

# 刚柔复合式路面轮后拉剪区域疲劳破坏规律研究

程小亮<sup>1,2</sup>, 邓福昊<sup>3</sup>, 王阳<sup>1,2</sup>, 韩雷雷<sup>1,2</sup>, 周吴军<sup>3</sup>

(1.中冶南方城市建设工程技术有限公司,湖北 武汉 430000;2.中冶南方工程技术有限公司,湖北 武汉 430223;

3.华中科技大学土木与水利工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**为研究沥青混凝土与连续配筋混凝土复合式路面(CRCP)推移病害产生机理,利用弹性层状体系对复合式路面结构进行建模,并使用路段实测数据对模型层间黏结状态进行校准。在层间力学行为分析中发现水平力系数为1时,轮后存在拉剪区域,拉剪区域的出现可能导致该区域先于最大层间剪应力位置破坏。结合相关试验数据分析表明:同样在水平力系数为1的情况下,常温标准轴载作用下不会导致最大拉应力位置先于最大剪应力位置破坏;而在高温超载作用下,最大剪应力位置疲劳寿命相较常温标准轴载降低,最大拉应力位置层间失去黏结,荷载产生的剪应力将导致层间直接破坏。在实际路面调查中,在长大纵坡+弯道处发现U形裂缝,严重时AC面层大面积脱落。

**关键词:**连续配筋混凝土复合式路面(CRCP);重载;推移病害;拉剪区域;疲劳破坏

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

## Research on Fatigue Failure Law in Tension-Shear Zone behind Wheel in Rigid and Flexible Composite Pavement

CHENG Xiaoliang<sup>1,2</sup>, DENG Fuhao<sup>3</sup>, WANG Yang<sup>1,2</sup>, HAN Leilei<sup>1,2</sup>, ZHOU Wujun<sup>3</sup>

(1.WISDRI City Construction Engineering & Research Incorporation Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China; 2.WISDRI Engineering &

Research Incorporation Ltd., Wuhan, Hubei 430223, China; 3.School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong

University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** In order to study the slippage mechanism of asphalt concrete overlay on continuous reinforced concrete composite pavement (CRCP), the structure of the composite pavement was modeled using the elastic layered system, and the interlayer bonding state of the model was calibrated by the measured data of the road. In the analysis of interlayer mechanical behavior, it was found that when the horizontal force coefficient was 1, there existed a tension-shear zone behind the wheel, which may lead to the failure of this zone prior to the position of the maximum interlayer shear stress. Relevant test data analysis shows that when the horizontal force coefficient is 1, under the action of the normal temperature and standard axle load, the maximum tensile stress position is not destroyed before the maximum shear stress position. Under the action of high temperature and overload, the fatigue life of the maximum shear stress position is lower than that under the normal temperature and standard axle load. The maximum tensile stress position loses bonding between the layers, and the shear stress caused by the load will lead to direct destruction between the layers. In the field road survey, a U-shaped crack is found in the long longitudinal slope and curve position, and the AC surface layer falls off in a large area when the crack is serious.

**Keywords:** continuous reinforced concrete composite pavement (CRCP); heavy load; slippage; tension-shear zone; fatigue failure

收稿日期:2023-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51708244);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:2018KFYYXJJ002)

作者简介:程小亮,男,硕士,高级工程师.E-mail:35004@wisdruidc.com

## 0 引言

在针对湖北省CRC+AC复合式路面状况的跟踪调查中发现:其整体性能优于半刚性基层沥青路面和接缝水泥混凝土路面,但在交通荷载频繁加、减速的交叉口和长大纵坡路段,存在推移、U形裂缝等层间黏结失效病害。

针对刚柔复合式路面的层间力学行为,国内外学者进行了诸多有价值的研究。刘朝晖<sup>[1]</sup>通过弹性层状体系软件BISAR对复合式路面的界面剪应力进行分析,发现层间剪应力随AC层层厚增加而减小,给出复合式路面的AC层建议厚度为6~12 cm,且提到在层间剪应力计算时需要适当考虑相同位置的竖向应力;陈东<sup>[2]</sup>利用应变能理论结合有限元软件计算发现水平和竖向荷载同时作用时路表形变能集中区域在水平荷载作用后方,并随深度增加向行车方向移动,指出描述层间抗剪状态同时考虑水平剪应力和法向压应力的综合影响更为合理。一般认为,复合结构层间黏结状态会改变结构层力学行为<sup>[3]</sup>,进一步导致层间病害。胡凯健<sup>[4]</sup>通过引入层间滑动系数描述CRCP与AC间的黏结状态,并通过计算结合试验发现层间黏结状态会同时影响层间最大剪应力和层间抗剪强度;贾进等<sup>[5]</sup>针对复合式路面层间黏结性能进行室内层间剪切试验和拉拔试验,测定不同层间处理方式的层间抗剪强度,以指导工程实践。

现有研究多关注最大层间剪应力变化规律,缺乏针对轮载区域附近的层间复杂应力状态的系统研究,尤其是急刹时轮后区域的力学特征及疲劳破坏规律。本文在采用现场实测移动交通荷载下CRCP板纵向应变对模型层间黏结参数进行校准的基础上,对刚柔复合式路面在不同交通荷载和不同温度下的层间力学状态进行分析,探究其与现场病害形态的关联性。

## 1 基于实测数据模型构建

路基路面材料和结构在荷载作用下的本构关系一般呈现出非线性,但由于交通荷载作用的瞬时性,产生的黏、塑性变形相较于结构本身尺寸和强度可忽略,因此可以将路基路面结构材料在交通荷载作用下的行为特征视为线弹性。此外,下面层的连续配筋混凝土路面不设置除施工缝以外任何形式的横

向接缝(缩缝、胀缝),具有良好的整体性,较好地符合层状弹性体系的假设,可采用层状弹性体系理论分析结构受力<sup>[1]</sup>。

本文采用壳牌公司开发的层状弹性体系分析软件BISAR对CRCP+AC复合式路面的典型结构进行分析。

### 1.1 模型假设与参数

在弹性层状体系中针对层与层之间的接触面采用两种假定:完全黏结和完全光滑,而实际结构层层间的黏结状态可以介于完全黏结和完全光滑之间<sup>[6]</sup>。BISAR中针对弹性层状体系的层间状态的表征采用经典的古德曼模型<sup>[7-8]</sup>,见式(1):

$$\tau = K_s(\Delta U) \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为层间剪应力; $\Delta U$ 为两结构层的层间相对位移; $K_s$ 为水平层间剪切模量。

从式(1)中可以看出:在层间剪切模量确定后,由荷载引起的层间剪应力越大,层间相对位移将越大,宏观上表现为层间黏结失效,导致推移、车辙、拥包等病害。因此,为更加准确地计算复合式路面层间力学状态,评估路面性能,使用现场实测数据对模型相关参数进行校准是必要的。

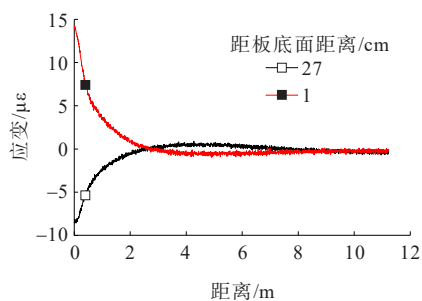
参考现行规范<sup>[9]</sup>并结合工程实际确定BISAR中输入的路面结构参数如表1所示。

表1 结构层参数  
Table 1 Structural layer parameters

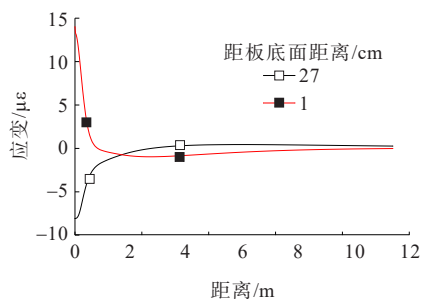
结构层	厚度/cm	模量/MPa	泊松比
连续配筋混凝土	30	30 000	0.15
AC-13C	4	8 500	0.25
水泥稳定碎石	60	14 000	0.25
土基	—	80	0.40

### 1.2 模型校准

对于AC+CRCP复合式路面,CRCP板是主要承重层,在进行结构受力分析时,主要考虑CRCP层的受力特性。通过在CRCP轮迹线位置处的板顶(距板底面27 cm)和板底(距板底面1 cm)沿纵向埋设混凝土应变计,测试获取38 t重载车辆以15 km/h行驶的板顶和板底应变数据如图1(a)所示。依据中国现行路面设计规范和实际工程经验,通过适当调整路基路面结构层参数和层间黏结状态参数进行模型校准。调整后的模型计算结果如图1(b)所示。



(a) 现场实测数据



(b) 模型拟合数据

图1 CRCP板的纵向应变模型校准

Figure 1 Model calibration of longitudinal strain in CRCP slab

由图1可知:实测路面在移动重载作用下CRCP板的板顶最大压应变为 $8.6 \mu\epsilon$ ,板底最大拉应变为 $14.1 \mu\epsilon$ 。校准后模型计算的板顶最大压应变为 $8.1 \mu\epsilon$ ,板底最大拉应变为 $14.0 \mu\epsilon$ 。板顶和板底应变最大的误差在6%以内,且轮载作用范围内变化趋势保持一致。

## 2 标准轴载下层间不利位置分析

CRC+AC复合式路面通常用于繁重交通的路段,本文以标准轴载BZZ-100为基准,在模型分析过程中的交通荷载分别取超载0%、50%、100%及150%,即对应的单轴双轮轴重分别为100 kN、150 kN、200 kN和250 kN。根据文献选取对应轮胎接触压力<sup>[10]</sup>,按照式(2)计算双圆当量圆半径 $\delta$ ,具体的交通荷载特征如表2所示。

$$\delta = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad (2)$$

式中: $P$ 为作用在车轮上的荷载(kN); $p$ 为轮胎接触压力(kPa)。

考虑最佳路面附着系数下汽车紧急制动情况,干燥路面附着系数可达0.7~1.0,水平力方向沿行车方向<sup>[11]</sup>。本文对水平力系数分别取0、0.5和1.0时进

表2 交通荷载换算

Table 2 Traffic load conversion

荷载等级	单轴双轮 轴重/kN	竖向压力/ MPa	双圆当量圆 半径/m
标准轴载	100	0.7	0.107
超载50%	150	0.8	0.122
超载100%	200	0.9	0.133
超载150%	250	1.0	0.145

行分析评价。为对复合式路面典型结构的力学行为进行分析,结合实际工程应用,在校准后的模型参数不变的基础上加铺7.5 cm的沥青混凝土层,模量取具有代表性的8 500 MPa,泊松比为0.25。

### 2.1 水平力影响

以外侧车轮触地荷载圆的中心为原点,分别沿 $x$ 轴(横向)和 $y$ 轴(纵向)正负方向0.5 m范围内每隔0.5 $\delta$ 设置一个计算点位,点位布置情况如图2(a)所示,分析不同水平力系数的标准轴载作用下层间剪应力的空间分布特征。

由图2可得:水平力系数对层间剪应力水平影响显著,水平力系数从0增加至1.0时,最大剪应力从0.107 MPa增加至0.281 MPa。水平力系数为0时的层间剪应力沿轮间中心点的横向和纵向呈对称分布,沿横向的对称分布随着水平力系数的增加而消失,具体表现为车轮中心后的层间剪应力水平逐渐减小,车轮中心前的层间剪应力水平显著增加。不同水平力系数下的层间最大剪应力位置均出现在单轮中心的纵向正前方约0.9 $\delta$ 处。

绘制不同水平系数力下AC层底部的竖向应力与层间剪应力沿行车方向分布图,见图3。位置为0代表轮载中心,负值代表轮胎后方(相对于水平力方向),正值代表轮胎前方(相对于水平力方向)。

由图3可知:水平力系数取0时,在荷载影响范围内(前后0.4 m内)仅出现压应力,并关于轮中心对称分布;水平力系数取0.5时,在轮后0.159 8 m(约1.5倍当量圆半径)处出现拉应力;当水平力系数取1.0时,轮后拉应力作用范围更大且幅值也有明显增长,最大拉应力达0.054 8 MPa。结合层间纵向剪应力分布,轮后出现了拉剪区域,在路面相关材料的拉剪试验中认为拉剪状态会导致材料抗剪强度降低<sup>[12]</sup>,因此拉剪区域的出现可能导致路面病害形式发生改变。

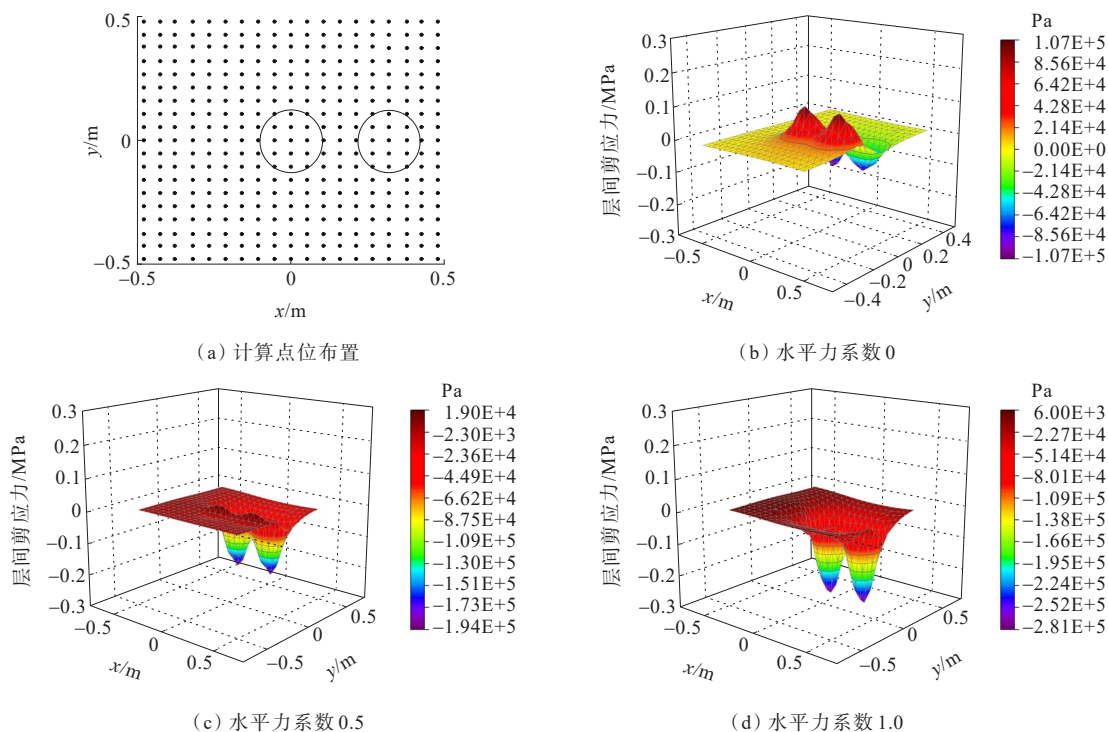


图2 层间剪应力空间分布

Figure 2 Spatial distribution of interlayer shear stress

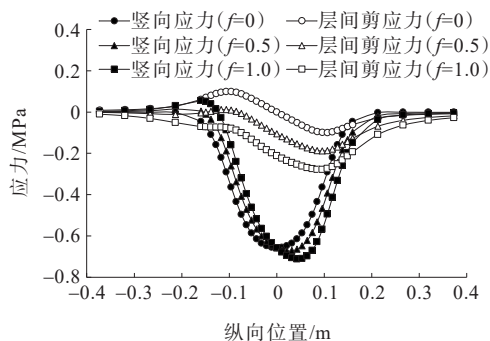


Figure 3 Stress distribution along traffic direction under standard axle load

## 2.2 温度的影响

考虑到沥青混凝土的模量对温度的变化十分敏感,AC层的动态模量随温度上升而减小,参考相关文献[13-14]中对沥青混合料动态模量试验结果,选取不同温度下沥青混凝土代表性动态模量(表3),不考虑泊松比变化。

AC层不同模量时的CRCP板和AC层间最大剪应力结果如图4所示。

由图4可知:最大层间剪应力随着AC层动态模量的减小(温度的升高)而增大,这一趋势在有水平力作用时更为显著。

表3 不同温度下AC层的动态模量

Table 3 Dynamic modulus of AC layer at different temperatures

温度/℃	动态模量/MPa	泊松比
4.4	16 000	0.25
20(常温)	8 500	0.25
40	2 000	0.25
55(高温)	600	0.25

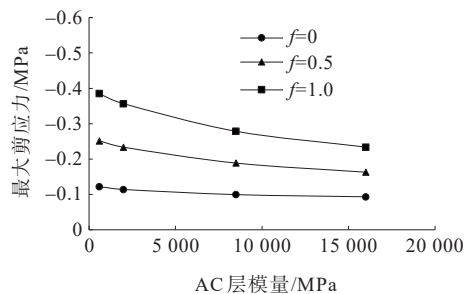


Figure 4 Effect of AC layer modulus on maximum interlayer shear stress

高温不仅会导致AC层模量的降低,同时会使AC层与CRCP层的黏结强度降低<sup>[15-16]</sup>。在依据表3对AC层模量进行基于温度调整的同时,将高温时的层间黏结状态简化为层间近似滑动的状态,在常温20℃和高温55℃情况下,标准轴载且水平力系数为



1.0时层间的竖向应力和剪应力沿行车方向的分布如图5所示。

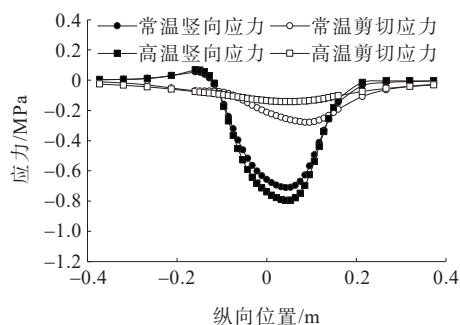


图5 常温和高温的应力分布对比

Figure 5 Comparison of stress distribution at normal temperature and high temperature

从图5中发现:高温导致层间最大剪应力的减小,对应位置的压应力有所增长,而轮后拉剪区域的最大拉应力和对应的层间剪应力基本不变,但考虑模量的大幅降低,实际中位移增长明显。

### 3 夏季重载作用下拉剪区域特征

超载车辆在加、减速过程中产生的水平力对层间剪应力的影响趋势远强于标准轴载车辆<sup>[17]</sup>。因此考虑实际路面中最不利状况(夏季+重载+急刹),对比重载车辆急刹时在行车方向上层间的剪应力和竖向应力分布情况,结果见图6。

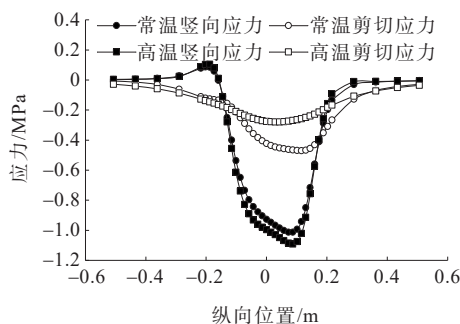


图6 重载作用下高温与常温应力分布对比

Figure 6 Comparison of stress distribution at normal temperature and high temperature under heavy load

由图6可知:高温状态下最大层间剪应力出现位置更接近轮胎中心,由0.471 MPa减小至0.280 MPa,减小40.6%,而轮后的层间最大拉应力变化极小。最大层间剪应力有明显减小,且高温时复合式路面层间黏结性能下降,出现破坏位置可能发生变化,由轮前最大剪应力位置改变为轮后最大拉应力位置。

一般认为层间破坏多为疲劳破坏<sup>[16]</sup>。因此,采

用剪应力与剪切强度的应力强度比来评价层间剪切破坏疲劳寿命,利用已有剪切疲劳试验数据描述实际路面中剪切疲劳破坏规律。

根据摩尔库仑准则,参考文献[18-19]通过室内成型试件的直剪试验和多角度斜剪试验,得出常温(15℃)和高温(60℃)下层间正应力与剪切强度间的关系,结果如图7所示。

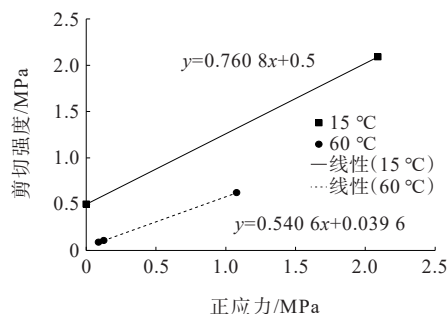


图7 室内试验正应力与剪切强度关系

Figure 7 Relationship between normal stress and shear strength in laboratory tests

为了分析层间疲劳破坏的规律,本文先通过模型分析获取的层间竖向应力回归得出其对应的剪切强度,然后计算剪切应力与剪切强度之间的应力强度比,最后通过剪切应力强度比与其疲劳寿命关系预估剪切疲劳寿命。

表4为轮载区域不同位置的应力和疲劳参数,由表4可知:常温标准轴载作用下轮前最大剪应力位置处的应力强度比为0.387,轮后最大拉应力位置处的应力强度比为0.279,常温下层间最不利荷载位置为轮前层间剪应力最大的压剪区域。高温下轮前最大剪应力小于常温下的最大剪应力值,但由于高温引起的层间剪切强度值降低导致轮前最大剪应力处应力强度比显著增大,将导致高温的层间疲劳寿命要明显低于常温疲劳寿命。结合文献[20]中高温下的层间剪切疲劳试验数据,对层间剪切应力强度比与其疲劳寿命进行指数拟合,结果如图8所示。由图8可知:高温重载下轮前最大剪应力位置处应力强度比为0.469,对应的疲劳寿命约为1800次。轮后最大拉应力位置处由于层间竖向应力为受拉状态,导致其相应的层间剪切强度极易出现小于剪应力的情况。即高温重载下轮后最大拉应力位置处出现一次性剪切破坏的可能性极大,宏观上表现为轮后半圆弧式的推移病害。

表4 轮载区域不同位置的应力和疲劳参数  
Table 4 Stress and fatigue parameters at different positions in wheel-load zone

项目	剪应力/ MPa	压应力/ MPa	抗剪强 度/MPa	应力 强度比	疲劳寿 命/次
常温					
轮前最大 剪应力处	0.471	0.942	1.217	0.387	—
轮后最大 拉应力处	0.121	−0.087	0.434	0.279	—
高温					
轮前最大 剪应力处	0.280	1.030	0.596	0.469	1 800
轮后最大 拉应力处	0.146	−0.105	−0.017	—	一次性破坏

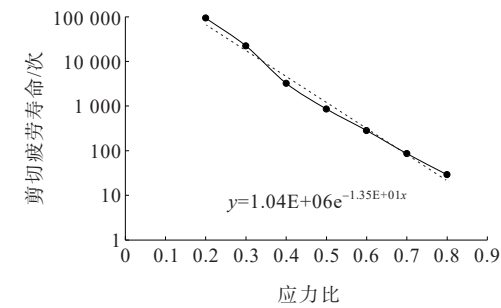


图8 高温下应力强度比与疲劳寿命关系

Figure 8 Relationship between stress intensity ratio and fatigue life at high temperature

4 复合式路面层间破坏特征调查

在针对湖北省部分刚柔复合式路面的层间病害调查中,本文采用在高温季末期的9月初调查层间破坏特征的方式。在长大纵坡和小半径曲线路段发现复合式路面的AC层存在推移病害,具体表现为轮迹线附近出现沿行车方向的U形裂缝[图9(a)]。与高温下重载车辆制动时较大水平力引起的轮后不利拉剪区域密切相关,导致层间黏结失效并引起AC层的纵向滑移失效,随着重载交通重复作用进而出现AC层的大面积剥落[图9(b)]。

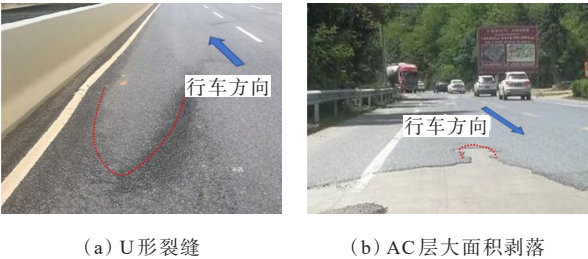


图9 复合式路面层间破坏特征调查结果

Figure 9 Investigation of interlayer failure characteristics of composite pavement

5 结论

通过CRCP板的纵向应变对层状弹性体系模型的层间状态进行校准,之后加铺AC层并对AC层与CRCP层的层间纵向剪应力和竖向应力状态进行分析,结合文献中室内试验数据得出层间剪切破坏规律,主要结论如下:

(1) 水平力系数的增大会显著增加层间最大剪应力,但最大剪应力位置始终在轮胎中心前约0.9δ处。水平力系数取1时相较无水平力情况下最大剪应力增加162.6%。

(2) 常温标准轴载在急刹等不利水平力作用工况下,轮后会出现拉剪区域,但拉剪区域的层间最大剪切应力强度比相较轮前压剪区域最大剪切应力强度比小38.7%,即常温下的层间疲劳破坏多起始于轮前最大剪应力位置处。

(3) 高温250 kN轴重在急刹等不利水平力作用下,轮前最大剪应力位置处的应力强度比会显著减小,但是轮后拉剪区域对应的层间剪切强度会出现小于剪切应力的更不利状态。表明高温不利荷载作用下轮后会出现一次性破坏,与实际路面病害调查中轮后区域的U形裂缝等破坏特征相符。

参考文献:

References:

[1] 刘朝晖.连续配筋混凝土刚柔复合式沥青路面研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.  
LIU Zhaohui. The research on rigid-flexible continuously reinforced concrete composite asphalt pavement[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.

[2] 陈东.基于应变能理论CRC+AC复合式路面抗剪分析[D].长沙:湖南大学,2017.  
CHEN Dong. Research on shear resistance of CRC+AC composite pavement based on strain energy theory[D]. Changsha: Hunan University, 2017.

[3] YANG K, LI R. Characterization of bonding property in asphalt pavement interlayer: A review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021, 8 (3): 374-387.

[4] 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.  
HU Kaijian. Research on interlaminar shear properties of

- rigid-flexible composite pavement[D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2020.
- [5] 贾进,甘孟松.考虑界面状态的复合式路面层间黏结性能研究[J].中外公路,2018,38(5):73-78.  
JIA Jin, GAN Mengsong. Study on the interlayer bond performance of composite pavement considering interlayer conditions[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018,38(5):73-78.
- [6] 阳宏毅.连续配筋混凝土复合式路面层间应力分析与结合技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2005.  
YANG Hongyi. Study of bonding layer stress analysis and bond craft of continuously reinforced concrete composite pavement[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2005.
- [7] 关昌余,王哲人,郭大智.路面结构层间结合状态的研究[J].中国公路学报,1989,2(1):70-80.  
GUAN Changyu, WANG Zheren, GUO Dazhi. A study of contact conditions of interfaces in pavement layers[J]. China Journal of Highway and Transport, 1989,2(1):70-80.
- [8] UZAN J, LIVNEH M, ESHED Y. An investigation of adhesion properties between asphaltic-concrete layers[C]// Association of Asphalt Paving Technologists Proc. Florida: 1978;495-521.
- [9] 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.  
CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of highway cement concrete pavement: JTG D40—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [10] 张洪亮,许金良,郭荣庆,等.重载沥青路面基于实测荷载图式的轴载换算研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2010,34(1):110-112,129.  
ZHANG Hongliang, XU Jinliang, GUO Rongqing, et al. Axle load conversion formula for asphalt pavement under heavy-load based on load figures tested[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010,34(1):110-112,129.
- [11] 王颖.脉冲制动下多车融合的路面峰值附着系数估算研究[D].成都:四川大学,2021.  
WANG Ying. Study on the estimation methodology of maximum tire-road friction coefficient based on multi-vehicle fusion under pulse braking condition[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.
- [12] 刘克非.环氧沥青结合料的试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.  
LIU Kefei. Research on the epoxy asphalt binder[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008.
- [13] 宋小金,曾梦澜,樊亮.沥青路面反算模量与沥青混合料动态模量的关系[J].土木工程学报,2019,52(4):121-128.  
SONG Xiaojin, ZENG Menglan, FAN Liang. Relationship between back-calculated modulus of asphalt pavement and dynamic modulus of asphalt mixture[J]. China Civil Engineering Journal, 2019,52(4):121-128.
- [14] 何兆益,李金凤,周文,等.多孔沥青混合料的动态模量及其预估模型[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(6):1375-1385.  
HE Zhaoyi, LI Jinfeng, ZHOU Wen, et al. Dynamic modulus of porous asphalt concrete and its prediction model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022,52(6):1375-1385.
- [15] LEE S L, MANNAN M A, WAN IBRAHIM W H. Shear strength evaluation of composite pavement with geotextile as reinforcement at the interface[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020,48(3):230-235.
- [16] 周婷.连续配筋混凝土刚柔复合式沥青路面层间剪切疲劳研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.  
ZHOU Ting. Study on interlaminar shear fatigue of continuously reinforced concrete rigid-flexible composite asphalt pavement[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [17] 张丙强.考虑层间界面剪切损伤的复合式沥青路面力学特性[J].福州大学学报(自然科学版),2016,44(4):588-592.  
ZHANG Bingqiang. Analysis of mechanical properties for composite asphalt pavement involving shear damage of interface[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2016,44(4):588-592.
- [18] 李一鸣.复合式沥青路面水泥混凝土基层面层处理技术研究[D].成都:西南交通大学,2018.  
LI Yiming. Research about the treatment of the cement concrete base course in composite asphalt pavement[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [19] 金思佳.沥青混凝土桥面铺装层间粘结强度评价方法及指标研究[D].武汉:华中科技大学,2017.  
JIN Sijia. Research on evaluation method and parameter for estimating bonding condition between concrete bridge deck and asphalt concrete overlay[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [20] 李盛,刘朝晖,李宇峙,等.刚柔复合式路面层间界面剪切疲劳试验研究[J].土木工程学报,2013,46(7):151-156.  
LI Sheng, LIU Zhaozhui, LI Yuzhi, et al. Experimental study on interlaminar shear fatigue of rigid-flexible composite pavement[J]. China Civil Engineering Journal, 2013,46(7): 151-156.