

文章编号:1001-7372(2017)04-0072-07

基于疲劳寿命的钢筋混凝土桥梁 限载取值分析方法

邓露, 毕涛, 何维, 王维

(湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了确定钢筋混凝土桥梁限载的合理取值, 针对钢筋混凝土桥梁的疲劳性能, 考虑随机车流参数、超限车违规率等因素的影响, 进行了基于疲劳寿命的桥梁限载取值分析方法研究, 提出了一种基于 $S-N$ 曲线和 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论的桥梁限载取值分析方法。首先基于交通荷载资料和蒙特卡罗法进行随机车流模拟, 根据桥梁限载试算值和超限车违规率剔除超限车得到修正的模拟随机车流; 然后通过雨流计数法得到应力幅谱, 根据 $S-N$ 曲线和疲劳损伤准则计算桥梁疲劳寿命; 最后取能使桥梁疲劳寿命达到期望值的限载试算值作为桥梁限载值。以某地区的交通荷载资料及跨径为 20 m 的简支 T 梁桥为例, 确定了在不同日均交通量和超限车违规率下能使桥梁疲劳寿命达到期望使用年限的桥梁限载值。研究结果表明: 日均交通量和超限车违规率均显著影响桥梁的疲劳寿命及桥梁限载取值, 日均交通量越大, 桥梁的疲劳寿命越短; 当日均交通量小于 6 000 veh 时, 在不同的桥梁限载值下桥梁的疲劳寿命均大于期望使用年限, 当日均交通量大于 8 000 veh 时, 桥梁的疲劳寿命仅在特定桥梁限载值下才能达到期望使用年限; 超限车违规率越大, 通过调整桥梁限载值来提高桥梁疲劳寿命的效果越不明显, 当超限车违规率较小时, 桥梁的疲劳寿命随限载试算值的减小而大幅增长, 当超限车违规率较大时, 桥梁的疲劳寿命随桥梁限载试算值的减小, 增幅并不明显。

关键词: 桥梁工程; 桥梁限载; 线性累积损伤理论; 疲劳寿命; $S-N$ 曲线; 超限车违规率

中图分类号: U441.4 **文献标志码:** A

Vehicle Weight Limit Analysis Method for Reinforced Concrete Bridges Based on Fatigue Life

DENG Lu, BI Tao, HE Wei, WANG Wei

(Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University,
Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: To determine the reasonable weight limit for reinforced concrete bridges, a vehicle weight limit analysis method based on fatigue life was conducted with the consideration of the effects of the random traffic flow parameters and overload violation rate, in view of fatigue performance of reinforced concrete bridges. The vehicle weight limit analysis method for reinforced concrete bridges based on the $S-N$ curve and Palmgren-Miner linear cumulative damage rule was proposed. The random traffic flow was firstly simulated according to the collected traffic data and Monte Carlo method, and then calibrated using the initial value of weight limit and

收稿日期:2016-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51478176);湖南省杰出青年基金项目(14JJ1014)

作者简介:邓露(1984-),男,湖南娄底人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dengl@hnu.edu.cn.

overload violation rates to exclude overweight trucks. The traffic-induced stress spectrum of the bridge was obtained by rain flow counting algorithm and fatigue life was calculated based on the S-N curve and Palmgren-Miner rule. The procedure was iterated until the value of weight limit was able to achieve the desired fatigue life of the bridge and thus deemed it as the final reasonable value. Taken the traffic data of a specific area and a typical simply-supported T-beam bridge with span length of 20 m as examples, reasonable weight limits with fatigue life of bridges reaching expected working life were determined for different average daily traffic volumes (ADTVs) and different violation rates. The results show that both the ADTV and the overload violation rate can significantly affect the fatigue life of the bridge components and the vehicle weight limit on bridge. The higher the ADTV is, the shorter the bridge fatigue life can be. Specifically, the desired bridge fatigue life is much longer than expected working life under different weight limits when the ADTV is less than 6 000. However, the expected working life can only be achieved under certain weight limits when the ADTV is larger than 8 000. The higher the violation rate is, the less effective the method of setting vehicle weight limit is to prolong the bridge fatigue life. With small violation rate, the bridge fatigue life increases rapidly with the decrease of the initial weight limit value. However, with large violation rate, limited increment of bridge fatigue life can be achieved with the decrease of the initial weight limit value.

Key words: bridge engineering; vehicle weight limit on bridge; linear cumulative damage rule; fatigue life; S-N curve; overload violation rate

0 引言

近年来随着中国经济的高速发展,公路交通运输量和车辆荷载均逐年增大,各地车辆超载超限现象普遍^[1-2]。为了保障在役桥梁的运营安全,中国多地投入了大量财力物力对在役桥梁进行限载,如 2009 年青岛市为桥梁增设了 239 块限载标志牌,2011 年浙江省对省内所有普通国、省道上的 3 894 座桥梁设置了限载标志牌。

国内外学者对桥梁限载问题开展了广泛的研究。王松根等^[2]从设计可靠水平与最低容许可靠水平 2 个层面提出了一种基于结构可靠度理论的典型车辆限载取值分析方法。Ghosn 等^[3-4]应用结构可靠度理论分析了美国桥梁限载公式的可靠性,提出了能达到目标可靠水准的桥梁限载建议公式。宗雪梅等^[5]利用等效荷载法计算超重车辆荷载模型的限载系数并确定了超重车辆的限载值。王硕^[6]基于可靠度理论采用对实桥交通荷载模型进行修改试算的方法确定了上海市桥梁的限载值,为《上海市城市桥梁限载标准》提供了理论依据。李松辉^[7]提出了一种基于结构可靠度理论,针对中、小跨度桥梁的限载分析模型,分别计算了针对按现行公路桥涵设计规范和 1985 年版规范设计的桥梁典型车辆的限载取值。Asantey 等^[8-9]以一种典型货车为对象研究了

过桥货车违规率对货车的车重分布规律以及对简支梁桥结构可靠度的影响。

以上研究几乎都是从桥梁极限承载力的角度开展桥梁限载研究,并未涉及桥梁的疲劳耐久性。许多研究^[10-12]表明,车辆超限会给桥梁带来不容忽视的疲劳累积损伤,导致桥梁运营寿命缩减、耐久性降低甚至直接垮塌。例如,2007 年美国 I-35 W 密西西比河大桥就因桁架角接板发生疲劳破坏而导致桥梁整体垮塌。实际上,随着桥梁服役年限的增加,因车辆荷载长期反复作用而导致的疲劳破坏问题越来越突出,已成为桥梁失效的主要原因之一^[13]。因此,从疲劳耐久性的角度开展桥梁限载研究具有重要的理论研究价值和现实意义。本文将从疲劳耐久性的角度出发,提出能满足桥梁预期疲劳寿命的桥梁限载取值分析方法。

中国相关法规中指出:超限是指汽车装载超过道路和桥梁的限载值。车辆超限包括几何尺寸超限、轴载质量超限和车货总重超限 3 种情况。本文中的超限特指车货总重超过桥梁限载值。需要强调的是,本文中桥梁限载值基于桥梁疲劳分析而非极限承载力分析确定。

1 桥梁疲劳寿命的评估

桥梁疲劳寿命的评估主要有基于 S-N 曲线和

基于断裂力学的评估方法。基于 $S-N$ 曲线的评估方法计算简单且便于工程应用,是目前各国设计规范主要采用的方法。

1.1 钢筋的 $S-N$ 曲线

研究表明^[13-15],钢筋混凝土桥梁在车辆荷载作用下混凝土的疲劳损伤远小于钢筋的疲劳损伤,因此钢筋混凝土桥梁的疲劳寿命主要受钢筋控制。对于钢筋的 $S-N$ 曲线,中国铁道科学研究院、欧洲钢结构协会(ECCS)和日本土木工程师学会(JSCE)等多个研究机构和协会都有各自的研究成果。经对比研究,选用了中国铁道科学研究院曾志斌等^[16]提出的钢筋 $S-N$ 曲线进行桥梁疲劳耐久性研究,如图 1 所示。钢筋 $S-N$ 曲线的表达式为

$$\lg(N) = \begin{cases} 12.2769 - 3.0324 \lg(\Delta\sigma) & N < 10^7 \\ 15.7574 - 5.0324 \lg(\Delta\sigma) & N \geq 10^7 \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 为应力循环次数; $\Delta\sigma$ 表示应力幅。

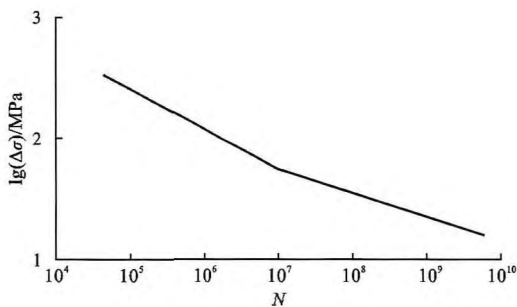


图 1 钢筋的 $S-N$ 曲线

Fig. 1 $S-N$ Curve of Steel Rebar

由图 1 可知:当钢筋应力幅为 93.5 MPa 时,疲劳寿命为 200 万次;当钢筋应力幅为 55 MPa 时,疲劳寿命为 1 000 万次。

1.2 疲劳损伤准则

采用基于 $S-N$ 曲线评估桥梁疲劳寿命的方法,还需选取合适的疲劳损伤准则。疲劳损伤机理复杂,国内外学者提出了包括线性累积损伤理论、修正的线性累积损伤理论、非线性累积损伤理论和概率疲劳累积损伤理论在内的多种理论^[17]。工程实际中应用最广泛的为 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论(简称 P-M 准则)。P-M 准则使用疲劳损伤累积值 D 评估构件疲劳损伤程度,即

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

式中: n_i 为在第 i 级等幅疲劳荷载作用下的循环次数; N_i 为在第 i 级等幅疲劳荷载作用下构件破坏所需的循环次数; D_i 为在第 i 级等幅疲劳荷载作用下的疲劳损伤累积值。一般认为,当 $D \geq 1$ 时构件发

生疲劳破坏。

计算桥梁疲劳寿命的步骤为:①通过雨流计数法^[18]将在随机车流荷载作用下桥梁构件的应力历程转化为应力幅谱;②将应力幅谱按数值大小划分为 k 个等距应力幅区间,统计各应力幅区间的应力幅个数,分别用 n_1, n_2, \dots, n_k 表示;③根据式(1)、(2)计算桥梁疲劳损伤度,从而计算获得桥梁的疲劳寿命。

2 桥梁限载分析方法

2.1 疲劳寿命

在桥梁的设计使用寿命期间,桥梁的重要构件(如主梁等)均应满足疲劳耐久性的要求。因此,对新建桥梁进行限载分析时,可将桥梁设计使用年限作为确定桥梁限载取值的依据;对既有桥梁,则应根据实际情况来确定一个合理的期望疲劳寿命作为桥梁限载取值的依据。中国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)^[19]规定了桥涵主体结构的设计使用年限,如表 1 所示。

表 1 桥涵设计使用年限

Tab. 1 Design Working Lives of Bridges and Culverts 年

公路等级	不同主体结构的设计使用年限		
	特大桥、大桥	中桥	小桥、涵洞
高速、一级公路	100	100	50
二、三级公路	100	50	30
四级公路	100	50	30

2.2 超限车违规率

目前,国内外采用的桥梁限载方式主要有 3 种:①统一限制总重;②分车型限制总重;③分车型限制总重和轴重^[6]。本文参考中国目前唯一的城市桥梁限载标准《上海城市桥梁限载标准》(SZ-C-E02-2007)采用统一限制总重的限载方式。实践中,并非所有的驾驶人都会严格遵守桥梁限载规定。为了考察超限车违规过桥对桥梁疲劳寿命的影响,以桥梁限载取值作为判断车辆是否超限的基准,定义超限车违规率^[8] I_{VR} 为

$$I_{VR} = N_{VR} / N_{all} \quad (3)$$

式中: N_{VR} 为交通车流中违反桥梁限载规定行驶车辆过桥的超限车数量; N_{all} 为交通车流中超限车总数。

2.3 确定桥梁限载值的流程

以满足桥梁的期望疲劳寿命为目标,通过对模拟的随机车流进行修改试算来确定桥梁的限载取值。首先,基于交通荷载资料,基于蒙特卡罗法(简称 M-C 法)进行随机车流模拟。然后,根据桥梁限

载试算值和超限车违规率剔除超限车得到修正的模拟随机车流,并将其加载到桥梁关键构件关键截面的影响线上得到其应力历程。接着,通过雨流计数法得到应力幅谱,再根据 $S-N$ 曲线和疲劳损伤准则计算桥梁疲劳寿命。最后,取能使桥梁疲劳寿命达

到期望值的限载试算值作为桥梁限载值。基本流程如图 2 所示,其中 $R(1,1)$ 为 MATLAB 库函数,用来生成服从区间 $(0,1)$ 上均匀分布的随机数。超限车是否过桥通过不等式“ $R(1,1) \leq I_{VR}$ ”判定,若不等式成立,表示该超限车过桥;反之,则不过桥。

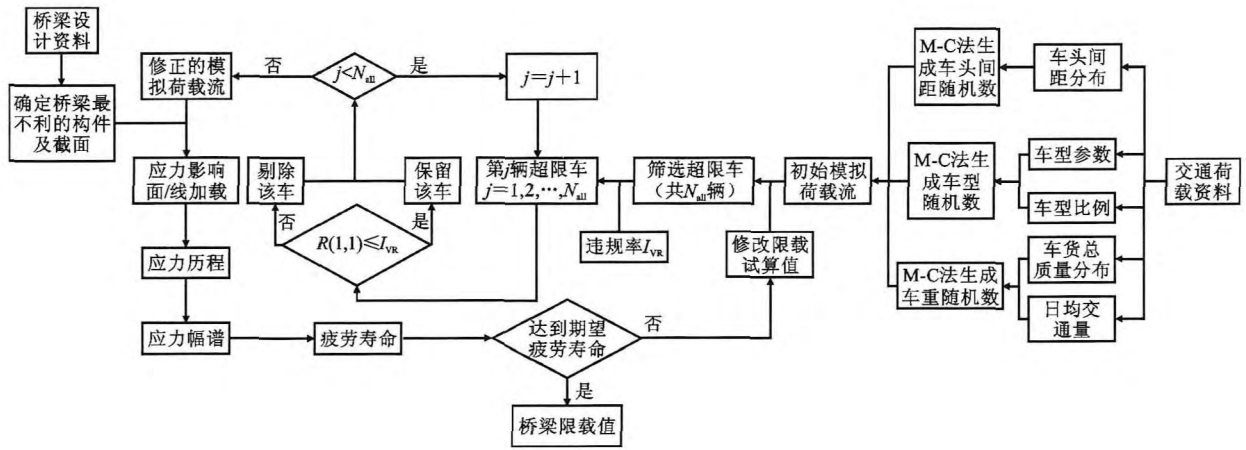


图 2 确定桥梁限载值的基本流程

Fig. 2 Procedure for Determining Vehicle Weight Limit of Bridges

3 算例分析

3.1 桥梁模型

为了更好地说明提出的桥梁限载分析方法,选取 1 座典型的钢筋混凝土简支 T 梁桥进行分析。桥梁基本设计资料如下^[20]:标准跨径 20 m,桥梁宽度 7 m(行车道)+2×1.0 m(人行道),主梁混凝土强度等级为 C40,主筋采用 HRB335,梁桥构造形式、T 梁截面尺寸和配筋如图 3 所示。

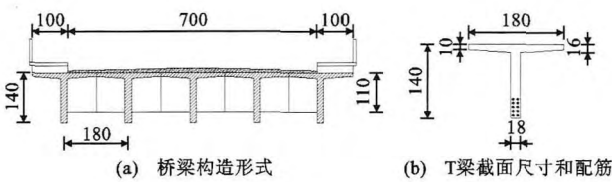


图 3 梁桥构造形式、T 梁截面尺寸和配筋(单位:cm)
Fig. 3 Structure of Bridge and Size and Reinforcement of T-beam Cross Section (Unit: cm)

3.2 交通荷载模型

采用文献[6]中调查统计分析得到的交通数据进行随机车流模拟。车头间距服从对数正态分布,对数均值 $\mu=3.792$,对数标准差 $\sigma=0.6822$ 。模型车辆共 11 种,编号为 A~K。各模型车辆的车货总质量分布类型及相关参数见表 2,表 2 中 p 为双峰正态分布函数中的参数,轴重分配系数及轴距见表 3。

3.3 限载取值分析过程和结果

各国桥梁规范中疲劳的等效冲击系数一般为强

表 2 交通荷载分布参数

Tab. 2 Parameters of Traffic Load Distributions

车型编号	车型描述	分布类型	分布参数	车货总质量/t
A	7 座及以下客车	正态分布	$\mu=1.525, \sigma=0.279$	1.2~2.2
B	8~19 座客车		$\mu=2.604, \sigma=1.219$	1.7~5.7
C	20~39 座客车		$\mu=9.098, \sigma=1.770$	6.0~13.0
D	40 座及以上客车		$\mu=11.497, \sigma=2.735$	8.0~20.0
E	微型货车		$\mu=4.147, \sigma=1.681$	2.4~8.0
F	中型及重型二轴货车	对数正态分布	$\mu=2.150, \sigma=0.435$	4.0~30.0
G	三轴货车	双峰正态分布	$\mu_1=14.850, \sigma_1=3.697$	8.0~60.0
H	三轴拖挂车		$\mu_2=28.710, \sigma_2=5.095$	8.0~60.0
I	四轴拖挂车		$p=0.664$	8.0~60.0
J	五轴拖挂车		$\mu_1=17.220, \sigma_1=2.165$	10.0~80.0
K	六轴拖挂车		$\mu_2=38.070, \sigma_2=15.175$	10.0~80.0
			$p=0.424$	

度设计值的一半^[18]。为简化计算,根据现行桥规计算桥梁动力冲击系数,并取其 1/2 以考虑随机车流荷载作用下的动力效应。计算钢筋应力的步骤为:首先,根据简支梁桥跨中弯矩影响线和横向分布系数获得受力最不利 T 梁的弯矩影响线,利用该弯矩影响线进行随机车辆荷载加载,得到任意时刻该主梁的弯矩时程曲线;然后根据 3 项基本假定(即平截面假定、弹性体假定、受拉区拉应力全部由钢筋承担

表3 模型车辆轴重分配及轴距

Tab. 3 Axle Weight Distributions and Axle Spacing of Model Vehicles

车型 编号	轴重分配 系数(轴 1)	轴 1,2 距离/m	轴重分配 系数(轴 2)	轴 2,3 距离/m	轴重分配 系数(轴 3)	轴 3,4 距离/m	轴重分配 系数(轴 4)	轴 4,5 距离/m	轴重分配 系数(轴 5)	轴 5,6 距离/m	轴重分配 系数(轴 6)
A	0.45	2.5	0.55								
B	0.45	3.3	0.55								
C	0.45	4.7	0.55								
D	0.45	6.0	0.55								
E	0.40	3.3	0.60								
F	0.35	4.0	0.65								
G	0.24	4.0	0.38	1.5	0.38						
H	0.20	3.5	0.40	5.0	0.40						
I	0.16	3.5	0.32	7.0	0.26	1.5	0.26				
J	0.12	3.0	0.21	1.5	0.21	7.5	0.23	1.5	0.23		
K	0.09	3.0	0.20	1.5	0.20	5.5	0.17	1.5	0.17	1.5	0.17

的假定)计算处于正常使用状态的钢筋混凝土梁受拉区钢筋的应力。

图4列出了日均交通量(V_{ADTV})为8 000 veh、桥梁限载值(L_{GVW})为55 t、超限车违规率 $I_{VR}=1$ 的情况下某天的车货总质量分布散点图。图5和图6则分别给出了在此情况下受力最不利T梁的跨中梁底受拉主筋1d的应力历程和应力幅谱。

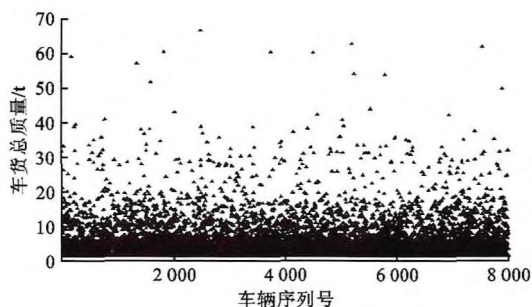


图4 随机车流车货总质量分布散点

Fig. 4 Scatterplots of Gross Mass of Vehicle and Goods in Random Traffic Flows

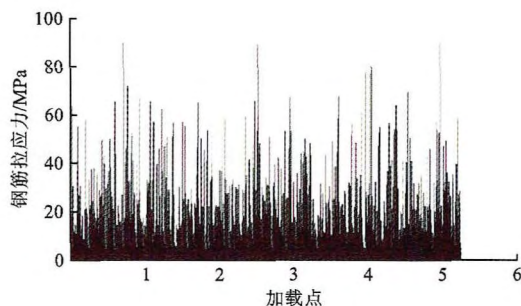


图5 T梁跨中梁底受拉主筋的应力历程

Fig. 5 Stress History of Bottom Tensile Rebar at Mid-span of T-beam

假定算例中的桥梁为一座新建桥梁,以设计使用年限(100年)作为确定其限载取值的依据,计算

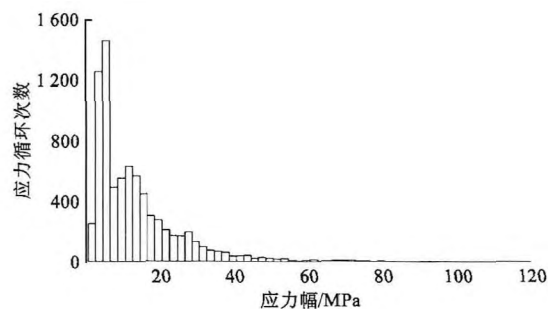


图6 T梁跨中梁底受拉主筋的应力幅谱

Fig. 6 Stress Range Spectrum of Bottom Tensile Rebar at Mid-span of T-beam

了此桥在不同日均交通量、不同限载试算值以及超限车违规率下的疲劳寿命,计算结果如图7所示。由图7可以发现:当超限车违规率较小时,桥梁的疲劳寿命随限载试算值的减小而增长很快;当超限车违规率较大时,桥梁的疲劳寿命随桥梁限载试算值的减小而提高的程度并不明显。这说明超限车违规率对桥梁疲劳寿命的影响十分显著,即超限车违规率越大,通过调整桥梁限载值来提高桥梁疲劳寿命的效果越不显著。

由图7还可以发现,日均交通量对桥梁的疲劳寿命也有很大的影响。当日均交通量小于6 000 veh时,在不同的桥梁限载值和超限车违规率下桥梁的疲劳寿命均在100年以上;而当日均交通量大于8 000 veh时,则需要对桥梁进行限载,桥梁的疲劳寿命才能达到期望使用年限。根据线性插值法获得了在不同日均交通量和超限车违规率下能使桥梁疲劳寿命达到期望值的桥梁限载值,计算结果如表4所示。

3.4 结果说明

值得说明的是,本文算例主要是为了更好地说

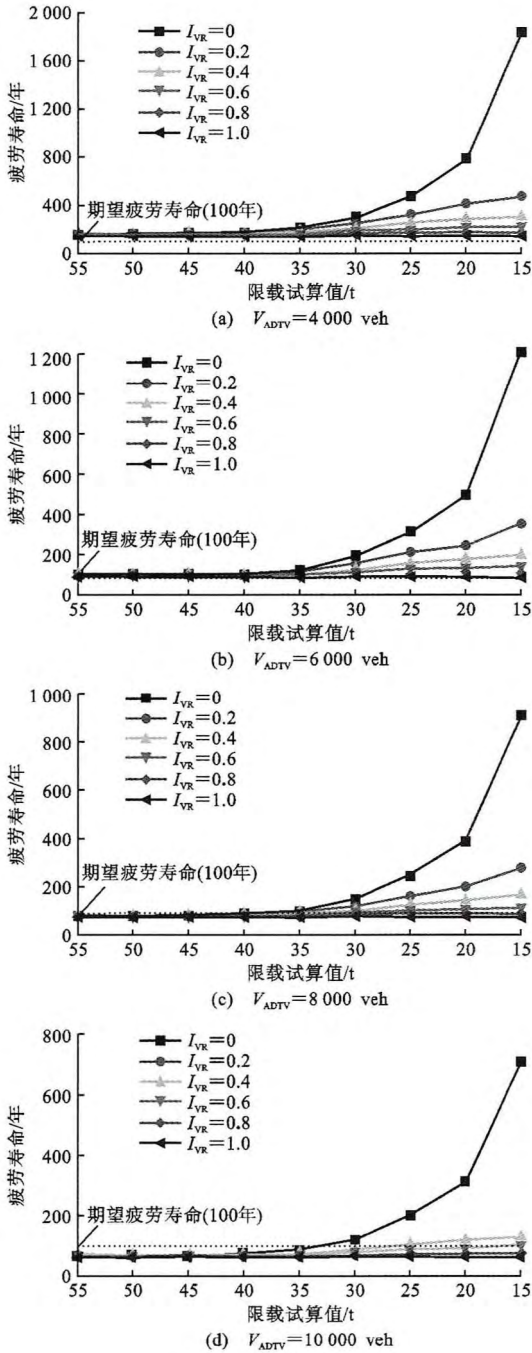


图 7 在不同日均交通量和超限车违规率下, 桥梁疲劳寿命与限载试算值的关系

Fig. 7 Relations Between Proposed Weight Limit and Fatigue Life of Bridge Under Different ADTVs and Overload Violation Rates

明本文提出的桥梁限载分析方法,其结论是在所采用的桥梁模型、交通数据等假设的基础上获得的,并不一定具有广泛的代表性。然而,针对不同设计荷载等级和技术状况的桥梁以及不同的交通数据,同样可以根据该方法进行限载取值分析,所以并没有对此来展开研究。实际应用中,桥梁管理部门

表 4 在不同日均交通量和超限车违规率下能使桥梁疲劳寿命达到期望值的桥梁限载值

Tab. 4 Proposed Vehicle Weight Limits on Bridge for Achieving Expected Bridge Fatigue Life Under Different ADTVs and Overload Violation Rates

V_{ADTV}/veh	不同 I_{VR} 取值下的桥梁限载值/t					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
10 000	32.93	29.99	26.59	15.89	—	—
8 000	36.07	34.98	32.47	28.36	—	—
6 000	*	*	*	*	*	*
4 000	*	*	*	*	*	*

注:“*”表示不限载;“—”表示限载无效。

可根据当地的实际交通荷载资料和桥梁状况,通过调查或合理假定超限车违规率,采用该分析方法并综合考虑路线或路网等因素来确定桥梁的限载值。

4 结 语

(1)提出了一种从桥梁疲劳耐久性的角度出发来确定能满足桥梁预期疲劳寿命限载取值的分析方法,该方法可为桥梁管理部门的桥梁限载管理工作提供一定的理论依据。

(2)基于某地区的交通荷载资料,以跨径为 20 m 的简支 T 梁桥为例,确定了在不同日均交通量和超限车违规率下,能使桥梁疲劳寿命达到期望值的桥梁限载值。分析结果表明:日均交通量和超限车违规率均能够显著影响桥梁的疲劳寿命;日均交通量越大,桥梁的疲劳寿命越短;超限车违规率越大,通过调整桥梁限载值来提高桥梁疲劳寿命的效果越不明显。

(3)提出的桥梁限载分析方法没有考虑交通量增长以及钢筋锈蚀等因素对桥梁疲劳寿命的影响,这些问题有待深入研究。

参考文献:

References:

[1] 徐 冲,孙晓燕,徐建苗,等.我国公路桥梁疲劳车辆模型研究[J].公路工程,2012,37(2):22-25,36.
XU Chong, SUN Xiao-yan, XU Jian-miao, et al. Research on Highway Bridge Fatigue Truck Model in China[J]. Highway Engineering, 2012, 37(2): 22-25, 36.

[2] 王松根,李松辉.公路桥梁限载标准的可靠性分析方法[J].工程力学,2010,27(10):162-166,181.
WANG Song-gen, LI Song-hui. Reliability-based Analysis on the Vehicle Weight Limit of Highway Bridges[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(10): 162-166, 181.

- [3] GHOSN M, MOSES F. Effect of Changing Truck Weight Regulations on U. S. Bridge Network[J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(4): 304-310.
- [4] GHOSN M. Development of Truck Weight Regulations Using Bridge Reliability Model[J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(4): 293-303.
- [5] 宗雪梅, 胡大琳, 高 军. 桥梁超重荷载与限载标准的确定[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(1): 60-65.
ZONG Xue-mei, HU Da-lin, GAO Jun. Vehicle's Overload and Limiting Load Standard for Bridge Safety[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 60-65.
- [6] 王 硕. 桥梁运营荷载状况研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
WANG Shuo. Study on Load Condition for In-service Bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [7] 李松辉. 公路桥梁限载取值的可靠性分析模型研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 83-90.
LI Song-hui. Reliability-based Analytical Model for Determining the Truck Weight Limits on Highway Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 83-90.
- [8] ASANTEY S B A, BARTLETT F M. Impact of Posted Load Limits on Highway Bridge Reliability[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(3): 321-330.
- [9] ASANTEY S B A. Traffic Load Enforcement for Bridge and Highway Management[D]. London: University of Western Ontario, 2002.
- [10] ZHANG J, PENG H, CAI C S. Field Study of Overload Behavior of an Existing Reinforced Concrete Bridge Under Simulated Vehicle Loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(2): 226-237.
- [11] 孙晓燕, 黄承逵, 赵国藩, 等. 超载对桥梁构件受弯性能影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(6): 35-40.
SUN Xiao-yan, HUANG Cheng-kui, ZHAO Guo-fan, et al. Experimental Study of the Influence of Truck Overloads on the Flexural Performance of Bridge Members[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(6): 35-40.
- [12] 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.
- [13] 王春生, 周 江, 吴全有, 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.
- [14] 曹开胜. 钢筋混凝土桥梁疲劳损伤分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
CAO Kai-sheng. Fatigue Damage Analysis of the Reinforced Concrete Bridge[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [15] 孙晓燕, 徐 冲, 王海龙, 等. 用于疲劳可靠性分析的公路桥梁荷载效应研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 80-85.
SUN Xiao-yan, XU Chong, WANG Hai-long, et al. Investigation of Highway Bridge Load Effect for Fatigue Reliability Analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(5): 80-85.
- [16] 曾志斌, 李之榕. 普通混凝土梁用钢筋的疲劳 S-N 曲线研究[J]. 土木工程学报, 1999, 32(5): 10-14.
ZENG Zhi-bin, LI Zhi-rong. Research on Fatigue S-N Curves of Reinforcing Bars in Common Reinforced Concrete Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(5): 10-14.
- [17] 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.
ZHU Hong-bing. Method and Experiment Research on Highway Reinforced Concrete Simply-supported Girder Bridge's Fatigue Residual Service Life Forecast [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [18] 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 Xi-gang. Study of Highway Bridges Vehicle Load [M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [19] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
JTG D60—2015, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts[S].
- [20] 闫志刚, 季文玉, 战家旺. 钢筋混凝土及预应力混凝土简支梁桥结构设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
YAN Zhi-gang, JI Wen-yu, ZHAN Jia-wang. Structure Design of Reinforced Concrete and Prestressed Reinforced Concrete Simply Supported Bridges[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.