

# 平整度水平对沥青路面疲劳破坏的影响

胡朋<sup>1</sup>, 迟连阳<sup>1\*</sup>, 王琨<sup>1</sup>, 杜海伦<sup>2</sup>, 管清泳<sup>2</sup>

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东舜都路桥工程有限公司, 山东 潍坊 262200

**摘要:**为分析路面平整度引发的动荷载对沥青路面的影响,建立五自由度车辆弹性振动模型,计算车辆在不同行驶速度下的动荷载系数;建立路面结构模型,采用动态弹性模量表征材料的黏弹性特征,以动荷载为输入变量,通过实例分析特定沥青路面结构的动态响应,计算疲劳开裂次数,以静荷载作用下的疲劳寿命为基准计算疲劳寿命比。结果表明:沥青混凝土 AC-13 的动态弹性模量随大气温度的升高而减小,随加载频率的增大而增大;加载频率对水泥稳定碎石和石灰稳定土的动态弹性模量影响较小,水泥稳定碎石和石灰稳定土的应变越大,动态弹性模量越小;大气温度和路面平整度引发的动荷载对路面疲劳开裂寿命有较大影响,国际平整度指数不大于 3.4 m/km 时,动荷载作用下的路面疲劳破坏小于静荷载;国际平整度指数大于 3.4 m/km 时,动荷载作用下的路面疲劳破坏大于静荷载。

**关键词:**沥青路面;路面平整度;动荷载;路面响应;疲劳寿命

**中图分类号:**U416.01

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2023)03-0072-09

**引用格式:**胡朋,迟连阳,王琨,等.平整度水平对沥青路面疲劳破坏的影响[J].山东交通学院学报,2023,31(3):72-80.

HU PENG, CHI Lianyang, WANG Kun, et al. Influence of surface evenness level on fatigue failure of asphalt pavement[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(3): 72-80.

## 0 引言

车辆在行驶时产生的动荷载一般高于静荷载,动荷载长期重复冲击路面,路面各结构层易受损伤。在理论分析和现场试验研究动荷载对路面结构的影响方面,Wu等<sup>[1]</sup>考虑车辆与路面相互作用,构建3D有限元模型分析水泥混凝土路面对动荷载的响应,结果表明动荷载作用下路面结构产生的应变比静荷载大18%;牛玺荣等<sup>[2]</sup>认为动荷载作用下的路面动态响应通常高于准静态荷载,尤其是在高速和低温条件下;董泽蛟等<sup>[3]</sup>认为在沥青路面的疲劳分析中考虑动态荷载时,道路的使用寿命将急剧下降。现场研究表明,车辆行驶速度(车速)对路面应变响应有较大影响:曹明明等<sup>[4]</sup>认为路面结构内部产生的应变随车速的增大显著减小,车速由36 km/h增至108 km/h,路面厚度较小时,竖向应变减小23%;路面厚度较大时,竖向应变减小33%。刘凯等<sup>[5]</sup>采用有限元法模拟沥青路面的动态响应,发现竖向应力随车速的增大而减小。大多数动荷载作用下的路面响应中,水平应变和垂直应变均减小,但研究时仅考虑车辆荷载作用时间,未考虑路面平整度引发的动荷载<sup>[6]</sup>。进行理论分析时,主要是将整车简化为多自由度振动模型,考虑路面平整度计算动态荷载<sup>[7]</sup>;现场试验时,通常将加速度计置于轮轴中心和车厢底部,采集车辆轮轴和车厢底部的加速度计算动荷载<sup>[8]</sup>。采用有限元数值分析方法可较好模拟路面结构的动态响应<sup>[9]</sup>,但难

收稿日期:2022-11-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600100)

第一作者简介:胡朋(1976—),男,山东沂南人,教授,工学博士,主要研究方向为路基路面结构,E-mail:204021@sdjtu.edu.cn。

\*通信作者简介:迟连阳(1999—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为路基路面结构,E-mail:1621679917@qq.com。

以模拟路面平整度引发的随机动荷载。

本文建立五自由度车辆模型,计算不同车速和平整度水平下的车辆动荷载系数,将动荷载施加到特定路面结构上,分析不同荷载频率下路面各结构层材料的动态弹性模量,计算路面的力学性能,分析平整度水平对沥青路面疲劳开裂的影响,以期路面平整度确定合理的技术标准。

## 1 车辆动荷载计算模型

### 1.1 路面平整度功率谱密度

路面平整度功率谱密度是路面平整度的常用指标,表示路面标高在不同空间频率下的能量密度,频域中的路面平整度功率谱密度<sup>[10]</sup>

$$G_x(f_t) = G_x(n_0) (n/n_0)^{-2/v} = G_x(n_0) n_0^2 v / f^2,$$

式中:  $f_t$  为频率, Hz;  $v$  为车速, m/s;  $n$  为空间频率, 1/m,  $n = 1/\lambda$ , 其中  $\lambda$  为波长, m;  $f_t = vn$ ;  $n_0$  为参考空间频率,  $n_0 = 0.1/\text{m}$ ;  $G_x(n_0)$  为路面不平整度系数, 为  $n_0$  下的路面平整度功率谱密度。

根据  $G_x(n_0)$  将路面平整度分为 8 个等级。国际平整度指数  $E_{\text{IRI}}$  反映沥青路面的行驶质量水平,  $G_x(n_0)$  与车辆动荷载密切相关, 现阶段  $E_{\text{IRI}}$  与  $G_x(n_0)$  的关系为  $E_{\text{IRI}} = 0.6 \sqrt{G_x(n_0)}$ <sup>[11]</sup>。

4 个路面平整度等级的  $G_x(n_0)$  与  $E_{\text{IRI}}$  见表 1。

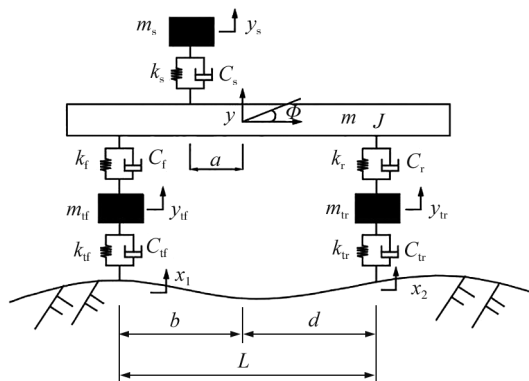
等级为 A、B、C、D 的路面质量依次下降。我国道路平整度等级多为 A、B 级, A 级路面一般为机场跑道、高速公路及新路面, B 级路面一般为老路面, C 级路面多为经常养护的无铺面路和已损坏的路面, D 级路面一般为不平整的无铺面路。

### 1.2 车辆振动模型和动荷载系数

选择多自由度振动模型计算车辆的动荷载。考虑车辆的转动和仰俯, 将两轴车辆的 1/2 简化为五自由度振动模型, 假定弹簧刚度和阻尼系数均为线性, 如图 1 所示。

表 1 不同路面平整度等级的  $G_x(n_0)$  与  $E_{\text{IRI}}$

路面平整度等级	$G_x(n_0)$		$G_x(n_0)$ 的几何平均值	$E_{\text{IRI}} / (\text{m} \cdot \text{km}^{-1})$
	低限	高限		
A	8	32	16	1.7~3.4
B	32	128	64	>3.4~6.8
C	128	512	256	>6.8~13.6
D	512	2 048	1 024	>13.6~27.2



$k_{if}$ —前轮胎刚度系数;  $k_{ir}$ —后轮胎刚度系数;  $k_f$ —前悬架刚度系数;  $k_r$ —后悬架刚度系数;  $k_s$ —座椅刚度系数;  $C_s$ —座椅阻尼系数;  $C_{if}$ —前轮胎阻尼系数;  $C_{ir}$ —后轮胎阻尼系数;  $C_f$ —前悬架阻尼系数;  $C_r$ —后悬架阻尼系数;  $m_s$ —座椅和驾驶员总质量的一半;  $m_{if}$ —前轮胎质量;  $m_{ir}$ —后轮胎质量;  $m$ —悬架和载重质量;  $J$ —悬架围绕质心的转动惯量;  $a$ —座椅中心到悬架质心的距离;  $b$ —后轮中心到悬架质心的距离;  $d$ —前轮中心到悬架质心的距离;  $L$ —前后轮中心距,  $L = b + d$ ;  $y_s$ —座椅位移;  $y_{if}$ —前轮胎位移;  $y_{ir}$ —后轮胎位移;  $y$ —悬架位移;  $x_1$ —前轮的道路位移;  $x_2$ —后轮的道路位移;  $\Phi$ —悬架围绕其质心的角。

图 1 五自由度车辆振动模型

五自由度车辆模型的悬架在座椅质心的位移为  $y - a\Phi$ , 在前悬架质心的位移为  $y - d\Phi$ , 在后悬架质心的位移为  $y + b\Phi$ 。根据牛顿第二定律,  $m_s$  的振动方程为:

$$m_s \ddot{y}_s = -k_s [y_s - (y - a\Phi)] - C_s [\dot{y}_s - (\dot{y} - a\dot{\Phi})], \quad (1)$$

$m_{if}$  的振动方程为:

$$m_{if} \ddot{y}_{if} = -k_{if} [y_{if} - (y - d\Phi)] - C_{if} [\dot{y}_{if} - (\dot{y} - d\dot{\Phi})] - k_{if} (y_{if} - x_1) - C_{if} (\dot{y}_{if} - \dot{x}_1), \quad (2)$$

$m_{ir}$  的振动方程为:

$$m_{tr}\ddot{y}_{tr} = -k_r[y_{tr} - (y + b\Phi)] - C_r[\dot{y}_{tr} - (\dot{y} + b\dot{\Phi})] - k_{tr}(y_{tr} - x_2) - C_{tr}(\dot{y}_{tr} - \dot{x}_2), \quad (3)$$

$m$  的垂向振动方程为:

$$m\ddot{y} = -k_s[y - a\Phi - y_s] - C_s(\dot{y} - a\dot{\Phi} - \dot{y}_s) - k_f(y - d\Phi - y_{if}) - C_f(\dot{y} - d\dot{\Phi} - \dot{y}_{if}) - k_r(y + b\Phi - y_{tr}) - C_r(\dot{y} + b\dot{\Phi} - \dot{y}_{tr}), \quad (4)$$

$m$  的转动方程为:

$$J\ddot{\Phi} = -ak_s[y - a\Phi - y_s] + aC_s(\dot{y} - a\dot{\Phi} - \dot{y}_s) - dk_f(y - d\Phi - y_{if}) - dC_f(\dot{y} - d\dot{\Phi} - \dot{y}_{if}) - bk_r(y + b\Phi - y_{tr}) - bC_r(\dot{y} + b\dot{\Phi} - \dot{y}_{tr}). \quad (5)$$

前轮的动荷载  $F_{df} = K_{df}(y_{if} - x_1) + C_{df}(\dot{y}_{if} - \dot{x}_1)$ , 后轮的动荷载  $F_{dr} = K_{dr}(y_{tr} - x_2) + C_{dr}(\dot{y}_{tr} - \dot{x}_2)$ , 前轮的动荷载系数

$$\mu_f = F_{df}/G,$$

式中:  $G$  为车辆静荷载,  $G = (m_{df} + m_{dr} + m + m_s)g$ 。

后轮的动荷载系数  $\mu_r = F_{dr}/G$ 。

车辆动荷载系数的功率谱密度与  $G_x(n_0)$  间的函数关系为:

$$G_{\mu/G(f)} = |H(\omega)_{\mu-x}|^2 G_x(f), \quad (6)$$

式中:  $\mu$  为动荷载系数;  $H(\omega)_{\mu-x}$  为频响函数, 由式(1)~(5)的傅里叶变换得到。

车辆正、负动荷载的概率相等, 平均动荷载为 0, 平均动荷载系数为 0, 动荷载的方差等于均方差。可采用均方差表征前后轮动荷载系数, 均方差

$$\sigma_{Fd/G}^2 = \int_0^{\infty} G_{\mu/G(f)} df = \int_0^{\infty} |H(\omega)_{\mu-x}|^2 G_x(f) df. \quad (7)$$

可采用软件 MATLAB 为计算过程编写程序。

## 2 路面结构材料的动态弹性模量

以水泥稳定碎石基层沥青路面为研究对象, 为简化计算过程, 设计特定路面结构为 6 cm 沥青面层 (AC-13)-20 cm 水泥稳定基层-30 cm 石灰土底基层。某点距车轮荷载作用点为  $10r$  ( $r$  为轮胎接触半径,  $r = 15$  cm) 时, 车辆荷载对该点几乎无影响<sup>[12]</sup>。车辆在不同  $v$  下经过此点的等效加载频率见表 2。

表 2 不同  $v$  下的等效加载频率

$v/(km \cdot h^{-1})$	137.2	109.7	54.9	27.4	11.0	5.5	2.7
等效加载频率/Hz	25.0	20.0	10.0	5.0	2.0	1.0	0.5

### 2.1 路面材料的动态弹性模量

根据文献[13]中沥青混合料动态弹性模量  $E_d$  的试验方法, 采用应变控制, 试件的应变为  $(40 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6})$ , 得到在不同大气温度和荷载频率  $f$  下沥青混凝土 AC-13 的  $E_d$ , 结果如表 3 所示。大气温度为 20.0 °C 时, 采用应变控制, 对测试样品施加半正弦波荷载, 在各级应变  $(10 \times 10^{-6} \sim 45 \times 10^{-6})$  条件下, 测量水泥稳定碎石在不同  $f$  下的  $E_d$ <sup>[14]</sup>, 结果如表 4 所示。采用与水泥稳定碎石相同的试验方法, 在大气温度为 20.0 °C 时进行石灰稳定土的  $E_d$  试验, 结果如表 5 所示。由表 3 可知: 沥青混凝土 AC-13 的  $E_d$  随大气温度的升高而减小, 随  $f$  的增大而增大。原因是大气温度升高时沥青混合料的黏性增强, 弹性减弱,  $E_d$  逐渐减小; 随  $f$  增大, 荷载作用时间缩短, 滞后现象增强,  $E_d$  增大。由表 4、5 知:  $f$  对水泥稳定碎石和石灰稳定土的  $E_d$  影响较小, 因为水泥稳定碎石和石灰稳定土属于半刚性材料, 滞后现象微弱; 水泥稳定碎石和石灰稳定土的应变越大,  $E_d$  越小。

路基土的弹性模量受多种因素影响, 包括土质类型、含水量、压实度、加载频率和围压等, 路基土的回弹模量约为 60~85 MPa<sup>[15]</sup>, 本文假设道路的路基回弹模量为 80 MPa。

表 3 不同大气温度和  $f$  下沥青混凝土 AC-13 的  $E_d$ 

大气温度/°C	$E_d$ /MPa						
	$f=25.0$ Hz	$f=20.0$ Hz	$f=10.0$ Hz	$f=5.0$ Hz	$f=2.0$ Hz	$f=1.0$ Hz	$f=0.5$ Hz
6.0	23 290	22 660	20 890	19 170	16 850	15 020	13 130
21.1	12 240	11 660	9 990	8 450	6 600	5 340	4 200
37.0	5 520	5 175	4 050	3 090	2 110	1 560	1 180
54.0	1 630	1 440	1 040	760	500	400	330

表 4 不同应变和  $f$  下水泥稳定碎石的  $E_d$ 

应变/ $10^{-6}$	$E_d$ /MPa						
	$f=25.0$ Hz	$f=20.0$ Hz	$f=10.0$ Hz	$f=5.0$ Hz	$f=2.0$ Hz	$f=1.0$ Hz	$f=0.5$ Hz
10	22 390	22 770	22 510	22 640	22 310	22 070	21 870
15	21 960	21 970	21 850	21 690	21 640	21 610	21 470
20	21 430	21 450	21 400	21 170	21 140	21 110	20 960
25	21 130	21 030	21 010	20 980	20 880	20 770	20 680
30	20 980	20 950	20 810	20 710	20 680	20 620	20 510
35	20 690	20 780	20 580	20 530	20 480	20 440	20 300
40	20 650	20 560	20 450	20 380	20 310	20 270	20 320
45	20 490	20 380	20 310	20 210	20 170	20 120	20 040

表 5 不同应变和  $f$  下石灰稳定土的  $E_d$ 

应变/ $10^{-6}$	$E_d$ /MPa						
	$f=25.0$ Hz	$f=20.0$ Hz	$f=10.0$ Hz	$f=5.0$ Hz	$f=2.0$ Hz	$f=1.0$ Hz	$f=0.5$ Hz
20	3 000	2 990	2 950	2 920	2 870	2 840	2 810
40	2 920	2 910	2 860	2 830	2 780	2 750	2 740
80	2 720	2 710	2 670	2 640	2 600	2 570	2 550
100	2 690	2 670	2 630	2 600	2 560	2 530	2 510

## 2.2 沥青路面疲劳开裂预测模型

疲劳寿命荷载作用次数可表示为<sup>[16]</sup>:

$$N_f = 0.00432C(1/\varepsilon_r)^{3.291}(1/\{S_m\}_{\text{MPa}})^{0.854},$$

式中:  $C$  为沥青混合料调整系数,  $C = 10^M$ ,  $M = 4.84[V_b/(V_a + V_b) - 0.69]$ , 其中  $V_b$  为有效沥青质量分数,  $V_a$  为空隙率;  $\varepsilon_r$  为弯拉应变;  $S_m$  为沥青混合料的劲度模量。

## 3 计算实例

### 3.1 动荷载系数

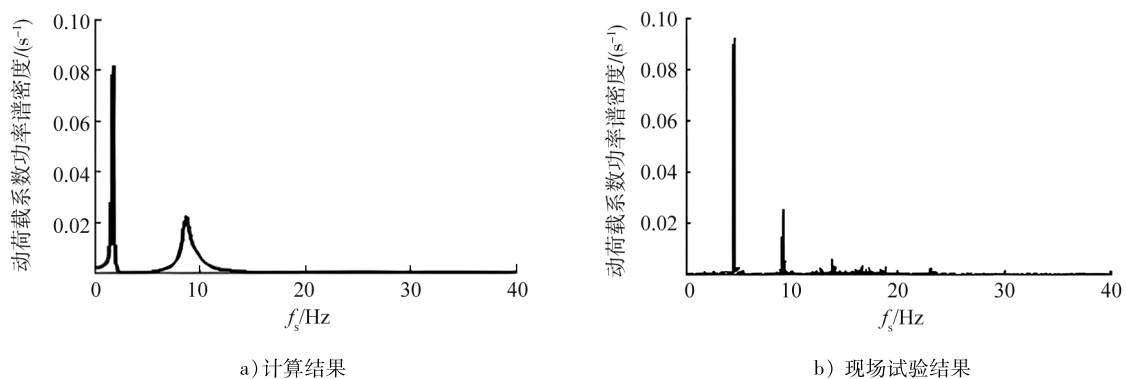
以重型货车为代表车辆,其参数如表 6 所示<sup>[8]</sup>。采用 MATLAB 编制程序,计算得到动荷载系数的功率谱密度与路面激励频率  $f_s$  的理论关系,如图 2a) 所示。采用加速度传感器进行现场试验,采集加速度

数据,计算动荷载系数,得到动荷载系数的功率谱密度与 $f_s$ 的关系如图2b)所示。由图2可知:理论分析和现场试验得到的动荷载系数的功率谱密度与 $f_s$ 的关系曲线形状几乎相同,均约在5、10 Hz时出现2个峰值。

表6 重型货车的参数

$m_s/\text{kg}$	$m_{it}/\text{kg}$	$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$k_f/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_r/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$C_s/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$C_{it}/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$C_{ir}/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$b/\text{m}$	$L/\text{m}$
100	780	37 430	525	1 051	1.7	2.1	4.2	2	4.5
$m_{it}/\text{kg}$	$m/\text{kg}$	$k_s/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_{it}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_{ir}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$C_f/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$C_r/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$a/\text{m}$	$d/\text{m}$	$\Delta t/\text{s}$
635	$1.42\times 10^4$	2.1	1 646	3 292	5.6	12.6	1.5	2.5	4.5

注: $\Delta t$ 为前、后轮经过同一地点的时间差。

图2 动荷载系数功率谱密度与 $f_s$ 的关系曲线

由式(7)得到动荷载系数的均方差,可计算得到平均动荷载系数,前轮动荷载较小,可只考虑后轮动荷载,结果如表7所示。由表7可知:动荷载系数随车速和 $E_{IRI}$ 的增大而增大。

表7 车辆的动荷载系数

路面平整度等级	$E_{IRI}/(\text{m}\cdot\text{km}^{-1})$	动荷载系数						
		$v=137.2\text{ km/h}$	$v=109.7\text{ km/h}$	$v=54.9\text{ km/h}$	$v=27.4\text{ km/h}$	$v=11.0\text{ km/h}$	$v=5.5\text{ km/h}$	$v=2.7\text{ km/h}$
A	1.7~3.4	0.251	0.214	0.179	0.165	0.111	0.084	0.065
B	>3.4~6.8	0.502	0.428	0.354	0.330	0.221	0.167	0.131
C	>6.8~-13.6	1.004	0.856	0.714	0.660	0.441	0.334	0.261
D	>13.6~27.2	2.008	1.702	1.428	1.321	0.882	0.667	0.522

刘祥银<sup>[17]</sup>通过现场试验获得B级路面的动荷载系数,发现车速由20 km/h增至80 km/h时,动荷载系数由0.050增至0.350;吕彭民等<sup>[18]</sup>采用四自由度模型计算动荷载系数,发现车速为30 m/s时,A级路面上的动荷载系数约为0.300,B级路面上约为0.400,C级路面上约为0.800。以上计算结果和本文计算结果基本一致,验证了计算结果的准确性。

### 3.2 计算结果

在建立的路面结构上施加荷载 $G'=G(1+\mu)$ ,其中 $\mu$ 为动荷载系数。各路面结构材料的 $E_d$ 如表3~5所示。假设路基的回弹模量为80 MPa,根据文献[19],基层和底基层的 $E_d$ 取表4、5中 $E_d$ 的中值。

#### 3.2.1 下面层层底应变

大气温度对沥青路面材料的路用性能有较大影响,根据不同大气温度选取沥青路面材料的参数,如 $E_d$ 和泊松比等,计算路面结构响应。以大气温度为21.1℃为例,路面平整度等级不同时,轮迹带和轮系中心下面层层底的水平拉应变和竖向压应变如图3所示。

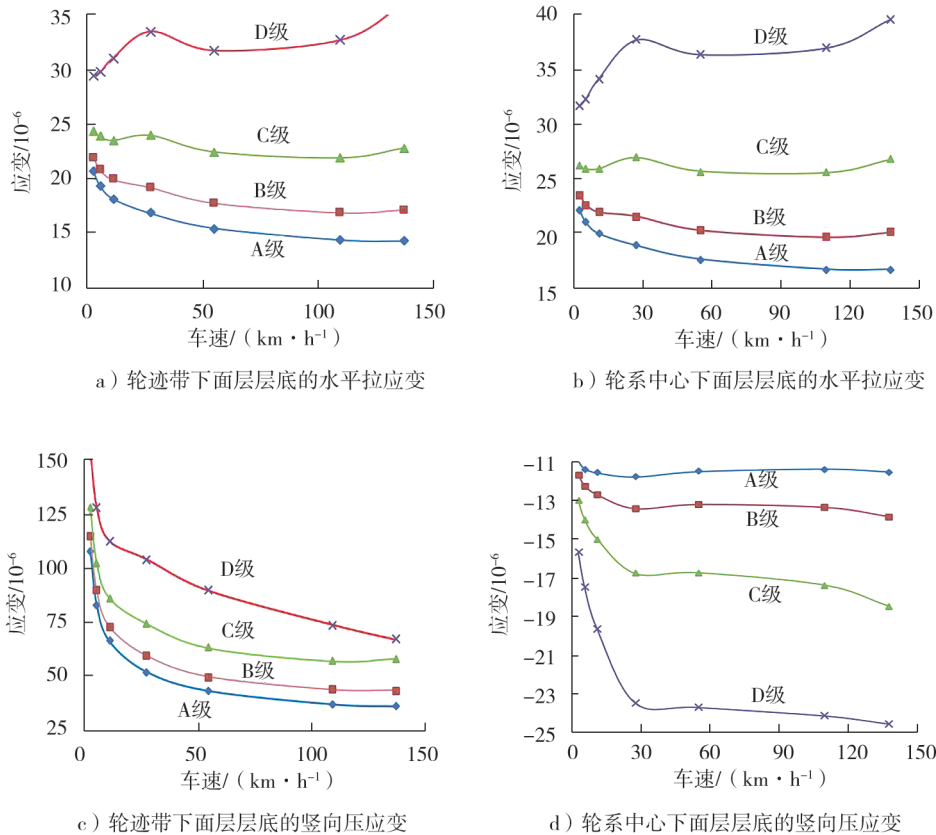


图3 轮迹带和轮系中心下面层层底的应变曲线

由图3a)、b)可知:A、B、C级路面的轮迹带和轮系中心下面层层底的水平拉应变随车速的增大而减小,D级路面的水平拉应变整体呈增大趋势。原因是A、B、C级路面较平整,动荷载随车速的增大而增大,动荷载作用时间缩短,动荷载增大的影响小于荷载作用时间缩短;D级路面不平整,动荷载作用时间缩短造成的影响小于动荷载增大。

由图3c)、d)可知:轮迹带下路面直接受车辆荷载作用,随车速的增大,路面竖向压应变减小;轮系中心下,车辆荷载没有直接作用在路面,受沥青材料的黏滞性影响,在车速较低时,沥青材料有足够的响应时间,随车速的增大,竖向压应变快速增大,车速较高时,沥青材料响应时间不足,竖向应变缓慢增大。

### 3.2.2 疲劳开裂寿命比

一般低温条件下路面会产生温缩裂缝,较少出现车辙和疲劳开裂。高温条件下,车辙比疲劳开裂更易发生。因此本文不考虑低温( $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和高温( $54.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )2种工况。

热拌沥青混合料的平整度竣工质量要求为:高速和一级公路的  $E_{\text{IRI}} \leq 2.0\text{ m/km}$ ,其他等级公路的  $E_{\text{IRI}} \leq 4.2\text{ m/km}$ ;表面处治及贯入式公路的  $E_{\text{IRI}} \leq 7.5\text{ m/km}$ <sup>[20]</sup>。运营后,大多数新修路面的路面平整度等级下降,但一般不低于D级。分析A级、B级和C级3种路面,并以静荷载作用下的疲劳寿命为标准,得到动荷载作用下路面疲劳开裂寿命比(动荷载作用下的疲劳开裂寿命与静荷载作用下的疲劳开裂寿命之比,即动荷载作用下的疲劳开裂荷载重复次数与静荷载作用下的疲劳开裂荷载重复次数之比),如图4所示。由图4a)可知:温度为 $21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $E_{\text{IRI}} \leq 6.8\text{ m/km}$ 时,动荷载作用下的疲劳开裂寿命比高于静荷载,说明动荷载引起的破坏程度低于静荷载; $E_{\text{IRI}} > 6.8\text{ m/km}$ 时,动荷载作用下的疲劳开裂寿命比低于静荷载,说明动荷载引起的破坏程度高于静荷载。由图4b)可知:温度为 $37.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $E_{\text{IRI}} \leq 3.4\text{ m/km}$ 时,动荷载作用下的疲劳开裂寿命比高于静荷载;但在 $E_{\text{IRI}} = > 3.4 \sim 6.8\text{ m/km}$ 时,二者接近; $E_{\text{IRI}} > 6.8\text{ m/km}$ 时,动荷载作用下的疲劳开裂寿命比低于静荷载作用,说明动荷载对路面的破坏程度高于静荷载。

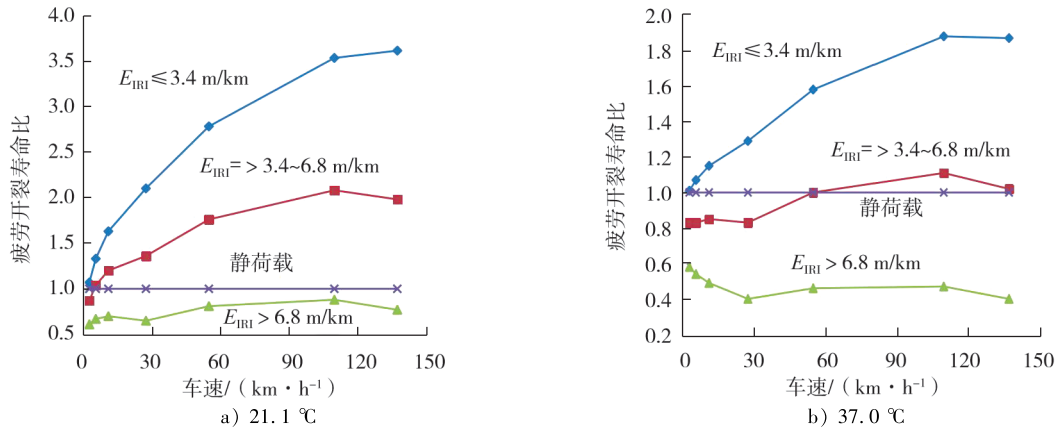


图4 不同车速、不同等级路面的疲劳开裂寿命比

因此,  $E_{IRI}$  对疲劳开裂寿命比有较大影响。路面平整度较好, 行驶车辆产生的动荷载较小, 车辆高速行驶对路面的疲劳开裂寿命比影响也较小。大气温度对水平应变和疲劳开裂也有一定影响, 随大气温度的升高,  $E_d$  减小, 但动荷载仍增大, 在一定温度范围内, 疲劳破坏程度增大。应结合平整度和大气温度等因素综合考虑动荷载对沥青路面疲劳开裂的影响。

## 4 结论

为分析路面平整度对沥青路面的影响, 计算不同平整度等级路面的国际平整度指数; 建立五自由度车辆振动模型, 计算车辆动荷载系数; 考虑大气温度和车辆动荷载频率的影响, 分析路面各结构层材料的动态弹性模量; 将动荷载施加到路面结构上, 计算路面结构面层层底的应变和路面疲劳开裂寿命比。

研究表明: 沥青混凝土 AC-13 的动态弹性模量随大气温度的升高而减小, 随加载频率的增大而增大; 加载频率对水泥稳定碎石和石灰稳定土的动态弹性模量影响较小; 水泥稳定碎石和石灰稳定土的应变越大, 其动态弹性模量越小; 动荷载随车速的增大而增大; 路面不平度及车辆参数对动荷载也有较大影响; 大气温度和平整度水平对路面底部的水平应变和疲劳开裂寿命比都有一定影响, 国际平整度指数不大于 3.4 m/km 时, 动荷载作用下的路面疲劳破坏小于静荷载作用; 国际平整度指数大于 3.4 m/km 时, 动荷载作用下的路面疲劳破坏大于静荷载作用。

本文仅采用特定路面结构作为计算模型, 下一步可采用多种路面结构作为计算模型, 同时考虑路面厚度对路面结构的响应。

### 参考文献:

- [1] WU C P, SHEN P A. Dynamic analysis of concrete pavements subjected to moving loads[J]. Journal of transportation engineering, 1996, 122(5):367-373.
- [2] 牛玺荣, 韩萍, 张晓燕. 车轮荷载下路基和基底竖向应力计算[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(1):26-30. NIU Xirong, HAN Ping, ZHAN Xiaoyan. Calculation of vertical stress in subgrade and foundation base under wheel load [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2011, 31(1):26-30.
- [3] 董泽蛟, 谭忆秋. 沥青路面动力响应研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [4] 曹明明, 黄晚清, 吴志勇, 等. 混合式基层沥青路面动态响应测试结果特征分析[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2019, 38(2):223-228. CAO Mingming, HUANG Wanqing, WU Zhiyong, et al. Feature analysis of dynamic response test results of mixed base asphalt pavement[J]. Journal of Chengdu University(Natural Science Edition), 2019, 38(2):223-228.
- [5] 刘凯, 徐晓美, 张磊, 等. 动态荷载作用下半刚性沥青路面动力响应研究[J]. 森林工程, 2019, 35(2):82-86. LIU Kai, XU Xiaomei, ZHANG Lei, et al. Research on dynamic response of semi-rigid asphalt pavement under dynamic

- load[J]. *Forest Engineering*, 2019,35(2):82-86.
- [6] 艾长发,肖川,曾杰,等. 沥青路面动应变响应及其动荷载作用等效换算[J]. *土木工程学报*,2017,50(1):123-132.  
AI Changfa, XIAO Chuan, ZENG Jie, et al. Dynamic strain response of asphalt pavement and equivalent conversion of load effects[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017,50(1):123-132.
- [7] 李金辉,何杰,李旭宏. 车辆随机及移动荷载作用下路面动态响应[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2015,35(2):38-45.  
LI Jinhui, HE Jie, LI Xuhong. Dynamic response of pavement under vehicle random load and moving constant load[J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2015,35(2):38-45.
- [8] 董泽蛟,谭忆秋,欧进萍. 三向非均布移动荷载作用下沥青路面动力响应分析[J]. *土木工程学报*, 2013,46(6):122-130.  
DONG Zejiao, TAN Yiqiu, OU Jinping. Dynamic response analysis of asphalt pavement under three-directional nonuniform moving load[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013,46(6):122-130.
- [9] 宋小金,樊亮. 移动荷载作用下沥青路面应力响应的持续时间[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*,2018,45(7):71-76.  
SONG Xiaojin, FAN Liang. Durations of stress response in asphalt pavement under moving load[J]. *Journal of Hunan University(Natural Science)*, 2018,45(7):71-76.
- [10] 中国工业机械联合会. 机械振动道路路面谱测量数据报告:GB/T 7031—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [11] 周晓青,颜利,孙立军. 国际平整度指数与路面功率谱密度相关关系研究及验证[J]. *土木工程学报*,2007,40(1):99-104.  
ZHOU Xiaoqing, YAN Li, SUN Lijun. Study and validation of the relationship between international roughness index and power spectral density[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007,40(1):99-104.
- [12] 张宏超. 路面分析与结构设计[M]. 上海:同济大学出版社,2013.
- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt(HMA):AASHTO T 342-11—2019[S]. [S. l.]:AASHTO,2019.
- [14] American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials:AASHTO T307-99—2003[S]. [S. l.]:AASHTO,2003.
- [15] LIU X, ZHANG X, WANG H, et al. Laboratory testing and analysis of dynamic and static resilient modulus of subgrade soil under various influencing factors[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 195:178-186.
- [16] 孙梦青. 沥青路面结构性能预测研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- [17] 刘祥银. 重型车辆多轮动载荷及轮胎接地特性研究[D]. 青岛:青岛大学,2016.
- [18] 吕彭民,尤晋闵,和丽梅. 路面随机不平度下车辆对路面的动载特性[J]. *交通运输工程学报*,2007, 7(6):55-58.  
LÜ Pengmin, YOU Jinmin, HE Limei. Vehicle dynamic load property resulted from road random roughness[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(6):55-58.
- [19] 张锋,冯德成,凌贤长,等. 重载汽车-路面-路基垂向耦合动力学模型[J]. *中国公路学报*,2015,28(4):1-12.  
ZHANG Feng, FENG Decheng, LING Xianzhang, et al. Vertical coupling dynamics model of heavy truck-pavement-subgrade[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015,28(4):1-12.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2017[S]. 北京:人民交通出版社,2018.

## Influence of surface evenness level on fatigue failure of asphalt pavement

*HU Peng*<sup>1</sup>, *CHI Lianyang*<sup>1\*</sup>, *WANG Kun*<sup>1</sup>, *DU Hailun*<sup>2</sup>, *GUAN Qingyong*<sup>2</sup>

1. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Shundu Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Weifang 262200, China

**Abstract:** In order to analyze the influence of dynamic load caused by surface evenness on asphalt pavement, a



five-degree-of-freedom vehicle elastic vibration model is established to calculate the dynamic load coefficient of vehicles at different driving speeds. The pavement structure model is established. The viscoelastic characteristics of the material is characterized with the dynamic elastic modulus. Dynamic load is taken as the input variable. The dynamic response of the specific asphalt pavement structure is analyzed through examples, and the fatigue cracking times are calculated. The fatigue life ratio is calculated based on the fatigue life under static load. The results show that: The dynamic elastic modulus of asphalt concrete AC-13 decreases with the increase of atmospheric temperature and increases with the increase of loading frequency; Loading frequency has little influence on dynamic elastic modulus of cement stabilized macadam and lime stabilized soil is; The greater the strain of cement stabilized macadam and lime stabilized soil is, the smaller the dynamic elastic modulus is. The dynamic load caused by atmospheric temperature and surface evenness has a great influence on the fatigue cracking life of pavement. When the international roughness index is not greater than 3.4 m/km, the fatigue failure of pavement under dynamic load is less than that under static load; When the international roughness index is greater than 3.4 m/km, the fatigue failure of pavement under dynamic load is greater than that under static load.

**Keywords:** asphalt pavement; surface evenness; dynamic load; pavement response; fatigue life

(责任编辑:王惠)

(上接第 71 页)

## Analysis and GSPN model of train fire emergency response in FAO system

*LI Yanyan*<sup>1</sup>, *ZHANG Xiaofa*<sup>2</sup>

1. Department of Urban Rail Transit and Information Engineering, Anhui Communications Vocational and Technical College, Hefei 230051, China;

2. Anhui Provincial Road Transport Management and Service Center, Hefei 230022, China

**Abstract:** In order to avoid the loss of people's lives and property due to improper disposal in case of sudden fire on unattended subway trains in the fully automatic operation (FAO) state, and to improve the emergency disposal efficiency and emergency management level of train fire under FAO system, the emergency disposal process of subway train section fire under FAO system is analyzed. A GSPN model and its isomorphic Markov chain (MC) for fire emergency response of unattended trains in FAO system are established based on Generalized Stochastic Petri net (GSPN). Combined with the operation process of subway train fire emergency drill, the system performance of the emergency treatment process model is analyzed by the empirical simulation, and the key link and the disposal time is determined. The results show that: during the rescue operation stage, the actions of rescue personnel, the arrival of passengers to the safe carriage, the arrival of trains, the completion of station disposal and the completion of rescue operations are easy to cause information congestion; The transition utilization rate of station disposal, station rescue and accident train offline is relatively high, which is the focus of emergency disposal process optimization; The relationship between the balance state of the system and the emergency response efficiency is simulated by changing the transition implementation rate of key links, the optimal transition implementation rate of key links and the total time of emergency response are determined.

**Keywords:** FAO system; train fire; emergency disposal; GSPN; MC

(责任编辑:王惠)