

文章编号:1671-8879(2005)02-0055-05

既有铆接铁路钢桥剩余寿命的评估

王春生^{1,2}, 陈艾荣³, 陈惟珍³, 聂建国¹

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 长安大学 桥梁与隧道陕西省
重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘 要:为确保既有铆接铁路钢桥使用安全,探讨了评估既有铆接铁路钢桥疲劳剩余寿命的方法。以京九线赣江桥为例,介绍了基于断裂力学的既有铆接铁路钢桥剩余寿命评估的原理与方法。基于断裂力学的评估过程主要包括如下 4 个步骤:识别临界构件、计算临界裂纹尺寸、疲劳裂纹扩展模拟、确定探测间隔。根据赣江桥剩余寿命评估结果:若按保证桥梁的正常使用功能,超声波探测间隔为 1 a;若按保证主桁结构承载安全,则探测间隔为 3 a。

关键词:桥梁工程;既有铆接铁路钢桥;疲劳剩余寿命;断裂力学;探测间隔;评估

中图分类号:U445.7 **文献标识码:**A

Assessment of remaining fatigue life for existing riveted railway bridges based on fracture mechanics

WANG Chun-sheng^{1,2}, CHEN Ai-rong³, CHEN Wei-zhen³, NIE Jian-guo¹

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
3. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In China the existing riveted railway bridges are often required to carry an increasing volume of traffic, usually consisting of trains heavier than those considered in the original design. An improved method for the estimation of the actual fatigue life and safety of such structures are required in order to make their continued safe use. Through the example of Ganjiang Bridge on Jing-jiu railway line, the fracture mechanics model applied to evaluate the remaining fatigue life of existing riveted railway bridges is investigated. The general procedure to determine the remaining fatigue life of existing riveted railway bridges can be divided into the following four steps: identification of the vital elements to be analyzed from bridge system, calculation of the critical crack size, simulation of crack growth from the initial crack size to the critical crack size, determination of economical and safe inspection intervals. According to the remaining fatigue life assessment results of Ganjiang Bridge, the inspection intervals for assuring the normal service function is only one year, and the inspection intervals for assuring the load-carrying capacity of main truss is three years.

Key words: bridge engineering; existing riveted railway bridges; remaining fatigue life; fracture mechanics; inspection intervals; assessment

收稿日期:2004-03-17

基金项目:国家自然科学基金项目(50408028);清华大学中大博士后基金项目;长安大学科学基金项目

作者简介:王春生(1972-),男,黑龙江绥化人,长安大学讲师,清华大学博士后。

0 引言

计算既有铆接铁路钢桥剩余寿命,可以采用经典疲劳分析方法^[1,2],即依照传统韦勒曲线,前提是准确已知受载历史,这在既有钢桥剩余寿命评估中是较难实现的;而且由于构件疲劳抗力曲线难以精确确定,往往会导致结果离散性很大,与真实情况有较大差别。克服这些缺陷的最佳方案是依据断裂力学方法,从已观察到的裂纹(很少发生)或假设的裂纹出发,模拟裂纹的扩展来计算既有钢桥的剩余寿命^[2]。本文基于断裂力学理论,预测既有铆接铁路钢桥的剩余寿命与检测间隔,并对其使用安全进行分析。

1 识别临界构件

评价既有铁路钢桥安全的出发点是识别哪些构件的破坏将导致桥梁的损坏或可能出现倒塌,这些构件可分为 4 个等级:串联构件、冗余构件、次要构件、桥面系^[3]。通过将构件分级,可以决定安全分析是对单个构件或者是整桥进行或者不进行。重要构件和临界构件的破坏将引起整座桁架桥的倒塌,其识别过程见图 1。通过对既有铁路桁架桥失效模拟分析,可知下弦杆、吊杆、斜腹杆、铁路横梁和纵梁可作为临界构件。此外节点板多半是一块板,没有足够的构造强壮性,因此验算它的断裂安全性是必需的。但试验证实,它后于杆件破坏。风撑和其他附属杆件被视为次要构件。

2 断裂力学评估模型

对于铆接钢桥,裂纹一般从钉孔边萌生,并沿垂直于构件方向扩展至断裂,因此可以假定钉孔与裂纹近似为 1 个大裂纹。这样的假定是偏安全的。参照国外研究成果,本文把构件缀合成份-板角钢,并结合铆钉布置形式分别简化为两种基本断裂力学模型^[4]: CCT=中心裂纹(图 2), DECT=双边裂纹(图 3)。

2.1 初始裂纹

超声波探测的初始裂纹为

$$2a_i = D + 2 \times \text{探测值}$$

其中, D 为铆钉孔直径。

2.2 临界裂纹

随着疲劳裂纹的扩展,在外载作用下可能会出现构件净截面屈服破坏的状态,即发生韧断,这种破坏状态下的疲劳裂纹临界长度计为 a_N 。 a_N 的近似表

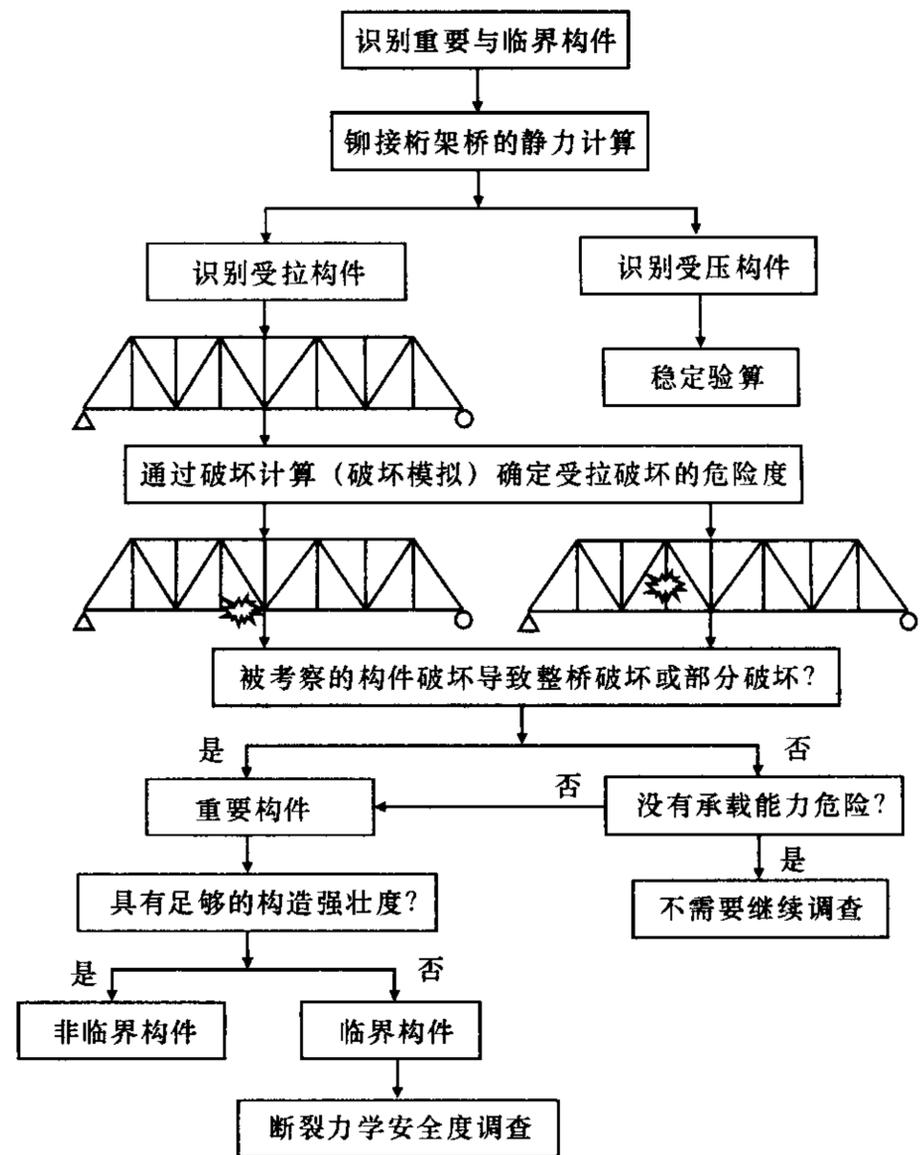


图 1 识别赣江桥的重要与临界构件

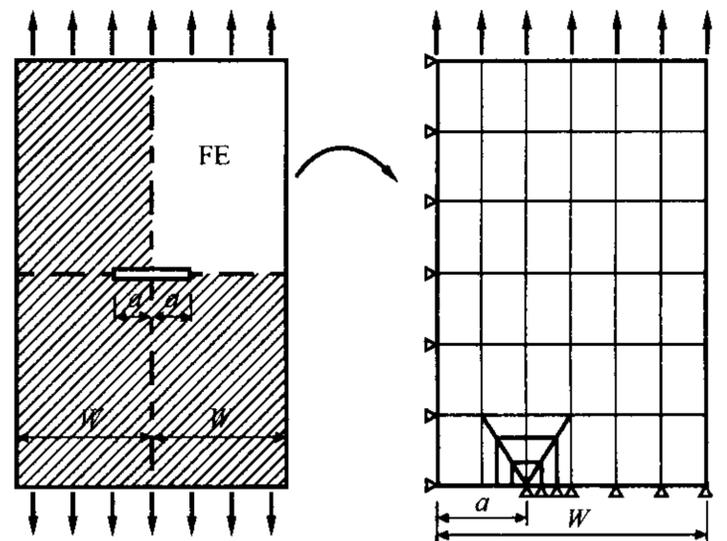


图 2 CCT 断裂力学有限元模型

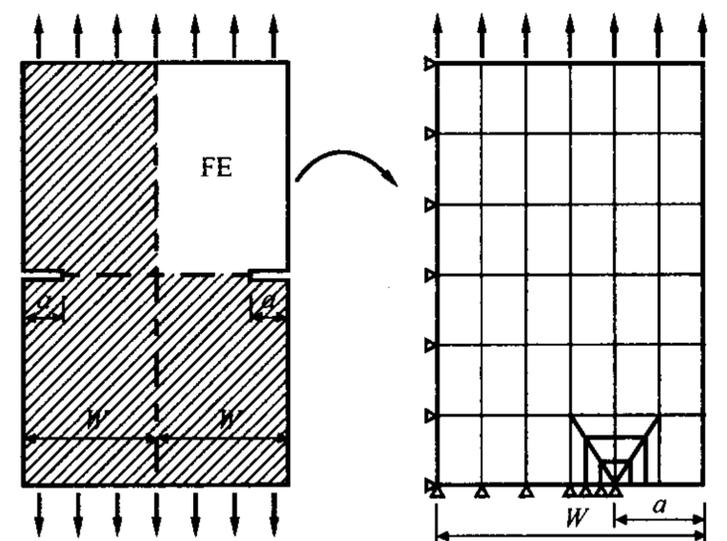


图 3 DECT 断裂力学有限元模型

达式为

$$\text{CCT} \quad a_N = W(1 - \sigma_{\max}/R_{el}) \tag{1}$$

$$\text{DECT} \quad a_N = W \sqrt{2.25 + 4(1 - \sigma_{\max}/R_{el})} - 1.5W \tag{2}$$

式中: W 为板宽; R_{ei} 为屈服强度; σ_{max} 为恒、活载应力之和的最大值。

如果裂尖应力强度因子 K_I 大于钢材的断裂韧性 K_{IC} , 截面有发生脆断的可能, 这时的临界裂纹长度可按下式计算得到

$$a_{cr} = (K_{IC}/Y\sigma_{max})^2/\pi \quad (3)$$

式中: Y 为几何修正因子。

式(3)中的几何修正因子 Y 可以从应力强度因子手册查到

CCT

$$Y = \frac{1.0 - 0.5 \frac{a}{W} + 0.37 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 0.044 \left(\frac{a}{W}\right)^3}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}} \quad (4)$$

DECT

$$Y = \frac{1.122 - 0.561 \frac{a}{W} - 0.015 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.091 \left(\frac{a}{W}\right)^3}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}} \quad (5)$$

按上述计算步骤所得临界裂纹长度, 必须小于构件成份实际所能承受的最大长度 a_{max} , 对于角钢, 试验证实: 临界裂纹大小不能超过肢长。按以上的计算分析, 最终确定的杆件断裂失效临界裂纹值为

$$a_f = \min(a_N, a_{cr}, a_{max}) \quad (6)$$

2.3 剩余寿命计算

桥梁结构中裂纹增长速度较低, 裂纹增长公式可采用由 Kesnil 和 Lukas 修正的 Paris 公式。

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C(\Delta K_{eff}^m - \Delta K_{eff,th}^m) & \Delta K_{eff} \geq \Delta K_{eff,th} \\ 0 & \Delta K_{eff} < \Delta K_{eff,th} \end{cases} \quad (7)$$

其中, C 和 m 为裂纹扩展参数, 根据 Barsom 的试验结果^[5], 可取 $C = 6.889 \times 10^{-12}$, $m = 3$ 。

如果在积分 Paris 方程中只考虑 $\Delta\sigma$, 会得到一个非常偏于安全的结果。实际上存在 1 个与应力比 $R(R = \sigma_{min}/\sigma_{max})$ 相关的门槛值 ΔK_{th} , 则裂纹增长速度可采用下列公式计算

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} 0 & \Delta K \leq \Delta K_{th} \\ C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) & \Delta K > \Delta K_{th} \end{cases} \quad (8)$$

上式中的应力强度因子变程按下式计算

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} Y \quad (9)$$

ΔK_{th} 与 R 的相关性可采用英国规范 BSPD6493 的推荐公式

$$\Delta K_{th}(R) = \begin{cases} 5.38 - 6.77R & R \leq 0.5 \\ 2.0 & R > 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

为了能考虑进应力序列的影响, 采用模拟应力历程, 并按雨流法计数出封闭循环及先后顺序, 用以直接计算裂纹增长。裂纹增长计算可以这样进行: 首先从雨流计数结果得出每次循环应力幅度 $\Delta\sigma_i = \sigma_{mini} - \sigma_{maxi}$ 以及应力比 $R_i = \sigma_{mini}/\sigma_{max}$, 再比较 $\Delta K_i = \Delta K(\Delta\sigma)$ 与 $\Delta K_{th}(R_i)$, 删除小于门槛值不产生裂纹增长的应力幅。裂纹由初始裂纹 a_i 扩展到临界裂纹 a_f (图 4) 的剩余寿命可按下式计算

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\left(\frac{da}{dN}\right)} \quad (11)$$

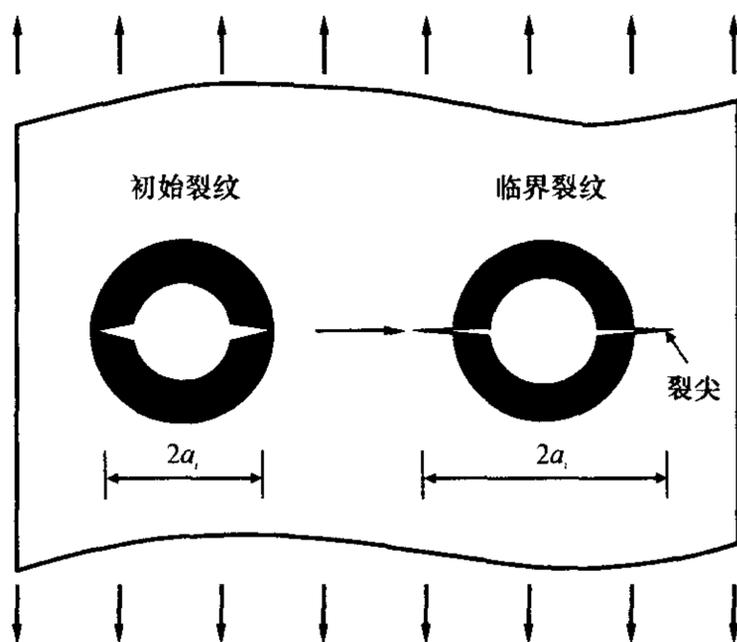


图 4 铆接构件初始与临界裂纹形态

2.4 探测间隔

对于超声波探测方法, 必须考虑有一次漏检的可能性, 因此安全系数应取 2.0, 即将剩余寿命除以 2.0 可得到探测间隔。

3 评估实例

3.1 桥梁概况

赣江大桥是京九线上一座双线公路铁路两用大桥, 建成于 1962 年。该桥由南、北二桥组成, 主跨为 64 m 下承式铆接钢桁梁。64 m 跨钢桁梁主桁宽 9.7 m, 在两主桁外侧各有 4.5 m 行车道和 0.75 m 人行道, 公路与铁路在同一平面内。赣江大桥自建成通车以来, 铁路钢桁梁进行了充分的维护与管理, 1995 年桥梁使用功能发生重大变化, 复线通车。1997 年南桥第 10 孔铆接钢桁梁跨中 L_4 节点遭到爆炸破坏, 破坏严重, 南昌铁路局立即对该部位进行加固抢修, 随后进行的静动载试验认为: 加固暂时达到了预期效果, 在一定限制条件下, 可以正常通行现行荷载, 但从长远来看, 疲劳问题将会变得突出。2002 年 7 月, 南昌铁路局决定对赣江南桥第 10 孔主桁部分以及铁路运营状况进行评定研究, 为线路运营与维护提供决策依据。南昌赣江大桥是京九线

的咽喉,对第 10 孔钢梁进行剩余寿命和使用安全评估,以确保该桥的正常安全运营^[6]。

3.2 剩余寿命

由赣江桥设计资料可知该桥采用的钢材为 3 号桥梁钢,考虑到当时钢材的冶炼水平,综合国内外有关资料,钢材的断裂韧性取为 $K_{IC} = 50 \text{ MPa}\sqrt{a}$,屈服强度取为 $R_{el} = 250 \text{ MPa}$ 。表 1、表 2 列出了赣江桥按简化断裂力学模型分析时,各个杆件 a_{max} 、 a_N 、 a_{cr} 和 a_f 的计算结果。杆件编号如图 5 所示。根据现场超声波探测结果确定的各杆件初始裂纹 a_i (表 1、表 2)。赣江桥铁路列车荷载谱与应力谱的模拟参见文献^[6]。

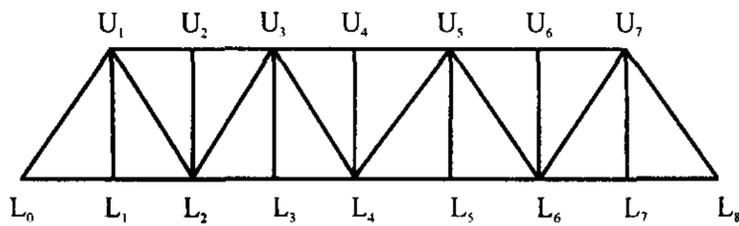


图 5 主桁杆件编号

表 1、表 2 分别列出了赣江桥主桁上、下游临界杆件按简化断裂力学模型计算的剩余寿命与超声波探测间隔。在全桥所有构件中,铁路桥面系的钢纵梁的剩余寿命相对较短,其中下游侧 L_3L_4 铁路纵梁的剩余寿命最短,为 2.3 a。主桁片中第一吊杆的剩余寿命相对较短,其中上游侧 U_1L_1 吊杆剩余寿命最短,为 5.1 a。

铁路桥面系的钢纵梁疲劳失效仅会导致桥面局部破坏,使桥梁丧失正常使用功能,若按使用功能为失效准则,由表 1、表 2 可知赣江桥结构疲劳剩余寿命为 2.3 a,且由铁路纵梁控制。主桁片内部杆件中上游侧 U_1L_1 吊杆剩余寿命最短,其疲劳破坏后将危及结构整体承载安全;可见若按承载力为失效准则,赣江桥结构疲劳剩余寿命为 5.1 a,且受上游侧 U_1L_1 吊杆控制。由结构剩余寿命评估结果可知,铁路纵梁和主桁吊杆为薄弱构件,结构使用寿命受薄弱构件控制。

3.3 探测间隔及维护对策

若按保证桥梁的正常使用功能,由表 1、表 2 可知,采用超声波探测的方法必须每年进行一次,以确定裂纹是否有扩展;如无扩展时,本文中的剩余寿命分析仍可适用;如扩展量不大时,可利用杆件裂纹扩展曲线,重新安排以后的维修对策。若按保证主桁结构承载安全,则探测间隔为 3 a。由于多数杆件存在脆断的危险,因此应加强对这些杆件与节点板连接处钉孔的探测。

由以上的分析可知,探测间隔主要受铁路纵梁和第一吊杆控制,且需每年进行一次,这样的探测安排间隔较短,在具体实施中会有困难。因此可采用加强相关杆件来延长检测间隔。具体加固措施,可

表 1 赣江桥上游侧主桁杆件临界裂纹尺寸与剩余寿命

上游杆件号	简化模型	2W	a_{max}	a_N	a_{cr}	a_f	$2a_i$	脆断	剩余寿命/a	探测间隔/a
U_1L_2	DECT	240	100	77.504	54.060	54.060	23.0	✓	79.1	40
U_3L_4	DECT	240	100	94.394	90.410	90.410	33.0	✓	44.6	22
U_1L_1	CCT	220	100	59.242	47.220	47.220	33.0	✓	5.1	3
U_2L_2	CCT	220	100	81.182	78.880	78.880	23.0	✓	290.1	145
U_3L_3	CCT	220	100	67.507	58.072	58.072	31.0	✓	18.6	9
U_4L_4	CCT	220	100	98.716	103.650	98.720	29.0	✗	9 767.2	4 884
L_0L_1	DECT	240	100	59.679	30.930	30.930	23.0	✓	27.3	14
L_1L_2	DECT	240	100	80.513	59.840	59.840	33.0	✓	47.5	24
L_2L_3	DECT	240	100	81.270	61.380	61.380	29.0	✓	71.4	36
L_3L_4	DECT	240	100	80.161	59.140	59.140	33.0	✓	58.1	29
U_7L_6	DECT	240	100	77.504	54.060	54.060	23.0	✓	79.1	40
U_5L_4	DECT	240	100	94.394	90.410	90.410	23.0	✓	64.4	32
U_7L_7	CCT	220	100	59.242	47.220	47.220	23.0	✓	7.8	4
U_6L_6	CCT	220	100	81.182	78.880	78.880	23.0	✓	290.1	145
U_5L_5	CCT	220	100	67.507	58.072	58.072	33.0	✓	17.2	9
L_8L_7	DECT	240	100	59.679	30.930	30.930	23.0	✓	27.3	14
L_7L_6	DECT	240	100	80.513	59.840	59.840	23.0	✓	71.3	36
L_6L_5	DECT	240	100	81.270	61.380	61.380	23.0	✓	91.4	46
L_5L_4	DECT	240	100	80.161	59.140	59.140	23.0	✓	86.6	43
L_3L_4 铁路纵梁 R	CCT	110	50	39.769	45.090	39.770	23.0	✗	3.7	2
L_3L_4 铁路纵梁 L	CCT	110	50	39.673	44.990	39.670	23.0	✗	3.5	2

表 2 赣江桥下游侧主桁杆件临界裂纹尺寸与剩余寿命

下游杆件号	简化模型	2W	a_{max}	a_N	a_{cr}	a_f	$2a_i$	脆断	剩余寿命/a	探测间隔/a
U ₁ L ₂	DECT	240	100	77.490	54.03	54.03	23.0	✓	72.0	36
U ₃ L ₄	DECT	240	100	94.393	90.40	90.40	23.0	✓	65.1	33
U ₁ L ₁	CCT	220	100	57.743	45.44	45.44	23.0	✓	7.2	4
U ₂ L ₂	CCT	220	100	81.164	78.86	78.86	23.0	✓	273.1	137
U ₃ L ₃	CCT	220	100	67.625	58.24	58.24	23.0	✓	26.4	13
U ₄ L ₄	CCT	220	100	95.681	100.18	95.68	29.0	✗	1 708.7	854
L ₀ L ₁	DECT	240	100	60.310	31.48	31.48	23.0	✓	33.1	17
L ₁ L ₂	DECT	240	100	80.301	59.42	59.42	23.0	✓	72.7	36
L ₂ L ₃	DECT	240	100	81.519	61.90	61.90	23.0	✓	87.3	44
L ₃ L ₄	DECT	240	100	79.901	58.62	58.62	23.0	✓	81.6	41
U ₇ L ₆	DECT	240	100	77.490	54.03	54.03	23.0	✓	72.0	36
U ₅ L ₄	DECT	240	100	94.393	90.40	90.40	23.0	✓	65.1	33
U ₇ L ₇	CCT	220	100	57.743	45.44	45.44	23.0	✓	7.2	4
U ₆ L ₆	CCT	220	100	81.164	78.86	78.86	23.0	✓	273.1	137
U ₅ L ₅	CCT	220	100	67.625	58.24	58.24	23.0	✓	26.4	13
L ₈ L ₇	DECT	240	100	60.310	31.48	31.48	23.0	✓	33.1	17
L ₇ L ₆	DECT	240	100	80.301	59.42	59.42	23.0	✓	72.7	36
L ₆ L ₅	DECT	240	100	81.519	61.90	61.90	23.0	✓	87.3	44
L ₅ L ₄	DECT	240	100	79.901	58.62	58.62	23.0	✓	81.6	41
L ₄ L ₄ 铁路横梁	DECT	240	100	95.287	92.29	92.29	23.0	✓	28.9	14
L ₃ L ₄ 铁路纵梁 R	CCT	110	50	39.576	44.88	39.58	23.0	✗	2.3	1
L ₃ L ₄ 铁路纵梁 L	CCT	110	50	39.724	45.04	39.72	23.0	✗	2.3	1

根据加固费用、探测间隔、每次探测费用等,进行综合分析确定。

4 结 语

(1)断裂力学评方法克服了传统疲劳评估方法的不足,通过周期性的裂纹探测,可以防止钢桥发生灾难性的突然疲劳断裂失效,从而确保了既有铁路钢桥的使用安全。

(2)以京九线赣江桥为例,给出了剩余寿命评估结果与维护对策:若按保证桥梁的正常使用功能,超声波探测间隔为 1 a;若按保证主桁结构承载安全,则探测间隔为 3 a;且探测间隔受薄弱构件(铁路纵梁和第一吊杆)控制。为延长检测间隔,可对桥梁中的薄弱构件进行加固处理。

参考文献:

References:

- [1] Fisher J W. Fatigue and fracture in steel bridges [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- [2] 王春生,陈惟珍,陈艾荣. 老铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估系统[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003,23(2):52-56.
- WANG Chun-sheng, CHEN Wei-zhen, CHEN Ai-rong.

Assessment system on remaining life and service safety of old riveted truss bridges[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2003,23(2): 52-56.

- [3] 陈惟珍. 铆接桁架桥承载安全分析[J]. 中国公路学报, 2000,13(4):53-56.
- CHEN Wei-zhen. Assessment of load carrying safety for riveted truss bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000,13(4):53-56.
- [4] 王春生. 铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估 [D]. 上海:同济大学, 2003.
- WANG Chun-sheng. Assessment of remaining fatigue life and service safety for riveted steel bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [5] Barsom J M, Rolfe S T. Fracture and fatigue control of structures: applications and fracture mechanics [M]. (Third edition), ASTM, West Conshohocken, PA, 1999.
- [6] 王春生,陈惟珍,陈艾荣,等. 既有钢桥工作状态模拟与剩余寿命评估[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(1):43-47.
- WANG Chun-sheng, CHEN Wei-zhen, CHEN Ai-rong, et al. 3D finite element model simulation and remaining fatigue life assessment of existing steel bridges [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2004,24(1): 43-47.