

# 应急钢桁梁桥钢销节点疲劳性能分析

陈士通<sup>1,2</sup>, 刘屹<sup>3</sup>, 王志远<sup>2</sup>, 郝伟<sup>2</sup>, 史海东<sup>1,2</sup>

(1. 河北省交通应急保障工程技术研究中心, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 应急钢桁梁作为拼装式结构, 反复拆装及倒运过程中可能导致销孔连接位置出现损伤, 对其使用寿命产生影响。以某128 m跨应急钢桁梁桥为研究对象, 缩短销孔边距, 模拟钢桁梁销孔损伤影响, 开展疲劳性能试验及仿真模拟, 研究钢销节点疲劳性能。结果表明, 静力仿真结果与疲劳试验结果具有较好的一致性, 验证了模型的可靠性; 试验钢销节点损伤后的疲劳寿命仅为16 980次, FE-SAFE仿真分析求得疲劳寿命为20 592次, 两者较为接近, 进一步验证了疲劳试验结果的可靠性。考虑销孔损伤的疲劳寿命与正常状态相比差异显著, 说明销孔损伤会大幅降低其疲劳寿命。因此应注意应急钢桁梁杆件保护, 同时加强钢销节点质量控制。

**关键词:** 应急; 钢桁梁桥; 钢销节点; 销孔损伤; 相似模型; 疲劳

**中图分类号:** U441.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)02-0001-07

节点在结构体系中连接构件和传递载荷, 其疲劳性能一直是钢桥研究的重点问题<sup>[1-2]</sup>。王天亮等<sup>[3]</sup>通过缩尺模型对芜湖长江大桥钢梁整体节点进行了试验研究, 研究表明该桥各种构造细节均有足够的抗疲劳强度; 邓晓光等<sup>[4]</sup>针对杨泗港长江大桥钢桁梁整体焊接节点, 进行了多轴疲劳荷载作用下的有限元疲劳分析和试验研究, 结果表明该桥整体焊接节点疲劳性能满足设计要求; 童乐为等<sup>[5]</sup>研究了荷载频率对结构钢及其焊接整体节点疲劳寿命的影响; 应曙辉等<sup>[6]</sup>通过数值模拟对某跨海大桥整体节点疲劳寿命进行了可靠预测。既有研究表明, 数值模拟和疲劳性能试验为钢桁梁节点疲劳性能分析的主要手段, 相关研究主要集中于永久性钢桁梁桥, 且研究部位集中于整体节点。

应急钢桁梁桥主要用于桥梁遭遇自然灾害或战争损毁后的应急抢通, 相较于永久钢桁梁桥, 为满足快速拼装要求, 其连接节点多采用销栓形式且预留一定销栓孔间隙<sup>[7-8]</sup>, 销栓孔间隙使得其受力过程较为复杂且不易观测。此外, 应急钢桁梁为拼装式结构, 需要反复拆卸、安装。既有应急钢桁梁使用事例表明, 拆装过程可能导致销孔处出现裂纹、耳板弯曲等现象, 再者, 战时冲撞或爆炸等外力因素也可致使钢销节点出现损伤。尽管相关规范标准对于应急钢桁梁桥无具体疲劳性能要求, 但考虑应急使用安全, 有必要了解损伤钢销节点的剩余使用寿命。

鉴于此, 结合某新型应急钢桁梁桥<sup>[9]</sup>, 以主要节点为研究对象, 考虑节点销孔损伤情况, 开展疲劳性能研究, 旨在揭示损伤对于钢销节点疲劳寿命的影响, 为维修加固提供依据, 同时, 为类似销接节点疲劳分析提供参考。

## 1 应急钢桁梁桥结构概况

选取文献<sup>[9]</sup>中128 m跨应急钢桁梁进行钢销节点疲劳性能分析, 钢桁梁主桁杆件采用Q460qD钢材, 平纵联及桥面系采用Q420D钢材。主桁中心距6.5 m, 桁高12 m, 主桁杆件均采用H型钢, 腹杆布置

收稿日期: 2024-01-12 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20240020

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600605)

作者简介: 陈士通(1977—), 男, 教授, 研究方向为应急交通保障技术与装备。E-mail: chst@stdu.edu.cn

陈士通, 刘屹, 王志远, 等. 应急钢桁梁桥钢销节点疲劳性能分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 1-6, 39.

方式为不设竖杆的 X 型体系,节间长度以 6 m 为主,辅以 4 m 节间,总体布置如图 1 所示。为便于拆装作业,弦杆采用节点外钢销连接,与文献[10]中用于疲劳计算的构造细节类别有一定区别,不宜依据规范直接开展疲劳计算。

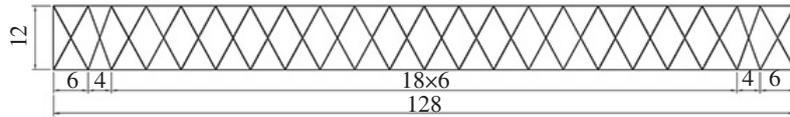


图 1 总体布置图(单位:m)

## 2 节点疲劳试验

### 2.1 试验模型设计

试验在石家庄铁道大学河北省交通应急保障技术创新中心实验室进行,考虑场地情况及加载条件限制,以几何相似比 1 : 4 开展试验模型设计,焊缝等构造细节与原型保持一致。试验桁架如图 2 所示,钢销与栓孔适配制作,试验模型安装情况如图 3 所示,作动器在上弦杆中部循环加载,两侧使用 16 cm 高钢垫梁支撑,为保证试验动载过程中作动器对桁架竖直加载,并防止试验桁架在破坏时向一侧倾倒,在桁架两侧施加柔性拉索进行限位控制。图 2 中钢销节点位置耳板销孔直径为 20 mm,鉴于钢销垂直弦杆轴力方向磕碰开裂较为常见且影响明显,现假定销孔自边缘开裂 14.5 mm,试件直接将边距由 32.5 mm 减至 18 mm,如图 4 所示。

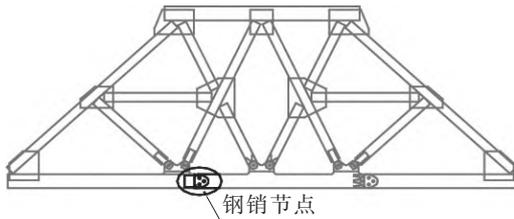


图 2 缩尺模型设计



图 3 模型安装

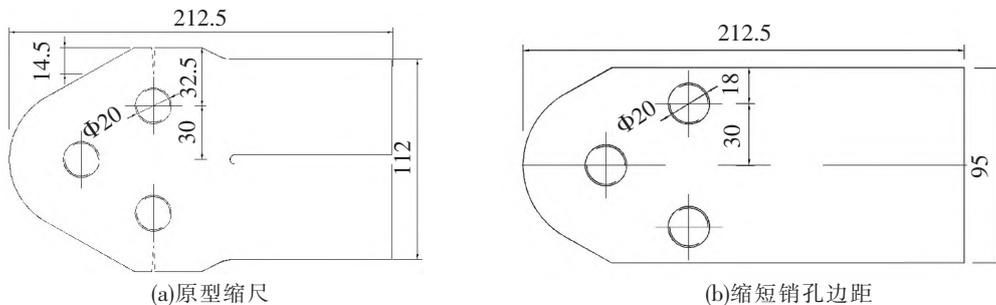


图 4 销孔边距设计(单位:mm)

### 2.2 试验荷载

建立图 5 所示有限元模型,加载文献[9]中列车荷载,并提取自桥梁一侧起 16、34、64 m 3 个位置处节点各个杆件轴力幅,见表 1。

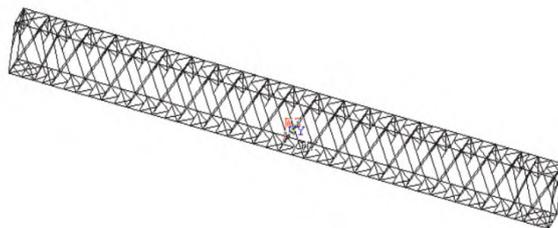


图 5 128 m 应急钢桁梁有限元模型

表 1 典型位置节点杆件轴力幅 kN

杆件	X		
	16 m	34 m	64 m
弦杆	2 158.76	4 038.25	5 746.12
左腹杆	1 107.45	812.78	627.78
右腹杆	887.78	744.39	643.61

经比较,选取跨中为最不利位置,提取该位置节点各个杆件轴力历程,见图 6。

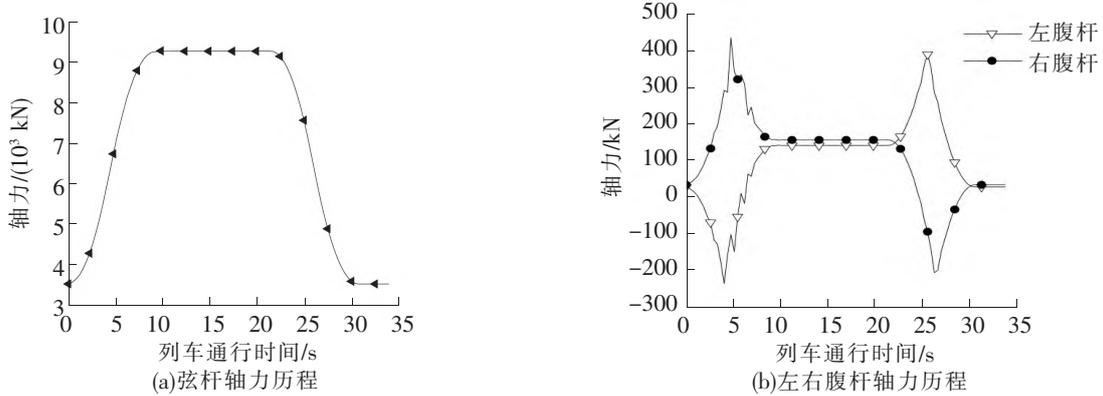


图 6 跨中节点周围杆件轴力历程

由图 6 可知,每通行一辆列车,弦杆、左右腹杆均只产生一次应力循环,弦杆轴力循环上下限均为拉力,腹杆轴力上下限为拉力-压力。由表 1 可知,弦杆轴力幅近似为 5 700 kN,左右腹杆轴力幅约为 600 kN。由于左右腹杆轴力实际接近于 0,设计模型时以弦杆轴力作为加载控制参数。相似模型应与原结构应力等效,则试验弦杆轴力幅值为  $5\ 700/16 = 356.25$  kN,取为 356 kN。弦杆为拉拉构件<sup>[10]</sup>,其疲劳破坏由应力幅控制。弦杆缩尺后截面面积为  $2\ 454\text{ mm}^2$ ,经计算应力幅为  $356\ 000/2\ 454 = 145\text{ MPa}$ 。

2.3 试验过程

沿杆件轴线方向布置应变片,弯弧处受力复杂,在节点弯弧处布置应变花,具体布置如图 7 所示。测点分南、北两侧布置,南侧测点以 A 命名,北侧测点以 B 命名,如图 8(a)所示;其中北侧测点如图 8(b)所示。加载波形使用正弦波,频率设置为 2 Hz,作动器加载下限设为 350 kN,上限设为 920 kN。

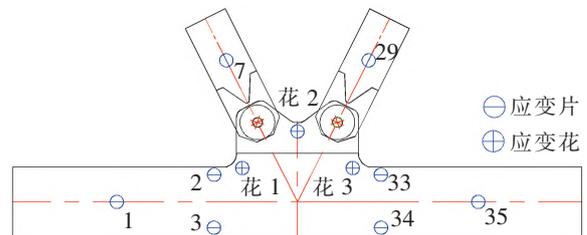


图 7 一侧关键测点布置



图 8 疲劳试验加载

先进行预加载,预加载取 1.1 倍上限值,在正式加载前先消除可能存在的装配误差。正式加载前,按每级 92 kN,共分 10 级进行 2 次分级静力加、卸载,判断构件受力是否稳定。正式加载时注意观察试件,采集加载过程中动应变,确保构件受力符合轴力幅要求。

## 2.4 试验过程分析

加载过程中分级静载应力结果如图 9 所示,动应变结果如图 10 所示。由图 9 可知,2 次分级静载中各测点应力基本呈线性变化,且 2 次静载试验结果差别不大,表明试件在正式静力加载前受力及变形已经稳定,不存在可能影响正式试验结果的额外因素。由图 10 可知,构件在动力循环加载过程中受力符合作动器所施加正弦曲线形式。经计算,轴力幅值始终保持在 356 kN 左右,试验过程符合要求。

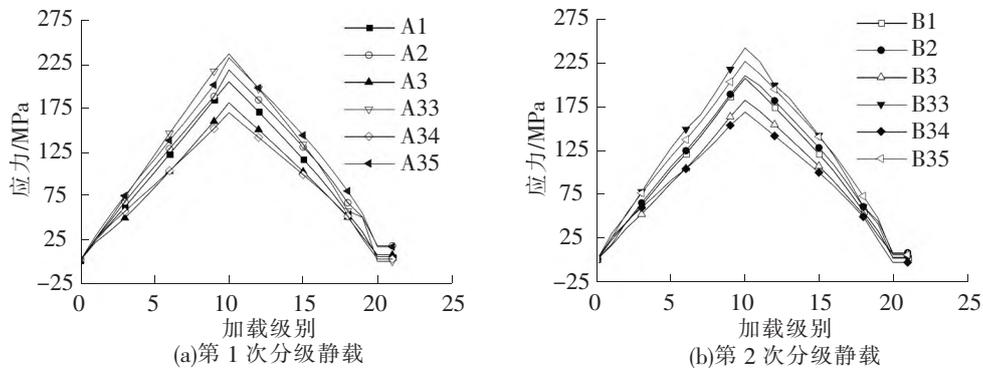


图 9 分级静载部分测点应力

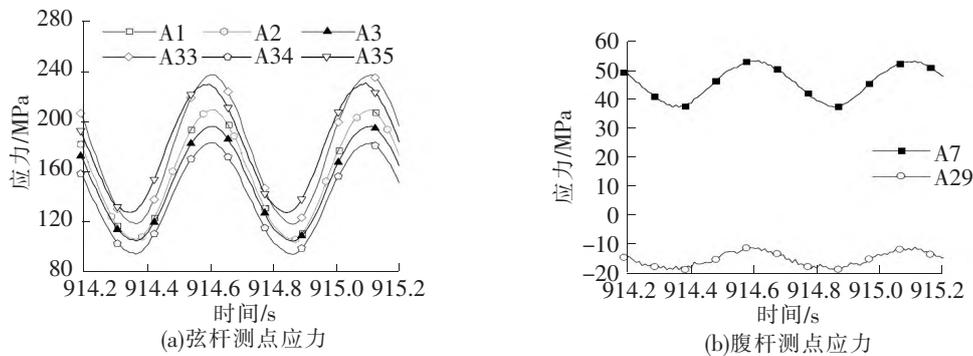


图 10 关键测点循环应力结果

## 3 静力结果分析

桁架设计时对非研究部位节点使用节点板焊接,可能使下部弦杆实际受力与原桥不一致,继而导致疲劳试验结果与实际情况存在偏差。为更加详细地探究试验模型的受力情况是否符合要求,利用 ABAQUS 建立有限元仿真模型与试验静力结果进行对照。

### 3.1 有限元模型

ABAQUS 有限元精细化模型如图 11 所示,模型中构件均采用三维实体单元 C3D8R 类型建立,材料设置为 Q460 钢材。本构关系采用图 12 双折线弹塑性模型<sup>[11]</sup>。屈服后刚度约为初始刚度的 0.005,极限应力为 565 MPa;分析步采用静力通用;应用绑定约束模拟焊接,且焊缝位置与原型基本一致;使用铰接连接器模拟钢销节点处销栓连接;支座位置使用两端简支,桁架与两侧钢垫梁采用硬接触,摩擦系数设置为 0.15。网格划分时对钢销节点及整体节点周围部件进行局部加密。

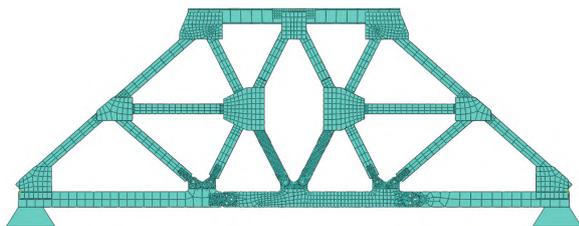


图 11 有限元精细化模型

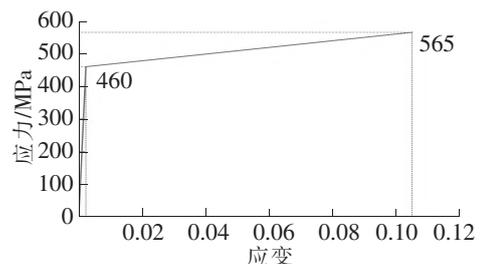


图 12 Q460 本构关系

### 3.2 结果分析

对模型施加 920 kN 竖向集中荷载,提取各个测点位置应力结果,如表 2 所示。

表 2 部分测点应力试验值与仿真值对比

测点	试验值/MPa	仿真值/MPa	误差/%
A1	207.06	212.000	2.38
A2	210.21	226.000	7.51
A3	181.96	193.000	6.07
A7	10.03	9.000	10.23
A29	19.08	18.000	5.64
A33	241.74	232.000	4.03
A34	186.16	191.000	2.60
A35	226.00	210.000	7.08
B 侧应变花 1	248.75	235.000	5.53
B 侧应变花 2	33.73	28.865	14.41
B 侧应变花 3	163.24	179.530	9.98

分析表 2 可知:试验弦杆测点轴向最大应力值为 241.74 MPa,与弦杆设计应力幅最大值 235.000 MPa 误差为 4.03%,较为接近,表明试验应力符合设计要求;测点试验与幅值应力值均处于弹性范围内,表明试验时节点周围杆件轴力满足要求;绝大部分测点应力仿真与试验值误差均在 10%以内,较为接近;测点 A7、花 2 误差虽然在 10%以上,但其应力水平较低,对疲劳试验结果影响较小。综上所述,试验结果较为可靠。

## 4 疲劳性能分析

### 4.1 规范疲劳性能评估

钢销节点在加载 16 980 次时破坏,破坏结果如图 13 所示。参照文献[10],将钢销节点视为螺栓连接,计算净截面强度下应力幅值,对其疲劳寿命进行评估。

普通螺栓连接类别疲劳抗力方程式为

$$\lg N + 3 \lg \Delta \sigma = 12.65 \quad (1)$$

式中, $\Delta \sigma$  为应力幅值; $N$  为应力幅值对应的疲劳寿命。

原截面应力幅值为 169.5 MPa,其疲劳寿命为 91.7 万次,损伤后截面应力幅值为 234.2 MPa,疲劳寿命缩短至 34.7 万次。在实际试验中,钢销节点的疲劳寿命仅为 16 980 次,与计算结果存在极大差异。这可能是由于耳板损伤导致有效传力截面积减小,同时,销孔边距减小至  $0.9d$ ,远低于规定的  $1.5d$  构造要求。进一步结合图 14 所示耳板仿真结果分析,发现其下缘应力较大,表明钢销节点除受轴向力作用外,还受明显的弯矩作用,从而加快了损伤后耳板的疲劳断裂进程,导致其实际疲劳寿命较计算寿命显著缩短。

### 4.2 仿真疲劳性能分析

FE-SAFE 软件作为一种主流疲劳计算软件,通过设置材料属性、载荷谱以及疲劳算法等参数,即可



图 13 破坏结果

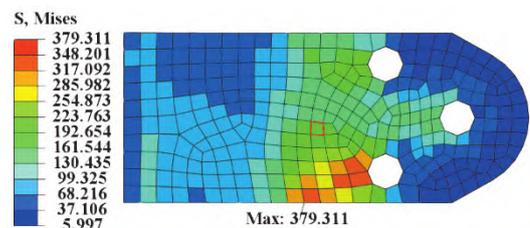


图 14 耳板应力云图

与 ABAQUS 联合仿真实现对部件的疲劳寿命求解,且分析结果较为理想。

将 ABAQUS 结果 ODB 文件导入 FE-SAFE 中进行疲劳寿命求解,导入材料属性参数<sup>[12]</sup>,使用“Goodman”修正公式<sup>[13]</sup>对其进行平均应力修正,将试验加载上下限值设为循环载荷谱。考虑耳板并不处于简单轴向受力状态,使用单元 Mises 应力进行疲劳分析,设定疲劳算法为“vonMises;Goodman”。求得疲劳寿命结果如图 15 所示,显示耳板疲劳寿命为 20 592 次,与试验值 16 980 次较为接近。而对于仿真结果略大于试验值,考虑是由于 FE-SAFE 疲劳寿命分析过程中未考虑结构疲劳退化导致应力重新分布<sup>[14]</sup>。

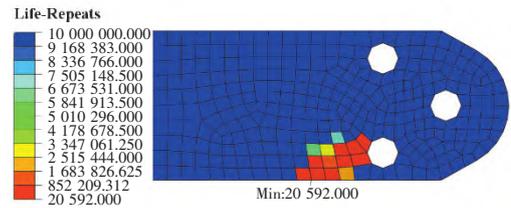


图 15 FE-SAFE 疲劳寿命结果

## 5 结论

针对应急桥梁杆件可替换性,考虑了钢销节点销孔处在使用过程中出现损伤情况,利用相似模型试验及有限元仿真研究了销孔边距缩短后节点的疲劳性能。试验和有限元仿真结果互相印证,可以得到以下结论:

(1) 损伤后钢销节点的疲劳寿命明显低于依据规范所估算的疲劳寿命,其原因如下:①钢销节点耳板销孔边距的削弱造成更大的应力集中,形成疲劳薄弱位置,因此在设计阶段必须对其严格控制;②规范估算时仅考虑轴向力对应力幅值的影响,未考虑弯矩的影响,在设计时要给予足够的疲劳寿命保障,或者依据有限元结果进行设计验算。

(2) 损伤后钢销节点的疲劳寿命不到 2 万次,因此在应急桥梁拆卸安装过程中,需注意钢销节点位置,避免粗暴安装导致节点损伤,严格拒绝使用已经出现弯曲、局部开裂等损伤情况的杆件。在桥梁服役期间及战时,应对节点部位重点观测及保护。

## 参 考 文 献

- [1] 郭琪, 韩之江, 邢颖, 等. 桥梁中整体节点疲劳性能研究综述[C]//第十八届全国现代结构工程学术研讨会论文集(五):其他结构及现代土木技术. 天津大学:天津市钢结构学会, 2018.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
- [3] 王天亮, 王邦楣, 潘东发. 芜湖长江大桥钢梁整体节点疲劳试验研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(5): 93-97.
- [4] 邓晓光, 刘沐宇, 史晶, 等. 大跨径双层悬索桥钢桁梁整体焊接节点疲劳分析与试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 96-103.
- [5] 童乐为, 袁一鑫, 牛立超, 等. 荷载频率对结构钢及其焊接节点疲劳寿命的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 1-7.
- [6] 应曙辉, 王会利, 邱文亮. 钢桁架整体节点疲劳性能的数值模拟分析[J]. 钢结构, 2013, 28(5): 15-18.
- [7] 张瞩熹. 铁路桥梁抢修器材应急保障能力现状与思考[J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(6): 30-33.
- [8] 高占军. 快速铁路桥梁抢修器材研制关键技术探讨[J]. 国防交通工程与技术, 2013, 11(5): 25-27.
- [9] 赵曼, 陈士通, 孙志星, 等. 128 m 大跨度铁路应急钢桁梁极限荷载[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 85-93.
- [10] 国家铁路局. 铁路桥梁钢结构设计规范: TB 10091—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [11] 施刚, 王飞, 戴国欣, 等. Q460D 高强度结构钢材循环加载试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 48-55.
- [12] 郭宏超, 郝李鹏, 李炎隆, 等. Q460D 高强钢及其焊缝连接疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(8): 157-164.
- [13] 刘曦程, 刘光连, 聂振超, 等. 应力控制下的 Q345 钢疲劳寿命预测研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 212-216.
- [14] 张俊豪, 刘世忠, 栗振锋, 等. 钢纤维混凝土栓钉-橡胶组合连接件疲劳性能分析[J/OL]. 铁道标准设计, 1-9[2024-01-12]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202305240001>.

(下转第 39 页)

rod tension, based on the existing formula of natural vibration frequency considering the non-linear vibration of the cable-stayed cables with fixed support at both ends, the experimental analysis with a 64 m through tied arch bridge in a practical project as the object was established. By using the measured data of actual tension and finite element software, a model considering the flexural stiffness of suspension rod was established to analyze the influence of flexural stiffness on the cable force of suspension rods of different lengths. The method of the correction formula of the theoretical natural vibration frequency was introduced and the correction formula of the theoretical frequency was fitted out. The application of this method to the construction monitoring of 83 m tied arch bridge shows that compared with the traditional frequency calculation formula, the tension error of the suspension rod is smaller and the error of the short suspension rod is within plus or minus 5%.

**Key words:** short suspension rod frequency calculation; frequency method; boundary conditions; flexural stiffness

~~~~~  
(上接第 6 页)

## Fatigue Performance Analysis of Steel Pin Joints in Emergency Steel Truss Bridges

CHEN Shitong<sup>1,2</sup>, LIU Yi<sup>3</sup>, WANG Zhiyuan<sup>2</sup>, HAO Wei<sup>2</sup>, SHI Haidong<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Engineering Research Center for Traffic Emergency and Guarantee, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Safety Engineering and Emergency Management,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In emergency steel truss bridges, which are characterized as assembled structures, damage to the pin hole connection locations may occur during repeated processes of assembly, disassembly, and transportation, thereby impacting their service life. Accordingly, a specific 128 m span emergency steel truss bridge was selected for study. The edge distances of the pin holes were reduced to simulate the effects of damage on steel truss pin holes. Fatigue performance tests and simulation models were conducted to investigate the fatigue performance of steel pin joints. The results indicate that there is considerable consistency between the static simulation outcomes and the fatigue test results, thereby confirming the reliability of the model. The fatigue life of the steel pin joints, post-damage, as determined through experimentation, is only 16 980 cycles, while the fatigue life derived from FE-SAFE simulation analysis is 20 592 cycles, which are closely aligned, further verifying the reliability of the fatigue test results. The significant difference in fatigue life when considering pin hole damage, as compared to the normal state, suggests that such damage can considerably reduce the fatigue life. Therefore, attention should be given to the protection of rod components in emergency steel truss bridges, and the quality control of steel pin joints should be strengthened.

**Key words:** emergency; steel truss bridge; steel pin joint; pin hole damage; analogous model; fatigue