

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.04.023

轮载模型对钢桥疲劳损伤评估的影响分析

马帅¹, 杨力²

(1. 河南省收费还贷高速公路管理中心, 河南 郑州 450018; 2. 河南省豫晋高速公路建设有限公司, 河南 三门峡 472200)

摘要:为研究轮载模型对钢桥疲劳损伤评估的影响,采用轮载作用面测试与有限元分析,获取典型疲劳细节在交通荷载作用下的疲劳应力谱,基于疲劳累积损伤理论对轮载模型引起的疲劳损伤评估差异进行分析。研究结果表明:轮载作用面为不规则形状,其中横向触地尺寸保持不变,纵向触地尺寸从车辆空载至满载时近似呈线性变化,不同载重下的触地尺寸可采用线性插值方法确定;采用 BS5400、日本钢桥规范中轮载模型的评估结果高于实际疲劳损伤,采用 EURO-CODE、中国钢桥规范中轮载模型的评估结果低于实际疲劳损伤,AASHTO 规范评估结果与实际疲劳损伤较为接近;轮载模型对钢桥疲劳损伤评估影响显著,在进行钢桥抗疲劳设计或疲劳损伤评估时应充分考虑实际轮载模型的影响,采用实际轮载模型或对基于规范轮载模型评估结果进行修正。

关键词:钢桥; 疲劳损伤评估; 轮载模型; 影响分析; 交通荷载

中图分类号: U441+.4

文献标志码: A

钢桥自重轻、跨越能力强、施工速度快、造型美观,被广泛用于大跨结构桥梁及城市桥梁中,其应用已成为衡量一个国家桥梁设计和建造水平的标志。随着中国钢材产能的不断提高和焊接技术的进步,钢桥在中小跨径桥梁方案里也具备较强的竞争力。然而,由于构造复杂、焊缝较多,在车辆荷载、环境腐蚀等因素影响下,钢桥运营过程中经常出现疲劳开裂问题,其萌生具有隐蔽性、破坏具有突发性,严重影响结构的安全使用^[1]。因此,如何解决钢桥的疲劳安全评估问题,确保钢桥使用安全,已成为桥梁工程界关注的技术焦点。

国内外针对钢桥疲劳损伤评估开展了一系列的研究工作,目前钢桥疲劳损伤评估常用的是基于疲劳累积损伤理论的评估方法,包括名义应力法、热点应力法和缺口应力法等^[2]。Imam B 等^[3]以铆接钢板梁桥为例,采用壳单元建立钢桥的整体有限元模型,基于铆接节点的疲劳 S-N 曲线对铆接的纵横梁连接节点进行疲劳评估,并确定疲劳最危险的节点;Zhou Y E 等^[4]基于公路钢桥的应变监测试验,对既有钢桥的疲劳寿命进行评估,并指出基于实测应力幅值谱的钢桥疲劳评估相对更加准确有效;Aygül M 等^[5]采用有限

同时,室内生产减少了高空作业,不受恶劣天气影响,保障了施工安全与工期。经开州湖特大桥 4[#] 主塔具体实践,在合理的组织下,单节段钢筋塔柱顶作业时间为 18 h,能够满足预期目标,钢筋接头质量经现场抽检,均能达到 I 级接头。随着悬索桥、斜拉桥及大断面空心薄壁墩在山区高速公路建设中的广泛应用,该工艺可实现在不显著增加成本的前提下,有效解决大断面墩塔钢筋施工面临的工效、安全等问题,具有良好的经济效益和借鉴意义。

参考文献:

[1] 李祥军,李传鹏,王立波,等.薄壁墩钢筋安装技术研究[J].施工技术,2016,45(24):68-70.

- [2] 金兵.斜拉桥主塔钢筋节段整体吊装施工关键技术[J].工程设备与材料,2020,5(1):127-128.
- [3] 聂东,李清培,陶龙,等.赤水河大桥索塔快速建造关键技术研究[J].城市道桥与防洪,2019(10):127-131,141,17-18.
- [4] 岳琳,黄盛,邱赛文.平塘特大桥超高墩塔钢筋模块化施工技术[J].公路,2019,64(9):75-79.
- [5] 钟荣炼,纵锐.超高异形索塔斜拉桥钢筋分片吊装施工工艺探索[J].公路,2019,64(9):79-82.
- [6] 张太科,虎门二桥建设关键技术[DB/OL].http://www.doc88.com/p-7754942301334.html,2017.
- [7] 杨永文.青岛海湾大桥非航道桥现浇墩身钢筋笼整体安装工艺[J].施工技术,2011,40(17):5-7.

收稿日期:2021-09-16(修改稿)

基金项目:河南省交通厅科技计划项目(编号:2017T08)

作者简介:马帅,男,大学本科,高级工程师.E-mail:2496890957@qq.com

元方法对焊接钢桥过焊孔位置处的焊接细节进行疲劳寿命评估,得出缺口应力相较于热点应力更能代表该细节的疲劳应力状态;Yen B T等^[6]分别采用双线性S-N曲线和现行规范建议的S-N曲线评估结果进行对比分析,并根据运营状态下获取的实测应力幅对在役钢桥进行疲劳寿命评估;崔闯等^[7]在对港珠澳大桥钢桥面板进行足尺节段模型疲劳试验的基础上,采用热点应力法对典型疲劳易损部位进行疲劳寿命评估,结果表明热点应力法评估结果离散性小,且与疲劳试验结果吻合较好;祝志文等^[8]采用有效缺口应力法对纵肋与横隔板连接细节进行疲劳性能评估,基于S-N曲线评估结果表明焊趾处更易萌生裂纹;朱太勇等^[9]提出一种适用于钢桥面板疲劳评估的全空间S-N曲线模型,能够利用时序准则对不同水平应力幅造成的疲劳损伤进行计算。

基于疲劳累积损伤理论的评估方法建立在大量试验基础上,评估理论简单、操作方便,在工程中应用最为广泛。采用基于疲劳累积损伤理论的评估方法的前提是准确获取通车情况下钢桥疲劳细节的疲劳应力谱,目前使用较多的是基于现场长期连续监测数据和基于交通荷载数据进行有限元模拟加载等方法^[10-11]。现场长期连续监测能够真实反映钢桥疲劳细节的应力历程,评估结果较为可靠,但长期监测耗费大量的人力、物力,成本较高。随着动态称重(Weigh-In-Motion, WIM)技术的发展和数值模拟技术的进步,部分学者开始尝试研究基于交通荷载的有限元动态加载,以此获取钢桥疲劳细节的疲劳应力谱^[12]。目前,国内外规范中疲劳车辆轮载模型各不相同,在进行有限元模拟加载时采用不同轮载模型,疲劳细节的应力响应差异显著,由此得到的评估结果可能出现较大的误差。因此,如何合理选取疲劳车辆轮载模型,成为钢桥抗疲劳设计与疲劳损伤评估的关键。

该文针对公路钢桥疲劳致伤车辆轮载模型,采用轮载作用面积测试与有限元模拟加载等方法,获取实际轮载作用面积与疲劳应力谱,基于疲劳累积损伤理论对采用不同轮载模型的疲劳损伤评估结果进行分析,同时对现行规范中轮载模型合理性进行深入研究。

1 基于交通荷载的钢桥疲劳损伤评估方法

基于交通荷载进行钢桥疲劳损伤评估方法(图1),主要包括交通荷载数据获取、交通荷载等效简化、

有限元模型动态加载和基于疲劳累积损伤理论的疲劳损伤评估等。交通荷载数据获取根据安装在桥址处的WIM系统准确获取钢桥运营过程中的交通流量,或根据桥址附近的收费站数据结合人工观测,以获取桥梁结构的交通荷载信息。为了便于进行有限元模拟加载,根据等效损伤原理将疲劳致伤车辆(总重大于30 kN)按照轴数进行简化,保证相同交通量下等效疲劳荷载模型和实际交通荷载对钢桥产生的疲劳损伤相同。

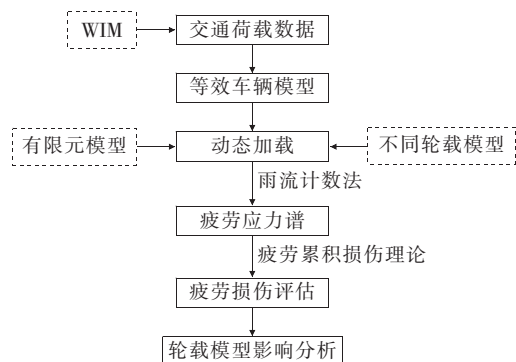


图1 基于交通荷载的钢桥疲劳损伤评估方法

建立钢桥节段有限元模型,考虑轮载模型的不同将疲劳等效车辆进行动态加载,以获取目标疲劳细节的疲劳应力历程,采用雨流计数法统计获得交通荷载作用下疲劳细节的疲劳应力谱。在进行钢桥疲劳损伤评估时,需确定疲劳细节的强度等级,即确定应力幅-寿命曲线(S-N曲线)。S-N曲线认为,在常幅应力幅 $\Delta\sigma_i$ 作用下,疲劳细节可承受的最大循环次数为 N_i ,则根据Palmgren-Miner线性累积损伤理论可知^[13],在 n_i 个循环的变幅应力幅 S_i 作用下,造成的疲劳损伤为:

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

式中: D 为疲劳损伤度。

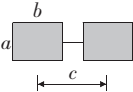
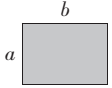
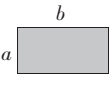
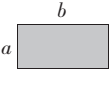
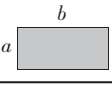
因此,进行疲劳损伤评估应首先确定结构承受的变幅应力幅 S_i 及其对应的循环次数 n_i (应力谱)。

2 轮载模型测试与分析

2.1 国内外规范中的轮载模型

国内外规范中针对钢桥抗疲劳设计与评估均制定了疲劳荷载模型及相应的轮载模型,该文选取英国BS 5400、欧洲EUROCODE、美国AASHTO、日本钢桥规范及中国JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》进行轮载模型对比分析,具体见表1。

表 1 国内外规范中的轮载模型

规范	轮载模型	具体尺寸($a \times b$)/ (mm \times mm)
BS 5400		200×200 $c = 300$
EUROCODE		400×400
AASHTO		250×510
日本钢桥规范		200×500
中国 JTG D64—2015		200×600

注: a 为纵向触地尺寸; b 为横向触地尺寸。

英国 BS 5400 Part10^[14]将典型疲劳致伤车辆按照疲劳等效原则简化为 25 种标准商用车,在此基础上归化出一辆总重 320 kN 四轴标准疲劳荷载模型。轮载模型采用双胎车轮,单侧车轮触地面积为 $2 \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,轴距分别为 1.8、6.0、1.8 m,轴重均为 80 kN,横向车轮中心距为 1.8 m。欧洲 EURO-CODE^[15]规范中给出的单车疲劳荷载模型为总重 480 kN 的四轴模型,轮载模型的单侧车轮触地面积为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$,轴距分别为 1.2、6.0、1.2 m,轴重均为 120 kN,车轮中心距为 2.0 m。美国 AASHTO 规范^[16]基于不同地区 30 个测站,建立了一辆总重 325 kN 的三轴标准疲劳荷载模型,轮载模型的单侧轮胎触地面积为 $250 \text{ mm} \times 510 \text{ mm}$,轴距分别为 4.3、9.0 m,轮距为 1.8 m。日本钢桥规范^[17]中公路钢桥疲劳荷载模型采用 T 荷载,单轴重 200 kN,轮载模型单侧轮胎触地面积为 $200 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,轮距 1.75 m。中国 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》^[18]制定的单车疲劳荷载模型为总重 480 kN 的四轴模型,轮载模型的单侧轮胎触地面积为 $0.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$,轴距分别为 1.2、6.0、1.2 m,轴重均为 120 kN,车轮横向中心间距为 2.0 m。

可以看出:不同规范中疲劳荷载模型差异显著,轮载模型也各有不同,在进行钢桥疲劳损伤评估时如何合理确定符合实际的轮载模型,成为钢桥抗疲劳设计与疲劳评估的关键。

2.2 轮载作用面测试与分析

针对不同规范中的轮载模型适应性进行研究,选

取河南省某高速公路上出现频次较高的四轴货车进行轮载作用面测试。测试分为单轮胎轴(前轴)和双轮胎轴(双联轴后轴),测试工况分为空载(140 kN)、半载(200 kN)、满载(400 kN)和后轴 100 kN,测试内容包括各轴重量及标准胎压下单轮胎轴和双轮胎轴的触地面积测试。测试首先利用地磅依次确定各轴的实际载重,然后通过 500 kN 吊车将拟测试轴吊离地面 20 cm,在轮胎底部均匀涂抹墨水,同时在轮胎下面铺设 A1 型白纸(841 mm \times 594 mm)。将拟测试轴缓慢放下,确保轮胎能够完全落于白纸上,以获取完整的轮胎触地尺寸(图 2)。

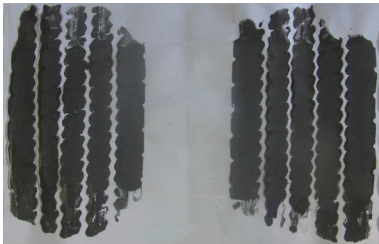


图 2 轴重 100 kN 的轮载作用面

轮载作用面测试结果如表 2 所示,四轴货车轮胎宽度 215 mm,双轮胎轴轮胎中心距 345 mm、净距 130 mm。根据钢桥结构疲劳细节受力特性及轮胎作用分布规律,近似认为双轮胎轴作用范围包括两轮胎之间的间距,即横向尺寸包括轮胎的实际触地尺寸和两轮胎之间的净距。

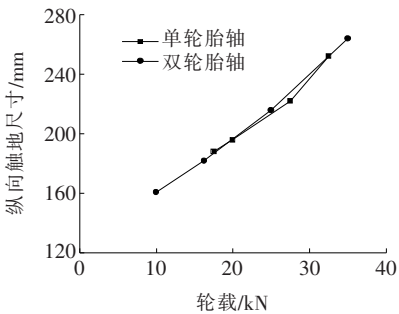
表 2 轮载作用面测试结果

工况	单轮胎轴		双轮胎轴	
	轴重/ kN	作用面/ (mm \times mm)	轴重/ kN	作用面/ (mm \times mm)
空载	35	188 \times 215	40	161 \times 560
半载	40	196 \times 215	65	182 \times 560
满载	60	252 \times 215	140	264 \times 560
后轴 100 kN	55	222 \times 215	100	216 \times 560

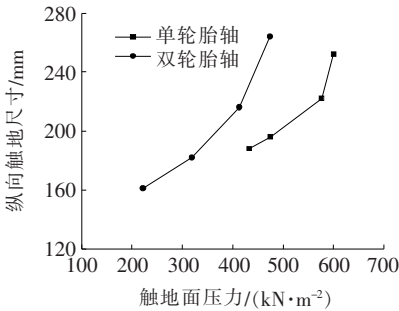
注:控制双联轴后轴轴重 100 kN 情况下,货车总重 300 kN;作用面指纵向 \times 横向。

轮胎作用面尺寸与载重密切相关,测试结果表明轮胎横向触地尺寸随载重量变化可以忽略,在测试过程中基本保持不变。为了进一步分析单侧轮胎载重、触地面压力与纵向触地尺寸的关系,该文近似采用将轴载平均分配到左、右侧轮胎的处理方法,同时取左、

右侧轮胎触地尺寸的平均值。空载和半载工况下前轴单个轮胎载重均大于后轴轮胎,总重 300 kN 和满载工况下后轴轮胎载重大于前轴轮胎,纵向触地尺寸随着载重变化近似呈线性变化规律,见图 3(a)。轮胎触地地面压力与纵向触地尺寸如图 3(b)所示,单轮胎轴触地地面压力由空载时 433.0 kN/m² 增大到满载时 599.9 kN/m²,双轮胎轴则由 221.8 kN/m² 增大到 473.5



(a) 不同轮载作用下纵向触地尺寸



(b) 不同触地地面压力作用下纵向触地尺寸

图 3 不同载重下轮胎纵向触地尺寸

kN/m²,纵向触地尺寸随触地地面压力增大而呈非线性增长趋势。由于触地地面压力在实际应用时一般难以获取,在进行钢桥疲劳应力分析时可基于轴载重量采用线性插值方法选取合理的轮胎触地面积。

3 轮载模型对疲劳损伤评估的影响分析

3.1 工程背景及有限元模型建立

以某高速公路连续钢箱梁桥为工程背景,跨径布置为(45+60+45) m,采用单箱四室钢箱梁(图 4),双向四车道设计,两侧设有 3.5 m 宽的硬路肩。钢箱梁纵向节段采用焊接连接,铺装层为 75 mm 厚的双层环氧沥青。钢箱梁全宽 26 m,底板宽 17 m,悬挑长度 3.8 m,箱梁中心线高度 2 m,设置 1.5% 双向横坡。顶、底板厚度 16 mm,顶板采用 300 mm×280 mm×

170 mm×8 mm U 肋加劲及部分 T 形肋、板肋加劲,加劲肋间距 600 mm。底板采用 T 形加劲肋,腹板采用板肋加劲,T 形肋、板肋厚度均为 16 mm,其中 T 形肋高度 200 mm、板肋高度 160 mm。腹板厚度 16 mm,横隔板厚 12 mm,纵向间距 3 m。

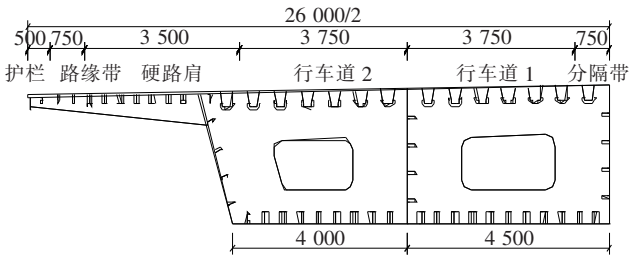


图 4 钢箱梁半宽截面(单位:mm)

为研究轮载模型对钢桥疲劳损伤评估的影响,采用 Abaqus 软件建立半宽钢箱梁节段模型,重点关注纵肋拼接细节在不同轮载模型作用下的疲劳损伤评估结果差异。为保证车辆加载能够完全覆盖关注细节,钢箱梁有限元模型长度为 26 m,横向宽 13 m,纵向包括 9 道横隔板,见图 5。模型采用壳单元(S4R)模拟,钢材弹性模量为 210 GPa、泊松比为 0.3,边界条件约束钢箱梁横隔板 3 个方向的平动自由度和转动自由度。加载区域选取外侧车道,单元大小划分为 50 mm,关注的纵肋拼接细节位于模型中间区域,纵向距横隔板 1 000 mm,单元大小划分为 20 mm,其他区域单元大小为 500 mm。采用不同轮载模型进行加载时,不考虑铺装层与钢桥面板的共同组合作用,加载时将轮载模型按 45°角进行扩散。

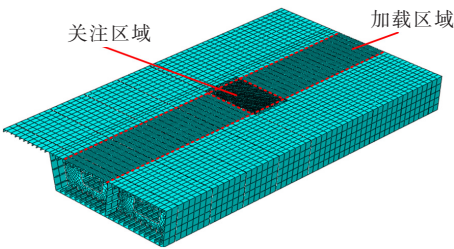


图 5 节段有限元模型

3.2 考虑不同轮载模型的疲劳损伤分析

基于 WIM 系统获取河南省某高速公路的交通荷载数据,主要包括通过时间、行驶车道、行驶速度、轴数、轴重及总重等参数。选取外侧车道 24 h 的交通数据,忽略 30 kN 以下对疲劳损伤贡献可忽略不计的轻型车辆,则二轴至六轴货车数量分别为 1 075、289、626、218、325 辆。选取四轴货车为代表,其载重分布

如图 6(a)所示,最小载重 118 kN,最大载重 496 kN。根据四轴货车载重限值 400 kN 计算,超载车辆共 197 辆,超载率为 7.8%。采用等效损伤原理对四轴货车轴重、轴距进行简化,得出等效的四轴疲劳荷载模型如图 6(b)所示。四轴疲劳荷载模型总重 335 kN,轴重分别为 50、75、102、108 kN,对应轴距分别为 2 600、5 000、1 350 mm。

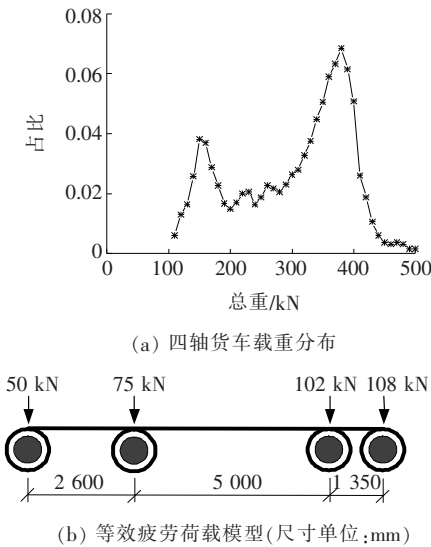


图 6 基于 WIM 的交通荷载信息

基于 Abaqus 软件移动加载功能,进行等效四轴疲劳荷载模型外侧行车道加载分析,关注区域为纵肋拼接焊接细节。轮载轨迹线横向分布概率按照 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》选取,以车道中心线向两侧以 0.1 m 为步距,共分为 5 个加载区域,轮载位置出现概率分别为 0.07、0.18、0.5、0.18、0.07。采用不同轮载模型进行加载,其中横向步距为 0.1 m,纵向步距为 0.2 m。提取纵肋拼接细节车辆通行时的应力历程曲线,采用雨流计数法对疲劳应力幅进行处理,得到采用不同轮载模型加载的疲劳应力谱,图 7 为采用实际轮载模型时获取的疲劳应力谱。

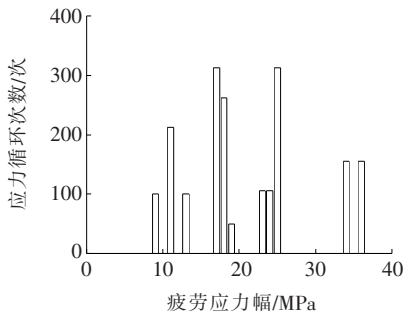


图 7 基于实际轮载模型的疲劳应力谱

根据疲劳累积损伤理论对钢桥面板纵肋拼接细节进行疲劳损伤评估,纵肋拼接细节疲劳强度等级为 70 级^[18],则基于不同轮载模型的疲劳损伤评估结果见表 3。按照实际轮载模型计算的 24 h 内四轴货车引起的疲劳损伤为 8.4×10^{-6} ,BS 5400、日本钢桥规范计算结果分别为 10.2×10^{-6} 、 10.1×10^{-6} ,高于实际轮载模型评估结果。EUROCODE、AASHTO 和中国钢桥规范 JTG/D64—2015 评估结果低于实际评估结果,24 h 疲劳损伤分别为 7.4×10^{-6} 、 8.2×10^{-6} 、 7.8×10^{-6} 。BS 5400 采用双轮胎模型,轮廓尺寸为 200 mm×500 mm,而日本钢桥规范采用单块触地面积 200 mm×500 mm 的轮载模型,二者评估结果几乎一致。因此,在计算分析中可以忽略双轮胎轴的轮胎间距,将触地面积简化为矩形,采用轮廓尺寸进行计算。

表 3 基于不同轮载模型的疲劳损伤评估结果

轮载模型	疲劳损伤度/ 10^{-6}
BS 5400	10.2
EUROCODE	7.4
AASHTO	8.2
日本钢桥规范	10.1
中国 JTG D64—2015	7.8
实际轮载模型	8.4

在不同的轮载模型中,AASHTO 规范评估结果与实际疲劳损伤较为接近,在无实测轮载数据时可近似采用。采用 BS 5400、日本钢桥规范中轮载模型进行疲劳损伤评估时,应将评估结果分别按照 0.82、0.83 进行折减。采用 EUROCODE、中国钢桥规范 JTG D64—2015 进行评估时,应分别考虑 1.17、1.08 的提高系数。此外,货车前轴一般为单胎轴,载重较轻,对疲劳损伤的评估结果影响较小,在疲劳评估时可以近似采用双轮胎轴的轮载模型。

基于实际轮载模型和 24 h 的 WIM 数据,对钢桥面板纵肋拼接细节进行疲劳寿命评估。分别对二轴至六轴货车进行简化,得出相应的等效车型,基于实际轮载模型进行有限元加载,通过雨流计数法得到 24 h 内的疲劳应力谱,根据线性累积损伤理论对纵肋拼接细节疲劳寿命进行评估。评估结果如表 4 所示,24 h 内二轴至六轴货车产生的疲劳损伤分别为 4.3×10^{-6} 、 3.8×10^{-6} 、 8.4×10^{-6} 、 5.2×10^{-6} 、 7.1×10^{-6} ,计算得该细节疲劳寿命为 95.1 年。考虑到该桥运营已经近 10 年,因此可以认为钢桥面板纵肋拼接细节疲劳性能能够满足设计使用要求。

表4 基于实际轮载模型的疲劳寿命评估

车型	交通量/ (pcu · d ⁻¹)	疲劳损伤度/ 10 ⁻⁶	疲劳寿命 评估/年
二轴	1 075	4.3	95.1
三轴	289	3.8	
四轴	626	8.4	
五轴	218	5.2	
六轴	325	7.1	

4 结论

为研究轮载模型对钢桥疲劳损伤评估的影响,采用轮载作用面测试与有限元分析,获取典型疲劳细节在交通荷载作用下的疲劳应力谱,基于疲劳累积损伤理论对不同轮载模型引起的疲劳损伤评估结果进行分析,从而确定不同轮载模型在钢桥疲劳损伤评估中的适应性。主要结论如下:

- (1) 轮载作用面为不规则形状,其中横向触地尺寸保持不变,纵向触地尺寸从车辆空载至满载时近似呈线性变化。
- (2) 单轮胎轴在轴重 35、55 kN 时纵向触地尺寸分别为 188、252 mm,双轮胎轴在轴重 40、140 kN 时纵向触地尺寸分别为 161、264 mm,其他载重下纵向触地尺寸可采用线性插值方法确定。
- (3) 采用 BS 5400、日本钢桥规范中轮载模型的评估结果高于实际疲劳损伤,评估结果应分别按 0.82、0.83 进行折减;采用 EUROCODE、中国钢桥规范 JTG D64—2015 中轮载模型的评估结果低于实际疲劳损伤,评估结果应分别考虑 1.17、1.08 的提高系数;AASHTO 规范评估结果与实际疲劳损伤较为接近,在无实测轮载数据时可近似采用。
- (4) 基于 WIM 数据和实际轮载模型对钢桥面板纵肋拼接细节进行疲劳评估,结果表明该细节疲劳寿命为 95.1 年,疲劳性能能够满足设计使用要求。

参考文献:

[1] 周细辉,黄坤. 钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳裂纹扩展特性及加固方法研究[J]. 中外公路,2019,39(3):138—142.

[2] 周晖,施刚,王元清,等. 钢桥疲劳评估研究进展[J]. 钢结构,2013,28(4):1—6,19.

[3] IMAM B, RIGHINIOTIS T D, CHRYSSANTHOPOULOS M K. Fatigue Assessment of Riveted Railway Bridge

es[J]. International Journal of Steel Structures, 2005, 5(5):485—494.

[4] ZHOU Y E. Assessment of Bridge Remaining Fatigue Lifethrough Field Strain Measurement[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(6):737—744.

[5] AYGÜL M, AL-EMRANI M, URUSHADZE S. Modeling and Fatigue Life Assessment of Orthotropic Bridge Deck Details Using FEM [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 40(7):129—142.

[6] YEN B T, HODGSON I C, ZHOU Y E, et al. Bilinear S-N Curves and Equivalent Stress Ranges for Fatigue Life Estimation [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(1):26—30.

[7] 崔闯,卜一之,张清华,等. 基于热点应力法的正交异性钢桥面板疲劳寿命评估[J]. 桥梁建设, 2014, 44(4):62—67.

[8] 祝志文,钱六五. 基于有效缺口应力法的正交异性钢桥面板疲劳评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(9):59—67.

[9] 朱太勇,周广东,张欢,等. 钢箱梁正交异性桥面板疲劳评估全空间 S—N 曲线研究[J]. 工程力学, 2017, 34(11):210—217.

[10] 祝志文,黄炎,向泽,等. 货运繁重公路正交异性板钢桥弧形切口的疲劳性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3):104—112.

[11] 祝志文,黄炎,向泽. 货运繁重公路的车辆荷载谱和疲劳车辆模型[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3):13—24.

[12] 陈斌. 基于 WIM 的疲劳荷载模型和钢桥疲劳性能评估方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.

[13] 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.

[14] British Standard Institution. Steel, Concrete and Composite Bridges-Part 2: Specifications for Loads; BS 5400—2; 2006 [S]. London: British Standard Institution, 2006.

[15] European Committee for Standardization. Eurocode 1: Actions on Structures-Part 2: Traffic Loads on Bridges; BS EN 1991—2 [S]. Brussel: European Committee for Standardization, 2003.

[16] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD Bridge Design Specifications (Edition 9): LRFDBDS—9 [S]. Washington, D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.

[17] 日本道路協会. 鋼道路橋の疲労設計指針[S]. 东京:日本道路協会, 2002.

[18] 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:人民交通出版社股份有限公司, 2015.