

文章编号:1671-8879(2020)02-0021-09

温度、粗糙度对混凝土桥面沥青铺装层层间 拉拔强度的耦合作用

孔令云¹,黄麟钦²,代 笠³,余 苗¹

(1. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室,重庆 400074; 2. 重庆交通大学 材料科学与工程学院,重庆 400074; 3. 西藏自治区公路局林芝公路分局,西藏 林芝 860000)

摘要:为研究温度与粗糙度对混凝土桥面沥青铺装层层间拉拔强度的耦合作用,首先制备了不同粗糙度的混凝土试件,测定其摩擦因数、构造深度与灰度值;然后在混凝土试件表面涂刷 SBS 改性沥青作为黏结层,同沥青混合料制成车辙板,并进行钻芯取样,将车辙板芯样在不同温度下进行保温后,进行拉拔试验得到其拉拔强度;最后利用主成分分析法将摩擦因数、构造深度、灰度值转化为粗糙度综合指数,对层间拉拔强度与粗糙度综合指数进行线性拟合。研究表明:当温度为 [20 °C, 28 °C] 时,温度每升高 1 °C 引起的层间拉拔强度变化,相当于温度保持不变,下降一个粗糙度当量值引起的拉拔强度变化;同时在这一温度范围内,温度对层间拉拔强度的影响程度明显大于粗糙度,当温度为 20 °C、23 °C、25 °C、28 °C 时,层间拉拔强度与粗糙度之间的相关系数以及粗糙度对层间拉拔强度的影响程度总体高于其他试验温度;当温度升高至 30 °C 时,层间拉拔强度与粗糙度的相关系数比 28 °C 时下降了 62.2%,拟合方程的斜率比 28 °C 时下降了 58.2%,二者线性相关性明显减弱,粗糙度对拉拔强度的影响程度显著降低;当温度超过 30 °C 时,层间拉拔强度与粗糙度之间的线性相关性极弱,拟合方程斜率接近于 0,粗糙度的改变几乎不影响层间拉拔强度。

关键词:道路工程;桥面铺装层;主成分分析;耦合作用;层间拉拔强度;粗糙度;温度

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.02.003

Coupling effect of temperature and roughness on the pull-out strength of concrete bridge deck inter-layer

KONG Ling-yun¹, HUANG Lin-huo², DAI Li³, YU Miao¹

(1. National and Local Joint Laboratory of Transportation and Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Linzhi Highway Branch of Tibet Autonomous Region Highway Bureau, Linzhi 860000, Tibet, China)

Abstract: To study the coupling effect of roughness and temperature on the inter-layer pull-out strength of concrete bridge deck, concrete specimens with different roughness were prepared at first, and their friction coefficients, structural depth and gray values were measured. SBS modified asphalt was coated on the surface of concrete specimens as bonding layer, and rutting

收稿日期:2019-11-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51608085);国家山区公路工程工程技术研究中心开放基金项目(GSGZJ-2015-08)

作者简介:孔令云(1976-),女,江苏南通人,教授,博士研究生导师,E-mail:43112443@qq.com.

board was made with asphalt mixture and core drilling was taken. The core samples of rutting plate were insulated at different temperatures, and then the pull-out strength was obtained by pull-out test. The principal component analysis method was used to transform the friction coefficient, structure depth and gray value into the comprehensive index of roughness. Finally, the pull-out strength and comprehensive index of roughness were linearly fitted. The results show that when the temperature ranges from 20 °C to 28 °C, the change of pull-out strength caused by increasing temperature by 1 °C is equivalent value to the change caused by decreasing roughness by 1 roughness equivalent when the temperature is constant. In this temperature range, the influence of temperature on pull-out strength is obviously greater than that of roughness. Secondly, when the temperature are 20 °C, 23 °C, 25 °C and 28 °C, the correlation coefficient between pull-out strength and roughness and the influence of roughness on pull-out strength are higher than other test temperatures. When the temperature is 30 °C, compared with 28 °C, the correlation coefficient between pull-out strength and roughness decreases by 62.2% and the slope of fitting equation decreases by 58.2%, indicating that the linear correlation between them and the influence of roughness on pull-out strength both decrease significantly. When the temperature is greater than 30 °C, the linear correlation between pull-out strength and roughness is very weak. The slope of fitting equation is close to 0, indicating that the change of roughness hardly affects pull-out strength. 5 tabs, 5 figs, 29 refs.

Key words: road engineering; bridge deck pavement; principal component analysis; coupling effect; pull-out strength of inter-layer; roughness; temperature

0 引言

桥面铺装防水黏结层可以将混凝土桥面和沥青面层黏结为一个整体,能有效地保护混凝土桥面不受车轮、雨水等外界作用的损害,提高桥梁的耐久性^[1-2]。桥面与沥青面层的黏结强度如果不足,则在外界荷载以及雨雪的作用下易产生车辙、水损害以及疲劳破坏等病害。李明国在弹性力学的基础上,应用有限元方法建立混凝土梁桥沥青铺装结构有限元分析模型,对混凝土梁桥沥青铺装结构进行静力学、动力学以及温度响应分析,探讨了空心板梁沥青桥面铺装结构设计方法,计算结果表明,车辙是沥青混凝土铺装层中最普遍且较严重的病害^[3]。钱振东等采用有限元软件 ABAQUS,研究动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝的扩展作用,模拟计算出不同温度以及不同铺装裂缝长度、宽度、深度及数量等条件下的铺装裂缝尖端 J 积分数值,结果表明,动水压力对桥面铺装层具有显著影响^[4]。万晨光等采用 LS-DYNA 有限元分析软件,建立了沥青铺装层内部饱水裂缝模型,分析了在施加正弦车辆荷载条件下,沥青铺装层内部动水行为,认为车辆动载作用下,动水压力会加速铺装结构破坏,从而破坏桥面铺装层中的沥青膜,导致沥青膜从集料表面脱落,从

而产生水损害^[5]。王笃喜等选取 6 种典型水泥混凝土桥面防水黏结层进行试验,研究认为当桥面铺装层黏结强度降低且出现裂缝后,会发生疲劳破坏,桥面板产生反射裂缝时防水黏结层的疲劳性能可以对防水黏结材料的疲劳特性进行评价^[6]。美国国家公路合作研究计划(NCHRP)也曾指出,桥面混凝土和钢筋的腐蚀破坏主要来源于水分和防冻盐^[7]。为提高混凝土桥面层间黏结强度,相关研究从层间界面力学行为^[8-9]、防水黏结层材料的类型和用量及结构形式^[10-12]、粗糙度与温度等方面进行了探讨。其中,粗糙度和温度是影响桥面铺装层间黏结强度的重要因素。Xu 等通过直剪试验、拉拔试验以及三维有限元分析认为,层间界面摩擦因数为 0.5 时,可获得较高的层间剪切强度^[13]。常艳婷等基于剪切试验和拉拔试验,研究了不同配方、洒布量及温度条件对环氧乳化沥青黏结层黏结性能的影响,由此确定了层间黏结力最大值对应的环氧乳化沥青洒布量,同时得到了环氧乳化沥青作为黏结层材料的最佳配比和最优洒布量^[14]。徐鸥明等利用复合试件的高温性能试验和疲劳后层间剪切试验,研究不同界面形式对铺装层高温性能的影响,以及不同界面形式条件下,层间抗剪强度随弯拉疲劳次数的变化,认为层间界面的粗糙程度对沥青铺装层层间抗剪性能有

重要影响,铺装层层间纹理丰富程度越高,越有利于扩散荷载应力,减小铺装层受力,间接提升铺装层抗变形能力^[15]。程道虎等选取 3 种典型的桥面板表面纹理及 3 种防水黏层材料,对其进行直剪试验,确定不同防水黏层材料与不同纹理混凝土桥面板组合时的防水黏层材料最佳用量及层间抗剪强度,研究发现,沥青铺装层间黏结材料的用量与层间界面的纹理丰富程度呈正相关,温度对桥面层间抗剪强度存在显著影响^[16]。严秋荣等根据汕湛(汕头—湛江)高速公路揭博段现场试验分析发现,沥青铺装层层间黏结强度与粗糙度指标中的摩擦因数与灰度值呈正相关^[17]。Liu 等采用水性环氧树脂乳化沥青作为沥青铺装层层间黏结材料,研究了温度和固化剂类型等因素对层间黏结性能的影响^[18]。Zhou 等指出,沥青铺装层层间黏结强度会随着粗糙度的增加呈先增后减趋势,且在摩擦因数为 45~60 时达到峰值,沥青铺装层黏结材料的最佳熔化温度为 280 ℃~350 ℃,但其考虑的是施工温度,并非桥面所处环境温度^[19]。任万艳等采用传统的刻槽、毛面、光面界面处理方式制备桥面铺装试件,测试竖向荷载作用下,不同界面类型试件的层间极限抗剪强度,分析得出其层间剪应力与剪切位移的关系,进一步研究温度、水以及冻融循环作用对沥青铺装层层间力学性能的影响,同时针对植石界面类型试件,分析了 AC-13C、AC-20C 与 SMA-13 沥青铺装层对其层间抗剪性能的影响,结果表明,植石界面比传统界面有更大的摩擦阻角和黏聚力^[20]。

综上所述,以上研究主要侧重于单独分析粗糙度与温度对层间黏结强度的影响,对二者的共同作用研究较少。实际工程中,在一定的温度范围内,温度、粗糙度对层间黏结强度影响是共同发生作用,而工程上进行混凝土桥面铺装层层间黏结强度测试过程中,在温度无法控制的条件下,未能提出现场检测的温度范围,从而导致现场检测数据偏离与离散。基于上述分析,本文主要研究温度与粗糙度对桥面铺装层层间拉拔强度的耦合作用,定量分析温度、粗糙度对层间黏结强度的影响,定性分析现场层间黏结强度检测的温度控制范围。目前,工程上评价粗糙度的主要指标有摩擦因数、构造深度、露骨率。摩擦因数与构造深度可以通过相关试验较为精确地测得。露骨率只能通过外观去辨别,因此存在很大的主观性。为弥补这一缺陷,相关研究引入了灰度值这一指标^[21-22]。因此,本文采用摩擦因数、构造深度、灰度值作为粗糙度评价指标。

1 试验材料与方法

1.1 主要原材料

防水黏结层采用 SBS 改性沥青。依照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ E20—2011)测试其各项技术指标见表 1。C40 和 C30 混凝土使用复合硅酸盐水泥 42.5, C20 混凝土使用复合硅酸盐水泥 32.5。

表 1 SBS 改性沥青技术指标试验结果

Tab. 1 Test results of technical indexes of SBS modified asphalt

试验项目	规范要求	实测值
针入度(25 ℃, 5 s, 100 g)/0.1 mm	60.0~80.0	66.8
针入度指数 PI 值	≥-0.40	0.09
软化点/℃	≥55.0	63.8
135 ℃运动黏度/(Pa·s)	≤3.0	2.6
延度(5 ℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	≥30.0	38.9

1.2 试验方案

本文制备了不同粗糙度的拉拔试件,然后进行试验,以得到不同温度下各粗糙度对应的拉拔强度,具体试验方案如下。

(1)制备 3 种不同强度的混凝土,分别为 C20、C30、C40 混凝土。

(2)对混凝土试件进行表面处理。同样,为使粗糙度有显著性差异,本文采用 2 种方式进行表面处理,即拉毛和抛丸处理。

(3)对混凝土表面进行粗糙度测试,测试数据包括摩擦因数、构造深度、灰度值。

(4)在混凝土试件表面涂刷 SBS 改性沥青,然后与沥青混合料共同制成车辙板,并放置于干燥处。对车辙板进行钻芯取样,芯样直径均为 5 cm。

(5)将准备好的芯样放置在恒温箱中,保温温度分别为 20 ℃、23 ℃、25 ℃、28 ℃、30 ℃、32 ℃和 35 ℃,保温时间为 5~6 h。待保温结束后取出芯样进行拉拔试验,记录下相关试验数据。

1.3 试验方法

1.3.1 灰度值测试方法

灰度值是一种描述黑白图像像素点取值的参数,其范围在 0~255 像素之间,0 表示纯黑色,255 像素表示纯白色^[23]。混凝土表面存在着许多凹凸不平的构造,当光线射在凸出部分时,光线较亮,所以灰度值较大;而当光线射在凹陷部分时,光线较暗,所以灰度值较小^[24-27]。本文测试灰度值的方法如下。

(1)将混凝土试件表面清理干净,并将预制定位

板置于试件中心。

(2)将相机架设在距离混凝土试件表面 100~150 cm 高度处,调平相机机身。打开摄像灯,并调整其光照度为 500 lx。

(3)进行拍照,获取混凝土试件表面图片。

(4)对图片进行后处理,获取测量点的坐标值以及像素值,然后计算灰度值,即

$$P = \frac{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m [z'_{\max} - z'(x,y)]}{nm} \quad (1)$$

式中: P 为灰度值; (x,y) 为测量点的坐标值; z'_{\max} 为剔除突变点后各点像素中最大值; $z'(x,y)$ 为剔除突变点后各点像素值; n,m 分别为像素测量点矩阵的行数和列数。

1.3.2 拉拔试验

拉拔试验采用现场智能拉拔仪进行测试,见图 1,图 2 为拉拔破坏后芯样断面。



图 1 拉拔试验
Fig. 1 Pull-out test

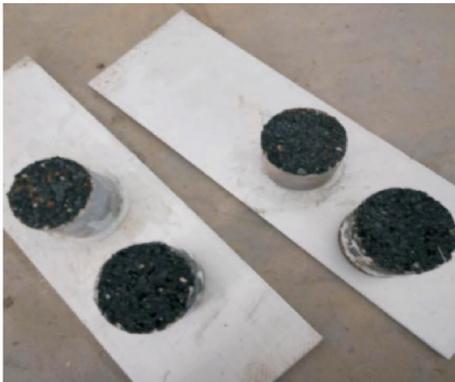


图 2 芯样断面
Fig. 2 Core sample sections

试验测试对象为车辙板芯样,测试方法如下。

(1)将 AB 胶均匀涂抹于车辙板芯样的上下表面,并将混凝土底面粘贴在铝板正中央,沥青混合料顶面粘贴在拉头中央,待 AB 胶完全固化。

(2)将粘贴有铝板和拉头的芯样置于恒温箱中进行保温,待保温结束后,取出试件。将试件拉头固定在拉拔仪的拉杆上,铝板用重物固定于地面。

(3)打开拉拔仪开关,调零显示器读数。匀速地转动摇把,提升拉杆,待显示器读数达到峰值后记下相应数据,即为破坏荷载。

2 结果与分析

2.1 试验结果

本文采用常规试验方法测试了混凝土试件的摩擦因数、构造深度、混凝土表面的灰度值,并在不同温度 T 下测试了试件拉拔强度,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出:随着温度的升高,拉拔强度值总体下降;各温度下,构造深度与灰度值的变化趋势相似,表明这 2 个指标之间可能存在一定的相关性;当温度为 20 °C、23 °C、25 °C 时,拉拔强度与构造深度、灰度值的变化趋势基本一致;在温度达到 28 °C 时,拉拔强度与摩擦因数的变化趋势大致相等;当温度为 30 °C、32 °C、35 °C 时,拉拔强度与三者的变化趋势之间无明显规律。因此,需进一步分析温度、粗糙度对拉拔强度的影响。

2.2 试验数据分析

2.2.1 粗糙度主成分分析

摩擦因数、构造深度(单位为 0.01 mm)、灰度值中的每个变量都能反映粗糙度的某一方面,但不能单独地代表粗糙度。但如果直接选取它们作为自变量,会由于变量间的线性相关性,造成多重共线性的存在,影响分析结果。因此,本文利用主成分分析^[28-29]将这些变量转化为粗糙度综合指数(roughness index, RI)进行研究。

设摩擦因数测试值为向量 $\mathbf{x}_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{16})^T$, 构造深度为向量 $\mathbf{x}_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{26})^T$, 灰度值为向量 $\mathbf{x}_3 = (x_{31}, x_{32}, \dots, x_{36})^T$, 按照式(2)对 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$ 中的元素进行量纲一化处理,依次得到向量 $\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \mathbf{x}'_3$

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{S_i} \quad i=1,2,3; j=1,2,\dots,6 \quad (2)$$

式中: x'_{ij} 为 \mathbf{x}_i 中第 j 个元素量纲一化处理后的数值,即 \mathbf{x}'_i 中第 j 个元素; x_{ij} 为 \mathbf{x}_i 中第 j 个元素实际测试值; \bar{x}_i 为 \mathbf{x}_i 中所有元素的平均值; S_i 为 \mathbf{x}_i 中所有元素的标准差。

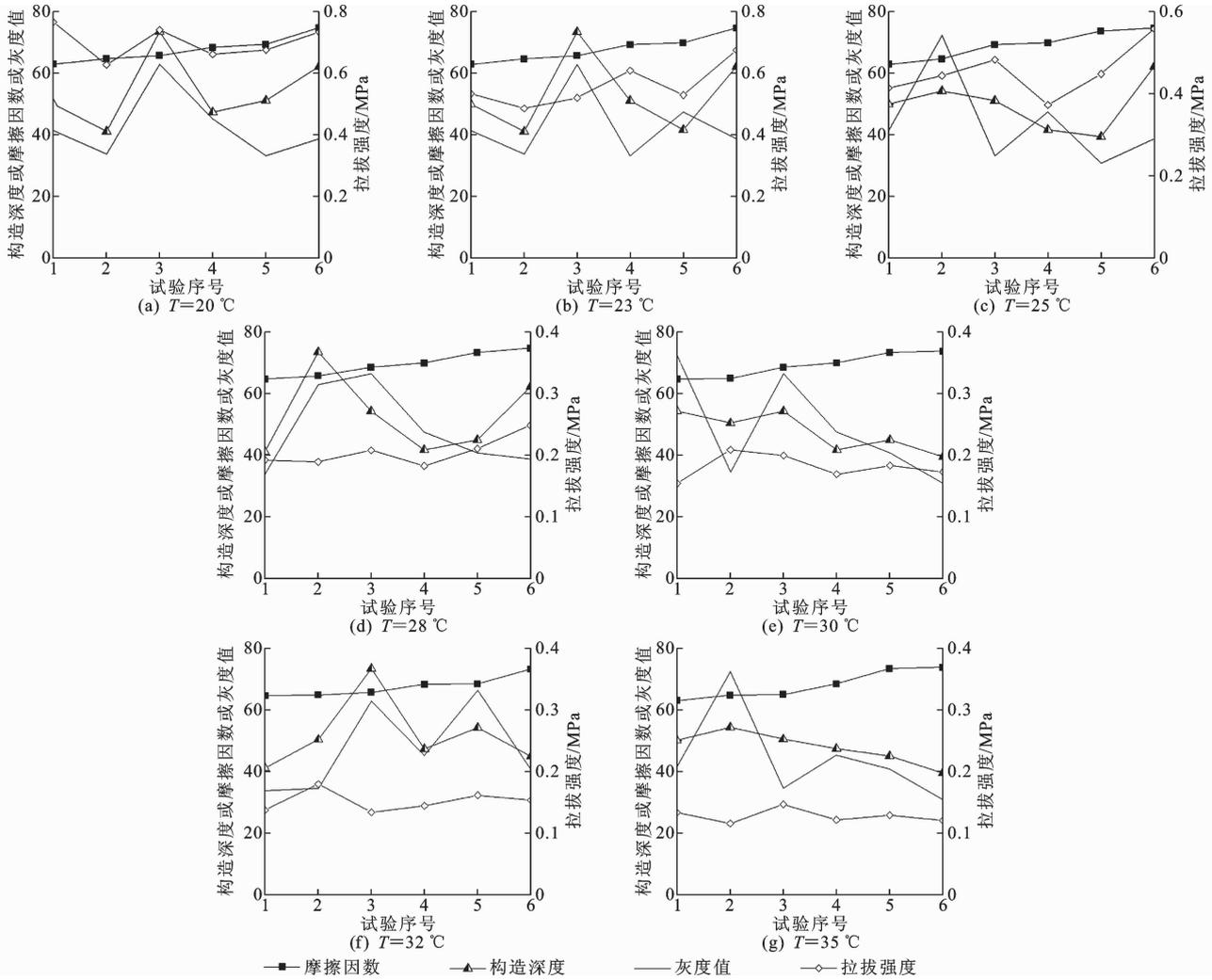


图 3 各温度下试验结果

Fig. 3 Test results under various temperatures

首先,定义含有摩擦因数 x_1 、构造深度 x_2 、灰度值 x_3 指标的粗糙度综合指数 z 。将 x_1 、 x_2 、 x_3 进行主成分分析,可以得到第 1 主成分 z_1 、第 2 主成分 z_2 、第 3 主成分 z_3 。以及各主成分对应的贡献率 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 。本文按累计贡献率超过 85% 方式选取前 r 个主成分 ($r \leq 3$)。含有 3 个指标的粗糙度综合指数 z 的表达式为

$$z = \lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_2 + \dots + \lambda_r z_r \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} z_1 = c_{11}x'_1 + c_{12}x'_2 + c_{13}x'_3 \\ z_2 = c_{21}x'_1 + c_{22}x'_2 + c_{23}x'_3 \\ \vdots \\ z_r = c_{r1}x'_1 + c_{r2}x'_2 + c_{r3}x'_3 \end{cases}$$

式中: c_{pq} ($p \leq r, q \leq 3$) 为因子载荷量; z_p ($p \leq r$) 为第 p 个主成分; λ_p 为第 p ($p \leq r$) 个主成分的贡献率。

同理,将摩擦因数、构造深度、灰度值进行两两组合,可以定义含有摩擦因数与构造深度 2 个指标

的粗糙度综合指数 z_{12} ,含有摩擦因数与灰度值的粗糙度综合指数 z_{23} ,含有灰度值与构造深度的粗糙度综合指数 z_{31} 。

将试验结果进行主成分分析,并按温度进行分类。在同一温度下,以拉拔强度为因变量,摩擦因数 x_1 、构造深度 x_2 、灰度值 x_3 以及各粗糙度综合指数 z 、 z_{12} 、 z_{23} 、 z_{31} 为自变量,分别进行线性拟合,并求得其相关系数,结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, x_3 与 z_{31} 的相关系数随温度的变化规律异常,而其他 5 个自变量 (x_1 、 x_2 以及粗糙度综合指数 z 、 z_{12} 、 z_{23}) 的变化趋势相似,基于此,后续分析中,仅考虑 x_1 、 x_2 、 z 、 z_{12} 、 z_{23} 这 5 个自变量,见图 4。

从图 4 可以看出:当温度为 20 °C、23 °C、25 °C、28 °C 时,拉拔强度与粗糙度的相关系数总体较高;当温度升高至 30 °C 时,拉拔强度与粗糙度的相关系数比 28 °C 时下降了 62.2% (5 个自变量对应

表 2 拉拔强度与粗糙度相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between pull-out strength and roughness

温度/℃	单一指标			粗糙度综合指标			
	x_1	x_2	x_3	z_{12}	z_{23}	z_{31}	z
20	-0.006	0.654	0.467	0.587	-0.099	-0.274	0.525
23	0.832	0.336	-0.301	0.457	0.848	0.758	0.438
25	0.530	0.754	-0.260	0.508	0.486	-0.826	0.186
28	0.751	0.284	-0.267	0.739	0.735	0.580	0.124
30	-0.113	0.234	0.323	-0.176	-0.198	0.789	0.051
32	0.049	-0.239	-0.215	0.099	-0.208	-0.033	-0.221
35	-0.319	0.144	-0.551	0.233	-0.071	-0.929	-0.111

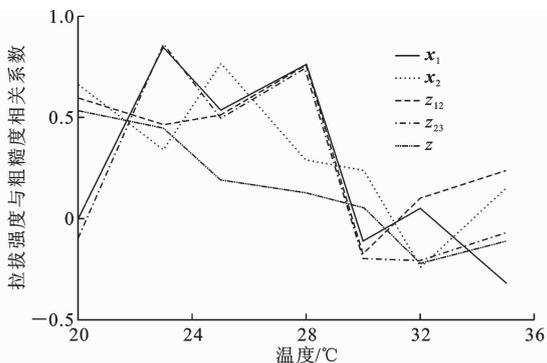


图 4 相关系数随温度的变化

Fig. 4 Variations of correlation coefficients with temperatures

相关系数绝对值的平均值),降幅明显;而当升温至 30℃以上时,拉拔强度与粗糙度之间存在较弱的相关性,相关系数总体接近于 0,可认为几乎不相关。

在拉拔强度与粗糙度的拟合方程式中,斜率代表了粗糙度对拉拔强度的影响程度,斜率越大,影响程度越大,反之则越小。以上述 5 个自变量(摩擦因数 x_1 、构造深度 x_2 以及粗糙度综合指数 z 、 z_{12} 、 z_{23})的拟合方程斜率随温度变化如图 5 所示。

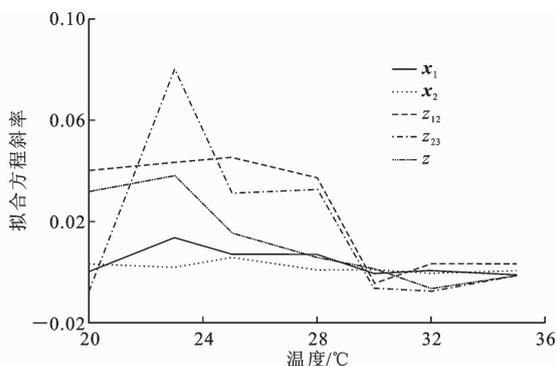


图 5 拟合方程斜率随温度的变化

Fig. 5 Variations of fitting equation slopes with temperatures

从图 5 可以看出:当温度为 20℃、23℃、25℃、28℃时,粗糙度对拉拔强度的影响较大,拉拔强度随着粗糙度的增加总体呈递增趋势;当温度为 30℃时,

斜率较 28℃时下降了 58.2%(5 个自变量对应斜率绝对值的平均值),粗糙度对拉拔强度的影响程度显著减小;当温度大于 30℃时,斜率接近于 0,粗糙度对拉拔强度几乎无影响。由此说明,在温度较低条件下(28℃以下),采用 SBS 改性沥青作为黏结材料,混凝土桥面粗糙度对桥面与沥青加铺层间拉拔强度有较显著影响;当温度超过一定范围时(本文中超过 30℃),混凝土桥面粗糙度对层间拉拔强度的影响显著减小。其主要原因是,在温度较高时,层间拉拔强度主要由黏结材料自身的黏结性能决定。

2.2.2 温度、粗糙度对拉拔强度影响

从以上分析得知,当温度不超过 28℃时,拉拔强度与粗糙度的相关系数较高。同时,从表 2 可以看出,粗糙度综合指数 z_{12} 的相关系数总体较高,异常点少,有利于分析。因此,在本节中,仅考虑前 4 个温度的试验数据以及粗糙度综合指数 z_{12} 。

当温度为 20℃、23℃、25℃、28℃时,拉拔强度与粗糙度综合指数 z_{12} 的拟合方程见表 3。拉拔强度设为 p (单位:MPa)。

表 3 拉拔强度与粗糙度综合指数 z_{12} 的拟合方程

Tab. 3 Fitting equations for pull-out strength and z_{12}

温度/℃	拟合方程	z_{12} 与 x_1 、 x_2 关系式
20	$p=0.040 2z_{12}+0.701 3$	$z_{12}=0.047x_2+0.061x_1-6.461$
23	$p=0.043 3z_{12}+0.560 0$	$z_{12}=0.028x_2+0.056x_1-4.893$
25	$p=0.045 4z_{12}+0.454 4$	$z_{12}=0.150x_2-0.002x_1-10.282$
28	$p=0.037 3z_{12}+0.308 5$	$z_{12}=0.177x_2-0.002x_1-12.183$

将 23℃的拟合方程减去 20℃的拟合方程,然后除以温度的变化量 ΔT ,得到拉拔强度在 [20℃, 23℃] 时对温度的变化率,记作 $\Delta p/\Delta T$;同理,可求得 [23℃, 25℃]、[25℃, 28℃] 的变化率。各个温度范围内,拉拔强度对粗糙度的变化率记作 $\Delta p/\Delta z_{12}$,易知该值即为各拟合方程的斜率。将粗糙度对温度变化率的负值定义为粗糙度当量 z_d ,即

$$z_d = -\frac{\Delta z_{12}}{\Delta T} = -\frac{\Delta p/\Delta T}{\Delta p/\Delta z_{12}} \quad (4)$$

式(4)表示温度变化 1℃与粗糙度变化 z_d 引起的拉拔强度改变量相等。即在拉拔强度变化值一定时,温度改变 1℃与粗糙度改变 z_d 相当。上述各变化率与粗糙度当量表达式见表 4。

为了说明 z_d 的实际意义,温度取为 20℃,如果通过现场试验测量并计算得到 $z_{12}=1$,那么 $z_d=$

表 4 变化率与粗糙度当量表达式

Tab. 4 Expressions of change rates and roughness equivalents

温度范围	$\frac{\Delta p}{\Delta T}$	$\frac{\Delta p}{\Delta z_{12}}$	z_d
[20 °C, 23 °C)	$0.001 0z_{12}-0.047 1$	0.040 2	$-0.025 7z_{12}+1.171 6$
[23 °C, 25 °C)	$0.001 1z_{12}-0.052 8$	0.043 3	$-0.024 2z_{12}+1.219 0$
[25 °C, 28 °C)	$-0.002 7z_{12}-0.048 6$	0.045 4	$0.059 5z_{12}+1.071 2$

1.146。结果表明:当温度为 20 °C,粗糙度综合指数 z_{12} 为 1 时,温度升高 1 °C 与 z_{12} 降低 1.146 引起的拉

表 5 粗糙度当量数值计算结果

Tab. 5 Numerical results of roughness equivalent

温度范围	不同 z_{12} 下的粗糙度当量										
	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
[20 °C, 23 °C)	1.197	1.192	1.187	1.182	1.177	1.172	1.167	1.161	1.156	1.151	1.146
[23 °C, 25 °C)	1.244	1.239	1.234	1.229	1.224	1.219	1.215	1.210	1.205	1.200	1.195
[25 °C, 28 °C)	1.012	1.024	1.036	1.047	1.059	1.071	1.083	1.095	1.107	1.119	1.131

式(5)表明拉拔强度对温度的变化率绝对值大于拉拔强度对粗糙度的变化率绝对值。因此,温度对拉拔强度的影响程度要大于粗糙度。同时,在温度为[23 °C, 25 °C)时, z_d 显著大于其他 z_{12} 下的结果,表明在这一温度范围内,温度对拉拔强度的影响程度明显高于其他 2 个温度范围。

3 结 语

(1)提出了混凝土桥面沥青铺装层层间拉拔强度测试过程中,温度变化引起的拉拔强度变化与粗糙度变化引起的拉拔强度变化的当量关系,为混凝土桥面粗糙度评价体系提供一定的指导。

(2)使用 SBS 改性沥青作为防水黏结层时,温度、混凝土表面粗糙度对层间拉拔强度的影响规律为:[20 °C, 28 °C]时,温度相同的条件下,粗糙度与层间拉拔强度成正相关的关系,且相关系数较高;[28 °C, 30 °C]时,温度相同的条件下,粗糙度与层间拉拔强度的正相关性显著下降,相关系数降低约 60%;当温度大于 30 °C 时,粗糙度与层间拉拔强度的相关性几乎为零。因此,在实际工程中,使用 SBS 改性沥青作为防水黏结层时,如果温度高于 30 °C,那么拉拔强度的现场实测值离散性较大,可信度较低,所以现场层间黏结强度检测的温度应尽量控制在 30 °C 以下。

(3)本文虽然得到了温度变化与粗糙度变化的

拉拔强度变化相等。如果将混凝土的粗糙度提高,使得粗糙度综合指数 z_{12} 增加 1.146,那么就可以抵消温度升高 1 °C 引起的拉拔强度降低作用。因此, z_d 表征了粗糙度变化与温度变化的当量关系,为混凝土桥面粗糙度评价体系提供了一定的指导依据。各温度范围内, z_d 数值计算结果见表 5。

从表 5 可以看出,粗糙度综合指数 z_{12} 取值范围为 -1~1 时,各温度范围内的粗糙度当量 z_d 均大于 1,即

$$\left| \frac{\Delta p}{\Delta T} \right| > \left| \frac{\Delta p}{\Delta z_{12}} \right| \quad (5)$$

当量关系,但并未拟合出拉拔强度、温度、粗糙度三者的数量关系式。同时,本文主要针对 SBS 改性沥青进行了研究,对于其他类型材料(如环氧沥青等)作为防水黏结层时,温度、粗糙度对桥面铺装层层间拉拔强度的影响,还有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 黄晓明. 水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 1-10.
HUANG Xiao-ming. Research status summary of asphalt pavement technology on cement concrete bridge deck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 1-10.
- [2] 张争奇,陶晶,张思桐. 桥面铺装环氧沥青防水粘粘层性能试验与评价[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(4): 1-6.
ZHANG Zheng-qi, TAO Jing, ZHANG Si-tong. Experiment and evaluation on performance of epoxy asphalt waterproof cohesive layer on bridge deck pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 1-6.
- [3] 李明国. 混凝土梁桥沥青铺装结构分析与材料优化研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
LI Ming-guo. Structure analysis and material optimization for concrete beam bridge asphalt mixture deck [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.

- [4] 钱振东,张勳,许静. 动水压力对钢桥面环氧沥青铺装裂缝扩展影响[J]. 郑州大学学报:工学版,2016,37(6):48-52.
QIAN Zhen-dong, ZHANG Meng, XU Jing. The influence of hydrodynamic pressure on the propagation of steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement crack[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2016, 37(6): 48-52.
- [5] 万晨光,申爱琴,王德强. 带裂缝桥面铺装内部动水行为仿真模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(9):60-64.
WAN Chen-guang, SHEN Ai-qin, WANG De-qiang. Dynamic water behavior simulation of bridge deck pavement with cracks[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 60-64.
- [6] 王笃喜,陈仕周,周丽丽. 几种水泥混凝土桥面防水粘结层的疲劳性能试验分析[J]. 公路交通技术,2012,28(4):98-99,108.
WANG Du-xi, CHEN Shi-zhou, ZHOU Li-li. Experimental analysis for fatigue properties of some waterproof bonding layers for cement concrete deck[J]. Technology of Highway and Transport, 2012, 28(4): 98-99, 108.
- [7] MANNING D G. Waterproofing membranes for concrete bridge decks[M]. Washington DC: Transportation Research Board, 1995.
- [8] 李云良,纪伦,邢超,等. 水泥混凝土桥面铺装力学行为数值分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(10):58-62.
LI Yun-liang, JI Lun, XING Chao, et al. Numerical analysis about mechanical behavior of concrete bridge deck pavement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(10): 58-62.
- [9] LIU Y, WU J, CHEN J. Mechanical properties of a waterproofing adhesive layer used on concrete bridges under heavy traffic and temperature loading[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014, 48: 102-109.
- [10] CAO H, CHEN Y, LI Z. Interlayer working state of asphalt mixture deck paving course and new waterproof binding material[C]//ASCE. Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals. Reston: ASCE, 2010: 3429-3439.
- [11] MAZZOTTA F, LANTIERI C, VIGNALI V, et al. Performance evaluation of recycled rubber waterproofing bituminous membranes for concrete bridge decks and other surfaces[J]. Construction and Building Materials, 2017, 136: 524-532.
- [12] SUN Y, LIU Y, JIANG Y, et al. Thermal and mechanical properties of natural fibrous nanoclay reinforced epoxy asphalt adhesives[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 85: 308-314.
- [13] XU Q, ZHOU Q, MEDINA C, et al. Experimental and numerical analysis of a waterproofing adhesive layer used on concrete-bridge decks[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29(5): 525-534.
- [14] 常艳婷,陈忠达,张震,等. 桥面沥青铺装环氧乳化沥青粘结层性能研究[J]. 材料导报,2015,29(18):103-107.
CHANG Yan-ting, CHEN Zhong-da, ZHANG Zhen, et al. Study of epoxy emulsified asphalt binder layer performance of asphalt bridge deck pavement[J]. Materials Review, 2015, 29(18): 103-107.
- [15] 徐鸥明,韩森,于静涛. 层间界面对混凝土桥面铺装结构性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(5):17-20,53.
XU Ou-ming, HAN Sen, YU Jing-tao. Effect of interlayer interface on structural performance of concrete bridge deck pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5): 17-20, 53.
- [16] 程道虎,韩森,李娜,等. 混凝土桥面防水粘层材料最佳用量与层间抗剪强度分析[J]. 世界桥梁,2010(2):55-58.
CHENG Dao-hu, HAN Sen, LI Na, et al. Analysis of optimal usage of waterproof binding materials and interlayer shearing strength of concrete bridge deck[J]. World Bridges, 2010(2): 55-58.
- [17] 严秋荣,孙瑞,孔令云,等. 基于现场数据混凝土桥面粗糙度与层间粘结强度相关性分析[J]. 中外公路,2016,36(6):63-65.
YAN Qiu-rong, SUN Rui, KONG Ling-yun, et al. Analysis of correlation between roughness of concrete bridge deck and interlayer bond strength based on field data[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(6): 63-65.
- [18] LIU M, HAN S, PAN J, et al. Study on cohesion performance of waterborne epoxy resin emulsified asphalt as interlayer materials[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 72-82.
- [19] ZHOU Q, XU Q. Experimental study of waterproof membranes on concrete deck; Interface adhesion under

- influences of critical factors[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(4):1161-1168.
- [20] 任万艳,韩森,李俊,等.植石混凝土桥面沥青铺装层间抗剪性能研究[J].*建筑材料学报*,2018,21(1):111-116.
REN Wan-yan, HAN Sen, LI Jun, et al. Research on interlaminar shear properties of bridge deck asphalt pavement on chip-sprinkling cement concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(1):111-116.
- [21] 孔令云,林雄伟,孙瑞,等.基于现场数据的混凝土桥面粗糙度评价体系[J].*公路工程*,2017,42(5):54-57,63.
KONG Ling-yun, LIN Xiong-wei, SUN Rui, et al. Evaluation system of concrete bridge deck roughness based on field data[J]. *Highway Engineering*, 2017, 42(5):54-57,63.
- [22] 王安福,孔令云,严秋荣.基于抛丸工艺的混凝土桥面粗糙度影响研究[J].*公路交通技术*,2016,32(4):80-82.
WANG An-fu, KONG Ling-yun, YAN Qiu-rong. Study on influence to roughness of concrete bridge pavement by shot blasting process[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2016, 32(4):80-82.
- [23] 田稳苓,宋昭,肖成志,等.基于数字图像法的新老混凝土粘结面粗糙度研究[J].*河北工业大学学报*,2017,46(5):74-79.
TIAN Wen-ling, SONG Zhao, XIAO Cheng-zhi, et al. Research on roughness of bonding interface between young and old concrete based on method of digital image[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2017, 46(5):74-79.
- [24] 王端宜,李维杰,张肖宁.用数字图像技术评价和测量沥青路表面构造深度[J].*华南理工大学学报:自然科学版*,2004,32(2):42-45.
WANG Duan-yi, LI Wei-jie, ZHANG Xiao-ning. Evaluation and measurement of asphalt pavement surface texture depth with digital image technique[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2004, 32(2):42-45.
- [25] 肖鑫,张肖宁.基于工业CT的排水沥青混合料连通空隙特征研究[J].*中国公路学报*,2016,29(8):22-28.
XIAO Xin, ZHANG Xiao-ning. Research on connecting void characteristics of porous asphalt mixture based on industrial CT[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(8):22-28.
- [26] 石立万,王端宜.基于数字图像处理的沥青混合料主骨架评价标准[J].*中国公路学报*,2017,30(5):52-58.
SHI Li-wan, WANG Duan-yi. Evaluation indexes of asphalt mixture main skeleton based on digital image processing[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(5):52-58.
- [27] 刘琬辰,黄晓明.基于图像处理的沥青路面构造深度评价方法的优化研究[J].*北方交通*,2013(3):9-13.
LIU Wan-chen, HUANG Xiao-ming. Optimization research of the asphalt pavement surface texture evaluation based on digital image[J]. *Northern Communications*, 2013(3):9-13.
- [28] HOTELLING H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components[J]. *Journal of Educational Psychology*, 1933, 24(6):417-441.
- [29] 杨虎,刘琼荪,钟波.数理统计[M].北京:高等教育出版社,2004.
YANG Hu, LIU Qiong-sun, ZHONG Bo. *Mathematical Statistics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.