

# 大跨度钢桁拱桥节点疲劳性能试验研究

周志祥, 向红, 徐勇

(重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074)

**摘要:**重庆朝天门大桥是当今世界第一大跨度拱桥, 其下弦节点直接承受公路荷载与轻轨荷载的双重作用, 下弦节点连接处应力幅大, 目前大跨度钢桥中未曾有类似的设计及试验, 因此, 该文对其下弦节点连接进行了高周疲劳试验以确定其连接的可靠性。首先通过相关规范及朝天门大桥的交通量确定出模型的试验荷载, 并完成从实桥节点到模型的转换, 然后对模型进行正常设计荷载下的 200 万次疲劳试验, 该试验验证了设计寿命期内朝天门大桥节点连接的安全性, 并用空间有限元分析结果验证了试验数据的真实性。最后进行了该模型的疲劳破坏试验, 得出了这类节点的疲劳破坏规律, 为该类桥梁以后的设计及监测提供了数据及参考意见。

**关键词:**钢桁拱桥; 节点连接; 疲劳试验; 破坏试验

**中图分类号:** U443.32    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2010)06-0060-07

## Fatigue Behavior Test of Nodes in a Large-span Steel Truss Arch Bridge

ZHOU Zhi-xiang, XIANG Hong, XU Yong

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

**Abstract:** Chongqing Chaotianmen Yangtze River Bridge is the world's longest-span arch bridge. The node connections on its main truss's lower chords are to bear millions of large-amplitude stress cycles caused by automobile and light-rail train loads. However, there exists no referential designing and testing experience in such detailing on long-span steel bridges at home and abroad as yet. High-cycle fatigue behavior testing on a detailing model has been conducted to study the fatigue reliability of the bridge's critical node connections. The testing cycling load on the model is determined according to conventional specifications and the expected traffic flow on the Bridge. The 1/2-scale detailing model is carefully fabricated to simulate the node prototype and undergo the 2 million-cycle testing with the design load. Through testing, fatigue reliability of Chaotianmen Yangtze River Bridge's main-truss lower-chord node connections during the design service life is verified. In addition, static test data are compared with those calculated by finite element analysis to prove the validity of the node model. In the end, fatigue destruction test of the model was carried out to get the fatigue failure law of the node connection and provide necessary parameters and reference for designing and monitoring of this bridge in the future.

**Key words:** steel truss arch bridge; node connection; fatigue test; destruction test

重庆朝天门长江大桥为公轨两用城市桥梁, 主 式钢桁连续系杆拱桥(图 1)。桥面采用双层布置, 桥采用跨径布置为 190 m+552 m+190 m 的中承 上层为双向 6 车道和两侧人行道, 桥面总宽 36.5

收稿日期: 2010-04-25

基金项目: 西部交通科技项目(200631881448)

作者简介: 周志祥(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事桥梁结构行为与新技术研究, (E-mail) zhouzhixiang@cqitu.edu.cn。

向红(联系人), 男, 博士, 主要从事桥梁结构研究, (E-mail) xianghong04@163.com。

m;下层中间为双线城市轨道交通,两侧各预留1个汽车车行道。下层桥面轨道横梁跨度达29 m,通过连接角钢用高强螺栓与下弦节点的节点板相连。下弦节点直接承受公路荷载与轻轨荷载的双重作用,导致轨道纵梁与横梁连接部位的应力幅大,对于大跨度钢桁梁桥,节点疲劳破坏是其最主要的破坏形式<sup>[1-4]</sup>。目前常规钢桥节点的设计规范显得过于简单,并不适合大型复杂受力节点的静力承载能力分析,而关于大型节点的疲劳承载能力分析,设计规范更没有规定。由于重庆朝天门长江大桥轨道横梁与主桁连接在国内外大跨度钢桥中未曾有类似设计及试验,目前的疲劳研究还不够深入,系统的试验资料也较少,一些结构的疲劳性能理论分析只能作为参考,因此,节点连接部位的可靠性除了理论分析外,有必要对该种类型节点连接进行疲劳试验。

20世纪30—40年代,用小型的拉压试件,在能力为0~1 000 kN或±500 kN试验机上进行疲劳试验。试验的背景:一是焊接开始用于桥梁;二是发现铆接桥在多年使用后有疲劳开裂状况。美国从1967年开始进行大规模钢结构疲劳试验研究,提出了根据应力幅 $\Delta\sigma$ 和结构构造细节来确定疲劳寿命 $N$ 的方法,该方法于1977年已为AASHTO公路桥梁设计规范<sup>[5]</sup>和AREA铁路桥梁钢结构规范所采用;日本钢结构协会疲劳设计指南<sup>[6]</sup>、英国BS5400<sup>[7]</sup>、欧洲钢结构规范<sup>[8]</sup>和西德桥规DN804也先后采用这些试验研究成果,该方法将不同的焊接接头型式,按疲劳强度相似情况分为A、B、C、D、E、F 6个等级,分别给出了其容许应力幅 $[\sigma]$ 与循环次数之间关系的容许应力曲线。由于材料、工艺、连接形式和构造细节的不同,上述国外研究成果与规范条文并不能照搬到中国大跨度钢桥节点高强螺栓连接的疲劳设计中,故只能提供参考。该文对经常规规范,根据朝天门大桥的交通量得出节点试验模型的试验荷载。采用空间有限元对全桥进行分析从而确定出全桥受力最不利的节点并完成从实桥节点到节点模型的转换,采用美国MTS公司的全自动液压伺服作动器进行200万次正常设计疲劳荷载试验,最后继续提荷载等级分逐级加载直到节点模型疲劳破坏。



图1 重庆朝天门长江大桥

试验提供的研究结果,一方面,通过对朝天门长江大桥这类高强螺栓连接节点的构造设计安全性和合理性的验证,从而对设计提出优化性建议,保证该类结构经济性和可靠性的实现;另一方面,可以为推动该类节点构造在大跨度钢桥中的应用,并为该类桥梁的设计及监测提供数据及参考意见。

## 1 疲劳试验荷载的确定

钢桥疲劳属于变幅、低应力、高循环、长寿命的疲劳范畴。但是,依照目前的实验设备、技术水平和试验研究周期要求,通常只能进行常幅疲劳试验,所以必须建立变幅疲劳强度和常幅疲劳强度(等效应力幅 $\Delta\sigma_0$ )之间的联系。所谓“等效应力幅 $\Delta\sigma_0$ ”的概念是:对于变幅应力循环 $\Delta\sigma_i, n_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ )的重复荷载作用,可以运用Miner<sup>[9-13]</sup>线性积伤律得到一个损伤度相同的常幅循环应力幅 $\Delta\sigma_0$ ,其循环次数为 $\sum n_i$ ,则称 $\Delta\sigma_0$ 为“等效应力幅”。

构造细部的常幅疲劳曲线方程为:

$$m \lg \Delta\sigma + \lg N = \lg C \quad (1)$$

由此可得该构造细部在 $\Delta\sigma_i, n_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ )重复荷载作用下的损伤度为:

$$D_b = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{C} \sum n_i (\Delta\sigma_i)^m \quad (2)$$

由式(1)可得该构造细部在“等效常幅 $\Delta\sigma_0$ ”应力循环作用下的疲劳破坏次数 $N_0$ 为:

$$N_0 = \frac{C}{(\Delta\sigma_0)^m} \quad (3)$$

以 $\Delta\sigma_0$ 重复 $\sum n_i$ 次时的损伤度为:

$$D_0 = \frac{\sum n_i}{N_0} = \frac{1}{C} (\Delta\sigma_0)^m \sum n_i \quad (4)$$

令: $D_b = D_0$ ,则有:

$$\frac{1}{C} \sum n_i (\Delta\sigma_i)^m = \frac{1}{C} (\Delta\sigma_0)^m \sum n_i \quad (5)$$

于是等效应力幅为:

$$\Delta\sigma_0 = \left[ \frac{\sum n_i (\Delta\sigma_i)^m}{\sum n_i} \right]^{1/m} \quad (6)$$

将朝天门大桥的营运荷载用标准疲劳车来代表,标准疲劳车出现的次数也根据与实际营运荷载等效的原则来确定。依据疲劳损伤累积理论的Miner线性积伤律,把标准疲劳车计算的内力幅值等效成200万次循环荷载的内力幅值,表1是根据英美规范计算的结果。

表 1 根据规范计算的弯矩幅和剪力幅

汽车类型	弯矩幅/(kN·m)	剪力幅/kN
上层 AASHTO 标疲劳车	138.638	54.672
下层 AASHTO 标疲劳车	299.38	374.199
上层 BS5400 标疲劳车	119.895	52.636
下层 BS5400 标疲劳车	259.298	331.178
地铁	529.949	246.18
AASHTO 标疲劳车+地铁	536.036	383.003
BS5400 标疲劳车+地铁	532.95	345.013

从表中可以得出:节点连接处的等效弯矩幅应为:536.036 kN·M、等效剪力幅应为:383.003 kN。

根据 BS5400<sup>[7]</sup> 规范对承受公路和铁路荷载的两用桥梁,为了得出总损伤度,应对 2 种损伤值的和再乘以一定的调整系数,以便把这 2 种荷载同时发生的概率考虑进去。根据实际情况调整系数一般不超过 1.2,参考已有的研究成果<sup>[3-4]</sup>,取调整系数为 1.1。因此,对于重庆朝天门长江大桥,疲劳荷载循环 200 万次时,原型试验节点联结处调整后的等效弯矩幅为 589.64 kN·M;等效剪力幅为 421.30 kN。最终确定疲劳试验荷载上限为 213.5 kN,下限为 103.65 kN,加载点距跨中 5.2 m 处。

## 2 试验模型设计

为了解重庆朝天门大桥下层桥道的轨道横梁与下弦节点连接处的抗疲劳性能,模型在设计时尽可能地考虑实桥结构的受力特性及连接处的材质与构造细节:

- 1) 用模型与原型的几何相似比为 1:2 来模拟原型;
- 2) 模型材质与实桥完全相同;
- 3) 模型节点区域的构造细节与实桥一致;
- 4) 模型与原型在考察重点区域受力性能一致;

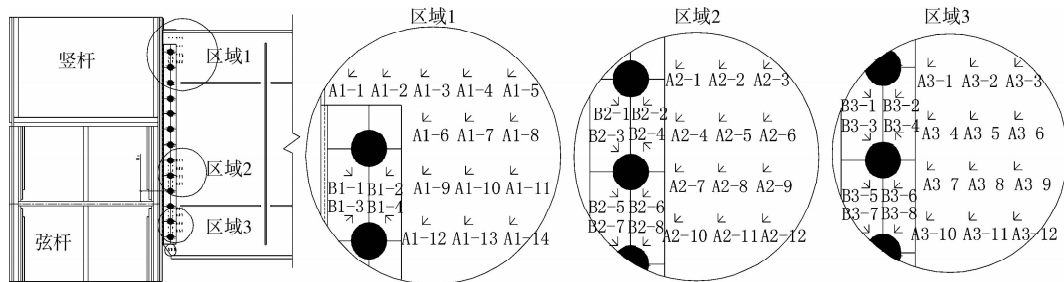


图 4 节点板与连接角钢处应变片布置

## 4 试验结果

疲劳试验前首先进行预压静载试验,预压试验

5) 模型的表面条件尽可能接近实桥结构。

通过满足这些条件使模型结构的应力状态、残余应力分布、应力集中情况、表面条件等尽可能接近实桥结构。实桥到模型的简化如图 2 所示,试验模型如图 3 所示。

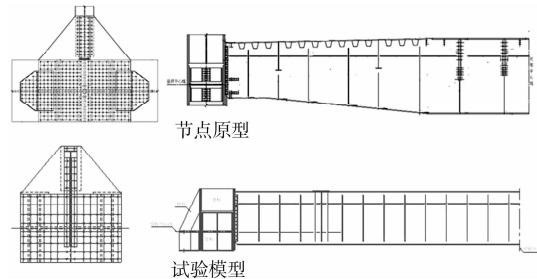


图 2 实桥节点到节点模型的简化

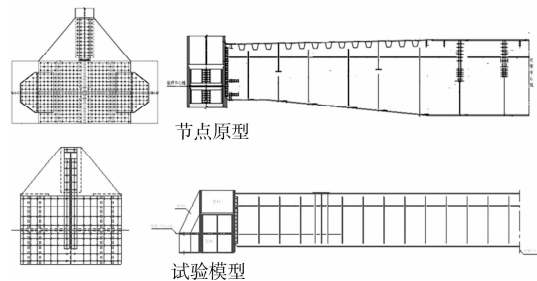


图 3 节点试验模型

## 3 试验模型应变测点布置

应变的测量采用电测法。根据试验模型的空间有限元计算分析结果选取有代表性的点进行应变测量,进而了解连接区域内的应力分布。下层桥道与下弦节点连接处受力复杂,因此在模型上该处 3 个区域全部布置 3 向 45°应变花,通过监测其应变来测定模型的主应力、剪应力和 Mises 应力。在试验中对该区域及附近范围进行详细测量,布置较多测点,而对下层桥道与下弦节点连接处的其他部位只布置少量测点。图 4 所示为部分布置区域。

重复 3 次,疲劳试验过程中停机静载试验采用逐级加、卸载,每次静载试验重复 3 次,荷载分级为:

0 → 25 kN → 50 kN → 75 kN → 103 kN →

125 kN → 150 kN → 175 kN → 213 kN → 150 kN  
→ 103 kN → 50 kN → 0 kN。

疲劳试验过程中,为了监测各测点应力,每加载1万、2万、5万、10万、20万、40万、60万、80万、

100万、120万、140万、160万、180万、200万次后停机进行静载应变测量,以便通过测点应变变化,及早发现开裂或其它异常情况,应力变化情况如图5和图6所示。

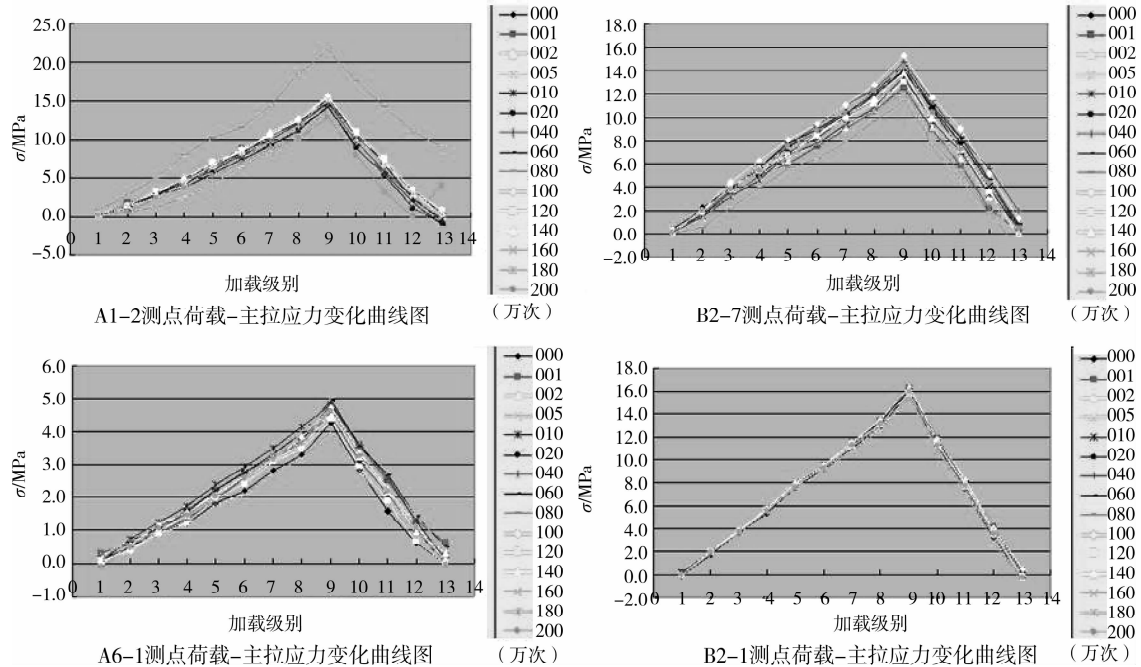


图5 节点板主拉应力实测值

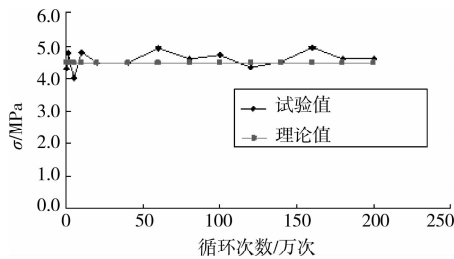


图6 B6-1 测点主拉应力随循环次数的变化曲线图

纵梁与横梁交叉节点模型测点最大主拉应力为28.3 MPa,出现在横梁上翼缘连接角钢上。模型测点的最大 Von. Mises 应力为 57.3 MPa,出现在梁腹板下部 1/3 处。横梁腹板与主桁节点连接角钢上测点的 Von. Mises 应力在 60 MPa 以内。测点主拉应力在每次静载试验时,呈线性变化,各次静载试验的主拉应力数值差别不大,未发现测点应变有明显增大或减小现象。整个疲劳加载过程中未发现异常现象。每次停机静载试验,检查试件,未发现裂纹,未发现螺栓有松动。200 万次疲劳试验后,对试件进行检查,未发现裂纹,螺栓未发现松动。

对试验模型建立了有限元计算模型(图7),计算结果见表2。从表1中可以看出,实测值与理论值的整体变化趋势基本上是一致的,除个别测点外,大多数测点都和理论值比较接近。在213 kN 荷载

作用下,除去轨道横梁加载截面附近外,模型测点的主拉应力理论计算最大值在 30 MPa 左右,实测最大值在 20 MPa 左右;Von. Mises 应力理论计算最大值在 55 MPa 左右,实测最大值在 50 MPa 左右;通过理论分析和试验结果比较,本次试验是成功的,试验的数据基本上反映了试件的工作状态,试验数据是可靠的。

## 5 疲劳可靠性评价

### 5.1 疲劳试验结果

从疲劳试验过程中的静载试验应力来看,绝大多数测点的主拉应力在 20 MPa 以内,少数几个测点的主拉应力接近 45 MPa。实测拉应力远低于各构件的疲劳容许应力。另外,整个疲劳加载过程中未发现有异常现象,200 万次疲劳试验后,对试件进行检查,未发现裂纹。下层桥道与下弦节点连接处的疲劳强度完全能够满足要求。

### 5.2 有限元计算结果

试验模型的应力水平不高,在 213 kN 荷载作用下,除去轨道横梁加载截面附近外,模型测点的主拉应力理论计算最大值在 30 MPa 左右, Von. Mises 应力理论计算最大值在 55 MPa 左右。从有限元计算结果来看,下层桥道与下弦节点连接处的疲劳强

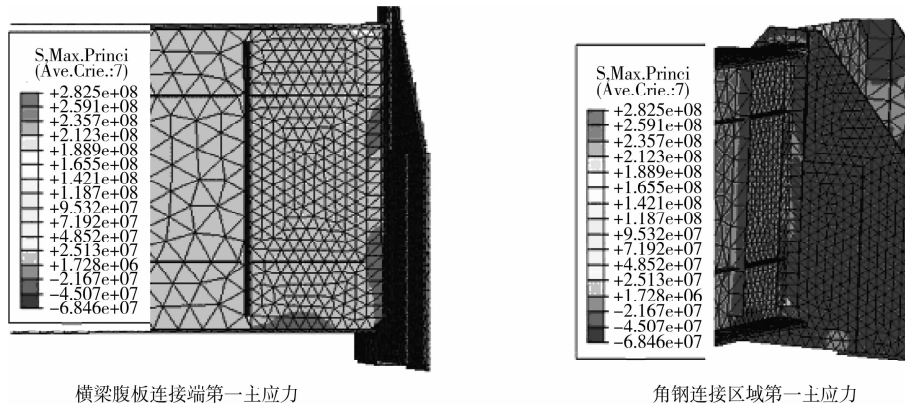


图 7 试验模型的有限元模型

表 2 试验模型的应力实测值和理论值对比

应变花编号	实测值/MPa		理论值/MPa		实测值/理论值	
	$\sigma_1$	$\sigma_{ep}$	$\sigma_1$	$\sigma_{ep}$	$\eta_1$	$\eta_{ep}$
A1-1	16.9	20.6	19.7	20.7	0.859	0.995
A1-6	11.5	23.4	23.3	25.4	0.493	0.923
A1-7	13.4	23.4	24.4	29.9	0.547	0.782
A1-11	15.9	26.5	22.9	32.7	0.695	0.809
A1-12	16.7	26.3	22.9	33.2	0.728	0.793
A1-14	16.6	28.8	21.7	33.4	0.763	0.861
A2-8	15.2	39	19	48	0.798	0.813
A2-12	15.3	39.2	18.7	47.7	0.819	0.822
A3-1	-1.6	48.9	8.8	50.5	-0.186	0.968
A3-2	0.7	45.4	15	51.5	0.046	0.968
A4-1	43.7	49.6		55.4	/	0.895
A4-2	24.9	48.9		55.4	/	0.883
A4-3	17.3	27.7			/	0.5

度完全能够满足要求。

### 5.3 相关规范验算结果

1) 中国公路规范 JTJ025-86<sup>[14]</sup>

高强螺栓连接的容许应力类别为 C 类。 $[\sigma]$  为钢材的基本容许应力； $\rho = |\sigma|_{\min} / |\sigma|_{\max}$ ，分子与分母同号应力为正，反号应力为负。重庆朝天门长江大桥实桥中的  $\rho$  介于  $-1 \sim 1$  之间。

$\rho = 0$  时，疲劳容许应力  $[\sigma_n] = 165 \text{ MPa} > 45 \text{ MPa}$ ，满足要求。

$\rho = -1$  时，疲劳容许应力  $[\sigma_n] = 103.13 \text{ MPa} > 45 \text{ MPa}$ ，满足要求。

2) 铁路钢桥设计规范 B10002.2-2005<sup>[15]</sup>

$\rho = 0.498$ ，疲劳容许应力  $[\sigma_0] = 109.6 \text{ MPa} > 45 \text{ MPa}$ ，满足要求。

3) 英国 BS5400<sup>[7]</sup>

摩擦型高强螺栓连接的构造细节类型为 C 类，

200 万次疲劳强度 50% 保证概率下为 161.9 MPa，97.7% 保证概率下为 123.86 MPa (其疲劳方程式为： $\lg N + 3.5 \lg \sigma = 13.63$ )，满足要求。

4) 美国 AASHTO<sup>[5]</sup>

美国公路桥梁设计规范 (AASHTO) 中，细节分类 B 的常幅疲劳临界值为 110 MPa  $> 45 \text{ MPa}$ ，满足要求。从以上分析可以看出，重庆朝天门长江大桥下层桥道与下弦节点连接处的疲劳强度满足要求。

5) 欧洲钢结构设计规范<sup>[8]</sup>

欧洲钢结构设计规范 (Eurocode 3 Part 1.9) 中，有关单边高强螺栓连接 (细节类型 90)，200 万次 97.7% 保证率下的疲劳强度为 90 MPa  $> 24.1 \text{ MPa}$ ，满足要求。

## 6 节点模型疲劳破坏试验

在完成与设计寿命期对应的 200 万次疲劳循环

加载试验后,对节点试验模型展开超长服役期内超负荷疲劳试验研究。具体试验破坏过程及现象描述

见表3,图8是疲劳破坏后的腹板和角钢裂纹以及螺栓松动情况。

表3 节点从加载到疲劳破坏的过程描述

循环次数	疲劳荷载幅/kN (设计荷载幅倍数)	加载次数/ 万次	疲劳荷载试验现象说明
设计寿命	103~213 (1.0)	0~200	横梁有轻微面外晃动,高强螺栓未见松动。
超长 服役 期 试 验	103~268 (1.5)	200~220	横梁下有面外晃动,高强螺栓未见松动。
	103~323 (2.0)	220~240	横梁下有明显面外晃动,高强螺栓未见松动。
	103~378 (2.5)	240~260	先有下部连接角钢和档水角钢连接界面磨出铁削粉,面外晃动加剧,下部第1颗高强螺栓出现松动。
	103~433 (3.0)	260~265	横梁腹板与下翼缘近焊缝处发现裂纹,振动加剧,第2颗高强螺栓相继松动。
	103~433 (3.0)	265~280	横梁与节点板连接角钢发现裂纹,第3颗高强螺栓相继松动。
	103~433 (3.0)	280~285	最大裂纹长扩展至110 mm,面外晃动非常显著,连接螺栓依次从下往上松动和失效。

根据结构疲劳裂纹出现前,疲劳试验实测应力幅及加载循环次数,可以对结构疲劳寿命进行估计。根据公式<sup>[16]</sup>:

$$\sigma_1^m n_1 = \sigma_2^m n_2, n_2 = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^m n_1, N = \sum \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_2}\right)^m n_i \quad (7)$$

得出计算结果表明,在设计疲劳荷载幅作用下,试验模型中纵梁与横梁交叉节点连接结构的使用寿命(出现裂纹前)是其设计寿命的4.4倍。若将疲劳荷载幅提高1.5倍,试验模型中纵梁与横梁交叉节点连接结构使用寿命是设计寿命1.3倍。当疲劳荷载幅提高到2倍以上后模型开始出现破坏。

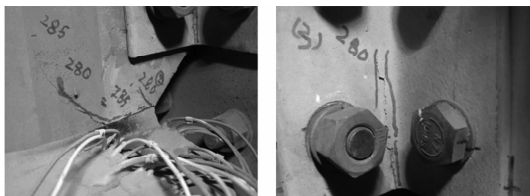


图8 疲劳破坏后的腹板和角钢裂纹

## 7 结论

1) 200万次疲劳试验加载过程中,测点主拉应力呈线性变化,各次静载测试结果基本一致,节点处于弹性工作状态。

2) 测点的动应变幅随循环次数变化不大,动应

变波形曲线比较光滑,表明测点在疲劳加载过程中受力无异常。

3) 200万次疲劳试验加载过程中未发现疲劳裂纹或螺栓松动等异常情况。

4) 节点测区应力的理论值与实测值变化趋势一致,理论值稍大于实测值,理论计算能够把握节点实际工作状态。

5) 模型试验和理论分析表明:M型节点连接构造在设计服役期内,在设计使用荷载作用下具有足够的抗疲劳强度。节点的估计使用寿命明显大于设计使用要求。

6) 该节点疲劳破坏的历程归纳为:疲劳加载—振动—面外晃动—一次应力产生—连接界面磨损—螺栓松动—联结性能退化—连接板件应力重分布—应力易集中部位出现疲劳裂纹。

## 参考文献:

- [1] 卫星,李俊,强士中. 钢桁梁整体节点典型构造细节的抗疲劳性能分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(7): 85-89. WEI XING, LI JUN, QIANG SHI-ZHONG. Fatigue performance of typical structure detail of Monolithic Joints in Steel Trusses [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(7), 85-89.
- [2] 桂国庆,余长征,等. 钢桥钢梁整体节点疲劳试验研究[J]. 工程力学, 2001, 18(4): 38-44.

- GUI GUO-QIN, YU CHANG-ZHEN etc. experimental research on fatigue of beam joints of steel bridges[J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(4):38-44.
- [3] 李俊, 李小珍. 轨道横梁与整体节点连接的疲劳试验[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(3):371-375.  
LI JUN, LI XIAO-ZHEN. Fatigue test of connection between floor beams and monothic joints[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(3): 371-375.
- [4] 乔晋飞, 李凤芹. 钢桁结合梁整体节点及细节构造设计与研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 131(8):68-81.  
QIAO JIN-FEI, LI FENG-QIN. Study and Design of integral joints and detailed structures of steel truss girder[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 131(8):68-81.
- [5] AASHTO LRFD. Bridge design specifications[S]. 3rd. ed. Association of State Highway and Transportation Officials, 2004
- [6] Japanese Society of Steel Construction. Fatigue design recommendations for steel structures [R]. 1995, Technical Rep. No. 32, Tokyo:JSSC, 1995, (32).
- [7] BS 5400-1980, Steel, Concrete and Composite Bridges [S].
- [8] prEN 1993-1-9 Eurocode 3: Design of steel structures [S]. Fatigue strength of steel structures CEN TC/250/SC3 committee document, 2003.
- [9] MINER M A. Cumulative damage in fatigue[J]. J. Appl. Mech. 1945(12):159-164.
- [10] ZHANG W, MILLER K J, A study of cumulative fatigue damage under variable loading-mode conditions [J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1996, 19(2): 229-239.
- [11] 周传月, 郑红霞, 罗慧强, 等. MSC Fatigue 疲劳分析应用与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [12] FISHER J W, STRUIK S H A. Guide to design criteria for bolted and riveted joints [J]. John Wiley and Sons, New York:1987:266-283.
- [13] 惠纪庄, 孙德仕, 邹亚科. Miner 线性累计损伤理论在汽车试验场可靠性试验强化系数研究中的应用[J]. 工程设计学报, 2008, 15(4):264-267.  
HUI JI-ZHUANG, SUN DE-SHI, ZOU YA-KE. Application of miner linear cumulative damage law in reliability test intensifying coefficient on automotive proving ground [J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(4):264-267.
- [14] 中华人民共和国交通部标准. JTJ025-86 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社 2002.
- [15] 中华人民共和国交通部标准. TB10002. 2-2005 铁路钢桥设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [16] KULAK G L, FISHER J W, STRUIK J H A. Guide to design criteria for bolted and riveted joints [M]. American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, 2001.

(编辑 胡玲)