

DOI:10.11918/201812050

水泥混凝土桥面复合防水粘结层的性能

张 锋¹, 李梦琪^{1,2}, 王天宇^{1,3}, 冯德成¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 沈阳 110166;

3. 中建国际投资(中国)有限公司, 广东 深圳 518971)

摘 要: 为研究水泥混凝土桥面复合防水粘结层的剪切性能、粘结性能和低温性能, 以北安—富裕高速公路建华大桥为工程依托, 采用水泥混凝土、SBS 改性沥青防水粘结层与沥青砂 AC-5 制备复合试件, 进行层间直接剪切试验和拉拔试验; 同时对沥青砂 AC-5 制备的小梁试件进行低温开裂及低温收缩试验. 结果表明: 当防水粘结层用量为 0.6 kg/m^2 时, 层间抗剪强度最大, 能够达到 3.45 MPa ; 随着防水粘结层用量的增大, 拉拔强度同样呈先增大后减小的趋势, 当防水粘结层用量为 0.8 kg/m^2 时, 拉拔强度最高; 沥青砂小梁试件梁底最大弯拉应变随温度的降低逐渐减小, 而弯曲劲度模量却逐渐增大, 且在 $-5 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度区间内沥青混合料低温变形最剧烈.

关键词: 道路工程; 复合防水粘结层; 水泥混凝土桥; 直接剪切试验; 低温性能

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)03-0026-07

Performance of composite waterproof cohesive layer on cement concrete bridge

ZHANG Feng¹, LI Mengqi^{1,2}, WANG Tianyu^{1,3}, FENG Decheng¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110166, China;

3. China State Construction International Investments (China) Ltd., Shenzhen 518971, Guangdong, China)

Abstract: To investigate the shear performance, bonding performance, and low temperature performance of the composite waterproof cohesive layer of cement concrete bridge deck, the Jianhua Bridge on Beian-Fuyu highway was taken as the research object. Composite specimens were prepared using cement concrete, SBS modified asphalt waterproof cohesive layer, and AC-5 asphalt sand, and the amount of waterproof cohesive layer was taken as a variable to carry out direct shear and pull-out tests. Meanwhile, asphalt sand AC-5 beam specimens were prepared to conduct low temperature cracking and low temperature shrinkage tests. Results show that when the amount of waterproof cohesive layer was 0.6 kg/m^2 , the interlayer shear strength was the best, reached 3.45 MPa . With the increase of the amount of waterproof cohesive layer, the pull-out strength first increased and then decreased. When the amount of waterproof cohesive layer was 0.8 kg/m^2 , the pull-out strength was the highest. The maximum bending strain at the bottom of asphalt sand beams decreased with the decrease of temperature, while the flexural stiffness modulus was gradually increased, and the bituminous mixture had the severest deformation in the temperature range of $-5 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Keywords: highway engineering; composite waterproof cohesive layer; cement concrete bridge; direct shear test; low temperature performance

水泥混凝土桥的沥青混凝土铺装层设计时, 桥面板与铺装层之间的粘结极为重要. 由于沥青铺装层和混凝土桥面板的模量相差大, 当两者形成复合结构受力时, 层间会产生较大的剪应力, 极易出现损伤, 甚至脱离. 层间粘结的减弱, 会使沥青混合料面层承受较大剪应力, 而最终诱发推移、拥包、脱层等病害^[1]. 因此, 对水泥混凝土桥面复合防水粘结层

性能进行研究非常必要.

最初, 发现在桥面铺装层施工后不久, 防水层的防水能力就会显著下降^[2]. 文献[3]对水泥混凝土桥面的防水粘结层的技术要求进行了明确的定义. 进而, 文献[4]采用废旧橡胶粉改性沥青、高分子聚合物改性沥青等防水材料. 文献[5]通过“双组分环氧树脂+铝土岩集料”形成复合粘结层以起到防水的作用. 文献[6]采用 SBS 聚合物改性乳化沥青作为性能优良的防水粘结材料. 文献[7]发现 SBS 改性沥青作为同步碎石防水粘结层的结合料, 其粘结性能优良, 抗老化性能、不透水性能良好. 文献[8]

收稿日期: 2018-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51578200)

作者简介: 张 锋(1981—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 张 锋, zhangf@hit.edu.cn

建议当下层采用浇筑式沥青混凝土或者防水层采用沥青系列防水材料时,粘结层宜使用沥青橡胶系列溶剂. 文献[9]建议应首选 SBS 改性沥青和橡胶沥青应作为混凝土桥的防水粘结层材料. 文献[10]研制出一种新型的防水粘结层 EAC,具有突出的高温特性. 文献[11]采用了橡胶垫防水卷材夹在两层 SBS 改性沥青之间的防水粘结层形式. 文献[12]制备了 ES-2 稀浆封层和 AC-5 沥青砂的复合试件,发现温度对防水粘结层的抗剪性能影响很大.

针对防水粘结层的技术指标,文献[13-15]给出了详细的评价方法. 文献[16]提出了评价防水材料路用性能的两项关键指标,即粘结性能和抗剪性能. 文献[17]设计了剪切-法向组合荷载的直剪试验,来评价混凝土上加铺沥青层的界面粘结. 文献[1]发现界面粗糙度会对混凝土桥面铺装层高温性能有显著的影响. 文献[18]利层间剪切试验,得到 SBS 改性沥青、FYT-1 型防水涂料和改性乳化沥青单位面积的最佳用量,并通过拉拔试验获得不同防水层粘结强度的变化规律. 文献[19]采用斜剪试验,研究了不同级配和表面构造特征对橡胶沥青防水粘结层的剪切性能的影响规律. 文献[20]对 ERS 铺装体系的剪切性能进行研究,得到 EBCL 与钢板以及 SMA-13 与 RA-05 之间的剪切规律.

综上,对于防水粘结层材料的选择和性能的评价逐渐完善,但很少有针对水泥混凝土、防水粘结层以及沥青砂相结合的复合防水粘结层的研究. 因此,本文针对水泥混凝土桥面铺装的破坏形式,采用复合试件直接剪切试验、拉拔试验以及沥青砂小梁低温开裂和收缩试验,对水泥混凝土桥面复合防水粘结层的剪切性能、粘结性能、低温抗裂及收缩性能进行研究,以期为水泥混凝土桥面铺装设计提供技术支持.

1 试验材料及试件制备

1.1 试验材料

以黑龙江省北安—富裕高速公路的建华大桥为工程依托. 水泥混凝土桥采用 C50 抗渗抗冻聚丙烯纤维混凝土,并掺入质量分数为 1.5% 的减水剂. 根据施工现场所提供的混凝土配合比:水泥用量为 490 kg、水为 153 kg、10~20 mm 碎石为 1 084 kg、中砂为 723 kg、减水剂为 7.2 kg. 采用此配合比进行试拌,得到坍落度为 135 mm.

复合防水粘结层下层采用哈尔滨市路同科技发展有限公司生产的 SBS 改性沥青防水粘结层,上层采用 AC-5 沥青砂应力吸收层. 对于 AC-5 沥青砂,设计油石比为 9%;3~6 mm 的机制砂占 31 %,

0~3 mm 的机制砂占 62 %,矿粉占 7 %.

1.2 试件制备

1.2.1 复合试件

为探究水泥混凝土桥与沥青砂应力吸收上层之间的层间剪切与粘结性能,本文采用由 AC-5 沥青砂、防水粘结层和水泥混凝土三部组成的复合试件进行试验.

据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》^[21]要求,采用振动密实成型法制备 300 mm×300 mm×50 mm 的混凝土试件,脱模后标准养生 28 d 使其达到强度. 利用施工抛丸机对其表面进行凿毛、清洗及干燥. 随后分两层撒布防水粘结层,每次撒布后需经 4 h 左右自然晾晒风干. 进而,对洒布好防水粘结层的混凝土板进行取芯,芯样直径为 100 mm、高为 5 cm 的圆柱试件. 清洗干燥后,根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[22],采用旋转压实成型高度为 5 cm 的 AC-5 沥青砂应力吸收层. 具体来讲,将 AC-5 沥青砂置于已洒布好防水粘结层的混凝土芯样表面,采用直径为 100 mm 的模具,压实角为 1.25°,压力为 600 kPa,旋转速度为 30 r/min 的成型条件对试件进行 100 次旋转压实成型,最终形成水泥混凝土-防水粘结层-沥青砂结构的复合试件,其成型过程如图 1 所示.

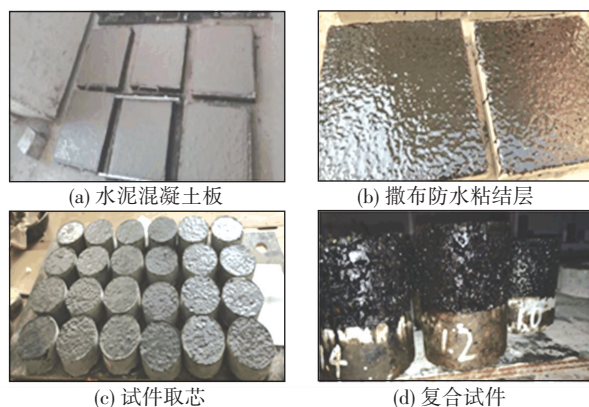


图 1 复合试件的成型过程

Fig.1 Forming process of composite specimen

1.2.2 低温小梁试件

为探究沥青砂应力吸收层自身的低温特性,制备了沥青砂小梁试件来进行低温开裂与收缩试验. 根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[22],采用轮碾法制作沥青砂车辙板,具体压实温度为 150 ℃,成型 1 d 后进行脱模. 随后将脱模好的沥青砂车辙板切割为试验指定规格大小,沥青混凝土低温开裂试验小梁尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm,低温收缩试验小梁尺寸为 200 mm×20 mm×20 mm. 低温小梁试件成型如图 2 所示.



(a) 沥青砂车辙板

(b) 小梁试件

图 2 小梁试件的成型过程

Fig.2 Preparation process of beam specimen

2 试验方法及结果分析

2.1 直接剪切试验

2.1.1 试验方法

为研究防水粘结层的用量对水泥混凝土下层与应力吸收上层之间剪切性能的影响,采用室内成型的复合剪切试件进行直接剪切试验. 试验采用 TYJ-500 微机控制电液伺服岩石剪切流变试验系统,如图 3 所示.

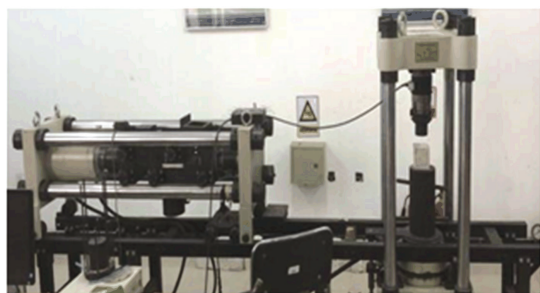


图 3 TYJ-500 微机控制电液伺服岩石剪切流变试验系统

Fig. 3 TYJ-500 microcomputer controlled electro-hydraulic servo rock shear rheological test system

试验时将制作好的复合试件按照混凝土层在下,沥青砂层在上的顺序放置于铁质模具内,调整试件位置使粘结层正好位于剪切平面,随后安置好相应位移传感器. 启动仪器后,首先对复合试件施加 0.2 MPa 的竖向荷载;之后启动剪切通道,记录所受剪切力随位移变化曲线. 试验中,控制剪切速率为 10 mm/min,温度为 25 °C,防水粘结层用量分别为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 kg/m²,每种防水粘结层用量条件下平行试件均为 3 个. 最终以试件破坏作为试验终止条件.

2.1.2 试验结果及分析

图 4 为防水粘结层用量为 0.8 kg/m²时位移与剪切力的关系曲线. 可见,在剪切试验进行前期,剪切力随着位移的增加缓慢增加,这时试件层间产生微小塑性变形,试件材料自身具有承担这部分变形的能力;当位移达到 2.5~3.0 mm 之间时,层间产生错动破坏,此时防水粘结层与沥青层的碎石开始产

生强度,强度随位移的增加而快速增加,直至达到一个峰值,粘结层达到屈服极限,剪切力急剧下降,这时粘结层界面完全破坏;界面破坏后层间随位移的变化产生滑移,微小剪切力由轴向加载产生的摩擦力提供.

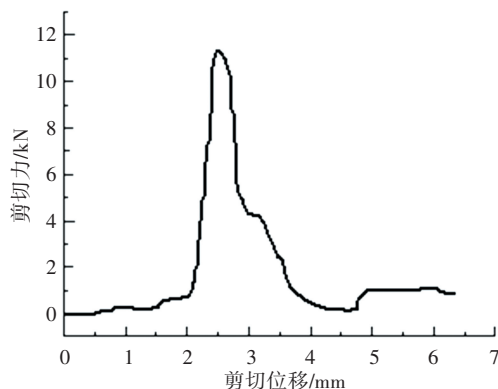


图 4 位移与剪切力的典型关系曲线

Fig. 4 Typical relationship between displacement and shear force

图 5 为剪切试件的界面破坏时的代表形态. 可见粘结层用量适中时,剪切面能够辨认出剪切破坏的细石料,表现出较为良好的性能;粘结层用量较小时,由于粘结层厚度较薄,会使剪切面上移,因此剪切面多为沥青混凝土层;而粘结层用量较大时,剪切破坏面主要为 SBS 改性沥青防水粘结层,这是由于沥青是粘弹性材料,硬度较小,因此剪切强度较低.

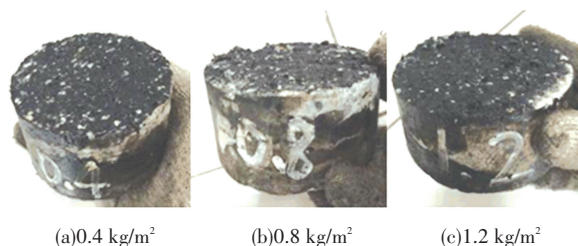
(a) 0.4 kg/m²(b) 0.8 kg/m²(c) 1.2 kg/m²

图 5 剪切试件界面的破坏形态

Fig. 5 Interfacial failure modes of shear specimens

根据直剪试验测试结果,层间剪切强度为

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切强度, kPa; F 为最大剪切力, kN; S 为剪切面积, m².

图 6 为防水粘结层用量与层间剪切强度关系曲线. 可见,当防水粘结层用量为 0.4 kg/m²时剪切强度最低,防水粘结层用量为 0.6 kg/m²时剪切强度最高. 而且,随着用量的增加,层间剪切强度呈现先增大后减小的趋势. 这是由于当防水粘结层用量较少时,没有足够的粘结强度抵抗外力的作用;随着用量的增多,防水粘结层将在水泥混凝土板与沥青铺装层间形成滑移层,层间剪切强度逐渐降低,说明粘结

层存在最佳用量. 此外,当剪切强度从最小值增大到最大值时,其数值由 0.89 MPa 增加至 3.45 MPa,增大幅度为 2.88 倍,说明防水粘结层的用量对剪切强度影响之大.

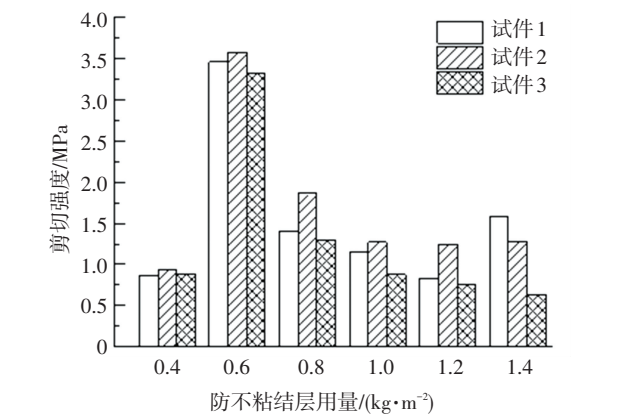


图6 防水粘结层用量与层间剪切强度关系

Fig.6 Relationship between shear strength and the amount of waterproof cohesive layer

2.2 拉拔试验

2.2.1 试验方法

与抗剪性能相同,防水粘结层的抗拉强度同样是粘结层粘结强度的重要评价指标. 合理的粘结层用量能够将接触面的细石料裹覆并均匀分散,在受到拉力作用时互相嵌挤粘结,从而获得较高的强度. 为测定粘结层的抗拉强度,本文采用电子式拉力试验机对复合试件进行整体拉拔试验.

为了使复合试件能够与试验机安装连接,本文制作了 150 mm×150 mm×10 mm 规格钢板. 试验时,使用环氧 AB 胶将模具钢板粘结至复合试件表面,施加适当压力静置 24 h 以上等待胶面提供强度,试件连接如图 7 所示.



图7 拉拔试验中的试件安装

启动试验机,待拉力数值保持不变时停止试验,记录最终最大拉力数据. 试验中,控制轴向拉拔速率为 10 mm/min,温度为 25 ℃,防水粘结层用量分别为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 kg/m²,每种防水粘结

层用量条件下平行试件均为 3 个. 拉拔强度为

$$p = \frac{F}{S} \tag{2}$$

式中: p 为拉拔强度, kPa; F 为拉力, kN; S 为受拉面积, m².

2.2.2 试验结果及分析

复合试件拉拔试验结果如图 8 所示. 可见,随着防水粘结层用量的增多拉拔强度的变化趋势与层间剪切强度的变化趋势相似,呈先增加后减小的趋势. 当防水粘结层用量为 0.8 kg/m²时,拉拔强度达到最高,为 0.21 MPa,当防水粘结层用量为 1.4 kg/m²时,拉拔强度达到最低. 当防水粘结层用量从 0.8 kg/m²增加至 1.4 kg/m²的过程中,拉拔强度的减小幅度为 65.2%. 值得注意的是,试件的破坏位置基本发生在界面上方的 AC-5 沥青砂中,这主要是由于防水粘结层界面自身的强度大于 AC-5 沥青砂的缘故.

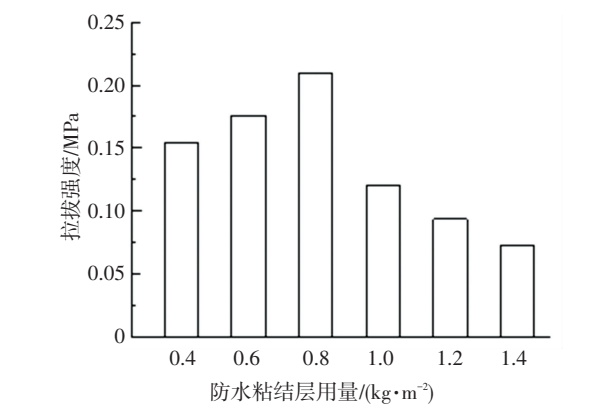


图8 防水粘结层用量与拉拔强度关系

Fig.8 Relationship between pull-out strength and the amount of waterproof cohesive layer

2.3 低温开裂试验

2.3.1 试验方法

对沥青砂应力吸收层铺装材料进行低温小梁弯曲试验,来评价其低温抗裂性能. 本试验采用 IPC 生产的万能材料试验机 UTM-250 进行控温和数据采集,以实现数据应力和应变的同步获取. 试验时,AC-5 在经过拌合、碾压、切割等工序后,形成 250 mm×30 mm×35 mm 的试件. 并将试件分别放在 -20、-15、-10、-5 ℃ 的保温箱内保温 4 h 以上后,试验机以 50 mm/min 的加载速率在跨中位置施加集中荷载,直至试件破坏. 每种试验条件下平行试件均为 3 个,共计 12 个试件.

试验结束后,试件破坏时的抗弯拉强度、破坏时梁底最大弯拉应变及破坏时的弯曲劲度模量分别为

$$R_B = \frac{3 \times L \times P_B}{2 \times b \times h^2} \tag{3}$$

$$\varepsilon_B = \frac{6 \times h \times d}{L^2}, \tag{4}$$

$$S_B = \frac{R_B}{\varepsilon_B}. \tag{5}$$

式中： R_B 为试件破坏时的抗弯拉强度，MPa； ε_B 为试件破坏时的最大弯拉应变； S_B 为试件破坏时的弯曲劲度模量，MPa； b 跨中断面试件的宽度，mm； h 为跨中断面试件的高度，mm； L 为试件的跨径，mm； P_B 为试件破坏时的最大荷载，kN； d 为试件破坏时的跨中挠度，mm。

2.3.2 结果及分析

图 9、10 分别为温度与最大拉应变和弯曲劲度模量的关系曲线。可见，梁底最大弯拉应变随温度的降低逐渐减小，而弯曲劲度模量则逐渐变大，产生此规律的主要原因为随着温度降低，沥青混合料的硬度和脆性变大，破坏时的跨中挠度变小，导致梁底最大弯拉应变降低，弯曲劲度模量增大。当温度从 0℃ 降低到 -25℃ 的过程中，梁底最大弯拉应变从 0.001 958 减小至 0.001 539，减小幅度为 21.4%，弯曲劲度模量从 213.2 MPa 增大到 466.5 MPa，增大了 1.19 倍，说明温度对弯曲劲度模量的影响大于其对梁底最大弯拉应变的影响。

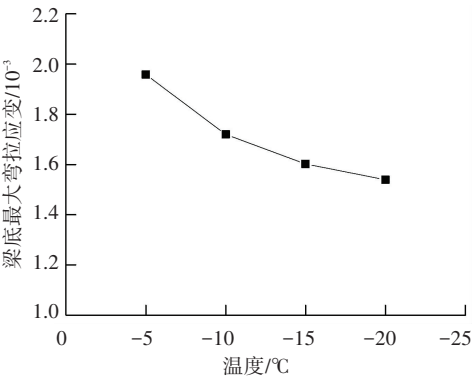


图 9 温度与最大弯拉应变关系

Fig.9 Relationship between temperature and maximum bending strain

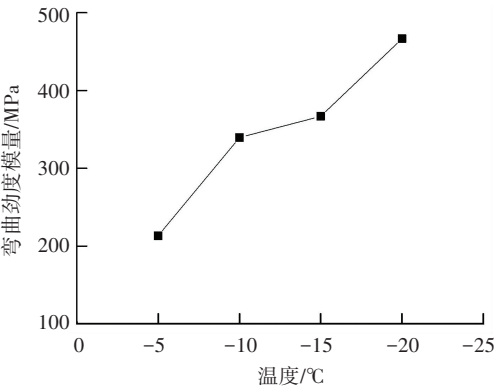


图 10 温度与弯曲劲度模量关系

Fig.10 Relationship between temperature and flexural stiffness modulus

2.4 低温收缩试验

2.4.1 试验方法

沥青混凝土的低温线收缩系数对桥面铺装层的温度应力影响很大，是计算温度应力的重要参数。收缩系数是一个复杂的物理参数，不仅与混凝土配合比组成及沥青性质有关，还与所处温度条件及其变化速率有关。本文采用哈尔滨工业大学交通学院自主开发的试验设备^[23]进行沥青混合料低温收缩线系数测定，如图 11 所示。



图 11 低温收缩线系数的测定设备

Fig.11 Measuring equipment of low temperature shrinkage linear coefficient

试验时，AC-5 在经过拌合、碾压、切割等工序后，形成 200 mm×20 mm×20 mm 的试件。之后在试件表面喷洒黑色油漆，待风干后喷洒白色油漆，最后涂抹数字散斑。散斑涂抹应当覆盖试件表面，尽量杂乱且分布均匀。随后将试件放进控温箱内，按照 10℃/h 的降温速率进行控温，温度达到指定温度后恒温保持 30 min 以上。进而仪器将对试验中的试件进行拍照观测。最终对机器拍摄的照片进行数据处理，得出试验结果。试验过程如图 12 所示。试验温度分别采用 -30、-20、-10、-5、5、10℃，每种试验条件下平行试件均为 3 个，共计 21 个试件。



(a) 试件表面处理 (b) 观测试件

图 12 低温收缩系数试验

Fig.12 Low temperature shrinkage coefficient test

据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[22]规定，降温区间平均收缩应变及平均收缩系数分别为

$$\varepsilon_e = \frac{L_e - L_0}{L_0}, \tag{6}$$

$$C = \frac{\varepsilon_e}{\Delta T} \tag{7}$$

式中： ε_e 为平均收缩应变； L_e 为指定温度下试件收缩后的长度，mm； L_0 为 10℃ 时试件的原始长度，mm； C 为沥青混合料的平均线收缩系数； ΔT 为温度区间，℃。

2.4.2 结果及分析

图 13 为试验测试时间与平均收缩应变的关系的典型曲线。根据式(7) 计算不同温度区间的收缩变化系数见表 1。可见,各温度区间内收缩变化系数随温度的降低呈现先增长后下降的趋势。收缩变化系数在-20~-30℃ 之间时达到最小,为 $0.276 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$,在-5~-10℃ 之间时收缩变化系数最大,为 $0.398 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$,收缩变化系数增大了 44.2%。同时说明,在-5~-10℃ 之间时沥青混合料低温变形最为剧烈。

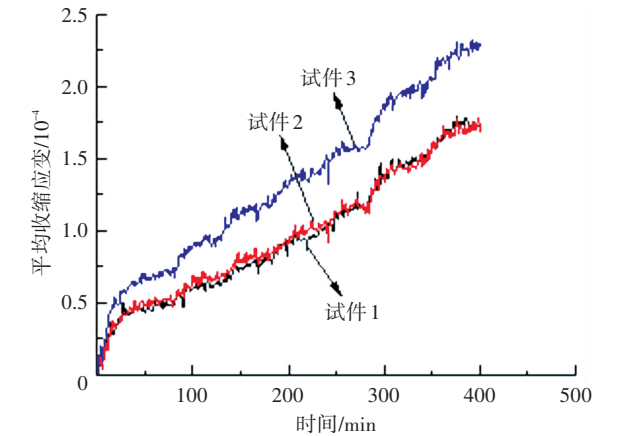


图 13 时间与平均收缩应变的典型关系曲线

Fig.13 Typical relationship between time and mean shrinkage strain

表 1 不同温度下的收缩变化系数

Tab.1 Coefficient of shrinkage variation in different temperature ranges

温度/℃	$\Delta T/^\circ\text{C}$	中值温度/℃	$C/10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
10~5	5	7.5	0.350
5~0	5	2.5	0.346
0~-5	5	-2.5	0.382
-5~-10	5	-7.5	0.398
-10~-20	10	-15	0.368
-20~-30	10	-25	0.276

3 结 论

1) 随着防水粘结层用量从 0.4 kg/m² 增加到 1.4 kg/m² 的过程中,层间剪切强度呈现先增大后减小的趋势;当防水粘结层用量为 0.6 kg/m² 时,抗剪强度最高,且为 3.45 MPa。剪切强度的最大值为最

小值 0.89 MPa 的 3.9 倍。

2) 当防水粘结层用量从 0.4 kg/m² 增加到 1.4 kg/m² 的过程中,拉拔强度同样呈先增大后减小的趋势。当防水粘结层用量为 0.8 kg/m² 时,拉拔强度达到最高,为 0.21 MPa。当防水粘结层用量从 0.8 kg/m² 增加至 1.4 kg/m² 的过程中,拉拔强度的减小幅度为 65.2%。

3) 小梁底最大弯拉应变随温度的降低逐渐减小,而弯曲劲度模量则不断增大,当温度从 0℃ 降低到-25℃ 的过程中,梁底最大弯拉应变减小幅度为 21.4%,弯曲劲度模量增大了 1.19 倍。而且,温度在-5~-10℃ 之间时沥青混合料低温变形最为剧烈。

参考文献

[1] 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
XU Ouming, HAN Sen, YU Jingtao. 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2009.05.004

[2] Van TIL C J, CARR L, VALLERGA B. Waterproof membranes for protection of concrete bridge decks: NCHRP Report 165 [R]. Washington DC: Transportation Research Board National Academy of Science, 1976

[3] WEGAN V, NIELSEN B C. Surfacing of concrete bridges: 00936004 [R]. Copenhagen, Denmark: Danish Road Institute, 2000

[4] JACOBS M J. Method for waterproofing bridge decks and the like: U.S. Patent 4151025[P]. 1979-04-24

[5] BUITELAAR P, BRAAM R. Heavy reinforced ultra thin white topping of high performance concrete for restrengthening and rehabilitation of structures and pavements[C]// Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete. Tokyo: Japan Concrete Institute, 2008: 1262

[6] 刘少文,张明. SBS 聚合物改性乳化沥青作为桥面防水粘结材料路用性能研究[J].工程力学,2009,26(增刊1):98
LIU Shaowen, ZHANG Ming. Study on road performance of SBS polymer modified emulsified asphalt for bridge waterproof and cohesive layer[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S1): 98

[7] 杨育生,李振霞,王选仓,等.桥面铺装同步碎石防水粘结层的路用性能[J].长安大学学报(自然科学版),2009,29(6):19
YANG Yusheng, LI Zhenxia, WANG Xuancang, et al. Road performance of synchronous crushed stone waterproof binding course of bridge pavement[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(6): 19. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2009.06.005

[8] HICKS R G, DUSSEK I J, SEIM C. Asphalt surfaces on steel bridge decks[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1740(1): 135

[9] 刘云,于新,戴优华,等.混凝土箱梁桥铺装防水粘结层力学性能[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(1):57
LIU Yun, YU Xin, DAI Youhua, et al. Mechanical properties of waterproof adhesive layer on concrete box girder bridge[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(1): 57. DOI:

- 10.3969/j.issn.0253-37x.2012.01.010
- [10] AI Changfa, RAHMAN A, WANG Feiyu, et al. Experimental study of a new modified waterproof asphalt concrete and its performance on bridge deck [J]. Road Materials & Pavement Design, 2017, 18 (2): 270. DOI: 10.1080/14680629.2017.1329881
- [11] 于晓贺, 汪帮平, 陈龙龙, 等. 基于 MTS 的桥面铺装防水粘结层抗剪性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(3): 484
- YU Xiaohu, WANG Bangping, CHEN Longlong, et al. Study on the shear performance of waterproof-bonding layer based on the material testing system [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41(3): 484. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2017.03.025
- [12] PRICE A R. A field trial of waterproofing systems for concrete bridge decks; RR185 [R]. Wokingham: Transport and Road Research Laboratory, 1989
- [13] PRICE A R. Laboratory tests on waterproofing systems for concrete bridge decks; RR248 [R]. Wokingham: Transport and Road Research Laboratory, 1990
- [14] PRICE A R. Waterproofing of concrete bridge decks; site practice and failures; RR317 [R]. Wokingham: Transport and Road Research Laboratory, 1991
- [15] MARTINELLI P. Bridge deck waterproof membrane evaluation; AK-RD-96-04 [R]. Anchorage: State of Alaska Department of Transportation and Public Facilities Central Region, 1996
- [16] 裴建中, 胡长顺, 张占军. 桥面防水材料路用性能[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(4): 33
- PEI Jianzhong, HU Changshun, ZHANG Zhanjun. Road performance of waterproof material for concrete bridge decks[J]. Journal of Traffic & Transportation Engineering, 2001, 1(4): 33
- [17] WEST R C, ZHANG Jinna, MOORE J. Evaluation of bond strength between pavement layers; NCAT Report 05-08 [R]. Auburn: Auburn University, 2005
- [18] 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
- WANG Yaling, ZHOU Yuli, YAO Ailing, 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2009.06.004
- [19] 纪伦, 李云良, 任俊达, 等. 桥面铺面防水粘结层胶结材料洒布量的确定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(4): 57
- Ji Lun, Li Yunliang, Ren Junda, et al. Method of determining the spraying amount of waterproof binder for bridge deck pavement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(4): 57
- [20] LIU X, ZHOU C, FENG D, et al. Experimental study on interlayer shear properties of ERS pavement system for long-span steel bridges [J]. Construction & Building Materials, 2017, 143: 198. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.144
- [21] 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程: JTG E30—2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005
- Test method of cement and concrete for highway engineering: JTG E30—2005 [S]. Beijing: China Communication Press, 2005
- [22] 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011
- Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communication Press, 2011
- [23] 张磊. 沥青混合料低温开裂及松弛特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
- ZHANG Lei. Asphalt mixture low-temperature cracking and relaxation characteristics research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010
- (编辑 魏希柱)
-
- (上接第 25 页)
- [21] WESTGATE R, KOO K Y, BROWNJOHN J. Effect of solar radiation on suspension bridge performance[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(5): 04014077
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and conditioning of civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012
- [23] 任远, 王晓春, 黄侨, 等. 中美欧公路桥梁设计规范的综合评价方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 7
- REN Yuan, WANG Xiaochun, HUANG Qiao, et al. The comprehensive evaluation method of highway bridge design specifications of China, U.S. and Europe[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 7
- [24] 吴继臣, 徐刚. 全国主要城市冬季太阳辐射强度的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(10): 1236
- WU Jichen, XU Gang. Major Chinese cities' solar radiant intensities in winter[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(10): 1236
- [25] 丁幼亮, 卞宇, 赵瀚玮, 等. 公铁两用斜拉桥竖向挠度的长期监测与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017(2): 73
- DING Youliang, BIAN Yu, ZHAO Hanwei, et al. Long-term monitoring and analysis of vertical deflections of a highway-railway cable-stayed bridge under operation conditions[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017(2): 73
- (编辑 魏希柱)