

文章编号: 1003-1995(2015)10-0019-07

铁路钢桥疲劳研究进展

刘晓光^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081; 2. 高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 近年来,我国铁路的运输格局发生了较大变化:一方面,建成了大量的高速铁路,铁路钢桥跨度不断增大,同时出现了大量新型构造细节;另一方面,既有铁路将逐步以货运为主,钢桥面临着轴重增加和运量增大的挑战。此外,我国将新建轴重 30 t 级专用重载铁路,在轴重显著增加的情况下,钢桥构造细节的疲劳问题也更为严峻。疲劳一直是钢桥研究领域一项重要的课题,在新的运输形势下,新型构造细节的疲劳设计以及既有钢桥的疲劳评估,均成为目前铁路钢桥研究中需要更加重视的课题之一。本文从铁路钢桥疲劳设计方法、设计荷载、性能试验和寿命评估等角度出发,对铁路钢桥疲劳研究现状进行了分析,提出了需要进一步研究的关键技术问题。

关键词: 铁路钢桥 疲劳设计荷载 疲劳性能 疲劳寿命评估

中图分类号: U441⁺.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1995.2015.10.04

纵观世界钢桥的发展历史,从 1779 年英国的第一座铁桥到 1874 年的第一座钢桥,再到 1880 年的第一座铁路钢桥,钢(铁)桥已经有 200 多年的历史^[1]。

随着钢材制造加工技术的不断进步,钢材的强度不断提高,性能不断优化,我国钢桥所用钢材也经历了由 Q235q 到 Q345q, Q370q 再到 Q420q 的过程。近年来出现了高强钢、耐候钢、Z 向钢等类型的钢材,使钢桥的建造技术有了进一步的提升,也为钢桥跨度的增加提供了便利。在钢桥的连接方面,经历了销钉连接、铆接、栓(高强螺栓)焊混合和全焊的发展过程,现代钢桥工厂制造全部采用焊接,工地拼装多采用焊接为主栓接为辅的连接方式^[2]。在钢桥的结构形式方面,对于中小跨度桥梁,以板梁桥、桁梁桥为主,当跨度增加时,斜拉桥和悬索桥以其优越的跨越能力,替代了桁梁桥。随着桥上搭载线路的增加,钢桥主桁结构由双主桁演变为三主桁,桥面系由纵横梁明桥面变为板桁组合、箱桁组合结构。与此同时,铁路钢桥也由传统的拼装节点过渡为整体节点,进而发展至整桁片甚至整节段焊接。这些变化带来了大量材料、结构和工艺等方面的创新和突破,主要体现在新建高速铁路大跨度桥梁中。

我国既有铁路钢桥部分建于解放前,当时的设计、材料和施工等方面的技术水平有一定的局限性,加之

近年来高速铁路不断建成,既有铁路逐步以货运为主,列车轴重将由 23 t 逐渐增加至 27 t,相应运营次数、年运量都会增加,有些钢桥已经出现了一些因疲劳问题引发的裂纹^[3]。轴重增加至 27 t 后,因运营荷载效应与设计荷载接近,将导致桥梁结构应对病害的安全储备降低,大运量的长期运营也会加剧结构状态劣化,既有钢桥的疲劳性能是否能满足安全性要求,需要予以重视。另外,随着经济的发展,对能源的需求日益增长,我国将新建轴重 30 t 级的专用重载铁路,钢桥原有的构造是否具备足够的疲劳强度也值得探讨。

综上,在铁路钢桥的疲劳研究中,既需要针对新建钢桥中不断出现的新型构造细节的疲劳性能进行研究,又需要针对既有钢桥的疲劳寿命进行研究。本文试图从铁路钢桥疲劳设计方法、设计荷载、性能试验和寿命评估等角度出发,对铁路钢桥疲劳研究现状进行分析,提出需要进一步研究的关键技术问题。

1 疲劳设计方法及规范的制定

1.1 疲劳设计方法

疲劳设计方法主要包括无限寿命设计、安全寿命设计、损伤容限设计、疲劳可靠性设计和通过疲劳试验设计等^[4-6]。目前,各国桥梁规范主要采用无限寿命设计和安全寿命设计方法进行疲劳设计。损伤容限设计是断裂力学理论在工程设计中成功应用的一种设计方法,各国航空设计、压力容器和焊接结构的设计已开始使用这种方法。随着可靠性理论不断发展完善,疲劳可靠性设计法也逐渐应用于钢桥的疲劳设计中。

收稿日期: 2015-08-31; 修回日期: 2015-09-10

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2013G010-A)

作者简介: 刘晓光(1961-),男,研究员,博士。

1) 无限寿命设计法

无限寿命设计的目标是检算部位在长期反复荷载作用下,不产生疲劳裂纹或即使已经产生疲劳裂纹,但不会继续扩展,判断条件是最大应力幅 $\Delta\sigma_{\max}$ 小于疲劳极限 $\Delta\sigma_f$ 。

在工程应用中,一般根据工程结构的使用期限,确定合适的循环次数 N_L ,规定构件承受 N_L 次应力循环而不破坏的最大应力为“条件疲劳极限”或“条件持久极限”。欧洲规范 Eurocode 3^[7] 和我国的《铁路桥梁检定规范》(2004)^[8] 规定, 5×10^6 次循环的疲劳强度 $\Delta\sigma_d$ 为等幅疲劳极限,采用 $\Delta\sigma_d$ 作为疲劳应力幅评判标准,即最大应力幅 $\Delta\sigma_{\max} < \Delta\sigma_d$ 时,便不会导致疲劳。我国《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10002.2—2005)^[9] 和美国 AREMA(2010)^[10] 则规定了 2×10^6 次循环的疲劳强度为评判标准。

可以看出,各国对于疲劳强度评判标准,并不统一,美国和我国将 2×10^6 次循环的疲劳强度作为评判标准,是基于当时的运输状态,认为桥梁寿命期内的最大应力循环次数不会超过 2×10^6 次。事实上,按照目前我国的运营状态,已不止 2×10^6 次,尤其是影响线较短的桥面系杆件,在整个寿命期内,运营次数已远远超过 2×10^6 次。鉴于此,我国提出了损伤修正系数,即在考虑实际车辆基础上,将疲劳应力幅换算至 2×10^6 次,仍以 2×10^6 次疲劳强度作为检算标准。

2) 安全寿命设计法

安全寿命设计的目标是结构在指定使用期内不发生疲劳破坏,检算应力幅可以超过疲劳极限。安全寿命设计方法也是根据构造细节的 $S-N$ 曲线进行设计,与无限寿命设计法不同,安全寿命设计方法使用的是 $S-N$ 曲线的左支,即考虑循环次数增加引起疲劳强度下降的情况,不同等级荷载下的疲劳应力都应考虑,并不像无限寿命设计方法仅考虑最大应力。采用安全寿命进行疲劳设计时,一般采用 Miner 线性损伤累积理论来计算损伤度,保证损伤度在使用期内 < 1 。我国《铁路桥梁检定规范》中规定,既有桥梁分两步进行疲劳评估,其中第二步的评估方法采用的即是安全寿命设计的思想。

3) 损伤容限设计法

损伤容限设计是通过控制疲劳裂纹发展进行设计,目标是保证含裂纹构件的安全。思路是认为构件存在初始裂纹,通过无损探伤或者经验假定,确定合适的断裂判据和疲劳裂纹扩展模型,预测指定时期内裂纹的发展情况,以保证裂纹扩展不会引起结构破坏。进行损伤容限设计时,需要制定适当的检查程序和间隔周期,以及时发现裂纹,确保结构安全。损伤容限设

计允许构件产生裂纹并扩展,但要确保在检查周期内裂纹不致扩展到引起结构破坏的地步,与安全寿命设计法的思想一致,区别在于采用的计算方法不同,安全寿命设计法是基于 $S-N$ 曲线,损伤容限设计法是基于断裂力学。

4) 疲劳可靠性设计法

前述三种疲劳设计方法都是基于应力、疲劳强度或者裂纹长度、裂纹扩展模型等,相关参数都是确定的。然而,实际上这些参数都属于不确定的数值,而是按照一定概率分布的函数。疲劳可靠性设计时,不但需要知道各参数的平均值,还要知道相应的概率分布类型。通过分布类型获得分布曲线,就可以得到强度超过应力的概率,即构件的可靠度。应用概率统计理论,就可以在给定的可靠指标下进行结构疲劳可靠性设计。

5) 依据试验设计

对于新型构造细节,规范对其 $S-N$ 曲线没有规定,事先应开展疲劳试验,根据疲劳试验结果进行设计。疲劳试验的试件可以采用足尺节段模型,或者选择局部关键构造细节进行设计。为了能够准确再现实际结构的疲劳破坏,材料、细节尺寸和制造方法应与实桥相符。

1.2 疲劳设计规范的制定

1931 年,德国设计规范制定了钢桥焊缝的疲劳检算方法。1936 年,美国出版发行了《公路和铁路焊接桥梁规范》,1947 年在大量钢桥焊接构造疲劳试验数据的支撑下,制定了《公路铁路焊接桥梁技术规范》。之后,西德、前苏联、美国等国都对焊接钢桥开展了疲劳研究,并制定了相关设计规范。1970 年以后,美国对工字形焊接钢梁展开了大量疲劳试验,并于 1977 年修订相关设计规范。英国于 1980 年颁布了 BS 5400 规范,其中的《钢、混凝土和组合桥梁疲劳设计规范》反映了当时钢桥疲劳研究的最新成果。同时,国际标准化组织(ISO)、欧洲钢结构学会(ECCS)和国际铁路联盟(UIC)也提出了钢结构的疲劳检算方法。1990 年以后,随着钢桥设计规范的进一步发展,欧洲规范 Eurocode 3 和美国公路桥梁规范 AASHTO 均引入了基于 $S-N$ 曲线的疲劳可靠性设计方法,通过引入荷载分项系数、疲劳抗力分项系数等实现了疲劳可靠性设计^[11]。

我国规范中钢桥疲劳设计主要经历了 3 个阶段:第 1 阶段是统一安全系数下的容许应力设计法,以 1951 年,1959 年设计规范为代表;第 2 阶段是分细节的容许应力设计法,以 1975 年,1986 年和 1996 年的规范为代表;第 3 阶段是考虑累积损伤的分细节容许

应力设计法,以1999年,2005年规范为代表。在疲劳可靠性设计方面,自1984年以来,铁科院在大量试验、调查和分析的基础上,对钢桥的疲劳可靠性开展了研究,于1991年提出了《铁路钢桥可靠度疲劳设计规范(建议稿)》。自2010年铁路部门开始对铁路桥涵极限状态设计法进行深入研究,并于2014年正式发布了《铁路桥涵极限状态法设计暂行规范》(Q/CR 9300—2014)。目前,正积极推进相关研究的进一步发展。

2 疲劳设计荷载及相关参数

2.1 疲劳设计荷载

20世纪70年代以前,各国在进行钢桥疲劳设计时,采用与静力强度设计相同的活载。不仅简单明了,具有足够的安全余量,还避免了繁琐的调查统计工作,在很大程度上减轻了设计计算的工作量。然而,钢桥疲劳是在不同类型车辆荷载反复作用下,逐步损伤累积的过程,因此,采用实际车辆进行钢桥疲劳设计,会使结果更为准确。于是,英国和美国对疲劳车辆荷载进行了研究,提出疲劳荷载的研究方法以及计算模型。根据研究成果,BS 5400 桥梁设计规范^[12]、Eurocode 设计规范^[13]和 AASHTO 桥梁设计规范^[14]等,都明确规定了用于钢桥疲劳设计和寿命评估的疲劳荷载谱。由于各国的国情与运输情况不同,疲劳荷载谱也相应有所差别。20世纪80年代,铁科院对我国17个编组站的列车编组情况进行了调查,经统计分析后,制定了三级运量的典型疲劳列车,在《铁路桥梁检定规范》(2004)中进行了具体规定;并于2008年对全国54条干线的年运量、运营列车的编组情况进行调研,制定了新形势下四级运量的典型疲劳列车^[15],为我国采用实际车辆进行疲劳设计奠定了基础。

2.2 相关参数

在进行疲劳设计时,针对作用力和抗力还应分别考虑动力系数、损伤修正系数、疲劳多线系数、次应力修正系数和板厚修正系数等相关参数。

2.2.1 动力系数

在进行钢桥疲劳应力谱计算时,虽然各国规范对动力系数的取值均不相同,但都认为疲劳计算采用的动力系数应与静力强度计算采用的不同。AASHTO 规定,疲劳验算的动力系数1.15。BS 5400 规定一般情况不考虑动力系数,当检算部位位于伸缩缝前后5m的区段内,则应考虑动力系数;Eurocode 1 在制定疲劳车的轴重时,就考虑了动力系数。我国《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10002.2—2005)和《铁路桥梁检定规范》(2004)对于该取值分别进行了不同的规定。设计规范中的动力系数仅适用于跨度为168m以下的

桁梁和40m以下的板梁,且列车运营速度最大为160km/h;检定规范中的动力系数也仅适用于200km/h以下的运营速度。随着我国桥梁建造技术的不断进步,已建成了大量跨度超过168m的钢桥,速度也达到了350km/h,目前规范规定的动力系数(疲劳)是否依然适用于超大跨度桥梁的设计,需要展开相关的研究。

2.2.2 损伤修正系数

为减少计算工作量,通过考虑设计使用年限内实际车辆与设计荷载之间的差异,并将寿命期内应力幅换算至验算点,制定了不同跨度(影响线长度)桥梁的损伤修正系数。在进行设计时,只需计算设计荷载下的疲劳应力幅,采用损伤修正系数对计算应力幅进行修正,将设计荷载下的应力幅转化为实际车辆荷载下的应力幅;这样一方面减小了设计工作量,另一方面又使疲劳检算结果更加准确。我国《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10002.2—2005)规定的损伤修正系数,设计荷载是中—活载图式,疲劳车辆是在20世纪80年代实际车辆调研的基础上,考虑了2000年后新增加的双层集装箱制定的。由于当时我国铁路运输以客货共线铁路为主,所以损伤修正系数的取值是通用的。如前所述,我国运输格局已经发生了较大变化,线路功能相应有所区分,损伤修正系数必然有所差异。所以目前损伤修正系数的取值已无法反映实际运输状态,需要展开相关研究工作,制定适用于新运输形势下的损伤修正系数,以保证新桥设计、旧桥评估的准确性。

2.2.3 疲劳多线系数

对于多线铁路,由于各线列车活载同时作用于桥上的概率很小,考虑列车在桥上相遇的概率和次数而引入多线系数,对采用一线加载的计算应力幅进行修正。我国《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10002.2—2005)对双线系数进行了规定。目前我国新建成的铁路桥梁已多达6线,如南京大胜关长江大桥、重庆白沙沱长江特大桥等。近年来,铁科院对疲劳检算多线系数进行了系统研究,得到了规律性认识,结合多座桥梁的工程应用实践,提出了通用的多线系数计算方法。并针对近年铁路钢桥结构特点,系统分析了现有结构形式和不同运营条件下的多线系数特征,研究提出了客货共线、客运专线和货运专线疲劳多线系数(见表1),可供铁路桥梁相关规范修订时参考^[16]。

2.2.4 次应力修正系数

目前,大型桥梁设计主要采用建立全桥有限元空间模型的方法进行计算。有些桥梁由于节点刚度大,弯曲次应力较大,根据常规弯曲应力与轴向应力直接叠加的计算方法,疲劳应力幅已远超过了疲劳容许应力幅。于是研究人员开始追问构件在弯曲应力下的疲

表 1 不同钢桥结构形式和运营特征条件下多线系数的取值建议

结构形式	运营特征	线路数量	多线系数	
			平面模型	空间模型
三主桁斜拉桥 双主桁连续钢桁梁	两线高速、两线客货	四线	1. 85	2. 20
	四线客专	四线	1. 40	2. 05
三主桁钢桁拱桥	两线轻轨、两线高速、两线客货	六线		边桁 2. 20 中桁 2. 40
双主桁斜拉桥	四线客专,两线货运双层布置	六线	2. 15	2. 40

劳性能是否与轴向应力下的相同,如果不同,疲劳应力是否有可能折减? 2007 年,铁科院开展了两种受力状态下箱形杆件隔板焊缝试件(图 1)的疲劳试验^[17],对其疲劳性能进行对比分析。研究表明,弯曲应力下试件的疲劳性能优于轴向应力下的疲劳性能。在杆件同时承受轴向应力和弯曲次应力作用时,可以对弯曲次应力予以折减,折减系数建议取 0. 65。该研究成果对钢桥构造细节的疲劳检算意义重大。在后续研究中,可以对其他类型的构造细节展开类似试验,进一步验证次应力修正系数的通用性。



图 1 箱形杆件隔板焊缝弯曲试件

2. 2. 5 板厚修正系数

通常钢板厚度越大,存在缺陷的可能性也越大,疲劳强度越低,因此,各国规范均引入板厚修正系数对厚板构造细节的疲劳强度予以折减。我国《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10002. 2—2005)也有相应规定,对板厚 > 25 mm 的厚板构造细节,提出了板厚修正系数的计算公式;但是随后的一些研究发现,该公式对于某些构造细节需要进一步细化。铁科院于 2007—2012 年间对箱形杆件隔板焊缝构造(图 2)开展了大量疲劳试验^[18-20],涉及的板厚组合包括 50 mm + 14 mm(主板 + 隔板), 24 mm + 14 mm, 50 mm + 20 mm, 19 mm + 19 mm 和 20 mm + 16 mm 等。结果表明,对于该构造疲劳强度与板厚并不明显相关,有些情况下,主板厚的构造疲劳强度反而要高一些,这是由于主板越厚焊接对其的损伤就越小,而且对于该构造主要是主板在受力,隔板只作为附连件焊接于主板,并不参与受力。



图 2 箱形杆件隔板板厚系数试件

因此,若出现类似构造细节,建议进行疲劳试验,以验证是否需要采用板厚修正系数对其疲劳强度予以折减。

3 构造细节疲劳性能试验

1966—1974 年期间,美国 Lehigh 大学对 531 根大型焊接钢梁进行了疲劳试验,根据试验结果,确定了一些典型构造细节的 S-N 曲线,奠定了钢桥构造细节疲劳设计的基础。1974 年, J. W. Fisher 提出钢桥焊接构造的疲劳性能取决于应力幅 $\Delta\sigma$, 而与钢材的强度指标、最大应力和应力比无关。此后,英国、法国、德国、日本和加拿大等国也开展了相关的疲劳试验,验证了 J. W. Fisher 的结论。这一结论随后被世界各国研究人员接受,并应用于桥梁钢结构的设计规范中^[21]。

我国在 1965—1970 年建设成昆铁路时,开展了栓焊钢梁构造细节的疲劳试验,为 1975 年铁路钢桥设计规范的制定奠定了基础。1997 年,铁科院对芜湖长江公铁两用大桥的关键构造细节进行了疲劳试验,初步形成了分细节、基于容许应力幅的铁路钢桥疲劳设计方法,并纳入我国铁路桥梁钢结构设计规范。2000 年以来,铁科院以武汉天兴洲公铁两用大桥、苏通大桥、南京大胜关长江大桥、重庆菜园坝长江大桥、郑州黄河大桥、安庆长江大桥、铜陵长江大桥等多座新建大跨度

铁路桥梁为工程背景,对各类新型构造细节进行了系统的疲劳性能试验研究,为现行规范的更新提供了丰富的试验数据。

3.1 主桁杆件构造细节疲劳性能试验

大跨度钢桥主桁杆件常见的构造细节主要包括箱梁弦杆棱角焊缝承受正应力构造、箱梁竖板与平联节点板连接构造、箱梁盖板与平联节点板连接构造、主桁弦杆横隔板附连件构造、箱形斜杆节点外焊接时腹板与盖板焊接交叉部位过焊孔构造、箱形杆件腹板与整体节点熔透焊缝端部构造、下弦整体节点焊缝向杆件棱角焊缝过渡构造、斜拉索锚板剪切焊缝构造、横隔板与纵肋交叉焊构造等。主桁杆件常见构造细节的疲劳 $S-N$ 曲线见图 3。

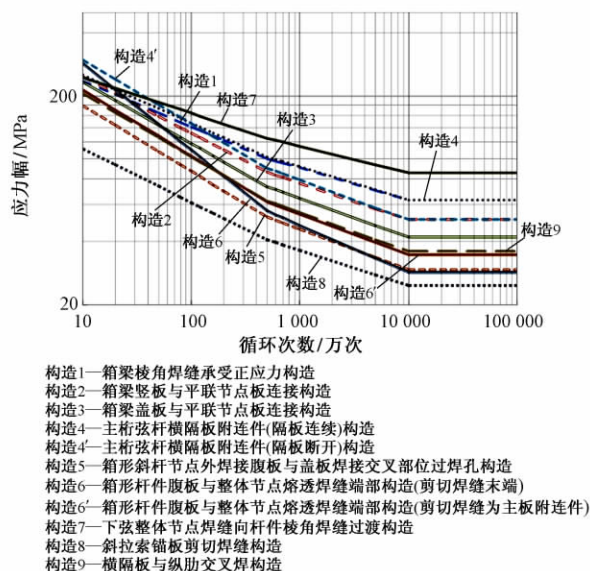


图3 主桁杆件构造细节疲劳 $S-N$ 曲线

由图3可知,斜拉索锚板剪切焊缝构造(构造8)的疲劳强度最低,其200万次疲劳强度为51.6 MPa,该构造在实桥中本身的应力幅较小,以某跨度1 092 m的斜拉桥为例,在中一活载设计荷载下,锚拉板的最大应力幅值为28 MPa,所以认为该构造的设计是合理的。作为主桁杆件构造细节,箱形斜杆节点外焊接时腹板与盖板焊接交叉部位过焊孔构造(构造5)200万次疲劳强度较低,为69.9 MPa。而主桁杆件其他构造的疲劳强度最低为82 MPa,该构造将主桁杆件的疲劳容许应力降低约15%,是控制设计的薄弱环节。

3.2 桥面系构造细节疲劳性能试验

桥面系常见的构造细节主要包括正交异性桥面板工地不等厚对接焊构造、正交异性钢板面板槽形闭口肋嵌补段对接焊构造、桥面系栓焊组合接头构造。桥面系各种常见构造细节的疲劳 $S-N$ 曲线见图4。

由图4可知,正交异性桥面板工地不等厚对接焊

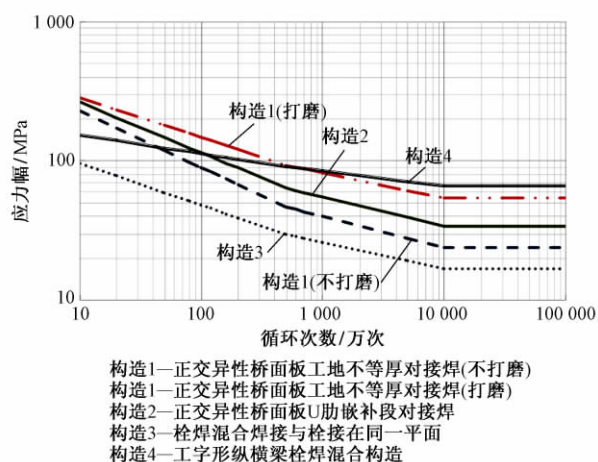


图4 桥面系构造细节疲劳 $S-N$ 曲线

构造(构造1),在不等厚坡度比例满足规范的前提下,不打磨时其疲劳强度仅为67.9 MPa,较打磨后的疲劳强度低44%。设计时要严格按规范规定进行打磨处理,以保证其疲劳强度。另外,栓焊混合焊接与栓接在同一平面构造(构造3)的200万次疲劳强度仅为39.3 MPa,需要进行优化。

3.3 主桁与桥面系连接构造细节疲劳性能试验

主桁与桥面系连接常见构造细节主要包括横梁端部负弯矩区翼缘与主桁整体节点焊接、横梁与整体节点十字对接焊缝、桥面板与箱形杆件整体节点处盖板焊缝承受纵向力构造、桥面板与箱形杆件整体节点处盖板焊缝承受横向力构造、弦杆盖板与桥面板不等厚十字对接焊构造等。主桁与桥面系连接常见构造细节的疲劳 $S-N$ 曲线见图5。

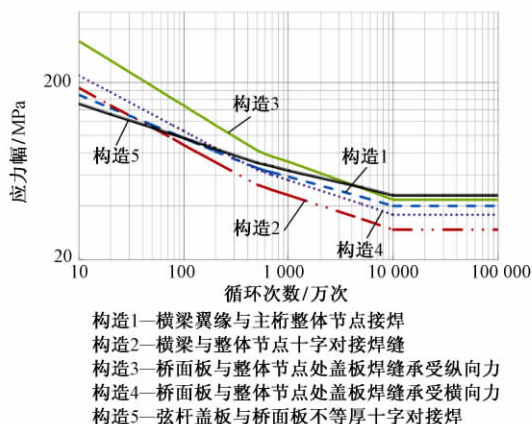


图5 主桁与桥面系连接构造细节疲劳 $S-N$ 曲线

由图5可知,当应力循环次数达到200万次以上时,与其它同类构造相比,横梁与整体节点十字对接焊缝(构造2)的疲劳强度与其它同类构造相比,明显偏低,需要予以重视。

4 疲劳寿命评估

疲劳寿命评估主要有基于 $S-N$ 曲线和基于断裂力学两种方法。随着可靠性理论的发展,将该理论引入到上述两种评估方法中,也逐渐开始受到各国学者的重视^[22]。

基于 $S-N$ 曲线的疲劳寿命评估方法原理简单,操作方便,易于理解。在确定疲劳细节和寿命期内荷载谱之后,评估即可进行,目前各国规范多采用该方法进行疲劳评估。但是采用设计 $S-N$ 曲线进行评估时,由于设计 $S-N$ 曲线考虑了一定的安全系数,导致该方法的评估结果偏于保守。另外,对于年代久远的桥梁,由于其历史荷载谱的残缺造成寿命评估存在一定的困难。

基于断裂力学的疲劳寿命评估方法承认初始缺陷的存在,评估的立足点是结构的目前状况,对于无法获知受载历史的既有钢桥的剩余寿命评估意义重大。但是,对于栓焊钢桥,评估位置处应力强度因子、临界裂纹尺寸、裂纹扩展模型的确定还有一定的困难。例如,目前应力强度因子手册中仅对简单的裂纹给出了应力强度因子计算公式,而栓焊钢桥中存在较多复杂构造细节且受力状态复杂,导致应力强度因子的计算存在一定难度。再如,某些裂纹起始于焊缝最终发展向母材,某些构件开裂后可能会发生应力重分布致使裂纹并不会进一步扩展,螺栓预紧力也对疲劳裂纹扩展速率有一定减缓作用等;计算中要考虑这些因素还有一定难度。另外,临界裂纹尺寸与材料的断裂韧性有关,而不同规格的桥梁钢和焊缝的断裂韧性国内还未见有规范规定取值。对于疲劳裂纹扩展模型中参数的取值,各国学者的研究结论也各不相同。所以要采用断裂力学进行疲劳寿命评估,还需要进行长期细致深入的研究。此外,采用断裂力学进行评估,要涉及到复杂的力学模型和计算公式,在今后的研究中,应着力于制定一种简便易用的评估方法。

基于可靠性理论的疲劳寿命评估方法认为疲劳荷载和构造细节的疲劳抗力曲线都不是确定的数值,而是符合一定概率分布的随机变量,该方法将可靠性理论引入疲劳荷载和疲劳抗力曲线的确定中,以数理统计和概率论为基础,避免了一些人为因素,能够更客观、实际地反映疲劳寿命,是疲劳寿命评估的发展方向之一。有些学者采用指定次数下疲劳作用力与抗力关系的极限状态方程,有些学者采用寿命极限状态方程,对于两种极限状态方程的差异,或者哪个方程更为科学,目前还没有定论。另外,对于目标可靠指标的确定,既有桥与新建桥取值是否应该一致,或者既有桥的

指标能否适当降低,降低到什么程度。这一系列的问题,仍需要继续开展大量的资料调研及深入研究。

综上,建议铁路钢桥疲劳寿命评估主要采用基于 $S-N$ 曲线的方法,并结合可靠性的方法得到较为科学的结论。另外,对于某些已开裂的非关键部位,在应力强度因子和断裂韧性能够确定、且疲劳扩展模型经过验证的情况下,可以采用基于断裂力学的方法来制订相应的检修周期。

5 结语

1) 在疲劳设计方法方面,针对目前采用的几种疲劳设计方法,包括无限寿命设计法、安全寿命设计法、损伤容限设计法、疲劳可靠性设计法以及依据试验设计法等,本文介绍了其基本思路和应用条件。指出目前各国设计规范采用的是无限寿命设计法,但是疲劳强度评判标准有所区别,有些国家以 5×10^6 次疲劳强度为验算点,有些国家以 2×10^6 次疲劳强度为验算点。另外,对国内外疲劳设计规范的制定历程进行了简要介绍。

2) 在疲劳设计荷载及相关参数方面,回顾了国内外的研究历程,对动力系数、损伤修正系数、疲劳多线系数、次应力修正系数以及板厚修正系数等相关参数作了介绍。指出在新的运输形势下,对各疲劳设计参数的制定中,需要进一步研究的技术问题。

3) 在构造细节疲劳性能试验方面,回顾了国内外的研究历程,介绍了铁科院近年来在疲劳试验方面的研究成果,指出了需要予以重视的构造细节,包括箱形斜杆节点外焊接时腹板与盖板焊接交叉部位过焊孔构造、栓焊混合焊接与栓接在同一平面构造、横梁与整体节点十字对接焊缝等。

4) 在疲劳寿命评估方面,对目前采用的几种疲劳寿命评估方法,包括基于 $S-N$ 曲线和基于断裂力学的方法进行研究分析。建议在目前的技术状态下,进行疲劳寿命评估时,采用基于 $S-N$ 曲线的疲劳寿命评估方法,并结合可靠性方法得到较为科学的结论。对于某些已开裂的非关键部位,在计算参数易于确定的情况下,可以采用断裂力学的方法来制订相应的检修周期。此外,在疲劳寿命可靠性评估中,建议对疲劳寿命评估极限状态方程和目标可靠指标进行深入研究;在基于断裂力学的寿命评估中,应着力研究制定一种简便易用的评估方法,避免在设计和评估中进行大量复杂的数学运算。

参 考 文 献

- [1] 刘晓光. 钢桥疲劳研究关键技术分析[J]. 钢结构, 2007, 22 (5): 7-9.

- [2] 刘美兰. 钢桥结构设计与施工控制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [3] 方兴. 典型裂纹成因及整治措施的研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010.
- [4] 陈维珍. 钢桥疲劳设计方法研究 [J]. 桥梁建设, 2000(2): 1-3.
- [5] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [7] European Committee for Standardization. BS EN 1993-1-9 Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-9: Fatigue [S]. London: European Committee for Standardization, 2005.
- [8] 中华人民共和国铁道部. 铁运函[2004]120号 铁路桥梁检定规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [9] 中华人民共和国铁道部. TB 10002.2—2005 铁路桥梁钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [10] American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. Manual for Rail Way Engineering [S]. Lanham: AREMA, 2010.
- [11] 杨晓红. 基于可靠度理论的钢桥剩余疲劳寿命评估 [D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
- [12] BSI. BS 5400 Steel, Concrete and Composite Bridges [S]. London: BSI, 1980.
- [13] European Committee for Standardization. pr EN 1991-2 Eurocode 1: Actions on structures—Part 2: Traffic Loads in Bridges [S]. London: European Committee for Standardization, 2001.
- [14] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. Washington: AASHTO, 2010.
- [15] 张玉玲. 采用新活载标准铁路钢桥设计参数及规定的研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2008.
- [16] 张玉玲. 铁路钢桥多线系数研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2012.
- [17] 张玉玲, 刘晓光. 武汉天兴洲公铁两用大桥结构构造疲劳性能试验研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 2007.
- [18] 张玉玲, 荣振环. 南京大胜关长江大桥结构构造疲劳性能试验研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 2007.
- [19] 王丽, 张玉玲. 大跨度铁路斜拉桥关键技术试验研究——新型钢结构焊接构造疲劳性能试验研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010.
- [20] 王丽, 张玉玲. 随机变幅疲劳荷载作用下钢桥节点板交叉焊缝疲劳性能试验研究 [J]. 铁道建筑, 2013(11): 1-4.
- [21] 任伟平. 焊接钢桥结构细节疲劳行为分析及寿命评估 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [22] 王春生. 铆接钢桥剩余寿命与实用安全评估 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.

Development of fatigue research on railway steel bridges

LIU Xiaoguang^{1,2}

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory for Track Technology of High-speed Railway, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, change happened in China's railway transportation pattern. On the one hand, a number of high speed railways have been built. The span of the railway steel bridge kept increase. At the same time, a large number of new structural details emerged. On the other hand, the existing railway used for passengers and freight will gradually give priority to freight transportation. Steel bridge is faced with the challenges of the increase of axle load and traffic volume. In addition, our country will build special heavy haul railway carrying axle load up to 30 t. With significant increase in axle load, the fatigue problem of structural details of steel bridge is getting more and more serious. Fatigue has always been an important subject in the research field of steel bridge. In the new transport situation, fatigue design of the new structural details and fatigue assessment of the existing steel bridges have become one of the issues that need to be paid more attention. In this paper, from the aspects of fatigue design methods, design load, performance test and life assessment of railway steel bridge, the current status of fatigue in railway steel bridge is analyzed and the key technical problems that need to be further studied are put forward.

Key words: Railway steel bridge; Fatigue design load; Fatigue performance; Fatigue life assessment

(责任审编 孟庆伶)