

组合桥面板 U 肋对接焊缝疲劳破坏及修复方法试验

苏庆田, 贺欣怡, 曾明根

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了研究弯折 U 形肋组合桥面板的疲劳性能以及疲劳开裂后的修补方法, 对一个带连续弯折 U 形肋的组合桥面板试件进行了前后两次疲劳试验研究。首先对初始采用无衬垫对接焊缝的试件进行疲劳加载直到焊缝开裂; 然后在开裂处采用带衬垫的对接焊缝加固, 再次进行疲劳加载直到破坏。研究了组合桥面板疲劳破坏形态、开裂处疲劳强度评定、疲劳裂缝修复方法及修复后的疲劳性能。试验结果表明: 在反复荷载作用下无衬垫单面焊的对接焊缝是正交异性组合桥面板的薄弱处, 首先发生疲劳裂纹, 采用带衬垫的熔透对接焊缝对开裂处进行修补, 能起到较好的补强效果。

关键词: 钢-混凝土组合桥面板; 疲劳试验; 应力幅; 修复
中图分类号: TU398 **文献标志码:** A

Experiment Research on Fatigue Failure and Repair Method of Butt Weld in U-Shaped Rib of Composite Bridge Deck

SU Qingtian, HE Xinyi, ZENG Minggen

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the fatigue property and the repair method of butt welds in folded U-shaped steel rib of composite bridge deck, a composite deck specimen has been tested twice, an original state and a repaired state, for fatigue character research in this paper. In first test, the specimen used butt welds without backing plate on the connection of the U-shaped ribs was loaded repetitively until a crack appeared. Then the butt welds with backing plate were applied to repair the fatigue crack. And after that, the second fatigue test was carried until the new weld crack appearing. The fatigue failure mode of composite bridge deck, fatigue strength of butt weld for folded U-shaped ribs, repair method of fatigue crack and the fatigue property after reinforcement were tested carefully. The results show that butt welds without backing plate are the vulnerable position of the composite bridge deck

under cyclic loading, and fatigue crack appeared in this position first. Adopting butt welds with backing plate to repair the cracked welds is an effective reinforcement method.

Key words: composite bridge deck; fatigue test; stress amplitude; repair

正交异性钢桥面板是由桥面板和纵横向加劲肋组成, 以其自重轻、强度大的特点成为大跨度桥梁中的主要桥面形式^[1]。正交异性钢桥面板常采用 U 形加劲肋, 大量使用焊缝连接, 在局部车轮荷载反复作用下, 顶板与 U 肋焊接处、U 肋腹板与横隔板焊接处、横隔板过焊孔及 U 肋对接焊缝等几个构造细节易发生疲劳开裂^[2-3]。此外, 正交异性钢桥面板的桥面铺装也易损坏。随着对正交异性钢桥面板病害的研究, 近年来国内外学者提出了正交异性组合桥面板, 将带有纵向加劲肋的钢板与混凝土通过开孔板或焊钉等剪力连接件连接起来^[4-5], 使钢与混凝土协同工作, 共同抵抗车辆荷载。该种组合板相比普通混凝土桥面板和正交异性钢桥面板, 其所用混凝土板厚更小, 钢板更薄^[1]。典型的正交异性组合桥面板构造如图 1 所示。

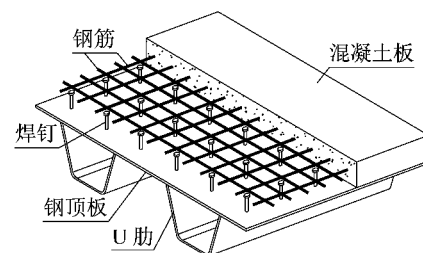


图 1 正交异性组合桥面板构造

Fig. 1 Structure of orthotropic composite deck

正交异性组合桥面板通过混凝土与钢顶板的结合, 大大提高了桥面板在车轮荷载作用下抗变形能

收稿日期: 2016-06-24

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036303)

第一作者: 苏庆田(1974—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为钢桥及组合桥梁。E-mail: sqt@tongji.edu.cn

通讯作者: 曾明根(1963—), 男, 工学博士, 教授级高工, 主要研究方向为钢桥及组合桥梁。E-mail: zengmg@tongji.edu.cn

力,并有效减少了 U 肋与钢顶板连接焊缝的应力水平,能显著提高顶板与 U 肋焊接处的抗疲劳性能^[6].但这种结构中仍存在着大量焊接连接,焊接残余应力的不利影响仍然存在.为此,文献[7]提出了一种连续弯折的 U 形肋的组合桥面板结构形式,如图 2 所示.

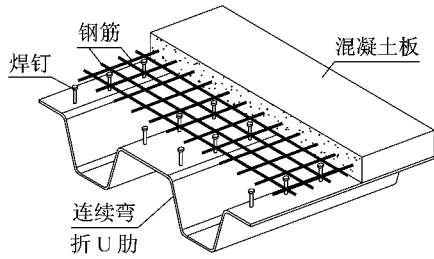


图 2 带连续弯折 U 肋的组合桥面板构造

Fig. 2 Structure of composite deck with bended U-rib

这种组合桥面板的钢结构采用冷加工方法进行弯折,横截面上没有焊缝连接,避免了焊接残余应力的产生,相对常规形式的组合板更有应用的优势;采用混凝土结构层除了能够有效扩散车轮局部荷载、有效与铺装层连接外,还作为结构的一部分进行承受荷载.由于钢厂生产的钢板尺寸所限,桥梁的长度和宽度方向必须由钢板拼接而成,因此采用弯折 U 形肋的组合正交异性桥面板存在板件拼接焊缝.有关这种桥面板的基本力学研究已在文献[7]中进行了较为详细的阐述.但是关于其疲劳性能的研究还未见报道,特别是对于连续弯折钢板的疲劳问题现有规范中没有规定.为此,本文结合工程中 U 形肋各种焊接方式对组合桥面板的疲劳性能进行研究,重点考察 U 肋对接焊缝的抗疲劳性能.

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验根据文献[7]所提出的钢-混凝土组合桥面板形式,并在其静力性能研究的基础上进行组合桥面板的疲劳试验.试件跨径根据实桥中主梁横隔板常用间距取为 4 m,试件宽度按 2 条加劲肋计取,以满足加载时试件受荷平稳.试件长 4 500 mm,宽 1 200 mm.采用的是连续弯折的 U 形肋,采用 6 mm 厚的钢板,混凝土板厚 100 mm,二者之间的连接件采用 $\Phi 13 \times 80$ 的焊钉,纵向受力钢筋采用 $\Phi 22$,布置间距 150 mm.具体尺寸如图 3 所示.

为了得到 U 肋连接处疲劳强度下限,本次试验在每个 U 肋纵向设置有一对接焊缝,这样可以保证

工程中实际具有更高的疲劳强度.为了进行检验 U 形肋组合桥面板疲劳性能,本试验先采用疲劳强度相对低的无衬垫对接焊缝形式.两条 U 肋上的对接焊缝错开布置,分别位于距跨中截面的左右 250 mm 处,如图 4 所示.试验前对试件进行了焊缝的外观检测和超声波检测.外观检测结果表明,焊缝的表面没有初始裂缝;超声波检测结果表明,试件的焊缝厚度与母材厚度(6 mm)基本一致,焊缝质量良好.

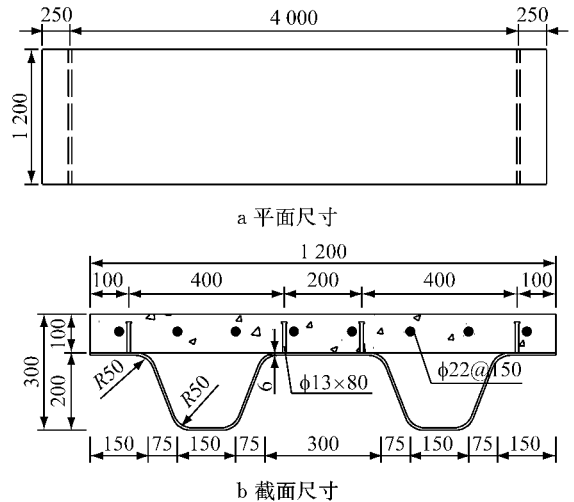


图 3 试件的结构尺寸(单位:mm)

Fig. 3 Dimension of the specimen (unit: mm)

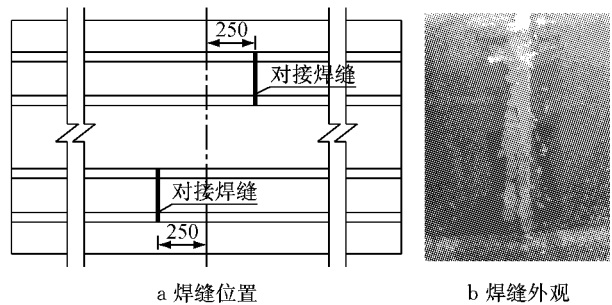


图 4 U 肋对接焊缝(单位:mm)

Fig. 4 Butt weld in U-shaped rib (unit: mm)

1.2 疲劳试验装置及加载方式

试验在同济大学结构工程与防灾研究试验室进行,加载设备采用 PMS-500 疲劳试验机.试件两端筒支,一端固定铰支座,一端为滚动铰支座,支座间距 4 m.试验机作动器置于试件跨中,单点施加竖向反复荷载.加载形式和装置如图 5 所示.

2 初始疲劳试验

2.1 测试内容及测点布置

在试件 U 肋底部布置纵向应变片,每个对接焊缝处布置 3 个,在试件跨中截面布置 3 个,作为对比

参考. 测点布置如图 6 所示.

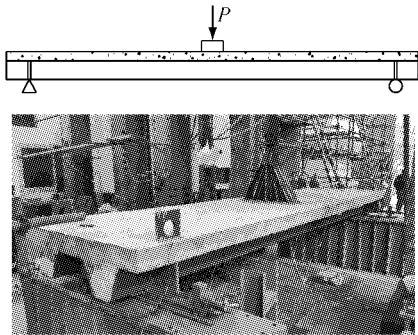


图 5 加载方法

Fig.5 Loading system

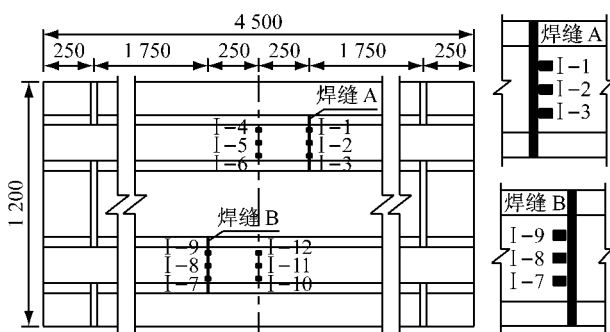


图 6 初始试验测点布置示意图 (单位:mm)

Fig.6 Layout of strain measured position in first test (unit:mm)

2.2 加载历程及破坏形式

采用等荷载幅加载至 200 万次, 由于未见开裂破坏, 先后两次提高荷载幅继续加载, 直到试件出现开裂破坏. 加载历程见表 1.

表 1 初始疲劳试验加载历程

Tab.1 Loading process of first fatigue test

荷载 P/kN			累计加载次数/万次
上峰值	下峰值	幅值	
70	24	46	200
80	25	55	250
138	28	110	283

加载到 283 万次时, 在焊缝 A 处观察到开裂, 焊缝 B 仍然完整. 裂缝如图 7a 所示. 从切割下的情况看, 裂缝正好出现在焊缝焊肉上, 如图 7b 所示, 另外从裂缝的断面可以看到, 该焊缝的熔透率还是比较高, 局部有焊接不完整的部位.

2.3 试验结果分析

2.3.1 开裂过程分析

焊缝 A 和焊缝 B 的应力幅结果见表 2.

从 A、B 两条焊缝的应力变化过程可看到, 焊缝 A 的 3 个测点应力值在 280 万次后依次退减到了 0, 而焊缝 B 的应力值只有很小的变化, 这与“焊缝 A

开裂、焊缝 B 未开裂”的试验现象符合.

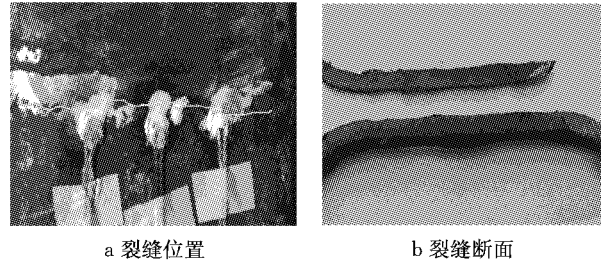


图 7 裂缝细部

Fig.7 Details of crack

表 2 焊缝应力幅的初始试验结果

Tab.2 Welds stress amplitude of the first test

加载次数 /万次	荷载幅 /kN	焊缝 A 应力幅/MPa			焊缝 B 应力幅/MPa		
		I-1	I-2	I-3	I-7	I-8	I-9
200	46	49.6	50.8	48.4	50.2	49.0	46.3
250	55	58.9	65.0	57.9	63.7	62.5	59.4
260	110	114.7	139.0	115.8	139.1	136.7	130.9
270	110	97.8	138.8	110.9	141.1	137.7	130.6
280	110	83.4	133.9	84.4	140.5	136.9	130.0
281	110	0	124.4	50.6	133.3	129.9	123.1
282	110	0	169.6	0	127.8	131.2	124.1
283	110	0	0	0	128.0	131.4	124.7

从 A、B 两条焊缝的应力测试值看, 焊缝 B 的 3 个测点测值接近, 焊缝 A 的 3 个测点测值有差异, 可推测焊缝 A 的不同部位焊接质量有差异, 这可能是导致焊缝 A 比焊缝 B 提前开裂的原因之一.

260 万次以后的焊缝 A 测点应力结果整理, 如图 8 所示. 从应力幅曲线变化可以看到, 测点 I-1 的应力幅在 270 万次时, 率先出现明显的减小, 可以推测此时 I-1 附近焊缝有开裂. 直到 283 万次时 3 个测点测值都变为 0, 此时裂缝逐渐扩大贯通.

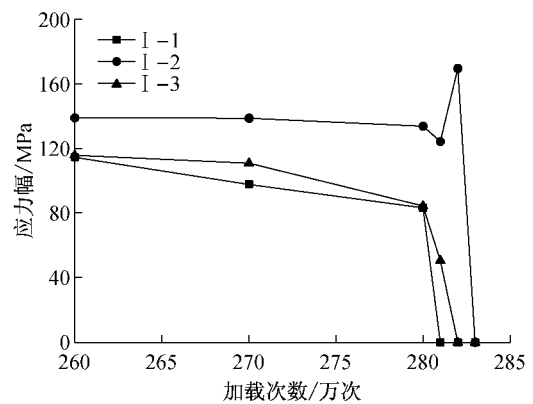


图 8 焊缝 A 测点结果

Fig.8 Result of stress amplitude in weld A

2.3.2 焊缝疲劳强度评定

根据焊缝开裂过程的分析, 以焊缝 A 首先开裂的测点 I-1 的结果为准, 开裂时加载总次数约 270 万

次,按照《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[8]中关于抗疲劳设计的应力强度曲线以及疲劳换算公式(1),进行焊缝疲劳强度计算.其中 $\Delta\sigma_E$ 为等效应力幅.

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

式中: n_i 为第 i 种荷载作用次数; $\Delta\sigma_i$ 为第 i 种荷载产生的应力幅值.

计算结果见表 3.

表 3 焊缝强度计算评定

Tab.3 Strength estimate of weld

开裂时加载次数/万次	应力幅/MPa
270	等效应力幅为 59.8
200(换算)	焊缝疲劳强度为 65.9

由计算结果知,该试件的焊缝对应 200 万次应力循环的疲劳强度为 65.9MPa.《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)提供了平钢板单侧全熔透对接焊缝、采用超声波探伤的疲劳细节,其疲劳强度为 70 MPa.本文试验试件弯折 U 肋底板连接的构造细节与规范中上述构造节点的构造细节接近但不

完全相同,但是实测结果比规范参考细节的略小.

3 加固方案

在实际工程中当 U 肋的焊缝出现疲劳裂纹后,需对该裂纹进行加固.常用的加固方法有在裂缝附近补加钢板或把开裂的焊缝切掉重新连接.对于裂缝不严重的位置可采用补强钢板方法,对于裂缝较大的部位常采用重新连接的方法.连接方法有焊接与高强度螺栓连接.尽管相同连接处高强度螺栓连接的疲劳寿命比焊接的高,但是高强度螺栓连接的方法施工时间较长,特别是现场钢板开孔困难时只能采用焊接的方法.为了测试相对疲劳强度较低的连接方式疲劳寿命,本次试验采用带衬垫的对接焊进行开裂处的加固补强^[9-10].具体操作为:切割机将 U 肋的对接缝切除(初始疲劳试验中未开裂的焊缝仍然予以切除并重新加固),如图 9a 所示;然后采用带衬垫的对接焊缝焊接,具体步骤见图 9b~9c.为了尽可能真实地模拟实际施工情况,试验现场采用了仰焊的焊接方式,如图 9d 所示.

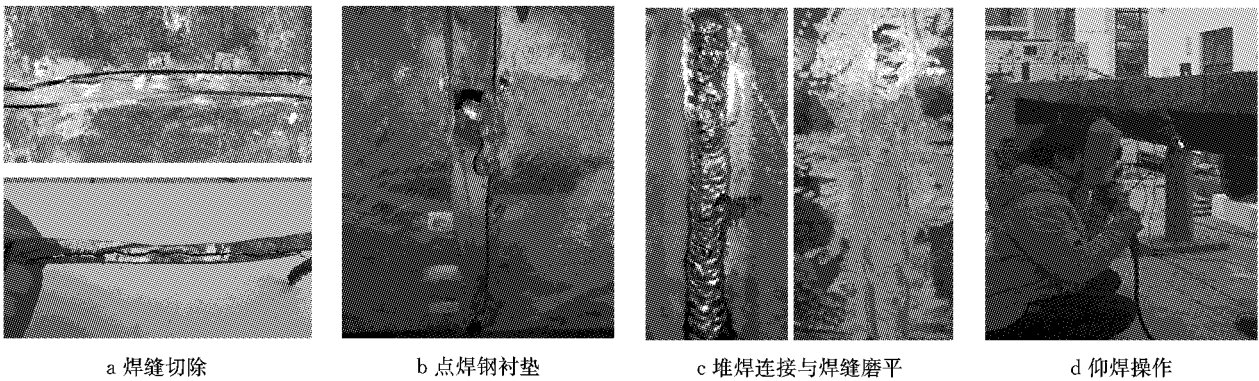


图 9 采用带衬垫对接焊缝加固补强

Fig.9 Reinforced by butt welds with backing plate

4 加固后疲劳试验

4.1 测试内容及测点布置

对于加固后的疲劳试验,焊缝处增加到 4 个测点,并且对称布置于焊缝两侧,应变片紧挨焊缝焊肉,横向间距大约为 1/4 底宽,如图 10 所示.

4.2 加载历程及破坏形式

加固后的试验,提高了荷载上下峰值,在前 6 万次对上峰值有所微调后,幅值基本维持在 50 kN,对试件进行疲劳试验直到破坏.详细加载历程见表 4.

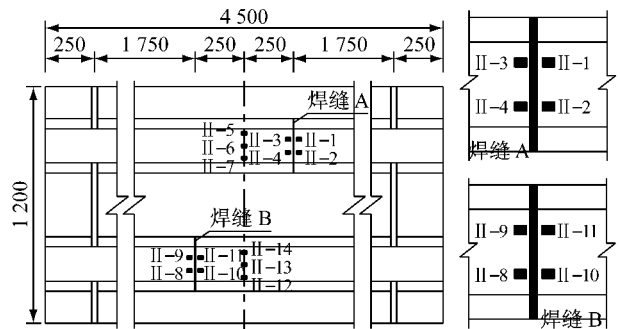


图 10 加固后试验测点布置示意图(单位:mm)

Fig.10 Layout of measured position in the test after reinforcement(unit:mm)

表 4 加固后疲劳试验加载历程

Tab.4 Loading process of the fatigue test after strengthening

荷载 P/kN			累计加载次数/万次
上峰值	下峰值	幅值	
150	80	70	0.5
140	80	60	6
130	80	50	104

加载到 104 万次时,仍然在焊缝 A 处观察到明显的开裂,焊缝 B 完整. 裂缝如图 11 所示. 裂缝沿着焊缝与母材的交界展开. 对比第一次焊接的疲劳裂缝位置,说明二次焊接后钢材的热影响使得材料性能有所减弱.

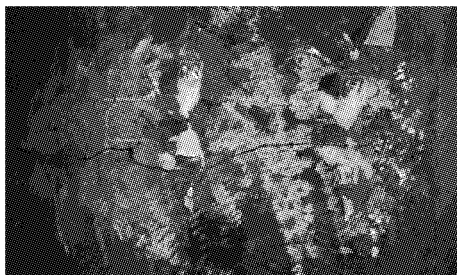


图 11 裂缝

Fig.11 Crack

4.3 试验结果分析

4.3.1 开裂过程分析

焊缝 A 和焊缝 B 的应力幅结果见表 5.

表 5 焊缝应力幅加固后试验结果

Tab.5 Welds stress amplitude of the strengthened specimen

累计加载次数/万次	荷载幅/kN	焊缝 A 应力幅/MPa				焊缝 B 应力幅/MPa				
		I-1	I-2	I-3	I-4	I-8	I-9	I-10	I-11	
6	60	156.6	142.1	113.9	122.6	111.0	113.5	117.2	126.3	
10	50	141.0	127.9	106.6	112.4	99.7	102.6	105.5	111.1	
20	50	142.8	128.5	106.8	112.8	99.9	103.0	105.7	111.5	
34	50	153.9	129.3	106.2	113.4	100.0	103.0	106.0	112.1	
45	50	200.6	131.8	102.6	114.6	99.8	103.0	106.4	112.7	
55	50	230.0	133.0	60.8	115.1	99.8	103.2	107.5	113.4	
67	50	170.4	134.8	86.2	116.2	99.7	103.3	109.7	114.7	
77	50	72.1	136.3	91.0	117.0	99.4	103.6	111.5	115.7	
87	50	15.4	138.9	80.7	118.0	98.9	104.3	114.2	117.2	
104	50	-1.1	0	-1.6	8.1	103.3	119.1	119.7	136.2	

类似于第一次的加载试验,焊缝 A 的 4 个测点应力值在 104 万次以后都退减到了 0 附近,而焊缝 B 的应力值只有很小的变化,与观察到的试验现象符合.

分析焊缝 A 测点应力结果,将其上 4 个测点在 20 万次以后的应力结果整理,如图 12 所示. 从结果看,加载达到 34 万次以后,测点 I-1 的幅值开始发生

较明显变化,说明该点附近有开裂. 在加载达到 55 万次后,测点 I-3 的幅值也开始发生明显变化,I-1 与 I-3 分别位于焊缝 A 同一部位的两侧,可以推测开裂首先出现在离 I-1 较远的地方,然后发展扩大后再影响到测点 I-3.

测点 I-2 和 I-4 在 87 万次以后最终减小到 0,说明裂缝是此后才发展到该处.

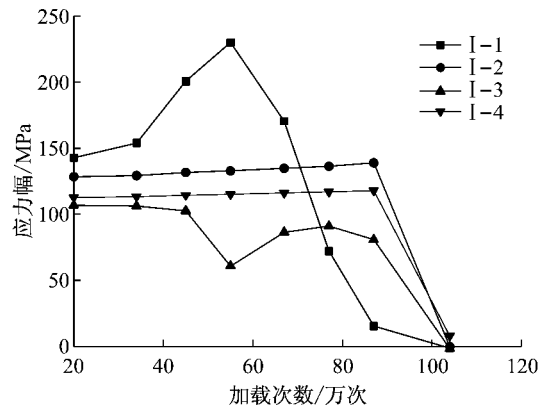


图 12 焊缝 A 测点结果

Fig.12 Result of the stress amplitude in weld A

4.3.2 焊缝疲劳强度评定

试验中观察到明显的贯通裂缝是在 104 万次,但从焊缝 A 的测点应力结果可以看到,34 万次以后,在荷载及荷载幅未发生变化的情况下,测得的应力幅已经发生改变,可以推知此时测点附近已经于局部开裂. 开裂处主要沿焊缝与母材交接处,部分位于焊肉上,故将二次焊接的焊缝视为开裂对象,在评定疲劳强度时不累加初始试验的疲劳损伤. 所以将 34 万次以前测点 I-1 的应力幅及应力循环次数,按照《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)相关内容^[8],进行焊缝疲劳强度计算结果见表 6.

表 6 焊缝强度计算评定

Tab.6 Strength estimate of weld

开裂时加载次数/万次	应力幅/MPa
34	等效应力幅为 149.0
200(换算)	焊缝疲劳强度为 82.6

由计算结果知,该试件的焊缝对应 200 万次应力循环的疲劳强度为 82.6 MPa,规范提供的对应疲劳细节(带衬垫的全熔透对接焊缝)为 70 MPa,实测值大于参考值. 说明采用的带衬垫对接焊缝加固方法具有很好的加固效果.

4.4 前后两次试验结果分析比较

对组合桥面板进行两次试验,疲劳开裂都发生在 U 肋焊缝的底部处,说明该处是组合桥面板中容易发生疲劳破坏的构造细节,而混凝土桥面板与钢

板之间的连接焊钉具有足够的抗疲劳性能。

试验试件最初采用无衬垫对接焊缝,得到 200 万次应力循环对应的焊缝疲劳强度为 65.9 MPa,在切除开裂焊缝重新加固,加固时则采用带衬垫的对接焊缝,得到的焊缝(带衬垫单面融透焊)疲劳强度为 82.6 MPa,说明有无衬垫对于焊缝质量影响较大。本文的试验结果表明经历了两次焊接的带衬垫的对接焊缝其疲劳强度还是明显高于不带衬垫的对接焊缝。说明采用该种连接方法来加固组合桥面板 U 肋的开裂焊缝有很好的效果。

5 结论

通过对 U 肋采用对接焊缝连接的组合桥面板试件,进行的前后两次疲劳加载试验,可以得到如下结论:

(1)对于弯折 U 形肋组合桥面板的疲劳试验表明,采用连接较为不利的焊接连接方式疲劳破坏发生在 U 肋对接焊缝的底部位置,该部位是桥面板在反复荷载作用下的易开裂的薄弱之处,桥面板的其他位置没有出现疲劳破坏,根据现有规范连接细节的疲劳强度等级,采用高强度螺栓连接 U 形肋其疲劳强度将进一步提高。

(2)采用弯折 U 肋对接焊缝采用无衬垫的对接焊时,其连接位置的疲劳强度比规范中平钢板无衬垫对接焊缝的略低。

(3)采用带衬垫的对接焊缝,在实桥中以仰焊的方式对组合桥面板 U 肋肋部的开裂焊缝进行加固补强,操作上是可行的,对补强后的焊缝进行磨平处理具有较好的补强效果,在保证焊接质量的情况下,其疲劳强度仍能满足现行规范要求。

参考文献:

- [1] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等. 正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面板基本性能研究[J]. 中国公路学报,2012,25(2): 40.
SHAO Xudong, CAO Junhui, YI Dutaotao, *et al.* Research on basic performance of composite bridge deck system with orthotropic steel deck and thin RPC layer[J]. China Journal of Highway and Transport,2012, 25(2): 40.
- [2] De Jong F B P. Overview fatigue phenomenon in orthotropic bridge decks in the Netherlands[C]//2004 Orthotropic bridge conference. Sacramento:[s. n.], 2004:31-79.
- [3] Kolstein M H. Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks[M]. TU Delft; Delft University of Technology, 2007.
- [4] 杨勇,周丕健,聂建国,等. 钢板-混凝土组合桥面板静力与疲劳性能试验[J]. 中国公路学报,2009,22(4): 78.
YANG Yong, ZHOU Pijian, NIE Jianguo, *et al.* Experiment on static and fatigue behavior of steel plate-concrete composite bridge decks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009,22(4): 78.
- [5] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
LIU Yuqing. Composite bridge [M]. Beijing: China Communication Press,2005.
- [6] 丁楠,邵旭东. 轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J]. 土木工程学报,2015(1): 74.
DING Nan, SHAO Xudong. Study on fatigue performance of light-weighted composite bridge deck [J]. China Civil Engineering Journal,2015(1): 74.
- [7] HAN Xu, SU Qingtian, JIANG Xu. A new type of orthotropic composite bridge deck [C]//International Conference Proceedings of the Fourth Orthotropic Bridge Conference. Beijing: Bridge Magazine (Sacramento: ASCE), 2015: 161-170.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D64—2015 Specifications for design of highway steel bridge [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd,2015.
- [9] 王元清,祝瑞祥,戴国欣,等. 工字形截面受弯钢梁负弯矩下焊接加固试验研究[J]. 土木工程学报,2015(1): 1.
WANG Yuanqing, ZHU Ruixiang, DAI Guoxin, *et al.* Experimental study on bending steel beams with I section strengthened bywelding under initial load [J]. China Civil Engineering Journal,2015(1): 1.
- [10] 董亮,董乐为,彭洋. 带衬垫的铸钢-轧钢对焊接头疲劳性能试验研究[J]. 结构工程师,2011,27(3): 80.
DONG Liang, TONG Lewei, PENG Yang. Experimental Investigation of Fatigue Behavior of Butt-Welded Joints between Cast Steel and Rolled Steel Plates with Backing Strip [J]. Structural Engineers,2011,27(3): 80.