

文章编号: 1000-5862(2020)06-0654-07

基于 WIM 数据的钢箱梁斜拉桥疲劳荷载谱分析及寿命预测研究

赖毅¹ 代力² 朱泽文¹ 韩志星¹

(1. 江西省交通科学研究所, 江西 南昌 330200; 2. 长大桥梁建设技术及装备交通运输行业研发中心, 江西 南昌 330200)

摘要: 由于钢桥面板的疲劳损伤主要来源于车辆荷载的反复作用, 因此, 为了预测钢箱梁斜拉桥的寿命, 需要对其在重载交通流量下的疲劳荷载谱进行研究. 该文以某大跨度钢箱梁斜拉桥为背景, 基于桥梁健康监测系统中的 WIM 模块采集得到一定时段的车重、轴数、轴距等车辆荷载参数, 采用统计分析方法对其进行批量化处理分析, 得到了等效模型车的疲劳荷载谱. 以此为基础, 选取了钢箱梁斜拉桥易发生疲劳损伤的 U 型肋、盖板、横隔梁等重点部位进行疲劳寿命分析, 分析结果表明: 各重点部位尚未产生过大损伤疲劳.

关键词: 钢箱梁; 车辆荷载模型; 荷载谱; 疲劳应力谱; 疲劳寿命

中图分类号: U 441.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.06.19

0 引言

对于大跨径桥梁而言, 在桥面通行的汽车荷载反复作用下常常会使桥面铺装层破坏和产生裂缝, 从而导致桥梁结构性能的降低. 分析其根本原因, 主要因素就是疲劳损伤的产生^[1]. 参照各类规范^[2-4], 钢桥面板的疲劳损伤原因较为复杂, 与车流交通和桥梁本身均有较大关系^[5-6]. 钢桥面板由于受力性能好、自身轻便、施工快捷, 被广泛应用于各类悬索桥、斜拉桥等大跨径桥梁的建设中^[7], 但同时由于焊缝质量、施工标准的差异, 目前现存正交异性钢桥面板均有各种程度的疲劳与损伤问题, 亟待解决^[8-9].

近年来, 国内外诸多学者根据动态称重(WIM)系统对这一问题进行了应力谱方面的大量研究. J. A. Laman等^[10]利用5座钢梁桥 WIM 系统的实测数据, 通过对不同车辆荷载适用的标准疲劳车模型进行分析, 得到了适用于钢梁桥的疲劳荷载模型. 王元清^[11]根据某大桥的动态称重系统数据, 分析车重概率密度函数, 得到了运营状态下的车辆荷载概率模型. 邓扬等^[12]结合桥梁 WIM 系统的监测信息, 通过统计学的相关判别模型分析, 得到了分时段的疲

劳荷载谱模型, 并通过实桥的疲劳损伤和寿命评估验证了这一模型的有效性.

目前, 通过对车辆荷载数据进行分析, 在建立车辆疲劳荷载谱方面已经进行了不少研究, 但大部分研究还是基于梁桥为背景的, 斜拉桥等大跨度桥梁还鲜有研究. 因此, 本文以某大跨径钢箱梁斜拉桥为依托, 通过桥上设置的 WIM 系统采集模块, 对全天、分时段的车型、车流数据进行分析, 得到了典型的等效车的疲劳荷载谱, 并以此为基础进行关键点的疲劳细节分析与寿命评估, 为大桥的安全运营与状态评估提供参考依据.

1 车辆荷载数据

某大跨斜拉桥位于福银高速江西省九江市境内, 是连接江西、湖北2省的重要主干桥梁. 大桥主桥全长1405 m, 主跨跨径818 m, 桥梁上部结构形式为双塔双索面混合梁, 主线设双向6车道. 大桥立面及主梁横断面布置如图1所示.

利用该桥健康监测系统中的 WIM 模块, 采集得到一段时间内的车重、车型、轴数、轴重、轴间距等车辆荷载数据, 并采用 Matlab 软件对数据进行分析.

收稿日期: 2020-08-22

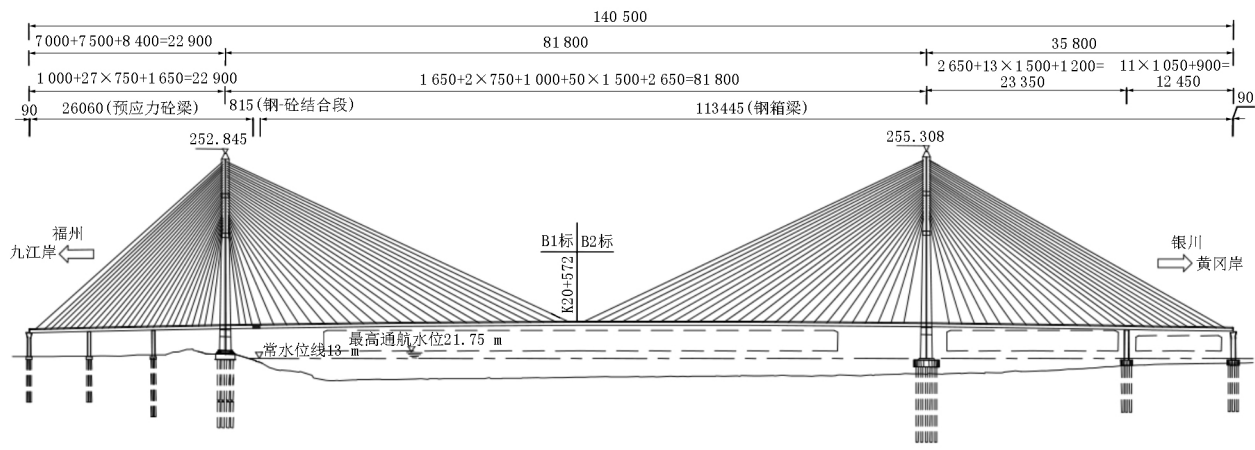
基金项目: 江西省交通运输厅科技课题(2017H0015)和江西省自然科学基金(20202BAB1214043)资助项目.

作者简介: 赖毅(1981-), 男, 江西会昌人, 高级工程师, 主要从事桥梁检测与加固、钢结构疲劳研究. E-mail: nclaiyi@sina.com

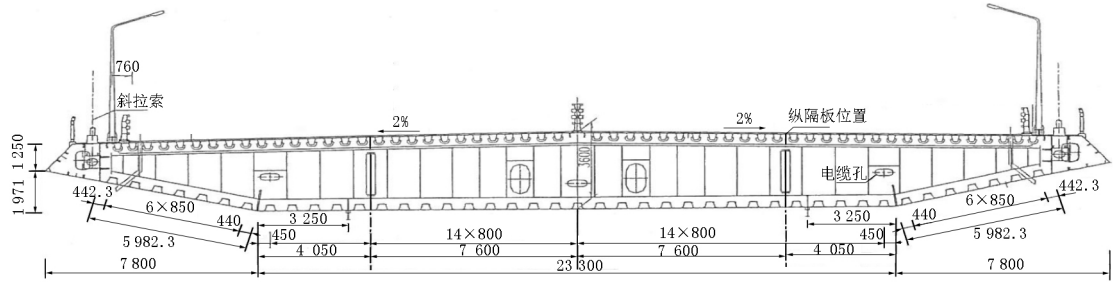
1.1 车型与车流参数分析

1.1.1 车型划分 基于现场荷载调查情况,依据过

桥车辆各方面(如轴距、轴数、功能)特点,划分车辆类别.在考虑车重、轴数基础上也对轴重进行考量,从小到大共分为 18 个车型类别^[13](见表 1).



(a) 钢箱梁主桥立面布置图(m)



(b) 钢箱梁横断面图(mm)

图 1 钢箱梁斜拉桥布置图

表 1 现场车辆分类

代号	车辆类别	轴数
B1	摩托车、三轮车(≤3 t)	2
B2	小汽车、轻型客车(≤3 t)	2
B3	中巴、公交车	2
B4	2 轴大客车	2
C5	3 轴大客车	3
B6	2 轴货车Ⅰ型	2
B7	2 轴货车Ⅱ型	2
B8	2 轴货车Ⅲ型	2
C9	3 轴货车Ⅰ型	3
C10	3 轴货车Ⅱ型	3
C11	3 轴货车Ⅲ型	3
D12	4 轴货车Ⅰ型	4
D13	4 轴货车Ⅱ型	4
E14	5 轴货车Ⅰ型	5
E15	5 轴货车Ⅱ型	5
E16	5 轴货车Ⅲ型	5
F17	6 轴货车Ⅰ型	6
F18	6 轴货车Ⅱ型	6

从轴数上可以看出,B1~B4、B6~B8 为 2 轴车,C5、C10~C11 为 3 轴车,D12~D13 为 4 轴车、E14~E16 为 5 轴车、F17~F18 为 6 轴车.其中 B1、B2 为小型车(≤3 t),虽然具有一定车流量,但是其车质量均小于 3 t.参照文献[3]的相关规定,这 2 类车型对疲劳荷载损伤分析影响较小.因此,在后续的车流量统计与荷载谱分析中略去.

1.1.2 日均车流分析 车流仿真模拟分析的精度取决于现场实测车流荷载数据的采集,对所处的环境气候、经济因素有较大依赖性,具备较强随机性.该工程地处城市桥梁中的工业区域,重型货车占比较高,因此工作日、非工作日的车载量差别不大,采用 1 d 的数据即可反映日常车辆荷载情况.相比于 24 h 周期而言,96 h 的数据统计的离散型更小,更为稳定.因此,本文采用现场连续视频拍摄方式采集过桥车流信息,对 4 d 连续 96 h 的车流量进行统计分析,并对不同方向、车型进行对比分析.其中不同方向车型日均车流量对比情况如图 2 所示,日均总车流量与车型关系对比情况如图 3 所示.

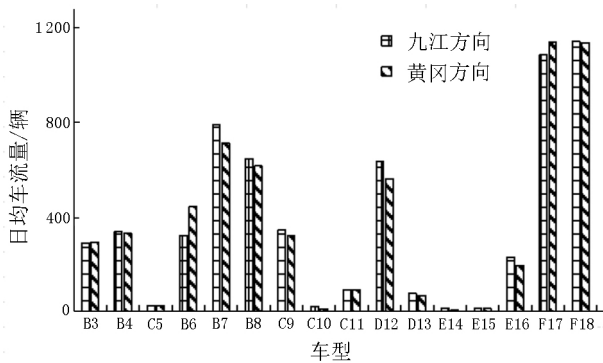


图2 不同方向车型数量对比

由图2可知,九江方向日均车流量为6 042 辆· d^{-1} ,黄冈方向日均车流量为5 949 辆· d^{-1} ,不同朝向车流比为1:1.016,从数据上比较接近,稳定性较好。由分析不同朝向车型可知,C10、E14的不同朝向车流比为2.50和2.27,差异较大。分析发现主要有2方面原因:(i)分析车辆的样本数较少,很难代表典型统计概率情况;(ii)相比于湖北省东南部黄冈地区,九江地区工业基础较好,因此往九江方向车辆也会比黄冈方向更多。

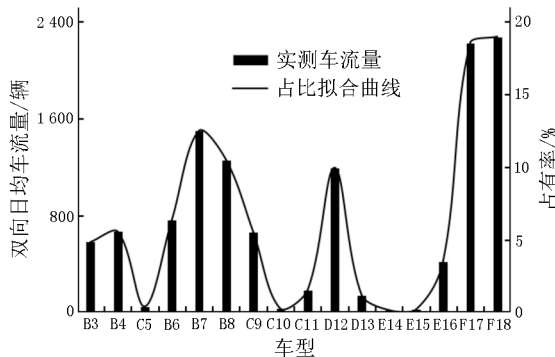


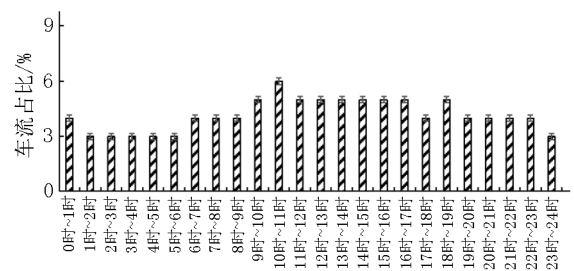
图3 总车流量与车型关系对比

由图3可知,F17、F18等6轴货车占有率较大,均接近20%;B7(2轴货车Ⅱ型)、B8(2轴货车Ⅲ型)和D12(4轴货车Ⅰ型)占有率也在10%左右。这说明该桥梁的交通形式主要以多轴货运车辆为主,后续荷载谱应力分析应以中间行车道、右侧行车道为主。

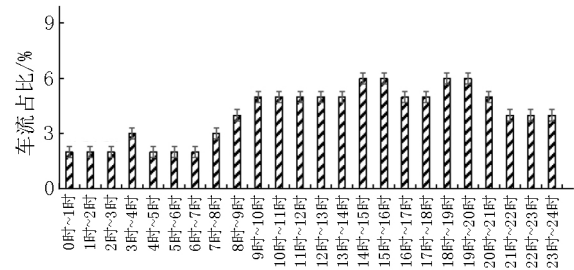
1.1.3 全天车流时段分析 不同车型由于其运营特点,对应的最大流量时段有所差异。限于篇幅此处仅列出B7、B8、D12、F17、F18这5种车流占比较大的典型车型时段分析(见图4)。

图4列出了车流占比最大的5种车型全天各时段的情况,由图4(a)、图4(b)可以看出,对于2轴车0:00~6:00车流量较小;由图4(c)可以看出,对于4轴车4:00~7:00、8:00~11:00车流量较小;由图4(d)、图4(e)可以看出,对于6轴车8:00~11:00车流量较小。根据全天车流时段分析结果可知,凌晨与上午时段车流量较小,这一结论可为后期中断交通

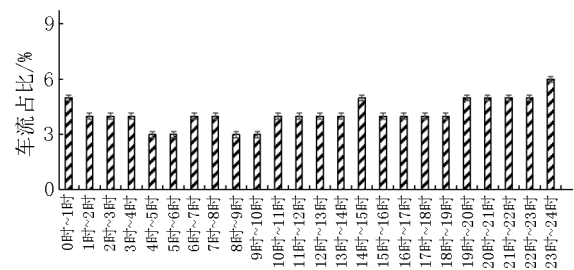
进行桥梁检测维修提供相关时间参考。



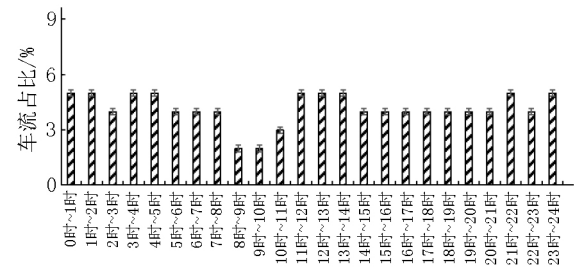
(a) B7 车型



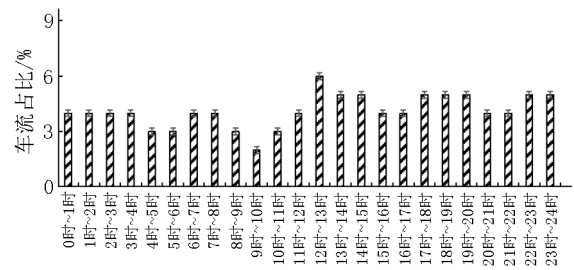
(b) B8 车型



(c) D12 车型



(d) F17 车型



(e) F18 车型

图4 几种典型车型全天时段的车流占比情况

1.2 车重情况分析

通过对桥面现场96 h的车重样本进行统计,典

型车型 B7、B8、D12、F17、F18 双向车重样本合并后的样本数分别为 2 640、2 012、2 193、4 145、4 253 ,并以此为基础进行进一步分析。

采用几种常见分布形式对上述典型样本进行参数估计 ,并通过 K-S 假设检验法进行分布优化拟合检验 ,其结果如表 2 所示。

2 荷载谱的建立与分析

2.1 荷载谱的建立

以通过统计得到车重荷载和轴重数据为基础进行该桥桥面系的疲劳荷载谱分析 ,并以此评估其疲劳细节与剩余寿命的预测。

表 2 典型车型车重概率分布模型

车型	假设检验法	分布类别	参数 1	参数 2	统计量检测值 D	统计量临界 $D_{n,\alpha}$	统计量差值
B7	K-S 检验法	正态	8.76	6.527	0.175 4	0.026 4	0.149 0
B8		威尔布	14.73	2.448	0.043 7	0.030 2	0.013 5
D12		威尔布	32.63	4.487	0.051 3	0.029 0	0.022 3
F17		极值 I 型	47.92	4.731	0.035 1	0.021 1	0.014 0
F18		极值 I 型	47.72	4.781	0.030 9	0.020 8	0.010 1

表 3 典型车型的疲劳荷载谱

编码	轴数	类别	等效荷载质量/t						总质量/t	等效轴距/m					频率/%
			G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	
B7	2	货车 II 型	3.4	10.0					13.4	3.95					4.63
B8	2	货车 III 型	5.8	9.6					15.4	5.00					3.89
D12	4	货车 I 型	6.5	6.5	9.2	9.2			31.4	1.90	4.50	1.35			3.69
F17	6	货车 I 型	5.1	8.5	8.5	7.9	7.9	7.9	45.8	3.30	1.35	7.00	1.31	1.31	6.87
F18	6	货车 II 型	3.8	5.2	12.6	8.0	8.0	8.0	45.6	1.80	2.70	7.00	1.31	1.31	7.04

由表 3 可以看出 ,典型车型对应的疲劳荷载车辆总质量均超过 10 t。从各车型对应频率可以看出 ,6 轴车的占比高 ,且荷载大 ,因此对桥面系构件造成的累计疲劳损伤也较大 ,使得构件的疲劳寿命大大缩短。

2.2 荷载谱分析

基于现场车辆特点将车型划分为 B3 ~ F18 等车型虽然能较好地分析车流信息 ,但是对于荷载谱分析会过于复杂与烦琐。因此依据各车型轴数、轴重特点关系 ,进一步将桥面通行车辆划分为 H1 ~ H7 (见图 5) ,对这 7 种车型进行疲劳荷载谱的分析。其中 B3 ~ B4、B6 ~ B8 车型因其均为 2 轴车 ,因此将其归类为 H1 模型车; C9、C10 车型为前中轴距较小、中后轴距较大的 3 轴车 ,归类为 H2 模型车; C5、C11 车型为前中轴距较大、中后轴距较小的 3 轴车 ,归类为 H3 模型车; D12、D13 车型因其均为 4 轴车 ,归类

基于等效疲劳原理 ,将各车型的荷载、轴距频次等数据进行统计分析 ,具体计算为

$$\begin{cases} W_{eu} = \left(\sum_{v=1}^n (f_v W_{uv}^2) \right)^{1/3}, \\ C_{eu} = \sum_{v=1}^n f_v W_{uv}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 W_{eu} 为该类车型第 u 轴的轴重质量; f_v 为该类车型中第 v 辆车的相对频率 ,其中 $v = 1, 2, 3, \dots, n$; W_{uv} 为第 v 辆车第 u 轴的轴重质量; C_{eu} 为该类车型第 u 轴的轴间距离; C_{uv} 为第 v 辆车第 u 轴的轴间距离。

通过(1)式可计算得到各车型对应的荷载质量和轴距参数 ,从而建立该桥对应的疲劳荷载谱 ,部分结果如表 3 所示。

为 H4 模型车; E14 ~ E15 车型为前 3 轴轴距较小、后 2 轴轴距较小的 3 轴车 ,归类为 H5 模型车; E16 车型为前 2 轴轴距较小、后 3 轴轴距较小的 3 轴车 ,为加以区分 ,归类为 H6 模型车; F17 ~ F18 车型因其均为 6 轴车 ,归类为 H7 模型车。

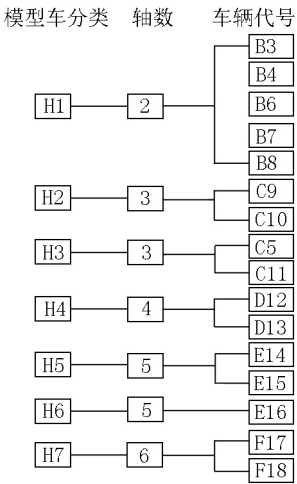


图 5 等效模型车分类图

参考文献[4]的相关标准,将等效模型车的轴重和轴距进行取整简化,得到等效模型车的疲劳荷载谱(见表4)。

表4 等效模型车的疲劳荷载谱

编码	轴数	车辆代号	等效荷载质量/t						总质量/t	等效轴距/m					频率/%
			G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	
H1	2	B3、B4、B6、 B7、B8	4.6	8.9					13.5	4.50					14.78
H2	3	C9、C10	4.6	5.4	12.2				15.4	1.95	5.75				2.14
H3	3	C5、C11	5.9	11.6	11.1				28.6	4.70	1.40				0.70
H4	4	D12、D13	6.5	7.2	9.1	9.1			31.9	2.10	4.85	1.35			4.14
H5	5	E14、E15	4.6	7.4	10.9	8.0	8.0		38.9	2.60	2.00	10.4	1.30		0.13
H6	5	E16	6.0	10.5	7.4	7.4	7.4		38.7	3.60	6.85	1.30	1.30		1.29
H7	6	F17、E18	4.5	7.3	11.0	8.0	8.0	8.0	45.6	2.55	2.05	7.00	1.30	1.30	13.92

由表4可以看出,等效模型车中的2轴车、4轴车和6轴车所占比例较高,这一情况从侧面也可反映出该地区的交通特点。本文对车辆荷载谱进行分析,不仅可对桥面系与锚固点进一步开展相关疲劳细节分析,具有较好参考意义,而且也可以为类似桥梁的分析提供一定的参考价值。

3 疲劳细节分析与寿命预测

3.1 疲劳细节分析

根据交通流量数据分析得到的车流荷载谱,对该桥梁的钢桥面板易发生疲劳损伤部位进行疲劳寿命分析和可靠性评估。

结合实际调查的日均车流量和上述车辆荷载谱,将其作为加载荷载。根据典型钢箱梁截面横向最不利的情况进行单车道加载,并将活荷载沿桥面横向移动,得到车轮横向最不利加载位置,参考美国的AASHTO钢桥疲劳指导性规范考虑冲击系数为0.15。具体的典型截面的钢箱梁模型如图6所示。

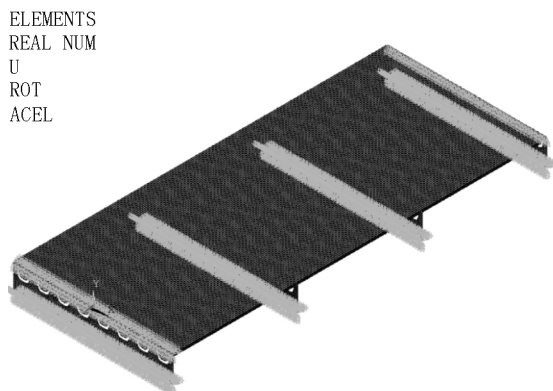


图6 典型截面的钢箱梁模型

据统计,正交异性钢板桥的盖板、加劲肋和横隔

梁等结构部位都是疲劳破坏的重灾区^[14]。因此本文拟以U型肋与盖板焊缝处(K_1)、U型肋、横梁与盖板的焊缝连接(K_2)以及U型肋与横隔梁的焊缝连接(K_3)等部位作为薄弱应力点进行疲劳分析。

其目标关键点对应的应力历程可通过模拟等效疲劳车在钢桥面板上的移动计算得到,依次让其中的每一模型车前轴从桥面板模型纵向的一端行驶至后轴离开桥面板另一端,车辆按每个荷载步向前移动0.05 m,对每个荷载步记录一次计算关注点的应力。限于篇幅,各车辆模型的应力历程此处不一一列出。按雨流法^[15]的相关规定对其应力历程进行统计分析,可得到相应的疲劳应力谱。薄弱应力点 $K_1 \sim K_3$ 的疲劳应力值如图7所示。

3.2 疲劳寿命预测

钢桥面板的疲劳特性属于低应力的变幅疲劳,参照相关规范的疲劳抗力计算方法,对应力点的疲劳强度进行计算与寿命预测。

结合Miner疲劳线性累积损伤理论,确定各点的细节类别与疲劳强度曲线,可得到各应力点的年线性累积损伤 D_y 和预期期疲劳寿命 T ,其计算公式为

$$\begin{cases} D_y = \sum_{i=1}^n (n_i/N_i) \\ T = 1/D_y \end{cases} \quad (2)$$

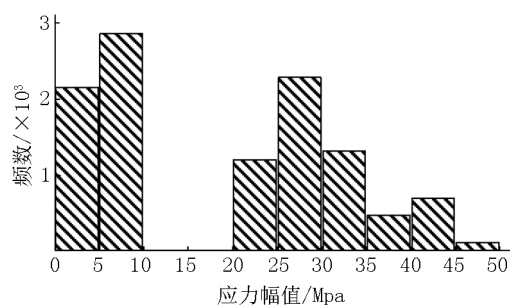
其中 N_i 为在任意应力 $\Delta\sigma_i$ 作用下结构的疲劳寿命, n_i 为从常幅加载直至破坏的循环次数。

根据文献[3]的规定, N_i 也可由

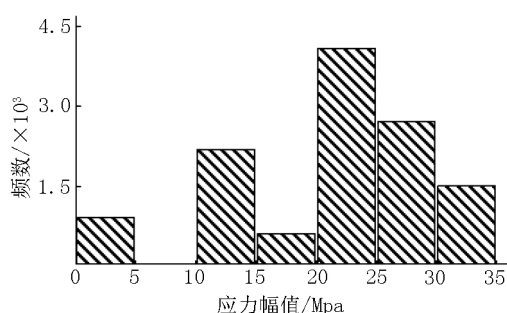
$$N_i = \begin{cases} 10^7 / (\Delta\sigma_i / \Delta\sigma_L)^m, & \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_L \\ 10^7 / (\Delta\sigma_i / \Delta\sigma_L)^{m+2}, & \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L \end{cases} \quad (3)$$

求出。

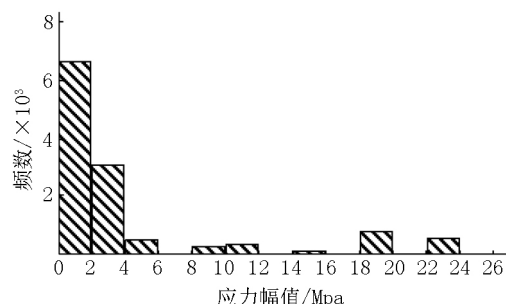
将图7相关数据代入(2)~(3)式,得到各应力点的疲劳寿命,评估结果如表5所示。



(a) 应力点 K_1 的疲劳应力谱



(b) 应力点 K_2 的疲劳应力谱



(c) 应力点 K_3 的疲劳应力谱

图7 各应力点的疲劳应力谱

表5 应力点疲劳寿命评估与预测

应力点	细节类型 号/Mpa	常幅疲劳 极限/Mpa	疲劳截止 极限/Mpa	疲劳寿命/ 年
K_1	100.75	76.73	43.90	118
K_2	95.93	72.51	41.09	>150
K_3	44.23	33.77	19.39	83

由表5可以看出,各应力点的最大应力幅均小于常幅疲劳极限应力,因此还未产生过大损伤疲劳。但在后期运营过程中仍需要对此类应力点进行重点监测,密切关注重点连接部位疲劳裂纹的产生与发展,及时采用相关措施,以保证正交异性板的使用安全。

4 结论

本文通过WIM系统采集到的各类车辆荷载数据,对等效车辆荷载谱与应力点疲劳应力进行分析,

并以此为基础对应力点的疲劳寿命进行评估与预测,得到结论如下:

1) 根据WIM数据可知,该桥上的交通形式主要以(2轴、4轴等)多轴货车为主,因此在进行正交异性板桥面荷载谱分析时,应重点关注中间行车道与右侧行车道位置;

2) 通过对全天过桥各类车型进行车流量分析可知,在凌晨与上午时段桥面整体车流量较小,这一结论可为后期需中断交通进行桥梁检测、维修提供相关时间参考;

3) 通过分析疲劳荷载谱可知,现场等效模型车中的2轴车、4轴车和6轴车占比较高,这一情况可反映出该桥梁路线的交通特点,也可以此为基础进行桥面系与锚固点等关键细节的疲劳损伤分析;

4) 在桥面的U型肋、横隔梁等部位选取了3个应力点进行疲劳应力谱分析,并对3个应力点进行疲劳寿命评估与预测。评估结果表明各部位还未产生过大损伤疲劳,但在后期的运营中还需要密切关注、重点监测,以保证桥梁运营安全。

5 参考文献

- [1] 吉伯海,徐捷,姚悦,等.考虑荷载影响面的钢桥面板顶板-U肋焊缝疲劳损伤分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2019,38(11):27-33,57.
- [2] British Standards Institution. American association of state highway and transportation officials: Bridge design specifications: LRFD 2012 [S/OL]. [2012-02-10]. <https://ishare.sina.com.cn/f/63151153.html>.
- [3] 英国焊接标准政策委员会.钢结构疲劳设计与评估使用标准:BSI 7608 [S].伦敦:英国标准协会,1993.
- [4] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015 [S].北京:人民交通出版社,2015.
- [5] 夏叶飞,李峰峰,顾煜,等.基于WIM的高速公路桥梁车辆疲劳荷载谱研究[J].公路交通科技,2014,31(3):56-64.
- [6] 涂文才.钢桥面板与纵肋焊接细节关键构造参数及其疲劳效应分析[J].世界桥梁,2019,47(5):59-64.
- [7] 陈国红,徐召.大跨径钢-混组合梁斜拉桥主梁力学特性研究[J].桥梁建设,2019,49(5):39-44.
- [8] 李朝阳,付晓鹏.开孔及焊接对钢桥面板疲劳性能的劣化效应研究[J].桥梁建设,2020,50(S1):8-13.
- [9] 段兰,王春生,翟慕赛,等.基于声发射技术的钢桥面板

- 疲劳损伤监测与评估 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 60-73.
- [10] Laman J A, Nowak A S. Fatigue-load models for girder bridge [J]. Journal of Structural Engineering-Asce, 1996, 122(7): 726-733.
- [11] 王元清. 基于 WIM 数据的某城市桥梁车辆荷载概率模型 [J]. 公路, 2019, 64(7): 155-159.
- [12] 邓扬, 颜巍, 刘扬, 等. 基于 WIM 数据的公路桥梁车辆疲劳荷载模型研究 [J]. 中外公路, 2018, 38(1): 164-171.
- [13] 邵雨虹, 吕彭民. 九江长江大桥疲劳车辆荷载谱 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2015, 35(5): 50-56.
- [14] 王伟, 周尚猛, 王亚飞. U 肋设小隔板和支撑板的正交异性板疲劳性能试验研究 [J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 58-63.
- [15] 冯飞飞, 沙云东, 朱林, 等. 基于改进雨流法的复合材料薄壁结构随机声疲劳寿命估算 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(1): 6-13.

The Study on Fatigue Load Spectrum Analysis and Service Life Prediction of Steel Box Girder Cable-Stayed Bridge Based on WIM Data

LAI Yi¹, DAI Li², ZHU Zewen¹, HAN Zhixing¹

(1. Jiangxi Transpotration Institute, Nanchang Jiangxi 330200, China; 2. Research and Development Center on Technologies and Equipment of Long-span Bridge Construction Ministry of Transport, Nanchang Jiangxi 330200, China)

Abstract: The fatigue damage of steel bridge face plate mainly comes from the repeated action of vehicle load, so in order to predict the life of steel box girder, it is necessary to study its fatigue load spectrum under heavy traffic flow. Taking a long-span steel box girder cable-stayed bridge as the background, based on the WIM module in the bridge health monitoring system, the vehicle load parameters (vehicle weight, axle number, wheelbase, etc.) of a certain period of time are collected, and the statistical analysis method is used for mass processing and analysis to obtain the fatigue load spectrum of the equivalent model vehicle. On this basis, u-shaped ribs, cover plates, transverse diaphragms and other key parts of cable-stayed bridges prone to fatigue damage are selected for fatigue life analysis. The results show that all key parts have not suffered excessive fatigue damage.

Key words: steel box girder; vehicle load model; load spectrum; fatigue stress spectrum; fatigue life

(责任编辑: 曾剑锋)