

基于切-拉拔试验的沥青路面层间黏结性能研究

刘红坡^{1,2}, 艾长发^{1,2}, RAHMAN Ali^{1,3}, 高晓伟^{1,2}, 邱延峻^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031; 3. 沙希德·钱伦大学 土木工程系, 胡泽斯坦 阿瓦士 83151-61357)

摘要:为研究沥青路面在车辆荷载作用下的层间黏结特性,采用自主研发的能施加水平推力的切-拉拔装置进行层间黏结试验。通过正交试验,测试了不同温度、水平推力和黏层油用量等条件下沥青混合料复合试件的层间黏结强度,分析了各因素对黏结强度的影响规律,并通过敏感性分析确定了各因素的影响程度;采用多元非线性回归方法和 SPSS 统计软件,分析了层间黏结强度与温度、水平推力和黏层油用量的关系,构建了低温、常温、高温 3 种温度下沥青路面在切-拉拔力综合作用下的层间黏结模型,并验证了该模型的可行性。研究表明:水平推力削弱了层间黏结整体性能,层间黏结强度降低,当黏层油用量为 0.8 kg/m^2 时,水平推力由 0 MPa 增至 0.2 MPa ,其黏结强度降至原有的 $1/3$;随着水平推力的增加,层间黏结强度随黏层油用量的增加呈先增后减趋势,但影响程度逐渐减弱,最大黏结强度所对应的合理黏层油用量为 $0.8 \sim 1.0 \text{ kg/m}^2$;随着温度的升高,层间黏结强度迅速降低,温度越高,水平推力对层间黏结强度的影响幅度越大,当温度为 50°C 、水平推力为 0.2 MPa 时,层间黏结强度降为 0 MPa ;不同温度区间层间黏结强度下降趋势不同,低温最快、常温缓慢、高温最慢;各因素对层间黏结强度影响大小的顺序为温度、水平推力、黏层油用量。

关键词:道路工程;沥青路面;拉拔试验;层间界面;黏结强度;水平推力

中图分类号:U416.224

文献标志码:A

Characterization of interlayer bonding in asphalt pavement based on direct tension test with horizontal loading

LIU Hong-po^{1,2}, AI Chang-fa^{1,2}, RAHMAN Ali^{1,3}, GAO Xiao-wei^{1,2}, QIU Yan-jun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. Key Laboratory of Highway Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 3. Department of Civil Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz 83151-61357, Khuzestan, Iran)

Abstract: To research the interface bond characteristics of asphalt pavement under traffic loading, this paper carried out the test to estimate bonding strength between asphalt layers via direct tension test (DTT) which can apply horizontal shear load. By the orthogonal test, this paper not only tested the interface bonding strength of asphalt mixture composite specimen under different temperature, shear load and tack coat application rate, but also analyzed the influence law of each factor on the bonding strength, and the influence degree of each factor was determined by

收稿日期:2016-12-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51378438);中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWJTU12ZT05)

作者简介:刘红坡(1979-),男,山西运城人,讲师,工学博士研究生,E-mail:lhpo301@163.com。

通讯作者:艾长发(1975-),男,江西南城人,教授,博士研究生导师,E-mail:cfai@home.swjtu.edu.cn。

sensitivity analysis. What's more, the multiple nonlinear regression method and SPSS statistical software were used to analyze the relationship between interface bonding strength and temperature, shear load and tack coat application rate. And the prediction models describing interface bonding strength under the combined effect of tension and shear stress at three different temperature levels including low temperature, middle temperature and high temperature were proposed and their feasibility was demonstrated. The results show that the interface bonding strength reduces once the shear load be applied, and the bonding strength decreases to 1/3 of the original value when the tack coat application rate is 0.8 kg/m^2 and the horizontal shear load increases from 0 MPa to 0.2 MPa. With the increase of shear load, the interface bonding strength increases and then decreases with the increase of tack coat dosage, but the degree of influence is gradually weakened. The bonding strength reaches the maximum value when the tack coat dosage is within the range of 0.8 to 1.0 kg/m^2 . Moreover, the interface bonding strength decreases sharply with the increase of temperature, and the higher the temperature, the greater the effect of horizontal shear load on the interface bonding strength. Once the temperature reaches 50°C and the shear load is 0.2 MPa, the interface bonding strength decreases to the value of 0 MPa. The decreasing tendency of the interlayer bonding strength is not the same in different temperature ranges. At low temperatures, there is a sudden fall in bond strength and it continues to drop steadily at medium temperatures, and finally decreases slowly at high temperatures. Influence of each factor on the interlayer bonding strength in descending order is temperature, shear load and tack coat application rate. 8 tabs, 5 figs, 21 refs.

Key words: road engineering; asphalt pavement; direct tension test (DTT); interface; bonding strength; horizontal loading

0 引言

沥青路面是一种由不同结构层组成的多层体系结构,其力学性能不仅与材料性能有关,还与层间的黏结性能有关。层间黏结不足会导致路面层的滑动或完全分离,会进一步使路面产生裂缝、剥离与坑洞等病害^[1]。针对沥青路面层间黏结问题,大量学者采用不同试验方法进行了系列研究。直接剪切试验是最常用的一种方法,该方法设备简单、操作方便,文献[2]~[8]中均采用该方法测试分析了层间剪切性能及其相关影响因素。由于直接剪切试验仅考虑了界面上的单向剪切力,与界面实际受力有较大差别,因此研究者考虑界面双向受剪模式对该方法加以改进。李盛等运用旋转流变仪测试了4种层间沥青材料的路用性能^[9];苏新国等采用扭转剪切仪对层间黏结效果的影响因素进行了研究^[10]。拉拔试验是评价层间界面受竖向拉力作用而破坏的一种常用试验方法,研究者常将拉拔试验和剪切试验综合起来以测试分析层间黏结性能。文献[11]~[15]中结合拉拔与剪切试验结果探讨了层间剪切强度与拉拔

强度间的相关关系;鉴于沥青铺装结构层的受弯拉特性,艾长发等采用三点弯曲试验方法测试了含层间界面的沥青混合料复合试件的疲劳性能^[16]。以上试验方法的研究成果进一步确定了选择优质黏层材料、采用合理洒铺量、保证界面粗糙干净是获得良好层间黏结效果的基础条件,对提高路面结构整体性及耐久性十分有利。

目前,国内外在层间黏结特性测试与评价中尚未形成统一有效方法,直剪试验忽略了竖向拉压荷载的影响,拉拔试验忽略了水平剪切荷载的影响。事实上,在路面荷载作用下,层间特性是竖向力和切向力综合作用的表现,因此需要设计新的试验方法,探寻新的评价模型。基于此,笔者设计了施加竖向荷载的压-直剪试验及施加水平荷载的切-拉拔试验,以研究竖向与水平荷载综合作用下沥青路面的层间黏结性能^[17]。本文基于施加水平荷载(水平推力)的切-拉拔试验,研究沥青路面层间黏结强度随黏层油用量、温度和水平推力等影响因素的变化规律,并进行各因素敏感性分析,确定这3种影响因素的主次关系,最终建立基于

影响,水平推力施加位置应靠近复合试件层间界面,并通过人工手柄调节控制阀,将加载误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。

2 试验材料及方案

2.1 试验材料

采用 AC-13 与 AC-20 组成的复合试件,两者级配均为《公路沥青路面施工技术规范》(JTJ F40—2004)(以下简称规范)中的中值级配^[19],沥青胶结料为 SBS 改性沥青。黏层油采用阳离子普通乳化沥青,蒸发残留物含量(质量分数)为 38%。制作复合试件时,先击实成型 1/2 高度的 AC-20 马歇尔试件,在洒铺普通乳化沥青黏层材料前先将已成型的 AC-20 试件称重,然后用刷子快速在试件表面上均匀涂抹黏层材料至设计用量,再击实另一半试件 AC-13,直至复合试件成型。

2.2 试验方案

2.2.1 黏层油用量

黏层油用量过多会起到润滑作用,用量过少起不到黏结作用,会导致黏层材料的黏聚力与嵌挤作用降低。参考规范中建议,本文中黏层油用量取值范围为 $0.4\sim 1.6\text{ kg/m}^2$ 。

2.2.2 试验温度

为研究温度对层间黏结性能的影响,本文考虑低温、常温、高温 3 种状态,试验温度取值范围为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.3 水平推力

车辆行驶时路面受到水平荷载作用,在水平荷载作用下,路面结构内部及黏结层会产生水平剪切应力。车辆刹车或车轮处于滑动状态时,其对路面的水平载荷(即水平推力 F)为

$$F=\mu N \tag{1}$$

式中: μ 为水平荷载系数,取值见表 1; N 为路面对轮胎的反作用力(kN)。

表 1 不同行车状况下车辆水平荷载系数

Tab. 1 Horizontal load coefficients of vehicle under different driving conditions				
行车状况	匀速行驶	正常启动	一般制动	紧急制动
μ	0.01	0.10	0.20	0.50

在 BZZ-100 标准轴载作用下,轮胎与路面的接触压应力为 0.7 MPa ,据此,本文中水平推力取值范围为 $0\sim 0.35\text{ MPa}$ 。已有研究成果表明,常温下普

通乳化沥青黏结层的层间抗剪强度为 0.5 MPa 左右^[20],为保证复合试件层间黏结面不至于在水平推力作用下直接被推剪破坏,本文中水平推力取小于 50% 的层间抗剪强度,即 $0\sim 0.2\text{ MPa}$ 。

3 试验结果及分析

3.1 黏层油用量对层间黏结性能的影响

常温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,分别进行 $0、0.05、0.1、0.15、0.2\text{ MPa}$ 这 5 种水平推力下的切-拉拔试验。各测试条件下的层间黏结强度测试结果见图 3。图 3 中: $k_1\sim k_5$ 为不同水平推力下层间黏结强度上升段中,随黏层油用量增加而增加的拟合曲线的斜率; R^2 为判定系数。

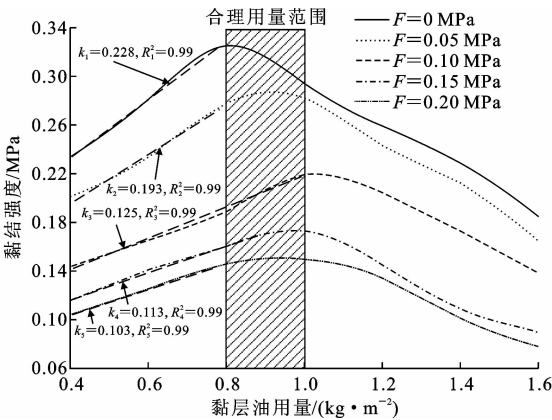


图 3 黏层油用量对层间黏结强度的影响
Fig. 3 Influence of tack coat application rate on bonding strength of interlayer

由图 3 可知:在水平推力和竖向拉力综合作用下,层间黏结强度降低,当黏层油用量为 0.8 kg/m^2 时,水平推力由 0 MPa 增至 0.2 MPa ,其黏结强度降至原有的 $1/3$;层间黏结强度随黏层油用量的增加呈先增加后减少的趋势,最大黏结强度所对应的合理黏层油用量受水平推力的影响,但均在 $0.8\sim 1.0\text{ kg/m}^2$ 。另外,由曲线斜率 k 可看出,随着水平推力的增大, k 逐渐减小,说明层间黏结强度随黏层油用量增加而增长的幅度逐渐减小,表明施加水平推力后,层间受到剪切力与拉拔力的叠加作用,该作用削弱了层间黏结整体性能,使得黏层油用量对层间黏结强度的影响逐渐减弱^[21-23]。

3.2 温度对层间黏结性能的影响

根据黏层油用量对层间黏结强度影响的试验结果,黏层油洒铺量选用 0.8 kg/m^2 ,温度取值为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,间隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,共进行 10 种温度条件下的切-拉拔试验,所施加的水平推力为 $0、0.1、0.2\text{ MPa}$,试验

结果如图 4 所示。可以看出,当温度由 5℃ 升至 50℃,在 0、0.1、0.2 MPa 水平推力与竖向拉力联合作用下,对应的层间黏结强度降幅分别为 96.13%、100%、100%,随着温度的升高,层间黏结强度迅速降低,温度变化对层间黏结强度影响十分显著。同时,在低温、常温、高温 3 个区域的下降趋势存在差别,低温最快、常温变缓、高温最慢。

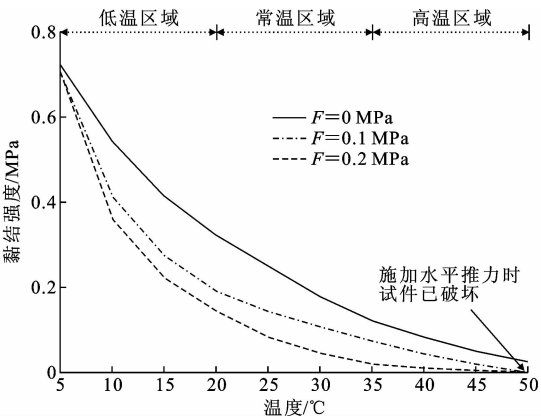


图 4 温度对层间黏结强度的影响

Fig. 4 Influence of temperature on bonding strength of interlayer

3.3 水平推力对层间黏结性能的影响

试验中,黏层油洒铺量为 0.8 kg/m²。选取低温 5℃、常温 20℃、高温 35℃ 这 3 种典型温度 T 条件,施加的水平推力分别为 0、0.05、0.1、0.15、0.2 MPa,其层间黏结强度变化趋势及拟合曲线如图 5 所示。

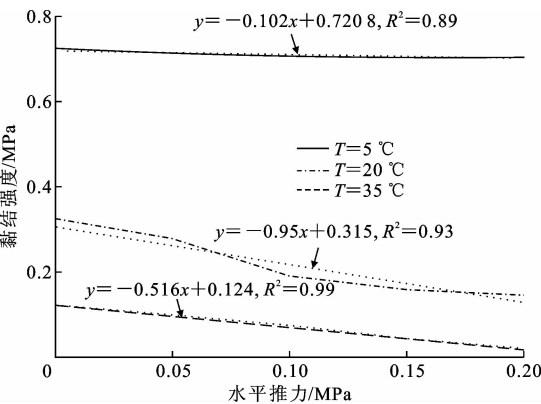


图 5 水平推力对层间黏结强度的影响

Fig. 5 Influence of horizontal shear stress on bonding strength of interlayer

由图 5 可知,不同温度下的层间黏结强度均随水平推力的增大而减小,水平推力的作用会减弱层间黏结性能。不同温度下的层间黏结强度与水平推力的拟合曲线斜率以 5℃ 时最小,仅为 -0.102,可见,低温条件下水平推力的作用对层间黏结强度的影响并不明显。分析认为:低温时黏层沥青处于硬脆固态,强度较大,当对层间界面进行切-拉拔试验

时,所施加的水平推力难以造成黏层沥青在水平方向的剪切损伤,故低温时水平推力的施加并不能对层间竖直拉拔方向的黏结强度造成明显影响;而常温时沥青处于黏弹状态,黏度和强度均比低温时下降,在层间界面切-拉拔试验中,随着水平推力的增大,黏层沥青将在水平方向产生剪切损伤,该损伤将削弱层间黏结整体性能,从而降低层间竖直拉拔方向的黏结强度。

为进一步分析不同温度下水平推力对层间黏结强度下降幅值的影响,以每种温度条件下没有施加水平推力($F=0$ MPa)时的黏结强度为基准,分别计算未施加水平推力时的黏结强度与施加不同水平推力时的黏结强度之比,该比值即为黏结强度下降比值。计算结果如表 2 所示。

表 2 不同水平推力时的黏结强度下降比值

Tab. 2 Decreasing ratios of bonding strength under different horizontal shear stresses

温度/℃	不同水平推力(MPa)下的黏结强度下降比值				
	0	0.05	0.10	0.15	0.20
5	1	1.01	1.02	1.03	1.03
20	1	1.17	1.71	2.02	2.23
35	1	1.22	1.63	2.77	5.81

由表 2 可以看出,不同温度条件下的黏结强度下降幅度不同。以 0.2 MPa 水平推力为例,5℃、20℃、35℃ 时黏结强度下降比值分别为 1.03、2.23、5.81,表明温度越高,水平推力对层间黏结强度的影响幅度越大。乳化沥青黏层材料的黏度、黏结性能随温度的升高而降低,由 Mohr Coulomb 理论关于黏层材料的黏结效果作用机理可知,水平推力削弱了层间摩擦阻力的作用,温度升高削弱了黏结力的作用,因此在两者综合作用下,层间黏结强度降幅更大。这也是夏季车辆运行时更容易导致层间脱离失效的原因所在。

3.4 各因素影响敏感性分析

运用 SPSS 软件,采用方差分析方法中的方差显著性检验(F 检验)进行各因素敏感性分析。试验中,水平推力选用 0、0.1、0.2 MPa 这 3 种水平;温度选取 5℃、20℃、35℃ 这 3 种水平;黏层油用量采用 0.4、0.8、1.2 kg/m² 这 3 种水平。黏结强度正交试验设计如下页表 3 所示。方差分析中,选择置信概率 0.01 和 0.05 作为检验水平,用 F 值与 $F_{0.05}$ 、 $F_{0.01}$ 临界值进行比较。本次试验中自由度 f_1 、 f_2 均为 2,通过查询 F 检验临界值表可知, $F_{0.05}$ 为 19.00, $F_{0.01}$ 为 99.01。下页表 4 为各因素方差分析结果。

表 3 黏结强度正交试验设计

Tab. 3 Orthogonal test design of bonding strength

水平因素	水平推力/ MPa	温度/℃	黏层油用量/ (kg·m ⁻²)	黏结强度/ MPa
试验 1	0.0	5	0.4	0.687
试验 2	0.0	20	0.8	0.325
试验 3	0.0	35	1.2	0.109
试验 4	0.1	5	0.8	0.707
试验 5	0.1	20	1.2	0.204
试验 6	0.1	35	0.4	0.052
试验 7	0.2	5	1.2	0.697
试验 8	0.2	20	0.4	0.105
试验 9	0.2	35	0.8	0.021

表 4 黏结强度方差分析结果

Tab. 4 Variance analysis results of bonding strength

变异源	平方和	自由度	均方	F 值	F 值临界值		显著性
					F _{0.05}	F _{0.01}	
水平推力	0.015	2	0.007	2.68	19.00	99.01	不显著
温度	0.663	2	0.332	120.07	19.00	99.01	高度显著
黏层油用量	0.008	2	0.004	1.47	19.00	99.01	不显著
误差	0.006	2	0.003				
总和	0.692	8	0.342				

从表 4 中各因素的 F 值可知,各因素影响层间黏结强度的大小顺序依次为温度、水平推力、黏层油用量。温度对黏结强度的影响显著,条件差异远大于随机差异;水平推力、黏层油用量对黏结强度影响不显著,其条件差异均小于随机差异。因此,对于同种黏层材料,温度是影响层间黏结强度的决定性因素,水平推力作用会削弱层间黏结效果,降低层间黏结强度,而黏层油用量并非关键因素,但结合 3.1 节的试验结果可知,合理的黏层油用量对提高层间黏结强度有利。

4 层间黏结模型构建

根据文献[21]中提供的思想与方法,采用 SPSS 统计软件,使用初等函数分别建立各单变量下层间黏结强度 Y_i (i 分别为温度 T 、水平推力 F 、黏层油用量 A) 对各变量 X_i 的最佳一元回归模型 $Y_i = f(X_i)$,再将以上 3 个变量综合作用下的层间黏结强度 Y 对 Y_i 进行多元线性回归,得到其多元非线性回归模型。

由于黏层材料的性能受温度影响大,图 4 显示层间黏结强度在低温、常温及高温 3 个区域表现出不同的变化趋势,因此本文为提高模型计算精度,在构建层间黏结模型时,区分为低温、常温、高温 3 种状态范围。对于每种温度状态范围,选用 4 种温度

条件、4 种黏层油用量、4 种水平推力的试验条件下的正交试验结果(共计 48 组正交试验结果),分别构建相应温度条件下的层间黏结模型。所构建的模型如表 5~表 7 所示。

表 5 低温状态下的层间黏结模型

Tab. 5 Interlayer bond models under low temperature condition

温度范围/℃		$T < 20$
各因素作用 下的层间黏 结模型	温度 T	$Y_T = 1.251 - 0.314\lg(T)$
	水平推力 F	$Y_F = 1.348 - 0.822\lg(T) - 0.738F$
	黏层油用量 A	$Y_A = 0.329A - 0.206A^2 + 0.497$
多因素作用下的 层间黏结模型		$Y = 1.32 - 0.878\lg(T) - 0.540F + 0.137A - 0.086A^2$ $R^2 = 0.977$,统计量 $Z = 167$

表 6 常温状态下的层间黏结模型

Tab. 6 Interlayer bond models under normal temperature condition

温度范围/℃		$20 \leq T < 35$
各因素作用 下的层间黏 结模型	温度 T	$Y_T = 1.212 - 0.732\lg(T)$
	水平推力 F	$Y_F = 1.094 - 0.614\lg(T) - 0.723F$
	黏层油用量 A	$Y_A = 0.866A - 0.784A^2 + 0.197 \cdot A^3 - 0.083$
多因素作用下的 层间黏结模型		$Y = 0.689 - 0.502\lg(T) - 0.604F + 0.658A - 0.596A^2 + 0.150A^3$ $R^2 = 0.958$,统计量 $Z = 83.1$

表 7 高温状态下的层间黏结模型

Tab. 7 Interlayer bond models under high temperature condition

温度范围/℃		$35 \leq T \leq 50$
各因素作用 下的层间黏 结模型	温度 T	$Y_T = 0.766 - 0.444\lg(T)$
	水平推力 F	$Y_F = 0.786 - 0.362F - 0.439\lg(T)$
	黏层油用量 A	$Y_A = e^{3.916A - 2.366A^2 - 4.36}$
多因素作用下的 层间黏结模型		$Y = 0.578 - 0.242F - 0.339\lg(T) + 0.638e^{3.916A - 2.366A^2 - 4.36}$ $R^2 = 0.935$,统计量 $Z = 24.1$

应用表 5~表 7 建立的多因素作用下的模型进行层间黏结强度预测,并与实测值进行比较,结果如下页表 8 所示。由表 8 可知,实测值与预测值的相对误差均在 10%以内,表明所构建的层间黏结模型精度高,可用于层间黏结强度的预测。

5 结 语

(1)在水平推力和竖向拉力综合作用下,层间黏结强度降低,且其随黏层油用量的增加先增加后减少,合理黏层油用量为 0.8~1.0 kg/m²;随着水平推力的增加,黏层油用量对层间黏结强度的影响逐

表 8 黏结强度实测值与预测值比较
Tab. 8 Comparison of predicted bonding strength
values and measured values

工况	水平推力 F/MPa	温度 T/℃	黏层油 用量 A/ (kg·m ⁻²)	黏结强度 Y/MPa		相对误 差/%
				实测值	模型 预测值	
1	0.00	10	0.8	0.543 0	0.497 0	-8.55
2	0.10	10	0.4	0.397 0	0.429 0	8.07
3	0.15	5	1.2	0.700 0	0.666 0	-4.88
4	0.20	15	0.8	0.223 0	0.234 0	4.91
5	0.00	20	0.4	0.234 0	0.218 0	-6.71
6	0.10	20	0.8	0.190 0	0.202 0	6.42
7	0.15	25	1.6	0.039 0	0.042 0	8.72
8	0.20	30	0.8	0.051 0	0.053 0	4.49
9	0.00	40	0.8	0.083 0	0.075 0	-9.72
10	0.10	35	0.8	0.075 0	0.070 0	-6.08
11	0.10	40	0.4	0.036 0	0.036 0	0.00
12	0.15	45	0.4	0.008 0	0.007 2	-8.75

渐减弱。

(2)层间黏结强度对温度变化十分敏感,随着温度的升高,层间黏结强度迅速降低;不同温度区间其下降趋势不同,低温最快、常温变缓、高温最慢。

(3)层间黏结强度随水平推力的增大呈线性下降趋势;温度越高,水平推力对层间黏结强度的影响越大。

(4)正交试验结果表明,各因素影响层间黏结强度大小的顺序依次为温度、水平推力、黏层油用量。

(5)基于不同温度区域层间黏结强度的变化趋势,结合 SPSS 数据统计软件,采用多元回归方法,构建了低温、常温、高温 3 种状态下的沥青路面层间黏结模型,并验证了模型的可行性。

(6)研究成果可为沥青路面新建工程、薄层加铺、桥面铺装以及急弯、陡坡、交叉路口等特殊路段的铺面工程黏结层设计与施工、层间病害成因分析提供重要的试验数据支撑与依据。由于本文模型仅考虑了一种黏层油,对于其他类型黏层油的适用性还需要开展进一步试验研究与模型修正。

参考文献:

References:

[1] 李秋实,何东坡,丁海波.黏层对不同类型路面组合界面力学特性的影响[J].中国公路学报,2015,28(8):22-30.
LI Qiu-shi, HE Dong-po, DING Hai-bo. Effects of tack coat on mechanical properties of pavement interface with combination of different types [J]. China

Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (8): 22-30.
[2] WEST R C,ZHANG J N,MOORE J R. Evaluation of bond strength between pavement layers[R]. Auburn: Auburn University,2005
[3] VAITKUS A,ŽILIONIENĖ D, PAULAUŠKAITĖ S, et al. Research and assessment of asphalt layers bonding [J]. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering,2011, 6(3):210-218.
[4] SONG W M,SHU X,HUANG B S,et al. Factors affecting shear strength between open-graded friction course and underlying layer [J]. Construction and Building Materials,2015,101:527-535.
[5] 刘 丽,郝培文,徐金枝. 粘层状况对沥青路面层间剪切疲劳性能的影响[J]. 公路交通科技,2012,29(10):11-15.
LIU Li, HAO Pei-wen, XU Jin-zhi. Influence of tack coat condition on shear fatigue performance of asphalt pavement structure interfaces[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2012, 29(10):11-15.
[6] 汪水银. 半刚性基层与沥青面层粘结性能影响因素[J]. 交通运输工程学报,2010,10(2):12-19.
WANG Shui-yin. Influence factors of bond performance between asphalt surface layer and semi-rigid base [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2010,10(2):12-19.
[7] 李彦伟,穆 柯,石 鑫,等. 基面层间接触状态对沥青路面力学响应影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2014,34(2):38-44.
LI Yan-wei, MU Ke, SHI Xin, et al. Impact of base-surface contact conditions on mechanical response of asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2014,34(2):38-44.
[8] 何 锐,武书华,管 勤,等. 沥青路面层间粘结性能影响因素试验研究[J]. 中外公路,2015,35(4):272-276.
HE Rui,WU Shu-hua, GUAN Qin, et al. Experimental research on influencing factors on interlayer bonding performance of asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2015,35(4):272-276.
[9] 李 盛,刘朝晖,张景怡,等. 刚柔复合式路面层间沥青材料路用性能试验评价[J]. 公路交通科技,2013,30(11):7-12,67.
LI Sheng, LIU Zhao-hui, ZHANG Jing-yi, et al. Test evaluation of pavement performance of interlaminar asphalt material for rigid-flexible composite pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research

- and Development, 2013, 30(11): 7-12, 67.
- [10] 苏新国, 颜 赫, 鲁圣弟, 等. 沥青路面层间粘结效果影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(3): 21-26, 68.
- SU Xin-guo, YAN He, LU Sheng-di, et al. Influencing factors on bonding effect between asphalt layers[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(3): 21-26, 68.
- [11] HAKIMZADEH S, BUTTLAR W G, SANTARROMANA R. Shear and tension-type tests to evaluate bonding of hot-mix asphalt layers with different tack coat application rates[J]. Transportation Research Record, 2012(2295): 54-62.
- [12] 王亚玲, 周玉利, 姚爱玲, 等. 沥青混凝土桥面铺装结构层间剪切与拉拔试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 15-18.
- WANG Ya-ling, ZHOU Yu-li, YAO Ai-ling, et al. Test of shear and pull-off between asphalt and concrete on bridge deck pavement structure[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 15-18.
- [13] 朱 俊, 雷茂锦, 刘永明. 沥青路面基-面层间拉拔试验研究[J]. 交通科技, 2013(1): 75-78.
- ZHU Jun, LEI Mao-jin, LIU Yong-ming. Study on the drawing interfacial strength between base and surface of asphalt pavement[J]. Transportation Science & Technology, 2013(1): 75-78.
- [14] 孙 强, 胡腾飞, 王光勇. 沥青路面层间粘结性能试验研究[J]. 石油沥青, 2015, 29(3): 46-50.
- SUN Qiang, HU Teng-fei, WANG Guang-yong. Experimental study on interlayer bond performance of asphalt pavement[J]. Petroleum Asphalt, 2015, 29(3): 46-50.
- [15] 韩志宇, 张新天. 沥青路面层间结合的扭剪与拉拔试验分析[J]. 北京建筑大学学报, 2015, 31(2): 8-14, 28.
- HAN Zhi-yu, ZHANG Xin-tian. Analysis of the tensile shear and anti-drawing test about the interlayer between asphalt layers[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015, 31(2): 8-14, 28.
- [16] 艾长发, 成 猛, 杨 涛, 等. 含层间界面的沥青混合料复合小梁弯曲疲劳试验[J]. 公路交通科技, 2011, 28(12): 27-31, 38.
- AI Chang-fa, CHENG Meng, YANG Tao, et al. Flexural fatigue test on beams of asphalt mixture involving inter-surface[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(12): 27-31, 38.
- [17] AI C F, RAHMAN A, SONG J J, et al. Characterization of interface bonding in asphalt pavement based on direct shear test with vertical loading[C]//ASCE. 2016 International Conference on Transportation Infrastructure and Materials. Reston: ASCE, 2016: 1-15.
- [18] 郭 锋. 道路结构层间性能评价方法[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- GUO Feng. Evaluation methods of tack coat and stress absorbing interlayer[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [19] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].
- JTG F40—2004, Technical specifications for construction of highway asphalt pavements[S].
- [20] 成 猛, 艾长发, 李永明. 黏层油合理用量试验及其对路面性能影响机理分析[J]. 公路, 2011(11): 35-39.
- CHENG Meng, AI Chang-fa, LI Yong-ming. Experiment of reasonable content of tack asphalt coat and analysis of its effect mechanism to pavement performance[J]. Highway, 2011(11): 35-39.
- [21] 刘 好, 刘 超, 刘 庚. 超薄磨耗层 NovaChip 层间粘结技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(7): 70-72.
- LIU Hao, LIU Chao, LIU geng. Research on Nova-Chip ultra-thin surface bonding technology between layers[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(7): 70-72.
- [22] 时林军. 超薄面层层间粘结技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(7): 68-71.
- SHI Lin-jun. Research on ultra-thin surface bonding technology between layers[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(7): 68-71.
- [23] 徐 群. 非线性回归分析的方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- XU Qun. The research on non-linear regression analysis methods[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.