

温度对设置缓冲层水泥混凝土路面 层间结合系数的影响

王兵¹, 孙丰哲¹, 董肇明¹, 胡洪溪^{2*}, 樊丽然², 胡朋²

1. 山东东泰工程咨询有限公司, 山东 淄博 256414; 2. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357

摘要:为研究设缓冲层的水泥混凝土路面各层间的结合状态,以AC-13沥青混合料为缓冲层,强度等级C30的混凝土为路面面层,水泥稳定碎石为基层制作试件,通过改造土工直剪仪剪切盒,在竖向荷载分别为0.327、0.627、0.927、1.227 kN,在温度分别为15、30、60℃下进行层间剪切试验。试验结果表明:相同温度下,水泥稳定碎石与缓冲层界面、水泥混凝土与缓冲层的层间抗剪强度均随竖向荷载的增大而增大;相同竖向荷下,2个界面的层间抗剪强度均随温度升高而减小,摩阻因数、黏聚力和层间结合系数随温度升高而减小。各参数变化规律一致,可用层间结合系数综合表征层间结合状态。

关键词:水泥混凝土路面;缓冲层;剪切仪;抗剪强度;层间结合系数

中图分类号:U447;U442.5⁺9

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)02-0065-06

引用格式:王兵,孙丰哲,董肇明,等. 温度对设置缓冲层水泥混凝土路面层间结合系数的影响[J]. 山东交通学院学报,2025,33(2):65-70.

WANG Bing, SUN Fengzhe, DONG Zhaoming, et al. The impact of temperature on the bonding coefficient between buffer layer and cement concrete pavement layers[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025,33(2):65-70.

0 引言

层间抗剪强度是指层压材料发生层间剪切破坏时的极限应力,反映层间结合状态。层间结合状态不良导致层间抗剪强度减小,影响水泥混凝土路面的耐久性^[1-3]。层间状态可分为分离式和结合式两种,实际层间结合状态可连续变化^[4-6]。

可采用不同试验方法评价不同路面结构的层间结合状态^[7-8]。Weidenmann等^[9]采用边缘剪切试验方法测定不同复合材料的层间剪切强度,实现直接剪切荷载,减少传统层间剪切强度试验方法中试件几何形状的复杂性。Komaragiri等^[10]研发测试热拌沥青混合料(hot mixture asphalt,HMA)-波特兰水泥混凝土层间键合的现场拉脱测试方法,表明拉拔强度与直剪强度密切相关。Jin等^[11]通过斜剪疲劳试验研究复合材料水泥混凝土表面在重复加载和水侵蚀作用下的层间黏结性能,结果表明采用改性沥青作为黏结层可提高路面的抗剪强度和疲劳寿命。He等^[12]应用无损分离技术和三维激光扫描,分析双层沥青路面的界面形态特征,通过提取纹理参数揭示界面形态与层间结合强度间的关系。龚育超^[13]研究半刚性基层路面的层间强度机理,提出层间强度与层间黏结力、层间摩擦力、层间嵌挤力间的关系。刘斌^[14]通

收稿日期:2023-10-11

基金项目:山东省交通科技创新计划项目(2022B17)

第一作者简介:王兵(1981—),男,济南人,高级工程师,主要研究方向为路面结构设计、道路施工与桥梁建设,E-mail:547559572@qq.com。

*通信作者简介:胡洪溪(1998—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:515191256@qq.com。

过层间剪切试验、拉拔试验、扭力试验、表面憎水试验等证实蜡制养护剂作为水泥混凝土路面隔离层的隔离效果。曹明明等^[15]通过 45° 剪切试验分析界面糙化方式、不同黏结材料、温度和加载速率对复合式路面层间剪切滑移行为的影响,认为凿毛糙化方式有助于提高复合式路面层间剪切强度。任少博等^[16]研究薄层橡胶沥青复合式路面在高温条件下的滑移特性,通过双侧无约束汉堡车辙试验探讨路面层间的高温滑移行为,认为界面具有较好的构造深度时,整体抗变形能力明显提高。胡凯健^[17]采用 45° 斜剪试验研究层间黏结材料和界面类型对层间抗剪强度的影响,表明沥青面层压实度增大,层间抗剪性能显著提高。现有研究中对设置沥青缓冲层的水泥混凝土路面层间剪切强度的研究较少,在温度影响下对此种路面结构的系统分析研究较少^[18-21]。

为分析水泥稳定碎石基层与缓冲层、水泥混凝土面层与缓冲层间的黏结性能,本文采用改进后的土工直剪仪剪切盒进行层间抗剪切强度试验,测量并分析不同温度下各层间抗剪强度与竖向荷载的关系,计算层间摩阻因数和黏聚力,求得层间结合系数表征层间结合状态,以为设置缓冲层的水泥混凝土路面结构提供参考。

1 试验材料与设备

采用强度等级 C30 混凝土作为面层,混凝土中水、水泥、砂、石子的体积质量分别为 165、430、561、1 244 kg/m³。为保证面层与缓冲层间良好的黏结性和力学性能,同时考虑经济性和环保性,缓冲层采用 AC-13 沥青混合料,根据文献[22]调整级配中值,级配曲线如图 1 所示。

为保证试验的精确性和可信性,选择单一粒径配比方式制备水泥稳定碎石混合料^[23]。为尽可能还原路面服役过程中水泥混凝土路面与沥青缓冲层间的结构特征,同时考虑试验条件和成本,选择碎石的最大粒径为 9.5 mm,水泥稳定碎石级配曲线如图 2 所示。碎石与砂的质量比为 61:39,水泥与碎石的质量比为 0.06,含水率为 7%。据此改进土工直剪仪剪切盒,改进后剪切盒内径为 100 mm,保证试件在剪切过程中不发生滑移或脱离,提高试验的效率和准确性。

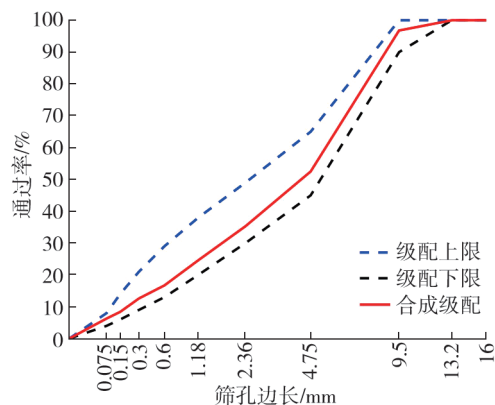


图 1 AC-13 沥青混合料缓冲层合成级配曲线

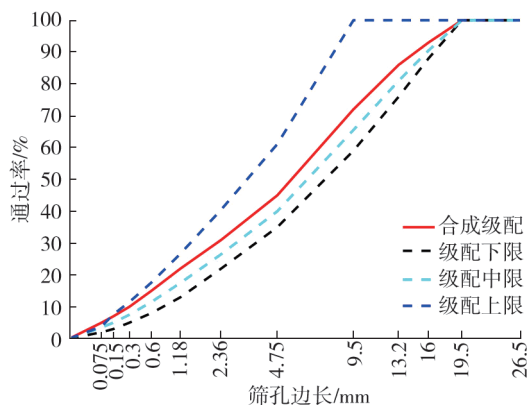


图 2 水泥稳定碎石合成级配曲线

2 试验方案及原理

2.1 试验方案

制备由水泥混凝土面层、AC-13 缓冲层和水泥稳定碎石基层组成的试件,各层厚度 l_1 、 l_2 、 l_3 如表 1 所示。将内径和长度均为 100 mm 的聚氯乙烯 (Polyvinyl Chlorid, PVC) 管涂上润滑油,将制备的水泥稳定碎石填入 PVC 管中,待振捣压实到设计高度后喷淋养护超过 7 d。养护结束后,先铺设 AC-13 沥青混合料,再用橡胶锤把缓冲层夯实后立即在上层铺设水泥混凝土,养护超过 7 d 后脱模。共制备 36 个有效试件。

试验前,将试件分别置于温度为 15、30、60 ℃ 的保温箱内保温;剪切时,选择质量分别为 2.55、5.10、7.65、10.20 kg 的 4 种砝码进行竖向加载,设置电动剪切速率为 12 r/min。每种水平下进行 3 组平行试验,以平行试验结果的平均值(平均层间抗剪强度)作为最终试验结果。

2.2 剪切原理

在上剪切盒顶部中心施加竖向压力,在水平方向推动上剪切盒,上、下剪切盒发生相对位移并产生剪切破坏,如图 3 所示。上剪切盒质量为 2.75 kg。

改进土工直剪仪后,竖向加载杠杆比 w 为 1:12,试件受力面积变化,试件所受荷载改变,经计算得到质量 m 分别为 2.55、5.10、7.65、10.20 kg 的砝码对应竖向荷载 F 分别为 0.33、0.63、0.93、1.23 kN。

根据量力表读取的剪切力计算抗剪强度

$$\tau = ks,$$

式中: k 为率定系数,本文 $k = 1.571 \text{ kPa}/(0.01 \text{ mm})$; s 为量力表读数,0.01 mm。

剪切力

$$F_s = \tau A,$$

式中: A 为剪切面积, m^2 。

采用摩阻因数 $\tan \varphi$ (φ 为内摩擦角)、黏聚力 c 和层间结合系数(剪切力与竖向荷载之比)描述层间结合状态。沥青混合料缓冲层有黏性,已知抗剪强度 τ 时, $\tan \varphi$ 和 c 可通过莫尔-库仑定律破坏公式^[24] 计算,公式为:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi,$$

式中: σ 为法向应力, MPa。

3 结果分析

3.1 水泥稳定碎石与缓冲层层间状态

温度对水泥稳定碎石与缓冲层层间抗剪强度的影响主要表现在温度改变时,沥青混合料中沥青的黏度和流动性发生变化,影响沥青与水泥稳定碎石间的黏结力和摩擦力。沥青的黏度和流动性与温度呈指数关系,温度升高时,沥青的黏度减小,流动性增大,沥青的黏结性能下降,沥青与水泥稳定碎石间的黏结力和摩擦力减小,层间抗剪强度减小,这些现象在高温环境下尤为明显。

在剪切试验过程中,记录温度分别为 15、30、60 ℃ 下水泥稳定碎石与缓冲层的层间抗剪强度与竖向荷载的关系,如表 2 所示。由表 2 可知:在 4 种竖向荷载水平下,温度为 30 ℃ 时测得的水泥稳定碎石与缓冲层的层间抗剪强度比温度为 15 ℃ 时分别减小 13.50%、15.03%、20.57%、24.35%;温度为 60 ℃ 时测得的水泥稳定碎石与缓冲层的层间抗剪强度比温度为 15 ℃ 时分别减小 66.59%、63.08%、65.42%、64.84%。高温对水泥稳定碎石与缓冲层层间结合性能有较大影响,温度为 60 ℃ 时水泥稳定碎石与

表 1 剪切试件组合方案

组合方案	l_1/cm	l_2/cm	l_3/cm	被剪切面
1	2	1	3	水泥稳定碎石与缓冲层接触面
2	3	1	2	缓冲层与水泥混凝土接触面
3	3	1	3	缓冲层

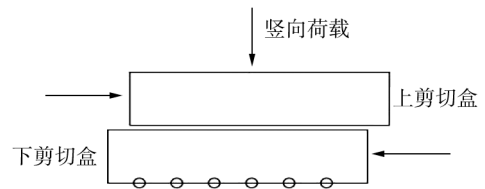


图 3 剪切原理图

表 2 不同温度下水泥稳定碎石与缓冲层的层间抗剪强度与竖向荷载的关系

竖向 荷载/kN	层间抗剪强度/MPa		
	温度为 15 ℃	温度为 30 ℃	温度为 60 ℃
0.327	0.452	0.391	0.151
0.627	0.539	0.458	0.199
0.927	0.671	0.533	0.232
1.227	0.768	0.581	0.270

缓冲层的层间抗剪强度显著减小,主要原因是高温导致缓冲层材料的物理性能发生变化,界面结合性能下降。在实际工程应用中需格外注意温度控制,保证层间结合的稳定性和耐久性。

竖向荷载对水泥稳定碎石与缓冲层层间抗剪强度的影响主要表现为增大水泥稳定碎石与缓冲层间的接触压力,层间的摩擦力和黏结力相应增大。竖向荷载与行车荷载和占比有关,行车荷载越大或加载越频繁,竖向荷载越大,层间抗剪强度越大。温度为 15 ℃ 时,竖向荷载为 0.327 kN 的试件水泥稳定碎石与缓冲层的层间抗剪强度比竖向荷载为 1.227 kN 的试件增大 69.91%;试验温度为 30、60 ℃ 时,试件水泥稳定碎石与缓冲层的层间抗剪强度比温度为 15 ℃ 时的试件分别增大 48.59%、78.81%。水泥稳定碎石与缓冲层间的层间结合性能有一定的自我修复能力,能在一定程度上抵抗行车荷载引起的层间剪切应力,提高路面的承载能力和使用寿命。若竖向荷载过大或超过层间极限结合强度,层间结合可能破坏,产生层间剥离或滑移等病害,需根据不同的交通条件和路面结构设计合理的水泥稳定碎石与缓冲层的厚度和强度,保证层间结合的安全性和可靠性。

摩阻因数和黏聚力是描述水泥稳定碎石与缓冲层的层间结合性能的重要参数,反映层间摩擦力和黏结力大小,与层间抗剪强度正相关。据此计算水泥稳定碎石与缓冲层的层间结合系数,如表 3 所示。该系数是评价层间结合性能的综合指标,层间结合系数越大,层间结合性能越好。

由表 3 可知:温度为 15 ℃ 时水泥稳定碎石与缓冲层的摩阻因数、黏聚力比温度为 60 ℃ 时分别减小 64.28%、65.85%;摩阻因数和黏聚力均与沥青的黏结性能有关,沥青的黏结性能受温度影响较大,温度越高,沥青软化程度越大,黏结性能越差,摩阻因数和黏聚力随温度升高而减小;试验温度为 60 ℃ 时水泥稳定碎石与缓冲层的层间结合系数比温度为 15 ℃ 时减小 64.79%,与层间抗剪强度的变化趋势一致,层间抗剪强度、摩阻因数和黏聚力相互关联。

3.2 水泥混凝土与缓冲层层间状态

记录温度分别为 15、30、60 ℃ 时水泥混凝土与缓冲层的层间抗剪强度与竖向荷载的关系,结果如表 4 所示。根据试验结果计算不同温度下水泥混凝土与缓冲层间的摩阻因数和黏聚力,并依此计算层间结合系数,结果如表 5 所示。

由表 4、5 可知,水泥混凝土与缓冲层的层间抗剪强度及层间结合性能整体变化规律与表 2、3 一致。试验温度为 30 ℃ 时,4 种竖向荷载水平下水泥混凝土与缓冲层的层间抗剪强度比温度为 15 ℃ 时分别减小 24.30%、22.52%、21.69%、24.15%;增至 60 ℃ 时,水泥混凝土与缓冲层的层间抗剪强度比温度为 15 ℃ 时分别减小 59.68%、55.44%、54.07%、54.63%。在 3 种温度条件下,竖向荷载由 0.327 kN 增至 1.227 kN 时,水泥混凝土与缓冲层的层间抗剪强度分别增大 42.90%、43.18%、60.80%。温度为 60 ℃ 时水泥混凝土与缓冲层的摩阻因数、黏聚力和层间结合系数比温度为 15 ℃ 时分别减小 42.86%、61.44%、57.04%。试验结果表明,温度升高对水泥混凝土面层与缓冲层的层间结合性能有显著影响,导致层间结合系数、黏聚力、摩阻因数和层间抗剪强度均减小。同时,随竖向荷载的增大,层间抗剪强度明显提高。

缓冲层与水泥混凝土的层间抗剪强度和摩阻因数比缓冲层与水泥稳定碎石的界面大,这与界面形态

表 3 不同温度下水泥稳定碎石与缓冲层的层间结合性能

温度/℃	摩阻因数	黏聚力/kPa	层间结合系数
15	2.8	328	7.1
30	1.7	323	5.8
60	1.0	112	2.5

表 4 不同温度、竖向荷载下水泥混凝土与缓冲层的层间抗剪强度

竖向 荷载/kN	层间抗剪强度/MPa		
	温度为 15 ℃	温度为 30 ℃	温度为 60 ℃
0.327	0.930	0.704	0.375
0.627	1.048	0.812	0.467
0.927	1.180	0.924	0.542
1.227	1.329	1.008	0.603

表 5 不同温度下水泥混凝土与缓冲层的摩阻因数、黏聚力和层间结合系数

温度/℃	摩阻因数	黏聚力/kPa	层间结合系数
15	3.5	778	13.5
30	2.8	591	10.4
60	2.0	300	5.8

和施工方式有关。压实缓冲层后立即加铺水泥混凝土,水泥混凝土渗入缓冲层表面空隙中,二者间的黏聚力增大。压实缓冲层时,水泥稳定碎石基层表面较光滑,无嵌锁力,二者间的界面滑移较大。层间结合状态与温度和竖向荷载有关,也与施工方式和界面形态密切相关。为确保层间结合的稳定性和耐久性,需优化施工工艺和施工设备,提高施工的效率和质量,改善层间的界面形态,增大层间的黏聚力和摩阻因数。例如,可在压实缓冲层后立即加铺水泥混凝土,使水泥混凝土渗入缓冲层表面空隙中,增大二者间的黏聚力;对水泥稳定碎石基层表面进行粗化处理,增大嵌锁力,减少界面滑移。

在不同的气候条件和交通荷载下,水泥混凝土路面层间结合性能改变,影响路面的承载能力和使用寿命。在实际工程中,需特别关注温度和竖向荷载对层间结合性能的影响,可通过控制施工温度和养护条件,确保在适宜的温度范围内施工;选择适当的竖向荷载水平,优化抗剪强度;定期检测和评估路面的状态,及时识别和修复层间结合的问题,通过延长路面的使用寿命等措施确保路面的稳定性和耐久性。

4 结论

通过层间剪切试验测试缓冲层与水泥混凝土面层、缓冲层与水泥稳定碎石基层的层间抗剪强度,计算黏聚力、层间摩阻因数和层间结合系数,分析竖向荷载和温度对层间结合状态的影响。

1) 水泥稳定碎石基层与缓冲层的黏聚力、摩阻因数、层间抗剪强度和层间结合系数均随温度的升高而减小,其中层间抗剪强度随竖向荷载的增大而增大,在高温状态下更易出现剪切破坏。

2) 水泥混凝土面层与缓冲层的黏聚力、摩阻因数、层间抗剪强度和层间结合系数均随温度的升高而减小,层间抗剪强度随竖向荷载的增大而增大,抗剪强度和各项结合状态指标均高于水泥稳定碎石与缓冲层间的相关指标,这与界面形态和施工方式有关。

3) 黏聚力和摩阻因数共同作用影响层间抗剪强度,采用层间结合系数评价层间结合状态更合理。

参考文献:

- [1] LIU Y, QIAN Z D, YIN Y X, et al. Investigation on interlayer behaviors of a double-layered heterogeneous asphalt pavement structure for steel bridge deck[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022,34(5):04022062.
- [2] 赵之仲,柳泓哲,刘桂强,等. ATB 柔性基层与半刚性基层的层间抗剪规律[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(3):57-62.
- [3] HWANG H S, RYU S W, OH J S, et al. Investigation of texture effects at interlayer bonding behavior between asphalt concrete (AC) overlay on Portland cement concrete (PCC)[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2022,49(3):412-419.
- [4] 中华人民共和国交通运输部,中交公路规划设计院有限公司. 公路水泥混凝土路面设计规范: JTG D40—2011[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [5] LU Z, FENG Z G, YAO D D, et al. Bonding performance between ultra-high performance concrete and asphalt pavement layer[J]. Construction and Building Materials, 2021,312: 125375.
- [6] JIA X Y, HUANG B S. Characterization of shear resistance of interlayer between concrete bridge deck and asphalt concrete overlay utilizing inclination shear test[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022,34(2):04021424.
- [7] HE H Z, AI C F, RAHMAN A. Characterization of interface morphology and its impact on interlayer bonding strength in double-layered asphalt systems[J]. Construction and Building Materials, 2024,421:135617.
- [8] YANG X, RAHMAN A, LUO Y, et al. Effects of interlayer surface characteristics on the interface bonding between double-layered asphalt systems[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023,24(1):2192496.
- [9] WEIDENMANN K A, BAUMGÄRTNER L, HASPEL B. The edge shear test: an alternative testing method for the determination of the interlaminar shear strength in composite materials[J]. Materials Science Forum, 2015, 825/826: 806-813.
- [10] KOMARAGIRI S, DRIMALAS T, HAZLETT D, et al. An in-situ method to evaluate the interlayer bond between hot-mix asphalt and portland cement concrete surface[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134648.

- [11] JIN T P, LIU L K, YANG R, et al. Investigation of interlayer bonding performance between asphalt concrete overlay and Portland cement concrete using inclined shear fatigue test[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 400: 132681.
- [12] HE H, RAHMAN A, AI C. Interlocking characteristic and its correlation with interlayer shear strength in typical double-layered asphalt systems[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2024, 25(1): 2347996.
- [13] 龚育超. 半刚性基层表面不同层间处治方法的试验研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
- [14] 刘斌. 蜡制养护剂用于水泥混凝土路面隔离层作用机理及应用研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2016.
- [15] 曹明明, 陆阳, 黄晚清, 等. 复合式路面层间界面剪切滑移特性[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(4): 1-11.
- [16] 任少博, 王浩, 邹晓龙, 等. 薄层橡胶沥青复合式路面层间高温滑移特性[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(29): 294-300.
- [17] 胡凯健. 刚柔复合式路面层间抗剪性能分析[D]. 成都:西南交通大学, 2020.
- [18] 武书华, 陈华鑫, 张久鹏, 等. 半刚性基层沥青路面层间界面力学特性与黏结状态的试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(2): 406-412.
- [19] 赵碧全, 冉武平, 王亚强. 基面层间接接触状态对沥青路面车辙影响的室内试验分析[J]. *公路工程*, 2023, 48(4): 64-69.
- [20] JANGATE W, SUJIVORAKUL C. The effect of surface roughness and a steel anchor on the direct-shear bond between existing concrete and new concrete[J]. *Structures*, 2024, 70: 107799.
- [21] 何锐, 陈拴发, 胡苗, 等. 水泥混凝土路面沥青混凝土功能层剪切变形性能[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(3): 415-420.
- [22] 中华人民共和国交通部, 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [23] 王旭东, 张蕾, 曾峰, 等. 《公路路面基层施工技术细则》实施手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [24] 樊丽然. 动荷载下设缓冲层的水泥混凝土路面结构响应研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2023.

The impact of temperature on the bonding coefficient between buffer layer and cement concrete pavement layers

WANG Bing¹, SUN Fengzhe¹, DONG Zhaoming¹, HU Hongxi^{2*},
FAN Liran², HU Peng²

1. Shandong Dongtai Engineering Consultants Co., Ltd., Zibo 256414, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To study the bonding state between different layers of cement concrete pavements with a buffer layer, AC-13 asphalt mixture is used as the buffer layer, and concrete with a strength grade of C30 is used as the surface layer. Cement-stabilized crushed stone is used for the base layer to fabricate specimens. Shear tests are conducted using a modified geotechnical direct shear apparatus with vertical loads of 0.327, 0.627, 0.927, 1.227 kN at temperatures of 15, 30, 60 °C. The test results indicated that, at the same temperature, the shear strength at the interface between the cement-stabilized crushed stone and the buffer layer, as well as the shear strength at the interface between the cement concrete and the buffer layer, both increase with the increase in vertical load. At the same vertical load, the shear strengths at the two interfaces decrease with the rise in temperature, and the friction coefficient, cohesion, and interlayer bonding coefficient also decrease with the increase in temperature. The variation patterns of each parameter are consistent, and the interlayer bonding state can be comprehensively characterized by the interlayer bonding coefficient.

Keywords: cement concrete pavement; buffer layer; shear device; shear strength; interlayer bonding coefficient

(责任编辑:王惠)