

钢筋混凝土桥梁疲劳荷载模型及应力水平研究

苗元耀¹, 牛荻涛^{1,2}, 程雪莉²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 省部共建西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 随着公路交通量的日益增加, 车辆荷载的循环累积作用引起桥梁结构疲劳损伤, 其安全运营与耐久性能受到严重影响, 公路桥梁疲劳损伤问题受到普遍关注。目前, 我国公路桥梁规范尚无疲劳车辆荷载模型的取值相关规定, 通过国内外公路桥梁疲劳车辆荷载模型研究分析其适用性。针对量大面广的中小跨径混凝土桥梁选取三座典型桥梁, 对其进行设计荷载、标准疲劳车荷载和实际调查运营荷载作用下的桥梁荷载水平进行计算与分析, 提出混凝土桥梁设计荷载应力水平为 0.5, 实际运营调查荷载应力水平为 0.55, 可为既有公路钢筋混凝土桥梁疲劳性能的准确评估提供一定的理论依据与技术参考。

关键词: 公路桥梁; 混凝土; 疲劳; 荷载; 应力水平

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)04-0500-06

Study on fatigue load model and stress level of the reinforced concrete bridge

MIAO Yuanyao¹, NIU Ditao^{1,2}, CHENG Xueli²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China)

Abstract: With the increasing of highway traffic volume, the cyclic accumulation of vehicle loads causes fatigue damage to the bridge structure, and its safe operation and durability are seriously affected. More and more attention has been paid to the fatigue damage of highway. At present, China's highway bridge code has no relevant provisions on the value of fatigue vehicle load model, to pass through the domestic and foreign highway bridge fatigue vehicle load model research and analysis of its applicability. Three typical bridges are selected for medium and small span concrete bridges. The design load and stress level of the actual investigation operation load are calculated and analyzed. It is proposed that the design load stress level of the concrete bridge is 0.5 and the actual operation investigation load stress level is 0.55, which can provide a theoretical basis for the accurate evaluation of the fatigue performance of the existing highway reinforced concrete bridges.

Key words: highway bridges; concrete; fatigue; load; stress level

随着社会经济不断发展, 公路桥梁车辆荷载快速增加, 结构疲劳损伤日益凸显, 钢筋混凝土桥梁的疲劳性能研究已成为工程界高度关注的热点问题。在我国, 中小跨径混凝土桥梁占据桥梁总量的比例较大, 公路桥梁中等跨度混凝土桥梁占 21.97%, 小桥占 69%, 因此, 针对量大面广的中小跨径公路钢筋混凝土桥梁的疲劳损伤问题进行研究值得广泛关注^[1-6]。中小跨径桥梁与大跨径桥梁相比较, 其活荷载在总荷载效应中所占的比例较大, 且实际运营中超载现象屡禁不止, 车辆荷载引起的桥梁结构或构件疲劳效应也进一步凸显, 严重时会出现重大交通事故, 导致人员伤

亡及财产损失^[7]。

目前现行的公路钢筋混凝土桥梁设计相关规范中, 我国尚无统一、明确的疲劳荷载模型相关内容, 使我国公路桥梁的设计理论研究发展受到一定的影响, 与此同时交通量及公路里程不断增加, 已严重滞后于国外的理论研究与实际应用。由此可见, 系统的开展对国内外钢筋混凝土桥梁疲劳荷载模型调研, 同时针对各运营桥梁的实际应力水平进行计算与分析, 有助于进一步完善我国在公路钢筋混凝土桥梁疲劳设计相关的理论及应用研究, 对准确掌握实际服役的混凝土桥梁的疲劳技术状况具有重要的工程应用指导价值。

收稿日期: 2017-05-04

修改稿日期: 2018-07-09

基金项目: 交通运输部应用基础研究项目(2013319223110); 西部绿色建筑国家重点实验室培育基地开放研究基金(LSKF201601)

第一作者: 苗元耀(1982—), 男, 博士生, 主要研究混凝土耐久性。E-mail: 121179127@qq.com

1 国内外公路混凝土桥梁车辆疲劳荷载模型简述

在公路桥梁结构分析中，交通车辆及车队荷载是荷载效应中的主要荷载，在结构疲劳计算中交通车辆荷载模型的选取，对桥梁实际运营状况计算分析结果的准确性影响较大。

1.1 国外车辆疲劳荷载模型

在欧洲 EN1991-2^[8] 规范中，车辆荷载会引起

实际服役桥梁结构或构件的疲劳损伤现象产生，其中车辆荷载在运行期间的距离、车辆轴重及尺寸、车辆密集度、车道布置等均会影响车辆荷载谱。疲劳车辆荷载与静荷载布置等情况选取不同。EN1991-2 公路钢筋混凝土桥梁疲劳车辆荷载模型及适用性见表 1 所示。在静力极限状态设计中，车辆荷载通常布置于结构产生最不利效应的位置；而对于疲劳荷载模型，与交通流量实际状况密切相关。

表 1 EN1991-2 中的公路桥梁竖向疲劳车辆荷载模型
Tab. 1 Highway bridge vertical fatigue vehicle load model in EN1991-2

模型类别	形式	适用范围简述
模型 1	集中力(双轴)+均布荷载	(1)模型 1~3 一般多采用应力幅，是欧洲主要干道的典型重车情况；
模型 2	简化重车车队模型	(2)模型 1~3 适用于确定桥上可能布置的荷载产生的应力最大值、最小值；
模型 3	四轴模型	(3)模型 3~5 不能用于确定结构寿命是否无限；
模型 4	等效标准车队模型(货车)	(4)模型 3~5 可用于桥梁结构疲劳寿命的评估；
模型 5	基于实际交通量调查的模型	(5)模型 4~5 适用于货车荷载在桥梁上应力谱的研究。

美国 AASHTO 规范^[9] 在疲劳极限状态设计中，对车辆模型进行如下定义，图 1 所示。所采用的疲劳车辆荷载模型为静力单车荷载模型，该模型考虑了车辆荷载的动力效应。桥梁结构在疲劳车辆应力水平作用下，通过记录不同循环次数所对应的应力幅进行疲劳计算与分析。

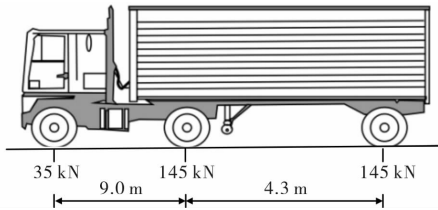


图 1 美国 AASHTO 标准疲劳车辆模型

Fig. 1 American AASHTO standard fatigue vehicle model

1.2 国内车辆荷载模型

郑蕊、李兆霞^[10] 基于桥梁结构健康监测得到时程曲线，该曲线为车辆荷载应变时程曲线；同时，采用雨流计数统计方法，得出车辆荷载对应的荷载谱与应力幅。采用 BS5400 相关标准分类方法，建立适用于公路桥梁疲劳寿命可靠性评估的概率模型。童乐为、沈祖炎等^[11] 通过对上海市内环线公路混凝土桥梁车辆荷载进行数据调研、梳理 18 类实际运营车辆情况，通过进一步简化等效累积损伤原理，最终得出比较实用的 6 类车辆模型谱，为国内开展同类研究提供了一定的参考价值。

《公路桥涵通用设计规范》(JTG D60-2004)^[12]

和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004)^[13] 相关条款中尚无公路钢筋混凝土桥梁疲劳荷载模型、荷载水平、应力幅等内容。文献[14]通过对我国 6 省区 8 条典型高速公路桥梁调查，数据实测与分析，提出基于车队形式的标准疲劳车辆模型，如图 2 所示。

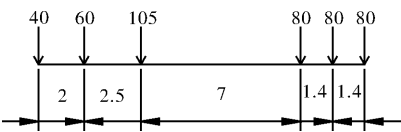


图 2 标准疲劳车辆模型(单位: kN · m)

Fig. 2 Standard fatigue vehicle model (unit: kN · m)

由于荷载模式不同，欧洲规范 EN1-2 分别规定了各个车道的汽车荷载基本代表值，其中第一道汽车荷载标准值效应大于我国规范，差值随跨径增大而逐步缩小；随着跨径的进一步增加，其第二道汽车荷载标准值效应由大于我国规范变为小于我国规范；欧洲规范 EN1-2 第三、第四道汽车荷载标准值效应均小于我国规范。

我国规范与美国 AASHTO 规范的汽车荷载基本相似，参考 AASHTO 规范中单车道汽车荷载标准值效应，能够更直观的评估我国规范的汽车荷载水平。

2 公路钢筋混凝土桥梁内力分析

我国中小跨径混凝土桥梁量大面广，因此，在研究中需选取具有代表性的桥梁，对其分别进

行设计荷载、实际运营荷载及考虑超载情况下所处的荷载水平、应力幅等进行验算与分析,对实际处于服役钢筋混凝土桥梁的疲劳技术状况、寿命极限等精准评估具有重要意义。

本次研究中,以 G101 正在服役的三座不同跨径重型中小跨径桥梁,三路居桥、京榆上线 11+460.02 桥、甘棠大桥为代表,分别选取汽-超 20、挂-120,汽-20,挂-100 和汽-15、挂-80 三种具有代表性荷载的汽车模型,对处于服役期的三座中小跨径钢筋混凝土桥梁的应力水平进行计算与分析,其研究结果与国内外规范和相关成果进一步比较分析,以实现既对既有公路混凝土桥梁疲劳性能的准确评估。

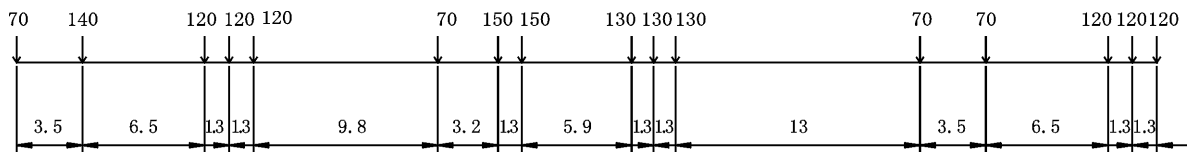


图 3 实际调查车辆荷载安全鉴定模型(单位: kN · m)

Fig. 3 Actual investigation vehicle load model considering overweight (unit: kN · m)

在研究报告中^[14]选择了安全鉴定 V 荷载模型,该车辆荷载模型考虑了在重载交通线运营过程中车辆通行与运输期间,桥梁受荷的最不利状态.采用五轴标准车(超额定载重)+一辆六轴重车(超额定载重)车队模型.该模型对应于跨径 16~20 m 的桥梁弯矩效应与公路 I 级弯矩效应比约 1.2,根据《标准》2003 版公路 I 级汽车荷载标准值计算效应值,将该效应比置于该范围内,如图 4 所示。

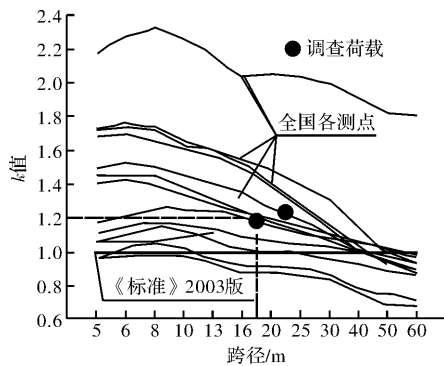


图 4 安全鉴定荷载模型 V 效应所处位置

Fig. 4 Security identification of load model V effect location

由图 4 可知,该调查荷载模型效应比处于调查数据区域中部,出现概率较高,因此可反映桥梁实际运营交通量产生的效应值,具有代表性和统计意义。

2.1.2 荷载组合

车辆荷载所产生的应力幅主要由桥梁结构自重及实际运营车辆的荷载作用引起,目前对于服

2.1 荷载模型及计算参数的选取

在桥梁结构或构件应力水平计算与分析过程中,车辆活荷载模型通常需要考虑公路 I 级设计荷载、标准疲劳车荷载和实际调查荷载三种,其中实际调查荷载模型如下:

2.1.1 荷载模型

服役桥梁结构能否满足当前及未来交通流量的发展需求,需对桥梁结构实际运营应力水平进行评估.2012 年,交通运输部公路科学研究所对国内 8 省区 12 条国道的主要车型、载重、车道分布、车辆间距等进行了大量的实地数据查阅、监测、计算、总结分析,最终提出了基于实际调查车辆荷载的安全鉴定荷载模型^[14],见图 3 所示。

役的大量中小跨径混凝土钢筋桥梁而言,荷载组合主要考虑汽车荷载与恒荷载两种效应组合.综合国内外各主要规范荷载组合方法,由于桥梁结构或主要受力构件的车辆荷载冲击产生的响应比较显著,本研究中采用我国混凝土结构设计规范组合方法,考虑车辆荷载冲击系数 μ ,其中恒荷载、活荷载组合方法见表 2 所示.表中 μ 为冲击系数,参数取值依据《公路桥涵通用设计规范》(JTG D60-2004)相关条款要求及公式(1)、(2)计算。

表 2 计算荷载组合方法及参数

Tab. 2 Calculation method and parameters of load combination

荷载组合项目	名称	组合系数	
		恒荷载	活荷载
组合 1	设计组合	1.2	1.4
组合 2	疲劳组合	1	$1+\mu$

服役桥梁的基频:

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \quad (1)$$

车辆荷载冲击系数:

$$\mu = 0.176 7 \ln f - 0.015 7 \quad (2)$$

2.2 Midas Civil 建模分析

目前,有限单元法可实现复杂结构的建模,已成为钢筋混凝土结构疲劳分析的重要数值计算方法.Midas Civil 模拟计算软件适用于桥梁工程有限元分析,其融合了国内外诸多普适性桥梁设

计规范，是桥梁设计及其应用较为广范的通用设计软件。

2.2.1 单元类型及材料参数

Midas 软件建模中梁采用杆单元模型，自动进行网格划分生成实体模型，本研究中采用 C40 混凝土、三级钢筋材料力学性能参数，计算分析中依据三座服役桥梁的选用材料，同时考虑材料性能的退化，进行相关参数设置。

2.2.2 模型边界约束条件前处理

三路居桥、京榆上线 11+460.02 桥、甘棠大桥三座服役桥梁均为简支桥梁，对其边界约束条件做如下处理：桥梁一端支座节点处采用三个转动自由度和一个沿轴向的线自由度约束力，桥梁另一端支座节点施加三个转动自由度约束力。在模型设置中，在支座节点与桥梁体相应节点处采用刚性连接方式，以保证梁结构在荷载作用过程中的位移和变形连续与协调，其中甘棠大桥 Midas 实体模型如图 5 所示，图 6 为实际调查荷载模型参数设置。

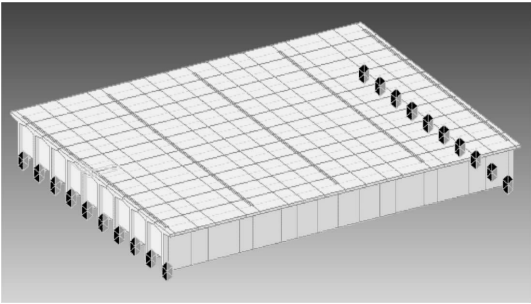


图 5 甘棠大桥 Midas 建模三维图
Fig. 5 3D map of Midas modeling of the Gantang Bridge

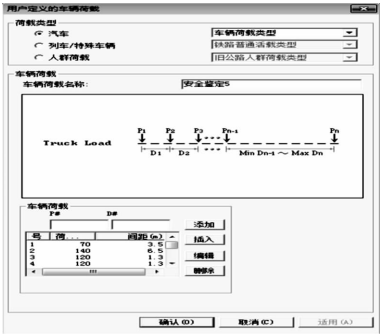


图 6 实际调查荷载模型参数设置
Fig. 6 Load model parameter settings of actual survey

2.2.3 活荷载定义及车道布置

Midas Civil 有限元分析软件中可直接选取公路 I 级车道荷载模型、标准疲劳车辆荷载模型和实际运营调查荷载模型，可在软件车队模型模板中输入，设置轴重、间距等相关参数。车道布置应按照《公路桥涵通用设计规范》(JTG D60-2004)的相关车道数规定和位置布置，其中实际运营调查荷载模型见图 5。

2.3 桥梁结构的内力计算与分析

根据上述车辆活荷载模型，采用 Midas Civil 2012 分析软件进行相关参数设置与有限元分析，三座桥梁在不同的车辆荷载模型下的活荷载所占比例介于 51.5%~67.3%之间。由此可见，在中小跨径钢筋混凝土桥梁中，其活荷载所占比例显著大于大跨径钢筋混凝土桥梁，依据上述表 2 中的荷载组合方式，三路居桥(15 m)、京榆上线 11+460.02 桥(18 m)、甘棠大桥(20 m)三座大桥分别在实际运营车辆荷载组合作用下的弯矩、疲劳应力计算结果见表 3、4 所示。

表 3 桥梁内力计算结果
Tab. 3 Bridge internal force calculation results

		kN · m			
荷载类型	跨 径	恒载弯矩 标准值	活载弯矩 标准值	设计基本组 合最大弯矩	疲劳组合 最大弯矩
设计荷载	15 m	458	379	1 070	942
	18 m	589	501	1 275	1 101
	20 m	776	663	1 849	1 623
标准 疲劳荷载	15 m	458	267	916	795
	18 m	589	293	1 109	946
	20 m	776	431	1 528	1 305
实际调查 运营荷载	15 m	458	440	1 155	1 013
	18 m	589	451	1 402	1 205
	20 m	776	771	2 000	1 761

由表3可知,三座桥梁在车辆设计荷载、标准疲劳荷载和实际调查运营荷载作用下的承载性能均满足相关规范的要求。如按规范中的设计荷载值进行组合计算时,三座桥梁的弯矩值达到设计

荷载承载力的68.3%~90.2%;在疲劳荷载组合验算中,三座桥梁的弯矩值达到结构允许承载力的59.4%~79.6%。

表4 桥梁疲劳荷载应力分析结果

Tab. 4 Load stress analysis results of bridge fatigue

荷载类型	跨径	$\sigma_{s,max}^f/\text{MPa}$	$\sigma_{s,min}^f/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_s^f/\text{MPa}$	$[\Delta\sigma_s^f]/\text{MPa}$	$\sigma_{c,max}^f/\text{MPa}$	$[c_c^f]/\text{MPa}$
荷载	15 m	204.17	99.27	105.22	119	9.33	13.4
	18 m	218.31	116.52	101.18	109	14.66	16.2
	20 m	188.52	90.21	98.65	119	7.58	14.4
标准 疲劳荷载	15 m	173.01	99.27	74.55	103	7.90	14.4
	18 m	189.03	116.52	71.64	94	12.63	16.2
	20 m	152.45	90.21	62.07	100	6.15	14.5
实际调查 运营荷载	15 m	221.21	99.27	122.14	124	10.10	13.4
	18 m	240.11	116.52	124.09	118	16.34	16.2
	20 m	204.32	90.21	114.79	126	8.25	14.4

由表4可得出,三座桥梁在车辆设计荷载、标准疲劳荷载作用下,其计算应力值基本满足规范要求;而在实际调查荷载作用下,三座桥梁的计算分析结果已处于疲劳破坏临界状态,表明服役桥梁结构在实际运营过程中,疲劳问题比较突出,应引起相关部门的足够重视。

3 钢筋混凝土桥梁疲劳应力水平分析结果

在疲劳验算分析过程中,参照我国《混凝土结构设计规范》(2015年版)(GB 50010-2010)相关条款。在标准疲劳车辆荷载作用下,三座桥梁的主要受力钢筋计算应力幅值均较小,疲劳荷载效应不显著,服役桥梁结构或构件的安全储备尚有大幅度余量;但三座桥梁在车辆设计荷载和实际运营调查荷载作用下桥梁结构主要受力钢筋的应力幅值均已接近或超过规范限值要求。综上可见,三座典型中小跨径钢筋混凝土桥梁在设计车辆荷载、标准疲劳荷载作用下的疲劳验算结果满足相关规范要求;在对实际服役桥梁结构的运营调查结果表明,车辆荷载作用下桥梁结构或构件疲劳应力已处于规范允许临界状态,如考虑车辆运营超载、交通量日益增加和桥梁结构服役过程中的环境恶化、材料性能进一步退化等众多因素的共同影响,实际服役运营的钢筋混凝土中小跨径桥梁的疲劳寿命将显著降低。

公路钢筋混凝土桥梁分别在车辆设计荷载、标准疲劳荷载和实际运营调查车辆荷载三种荷载

水平作用下,其主要受力钢筋的计算应力幅值约为100 MPa、100 MPa、120 MPa。依据文献[15]研究成果中提出的S-N疲劳寿命曲线,如式(3)、(4)式所示,在车辆设计荷载作用下的疲劳寿命分别为265万次、234万次;在实际运营调查车辆荷载作用下的疲劳寿命为147万次和105万次。现以《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)中的200万次为疲劳寿命极限循环次数进行计算分析,三座服役桥梁结构后构件在车辆设计荷载、标准疲劳荷载应力水平下均满足疲劳验算相关规范要求,而在实际运营的调查车辆荷载水平作用下均临近或超过疲劳验算相关规范限值要求。

$$\lg N = 12.9047 - 3.2402 \lg \Delta\sigma \quad (3)$$

$$\lg N = 15.1348 - 4.3827 \lg \Delta\sigma \quad (4)$$

式中: N 为疲劳循环次数; $\Delta\sigma$ 为应力幅。

根据(3)、(4)式研究成果,结合本次调查、计算分析结果,主要受力钢筋取三级钢,在车辆设计荷载和实际运营调查荷载作用下,中小跨径钢筋混凝土桥梁的应力水平可取为0.5和0.55,其中桥梁恒载的应力水平可取为0.25。如综合考虑实际中小跨径桥梁服役环境恶化、使用时间、交通量大幅度增加、材料性能退化等共同作用影响因素,中小跨径钢筋混凝土桥梁的应力水平可取为0.5、0.55、0.60。

4 结论

通过对国内外公路钢筋混凝土桥梁疲劳车辆荷载模型的研究,分析其在国内外相关规范中的

适用性. 针对量大面广的中小跨径混凝土桥梁选取三座典型桥梁, 对其进行设计荷载和实际调查运营荷载所处的应力水平进行疲劳分析, 得出如下结论:

(1)通过对国内外公路桥梁所采用的疲劳车辆荷载模型总结分析, 提出车辆设计荷载、标准疲劳荷载和实际调查运营荷载三种典型车辆荷载模型, 并对其适用性进行详细阐述.

(2)对处于重载交通线的三座典型中小跨径桥梁进行内力计算分析, 其活荷载所占比例为50.1%~66.9%, 车辆荷载在中小跨径桥梁中产生的效应比较高.

(3)三座桥梁在车辆设计荷载、标准疲劳荷载作用下, 其计算应力值基本满足规范要求; 而在实际调查荷载作用下, 三座桥梁的计算分析结果已处于疲劳破坏临界状态, 表明服役桥梁结构在实际运营过程中的疲劳损伤问题应引起重视.

(4)综合考虑实际中小跨径桥梁服役环境恶化、使用时间、交通量大幅度增加、材料性能退化等共同作用影响因素, 中小跨径钢筋混凝土桥梁的应力水平可取为0.5、0.55、0.60. 后续研究中应建立相关动态数据库, 以进一步实现对既有公路混凝土桥梁疲劳性能的准确评估.

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国交通运输部. “十一五”西部交通科技发展规划[Z]. 北京:交通部, 2007: 2-4.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. The 11th five-year plan for the development of western[Z]. Beijing: MOT, 2007: 2-4.
- [2] BHARTIYA Rahul. Fatigue analysis of concrete structures-introduction to fatigue of concrete [M]. Deutschland: VDM Verlag Dr. Muller, 2010: 5-15.
- [3] CEDERQUIST SC. Motor speedway bridge collapse caused by corrosion[J]. Materials Performance, 2000, 39(7): 18-19.
- [4] PARIS P C. A rational analytic theory of fatigue[J]. Tread in Eng., 1961(1): 9-14.
- [5] FORMAN R G. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structure[J]. Journal of basic engineering, 1967, D, 89, 459-464.
- [6] SAIN T, KISHEN J M C. Fracture stability and residual strength assessment of reinforced concrete beams [J]. Materials and Structures, 2008, 41: 1451-1463.
- [7] 周履. 桥梁耐久性发展的历史与现状[J]. 桥梁建设, 2004: 3-5.

- ZHOU Lü. History and current status of bridge durability development [J]. Bridge construction, 2004: 3-5.
- [8] CEN E. Eurocode 1: Actions on structures Part 2: Traffic loads on bridges, 2003[S]. Brussels: CEN E, 9-12.
- [9] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S]. Washington, DC: AASHTO, 2012: 4-10.
- [10] 郑蕊, 李兆霞. 基于结构健康监测系统的桥梁疲劳寿命可靠性评估[J]. 东南大学学报, 2001: 71-73.
ZHENG Rui, LI Zhaoxia. Reliability Assessment of Bridge Fatigue Life Based on Structural Health Monitoring System[J]. Journal of Southeast University University, 2001: 71-73.
- [11] 童乐为, 沈祖炎. 城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5): 20-26.
TONG Lewei, SHEN Zuyan. Fatigue load spectrum of urban road bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5): 20-26.
- [12] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵通用设计规范: JTG D60-2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 7-13.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. General Design Specification for Highway Bridges and Culverts (JTG D60-2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004: 7-13.
- [13] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62-2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 30-51.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design Specification for Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts (JTG D62-2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004: 30-51.
- [14] 中交公路规划设计院有限公司. 桥梁设计荷载与安全鉴定荷载的研究项目研究报告[R]. 北京: 中交公路规划设计院有限公司, 2012: 20-50.
China Communications Highway Planning and Design Institute Co., Ltd. Research project report on bridge design load and safety identification load [R]. Beijing: China Communications Highway Planning and Design Institute Co., Ltd., 2012: 20-50.
- [15] 朱红兵. 公路钢筋混凝土简支梁桥疲劳试验与剩余寿命预测方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 4-15.
ZHU Hongbing. Research on fatigue test and residual life prediction method of highway reinforced concrete simply supported beam bridge[D]. Central South University, 2011: 4-15.

(编辑 桂智刚)