

# 正交异性板钢桁结合梁焊接细节疲劳性能分析

黄鹤, 秦攀

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430052)

**摘要:**对某正交异性板钢桁结合梁的3处构造细节制作了试件,通过静载试验的方式、疲劳试验循环加载和有限元方法相结合研究了它们的疲劳性能。结果表明:桥面板焊接码板疲劳起裂位置在中间部位,裂纹从内部开始扩展,说明此处焊缝较薄弱,其原因在于中间码板部位横截面积较小,在循环荷载的作用下,持续承受较大的拉应力,从而引起构件开裂;U肋与横隔板及桥面板焊接构造最薄弱的部位是U肋与桥面板的焊缝,在疲劳试验中此处最先断裂;桥面板与横隔板及U肋交叉焊缝构造疲劳裂纹由焊趾起裂,然后斜向扩展,主要原因是外荷载作用下焊趾处的横向及竖向应力均较大,在两个方向力的共同作用下,容易产生斜向裂缝。这些由试验验证的薄弱部位应在疲劳设计中引起重视。

**关键词:**正交异性板;斜拉桥;焊接构造;疲劳试验;有限元分析

**中图分类号:** U441+.4

**文献标志码:** A

正交异性板钢桁结合梁结构自重较轻,其自重仅为同体积PC梁的1/5,因此对于跨度较大且对自重要求较高的桥梁,正交异性板钢桁结合梁是一种极具优势的构造形式。正交异性板钢桁梁制造工艺主要由纵肋及各桁架结构与桥面盖板焊接而成,在桥梁运营过程中,由于其构造细节及节点多,各焊接连接部位的受力情况复杂,因此对于其构造细节疲劳性能的研究十分必要。肖林,刘丽芳<sup>[1]</sup>等采用XFEM(扩展有限元

法),在断裂力学的基础上,对过焊孔构造细节的裂纹扩展过程中的疲劳寿命进行了评估,得出翼缘板与腹板交界处的焊缝较薄弱的结论;叶星汉、曹一山<sup>[2]</sup>等制作了正交异性钢板U肋与盖板的试件,并对焊接节点进行了疲劳试验,通过实测数据对其疲劳寿命进行了预测与评估,结果显示U肋与盖板在循环加载下出现裂纹,裂纹在初期缓慢扩展,当裂纹的路径通过盖板后加速扩展;崔丽君、于瑾<sup>[3]</sup>等利用Ansys建立了梁柱

\*\*\*\*\*  
桥梁抗震性能的影响,结果表明:

(1) 支座在服役全过程中大致经历了正常状态、硅脂耗尽、外露滑板磨损殆尽及不锈钢镜面磨损4个阶段,且随着支座滑板的逐渐磨损,摩擦系数由原来的0.01增大至0.156,改变了桥梁结构的原边界约束体系,降低桥梁的抗震性能,增加桥梁地震中倒塌风险。

(2) 支座滑板磨损后,对多塔斜拉桥的辅助墩、过渡墩的墩底、桩基弯矩表现为逐渐增大,其中,墩底纵向弯矩增大11.4%,桩基横向弯矩增大6.9%;而支座和梁端位移表现为逐渐减小,即桥梁结构的原约束体系发生改变。

(3) 支座摩擦系数约为0.03时,桥墩的关键截面的内力响应相对较小。因此,在桥梁支座滑板摩擦系数选取时,建议设计为0.03~0.04;且滑板表面不涂5201硅脂润滑,并开展滑板长距离干磨性能试验。

## 参考文献:

- [1] 张喜刚,刘高,马军海,等.中国桥梁技术的现状与展望[J].科学通报,2016,61(4-5):415-425.
- [2] 赵桂峰,马玉宏,简涛,等.摩擦摆支座性能劣化对港珠澳隔震桥梁全寿命期抗震性能的影响[J].中国公路学报,2016,29(12):10-16.
- [3] 黄勇,王君杰,韩鹏,等.考虑支座破坏的连续梁桥地震反应分析[J].土木工程学报,2010,43(S2):217-223.
- [4] 庄军生,杜文明,夏玉龙.摩擦摆式隔震支座用滑板性能研究[J].公路,2017,62(3):119-125.
- [5] 王常峰,朱春林,陈兴冲.活动支座摩擦作用对连续梁桥弹塑性地震反应的影响[J].公路交通科技,2013,30(5):67-73.
- [6] 阎贵平,夏禾,姜勇.盆式支座对桥梁动力特性的影响[C].第六届全国结构工程学术会议论文集,1997.
- [7] 朱文骏.桥梁盆式支座地震作用下的力学性能研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2015.

节点的焊接模型,并通过热弹塑性理论,给出了该构件温度场下的残余应力;张清华、罗鹏军<sup>[4]</sup>等设计了7组试件对墩边纵肋与顶板焊接构造细节进行了疲劳试验研究,试验证明这一新型构造细节在抗疲劳方面无明显改善;廖小伟、王元清<sup>[5]</sup>等利用自己编写的S-N曲线的疲劳评估程序,对钢桥的3种焊接细节进行了试验,并采用Abaqus验证了该程序对于钢桥焊接疲劳评估是可行的;Ali,ShahramShahrooi<sup>[6]</sup>等用无网格局部Petrov-Galerkin方法预测了焊接残余应力场中的疲劳裂纹扩展;AraqueOscar,Arzola Nelson<sup>[7]</sup>等利用Ansys建立模型研究了对接焊接接头试样在轴向力作用下产生疲劳从而引起的裂纹行为,并通过计算裂纹前沿的应力强度因子,得出由于几何应力的集中效应,使得位于焊趾中的应力与焊接钢筋的尺寸成比例的最大化;Giovanni Meneghetti,Alberto Campagnolo<sup>[8]</sup>等采用峰值应力法对焊接接头进行了疲劳设计,并通过试验验证了其有效性;Krzysztof<sup>[9]</sup>通过试验研究了采用一种新型焊接技术制造的弧焊接头的疲劳特性;Timothy D. Righiniotis, MariosK<sup>[10]</sup>等研究了概率断裂力学方法在桥梁谱加载下裂缝存在下预测焊接钢细节疲劳寿命的应用,基于模拟疲劳裂纹扩展的双线性关系,并结合了破坏标准来描述裂缝和塑性坍塌之间的相互作用。可见国内外学者对于焊接疲劳特性进行了大量研究,开辟了一系列的理论方法,但是对于正交异性板钢桁结合梁构造细节的疲劳研究则较少。金正凯、卜之一<sup>[11]</sup>等基于Kriging方法,建立某正交异性板钢桥面板模型,并对其进行了抗疲劳参数优化设计;王会利、秦泗凤<sup>[12]</sup>针对大连星海湾大桥的双层钢桁架结构进行了疲劳试验,并建立了有限元模型进行对比,结果表明:大部分节点的疲劳容许应力都低于试验值;周细辉、黄坤<sup>[13]</sup>利用Ansys对钢桥面板纵肋对接焊缝的疲劳裂纹进行了裂纹扩展特性研究,通过计算应力强度因子研究了裂纹扩展过程中的规律。

该文以某正交异性板钢桁结合梁为背景,制作了该桥3处典型构造细节的试件,并对这3个试件设计了静载试验与疲劳试验,将试验与有限元分析相结合,分析这3种细节的疲劳性能,并将试验分析结果反馈到设计,及时修正该桥制造中的部分构造细节。

## 1 疲劳试件设计与制造

根据实桥情况分别设计了该桥构造细节的3组试

件,3组试件分别对应实桥中桥面板工地焊接采用的码板、U肋与横隔板及桥面板焊接构造、桥面板与横隔板及U肋交叉焊缝构造,将3组试件编号为H3、H4、H5,焊接试件的主要材质为Q370qE钢,试件采用与实际桥梁一致的制作工艺,其中H3号试件全长960 mm,最大宽度250 mm,厚度24 mm;H4号试件长度564 mm,最大宽度306 mm,焊孔直径18 mm;H5号试件长度858 mm,最大宽度378 mm,焊孔直径24 mm,焊接材料均采用Supercored71H(药芯焊丝CO<sub>2</sub>气体保护焊),3种试件设计图如图1所示。

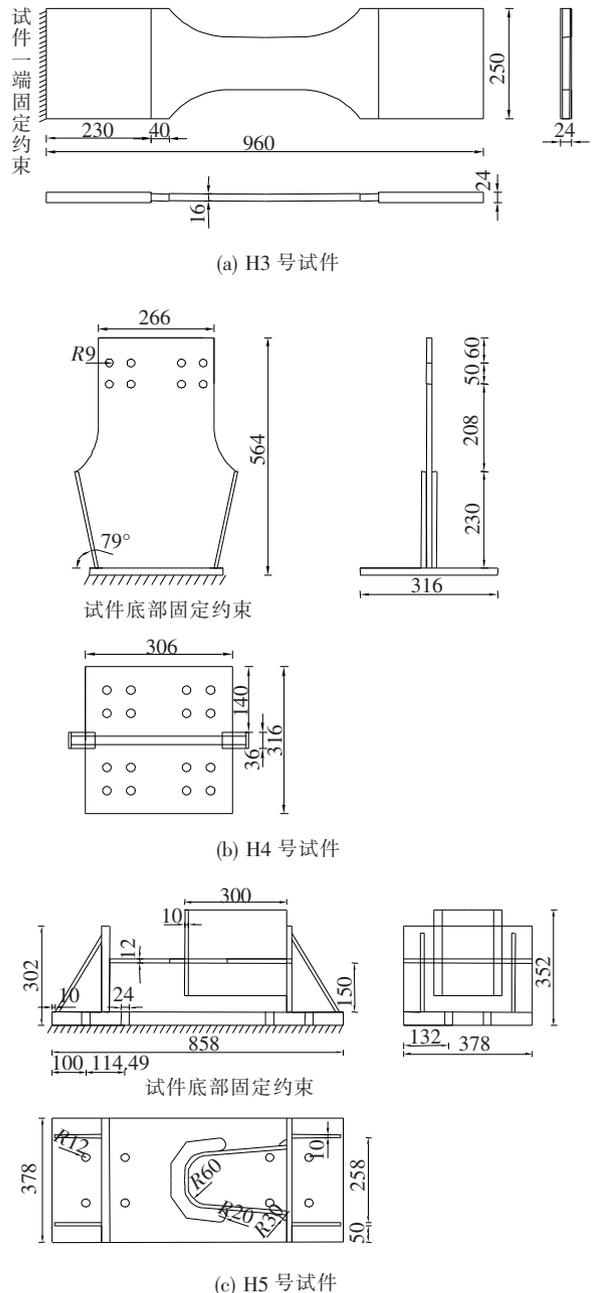


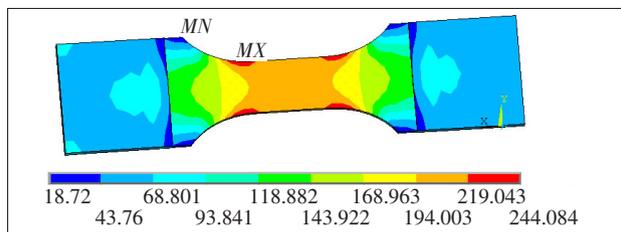
图 1 3 种试件设计图(单位:mm)

## 2 理论计算与静载试验

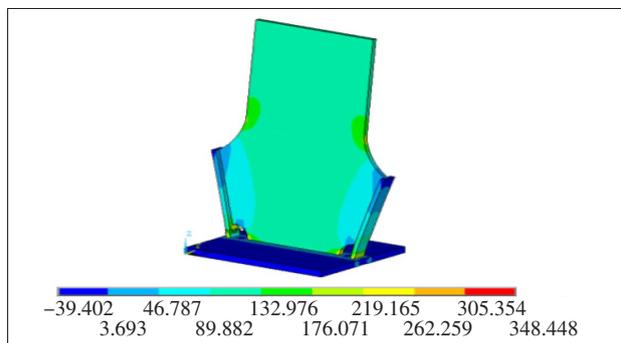
### 2.1 理论计算

H3号试件模拟桥面板工地焊接采用码板的构造细节,该试件焊接码板后,将码板铲掉,重新打磨平顺,计算采用Solid45八节点六面体单元,共划分800个单元,1422个节点,由于码板是用于连接桥面板的临时构件,因此将试件的一端采用固定约束,即约束 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的位移和转角,在另一端施加单位400 kN的均布荷载,用于模拟码板轴向受拉的危险应力状态。H4号试件通过开圆孔避免焊缝交叉,计算采用Solid45八节点六面体单元,模型共划分9518个单元,14805个节点,在试件底部施加固定约束,在顶部施加单位400 kN的均布拉力,用以模拟汽车移动荷载施加到桥上时,桥面板因整体和局部变形在横隔板和桥面板焊缝上产生的作用。H5号试件模拟桥面板与横隔板及U肋交叉焊缝并在横隔板与U形肋焊接处开孔,试件计算采用Solid45八节点六面体单元,模型共划分3847个单元,6839个节点,在试件底部施加固定约束,在开孔两侧加载部位施加单位200 kN的均布压力,用以模拟桥面板在局部荷载作用下产生面外变形,导致横隔板与U肋焊接处产生相对位移而导致的危险应力状态,3种试件有限元模型及网格划分情况见图2。

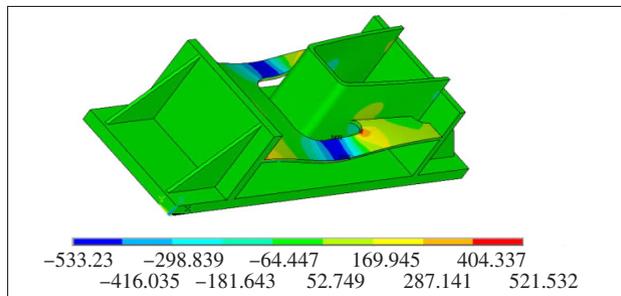
244.08 MPa;H4号试件最大应力为348.45 MPa,应力集中位置主要在U形肋与桥面板焊接处;H5号试件最大应力为521.53 MPa,发生在加载处的底部,同时横隔板圆弧处也有很大应力集中,横隔板与U形肋焊接部位应力不大,比较大的正拉力主要集中在从横隔板圆弧缺口处放射出去的一片区域。



(a) H3号试件应力分布



(b) H4号试件应力分布



(c) H5号试件应力分布

图3 3种试件 Mises 应力分布图(单位:MPa)

### 2.2 静载试验

为了保证后续试验中疲劳加载装置的正常运行以及了解试件进行疲劳加载时的应力分布状态,利用结构疲劳试验机对3组试件分别进行了静载测试,保证与相应试件疲劳试验的加载装置相同,加载位置与有限元计算保持一致。根据试件形状以及有限元计算结果,选择合理的位置布置应变片测点,3种试件的测点位置如图4所示。

由试验数据整理的回归曲线如图5所示,由图5可以看出:测试结果与理论值相差不大,试验系统满足

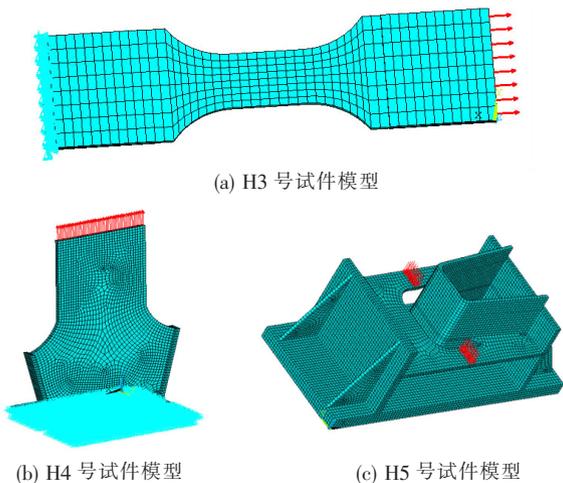


图2 3种试件网格划分

在施加约束和荷载的条件下进行求解,所得 Mises 应力分布云图如图3所示。

从图3可以看出:H3号试件发生应力集中的部位为试件圆弧区域向中间靠近的部分,最大应力为

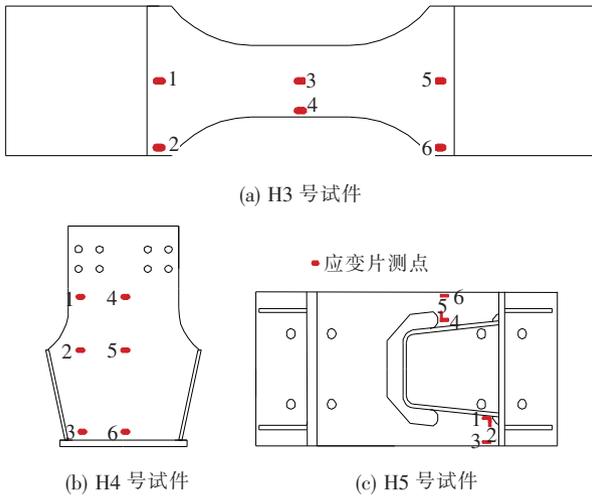


图 4 3 种试件测点布置图

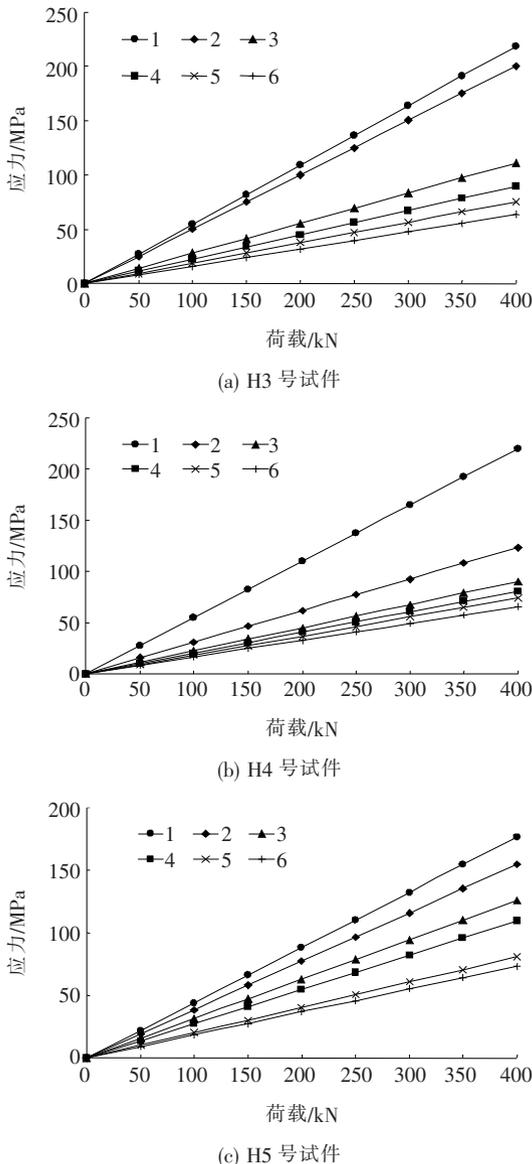


图 5 3 种试件静载回归曲线

要求。H3 号试件应力基本分成 3 个部分,中间的 3、4 号两个测点应力大于一侧 1、2 号测点和另一侧的 5、6 号测点,原因是试件在中间部位有效截面面积较小,同等条件下容易产生较大的拉应力;当施加到 400 kN 的荷载时,3 号点应力达到 197.27 MPa,测点 3 应力要明显大于两边测点 1、5。其原因可能是试件在焊接处的测点应力呈中心放射性分布。由图 5(b)可知:测点 3、5 靠近焊接部位,将其在荷载 400 kN 加载时测得的应力值平均得 155.42 MPa,与有限元计算值 153.27 MPa 接近,表明试验数据符合预期要求。由图 5(c)可知:1 号测点是横隔板圆弧测点横向应力,2 号测点为横隔板与 U 肋焊接处竖向应力,试验结果显示这两个测点是所有测点中数值最大的,这两个方向的力导致该种构造在疲劳断裂时,先是沿着焊趾起裂,然后在横隔板上斜向扩展。

从规律来看,实测与试件有限元计算基本保持一致,个别点存在误差,主要是由于试件加载时产生挠度,加载块与接触点无法保证理想的平面,同时计算过程中边界条件假设、测点位置与实际有一定的误差所致,但总体分布规律一致。

### 3 疲劳试验

#### 3.1 试验方法

由于各试件的结构形式不同,通过专门设计的液压伺服机进行疲劳试验,3 种试件具体试验情况见图 6。

3 种试件具体加载方案如下:首先利用液压伺服机进行预加载,使得试件约束部位及加载部位接触良好,进入正常工作状态,H3 及 H4 号试件在 2 000 kN 液压伺服疲劳试验机完成,各试件疲劳试验最小控制吨位均取 10 kN,进行拉-拉循环加载,H5 号试件通过设计专门装置由 3 800 kN 多头结构疲劳试验机上的  $\pm 1\ 000$  kN 加载装置完成,疲劳试验最小控制吨位均取 5 kN,进行压-压循环加载,试验过程中利用酒精涂抹并借助放大镜观察,当发现裂纹后,记录此时的循环次数,继续疲劳加载至裂透板厚或试件断开,以此时的循环次数作为统计数据。

#### 3.2 试验结果

为了取得准确结果,制作了多个相同的试件,持续施加循环荷载,得到试验结果如表 1 所示,3 种试件裂纹情况如图 7 所示。

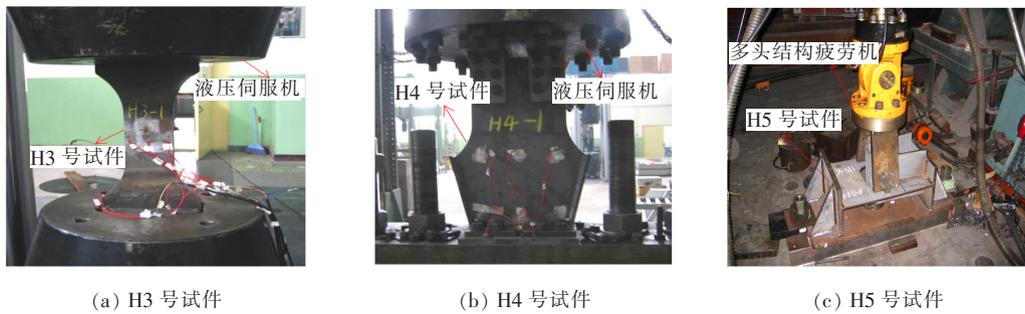
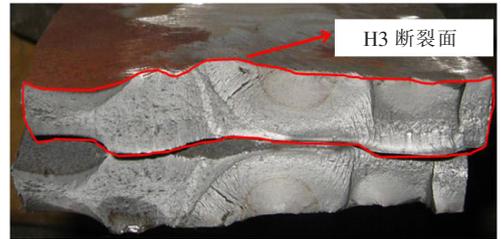


图6 疲劳试验图

表1 疲劳试验结果统计

试件编号	应力幅/MPa	循环次数/次
H3-1	220.0	460 600
H3-2	280.0	110 000
H3-3	250.0	134 900
H3-4	200.0	736 000
H3-5	180.0	2 000 000
H3-6	230.0	270 200
H4-1	150.0	227 500
H4-2	130.0	195 200
H4-3	100.0	1 292 500
H4-4	120.0	376 100
H4-5	95.0	891 600
H4-6	90.0	958 300
H4-7	80.0	2 000 000
H5-1	41.5	570 600
H5-2	40.0	391 300
H5-3	42.0	333 200
H5-4	38.0	619 500
H5-5	34.0	234 500
H5-6	36.0	853 600
H5-7	35.0	850 000
H5-8	35.0	832 000



(a) H3号试件断裂



(b) H4号试件断裂



(c) H5号试件断裂

图7 疲劳试验图

由图7可以看出:H3试件在与码板焊接处开始起裂,裂纹从内部逐渐扩展。H4号试件主要从U形肋与桥面板对接焊处起裂,之后,U肋焊缝交叉点过焊孔边缘开始起裂,并沿着横隔板向内扩展,最后发展为试件在横隔板处沿焊趾断裂。H5号试件的疲劳破坏位置有两种情况:①在横隔板与U肋焊接部位下焊趾,起先沿着焊趾起裂,后来在横隔板上斜向扩展;②在U肋上焊趾起裂,一直沿着上焊趾扩展,扩展速

度缓慢。两种情况裂纹源都在角焊缝根部,即裂纹起点均产生在横隔板与U肋焊趾根部,然后自内向外扩展。根据各构造的疲劳破坏特征,拟合疲劳试验结果,得出该桥主桥钢结构3种关键构造细节疲劳S-N曲线推荐公式如表2所示。

## 4 结论

(1) 根据静载试验结果,H3号试件在中间部位应力最大,其原因在于中间码板部位横截面积较小,同等外部条件下,该截面容易产生较大的应力,在循环荷载

表 2 3 种构造细节推荐疲劳设计 S-N 曲线

构造细节	试验回归曲线	推荐设计曲线	疲劳容许应力幅 $[\sigma_0]$ /MPa
桥面板工地焊接采用码板的构造细节(H3)	$\lg N = 21.2941 - 6.7918 \lg \sigma$	$\lg N = 15 - 4.0 \lg \sigma$	149.5
U形肋、桥面板与横隔板交叉焊缝构造(H4)	$\lg N = 13.1915 - 3.7863 \lg \sigma$	$\lg N = 13.38 - 4.0 \lg \sigma$	59.0
桥面板与横隔板及 U 肋交叉焊(H5)	$\lg N = 16.7580 - 5.6125 \lg \sigma$	$\lg N = 11.74 - 3.0 \lg \sigma$	65.0

的作用下,容易引起开裂,疲劳试验结果也表明该构件容易在中间部位断裂。

(2) H4 号试件主要从 U 形肋与桥面板对接焊处起裂,说明此处焊缝较薄弱,静载试验结果也显示在此处应力最大,在 400 kN 的拉力荷载下,焊缝处测点的平均应力达到 155.42 MPa。

(3) H5 号试件静载试验结果表明横隔板与 U 肋焊接处的横向应力和竖向应力均较大,这两个方向的力导致该种构造在疲劳断裂时,先是沿着焊趾起裂,然后在横隔板上斜向扩展,同疲劳试验所显示的裂缝特征一致,同时有限元模型在横隔板与 U 肋焊接处附近也出现较大的应力集中,更加说明横隔板与 U 肋焊接处是该构件最薄弱的部位。

(4) 利用试验数据拟合了 S-N 曲线,并给出了焊接构件的推荐设计曲线,可根据试验结果修正该桥建造过程中的部分构造细节,保证桥梁质量。

#### 参考文献:

- [1] 肖林,刘丽芳,李小珍,等. 钢桁梁焊接构造细节的疲劳性能及基于 XFEM 的疲劳寿命评估[J]. 铁道学报,2018,40(4):113-119.
- [2] 叶星汉,曹一山,曹星儿,等. 正交异性钢桥面板 U 肋-盖板焊接节点的疲劳性能试验[J]. 公路交通科技,2017,34(9):68-75.
- [3] 崔丽君,于瑾,俞家欢,等. 栓焊混合连接狗骨式梁柱钢节点残余应力有限元分析[J]. 钢结构,2013,28(12):17-21.
- [4] 张清华,罗鹏军,徐恭义,等. 新型墩边纵肋与顶板焊接构造细节疲劳性能试验[J]. 中国公路学报,2018,31(5):42-52.
- [5] 廖小伟,王元清,宗亮,等. 基于有效缺口应力法的钢桥焊

接细节疲劳分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(1):1-8.

- [6] MOARREFZADEH A, SHAHROOI S, AZIZPOUR M J. Predicting Fatigue Crack Propagation in Residual Stress Field Due to Welding by Meshless Local Petrov-Galerkin Method[J]. Journal of Manufacturing Processes,2019,45(sep.):379-391.
- [7] ARAQUE O, ARZOLA N, VARÓN O. Computational Modeling of Fatigue Crack Propagation in Butt Welded Joints Subjected to Axial Load[J]. PloS one,2019,14(6):e0218973.
- [8] MENEGHETTI G, CAMPAGNOLO A, BABINI V, et al. Multiaxial Fatigue Assessment of Welded Steel Details According to the Peak Stress Method: Industrial Case Studies[J]. International Journal of Fatigue,2019,125:362-380.
- [9] KRASNOWSKI K. Influence of High Frequency Impact Treatment (HiFIT) on Fatigue Strength of Welded Joints of High-Strength Steel S700MC for Bridges Applications [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2018,419(1):012020.
- [10] RIGHINIOTIS T D, CHRYSSANTHOPOULOS M K. Fatigue and Fracture Simulation of Welded Bridge Details Through a Bi-Linear Crack Growth Law[J]. Structural Safety,2004,26(2):141-158.
- [11] 金正凯,卜一之,李俊,等. 基于 Kriging 方法的正交异性钢桥面板大焊脚焊缝抗疲劳构造参数设计[J]. 中外公路,2017,37(6):166-170.
- [12] 王会利,秦泗凤,张哲. 双层钢桁架悬索桥整体节点疲劳试验研究[J]. 中外公路,2017,37(2):81-84.
- [13] 周细辉,黄坤. 钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳裂纹扩展特性及加固方法研究[J]. 中外公路,2019,39(3):138-142.