

大跨径公路钢斜拉桥索梁锚固区 疲劳试验荷载研究

李 乔¹, 唐 亮¹, 裴岷山², 满洪高¹

(1. 西南交通大学土木工程学院 成都市 610031; 2. 中交公路规划设计院 北京市 100010)

摘 要: 针对我国公路桥梁设计规范暂无疲劳荷载规定的情况, 参考国外规范和研究成果, 根据疲劳积累损伤理论, 以苏通大桥索梁锚固区疲劳试验荷载的确定为 例, 对公路桥梁疲劳荷载的确定方法和原则进行了研究, 并给出了具体的推算方法。

关键词: 公路桥梁; 钢桥; 疲劳; 荷载; 索梁锚固区

疲劳问题一直是钢桥研究的重点, 疲劳试验则是主要的研究手段之一。当根据疲劳试验的结果评定结构疲劳强度是否满足要求时, 首先必须明确结构在多大的荷载幅度下经过多少次循环不破坏才算合格。按照常规的试验方法, 满足疲劳强度要求的应力循环次数为 200 万次, 那么此时必须合理地确定对应的试验应力幅或试验加载幅度。我国的铁路桥梁设计规范以及国外发达国家的桥梁设计规范都有明确的疲劳设计荷载, 因此在进行验证性疲劳试验时, 只要按照规范计算出在疲劳荷载作用下构件所受到的力或应力的幅度, 即可得到疲劳试验荷载幅度。

我国《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025-86) 没有给出具体的疲劳荷载的大小、形式以及加载规定, 仅在 1.2.17 条中有这样一段说明: “验算疲劳强度时, 可根据桥梁的实际行车情况, 选用实际经常发生的荷载组合中的车辆荷载进行计算”。这就使得在进行公路钢桥疲劳验算和验证试验时荷载幅度的确定时发生困难。采用静力强度计算时的应力幅或荷载幅度虽然偏于安全, 但因为这样确定的荷载幅度是小概率事件, 与经常发生的车辆荷载相差甚远, 未免太过于保守。于是, 如何确定合理的公路桥梁疲劳荷载成为亟待解决的问题。

本文结合苏通大桥钢箱梁索梁锚固区的疲劳试验研究, 根据疲劳积累损伤理论, 参考国外规范, 对大跨径公路斜拉桥索梁锚固区疲劳验证试验荷载幅度

进行了研究, 并提出确定该荷载的方法。该方法虽然是针对斜拉桥索梁锚固区提出的, 但其基本原则和思路可适用于一般公路桥梁疲劳荷载的进一步研究。

1 引起桥梁疲劳的荷载

我国铁路桥涵设计规范虽然有关于疲劳加载的规定, 但由于铁路荷载与公路荷载相差甚大, 尤其对于疲劳问题差别更大, 不能套用。美国公路桥梁设计规范 AASHTO、英国桥梁设计规范 BS 5400 以及欧洲规范 Eurocode 1 中均有关于公路桥梁疲劳荷载的规定, 它们都是采用线性疲劳积累损伤理论, 通过估算桥梁设计寿命期内能够引起疲劳损伤的车辆通过数量及荷载循环次数, 计算这些车辆产生的疲劳积累损伤。国内外的研究均认为只有较重的载重汽车(卡车)和火车才会引起疲劳损伤, 而小型汽车不引起疲劳问题。BS 5400 认为总重 30 kN 以上的车辆才产生疲劳影响, 而 Eurocode 1 则只考虑 100 kN 以上的车辆。上述我国公路规范关于疲劳荷载说明也含有这个概念, “实际经常发生的荷载组合中的车辆荷载” 应该就是指载重汽车。

显然, 在正常运营中, 这样的车辆只占全部通行汽车数量的一小部分。按 AASHTO 规范只占 10%~20% (不同的公路类别不一样), 而按 BS 5400 规范则占 20%~25%; 我国学者也曾做过调查和研究, 得到车辆的荷载频值谱, 所得结论也表明, 在总的通

行量中,有 80% 的汽车属于不产生疲劳的小型汽车。苏通大桥设计交通量为:到 2028 年日均交通量为 50 652 辆/日(绝对数量),其中各种车型所占比例为:小货(2 t 以下)13.6%;中货(2~7 t)14.0%;大货(7 t 以上)7.0%;小客(6 人以下)51.3%;大客(6~26 人)7.9%;集装箱6.2%。其中能够引起疲劳问题的车辆应该包括中货和大客的一部分以及大货和集装箱的全部。即使非常保守地将中货和大客全部包含在内,也只占车辆总数的 35.1%。

根据这个结论,如果在试验中采用静力强度计算得到的最不利索力幅度(1 850 kN)进行疲劳试验就很不合适,因为这样的荷载情况只有在极少数情况下才会有(一个月或者更长时间才有一次),于是在桥梁的设计寿命期内,这样的荷载情况就没有多少次,绝不可能产生 200 万次荷载循环或应力循环。

2 桥梁标准疲劳加载车

美国规范 AASHTO 在 1994 中规定,疲劳加载采用“车辆荷载”,本文称之为标准疲劳加载车。全桥布置 1 辆,为 3 轴货车,总重 325 kN(另乘以相应的组合系数),按最不利位置加载。由此产生的计算部位的应力幅 $\Delta\sigma$ 作为计算疲劳积累损伤的根据。BS 5400 1978-83 中规定了几种疲劳计算方法:一种是采用标准疲劳加载车,为一辆重 320 kN 的 4 轴车;另一种方法采用规范给出的荷载频值谱(即引起疲劳效应的车辆中不同重量的汽车各自占的比例)进行计算。欧洲规范 Eurocode 1 EN1991-2:2003 则将疲劳荷载分为 5 种模式,其中前 4 种是规范给出的荷载,第 5 种则是每座桥梁具体实际调查预测的荷载模式,被称为是最精确的一种。荷载模式 1 采用静力荷载的形式,但数值上进行折减,集中力采用 0.7 倍,分布力采用 0.3 倍。对于大跨径斜拉桥,由荷载模式 1 引起的拉索索力大约相当于静载索力的 35% 左右。荷载模式 2 和荷载模式 4 都是以荷载谱形式给出的,荷载模式 3 是一辆 4 轴的标准疲劳加载车,总重为 480 kN。各规范中的标准疲劳加载车重量虽然不同,但车辆的数量和布置的规定也不同,因此不能说越重的越保守。

为了确定苏通大桥的疲劳荷载,取其设计交通量中各种车辆的比例数字作为估计荷载频值谱的依据,但必须确定各种车辆的具体重量。偏于安全地可取上限:中货 7 万秀数据 t(汽车一超 20 的标准车),集装箱 55 t(汽车一超 20 的重车),大客 16 t(豪华大巴)。

对于斜拉桥的索梁锚固区而言,其荷载幅度等于桥上疲劳加载引起的索力幅度。而大跨径斜拉桥的索力影响线很长,一辆车引起的索力主要取决于车的总重,而与轴重的分布关系不大。于是为了简便,可以按照线性疲劳累计损伤理论,将上述不同重量的车换算为同一种重量的等效车辆,即标准疲劳加载车的形式。参考 BS 5400 和 Eurocode 3,取疲劳曲线的斜率倒数 $m=5$ (疲劳曲线的第二个直线部分,小应力幅区段),标准疲劳加载车重量 W_e 的近似公式为:

$$W_e = [\sum f_i W_i^m]^{\frac{1}{m}} \tag{1}$$

式中: W_i 为第 i 种产生疲劳影响的车辆的重量; f_i 为 W_i 在总的产生疲劳影响的车辆数目中的比例。将具体数字代入得:

$$W_e = [0.14/0.351 \times 70^5 + 0.07/0.351 \times 200^5 + 0.079/0.351 \times 160^5 + 0.062/0.351 \times 55^5]^{1/5} = 390 \text{ kN}$$

即根据线性疲劳积累损伤理论,苏通大桥换算等效标准疲劳加载车辆重量为 390 kN。

3 桥梁设计寿命内疲劳荷载循环次数

3.1 按 AASHTO 计算

美国的一般桥梁设计寿命为 75 年,BS 5400 则规定为 120 年,我国对于桥梁没有明确的设计寿命规定。我们可取苏通大桥的设计寿命为 120 年。苏通大桥 2028 年设计交通量 $ADT = 50\ 652$ 辆/d。根据 AASHTO 第 3.6.1.4.2 条的规定,疲劳荷载的频率按单车道日平均货车交通量 $ADTT_{SL}$ 计算:

$$ADTT_{SL} = p \times ADTT \tag{2}$$

式中: $ADTT = k \times ADT_{SL} = 0.351 \times 50\ 652 / 2 = 8\ 889$ 辆/d(单向货车交通量); k 为货车占总交通量的比例,取 35.1%; p 为多车道折减系数,根据 AASHTO,当单向车道数大于等于 3 时,取 $p = 0.8$ 。

于是有:

$$ADTT_{SL} = 0.8 \times 8\ 889 = 7\ 111 \text{ 辆/d.}$$

这是该桥 2028 年的换算单车道能产生疲劳的车辆交通量。为了考虑苏通大桥整个设计寿命 120 年期间的交通量,这里偏于安全地按 6 车道高速公路最大日交通量上限值 80 000 辆/d 计算(见《公路工程技术标准》(JTG B01-2003)表 1.7),即认为该桥刚一通车就已达到饱和交通量。即 $ADTT_{SL} = 0.351 \times 80\ 000 / 2 \times 0.8 = 11\ 232$ 辆/d > 7 111 辆/d。

根据分析计算,对于苏通大桥这样的大跨径斜拉

桥,斜拉索索力的影响线很长,每通过一辆车在斜拉索锚箱上只会产生一次较大的应力循环。于是在120年设计寿命期间内,对应单车道的应力循环总次数为:

$$N = 11\,232 \times 365 \times 120 = 491\,196\,600 \text{ 次}$$

苏通大桥为6车道,根据AASHTO规定,所有车道的荷载循环次数都按上述单车道的 N 值计算。但需注意,荷载作用在不同车道时产生的索力不同,为了方便推算,根据线性疲劳积累损伤理论,可以将每个车道的荷载产生的索力按同一个值计算,而将循环次数进行等效换算。已知一辆390 kN车辆分别作用在各个车道时产生的索力如表1。

表1 一辆390 kN车辆分别作用在各个车道时产生的索力

荷载作用车道 i	索力 T_i/kN	$c_i = T_i / T_1$
1	56.4	1.000
2	53.2	0.949
3	50.6	0.897
4	40.1	0.710
5	37.0	0.659
6	34.3	0.610

将各车道产生的索力均换算为 $T = 56.4 \text{ kN}$,则相应的换算荷载循环次数为

$$N_i = c_i^5 \times N \quad (3)$$

将表中相应数字代入式(3)并求和,便得6个车道总的等效循环次数为:

$$N_T = \sum N_i = 1\,021\,197\,731 \text{ 次}$$

也就是说对于苏通大桥的索梁锚固区,按照线性疲劳积累损伤理论,如果用一辆390 kN的货车产生的索力56.4 kN(乘以相应的系数)作为试验荷载,那么只要结构经历1 021 197 731次加载循环后还没有破坏,就可以认为该结构满足疲劳强度要求。

3.2 按 BS 5400 计算

按该规范,疲劳荷载只布置在慢车道及其相邻的车道上,也就是每一方向最靠边的两个车道,即表1中的1、2、5、6车道。

根据该规范,相邻车道年交通量与慢车道年交通量的比例为 $1.5 : 2 = 0.75$ 。对于苏通大桥,车道1和车道6各取为11 232 辆/d(每年406万辆,该数值比BS 5400或Eurocode 1规定的交通量每年200万辆高出了1倍,应该属于非常保守的估计了),120年总的荷载循环次数为 $N_{01} = N_{06} = 491\,196\,600$ 次;车道

2和车道5各为 $11\,232 \times 0.75 = 8\,424$ 辆/d,120年总的荷载循环次数为 $N_{02} = N_{05} = 368\,971\,200$ 次。

系数 $K_B = T_2 / T_1 = 0.949$,影响线长度 $L > 200 \text{ m}$,由BS 5400图10-11得,系数 $K_F = 2.95$ 。于是按照类似上面的原理,得到换算荷载循环次数为:

$$N_T = K_F \sum c_i^5 N_{0i} = 2\,543\,836\,233 \text{ 次}$$

3.3 按 Eurocode 1 计算

该规范在采用疲劳荷载模式3计算时($4 \times 120 \text{ kN} = 480 \text{ kN}$),一个车道上可以施加2辆标准疲劳车,间距不小于40 m,并且第2辆的轴重按第1辆的30%计($4 \times 36 \text{ kN} = 144 \text{ kN}$)。慢车道的重车交通量为每年200万辆,快车道(对于苏通大桥即车道2~5)按慢车道的10%计算。由于该规范的疲劳荷载模式3的车重(480 kN)大于苏通大桥的标准疲劳加载车重(390 kN),为偏于安全地估计苏通大桥的疲劳荷载,此处取480 kN。而慢车道重车交通量仍按前面的11 232 辆/d计算。于是可得 $N_T = 614\,939\,086$ 次。

4 疲劳模型试验荷载的确定

按照国内外目前的实验设备、技术水平和实验研究周期要求,不可能进行几亿次到几十亿次的加载试验,所以,必须适当提高荷载幅度,以降低循环次数。

按照常规做法,疲劳试验加载按常幅应力循环200万次进行。根据前面的分析,疲劳寿命与应力幅的 m 次方成反比,而200万次疲劳寿命对应的疲劳曲线斜率的倒数为 $m = 3$,所以如果要按200万次进行疲劳试验加载并产生等效的疲劳积累损伤,则荷载的幅度应为原来的 n 倍。 n 值计算如下:

按AASHTO:

$$n = \left[\frac{1\,021\,197\,731}{2\,000\,000} \right]^{\frac{1}{3}} = 7.993$$

按BS 5400:

$$n = \left[\frac{2\,543\,836\,233}{2\,000\,000} \right]^{\frac{1}{3}} = 10.835$$

按Eurocode 1:

$$n = \left[\frac{614\,939\,086}{2\,000\,000} \right]^{\frac{1}{3}} = 6.749$$

根据AASHTO,动荷载增取值取15%,于是疲劳试验荷载幅度应为:

$$\Delta P = 7.933 \times 1.15 \times 56.4 = 515 \text{ kN}$$

根据BS 5400,疲劳试验荷载幅度应为:

$$\Delta P = 10.835 \times 56.4 = 611 \text{ kN}$$

在一辆480 kN和一辆144 kN车辆作用下,引起所研究的拉索索力为86.8 kN,根据Eurocode 1

和 3, 疲劳试验荷载幅度应为:

$$\Delta P = 6.749 \times 86.8 = 586 \text{ kN}$$

按照这 3 个规范估算的疲劳试验荷载大约分别相当于静载最大索力幅度 1 850 kN 的 28%、33% 和 32%, 与按 Eurocode 1 的疲劳荷载模式 1 之规定的加载结果接近。

为了安全起见, 取安全系数为 1.7, 上述 ΔP 最大值为 611 kN, 于是对苏通大桥锚箱的疲劳试验实际加载幅度取为:

$$\Delta P_t = 1.7 \times 611 = 1\,039 \text{ kN} \approx 1\,100 \text{ kN}.$$

5 结论

(1) 评价公路桥梁构件疲劳强度时, 不应采用静活载应力幅, 因为这样得到的应力幅是很少发生的, 其所产生的疲劳积累损伤也是十分有限的。

(2) 公路桥梁构件疲劳试验荷载的确定应参考国外规范及研究成果, 尤其是 BS 5400 和 Eurocode 的成果, 根据疲劳积累损伤理论并结合具体构件的受力

特点来进行。

(3) 本文虽然是针对苏通大桥索梁锚固区的疲劳试验荷载开展研究的, 但其基本原则和方法同样适用于其他构件疲劳荷载的确定, 只要注意具体构件的受力特性就可以了。

参考文献:

- [1] 唐继舜, 钱冬生. 关于钢结构疲劳问题当代水平的简述 [J]. 钢结构, 1999, 14(45).
- [2] 辛济平, 等译. 美国公路桥梁设计规范 AASHTO——荷载与抗力系数设计法(1994). 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [3] British Standard BS 5400 1980, Steel, concrete and Composite Bridges——Part 10: Code of Practice for Fatigue.
- [4] Eurocode 1: Actions on Structures——Part 2: Traffic Loads on Bridges, BS EN 1991-2:2003.
- [5] Eurocode 3: Design of Steel Structures——Part 2: Steel Bridges, ENV 1993-2:1997.

A Study on Fatigue Test Loads of Cable-Girder Anchorage Zone of Steel Cable Stayed Highway Bridges

LI Qiao¹, TANG Liang¹, PEI Min-shan², MAN Hong-gao¹

(1 Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China; 2 China Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, INC, Beijing 100010, China)

Abstract: To counter the situation that there are no rules about fatigue loads in China highway bridge design codes, the determination method and the principle of highway bridge fatigue loads are studied and a detailed method of predication given. Some abroad design codes and the theory of cumulative damage for fatigue are used in the research.

Key words: highway bridge; steel bridge; fatigue; loads; cable-girder anchorage zone

咸阳至陕甘界高速公路开工

陕西“米”字公路主骨架书写最后一笔

2004 年 11 月 7 日上午, 银川至武汉西部大通道陕甘界至咸阳高速公路正式动工。此举标志着陕西省“米”字型公路主骨架最后一笔正式开“画”。

陕甘界至咸阳高速公路是西部省际公路通道银川至武汉线的一部分, 是国家重点公路上海至武威公路的重要组成部分, 同时也是全国 12 条公路勘察设计典型示范工程项目之一。该项目全长约 164 km, 项目估算总投资 51.5 亿元。

陕西省“米”字型公路主骨架中, 以西安为起点的公路有 8 条, 其中 2 条已建成通车, 5 条正在建设。陕甘界至咸阳公路为最后开工建设的一条, 计划于 2008 年年底建成通车。

万方数据