

文章编号:1671-6833(2015)02-0062-05

正交异性桥面板横隔板圆弧过渡处剪切疲劳强度实验研究

吕彭民, 宋年波, 李大涛

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为了研究正交异性桥面板横隔板圆弧过渡处的疲劳特性, 本文以九江长江大桥实际结构为例制作了横隔板与 U 型肋局部构造细节疲劳试验试样, 实验结果发现 13 个试样中有 8 个试样疲劳裂纹发生在横隔板与 U 型肋焊缝处, 而有 5 个试样疲劳裂纹发生在横隔板母材圆弧过渡处, 说明横隔板圆弧过渡处为疲劳破坏的危险部位之一. 有限元分析与应力测试表明, 该处为压应力状态区域, 而剪切应力较大, 其疲劳失效形式为剪切疲劳破坏, 通过将实验数据与欧洲规范 Eurocode3 进行比较, 该部位满足容许剪切应力幅值为 100 MPa 的  $\Delta\tau-N$  曲线方程. 该研究结果可为正交异性桥面构造细节强度设计和寿命评估提供参考.

关键词: 正交异性钢桥; 横隔板圆弧过渡处; 剪切疲劳破坏; 疲劳试验; 有限元分析; 应力测试  
中图分类号: U443.3 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.014

0 引言

正交异性钢桥面板, 是用纵横向互相垂直的加劲肋(纵肋和横肋)连同桥面盖板所组成的共同承受车轮载荷的结构. 因其具有自重轻、承载能力大、节省钢材、施工方便等优点, 已成为大跨度现代钢桥通常采用的桥面结构形式<sup>[1]</sup>. 迄今为止, 国内采用正交异性钢桥面板的桥梁已有近 30 余座<sup>[2]</sup>, 但因结构复杂、焊缝立体交叉等原因, 疲劳开裂已成为阻碍其进一步发展的关键技术问题. 国内外关于钢桥细部结构疲劳性能做了大量的研究<sup>[3-8]</sup>, 形成了各种设计规范, 如欧洲规范 Eurocode3<sup>[9]</sup>, 英国规范 BS5400<sup>[10]</sup>, 美国规范 AS-SHTO<sup>[11]</sup>, 国内的《铁路桥梁钢结构设计规范》<sup>[12]</sup>等, 对各类构造细节的疲劳特性给出了详细规定. 由于正交异性桥面采用全焊结构, 人们对焊接部位的疲劳特性进行了深入研究, 而对母材处的剪切疲劳特性的研究较少. 正交异性桥面结构横隔板圆弧过渡处应力集中较大, 是疲劳破坏的薄弱部位之一, 由于该部位受压应力作用, 其疲劳破坏为剪切疲劳破坏. 为了研究该部位的疲劳特性, 本文以九江长江大桥正交异性桥面结构为例, 制作了横隔板与 U 型肋局部构造细节疲劳试样, 通过

疲劳试验和仿真计算, 研究横隔板圆弧过渡处(见图 1 圆弧 R34 处)的应力状态和疲劳特性.

1 横隔板圆弧过渡处疲劳试验

九江长江大桥横隔板与 U 肋细部构造如图 1 所示, 为了研究横隔板圆弧过渡处疲劳特性, 本文设计了试样如图 2 所示, 疲劳试验结果如表 1 所示.

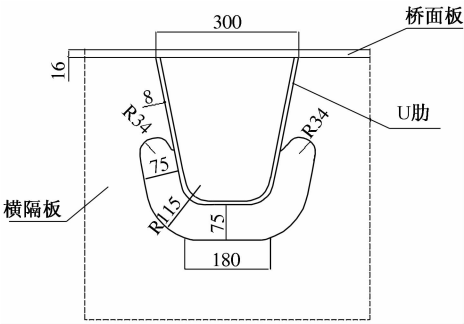


图 1 桥面横隔板与 U 肋细部构造图(单位:mm)  
Fig.1 The bridge deck transverse diaphragm with U rib local structural detail diagram

由表 1 可知, 横隔板与 U 肋细部结构疲劳危险部位为横隔板与 U 肋围焊处(见图 3)和横隔板圆弧过渡处(见图 4~图 5). 围焊处疲劳性能另有

收稿日期:2014-10-21;修订日期:2014-12-18

基金项目:江西省交通运输科技项目资助(2010C00003)

作者简介:吕彭民(1957-),男,陕西渭南人,长安大学教授,博导,博士后,主要从事结构动力学、结构疲劳强度及优化设计, E-mail:lpmin@chd.edu.cn.

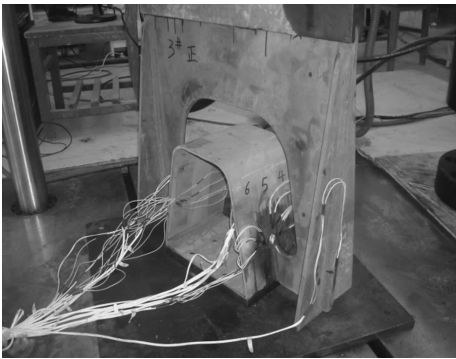


图 2 试样样件图  
Fig.2 The sample diagram

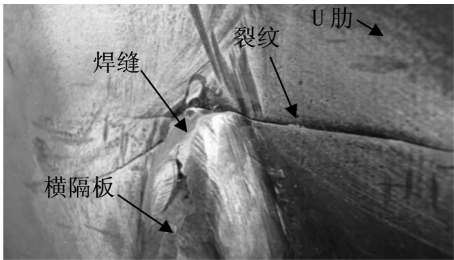


图 3 试样 SY-2 裂纹  
Fig.3 Sample crack of SY-2

论文讨论,笔者主要研究横隔板圆弧过渡处的疲劳特性.

表 1 试样疲劳试验结果汇总表  
Tab.1 Summary table of specimen fatigue test results

试样编号	载荷幅 $\Delta P/\text{kN}$	裂纹长度 30 mm 对应	裂纹位置
		循环次数	
SY-1	120.00	1 409 107	横隔板与 U 型肋围焊处
SY-2	230.00	—	横隔板与 U 型肋围焊处
SY-3	180.00	1 059 280	横隔板与 U 型肋围焊处
SY-4	150.00	736 535	横隔板与 U 型肋围焊处
SY-5	180.00	435 607	横隔板与 U 型肋围焊处
SY-6	200.00	169 466 *, 409 925 **	横隔板与 U 型肋围焊处、母材横隔圆弧过渡处
SY-7	180.00	238 899	母材横隔圆弧过渡处
SY-8	180.00	158 101	母材横隔圆弧过渡处
SY-9	180.00	331 072	横隔板与 U 型肋围焊处
SY-10	180.00	205 567	横隔板与 U 型肋围焊处
SY-11	180.00	103 719	母材横隔圆弧过渡处
SY-12	180.00	241 068	横隔板与 U 型肋围焊处
SY-13	270.00	310 00 *, 82 632 **	横隔板与 U 型肋围焊处、母材横隔圆弧过渡处

注:“—”表示母材横隔板圆弧过渡处裂纹扩展到 30 mm 时没有检测循环次数;“\*”表示母材横隔板圆弧过渡处裂纹扩展到 30 mm 时的循环次数;“\*\*”表示横隔板与 U 型肋围焊处裂纹扩展到 30 mm 时的循环次数.

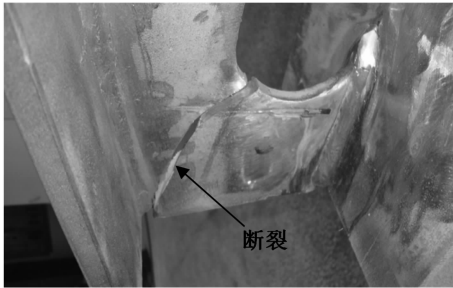


图 4 试样 SY-7 裂纹  
Fig.4 Sample crack of SY-7

2 横隔板圆弧过渡处有限元分析

为了准确分析该疲劳试样横隔板圆弧过渡处的应力状态,有限元分析时采用实体单元 Solid45 建立了疲劳试样 1/2 有限元计算模型,在对称面上施加对称约束,共划分实体单元 132 388 个,接

触单元 4 140 个,节点 150 813 个,试样有限元模型见图 6.图 7 为复合应力云图根据有限元对疲劳试样分析结果可知,由于有应力集中,横隔板圆弧过渡处复合应力很大,由分析可知,该处为压应力区,图 8 为试样第三主应力(压应力)云图,圆弧过渡处压应力很大.

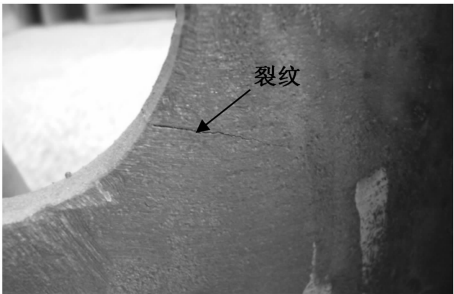


图 5 试样 SY-8 裂纹  
Fig.5 Sample crack of SY-8

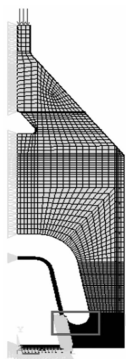


图 6 试样有限元模型  
Fig. 6 Finite element model of sample

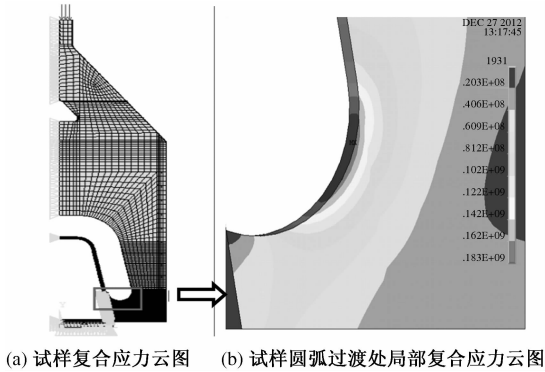


图 7 试样复合应力云图

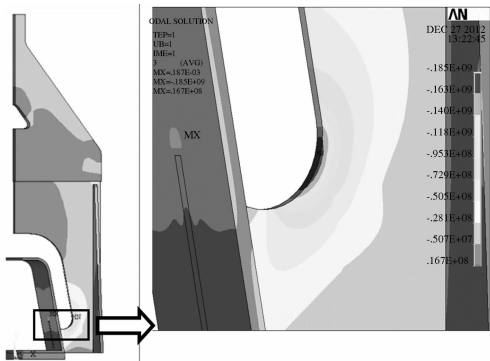
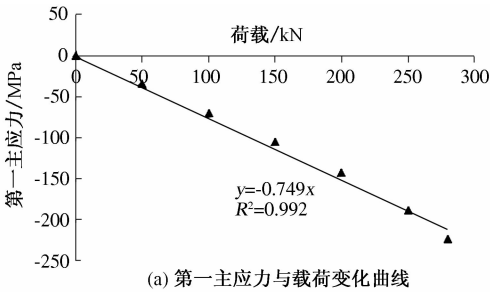


图 8 试样第三主应力应力云图  
Fig. 8 Sample stress cloud of the third principal stress

3 横隔板圆弧过渡处应力状态测试

根据有限元计算结果,在试样上布置应变片. 试样布片图见图 9,其中应变花 5 和 6 用来测圆



(a) 第一主应力与载荷变化曲线

弧过渡处应力. 应力测试按照 0、50、100、150、200、250、280 kN 逐级加载和 250、200、150、100、50、0 kN 逐级卸载进行,静载试验共完成 2 次加载、卸载,将 2 次所测值平均后求出测点的应力值,应变花 6 所测的主应力见图 10.

通过实测结果可知,试样圆弧过渡处同样为压应力,其第一主应力和第三主应力均为负值,从而验证了有限元分析的合理性. 根据最大剪切应力计算公式( $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ,  $\sigma_1$  为第一主应力,  $\sigma_3$  为第三主应力)可以求出此处最大剪切应力,图 11 为最大切应力-载荷变化曲线. 图 12 为有限元分析得到的圆弧过渡处第三主应力方向分布图,由图中可以看出圆弧过渡处第三主应力方向与圆弧切线大约成  $20^\circ \sim 30^\circ$  角,由于最大切应力  $\tau_{\max}$  所在的截面与  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  主平面互成  $45^\circ$  角,因此可以作出最大切应力  $\tau_{\max}$  的大致方向,如图 13 所示,由此可以看出最大切应力  $\tau_{\max}$  与裂纹扩展方向基本吻合,进一步说明该处的裂纹破坏是由剪切应力产生的疲劳破坏.

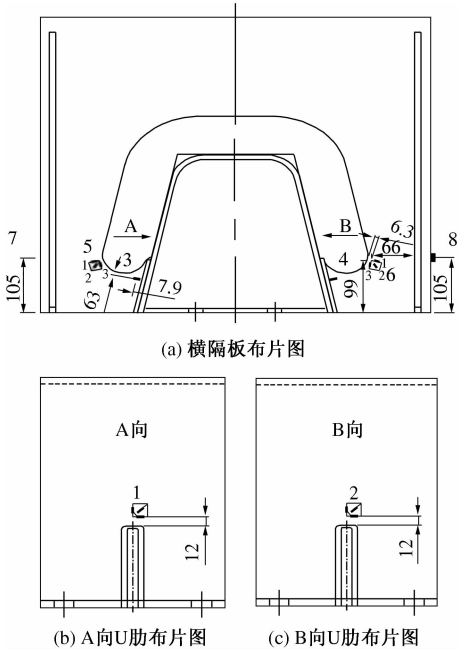
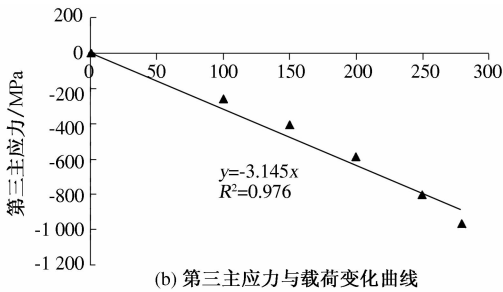


图 9 试样圆弧过渡处布片图(单位:mm)  
Fig. 9 Cloth map at sample arc transition



(b) 第三主应力与载荷变化曲线

图 10 应变花 6 测试结果  
Fig. 10 Test result of rosette 6

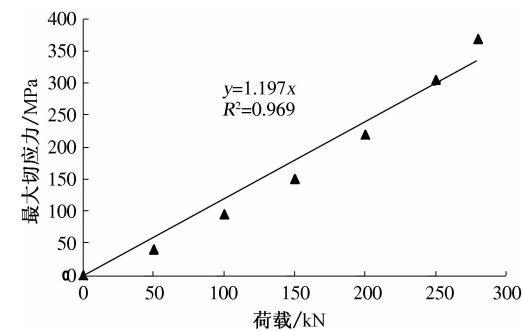


图 11 圆弧过渡处最大剪切应力 - 载荷曲线

Fig. 11 The maximum shear stress-load curve at arc transition

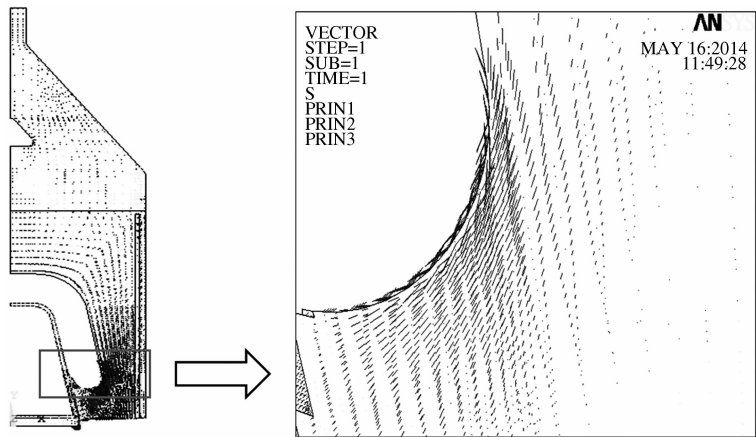


图 12 圆弧过渡处第三主应力方向

Fig. 12 The third principal stress directions at the arc transition

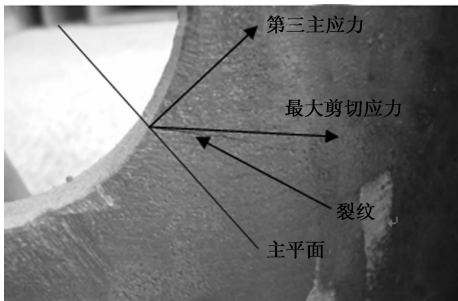


图 13 剪应力方向与裂纹实际方向对比

Fig. 13 Comparison of shear stress direction with practical direction of crack

表 2 试样各切应力幅与循环次数汇总

Tab.2 Summary of each sample shear stress amplitude and cycles

试样 编号	载荷幅 $\Delta P/\text{kN}$	应力幅 $\Delta \tau/\text{MPa}$	循环次数 $N$
SY-6	200	239.4	169 466
SY-7	180	215.46	238 899
SY-8	180	215.46	158 101
SY-11	180	215.46	103 719
SY-13	270	323.19	31 000

4 横隔板圆弧过渡处疲劳性能讨论

为研究该细部构造结构的疲劳失效状况,共进行了 13 个试样的疲劳试验,由表 1 可以看出试验中 5 个试样横隔板圆弧过渡处发生裂纹,该处可用的疲劳试样数据见表 2. 其中剪切应力幅是通过图 11 中最大剪切应力 - 载荷曲线求得.

将表 2 中试验数据与欧洲规范 Eurocode3 中给出的两条  $\Delta \tau - N$  疲劳曲线(200 万次对应容许应力幅分别为 100 MPa 和 80 MPa)进行比较(如图 14). 可以看出,试验数据满足 200 万次对应容

许应力幅值为 100 MPa 的疲劳曲线要求. 因此,对于正交异性桥面结构横隔板圆弧过渡处的疲劳强度计算与评估建议采用 Eurocode3 中容许应力幅值为 100 MPa 的  $\Delta \tau - N$  曲线方程: $\log N = 16.301 - 5 \lg \Delta \sigma_R$ .

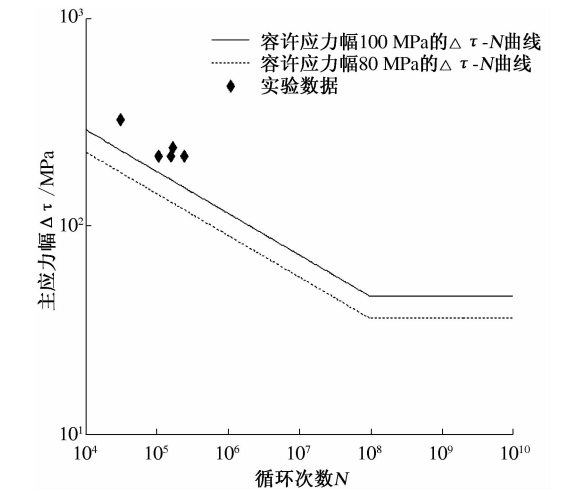


图 14 Eurocode3 中  $\Delta \tau - N$  曲线和横隔板圆弧过渡处两种可靠度下的  $\Delta \tau - N$  曲线

Fig. 14  $\Delta \tau - N$  curves in Eurocode3 and  $\Delta \tau - N$  curves under two reliability arcs transitions at arcs transitions

## 5 结论

横隔板圆弧过渡处由于应力集中等原因,该处为正交异性桥面结构疲劳破坏的危险部位之一,在构造细节设计和强度评估时应加以关注;横隔板圆弧过渡处为压应力区域,其疲劳破坏一般为剪切疲劳破坏;正交异性桥面结构横隔板圆弧过渡处疲劳特性曲线建议采用 Eurocode3 中 200 万次对应剪切许用应力幅值为 100 MPa 的  $\Delta\tau - N$  曲线方程:  $\log N = 16.301 - 5\lg\Delta\sigma_R$ .

## 参考文献:

- [1] 周建林. 苏通大桥主桥钢箱梁桥面板抗压与疲劳性能试验研究[D]. 上海: 同济大学桥梁工程与隧道工程系, 2007.
- [2] 《中国大桥》编写组. 中国大桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [3] SIM H B, UANG C M, CHARLES S. Effects of fabrication procedures on fatigue resistance of welded joints in steel orthotropic decks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(5): 366 - 373.
- [4] ROBERT J C, JOHN W F. Consistent approach to calculating stresses for fatigue design of welded rib-to-web connections in steel orthotropic bridge decks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(5): 517 - 525.
- [5] TSAKOPOULOS P A, JOHN W F. Full-scale fatigue tests of steel orthotropic decks for the williamsburg bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(5): 323 - 333.
- [6] 陶晓燕. 大跨度钢桥关键构造细节研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2008.
- [7] 张玉玲, 潘际炎, 张建民, 等. 芜湖长江大桥钢梁细节疲劳强度的研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 10(5): 15 - 21.
- [8] 余波, 邱洪兴, 王浩, 等. 正交异性钢桥面板构造细节疲劳性能及损伤演化研究[J]. 公路交通科技, 2009, 29(9): 64 - 69.
- [9] DDEVN 1993 - 1 - 1; 1992. Eurocode 3: Design of Composite Steel and Concrete [S]. Part 1. 9 Fatigue; 2003.
- [10] 英国标准学会. BS5400 钢桥, 混凝土桥及结合桥 (1978 - 821 版) [S]. 成都: 西南交通大学出版社, 1987.
- [11] 美国各州公路和运输工作者协会 (AASHTO)、美国公路桥梁设计规范 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [12] 铁道部大桥工程局勘测设计院. TB 10002. 2—2005. 铁路桥梁钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.

## Experimental Study of Shear Fatigue Strength for the Orthotropic Deck Diaphragm Arc Transition

LV Peng-min, SONG Nian-bo, LI Da-tao

(Key Laboratory Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to study the fatigue characteristics on the diaphragm arc transition for orthotropic bridge deck, Jiujiang Yangtze River bridge was taken as an example, and the fatigue test specimens of the diaphragm and U rib local structural detail were made. Experimental results showed that 8 samples fatigue crack occurred in the diaphragm with U rib welds in 13 samples, and 5 samples fatigue crack occurred in the diaphragm arc transitional area, which illustrated that the diaphragm arc transitional area is one of the dangerous places of the fatigue failure. Finite element analysis and stress tests all indicated that this region is in the compressive stress state, but the shear stress is very large, and the fatigue failure belongs to shear fatigue failure. Comparing the experimental data with European standard Eurocode3, we can find it meets the  $\tau - N$  curve equation of the allowable shear stress amplitude for 100 MPa. The results of this study can provide reference for the strength design and life assessment on the orthotropic deck structure details.

**Key words:** orthotropic steel bridge; diaphragm arc transition; shear fatigue failure; fatigue test; finite element analysis, stress test