

水泥混凝土桥面加铺罩面层间剪切疲劳性能研究

姜 军

(廊坊京台高速公路有限公司, 河北 廊坊 650000)

摘 要: 为探究水泥混凝土桥面加铺超薄罩面层间抗剪切疲劳性能的影响因素, 采用改性乳化沥青、SBS 改性沥青、基质沥青作为黏结层制备了组合结构试件。通过层间剪切疲劳试验分析了不同黏结材料、不同基面处理方式和环境温度对层间剪切疲劳性能的影响。结果表明: 不同黏结材料的层间抗疲劳性能有明显差异, 相同基面上 SBS 改性沥青的抗疲劳性能优于改性乳化沥青和基质沥青。相同应力比下 SBS 改性沥青间剪切疲劳寿命约为改性乳化沥青的 1.4 倍, 约为基质沥青的 2 倍。水泥混凝土喷砂、拉毛以及露石处理后组合结构试件的疲劳寿命分别提高了 17.0%~25.2%、24.5%~28.6%、34.5%~44.8%, 其中露石对抗疲劳性能的提升效果最明显。温度对层间疲劳性能影响显著, 环境温度越高, 黏结层抗剪切疲劳性能越弱。

关键词: 水泥混凝土桥面; 超薄罩面; 层间黏结; 剪切疲劳

中图分类号: U416.216

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0271-04

Research on Interlayer Shear Fatigue Performance of Overlay on Cement Concrete Bridge Deck

JIANG Jun

(Langfang Jingtai Expressway Co., Ltd., Langfang 650000, China)

Abstract: In order to explore the influencing factors of the interlayer shear fatigue resistance of the ultra-thin overlay on the cement concrete bridge deck, the combined structural specimens are prepared by using the modified emulsified asphalt, SBS modified asphalt and matrix asphalt as the binder layer. The effects of different binder materials, different base surface treatments and surrounding temperatures on the interlayer shear fatigue performance are analyzed through the interlayer shear fatigue test. The results show that the interlayer fatigue resistance of different binder materials is significantly different. On the same base surface, the fatigue resistance of SBS modified asphalt is superior to that of modified emulsified asphalt and base asphalt. The interlayer shear fatigue life of SBS modified asphalt under the same stress ratio is about 1.4 times that of modified emulsified asphalt and about 2 times that of matrix asphalt. The fatigue life of the combined structural specimens after the cement concrete sandblasting, brushing and exposed stone treatment increases by 17.0%~25.2%, 24.5%~28.6%, and 34.5%~44.8%, respectively, in which the exposed stone has the most obvious effect on the fatigue resistance. The temperature has a significant effect on the interlayer fatigue performance. The higher the ambient temperature, the weaker the shear fatigue resistance of the bonding layer.

Keywords: cement concrete bridge deck; ultra-thin overlay; interlayer bonding; shear fatigue

0 引 言

我国公路行业迅速发展,截至 2023 年底,全国高速公路里程已达 18.36 万 km^[1]。水泥混凝土桥面铺装强度大、稳定性良好、耐久性出色,这使得它成为早期桥面铺装的主要结构形式之一^[2]。但随着使用年限的增加,早期水泥混凝土桥面出现了裂缝、露骨等病害,严重危及行车安全,降低了道路通行能力和

服务水平。薄层罩面具有恢复路表功能,提升安全特性等优点,因此“白改黑”加铺罩面广泛用于水泥混凝土桥面病害处治^[3]。

在加铺超薄罩面时需在原混凝土桥面喷洒黏结剂来确保混合料层间黏结紧密^[4]。黏结层材料性能是影响超薄罩面路用性能的关键因素,其性能优劣直接影响路面的服役寿命。如果黏结层性能较差或者水泥混凝土表面处治不到位,荷载作用下产生的剪应力易导致路面出现推移、拥包等剪切破坏^[5]。郑万鹏等^[6]研究发现沥青混合料层间抗剪切疲劳性能受加载频率、温度、黏层油种类影响,其中加载频

收稿日期: 2025-02-07

作者简介: 姜军(1981—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道路与桥梁养护施工技术研究工作。

率对疲劳性能影响最大。同时,层间抗剪强度受沥青混合料级配类型影响,沥青混合料表面粗糙程度和构造深度越大,其层间抗剪强度越大^[7]。随着温度升高,铺装层间黏结性能下降^[5,8]。宋亮等^[9]研究发现掺玄武岩纤维沥青碎石封层的拉拔强度、抗剪强度分别提高了 11.7%~16.3% 和 9.7%~22.4%,并推荐玄武岩纤维掺量为 80 g/m²。马强^[10]研究了不同黏结剂、水泥路面拉毛对层间抗剪强度的影响,推荐了各黏结剂的最佳掺量。而且对桥面铺装水泥混凝土板进行抛丸、精铣刨、拉毛处理后可以提高层间拉拔强度和剪切强度^[11]。

综上,水泥混凝土桥面铺装层间黏结性能受基面类型、黏结材料性能等多因素影响。本文对水泥混凝土板面进行拉毛、喷砂、露石处理,使用 SBS 改性沥青、改性乳化沥青和基质沥青室内成型“沥青面层-黏结层-水泥基面”组合结构试件。测试试件的层间剪切疲劳寿命,分析黏结层材料、基面处治方式和温度对层间剪切疲劳性能的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本文选用了壳牌 70# 基质沥青、改性乳化沥青以及 SBS 改性沥青作为黏层材料。不同材料具体的指标见表 1~表 3。

表 1 基质沥青技术指标		
检验项目	技术指标	测试结果
针入度/0.1 mm	60~80	72
软化点/℃	≥45	53
10℃延度/cm	≥25	29
针入度指数 PI	-1.5~1	0.578

表 2 改性乳化沥青技术指标		
蒸发残留物指标	技术要求	测试结果
含量/%	≥50	57
针入度/0.1 mm	40~120	60
软化点/℃	≥50	72
5℃延度/cm	≥20	44

表 3 SBS 改性沥青技术指标		
检验项目	技术指标	测试结果
布氏黏度 135℃/Pa.s	≤3	2.37
针入度/0.1 mm	50~70	56.6
软化点/℃	≥70	82.3
5℃延度/cm	≥20	34.1
25℃弹性恢复/%	>85	91

1.2 试件成型

首先成型 300 mm×300 mm×50 mm 水泥混凝土

板,然后分别采用喷砂、拉毛以及露石工艺制备具有不同粗糙程度的水泥混凝土板^[12]。水泥混凝土板面处治后涂刷层间黏结剂,之后在水泥混凝土板上成型 20 mm 厚的沥青混凝土试件。超薄罩面沥青混合料采用 SBS 改性沥青,油石比为 5.5%,级配见图 1。基质沥青、改性乳化沥青和 SBS 沥青的用量分别为 0.6、0.5、1.1 kg/m²^[12]。然后将水泥混凝土-黏结层-沥青混凝土板切割成 90 mm×90 mm×70 mm 的组合结构试件,进行剪切疲劳试验。

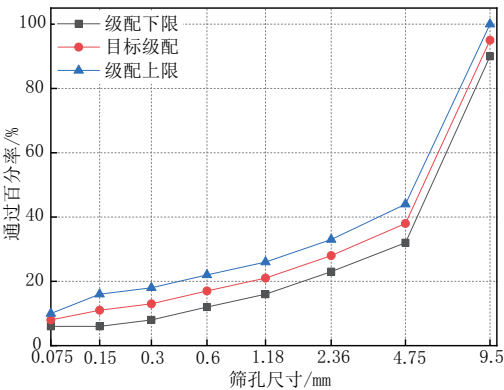


图 1 超薄罩面沥青混合料级配

1.3 试验方法

在进行剪切疲劳试验之前,根据规范(JTG/T3364-02—2019)进行剪切强度试验^[13],荷载施加速率为(50±5) mm/min,见图 2。

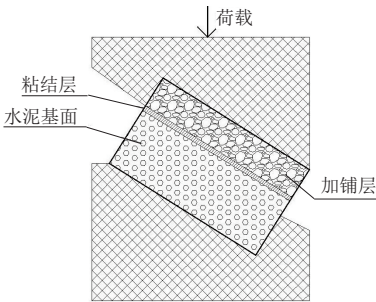


图 2 剪切强度和剪切疲劳试验示意图

根据剪切强度试验得到极限破坏荷载 S 计算各应力比下的最大荷载和最小荷载。本文选取 3 个应力比 σ/S , 分别为 0.3、0.5、0.7, 应力循环特征值为 0.1。通过 UTM-100 试验机进行试验,施加荷载为连续的半正弦波,频率为 10 Hz。试件破坏时荷载累计作用次数即疲劳寿命。试验设置 3 组平行试验。探究温度对层间剪切疲劳性能影响时,试件在控温箱中保温 1h 后再进行疲劳试验。

2 结果与讨论

2.1 黏结材料对疲劳性能的影响

采用三种层间黏结材料和未处理的水泥混凝土

板制作组合结构剪切试件,测试组合结构的层间剪切强度与剪切疲劳寿命。表4列出了剪切强度试验结果和剪切疲劳试验荷载条件。

表4 不同黏结层组合结构试件的剪切强度

黏层材料	剪切强度 S/MPa	应力比 (σ/S)	应力水平 σ/MPa
基质沥青	0.44	0.3、	0.132、0.220、0.308
改性乳化沥青	0.65	0.5、	0.195、0.325、0.455
SBS 改性沥青	1.02	0.7	0.306、0.510、0.714

剪切疲劳试验结果见图3。将加应力比作为横坐标,疲劳寿命作为纵坐标,绘制出三种不同黏结层试件的剪切疲劳寿命,并按照式(1)拟合疲劳曲线^[14]。

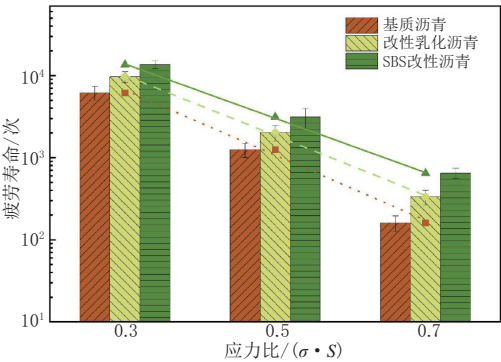


图3 剪切疲劳寿命

$$\lg N = a + b(\sigma/S) \tag{1}$$

式中: N 为疲劳剪切寿命,次; σ 为应力水平,MPa; S 为组合结构试件的剪切强度,MPa; a 、 b 为拟合系数。

如图3所示,组合结构的剪切疲劳寿命受层间黏结材料影响明显。相同应力比条件下,SBS 改性沥青的疲劳寿命最大,其次是改性乳化沥青,基质沥青的抗剪切疲劳性能最差。在0.3 应力比条件下,SBS 改性沥青的平均剪切疲劳寿命约改性乳化沥青的1.41 倍,约为基质沥青的1.98 倍,表明SBS 改性沥青相较于其余两种沥青具有更好的抗疲劳剪切性能。

组合结构试件的剪切疲劳寿命随应力比的变化,其在对数坐标轴下呈现出线性变化规律,线性拟合效果较好。每种组合结构试件疲劳寿命均随着应力比的增大而减小,且疲劳寿命对应力比的变化敏感。应力比从0.3 变化到0.5,疲劳寿命减少70%~80%,在0.7 的应力比下,疲劳寿命减少高达95%以上。疲劳寿命拟合结果见表5。拟合方程斜率 b 可以反映试件疲劳寿命随应力比增大而减小的速度,斜率 b 值越大说明应力变化对疲劳寿命的影响更为显著。从表5 中可以看出SBS 改性沥青的拟合方程 b 值最小,基质沥青的拟合 b 值最大。表明SBS 改性沥

青应力敏感性较小,具有较好的抗疲劳性能。

表5 疲劳寿命拟合结果

黏结材料	拟合方程	R^2
基质沥青	$\lg N = -3.30(\sigma/S) + 5.13$	0.999
改性乳化沥青	$\lg N = -3.65(\sigma/S) + 5.10$	0.998
SBS 改性沥青	$\lg N = -4.08(\sigma/S) + 5.08$	0.997

2.2 基面处理对疲劳性能的影响

在 $\sigma/S = 0.3$ 时不同处治基面下组合结构试件的疲劳寿命见图4。由图4 可知,对水泥基面进行喷砂、拉毛和露石处理都能有效提高界面的剪切疲劳寿命。相比于未处理基面,拉毛、喷砂和露石处理后组合结构试件的疲劳寿命分别提高了17.0%~25.2%、24.5%~28.6%、34.5%~44.8%。其中基面经露石处理后疲劳寿命提升幅度最大,优于喷砂和拉毛。

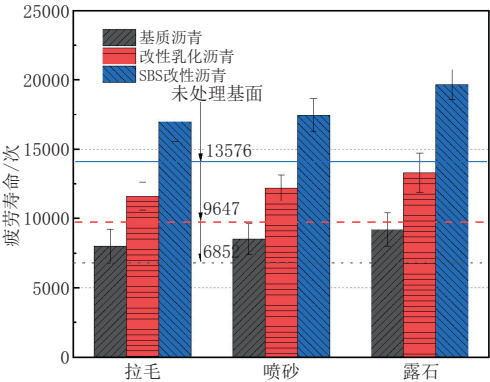


图4 不同基面处理试件的疲劳寿命

水泥混凝土板面经过拉毛、喷砂和露石处理后,涂布SBS 改性沥青的组合结构试件疲劳寿命分别提高了25.2%、28.6%、44.8%。露石处理后采用基质沥青作为层间黏结材料,疲劳寿命提升幅度为34.5%,较SBS 改性沥青小。由于SBS 改性沥青比基质沥青具有更好的粘结能力,而且露石处理能提高基面的构造深度与粗糙度,增强沥青混合料与水泥混凝土的层间摩阻力,从而能够大幅增加试件剪切疲劳寿命。因此,在实际工程中建议铣刨处理水泥混凝土桥面,增加原表面的粗糙程度,提高薄层罩面的抗层间剪切能力。

2.3 温度对疲劳性能的影响

制备未处理水泥混凝土板面的组合结构试件,分别在10、25、40、55℃ 测试其剪切疲劳寿命。在 $\sigma/S = 0.3$ 条件下,不同黏结层剪切疲劳寿命随温度的变化趋势见图5。

由图5 可知,在10~60℃ 的温度范围内,三种黏结层材料的剪切疲劳寿命都随着温度的升高而降低,其中SBS 改性沥青黏层在各温度下的剪切疲劳

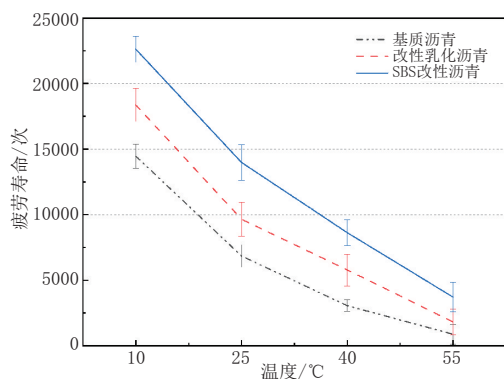


图5 不同温度下试件疲劳寿命

寿命最高,基质沥青黏层的疲劳寿命最低。在10℃~25℃的范围内,基质沥青的剪切疲劳寿命损失率为52.6%,改性乳化沥青为47.5%,SBS改性沥青为38.2%。温度提升至55℃时,相比于10℃基质沥青的疲劳寿命损失率达到了93.8%,改性乳化沥青为90.3%,SBS改性沥青为83.6%。由此可见,温度对于不同黏结层材料的剪切疲劳寿命影响较大。其中SBS改性沥青黏层较为稳定,温度升高后疲劳寿命损失较小。这可能是由于SBS改性剂形成的三维网状结构,有效抑制了沥青的热流动性和塑性变形,从而延缓疲劳破坏。

3 结 语

本文分析了黏结材料、基面处治方式以及温度对水泥混凝土桥面加铺超薄罩面层间剪切疲劳性能的影响,得到了以下结论:

(1)黏层材料的剪切疲劳寿命随应力比增大而减小,不同黏层材料的抗剪切疲劳性能为:SBS改性沥青>改性乳化沥青>基质沥青。

(2)对水泥混凝土进行喷砂、拉毛和露石处理均

能提高超薄罩面层间剪切疲劳寿命。其中,通过露石处理可提高水泥混凝土表面的构造深度,对剪切疲劳寿命提高幅度最大。

(3)温度对层间剪切疲劳性能有明显影响。随着温度升高,层间抗剪切疲劳性能下降,SBS改性沥青层间疲劳性能的温度敏感性较小。

参考文献:

- [1] 葛冬冬,姜向阳,吕松涛,等.湿法橡胶改性沥青研究进展[J].中外公路,2024,44(6):1-28.
- [2] 徐鹏,祝轩,姚丁,等.沥青路面养护智能检测与决策综述[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2099-2117.
- [3] 徐洋洋.开级配环氧沥青超薄罩面设计及其性能研究[D].西安:长安大学,2023.
- [4] 杜宇兵,柴明明,李雪毅,等.薄层罩面沥青胶结料性能试验研究[J].公路,2017,62(6):291-296.
- [5] 颜可珍,黄顺欣,葛冬冬,等.水泥混凝土桥面铺装层间黏结性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(7):23-32.
- [6] 郑万鹏,念腾飞,王国伟,等.基于灰熵理论的沥青混合料层间抗剪切疲劳影响因素探讨[J].兰州理工大学学报,2023,49(6):138-144.
- [7] 吴宇浩,肖鹏,吴帮伟,等.超薄磨耗层加铺路面层间抗剪性能试验[J].中国科技论文,2022,17(7):739-745;758.
- [8] 康广朝,董春晓,李若晨,等.不同温度下水泥混凝土桥面铺装结构抗剪性能研究[J].新型建筑材料,2024,51(3):111-115.
- [9] 宋亮,安传峰,黄美.玄武岩纤维沥青碎石封层黏结性能及评价[J].建筑材料学报,2019,22(3):440-445.
- [10] 马强.“白改黑”路面层间抗剪性能影响因素试验研究[J].中外公路,2016,36(4):86-90.
- [11] 党静.混凝土桥面铺装层间黏结性能影响因素[D].重庆:重庆交通大学,2022.
- [12] 李城,杨德胜.水泥路面加铺超薄罩面层间黏结性能[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(2):347-351.
- [13] JTG/T3364-02—2019,公路钢桥面铺装设计与施工技术规范[S].
- [14] 裴旭东.沥青面层与基层层间黏结强度和耐久性变化规律研究[D].西安:长安大学,2013.
- [21] Wang C, Liu J, Chen S, et al. Polyvinyl alcohol fiber cement-stabilized macadam: A review and performance evaluation[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2024, 11(3): 406-423.
- [22] 杨文广.拉萨地区水泥稳定砾石基层路用性能研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
- [23] 陈峰,仪珂,王朝辉,等.纤维改性水泥基材料研究进展:水泥稳定基层[J].硅酸盐通报,2024,43(9):3479-3493.

(上接第270页)

- 料的抗冲刷性能[J].建筑材料学报,2010,13(2):263-267;276.
- [18] 付春梅,齐善忠.聚酯纤维和聚丙烯纤维水泥稳定碎石力学性能研究[J].公路,2015,60(1):37-42.
- [19] 张鹏,李清富,黄承逵.聚丙烯纤维水泥稳定碎石抗弯拉强度试验研究[J].新型建筑材料,2007(7):52-54.
- [20] 王艳,倪富健,李再新.水泥稳定碎石基层收缩性能影响因素试验研究[J].公路交通科技,2007(10):30-34;52.