

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.006

外因素作用下沥青路面坑槽修补界面缝 疲劳特性试验研究

艾长发^{1,2}, 邵珠涛^{1,3*}, 黄杨权^{1,2}, 任东亚^{1,2}

(1.西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031;2.道路工程四川省重点实验室,四川 成都 610031;

3.中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司,云南 昆明 650051)

摘要:沥青路面坑槽修补块在投入使用后,其四周的界面缝在自然环境和行车荷载效应等外因素作用下易出现疲劳耐久性问题。为分析外因素作用下修补界面缝的疲劳特性,采用四点弯曲疲劳试验和拉拔试验,结合正交分析结果,确定最佳修补界面黏结方案;以温度、频率和应变水平等外因素作为影响变量,分析各因素对界面缝疲劳寿命的影响规律;基于Origin软件平台,构建外因素作用下的沥青路面修补界面缝疲劳寿命预估模型。结果表明:在最佳修补界面形式下,界面缝疲劳寿命随荷载作用应变水平的增加而降低,但不同荷载频率、不同温度时的界面缝疲劳寿命降低趋势不同;温度越高,界面缝疲劳寿命越低,且随温度升高,界面缝疲劳寿命降低趋势更快;在相同修补措施下,行驶车辆高速高频,则界面缝疲劳寿命越小;该文所建立的外因素综合作用下界面缝疲劳寿命预估模型精度较高,可用于类似路面修补工程的界面缝寿命预估。

关键词: 沥青路面;坑槽修补;界面缝;疲劳特性;预估模型

中图分类号: U416.417

文献标志码: A

0 引言

坑槽作为沥青路面病害之一,在潮湿多雨地区、混合料黏结不良时更容易出现,对于已经出现的坑槽,如得不到及时修补,在自然环境和车辆荷载反复作用下将进一步扩展,易导致路段局部大面积破坏,从而严重影响行车安全性和使用寿命^[1-2],因此,坑槽必须得到及时有效修补。目前国际上常用的沥青路面坑槽修补技术有:挖补式坑槽修补、热烘式坑槽修补、填料坑槽修补以及喷射式坑槽修补等技术^[3-5]。其中,挖补式坑槽修补又可分为冷凿热补修补和冷凿冷补修补^[6],采用冷凿热补法修补坑槽,影响修复效果的因素较多,其中,坑槽新旧交界壁面处理不当是导致坑槽二次破坏的一大原因^[7]。康敬东^[8]则针对开垂直坑槽、开斜坡坑槽和不开槽3种坑槽壁面处理方式,分析了其施工难易程度及修补效果。除修

补工艺技术外,修补材料性质、修补尺寸等也将影响坑槽修复效果,时宁^[9]通过现场试验研究发现将乳化沥青均匀涂抹在坑槽壁面上可提高修补效果。而更多研究人员采用数值模拟手段从界面受力角度对该问题进行了分析,张倩等^[10]采用数值模拟分析了界面接触摩擦系数和修补尺寸对黏结界面受力分布的影响;田耀刚等^[11]采用Ansys软件分析了修补材料抗压模量对坑槽修补效果的力学影响;高菲等^[12]、李炜光等^[13]、延丽丽^[14]采用有限元方法研究了挖补面积、修补厚度、修补材料模量以及基面层层间接触状态等对修补路面结构受力的影响,分析了修补参数对坑槽修补效果的影响水平。以上研究主要针对坑槽修补工艺和材料,虽也涉及坑槽壁面受力问题,但未就界面黏结缝疲劳特性展开研究。由于坑槽修补界面缝是修补路面的最薄弱部位,修补失效损坏往往源于补块四周界面缝,工程实践中,在确定了坑槽修补材料与工艺并实施修补和投入使用后,导致修补

收稿日期:2022-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51378438);成都市交通科技项目(编号:JHFDD-JSFW-001)

作者简介:艾长发,男,博士,教授.E-mail:cfai@home.swjtu.edu.cn

*通信作者:邵珠涛,男,硕士研究生.E-mail:523041828@qq.com

失效的因素则主要为环境温度和行车荷载等外因素。为此,本文以坑槽修补界面作为研究对象,通过正交试验,确定最佳坑槽修补界面黏结方案,在此基础上,聚焦环境温度和行车荷载效应等外因素对修补界面的疲劳特性作用影响,以试验温度、荷载频率和荷载作用应变水平为影响变量,分析界面缝的疲劳寿命变化规律,为沥青路面坑槽修补界面处置及寿命预估提供技术参考。

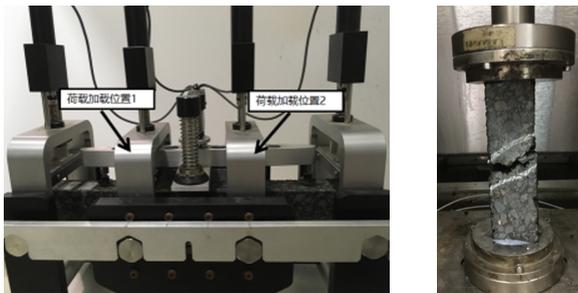
1 试验材料与设备

1.1 试验材料

试验采用骨架悬浮密实型沥青混合料 SMA-13 制备含界面黏结缝复合小梁,用于模拟沥青层坑槽修补界面, SMA-13 混合料级配均为规范^[15]中的中值级配。沥青胶结料为高黏弹改性沥青,油石比为 6.18%,粗集料为玄武岩碎石,细集料为机制砂,矿粉采用石灰石碱性矿粉,纤维采用木质素纤维,掺量为 0.3%。

1.2 试验设备

试验主要评价指标为疲劳寿命和黏结强度,采用 UTM-100 自带的四点弯曲疲劳装置[图 1(a)]和拉拔装置[图 1(b)]进行小梁试验。



(a) 四点弯曲疲劳试验加载装置 (b) 拉拔试验加载装置

图 1 试验加载装置

1.3 试验模具

试验采用自制车辙板模具(图 2),通过选择不同分隔板位置以及更换活动钢板(图 3),成型复合小梁不同黏结面形式,并保证黏结面位于成型后车辙板中间位置。

2 最佳界面黏结方案确定

影响复合小梁界面缝处置效果的因素主要包括

黏结剂种类、黏结剂用量和黏结面形式等,各因素下选择不同试验水平如表 1 所示。

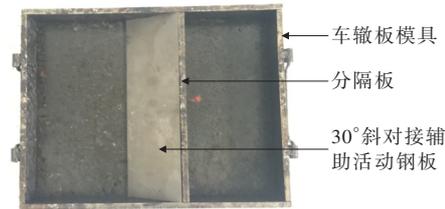


图 2 车辙板模具

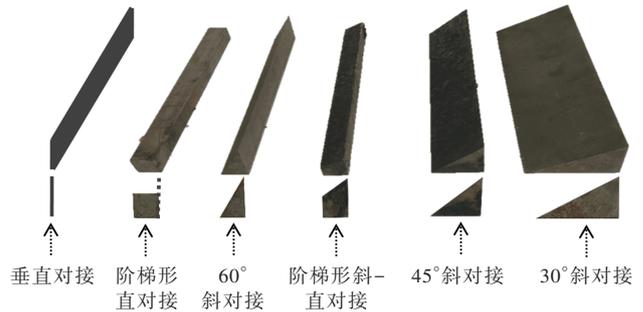


图 3 不同黏结面形式的辅助活动钢板

表 1 试验因素水平

试验水平	黏结材料类型(A)	黏结材料用量(B)/(kg·m ⁻²)	黏结面形式(C)
1	普通乳化沥青	0.3	垂直对接
2	高黏弹乳化沥青	0.6	阶梯形直对接
3	树脂乳化沥青	0.9	阶梯形斜一直对接
4	—	—	30°斜对接
5	—	—	45°斜对接
6	—	—	60°斜对接

在各试验因素的交互作用影响下,复合小梁界面缝具有不同疲劳性能与黏结性能,按照正交方法,进行试验方案设计,并通过四点弯曲小梁疲劳试验和垂直拉拔试验得到不同试验方案下界面缝疲劳寿命和黏结强度(表 2),通过正交分析,确定了界面缝最佳黏结方案为:采用高黏弹改性乳化沥青作为黏结剂,黏结剂用量 0.6 kg/m², 30°倾斜面作为黏结面形式。

3 外因素作用下界面缝疲劳特性分析

以最佳黏结方案界面缝作为研究对象,进行不同试验温度、荷载作用频率和应变水平等外因素作用下的四点弯曲复合小梁疲劳试验。荷载作用频率选取 2 Hz、10 Hz 和 15 Hz,分别模拟 20 km/h 低速低频、60~65 km/h 中速中频和 80 km/h 高速高频^[16];试

验温度考虑 5℃、10℃、15℃和 25℃；以 750 με、1 000 με、1 250 με 和 1 500 με 作为荷载作用应变水平，分别模拟小、较小、较大、大 4 种车载对路面的作用效应。各试验因素水平如表 3 所示。

表 2 小梁疲劳寿命和黏结强度试验结果

试验编号	疲劳寿命 N_f /次	黏结强度/MPa	试验编号	疲劳寿命 N_f /次	黏结强度/MPa
A ₁ B ₁ C ₁	775	0.217	A ₁ B ₁ C ₄	58 698	1.020
A ₁ B ₂ C ₂	3 522	0.440	A ₁ B ₂ C ₅	62 577	1.008
A ₁ B ₃ C ₃	7 112	0.749	A ₁ B ₃ C ₆	55 365	0.892
A ₂ B ₁ C ₂	23 062	1.233	A ₂ B ₁ C ₅	79 849	1.330
A ₂ B ₂ C ₃	38 369	1.037	A ₂ B ₂ C ₆	69 598	1.356
A ₂ B ₃ C ₁	11 213	0.685	A ₂ B ₃ C ₄	34 671	1.463
A ₃ B ₁ C ₃	13 854	0.902	A ₃ B ₁ C ₆	21 495	0.714
A ₃ B ₂ C ₁	18 696	1.322	A ₃ B ₂ C ₄	35 694	0.775
A ₃ B ₃ C ₂	21 658	0.918	A ₃ B ₃ C ₅	27 584	1.076

表 3 试验因素水平

试验水平	频率 Z/Hz	温度 T/℃	应变水平 H/με
1	2	5	750
2	10	10	1 000
3	15	15	1 250
4	—	25	1 500

3.1 界面缝疲劳寿命随荷载作用应变水平变化规律

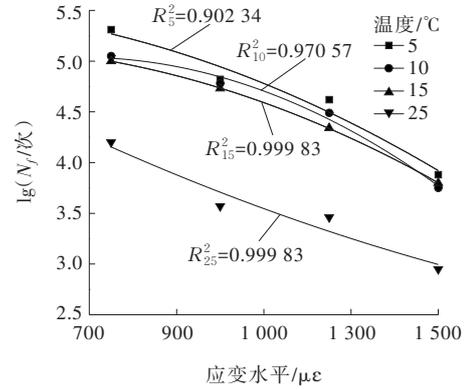
为分析荷载作用应变水平对界面缝疲劳寿命的影响规律，展开界面缝疲劳试验，根据试验结果，当荷载作用频率为 2 Hz、10 Hz 和 15 Hz 时，其应变水平与界面缝疲劳寿命对数在不同温度下的回归曲线如图 4 所示。

由图 4 可知：不同荷载作用频率时，界面缝疲劳寿命对数均随着荷载作用应变水平的增加而降低，但在不同频率和不同温度时，应变水平与界面缝疲劳寿命对数回归拟合曲线凹凸性不一，表明其降低趋势不同，可推测沥青路面坑槽修补界面缝疲劳寿命降低趋势由车速、荷载作用频率和温度共同决定。

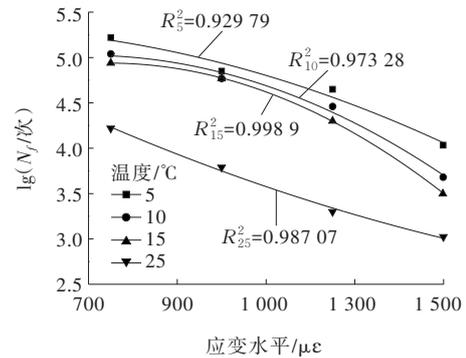
3.2 界面缝疲劳寿命随试验温度变化规律

为分析温度对界面缝疲劳寿命的影响规律，不同荷载作用频率情况下，温度与界面缝疲劳寿命对数在不同应变水平下的变化曲线如图 5 所示。

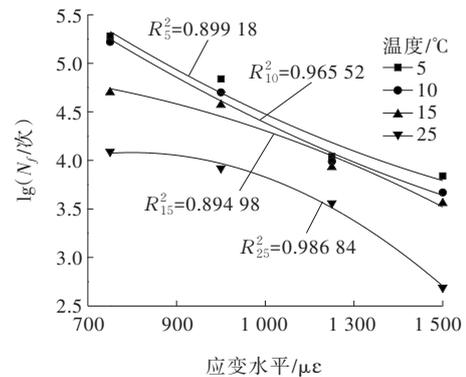
由图 5 可明显看出：在不同荷载作用频率下，温度越高，界面缝疲劳寿命越低，当温度达到一定程度



(a) 2 Hz



(b) 10 Hz



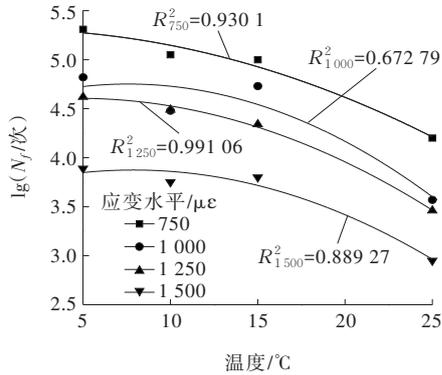
(c) 15 Hz

图 4 应变水平对界面缝疲劳寿命影响规律

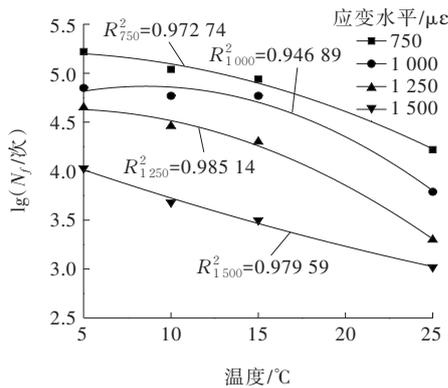
时，界面缝黏结剂将失去黏结效果，导致界面缝的破坏。就界面缝疲劳寿命对温度变化的敏感性而言，不同试验条件下，仍有差异，但整体表现为随着温度的升高，界面缝疲劳寿命呈加速减小状态。据此可推测，若修补路面位于高温地区，在施工过程中应采用高温性能好的黏结剂，否则容易导致修补路面的二次破坏。

3.3 界面缝疲劳寿命随荷载作用频率变化规律

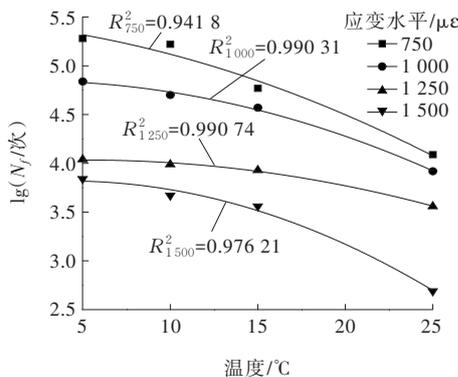
以加载频率模拟行车速度作用，研究其对界面缝疲劳寿命的影响，进行了不同荷载作用频率下的复合小梁四点弯曲疲劳试验。根据试验结果(图 6)，



(a) 2 Hz



(b) 10 Hz



(c) 15 Hz

图5 温度对界面缝疲劳寿命影响规律

对比分析加载频率2 Hz、10 Hz和15 Hz时的界面缝疲劳寿命。

从图6可以看出:荷载作用频率为2 Hz时,界面缝疲劳寿命最大;频率为10 Hz时,界面缝疲劳寿命次之;频率为15 Hz时,界面缝疲劳寿命最小。据此可推测,相同处置方案下的界面缝若位于车辆低速低频行驶路段,则具有较长使用寿命,相反,如果界面缝处于车辆高速高频行驶路段,则更容易破坏,使用寿命更短。

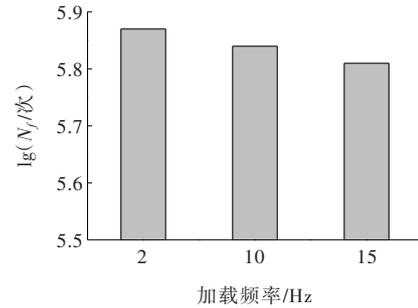


图6 试验频率对界面缝疲劳寿命影响

4 外因素作用下界面缝疲劳寿命预估

为预估各外因素共同作用下修补界面缝的疲劳寿命,采用Origin软件,建立 Y_i 对各变量 X_i ($i=1, 2, \dots, p$)的最佳多元回归模型 $Y_i=f_i(X_i)$,本研究中,关于界面疲劳寿命对数 $\lg N_f$ 与温度 T 、频率 Z 、应变水平 H 等各因素的多元回归模型构建过程如下:

(1) 针对上述各试验因素下的试验结果,构建回归模型 $\lg N_f=a+bT+cT^2+dZ+eZ^2+f\ln H$ 。

(2) 构建自定义函数,如图7(a)所示。

(3) 将上述试验数据输入软件,选择自定义函数,进行多次拟合,得到回归模型系数,如图7(b)所示。

(4) 将回归系数 a, b, c, d, e, f 代入 $\lg N_f=a+bT+cT^2+dZ+eZ^2+f\ln H$ 中,整理后,得到复合小梁黏结面疲劳寿命对数 $\lg N_f$ 与温度 T 、频率 Z 、应变水平 H 等因素的多元回归模型:

$$\lg N_f = 17.68 + 0.0183T - 0.0017T^2 + 0.0173Z - 0.0023Z^2 - 1.87 \ln H \quad (1)$$

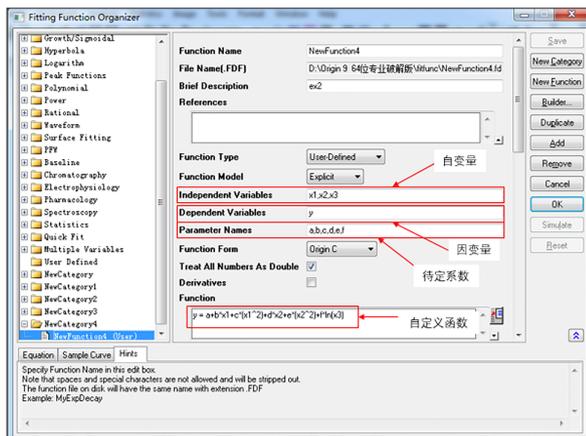
Origin软件自动算出式(1)的复相关系数 $R^2=0.931$,表明所建模型精度较高。

为进一步验证式(1)的精度,随机取部分试验数据代入此模型,并计算误差,结果如表4所示。

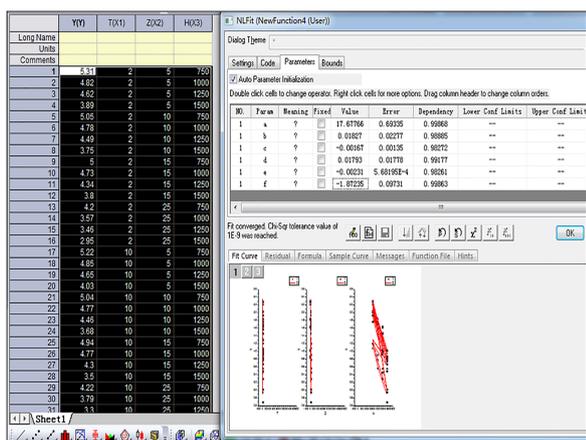
表4显示疲劳寿命对数实测值与预估值误差较小,可进一步佐证式(1)在界面缝疲劳寿命预估时具有较高可靠性。

5 结论

(1) 沥青路面坑槽修补界面合理形式为:采用高黏弹改性乳化沥青以 0.6 kg/m^2 的用量均匀涂抹在倾角为 30° 的切割面。在该修补界面形式下,界面缝



(a) 构建自定义函数



(b) 拟合过程

图7 多元拟合回归过程

表4 界面缝疲劳寿命对数实测值和预估值比较

工况	疲劳寿命对数 $\lg(N_f/\text{次})$		实测值与 预估值误 差/%
	试验结果	模型计算	
2 Hz, 5 °C, 750 $\mu\epsilon$	5.31	5.37	1.13
2 Hz, 10 °C, 1 000 $\mu\epsilon$	4.78	4.80	0.42
2 Hz, 15 °C, 1 250 $\mu\epsilon$	4.34	4.26	-1.84
10 Hz, 10 °C, 1 000 $\mu\epsilon$	4.77	4.72	-1.05
10 Hz, 15 °C, 1 250 $\mu\epsilon$	4.30	4.12	-4.19
10 Hz, 25 °C, 1 500 $\mu\epsilon$	3.02	3.34	10.60
15 Hz, 15 °C, 1 250 $\mu\epsilon$	3.93	3.97	1.02
15 Hz, 25 °C, 750 $\mu\epsilon$	4.09	4.43	8.31
15 Hz, 5 °C, 1 000 $\mu\epsilon$	4.84	4.99	3.10

疲劳寿命随荷载作用应变水平的增加而降低,但不同作用频率和不同环境温度时,界面缝疲劳寿命的降低趋势不同;温度越高,界面缝疲劳寿命越低,且随着温度的升高,界面缝疲劳寿命呈加速减小状态;

作用频率越大,界面缝疲劳寿命越小,因此,在同种修补方式下,路段行车速度不同、作用频率不同,修补界面缝的疲劳寿命不同,行车速度越快、作用频率越高,修补路面使用寿命越短。

(2) 采用 Origin 软件构建了外因素作用下的沥青路面坑槽修补界面缝疲劳寿命多元回归预估模型,通过验证,所建模型精度较高,具有较高的可靠性。

参考文献:

- [1] 梁全富,艾贺申,李雪杰.冬季沥青路面坑槽修补养护探讨[J].河南交通科技,1996(3):15-20,23.
- [2] 吴莉萍.沥青路面坑槽修补研究[J].城市道桥与防洪,2010(8):198-201,273.
- [3] FORSSBLAD L, STURESSON E. Investigation of different methods for pothole repair[R], 1982.
- [4] SLOVENSKY R. Pothole patchers demonstrated in California[J]. Public Roads, 1999, 63: 20-22.
- [5] SMITH K L, ROMINE A R, WILSON T P. Asphalt pavements repairManuals of practice[Z]. SHRP-H_348, National Research Council,1993.
- [6] 广东省交通运输厅.广东省高等级公路沥青路面典型破坏形式修复技术指南(试用)[Z], 2012.
- [7] 童立.沥青路面坑槽快速修补材料研究[D].西安:长安大学,2014.
- [8] 康敬东.沥青路面裂缝和坑槽养护维修技术的研究[D].西安:长安大学,2002.
- [9] 时宁.开槽法修补破损沥青路面技术分析[J].重庆交通学院学报,2006(S1):62-63,143.
- [10] 张倩,李泽,范哲哲,等.沥青路面坑槽补缝界面应力集中模拟及影响因素分析[J].中外公路,2016,36(4):81-86.
- [11] 田耀刚,延丽丽,陈长征,等.材料模量对沥青路面坑槽修补结构力学性能影响分析[J].武汉理工大学学报,2013,35(11):58-62.
- [12] 高菲,魏连雨,马士宾,等.基于有限元的沥青路面坑槽修补结构力学特征研究[J].河北工业大学学报,2012,41(2):92-95,100.
- [13] 李炜光,经冠举,田智仁,等.基于不同工艺沥青路面坑槽修补结构受力分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(1):19-22.
- [14] 延丽丽.基于 ANSYS 的沥青路面坑槽修补结构仿真分析[D].西安:长安大学,2012.
- [15] 交通运输部公路科学研究院.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.
- [16] 杜健欢.单、双层式沥青混合料小梁疲劳试验研究[D].成都:西南交通大学,2017.