

文章编号: 1000-4750(2013)11-0094-07

运营状态下悬索桥钢桥面板疲劳效应监测与分析

宋永生¹, 丁幼亮¹, 王晓晶², 李爱群¹, 李万恒², 闫昕²

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘 要: 基于润扬大桥悬索桥 7 个月的长期疲劳效应监测结果, 建立了铺装层-钢桥面板一体化疲劳分析模型, 并研究了两类关键焊接细节的疲劳效应与车流量、环境温度间的相关性关系。结果表明, 两类焊接细节的应力循环次数与车流量线性相关而与环境温度无关, 等效应力幅与环境温度线性相关而与车流量无关。由疲劳设计指南推荐的疲劳效应计算模型得到的应力循环次数较监测结果偏低, 顶板-纵肋焊接细节的等效应力幅与监测结果吻合良好而纵肋对接焊接细节的结果较为保守。上述分析结果为疲劳设计指南的进一步改进和完善提供参考和依据。

关键词: 疲劳效应; 正交异性钢桥面板; 沥青铺装层; 环境温度; 车流量; 有限元; 结构健康监测

中图分类号: TU318 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.07.0551

MONITORING AND ANALYSIS OF FATIGUE EFFECTS ON STEEL DECK OF A SUSPENSION BRIDGE IN WORKING CONDITIONS

SONG Yong-sheng¹, DING You-liang¹, WANG Xiao-jing², LI Ai-qun¹, LI Wan-heng², YAN Xin²

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: One integrated fatigue analytical model consisting of asphalt pavement layer and orthotropic steel bridge deck was established based on long-term fatigue effect monitoring results of Runyang Suspension Bridge in seven months. The correlations between fatigue effects of two pivotal welded joints and traffic flow as well as ambient temperature were then investigated respectively. The investigation results show that the number of stress cycles is merely in linear correlation with traffic flow, and is irrelevant with ambient temperature. In addition, the calculated number of stress cycles according to the fatigue computation model recommended by design code is lower than that by monitoring results. The equivalent stress amplitude of deck-rib is coincident with monitoring results while the equivalent stress amplitude of rib-rib welded joint is relatively conservative. The above results are beneficial and referential for further improvement and completion of design code.

Key words: fatigue effect; orthotropic steel bridge deck; asphalt pavement layer; ambient temperature; traffic flow; finite element method; structural health monitoring

正交异性钢桥面板因其自重轻、承载能力高、施工速度快等优点而广泛应用于国内外的大型桥

梁^[1]。正交异性钢桥面板构造复杂, 焊接量大, 在车辆往复交变荷载作用下, 部分焊接细节易遭受疲

收稿日期: 2012-07-26; 修改日期: 2012-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178100); 交通运输部“十二五”重大科技专项项目(2011318223190); 江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助计划项目(1105000214); 江苏省研究生创新计划项目(CXZZ-0162); 东南大学优秀博士学位论文基金项目(YBJJ-1122)。

通讯作者: 丁幼亮(1979—), 男, 江苏苏州人, 副研究员, 博士, 博导, 从事结构健康监测及安全评估研究(E-mail: civilding@163.com)。

作者简介: 宋永生(1984—), 男, 安徽蚌埠人, 博士生, 从事结构健康监测及安全评估研究(E-mail: song1984419@163.com);

王晓晶(1973—), 男, 宁夏吴忠人, 副研究员, 硕士, 从事特大桥综合管理系统的研发研究(E-mail: 1074174389@qq.com);

李爱群(1962—), 男, 湖南耒阳人, 教授, 博士, 博导, 从事结构健康监测及安全评估研究(E-mail: aiqunli@seu.edu.cn);

李万恒(1972—), 男, 山东烟台人, 副研究员, 博士, 从事桥梁结构设计和安全管理研究(E-mail: wh.li@rioh.cn);

闫昕(1978—), 男, 吉林长春人, 副研究员, 博士, 从事桥梁结构设计和安全评估研究(E-mail: yanxin66hrb@yahoo.com.cn)。

劳开裂^[2]。一旦开裂, 钢桥面板的疲劳裂纹检查和修复十分困难, 不仅代价昂贵而且不利于桥梁运营安全。因此, 设计时应应对正交异性钢桥面板的疲劳给予充分重视和重点关注。

国外对正交异性桥面板疲劳效应的研究开展较早, 相继编制了设计规范, 如英国规范BS5400, 欧洲规范Eurocode3, 美国规范AASHTO等。近20年来, 正交异性钢桥面板在我国大跨公路桥梁的应用发展较快, 但疲劳研究和设计规范制订工作滞后于桥梁建设, 疲劳设计通常是参考国外规范进行。由于交通状况、桥梁结构形式和施工工艺等差异, 国外规范并不完全符合我国国情。基于多年的研究成果和工程经验, 中交公路规划设计院有限公司等单位联合编制了《正交异性钢桥面系统设计与基本维护指南》^[3](以下简称《指南》), 对指导正交异性钢桥面的疲劳效应设计计算具有重要意义。《指南》采用标准疲劳车荷载模型对正交异性钢桥面板进行疲劳设计验算, 仅计入总重大于3t的车辆(对于八车道, 占总车流量的30%), 同时不考虑各车道的车流量差异。

随着桥梁结构健康监测系系统^[4]的广泛应用, 通过分析运营期内正交异性钢桥面板的疲劳应变数

据, 可深入研究疲劳效应的变化规律, 相关研究成果可有效反馈疲劳设计, 对完善和深化疲劳设计指南具有积极意义。本文以润扬长江大桥悬索桥7个月的疲劳应变监测分析结果为基础, 建立了钢箱梁的铺装层-钢桥面板一体化疲劳分析模型, 研究了二类关键焊接细节的的疲劳效应参数(即应力循环次数和等效应力幅)与车流量、环境温度间的相关性关系, 结果表明《指南》推荐的疲劳效应计算方法是合理的, 但应对疲劳车辆荷载模型和验算车流量进一步优化, 且应考虑环境温度对疲劳效应的影响。

1 润扬大桥悬索桥疲劳效应监测

润扬长江大桥是连接镇江和扬州两市的跨江大桥, 它由北汊斜拉桥和南汊悬索桥组成。其中, 悬索桥的跨度为1490m, 主梁采用带正交异性桥面板的扁平钢箱梁。为了对润扬悬索桥钢桥面板关键位置的焊接细节持续地开展疲劳应变监测, 掌握钢箱梁在运营环境作用下的疲劳效应变化规律, 桥梁建设期间分别在钢箱梁跨中截面的上游侧和下游侧安装了疲劳应变监测传感器, 传感器编号和横桥向位置见图1。应变传感器采用三向应变计, 表1分别给出了各传感器的编号和监测参数。

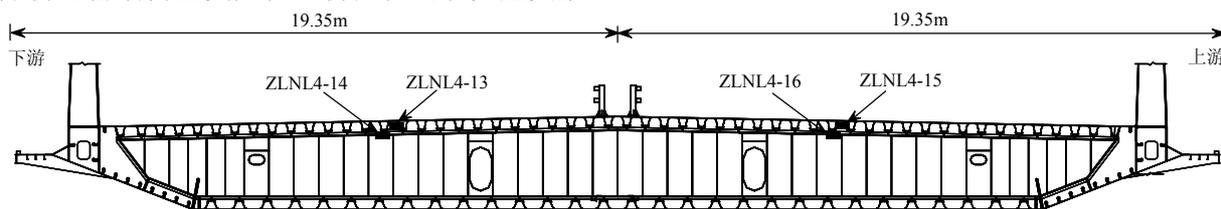


图1 润扬大桥悬索桥疲劳应变传感器横桥向布置图

Fig.1 Transverse layout of fatigue strain gauges installed in Runyang Suspension Bridge

表1 润扬大桥悬索桥疲劳应变传感器监测参数

Table 1 Monitoring parameter of fatigue strain gauge in Runyang Suspension Bridge

编号	监测焊接细节类型	所在车道侧
ZLNL4-13	顶板-纵肋	下游侧
ZLNL4-14	纵肋对接	下游侧
ZLNL4-15	顶板-纵肋	上游侧
ZLNL4-16	纵肋对接	上游侧

1.1 车辆荷载作用下的疲劳效应监测

顶板-纵肋焊接细节和纵肋对接焊接细节的疲劳监测分别采用三向应变计的横桥向和顺桥向应变数据进行分析^[5-6]。采用“简化雨流计数法”^[6]对各传感器每天的应力时程提取应力循环, 得到每天的应力幅谱 S_i , 在此基础上计算日等效应力幅 S_{eq} , 同时可得对应的日应力循环次数 N_s ^[8-10], 其

公式具体为:

$$S_{eq} = \sqrt[m]{\frac{\sum S_i n_i^m}{\sum n_i}} \quad (1)$$

$$N_s = \sum n_i \quad (2)$$

式中: n_i 为对应于第 i 个应力幅 S_i 的循环次数; m 为 $S-N$ 曲线的斜率, 本文取 3。

选取 2009 年 1 月~7 月期间 57d 的应变数据, 得到各天的日应力循环次数 N_s 和日等效应力幅 S_{eq} , 同时利用收费站数据库得到上下游侧的日车流量 N_v 。由于两个应变计的安装位置接近, 可忽略车流量差异对两类焊接细节应力循环次数的影响。以上游侧为例, 表 2 给出了该时间段上游侧车流量 N_v 和日应力循环次数 N_s 的平均值。从表中可以发现, 在相同车辆荷载作用下, ZLNL4-15 与 ZLNL4-16

应力循环次数 N_s 的比值为 1.89。

图2分别给出了ZLNL4-15和ZLNL4-16的日应力循环次数 N_s 与上游侧车流量 N_v 之间的相关性散点图。从图中可以发现,无论是顶板-纵肋或纵肋对接焊接细节,应力循环次数 N_s 与车流量 N_v 间均表现出较好的线性关系。采用最小二乘法 and 线性回归模型分别建立上游侧顶板-纵肋和纵肋对接焊接细节的日应力循环次数 N_s 与车流量 N_v 的相关性模型,同时得到相关系数 R ,结果如图2所示。对于ZLNL4-15和ZLNL4-16,日车流量和日应力循环次数间的相关性系数 R 分别为0.76和0.82(均大于0.75),可认为悬索桥的顶板-纵肋和纵肋对接焊接细节的应力循环次数 N_s 和车流量 N_v 间成正比。

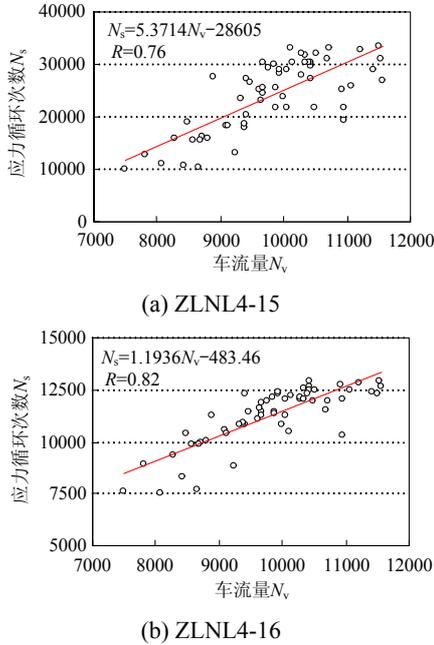


图2 润扬大桥悬索桥应力循环次数 N_s 与车流量 N_v 关系散点图

Fig.2 Scatter diagram between N_s and N_v of Runyang Suspension Bridge

表2 应力循环次数 N_s 与上游侧车流量 N_v 的平均值
Table 2 The average value of N_s and N_v in downstream side

编号	上游侧车流量	应力循环次数
ZLNL4-15	9812	21179
ZLNL4-16		11228

已有研究发现,环境温度的变化对钢桥面板焊接细节在车载作用下的疲劳应力存在较大影响^[8,11-12]。为尽量消除温度对等效应力幅与车流量间相关性规律的影响,分别选取两个温度相对稳定的时间区段(即T1和T2)内的36d应变数据,对应的的时间区段分别为1月初至3月中旬和5月中旬至7月底,图3分别给出了T1和T2内由上游侧应变传感器算得

的等效应力幅 S_{eq} 与车流量 N_v 的相关性散点图。从图中可以发现,无论ZLNL4-15或ZLNL4-16, T1和T2内的等效应力幅与车流量间相关性较低。以T1为例,计算得到两个焊接细节等效应力幅与车流量间的相关系数 R 分别为0.34和0.14(均小于0.50),因此可认为等效应力幅与车流量无关。上述结果表明,《指南》采用的标准疲劳车荷载模型并计入疲劳车流量的设计计算方法是合理的。

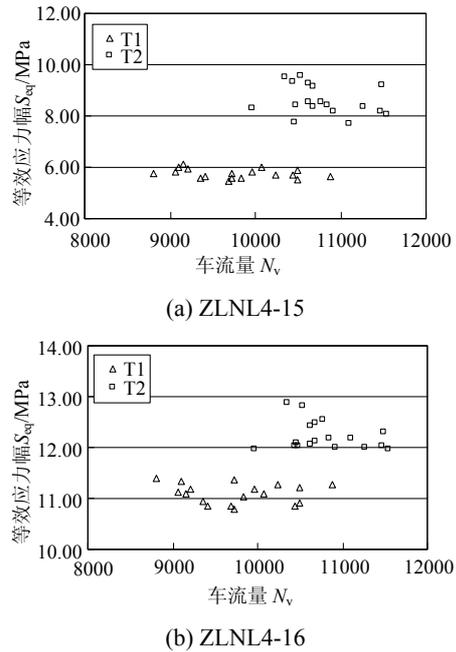


图3 日等效应力幅 S_{eq} 与车流量散点图

Fig.3 Scatter diagram between S_{eq} and N_v of Runyang Suspension Bridge

1.2 温度作用下的疲劳效应监测

图3同样反映出: ① 对于两类焊接细节, T2内的等效应力幅均大于T1, 表现为环境温度高, 等效应力幅高, 反之则较低; ② 相比于纵肋对接焊接细节, 相同的温度下的顶板-纵肋焊接细节的等效应力幅较低; ③ 顶板-纵肋焊接细节的等效应力幅对温度的敏感性相对较高: 对于顶板-纵肋焊接细节, 其在T1和T2内的等效应力幅平均值分别为5.75MPa和11.75MPa, 后者为前者的1.50倍; 而对于纵肋对接焊接细节, 其在T1和T2内的等效应力幅平均值分别为8.62MPa和12.23MPa, 后者仅为前者的1.10倍。

图4分别给出了ZLNL4-15和ZLNL4-16在1月和7月份的应力幅频值谱。从图中可以发现, 相比于1月份的应力幅谱, 顶板-纵肋和纵肋对接两类焊接细节在7月份的低应力幅段的比例较小而高应力幅段的较大。同时, 相比于纵肋对接焊接细节, 顶板-纵肋焊接细节的应力幅频值谱随温度的变化较大。

上述结果表明, 温度升高将导致车载作用下的两类焊接细节的高应力幅频段的比例增加, 造成等效应力幅总体水平上升; 相比于纵肋对接焊接细节, 温度变化对顶板-纵肋焊接细节的应力幅谱和等效应力幅的影响更为显著。

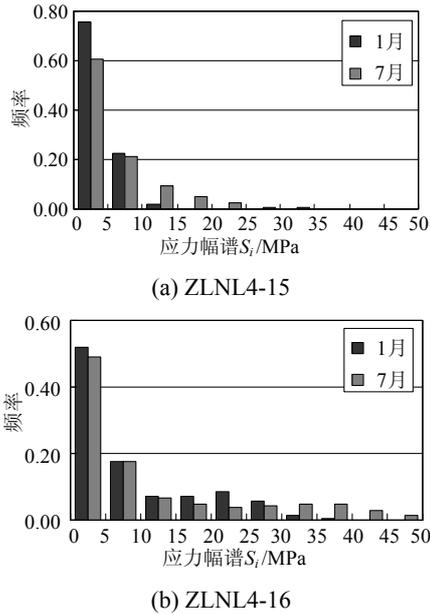


图 4 上游侧桥面板焊接细节 1 月和 7 月应力幅谱对比
Fig.4 Comparison of spectrum of equivalent stress amplitude in January and July

由上述疲劳应变监测结果可得: ① 正交异性钢桥面板两类焊接细节的应力循环次数与车流量成正比而与环境温度无关, 车辆荷载作用下的顶板-纵肋焊接细节的应力循环次数大于纵肋对接焊接细节; ② 两类焊接细节的等效应力幅与环境温度间的相关性较为显著, 表现为等效应力幅随着环境温度的升高而增加, 且顶板-纵肋焊接细节的等效应力幅对温度变化的敏感性显著高于纵肋对接焊接细节。然而, 《指南》推荐的疲劳设计方法并未考虑环境温度的影响效应, 因此, 疲劳设计指南中应进一步考虑环境温度变化对正交异性桥面板疲劳效应的影响。

2 运营状态下钢桥面板疲劳效应分析

2.1 疲劳效应分析模型

为进一步分析润扬长江大桥悬索正交异性钢桥面板两类关键焊接细节的疲劳效应与车流量、温度间的相关性规律, 采用有限元软件 ANSYS 建立了铺装层-桥面板的一体化疲劳分析模型。由文献 [13] 给出的两类焊接细节的影响线表明, 顶板-纵肋和纵肋对接焊接细节的顺桥向影响线长度分别为 1

倍和 3 倍的横隔板间距, 本文的分析模型顺桥向长度取为 5 个横隔板间距, 模型在顺桥向两端固支。顶板、纵肋、横隔板均采用 Shell63 弹性壳单元模拟, 沥青铺装层采用 Solid45 弹性实体单元模拟, 其弹性模量采用文献 [14] 的温度-沥青铺装层弹性模量的相关模型。图 5 给出了横桥向 1/2 有限元模型图。车辆模型采用《指南》提出的疲劳标准车模型, 车辆纵向中心线与应变传感器所在车道的中心线重合, 并沿顺桥向以 60km/h 的速度通过模型, 如图 6 所示。图 6 同时给出了两类焊接细节疲劳应变计的位置。

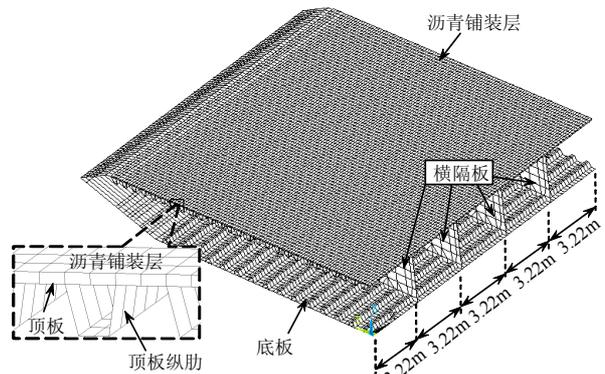


图 5 钢箱梁 1/2 疲劳分析有限元模型
Fig.5 Half model of FEM for fatigue analysis of steel box girder

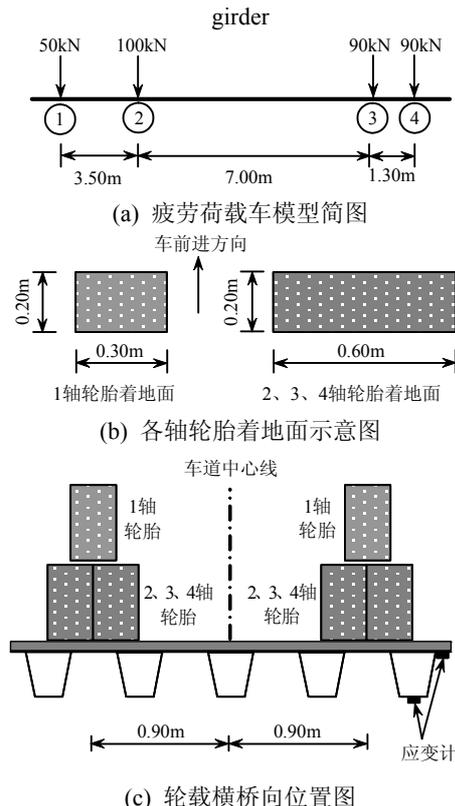


图 6 疲劳标准车荷载模型
Fig.6 Load model of fatigue standard vehicle

2.2 车辆荷载作用下的疲劳效应分析

T1 和 T2 内顶板的平均温度分别为 13.8℃和 33.2℃。由沥青铺装层温度场的实桥试验结果^[15]，取沥青层平均温度与顶板间的温差为+5℃，采用文献[14]给出的沥青层弹性模量和温度的相关性模型，分别算得沥青铺装层弹性模量 $E=4405\text{MPa}$ 和 $E=1928\text{MPa}$ ，分析时简化为 4000MPa 和 2000MPa。将标准疲劳车模型加载至如图 6(c)所示的横桥向位置，并如 2.1 节所述通过钢箱梁，得到 E 分别等于 4000MPa 和 2000MPa 时应变计处两类焊接细节的疲劳应力时程曲线，如图 7 所示。

从图 7 可以发现：① 不同沥青铺装层弹性模量下的两类焊接细节的应力时程曲线形态相同，仅应力峰(谷)值间存在差异；② 两类焊接细节的疲劳应力时程曲线的峰(谷)数目与疲劳车模型的轴数一致；③ 对于纵肋对接焊接细节，各车轴间的应力叠加效应较顶板-纵肋更为显著；④ 顶板-纵肋焊接细节的应力时程曲线变化对沥青层弹性模量的敏感性更加明显。

由图 7 的应力时程曲线，分别算得 $E=4000\text{MPa}$ 和 $E=2000\text{MPa}$ 时的等效应力幅 S_{eq} 和应力循环次数 N_s ，如表 3 所示。从表中可以发现：对于应力循环次数，两类焊接细节均随 E 的变化保持不变，且顶板-纵肋焊接细节的应力循环次数始终为纵肋对接焊接细节的 2 倍。对于等效应力幅，两类焊接细节均随 E 的减小而增大且纵肋对接焊接细节的等效应力幅始终大于顶板-纵肋焊接细节，而顶板-纵肋焊接细节对沥青铺装层弹性模量的敏感性高于纵肋对接： $E=2000\text{MPa}$ 时顶板-纵肋焊接细节的应力幅约为 $E=4000\text{MPa}$ 时的 1.52 倍，而纵肋对接焊接细节仅为 1.13 倍。上述分析结果与疲劳效应监测结果一致，因此可采用该模型作为正交异性钢桥面的疲劳效应分析模型。

同时，由表 2 给出的上游侧车流量，根据《指南》推荐的疲劳车流量计算方法，分别得到了两类焊接细节的应力循环次数为 8095 和 4047，远小于表 2 所示的监测结果；如 2.2 节所述，顶板-纵肋和纵肋对接焊接细节在 T1(T2)内的等效应力幅的平均值分别为 5.75MPa(11.75MPa) 和 8.62MPa (12.23MPa)，对比表 3 得：顶板-纵肋焊接细节分析结果吻合良好，而纵肋对接焊接细节的结果比监测值的大。由此可知，对于应力循环次数，由《指南》推荐计算方法得到的结果偏小；而对于等效应力

幅，由《指南》推荐计算方法得到的顶板-纵肋焊接细节结果较为吻合但纵肋对接焊接细节的结果偏于保守。

综上所述，正交异性钢桥面板两类关键焊接细节的应力循环次数与车流量相关而与环境温度变化无关。相同车辆荷载作用下，顶板-纵肋焊接细节的应力循环次数为纵肋对接的 2 倍。由上文可知，因两类焊接细节的影响线长度相差较大，导致相同车载作用下的应力时程曲线的显著差异(纵肋对接焊接细节的波峰(谷)数较少)，造成两类焊接细节的应力循环次数差异较大。同时，等效应力幅与车流量无关而与桥面板沥青铺装层弹性模量间具有较大的相关性，其中顶板-纵肋焊接细节的等效应力幅对沥青铺装层弹性模量的敏感性高于纵肋对接焊接细节。由于沥青铺装层弹性模量与环境温度间相关性较大，因此有必要研究环境温度对两类焊接细节等效应力幅的影响性规律。

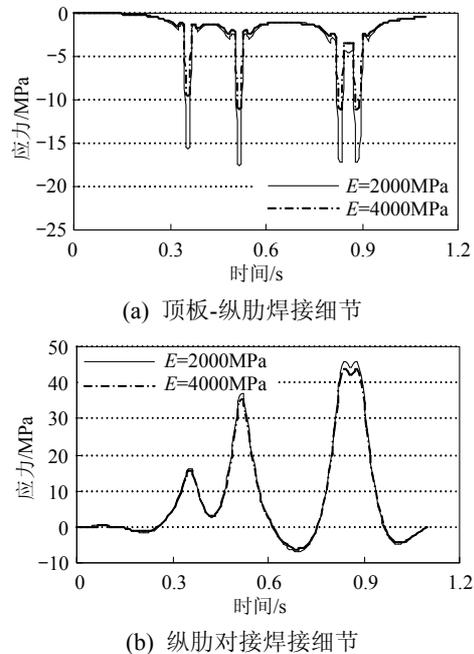


图 7 不同沥青层弹性模量下的应力时程曲线

Fig.7 History curve of stress under different elastic modulus of asphalt pavement

表 3 不同沥青弹性模量下的有效应力幅 S_{eq} 和循环次数 N_s 结果

Table 3 Calculation results of S_{eq} and N_s under different elastic modulus of asphalt pavement

弹性模量 E/MPa	焊接细节类型			
	顶板-纵肋		纵肋对接	
	S_{eq}	N_s	S_{eq}	N_s
2000	10.37	11	33.70	5.5
4000	6.83	11	31.94	5.5

2.3 温度作用下的疲劳效应分析

采用文献[14]给出的沥青层弹性模量和温度的相关性模型, 分别得到 0℃~60℃的沥青层弹性模量, 继而得到疲劳分析模型 I 至 VII, 将车辆模型按照 2.1 节所述加载至上述模型, 得到两类焊接细节的疲劳应力时程曲线后算得等效应力幅, 结果见表 4。

表 4 疲劳分析模型编号及对应的温度、沥青层弹性模量
Table 4 Table of analytical model and corresponding temperature and elastic modulus of asphalt pavement

疲劳分析 模型编号	温度/(℃)	沥青层 弹性模量 E/MPa	等效应力幅 S_{eq}/MPa	
			顶板-纵肋	纵肋对接
I	0	10562	2.68	28.60
II	10	6791	4.22	30.25
III	20	4366	6.33	31.67
IV	30	2807	8.94	32.94
V	40	1805	11.58	33.95
VI	50	1161	15.19	34.68
VII	60	746	18.43	35.31

从表中可以看出, 随着温度的升高, 两类焊接细节的等效应力幅随之增加; 顶板-纵肋焊接细节的等效应力幅对温度变化的敏感性较高: 当温度由 0℃增至 60℃, 顶板纵肋焊接细节的等效应力幅由 2.68MPa 增至 18.43MPa(同比增加 588%), 而纵肋对接焊接细节仅由 28.60MPa 增至 35.31MPa(同比增加 23%)。图 8 分别给出了两类焊接细节的等效应力幅与温度间的相关性散点图。从图中可以看出, 随着温度的升高, 两类焊接细节的等效应力幅线性增加。分别建立两类焊接细节的等效应力幅与温度的相关性模型(详见图 8), 可知顶板-纵肋焊接细节的斜率约为纵肋对接焊接细节的 2.38 倍, 即同一温差下, 前者等效应力幅的差异约为后者的 2.38 倍。

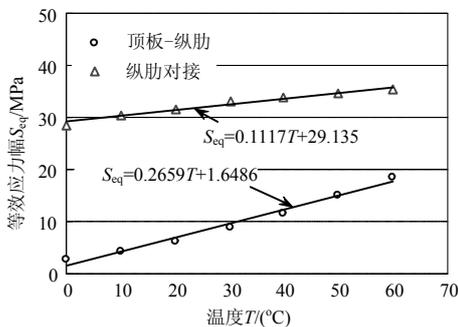


图 8 等效应力幅 S_{eq} 与温度 T 散点图及相关模型

Fig.8 Scatter diagram and correlation model of S_{eq} and T

综上所述, 两类焊接细节的等效应力幅均随温度的上升线性增加, 但顶板-纵肋焊接细节的等效应

力幅对温度的敏感性显著高于纵肋对接焊接细节。基于上述分析结果可知, 《指南》的疲劳效应计算方法应进一步修正以考虑铺装层材性对环境温度的敏感性对焊接细节处等效应力幅的影响规律。

3 结论

为分析运营状态下润扬长江大桥悬索桥正交异性钢桥面板疲劳效应的变化规律, 建立了铺装层-钢桥面板一体化疲劳分析模型, 分别得到了顶板-纵肋和纵肋对接两类焊接细节的疲劳效应, 即等效应力幅和应力循环次数, 与车流量、环境温度间的相关性关系, 同时对比分析了监测结果、分析结果和我国疲劳设计指南计算方法结果的差异, 主要结论如下:

(1) 两类焊接细节的等效应力幅与车流量无关, 而应力循环次数与车流量成正比, 采用疲劳标准荷载车模型并考虑车流量的疲劳效应计算方法是合理的。

(2) 桥面沥青铺装层材性随环境温度变化而产生的差异对等效应力幅的影响显著, 但对应力循环次数无影响, 而《指南》中并未考虑环境温度变化对等效应力幅的影响。

(3) 相比于监测结果, 由《指南》推荐的疲劳计算模型得到的应力循环次数结果偏低; 对于等效应力幅, 顶板-纵肋的计算和监测结果吻合良好而纵肋对接的计算结果较为保守。

(4) 上述结果将为疲劳设计指南的进一步修订提供参考和依据, 而改进疲劳车辆荷载模型和考虑温度的疲劳设计方法将在后续研究中继续开展。

参考文献:

[1] 王高新, 丁幼亮, 李爱群, 周广东. 基于长期监测数据的润扬大桥斜拉桥钢箱梁横向温差特性研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 163—167, 197.
Wang Gaoxin, Ding Youliang, Li Aiqun, Zhou Guangdong. Characteristics of transverse temperature differences of steel box girder in Runyang Cable-stayed Bridge using long-term monitoring [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 163—167, 197. (in Chinese)

[2] Mustafa Aygül, Mohammad Al-Emrani, Shota Urushadze. Modeling and fatigue life assessment of orthotropic bridge deck details using FEM [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 40(3): 129—142.

[3] 中华人民共和国行业标准. 正交异性钢桥面系统的设计和维护指南(报批稿)[S]. 2010.
Industry Standard of the People's Republic of China.

- Guidelines for design and maintain of orthotropic steel deck (Edition for approval) [S]. 2010. (in Chinese)
- [4] Wu Z J, Ghosh K, Qing X L, et al. Structural health monitoring results on Tsing Ma, Kap Shui Mum and Ting Kau bridges [C]. Proceeding of SPOE- The International Society for Optical Engineering, Smart Structures and Materials 2006 – Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems, San Diego, CA, 2006.
- [5] Wang Y, Li Z X, Li A Q. Combined use of SHMS and finite element strain data for assessing the fatigue reliability index of girder components in long-span cable-stayed bridge [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2010, 54(2): 127–136.
- [6] 邓扬, 丁幼亮, 李爱群. 钢箱梁焊接细节基于长期监测数据的疲劳可靠性评估: 疲劳可靠度指标[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 86–92.
Deng Yang, Ding Youliang, Li Aiqun. Fatigue reliability assessment for welded details of steel box girders using long-term monitoring data: fatigue reliability indices [J]. Chinese Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 86–92. (in Chinese)
- [7] Downing S D, Socie D F. Simplified rainflow cycle counting algorithms [J]. International Journal of Fatigue, 1982, 4(1): 31–40.
- [8] Guo T, Li A Q, Wang H. Influence of ambient temperature on the fatigue damage of welded bridge decks [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(6): 1092–1102.
- [9] BSI BS5400: Part10, Code of Practice for Fatigue [S]. British Standards Institution, 1982.
- [10] BS 7608. Fatigue design and assessment of steel structures [S]. Standards Institution, 1993.
- [11] Bohai Ji, Dong-hua Chen, Lin Ma, et al. Research on stress spectrum of steel decks in suspension bridge considering measured traffic flow [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(1): 65–75.
- [12] Jun-Hyeok Choi, Do-Hwan Kim. Stress characteristics and fatigue crack behavior of the longitudinal rib-to-cross beam joints in an orthotropic steel deck [J]. Advances in Structural Engineering, 2008, 11(2): 189–199.
- [13] 邓扬. 基于长期监测数据的大跨桥梁结构状态预警与评估方法及其应用[D]. 南京: 东南大学, 2011: 80–86.
Deng Yang. Methodology and application of damage alarming and safety assessment for long-span bridge structures based on long-term monitored data [D]. Nanjing: Southeast University, 2011: 80–86. (in Chinese)
- [14] 查旭东. 沥青路面反算模量的温度修正[J]. 公路, 2002(6): 51–53.
Zha Xudong. Temperature adjustment for back calculation moduli of asphalt pavement [J]. Highway, 2002(6): 51–53. (in Chinese)
- [15] 李洪涛, 黄卫. 润扬大桥钢桥面板铺装实桥试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(4): 76–78.
Li Hongtao, Huang Wei. Study on deck surfacing of trail bridge for Runyang Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(4): 76–78. (in Chinese)

(上接第 93 页)

- [10] Kim Y M, You K P, Ko N H. Across-wind responses of an aeroelastic tapered tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 2008, 96(8/9): 1307–1319.
- [11] Kareem A, Kijewski T, Tamura Y. Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications [J]. Wind Structure, 1999, 2(3): 201–251.
- [12] Kim Y M, Kawai H. Aerodynamic methods for reducing bending and torsional vibrations of tall building [C]. Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen, Denmark, 1999: 673–677.
- [13] 黄鹏, 顾明, 全涌. 高层建筑气动阻尼的实验研究[C]. 西安: 第十二届全国结构风工程学术会议, 2003: 359–364.
Huang Peng, Gu Ming, Quan Yong. Experimental study of aerodynamic damping of high-rise buildings [C]. Xi'an: Proceedings of the 12th National Conference on Structural Wind Engineering, 2003: 359–364. (in Chinese)
- [14] 曹会兰. 超高层建筑结构的气动阻尼研究[M]. 上海: 同济大学, 2012: 123–128.
Cao Huilan. Aerodynamic damping of super-high-rise building [M]. Shanghai: Tongji University, 2012: 123–128. (in Chinese)
- [15] GB50009-2001, 建筑结构荷载规范[S]. 2001.
GB50009-2001, Architectural structure load standards load code [S]. 2001. (in Chinese)
- [16] AIJ 2004 Recommendations for loads on building [S]. Architectural Institute of Japan, 2004.
- [17] Tamura Y, Suganuma S Y. Evaluation of amplitude-dependent damping and natural frequency of buildings during strong winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 59(2/3): 115–130.