

文章编号:1671-6833(2007)03-0033-04

## 基于全寿命理念的公路桥梁钢结构抗疲劳设计

郭琦, 贺拴海

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 针对公路桥梁中周期性可变荷载的特点, 依据现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D62-2004) 给出公路桥梁钢结构疲劳应力幅的计算方法. 按构造重要性和可替换性的差异, 根据全寿命设计思想, 在铁道部科学研究院长期大量试验的基础上, 提出将容许应力幅的保证率作为变量的疲劳抗力方程, 达到设计时综合考虑施工及桥梁服役整个寿命期的目的. 以一座公路悬索桥钢混叠合加劲梁疲劳计算作为算例, 通过与其它规范方法的比较, 证明本方法的可靠性.

**关键词:** 钢结构; 钢混叠合梁; 疲劳抗力; 全寿命设计

**中图分类号:** U 441<sup>+</sup>.4

**文献标识码:** A

### 0 引言

长期以来, 我国由于钢材缺乏等原因修建的公路钢桥较少. 随着我国钢铁生产量的提升, 加之公路桥梁结构向轻型、大跨的发展趋势, 采用钢箱或钢混叠合加劲梁的索式桥梁结构将占有更重要的位置. 在这些特大跨径桥梁中, 由于运营车辆荷载的作用, 钢结构会承受周期性的反复应力, 由此引起的疲劳问题已经成为影响该类结构耐久性及安全性的重要因素之一. 在传统的公路桥梁设计方法中, 由于疲劳问题还未引起足够的重视并且缺乏完备的公路桥梁荷载谱数据, 加之钢结构的应力状况和疲劳强度分类细节较为复杂等诸多因素, 设计者往往忽略了对这一问题的分析计算. 由此设计完成的公路桥梁钢结构不具备足够的抗疲劳破坏能力, 为桥梁在服役期内的安全埋下隐患<sup>[1-4]</sup>.

文中以《公路桥涵设计通用规范》(JTG D62-2004) 的服务荷载为依据, 在铁道部科学研究院长期大量疲劳试验<sup>[3,5]</sup>的基础上, 吸收国内、外最新疲劳研究成果, 对公路桥梁钢结构抗疲劳设计方法展开研究. 改变以往方法中允许应力的保证率为定值的设计思想, 提出公路桥梁钢结构抗疲劳设计方法, 试图弥补我国公路桥梁疲劳设计方面的不足. 应用本方法对公路桥梁钢结构构件进行抗疲劳设计时, 设计人员可根据结构构件或连接部位的重要性不同, 采用不同的保证率, 为桥

梁全寿命设计提供参数, 在一定程度上体现了综合考虑设计、施工、运营和管理的全寿命设计思想.

### 1 变幅应力幅向等幅应力幅的转化

在实际车辆荷载作用下, 钢结构构件承受的是随机变幅荷载, 对疲劳产生作用的是随机变幅应力幅. 然而, 试验所提供的疲劳抗力方程是在常幅应力幅作用下得到的, 只适用于常幅应力幅的作用. 为了将实际运行荷载所产生的疲劳损伤效应与试验抗力方程联系起来, 必须寻找一个将随机变幅应力效应转化为常幅应力效应的方法. 文中方法依据著名的 Palmgren—Miner 线性损伤累积法则(简称 Miner 法则)来综合考虑疲劳累积损伤中变幅应力幅与等幅应力幅的等价关系.

将特定构造细节的疲劳抗力  $S-N$  曲线方程  $N = A\Delta\sigma^{-m}$  代入 Miner 线性积伤律, 得到

$$\Delta\sigma_e = \left( \frac{\sum r_i \Delta\sigma_i^m}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

对于公路桥梁可以实测或者可以通过模拟随机荷载方式得到结构构件随机应力谱的情况下, 则可以用式(2)进行抗疲劳计算.

$$\Delta\sigma_e = \alpha \left( \frac{\sum r_i \Delta\sigma_i^m}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为测量最大值修正系数, 为保证计算误差

收稿日期: 2007-04-04; 修订日期: 2007-05-23

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200538181215)

作者简介: 郭琦(1976-), 男, 陕西西安人, 长安大学博士研究生, 主要从事在役混凝土桥梁检测评估研究.

(数值模拟)或测量误差(实测应力谱)带来的不利影响,参照铁路桥梁检定规范取1.1。

国内外研究结果均表明<sup>[6-7]</sup>: Miner的线性损伤律用来建立随机变幅应力疲劳和常幅应力疲劳数据之间的关系是将变幅应力幅转化为常幅应力的好方法。将该方法应用于公路桥梁钢结构的应力幅转换,由此造成的计算误差与公路桥梁荷载离散造成的误差相比小得多,体现出简单、可行及实用的优点。

## 2 钢结构构件抗疲劳计算

### 2.1 全寿命设计思路

以往桥梁设计过程中均未考虑桥梁建设施工、营运和养护管理中的综合影响因素,使得结构在服役过程中出现功能退化、耐久性不足、后期养护费用昂贵等诸多问题。因此,在设计时就应综合考虑施工、营运、维修养护直至桥梁结构退出工作的全寿命周期内的所有问题。根据全寿命设计理念,在桥梁设计时应考虑后期维修养护的可行性及代价,综合考虑结构构造的可替换性、替换周期及替换费用等因素。在公路桥梁钢结构疲劳抗力方程中对构造进行分类,对于不可替换的关键性构造,或替换费用很高的构造应采用较高的有效工作保证率,对于可以替换的构造则为降低造价可以选用较低的保证率,从而实现与全寿命设计思想相衔接。

### 2.2 公路桥梁疲劳应力幅

常规情况下的桥梁结构设计时,很难得到真实的随机应力谱,就我国目前来讲,还没有一个公路桥梁荷载谱。其原因是公路桥梁与铁路桥梁相比,在不同地区、同一地区的不同地段以及不同时间段下车辆荷载的随机性很大,很难准确统计和模拟。为了与现行设计规范接轨、使疲劳计算公式简单化、便于指导设计,可以采用现行公路桥梁荷载计算方法计算设计疲劳应力幅。

桥梁结构所承受的荷载一般有恒载、汽车活载、汽车冲击效应以及其它种类。对于疲劳设计来说,起作用的是频遇次数较高的荷载。因此,可纳入公路桥梁疲劳设计的荷载就是恒载、车辆活载、汽车冲击效应3种。对应力幅起贡献作用的主要是车辆活载及冲击效应,但恒载作用参与决定结构构件是否出现拉应力及拉应力的值,因为对不出现拉应力的构件即使有循环应力幅也可以不计算疲劳。

按一般的桥梁设计方法可以提出下述的疲劳万方数据

应力幅计算方法:①计算出验算细节处的最大及最小应力影响线;②按车道活载影响线加载方式求出验算细节处车道荷载下的最大、最小应力 $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ ;③将得到的车道荷载下的最大、最小应力计入动力冲击系数 $(1+\mu)$ ,以反映动力冲击作用的贡献;④将车道荷载及冲击作用的应力乘以横向分布系数或偏载系数 $m_e$ ,以反映加载方式的空间效应。同时计入多车道横向折减系数 $\xi$ ,其在疲劳设计上可以理解为由横向车道荷载引起的应力幅变化向等应力幅转化的系数,是变幅应力损伤的累积转化方式。

从而,得到应力幅计算公式

$$\Delta\sigma_s = \beta(1+\mu)\xi m_e(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (3)$$

最大、最小应力值分别为

$$\sigma'_{\max} = r_1\sigma_1 + r_2\sigma_{\max} \quad (4)$$

$$\sigma'_{\min} = r_1\sigma_1 + r_2\sigma_{\min} \quad (5)$$

式中: $\sigma_1$ 为恒载应力; $r_1$ 为恒载组合系数; $r_2$ 为活载组合系数; $\beta$ 为汽车效应系数。各系数取值见参考文献[1]。

对于公路桥梁计算应力幅,其相关系数是在大量试验和独立概率统计基础上得到的。所以用各相关系数方式计入各种效应的设计方法已经考虑了可变荷载是一定保证率基础上的概率事件,是一套系统化的计算方法。因此对公路桥梁具有适用性和通用性,能够有效地指导公路桥梁钢结构的抗疲劳设计。

### 2.3 疲劳抗力分析

#### 2.3.1 抗疲劳设计方法

文中对公路桥梁钢结构进行抗疲劳设计时分2类分别制订算法:

第一类是焊接构件及疲劳应力为拉—拉应力的非焊接构件及连接,以应力幅为主要控制因素,公路桥梁钢结构抗疲劳设计仍可采用容许应力法,表达式如式(6)。

$$\Delta\sigma_s \leq r_t[\sigma_y] \quad (6)$$

第二类是焊接构件及疲劳应力为拉—压应力的非焊接构件及连接,引入应力比修正系数进行修正。表达式如式(7)。

$$\Delta\sigma_s \leq r_t r_p[\sigma_y] \quad (7)$$

式中: $\Delta\sigma_s$ 为实测构件构造细节的等幅应力幅; $r_t$ 、 $r_p$ 分别为板厚和应力比修正系数。

#### 2.3.2 疲劳抗力方程

参考铁路栓焊钢桥疲劳抗力方程<sup>[8-9]</sup> $\lg N + m \lg \Delta\sigma = C'$ 。由于 $\lg \sigma$ 服从正态分布且 $\lg N$ 与 $\lg \sigma$ 呈线性关系,则由正态分布的特性可知, $\lg N$ 与

$\lg \sigma$  的拟合直线误差分布服从正态分布, 即

$$\lg N = C' - m \lg \Delta \sigma + \varepsilon_i \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon_i$  为误差值, 且  $\varepsilon_i$  服从正态分布  $N(0, \delta)$ 。故当保证率为  $\gamma\%$  时,

$$\lg N = C' - m \lg \Delta \sigma - t \delta \quad (9)$$

式中:  $t$  为标准正态分布保证率为  $\gamma\%$  的置信下限, 可通过正态分布表得到。

由  $C' = C + 2\delta$  可得出基于可靠度的疲劳抗力一般方程

$$\lg N = C - m \lg \Delta \sigma + (2 - t) \delta \quad (10)$$

特殊地, 对于公路索式桥梁中常见的钢混叠合加劲梁, 构造细节可按高强度螺栓连接(毛截面)取用, 对保证率为  $\gamma\%$  情况下的置信度  $t$ , 其疲劳抗力方程为

$$\lg N + 3.01 \lg \Delta = 12.732 - 0.156t \quad (11)$$

笔者采用的构造细节、连接形式、板厚系数及应力比修正系数等均采用铁道部的试验值, 与我国铁路桥梁钢结构设计规范(2005)相衔接。由于这些参数均由一般钢结构试验得出, 具有普遍性和通用性, 因此对于公路桥梁钢结构的抗疲劳设计也是适用的。

### 3 算例

以一座单跨竖直吊索悬索公路桥梁的钢混叠合加劲梁接头为例, 进行抗疲劳计算, 验算部位为加劲梁接头的上下缘连接板。连接接头的构造见图1所示。

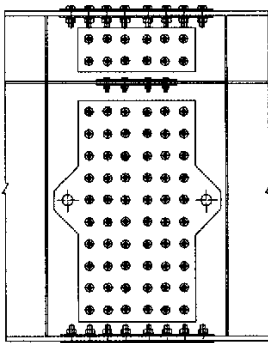


图1 加劲梁接头构造示意图

Fig.1 Constitution diagram of stiffening girder

#### 3.1 疲劳应力幅 $\Delta \sigma$ 。

由于悬索桥具有几何非线性和应力刚度的特征, 使得影响线加载求构件截面内力的方法不再适用。但是, 桥梁结构在恒载作用下时, 主缆应力较大, 结构的整体刚度也较大, 如果在恒载作用的有限元模型基础上再施加移动荷载进行非线性分析

析计算, 得出各节点在移动荷载作用下的节点应力, 并形成应力影响线的话, 则此时的应力影响线相对与未计入恒载作用的影响线而言, 误差值大大减小。图2中分别对1t及10t两种移动荷载作用下得到的应力影响线进行比较。从图中可见, 移动荷载为1t和10t的情况下, 应力影响线的正负号变化点是一致的。因此可以得出结论: 采用非线性分析方法在计入桥梁结构恒载作用基础上得到的应力影响线正负号变化点的位置是基本确定的, 不会因荷载不同而发生较大变化。在找到应力符号变化点后, 可以通过在有限元模型上直接布载进行非线性分析计算, 求出计算点的节点应力值。该值即是最大或最小应力值。计算结果见表1。按照文中方法由式(3)分别求出上下缘疲劳应力幅为:  $\Delta \sigma_{e, \uparrow} = -90.5 \text{ MPa}$ ;  $\Delta \sigma_{e, \downarrow} = -92.9 \text{ MPa}$ 。

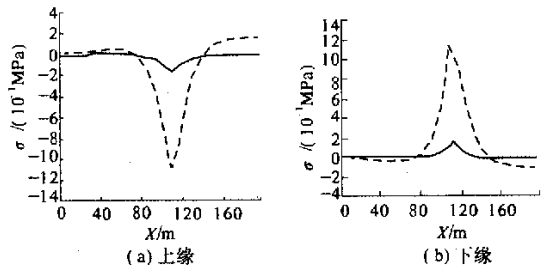


图2 加劲梁连接接头应力影响线比较图

Fig.2 Comparative diagram for influence lines on stiffening girder

表1 节点最大应力

Tab.1 Maximum stress on joint

加载区域	正弯矩区		负弯矩区	
	加载(拉为“+”)		加载(拉为“+”)	
计算部位	上缘	下缘	上缘	下缘
节点应力/MPa	-92.7	95.1	-35.6	36.5

#### 3.2 疲劳抗力对比分析

现将笔者提出的算法与美国公路桥梁钢结构设计规范、我国钢结构设计规范、我国铁路桥梁钢结构设计规范中不同的疲劳抗力方法进行对比分析, 将所得的计算结果列于表2。表中对于由于荷载差异等原因无法进行比较的项没有列出。

文中方法取作用次数  $N = 2 \times 10^6$ , 保证率  $\gamma = 97.7$ , 验算构件构造细节为高强度螺栓连接(毛截面)进行计算; 公路桥涵钢结构及木结构设计规范按全断面拼接B类构件的分类细节进行计算; 钢结构设计规范按照验算部位为II类构造计算; 对于美国规范按无冗余承载结构, B类构造细节分析得到200万次容许应力幅。

表2 不同方法计算结果比较  
Tab.2 Comparison between different results

计算方法	计算 应力	容许 应力	容许 计算
	幅/MPa	幅/MPa	
本文方法	92.9	109.56	1.179
中国钢结构设计规范(2003)	110.3	144.0	1.306
中国钢结构设计规范(1988)	110.3	144.0	1.306
美国公路桥梁设计规范	—	110.31	—
中国铁路规范(2005)	—	109.56	—

通过表2中数据的比较和分析,可以得出如下主要结论:

(1) 本方法所采用的容许应力幅同我国铁路规范一致,与美国钢结构规范非常相近,略小于我国钢结构设计规范(1988,2003)。

(2) 从容许应力幅与计算应力幅比值来看,采用文中方法得到的值小于我国钢结构设计规范(1988,2003),计算结果是偏安全的,具有一定的可靠性。

#### 4 结束语

综合目前国内外最新规范及研究理论,从计算方法来看均统一认定应力幅控制设计理论是符合实际的。而采用应力比控制设计的思想已经远落后于现在的疲劳研究理论。

本研究提出的公路桥梁钢结构抗疲劳设计方法引入保证率作为参数,一定程度上体现了全寿命设计的思想。其疲劳抗力方程来源于我国长期大量的结构疲劳试验,比较真实的反映我国钢材

质量和工艺水平,具有一定的可靠性。同时,通过算例分析,其计算结果与我国最新铁路桥梁钢结构设计规范和钢结构设计规范比较接近,与美国等国家计算结果基本趋势一致,较真实地反映了我国公路桥梁钢结构的实际工作状态,能有效地指导公路桥梁钢结构抗疲劳设计。

#### 参考文献:

- [1] JTG D62 - 2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 师义军.既有公路钢桥剩余疲劳寿命评估及疲劳可靠性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2005,7.
- [3] 张玉玲,潘际炎,张健民.芜湖长江大桥钢梁细节疲劳强度的研究[J].中国铁道科学,2001,22(5):15-21.
- [4] 卢汝生,成 彤,王荣辉.桥梁结构疲劳特性分析发展历程与评定设计方法综述[J].公路交通技术,2004(3):14-16.
- [5] 王 硕,张 钰.部分剪力连接组合梁疲劳性能的实验研究[J].郑州大学学报(工学版),2004,25(2):48-53.
- [6] AISC - LRFD 99. Load and resistance design specification for structural steel building[S]. American Institute of Steel Construction, December 27, 1999.
- [7] 郑 宏,顾 强.钢板件考虑损伤的循环弹塑性大变形成形分析[J].土木工程学报,2001,34(5):35-39.
- [8] 李亚东,徐 俊.铁路钢桥疲劳损伤概率分析[J].桥梁建设,2003,(4):2-5.
- [9] 王春生,陈艾荣,聂建国.既有铁路钢桥剩余疲劳寿命的概率性评估[J].计算力学学报,2006,23(4):408-413.

## Study on Whole Life Design of Fatigue Resistance on Steel Structure in Highway Bridges

GUO Qi, HE Shuan - hai

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Aiming at features of cyclical loads in highway bridges, a method for calculation of fatigue stress amplitude design was put forward in accordance with General Code for Design of Highway Bridges and Culverts(JTG D62 - 2004). Based on "whole life design", combined with the experiments done by railway institute for a long time, it brought forward variable assurance ratio in fatigue equations, so that different assurance ratio can be used according to the difference of structure replaceable and significance. Through a calculating demonstration for concrete - steel reinforced beam of a suspension bridge, feasibility of the method in this paper was verified.

**Key words:** steel structure; concrete - steel Beam; fatigue resistance; whole life design