

随机车流作用下沥青砼铺装层疲劳可靠性分析

张建

(长沙锦程公路勘测设计院有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对沥青砼铺装层疲劳开裂因随机性较强难以预测的问题, 基于中国西南地区南溪长江大桥动态称重(WIM)统计数据, 统计不同车速、车重和行车间距的概率分布模型, 应用 Monte-Carlo 随机抽样法提取随机车流模型; 采用瞬态分析法模拟计算随机车载下沥青砼下缘弯拉应力时程曲线, 利用雨流计数法提取疲劳应力时程, 得到疲劳荷载效应概率模型; 基于 Miner 线性损伤准则对沥青铺装层的疲劳可靠性进行评估。结果表明, 车辆荷载概率分布具有多峰特征; 随机车流作用下沥青砼铺装层在服役期内的疲劳可靠度指标均大于目标可靠度指标, 具有一定的安全储备; 考虑车辆数年增长率为 2% 时, 服役期为 9.6 年时其疲劳可靠度指标小于目标疲劳可靠度指标。

关键词: 桥梁; 沥青砼铺装层; 疲劳可靠度; 随机车流

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)02-0128-04

沥青砼作为中国公路最常用的一种铺装材料, 在车辆荷载反复作用下容易产生疲劳破坏。车辆荷载具有很强的随机性, 随机车流荷载作用下沥青砼铺装层的疲劳性能亟待研究。近年来大量学者研究了车载作用下沥青砼铺装层的疲劳力学行为, 如孙志林等提出了一种考虑路面材料非线性疲劳损伤因素的循环车载作用下沥青砼地面正应力计算方法; 黄宝涛等研究了不同车速作用下沥青砼内部级配碎石的细观变形, 讨论了车速对铺装层疲劳寿命的影响; 徐勋倩等基于损伤力学, 讨论了车辆和温度荷载耦合作用下沥青砼铺装层的疲劳性能; 谭金祥等采用数值分析方法研究了车辆荷载下桥面铺装层的疲劳损伤演化。以上学者选取的车辆荷载形式均是确定的, 沥青砼铺装层的疲劳损伤分析也是确定性的。而车辆在运行中往往具有较大的随机性, 车重、车速和车流密度均具有概率性和随机性, 需从概率性的角度分析车辆荷载作用下沥青砼铺装层的疲劳性能。该文基于中国西南地区南溪长江大桥动态称重(WIM)数据建立随机车流模型, 得到随机车流加载样本, 并采用 ABAQUS 进行瞬态加载分析, 提出沥青砼铺装层的疲劳可靠度功能函数, 分析随机车流荷载作用下沥青砼铺装层的时变可靠度指标。

1 基于实测数据的随机车流建模

1.1 车重荷载模型

设母样本 X 中包含 M 个不同性质或类别的子样本 X_i , 各子样本均为一维随机变量, 服从 $p_i(x)$

分布, 子样本 X_i 在母样本中的比重分别为 w_i , 且各子样本之间相互独立, 则母样本 X 的概率模型为:

$$p(x) = \sum_{i=1}^M w_i p_i(x) \quad (1)$$

车辆荷载母样本监测数据包含不同车型和车辆货载率, 意味着母样本监测数据中包含多类子样本点。车辆荷载服从高斯混合分布(GMM):

$$p(x) = \sum_{i=1}^M w_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (2)$$

式中: μ_i 为车重的均值; σ_i^2 为方差。

基于西南地区南溪长江大桥的 WIM 数据, 依据式(2)建立货车车重高斯混合模型(见图 1), 模型参数见表 1。

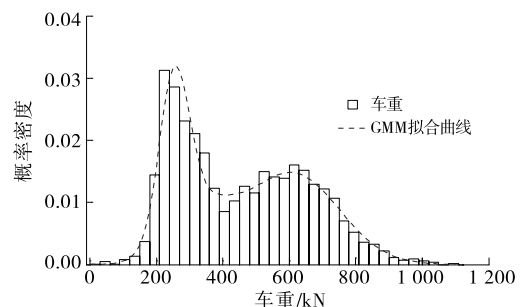


图 1 典型货车的车重和混合模型

表 1 典型货车车重高斯混合模型参数

M_i	w_i	μ_i/t	σ_i^2
1	0.29	253.8	20.34
2	0.20	333.2	93.64
3	0.52	610.1	196.43

1.2 车速模型

车辆的行驶速度与很多因素有关,如驾驶员行为、车型和交通状况等,其为随机变量。对南溪长江大桥的 WIM 数据进行统计分析,得到按车型分类后的车速服从正态分布。以行车道车速为例,重车速度均值为 70 km/h,标准差为 63 km/h。

1.3 行车间距

根据鲍卫刚等的研究,在实际交通状况中,车辆之间的行驶间距随时间不断变化,具有明显的随机性,且行车间距的随机性在不同车道、不同时间具有不同的特点,如节假日车辆数量增加导致行车间距变小、行车道的行车间距比超车道的的小等。分别采用 log-normal 分布、Weibull 分布及 Gamma 分布拟合行车间距,结果显示 Gamma 分布对行车间距的拟合效果最好(见图 2)。因此,采用 Gamma 分布作为行车间距的概率分布函数,其表达式如下:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (3)$$

式中: t 为形状参数。

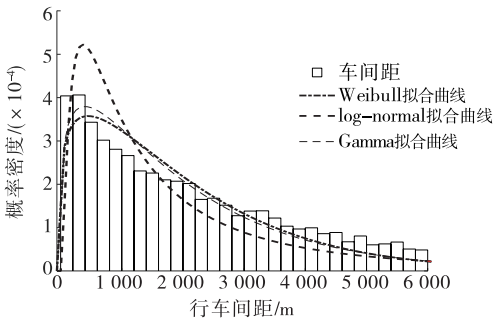


图 2 典型货车的行车间距和混合模型

1.4 随机车流建模

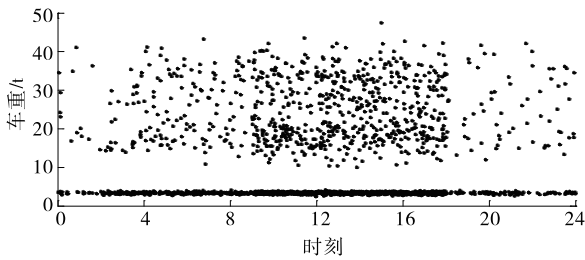
基于 WIM 实测车辆荷载数据,考虑车辆荷载相关性的随机车流模拟步骤如下:1) 分车道统计车辆荷载 WIM 数据,对车辆荷载进行预处理,将车总重小于 3 t 的车辆数据剔除;2) 分析车型占有率,讨论行车间距及各车型车重、车速的概率分布;3) 以 2 h 为一个时间区间建立不同时间区间内车辆荷载概率模型;4) 采用 Monte-Carlo 法模拟产生随机车辆样本。

以 2016 年 3 月 21 日南溪长江大桥路段交通监测数据为例对车型进行分类。当天的总交通量为 5 471 辆,白天和夜晚 4 条车道的车辆总重统计特征值(均值、方差和变异系数)见表 2。由表 2 可知:4 条车道中行车道车辆的车重大于超车道的。这里仅分析最不利车道沥青砼铺装层的疲劳寿命。采用

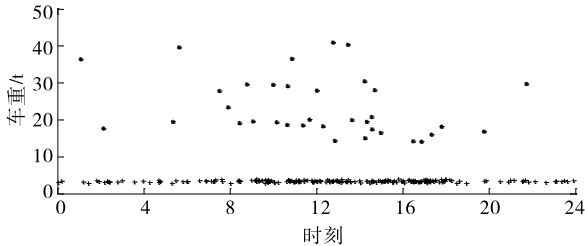
Monte-Carlo 法对每个时段车重、车速和行车间距进行样本抽样,结果见图 3。

表 2 不同时间周期车重统计

车道	时段	平均值/t	标准差/t	变异系数	最大值/t
1	白天	10.800	22.460	3.960	180.6
	夜间	15.070	28.830	2.130	155.4
2	白天	2.863	6.099	1.910	37.7
	夜间	3.741	14.820	2.080	131.8
3	白天	5.414	6.047	1.117	195.8
	夜间	5.340	8.384	1.570	188.2
4	白天	20.240	32.470	1.605	280.6
	夜间	34.250	45.140	1.318	205.9



(a) 车道1日交通车重分布



(b) 车道2日交通车重分布

图 3 随机车流样本

2 随机车载作用下铺装层底层应力分析

2.1 有限元建模

文献[9]通过对比分析,得出沥青砼梁三点式加载疲劳试验结果和 ABAQUS 软件模拟瞬态分析结果吻合。采用 ABAQUS 建立沥青砼路面结构的三维有限元模型,将沥青砼铺装层简化为 3 层结构,依次为沥青层、水泥稳定碎石层及土基层,弹性模量分别为 1 300、1 500 和 60 MPa,泊松比分别为 0.35、0.2和 0.4,采用 C3D8R 六面体单元进行材料模拟。有限元模型见图 4。

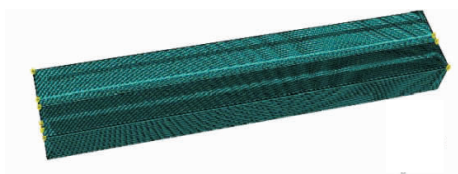


图 4 沥青砼铺装层有限元模型

2.2 应力时程分析

采用瞬态分析模拟车轮经过路面,采用车轮截面大小的均匀力模拟轮轴荷载。瞬态分析计算步骤:1) 确定车辆的到达时间。以第一辆车模型前轮轴作用在结构的第一个节点作为开始时间点,后续车队按照车速与车距的关系式计算到达作用节点的时间。2) 根据行车速度、轴距和有限元网格的划分长度计算节点加载时间。3) 删除前一个荷载加载步骤。依次循环以上3个计算步骤,模拟多车上桥的瞬态分析过程。图5(a)为单轴荷载为150 kN的某车以70 km/h的速度经过时沥青砼地面局部应力时程曲线。将随机车辆样本加入有限元软件进行瞬态分析,提取沥青砼铺装层底部边缘最大拉应力,结果见图5(b)。

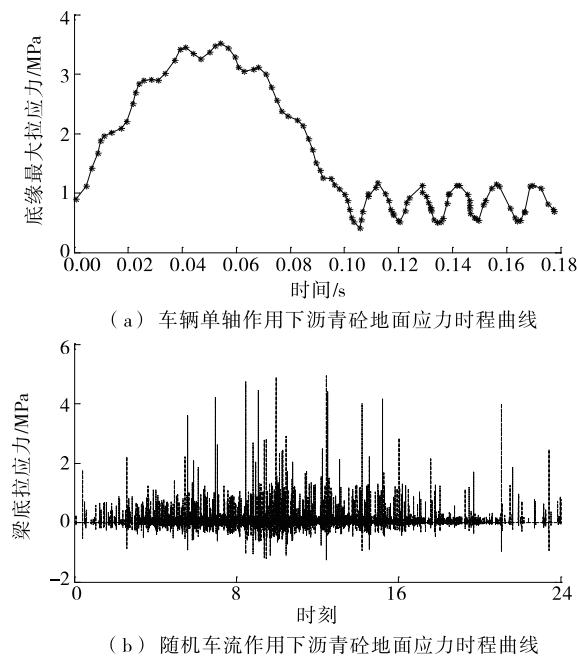


图5 车辆荷载作用下沥青砼地面应力时程曲线

3 沥青砼铺装层疲劳可靠度评估

3.1 沥青砼铺装层疲劳损伤模型

结合 Miner 疲劳损伤准则和文献[11],得到沥青砼铺装层的指数函数的疲劳损伤模型:

$$D = [(1 + 3.679 \times 10^{-11} S^{2.665} - 4.043 \times 10^{-12})^S - 1] N \quad (4)$$

式中: S 为沥青砼底缘的疲劳应力幅值; N 为疲劳应力幅值的疲劳应力循环次数。

3.2 疲劳可靠性功能函数

假定沥青砼的疲劳抗力变量和疲劳荷载效应变

量分别为 R 、 S ,则沥青砼铺装层的疲劳可靠度功能函数为:

$$Z = R - S \quad (5)$$

疲劳强度曲线基于 Miner 线性损伤准则,假设疲劳损伤达到1为结构发生疲劳失效,则认为抗力 R 为均值为1、变异系数为0.03的服从对数正态分布的变量。

将式(4)代入式(5),并将疲劳损伤乘以沥青砼服役年限 m ,得:

$$Z = R - 365 \times m [(1 + 3.679 \times 10^{-11} S^{2.665} - 4.043 \times 10^{-12})^S - 1] N \quad (6)$$

采用雨流计数法提取图5(b)中应力时程曲线,得到随机车流荷载作用下沥青砼底板层位置的疲劳应力幅 S 和应力循环次数 N 。图6为沥青砼铺装层日等效疲劳应力幅和应力循环次数拟合概率分布, S 和 N 的均值、方差分别为(2.41, 2 551)、(0.7, 601)。

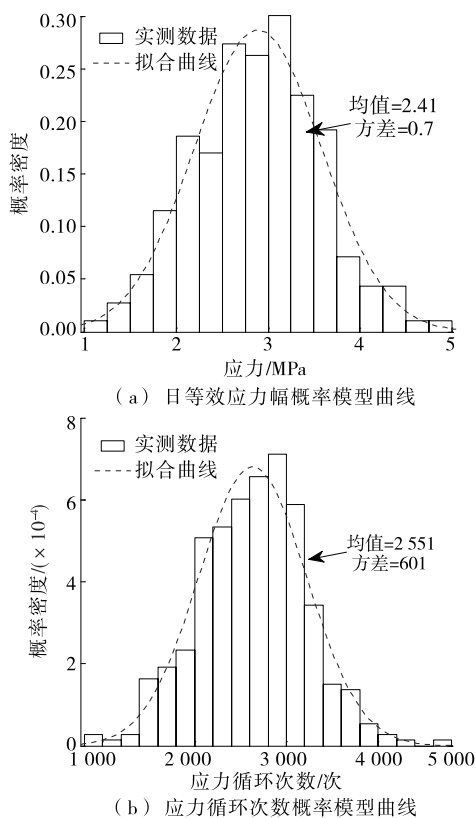


图6 沥青砼铺装层疲劳效应变量概率分布拟合曲线

3.3 疲劳可靠度指标计算

在规定时间内和条件内完成预定功能的能力用可靠度指标量化。可靠度的物理意义是坐标原点到极限状态曲线的最短距离,其数学表达式为:

$$\beta = \phi^{-1}(1 - P_f) \quad (7)$$

式中: ϕ^{-1} 为标准正态分布的反函数; P_f 为结构的失效概率, 其表达式见式(8)。

$$P_f = \iint_{g(X) < 0} \cdots \int g_X(x_1, x_2, \cdots, x_n) dx_1 dx_2 \cdots dx_n \quad (8)$$

式中: $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 为结构可靠度功能函数的变量; $g(x)$ 为可靠度功能函数极限状态。

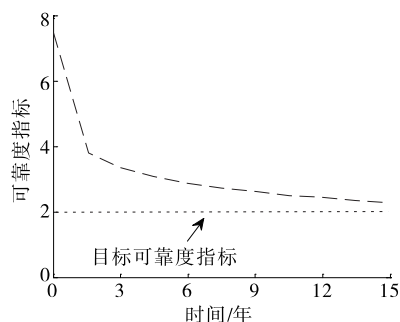
一阶二次矩法的基本思想是将功能函数 $g(x)$ 在各变量的均值点进行泰勒展开[见式(9)], 将可靠度指标计算式简化为式(10)。

$$g(x_1, x_2, \cdots, x_n) \approx g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \cdots, \mu_{x_n}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(x_1, x_2, \cdots, x_n)}{\partial x_i} \bigg|_{\mu_{x_i}} (x_i - \mu_{x_i}) \quad (9)$$

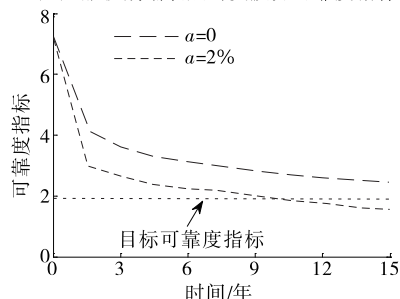
$$\beta \approx \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (10)$$

式中: μ_z 、 σ_z 分别为功能函数的平均值和标准差。

采用一阶二次矩法计算设计使用寿命下沥青砼铺装层的时变可靠度指标, 结果见图7。文献[12]规定目标可靠度指标为2。由图7可知: 铺装层在服役期内的疲劳可靠度指标均大于目标可靠度指标, 具有一定的安全储备; 交通年增长率 $a=2\%$ 时, 沥青砼铺装层服役9.6年后的疲劳可靠度指标小于目标可靠度指标。



(a) 服役期铺装层时变疲劳可靠度指标



(b) 不同交通增长率 a 下可靠度指标

图7 不同交通增长情况下的疲劳损伤演化

4 结论

(1) 车重的概率分布具有多峰分布特征, 可用

分量数为3的高斯混合模型描述。随机车辆样本密度随时间变化呈现白天密度大、晚间密度小的特征。

(2) 沥青砼铺装层在服役期内的疲劳可靠度指标均大于目标可靠度指标, 具有一定的安全储备。考虑车辆数年增长率为2%时, 服役期为9.6年时其疲劳可靠度指标小于目标疲劳可靠度指标。

参考文献:

- [1] 罗辉, 朱宏平. 基于断裂分析的沥青路面疲劳寿命预测[J]. 中外公路, 2007, 27(4).
- [2] 孙志林, 黄晓明. 沥青路面线性疲劳损伤特性及应力状态演变规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 29(2).
- [3] 黄宝涛, 袁鑫, 于蕾, 等. 行车速度对沥青路面疲劳损伤性能影响的数字试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(3).
- [4] 徐勋倩, 张晨, 孙科祥. 钢桥面铺装层在行车荷载与环境温度共同作用下疲劳损伤分析[J]. 工程力学, 2010, 27(11).
- [5] 谭金祥, 唐雪松, 朱文刚. 交通荷载下桥面铺装层损伤演化的数值分析[J]. 公路与汽运, 2013(2).
- [6] 刘扬, 张海萍, 邓扬, 等. 公路桥梁车辆荷载建模方法及疲劳寿命评估[J]. 应用力学学报, 2016, 33(4).
- [7] 刘扬, 张海萍, 鲁乃唯, 等. 基于WIM的随机车流建模和简支梁桥荷载效应研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(5).
- [8] 鲍卫刚, 李扬海, 郑绍圭, 等. 公路桥梁车辆荷载研究[A]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会年会议论文集[C]. 1996.
- [9] 张磊, 陈静云. 沥青混凝土桥面铺装车辙变形的非线性有限元模拟分析[J]. 中外公路, 2011, 31(1).
- [10] Jardin A, Leblond J B, Berghezan D, et al. Definition and experimental validation of a new model for the fatigue of elastomers incorporating deviations from Miners linear law of cumulative damage[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1).
- [11] 朱江. 动载作用下沥青混凝土的非线性疲劳损伤[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [12] Liu Y, Zhang H, Liu Y, et al. Fatigue reliability assessment for orthotropic steel deck details under traffic flow and temperature loading [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 71.
- [13] 赵锋军, 杨鑫. 水泥砼桥面沥青铺装受力特性研究[J]. 公路与汽运, 2017(3).
- [14] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范[S].

收稿日期: 2018-12-10