

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.03.009

引用格式:房娜仁,王雪森,胡士清,等.复合式路面非线性损伤疲劳裂缝演化机理研究[J].重庆大学学报,2025,48(3): 107-120.



# 复合式路面非线性损伤疲劳裂缝演化机理研究

房娜仁<sup>1</sup>,王雪森<sup>1</sup>,胡士清<sup>2,4</sup>,吴朝玥<sup>3</sup>,韩金川<sup>1</sup>,孙耀宁<sup>5</sup>,于康<sup>6</sup>

(1. 天津城建大学 土木工程学院,天津 300384; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司,武汉 430056; 3. 中国公路工程咨询集团有限公司,北京 100000; 4. 长安大学 公路学院,西安 710064; 5. 天津市赛英工程技术咨询有限公司,天津 300191; 6. 中交一公局第六工程有限公司,天津 300450)

**摘要:**现有复合式路面裂缝扩展机理研究重材料轻结构、模拟方法多样,但精确度不高、路面结构难以充分反映实际工况等问题,对非线性损伤复合式路面疲劳裂缝扩展行为展开深入研究。采用损伤力学理论、剩余强度理论、加速加载试验、Python 算法等研究手段,完成水泥混凝土板接缝传荷力学行为模拟,编写分布载荷子程序+用户材料子程序+自定义损伤起始准则子程序+扩展有限元主程序用以实现循环荷载作用下复合式路面疲劳损伤-断裂全过程模拟,得到反射裂缝扩展速率、路面内部材料累积损伤及剩余强度、路表弯沉值 4 个指标在循环荷载作用下的退化规律。结果表明,随着荷载作用次数的增加,疲劳损伤的累积速度逐渐增加,剩余强度逐渐减小;损伤累积的速度与剩余强度降低的程度相关。100 kN、160 kN、220 kN 轴载作用下裂缝扩展阶段的寿命分别占路面全寿命周期的 43.94%、35.34%、28.82%;40 km/h、60 km/h、100 km/h 速度作用下裂缝扩展阶段的寿命分别占路面全寿命周期的 46.83%、43.94%、43.13%;超载对路面稳定性影响更大。

**关键词:**路面;反射裂缝;疲劳损伤;剩余强度

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)03-107-14

## Research on the evolution mechanism of nonlinear damage fatigue cracks in composite pavement

FANG Naren<sup>1</sup>,WANG Xuesen<sup>1</sup>,HU Shiqing<sup>2,4</sup>,WU Zhaoyue<sup>3</sup>,HAN Jinchuan<sup>1</sup>,SUN Yaoning<sup>5</sup>,YU Kang<sup>6</sup>  
(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China; 2. CCCC Second Highway Consultants Corporation, Wuhan 430056, P. R. China; 3. China Highway Engineering Consulting Group Co., Ltd, Beijing 100000, P. R. China; 4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China; 5. Tianjin Saiying Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Tianjin 300191, P. R. China; 6. No.6 Engineering of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, P. R. China)

收稿日期:2024-06-14

基金项目:天津市交通运输科技发展计划项目(2022-08);天津市教委科研计划项目(2022ZD003);天津市自然科学基金青年项目(22JCQNJC01550);山东省交通运输科技计划(2022B16)。

Supported by Tianjin Transportation Science and Technology Department Plan Project (2022-08); Tianjin Municipal Education Commission Scientific Research Project (2022ZD003); Tianjin Natural Science Foundation Youth Project (22JCQNJC01550); Shandong Provincial Transportation Technology Plan (2022B16).

作者简介:房娜仁(1992—),女,博士,主要从事路基路面方向研究,(E-mail) 2017021044@chd.edu.cn。

**Abstract:** Existing researches on the crack propagation mechanisms in composite pavement often focus on materials, but do not emphasize structure. There are many simulation methods, but they are difficult to reflect actual working conditions. To solve these problems, this study conducts an in-depth investigation on the fatigue crack propagation behavior of non-linear damage in composite pavements. Using damage mechanics theory, residual strength theory, accelerated loading tests, and Python algorithms, a comprehensive simulation of the mechanical behavior of cement concrete slab joint load transfer was conducted. A cycle fatigue damage-fracture simulation system was established using the DLOAD subroutine, UMAT subroutine, UDMGINI subroutine, and XFEM main program. This system reveals the degradation patterns 4 key indexes under cyclic loading: reflection crack propagation rate, internal material damage, residual strength, and pavement deflection. The results show that fatigue damage accumulates with the increase of loading cycles, leading to a gradual decline in residual strength, with the damage accumulation rate closely linked to the extent of residual strength reduction. Under axle loads of 100 kN, 160 kN, and 220 kN, the crack propagation phase accounts for 43.94%, 35.34%, and 28.82% of the pavement's full life cycle, respectively. For vehicle speeds of 40 km/h, 60 km/h, and 100 km/h, the crack propagation phase comprises 46.83%, 43.94%, and 43.13% of the pavement's life cycle, respectively. Overloading significantly impacts pavement stability, accelerating fatigue damage and reducing service life.

**Keywords:** pavement; reflective cracks; fatigue damage; residual strength

“白加黑”复合式路面结构作为典型的长寿命路面结构,其面层厚度大、服务周期长、维修方便、费用少,既紧随国家发展战略以及行业实际现状,又兼顾经济性和实用性<sup>[1]</sup>。但如何解构复合式路面疲劳损伤开裂机理,分析复合式路面反射裂缝扩展行为,构建全面有效的复合式路面结构反射裂缝扩展模型始终是学者研究的重点。Diyar<sup>[2]</sup>采用ABAQUS软件研究了沥青加铺层的反射裂缝开裂潜能;Cho等<sup>[3]</sup>采用有限元法研究了交通荷载作用下疲劳开裂和反射裂缝对沥青加铺层应力分布的影响规律;Monismith等<sup>[4]</sup>利用有限元法研究了橡胶沥青膜对反射裂缝附近的沥青加铺层应力的影响;周刚等<sup>[5]</sup>通过疲劳加载试验研究了玻纤格栅、聚酯玻纤布和经编复合聚酯玻纤布对复合式路面反射裂缝扩展的影响,结果表明复合聚酯玻纤布能有效防治反射裂缝的产生和扩展;张倩倩等<sup>[6]</sup>通过小梁加载试验研究了普通水泥混凝土、纤维增强水泥基复合材料(ECC)和ECC加设传力杆3种修补材料抵抗反射裂缝扩展的有效性;李汝凯<sup>[7]</sup>研究了重载作用下新建复合式路面反射裂缝的扩展规律;丛林等<sup>[8]</sup>采用有限元方法设定防水抗裂功能层,考虑温度和交通荷载共同作用下铺设功能层的复合式路面结构应力、弯沉等指标的变化规律。

综上所述,目前国内外针对复合式路面反射裂缝发展规律的研究取得了一定进展,尤其是采用有限元软件模拟路面结构裂缝的产生与扩展行为已较为成熟<sup>[9]</sup>,但仍存在以下不足:1)裂缝研究存在“重材料而轻结构”现象,较多从沥青面层材料角度出发研究裂缝扩展行为,对路面结构的模拟一笔带过,例如,采用有限元软件模拟时,仅以设置杆件简单模拟水泥混凝土接缝处受力行为,而不考虑接缝处的刚度及传递效应;2)实际复合式路面结构是在“连续移动荷载反复作用”“非线性损伤”“损伤至一定程度后转入断裂”等工况下受力至裂缝产生扩展,已有研究尚未全面综合地考虑上述现象,因而对路面工况模拟不全面、不准确。

鉴于此,文中对非线性损伤复合式路面疲劳裂缝扩展行为展开深入研究,揭示复合式路面裂缝损伤演化行为,以移动荷载作用下复合式路面沥青层底最不利位置处疲劳损伤为研究重点,以沥青混合料疲劳损伤力学为理论基础,结合剩余强度理论、加速加载(MMLS3)技术试验,提出采用Python开发弹簧模拟接缝传荷算法,完成水泥混凝土板之间接缝传荷模拟的基础上,自编分布载荷子程序(DLOAD子程序)+用户材料子程序(UMAT子程序)+自定义损伤起始准则子程序(UDMGINI子程序)+扩展有限元主程序(XFEM主程序),建立循环荷载作用下复合式路面疲劳损伤-断裂全过程模拟系统,得到复合式路面结构力学响应规律与裂缝扩展行为机理,实现预估复合式路面结构的疲劳寿命。

## 1 确定非线性疲劳损伤演化方程

### 1.1 确定损伤演化方程

路面在重复荷载作用下,结构材料内部性能退化引起的材料失效称为路面疲劳损伤。假定,初始面积为 $A$ ,疲劳荷载反复作用后实际有效面积为 $A^*$ ,材料损伤面积 $A_D$ ,损伤力学中定义损伤 $D$ 为<sup>[10-11]</sup>

$$D = \frac{A_D}{A} = \frac{A - A^*}{A}, \quad (1)$$

当 $D=0$ 时,表示材料没有损伤; $D=1$ 时,表示材料完全损伤。

非线性疲劳损伤演化方程考虑了应力 $\sigma$ 、温度 $T$ 和材料已有损伤 $D$ 等因素,更适合复合式路面的疲劳损伤分析。非线性疲劳损伤演化方程为

$$\frac{dD}{dN} = F(\sigma, T, D). \quad (2)$$

文中采用Lemaitre和Chaboche提出的非线性疲劳损伤演化方程为

$$\frac{dD}{dN} = \alpha^* \left( \frac{\sigma}{1-D} \right)^p (1-D)^{-q}. \quad (3)$$

采用最大主应力准则作为损伤起始准则,公式中的 $\sigma$ 取最大主应力 $\sigma_{\max}$ 。其他参数根据已有研究<sup>[12]</sup>取值,确定损伤演化方程为

$$\frac{dD}{dN} = 9.62 \times 10^{-4} \left( \frac{\sigma_{\max}}{1-D} \right)^{4.5}. \quad (4)$$

### 1.2 确定本构模型

Lemaitre提出的等效应力(应变)假设如下:受损材料的应力(应变)等于无损材料的应力(应变)。

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{1-D}, \quad (5)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon(1-D), \quad (6)$$

式中: $\sigma$ 、 $\varepsilon$ 为真实应力(应变); $\sigma^*$ 、 $\varepsilon^*$ 为有效应力(应变)。

在控制应力的小梁疲劳试验中,假设初始状态时劲度模量为 $S_0$

$$S_0 = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_0}. \quad (7)$$

$N$ 次加载后,小梁的应变增大,材料的劲度模量为 $S_N$

$$S_N = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_N}. \quad (8)$$

根据等效应变理论,得到损伤后的沥青混合料的一维本构方程为

$$\sigma = (1-D) E \varepsilon. \quad (9)$$

对于三维问题,有限元中损伤本构方程为

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = (1-D) \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2G & 0 & 0 & 0 \\ & & & G & 0 & 0 \\ & & & & G & 0 \\ & & & & & G \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = [\mathbf{S}] \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中,[ $\mathbf{S}$ ]为考虑损伤的弹性矩阵,即雅克比矩阵。 $\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$ , $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ 。

文中建立二维模型,修改弹性矩阵[ $\mathbf{S}$ ]为

$$[\mathbf{S}] = (1-D) \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda & 0 \\ & \lambda + 2G & \lambda & 0 \\ & & \lambda + 2G & 0 \\ & & & G \end{bmatrix}. \quad (11)$$

## 2 构建复合式路面裂缝疲劳损伤-断裂力学响应模型

复合式路面从疲劳损伤累积到裂缝产生,再到裂缝扩展到顶部,一般需要移动荷载反复作用几万次甚至上百万次,考虑到计算机运行效率及计算精度,文中采用2维平面模型进行模拟。

### 2.1 DLOAD子程序编写及参数

采用DLOAD子程序模拟移动荷载循环作用在路面结构上的轮迹效应,在路面结构上施加线荷载,每一步步长为0.213 m;压强为0.117 37 kN(标准轴载0.7 MPa转化为平面应变问题的值)。荷载在路面上反复移动过程如图1所示。

模拟相同速度下,不同轴载的等效步长、等效压强如表1所示;标准轴载作用下,不同速度时移动荷载运行1周的周期t如表2所示。

表1 不同轴载作用下移动荷载参数  
Table 1 Moving load parameters under different axle loads

轴载/kN	轮载/kN	等效步长/m	等效压强/kN
100	25	0.213	0.117 37
160	40	0.249	0.160 84
220	55	0.280	0.196 16

表2 不同速度作用下对应周期时间  
Table 2 Corresponding cycle time under different speeds

速度/(km·h <sup>-1</sup> )	40	60	100
时间/s	0.180	0.120	0.072

### 2.2 UMAT子程序编写及参数

文中采用UMAT子程序计算疲劳损伤,主要过程为:1)通过损伤演化方程计算得到损伤值 $\Delta D$ ;2)更新考虑损伤的弹性矩阵,并将计算得到的应力 $\sigma_{n+1}$ 、应变 $\varepsilon_{n+1}$ 返回到主程序;3)将损伤变量储存到状态变量数组。

### 2.3 UDMGINI子程序编写及参数

采用最大主应力损伤起始准则,FINDEX为当前最大主应力和材料剩余强度的比值;FNORMAL为开裂方向,文中开裂面的法向为最大主应力的方向。

金光来等<sup>[13]</sup>建立了剩余强度的幂函数模型,计算公式为

$$\frac{S}{S_0} = 1 - D_{ms} + D_{ms} \times \left(1 - \frac{D}{D_m}\right)^{\omega}, \quad (12)$$

$$D_{ms} = 1 - \frac{\sigma_0}{S_0}, \quad (13)$$

式中: $S$ 为剩余强度; $S_0$ 为初始强度; $\sigma_0$ 在应力恒定时,为初始时刻应力,取最大主应力 $\sigma_{max}$ ; $D_{ms}$ 为根据强度定义的损伤疲劳临界值; $D_m$ 为以劲度定义的损伤疲劳临界值;文中取 $D_m=0.8$ 时,表示材料完全损伤; $\omega$ 为材料参数,一般取0.149 4。

在UDMGINI中判断损伤开裂机制如下:

$FINDEX = \frac{\sigma_{max}}{S}$ ,则不断裂(不符合损伤起始准则条件),继续进行疲劳加载卸载循环以及累积损伤;

$FINDEX = \frac{\sigma_{max}}{S}$ ,则断裂,激活XFEM。

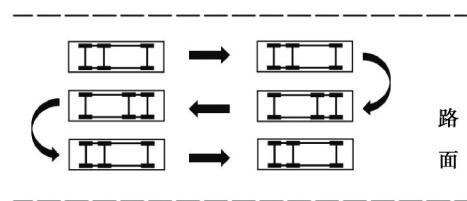


图1 荷载循环移动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of load cyclic movement

## 2.4 XFEM自动开裂实现

ABAQUS只能解决一次性简单加载下断裂扩展问题,为了使XFEM实现移动循环荷载作用下疲劳自动开裂,需要采用UDMGINI子程序不断降低开裂所需的条件,在inp模型中编辑关键字自定义损伤起始准则、损伤演化规律及黏性系数。

## 2.5 疲劳损伤-断裂全过程模拟流程

综上所述,在移动荷载作用下,路面疲劳损伤-断裂全过程模拟流程如图2所示。

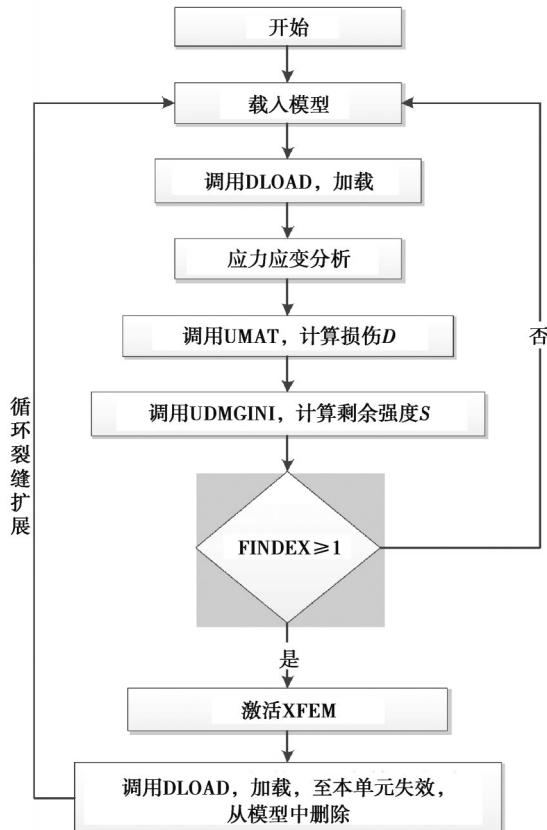


图2 路面疲劳损伤-断裂全过程模拟流程图

Fig. 2 Simulation flow chart of the whole process of road fatigue damage-fracture

## 3 基于MMLS3加速加载试验的模拟方法有效性验证

为验证文中建立的“基于循环荷载的路面疲劳损伤-断裂全过程模拟”方法有效性,进行了室内MMLS3加速加载试验,同时构建相应的模型并调用自编子程序进行计算,得到试验结果与模拟结果相近,证明模拟效果良好。

### 3.1 试验设备

常用复合式路面反射裂缝的室内试验主要有:轮辙试验仪模拟、Overlay-tester试验等,这些试验作用次数只有千次级别,与实际路面力学状态相差较大,无法真正反映路面在循环移动荷载作用下的疲劳损伤规律<sup>[14-16]</sup>。文中采用一种新的试验方法,即在沥青混凝土试件上预制裂缝,利用小型加速加载设备模拟循环移动荷载作用,并观察其裂缝反射规律。试验槽如图3所示。



图3 加速加载试验槽

Fig. 3 Accelerated loading test slot

### 3.2 试验材料及试件

沥青混合料 AC-16 主要技术指标如表 3 所示,合成级配如表 4 所示,均满足规范要求。

表 3 沥青主要技术性质  
Table 3 Main technical properties of asphalt

试验	基质沥青结果
针入度,25 °C,5 s,0.1 mm	88
软化点 TR&B, °C	44.8
延度 15 °C,5 cm/min,cm	>100
动力黏度 135 °C,Pa·s	0.45
密度 15 °C,g/cm <sup>3</sup>	1.013
质量损失,%	-0.12
RTFOT 残留物 163 °C	针入度比,%
延度 15 °C,cm	>100

表 4 AC-16 沥青混凝土合成级配  
Table 4 AC-16 asphalt concrete synthetic gradation

级配	不同筛孔(mm)尺寸下的通进率/%										
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19
合成级配	6	9.5	12.5	17.5	24.5	34	48	70	84	95	100
级配上限	8	14	18	26	36	48	62	80	92	100	100
级配下限	4	5	7	9	13	20	34	60	76	90	100

试验的试槽参数为 900 mm×150 mm×95 mm;制备的试件参数为 300 mm×150 mm×50 mm。试槽中可以同时放置 3 个试件作为对比。考虑到试验结构为沥青层+硅胶,正常情况下沥青层底较难开裂,试验时间长、效果差。为快速观测到裂缝扩展,预制初始裂缝为 30 mm,加载速度为 2.5 m/s。试槽高度如图 4 所示,试件制备如图 5 所示。

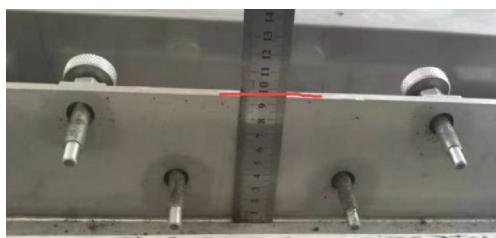


图 4 试验槽高度 95 mm

Fig. 4 Test tank height 95 mm



图 5 试件制备

Fig. 5 Preparation of test piece

### 3.3 试验结果

MMLS3 加速加载试验得到:轮载作用 14 万次后起裂,18 万次后,裂缝扩展了 1.5 cm。裂缝扩展图如图

6~图7所示。



图6 作用14万次后的试件

Fig. 6 Specimen after 140,000 actions



图7 局部裂缝放大示意图

Fig. 7 Schematic diagram of enlarged partial cracks

### 3.4 模拟模型的建立及结果分析

模型参数如表5所示,模拟结果如图8~图9所示。

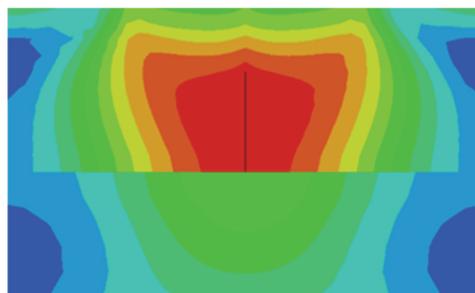


图8 预制3 cm 裂缝

Fig. 8 Prefabricated 3 cm crack

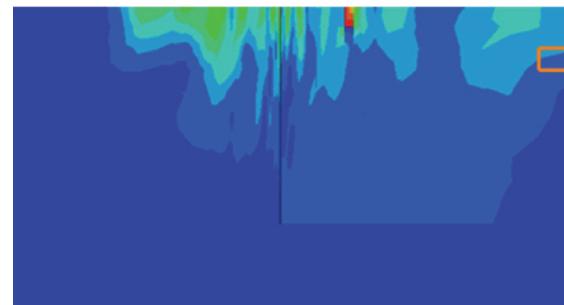


图9 裂缝扩展至顶面

Fig. 9 Cracks spread to the top surface

表5 基准模型参数

Table 5 Benchmark model parameters

结构层名称	长度/cm	厚度/cm	模量/MPa	泊松比	密度
沥青层	50	5.0	2 000	0.2	2 300
硅胶	50	4.5	1 800	0.4	1 000
层间摩擦系数			0.8		
DLOAD参数		步长 0.076 m; 速度 2.5 m/s; 施加荷载 328 947 Pa			

模拟结果如图10所示,考虑到裂缝扩展后期速度较快,材料彻底失效,为保证分析准确性,以距离顶面0.5 cm为界,即当裂缝扩展至距顶面0.5 cm时判定路面失效,不再提取分析后续数值。由模拟结果可知,荷载作用15.14万次后,路面起裂;作用15.61万次后,裂缝扩展至0.5 cm;作用17.99万次,裂缝扩展至1.0 cm;作用18.84万次,裂缝扩展至1.5 cm;这是因为裂缝每次起裂1个网格,模型网格尺寸为0.5 cm,因此,裂缝每次扩展0.5 cm。加速加载试验中,重复荷载作用下层间结合会逐渐失效,层间摩擦系数逐渐降低,模拟中的摩擦系数为定值,模拟结果略大于实际结果,但仍能较好地表征裂缝扩展规律。

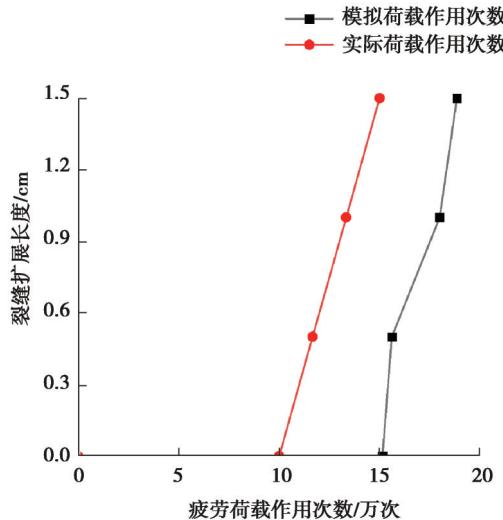


图 10 MMLS3 疲劳裂缝扩展规律

Fig. 10 MMLS3 fatigue crack propagation pattern

进一步提取预制裂缝上方 0.5 cm 处单元节点的累积损伤和剩余强度,如图 11~图 12 所示。

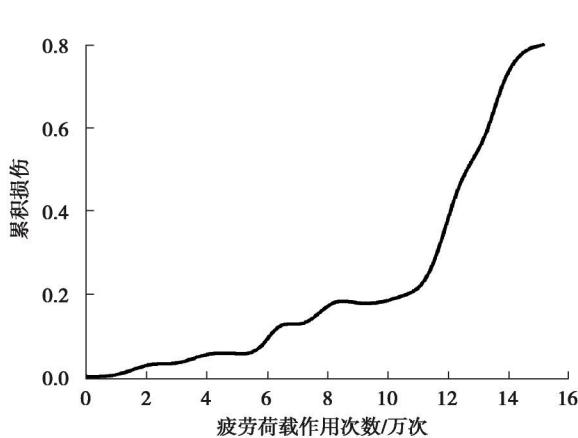


图 11 MMLS3 疲劳损伤变化规律

Fig. 11 MMLS3 fatigue damage change pattern

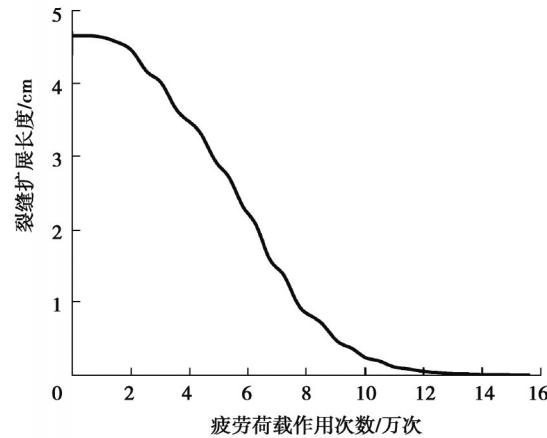


图 12 MMLS3 剩余强度变化规律

Fig. 12 MMLS3 residual intensity change pattern

由图 11 和图 12 分析单元节点处疲劳累积到失效全过程:

1) 疲劳损伤累积曲线与剩余强度曲线存在小范围的波浪线波动,是因为模拟时施加移动循环荷载,在一个循环周期内,荷载作用位置离节点处较远时,节点处受力小;荷载作用位置在节点正上方时,节点处受力最大;节点处受力存在波动,导致累积损伤与剩余强度也有一定的波动。

2) 随着荷载作用次数的增加,疲劳损伤的累积速度逐渐增加,剩余强度逐渐减小。荷载作用 12.72 万次时,剩余强度减小至 0.0203 MPa,此时节点处的累积损伤开始成直线增长;最终在 15.14 万次时,累积损伤达到 0.8,节点进入塑性损伤阶段,此时剩余强度为 0.000201852 MPa;此后,单元节点进入塑性损伤阶段,并在作用 15.61 万次时,节点彻底失效,失去了承载能力,路面出现裂缝,此时剩余强度约为 0.0000112 MPa,为防止程序不收敛,模型设定剩余强度小于 0.0001 MPa 时,材料失效。

综上所述,通过与 MMLS3 试验结果比较,可知路面疲劳损伤-断裂全过程模拟系统较准确地得到了裂缝产生以及扩展规律,还可以得到材料内部的损伤累积,剩余强度等参数的变化规律。

## 4 复合式路面疲劳损伤-断裂全过程分析

采用Python算法设计弹簧模拟水泥混凝土板处接缝传荷行为,建立复合式路面结构计算模型,分析路面在不同轴载(100、160、220 kN)、不同行驶速度(40、60、100 km/h)下的裂缝扩展速率,并以轴载100 kN,车速60 km/h模型为例,研究了路面内部材料累积损伤及剩余强度、路表弯沉值在循环移动荷载作用下的变化规律。

### 4.1 模型构建

#### 4.1.1 确定标准模型的参数

基准模型及参数如表6所示,文中进行相关参量变换时,在基准模型的基础上改变相应单因素变量即可。

表6 基准模型参数  
Table 6 Benchmark model parameters

结构层名称	长/m	厚度/cm	模量	泊松比
AC-16	8.01	6	2 000	0.20
水泥混凝土板	4 m×2	28	30 000	0.15
水泥稳定碎石	8.01	18	2 600	0.15
接缝宽度				10 mm
层间状态(沥青+水泥)				层间光滑
层间状态(水泥+基层)				完全连续

#### 4.1.2 传荷能力的模拟方式

##### 1) 模拟方法

采用理论法计算接缝刚度,计算过程如式(14)~(20)所示<sup>[17]</sup>。计算思路为:①计算混凝土对传力杆支承的剪切刚度DCI;②计算传力杆自身剪切弹簧刚度C;③计算DCI与C的组合剪切刚度D;④计算接缝单位长度的刚度q。

$$DCI = \frac{4\beta^3}{(2 + \beta\omega)} E_d I_{d\circ} \quad (14)$$

$$\beta = \left( \frac{Kd}{4E_d I_d} \right)^{1/4} \circ \quad (15)$$

$$C = \frac{E_d I_d}{\omega^3 (1 + \phi)} \circ \quad (16)$$

$$\phi = \frac{12E_d I_d}{G_d A_d \omega^2} \circ \quad (17)$$

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \circ \quad (18)$$

$$D = \frac{1}{\frac{1}{DCI} + \frac{1}{12C}} \circ \quad (19)$$

$$q = \frac{D}{s} \circ \quad (20)$$

式中:E<sub>d</sub>为水泥混凝土板间传力杆弹性模量,MPa;I<sub>d</sub>为水泥混凝土板间传力杆截面惯性矩,m<sup>4</sup>;K为混凝土对传力杆的支承模量,MN/m<sup>3</sup>;d为水泥混凝土板间传力杆直径,m;β为传力杆-混凝土的相对刚度,m<sup>-1</sup>;ω为接缝缝隙宽度,m;G<sub>d</sub>为水泥混凝土板间传力杆剪切模量,MPa;A<sub>d</sub>为水泥混凝土板间传力杆有效截面面积,m<sup>2</sup>; $\mu_d$ 为水泥混凝土板间传力杆泊松比;s为水泥混凝土板间传力杆间距,m。

### 2) 弹簧刚度计算

参考相关规范和资料<sup>[18]</sup>, 取杆的弹性模量为 200 GPa, 泊松比为 0.3, 传力杆的直径取 32 mm, 间距为 0.3 m, 接缝宽度为 10 mm, 根据式(14)~(20), 计算结果如表 7 所示。

表 7 接缝刚度计算过程表

Table 7 The calculation process of the joint stiffness

名称	单位	传力杆系数
$d$	m	0.032
$E_d$	MPa	2E5
$I_d$	$\text{m}^4$	$5.15 \times 10^{-8}$
$K_d$	MPa	$4.07 \times 10^5$
$\omega$	m	0.01
$\beta$	$\text{m}^{-1}$	23.71
DCI	$\text{MN} \times \text{m}^{-1}$	245.45
$\mu_d$	—	0.30
$G_d$	MPa	76 923.08
$A_d$	$\text{m}^2$	$7.23 \times 10^{-4}$
$\Phi$	—	22.19
$C$	$\text{MN} \times \text{m}^{-1}$	443.75
$D$	$\text{MN} \times \text{m}^{-1}$	234.63
$s$	m	0.30
$q$	$\text{MN} \times \text{m}^{-2}$	782.13

### 3) 弹簧模拟接缝传荷算法

在网格划分后, 给出各个节点位置的弹簧刚度, 并且设置弹簧, 工作量较大。采用 Python 开发了弹簧模拟接缝传荷算法, 批量写入 inp 文件, 完成水泥混凝土板之间接缝传荷模拟。

## 4.2 不同轴载作用下疲劳裂缝寿命研究

路面在 100、160、220 kN 轴载作用下, 疲劳裂缝扩展规律如图 13 所示。

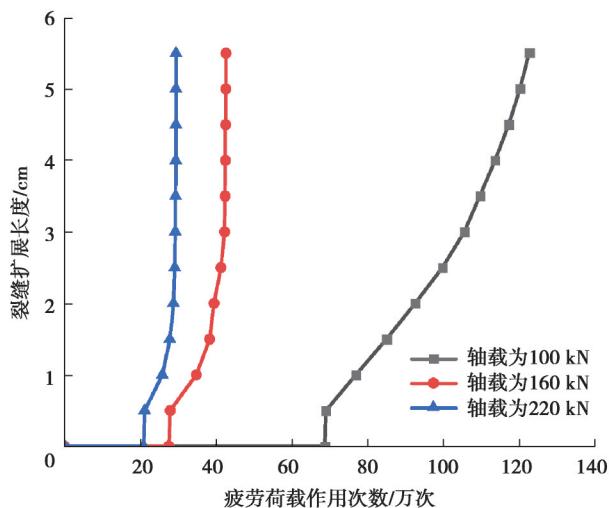


图 13 不同轴载下疲劳裂缝扩展规律

Fig. 13 Fatigue crack propagation pattern under different axle loads

1)有限元模型中,以increment作为每一次荷载步的运行时间,以steptime作为总运行时间;文中编制DLOAD子程序,将程序中运行时间与疲劳荷载作用次数一一对应;模型网格尺寸为0.5 cm,裂缝每次都必须起裂1个网格,裂缝每次扩展0.5 cm。以轴载100 kN,车速60 km/h模型为例,运算时间steptime为8.269 2 s时,对应疲劳荷载作用次数为 $8.269 2/0.12=68.91$ 万次,此时未达到起裂1个网格的标准;下一步increment为0.026 4 s,此时,steptime为 $8.269 2+0.026 4=8.295 6$  s,对应疲劳荷载作用次数为 $8.295 6/0.12=69.13$ 万次,达到起裂标准,裂缝起裂0.5 cm;从而解释了图中裂缝从0扩展到0.5 cm时,所存在的接近垂直线段(MMLS3模拟结果图中也存在此现象,因为荷载作用次数相差不大,因此并不直观)。将最接近裂缝扩展但尚未扩展的次数记为疲劳裂缝起裂次数,即轴载100 kN,车速60 km/h模型的起裂次数为68.91万次。

2)分析不同轴载作用下的起裂次数可知,轴载越大,路面起裂速度越快,起裂次数越小。100 kN、160 kN、220 kN标准轴载对应的路面起裂次数分别为68.91万次、27.61万次、20.98万次。

3)分析不同轴载作用下的疲劳损伤-断裂全过程可知,轴载越大,路面裂缝扩展速度越快,越容易失效。100 kN、160 kN、220 kN标准轴载对应的路面断裂失效次数分别为122.93万次、42.71万次、24.49万次;裂缝扩展阶段的寿命分别占路面全寿命周期的43.94%、35.34%、28.82%;且轴载越大,裂缝扩展速率到后期越接近垂直扩展。说明超载对路面稳定性影响更大,显著增加了裂缝的扩展速度,使得路面更容易起裂失稳破坏。

#### 4.3 不同车速作用下疲劳裂缝寿命研究

路面在40 km/h、60 km/h、100 km/h作用下,疲劳裂缝扩展规律如图14所示。

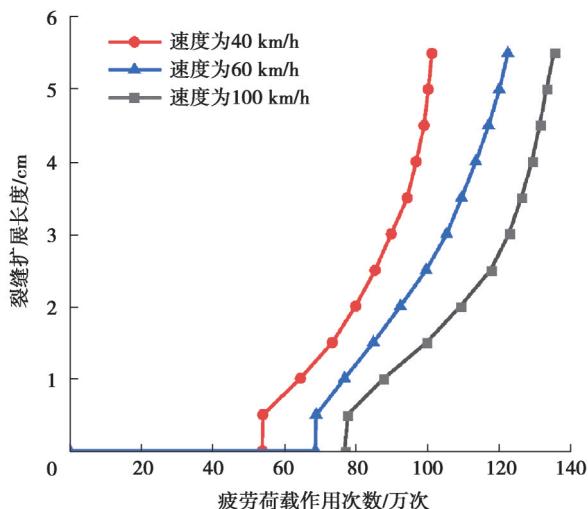


图14 不同速度下疲劳裂缝扩展规律

Fig. 14 Fatigue crack propagation pattern at different speeds

1)分析不同速度下的起裂次数可知,速度越小,路面起裂速度越快,起裂次数越小。40 km/h、60 km/h、100 km/h对应的路面起裂次数分别为54.03万次、68.91万次、77.22万次。

2)分析不同速度作用下的疲劳损伤-断裂全过程可知,速度越小,路面全寿命周期越短。40 km/h、60 km/h、100 km/h对应的路面断裂失效次数分别为101.62万次、122.93万次、135.77万次。裂缝扩展阶段的寿命分别占路面全寿命周期的46.83%、43.94%、43.13%;说明行驶速度越小,路面扩展速率越快,但不同速度下的裂缝扩展速度相差不大,远没有超载对路面裂缝扩展速度的影响大。

#### 4.4 复合式路面疲劳损伤分析

分析轴载100kN,车速60 km/h模型路面内部材料累积损伤及剩余强度的变化规律。文中编制的UMAT子程序可输出模型内任意单元节点处的累积损伤和剩余强度,提取沥青层底接缝处正上方0.5 cm处单元节点的累积损伤和剩余强度,剩余强度云图如图15所示,路面累积损伤及剩余强度变化规律如图16所示。

1)由剩余强度云图可直观得到,出现裂缝的单元节点处剩余强度极小接近于0;为防止程序不收敛,在

UMAT中设定剩余强度小于0.000 1 MPa时,材料失效;裂缝扩展至顶面时,周围单元的剩余强度均接近0,即周围单元均已失效,路面彻底断裂。

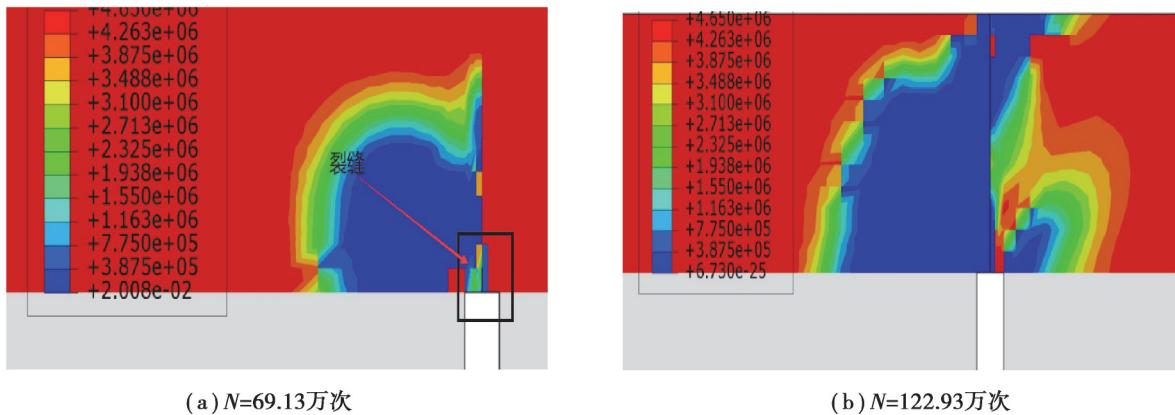


图 15 剩余强度云图

Fig. 15 Remaining intensity cloud map

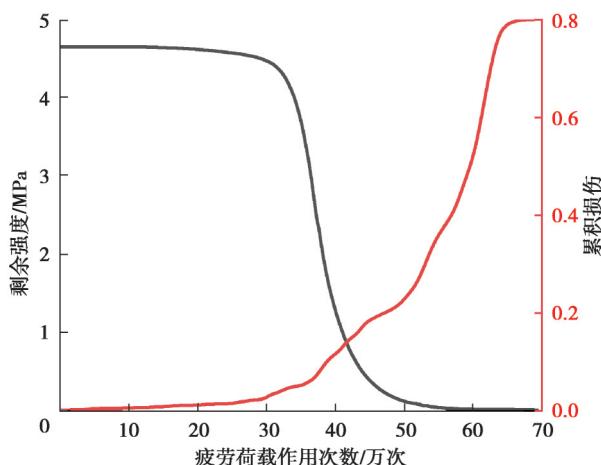


图 16 路面累积损伤及剩余强度变化规律

Fig. 16 Cumulative damage and residual strength change pattern of road surface

2)宏观分析得到路面起裂次数为68.91万次,在下一个increment,即荷载作用69.13万次时起裂0.5 cm。从疲劳累积损伤角度分析,荷载作用64.68万次时,疲劳累积损伤为0.798;荷载作用68.91万次时,疲劳累积损伤为0.8;进入塑性阶段。此处需说明:UMAT程序规定当某一个increment运算中,累积损伤大于0.8时,仍记为0.8,并判定该单元节点进入塑性阶段,从而解释了累积损伤曲线末端趋于平稳,此时实际疲劳累积损伤大于0.8。

3)随着荷载作用次数的增加,疲劳损伤的累积速度逐渐增加,剩余强度逐渐减小;损伤累积的速度与剩余强度降低的程度相关。

- ①荷载作用33.45万次时,剩余强度开始大幅度衰减,疲劳损伤开始迅速累积;
- ②最终在68.91万次时,累积损伤达到0.8,节点进入塑性损伤阶段,此时剩余强度为0.000136518MPa;
- ③此后节点进入塑性损伤阶段,并最终在作用69.13万次时,节点彻底失效,失去了承载能力,生成裂缝。
- 4)由上述分析可知,单元节点进入塑性累积阶段后,会迅速失效;这是因为UMAT设定疲劳累积损伤达到0.8后进入塑性阶段,材料剩余强度已经衰减至极其接近门槛值0.000 1 MPa;因此,塑性阶段的荷载作用次数很少,基本上会在下一个increment内失效。此后,相当于沥青层底接缝处正上方0.5 cm处单元节点失效删除,不再受力;因此,该节点上方的单元(即沥青层底接缝处正上方1 cm处)会承受更大的主应力,进而导致剩余强度降低速度增大、疲劳损伤累积速度增加,更快达到0.8进入塑性阶段之后失效删除;进入下一个

单元节点累积损伤-失效的循环。综上所述,文中从疲劳损伤角度阐述了路面起裂后裂缝扩展速度越来越快的原理。

#### 4.5 复合式路面整体结构性能衰变研究

分析轴载 100 kN,车速 60 km/h 模型路面整体结构性能的变化规律,以路表弯沉值作为路面整体结构性能的体现,研究路表弯沉值与循环荷载作用次数的关系。提取路面中心点处路表弯沉值变化规律如图 17 所示。

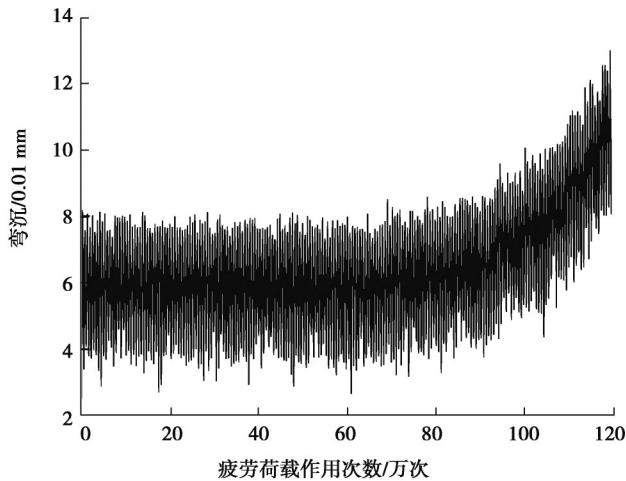


图 17 路表弯沉值变化规律

Fig. 17 Variation pattern of road surface deflection value

1)路面受到移动循环荷载作用,路面中心点处的路表弯沉值起伏不定;因数据量过大,弯沉值过于密集,较小弯沉值在图中以阴影形式体现。

2)随着荷载作用次数的增加,弯沉值呈现整体上移的趋势。因为疲劳荷载作用次数增加,路面结构内各个单元节点的剩余强度都在折减,路面整体性能衰减,体现为路表弯沉值逐渐增大。

3)路面起裂前,路表最大弯沉值为 9.42(0.01 mm);路面彻底断裂失效后,路表最大弯沉值为 13.76(0.01 mm);路表弯沉值增加了 46%。

## 5 结 论

采用 Python 开发弹簧模拟接缝传荷算法,完成水泥混凝土板之间接缝传荷模拟。编写 DLOAD+UMAT+UDMGINI+XFEM 程序,实现了循环荷载作用下复合式路面疲劳损伤与断裂的全过程模拟,得到了反射裂缝扩展速率、路面内部材料累积损伤及剩余强度、路表弯沉值 4 个指标在循环荷载作用下的退化规律。主要结论如下:

1)采用 Python 开发弹簧模拟接缝传荷算法,提出设置三向剪切弹簧单元模拟接缝处的传荷作用,采用理论法计算接缝刚度为  $782.13 \text{ MN} \times \text{m}^{-2}$ 。

2)编写 DLOAD+UMAT+UDMGINI+XFEM 程序实现移动循环荷载作用下复合式路面疲劳损伤与断裂的全过程模拟。结果表明,100 kN、160 kN、220 kN 标准轴载对应的路面起裂次数分别为 68.91 万次、27.61 万次、20.98 万次;路面断裂失效次数分别为 122.93 万次、42.71 万次、24.49 万次。 $40 \text{ km/h}$ 、 $60 \text{ km/h}$ 、 $100 \text{ km/h}$  对应的路面起裂次数分别为 54.03 万次、68.91 万次、77.22 万次;对应的路面断裂失效次数分别为 101.62 万次、122.93 万次、135.77 万次。结果表明,行驶速度越小,路面扩展速率越快,但不同速度下的裂缝扩展速度相差不大,远没有超载对路面裂缝扩展速度的影响大。

## 参考文献

- [1] Fang N R, Li H, Li Q Q, et al. Study on asphalt layer of composite pavement temperature shrinkage stress considering stress

- relaxation[J]. Materials and Structures, 2021, 54(1): 32.
- [2] Diyar B. Three dimensional finite element analysis to evaluate reflective cracking potential in asphalt concrete overlays[D]. Chicago: university of Illinois, 2002.
- [3] Cho Y H , Liu C , Dossey T , et al. Asphalt overlay design methods for rigid pavements considering rutting reflection cracking and fatigue cracking[R]. The University of Texas at Austin October, 1998: 11-98.
- [4] Monismith C L, Coetzee N F. Reflection cracking: analyses, laboratory, study, and design considerations[J]. Proceedings of AAPT, 1980, 49: 78-82.
- [5] 周刚, 李汝凯, 王火明, 等. 经编复合聚酯玻纤布防反射裂缝性能试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 16-22.  
Zhou G, Li R K, Wang H M, et al. Test on performance of reflective cracking resistance of warp knitting fiberglass-polyester paving mat[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2): 16-22. (in Chinese)
- [6] 张倩倩, 吴德芬, 何文, 等. 接缝修补材料对复合式路面AC层抵抗反射裂缝的试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016(47): 136-142.  
Zhang Q Q, Wu D F, He W, et al. Experimental research on reflection-crack resistance of composite pavement with different joint repair materials[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016(47): 136-142. (in Chinese)
- [7] 李汝凯. 重载条件下复合式路面防反技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.  
Li R K. Study on technology of reflective cracking resistance of composite pavement under heavy load conditions[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [8] 丛林, 于露, 魏强. 沥青路面防水抗裂功能层缓解反射裂缝的数值分析[J]. 公路工程, 2014, 39(4): 86-89.  
Cong L, Yu L, Wei Q. Numerical analysis of anti-crack layer reflect-crack alleviation in asphalt pavement[J]. Highway Engineering, 2014, 39(4): 86-89. (in Chinese)
- [9] Li H, Fang N, Wang X, et al. Evaluation of the coordination of structural layers in the design of asphalt pavement[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3178.
- [10] Wang X C, Fang N R, Ye H Y, et al. Fatigue damage analysis of cement-stabilized base under construction loading[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2263.
- [11] 房娜仁, 胡士清, 王选仓, 等. 施工期水泥稳定碎石底基层的疲劳损伤分析[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2021, 38(1): 61-68.  
Fang N R, Hu S Q, Wang X C, et al. Fatigue damage analysis of cement stabilized sub-base during construction period[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2021, 38(1): 61-68. (in Chinese)
- [12] 孙志林, 黄晓明. 基于非线性疲劳损伤特性的沥青路面形变规律[J]. 公路交通科技, 2012, 29(9): 13-18.  
Sun Z L, Huang X M. Deformation regularity of asphalt pavement based on nonlinear fatigue damage characteristics[J]. Highway and Transportation Science and Technology, 2012, 29(9): 13-18. (in Chinese)
- [13] 金光来, 黄晓明, 梁彦龙. 两种不同模式下的沥青混合料断裂过程研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(6): 120-126.  
Jin G L, Huang X M, Liang Y L. A numerical analysis of the fracture behavior of asphalt concrete under two different modes [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(6): 120-126. (in Chinese)
- [14] Fang N , Wang X , Ye H , et al. Study on fatigue characteristics and interlayer design method of waterproof cohesive bridge deck layer[J]. Applied Sciences, 2019, 9(10): 2090.
- [15] 吕松涛, 刘超超, 屈芳婷, 等. 沥青混合料疲劳性能试验与表征方法综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 67-75.  
Lyu S T, Liu C C, Qu F T, et al. Test methods and characterization of fatigue performance of asphalt mixture: a review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 67-75. (in Chinese)
- [16] 叶奋, 刘嘉良, 王泽, 等. 基于MMLS3和四点弯曲试验的沥青混合料疲劳性能研究[J]. 交通科技, 2020(5): 116-120.  
Ye F, Liu J L, Wang Z, et al. Research on fatigue performance of asphalt mixture based on MMLS3 and four-point bending test [J]. Transportation Science and Technology, 2020(5): 116-120. (in Chinese)
- [17] 李晶晶, 张擎. 考虑冲刷脱空的水泥路面接缝错台预估研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(2): 159-164.  
Li J J, Zhang Q. Study on faulting of concrete pavement considering erosion and void[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2017, 39(2): 159-164. (in Chinese)
- [18] 谭悦, 凌建明, 袁捷, 等. 脱空对机场水泥混凝土道面荷载应力的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 552-556, 568.  
Tan Y, Ling J M, Yuan J, et al. Influence of voids to loading stresses of airport cement concrete pavement[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(4): 552-556, 568. (in Chinese)