



同济大学优秀博士论文文库

铆接钢桥剩余寿命 与使用安全评估



Assessment of Remaining Fatigue Life and Service Safety for Riveted Steel Bridges

王春生 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

同济大学优秀博士论文文库
同济大学研究生院出版基金资助

铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估

王春生 著

江苏工业学院图书馆
藏书章



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书对既有铆接钢桥疲劳剩余寿命与使用安全评估这一极富挑战性的研究课题从理论到实践进行了系统深入的探索。针对铆接结构多破坏模式和铆接多成分、多构件的疲劳失效特点,提出了基于断裂力学和概率断裂力学的既有铆接钢桥确定性与概率性评估理论和方法体系。运用 Monte-Carlo 模拟技术,实现了公路与铁路桥梁交通荷载谱和应力谱的模拟。提出了基于断裂力学评估铆接钢桥剩余寿命与使用安全的基本方法与评估模型。在建立铆接钢桥构件单角钢和双角钢概率疲劳破坏模型的基础上,提出了铆接钢桥结构系统疲劳断裂可靠性分析模型,运用 Monte-Carlo 算法实现了铆接钢桥构件与结构系统疲劳断裂失效概率的计算。将评估理论与方法推广应用于工程实践,为桥梁维护决策提供了可靠的科学依据。

本书是一本钢桥疲劳断裂领域的研究专著,可供从事本专业的教学、科研和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估/王春生著. —上海:

同济大学出版社, 2007. 10

(同济大学优秀博士论文文库)

ISBN 978-7-5608-3629-4

I. 铆… II. 王… III. 铆接—钢桥—疲劳寿命—评估
IV. U448.361

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 147373 号

同济大学优秀博士论文文库

铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估

王春生 著

责任编辑 高晓辉 责任校对 谢惠云 封面设计 李志云

出版发行 同济大学出版社 www.tongjiipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏句容排印厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 9.25

字 数 231000

版 次 2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-3629-4/U·77

定 价 28.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

出版说明

同济大学 2003 届博士毕业生王春生的博士学位论文已入选 2007 年“全国百篇优秀博士学位论文”，论文题目为“铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估”，导师为陈艾荣教授、陈惟珍教授。根据同济大学有关规定，该博士论文由同济大学研究生院优秀博士论文出版基金资助出版。

同济大学研究生院

2007 年 9 月

前 言

如何确保既有钢桥的使用安全是桥梁工程界面临的重要研究课题。目前,德国、美国与日本等国家都在对长期运营的钢桥加紧开展研究,以确保这些桥梁继续使用的安全性。追踪发达国家桥梁工程的发展历史,不难发现这些国家大兴土木的时期已经结束,桥梁工程师已由桥梁设计者转变为维修工程师,他们的精力主要集中在既有桥梁的剩余寿命评估、使用安全性分析和既有桥梁的维修、加固与改造上,其目的是为确保既有桥梁经济、安全、可靠地使用。目前,中国的交通主管部门和桥梁建设者主要将精力投入在新建的桥梁工程中,而对既有桥梁工作状态关注较少,但这并不意味着国内不存在国外所面临的挑战。20 世纪初至 20 世纪 70 年代,我国修建了大量铆接公路钢桥与铁路钢桥,这些铆接钢桥承受着日益繁重的交通荷载,其疲劳剩余寿命急剧缩短,桥梁的使用安全性大大降低,桥梁失效倒塌的风险日益增加。桥梁作为国家交通的命脉,在国民经济建设中处于十分重要的地位,因此,为确保铆接钢桥的使用安全,避免危险发生,发展一套铆接钢桥疲劳剩余寿命与使用安全评估系统十分必要。

基于 Miner 疲劳累积损伤理论的评估方法,一直是各国学者评估钢桥疲劳剩余寿命的常用方法,但该方法有其自身难以克服的缺点。近年来,许多学者尝试应用断裂力学评估钢桥剩余寿命。实践表明,基于断裂力学的评估方法可以有效预测钢桥的疲劳剩余寿命。自美国 ASCE 疲劳与断裂分委员会 1982 年发表了 4 篇关于疲劳可靠性的经典论文之后,研究者逐渐认识到结构疲劳中存在大量的不确定性因素,钢桥疲劳可靠性评估日益受到各国学者的重视。首先,基于概率线弹性断裂力学的钢桥疲劳可靠性评估方法受到了学者们的关注,但其疲劳可靠性评估研究属构件级水平。本书基于铆接钢桥的疲劳损伤演化机理以及铆接结构多破坏模式和铆接多成分、多构件的疲劳失效特点,对既有铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估理论与方法进行了系统研究,建立了基于疲劳累积损伤理论、断裂力学和可靠度理论的铆接钢桥使用安全评估的确定性与概率性评估方法体系,并将所建立的评估方法应用于既有铆接公路钢桥与铁路钢桥剩余寿命评估的工程实践。

全书共分为 7 章。第 1 章简要回顾了既有钢桥疲劳寿命评估研究的现状。第 2 章针对我国公路与铁路桥梁设计规范尚未对交通荷载谱模拟作出规定的不足,在现场交通观测和应力谱实测基础上,运用 Monte-Carlo 模拟技术,实现了公路与铁路桥梁交通荷载谱和应力谱的模拟;并在合理确定铆接细节疲劳强度基础上,按线性 Miner 累积损伤准则,对铆接钢桥疲劳寿命进行了估算,由此确定铆接构件的检测优先级。第 3 章提出了基于断裂力学评估铆接钢桥剩余寿命与使用安全的基本方法,根据铆接构件的疲劳破坏特征,建立了铆接钢桥简化 CCT 和 DECT 模型;鉴于简化断裂分析模型的不足,建立了铆接构件断裂分析模型,构件模型可合理计入铆接构造、钉载等对疲劳裂纹扩展的影响;并运用板壳断裂力学有限元程序,经计算回归得到了铆接构件断裂分析模型的几何修正因子公式。第 4 章建立了反映铆接钢桥疲劳破坏机理的脆断和韧断概率失效模型,给出了用于疲劳可靠性分析的极限状态方程,并合理确定了

随机变量的参数取值;建立了铆接钢桥构件单角钢概率疲劳破坏模型,并首次提出了铆接钢桥构件双角钢概率疲劳破坏模型,基于 Monte-Carlo 算法实现了铆接钢桥构件单角钢、双角钢疲劳断裂失效概率的计算,编制了相应的概率断裂分析程序 SAPFF, DAPFF;提出了铆接钢桥结构系统疲劳断裂可靠性分析模型,建立了 Monte-Carlo 法计算铆接钢桥结构系统疲劳断裂失效概率的基本流程,并编制了用于铆接钢桥结构系统概率断裂分析的大型程序 RBSPPF。第 5 章和第 6 章将铆接钢桥确定性与概率性评估方法应用于既有公路与铁路铆接桁架桥剩余寿命与使用安全评估,合理确定了检测间隔。第 7 章对本书在理论方法与实际工程应用方面的主要成果进行了总结,并对进一步的研究工作提出了建议。

本书的出版得到了同济大学研究生院出版基金的资助。

限于作者水平,本书难免存在不足之处,尚需在进一步研究工作中加以完善,欢迎广大读者提出宝贵的批评和指正。

王春生

2007 年 9 月

目次

出版说明

前言

第1章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 钢桥疲劳问题研究的历史与现状	(2)
1.3 钢桥剩余寿命与使用安全评估方法	(4)
1.3.1 传统疲劳分析方法	(4)
1.3.2 断裂力学方法	(5)
1.3.3 疲劳可靠性方法	(7)
1.4 本章小结	(8)
第2章 疲劳荷载谱模拟与疲劳寿命评估	(11)
2.1 公路桥梁荷载谱与应力谱模拟	(11)
2.1.1 外白渡桥简介	(11)
2.1.2 交通荷载观测及统计分析	(11)
2.1.3 Monte-Carlo 方法模拟车流	(13)
2.1.4 应力历程与应力谱模拟	(16)
2.2 铁路桥梁荷载谱与应力谱模拟	(18)
2.2.1 铁路桥运输状况调查	(19)
2.2.2 荷载谱模拟与应力谱模拟	(23)
2.3 铆接钢桥疲劳寿命估算	(24)
2.3.1 铆接钢桥疲劳强度	(24)
2.3.2 疲劳累积损伤	(26)
2.3.3 外白渡桥疲劳寿命估算	(28)
2.4 本章小结	(29)
第3章 基于断裂力学的剩余寿命与使用安全评估	(30)
3.1 基于断裂力学评估的基本原理	(30)
3.1.1 宏观裂纹的基本形式	(30)
3.1.2 裂纹尖端应力场	(30)
3.1.3 线弹性断裂力学及 K 准则	(31)
3.1.4 弹塑性断裂力学及 J 准则	(32)
3.1.5 疲劳裂纹扩展速度	(33)
3.1.6 裂纹扩展寿命估算方法	(34)

3.1.7	初始裂纹尺寸	(35)
3.1.8	临界裂纹尺寸的确定方法	(35)
3.1.9	裂纹增长模拟	(36)
3.2	断裂力学的有限元法	(37)
3.2.1	有限元单元类型选取	(37)
3.2.2	裂纹尖端有限元单元类型	(39)
3.2.3	计算 J 积分的有限元方法	(39)
3.2.4	程序实现	(41)
3.3	铆接钢桥断裂力学分析模型	(42)
3.3.1	识别临界构件	(42)
3.3.2	断裂力学分析模型的建立	(44)
3.3.3	材料性能指标	(44)
3.3.4	初始裂纹	(47)
3.3.5	临界裂纹大小的确定	(47)
3.3.6	剩余寿命计算	(48)
3.3.7	探测间隔	(51)
3.4	简化断裂力学分析模型在外白渡桥剩余寿命评估中的应用	(51)
3.5	本章小结	(53)
第4章	基于概率断裂力学的剩余寿命与使用安全评估	(54)
4.1	问题的提出	(54)
4.2	构件疲劳可靠性	(55)
4.2.1	疲劳累积损伤模型	(55)
4.2.2	剩余强度模型	(56)
4.2.3	疲劳寿命模型	(57)
4.3	结构系统疲劳可靠性分析	(60)
4.3.1	结构系统疲劳可靠性研究现状	(60)
4.3.2	结构系统疲劳可靠性分析模型	(62)
4.4	钢桥结构疲劳可靠性分析	(64)
4.4.1	钢桥疲劳可靠性研究回顾	(64)
4.4.2	钢桥疲劳可靠性分析方法	(66)
4.5	铆接钢桥构件概率断裂力学分析模型	(69)
4.5.1	铆接构件概率断裂力学模型	(70)
4.5.2	铆接构件疲劳失效模式	(71)
4.5.3	Monte-Carlo 法计算构件疲劳失效概率	(74)
4.6	铆接钢桥结构系统概率断裂力学分析模型	(77)
4.7	目标可靠度与检修间隔	(80)
4.8	本章小结	(80)

第 5 章 铆接公路钢桥剩余寿命与使用安全评估	(81)
5.1 工作状态模拟	(81)
5.1.1 桥梁概况	(81)
5.1.2 工作状态模拟	(81)
5.2 荷载谱与应力谱模拟	(84)
5.2.1 交通荷载观测及统计分析	(84)
5.2.2 荷载谱与应力谱模拟	(85)
5.3 基于确定性疲劳和断裂力学的评估	(86)
5.3.1 疲劳使用寿命估算	(86)
5.3.2 基于断裂力学的剩余寿命与安全分析	(87)
5.4 基于构件概率断裂力学的可靠性评估	(95)
5.4.1 参数取值	(95)
5.4.2 按单角钢破坏模式的概率评估	(98)
5.4.3 按双角钢破坏模式的概率评估	(99)
5.5 基于结构系统概率断裂力学的可靠性评估	(101)
5.6 本章小结	(102)
第 6 章 铆接铁路钢桥剩余寿命与使用安全评估	(104)
6.1 桥梁概况	(104)
6.2 工作模型	(104)
6.2.1 有限元模型	(104)
6.2.2 计算与实测对比分析	(105)
6.3 赣江桥疲劳寿命估算	(108)
6.3.1 疲劳抗力曲线	(108)
6.3.2 累积损伤与剩余寿命	(109)
6.4 基于断裂力学的剩余寿命评估	(109)
6.4.1 识别临界构件	(109)
6.4.2 断裂力学分析模型的建立	(111)
6.4.3 材料韧性	(111)
6.4.4 初始裂纹	(111)
6.4.5 临界裂纹大小的确定	(112)
6.4.6 剩余寿命计算	(113)
6.4.7 检测间隔及维护对策	(114)
6.5 基于构件概率断裂力学的可靠性评估	(115)
6.5.1 参数取值	(115)
6.5.2 按单角钢破坏模式的概率评估	(116)
6.5.3 按双角钢破坏模式的概率评估	(118)
6.6 基于结构系统概率断裂力学的可靠性评估	(120)

第1章 绪论

1.1 引言

在19世纪末至20世纪中叶,由于钢铁冶炼技术的提高和交通运输系统发展的需要,西方工业国家修建了大量的铆接钢桥。这些至今仍在运营且仍将继续使用的老龄铆接钢桥的剩余寿命与使用安全性如何一直困扰着各国科学家。尽管当初在设计一座新钢桥时遵循的有效规范能保证一个足够的安全度,但该安全度已不再适用于这些经历过两次世界大战、运营历史无法知晓的百年老桥。且这些老桥的材料也与现在的材料有很大差异,桥梁的承载能力下降,因已有损伤(锈蚀与裂纹,甚至弹孔)的削弱(图1.1),其真实工作状态必须精确地加以调查。

因此,如何保障老龄钢桥的安全使用是摆在桥梁工作者面前的重要研究课题。目前,德国、美国与日本等国家都在对过去长期运营的旧钢桥加紧开展研究,以确保这些桥梁继续使用的安全性(陈惟珍,2000)。

从发达国家桥梁事业的发展来看,这些国家大兴土木的时期已经结束,桥梁工程师已由桥梁设计者转变为维修工程师,他们的注意力主要集中在既有桥梁的剩余寿命评估、使用安全性分析和旧桥的维修、加固与改造,以此来确保旧桥安全、经济、可靠地使用。

目前,我国的交通主管部门和桥梁建设者主要将精力投入在新建桥梁工程中,对既有桥梁工作状态尚无暇关注,但这并不意味着我国不存在国外所面临的问题。从20世纪初至建国初期,我国修建了一定数量的桥梁,其中,运营超过50年的铆接钢桥就有1万多孔(王春生,2002),有些还是德、日、英等国留下的舶来品。新中国成立后的近30年间,我国在重要的铁路和公路交通线上修建了一批跨度较大的铆接钢桥,如武汉长江大桥(图1.2)、南京长江大桥(图1.3)等,目前,这些桥梁承受着日益繁重的交通运输任务,有些桥梁已显示出疲劳迹象(如南京长江大桥钢桁梁中的公路钢梁部分已发现疲劳裂纹)。

对这些长期甚至超期服役的老龄钢桥而言,锈蚀与疲劳是控制其寿命的两大主要因素,但鉴于当时的技术水平和钢材的质量,疲劳问题也不可能在当时桥梁的设计中加以充分考虑。某些桥梁过去也曾进行过大修,但一般都不是针对疲劳问题进行的。同时,随着我国经济建设的飞速发展,公路、铁路运输亦迅猛增加。公路交通量、车的载重量和车速都在大幅度提高,这使按老标准设计的公路桥的使用状况不容乐观,很多旧桥的病害与此密切相关。近年来,列车的6次大提速,一方面,增加了过桥列车的频率和运量;另一方面,由于速度增加引起较大的横向和竖向的振动,这些因素将造成桥梁剩余使用寿命的急剧缩短。尤其是横向振动的加剧,对原来薄弱的横向联系更是雪上加霜,从而大大降低桥梁的使用寿命,增加了桥梁失效倒塌的

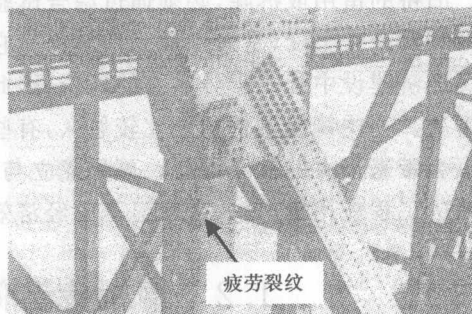


图 1.1 铆接桁架桥吊杆中的疲劳裂纹
(Fisher, 1990)



图 1.2 武汉长江大桥

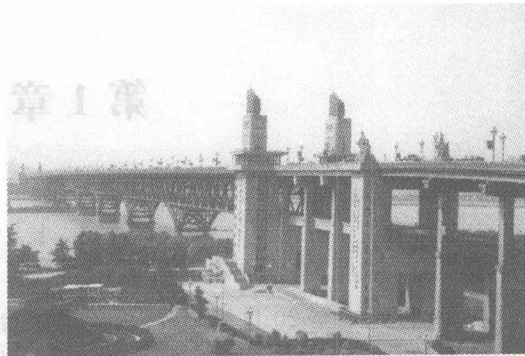


图 1.3 南京长江大桥

风险。

以上事实充分说明,我国桥梁工程界也面临着同样的挑战,对旧桥的研究与评估势在必行。旧桥的留用或拆除,必须通过综合试验与理论方面的分析来确定。正确评估旧桥的剩余寿命和剩余安全度,是采用加固措施保障它们使用的理论基础。桥梁作为国家交通的命脉,在国民经济建设中处于十分重要的地位,因此,如何安全与经济地使用旧桥,迫切需要加以研究和解决。一些铆接钢桥历史比较悠久,有些已经成为当地不可或缺的城市景观,继续保存它们无疑会带来很大的社会效益。可见建立与完善铆接钢桥剩余寿命与使用安全性评估系统具有重要的工程应用价值,并带来显著的经济效益。

1.2 钢桥疲劳问题研究的历史与现状

随着钢的力学性能进一步改善以及制造与连接技术的发展,在 20 世纪 50 年代初就已经开始采用了今天常见的焊接技术,稍前生产的钢由于焊接技术还很不成熟,焊接性能较差且易于脆断,尤其在质量保证与质量控制方面更是如此。如美国自由轮在二战中断成两截,在 1938—1940 年间欧洲 40 座焊接钢桥倒塌,1962 年澳大利亚墨尔本的 Kings 桥在 4.4°C 时发生脆性断裂。但直到 1967 年 12 月 15 日西弗吉尼亚的 Point Pleasant 大桥在没有预兆的情况下倒塌(图 1.4),导致 46 人死亡,之后,桥的脆性断裂才引起桥梁工程师的关注(Barsom, 1987)。经过大量研究发现,这些低应力工作下的事故往往发生在低温冬天,这与结构中存在的缺陷或裂纹有关。据美国 ASCE 疲劳与断裂分委员会在 1982 年的调查结果(ASCE, 1982),80%~90% 的钢结构破坏与疲劳断裂有关。即使人类对疲劳问题已有相当认识的今天,钢桥疲劳破坏的事故亦屡次发生(王春生, 2002),如 1994 年 10 月韩国首尔汉江上的圣水大桥中央在交通高峰期间断裂倒塌 50 m,其中 15 m 掉入江中,造成 32 人死亡,17 人重伤的重大事故。调查结果表明,该事故是桥梁长期超负荷运营,下部钢桁梁螺栓及杆件疲劳破坏所致。可见,超负荷运营加速了薄弱细部的疲劳断裂进程,大大降低了既有桥梁结构的使用安全性。1995 年 7 月的一天清晨,使用仅 7 年的广州海印大桥一根斜拉索突然断落,虽无人员伤亡,但却暴露出斜拉索防护措施不够合理的问题。斜拉索严重锈蚀,加之疲劳荷载的作用,使得拉索发生脆断。2001 年 11 月 7 日凌晨,四川省宜宾市小南门桥发生桥面部分断落事故(图 1.5),桥两侧短吊杆部分分别垮塌 20 m 和 40 m,造成 2 人死亡,吊杆破断的原因之一是钢丝

的腐蚀疲劳。Rice和Rosengren(1968)发表了著名的HRR理论,指出在裂纹尖端附近,材料的屈服和硬化过程对应力强度因子 K 的修正作用,从而提出了修正应力强度因子 K_{IC} 的概念。



图 1.4 垮塌的 Point Pleasant 桥

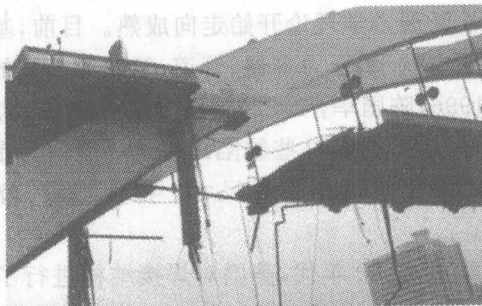


图 1.5 吊杆断裂后的宜宾小南门桥

可见一个足够的强度保证不总是足以阻止一个金属结构的破坏。究其原因,是因为传统强度理论假设材料匀质各向同性且无缺陷,而这些假设与实际情况有很大差别。实际上,材料内部不可避免地存在的缺陷或裂纹可以在低应力下扩展直至断裂。这种现象引发了对疲劳与断裂的深入研究(Suresh, 1999; Barsom, 1987)。

金属疲劳的最初研究是德国一位矿业工程师 W. A. J. Albert 在 1829 年前后完成的,他用铁制的矿山升降机链条进行了反复加载试验,以校核其可靠性。1843 年,英国铁路工程师 W. J. M. Rankine 对疲劳断裂的不同特征有了更进一步的认识,并注意应力集中带来的危险性。1852 年至 1869 年期间, Wohler 对疲劳破坏进行了系统的研究发现,由钢制的车轴在循环载荷作用下,其强度大大低于静载强度,他提出了利用 S-N 曲线来描述疲劳行为的方法,并且提出了疲劳“耐久极限”的概念。1874 年,德国工程师 H. Gerber 开始研究疲劳设计方法,提出了考虑平均应力影响的疲劳寿命计算方法。Goodman 讨论了类似的问题。1910 年, O. H. Basquin 提出了描述金属 S-N 曲线的经验规律,并发现应力对疲劳循环数的双对数图在很大的应力范围内呈线性关系。Bairstow 通过多级循环试验和测量滞后回线,给出了有关形变滞后的研究结果,并指出形变滞后与疲劳破坏的关系。1929 年, B. P. Haigh 对缺口敏感性进行了研究。1937 年, H. Neuber 指出缺口根部区域内的平均应力比峰值应力更能代表受载的严重程度。1945 年, M. A. Miner 在 J. V. Palmgren 工作的基础上提出了著名的疲劳线性累积损伤理论,尽管它的不准确性现在已得到证实,但其方便、成熟的工程方法一直在桥梁工程中应用。L. F. Coffin 和 S. S. Manson 各自独立提出了塑性应变幅和疲劳寿命之间的经验关系,即 Coffin-Manson 公式,进而形成了局部应力应变法。可见疲劳是一个既古老又年轻的科学研究分支,自 Wohler 将疲劳纳入科学研究的范畴至今,疲劳研究仍有方兴未艾之势,但材料疲劳的真正机理的科学描述尚未得到很好的解决(徐灏, 1988; 姚卫星, 2003)。

20 世纪 20 年代, Griffith 对带裂纹玻璃平板的断裂研究标志着现代断裂理论的开始,但一直没有可进行定量处理有关疲劳破坏模型的数学框架,直到 1957 年, Irwin 提出了应力强度因子来描述裂纹顶端应力奇异性的大小,此后,人们一直试图采用应力强度因子来描述疲劳裂纹的扩展(陆毅中, 1987)。Paris(1963)指出疲劳裂纹在每个应力循环中的扩展量 $\frac{da}{dN}$ 与应力强度因子幅值 ΔK 有关,并给出了它们之间的关系,这就是著名的 Paris 公式。1968 年,非线性断裂力学的研究出现了理论新起点: Rice(1968)提出了与路径无关的 J 积分; Hutchinson

(1968), Rice 和 Rosengren(1968)发表了著名的 HRR 弹塑性静止裂纹尖端奇异解,这标志着弹塑性断裂力学理论开始走向成熟。目前,基于断裂力学发展起来的损伤容限方法已广泛应用于航空航天、压力容器、管道、船舶等领域的安全性评估(陆毅中, 1987; 吴清可, 1995; 胡毓仁, 1996; 陈国华, 2002)。该方法假定在冶炼加工、安装和使用过程中,材料内部不可避免地存在缺陷或裂纹,这些缺陷或裂纹一般认为是无损检测手段刚好检测不到的裂纹尺寸,它将在循环荷载下扩展至临界尺寸。损伤容限方法可以用于确定桥梁的剩余寿命以及下一检测间隔。

20 世纪 60 年代,美国对焊接结构进行了系统地试验,并应用断裂力学方法展开调查,得出一个能对结构细节寿命进行分级的方法(Fisher, 1990),该方法为最新的欧洲规范所采用。这些新规范能提供给所设计的钢桥一个足够的安全度,但不适合以前的老龄钢桥。

建于铆接时代的钢桥部分已运营了 100 多年了,许多还没有显露疲劳迹象。文献中足尺构件实验表明(Bruhwiler, Hirt, 1987, 1990; Fisher, 1990; Kulak, 1998, 1999):维护好的铆接钢桥仍具有不少的剩余寿命,而从设计角度来看,这些桥梁已经破坏,这说明采用韦勒曲线的设计模型低估了桥梁疲劳寿命。近 20 多年来,铆接在国内外钢桥制造中不再被采用,但仍有大量各类在役铆接钢桥仍在使用,这些桥梁的剩余寿命研究已引起工程界的极大关注。目前,德国、美国、日本等国家,都在对过去未做疲劳设计的旧钢桥加紧开展研究,以确保这些桥梁继续使用的安全性。应用断裂力学计算老龄钢桥的剩余寿命与安全度已被证实是一种行之有效的方法,并且已在德国等一些国家开始应用,但也有许多问题尚待解决。

1.3 钢桥剩余寿命与使用安全评估方法

目前,对老龄钢桥还没有可供使用的有效规范来评估其剩余寿命,但在理论研究与工程实践中逐渐形成了计算老龄钢桥剩余寿命的两类主要方法(Chen, Wang, 2001, 2002):一是依照传统韦勒曲线,但需要尽可能准确地概括投入运营后的受载历史,这就带来了如战争时期的受载历史无法知晓的困难;二是依据断裂力学方法,从已探测到的裂纹(很少)或假设的裂纹出发,模拟以后的受载来确定桥梁的剩余寿命。与常用的疲劳方法相比,断裂力学方法的优点是:不需要知道受载历史,只需确定旧桥材料的断裂性能。此外,基于疲劳可靠性理论的剩余寿命评估方法已引起学者们的重视,但这方面的研究工作才刚刚开始。

1.3.1 传统疲劳分析方法

许多文献报道的随交通流量增加及车辆加重而引起的老龄钢桥剩余寿命的评估方法一般都是采用现场实测应力谱,并利用现有的 S-N 曲线(图 1.6)和 Miner 线性累积损伤准则来计算剩余寿命(陈惟珍,王春生, 2001)。目前,各国的桥梁设计规范中大部分都仍然沿用此方法。传统疲劳方法必须要解决疲劳细节的确定和荷载与应力谱模拟这两个关键问题。现有各疲劳细节的 S-N 曲线是 20 世纪 60 年代以来各国采用足尺焊接试件进行疲劳实验获得的,铆接接头的疲劳强度只能参考焊接接头的 S-N 曲线来确定。S-N 曲线疲劳分级以及长寿命区形状的取用不同,往往会造成计算剩余寿命与实际情况相差很大,主要原因是铆接结构受力复杂,使得构件疲劳强度的分散性很大。针对这一问题,国外做了很多足尺大构件、部分结构甚至整个桁梁的试验,来验证桥梁评估采用的基本假定、观测裂纹的扩展以及识别桥梁结构中的

薄弱细节,尤其那些裂纹发展比较隐蔽的部位。

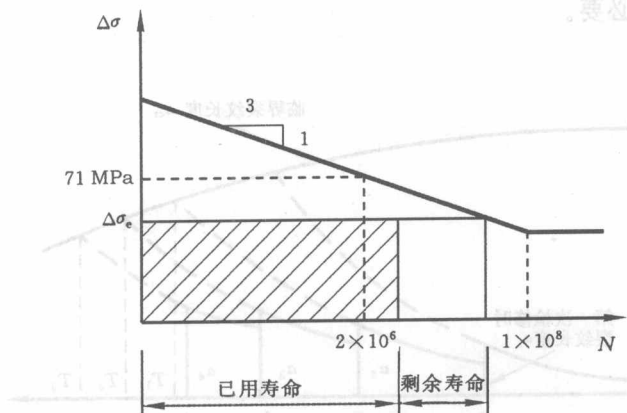


图 1.6 按 S-N 曲线确定使用寿命

与验算静强度所用荷载不同,计算疲劳损伤所用荷载应该采用能代表日常交通状况的荷载,这便是疲劳荷载谱。现在很多国家都针对本国的实际情况,在大量交通调查的基础上,制定了疲劳荷载谱,如英国 BS 5400 中对公路和铁路疲劳荷载谱都作了比较详尽的规定,其制定疲劳荷载谱的方法也为很多国家所仿效。我国目前尚无可供使用的公路与铁路荷载谱,现行公路桥涵设计规范中也只是规定验算桥梁疲劳寿命的荷载应能代表该桥的日常交通状况,而无具体荷载谱的编制办法;而现行铁路桥涵设计规范验算桥梁疲劳寿命所采用的荷载与验算静强度的荷载都是中—活载,这显然不能代表铁路桥日常真实的承载状况。国内一些学者已针对这一问题,进行了初步研究,取得一定的进展(车惠民, 1990; 潘际炎, 1992; 童乐为, 1997),但要形成能代表我国交通状况的规范荷载谱,尚需深入研究。老龄钢桥使用历史悠久,其受载历史较为复杂、有相关档案资料不齐全,要得到其真实的受载历史比较困难,一般的处理办法是利用现有的疲劳荷载谱和可调查到的历史记录(如铁路运输中的历年运量等)对其受载历史进行大致的描述,这样所得到的结果往往是偏安全的。由于传统疲劳分析方法原理简单,操作比较方便,得到了较为广泛的应用。

1.3.2 断裂力学方法

与传统疲劳理论不同,断裂力学认为任何材料都存在缺陷,而疲劳裂纹则源于这些缺陷。在这一假设基础上发展了基于断裂力学的结构使用寿命评估方法,如损伤容限方法。基于断裂力学的损伤容限方法最早出现在航空航天领域,1974年,美国空军颁布了《美国空军飞机损伤容限要求 MIL-A-83444》,这一标准有力地推动了断裂力学理论在结构缺陷评定中的应用(刘文琰, 1999)。

近些年来,各国学者尝试应用断裂力学评估钢桥剩余寿命,取得了可喜的研究进展(Zhao, 1994; Geißler, 1995; Chen, 1999)。其解决问题的基本思路可用图 1.7 来描述(Chen, 1999),主要工作步骤包括:临界构件及细节的确定和检查;计算剩余安全度;对必要构件进行维修;估计桥梁剩余寿命;确定下一检测间隔。即首先采用无损探伤技术确定初始裂纹,如果没有发现裂纹,则根据探伤技术的分辨率给出裂纹初始尺寸;然后根据断裂力学的扩展规律得出结构的剩余寿命,并确定下一次检测或维修间隔;到达某一检测间隔时,应再进行

相应的检测,根据新近的检测结果重新计算剩余寿命与检测间隔;按此循环下去,直到结构已失去再次检测与加固的必要。

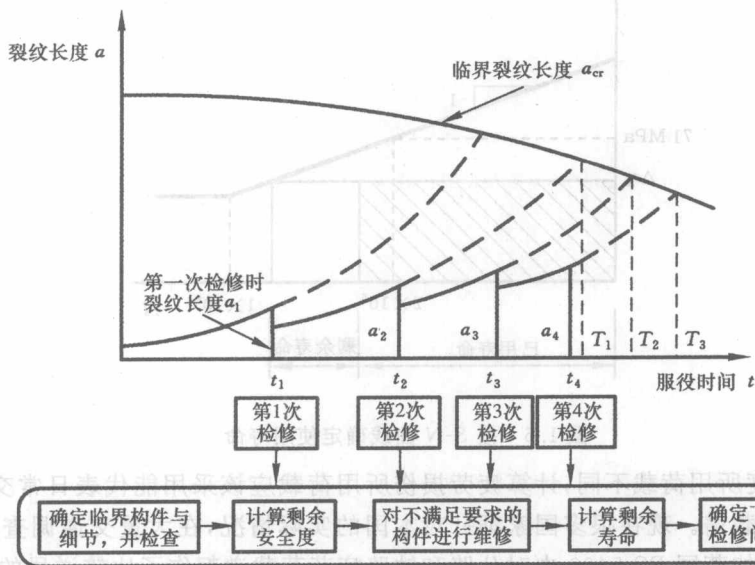


图 1.7 断裂力学方法评估钢桥剩余寿命(Chen,1999)

实践表明,采用断裂力学方法计算剩余寿命不仅具有良好精度,而且可以确保在检测间隔内结构的使用安全。对于铆接钢桥,由于铆钉较多,铆接构造也较复杂,如节点板和补强焊缝,使得初始裂纹大小的确定比较困难。国外最常用的是观测方法,这种方法计算结果过于保守。如今国外致力于发展一些无损或微损探测方法。在老钢材料疲劳断裂常数的确定方面,德国亚琛工业大学作了较系统的试验研究,发展了一种实桥钻孔取样的试验方法,但这一试验方法会给桥梁造成一定的损伤。

铆接钢桥构造细节与传力均较复杂,因而存在求解复杂边界条件下的应力强度因子的问题。目前,解决的方法有两种(徐晓飞,1999):一种是将复杂裂纹形式简化为简单的裂纹形式,如远场荷载下板中的孔边单边裂纹或孔边双边裂纹;另一种是按有限元或组合法来求取复杂边界条件下应力强度因子。

老龄钢桥的剩余安全度与剩余寿命是与当时的设计、施工和以后的维护分不开的,细节构造和钢种的选用以及施工方法给定了一个桥梁的疲劳特征。在施工过程中会出现误差、连接缺陷,有时还带来预料不到的损伤。对桥梁的维护就是对桥梁状态的描述、评判与保持,对这些措施的记录构成了桥梁档案的重要组成部分。在接近或超过桥梁设计寿命的时候,疲劳裂纹可能被探测到,这时,桥梁将进入一个特殊的使用期。

从断裂力学和统计学的角度出发,一个老龄钢桥的检测与继续使用之间是相关的。众所周知,桥梁在运营过程中构件间的联系作用将减弱,受力也会重分配,这往往导致临界构件受力的升高,另外桥梁的承载性能还受到腐蚀、射线损伤与材料退化的影响,结果造成实际断裂临界裂纹尺寸随时间减小。

研究老龄钢桥档案对识别临界疲劳细节是非常有帮助的,现场桥梁检测提供了桥梁的外观、力学状态和补充档案缺失部分(设计蓝图、施工说明和损伤记录等)的第一手资料,用于剩

余寿命计算的初始裂纹是通过理想化检测到的裂纹(指未加修补)或者裂纹正好是检测手段的识别界限的假定(未检测到裂纹时)来获取的。为了提高整个桥梁系统的安全度,带有可见裂纹的构件或者那些不能承受龄钢假设裂纹的构件必须被加强或替换,由此可降低下一使用阶段的统计裂纹大小。这将使得老龄钢桥能逐步满足使用要求。通过对裂纹的扩展模拟来计算修补后的桥梁剩余寿命,用它来确定下一检测时间。由于有越来越多的潜在缺陷向裂纹增长,而且裂纹增长后期愈来愈快,老龄钢桥的剩余寿命将愈来愈低,这将引起检测间隔的缩短和要修补构件的增多,使得桥梁的继续使用不经济,这时,应该新建一座桥梁。这样一个检测过程总是置老龄钢桥的构件和承载性能于监视之下,可以由此得知计算值与真实情况的误差,以便改善计算模型。

可见与传统的疲劳分析方法相比,断裂力学方法的优点主要在于:①承认初始缺陷的存在更符合实际情况;②评估的立足点是结构的目前状况,这一点对于现役老龄钢桥的使用寿命评定意义重大,即减小了由于桥梁的受载历史难以得到而造成的评估误差。

1.3.3 疲劳可靠性方法

随着人类对疲劳问题认识的深入,出现了概率疲劳与概率断裂研究分支,并有学者将其应用于结构概率剩余寿命与使用安全评估之中,逐渐形成了结构疲劳可靠性评估的基本理论框架(Provan, 1987; 刘文琰, 1999; 钟群鹏, 2000)。应用疲劳可靠性方法评估钢桥剩余寿命的基本过程如图 1.8 所示。首先,确定临界构件与目标可靠度;建立疲劳可靠性分析模型,进而计算时变疲劳可靠度;根据时变疲劳可靠度和目标可靠度确定下一检修间隔;在某一次检修后,结构的疲劳可靠性分析模型将得到更新与修正,从而可获得新的时变疲劳可靠度,再进一步确定下一检修间隔;如此循环下去,直到对结构检修已不经济为止。

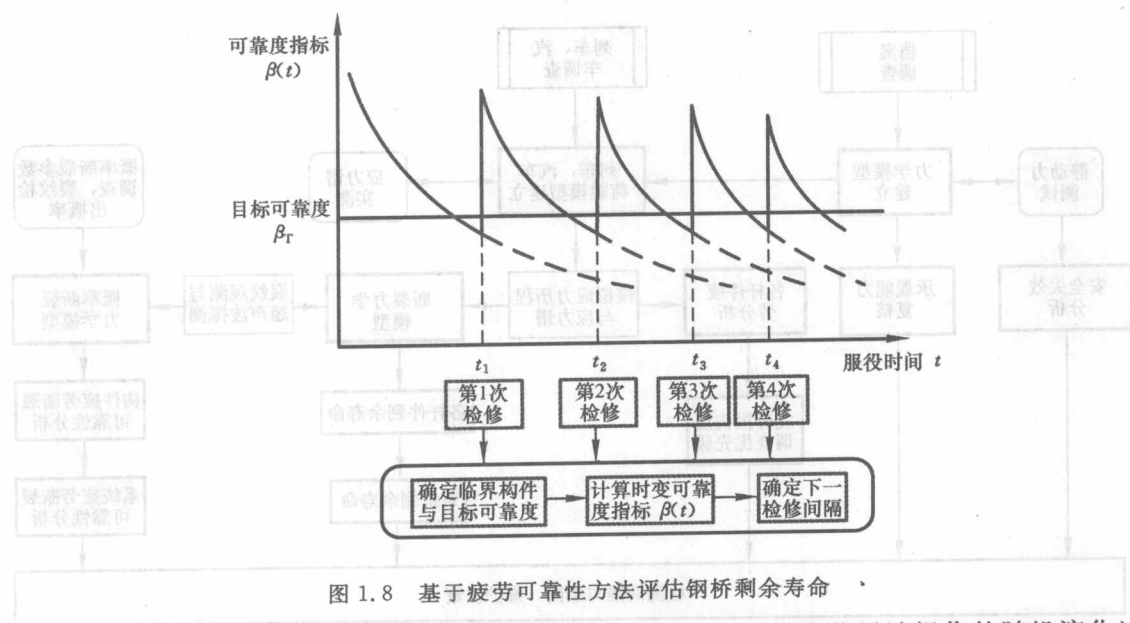


图 1.8 基于疲劳可靠性方法评估钢桥剩余寿命

与确定性评估方法相比,疲劳可靠性评估方法可以真实反映疲劳累计损伤的随机演化过程,评估结果更加科学合理。但由于目前相关的实验与实测数据较为匮乏,确定疲劳可靠性分析模型中随机变量的统计概型和数字特征是一项十分困难的工作。此外,在确定结构疲劳失