

文章编号:1001-7372(2017)03-0040-09

基于美国规范的桥梁疲劳设计优化及应用

邓露¹,王 维¹,何旭辉²

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082; 2. 中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:为了更准确地考虑路面不平整度变化引起的车辆荷载动力效应对桥梁构件疲劳累积损伤的影响,首先研究了钢桥路面不平整度在假定的车辆和环境荷载条件下的劣化过程,得到路面不平整度从一个等级退化到另一个等级过程中通过的车辆数量;然后,分别建立桥梁和车辆的三维模型,根据车辆和桥梁接触点位移和作用力的关系构建车-桥耦合振动方程,并利用模态叠加技术和4阶龙格库塔方法在时域内对其进行求解。通过数值计算研究了根据美国 AASHTO 桥梁规范设计的5座不同跨径 I-型简支钢梁桥的主梁在不同路面不平整度下每辆车通过时承受的应力幅冲击系数和等效应力幅度个数。最后,通过考虑路面劣化过程中过往车辆对桥梁构件疲劳累积损伤的影响,对 AASHTO 规范中疲劳动力冲击系数和应力幅个数这2个直接影响桥梁疲劳寿命的参数进行了优化设计,并探讨了如何借鉴此优化方法来完善中国钢结构桥梁构件的疲劳设计和评估。结果表明:美国 AASHTO 规范里规定的疲劳冲击系数 0.15 适用于跨径大于 23 m 的桥梁,而对短跨桥梁而言,需要采用更大的疲劳冲击系数;当桥梁跨径大于 23 m 时,每辆车通过桥梁时主梁承受的应力幅个数设计值可取 1,小于 23 m 时可根据所提出的应力幅个数设计公式计算确定。该优化方法可用来完善中国钢结构桥梁构件的疲劳设计和评估。

关键词:桥梁工程;疲劳设计参数优化;车-桥耦合模型;应力幅冲击系数;应力幅个数;路面不平整度;疲劳累积损伤

中图分类号:U441.4 文献标志码:A

Optimization and Application of Fatigue Design Based on AASHTO Code

DENG Lu¹, WANG Wei¹, HE Xu-hui²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: In order to more accurately consider the effect of the dynamic vehicle loading caused by the road surface condition (RSC) on the fatigue damage accumulation of bridge components, the deterioration process of the RSC of steel bridges under the given traffic and environmental loading condition was first investigated, and the number of vehicle passages required for the RSC to deteriorate from one class to the next was obtained. Then, the three-dimensional bridge and vehicle models were established respectively. Coupling vibration equations based on the displacement and the interaction force relationships at the contact points of the bridge and vehicle models were solved by the modal superposition technique and the fourth-order Runge-Kutta method in the time domain. In terms of numerical simulations, the impact factors for stress range and the equivalent number of stress cycles, induced by each vehicle passage were obtained under

收稿日期:2016-08-20

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);中南大学创新计划项目(2015CX006)

作者简介:邓露(1984-),男,湖南双峰人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:denglu@hnu.edu.cn.

the different RSCs of the main girder of five I-type simply supported steel girder bridges with different span lengths based on AASHTO bridge design specifications. Finally, impact factors and the number of stress cycles for fatigue design, two parameters directly affecting fatigue lifetime of bridges in AASHTO bridge design specifications were optimized by considering the fatigue damage accumulation effect of dynamic vehicle loading on bridge members during the deterioration process. The procedure of applying the proposed method to improve the Chinese code for fatigue design and evaluation of steel bridges was also discussed. The results show that the impact factor (0.15) specified in AASHTO bridge design specifications for fatigue design is suitable for bridges with span lengths larger than 23m, while for the fatigue design of shorter-span steel bridges, larger impact factor should be adopted. The value of 1 may be adopted as the number of stress cycles for the main girders of steel bridges with span lengths larger than 23 m and the number of stress cycles can be calculated with the proposed equation for bridges with span lengths shorter than 23 m. The proposed approach can be applied to improve the Chinese code for fatigue design and evaluation of steel bridges.

Key words: bridge engineering; optimization of parameter for fatigue design; vehicle-bridge coupled model; impact factor for stress range; number of stress range; RSC; fatigue damage accumulation

0 引 言

基于近年来发生的钢桥疲劳失效案例以及对钢桥疲劳失效问题认识的不断深入,对钢桥进行准确疲劳设计和评估已成为桥梁界的重要任务^[1-2]。美国 AASHTO 桥梁规范^[3]中,对于活荷载引起的疲劳问题,构件需满足如下关系

$$\beta f \leq F_n \quad (1)$$

式中: β 为疲劳荷载组合系数; f 为疲劳设计荷载作用下产生的活荷载应力幅,通过考虑疲劳动力冲击系数(0.15)由静应力幅计算获得; F_n 为名义抗疲劳强度。

对于有限疲劳寿命的构件, F_n 由下式确定,即

$$F_n = \left(\frac{A}{365 \times 75 n_c N_T} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中: A 为疲劳强度系数; n_c 为每辆车通过桥梁时产生的应力幅个数; N_T 为单车道车辆日通行量。

部分学者指出目前 AASHTO 规范在路面不平整度差的情况下可能低估了疲劳设计荷载的动力效应^[4-5],因此 AASHTO 疲劳设计中采用的动力冲击系数 0.15 不能很好地反映路面不平整度变化过程中车辆荷载的动力效应对桥梁构件疲劳寿命的影响。另外,AASHTO 规范中规定的每辆车通过桥梁时产生的应力幅个数也没有考虑车辆荷载动力效应的影响^[6]。

为了考虑桥梁路面不平整度变化过程中车辆荷

载动力效应对桥梁构件疲劳寿命的影响,本文首先研究了钢桥路面不平整度在假定的车辆和环境条件下的变化过程,得到路面不平整度从一个等级退化到另一个等级过程中通过的车辆数量。然后,基于三维车-桥耦合模型,通过数值计算研究了根据 AASHTO 规范设计的 5 座不同跨径的 I-型简支钢梁桥的主梁在不同路面不平整度情况下每辆车通过时承受的应力幅冲击系数和等效力幅个数。最后,通过考虑路面不平整度变化过程中每辆车通过对桥梁构件疲劳累积损伤的影响,优化了 AASHTO 规范中疲劳动力冲击系数和应力幅个数这 2 个直接影响桥梁疲劳寿命的参数。此外,还对如何将本文的优化方法应用到中国钢结构桥梁构件的疲劳设计和评估中进行了探讨。

1 桥梁模型

I-型简支钢梁桥占美国钢桥的比例很大,本文根据美国 AASHTO 规范设计了 5 座不同跨径的 I-型简支钢梁桥作为研究对象,其横断面如图 1 所示,钢纵梁从左至右依次编号为 1~5。采用商业有限元软件 ANSYS 对桥梁进行建模,桥面板和钢纵梁采用 Solid45 单元模拟,横隔板采用 Shell63 单元模拟。假定桥面板和钢纵梁没有相对运动,因此,桥面板与钢纵梁上翼缘采用共单元节点的方式实现刚性连接。桥梁两端的支座约束情况,在其一端约束了竖向、横向和纵向 3 个方向的位移,另一端约束了竖向和横向 2 个方向的位移。5 座桥梁的具体参数

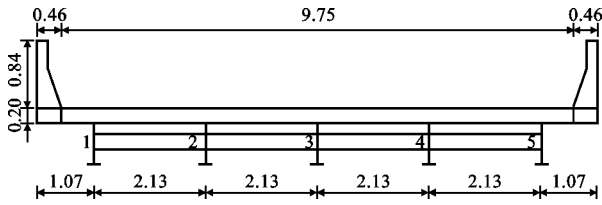


图1 桥梁典型断面(单位:m)

Fig.1 Typical Cross-section of Bridges (Unit: m)

和基频如表1所示。桥梁2的ANSYS有限元模型如图2所示。

表1 5座桥梁的详细参数

Tab.1 Detailed Parameters of Five Bridges

桥梁序号	跨径/m	基频/Hz	纵梁		横隔板数量
			横截面面积/m ²	截面惯性矩/10 ⁻² m ⁴	
1	10.67	12.40	0.018	0.040	3
2	16.76	8.62	0.020	0.109	4
3	22.86	6.10	0.023	0.219	4
4	30.48	4.39	0.026	0.421	5
5	36.58	3.49	0.028	0.641	6

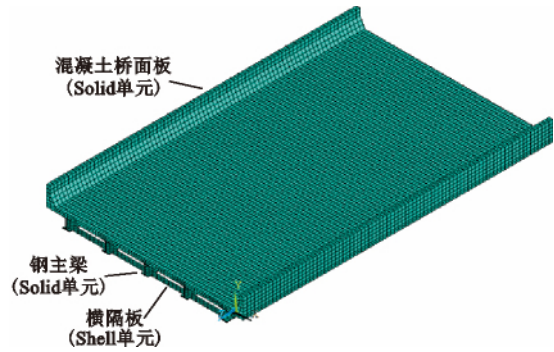


图2 桥梁2的有限元模型

Fig.2 Finite Element Model for Bridge 2

2 车辆模型

本文采用美国AASHTO规范中规定的HS20-44车辆模型作为疲劳荷载车辆模型,如图3所示,其具体参数(几何尺寸、质量分布、悬挂系统等)见表2^[7]。

3 车-桥耦合系统

车辆运动方程可表示为

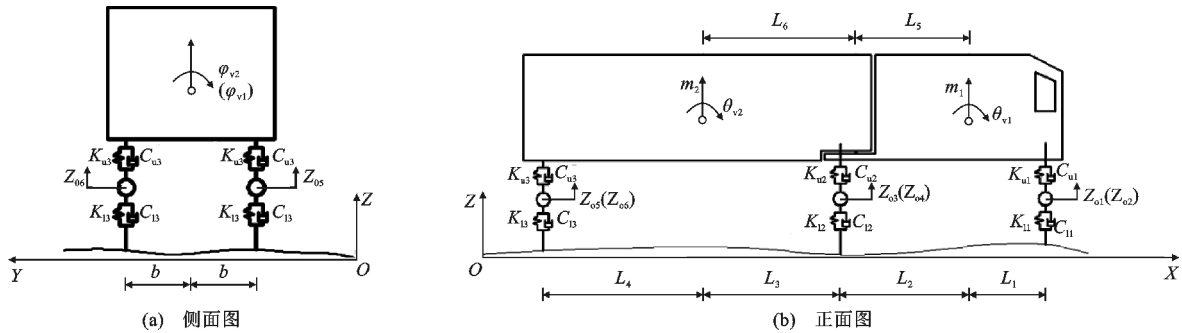


图3 疲劳荷载车辆模型

Fig.3 Model of Fatigue Vehicle Loading

$$M_v \ddot{d}_v + C_v \dot{d}_v + K_v d_v = F_G + F_v \quad (3)$$

式中: M_v 、 C_v 和 K_v 分别为车辆的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; d_v 为车辆的位移矩阵; F_G 为车辆所受重力荷载矩阵; F_v 为桥面对车辆的作用力矩阵。

桥梁的运动方程可表示为

$$M_b \ddot{d}_b + C_b \dot{d}_b + K_b d_b = F_b \quad (4)$$

式中: M_b 、 C_b 和 K_b 分别为桥梁的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; d_b 为桥梁的位移矩阵; F_b 为车辆作用在桥面的作用力矩阵。

根据车-桥接触点的位移关系和接触力关系^[8-9],可以建立如下车-桥耦合方程,即

$$\begin{bmatrix} M_b \\ M_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{d}_b \\ \ddot{d}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b + C_{b-v} & C_{b-v} \\ C_{v-b} & C_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d}_b \\ \dot{d}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b + K_{b-v} & K_{b-v} \\ K_{v-b} & K_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_b \\ d_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{b-r} \\ F_{v-r} + F_G \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: C_{b-b} 、 C_{b-v} 、 C_{v-b} 、 K_{b-b} 、 K_{b-v} 和 K_{v-b} 均为与时间相关的影响车轮和路面接触力的项; F_{b-r} 和 F_{v-r} 均为与时间相关的车轮与路面的接触力。

运用模态叠加法,式(5)可简化为:

$$\begin{bmatrix} I \\ M_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_b \\ \ddot{d}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\omega_j \epsilon_j I + \Phi_b^T C_{b-b} \Phi_b & \Phi_b^T C_{b-v} \\ C_{v-b} \Phi_b & C_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_b \\ \dot{d}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_j^2 I + \Phi_b^T K_{b-b} \Phi_b & \Phi_b^T K_{b-v} \\ K_{v-b} \Phi_b & K_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_b \\ d_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_b^T F_{b-r} \\ F_{v-r} + F_G \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: I 为单位矩阵; Φ_b 和 ξ_b 分别为桥梁振型矩阵和模态标准化系数矩阵; ω_j 为第 j 阶模态的固有频率; ϵ_j 为桥梁第 j 阶模态的阻尼比。

式(6)中只包含了桥梁的模态特性参数和车辆的物理参数,极大降低了方程求解的计算量。本文利用MATLAB编制的程序在时域中采用4阶龙格库塔方法求解式(6)。根据方程求解收敛的需要,时

表 2 疲劳荷载车辆模型主要参数

Tab. 2 Major Parameters of Fatigue Vehicle Loading Model

参数		数值
车体 1	质量 m_1/kg	2 612
	俯仰惯性矩 $\theta_{v1}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 022
	转动惯性矩 $\varphi_{v1}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	8 544
车体 2	质量 m_2/kg	26 113
	俯仰惯性矩 $\theta_{v2}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	33 153
	转动惯性矩 $\varphi_{v2}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	181 216
前轴	轴质量 Z_{o1}/kg	490
	上方弹簧刚度 $K_{u1}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	242 604
	上方阻尼刚度 $C_{u1}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	2 190
	下方弹簧刚度 $K_{l1}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	875 082
	下方阻尼刚度 $C_{l1}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	2 000
中轴	轴质量 Z_{o2}/kg	808
	上方弹簧刚度 $K_{u2}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1 903 172
	上方阻尼刚度 $C_{u2}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	7 882
	下方弹簧刚度 $K_{l2}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	3 503 307
	下方阻尼刚度 $C_{l2}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	2 000
后轴	轴质量 Z_{o3}/kg	653
	上方弹簧刚度 $K_{u3}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1 969 034
	后轴上方阻尼刚度 $C_{u3}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	7 182
	下方弹簧刚度 $K_{l3}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	3 507 429
	下方阻尼刚度 $C_{l3}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	2 000
前轴与车体 1 质心距离 L_1/m		1. 698
中轴与车体 1 质心距离 L_2/m		2. 569
中轴与车体 2 质心距离 L_3/m		4. 452
后轴与车体 2 质心距离 L_4/m		4. 692
车体 1 质心与两车铰点距离 L_5/m		2. 215
车体 2 质心与两车铰点距离 L_6/m		4. 806
半轮距 b/m		1. 1

间步长设置为 0.001 s。由于篇幅所限,模型的详细建立过程和方程求解过程并未给出,相关内容可参见文献[9]。

获得桥梁位移响应后,应力 S 可通过下式求得

$$S = EBd_b \quad (7)$$

式中: E 为单元刚度矩阵; B 为位移-应变函数矩阵。

4 路面不平度变化过程

4.1 路面不平度表达式

路面不平度对车-桥相互作用的影响很大。路面不平度的生成通常考虑成均值为 0 的静态高斯随机过程,其表达式可根据功率谱密度函数通过傅里叶逆变换得到^[10],即

$$r(X) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2\varphi(n_k)\Delta n} \cos(2\pi n_k X + \theta_k) \quad (8)$$

式中: $r(X)$ 为桥面 X 处的不平度; N 为上、下限频率范围的等分数; θ_k 为 $0 \sim 2\pi$ 均匀分布的随机相位角; $\varphi(\cdot)$ 为路面不平度功率谱函数; n_k 为波的个数; Δn 为空间频率增量。

本文中路面不平度功率谱函数采用如下表达式^[11],即

$$\varphi(n) = \varphi(n_0) (n/n_0)^{-2} \quad n_1 < n < n_2 \quad (9)$$

式中: n 为空间频率; n_0 为 $1/(2\pi)$ 的间断频率; $\varphi(n_0)$ 为路面不平度系数,与路面状况有关; n_1, n_2 分别为截止频率的上、下限。

4.2 路面不平度评定指标

路面不平度(Road Surface Condition, RSC)评定指标^[12-13]有:现有路况功能评定(Present Serviceability Rating, PSR)、路面不平度系数(Road-roughness Coefficient, RRC)和国际平整度指数(International Roughness Index, IRI)。国际标准化组织利用路面不平度系数评定路面不平度等级,不同路面不平度等级对应的路面不平度系数的范围如表 3 所示。不少学者研究了路面不平度评定指标之间的关系,本文采用了 Shiyab^[13]提出的路面不平度系数和国际平整度指数值(I_R)的关系式,即

$$\varphi(n_0) = 6.197 2 \times 10^{-9} e^{I_R/0.428 08} + 2 \times 10^{-6} \quad (10)$$

表 3 不同路面不平度等级的路面不平度系数值

Tab. 3 RRC Values for Different Road-roughness Classifications

路面不平度	等级	RRC 范围/($\text{m}^3 \cdot \text{周期}^{-1}$)
非常好	1	$2 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$
好	2	$8 \times 10^{-6} \sim 32 \times 10^{-6}$
一般	3	$32 \times 10^{-6} \sim 128 \times 10^{-6}$
差	4	$128 \times 10^{-6} \sim 512 \times 10^{-6}$
非常差	5	$512 \times 10^{-6} \sim 204 8 \times 10^{-6}$

4.3 路面不平度变化过程研究

在车辆荷载和环境的作用下,路面不平度不断恶化。根据 Paterson^[12]的研究,桥梁投入运营后 IRI 在任意时刻的值可表示为

$$I_R(t) = 1.04e^{\eta t} I_{R0} + 263(1 + S_N)^{-5} C_E^t \quad (11)$$

式中: $I_R(t)$ 为 t 时刻 IRI 的值; I_{R0} 为路面初始不平度系数; t 为桥梁运营年数; η 为环境系数,根据环境条件好坏在区间 $0.01 \sim 0.7$ 之间取值; S_N 为表征桥面强度和厚度的参数; C_E^t 为 t 时刻等效轴重为 80 kN 的轴重数。

将式(11)代入式(10)得到桥梁运营后任意时刻 t 的 RRC 值为

$$\varphi(n_0)_t = 6.197 2 \times 10^{-9} \exp\{[1.04e^{\eta t} I_{R0} + 263(1 + S_N)^{-5} C_E^t]/0.428 08\} + 2 \times 10^{-6} \quad (12)$$

根据式(12)可以得到路面不平整度从一个等级退化到另一个等级过程中通过的车辆数量。根据 Shiyab^[13]的研究,式中参数 S_N 取值 6.19, η 在一般环境中取值 0.1。根据美国 AASHTO 桥梁规范规定,本文中车辆日通行量和单车道分流系数分别取为 2 000 和 0.85,不考虑交通量增加,计算得到单车道的 C_E 值为 12.42。计算所得路面不平整度变化过程通过的车辆数量如表 4 所示。表 4 中: N_i 和 t_i 分别表示路面不平整度从一个等级退化到另一个等级需要通过的车辆数量和经历的时间; T 表示桥梁自运营到每个路面不平整度等级结束所需要的总时间; $r_i = N_i / \sum N_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$, 表示每个路面不平整度等级退化过程中通过车辆的数量占总车辆数的比例。

表 4 路面不平整度从一个等级退化到另外一个等级通过的车辆数和经历的时间

Tab. 4 Number of Vehicle Passages and Time Taken for the RSC to Deteriorate to Next Class

参数	路面不平整度等级				
	1	2	3	4	5
$N_i/10^6$	4.11	1.16	0.94	0.84	0.77
$r_i/\%$	52.63	14.80	12.01	10.74	9.82
$t_i/\text{年}$	6.63	1.86	1.52	1.35	1.24
$T/\text{年}$	6.63	8.49	10.01	11.36	12.60

5 数值分析

本文考虑了桥梁跨径、车速和路面不平整度这 3 个因素对车-桥相互作用的影响。5 座跨径不同桥梁的具体参数如表 1 所示,7 个不同的速度从 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 增至 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 间距为 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 5 个不同的路面不平整度为“非常好”、“好”、“一般”、“差”和“非常差”。图 4 为荷载的加载位置。需要注意的是本文中假定左右车轮下路面不平整度情况相同,也就是说没有考虑路面不平整度的横向差异性。为了减少路面不平整度生成过程的随机性对结果的影响,对每座桥在给定的车速和路面不平整度情况下,车-桥耦合程序都运行了 20 次,取动力冲击系数和应力幅个数 20 次结果的平均值作为分析值。取 20 次运行结果的平均值作为分析值也被其他学者所采用^[14]。

桥梁构件疲劳寿命主要受其承受的应力幅大小和应力幅个数影响。图 5 为车辆荷载作用下各桥梁每个主梁跨中截面承受的最大静应力幅,由图 5 可知,所有桥梁的 4 号主梁跨中截面承受的静应力幅

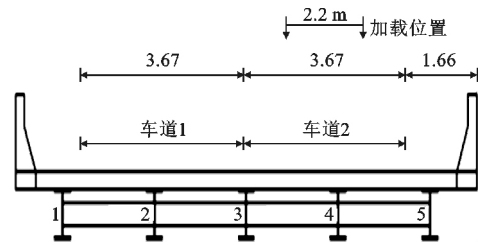


图 4 车道加载位置(单位:m)

Fig. 4 Vehicle Loading Position (Unit: m)

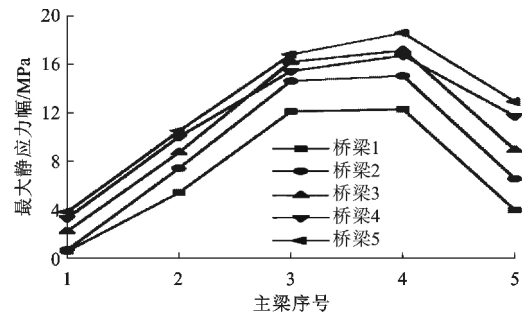


图 5 车辆荷载作用下桥梁跨中截面最大静应力幅
Fig. 5 Maximum Static Stress Ranges at Mid-span of Bridges Under Loading Case

最大,因此,选取各桥梁的 4 号主梁作为研究对象。下文将分别从应力幅冲击系数和等效应力幅个数两方面来优化美国现行疲劳设计规范。

5.1 应力幅冲击系数

本文中应力幅冲击系数 I_S 定义为

$$I_S = \frac{S_d - S_s}{S_s} \quad (13)$$

式中: S_s 和 S_d 分别为构件承受的最大静应力幅和最大动应力幅。

根据数值计算结果由式(13)得到各桥梁在不同路面不平整度和车速条件下的应力幅冲击系数如图 6 所示。从图 6 可知,路面不平整度对应力幅冲击系数的影响很大,当路面不平整度等级为“非常好”时应力幅冲击系数有时甚至小于 0.1,而当路面不平整度等级为“非常差”时其值有时甚至大于 3。从图 6 还可知,速度的增加不一定导致冲击系数的增加,这是因为速度的增加并不一定导致车-桥相互作用的增强,其他学者也得出过类似的结论^[14-15]。

图 7 为每个参数对 I_S 的影响。从图 7 可知,除了路面不平整度为“非常好”的情况外,其他情况下的 I_S 都大于美国 AASHTO 桥梁规范里规定的疲劳冲击系数 0.15。这是因为 AASHTO 规范中规定的疲劳冲击系数是在路面不平整度为“一般”的条件下获得的^[16]。图 7 表明 I_S 受路面不平整度和桥梁跨径影响很大,根据回归分析得到 I_S 与两者的关

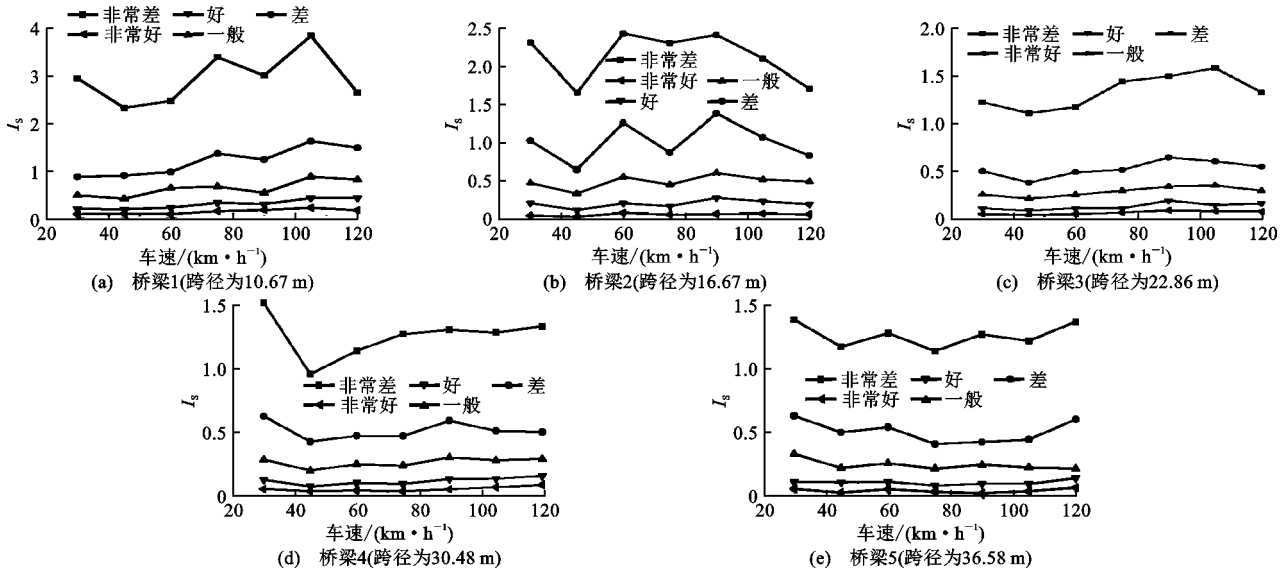


图 6 荷载作用下不同桥梁 I_s 随车速和路面不平整度的变化

Fig. 6 Variations of Impact Factors with Change in Vehicle Speed and RSC for Different Bridges Under Loading Case

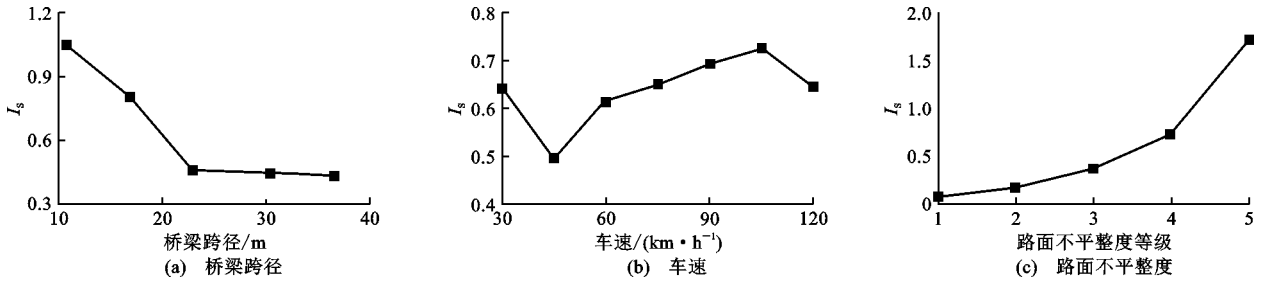


图 7 I_s 随各参数的变化

Fig. 7 Variations of Average I_s with Change of Each Parameter

系式为

$$I_s^i = \begin{cases} R_s^i [0.46 + 0.057 \times (23 - L)] & L < 23 \text{ m} \\ 0.46 R_s^i & L \geq 23 \text{ m} \end{cases} \quad (14)$$

式中: R_s^i 为路面不平整度对应力幅冲击系数的影响系数,在路面不平整度为“非常好”、“好”、“一般”、“差”、“非常差”时分别取值 0.12, 0.27, 0.62, 1.21, 2.71; L 为桥梁跨径。

拟合验证结果表明:通过式(14)得到的 I_s^i 拟合值和实际值具有很好的相关性,在路面不平整度为“非常好”、“好”、“一般”、“差”、“非常差”5 种情况下的拟合相关系数分别达到了 0.990 1, 0.989 9, 0.981 6, 0.974 7 和 0.999 2。根据式(14)得到 5 座桥梁在不同路面不平整度情况下的应力幅冲击系数如表 5 所示。

5.2 等效应力幅个数

根据 Schilling^[6]的研究,每辆车通过桥梁时构件承受的复杂应力所产生的累积疲劳可用最大应力幅产生的疲劳等效,对应的等效应力幅个数用下式计算

表 5 不同路面不平整度情况下 5 座桥梁的应力幅冲击系数

Tab. 5 I_s of the Five Bridges under Different RSCs

桥梁序号	不同路面不平整度下的 I_s 值				
	非常差	差	一般	好	非常好
1	3.13	1.40	0.72	0.31	0.14
2	2.18	0.98	0.50	0.22	0.10
3~5	1.25	0.56	0.29	0.13	0.06

$$E_N = n_u + \left(\frac{S_{r1}}{S_{rm}}\right)^m + \left(\frac{S_{r2}}{S_{rm}}\right)^m + \dots + \left(\frac{S_{rq}}{S_{rm}}\right)^m \quad (15)$$

式中: E_N 为等效力幅个数; n_u 为每辆车通过时产生的最大应力幅 (S_{rm}) 个数; m 为 $S-N$ 曲线的斜率,通常取 3; $S_{rq} (q=1, 2, \dots, O)$ 表示高阶应力幅, O 表示大于截断应力幅 (通常取 3.45 MPa) 的高阶应力幅个数。

根据数值计算结果由式(15)得到各桥梁在不同路面不平整度和车速条件下的等效力幅个数如图 8 所示。从图 8 可知,路面不平整度对 E_N 的影响也很大,当路面不平整度等级为“非常好”时, E_N 有时甚至小于 1,而当路面不平整度等级为“非常差”时,其值有时甚至大于 3。

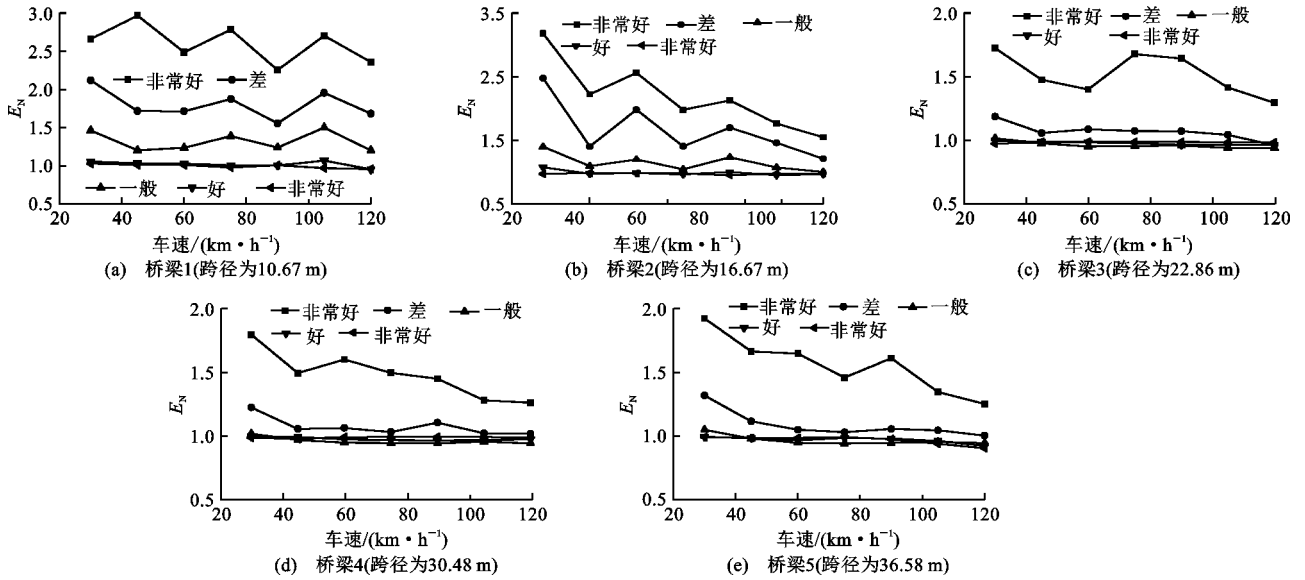


图8 荷载作用下各桥梁的 E_N 随车速和路面平整度的变化

Fig. 8 Variations of E_N with Change in Vehicle Speed and RSC for Different Bridges Under the Loading Case

图9显示了每个参数对 E_N 的影响。由图9可知 E_N 也受路面平整度和桥梁跨径的影响很大。当路面平整度从“非常好”变到“非常差”时, E_N 从

1.0 增加到 1.9; 而当桥梁跨径从 10.67 m 增加到 22.86 m 时, E_N 从 1.55 减少到 1.1, 之后桥梁跨径继续增加时 E_N 基本保持不变。

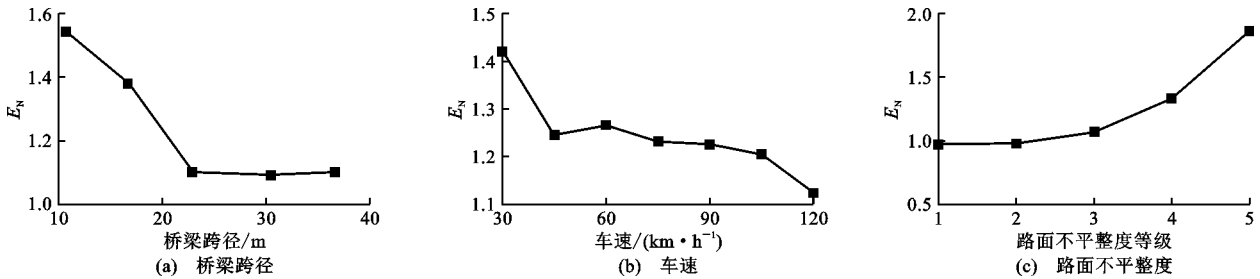


图9 E_N 随各参数的变化

Fig. 9 Variations of Average E_N with Change of Each Parameter

根据回归分析得到 E_N 与路面平整度和桥长的关系式为

$$E_N^i = \begin{cases} R_N^i [1.117 + 0.037 \times (23 - L)] & L < 23 \text{ m} \\ 1.117 R_N^i & L \geq 23 \text{ m} \end{cases} \quad (16)$$

式中: R_N^i 为路面平整度对应力幅个数的影响系数, 在路面平整度为“非常好”、“好”、“一般”、“差”和“非常差”时分别取值为 0.87, 0.87, 0.87, 1.23 和 1.65。

拟合验证结果表明: 通过式(16)得到的 E_N^i 拟合值和实际值具有很好的相关性。在路面平整度为“非常好”、“好”、“一般”、“差”和“非常差”5种情况下, 拟合相关系数分别达到了 0.931 5, 0.953 5, 0.999 9, 0.966 9 和 0.992 7。根据式(16)得到 5 座桥梁在不同路面平整度情况下的 E_N 如表 6 所示。

表6 不同路面平整度情况下 5 座桥梁的等效力幅个数

Tab. 6 E_N of Five Bridges Under Different RSCs

桥梁序号	不同路面平整度下的 E_N 值				
	非常好	好	一般	差	非常差
1	1.37	1.37	1.37	1.93	2.59
2	1.17	1.17	1.17	1.65	2.22
3~5	0.97	0.97	0.97	1.37	1.84

6 疲劳冲击系数和应力幅个数的优化

为了考虑不同路面平整度状况下每辆车通过对桥梁构件累积疲劳损伤的影响, 疲劳设计中构件承受的疲劳冲击系数 I_F 和应力幅个数 N_F 的设计值可分别由式(17)、(18)算得, 即

$$I_F = \sum r_i I_s^i = \begin{cases} \sum r_i R_s^i [0.46 + 0.057 \times (23 - L)] & L < 23 \text{ m} \\ 0.46 \sum r_i R_s^i & L \geq 23 \text{ m} \end{cases} \quad (17)$$

$$N_F = \sum r_i E_N^i = \begin{cases} \sum r_i E_N^i [1.117 + 0.037 \times (23 - L)] & L < 23 \text{ m} \\ 1.117 \sum r_i E_N^i & L \geq 23 \text{ m} \end{cases} \quad (18)$$

根据式(17)、(18)得到不同跨径的 I 型简支钢桥的疲劳冲击系数和应力幅个数的设计值如表 7 所示。表 7 考虑了 2 种不同的情况,即情况“a”和“b”。两者的不同点是,情况“a”在计算 I_F 和 N_F 时考虑了 5 种路面平整度情况,而情况“b”没有考虑路面平整度“非常差”的情况。情况“b”可能更接近实际情况,因为路面一般在进入“非常差”的状况前已进行维护。

表 7 五座桥梁疲劳冲击系数和应力幅个数的设计值

Tab. 7 I_F and N_F for Five Studied Bridges

桥梁序号	L/m	I_F	N_F
1	10.67	0.66 0.36	1.54 1.29
2	16.76	0.46 0.25	1.32 1.10
3	22.86	0.26 0.14	1.10 0.92
4	30.48	0.26 0.14	1.10 0.92
5	36.58	0.26 0.14	1.10 0.92

注:“|”前后数字分别为考虑情况“a”,“b”所得结果。

表 7 表明路面平整度对疲劳冲击系数和应力幅个数的影响很大,说明及时对桥面进行维护能有效减小桥梁构件的疲劳累积损伤。从表 7 可知,在情况“b”条件下,当桥梁长度不小于 22.86 m 时,疲劳冲击系数设计的建议值为 0.14,略小于美国 AASHTO 桥梁规范里规定的 0.15,而当桥梁跨径大于 22.86 m 时,疲劳冲击系数的值大于 0.15。这表明 AASHTO 规范里规定的疲劳冲击系数 0.15 适用于中大跨径桥梁,而对短跨桥梁而言,需要采用更大的疲劳冲击系数。根据式(18),在情况“b”条件下当桥梁跨径等于 22.17 m 时应力幅个数为 1,而在 AASHTO 规范中当桥梁跨径大于 12.19 m 时应力幅个数取 1,小于 12.19 m 时取 2。这说明桥梁长度处于 12.19~22.17 m 时,AASHTO 规范可能低估了构件承受的应力幅个数。根据本文的研究,当桥梁跨径大于 23 m 时,应力幅个数设计值可取 1,小于 23 m 时可根据式(18)计算确定。

7 本文优化方法在中国钢结构桥梁构件疲劳设计和评估中的应用

目前,中国《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)规定承受拉-拉循环应力或拉-压循环应力的桥梁构件需进行可变荷载作用下的疲劳设计

验算^[17],具体包括 3 种疲劳荷载模型的验算。荷载模型 1 条件下的整体构件疲劳验算要求构件承受的最大应力幅不大于常幅疲劳极限。构件承受的最大应力幅取规定的等效车道荷载最不利排列作用下考虑多车道折减时构件承受的最大应力和最小应力差值。荷载模型 2 条件下疲劳验算要求构件承受的等效正应力幅 σ_F 和剪应力幅 τ_F 满足如下关系,即

$$\left(\frac{\gamma_{FI}\sigma_F}{\sigma_c/\gamma_{MI}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{FI}\tau_F}{\tau_c/\gamma_{MI}}\right)^5 \leq 1.0 \quad (19)$$

式中: γ_{FI} 为疲劳荷载效应分项系数; γ_{MI} 为结构重要性系数; σ_c 和 τ_c 分别为正应力和剪应力疲劳抗力。

荷载模型 3 是根据实桥交通情况制定的疲劳荷载,要求构件在该荷载作用下疲劳验算满足以下条件,即

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots \leq \frac{1}{\gamma_{FI}\gamma_{MI}} \quad (20)$$

式中: n_i 为疲劳应力谱中应力幅 σ_i 的加载次数; N_i 为疲劳曲线中与应力幅 σ_i 对应的疲劳寿命。

值得注意的是,现行中国钢结构桥梁构件的疲劳设计对车辆荷载动力效应的影响考虑不足,而实际上在进行荷载模型 3 条件下的疲劳验算时可以利用本文中介绍的方法来更合理地考虑车辆荷载动力效应对桥梁构件疲劳累积损伤的影响。具体过程如下:

(1)根据制定的疲劳荷载模型研究桥面平整度在一定的模型车辆日通行量和环境条件下的变化过程,得到桥梁路面平整度处在各个等级时通过的模型车辆数量。

(2)建立模型车辆和桥梁的三维车-桥耦合模型,求得桥梁各路面平整度等级条件下模型车辆通过时桥梁构件承受的等效应力幅及应力幅个数。

(3)根据步骤(1)和(2)的结果利用式(20)进行疲劳验算。

8 结 语

(1)针对美国现行疲劳设计方法可能低估了路面全寿命周期内由于路面平整度变化引起的车辆荷载动力效应对桥梁构件疲劳累积损伤的影响,通过三维车-桥耦合模型数值计算,优化了疲劳冲击系数和应力幅个数这 2 个直接影响桥梁构件疲劳寿命的参数。

(2)美国 AASHTO 桥梁规范里规定的疲劳冲击系数 0.15 适用于跨径大于 23 m 的中大跨径桥梁,而对短跨桥梁而言,需要采用更大的疲劳冲击

系数。

(3)当桥梁跨径大于23 m时,每辆车通过桥梁时桥梁构件承受的应力幅个数设计值可取1,小于23 m时可根据文中提出的应力幅个数设计公式计算确定。

(4)由于国内外钢桥桥型区别不大,并且中国目前尚无三维疲劳车模型的详细设计参数,因此本文采用了美国规范中的桥梁和疲劳车设计模型作为借鉴。本文优化方法可应用到中国钢结构桥梁构件的疲劳设计和评估中。此外,本文尚未考虑腐蚀等因素对桥梁钢构件疲劳强度的影响,对此有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's Bridge Engineering Research · 2014 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(5): 1-96.
- [2] 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.
- [3] AASHTO LRFD 2012, Bridge Design Specifications [S].
- [4] ZHANG W, CAI C S. Fatigue Reliability Assessment for Existing Bridges Considering Vehicle Speed and Road Surface Conditions [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(3): 443-453.
- [5] ZHANG W, CAI C S. Reliability-based Dynamic Amplification Factor on Stress Ranges for Fatigue Design of Existing Bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(6): 538-552.
- [6] SCHILLING C G. Stress Cycles for Fatigue Design of Steel Bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1984, 110(6): 1222-1234.
- [7] SHI X, CAI C S, CHEN S. Vehicle Induced Dynamic Behavior of Short-span Slab Bridges Considering Effect of Approach Slab Condition [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2008, 13(1): 83-92.
- [8] DENG L, CAI C S. Development of Dynamic Impact Factor for Performance Evaluation of Existing Multi-Girder Concrete Bridges [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(1): 21-31.
- [9] DENG L, CAI C S. Identification of Dynamic Vehicular Axle Loads: Theory and Simulations [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2010, 16(14): 2167-2194.
- [10] DODDS C J, ROBSON J D. The Description of Road Surface Roughness [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1973, 31(2): 175-183.
- [11] HUANG D, WANG T L. Impact Analysis of Cable-stayed Bridges [J]. *Computers & Structures*, 1992, 43(5): 897-908.
- [12] PATERSON W D. International Roughness Index: Relationship to Other Measures of Roughness and Riding Quality [J]. *Transportation Research Board*, 1986(1084): 49-59.
- [13] SHIYAB A M S H. Optimum Use of the Flexible Pavement Condition Indicators in Pavement Management System [D]. Perth: Curtin University, 2007.
- [14] LIU C, HUANG D, WANG T L. Analytical Dynamic Impact Study Based on Correlated Road Roughness [J]. *Computers & Structures*, 2002, 80(20): 1639-1650.
- [15] BRADY S P, O'BRIEN E J, ŽNIDARIČ A. Effect of Vehicle Velocity on the Dynamic Amplification of a Vehicle Crossing a Simply Supported Bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11(2): 241-249.
- [16] HWANG E S, NOWAK A S. Simulation of Dynamic Load for Bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(5): 1413-1434.
- [17] JTG D64—2015, 公路钢结构桥梁设计规范[S].
JTG D64—2015, Specifications for Design of Highway Steel Bridge [S].