【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

超载对装配式梁桥横向联系疲劳损伤的影响

李 岩¹, 林雪琦¹, 商贺嵩²

1) 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150090; 2) 河北省交通规划设计院, 河北石家庄 050011

摘 要: 为研究超载作用下装配式梁桥横向联系的疲劳损伤程度, 基于线性累积损伤准则建立装配式梁桥横隔梁钢板连接构造的疲劳评估流程. 以某混凝土梁桥为工程背景, 开展车辆超载对混凝土梁桥横向联系疲劳损伤的影响研究, 分析过桥重车超载比例、超载率、车载作用频次、装载水平和超载车型等因素对连接构造疲劳损伤的影响规律. 结果表明: 随着超载率增加, 横向联系疲劳寿命显著降低; 相对车辆一般运行状态, 密集运行状态下横向联系的疲劳寿命对超载率变化更为敏感; 相较于超载率和车辆作用频次, 横向联系疲劳损伤对车辆超载比例和装载水平更为敏感; 不同超载车型对横向联系疲劳损伤的影响差异明显, 其中, 四轴整车与六轴挂车的超载对横隔梁连接钢板的疲劳损伤影响最为突出. 严格控制实际交通超载车比例和重车装载水平, 可有效延缓关键构件疲劳损伤进程, 桥梁限载管理中应考虑超载车型对桥梁构件疲劳寿命影响的差异.

关键词: 桥梁工程; 装配式混凝土梁桥; 横向联系; 疲劳损伤; 超载率; 装载水平; 运行状态

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.02158

Effect of vehicle overload on the fatigue damage of transverse connection for assembled girder bridges

LI Yan¹, LIN Xueqi¹, and SHANG Hesong²

1) School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang Province, P. R. China

2) Hebei Provincial Communications Planning and Design Institute, Shijiazhuang 050011, Hebei Province, P. R. China

Abstract: In order to study the fatigue damage degree of the transverse connection of prefabricated assembled beam bridges under overloading, we establish the fatigue evaluation process of the steel beam connection structure of the fabricated beam bridges based on the linear cumulative damage criterion. Taking a concrete girder bridge as an example, we investigate the influence of vehicle overload on the lateral contact fatigue damage of concrete girder bridge and analyze the factors such as overload ratio, overload rate, vehicle frequency, loading level and overload model. The results show that the fatigue life of transverse connection decreases significantly with the increase of overloading rate. Compared with the general running state of vehicles, the fatigue life of horizontal connection is more sensitive to the change of overloading rate. Compared with overloading rate and vehicle action frequency, the lateral contact fatigue damage is more sensitive to vehicle overload ratio and loading level. The influence of different

Received: 2019-05-21; **Accepted:** 2019-11-15

Foundation: Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2019E049); Science and Technology Project of Department of Housing and Urban-rural Development of Shandong Province (2019-k4-1)

Corresponding author: Associate professor LI Yan. E-mail: liyan2011@hit.edu.cn

Citation: LI Yan, LIN Xueqi, SHANG Hesong. Effect of vehicle overload on the fatigue damage of transverse connection for assembled girder bridges [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(2): 158-164. (in Chinese)

overload models on the fatigue damage of transverse connection is obvious, among which the overload of four-axle vehicle and six-axle trailer has the most prominent influence on the fatigue damage of the steel plate connected with the transverse diaphragm beam. Strictly controlling the proportion of overloaded vehicles and the loading level of heavy vehicles can effectively delay the fatigue damage process of key components. The bridge load limit management should consider the difference of the impact of overloaded models on the fatigue life of bridge components.

Key words: bridge engineering; prefabricated concrete girder bridge; lateral connection; fatigue damage; overloading rate; loading level; running state

正常使用荷载下公路混凝土桥梁结构的应力幅水平较低,传统设计通常不考虑疲劳问题。然而,近年中国公路交通运输需求量急剧增长,车辆违法超载超限问题突出^[1],不仅对桥梁承载能力造成负面影响,也显著增加了结构疲劳失效的概率,严重威胁桥梁安全。因此,研究超载对桥梁结构疲劳损伤的影响问题具有重要的现实意义。孙晓燕等^[2]以一座服役37年,超载运营1年的钢筋混凝土桥梁为例,运用线性累积损伤理论进行疲劳分析,指出超载作用会造成混凝土开裂损伤,进而导致桥梁发生较大疲劳损伤;刘扬等^[3]以钢筋混凝土梁桥为对象,提出简支梁桥在车辆荷载作用下的疲劳损伤计算方法,发现超载作用会降低结构疲劳可靠度指标;赵少杰等^[4]采用定性分析结合数据拟合的方法,建立了车辆参数与疲劳可靠度的量化关系,并通过车辆参数构造荷载系数,研究发现疲劳可靠度与荷载参数成负相关关系;CHEN等^[5]以广州地区公路桥梁为研究对象,提出了3种车辆超载谱下的疲劳试验方法,发现超载谱作用下,钢筋混凝土加固梁的疲劳性能明显下降。同时,工程实例调查表明,超载重车长期作用常会导致装配式混凝土梁桥的横向联系构件发生疲劳损伤,其中又以钢板连接的横向联系损伤问题更为突出^[6-7],该问题将对上部结构整体受力性能产生显著影响,进而导致“单梁受力”现象,严重威胁桥梁安全。李岩等^[8]采用数值分析方法以装配式简支箱梁桥为对象,研究了随机交通的动力冲击效应、运行状态和桥面退化等因素对其横向联系疲劳损伤的影响规律。以上研究集中于横向连接构造的失效机制及对结构性能的影响分析,缺乏关于混凝土梁桥横向联系疲劳损伤的深入研究。中国现行桥梁设计规范对此类构件也尚未给出明确的疲劳损伤评估方法及具体防护措施^[9],有关超载对装配式混凝土梁桥横向联系疲劳损伤影响的相关研究还未见报道。本研究依托某装配式预应力混凝土简支梁桥工程实例,开展超载车辆作用对横隔梁疲劳损伤的影响研究,对不同的超

载影响参数进行对比分析,以期为桥梁运营维护、超载车辆治理等提供依据。

1 横向联系疲劳损伤评估方法

本研究主要针对横隔梁钢板连接的疲劳性能开展研究。基于S-N曲线方程,并结合Palmgren-Miner (P-M)线性累积损伤准则,建立横向联系连接钢板疲劳损伤评估流程如图1。通过Monte-Carlo方法模拟随机交通流,采用影响线加载的方法,计算热点位置的应力时程响应。考虑动力冲击系数,经雨流法处理后得到应力谱,并结合线性累计损伤理论进行横向联系连接钢板疲劳损伤评估和疲劳寿命计算。

图1 疲劳寿命评估流程

Fig. 1 Fatigue life assessment process

2 工程实例概况

2.1 随机交通荷载模拟

实际桥梁结构所承受的车辆荷载具有极强随机性,各车型参数包括频率、车重及间距都服从一定的概率分布^[10]。本研究通过数理统计理论与 Miner 疲劳损伤等效原理将实际调查统计的车辆荷载归纳为7类车型(表1),并按照文献[10]方法计算得到实际桥梁结构的典型车辆荷载谱。采用极大似然法和K-S检验法对车辆荷载进行随机分布的参数估计和优度拟合,结果如表2。

表 1 7 种车型图示及规范限质量
Table 1 Graphics of seven types of vehicles and normative weights

车型	运输车性质	轴数	图式 (轴距/mm; 轴质量/kg)	$10^{-3} \times$ 规范限质量/kg
V1	大货车	2		18
V2	大货车	3		25
V3	大货车	4		31
V4	拖挂车	3		27
V5	拖挂车	4		36
V6	拖挂车	5		43
V7	拖挂车	6		49

表 2 车辆荷载概率分布类型及其参数估计
Table 2 Probability distribution type of vehicle load and the parameter estimation

车辆参数	分布类型	期望值	标准差
$10^{-3} \times$ 车质量/kg	对数正态	1.667	0.816
一般运行状态车间距	对数正态	4.343	0.935
密集运行状态车间距	对数正态	1.561	0.279

采用 Matlab 编程, 运用 Monte-Carlo 方法, 实现实际桥梁结构的随机交通荷载模拟, 具体模拟流程如图 2。现以日均总交通量 6 943 辆、货车交通量 4 860 辆为例, 模拟随机交通流, 结果如图 3。

2.2 桥梁计算模型

以某一跨铁路立交桥中的 30 m 跨径装配式预应力混凝土简支梁桥为对象, 开展超载作用对装配式梁桥横向联系疲劳损伤的影响分析。该桥位于城市电厂和钢厂等工业集中区连接外部通道的位置, 过桥交通流重载车辆比率高, 超载现象较为严重。该桥跨全宽 12 m (图 4), 跨内含 5 道内横隔梁、2

图 2 随机车流模拟流程
Fig. 2 Random traffic flow simulation flow chart

道端横隔梁, 横向联系采用预埋钢板焊接连接构造形式。采用 Ansys 软件建立该桥的精细化分析模型,

图 3 随机车流模拟示例

Fig. 3 (Color online) Random traffic flow simulation example

具体详见文献[8], 此不赘述.

通过疲劳车辆的加载分析, 可确定最不利横向联系位置及其焊接钢板的疲劳热点部位^[11]. 焊接钢板疲劳细节的 S-N 方程和参数依据《公路钢结构桥梁设计规范》(GD 64—2015) 选用, 如式(1). 本研究着重分析超载对疲劳热点部位的动力响应和疲劳损伤的影响.

$$\lg N = \begin{cases} 11.260\,7 - 3\lg \Delta\sigma, & N < 5 \times 10^6 \\ 14.301\,8 - 5\lg \Delta\sigma, & 5 \times 10^6 \leq N \leq 1 \times 10^8 \end{cases} \quad (1)$$

图 4 装配式小箱梁桥横断面示意图 (单位: cm)

Fig. 4 Cross section of assembled small box girder bridge (unit: cm)

3 超载作用下横向联系疲劳损伤分析

3.1 超载指标

超载车辆是指装载物质量超出规定的车辆, 本研究以《超限运输车辆行驶公路管理规定》(交通运输部令 2016 年第 62 号) 中的规定值作为标准, 具体如表 1. 以汽车超载率 γ 描述超载情况:

$$\gamma = (m_s - m_0) / m_0 \times 100\% \quad (2)$$

其中, m_s 为车辆总质量; m_0 为相应车型的限质量标准.

3.2 超载对热点位置应力反应的影响

为分析超载对横向联系连接钢板热点位置应力响应的影响, 针对前述桥例, 考虑桥面平整度等级为“一般”, 采用密集运行状态下容量为 1 000 辆的随机车流样本, 分别计算超载率分别为 0、20%、50% 和 100% 时的横向联系连接钢板热点位置应力反应, 得到应力幅分布如图 5. 对应的最大应力幅分别为 34、58、90 和 116 MPa. 可见, 随着超载率增大, 横向联系连接钢板热点位置的应力幅峰值显著提高, 超载作用下应力幅频次分布由单峰变为双峰形式.

3.3 超载对横向联系疲劳寿命的影响

针对前述桥例, 选取日交通量 6 943 辆, 其中

货车 4 860 辆. 考虑车辆超载与车辆运行状态的影响, 将 4 种超载率与 2 种运行状态进行组合, 共 8 种工况, 进行超载车辆作用下横向联系焊接钢板疲劳寿命分析, 结果如表 3 和图 6.

表 3 不同超载率下的疲劳寿命

Table 3 Fatigue life under different overload rates

超载率/%	10 ⁴ × 日累计损伤量		疲劳寿命/a	
	一般运行	密集运行	一般运行	密集运行
0	3.60	5.61	10.67	53.74
20	9.87	2.10	6.26	15.46
50	1.67	5.25	4.87	7.99
100	38.0	15.1	2.56	6.22

由表 3 可见, 随着超载率增大, 热点位置的日疲劳累积损伤量明显增大, 疲劳寿命显著降低. 同时由图 6 可见, 当超载率由 0 增到 20% 时, 构件疲劳寿命下降幅度最为剧烈, 而后随超载率增加, 疲劳寿命下降幅度趋于平缓, 且密集运行状态下的疲劳寿命对于超载率的变化更为敏感. 对比两种车辆运行状态下的疲劳分析, 发现一般运行状态下的横向联系疲劳寿命明显低于密集运行状态的疲劳寿命, 但随着超载率增大, 两种运行状态下构件的疲劳寿命差距缩小. 以超载率 0 和 100% 为例, 两者

图 5 横向联系热点位置的应力幅直方图

Fig. 5 (Color online) Histogram of the stress amplitude at the hot spot of the diaphragm

一般运行状态下横向联系的疲劳寿命分别较密集运行状态缩短了 43.07 a 和 3.66 a.

关于车辆不同运行状态对疲劳损伤的影响分析为: 密集运行状态下, 多辆车以较小车距过桥的情

图 6 疲劳寿命与超载率的关系曲线

Fig. 6 Relation curve between fatigue life and overload rate

况较为常见, 产生的车队效应增大了横向联系疲劳热点位置的应力幅, 但同时较小的车辆间距也造成应力时程峰值和谷值大幅增大, 导致雨流法处理得到的总应力循环次数减少; 对于一般状态, 车辆间距较大, 应力幅值主要受单车车重控制, 应力循环次数受车辆数影响. 因此密集运行状态下横向联系疲劳损伤值较一般运行状态小.

4 横向联系疲劳损伤的影响参数分析

4.1 超载比例与超载率的影响分析

超载比例为过桥重车交通流中超载车的占比, 是衡量运营车辆超载情况的重要指标之一. 现进行超载率与超载比例对横向联系疲劳寿命影响的比较分析. 仍采用一般运行状态下货车容量为 4 860 辆时的随机车流, 桥面平整度等级“一般”, 分别考虑超载率 10% 与 4 种超载比例 (10%、20%、50% 和 100%) 组合, 超载比例 10% 与 4 种超载率 (10%、20%、50% 和 100%) 组合形成的 8 种工况, 进行横向联系疲劳寿命分析, 结果如图 7.

以超载比例和超载率均为 10% 工况对应的横向联系疲劳寿命作为基准值, 其中超载比例 10%、超载率 100% 的工况下疲劳寿命较基准值降低了 5.45 年, 而超载率 10%、超载比例 100% 的工况下对应疲劳寿命相较于基准值减少了 6 年. 由图 7 可知, 相较于车辆超载率, 横向联系的疲劳寿命对车辆超载比例更为敏感. 为此, 在实际治理道路超载时, 应同时对超载率和超载比例进行合理控制, 避免超载现象导致桥梁受力构件疲劳寿命的大幅降低.

图7 超载比例与超载率对疲劳寿命的影响

Fig. 7 Influence of overload ratio and rate on fatigue life

4.2 车辆作用频次与装载水平的影响分析

当过桥货运量相同时,车辆作用频次和载重水平是表征车辆货运特征的重要参数.为此,本研究对比分析了车辆作用频次与装载水平对横向联系疲劳寿命的影响.分析选取的车辆运行状态、交通量和桥面平整度等级同4.1节.将车货总重视为定量,分别计算车辆3种工况(半载运输4d、满载运输2d和超载100%运输1d)下横向联系的疲劳损伤值,结果如图8.由图8可见,总运量相同条件下,满载方式下的累计疲劳损伤值是半载方式的10倍,而超载状况的累计疲劳损伤值是半载方式的36倍.显然,相对车辆作用频次,横向联系的疲劳寿命对车辆的装载水平更为敏感,考虑是由于装载水平与横向联系热点位置应力幅水平直接相关,进而直接影响构件的疲劳寿命.对实际重载车辆,严格控制其装载水平、避免超限对于降低桥梁关键受力构件的应力幅幅值,减缓疲劳损伤进程十分重要.

图8 不同车辆载重下焊接钢板损伤对比

Fig. 8 Damage comparison of welded steel plate under different vehicle loads

4.3 超载车型的影响分析

实际运营中各类车型的超载发生率一般存在较大差异.为考察不同超载车型对横向联系疲劳损伤的影响,考虑表1中7种车型的任一种为超载车(超载率分别为10%、20%、50%和100%),其他车型按满载计算.选取一般运行状态下4860辆重车的日交通量,考虑桥面平整度等级为“一般”,并以两轴整车(V1)的疲劳损伤值为基准值(设定为1),将其余车型的疲劳损伤值与基准值的比值定义为累积损伤标量,结果如图9.由图9可见,六轴挂车超载引起的横向联系疲劳损伤最大,超载率100%时是两轴整车的5倍;四轴整车其次,超载率100%时可达两轴整车的2倍,但在超载率不超过20%时,其超载对连接钢板造成的疲劳损伤与其他车型相差不多;其余车型超载对连接钢板造成的疲劳损伤相差不多.对于该桥例,应重点关注四轴整车和六轴挂车的超载问题.可见,实际桥梁限载管理中应考虑超载车型对桥梁构件疲劳寿命的影响差异,对影响显著的车型需给以重点关注.

图9 各车型在不同超载率下的疲劳损伤标量

Fig. 9 The fatigue damage scalar of each vehicle model under different overloading rate

5 结 论

以超载作用下的装配式预应力混凝土简支小箱梁桥的横向联系连接钢板为研究对象,基于S-N曲线和线性Miner累积损伤准则,建立疲劳评估流程.运用Monte-Carlo方法模拟随机交通流,分析了车辆超载对装配式预应力混凝土横向联系连接钢板疲劳损伤的影响,结果发现:

1) 随机交通荷载作用下,随着超载率增加横向联系热点位置的应力幅明显增大,疲劳寿命显著

降低,且当超载率由 0 增至 20% 时,构件疲劳寿命下降幅度最为剧烈;相对一般运行状态,密集运行状态下的横向联系的疲劳寿命对超载率的变化更敏感。

2) 相对于超载率,横向联系的疲劳寿命对车辆超载比例更敏感;相对车辆作用频次,横向联系的疲劳损伤对车辆的装载水平更敏感。严格控制实际交通流中超载车比例和重载车辆的装载水平,可有效降低桥梁关键受力构件的应力幅,延缓疲劳损伤的进程。

3) 不同超载车型对横向联系疲劳损伤的影响差异明显,在该桥中四轴整车与六轴挂车的超载对横向联系连接钢板的疲劳损伤影响最为突出。建议在进行桥梁构件疲劳寿命评估时应考虑实际交通流中超载车型的影响。

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目 (LH2019E049); 山东省住建厅科技资助项目 (2019-k4-1)

作者简介: 李 岩 (1978—), 哈尔滨工业大学副教授、博士。研究方向: 桥梁结构动力性能。E-mail: liyan2011@hit.edu.cn

引 文: 李 岩, 林雪琦, 商贺嵩. 超载对装配式梁桥横向联系疲劳损伤的影响[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(2): 158-164.

参考文献 / References:

- [1] 刘焕举, 韩鹤翔, 黄平明, 等. 基于车-桥耦合振动的桥梁加固效果分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2018, 35(1): 55-61.
LIU Huanju, HAN Hexiang, HUANG Pingming, et al. Evaluation of the bridge reinforcement effect based on vehicle-bridge coupling vibration [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2018, 35(1): 55-61. (in Chinese)
- [2] 孙晓燕, 王海龙. 超载运营下服役钢筋混凝土桥梁疲劳损伤研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(5): 734-740.
SUN Xiaoyan, WANG Hailong. Fatigue damage analysis on existing reinforced concrete bridge under overloading [J]. Journal of Applied Foundation and Engineering Science, 2008, 16(5): 734-740. (in Chinese)
- [3] 刘 扬, 张海萍, 邓 扬, 等. 考虑车辆超载的公路简支梁桥疲劳性能[J]. 浙江大学学报工学版, 2015, 49(11): 2172-2178.
LIU Yang, ZHANG Haiping, DENG Yang, et al. Fatigue damage analysis on simple supported bridge under overloading [J]. Journal of Zhejiang University Engineering Science, 2015, 49(11): 2172-2178. (in Chinese)

- [4] 赵少杰, 任伟新. 超限超载交通对桥梁疲劳损伤及可靠度的影响[J]. 中南大学学报自然科学版, 2017, 48(11): 3044-3050.
ZHAO Shaojie, REN Weixin. Effect of overrun and overloaded vehicles on fatigue damage and reliability of highway bridges [J]. Journal of Central South University Science and Technology, 2017, 48(11): 3044-3050. (in Chinese)
- [5] CHEN Zhanbiao, HUANG Peiyan, LI Zhengwei, et al. Fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP under overloads with a ladder spectrum [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(10), 3321: 1-14.
- [6] 姚晓飞, 徐 岳, 丁怡洁, 等. 翼缘刚接混凝土 T 梁桥结构体系损伤评价研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(1): 169-173.
YAO Xiaofei, XU Yue, Ding Yijie, et al. Research on damage assessment of rigid-jointed concrete T-beam bridge system [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(1): 169-173. (in Chinese)
- [7] BAE H U, OLIVE G M. Moment and shear load distribution factor for multi-girder bridge subjected to overload. [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(3): 519-527.
- [8] 李 岩, 杨婷婷, 商贺嵩, 等. 考虑多因素影响的装配式梁桥横向联系疲劳损伤评估[J]. 湖南大学学报自然科学版, 2019, 46(9): 79-88.
LI Yan, YANG Tingting, SHANG Hesong, et al. Fatigue assessment for lateral connection of fabricated girder bridge considering multi factors influence [J]. Journal of Hunan University Natural Sciences, 2019, 46(9): 79-88. (in Chinese)
- [9] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
JTG D 60—2015 General code for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [10] 张喜刚. 公路桥梁汽车荷载标准研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
ZHANG Xigang. Study on vehicle load standard for highway bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese)
- [11] 商贺嵩. 装配式混凝土梁桥横向联系的疲劳评定研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
SHANG Hesong. Fatigue assessment for the transversal connection of assembled concrete beam bridge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】