

文章编号: 1673-2049(2015)04-0099-06

混凝土矮箱梁桥疲劳性能监测与评估

管国东¹, 翟慕赛², 张培杰², 王春生²

(1. 西安公路研究院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 桥梁工程研究所, 陕西 西安 710064)

摘要:采用动态称重(WIM)技术对陕西省省道 S305 线岷岷中桥进行交通荷载监测,分析得出了适合陕西省混凝土桥梁的标准疲劳车模型。采用动应变监测技术对混凝土矮箱梁关键部位进行长期动应变监测,获得了运营状态下混凝土矮箱梁的实测应力谱;运用 Miner 线性准则和应力幅-循环次数曲线对结构进行疲劳寿命评估;对超载情况下混凝土矮箱梁的疲劳寿命进行了分析。结果表明:在目前交通荷载作用下,混凝土矮箱梁的疲劳寿命为 5 120 年,考虑腐蚀疲劳的因素后疲劳寿命降至 254 年;当超载车辆比例低于 1% 时,超载对桥梁结构的疲劳寿命影响很小;当超载车辆比例达到 10% 时,结构的疲劳寿命随着超载率的提高而显著降低;该研究成果可为岷岷中桥未来维护管理提供技术支持,同时为同类型其他桥梁的疲劳寿命评估提供参考。

关键词:混凝土矮箱梁桥;疲劳性能;运营监测;交通荷载;超载

中图分类号: U448. 21

文献标志码: A

Fatigue Performance Monitoring and Assessment for Concrete Low-box Girder Bridge

GUAN Guo-dong¹, ZHAI Mu-sai², ZHANG Pei-jie², WANG Chun-sheng²

(1. Xi'an Highway Research Institute, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Institute of Bridge Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Weigh-in-motion (WIM) system was adopted to monitor the fatigue loads of Yaoxian medium bridge in Shaanxi provincial road S305, and standard fatigue vehicle model for concrete bridges in Shaanxi province was determined based on recorded data. Dynamic strain monitoring technique was adopted to conduct continuous strain monitoring of key positions on concrete low-box girder, acquiring the real stress spectrum under service situation. Moreover, the fatigue life assessment of structures was carried out by using Miner linear criterion and stress amplitude-cycle number curve. The results show that the fatigue life of concrete low-box girder is 5 120 years under the present traffic load, and the fatigue life decreases to 254 years when taking into consideration of fatigue corrosion. Under overload situation, when the ratio of overload vehicle belows 1%, the influence is little; when the ratio reaches 10%, the fatigue life of structures will decrease sharply with increasing of the overload ratio. Research achievement can provide technical support for the future management and maintenance of Yaoxian medium bridge, and provide reference for fatigue life assessment of other similar bridges.

Key words: concrete low-box girder bridge; fatigue performance; service monitoring; traffic load; overload

收稿日期: 2015-01-11

基金项目: 陕西省交通科技项目(07-04K); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012ZD008);

交通运输部建设科技项目(2013318223040)

作者简介: 管国东(1966-), 男, 河南洛阳人, 高级工程师, E-mail: 187224774@qq.com。

0 引言

在中国的公路与城市道路建设中,混凝土结构桥梁使用广泛,而混凝土矮箱梁桥以其整体性好、跨越能力相对较高等优点,在中小跨径混凝土桥梁中占有很高比例。伴随着交通运输行业的迅猛发展,交通量、轴载及车速都在不断提高,超载现象也频繁发生,由此造成的混凝土构件疲劳损伤不容忽视。加上环境因素、材料性能的影响,混凝土桥梁在运营过程中梁体开裂、钢筋锈蚀问题日益突出。随着车辆荷载及外部环境的影响,在运营期内钢筋混凝土桥梁的承载能力不断降低,而实际交通的运营需求却不断增加。为了使混凝土矮箱梁桥在运营期内能够可靠、安全地完成其任务,并为后期维护管理提供相应技术依据,解决混凝土矮箱梁桥的疲劳寿命评估问题刻不容缓。

20 世纪 70 年代以前,钢筋混凝土结构均是按照容许应力法进行设计的,因结构的容许应力较低,故运营期间因疲劳而破坏的工程实例较少^[1]。因此,在以往混凝土结构的疲劳断裂问题方面没有给予足够的重视,中国公路规范在疲劳断裂问题方面亦未给出具体要求。相比一些发达国家已经着手研究混凝土结构的疲劳断裂问题而言,中国的相关研究和探索还处于开始阶段。近年来,钢筋混凝土结构逐步采用高强混凝土及高强钢筋,并且采用极限状态设计理论以充分利用材料的强度,这也导致结构中很多部位都处于高应力状态。随着高强材料的广泛应用使得结构的恒载不断降低,从而动载所占比例相对增大,动载引起的疲劳损伤日益严重。疲劳断裂引起的失效问题在各种结构构件中越来越突出,并且这一问题正在逐渐成为造成工程结构和构件失效的主要原因。在理论及设计方面,由于对结构的分析越来越精确,对混凝土的力学性能了解越来越全面,这也使我们认识到混凝土结构的疲劳断裂问题是一个不容忽视的问题,并已逐渐成为重要研究课题^[2-5]。

国外对混凝土箱梁桥的疲劳研究起步较早,Rao 等^[6]对 1 座运营 27 年的预应力混凝土箱梁进行疲劳试验,得到了混凝土箱梁疲劳性能及退化机理。Tilly^[7]研究了钢筋不同腐蚀水平下疲劳强度的折减系数,用于混凝土桥梁耐久性与剩余寿命评估;Schlafli 等^[8]提出了既有混凝土桥梁的疲劳寿命评估方法,对瑞士既有铁路和公路混凝土桥面板进行了疲劳安全检测与评估。

近年来,中国学者也开始涉足混凝土桥梁疲劳安全评估问题。朱劲松等^[9-10]根据混凝土及钢筋疲劳刚度退化、疲劳强度退化与疲劳残余变形演变规律,提出了混凝土筒支梁和混凝土桥面板疲劳损伤累积失效全过程数值分析法,并采用应力幅-循环次数(S-N)曲线对既有混凝土连续梁桥进行剩余疲劳寿命评估。王春生等^[11-12]提出基于钢筋 S-N 曲线和断裂力学模型的既有混凝土桥梁剩余寿命评估方法,并应用于七狼窝大桥桥面板 T 型梁受拉主筋的疲劳寿命评估,考虑了腐蚀对钢筋疲劳寿命的影响。

本文采用动态称重技术对陕西省省道 S305 线岷岷中桥进行交通荷载监测,基于大量实测车辆信息的分析结果,对陕西省二级公路的标准疲劳车模型进行研究;采用动应变监测技术对岷岷中桥矮箱梁关键受力部位进行运营状态下连续应变监测,获得多天的实测应力谱;通过 Miner 准则和 S-N 曲线对混凝土矮箱梁进行疲劳寿命评估,并对超载情况下混凝土箱梁疲劳寿命进行评估,为混凝土桥梁运营维护管理提供技术参考。

1 疲劳荷载监测分析

岷岷中桥(图 1)是陕西省省道 S305 线上连接铜川城区和焦坪县的一座重要桥梁,结构为 3×20 m 的混凝土连续矮箱梁弯桥。焦坪县境内有丰富的煤矿资源,每天有货车从焦坪运煤至铜川,因此该桥每天承受着相当一部分的重载车辆。为准确监测岷岷中桥的实际通行车辆信息,在岷岷中桥桥端安装了动态称重系统(图 2),并进行了长期连续监测。动态称重系统可以同时记录通过车辆的多种信息,如车型、总质量、轴数、轴距、轴重和车速等。

据统计,1 个月时间内焦坪方向车辆共计为 24 380 辆,铜川方向车辆为 23 671 辆。图 3 为总体车辆不同车型比例的统计结果。陕西省 S305 线以



图 1 岷岷中桥

Fig. 1 Yaoxian Medium Bridge



图 2 动态称重系统

Fig. 2 WIM System

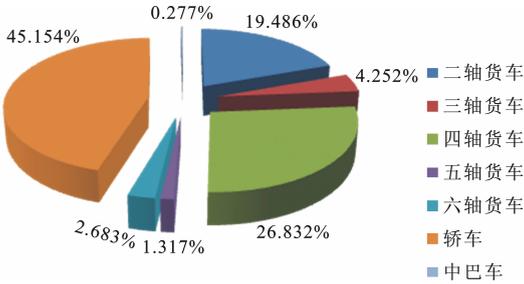


图 3 车辆车型比例

Fig. 3 Proportion of Vehicle Types

轿车、二轴货车和四轴货车为主,其余车型所占比例均较小。为了比较各车道的荷载分布特征,将铜川方向与焦坪方向的车辆均进行统计。图 4 为焦坪方向车重随时间分布,图 5 为铜川方向车重随时间分布。由图 4,5 可知:焦坪方向车重主要集中于 10~20 t,多为二轴货车;铜川方向车重主要集中于 30~40 t,多为四轴货车。焦坪方向车重超过 55 t 的车辆极少,1 个月内仅有 6 辆;铜川方向车重超过 55 t 的车辆,1 个月内为 171 辆,占总交通量 0.7%。根据对荷载谱的分析可知,实测车辆荷载最大值基本均在设计荷载范围内。

根据陕西省 S305 线岷岷中桥交通监测结果,得出以下结论:①在车辆组成中,轿车所占比例最大,

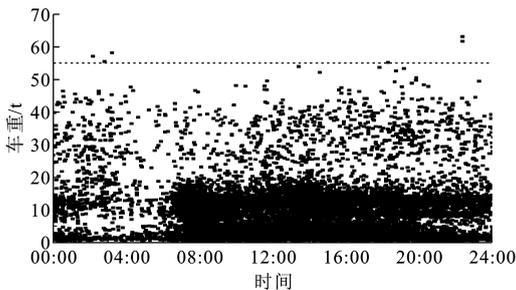


图 4 焦坪方向车重随时间分布

Fig. 4 Distribution of Gross Vehicle Weight with Time Along Jiaoping Direction

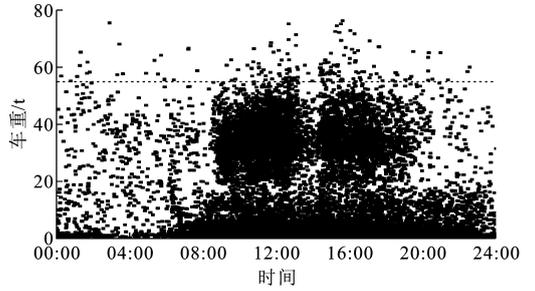


图 5 铜川方向车重随时间分布

Fig. 5 Distribution of Vehicle Weight with Time Along Tongchuan Direction

在货车组成中,四轴货车所占的比例最大;②虽然轿车所占比例较大,但是相对于货车车重,轿车重要轻很多,对结构造成的疲劳损伤较小,可以忽略其影响;③二轴货车满载时后轴重达 125 kN,但总重偏低,对混凝土梁体造成的疲劳损伤较小,在计算标准疲劳车模型时可以忽略其影响。

将能够造成疲劳损伤的车型按照车轴数进行分类,各型疲劳车的轴重按照式(1)计算,即

$$W_{e_j} = \left(\sum f_i W_{ij}^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: f_i 为归在同一类车型中的第 i 辆车的相对频率; W_{ij} 为第 i 辆车的第 j 个轴的轴重; W_{e_j} 为同一类车型第 j 个轴的等效轴重。

统计结果显示,四轴货车在能造成疲劳损伤的车型中比例最高,将其作为标准疲劳车的基本形式。通过式(2)将四轴疲劳货车的基本形式与标准形式的轴重联系起来。

轴重修正系数 α 为

$$\alpha = \frac{W_S}{W_B} \quad (2)$$

式中: W_B 为疲劳车基本形式下的轴重; W_S 为疲劳车标准形式下的轴重。

通过等效疲劳损伤原理可得到式(3),计算出轴重修正系数 α 后即可求得标准疲劳车的轴重。

$$\alpha = \left(\frac{n_T \Delta\sigma_T^m}{N_T n_B} \right)^{\frac{1}{m}} / \Delta\sigma_B \quad (3)$$

式中: n_T, n_B 分别为各型典型疲劳车作用后产生的总循环次数和基本疲劳车作用 1 次所产生的应力循环次数; N_T 为造成疲劳损伤总的车辆数; $\Delta\sigma_T, \Delta\sigma_B$ 分别为各型典型疲劳车分别作用后所产生的总等效应力幅和基本疲劳车作用后所产生的等效应力幅; m 为 S-N 曲线斜率负倒数。

通过计算分析并将轴重、轴距取整,最终确定的标准疲劳车为总质量 40 t 的四轴货车,车辆荷载模型如图 6 所示。

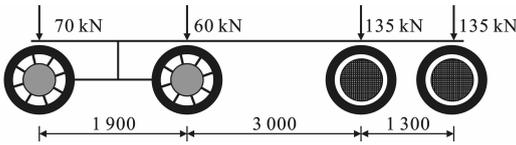


图6 陕西省S305线标准疲劳车(单位:mm)

Fig. 6 Standard Fatigue Vehicle for Shaanxi Provincial Road S305 (Unit:mm)

采用等效应力幅法对标准疲劳车的加载效果进行检验,即将疲劳车加载至结构上并计算其等效应力幅,然后与实际车流在结构上作用产生的等效应力幅进行比较。等效应力幅的计算公式为

$$\Delta\sigma_e = \left(\frac{\sum_{k=1}^n n_k (\Delta\sigma_k)^m}{\sum_{k=1}^n n_k} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

式中: $\Delta\sigma_e$ 为等效应力幅; $\Delta\sigma_k$ 为第 k 级应力幅水平下的应力幅值; n_k 为与 $\Delta\sigma_k$ 对应的循环次数。

将提出的标准疲劳车与动态称重系统测得的车辆荷载数据加载至桥梁上,计算边跨0.4L(L为计算跨径)截面处箱梁底板最下层主筋的等效应力幅,结果如表1所示。建议的陕西省S305线标准疲劳车与实际交通荷载效应比较接近(相对误差小于1%),故提出的标准疲劳车模型可以代表实际交通荷载进行混凝土桥梁疲劳寿命评估。

表1 等效应力幅比较

Tab. 1 Comparison of Equivalent Stress Ranges

荷载类型	标准疲劳车	实际车流
等效应力幅/MPa	6.32	6.28

2 混凝土桥梁疲劳寿命评估

2.1 现场监测布置与关键截面的选择

监测过程中采用动态应变数据采集仪对混凝土测点位置的动态应变进行了监测(图7),并记录了每辆车过桥时的混凝土应变历程。图8为车辆通过时的典型动应变曲线。

岷中桥各主梁应变中1#梁及2#梁所测得的应变明显大于其他梁的应变,其中1#梁应变最大,

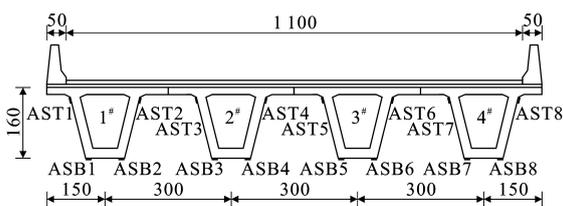


图7 边跨0.4L处截面测点布置(单位:cm)

Fig. 7 Measuring Point Layout of 0.4L Section at Side Span (Unit:cm)

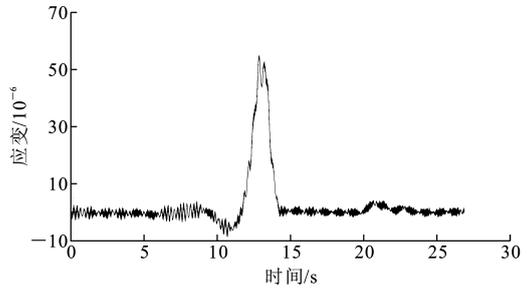


图8 典型动应变曲线

Fig. 8 Typical Dynamic Strain Curve

且边跨0.4L处测点所测得的应变大于距中支点1m处截面的应变。因此,选取1#梁边跨0.4L截面为控制截面进行疲劳寿命评估。

2.2 基于Miner准则和S-N曲线的疲劳寿命评估

疲劳性能曲线可以反映外加应力幅和疲劳寿命间的关系,被广泛应用于疲劳寿命评估。本文通过建立荷载与疲劳寿命之间的线性关系来计算相应的疲劳寿命或疲劳强度。

通常情况下桥梁疲劳是变幅的,而对于变幅疲劳,Miner线性疲劳累积损伤理论^[13]因其具备相当高的精度而被广泛认可和使用。Miner理论认为,在等效应力幅作用下或在各循环的应力幅 S_k 作用下,造成的疲劳损伤 D 为

$$D = \sum_{k=1}^n D_k = \sum_{k=1}^n \frac{n_k}{N_k} \quad (5)$$

式中: N_k 为第 k 级应力幅 S_k 作用下疲劳破坏时的总循环次数; D_k 为第 k 级应力幅 S_k 造成的疲劳损伤。

采用特定时间作为周期,如1d、1周、1月或1年作为周期。已知实际应力幅水平和一段时间内的循环次数 n_k ,则该周期内结构的疲劳累积损伤 D_T 等于各级应力幅水平作用下产生的疲劳损伤的累加,其计算表达式为

$$D_T = \sum \frac{n_k}{N_k} \quad (6)$$

故结构的疲劳寿命 Y 可用式(7)计算,即

$$Y = \frac{D_{cr}}{D_T} T \quad (7)$$

式中: T 为周期; D_{cr} 为临界疲劳损伤。

试验表明,随机荷载下试件破坏的临界疲劳损伤值 D_{cr} 在1附近波动,工程上常将其值取为1。当 $D \geq D_{cr}$ 时便可认为发生疲劳破坏。

2.3 混凝土矮箱梁桥疲劳寿命评估

根据动态应变监测内容,得到实测的混凝土测点应变历程,通过平截面假定换算得到梁最下层受

拉主筋的应变历程,然后通过雨流计数得到各级应力幅水平下应力循环次数,依照前述 Miner 线性累积损伤原理和 $S-N$ 曲线计算得出岷岷中桥的剩余疲劳寿命。

综合比较各国文献和规范中给出的各种疲劳细节的 $S-N$ 曲线,本文偏于安全地采用欧洲钢结构协会(ECCS)^[14]建议的变形钢筋 $S-N$ 曲线,纵向钢筋偏于安全考虑按疲劳细节 80 进行计算,200 万次循环对应的疲劳强度为 80 MPa,在 500 万次~10 000 万次循环的区段由 3 增大到 5。此时疲劳性能曲线($S-N$ 曲线)的表达式如式(8)所示,其常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D=0.737\Delta\sigma_C=59.0$ MPa($\Delta\sigma_C$ 为 $S-N$ 曲线中 200 万次循环次数对应的应力幅),疲劳极限门槛值 $\Delta\sigma_L=0.737\Delta\sigma_D=32.4$ MPa, $S-N$ 曲线表达式为

$$\lg(N)=\begin{cases} 12.0106-3\lg(\Delta\sigma) & 1\times 10^5\leq N<5\times 10^6 \\ 15.5517-5\lg(\Delta\sigma) & 5\times 10^6\leq N\leq 1\times 10^8 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为变幅应力幅。

考虑钢筋腐蚀疲劳的影响,钢筋的疲劳强度下降至 65%^[15],将钢筋的疲劳细节等级由 80 降低为 50,则 $S-N$ 曲线的表达式如式(9)所示,其中常幅疲劳极限为 36.9 MPa,疲劳极限门槛值为 20.3 MPa,其表达式为

$$\lg(N)=\begin{cases} 11.4-3\lg(\Delta\sigma) & 1\times 10^5\leq N<5\times 10^6 \\ 14.5431-5\lg(\Delta\sigma) & 5\times 10^6\leq N\leq 1\times 10^8 \end{cases} \quad (9)$$

根据 Miner 准则和 $S-N$ 曲线对岷岷中桥正常运营状态下疲劳性能进行评估(表 2),在目前交通量状态下,混凝土矮箱梁均为无限寿命(大于 500 年);若考虑钢筋腐蚀对其疲劳等级的影响,计算得到岷岷中桥矮箱梁的疲劳寿命下降至 254 年,在 100 年设计使用年限内,该桥不会发生疲劳失效。

表 2 疲劳寿命计算结果

Tab. 2 Calculation Results of Fatigue Life

测点编号	测点位置	是否考虑腐蚀	$D/10^{-7}$ 次	Y/年
ASB1	边跨 0.4L 处 1# 梁底部	不考虑	5.35	5 120
	边跨 0.4L 处 1# 梁底部	考虑	207.56	254

2.4 超载情况下疲劳寿命分析

根据陕西省境内超载现象的实际情况,在动态称重获得的疲劳荷载数据基础上,对岷岷中桥进行不同超载情况下的疲劳寿命评估。将超载车比例依照严重超载情况、部分超载情况、轻度超载情况以及

超载治理后的超载情况等进行分类,并分别用 10%,5%,1%,0.3% 来代表超载车辆所占比例,选取超载率为 5%,10%,15%,20%,30%,40%,50%,60%,70%,80%,将超载部分按照比例分配增加至计算荷载上,最终计算混凝土梁桥疲劳累积损伤并得出疲劳剩余寿命。

图 9 为岷岷中桥在超载情况下的疲劳寿命计算结果。当超载车辆比例低于 1% 时,不考虑受力主筋腐蚀时,超载对桥梁结构的疲劳寿命影响很小;当超载车辆比例达到 10% 时,结构的疲劳寿命随着超载率的提高而显著降低,当超载率达到 80% 时,结构的疲劳寿命将下降为原有寿命的一半。

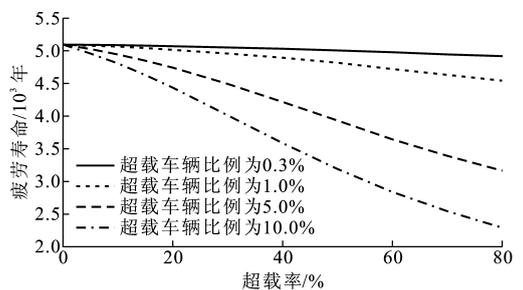


图 9 超载情况下疲劳寿命计算结果

Fig. 9 Fatigue Life Calculation Results Under Overload Situations

2.5 超载与腐蚀情况下疲劳寿命分析

桥梁在实际运营中,往往会同时面临腐蚀与超载两大问题。考虑超载情况为超载车比例 10% 和超载率 80% 的严重超载情况,钢筋腐蚀导致疲劳等级降为 50.0 MPa,计算该情况下桥梁疲劳寿命。

图 10 为岷岷中桥在超载及腐蚀情况下的疲劳寿命计算结果。由图 10 可以看出,腐蚀和超载对混凝土矮箱梁疲劳寿命的影响十分显著。在超载率 80% 和超载车所占比例 10% 的严重超载情况下,疲劳寿命为 168 年,仅为正常运营且不考虑钢筋腐蚀情况下寿命的 3.3%。

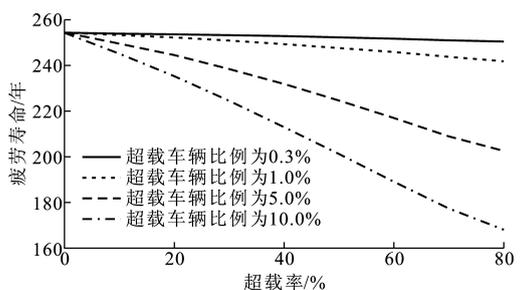


图 10 超载与腐蚀情况下疲劳寿命计算结果

Fig. 10 Fatigue Life Calculation Results Under Overload and Corrosion Situations

3 结 语

(1) 运用动态称重技术对岷岷中桥进行交通荷载观测,通过对实测数据的分析得出了适合陕西省的四轴标准疲劳车模型。

(2) 采用动态称重技术对混凝土箱梁关键部位进行动应变监测,获得了运营状态下混凝土箱梁的实测应力谱;运用 Miner 准则和 $S-N$ 曲线对结构进行疲劳寿命评估,并考虑受力主筋腐蚀的影响。评估结果表明,在目前交通荷载作用下混凝土矮箱梁的疲劳寿命为 5 120 年,考虑腐蚀疲劳的因素后疲劳寿命降至 254 年,在 100 年设计使用年限内不会发生疲劳失效。

(3) 考虑超载现象对疲劳寿命的影响,当超载车辆比例低于 1% 时,超载对桥梁结构的疲劳寿命影响很小;当超载车辆比例达到 10% 时,结构的疲劳寿命随着超载率的提高显著降低,当超载率达到 80% 时,结构的疲劳寿命将下降为原有寿命的一半。

(4) 考虑超载和钢筋腐蚀双重作用时,混凝土矮箱梁桥的疲劳寿命将会显著变短,极端情况下疲劳寿命甚至降为正常寿命的 3.3%。研究成果将为岷岷中桥后期维护管理提供技术支持,同时为其他同类型桥梁的疲劳寿命评估提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 赵国藩. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
ZHAO Guo-fan. The Advanced Reinforced Concrete Structures[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [2] 王春生, 翟慕赛, 付炳宁, 等. 混凝土梁桥疲劳安全监测与评估[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2013, 32(6): 1128-1132.
WANG Chun-sheng, ZHAI Mu-sai, FU Bing-ning, et al. Fatigue Safety Monitoring and Evaluation of Concrete Girder Bridges[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2013, 32(6): 1128-1132.
- [3] WANG C S, LI G, DONG X H, et al. Fatigue Life Evaluation of Existing Highway Reinforced Concrete Bridges[C]//FRANGOPOL D M, SAUSE R, KUSKO C S. Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Boca Raton: The Chemical Rubber Company Press, 2010.

- [4] GUAN G D, WANG C S, LI G, et al. Study on Fatigue Load and Fatigue Life Estimation for Concrete Bridges[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243-249: 1536-1539.
- [5] WANG C S, LI G, GUAN G D, et al. Fatigue Truck Load and Fatigue Life Evaluation of Concrete Bridges for Shaanxi Province [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260: 1299-1302.
- [6] RAO C, FRANTZ G C. Fatigue Tests of 27-year-old Prestressed Concrete Bridge Box Beams[J]. PCI Journal, 1996, 41(5): 74-83.
- [7] TILLY G P. Durability of Concrete Bridges[J]. Highways and Transportation, 1988, 35(2): 10-19.
- [8] SCHLAFLI M, BRUHWILER E. Fatigue of Existing Reinforced Concrete Bridge Deck Slabs[J]. Engineering Structures, 1998, 20(11): 991-998.
- [9] 朱劲松, 朱先存. 钢筋混凝土桥梁疲劳累积损伤失效过程简化分析方法[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 107-114, 121.
ZHU Jin-song, ZHU Xian-cun. Study on Simplified Method for the Analysis of Fatigue Failure Process of RC Bridges[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(5): 107-114, 121.
- [10] 朱劲松, 闫广鹏. 钢筋混凝土桥面板疲劳数值分析方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 59-66.
ZHU Jin-song, YAN Guang-peng. Method of Numerical Simulation for Reinforced Concrete Bridge Slabs Under Fatigue Load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 59-66.
- [11] 王春生, 周江, 吴全友, 等. 既有混凝土桥梁疲劳寿命与使用安全评估[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 101-107.
WANG Chun-sheng, ZHOU Jiang, WU Quan-you, et al. Fatigue Life and Service Safety Assessment for Existing Concrete Bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 101-107.
- [12] 王春生, 吴全友, 缪文辉. 钢筋混凝土桥面板疲劳寿命评估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(2): 50-55, 62.
WANG Chun-sheng, WU Quan-you, MIAO Wen-hui. Fatigue Life Estimation for Reinforced Concrete Bridge Deck[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(2): 50-55, 62.
- [13] MINER M A. Cumulative Damage in Fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945(12): 159-164.
- [14] ECCS. Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures[M]. Brussels: ECCS, 1985.
- [15] WALKER E F, AUSTEN I M, HARRISON T C, et al. Fatigue and Corrosion Fatigue of Reinforcement Bars[R]. Cardiff: Cardiff University, 1975.