

温度和粗糙度对混凝土桥面铺装层间 剪切强度的影响研究

严秋荣^{1,2}, 许磊³, 代笠³, 吴海鹰⁴

(1. 国家山区公路工程技术研究中心, 重庆 400067; 2. 重庆交大建设工程质量检测中心有限公司, 重庆 400067;
3. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 4. 中机中联工程有限公司, 重庆 400039)

摘要:为探究温度和粗糙度对混凝土桥面铺装层间剪切强度的影响规律. 在室内剪切试验中, 采用摩擦系数、构造深度、2D/3D 灰度值表征混凝土板粗糙度; 并测量剪切试件的层间剪切强度. 对粗糙度与层间剪切强度的关系进行灰色关联分析后, 基于主成分回归法分析温度、粗糙度对层间剪切强度的影响规律. 发现摩擦系数、构造深度变化对层间剪切强度的影响较大; 灰度值变化对层间剪切强度的影响较小. 从温度、粗糙度与层间剪切强度的非线性回归模型可知: 相较于粗糙度变化, 温度变化对层间剪切强度的影响更大, 层间剪切强度随温度的升高而减小.

关键词:温度; 粗糙度; 桥面铺装; 防水粘结层; 剪切强度

中图分类号: TU445.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)03-0328-07

Effect of temperature and roughness on interlayer shear strength of concrete bridge deck pavement

YAN Qiurong^{1,2}, XU Lei³, DAI Li³, WU Haiying⁴

(1. National Mountain Highway Engineering Technology Research Center, Chongqing 400067, China;
2. Chongqing Jiaoda Construction Engineering Quality Test Center Co. Ltd., Chongqing 400067, China;
3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
4. Zhongji Zhonglian Engineering Co. Ltd., Chongqing 400039, China)

Abstract: The paper exploring the influence of temperature and roughness on interlayer shear strength of concrete bridge deck pavement. In the indoor shear test, the roughness of concrete slab is characterized by friction coefficient, structure depth and 2D/3D gray value, and the interlayer shear strength of shear specimens is measured. After grey correlation analysis of the relationship between roughness and interlayer shear strength, the influence of temperature and roughness on interlayer shear strength was analyzed based on principal component regression method. It is found that the variation of friction coefficient and structural depth has a greater impact on interlayer shear strength, while the variation of gray value has a smaller impact on interlayer shear strength. From the non-linear regression model of temperature, roughness and interlayer shear strength, it can be seen that compared with the change of roughness, the influence of temperature on interlayer shear strength is greater, and the interlayer shear strength decreases with the increase of temperature.

Key words: Temper; roughness; bridge deck pavement; waterproof bonding layer; shear strength

目前, 由于桥面混凝土板与沥青混合料面层层间力学性能不足而导致的桥面铺装病害频发. 如桥面拥包、推移等病害极大地影响了桥面的使用性能.

对于桥面铺装层间力学性能的不足, 国内外已有广泛研究. 2009 年郑国华从受力角度出发对桥面铺装进行研究, 并建立力学模型, 研究了桥梁

结构尺寸、材料参数、荷载等对力学模型的影响^[1].

2010 年程道虎、韩森等在凿毛、刻槽、露石处理后的混凝土桥面板上分别铺装 SBS 改性沥青、SBR 乳化沥青等防水粘结层材料, 以此研究桥面表面纹理、防水层材料类型、温度等对桥面铺装层间力学性能的影响^[2].

收稿日期: 2019-07-19 修改稿日期: 2020-05-04

基金项目: 国家山区公路工程技术研究中心开发基金项目 (GSGZJ-2015-08)

第一作者: 严秋荣 (1978-), 男, 研究员, 主要从事路基工程, 岩土工程, 桥梁工程, 检测方面的研究. E-mail: 56952071@qq.com

2016 年王安福、孔令云、严秋荣等人, 在广东汕湛高速公路经过调查研究认为: 混凝土桥面粗糙度大小与桥面构造深度、摩擦系数和灰度值有关, 不同的桥面处理形式和不同施工工艺(抛丸打毛、拉毛)会对桥面粗糙度产生很大的影响^[3], 进而对桥面铺装层间力学性能产生影响。

美国 P. Martinelli 分析了防水粘结层破坏形式、气温、沥青混凝土施工温度等因素对防水粘结层力学性能的影响, 认为当沥青混合料面层厚度大于 12cm 时, 由行车荷载引起的剪应力不会造成防水层的破坏^[4]. Johnson 认为温度和碾压温度对桥面铺装层间力学性能有一定影响^[5]。

有学者从不同角度对桥面铺装层间力学性能进行研究, 分析了材料设计参数、铺装层厚度、弹性模量、沥青铺装层的疲劳特性对桥面铺装层力学状态的影响^[6-8]。

英国 TRRL(Transportation Research Laboratory)针对防水粘结层在施工之后的渗水、层间力学性能不足和路面高温稳定性差等问题进行了全面系统的研究。主要研究层间防水材料在高温混合料碾压作用下的性能变化; 层间粘结强度的影响因素^[9-10]。

在《城市桥梁桥面防水工程技术规程》(CJJ I39-2010)中规定桥面铺装必须由防水粘结层和沥青混凝土面层组成。而目前, 国内外研究多集中于防水粘结层的破坏形式、粘层材料、沥青混合料面层厚度; 但对外界温度、桥面混凝土板与沥青混合料面层之间的界面特性却研究较少^[11-12]。且在桥面铺装施工和现场检测时, 外界温度不可控, 现有标准一般仅给出标准温度 25℃时的技术要求。此外, 混凝土桥面粗糙度指标与层间粘结性能关系尚不明确, 导致工程设计文件中给出的粗糙度评价指标及技术要求主观性较强。

针对温度和桥面粗糙度研究较少的状况, 本文以构造深度、摩擦系数、灰度值等粗糙度指标表征桥面混凝土板与沥青混合料面层之间的界面特性。在不同的界面特性和温度下, 采用室内剪切试验, 研究温度和粗糙度对混凝土桥面铺装层间剪切强度的影响规律^[13]。

1 试验部分

1.1 试验材料

试验材料主要包括水泥、河砂、集料, C40、C30 强度的混凝土板使用复合硅酸盐水泥 42.5,

C20 强度的混凝土板使用复合硅酸盐水泥 32.5。

沥青混合料集料用料、SBS 改性沥青试验结果、混凝土配合比设计计算结果详见表 1、表 2、表 3。

表 1 沥青混合料各种集料的用料表
Tab. 1 Material schedule of asphalt mixtures %

矿粉	0~5 玄武岩	5~11 玄武岩	11~17 玄武岩
1	40	40	19

表 2 SBS 改性沥青技术指标试验结果
Tab. 2 Test results of technical parameters of SBS modified asphalt

试验项目	规范要求	实测值	试验方法
针入度(25℃, 5 s, 100 g)	60~80	66.8	T0604
针入度 PI 值	≥-0.4	0.09	T0604
软化点(TR&B)/℃	≥55	63.8	T0606
135℃运动粘度/Pa·s	≤3	2.6	T0625
延度 5℃, 5 cm/min(cm)	≥30	38.9	T0605

表 3 混凝土配合比设计关键参数指标
Tab. 3 Key parameters of concrete mix design

混凝土强度 /MPa	设计参数		
	标准差	水灰比	含砂率/%
C20	4	0.634	38
C30	5	0.601	38
C40	5	0.489	35

1.2 试验方案

(1)本文对混凝土板采用拉毛、抛丸打毛两种处理方式以获取不同粗糙度的混凝土板。具体做法为: 在一部分混凝土板浇筑完毕, 未形成强度之前进行拉毛处理; 对未拉毛的混凝土板, 在混凝土强度形成之后, 进行不同抛丸次数的打毛处理。

(2)为使混凝土板在同一种处理方式下获得不同的粗糙度, 试验设计的混凝土强度分别采用 C20、C30、C40。

(3)沥青混合料的级配设计参照《公路工程集料试验规程》、《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》、《公路沥青路面施工技术规范》, 油石比为 5%。

(4)粗糙度评价指标采用摩擦系数、构造深度、2D/3D 灰度值。

(5)考虑温度对混凝土桥面铺装层间剪切强度的影响, 设置四组不同的试验温度。

(6)通过直剪试验, 研究上述温度、粗糙度指标对剪切强度的影响规律。

1.3 试件成型

制作尺寸为 30 cm×30 cm×5 cm 的混凝土板,对混凝土板进行编号.编号规则为:处理方式-混凝土强度-板号(如 L-20-1, L 表示拉毛, 20-1 表示混凝土强度为 C20 的 1 号混凝土板),混凝土板成型和抛丸打毛如图 1 所示.

混凝土板制作,预处理完成后,在其上涂刷一层 SBS 改性沥青,然后铺设一层改性沥青混合料面层、成型车辙板、每块车辙板钻取 5 个剪切试件.



图 1 混凝土板成型与抛丸

Fig. 1 Concrete slab molding and shot blasting

1.4 试验方法

1.4.1 混凝土板粗糙度试验

本文采用的粗糙度指标包括摩擦系数、构造深度、2D/3D 灰度值.摩擦系数和构造深度试验均参照《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》.

近年来,随着 MATLAB 图像分析及处理技术应用到道路检测方面^[14],本文使用 MATLAB 和图像处理技术,将 2D/3D 灰度值作为混凝土桥面粗糙度评价关键指标^[15-16].

眼睛能分辨出凹凸不平的点,是因为光在凸起和凹陷的点反射进入人眼的光线不同,凸点反射进入照相机光线多灰度值更大,相反凹点灰度值更小^[17].这样就可以根据灰度值大小来评价所测区域的凹凸情况即表面粗糙度大小.

1.4.2 剪切强度试验

试验设备:ETM504C 型微机控制电子万能试验机,如图 2 所示.

试验条件:每组剪切试件在各温度下保温 5h,剪切速率为 10 mm/min.

几何参数:截面直径为 10 cm.

剪切强度的计算公式如式(1)所示.

$$\tau = P/S \quad (1)$$

式中 S 为试件受剪切截面积,单位 mm²; P 为破坏时的最大力,单位 N.

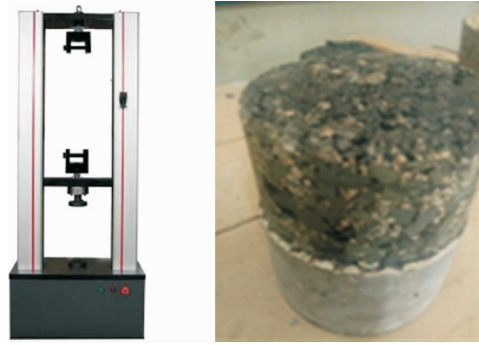


图 2 电子万能试验机与剪切试件

Fig. 2 Schematic diagram of shear test and shear plane after shear

2 试验结果分析

2.1 室内剪切试验粗糙度与剪切强度结果

对室内剪切试验混凝土板的粗糙度指标、对应剪切试件的剪切强度进行统计汇总,结果详见表 4.

表 4 粗糙度与剪切强度统计表

Tab. 4 Roughness and Shear Strength Data Sheet

板号	摩擦系数 /BPN	构造深度 (0.01mm)	2D 灰度值	3D 灰度值	温度 /℃	剪切强度 /MPa
L-20-1	65.8	37.0	30.62	34.03	24	0.71
L-30-1	71.8	51.0	37.97	37.18	24	1.20
L-40-1	70.8	50.0	34.92	41.95	24	0.77
P-20-1	65.2	52.0	71.06	67.33	24	0.69
P-30-1	64.2	43.0	50.41	50.61	24	1.01
P-40-1	64.6	46.0	48.71	43.37	24	0.52
L-20-2	63.8	41.0	24.33	26.76	28	0.69
L-30-2	64.4	54.0	33.56	35.64	28	0.75
L-40-2	72.8	51.0	39.54	43.27	28	0.89
P-20-2	64.0	52.0	59.35	64.34	28	0.55
P-30-2	67.4	41.0	65.69	61.53	28	0.50
P-40-2	69.8	44.0	40.34	42.58	28	0.43
L-20-3	64.6	46.0	32.09	34.89	32	0.50
L-30-3	65.2	60.0	34.81	36.74	32	0.45
L-40-3	65.4	60.8	30.22	34.46	32	0.50
P-20-3	63.4	61.0	70.73	72.43	32	0.37
P-30-3	65.6	45.0	65.98	66.38	32	0.34
P-40-3	63.4	40.0	42.79	30.62	32	0.35
L-20-4	65.4	43.0	28.68	30.52	36	0.31
L-20-4	68.8	46.0	29.03	30.40	36	0.34
L-30-4	74.6	55.0	36.00	40.11	36	0.41
P-20-4	60.4	52.0	68.91	67.96	36	0.27
P-30-4	65.6	44.0	47.77	56.78	36	0.37
P-40-4	64.4	52.0	46.38	57.72	36	0.30

2.2 剪切强度的影响因素分析

对表 4 混凝土板的粗糙度指标进行汇总见图

3, 从图3可知经过拉毛处理的混凝土板的摩擦系数、构造深度大于经过抛丸处理的混凝土板。抛丸处理过的混凝土板的灰度值大于经过拉毛处理的混凝土板;这主要是由于经过抛丸后露出的石料比水泥浮浆更光滑,可以反射更多的光线,灰度值也就更大。

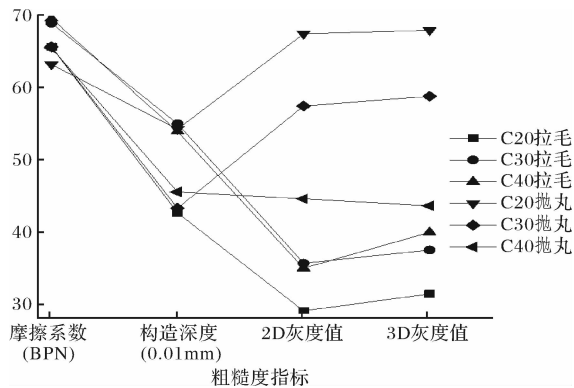


图3 不同处理方式下的车辙板粗糙度统计

Fig. 3 Roughness statistics of rutting plates under different treatment methods

根据表4, 对不同温度和处理方式下的剪切强度的变化规律进行分析。如图4, 在相同温度下, 经过拉毛处理的剪切试件的剪切强度大于经过抛丸处理的剪切试件的剪切强度; 相同粗糙度处理方式下, 温度越高, 层间剪切强度越小。

考虑到粘层材料本身的粘结力不变, 在两种处理方式下, 剪切强度之间的差异在于铺装层、黏层和桥面板之间的摩擦力的不同。

2.3 粗糙度及剪切强度的灰色关联分析

为探究各粗糙度指标之间的内在联系, 以及粗糙度指标与剪切强度之间的关系, 本小节采用灰色关联理论进行关联性分析。

首先建立灰色关联指标, 如表4所示, 以表4中的每一列数据代表一个灰色关联指标, 将表中不同的两列数据进行灰色关联分析, 便能得到这两个灰色关联指标的灰色关联度。

本小节记5个灰色关联指标, 分别为B1、B2、B3、B4、B5; 其中摩擦系数代表B1、构造深度代表B2、2D灰度值代表B3、3D灰度值代表B4、剪切强度代表B5。之后, 采用GMsetup winx灰色关联软件对表4中各个灰色关联指标进行灰色关联分析; 各粗糙度指标之间的灰色关联度见图5; 粗糙度指标与剪切强度之间的灰色关联度见图6。

从图5可知摩擦系数和其他粗糙度指标之间的关联度较低; 构造深度和灰度值之间的关联度较高。从图6可知摩擦系数、构造深度与剪切强度关

联度较高; 灰度值与剪切强度的关联度较低。

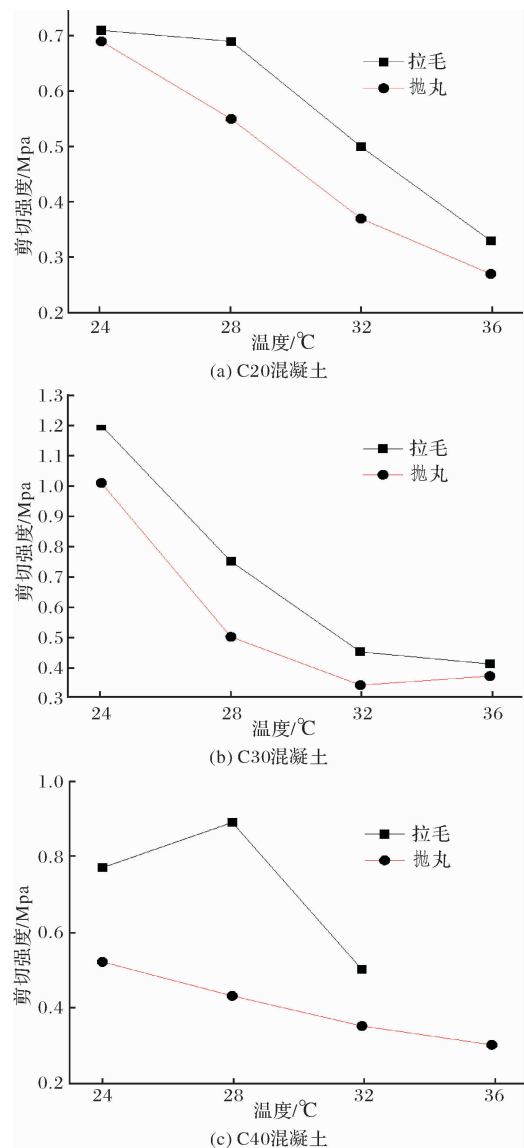


图4 剪切试件在不同温度和粗糙度下的剪切强度

Fig. 4 Shear strength of shear specimens at different temperatures and roughness

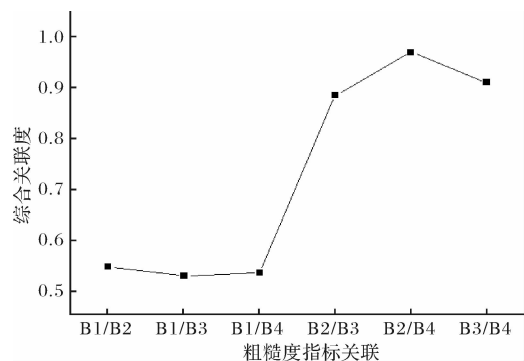


图5 各粗糙度指标之间的灰色关联度曲线

Fig. 5 The grey correlation curve of roughness index

2.4 各试验段粗糙度指标之间的灰色关联分析

为了对室内剪切试验所用的混凝土板与实际桥梁的混凝土板的粗糙度指标进行对比分析, 分别

收集了各试验段桥梁(汕湛高速公路源塘大桥、四维桥、竹园 2 号大桥等桥梁)混凝土板的粗糙度指标,结果详见表 5;对各试验段粗糙度指标之间的灰色关联分析见图 7.从图 5、图 7 中可知在室内剪切试验和现场试验段两种条件下,摩擦系数和其他粗糙度指标之间的关联度均较低;构造深度和灰度值之间的关联度均较高.表明室内试验的粗糙度评价指标对于指导现场施工具有一定借鉴意义.

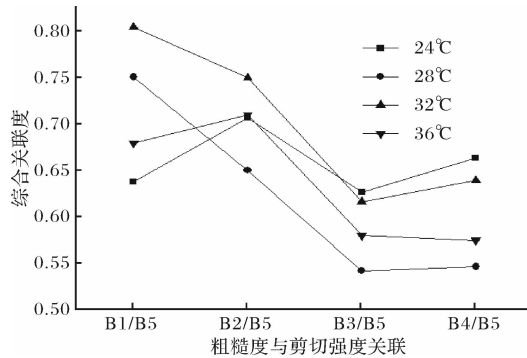


图 6 各粗糙度指标与剪切强度的灰色关联度曲线

Fig. 6 The grey relation curve of roughness index and shear strength

表 5 试验段混凝土板粗糙度指标

Tab. 5 Roughness index of concrete slab in test section

试验段	摩擦系数	构造深度	2D	3D
	/BPN	/mm	灰度值	灰度值
1	69.48	0.45	26.6	27.7
2	69.71	0.73	32.9	35.4
3	70.80	0.87	40.2	44.7
4	71.38	0.36	24.0	26.1
5	71.40	0.51	24.2	26.0
6	71.90	0.32	34.2	33.8
7	72.62	0.69	34.5	35.9
8	73.20	0.58	24.0	27.0
9	73.40	1.01	38.8	40.7
10	74.20	0.57	26.8	28.2
11	74.30	0.68	33.4	33.2
12	76.20	0.73	26.2	29.3
13	59.80	0.66	27.3	28.2
14	60.90	0.47	18.8	20.5
15	64.70	0.61	34.6	32.6
16	66.60	0.60	24.3	26.4
17	70.80	0.44	16.8	21.6
18	72.50	0.43	26.6	27.4
19	73.00	0.46	38.0	27.4
20	73.30	0.42	36.9	36.4
21	73.60	0.51	31.9	29.5

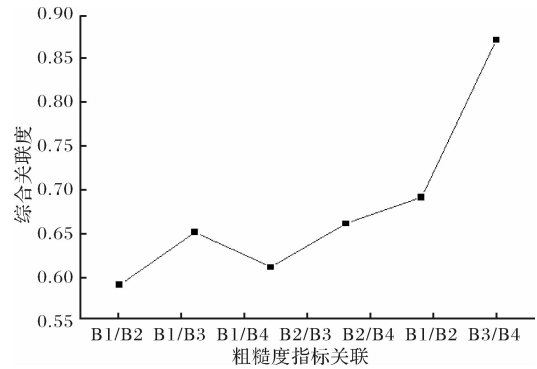


图 7 试验段各粗糙度指标之间的灰色关联度

Fig. 7 The grey correlation of the measured roughness parameters

2.5 剪切强度的主成分回归分析

为准确评价温度和粗糙度对车辙板剪切试件层间(SBS 防水粘结层)剪切强度的影响,采用 SPSS 20.0 软件,以剪切强度作为因变量(Y),以摩擦系数、构造深度、2D 灰度值、3D 灰度值、温度(X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5)及各自的平方项(X_{12} 、 X_{22} 、 X_{32} 、 X_{42} 、 X_{52})作为自变量,进行多元非线性回归分析.

回归结果见表 7,从表 7 可以知回归模型中的自变量回归系数不显著,自变量之间存在严重的共线性.

为了处理自变量之间的共线性问题,本文采用主成分分析中降维的处理方式来消除共线性影响;且 KMO 和球形检验度均通过($KMO(KMO > 0.5)$ 、($sig < 0.05$)),表示可以采用主成分进行分析.

主成分回归分析中,主要步骤为:

(1)标准化处理:为消除自变量量纲的影响,将 X_1 、 X_{12} 、 X_2 、 X_{22} 、 \dots 、 X_{52} 等 10 个自变量通过标准化公式转化为标准自变量,即 $Z(X_1)$ 、 $Z(X_{12})$ 、 \dots 、 $Z(X_{52})$;标准化公式见式 2,各自变量平均值和标准差见表 6.

(2)主成分分析:通过 SPSS 软件将 $Z(X_1)$ 、 $Z(X_{12})$ 等自变量转化为少数几个综合指标即主成分(Z_1 、 $Z_2 \dots$).

①主成分提取:从表 8 可知前四个主成分 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 的特征值之和占有所有特征值之和的 99.027%,且各自对应的 4 个特征值($\lambda_1 = 4.364$ 、 $\lambda_2 = 2.319$ 、 $\lambda_3 = 1.985$ 、 $\lambda_4 = 1.235$)均大于 1;因此,本节取前 4 个主成分来进行主成分分析.

②主成分转化:在主成分分析中,通过矩阵的正交变换,可得到主成分与自变量之间的关系式,如式 3 所示.式中 λ_1 为第 1 个主成分所对应的

特征值, 分子为主成分与各个自变量之间的系数. 前 4 个主成分与各个自变量的系数见表 9.

③主成分回归: 将得到的 4 个主成分 (Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4) 与标准化后的因变, ZY (剪切强度) 通过 SPSS20.0 进行回归分析, 从表 10 中可知回归方程和回归系数均通过显著性检验. 最终得到 ZY (剪切强度) 与主成分之间的回归方程即式 4. 将式 4 中的主成分代换为自变量后得到式 5, 式 5 即剪切强度(KPa)与粗糙度指标、温度之间的多元非线性的回归模型.

$$ZY = \frac{y - \bar{y}}{\sqrt{Dy}}, Z(X_1) = \frac{X_1 - \bar{X}_1}{\sqrt{DX_1}} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} Z_1 = & -\frac{0.524}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_1) - \frac{0.518}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_1^2) + \\ & \frac{0.302}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_2) + \frac{0.298}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_2^2) + \\ & \frac{0.944}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_3) + \frac{0.950}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_3^2) + \\ & \frac{0.946}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_4) + \frac{0.963}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_4^2) + \\ & \frac{0.114}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_5) + \frac{0.110}{\sqrt{\lambda_1}}Z(X_5^2) \end{aligned} \tag{3}$$

$$ZY = -0.150Z_1 - 0.307Z_2 + 0.397Z_3 - 0.252Z_4 \tag{4}$$

$$\begin{aligned} y = & 0.0497x_1^2 + 6.9066x_1 + 0.0233x_2^2 \\ & + 2.2854x_2 - 0.005x_3^2 - 0.4672x_3 \\ & - 0.0104x_4^2 - 0.846x_4 - 20.5844x_5 \\ & - 0.3438x_5^2 + 735.8 \end{aligned} \tag{5}$$

表 6 描述统计量

Tab. 6 Descriptive statistics				
	极小值	极大值	均值	标准差
X_1	60.400	74.600	66.308	3.408
X_{12}	3 648.160	5 565.160	4 407.928	462.878
X_2	37.000	61.000	48.617	6.675
X_{22}	1 369.000	3 721.000	2 406.277	663.980
X_3	24.330	71.060	44.579	14.890
X_{32}	591.949	5 049.524	2 199.725	1 471.208
X_4	26.760	72.430	46.150	14.357
X_{12}	716.098	5 246.105	2 327.345	1 430.344
X_5	24.000	36.000	30.000	4.568
X_{52}	576.000	1 296.000	920.000	274.586
Y	0.270	1.200	0.551	0.242

表 7 非线性回归分析和共线性与 KMO 检验

Tab. 7 The nonlinear regression analysis and collinearity and KMO test

模型	sig.	共线性统计量		KMO	球形度检验 sig.
		容差	VIF		
(常量)	1.00				
$Z(X_1)$	.342	.001	1761.18		
$Z(X_{12})$	.329	.001	1752.40		
$Z(X_2)$	.526	.004	277.53		
$Z(X_{22})$	.549	.004	273.96		
$Z(X_3)$	.831	.004	252.70		
$Z(X_{32})$	.640	.004	283.80	.539	.000
$Z(X_4)$	.655	.002	460.64		
$Z(X_{42})$	.590	.002	523.59		
$Z(X_5)$	.526	.003	360.97		
$Z(X_{52})$	.771	.003	359.39		

表 8 各主成分的方差贡献

Tab. 8 Variance contribution of each principal component

成分	初始特征值(λ_i)		
	合计	方差的 %	累积 %
Z_1	4.364	43.639	43.639
Z_2	2.319	23.187	66.826
Z_3	1.985	19.851	86.677
Z_4	1.235	12.350	99.027
Z_5	0.083	0.832	99.859
Z_6	0.010	0.095	99.954
Z_7	0.002	0.022	99.976
Z_8	0.001	0.014	99.990
Z_9	0.001	0.007	99.997
Z_{10}	0.000	0.003	100.000

表 9 前四个主成分的成分矩阵

Tab. 9 Composition matrix of the first four principal components

	主成分			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
$Z(X_1)$	-0.524	0.130	0.691	0.480
$Z(X_{12})$	-0.518	0.139	0.693	0.482
$Z(X_2)$	0.302	0.713	0.472	-0.421
$Z(X_{22})$	0.298	0.712	0.456	-0.443
$Z(X_3)$	0.944	-0.192	0.142	0.175
$Z(X_{32})$	0.950	-0.180	0.122	0.153
$Z(X_4)$	0.946	-0.062	0.182	0.203
$Z(X_{42})$	0.963	-0.051	0.139	0.183
$Z(X_5)$	0.114	0.775	-0.505	0.361
$Z(X_{52})$	0.110	0.770	-0.504	0.375

表 10 主成分回归分析

Tab. 10 Analysis of principal component regression

方差	模型	系数
Sig.	R	R ²
		常量
		-6.933E-16
		Sig
.000 ^b	.842 ^a	.708
		Z ₁
		-.150
		.020
		Z ₂
		-.307
		.001
		Z ₃
		.397
		.000
		Z ₄
		-.252
		.036

从回归模型即式(5)可知:回归系数的大小代表了自变量对因变量的具体影响程度.从式(5)的自变量回归系数的绝对值的大小可知,各因素的影响程度从大到小依次为温度、摩擦系数、构造深度、3D 灰度值、2D 灰度值,该规律与上文中的灰色关联分析规律一致.

为了对非线性回归模型进行检验,以回归模型拟合的剪切强度数据与室内试验的剪切强度数据进行误差分析,结果详见图 8、图 9.

从图 8、图 9 可知:80%车辙板的层间剪切强度的拟合误差均小于 25%,其中大部分拟合误差小于 10%;个别车辙板的拟合误差较大,但总体误差满足拟合要求;说明回归模型能较好的拟合剪切试件层间剪切强度随温度、粗糙度指标的变化规律.

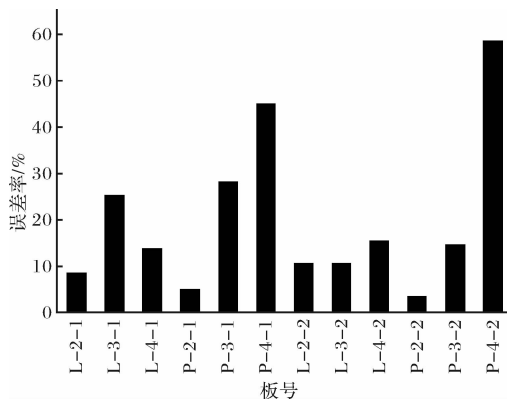


图 8 24°C 和 28°C 下的剪切强度拟合误差

Fig. 8 Fitting error of shear strength at 24°C and 28°C

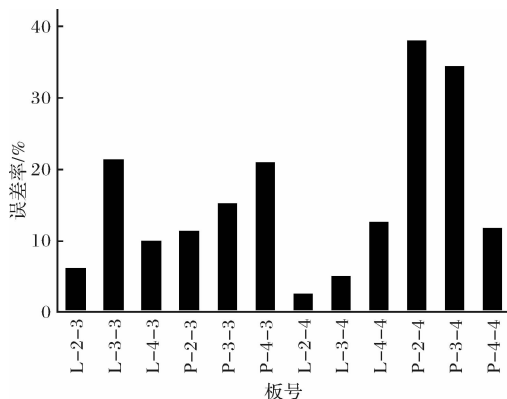


图 9 32°C 和 36°C 下的剪切强度拟合误差

Fig. 9 Fitting error of shear strength at 32°C and 36°C

3 结论

(1)在拉毛和抛丸两种处理方式下得到的混凝土板的表面粗糙度不同.室内试验的粗糙度评价指标对于指导现场施工具有一定借鉴意义.

在粗糙度指标与层间剪切强度的灰色关联分析中,摩擦系数、构造深度与层间剪切强度相关性较大;2D/3D 灰度值与层间剪切强度的相关性较弱.

(2)在温度、粗糙度指标与剪切强度的非线性回归模型中,摩擦系数、构造深度、2D 灰度值、3D 灰度值、温度的回归系数分别为 6.9066、2.2854、-0.4672、-0.846、-20.5844;各自平方项的回归系数分别为 0.0497、0.0233、-0.005、-0.0104、-0.3438.

说明摩擦系数、构造深度与层间剪切强度的关系为正相关且影响较大;灰度值与层间剪切强度的关系为负相关且影响较小;温度与层间剪切强度为非线性关系且影响最大.

参考文献 References

- [1] 郑国华. 桥面铺装层受力及其主要影响因素分析[J]. 工程设计, 2009, 23(5): 672-674.
ZHENG Guohua. Analysis of stress and main influencing factors of bridge deck pavement [J]. Engineering Design, 2009, 23 (5): 672-674.
- [2] 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): 55-57.
CHENG Daohu, HAN Sen, LI Na, et al. Analysis of the optimal amount of waterproof adhesive layer material and the shear strength between layers of concrete bridge deck [J]. World Bridge, 2010(2): 55-57
- [3] 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 Anfu, KONG Lingyun, YAN Qiurong. Study on the influence of concrete deck roughness based on shot blasting technology [J]. Highway Traffic Technology, 2016, 32 (4): 80-82.
- [4] MARTINELLI P. Bridge decks waterproof membrane evaluation[Z]. Sep. 1996.
- [5] JOHNSON. Bridge deck waterproofing membrane evaluation[C] // Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering, 1998.
- [6] XU T, HUANG X. Effects of material design parameters on mechanical states of bridge deck pavement[C] // Geohunan International Conference. 2009: 61-67.

(下转第 342 页)

- Complex variable analysis of soil displacement and liner deformation induced by shield excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (9): 1626-1635.
- [6] PARK K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays [J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4):310-318.
- [7] 王述红,阿力普江·杰如拉,王鹏宇,预制矩形箱涵受力性能模拟及其潜在的破坏模式[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(2):260-265.
- WANG Shuhong, A Li Pu Jiang · Jie Ru La, WANG Pengyu, LIU Wei-hua, Mechanics Performance Analysis of Precast Rectangle Box Culvert in Different Burial depth and Damage Prediction of key Parts [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2018, 39 (2):260-265.
- [8] MUSKHLISHVILI N I. Mathematical theory of elasticity [M]. Leyden: International Publishing, 1954.
- [9] LEEK M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunneling. I. estimating the gap parameter [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6):929-940.
- [10] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-8 56.
- [11] SAGASETA C. On the role of analytical solutions for the evaluation of soil deformation around tunnels[C]//Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems. [S. l.]: CISM Courses and Lectures, 1998:397;3-24.
- [12] FLÜEGGE W. Stresses in shells [M]. New York: Springer-Verlag, 1973.
- [13] WANG Shuhong, Ni Pengpeng, Application Of Block Theory Modeling On Spatial Block Topological, Identification To Rock Slope Stability Analysis; International Journal Of Computational Methods, VL 11, IS 1, DI 10.1142/S0219876213500448, PD FEB 2014.
- (编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 334 页)

- [7] SONG Jinqiang, HAO Xingzhou, ZHU Hongping. Theoretical and numerical study of mechanic performance of asphalt concrete bridge deck pavement [J]. Earth & Space, 2006: 1-6.
- [8] CHEN X, HUANG W, YANG J, et al. Principles of designing asphalt pavement for orthotropic steel bridge decks[C]//Selected Papers from the 2009 Geo Hunan International Conference. 2009:23-23.
- [9] PRICE A R. Waterproofing of concrete bridge decks: site practice and failures[R]. Deterioration, 1991.
- [10] PRICE A R. A field trial of waterproofing systems for concrete bridge decks [R]. TRRL, 1989.
- [11] 王伟,孟庆营,周卫峰,等. 水泥混凝土桥面铺装层间界面剪切性能试验研究[J]. 中国市政工程, 2013(1): 87-91.
- WANG Wei, MENG Qingying, ZHOU Weifeng, et al. Experimental study on interface shear performance of cement concrete bridge deck pavement [J]. China Municipal Engineering, 2013 (1): 87-91.
- [12] 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.
- XU Ouming, HAN Sen, YU Jingtiao. The influence of interlayer interface on the performance of concrete deck pavement structure [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009. 29 (5): 17-20.
- [13] 汪超,朱文娟,陈浩. 基于室内试验的桥面防水黏结层应用探讨[J]. 材料与试验, 2016(2):69-72.
- WANG Chao, ZHU Wenjuan, CHEN Hao. Discussion on application of bridge deck waterproof bonding layer based on indoor test [J]. Materials and test, 2016(2):69-72.
- [14] 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 Wanchen, HUANG Xiaoming. Optimization of evaluation method of asphalt pavement structural depth based on image processing [J]. Northern transportation, 2013(3):9-13.
- [15] 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 Qiurong, SUN Rui, KONG Lingyun, et al. Correlation analysis of concrete deck roughness and interlayer bond strength based on field data [J]. Chinese and foreign highways, 2016, 36 (6): 63-65.
- [16] 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): 35-39.
- KONG Lingyun, LIN Xiongwei, SUN Rui, et al. Roughness evaluation system of concrete bridge deck based on field data [J]. Highway Engineering, 2017, 42 (5): 35-39.
- [17] 代笠. 温度和粗糙度对混凝土桥面铺装层间力学性能的影响[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.
- DAI Li. Effect of temperature and roughness on the mechanical properties of concrete deck pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- (编辑 吴海西 沈 波)