

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.101



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 钢桁腹-混凝土组合箱梁外接式节点疲劳性能 试验研究

谭映梁, 祝兵, 崔圣爱, 毕昕宇, 张振, 卢宝洁  
(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:**为研究钢桁腹-混凝土组合外接式节点的疲劳性能,并验证该结构应用于高速铁路桥梁的可靠性,设计制作了两个缩尺比为 1:3 的节点模型并开展疲劳试验,研究组合外接式节点疲劳破坏模式、荷载-位移关系和荷载-应变曲线,观察不同应力幅作用下外接式节点疲劳受力特征。结果表明:在设计应力幅作用下,组合外接式节点疲劳寿命超过 251 万次,节点未破坏且刚度未减小,抗疲劳性能满足要求;在 1.4 倍设计应力幅作用下,节点实测疲劳寿命为 140 万次;外接式节点的疲劳破坏模式为受拉侧外露节点板的开裂,组合外接式节点疲劳性能的控制构造细节是外露节点板与加劲板之间的焊缝连接细节;疲劳裂纹引起节点板的应力重分布,裂纹上下节点板的应变最大减小了 81%,裂纹附近节点板应变最大增加了 33%;根据一点法所得 S-N 曲线,组合外接式节点对应于设计应力幅 53.2 MPa 作用下的疲劳寿命,为 436 万次,是设计寿命的 2.18 倍。

**关键词:**钢桁腹-混凝土组合桥;组合外接式节点;模型试验;疲劳性能;疲劳损伤

**中图分类号:**U443.35      **文献标志码:**A      **文章编号:**2096-6717(2025)04-0100-09

## Experimental study on fatigue performance of external joints in steel truss web-concrete composite box girders

TAN Yingliang, ZHU Bing, CUI Shengai, BI Xinyu, ZHANG Zhen, LU Baojie

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** Two joint models with a scale of 1:3 were fabricated and fatigue tests were carried out to investigate the fatigue performance of steel truss web-concrete composite external joints and verify the reliability of the new structure applied to high-speed railway bridges. The fatigue damage mode, load-displacement relationship, and load-strain curve of the composite external joints were investigated, the fatigue force characteristics of the external joints under different stress amplitudes were examined and the experimental results showed that the fatigue life of the composite external joint exceeds 2.51 million loading cycles under the design stress amplitude, the joint is not damaged, the stiffness is not reduced, and the fatigue resistance performance meets the requirements. Under the action of 1.4 times design stress amplitude, the measured fatigue life of the external

**收稿日期:**2023-04-06

**基金项目:**国家自然科学基金(U1834207、U2034202)

**作者简介:**谭映梁(1993-),男,博士生,主要从事钢-混凝土组合结构研究,E-mail:yingliang\_tan@my.swjtu.edu.cn。

祝兵(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:bing\_zhu126@126.com。

**Received:** 2023-04-06

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos. U1834207, U2034202)

**Author brief:** TAN Yingliang (1993-), PhD candidate, main research interest: steel-concrete composite structure, E-mail: yingliang\_tan@my.swjtu.edu.cn.

ZHU Bing (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: bing\_zhu126@126.com.

joint is 1.4 million times. The fatigue damage mode of the external joint is the cracking of the exposed gusset plate on the tensile side, and the critical detail of composite external joint is the welding detail which connecting the exposed gusset plate and the stiffening plate. The fatigue crack causes the stress redistribution in the gusset plate, the strain in the gusset plate above and below the crack is reduced by 81% at most, and the strain in the gusset plate near the crack is increased by 33% at most. According to the  $S-N$  curve obtained by the one-point method, the fatigue life of the composite external joint corresponding to the design stress amplitude of 53.2 MPa is 4.36 million times, which is 2.18 times of the design value.

**Keywords:** steel truss web-concrete composite bridge; composite external joint; model test; fatigue performance; fatigue damage

钢-混凝土组合结构桥充分结合了钢材和混凝土的优势,具有优良的整体受力性能,得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。钢桁腹-混凝土组合箱梁桥是近年发展起来的一种新型桥梁结构,由混凝土顶板、钢桁腹杆、混凝土底板及体内外预应力钢束等组成<sup>[5]</sup>。与混凝土箱梁桥相比,钢桁腹-混凝土组合梁桥采用钢腹杆代替混凝土腹板,规避了腹板开裂问题,减小了风力作用,减轻了上部结构自重,不仅增大了跨径,还减少了下部结构尺寸,获得了更优力学性能和景观效果。与钢桁架桥相比,混凝土顶底板的加入,增大了结构刚度,提升了桥梁抗扭转性能,增加了结构稳定性。因此,钢桁腹-混凝土组合结构桥被认为是非常有前景的新桥型,逐渐得到学者们的广泛关注<sup>[6-12]</sup>。近年来,中国先后建成了江山桥、德胜路桥、国道107宝安段匝道桥、深圳大学1号桥、水碾堡天桥等多座钢桁腹-混凝土组合结构公路桥梁,该桥型得到越来越多应用,但尚未应用于高速铁路桥梁。

钢桁腹-混凝土组合节点作为连接钢腹杆和混凝土顶(底)板的关键构造,其受力性能是保证桥梁安全性和可靠性的基石。学者们针对组合节点开展了大量研究。Furuichi等<sup>[13]</sup>设计了一种嵌入式(钢腹杆直接嵌入弦杆)钢盒节点,开展了缩尺比为1:2的静载破坏试验,结果表明,增大混凝土弦杆配筋率可以提升节点的抗剪刚度和强度,但会增大弦杆开裂破坏程度。Liu等<sup>[14]</sup>针对3种采用不同剪力连接件的嵌入式节点开展了疲劳试验,考察了节点的疲劳受力性能,结果表明,PBL剪力连接件节点的刚度变化比栓钉式节点小,具有更好的抗疲劳性能。Jung等<sup>[1]</sup>对4种嵌入式节点进行了静载破坏试验,对比了各节点的静载受力性能,结果表明,4种节点具有良好的承载力,满足结构安全性需求。端茂军等<sup>[15-16]</sup>针对一种嵌入式节点开展静载破坏试验和数值模拟,研究了该嵌入式节点的传剪机理,结果表明,节点的抗剪承载力受键销钢筋和连接螺栓的承载力控制。邵旭东等<sup>[17]</sup>、He等<sup>[18]</sup>开展了UHPC拱肋-钢腹杆组合节点的平面三向静载破坏试验和

抗拔试验,得到了节点破坏模式和极限承载力,验证了节点的承载能力和抗剪性能。Yin等<sup>[19]</sup>针对外接式节点(钢腹杆与弦杆通过节点板间接连接)和嵌入式节点开展了静载模型试验,结果表明,增加钢腹杆厚度可以提升节点极限承载力,外接式节点和嵌入式节点的典型破坏模式分别是节点板剪切破坏和弦杆开裂。周凌宇等<sup>[20]</sup>采用理论分析和数值模拟相结合的方法,对外接式节点的初始转动刚度开展了研究,得到了节点初始转动刚度的参考范围。Tan等<sup>[21]</sup>提出了一种外接式节点,并开展了大吨位荷载作用下节点静载破坏试验,探明了各构件应变分布规律,揭示了节点破坏模式和受力关键区域,结果表明,外接式节点具有良好的承载能力和节点刚度。

学者们针对不同构造形式的钢桁腹-混凝土组合节点开展了相关研究,但研究主要集中在嵌入式节点,对外接式节点的研究较少,尤其外接式节点疲劳性能方面鲜有报道。然而,组合外接式节点的疲劳性能对于钢桁腹-混凝土组合箱梁桥尤其是高速铁路桥梁的运营安全至关重要。因此,笔者设计了1:3缩尺模型的疲劳试验,开展不同应力幅作用下节点疲劳破坏模式、节点位移-荷载曲线和各构件荷载-应变曲线等力学性能的研究。

## 1 钢桁腹-混凝土组合外接式节点

如图1所示,渭河特大桥主桥的桥跨布置为 $3 \times 60$  m。为了减轻自重、减小下部结构尺寸并增加结构通透性,该桥拟采用新型钢桁腹-混凝土组合结构,即用钢腹杆代替传统混凝土箱梁桥中的混凝土腹板,该设计方案是钢桁腹-混凝土组合结构在中国双线高速铁路桥上的首次应用。如图2所示,混凝土顶底板通过钢腹杆和节点板连为整体,箱梁高6 m,顶面宽12.2 m,底面宽7.2 m。

图3所示钢桁腹-混凝土组合外接式节点作为新型结构的关键构造,对桥梁结构的安全性和可靠性起着决定性作用。新型组合外接式节点由混凝

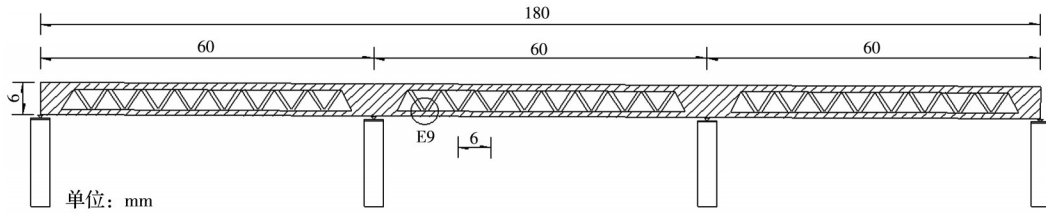


图 1 渭河特大桥主桥立面图

Fig. 1 Elevation view of the main bridge of Weihe River Bridge

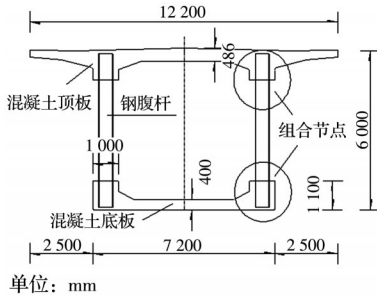


图 2 跨中横截面

Fig. 2 Midspan cross section

土弦杆、部分内置于弦杆的节点板、矩形钢腹杆以及 PBL 剪力连接件组成,钢腹杆与节点板之间采用高强度螺栓连接。外接式节点具有以下特点:1)与嵌入式节点相比,外接式节点的钢腹杆未直接嵌入到混凝土弦杆中,可以避免嵌入式节点弦杆易开裂的问题,以保证组合节点的安全性和耐久性,确保桥梁结构运营安全;2)节点板与钢腹杆采用高强度螺栓连接,当钢腹杆出现损伤或破坏时,能够快捷地维修和更换,利于桥梁结构的后期维护;3)与钢桁架节点相比,组合外接式节点刚度增大,可以避免钢弦杆受压失稳,具有更优的整体稳定性。因其突出特点,外接式节点已在后河村特大桥、太峪大桥、广佛环线镇北路桥等多座钢-混凝土组合桁架桥上得到了应用<sup>[19, 22]</sup>。

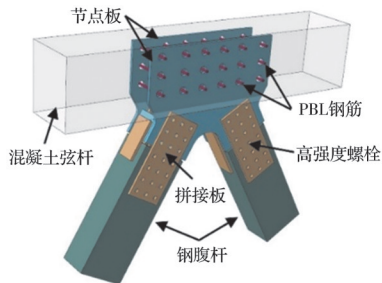


图 3 组合外接式节点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of composite external joints

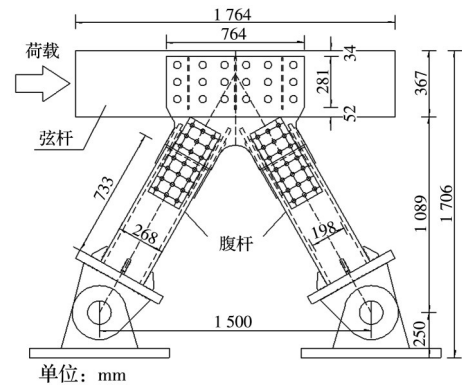
目前,中国关于组合外接式节点的研究尚处于起步阶段,鲜有关于其疲劳受力性能的研究报道,因此,亟须开展有关研究。Tan 等<sup>[21]</sup>对外接式节点的静载受力性能进行了研究,而笔者着重关注节点的疲劳性能。

## 2 试验概况

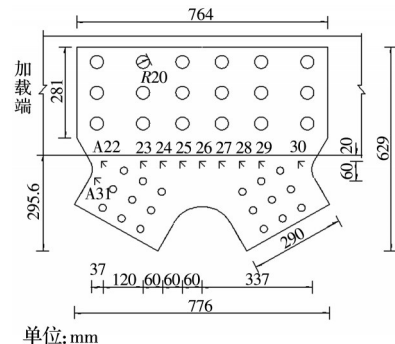
### 2.1 试件设计

为研究组合外接式节点的疲劳性能,选取在活载作用下应力幅最大的 E9 节点进行缩尺模型疲劳试验。由于原型节点过于庞大,足尺试验加载难度大、试验周期长且试验成本高,为保证试验加载的可行性,根据相似理论,最终将缩尺比定为 1:3,制作了两个相同的节点模型试件(F1 和 F2),疲劳试件与文献[21]中静载破坏试验试件同期制作,节点试件示意图如图 4 所示。试件所用材料与实桥所用材料一致,混凝土弦杆采用 C50 商品混凝土,节点板、钢腹杆和连接板等钢构件采用 Q370qE 钢材,PBL 贯穿钢筋选用 HRB400 钢筋,材料力学性能见表 1。

图 4(a)为试件的正视图,试件尺寸为 1 764 mm×334 mm×1 706 mm(长×宽×高),混凝土弦



(a) 试件正视图



(b) 节点板大样图

图 4 节点模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of joint model



表 1 材料力学性能  
Table 1 Mechanical properties of materials

材料	弹性模量/ GPa	立方体抗压强 度/MPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
C50	34.6	61.3		
Q370qE	206		452	583
HRB400	203		458	640

杆尺寸为 1 764 mm×334 mm×367 mm(长×宽×高),腹杆截面尺寸为 268 mm×184 mm×20 mm(长×宽×厚),长度为 733 mm。图 4(b)为试件节点板的大样图,节点板尺寸为 776 mm×629 mm×16 mm(长×宽×厚),每个节点板开有 18 个直径为 40 mm 的孔,并在孔中穿入直径为 14 mm 的钢筋,形成 PBL 剪力连接件。

2.2 试验装置及加载方案

试验装置由 1 台 1 000 kN 的 MTS 加载系统、反力墙、钢底座、锚杆等构成,疲劳试验加载装置示意图和现场实景如图 5 所示。通过安装,于反力墙上的 MTS 作动器提供水平反复荷载,施加于外接式节点混凝土弦杆的一端,试件通过销轴与钢底座连接,采用 16 根锚杆将钢底座锚固于反力地坪。图 5(a)为模型试件的 A 面视图,图 5(b)为 B 面视图。

该桥梁的设计荷载采用 ZK 标准活载,设计寿命期内运营车次为 6 730 600 次,结合 Miner 线性累

积损伤理论可知,在荷载作用 200 万次时,节点模型需承受的等效荷载幅为 260 kN,节点板应力幅为 53.2 MPa(设计应力幅)。首先,对试件 F1 进行设计疲劳荷载作用下的验证试验,疲劳荷载上下限分别为 40、300 kN;然后,将疲劳荷载提高到 400 kN,对试件 F2 进行 1.4 倍疲劳荷载作用下的疲劳破坏试验,节点板应力幅为 73.6 MPa,两个试件的加载频率均为 3.5 Hz。每加载 50 万次后,对试件进行分级静力加载,加载上限为 600 kN。

2.3 测点布置

在各构件上布置测点,对构件的应变及试件的位移进行量测,测点布置方案见图 4(b)和图 5(a)。如图 4(b)所示,A22~A31 为节点板 A 的应变测点,节点板 B 的测点布置位置与节点板 A 相同,编号为 B22~B31。如图 5(a)所示,C1、C2、C3 为混凝土弦杆应变测点,L5 和 Y5 分别为受拉钢腹杆和受压钢腹杆的应变测点,D4 为节点位移测点位于弦杆远离加载端一侧。混凝土弦杆表面沿加载方向布置单向应变片,节点板和钢腹杆上布置应变花,位移测点上布置激光位移计。在静载试验过程中,每级荷载稳载 5 min 后进行试验数据的采集。

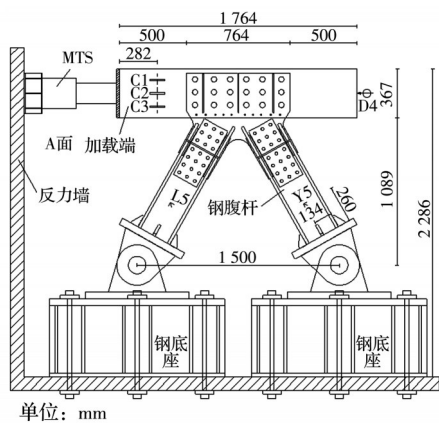
3 试验结果及分析

3.1 试验现象及破坏模式分析

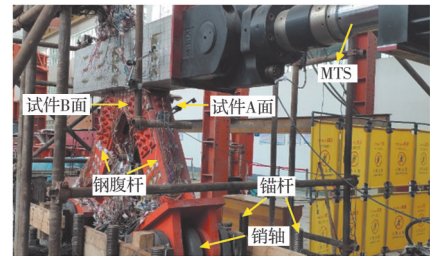
在设计疲劳荷载作用下,对试件 F1 进行了 251 万次加载,在疲劳试验加载过程中,钢构件未出现裂纹,混凝土弦杆也未开裂,试件 F1 未发生疲劳破坏,满足 200 万次疲劳循环加载次数要求。在 1.4 倍疲劳荷载作用下,在荷载循环约 140 万次后,在靠近试件 F2 加载端的 B 面节点板与侧向节点板加劲板交界处出现了裂纹,该裂纹起裂于节点板与加劲板焊趾并贯通板厚,如图 6 所示。直至加载到 251 万次,其他构件未见明显损伤。试件 F2 疲劳裂纹出现位置与静载破坏试验<sup>[21]</sup>中节点板拉伸断裂位置重合,裂纹产生于加劲肋截止点对应的节点板上,此处节点板未被弦杆包裹,刚度突变,自身应力处于较高水平,且该区域既有螺栓孔的削弱,还有加劲板导致的刚度变化以及焊缝的存在导致的该区域应力集中现象突出,使得节点板与加劲板交界区域成为组合节点的薄弱部位。在设计同类型节点时,应重点关注该薄弱部位,建议增大加劲板与螺栓孔的距离,将加劲板延伸至混凝土弦杆内部。

3.2 位移-荷载曲线分析

图 7 为试件 F1 和 F2 的位移-荷载曲线。由图 7(a)可知,试件 F1 的位移-荷载曲线斜率并没有随荷



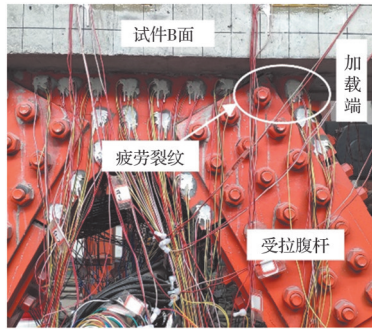
(a) 示意图



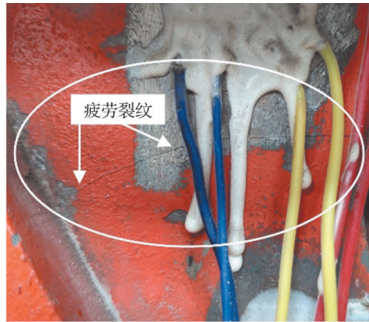
(b) 现场照片

图 5 疲劳试验加载装置

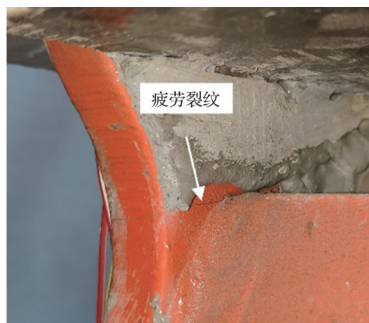
Fig. 5 The loading device of fatigue test



(a) 疲劳裂纹所处位置



(b) 疲劳裂纹形态



(c) 裂纹与节点板加劲肋相对位置

图 6 试件 F2 疲劳裂纹

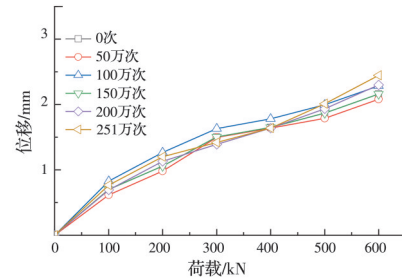
Fig. 6 Fatigue crack of specimen F2

载循环次数的增加而规律变化,表明试件 F1 在设计疲劳荷载作用后刚度未退化,具有良好的抗疲劳性能。由图 7(b)可知,在 1.4 倍设计应力幅作用下,试件 F2 的位移-荷载曲线斜率无明显下降,即便是节点板出现疲劳裂纹后曲线也未出现明显变化,表明试件 F2 的刚度无明显变化。

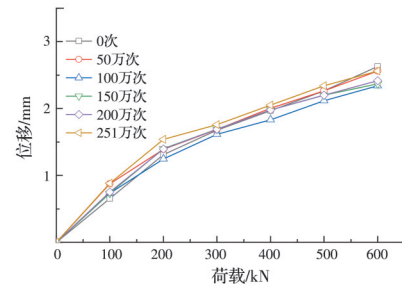
### 3.3 应变分析

#### 3.3.1 未疲劳破坏构件的应变

图 8 为试件 F1 和 F2 各构件 A 面(未出现疲劳破坏)的荷载-应变曲线。由图 8 可知,各构件应变水平平均较低,应变随荷载增大而线性增加,表明各构件处于弹性阶段。在不同疲劳循环次数后,试件 F1 弦杆、节点板和钢腹杆等构件的荷载-应变曲线基本重合,应变差距较小且未呈现出规律性变化,表明疲劳荷载对试件 F1 各构件的应变分布无显著影响。与试件 F1 相似,试件 F2 弦杆、节点板和钢腹



(a) 试件 F1



(b) 试件 F2

图 7 位移-荷载曲线

Fig. 7 Displacement-load curves

杆的荷载-应变曲线在疲劳加载前后区别较小,未呈现出规律性变化,表明疲劳荷载及疲劳裂纹对试件 F2 中未破坏构件的应变分布无显著影响。

#### 3.3.2 试件 F2 疲劳加载前后节点板应变对比分析

图 9 为试件 F2 受拉侧外露节点板各测点的应变结果。由图 9(a)所示不同加载次数所对应的各测点应变可知,试验加载至 150 万次时,测点 B22 和 B31 的应变显著降低,分别出现了 69%、60% 的降幅。结合图 9(b)所示的位于裂纹上方测点 B22 荷载-应变曲线可知,疲劳加载前后测点 B22 的应变差距明显,经受疲劳荷载作用后,测点 B22 的应变最终减小了 73%(当荷载为 600 kN 时)。位于裂纹下方测点 B31 的应变与疲劳加载前相比最终减小了 81%。试验结果表明,疲劳裂纹导致处于裂纹上方和下方测点的应变显著减小。

图 9(c)为经受疲劳荷载前后,距焊趾不同距离测点的应变结果。当荷载为 600 kN 时,测点 B22~B26 疲劳加载前后应变比值分别为 369%、75%、81%、81%、101%,测点 B22 疲劳加载后的应变远小于加载前。然而,随着距离的增大,测点 B23~B26 疲劳加载后应变分别增加了 33%、23%、23% 和 -1%,表明疲劳裂纹的出现引起了外露节点板应力重分布。从测点 B22 到测点 B23,与焊趾距离从 0 mm 增大到 120 mm,应变变化从减小 73% 到增大 33%,表明距焊趾水平距离 120 mm 内节点板的应变受疲劳裂纹影响显著。

由图 9(d)可知,与焊趾水平距离为 300 mm 的

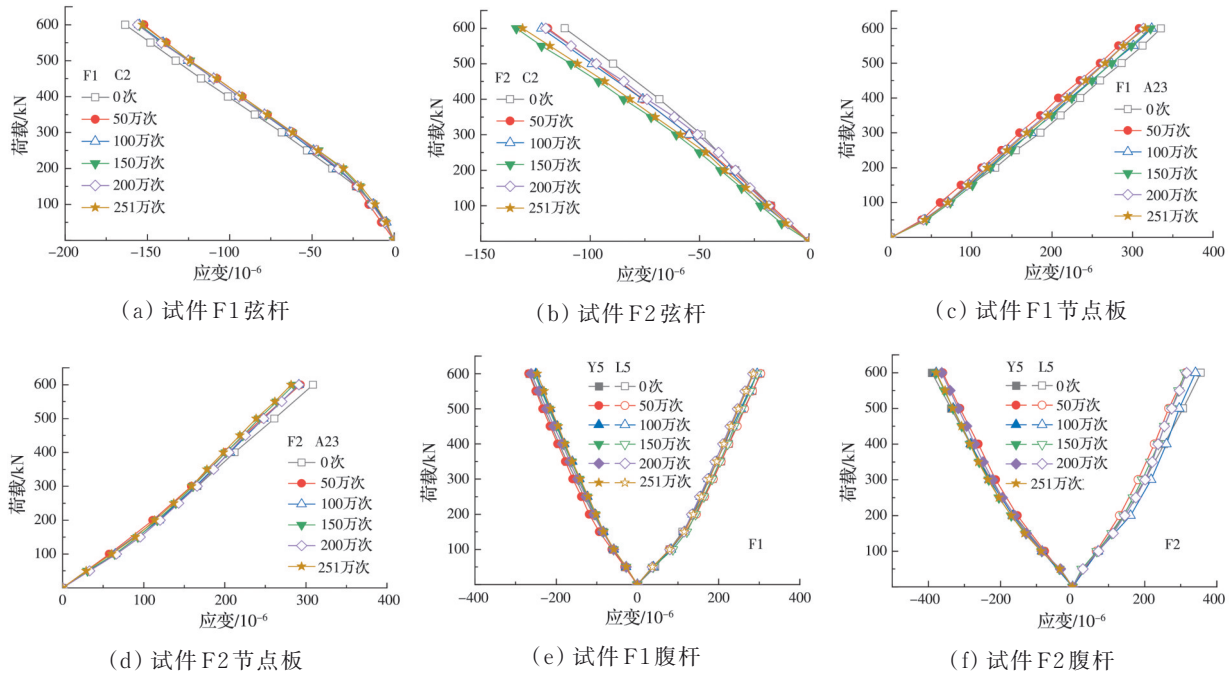


图8 未发生疲劳破坏构件的荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of members without fatigue failure

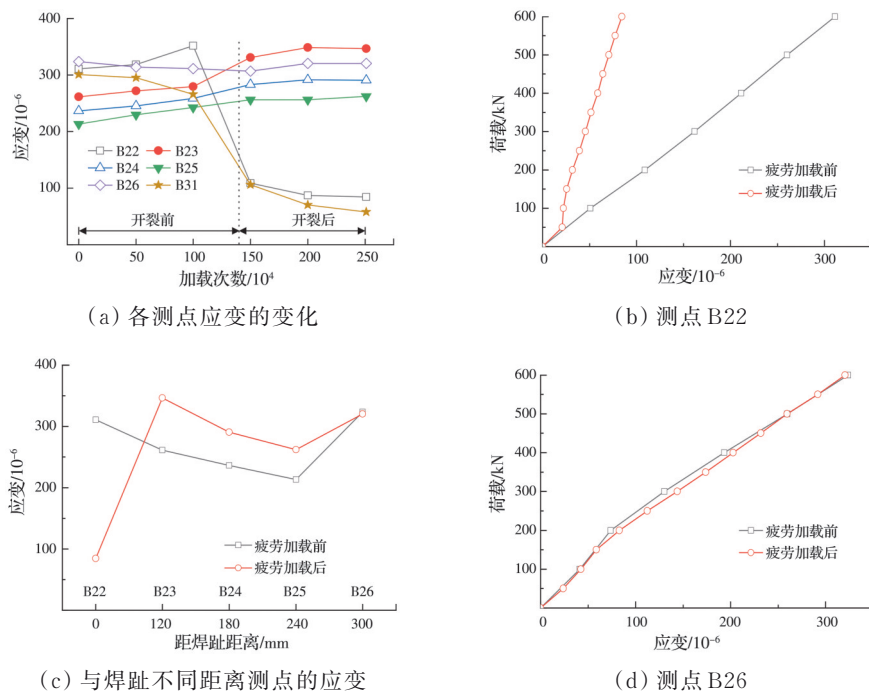


图9 F2试件疲劳加载前后节点板应变对比

Fig. 9 Strain comparison of gusset plate of F2 specimen before and after fatigue loading

测点B26疲劳加载前后的荷载-应变曲线基本重合。表明在水平方向上疲劳裂纹对节点板应变的影响随着与焊趾距离的增大而逐渐减小,与开裂焊趾水平距离300 mm外测点的应变受疲劳开裂的影响较小,几乎可以忽略。

结合对未破坏构件的应变分析可知,疲劳裂纹对裂纹附近节点板应变分布影响较大,且随着距离

的增大,该影响迅速消失。疲劳裂纹对于外接式节点其他构件的应变影响较小。此外,紧邻裂纹区域应变减小,与裂纹一定距离的其他区域应变增大,出现了应力重分布现象,对实际桥梁结构中疲劳裂纹的及时发现带来挑战。为及时发现疲劳裂纹的产生,在重点关注区域附近应尽量密布测量传感器,且尽量缩短测点与重点关注区域的距离。



## 4 疲劳寿命分析

### 4.1 采用规范公式评估疲劳寿命

试件 F2 节点板疲劳裂纹产生位置处于高强度螺栓、节点板加劲板焊缝以及混凝土弦杆交汇区域,相关规范中节点细节与此交汇区域的构造细节不完全相同,参考《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017)<sup>[23]</sup>中疲劳抗力方程,计算得到与应力幅相对应的循环次数,对组合节点疲劳寿命进行评估。参照规范中关于高强度螺栓连接(净截面)和高强度螺栓连接(毛截面)的规定,其疲劳抗力方程分别为

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

$$\lg N + 3 \lg(\Delta\sigma) = 12.42 \quad (2)$$

采用式(1)、式(2)求得对应于应力幅 73.6 MPa 作用下组合外接式节点的疲劳寿命分别为 1 120 万次、660 万次,为试验测得疲劳寿命(140 万次)的 8、4.7 倍。

参照规范中关于栓焊组合接头的规定,其疲劳抗力方程为

$$\lg N + 3.5 \lg(\Delta\sigma) = 12.80 \quad (3)$$

由式(3)可得,对应于应力幅 73.6 MPa 的疲劳寿命为 184 万次,为试验测得疲劳寿命的 1.3 倍。图 10 为上述各式所代表的 S-N 曲线与试验结果的对比图,由图 10 可知,采用规范中高强度螺栓连接的疲劳抗力方程计算所得疲劳寿命远高于试验值,明显高估了节点的疲劳寿命。按照与节点较相似的栓焊组合接头的规定,所得疲劳寿命计算值与试验值较为接近,但仍高于试验值。

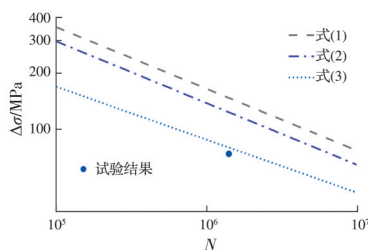


图 10 规范中类似结构的 S-N 曲线

Fig. 10 S-N curves of similar structures in the specification

参考规范相关构造细节的规定,所得疲劳寿命的计算值与试验值差距较大且偏于不安全,故不能完全按照规范中相关规定对节点的疲劳寿命进行评估。

### 4.2 采用一点法得到的 S-N 曲线评估疲劳寿命

研究表明<sup>[24-25]</sup>,在一定范围内,同类型焊接钢结构的 S-N 曲线相近或基本重合,即曲线斜率  $m$  基本不变。然而,目前暂无与钢桁腹-混凝土组合外接式节点的 S-N 曲线可供参考。本文节点与规范<sup>[23]</sup>中栓

焊组合接头的连接形式相似,因此,根据一点法<sup>[24, 26]</sup>的基本原理,采用钢桁腹-混凝土组合外接式节点试验结果对栓焊接头的 S-N 曲线进行修正,可得到钢桁腹-混凝土组合外接式节点的 S-N 曲线。

由式(3)可知,组合外接式节点疲劳设计 S-N 曲线的斜率为 3.5。将实测应力幅及疲劳寿命代入  $\lg N = C - m \lg(\Delta\sigma)$ ,可得到钢桁腹-混凝土组合外接式节点疲劳寿命计算公式。

$$\lg N = 12.68 - 3.5 \lg(\Delta\sigma) \quad (4)$$

图 11 为式(3)和式(4)的 S-N 曲线对比图,式(3)所示 S-N 曲线偏于不安全。由于目前暂无更精确的组合外接式节点 S-N 曲线,因此,在这种情况下,可采用式(4)所示的式 S-N 曲线评估钢桁腹-混凝土组合外接式节点的疲劳寿命。由式(4)可知,节点对应于设计应力幅 53.2 MPa 作用下的疲劳寿命为 436 万次,是设计寿命的 2.18 倍。组合外接式节点对应于加载次数 200 万次的疲劳容许应力幅,为 66.5 MPa。

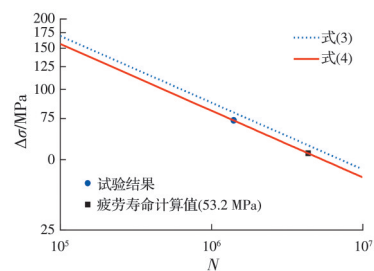


图 11 式(3)和式(4)的 S-N 曲线对比

Fig. 11 Comparison of S-N curves obtained by formula (3) and formula (4)

## 5 结论

1) 组合外接式节点在 1.4 倍设计应力幅作用下的疲劳寿命为 140 万次,对应于设计应力幅作用下的疲劳寿命为 436 万次,是设计寿命的 2.18 倍。疲劳试验过程中,组合外接式节点刚度未折减,抗疲劳性能满足规范要求,可为同类型节点的研究及其在高速铁路桥梁中的首次应用提供参考。

2) 钢桁腹-混凝土组合外接式节点的疲劳性能主要由外露节点板控制,疲劳裂纹出现于外露节点板与加劲肋交界区域,与静载破坏试验中节点板断裂位置重合。

3) 疲劳裂纹引起了节点板局部的应力重分布,裂纹对与焊趾水平距离 120 mm 内区域的应变影响显著,该范围内测点应变最大减小了 81%,最大增加了 33%,该区域应变的显著变化可作为识别疲劳破坏发生的参考依据。

4) 直接采用现有规范中针对类似连接形式的

疲劳抗力方程会高估组合外接式节点的疲劳寿命,计算结果偏于不安全。基于一点法建立的S-N曲线可为钢桁腹-混凝土组合外接式节点疲劳寿命评估提供参考。

通过疲劳试验确定了组合外接式节点的疲劳控制构造及节点疲劳性能,对于构造细节的疲劳开裂机理分析不够深入,下一阶段将重点开展细部构造试件的疲劳试验及开裂机理分析研究。此外,关于外接式节点疲劳性能的研究较少,尚缺少相关研究成果与本文结果进行对比,针对外接式节点的疲劳性能仍需开展更多系统且深入的研究。

## 参考文献

- [1] JUNG K H, KIM J H J, YI J W, et al. Development and evaluation of new connection systems for hybrid truss bridges [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2013, 11(2): 61-79.
- [2] TAN Y L, ZHU B, YAN T Y, et al. Experimental study of the mechanical behavior of the steel-concrete joints in a composite truss bridge [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(5): 854.
- [3] 卫星, 肖林, 温宗意, 等. 钢混组合结构桥梁2020年度研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(增刊1): 107-119.  
WEI X, XIAO L, WEN Z Y, et al. Research progress of steel-concrete composite bridge in 2020 [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(Sup 1): 107-119. (in Chinese)
- [4] 肖林, 卫星, 温宗意, 等. 钢-混组合结构桥梁2019年度研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(5): 168-182.  
XIAO L, WEI X, WEN Z Y, et al. State-of-the-art review of steel-concrete composite bridges in 2019 [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(5): 168-182. (in Chinese)
- [5] HE Y H, YAN T, FU J D. Design and calculation of PC composite rigid frame bridge with variable section steel truss webs [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1624(4): 042035.
- [6] TIAN Z J, LIU Y J, JIANG L, et al. A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2019, 6(1): 94-108.
- [7] 周凌云, 薛宪鑫, 李龙祥, 等. 考虑节点刚度的钢桁腹连续箱梁桥多尺度分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(11): 2851-2860.  
ZHOU L Y, XUE X X, LI L X, et al. Multi-scale analysis of continuous box girder bridge with steel truss webs considering the joint stiffness [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(11): 2851-2860. (in Chinese)
- [8] 陈建兵, 蒋明利, 周晨, 等. 钢桁腹混凝土组合梁挠度计算方法研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(6): 66-72.  
CHEN J B, JIANG M L, ZHOU C, et al. Calculation method of deflection of steel truss web concrete composite beam [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2022, 41(6): 66-72. (in Chinese)
- [9] 杨霞林, 于小芹, 张元海. 钢桁腹式混凝土组合箱梁的扭转效应分析[J]. *计算力学学报*, 2021, 38(2): 230-238.  
YANG X L, YU X Q, ZHANG Y H. Analysis on torsion effect of concrete composite box girder with steel truss webs [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(2): 230-238. (in Chinese)
- [10] 陈康明, 罗健平, 吴庆雄, 等. 钢腹杆PC组合梁桥抗弯性能[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(6): 146-156.  
CHEN K M, LUO J P, WU Q X, et al. Bending behavior of PC composite beam bridge with steel web members [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(6): 146-156. (in Chinese)
- [11] 陈宝春, 牟廷敏, 陈宜言, 等. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(增刊1): 1-10.  
CHEN B C, MU T M, CHEN Y Y, et al. State-of-the-art of research and engineering application of steel-concrete composite bridges in China [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(Sup 1): 1-10. (in Chinese)
- [12] GOTO T, KAGOTANI K, KOSHIJIMA K, et al. Prestressed-concrete composite truss bridge harmonized with a valley- Hakkou Bridge [C]//National Report of Japan on Structural Concrete 2018. The Fifth International FIB 2018 Congress, Melbourne, Australia. Japan Prestressed Concrete Institute, 2018: 87-90.
- [13] FURUICHI K, YAMAMURA M, NAGUMO H, et al. Experimental study on a new joint for prestressed concrete composite bridge with steel truss web [C]//International Symposium on Connections between Steel and Concrete. France: RILEM Publications SARL, 2001: 1250-1259.
- [14] LIU Y Q, XIN H H, HE J, et al. Experimental and analytical study on fatigue behavior of composite truss joints [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 83: 21-36.
- [15] 端茂军, 刘钊, 张建东, 等. 钢管腹杆-混凝土K形组合节点试验及仿真分析[J]. *桥梁建设*, 2017, 47(5): 47-52.  
DUAN M J, LIU Z, ZHANG J D, et al. Experiment and simulation analysis of K-shape composite joint of steel tube web members and RC chord [J]. *Bridge Construction*, 2017, 47(5): 47-52. (in Chinese)



- [16] 端茂军, 刘钊, 张建东, 等. 钢桁腹-混凝土组合结构桥梁新型 PBL-钢管节点试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(3): 572-577.
- DUAN M J, LIU Z, ZHANG J D, et al. Experimental study on new PBL-steel tube joint for steel truss-webbed concrete slab composite bridges [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(3): 572-577. (in Chinese)
- [17] 邵旭东, 陈玉宝, 何广, 等. 钢-UHPC 组合桁式拱桥拱肋与腹杆节点性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(5): 54-66.
- SHAO X D, CHEN Y B, HE G, et al. Experimental study on performance of joints between arch ribs and web members of steel-UHPC composite truss arch bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(5): 54-66. (in Chinese)
- [18] HE G A, SHAO X D, CHEN Y B, et al. Preliminary design of a steel-UHPFRC composite truss arch bridge and model tests of K-joints [J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(10): 04022090.
- [19] YIN G A, DING F X, WANG H B, et al. Connection performance in steel-concrete composite truss bridge structures [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(3): 04016126.
- [20] 周凌宇, 薛宪鑫. 外接式组合桁架节点初始转动刚度研究[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 100-109.
- ZHOU L Y, XUE X X. Study on initial rotational stiffness of external composite truss joint [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5): 100-109. (in Chinese)
- [21] TAN Y L, ZHU B, QI L, et al. Mechanical behavior and failure mode of steel-concrete connection joints in a hybrid truss bridge: Experimental investigation [J]. Materials, 2020, 13(11): 2549.
- [22] 周凌宇, 贺桂超. 大跨度钢-混凝土组合桁架铁路桥端节点模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 92-99.
- ZHOU L Y, HE G C. Model test for the end joint of long-span steel-concrete composite truss railway bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 92-99. (in Chinese)
- [23] 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.
- Code for design on steel structure of railway bridge: TB 10091—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [24] 管德清. 焊接钢结构疲劳强度与寿命预测理论的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2003.
- GUAN D Q. Study on fatigue strength and life prediction theory of welded steel structure [D]. Changsha: Hunan University, 2003. (in Chinese)
- [25] 刁砚. 钢管混凝土桥管节点疲劳性能试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- DIAO Y. Experimental study on fatigue behavior of concrete-filled steel tubular bridge joints [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [26] 吴庆雄, 黄汉辉, 陈康明, 等. 钢管混凝土 K 形节点足尺模型疲劳性能试验[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(10): 102-111.
- WU Q X, HUANG H H, CHEN K M, et al. Fatigue performance experiment of full-scale model of concrete-filled steel tubular K-joint[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(10): 102-111. (in Chinese)

(编辑 胡玲)