 - \alpha$ 。

在路面结构力学计算中经常用层间结合系数来表征层间结合状态^[23-25],其大小能够反映复合路面层间结合的紧密程度,层间结合系数由理论计算与试验相结合的方式推导,是区别于层间剪切试验的一种判别层间结合状态的方法,相较于单纯的理论计算与试验其更具说服力。层间结合系数 η 越大,表示复合路面的层间作用越强,层间结合越紧密;层间结合系数 η 越小,表示复合路面的层间作用越弱,层间结合越疏松。因此,就 CPC-AC 复合路面层间结合系数而言,可通过层间处理和黏结材料选择以获取较大的层间结合系数。

1.2 层间结合系数推导

部分结合状态下双层梁的抗弯刚度 EI_b 的计算式为

$$EI_b = E_1 I_1 + E_2 I_2 = E_1 b \int_{y_1}^{y_2} y^2 dy + E_2 b \int_{y_3}^{y_4} y^2 dy \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; I_1 、 I_2 、 E_1 、 E_2 分别为部分结合状态下上、下梁相对于各自中性轴的惯性矩和弹性模量; I_b 为部分结合状态下的等效中性轴惯性矩; b 为部分结合式双层梁跨中截面宽度; y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 均为积分限,其值分别为

$$\begin{aligned} y_1 &= -\left[\frac{h_1}{2} + \left(h_0 - \frac{h_1}{2}\right)\eta\right] \\ y_2 &= \frac{h_1}{2} - \left(h_0 - \frac{h_1}{2}\right)\eta \\ y_3 &= -\left[\frac{h_2}{2} - \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - h_0\right)\eta\right] \\ y_4 &= \frac{h_2}{2} + \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - h_0\right)\eta \end{aligned}$$

将 $y_1 \sim y_4$ 代入式(1)可得式(2)

$$\begin{aligned} EI_b &= b(E_1^2 h_1^4 + E_1 E_2 h_1^3 h_2 + E_1 E_2 h_1 h_2^3 + \\ &E_2^2 h_2^4 + 3E_1 E_2 h_1^3 h_2 \eta^2 + 6E_1 E_2 h_1^2 h_2^2 \eta^2 + \\ &3E_1 E_2 h_1 h_2^3 \eta^2) / [12(E_1 h_1 + E_2 h_2)] = \\ &\frac{b(E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3)}{12} + \\ &\frac{bE_1 E_2 h_1 h_2 (h_1 + h_2)^2 \eta^2}{4(E_1 h_1 + E_2 h_2)} = \end{aligned}$$

$$EI_f+\frac{bE_1E_2h_1h_2(h_1+h_2)^2\eta^2}{4(E_1h_1+E_2h_2)}\tag{2}$$

式中: EI_f 为完全分离式双层梁抗弯刚度理论值; I_f 为完全分离式双层梁的等效中性轴惯性矩。

最终将上式变化可求得层间结合系数 η

$$\eta=\sqrt{\frac{(EI_b-EI_f)\times 4(E_1h_1+E_2h_2)}{bE_1E_2h_1h_2(h_1+h_2)^2}}\tag{3}$$

式(3)中除 EI_b 外,其他参数均可通过常规试验求得,而部分结合式双层梁抗弯刚度 EI_b 可通过下节介绍的双层梁弯曲试验来求解。

2 层间结合系数的求取

CPC 与 AC 层间的结合系数 η 值可以表征复合路面层间的结合状态,通过 η 值的求解可为层间处理及材料用量的优化提供依据,并且为 CPC-AC 复合路面层间处理及施工提供技术指导。结合复合路面工程实际,本文设计了多种层间结合处理方案,并通过双层梁低温弯曲模拟试验,参照《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)来测定不同层间处理方式下的部分结合式双层梁抗弯刚度的变化,并以此来反算层间结合系数 η 值。

2.1 部分结合双层梁弯曲试验

2.1.1 原材料

原材料采用 I-C 型 SBS 改性沥青,由 90[#] 壳牌基质沥青改性而来;秦岭 32.5R 水泥;细集料为西安灞河产中砂;粗集料为陕西铜川石料场生产的碎石,其中最大粒径为 31.5 mm;粉煤灰为西安博迪粉煤灰制品有限公司生产的 I 级粉煤灰;减水剂为山西恒升生产的高效减水剂;试验用水为自来水。

2.1.2 层间处理方案设计及试件成型

为了考察 CPC 与 AC 之间不同层间处理方式下的层间结合状况,本文结合课题组前期研究成果以及工程上常用的层间处理工艺^[26-27],设计了 3 种层间处理方案,分别为刻槽、凿毛及植石工艺。刻槽、凿毛工艺较为普遍,但植石工艺为本文首次提出并实施。针对植石工艺,本文提出严格的材料要求及实施步骤,同时还提出质量检测指标及要求。本文对混凝土板分别采用刻槽、凿毛及植石等 3 种表面处理工艺,在处理后的表面上分别铺设 SBS 改性沥青同步碎石或 SBS 改性沥青,各方案沥青洒布量根据课题组前期研究结果以及现行相关规范综合确定^[28]。设计的 9 种试验方案如表 1 所示。

表 1 CPC 与 AC 层间处理方案设计
Tab. 1 Design scheme of CPC-AC interlayer treatments

水泥混凝土板 表面处理措施	同步碎石封层 SBS 改性 沥青洒布量			黏结层 SBS 改性 沥青洒布量		
刻槽	1.5	1.8	2.1			
凿毛	1.5	1.8	2.1			
植石				0.2	0.4	0.6

为了模拟 CPC 与 AC 双层梁工作状态,试件成型至关重要,首先利用 300 mm(长)×300 mm(宽)×50 mm(高)的车辙板试模,并依据实体工程的 CPC 配合比,将拌和好的水泥混凝土装入试模,通过振捣使其密实,拆模后待水泥混凝土板养生到规定龄期后,再对其表面进行刻槽、凿毛处理,刻槽宽度、深度、间距分别为 4、5、20 mm;凿毛是待混凝土板养生至终凝后用小锤模拟实际施工中的甩锤对表面进行凿毛处理,处理后的效果见图 3。植石工艺是在水泥混凝土板初凝时撒上粒径为 9.5~19 mm 的洁净石料,并通过按压使石料粒径的 2/3 嵌入板内,然后养生 14 d 左右,以备使用,见图 3(c)。同时,还利用车辙板试模成型了水泥混凝土板及沥青混合料 AC-13 车辙板,切割成规定尺寸的小梁,通过室内试验可求得水泥混凝土 CPC 及 AC-13 的模量值。

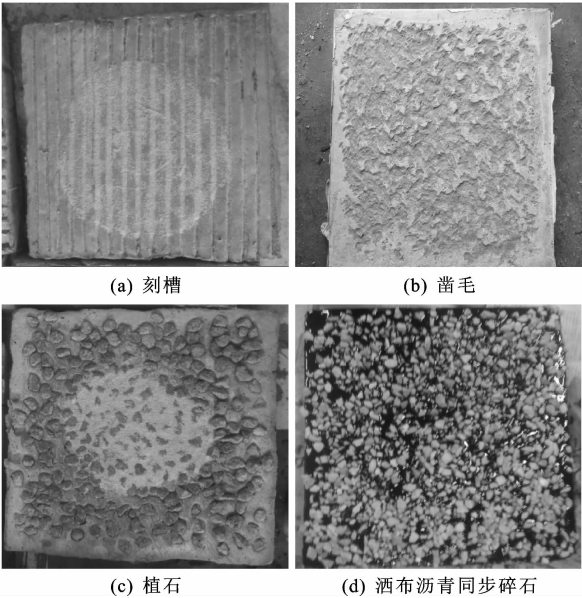


图 3 层间处理方式

Fig. 3 Interlayer treatment method

对经过刻槽和凿毛处理的 6 组水泥混凝土板,按照表 1 分别在其上铺筑不同沥青洒布量的 SBS 改性沥青同步碎石封层,碎石粒径为 4.75~9.5 mm,对经过植石处理的 3 组水泥混凝土板,按

照表 1 分别在其上洒布不同量的 SBS 改性沥青作为黏层。然后在这 9 组经过表面处理的水泥混凝土板上铺筑 AC-13 并碾压成型,在室温下冷却 48 h 脱模形成复合板,然后对其进行切割,形成 9 种不同层间接触状况的复合小梁,见图 4。

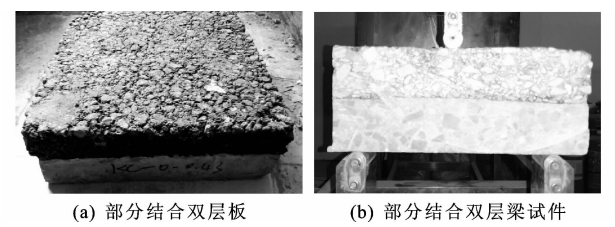


图 4 部分结合双层板和试验试件
Fig. 4 Partially-bonded two-layered plate and test sample

用钻芯机钻出直径和高度均为 10 cm 的圆柱体芯样,每块双层板最多钻 4 个芯样,钻芯试块及芯样试件如图 5 所示。

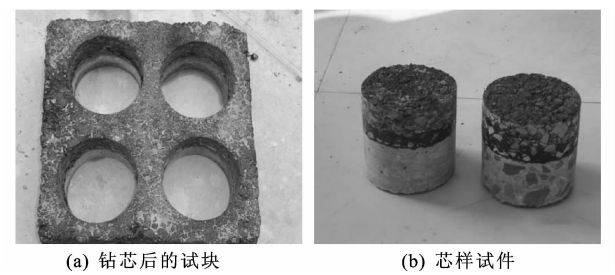


图 5 试件成型
Fig. 5 Molding specimens

2.1.3 相关参数计算

2.1.3.1 弹性模量

首先对单层沥青混合料和水泥混凝土小梁试件进行三点弯曲试验。通过沥青混合料小梁弯曲试验的力-位移曲线可知:当 $P < 0.6P_B$ (P_B 为试件破坏时的荷载)时,曲线近似为直线,因此取荷载值为 $0.6P_{BA}$ (P_{BA} 为每组沥青混合料试件破坏时最大荷载的平均值)来求取沥青混合料的弹性模量;对于水泥混凝土而言,由于其刚度远大于沥青混合料,因此,取荷载值为 $0.8P_{BC}$ (P_{BC} 为每组水泥混凝土小梁试件破坏时最大荷载平均值)。模量计算式为

$$R=\frac{3LP}{2bh^2},\epsilon=\frac{6hd}{L^2},E=\frac{R}{\epsilon}$$
 (4)

式中: R 为荷载对应的弯拉应力(MPa); ϵ 为荷载对应的回弹应变; h 为试件的高度(mm); d 为与荷载值对应的试件回弹变形(mm)。

2.1.3.2 部分结合双层梁的弯拉刚度

双层梁的弯拉刚度计算式为

$$EI_b=\frac{PL^3}{48d}$$
 (5)

将 2.1.3 节计算所得参数代入式(3),即可计算出层间结合系数 η 。

2.2 试验结果与分析

2.2.1 单层梁弯曲试验结果

对沥青混合料小梁试件和水泥混凝土小梁试件分别进行弯曲试验,试验结果见表 2。

表 2 沥青混合料和水泥混凝土小梁试件弯曲试验结果
Tab. 2 Test results of asphalt mixture and cement concrete bending beam specimens

材料类型	参数	试件 1	试件 2	试件 3	试件 4
沥青混合料	h/mm	52.384	49.581	51.014	51.331
	b/mm	51.632	50.374	47.496	50.343
	E/MPa	501.623	485.874	610.786	538.631
水泥混凝土	h/mm	51.006	50.692	51.837	52.391
	b/mm	49.015	49.191	50.944	48.699
	E/MPa	28 972.004	26 987.410	29 761.991	25 695.279

2.2.2 部分结合双层梁及芯样剪切试验结果

求得沥青混合料和水泥混凝土弹性模量后,对双层梁进行弯曲试验,荷载值取 $0.8P_{BC}$,对其抗弯刚度进行测试,结合表 2 以及式(3)计算得出层间结合系数,并对芯样试件进行剪切试验,测出不同层间处理下双层板的层间剪切强度,试验结果见表 3 及下页表 4。

表 3 水泥混凝土板处理+SBS 改性沥青同步碎石层间剪切试验结果

Tab. 3 Interfacial shear test results of treatment of cement concrete plank and SBS modified asphalt synchronous chip

水泥混凝土表面处理措施	同步碎石封层 SBS 改性沥青洒布量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	完全分离式 双层梁抗弯 刚度理论值/ ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	部分结合式 双层梁抗弯 刚度实际值/ ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	层间结合系数 η	剪切强度/ MPa
刻槽	1.5	14 193.8	15 095.5	0.340	0.696
	1.8	14 230.8	16 028.0	0.488	0.741
	2.1	14 220.0	15 949.3	0.462	0.708
凿毛	1.5	14 208.0	15 530.0	0.409	0.685
	1.8	14 225.3	15 190.8	0.351	0.648
	2.1	14 223.3	15 051.3	0.327	0.592

从表 3 和表 4 可以看出,对于不同的层间处理方法,随着沥青洒布量的变化,其层间结合系数的变化规律同层间剪切强度的变化规律基本一致,这也说明基于理论推导及模量测试计算得到的 CPC-AC 复合路面层间结合系数与剪切强度有一定的关联,完全可直接反映不同层间处理下 CPC-AC 复合路面的层间结合状态。层间结合系数越大,层间剪切强度越大,CPC-AC 复合路面的层间作用越

表 4 水泥混凝土板处理+ SBS 改性沥青层间剪切试验结果

Tab. 4 Interfacial shear test results of treatment of cement concrete plank and SBS modified asphalt

水泥混凝土板处理措施	黏结层 SBS 改性沥青洒布量/ (kg · m ⁻²)	完全分离式 双层梁抗弯 刚度理论值/ (N · m ²)	部分结合式 双层梁抗弯 刚度实际值/ (N · m ²)	层间结合系数 η	剪切强度/MPa
植石	0.2	14 205.8	15 075.6	0.337	0.691
	0.4	14 222.8	15 939.3	0.463	0.727
	0.6	14 228.0	15 513.0	0.404	0.586

强,层间结合越紧密;层间结合系数越小,层间剪切强度越小,复合路面的层间作用越弱,层间结合越疏松。

刻槽处理方案的层间结合系数随沥青洒布量的增加先增大后减小,当沥青洒布量达到 1.8 kg/m² 时,层间结合系数最大,为 0.488,随后继续增加沥青用量,层间结合系数有所下降,因为沥青过多会起到润滑作用;凿毛处理方案的层间结合系数随沥青洒布量的增加逐渐降低,在选定的沥青用量范围内,洒布量为 1.5 kg/m² 时,层间结合系数最大,其值为 0.409。在这 2 种方案中,达到最佳层间结合状态时,刻槽方案的沥青用量比凿毛方案大,且其层间结合系数比凿毛方案大 16.2%。

当沥青洒布量(1.5 kg/m²)较小时,凿毛+ SBS 改性沥青同步碎石处理方案的层间结合系数较大;而当沥青洒布量大于 1.6 kg/m² 时,刻槽处理方案的层间结合系数远大于凿毛处理方案。其原因主要是:刻槽处理方案中混凝土表面构造深度大于凿毛形成的构造深度,表面构造分布不同,层间黏结达到最佳状态时的沥青洒布量不同,其抵抗层间剪切的能力也有所不同。混凝土表面槽缝处理明显增加了沥青用量,而且槽缝的存在可使同步碎石封层中的碎石更好地嵌挤在槽缝之中,形成更强的咬合作用,加之沥青与槽缝以及碎石的综合黏结作用,致使刻槽处理的层间结合系数远大于凿毛处理方案。

如前所述,植石处理方案是将粒径为 9.5~19 mm 的石料直接嵌入水泥混凝土,嵌入高度为粒径的 2/3,裸露高度为粒径的 1/3,碎石表面凹凸不平、粗糙度大,表面有微裂隙,可吸入一定的水泥浆,增大了植石与水泥混凝土之间的黏结力。另外,植石所用碎石粒径较大,其表面构造深度大于凿毛工艺,直接洒布黏层油便能获得较好的层间结合系数。从表 4 可知:层间结合系数随沥青洒布量的增加先增大后减小,当沥青洒布量为 0.4 kg/m² 时,层间结合系数最大,达 0.463;继续增加沥青洒布量,层间

结合系数则急剧下降,说明部分沥青不再发挥黏结作用而起润滑作用,促使了层间的滑移。

对比以上 3 种层间处理方案的层间结合系数可知:刻槽+ SBS 改性沥青同步碎石处理方案的层间结合系数最大,但其所需的沥青洒布量也最高;凿毛+ SBS 改性沥青同步碎石处理方案的层间结合系数最小;植石+ SBS 改性沥青黏层处理方案的层间结合系数略低于刻槽+ SBS 改性沥青同步碎石方案,但其所需的沥青洒布量明显低于其他 2 种方案,可大大节省工程造价。因此,推荐植石+ SBS 改性沥青黏层处理方案为 CPC-AC 复合路面层间处理的最佳方案。本文研究所推荐处理方案已经在延安—志丹—吴旗高速公路工程中得到应用,其应用效果良好。

3 结 语

(1)通过理论分析,将 CPC-AC 复合路面简化为双层梁,其中性轴间距随层间结合状态变化,基于双层梁层间结合状态对中性轴的影响,推导出部分结合 CPC 与 AC 双层梁的层间结合系数计算公式。

(2)提出了用层间结合系数作为 CPC-AC 复合路面层间结合状态的评价指标,并以此作为层间处理技术的优选依据;将复合路面简化成双层梁,再通过室内双层梁弯曲模拟试验求得双层梁层间结合系数。通过对比分析层间结合系数与层间剪切强度的变化规律,论证了层间结合系数作为复合路面评价指标的可行性。

(3)通过对 9 种 CPC-AC 复合路面层间处理方案进行小梁弯曲试验可知:最佳沥青用量时,刻槽+ SBS 改性沥青同步碎石处理方案的层间结合系数最大,为 0.488,对应的沥青洒布量为 1.8 kg/m²;植石+ SBS 改性沥青处理方案的层间结合系数次之,最大值为 0.463,沥青洒布量为 0.4 kg/m²;凿毛+ SBS 改性沥青同步碎石处理方案的层间结合系数最小,其最大值为 0.409,沥青洒布量为 1.5 kg/m²。结合层间结合系数及工程造价要求,推荐植石+ SBS 改性沥青黏层处理方案为 CPC-AC 复合路面层间处理最佳方案。

(4)研究成果已经在延安—志丹—吴旗高速公路工程中得到应用,其效果良好,但目前研究并未考虑不同环境、不同温度条件下 CPC-AC 复合路面层间结合系数的变化。下一步将开展不同试验环境下的层间结合系数研究,以期为其他地区 CPC-AC 复合路面的研究与应用提供理论及技术支持。

参考文献:

References:

- [1] 李娜. 斜向预应力混凝土路面研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
LI Na. Study on cross-tensioned prestressed concrete pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [2] 胡长顺, 王秉纲. 水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面研究综述[J]. 中国公路学报, 1994, 7(4): 33-39.
HU Chang-shun, WANG Bing-gang. Composite pavement with asphalt concrete upper layer and cement concrete underlayer[J]. China Journal of Highway and Transport, 1994, 7(4): 33-39.
- [3] 周海春. 复合式路面的发展与应用[J]. 重庆交通大学学报: 社会科学版, 2007, 7(增): 139-140.
ZHOU Hai-chun. Development and application of composite pavement[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Social Sciences Edition, 2007, 7(S): 139-140.
- [4] 胡熠鑫. 连续配筋混凝土复合式路面设计与工程应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
HU Yi-xin. Design and engineering application of continuously reinforced concrete composite pavement[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [5] 王猛. 斜向预应力无缝水泥混凝土力学性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
WANG Meng. Mechanical behavior of slant prestressed concrete[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [6] NUNEZ O, FLINTSCH G W, DIFENDERFER B K. Synthesis on composite pavement systems: Benefits, performance, design and mechanistic analysis[C]//ASCE. The 2008 Airfield and Highway Pavements Conference. Reston: ASCE, 2008: 535-546.
- [7] 倪富健, 卢杨, 顾兴宇, 等. 沥青混凝土与连续配筋混凝土复合式路面承载力分析[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 43-48.
NI Fu-jian, LU Yang, GU Xing-yu, et al. Carrying capacity analysis of asphalt concrete and continuously reinforced concrete composite pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 43-48.
- [8] 李盛, 刘朝晖, 李宇峙, 等. 刚柔复合式路面层间界面剪切疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 151-156.
LI Sheng, LIU Zhao-hui, LI Yu-zhi, et al. Experimental study on interlaminar shear fatigue of rigid-flexible composite pavement[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 151-156.
- [9] 冯德成, 宋宇. 沥青路面层间结合状态试验与评价方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 627-631.
FENG De-cheng, SONG Yu. Study of test and evaluation method on interfacial combining state of asphalt pavement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 627-631.
- [10] YU X C, ZHENG C. Neutral plane analysis of bonded two-layered slab on Winkler foundation[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(9): 65-71.
- [11] LI Mei-jiang, WANG Xu-dong. Influence of combination between asphalt pavement layers to water damages[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: English Edition, 2008, 3(2): 18-22.
- [12] 黄优, 刘朝晖, 李盛, 等. 不同层间结合状态下刚柔复合式路面的剪应力分析[J]. 公路交通科技, 2015, 32(6): 32-38, 61.
HUANG You, LIU Zhao-hui, LI Sheng, et al. Analysis of shear stress of rigid-flexible composite pavement under different interlaminar bonding conditions[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(6): 32-38, 61.
- [13] 李文科. 连续配筋混凝土复合式路面(CRC+AC)层间结合与施工关键技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
LI Wen-ke. The research of layer combination and key technology of construction of continuously reinforced concrete composite pavement[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009.
- [14] 杨太钦. PCC-AC复合式路面典型结构研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
YANG Tai-qin. Research on representative structure of PCC-AC composite pavement[D]. Nanning: Guangxi University, 2008.
- [15] 付军, 张小强, 王发洲, 等. 水泥乳化沥青混凝土长寿命复合式路面结构研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(11): 1-6.
FU Jun, ZHANG Xiao-qiang, WANG Fa-zhou, et al. Research on CEAC long-life composite pavement structure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(11): 1-6.
- [16] 宋人武. 桥面橡胶沥青碎石封层层间结合稳定性研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(5): 51-54.
SONG Ren-wu. Research on interlayer bonding stability of asphalt rubber chip seal[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(5): 51-54.

- [17] 王荣庆. 橡胶沥青碎石封层的层间结合稳定性分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(5): 63-66.
WANG Rong-qing. Analysis on stability of interlayer bonding of asphalt rubber chip seal[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(5): 63-66.
- [18] 罗作芬, 郑传超, 史泽恒. 部分结合式双层梁层间结合系数的求解[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 30-34.
LUO Zuo-fen, ZHENG Chuan-chao, SHI Ze-heng. Approach of interfacial bond factor of semi-contacted bi-layer asphalt mixture beam[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1): 30-34.
- [19] 柳浩, 谭忆秋, 宋宪辉, 等. 沥青路面基-面层间结合状态对路面应力响应的影响分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(3): 1-6.
LIU Hao, TAN Yi-qiu, SONG Xian-hui, et al. Influence of bonding condition between base and surface courses of asphalt pavement on pavement stress response[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(3): 1-6.
- [20] 史泽恒. 陕蒙长寿命路面结构及试验段检测与分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
SHI Ze-heng. Analysis and study on long-life asphalt pavement structure and detecting the test road from Shaanxi to Inner Mongolia[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [21] 万晨光, 申爱琴, 郭寅川, 等. 桥面铺装混凝土调平层与沥青面层接触状态研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 262-266.
WAN Chen-guang, SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuan, et al. Interlayer contact state between concrete leveling course and asphalt surface on bridge deck pavement[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 262-266.
- [22] 蔚旭灿, 郑传超. 温克勒地基上结合式双层板中性面分析[J]. 工程力学, 2007, 24(9): 65-71.
YU Xu-can, ZHENG Chuan-chao. Neutral plane analysis of bonded two-layered slab on Winkler foundation[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(9): 65-71.
- [23] 李盛, 刘朝晖, 李宇峙. CRC+AC 复合式路面结构层厚度对温度效应及车辙变形的影响[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 21-28.
LI Sheng, LIU Zhao-hui, LI Yu-zhi. Influence of structure layer thickness of CRC+AC composite pavement on temperature effect and rutting deformation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 21-28.
- [24] 黄芳. 半柔性复合路面结构设计理论与方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
HUANG Fang. Study on design theory and methods of semi-flexible compound pavement structure[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [25] 曾梦澜, 吴正新, 钟梦武, 等. AC+CRC 复合式路面反射裂缝的有限元分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(10): 1516-1520.
ZENG Meng-lan, WU Zheng-xin, ZHONG Meng-wu, et al. Finite element analysis of reflection crack in AC+CRC composite pavement[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(10): 1516-1520.
- [26] 朱耀庭, 雷茂锦, 时宁, 等. 层间结合状态对沥青路面结构力学和寿命影响分析[J]. 公路工程, 2011, 36(5): 18-21, 32.
ZHU Yao-ting, LEI Mao-jin, SHI Ning, et al. Influence of interface condition on structural performance and life prediction of asphalt pavement[J]. Highway Engineering, 2011, 36(5): 18-21, 32.
- [27] 郭能荣, 袁美俊, 邢钦玉. 层间接触状况对半刚性基层沥青路面性能的影响[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2009, 31(2): 183-186.
GUO Neng-rong, YUAN Mei-jun, XING Qin-yu. Bond condition effect on the performance of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 2009, 31(2): 183-186.
- [28] 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 Yin-chuan, SHEN Ai-qin, ZHANG Jin-rong, et al. Shear strength test and mechanical response of lower seal coat for asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4): 20-26.