

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.009

# 基于实测应变的钢桥面板疲劳寿命分析

吉伯海,程 苗,傅中秋,袁周致远

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**为评估钢桥面板的疲劳寿命,在某大桥钢箱梁 1/4 跨截面的顶板与 U 肋连接焊缝处和横隔板弧形缺口处布置应力测点,进行 24 h 疲劳应力监测。根据实测数据,利用雨流计数法计算得到疲劳应力谱,并基于 BS 5400 规范对各应力测点的疲劳损伤状态进行评估。结果表明:横隔板弧形缺口周边测点的应力水平相对较高;各应力测试点以低幅值应力循环为主,其中应力幅为 2 ~ 10 MPa 的循环次数占 90% 以上,但最大应力幅值均超过了 BS 5400 规范规定的产生疲劳损伤的极限值。疲劳寿命分析表明,顶板与 U 肋纵向连接焊缝过焊孔处易产生靠近顶板部位的疲劳裂纹,横隔板与 U 肋腹板连接焊缝的疲劳寿命较低。

**关键词:**钢桥面板;实测应变;疲劳应力谱;疲劳寿命

**中图分类号:**U448.25      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-1980(2014)05-0422-05

## Fatigue life analysis of steel bridge deck based on measured strain

JI Bohai, CHENG Miao, FU Zhongqiu, YUAN-ZHOU Zhiyuan

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to evaluate the fatigue life of a steel bridge deck, stress measuring points were set near the weld of the roof connected to the U-rib and the arc-shaped notch of the diaphragm plate across a quarter of a bridge's steel box girder, and the fatigue stress was monitored for 24 hours. According to the measured data, the fatigue stress spectra were calculated with the rain-flow counting method. Based on the BS 5400 specification, the fatigue damage state of the stress measuring points was evaluated. The results show that the stress level of the measuring points near the arc-shaped notch of the diaphragm plate was relatively high. Each stress measuring point was mainly a low-rising stress cycle and the cycles of 2 to 10 Mpa stress amplitude accounted for more than 90%. However, the maximum stress amplitude exceeded the limit of fatigue damage stipulated by the BS 5400 specification. Fatigue life analysis shows that fatigue cracks in the weld of the roof connected to the U-rib easily occurred near the roof area at the welding hole, and the fatigue life of the weld of the diaphragm plate connected to the U-rib's web was short.

**Key words:** steel bridge deck; measured strain; fatigue stress spectra; fatigue life

钢箱梁以其自重轻、抗扭强度高、抗风性能好、制作施工便捷等优点被广泛用于大跨度桥梁上<sup>[1]</sup>。正交异性钢桥面板是钢箱梁的重要组成部分,由于长期承受车辆交变荷载的作用,其局部构造细节容易产生疲劳损伤,直接影响大桥的使用寿命和安全运营。以往获取疲劳应力谱的途径是通过正常运营桥梁上的交通量进行调查统计,利用各类车型荷载参数建立车辆荷载谱,然后计算得到疲劳应力谱<sup>[2-6]</sup>。但统计车辆荷载谱仅能反映大桥整体的车载特征,不能反映车辆在桥面上的真实行使轨迹,故局部应力分析结果与真实情况存在一定差异。

近年来,随着结构健康监测系统在大跨度桥梁上的广泛应用,利用监测系统得到应变时程曲线,再通过雨流计数法获得疲劳应力谱,使桥梁的疲劳损伤评估精确性有了进一步提高<sup>[7-9]</sup>。但健康监测系统数据代表

收稿日期:2013-09-25

基金项目:江苏省交通科学研究计划(2012Y13)

作者简介:吉伯海(1966—),男,江苏扬州人,教授,博士,主要从事钢桥疲劳与维护研究。E-mail:hhbhji@163.com

的是桥梁整体运营状况,不能精确反映焊缝周边应力幅变化情况,故有必要对焊缝的局部应力进行实测,以获取真实的疲劳应力。实测应变时程数据对比表明,应变时程每 24 h 总体相似,具有大致相同的曲线形状和循环次数<sup>[10-11]</sup>。因此,可以认为桥梁实际发生的是一个应变循环的不断重复,从而可利用这个应变循环计算得到疲劳应力谱,然后评估桥梁的疲劳损伤<sup>[12-14]</sup>。

笔者通过在某大桥钢桥面板局部易疲劳构造细节处布置应力测点,进行 24 h 疲劳应力监测,获得较准确的应变时程曲线。对应变数据进行预处理,再利用雨流计数法计算得到疲劳应力谱,最后基于 Miner 线性累积损伤准则和 S-N 曲线估算各构造细节的疲劳寿命。

1 疲劳应力测试

1.1 测点布置

根据某大桥主梁整体振动响应计算结果和实桥疲劳裂纹检测结果,笔者选择下游主梁 1/4 跨(靠近南塔)截面作为测试部位,如图 1 所示。在此截面对重车道上顶板与 U 肋纵向连接焊缝过焊孔处(测点编号 L-A-1、L-A-2、R-A-1、R-A-2)和横隔板弧形缺口周边(测点编号 L-B-3、L-B-4、R-B-3、R-B-4)进行应变测试。

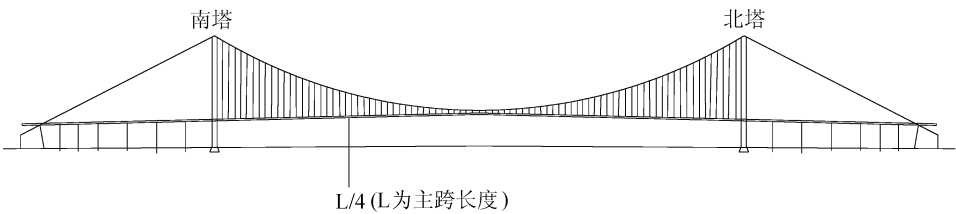


图 1 主梁测试部位  
Fig. 1 Measuring position of main girder

在过焊孔处的顶板和 U 肋上沿垂直于焊缝方向各粘贴 1 个应变片;在横隔板与 U 肋腹板连接焊缝处沿垂直于焊缝方向粘贴 1 个应变片;在横隔板弧形缺口有效截面最小处沿竖直方向粘贴 1 个应变片。测点布置时,综合考虑了设备情况以及试验的经济性和有效性,测点布置如图 2 所示。

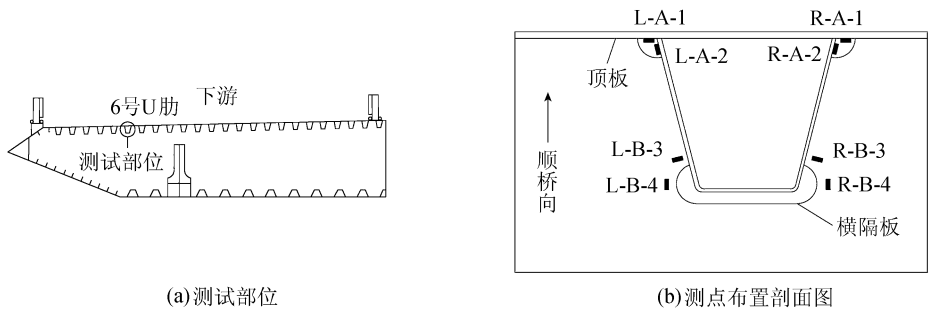


图 2 顶板、U 肋和横隔板上测点布置  
Fig. 2 Distribution of measuring points on roof, U-rib, and diaphragm plate

1.2 动态应变监测

2013 年 5 月 8—9 日,在大桥正常通车运营情况下,对钢桥面板局部构造细节进行了疲劳应力监测,使用 INV303/306 型智能信号采集仪连续采集 24 h 的动态应变,采样频率为 50 Hz。

桥梁结构的疲劳损伤与应力幅大小有关,而应力幅主要是由车辆荷载引起的。测试过程中,由于受到风荷载、温度荷载以及各种噪音的干扰,实测数据会存在一定的误差。为了保证实测结果的可靠性,利用 DASP 数据自动采集处理系统软件对实测数据进行滤波处理,提取代表车辆经过时的应变时程,减少各环境因素产生的影响。限于篇幅,本文仅列出位于 U 肋同一侧 L-A-1、L-A-2、L-B-3 和 L-B-4 测点 300 s 的微应变  $\mu\varepsilon$  监测结果,如图 3 所示。

在一天监测中,9:00~12:00 和 14:00~17:00 这 2 个时段内各测点的应变值比其他时间段大,表明这 2 个时段内交通比较繁忙。从过焊孔处测点的应变时程曲线来看,顶板与 U 肋纵向连接焊缝的应变值大部分都在  $30\mu\varepsilon$  之内。从横隔板弧形缺口周边测点的应变时程曲线来看,此处的应变水平相对较大。

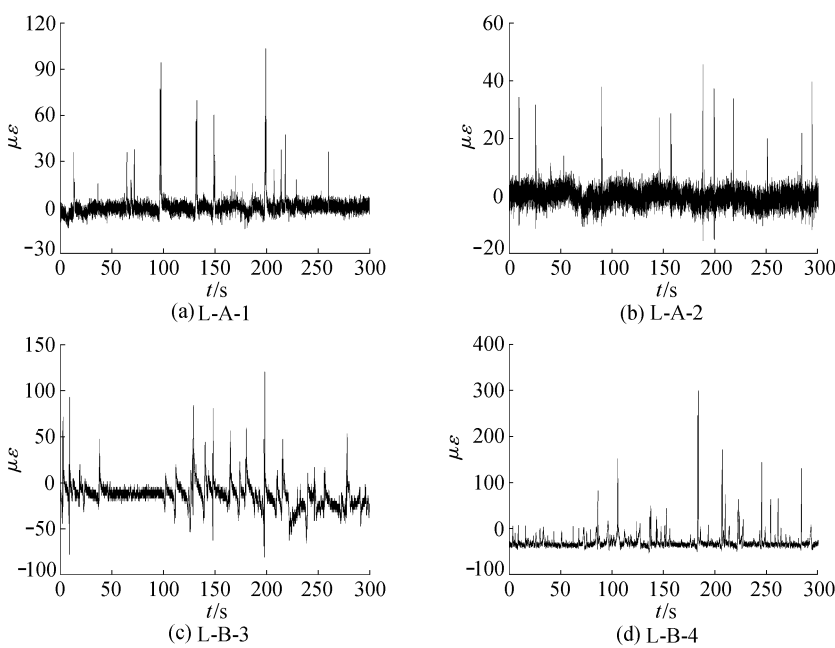


图3 部分测点 300 s 微应变时程曲线

Fig. 3 Strain time-history curves for 300 s at part of measuring points

2 疲劳应力谱分析

将应变时程数据乘以钢的弹性模量便可以得到相应的应力时程数据。根据应力时程曲线,仅看到某一时间区间内结构构件应力随时间的变化趋势,无法知道各级应力幅对结构构件作用的次数,所以需要求得相应的疲劳应力谱。利用编制的雨流计数法程序,提取整个应力时程中的应力循环,从而可得到疲劳应力谱。

通过比较发现,舍弃低于 2.0 MPa 的应力循环对疲劳寿命的计算基本没有影响,且舍弃低应力循环可以缩减需要处理的数据量,所以本文的疲劳应力谱中,低于 2.0 MPa 的应力循环被舍弃<sup>[15]</sup>。另外,在疲劳应力谱中,划分应力幅的区段长度定为 1.0 MPa。由于所得疲劳应力谱中前几级应力幅循环次数相差较大,如果使用直方图表示则不易观察,故本文列出了 L-A-1、L-A-2、L-B-3 和 L-B-4 测点的各级应力幅循环次数,见表 1。

由表 1 可知,随着应力幅值的增大,相应的循环次数逐渐降低。应力幅为 2 ~ 10 MPa 的循环次数占 90% 以上,说明各测点大部分时间经历的都是低幅值应力循环。BS 5400 规范<sup>[16]</sup>指出,较大的应力幅会使构件的初始缺陷扩大,从而降低疲劳极限值。

随着时间的增长,原来低于构件疲劳极限值的应力幅也会对损伤的累积产生作用。所以,对于低幅值的应力循环也应以一定方式予以考虑。

同时,根据 BS 5400 规范<sup>[16]</sup>关于钢桥焊接细节的疲劳等级分类可知,顶板与 U 肋纵向连接焊缝过焊孔处和横隔板弧形缺口周边处的最大应力幅值都超过了该细节不发生疲劳损伤的极限值,在车辆荷载作用的累积下,此处会发生疲劳破坏。

表 1 部分测点的应力幅循环次数

Table 1 Stress amplitudes' cycles for some measuring points

| 应力幅/<br>MPa | 循环次数     |          |          |          |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
|             | L-A-1    | L-A-2    | L-B-3    | L-B-4    |
| 2 ~ 3       | 49 815.5 | 50 255.5 | 51 423.5 | 69 751.5 |
| 3 ~ 4       | 5 878.5  | 4 582.5  | 7 324.0  | 10 673.5 |
| 4 ~ 5       | 1 836.5  | 1 316.5  | 3 540.0  | 3 129.5  |
| 5 ~ 6       | 937.5    | 815.0    | 2 234.5  | 2 398.0  |
| 6 ~ 7       | 687.0    | 636.0    | 1 308.0  | 1 668.0  |
| 7 ~ 8       | 490.0    | 524.0    | 927.0    | 1 423.0  |
| 8 ~ 9       | 455.0    | 479.0    | 711.0    | 1 435.5  |
| 9 ~ 10      | 363.0    | 423.0    | 581.0    | 1 349.5  |
| 10 ~ 30     | 1 870.5  | 1 934.0  | 3 611.5  | 5 850.5  |
| 30 ~ 50     | 19.0     | 1.5      | 356.5    | 1 142.0  |
| 50 ~ 70     | 0        | 0        | 22.5     | 407.0    |
| 70 ~ 90     | 0        | 0        | 0        | 185.0    |
| 90 ~ 110    | 0        | 0        | 0        | 76.0     |
| 110 ~ 130   | 0        | 0        | 0        | 22.0     |
| 130 ~ 150   | 0        | 0        | 0        | 4.0      |

### 3 基于 S-N 曲线的疲劳寿命分析

#### 3.1 计算公式

BS 5400 规范<sup>[16]</sup>通过对大量构件试样进行疲劳试验,得到不同构造细节的疲劳寿命曲线。通过对疲劳试验获得的大量数据( $\lg\sigma_r \sim \lg N$ )进行线性回归统计分析,得到桥梁构件在不同失效概率下疲劳寿命的经验计算公式:

$$N\sigma_r^m = K_0\Delta^d$$

(1)

式中: $N$ ——构件在应力幅  $\sigma_r$  作用下发生破坏所需要的次数; $m$ —— $\lg\sigma_r \sim \lg N$  均值线斜率的倒数; $K_0$ ——由统计分析结果均值线决定的常数项; $\Delta$ —— $\lg N$  的标准差反对数的倒数; $d$ ——概率因子。

#### 3.2 疲劳寿命计算

为了评估各构造细节的疲劳寿命,首先要确定其所属的疲劳等级,并选取相对应的S-N曲线。虽然各种规范都对钢桥的不同构造细节进行了分类,但不同规范对同一种构造细节的 S-N 曲线规定相差较大。由于此桥在设计时疲劳验算参照的是 BS 5400 规范<sup>[16]</sup>,故本文选用 BS 5400 规范<sup>[16]</sup>确定各构造细节的 S-N 曲线。根据该规范对构造细节的分类,顶板与 U 肋连接焊缝疲劳等级为 W 级,横隔板与 U 肋腹板连接焊缝疲劳等级为 F<sub>2</sub> 级,横隔板弧形缺口有效截面最小处的疲劳等级为 B 级。本文根据 2.3% 的失效概率对应的 S-N 曲线计算各构造细节的疲劳寿命值,相应疲劳寿命计算关系式中各参数值可查阅 BS 5400 规范<sup>[16]</sup>。

在载荷历程中,结构构件所产生的应力幅值有大有小,以往都是不考虑低于结构构件疲劳极限值的应力幅,认为它不能对构件产生疲劳损伤。但是,当较大的应力幅值使构件的初始缺陷增大到一定程度时,构件的疲劳极限值会有所降低。因此,随着时间增长,原来低于构件疲劳极限值的应力幅也会对损伤的累积产生作用。所以,对于低幅值的应力循环也应以一定方式予以考虑。根据 BS 5400 规范<sup>[16]</sup>,对于低于疲劳极限值  $\sigma_0$  的各个应力幅  $\sigma_r$  的循环次数,应按  $(\sigma_r/\sigma_0)^2$  比例减少。

根据各测点的疲劳应力谱,可以计算得出相应的疲劳寿命值,见表 2。

从表 2 可以看出,位于 L 侧 A 类测点的疲劳寿命明显低于位于 R 侧 A 类测点的疲劳寿命,这主要是因为 L 侧是重车道内侧,车载作用主要集中在 L 侧 A 类测点附近,从而在此处产生较大的应力幅。同时,L-A-1 测点(顶板上)的疲劳寿命只有 72 a,低于 L-A-2 测点(U 肋上)的疲劳寿命,说明顶板与 U 肋纵向连接焊缝过焊孔处易产生靠近顶板部位的疲劳裂纹。

在 B 类测点中,R-B-3 测点的疲劳寿命出现异常,可能是由于此处的应变片受到破坏造成的。R-B-4 和 L-B-3 测点的疲劳寿命都相当小,分别只有 52 a 和 39 a,这主要是因为车载作用下 U 肋的变形受到横隔板的约束,从而会在 B 类测点处产生很大的次弯曲应力。同时,横隔板的竖向变形在 B 类测点处也会产生较大的面内弯曲应力和剪应力。虽然从实桥检测情况来看此处发生的疲劳裂纹不多,但也应引起重视。

### 4 结 论

- a. 根据实测应变时程曲线可知,横隔板与 U 肋腹板连接焊缝处测点和横隔板弧形缺口有效截面最小处测点的应变水平相对较高。
- b. 各应力测点主要以低幅值应力循环为主,其中应力幅为 2 ~ 10 MPa 的循环次数占 90% 以上,但最大应力幅值均超过了 BS 5400 规范<sup>[16]</sup>规定的产生疲劳损伤的极限值,在车辆荷载的累积作用下会发生疲劳破坏。
- c. 从疲劳寿命分析结果来看,顶板与 U 肋纵向连接焊缝过焊孔处易产生靠近顶板部位的疲劳裂纹。横隔板弧形缺口周边部分测点的疲劳寿命较低,也容易产生疲劳裂纹。虽然在实桥上产生于该部位的疲劳裂

表 2 主梁 1/4 跨截面处各测点的累积损伤评估结果  
Table 2 Evaluation results of measuring points' cumulative damage over a quarter of main girder

| 测点    | 日等效应力幅/<br>MPa | 日损伤度/<br>10 <sup>-6</sup> | 疲劳寿命/<br>a |
|-------|----------------|---------------------------|------------|
| L-A-1 | 15.46          | 38.28                     | 72         |
| L-A-2 | 13.69          | 25.85                     | 106        |
| R-A-1 | 11.61          | 6.15                      | 445        |
| R-A-2 | 12.88          | 13.00                     | 211        |
| L-B-3 | 25.40          | 70.87                     | 39         |
| L-B-4 | 69.92          | 19.26                     | 142        |
| R-B-3 | —              | —                         | —          |
| R-B-4 | 80.10          | 53.04                     | 52         |



纹不多,但也应引起重视。

## 参考文献:

- [1] 吴冲. 现代钢桥[M]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 吕磊,吉伯海,马麟,等. 基于实测车流的大跨度悬索桥振动响应研究[J]. 土木工程学报,2011,44(增刊1):102-108. (LYULei, JI Bohai, MALin, et al. Study on the vibration response of long span suspension bridge based on the measured traffic flow[J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(Sup1):102-108. (in Chinese))
- [3] 吉伯海,陈冬华,徐声亮,等. 单柱式钢桥墩抗震性能校验方法[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(4):436-441. (JI Bohai, CHEN Donghua, XU Shengliang, et al. Check method for seismic performances of single-column type steel piers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010,38(4):436-441. (in Chinese))
- [4] 冯亚成,王春生. 正交异性钢桥面板纵肋与桥面板连接细节的疲劳评估及修复措施[J]. 钢结构,2011,26(2):27-30. (FENG Yacheng, WANG Chunsheng. Fatigue assessment and repairing measures of the rib to deck connections in orthotropic steel bridge decks[J]. Steel Construction, 2011,26(2):27-30. (in Chinese))
- [5] 王春生,陈惟珍,陈艾荣,等. 既有钢桥工作状态模拟与剩余寿命评估[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):43-47. (WANG Chunsheng, CHEN Weizhen, CHEN Airong, et al. 3D finite-element model simulation and remaining fatigue life assessment of existing steel bridges[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(1):43-47. (in Chinese))
- [6] 曹硕,张启伟. 基于实测的苏通大桥疲劳寿命评估[J]. 结构工程师,2011,27(2):84-89. (CAO Shuo, ZHANG Qiwei. Fatigue evaluation of Sutong bridge based on actual measurement[J]. Structural Engineers, 2011,27(2):84-89. (in Chinese))
- [7] LI Zhaoxia, CHAN T H T, K O J M. Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data-Part I: methodology and strategy[J]. International Journal of Fatigue, 2001,23(1):45-53.
- [8] CATBAS F N, SUSOY M, FRANGOPOL D M. Structural health monitoring and reliability estimation: long span truss bridge application with environmental monitoring data[J]. Engineering Structures, 2008,30(9):2347-2359.
- [9] 王超,钟继卫,朱宏平. 基于健康监测系统的钢箱梁疲劳评估[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(12):103-107. (WANG Chao, ZHONG Jiwei, ZHU Hongping. Fatigue assessment of steel box girder based on measured stress of health monitoring system[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012,34(12):103-107. (in Chinese))
- [10] GUO Tong, FRANGOPOL D M, CHEN Yuwen. Fatigue reliability assessment of steel bridge details integrating weigh-in-motion data and probabilistic finite element analysis[J]. Computers and Structures, 2012,112/113:245-257.
- [11] 王滢,李兆霞,吴伯建. 润扬悬索桥钢箱梁结构疲劳应力监测及其分析[J]. 东南大学学报:自然科学版,2007,37(2):280-286. (WANG Ying, LI Zhaoxia, WU Baijian. Fatigue stress monitoring and analysis for steel box girder of Runyang suspension bridge[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007,37(2):280-286. (in Chinese))
- [12] KWON K, FRANGOPOL D M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data[J]. International Journal of Fatigue, 2010,32(8):1221-1232.
- [13] 周毅,孙利民,闵志华. 斜拉桥主梁应变监测数据分析[J]. 振动与冲击,2011,30(4):230-235. (ZHOU Yi, SUN Limin, MIN Zhihua. Girder strain analysis of a cable-stayed bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(4):230-235. (in Chinese))
- [14] 王浩,李爱群,郭彤,等. 车载作用下大跨度悬索桥钢箱梁受力状态的实验研究[J]. 实验力学,2009,24(1):27-34. (WANG Hao, LI Aiqun, GUO Tong, et al. Experimental study of the steel box girder force state for a long span suspension bridge under vehicle loads[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009,24(1):27-34. (in Chinese))
- [15] 余波,邱洪兴,王浩,等. 江阴长江大桥钢箱梁疲劳应力监测及寿命分析[J]. 公路交通科技,2009,26(6):69-73. (YU Bo, QIU Hongxing, WANG Hao, et al. Fatigue stress monitoring and fatigue life analysis of steel box girder of Jiangyin suspension bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009,26(6):69-73. (in Chinese))
- [16] BS 5400—10—1980 Steel, concrete and composite bridges. Part 10: code of practice for fatigue[S].