

基于崇启大桥交通流数据归一化处理的钢桥面板 疲劳耐久性评估

林峰¹, 童浩^{2*}, 姜旭³

(1. 江苏省高速公路经营管理中心, 南京 210003; 2. 江苏现代路桥有限责任公司, 南京 210018;
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了评估崇启大桥主桥钢箱梁疲劳易损部位的疲劳耐久性, 本文开展了基于实际交通流的参数分析和有限元模拟。首先, 采用动态称重系统对崇启大桥主桥进行为期37个月的交通流统计分析, 统计各车辆的车重、轴距和轴重等特征参数, 并基于以上交通流数据的归一化处理建立了适用于崇启大桥的等效疲劳车辆荷载谱; 之后, 选择更易受到疲劳损坏的顶板-U肋焊缝作为正交异性钢桥面板的疲劳敏感区, 通过将等效疲劳车辆荷载谱加载到更为精细的钢桥面板局部模型上, 计算得出了顶板-U肋焊缝处的疲劳应力幅和疲劳寿命。研究表明, 崇启大桥顶板-U肋焊缝内外侧的等效常值应力幅超出了疲劳验算的容许应力幅, 计算的相应区域疲劳寿命也表明了其存在一定的疲劳风险。以上结果为后续崇启大桥钢箱梁实桥疲劳应力监测以及各疲劳敏感区细节的具体疲劳损伤评估奠定了初步研究基础, 并可为其他使用正交异性钢桥面板的桥梁的疲劳耐久性评估提供参考。

关键词: 正交异性钢桥面板; 数据归一化; 车辆荷载谱; 疲劳耐久性; 动态称重系统; 交通流数据; 等效常值应力幅
中图分类号: U441.4, U491.112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2025)12-0030-11
DOI: 10.13969/j.jzgjgiz.20240704001

Fatigue Durability Assessment of Orthotropic Steel Decks Based on Normalized Traffic Flow Data from the Chongqi Bridge

LIN Feng¹, TONG Hao^{2*}, JIANG Xu³

(1. The Expressway Operation and Administration Center of Jiangsu Province, Nanjing 210003, China; 2. Jiangsu Xiandai Road&Bridge Co., Ltd., Nanjing 210018, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

*Corresponding author: 28223506@qq.com

Abstract: The objective of this study is to assess the fatigue durability of the fatigue-prone regions of the steel box girders of the Chongqi Bridge main bridge, and to this end, actual traffic flow parameter analysis and finite element simulation were carried out. Firstly, a 37-month traffic flow statistical analysis of the main bridge of the Chongqi Bridge was carried out by using a dynamic weighing system (WIM) to count the vehicle weight, axle distance, axle weight and other characteristic parameters of each vehicle, and the equivalent fatigue vehicle load spectrum applicable to the Chongqi Bridge was established based on the normalization of the above traffic flow data. Secondly, the top plate-U-rib weld, which is more prone to be fatigue-damaged, was chosen to be the fatigue-sensitive area of orthotropic steel decks, and the equivalent

收稿日期: 2024-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(52278207, 52578236)

作者简介:

林峰(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事桥梁养护运营方面的研究。E-mail: 284276709@qq.com。

通信作者:

童浩(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事桥梁养护运营方面的研究。E-mail: 28223506@qq.com。

fatigue vehicle load spectrum was applied to a more detailed local model of the steel decks to calculate the fatigue stress amplitude and fatigue life of the weld. The results show that the equivalent constant stress amplitude at the inner and outer sides of the top plate-U-rib weld of the Chongqi Bridge exceeds the allowable stress amplitude for fatigue calculation, and the fatigue life of the corresponding area also indicates that there is a certain fatigue risk. The above results lay a preliminary research foundation for the subsequent fatigue stress monitoring of the real steel box girder bridge of the Chongqi Bridge as well as the specific fatigue damage assessment of each fatigue-sensitive zone detail, and can provide an empirical reference for the fatigue durability assessment of other bridges using orthotropic steel decks.

Keywords: orthotropic steel bridge deck; data normalization; vehicle load spectrum; fatigue durability; dynamic weighing system; traffic flow data; equivalent constant stress amplitude

正交异性钢桥面板由纵向加劲肋、横隔板和盖板等焊接而成,具有重量轻、抗扭及横向抗弯刚度大、整体性好、施工便捷等优点,已被广泛应用于国内外各类桥梁中。然而,正交异性钢桥面板焊缝繁多、结构复杂,导致主要构件连接处应力集中明显,加之交通流荷载的反复作用,构件连接处易产生疲劳损伤,给钢桥的运营维护带来巨大挑战^[1-2]。

正交异性钢桥面板的疲劳源于车辆荷载反复作用下的累积损伤,因此对钢桥面板的疲劳设计和耐久性评估应采用一组能代表日常车辆荷载的典型荷载谱,即将大量的往返车辆数据简化为少数几类车型的荷载频值谱^[3-4]。目前主流的构建典型车辆荷载谱的方法为借助数理统计中的数据归一化方法,将大桥上的车辆进行分类整理成各类特定的车型,然后对收集整理的实测车辆数据进行加权平均,以获得各类车型的荷载特征,进而得出等效的疲劳荷载谱^[5]。翟慕赛等^[6]基于桥梁结构健康监测系统中的动态称重系统模块,获取了5种能够较好地代表不同等级的公路实际交通荷载水平的疲劳荷载谱,分析了某斜拉桥的钢箱梁节段模型的典型疲劳细节特征;赖毅等^[7]使用统计分析方法批量处理了江西省某大跨度钢箱梁斜拉桥某时段的车辆荷载参数,得到对应的等效疲劳车辆荷载谱,并建立钢箱梁疲劳易损部位的有限元模型进行疲劳寿命评估分析;祝青鑫等^[8]基于典型公路桥梁动态称重系统实测数据,归类出了通行车辆的代表车型,并建立了江苏省干线公路桥梁车辆荷载谱。

统计数据显示,正交异性钢桥面板的顶板、U肋和横隔板等部位是疲劳破坏的重点区域^[9],尤其是作为钢桥面板关键连接部位的顶板-U肋焊缝,长期承受轮压荷载的反复作用,其疲劳应力水平明显高于其他疲劳敏感区域,是最易出现裂纹且裂纹发展较快的部位^[10-11]。因此,本文通过对崇启大桥主桥37个月的交通流数据进行归一化处理,构建了等效疲劳车辆荷载谱,同时建立了钢箱梁局部节段的有限元模型,选择疲劳应力水平较高的顶板-U肋焊缝部位进行疲劳分析与寿命评估,为崇启大桥主桥的安全运营与疲劳耐久性评估提供参考。

1 工程概况

崇启大桥线路北起南通市启东南互通,上跨长江水道,南至上海市崇明区向化公路跨线桥;主桥为 $102\text{ m}+4\times 185\text{ m}+102\text{ m}=944\text{ m}$ 的六跨钢连续梁桥,实景图如图1所示。主桥桥面设计为双向六车道高速公路,梁高呈二次抛物线变化,主跨跨中高度为8 m,次边跨跨中高度为3.5 m,支座处高度为9.0 m;主梁采用双幅变截面直腹板连续钢箱梁,全桥梁宽为33.2 m;横桥向分左右两幅,全桥共12个大节段,总重约21万t。钢箱梁采用以焊接为主的栓焊方式;各节段连接处,除了顶板采用焊接连接外,其余U肋、底板和腹板及其加劲肋均采用高强度螺栓连接。



图1 崇启大桥

Fig. 1 Chongqi Bridge

2 交通流数据的归一化处理

2.1 数据归一化

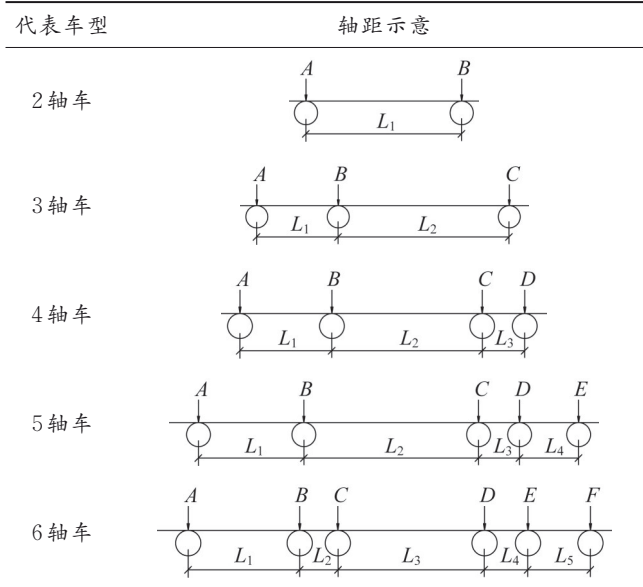
数据归一化又称数据标准化,主要包括数据同趋化和数据无量纲化两个方面:数据同趋化解决了不同数据性质不同的问题,因为不同性质指标数据的直接加和不能准确反映不同因素的综合结果,需要优先改变逆指标数据的性质,使所有指标对测评方案的作用趋同,并使各指标值处于同一个数量级上;数据无量纲化主要实现数据的可比性,即将原始数据统一映射到 $[0,1]$ 区间上,转换为无量纲的纯数值,便于不同单位或量级的指标能够进行比较和加权,以进行综合测评分析^[12]。

数据归一化的优势在于提升数学模型的精度:在多指标评价体系中,由于各评价指标的性质不同,通常具有

不同的量纲和数量级。当各指标之间的水平相差很大时,直接使用原始指标值进行分析会导致数值较高的指标在综合分析中起主导作用,从而相对削弱数值较低指标的影响。因此,为确保结果的可靠性,需要对原始指标数据归一化处理^[13-14]。

通过对崇启大桥主桥交通流数据的统计,基于数据归一化处理的思想,构建了等效车辆荷载谱:将车辆按照轴数分为2~6轴车(表1),并将实际观测得到的交通流量换算为轴数相同的各类车辆的统计值,目的是确保各样本的车重、轴距和轴重在对应车型中具有等比重的影响程度,符合数据归一化中的数据同趋化原则。此外,基于Palmgren-Miner理论推导出的等效疲劳损伤原理,以同一类车型中各车辆的车重、轴距、轴重的相对频率作为权数,求出对应的加权平均值作为各类车型的等效车重、轴距、轴重,综合考虑了各车型的荷载特征,实现了数据的无量纲化处理,同时确保了统计数据的可靠性,为后续正交异性钢桥面板的疲劳耐久性评估提供了可靠的数据基础^[15]。

表1 代表车型轴距示意图
Table 1 Schematic diagram of wheelbase for representative vehicle models



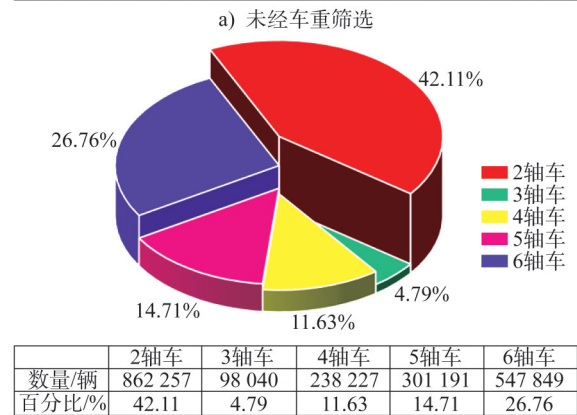
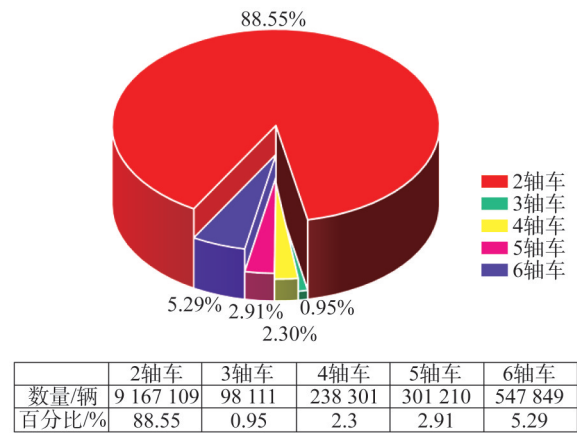
2.2 实际交通流特征分析

文献[16]表明,慢车道因承载重型车辆的频率较高,对钢桥面板的疲劳损伤影响最为显著;中间车道尽管承载的车辆荷载较小,但车流量明显高于快车道,对疲劳寿命的影响同样不可忽视^[17];快车道则以车重小于3 t的2轴车辆为主,对桥面板的疲劳损伤影响可忽略。此外,钢桥面板结构疲劳性能相关研究显示,在慢车道和中间车道最不利车道加载条件下,钢桥面板疲劳损伤程度相较于考虑车轮荷载沿横向车道分布下钢桥面板疲劳损伤程度显著

增加,从而进一步证明了慢车道和中间车道在疲劳损伤评估中的主导作用^[18]。因此后续重点统计慢车道的车流量分布,有限元模拟中也选择这一部分的钢桥面板结构来建立局部模型,符合实际工程中的疲劳损伤分布规律。

统计崇启大桥在2020年3月~10月、2020年12月、2021年1月~10月、2022年2月~9月、2023年4月~2024年1月,总计37个月的交通流数据,涵盖了不同季节、节假日或工作日等多种情况,从而能够较好地反映这一时期的交通流量波动趋势。图2a)展示了未经数据筛选的37个月车流量数据中2~6轴车的车型分布,其中2轴车占比最高,达到88.55%;其次为6轴车,占5.29%。根据英国规范^[19]和欧洲规范^[20],重量小于3 t(30 kN)的车辆对桥梁疲劳损伤影响可忽略不计,因此筛去车重小于3 t的数据后重新进行统计,结果如图2b)所示,最终得出崇启大桥的日均交通流量约为645.5辆。

根据前人有关中大型桥梁的交通流量统计分析可知,车辆荷载谱的变化具有周期性特征,在不同月份或年份间变化相对较小,尤其是在交通条件、路网结构及经济发展稳定的区域^[21]。崇启大桥连接上海与江苏,交通通达性较高,未来车流量预计不会有显著变化。因此,37个月的动态称重数据具备代表性,足以作为未来几十年车辆荷载模拟的参考依据。



b) 筛去车重小于3 t的车辆数据

图2 车型分布情况

Fig. 2 Distribution of vehicle types

2.3 等效疲劳车辆荷载谱的构建

2.3.1 车重

统计37个月各类车型的车重及其分布特性(已剔除车重小于3 t的数据),车重分布如图3所示。2轴车车重呈现明显的单峰分布特点,绝大部分为车重小于5 t的普通生活

用车,最大车重接近39 t;3轴车车重集中分布在10 t附近,最大车重大于60 t;4轴车车重集中分布在10~15 t区间,最大车重超过了80 t;5轴车车重集中分布在10~20 t区间,最大车重约100 t;6轴车呈现较为明显的双峰分布,其峰值分别在20 t和40 t附近,最大车重大于120 t。

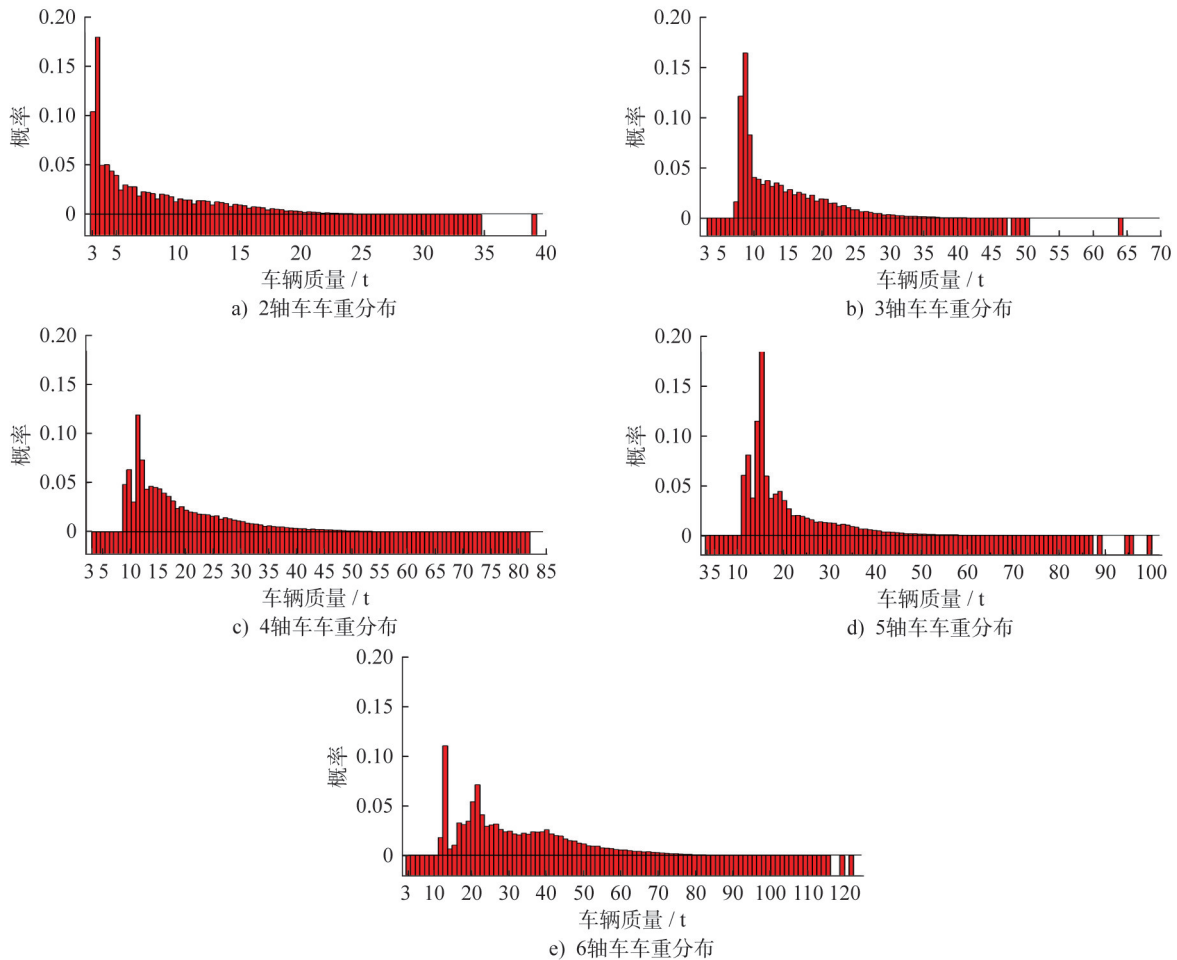


图3 各类车型车重分布

Fig. 3 Distribution of vehicle weight for various vehicle models

2.3.2 轴距

轴距作为划分代表车型的重要依据,是车辆荷载谱的重要特征参数。选取车流量占比最大的2轴车和6轴车进行轴距分析,如图4所示。以同一类的每种车辆出现的相对频率作为权数,按轴距的加权平均值求出该车型的各轴距,即公式(1):

$$L_{ej} = \sum (f_i L_{ij}) \quad (1)$$

式中: L_{ej} 为该类车型第 j 个轴的等效轴距, f_i 为同一类车辆中的第 i 辆的相对频率, L_{ij} 为第 i 辆车的第 j 个轴的轴距。

2.3.3 轴重

考虑到正交异性钢桥面板的影响线较短这一结构力学特性,多轴车在大桥上通行时会引起复杂的应力循环,

应力循环次数与车轴数密切相关,同时单轴重量也直接决定了应力幅的大小,因此,崇启大桥交通流的轴重统计对于钢桥面板结构的疲劳耐久性评估至关重要。

选取车流量占比最大的2轴车和6轴车进行轴重分析,相关数据的轴重分布图分别如图5和图6所示。结果显示,2轴车轴重基本呈现单峰分布,其中轴1重量集中在2 t附近,不超过14 t,轴2重量集中在2 t附近,不超过30 t。6轴车除轴2外,其余轴重整体呈现单峰分布的特点,其中轴1、轴3~6重量主要分布在1~10 t范围内,轴2重量有较为明显的双峰分布,峰值分别在2~4 t范围内以及6~8 t范围内。

根据各轴车的轴重分布图以及等效疲劳损伤原理,不同轴数的等效轴重可按公式(2)计算:

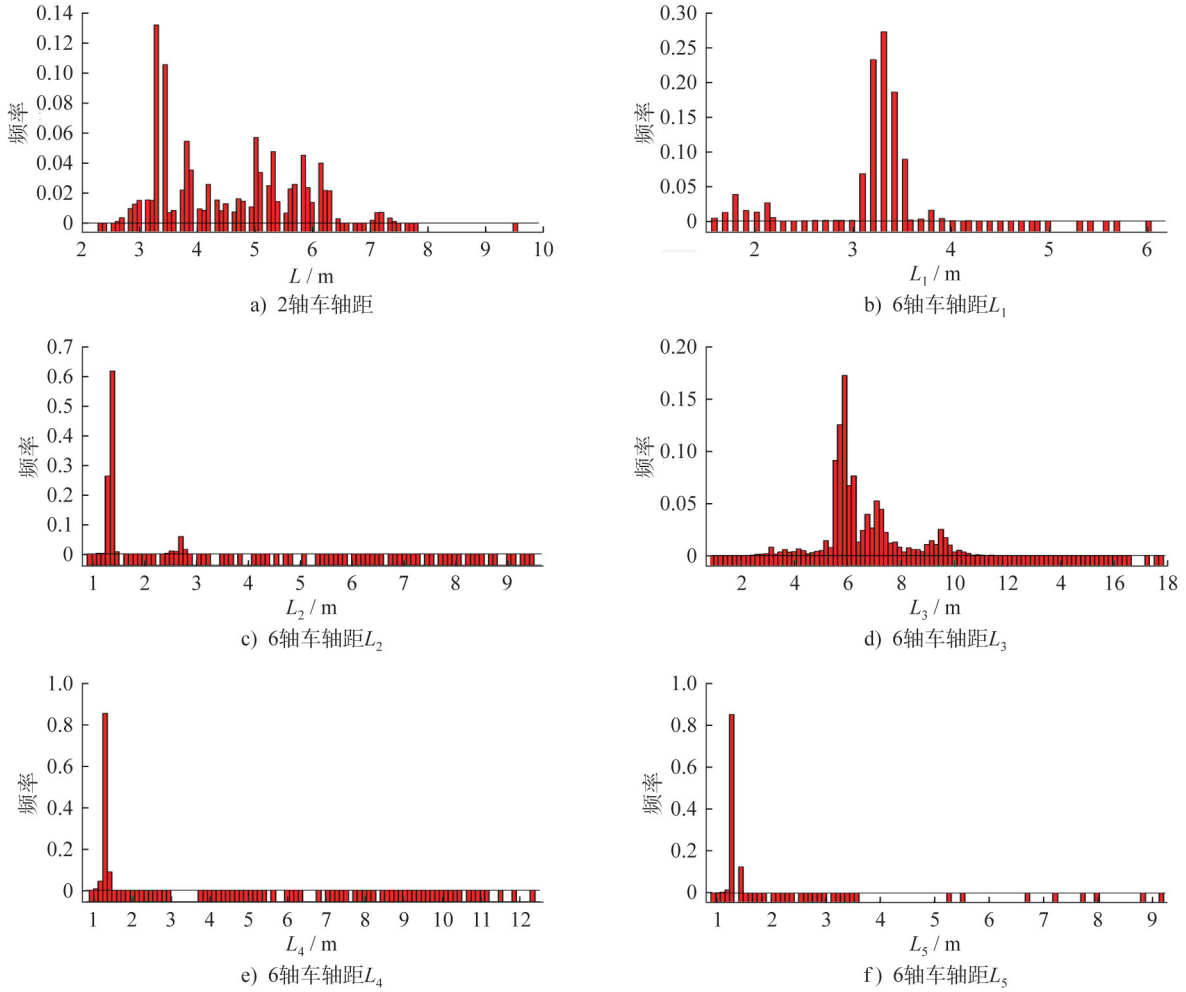


图4 2轴车和6轴车轴距分布

Fig. 4 Axle distance distribution of 2-axle and 6-axle vehicles

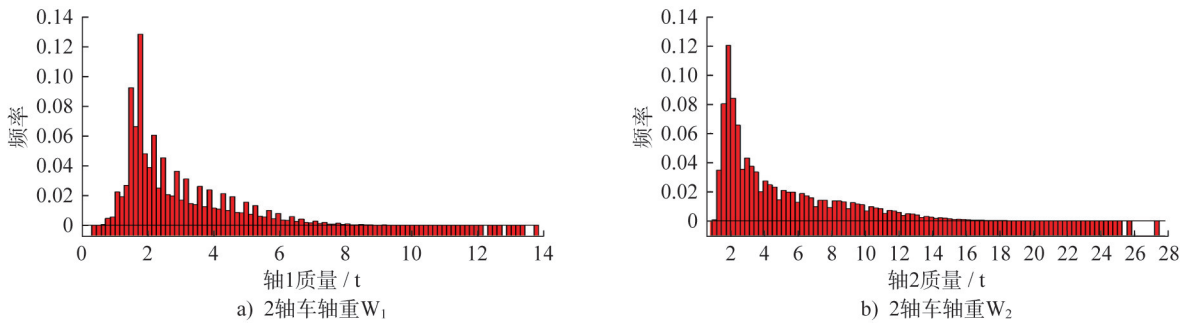


图5 2轴车轴重分布

Fig. 5 Axle weight distribution of 2-axle vehicles

$$W_{ej} = \left[\sum (f_i \times W_{ij}^m) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

式中： f_i 为第*i*车辆的相对频率； W_{ij} 为第*i*车辆的第*j*个车轴轴重； W_{ej} 为第*j*个轴的等效轴重； m 为应力-疲劳寿命曲线(S-N曲线)斜率的参数，一般可以取3或5。

根据上述公式计算得到的各轴车等效轴距、等效车重(根据规范^[22]，总重小于3 t的车辆不造成疲劳损伤，计算中已剔除)以及等效轴重，得到适用于崇启大桥

主桥的等效疲劳车辆荷载谱，如表2所示。

3 钢桥面板疲劳耐久性评估

3.1 车辆荷载有限元模拟

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[22]，对于桥面板构件的疲劳耐久性验算，应使用如图7所示标准四轴单车疲劳荷载模型^[22]，采用60 kN双轮单轴加载，车轮加载面积为600 mm×200 mm，荷载集

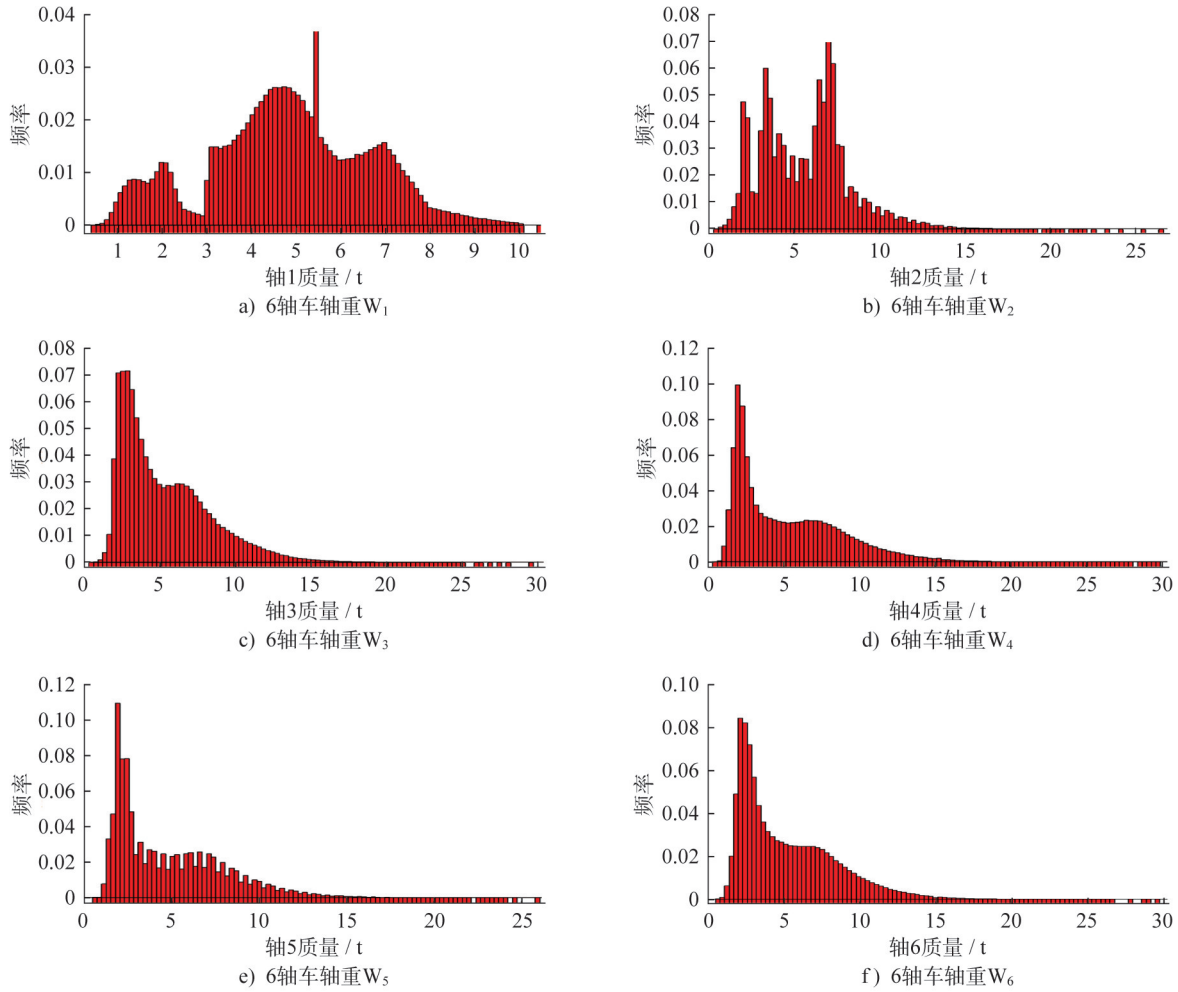


图6 6轴车轴重频率分布

Fig. 6 Axle weight distribution of 6-axle vehicles

表2 等效疲劳车辆荷载谱

Table 2 Equivalent fatigue vehicle load spectrum

轴数	等效轴重/t						等效车重/t	等效轴距/m					车辆数/辆	车辆数相对比例/%
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5		
2	3.6	6.9	—	—	—	—	10.5	4.6	—	—	—	—	862 257	42.11
3	4.0	4.1	9.5	—	—	—	17.6	2.1	5.1	—	—	—	98 040	4.79
4	5.0	6.9	6.8	7.1	—	—	25.8	2.7	6.0	1.3	—	—	238 227	11.63
5	5.2	6.8	5.2	4.2	4.6	—	26.0	3.1	4.9	1.9	1.4	—	301 191	14.71
6	5.8	7.1	7.1	7.6	6.8	7.2	41.4	3.1	1.5	6.5	1.3	1.3	547 849	26.76

度为0.5 MPa, 车轮加载位置位于横向最不利的慢车道中心。

使用ABAQUS有限元分析软件建立钢桥面板局部模型, 模型长14.0 m, 宽约4.2 m。顶板、U肋、横隔板及加劲肋的厚度分别为16 mm、8 mm、12 mm和10 mm。

在疲劳分析中, 正交异性钢桥面板的顶板-U肋焊缝受轮载影响的区域在纵向一般局限于两横隔板之间, 横

向则主要集中在车轮作用下的3~4个纵肋之间, 因此该局部模型包括6个横隔板和7个加劲肋, 覆盖了中间车道区域, 并简化了横截面结构细节, 以降低建模的复杂程度^[23]; 模型的边界条件设置尽量模拟钢桥面板的实际位移状态, 根据圣维南原理, 远离边界的区域不会受到边界条件近似处理的影响, 因此在模型纵向两侧顶板边缘施加三向平动约束, 以模拟箱梁腹板的支撑作用, 在横向顶

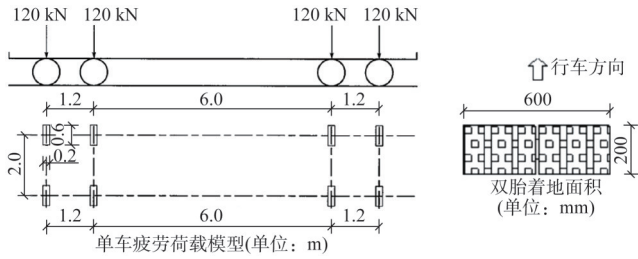


图7 规范 JTG D64—2015 中标准单车疲劳荷载模型^[22]

Fig. 7 Standard single vehicle fatigue load model in JTG D64-2015

板和横隔板外侧施加同样的约束,近似反映实际横隔板的边界情况,确保应力分布符合实际应力状态,如图 8a)所示;此外,本文主要针对顶板-U肋焊缝进行疲劳分析,假定车辆荷载直接作用于钢桥面板,未将铺装层对车轮荷载的扩散影响纳入考量。这一假设有助于突出最不利的受力情况。

钢桥面板采用四节点四边形壳单元 S4R 进行模拟,单元划分精度为 100 mm;对全模型纵向 854.2 mm 范围内网格进行细分,网格尺寸为 30 mm×100 mm;对跨中 3 400.0 mm×4 174.2 mm 范围内网格进行细分,顶板网格尺寸为 30 mm×30 mm。顶板网格布置如图 8b)所示。

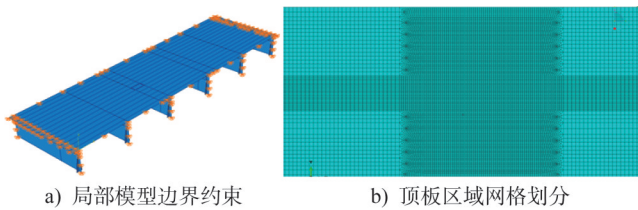


图8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

常用的车辆荷载模拟方法主要有两种:一是基于 Fortran 语言编制的 ABAQUS 用户子程序 Dload,二是基于移动质量的车桥耦合模型。虽然车桥耦合模型能全面分析车辆与桥梁结构的相互作用,但其更适合整体动态响应的分析,计算复杂度显著高于 Dload 方法,特别是在多车道或大跨度桥梁的情况下^[24]。而 Dload 方法专注于桥面板局部的疲劳分析,简化车辆荷载的动态作用,直接模拟轮载在桥面上的移动路径,能够灵活处理复杂的车流和荷载,确保桥面上车辆荷载的合理分布;尽管该方法忽略了车辆质量的惯性效应,但 Dload 的模拟精度已能够准确反映荷载移动引起的应力变化,分析结果与车桥耦合模型相近;而且针对钢桥面板顶板-U肋焊缝处抗疲劳性能分析,Dload 方法能够有效捕捉局部应力变化,适合疲劳敏感区应力幅的研究^[25]。因此本文使用 Dload 方法模拟车辆荷载,移动工况布置在慢车道中心。

3.2 标准单车疲劳荷载修正系数计算

根据等效疲劳损伤原理,使崇启大桥的等效车辆荷载谱作用下构件的疲劳损伤度与规范 JTG D64—2015 中修正后标准单车疲劳荷载作用下构件的疲劳损伤度相同,即满足等式(3),从而推出标准单车疲劳荷载修正系数公式(4)。

$$\Sigma [N_b (\eta \sigma_b)^m] = \Sigma (N_y \sigma_y^m) \quad (3)$$

$$\eta = \left[\frac{\Sigma (N_y \sigma_y^m)}{\Sigma (N_b \sigma_b^m)} \right]^{1/m} \quad (4)$$

式中: η 为标准单车疲劳修正系数; N_b 、 σ_b 分别为标准单车疲劳荷载作用下的应力循环次数及循环应力幅; N_y 、 σ_y 分别为等效车辆荷载谱中 2~6 轴车单独作用下的应力循环次数及循环应力幅; m 为 S-N 曲线反斜率,取 3。

将等效车辆荷载谱中 2~6 轴车和标准单车疲劳荷载分别加载到局部模型上,得出顶板-U肋焊缝的正应力历程曲线,分别如图 9 和 10 所示。然后采用雨流计数法对上述应力历程进行计数,得到各车辆荷载作用下顶板-U肋焊缝的一系列应力幅,默认各应力幅的循环次数为 1 (除去小于 5 MPa 的应力幅),结果如表 3 所示。根据表 3 对各轴车应力幅及循环次数的统计,采用 Fortran 语言编制程序计算得到依据规范加载的等效累积损伤值为 9.65×10^{11} ,依据实际车辆荷载情况加载的累积损伤值为 1.59×10^{12} ,通过式(4)计算出钢桥面板顶板-U肋焊缝的标准单车疲劳荷载修正系数为 1.181 2,计算结果如表 4 所示。

表3 顶板加载应力幅

Table 3 Load stress amplitude at top plate MPa						
车型	$\Delta\sigma_1$	$\Delta\sigma_2$	$\Delta\sigma_3$	$\Delta\sigma_4$	$\Delta\sigma_5$	$\Delta\sigma_6$
2 轴	16.51	28.58				
3 轴	15.24	19.62	38.45			
4 轴	21.51	25.93	26.39	30.19		
5 轴	17.21	19.34	19.98	21.62	25.56	
6 轴	21.81	25.95	27.57	28.71	31.38	32.55
疲劳标准车	8.64	8.71	44.09	46.96	50.04	55.04

表4 疲劳应力计算结果汇总

Table 4 Summary of fatigue stress calculation results				
疲劳敏感位置	计算应力幅/MPa	等效常值应力幅/MPa	疲劳容许应力幅/MPa	计算疲劳寿命/次
顶板-U肋焊缝外侧	55.04	162.37	70	1.602×10^5
顶板-U肋焊缝内侧	52.35	154.44	70	1.862×10^5

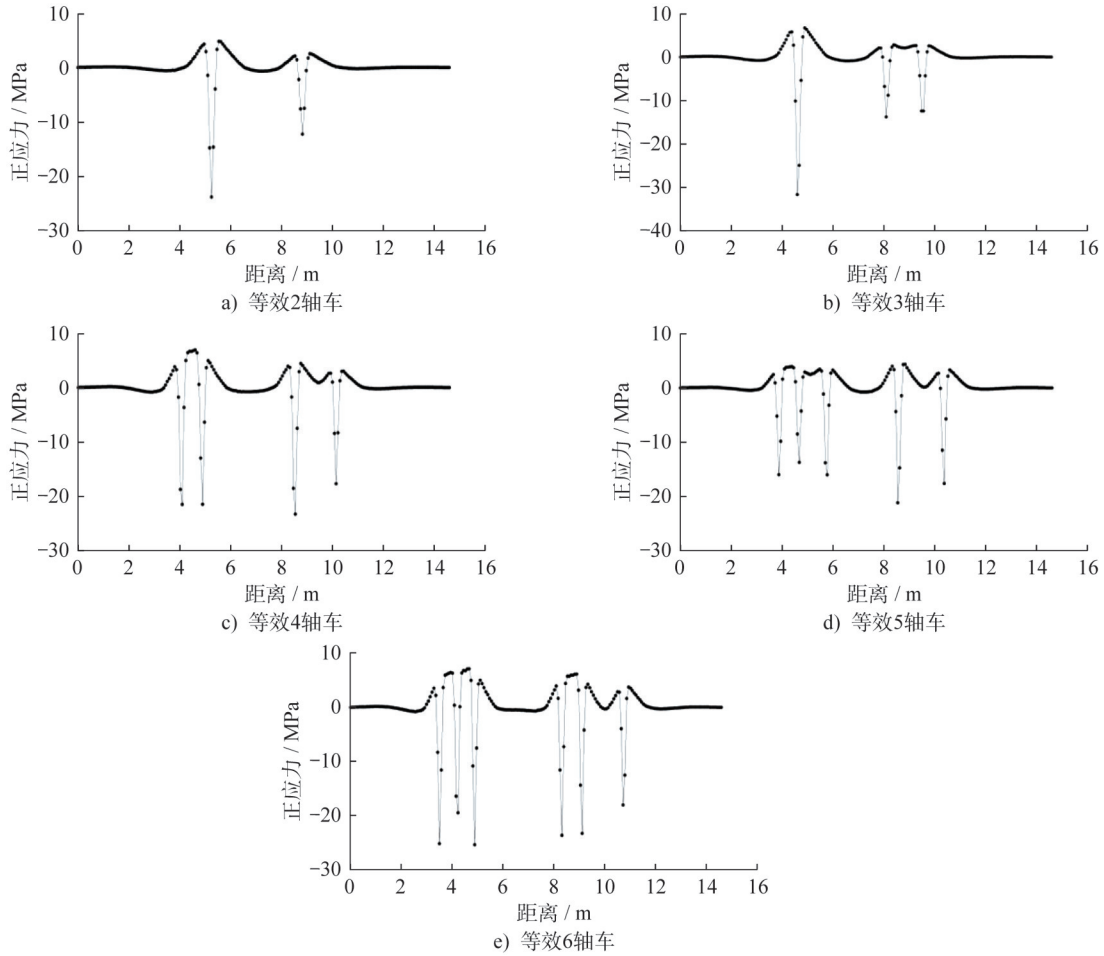


图 9 等效 2~6 轴车作用下顶板-U 肋焊缝正应力影响线

Fig. 9 Influence line of positive stress on the top plate-U-rib weld under the action of equivalent two-axle to six-axle vehicles

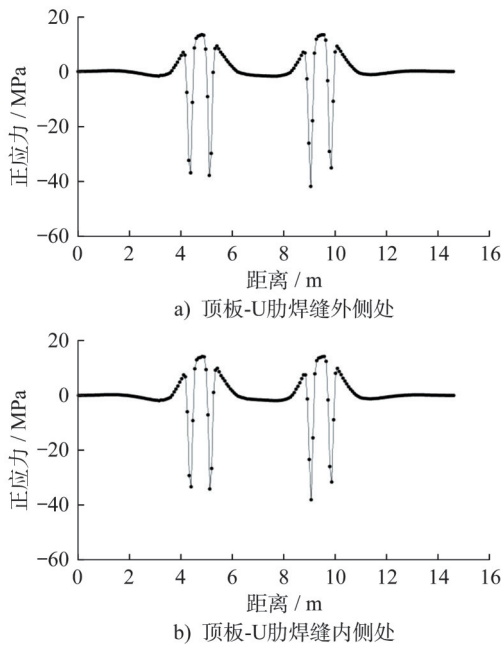


图 10 标准单车疲劳荷载作用下顶板-U 肋焊缝正应力影响线

Fig. 10 Influence line of positive stress on the top plate-U-rib weld under the action of standard single-vehicle fatigue load

3.3 顶板-U 肋焊缝疲劳耐久性评估

顶板-U 肋焊缝处疲劳开裂模式主要有 4 种,如图 11 所示,分别为顶板焊趾竖向裂纹(Type-1)、顶板焊根竖向裂纹(Type-2)、顶板焊根斜裂纹(Type-3)以及 U 肋焊趾斜裂纹(Type-4)^[26]。

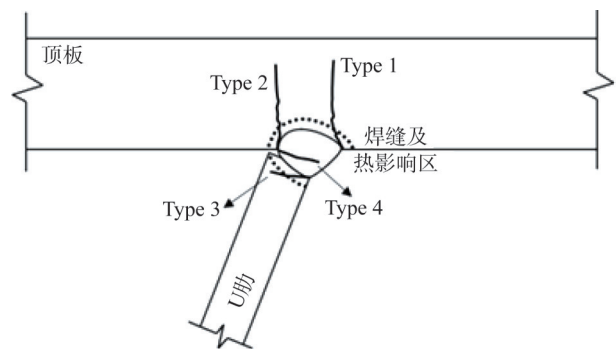


图 11 顶板-U 肋焊缝的疲劳开裂模式^[26]

Fig. 11 Fatigue cracking pattern in top plate-U-rib weld

由于采用板壳单元只模拟了局部模型,无法详细考虑各焊缝处的疲劳应力情况和应力幅大小,因此只考虑顶板

-U肋焊缝内外侧的疲劳正应力幅。根据图10所示的标准单车疲劳荷载作用下顶板-U肋焊缝的影响线,顶板-U肋焊缝外侧正应力幅为13.42-(-41.62)=55.04 MPa,焊缝内侧正应力幅为14.26-(-38.09)=52.35 MPa。

采用规范JTG D64—2015中疲劳荷载模型III进行正交异性钢桥面板构造细节的疲劳应力验算,并按最不利加载工况施加于该细节的影响线上,由此可获得正应力最大值和最小值 $\sigma_{p\max}$ 、 $\sigma_{p\min}$,并按照式(5)和(6)验算:

$$\Delta\sigma_{E2} = (1 + \Delta\varphi)\gamma(\sigma_{p\max} - \sigma_{p\min}) \quad (5)$$

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E2} \leq \Delta\sigma_C/\gamma_{Mf} \quad (6)$$

式中: $\Delta\sigma_{E2}$ 为等效力幅, $\Delta\varphi$ 为动力放大系数,与验算截面到伸缩缝的距离有关,此处取0;

γ 为损伤等效系数, $\gamma = \gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4$,且 $\gamma \leq \gamma_{\max}$;其中 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 、 γ_4 、 γ_{\max} 分别为损伤效应系数、交通流量系数(标准单车疲劳修正系数)、设计寿命影响系数、多车道效应系数和损伤等效系数上限值。根据规范JTG D64—2015附录D分别计算;

γ_{Ff} 为疲劳荷载分项系数,一般取1.0;

γ_{Mf} 为疲劳抗力分项系数,钢桥面板作为重要构件取1.35;

$\Delta\sigma_C$ 为 2.0×10^6 次下细节的疲劳容许应力幅,根据规范JTG D64—2015正应力S-N曲线,取70 MPa作为疲劳容许应力幅(图12)。

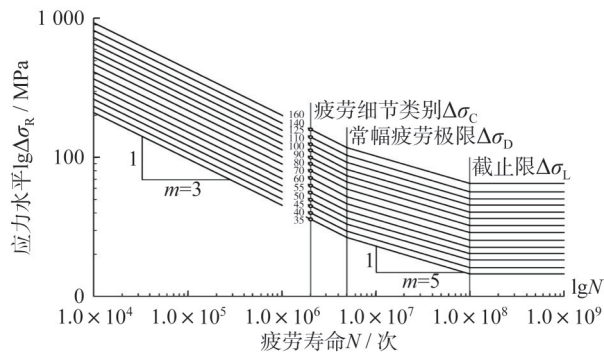


图12 规范JTG D64—2015中正应力S-N曲线^[22]

Fig. 12 S-N curves in JTG D64—2015

根据规范JTG D64—2015,损伤效应系数 γ_1 取1.85,交通流量系数 γ_2 即标准单车疲劳修正系数取1.181 2,设计寿命影响系数 γ_3 取1.0,多车道效应系数 γ_4 取1.0,疲劳抗力分项系数 γ_{Mf} 取1.35,经计算最终得到顶板-U肋焊缝外侧和内侧的等效常值正应力幅分别为162.37 MPa和154.44 MPa,均超过正应力疲劳容许应力幅70 MPa,未能通过疲劳验算,表明顶板-U肋焊缝内外侧使用阶段承受的疲劳应力幅较大,需要进一步根据式(7)计算其剩余疲劳寿命 N ,以量化其疲劳耐久性。

$$N = \begin{cases} 2 \times 10^6 \times \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_{E2}} \right)^3, & \Delta\sigma_{E2} \geq \Delta\sigma_D \\ 5 \times 10^6 \times \left(\frac{0.737\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_{E2}} \right)^5, & \Delta\sigma_{E2} < \Delta\sigma_D \end{cases} \quad (7)$$

疲劳验算结果汇总见表4。根据崇启大桥的设计文件,桥梁的设计基准期为100年,然而实际服役年限受实际交通流量和车辆荷载的影响较大。以上疲劳敏感区剩余疲劳寿命计算结果显示,顶板-U肋焊缝外侧和内侧位置的剩余疲劳寿命分别为 1.602×10^5 次和 1.862×10^5 次,换算为约20~30年的服役时间,表明正交异性钢桥面板典型疲劳敏感区的顶板-U肋焊缝存在较高的疲劳风险,需要额外的关注和维护,包括采取密切的实桥监测和定期人工检查等措施,及时发现潜在的疲劳开裂损伤部位,以便采取桥梁结构养护措施;此外,鉴于该疲劳敏感位置的高风险性,还可以考虑采取一些疲劳裂纹修复方法或结构加固设计,以改善原结构疲劳易损部位的受力状况,从而增强结构的疲劳耐久性。

4 结论

本文通过对崇启大桥37个月交通流数据的归一化处理,构建了等效疲劳车辆荷载谱,并结合有限元模拟方法,对钢桥面板顶板-U肋焊缝的疲劳耐久性进行了系统评估,得到的结论如下:

(1) 实际交通流特征分析表明,2轴车在崇启大桥车流量中占绝大多数,数量远超过3轴~6轴车的总和,而在剔除车重小于3t的车辆后,2轴车数量显著减少,其他车型数量基本保持不变,说明2轴车在小型车辆中占绝大多数。

(2) 通过采用数据归一化这一处理大桥交通流数据的重要方法,将崇启大桥实际观测到的交通流量转换为5类车型的车重、轴距和轴重的统计值,有效构建了崇启大桥主桥的等效车辆荷载谱,较为准确地模拟了大桥运营阶段的车辆作用情况,为后续正交异性钢桥面板的疲劳耐久性评估提供了可靠的数据支撑。

(3) 基于等效疲劳车辆荷载谱和标准单车疲劳荷载作用下顶板-U肋焊缝的正应力影响线,计算出了顶板-U肋焊缝内外侧的疲劳应力幅和疲劳寿命,从而实现了崇启大桥钢桥面板典型疲劳敏感区疲劳耐久性评估的仿真模拟。后续为了进一步评估崇启大桥钢桥面板各构件细节的具体疲劳损伤情况,仍需要对各主要焊接细节进行实桥疲劳应力监测,并在此基础上进行疲劳累积损伤评估,以保证崇启大桥的运营安全。

参考文献:

- [1] 童乐为,沈祖炎.正交异性钢桥面板疲劳验算[J].土木工程学报,2000,33(3):16-21,70.DOI:10.15951/j.tmgxcb.2000.

- 03.003.
TONG Lewei, SHEN Zuyan. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33 (3) : 16-21, 70. DOI: 10.15951/j. tmgcxb. 2000.03.003. (in Chinese)
- [2] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3) : 14-30, 39. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002.
ZHANG Qinghua, BU Yizhi, LI Qiao. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (3) : 14-30, 39. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002. (in Chinese)
- [3] 赵欣欣, 刘晓光, 张玉玲. 正交异性桥面板设计参数和构造细节的疲劳研究进展[J]. 钢结构, 2010, 25(8) : 1-7.
ZHAO Xinxin, LIU Xiaoguang, ZHANG Yuling. New advance of design parameter and structure details of orthotropic deck [J]. Steel Construction, 2010, 25(8) : 1-7. (in Chinese)
- [4] 童乐为, 沈祖炎, 陈忠延. 城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5) : 20-27.
TONG Lewei, SHEN Zuyan, CHEN Zhongyan. Fatigue load spectrum for urban road bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5) : 20-27. (in Chinese)
- [5] 刘兴, 王辉, 方兴. 公路钢桥疲劳设计荷载的研究分析[J]. 北方工业大学学报, 2012, 24(3) : 78-83, 94.
LIU Xing, WANG Hui, FANG Xing. Study of fatigue design load of steel bridge [J]. Journal of North China University of Technology, 2012, 24(3) : 78-83, 94. (in Chinese)
- [6] 翟慕赛, 王春生, 崔冰, 等. 基于WIM的钢桥面板疲劳荷载模型研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(2) : 31-36.
ZHAI Musai, WANG Chunsheng, CUI Bing, et al. Study of fatigue load models for steel bridge decks based on WIM [J]. Bridge Construction, 2017, 47(2) : 31-36. (in Chinese)
- [7] 赖毅, 代力, 朱泽文, 等. 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[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2020, 44(6) : 654-660. DOI: 10.16357/j. cnki. issn1000-5862.2020.06.19.
LAI Yi, DAI Li, ZHU Zewen, et al. The study on fatigue load spectrum analysis and service life prediction of steel box girder cable-stayed bridge based on WIM data [J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2020, 44(6) : 654-660. DOI: 10.16357/j. cnki. issn1000-5862.2020.06.19. (in Chinese)
- [8] 祝青鑫, 王浩, 陈铮一, 等. 基于WIM的江苏省干线公路桥梁车辆荷载统计模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(6) : 1148-1155.
ZHU Qingxin, WANG Hao, CHEN Zhengyi, et al. Statistic model of vehicle loads for arterial highway bridges in Jiangsu Province based on WIM system [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(6) : 1148-1155. (in Chinese)
- [9] 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.
WANG Wei, ZHOU Shangmeng, WANG Yafei. Experimental study of fatigue performance of orthotropic plates with small baffles and supporting plates in U ribs [J]. Bridge Construction, 2020, 50(3) : 58-63. (in Chinese)
- [10] 杨雅斌, 石广玉. 正交异性钢桥面板肋-面板焊缝疲劳验算的应力分析模型评估[J]. 工程力学, 2019, 36(增刊1) : 98-105.
YANG Yabin, SHI Guangyu. Evaluation of finite element analysis models for fatigue stress at rib-to-deck welded joints of orthotropic steel deck [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (Suppl.1) : 98-105. (in Chinese)
- [11] TSAKOPOULOS P A, FISHER J W. Full-scale fatigue tests of steel orthotropic decks for the Williamsburg bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(5) : 323-333. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:5(323).
- [12] GARCÍA S, LUENGO J, HERRERA F. Data preprocessing in data mining [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015.
- [13] ÇETIN V, YILDIZ O. A comprehensive review on data preprocessing techniques in data analysis [J]. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 2022, 28(2) : 299-312. DOI: 10.5505/pajes.2021.62687.
- [14] PATRO S G K, SAHU K K. Normalization: A preprocessing stage [J]. IARJSET, 2015: 20-22. DOI: 10.17148/IARJSET.2015.2305.
- [15] 刘延芳, 周泳涛, 鲍卫刚, 等. 公路钢桥疲劳标准荷载推导方法研究[J]. 中外公路, 2012, 32(1) : 164-169. DOI: 10.14048/j. issn.1671-2579.2012.01.043.
LIU Yanfang, ZHOU Yongtao, BAO Weigang, et al. Research on the derivation method of fatigue standard load for highway steel bridges [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(1) : 164-169. DOI: 10.14048/j. issn.1671-2579.2012.01.043. (in Chinese)
- [16] 李行, 潘军, 唐雪松. 考虑车轮横向分布的钢桥面板顶板-U肋连接处疲劳损伤分析[J]. 公路与汽运, 2020(1) : 106-109, 138.
LI Hang, PAN Jun, TANG Xuesong. Fatigue damage analysis of top plate-U rib joint of steel bridge deck considering lateral distribution of wheels [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(1) : 106-109, 138. (in Chinese)
- [17] LAMAN J A, NOWAK A S. Fatigue-load models for girder bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(7) : 726-733. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9445 (1996) 122: 7(726).
- [18] 邹圣权. 车辆荷载作用下正交异性钢桥面板的疲劳研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
ZOU Shengquan. Study on the fatigue of orthotropic steel decks under the action of vehicle loads [D]. Changsha: Hunan University, 2023. (in Chinese)
- [19] British Standards Institution. Steel, Concrete and Composite

- Bridges-Part 2: Specification for Loads; BS 5400-2 [S]. London: British Standards Institution, 2006.
- [20] European Committee for Standardization. Eurocode 1: Actions on Structures—Part 2: Traffic Loads on Bridges; EN 1991-2[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2003.
- [21] 孙颖, 王昊平. 崇启大桥超限运输管理方案[J]. 中国交通信息化, 2012(增刊1): 50-52. DOI: 10.13439/j.cnki.itsc.2012.s1.003.
SUN Ying, WANG Haoping. Management plan for over limit transportation of Chongqi Bridge[J]. China ITS Journal, 2012 (Suppl.1): 50-52. DOI: 10.13439/j.cnki.itsc.2012.s1.003. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 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.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Steel Bridge: JTG D64—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [23] XIAO Z G, YAMADA K, YA S, et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(8): 1387-1397. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.10.008.
- [24] 郭馨阳. 随机车辆荷载作用下钢箱梁细节疲劳可靠度分析[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
GUO Xinyang. Fatigue reliability analysis of steel box girder details under random vehicle loads [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2023. (in Chinese)
- [25] 王春生, 翟慕赛, 唐友明, 等. 钢桥面板疲劳裂纹耦合扩展机理的数值断裂力学模拟[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 82-95. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.009.
WANG Chunsheng, ZHAI Musai, TANG Youming, et al. Numerical fracture mechanical simulation of fatigue crack coupled propagation mechanism for steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 82-95. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.009. (in Chinese)
- [26] 白文畅, 袁周致远, 吉伯海, 等. 钢桥面板顶板-U肋焊缝裂纹萌生特征及扩展规律[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(1): 20-29. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20230614.001.
BAI Wenchang, YUAN Zhouzhiyuan, JI Bohai, et al. Study on crack initiation characteristics and propagation laws of U rib-to-deck weld joint of orthotropic steel bridge decks [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(1): 20-29. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20230614.001. (in Chinese)