

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.007

我国缆索支承桥梁钢箱梁疲劳损伤研究现状

吉伯海

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要: 针对钢桥运营安全亟需关注的热点问题之一——缆索支承桥梁钢箱梁的安全性、耐久性,回顾我国钢箱梁疲劳损伤相关研究概况及主要成果,分析总结过去研究中存在的难点与热点问题,并对今后的发展方向提出了展望与建议。

关键词: 缆索支承桥梁;钢箱梁;车辆荷载谱;疲劳损伤机理;维护技术;综述

中图分类号: U441⁺.4; U448.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)05-0410-06

Current status of research on fatigue damage in steel box girder of cable-supported bridge in China

Ji Bohai

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The safety and durability of the steel box girder of cable-supported bridges has become a compelling subject in steel bridge safety operation. This paper provides a review on the research status and main results of fatigue damage in steel box girders in China, presents an analysis of the difficulties and pressing issues in previous research, and puts forward prospects and suggestions for the future development.

Key words: cable-supported bridge; steel box girder; vehicle load spectrum; fatigue damage mechanism; maintenance technology; review

我国缆索支承桥梁建设规模和数量已处于世界前列,桥梁结构不断向着大、轻、柔的方向发展。对于大跨径缆索支承桥梁而言,由于自重限制,大多采用自重较小、抗扭强度高、制作施工便捷的钢箱梁截面形式^[1]。但钢箱梁构造复杂,易发生疲劳开裂问题。随着桥梁服役年限的增长及交通运输行业的快速发展,我国缆索支承桥梁钢箱梁疲劳损伤问题日益突出^[2]。

由于钢箱梁的构造特点,其疲劳损伤难以避免。德国、英国 20 世纪 60 年代建造的钢桥,在 80 年代就出现了不同程度的疲劳开裂;de Jong^[3]、Wolchuk^[4]、Boersma 等^[5]调查发现荷兰多座钢桥在使用 20~30 a 后,钢桥面板均出现不同类型的疲劳裂纹。我国多座缆索承重桥梁也不同程度地出现疲劳开裂问题^[6-7],如主跨 888 m 的广东虎门大桥,通车 6 a 后不断出现疲劳裂纹,虽多次局部修补,但效果欠佳^[8];厦门海沧大桥在 U 肋嵌补段及纵隔板的端部发现了疲劳裂纹^[9]。

疲劳裂纹初期较难发现,一旦裂纹萌生则数量和长度发展迅速,直接威胁结构受力安全,还会导致渗漏等次生病害。如 1967 年倒塌的美国的银桥、1994 年坍塌的韩国圣水大桥,疲劳是造成整个大桥突然倒塌的主要原因之一。据美国土木工程学会(ASCE)统计,80%~90% 钢结构的破坏与疲劳损伤有关^[10]。一直以来疲劳都是钢桥乃至钢结构领域亟需解决的难点问题之一。我国缆索支承桥梁的疲劳问题已成为我国钢桥维护领域面临的主要工作之一。

1 我国钢桥现状

中国建设钢桥的历史可以追溯到百年以前,但超过百年的老龄钢桥大多是外国人设计并建造的。

收稿日期:2014-05-27

基金项目:国家自然科学基金(51278166);高等学校博士学科点专项科研基金(20120094110009)

作者简介:吉伯海(1966—),男,江苏扬州人,教授,博士,主要从事钢桥疲劳与维护研究。E-mail:hbbhji@163.com

1934—1937 年,茅以升先生带领中国工程师设计并建造了钱塘江大桥,开创了我国自行建造钢桥的历史。中国钢桥是从建设铁路桥起步的,相当长的时间里是采用铆接制造技术;后以成昆铁路建设为契机,开始进入栓焊钢桥时代;1996 年建成通车的长江三峡西陵大桥是中国自己设计建造的第一座全焊钢箱梁公路桥,虽然较之世界上第一座全焊悬索钢桥——Severn 大桥(英国,1966 年)晚了 30 a,但中国焊接钢桥已经开始疾步赶上世界先进水平。

国内外已建造了大量的钢桥,日本公路桥梁中钢桥占 41%,美国占到 33%^[11]。我国钢桥也有着广泛的应用,尤其在大跨径缆索支承桥梁中,钢箱梁是其主要的主梁结构形式之一。截至 2013 年,世界跨径排名前 10 位的已建斜拉桥和悬索桥中,均各有 5 座位于中国。当代我国钢桥建设成就的里程碑如图 1 所示。

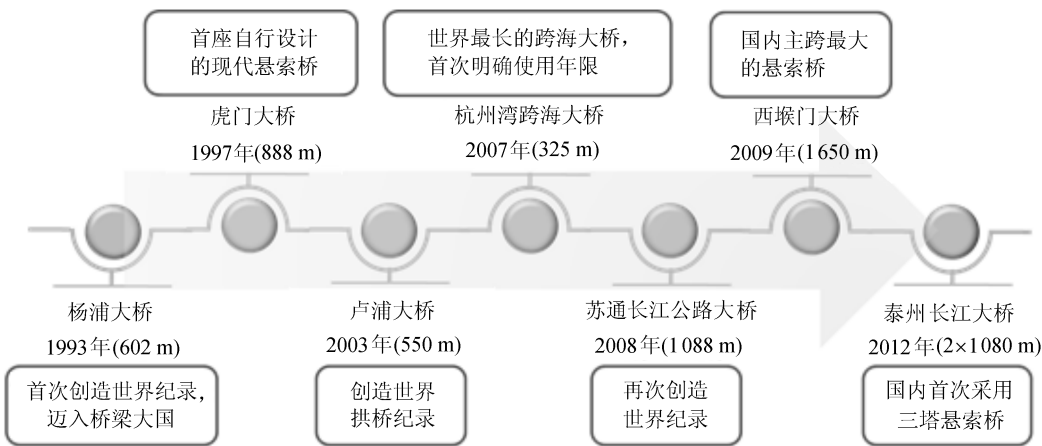


图 1 当代我国桥梁建设成就的里程碑

Fig. 1 Contemporary bridge construction achievements in China

随着我国综合国力的不断增强和钢材产量、质量的大幅度提高,钢桥将得到进一步发展和应用。但随着已建缆索支承桥梁服役年限的增长,其运营安全与维护问题亦日显突出^[12-14]。目前相关研究认为,钢箱梁病害主要有涂装劣化、腐蚀和疲劳损伤等 3 种类型。涂装劣化和腐蚀在维护过程中比较容易发现,也可以及时采取相应的维护措施;而疲劳开裂产生机理复杂,初期不易发现,具有检测及修复困难、修复成本高等特点,如英国 Severn Cross 悬索桥的疲劳损伤加固费用高达钢桥面板建设费用的 2.5 倍。疲劳裂纹的发生会直接威胁结构的受力安全,严重的可能会导致桥梁倒塌事故^[15-17]。国内对钢箱梁疲劳问题的理论研究滞后于实践研究,钢箱梁疲劳损伤是我国在役缆索承重桥梁安全运营面临的核心难题之一。

2 我国钢桥疲劳问题研究现状

2.1 车辆荷载谱

对于大跨径缆索支承桥梁,随机车辆荷载是导致其钢箱梁疲劳问题突出的直接原因。车辆荷载的准确与否直接关系到疲劳研究结论的可靠性。美国、英国等国家的学者对其国内的车流交通进行了广泛研究及统计,并建立了适用于本国的疲劳车辆荷载模型。国外很多规范如 BS 5400^[18]、AASHTO-LRFD^[19]、Eurocode 3^[20]等均对疲劳荷载进行了明确规定。而我国 JTG D60—2004《公路桥涵通用设计规范》^[21]仅对强度设计时不利布置的标准活荷载进行了规定。已有实测结果表明,标准活荷载与实际车辆荷载对桥梁结构产生的损伤效应相差较大,采用标准车辆荷载进行结构疲劳设计不符合实际情况^[22]。

我国缆索支承桥梁在设计中尚无疲劳验算荷载可以参照。目前,国内已有部分研究针对局部地区交通状况给出了当地车辆荷载谱,如中交公路规划设计院统计分析了南京长江第三大桥、南京长江第二大桥及虎门大桥等的车辆荷载,得到不同车型对桥面板的损伤度^[23];河海大学根据 2006 年、2010 年江阴长江公路大桥实测车流建立了随机车辆荷载谱^[24-25]。然而由于架桥位置的不同,桥梁的日交通车流量亦存在明显差异,如东部沿海发达地区和西部欠发达地区同等级公路的车流量最大相差 10 倍之多。因此,仅参考现有的国外规范或我国部分地区的车辆荷载谱很难精确反映实桥的受荷状况,需要立足于当地的具体情况并根据具体统计数据来分析。

2.2 疲劳损伤机理

缆索支承桥梁的钢箱梁疲劳损伤机理因其结构的柔性而更为复杂。疲劳设计方法有安全寿命设计、损

伤容限设计和耐久性设计等,各种设计方法相互补充。安全寿命设计依据材料的 $S-N$ 曲线和 Miner 累计损伤理论;损伤容限设计以断裂力学为理论基础;耐久性设计则是以经济寿命控制为目标,需要定义构造细节疲劳质量和初始疲劳损伤状态^[26-28]。对于钢箱梁疲劳性能的研究来说,由于疲劳裂纹的存在,安全寿命设计不能完全确保安全。基于断裂力学的疲劳裂纹损伤理论克服了 $S-N$ 曲线的不足,并从机理上解释了疲劳现象,最早于 1957 年由 Irwin^[29] 指出可用应力强度因子 K 表示裂纹顶端应力奇异性大小;同年美国人 Paris 提出在循环荷载作用下,裂纹尖端的 K 幅值是控制构件疲劳裂纹扩展速率的基本参量^[30],并于 1963 年提出了著名的描述裂纹扩展速率的 Paris 公式。后来在解决工程实际问题时,许多学者对 Paris 公式的具体形式做了大量修正^[31]。但由于这些修正公式含有部分物理意义不明确或测量结果存在主观性的问题,因此存在应用局限性^[32]。目前对疲劳裂纹的扩展机理研究停留在理论层面。

2.3 疲劳损伤预测及评估

钢桥疲劳损伤的预测评估主要依据钢桥实测或计算的应变时程数据来判定关键构件的疲劳寿命,并给出疲劳微裂纹扩展趋势。20 世纪后半叶,随着新的试验手段、计算机和有限元应力分析计算等的发展和完善,国内外对疲劳现象的定性认识日臻完善,出现大量有关疲劳寿命预测的理论,也提出一些疲劳寿命预测模型^[33-35]。目前疲劳预测及失效评估方法主要有:(a)通过裂纹尺寸特征及应力突变等进行判断,该方法直观、简便,国内外疲劳试验多以应力突变和肉眼观测裂纹作为疲劳失效标准。(b)通过现有 $S-N$ 曲线计算疲劳累计损伤度,并以此判断剩余寿命。该方法运用最广泛,但需依赖较精确的荷载统计和应力计算,且存在一定的经验或半经验性质,通常应用于疲劳开裂前的损伤判断。(c)基于断裂力学的临界值法,通过断裂力学分析,研究疲劳开裂的发展规律以及疲劳裂纹扩展的全过程。(d)基于可靠度的分析方法,该方法考虑因素全面,理论依据充分,但分析时必须做一定的模型假设和简化。基于线弹性断裂力学的疲劳可靠性评估理论已在海外得到较多应用,而在国内尚处于起步阶段^[36-39]。目前这些方法在用于评估钢箱梁开裂后疲劳承载性能方面尚有许多细节有待研究。

2.4 钢箱梁疲劳损伤检测及修复

钢箱梁病害特征多样,产生原因复杂,维护方案的选择需要借助检测技术进行判断,然后确定相应的修复方法。我国现有的规范涉及钢箱梁疲劳裂纹成因和检测技术的内容较少,对于钢箱梁疲劳裂纹的检测依然以目视检查为主,辅以必要的工具(如放大镜、游标卡尺、钢尺等)。如需进行较为精确的疲劳裂纹检测,则需要借助仪器。常用的疲劳裂纹检测方法有无损检测和有损检测 2 种,在役钢箱梁的疲劳裂纹检测一般不用有损检测。部分无损检测法已用于钢箱梁裂纹的检测,如磁粉检测法、超声波检测法等,各有其优缺点,且未形成系统的检测方法。其他无损检测法如 X 射线检测法、脉冲涡流检测法、红外线热成像检测法等^[40-41],因各自不同的应用特点,在钢箱梁维护中的适用性有待研究。

目前在钢结构中常用的疲劳裂纹修复方法主要有止裂孔法、裂纹焊合法、钢板补强法、碳纤维补强法及渗透填充法^[42-43]。但考虑到钢箱梁复杂的局部构造,大多焊缝细节只有止裂孔法和裂纹焊合法适用,其他方法更多地适用于面板上的疲劳裂纹。钢箱梁受力复杂,采用止裂孔法只能对疲劳裂纹进行临时性止裂;裂纹焊合法虽然是对疲劳裂纹修复的一种比较彻底的方法,但该方法对重焊的质量要求很高,否则会引入新的缺陷,易引起二次开裂。日本近几年提出了 ICR 处理修复方法,开裂试件经过 ICR 处理后,疲劳裂纹闭合以降低裂纹扩展速率^[44]。该方法还能够对焊缝进行预处理,通过塑性变形施加残余压应力,以提高局部疲劳强度^[45-46]。ICR 处理修复方法目前处于起步阶段,国内无相关研究,在实桥修复中的实用性、局限性等还需进一步分析研究。

3 缆索支承桥梁钢箱梁疲劳研究发展方向

3.1 试验手段

我国现阶段钢桥疲劳设计大多借鉴现有的国外规范,未有可参考的基于国内加工工艺水平的钢桥面板疲劳强度曲线。疲劳试验结果具有较大离散性,验证钢箱梁各焊接细节疲劳强度曲线需要进行大量疲劳试验。国内基于名义应力法的大尺寸构造细节疲劳试验,大多采用 MTS 大型液压伺服疲劳试验机作为加载仪器,能够进行足尺寸的钢箱梁节段模型试验,但试验装置购置投入大、试验能耗高、加载频率低,往往得到一个数据点需要进行少则半个月、长则半年以上的试验。针对某一类构件细节总结其疲劳强度曲线需要至少几十个数据点,常规疲劳试验时间长、费用高昂。日本新研制的振动型疲劳试验机,通过电动机转动带动偏

心激振器输出荷载,通过弹簧传力施加预应力和调节振幅,振动频率可达 20 Hz,与传统疲劳试验相比,试验成本大幅度降低。

随着我国桥梁建设的推进,高强钢、新型结构细节出现的越来越多。由于构件疲劳性能受构件细节、材料和制造工艺的影响较大,因此探索发展新的试验手段、足尺大模型和细节模型试验相结合,是疲劳试验的发展趋势。

3.2 理论研究

近十几年来,许多公路桥梁的车流量日益增大,超载问题越发严峻,而铁路桥梁则面临需要适应更高车速的问题。与此同时,我国钢桥的用材屈服强度从 240 MPa 提高到 420 MPa,一些新型焊接细节和更优化的钢结构形式也不断出现,这些都意味着我国钢桥疲劳理论研究需要面临更大的挑战。随着国际上钢箱梁疲劳理论研究的不断进步,原来钢桥领域未考虑到的复杂工况、条件得以深入研究。如钢箱梁的钢桥面板直接承受的车辆荷载,焊缝处于复杂多轴受力状态;钢箱梁结构由于各细节的应力水平相差不大,多处裂纹共同作用不可避免^[47]。如今这些问题在其他领域已开展了试验及理论研究,如机械领域针对焊接接头主应力轴旋转而引起的多轴疲劳,已建立多轴疲劳破坏准则和基于临界面法的多轴疲劳寿命预测方法等^[48-49];在航空航天领域,国内外研究人员建立了许多裂纹扩展概率断裂力学(PFM)模型,这些研究成果为钢桥多部位裂纹损伤分析方法奠定了初步的理论基础^[50-51]。

我国还需加强工程实用的疲劳理论研究,如疲劳设计的目标量化、新材料的应用分析等,材料、工艺等制造因素的理论支持不可忽视。比如 20 世纪 60 年代各国的研究结果均显示^[52],采用以往的焊接工艺,钢材在屈服强度上的优势不一定与焊接细节的疲劳成正比。我国传统焊接工艺不能满足高强钢抗疲劳要求,随着桥梁用钢不断向强度及性能更高的要求发展,必须在焊接工艺或焊缝处理手段方面开发新技术以支撑高强钢在钢桥领域的应用。

3.3 钢箱梁维护技术及其标准化

钢箱梁后期维护是目前国内外研究的热点问题之一。现阶段我国针对钢箱梁已有疲劳病害的维护工作尚处于起步阶段,维护手段仅停留在对检测出来的裂纹进行扩缝焊接或局部换板的处理上,实桥运营过程中的健康检测系统则重点关注桥梁整体状态,对疲劳损伤问题的针对性不足。我国已有部分研究对大跨度桥梁设计寿命期内的监测、维护与管理策略做了一些原则性的规定^[53-54],但与日本以及欧美等桥梁大国相比,这些研究大多处于理论阶段,内容较为宏观,无法投入应用。

美国的桥梁养护手册^[55]中比较重视桥梁耐久性不足的影响,尤其强调对腐蚀病害的检测和防治。美国重视无损检测技术的应用,并针对较成熟的无损检测技术制订了技术标准,如雷达、冲击回波法等都有相应的技术准则。但是由于各国钢桥所处环境迥异、材料及施工工艺也有较大不同,国外的钢桥养护技术准则并不一定适用于我国钢桥。另外,我国某些公路钢桥的过桥车流量巨大,超载情况严重,需要制定具有针对意义的养护规程。河海大学已开始有针对地就钢箱梁病害评定、检测、修复等进行了系统的研究^[56-57],提出了考虑钢箱梁结构特点的针对性维护方法。钢箱梁维护相应设计规范亟待进一步完善,编制相应的维护及修复技术指南具有十分重要的科学意义和工程应用价值。

4 结 语

缆索支承桥梁通常建造跨度大、难度高且处于重要的交通位置。我国建造的大量世界著名的缆索支承桥梁都面临着一系列维护问题,其中钢箱梁疲劳损伤问题是主要难点和热点之一。钢箱梁的局部疲劳损伤问题贯穿桥梁整个运营阶段,影响因素众多,但无法通过设计及构造彻底避免。目前我国缆索支承桥梁钢箱梁疲劳损伤相关研究已经成为桥梁领域的热点方向之一。随着高强钢、新型结构细节出现的越来越多,我国应继续探索发展新的试验手段,将足尺模型和细节模型试验相结合,在考虑更为复杂的受力工况的同时,加强工程实用的疲劳理论研究,并依据国情进行损伤检测与修复新技术研发与应用,为制定我国缆索支承桥梁钢箱梁疲劳维护相关标准或规程提供依据。

参考文献:

[1] 吴冲. 现代钢桥[M]. 北京:人民交通出版社, 2006.
[2] 王春生, 冯亚成. 正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J]. 钢结构, 2009, 24(9): 9-13. (WANG Chunsheng, FENG

- Yacheng. Review of fatigue research for orthotropic steel bridge decks [J]. Steel Construction, 2009, 24(9):9-13. (in Chinese))
- [3] de JONG F B P. Overview fatigue phenomenon in orthotropic bridge decks in the Netherlands [EB/OL]. [2014-05-22]. <http://www.ferroplan.com/>.
- [4] WOLCHUK R. Steel orthotropic decks: developments in the 1990s [DB/OL]. [2014-05-02]. <http://trb.metapress.com/content/a65786436m314u58>.
- [5] BOERSMA P D, de JONG F B P. Techniques and solutions for rehabilitation of orthotropic steel bridge decks in the Netherlands [EB/OL]. [2014-05-23]. <http://www.confalt.de/>.
- [6] 钱冬生. 谈谈钢桥的疲劳和断裂[J]. 桥梁建设, 2009(3): 12-21. (QIAN Dongsheng. On fatigue and fracture of steel bridges [J]. Bridge Construction, 2009(3): 12-21. (in Chinese))
- [7] 党志杰. 钢桥构造的疲劳开裂分析[J]. 桥梁建设, 2009(增刊2): 23-25. (DANG Zhijie. Analysis of fatigue cracking of steel bridge structures[J]. Bridge Construction, 2009(Sup2): 23-25. (in Chinese))
- [8] 徐伟, 张肖宁, 涂常卫. 虎门大桥钢桥面铺装维修方案研究与工程实施[J]. 公路, 2010(5): 67-71. (XU Wei, ZHANG Xiaoning, TU Changwei. A study on repair scheme and engineering implementation of Humen Bridge steel deck pavement [J]. Highway, 2010(5): 67-71. (in Chinese))
- [9] 梁肇伟. 厦门海沧大桥钢箱梁的装配焊接[J]. 钢结构, 2001, 16(3): 3-6. (LIANG Zhaowei. Erection and welding of steel box beam structure of Haicang Suspension Bridge in Xiamen [J]. Steel Construction, 2001, 16(3): 3-6. (in Chinese))
- [10] 殷爱国. 含局部焊接细节的桥梁钢桁架结构静动力响应实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [11] FISHER J W, ROY S. Fatigue of steel bridge infrastructure [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(8): 457-475.
- [12] 葛耀君, 项海帆. 桥梁结构的耐久性和安全性思考[J]. 预应力技术, 2011(1): 3-9. (GE Yaojun, XIANG Haifan. Some ideas on safety and durability of bridge structure [J]. Prestress Technology, 2011(1): 3-9. (in Chinese))
- [13] 潘际炎. 中国钢桥[J]. 中国工程科学, 2007, 9(7): 18-26. (PAN Jiyan. Steel bridge of China [J]. Engineering Science, 2007, 9(7): 18-26. (in Chinese))
- [14] 梁鹏, 肖汝诚, 夏旻, 等. 超大跨度缆索承重桥梁结构体系[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 53-56. (LIANG Peng, XIAO Rucheng, XIA Min, et al. Structural systems for ultra-long span cable supported bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(5): 53-56. (in Chinese))
- [15] XIAO Z G, YAMADA K, INOUE J, et al. Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(4): 409-416.
- [16] YA S, YAMADA K. Fatigue durability evaluation of trough to deck plate welded joint of orthotropic steel deck [J]. 土木学会論文集 A, 2008, 64(3): 603-616.
- [17] 张允士, 李法雄, 熊锋, 等. 正交异性钢桥面板疲劳裂纹成因分析及控制[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 75-80. (ZHANG Yunshi, LI Faxiong, XIONG Feng, et al. Cause analysis and control measures of fatigue cracks in orthotropic steel deck [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(8): 75-80. (in Chinese))
- [18] BS 5400—10—1980 Code of practice for fatigue. Part 10: code of practice for fatigue [S].
- [19] AASHTO-LRFD Bridge design specifications [S].
- [20] EN 1993-1-9:2005 Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.9: fatigue [S].
- [21] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范 [S].
- [22] 童乐为, 沈祖炎, 陈忠延. 城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5): 20-27. (TONG Lewei, SHEN Zuyan, CHEN Zhongyan. Fatigue load spectrum for urban road bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5): 20-27. (in Chinese))
- [23] 周泳涛, 鲍卫刚, 翟辉, 等. 公路钢桥疲劳设计荷载标准研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 79-85. (ZHOU Yongtao, BAO Weigang, ZHAI Hui, et al. Study of standard fatigue design load for steel highway bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 79-85. (in Chinese))
- [24] 吕磊, 吉伯海, 马麟, 等. 基于实测车流的大跨度悬索桥振动响应研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊1): 102-108. (LYU Lei, JI Bohai, MA Lin, et al. Study on the vibration response of long span suspension bridge based on the measured traffic flow [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Sup1): 102-108. (in Chinese))
- [25] JI Bohai, CHEN Donghua, MA Lin, et al. Research on stress spectrum of steel decks in suspension bridge considering measured traffic flow [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(1): 65-75.
- [26] MIKI C. Bridge engineering learning from failures-fatigue and fracture control [R]. Tokyo: Institute of Technology, 2004.
- [27] MIKI C, TOYODA Y, MORI T, et al. Fatigue of large scale welded girders under simulated highway loadings [J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 1990, 7(2): 283-291.
- [28] 陈传尧. 疲劳与断裂 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [29] IRWIN G R. Structural aspects of brittle fracture [J]. Applied Materials Research, 1964, 3(2): 65-81.
- [30] PARIS P C, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Fluids Engineering, 1963, 85(4): 528-533.
- [31] FISHER J W. Fatigue and fracture in steel bridges, case studies [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [32] FORMAN R G, KEARNEY V E, ENGLE R M. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures [J]. Journal of Fluids Engineering, 1967, 89(3): 459-463.

- [33] INOKUCHI S. Wheel trucking test for weld of U-shaped rib and deck plate in the orthotropic steel deck [R]. Tokyo: Japan Bridge Association, 2006.
- [34] WOLCHUK R. Lessons from weld cracks in orthotropic decks on three European bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(1): 75-84.
- [35] 菅沼久忠, 三木千壽. 鋼床版のデッキプレートとトラフリブ間の縦方向溶接部の疲労に対する effective notch stress による評価[J]. 土木学会論文集 A, 2007, 63(1): 35-42. (SUGANUMA H, MIKI C. Fatigue strength evaluation with effective notch stress of the weld between trough rib and deck plate on orthotropic steel deck [J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu A, 2007, 63(1): 35-42. (in Japanese))
- [36] 陈惟珍, ALBRECHT G, KOSTEAS D. 老钢桥剩余安全度与剩余寿命估计[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(4): 384-389. (CHEN Weizhen, ALBRECHT G, KOSTEAS D. Remaining reliability and fatigue life of old steel bridges [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(4): 384-389. (in Chinese))
- [37] BAIK B, YAMADA K, TOSHIYUKI I. Fatigue strength of fillet welded joint subjected to plate bending [J]. Steel Structures, 2008, 8(3): 163-169.
- [38] XIAO Z, YAMADA K. A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints [J]. International Journal of Fatigue, 2004(26): 1277-1293.
- [39] 潘春宇, 童乐为. 钢结构疲劳可靠度设计方法的研究进展 [J]. 钢结构, 2013, 28(12): 1-8. (PAN Chunyu, TONG Lewei. Research progress of fatigue reliability analysis methods for steel structures [J]. Steel Construction, 2013, 28(12): 1-8. (in Chinese))
- [40] 刘琪峰. 无损检测新技术新工艺与应用技术标准大全 [M]. 北京: 中国知识出版社, 2006.
- [41] 于凤坤, 赵晓顺, 王希望, 等. 无损检测技术在焊接裂纹检测中的应用 [J]. 无损检测, 2007, 29(6): 353-355. (YU Fengkun, ZHAO Xiaoshun, WANG Xiwang, et al. Application of nondestructive testing in inspection of weld crack [J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(6): 353-355. (in Chinese))
- [42] 陈刚, 吴开斌. 用超声波相控阵检测钢箱梁桥面板 U 肋角焊缝熔深的试验研究 [J]. 建设科技, 2013(8): 96-99. (CHEN Gang, WU Kaibin. Study on weld penetration of U-rib in steel box bridge deck by ultrasonic phased array inspection [J]. Construction and Technology, 2013(8): 96-99. (in Chinese))
- [43] 刘贵民, 马丽丽. 无损检测技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [44] ISHIKAWA T, SHIMIZU M, TOMO H, et al. Effect of compression overload on fatigue strength improved by ICR treatment [J]. International Journal of Steel Structures, 2013, 13(1): 175-181.
- [45] ISHIKAWA T, YAMADA K, KAKIICHI T, et al. Extending fatigue life of cracked out-of-plane gusset by ICR treatment [J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu A/JSCE Journal of Structural and Earthquake Engineering, 2010, 66(2): 264-272.
- [46] 石川敏之, 山田健太郎, 柿市拓巳, 等. ICR 处理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果 [J]. 土木学会論文集 A, 2010, 66(2): 264-272. (ISHIKAWA T, YAMADA K, KAKIICHI T, et al. Extending fatigue life of cracked out-of-plane gusset by ICR treatment [J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu A, 2010, 66(2): 264-272. (in Japanese))
- [47] 王春生, 聂建国, 陈艾荣, 等. 基于概率断裂力学的老龄钢桥使用安全评估 [J]. 工程力学, 2006, 23(6): 102-106. (WANG Chunsheng, NIE Jianguo, CHEN Airong, et al. Probabilistic fracture mechanics assessment of service safety for old steel bridges [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(6): 102-106. (in Chinese))
- [48] MCDIARMID D L. Fatigue under out-of-phase bending and torsion [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1987, 9(6): 457-475.
- [49] JORDAN E H, BROWN M W, MILLER K J. Fatigue under severe nonproportional loading [J]. Multiracial Fatigue, 1982, 23: 569-585.
- [50] AKPAN U O, KOKO T S, ORISAMOLU I R, et al. Practical fuzzy finite element analysis of structures [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 38(2): 93-111.
- [51] KUANG J H. The failure of ligaments due to multiple-Site damage using interactions of dugdale-type cracks [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1998, 21(9): 1147-1156.
- [52] MENG G P. Evening meeting-high strength steel use in Australia, Japan & the US [J]. Structural Engineer, 2006, 84(21): 27-31.
- [53] 曾勇. 大跨度悬索桥设计寿命期内的监测、维护与管理策略研究 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [54] 江阴长江公路大桥管理中心. 大型桥梁养护管理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [55] ZOKAIE T. AASHTO-LRFD live load distribution specifications [J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(2): 131-138.
- [56] 姜竹生, 瞿涛, 吕磊, 等. 钢箱梁典型病害分析及其检测与维护技术研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 31(5): 572-577. (JIANG Zhusheng, QU Tao, LYU Lei, et al. Research on typical defects analysis of steel box girder and its testing and maintenance technology [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 31(5): 572-577. (in Chinese))
- [57] 吉伯海, 赵端端, 姜竹生, 等. 钢箱梁腐蚀病害综合评分制评定方法 [J]. 世界桥梁, 2013, 41(6): 81-85. (JI Bohai, ZHAO Duanduan, JIANG Zhusheng, et al. Integrated scoring system evaluation method of corrosion disease in steel box girder [J]. World Bridges, 2013, 41(6): 81-85. (in Chinese))