

文章编号: 0451-0712(2004)12-0007-04

中图分类号: U448.271

文献标识码: A

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 万方数据 t(汽车—超 20 的标准车),集装箱 55 t(汽车—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:

$$W_e = [\sum f_i W_i^m]^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

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:

$$W_e = [0.14/0.351 \times 70^5 + 0.07/0.351 \times 200^5 + 0.079/0.351 \times 160^5 + 0.062/0.351 \times 550^5]^{1/5} = 390 \text{ kN}$$

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:

$$ADTT_{SL} = p \times ADTT \quad (2)$$

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:

$$N=11\,232\times365\times120=491\,196\,600\text{ 次}$$

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

$$N_i=c_i^5\times N\tag{3}$$

将表中相应数字代入式(3)并求和,使得 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 $N_{01}=N_{06}=491\,196\,600\text{ 次}$;车道

2 和车道 5 各为 $11\,232\times0.75=8\,424\text{ 辆/d}$,120 年总的荷载循环次数为 $N_{02}=N_{05}=368\,971\,200\text{ 次}$ 。

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:

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

3.3 按 Eurocode 1 计算

该规范在采用疲劳荷载模式 3 计算时(4×120 kN=480 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(4×36 kN=144 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 $N_T=614\,939\,086\text{ 次}$ 。

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,动荷载增计值取 15%,于是疲劳试验荷载幅度应为:

$$\triangle P=7.933\times1.15\times56.4=515\text{ kN}$$

根据 BS 5400,疲劳试验荷载幅度应为:

$$\triangle P=10.835\times56.4=611\text{ kN}$$

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

