

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.08.013

正交异性钢桥面板疲劳裂纹 成因分析及控制

张允士¹, 李法雄², 熊 锋³, 周旭东³, 李 卫³

(1. 北京交通大学 土木与建筑工程学院, 北京 100044; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;
3. 广东虎门大桥有限公司, 广东 东莞 523900)

摘要:通过对某实桥正交异性钢桥面板疲劳裂纹的实地调查,总结正交异性钢桥面板疲劳裂纹主要分布形态,分析正交异性桥面板疲劳开裂原因主要是:在车辆荷载作用下桥面板产生的局部竖向变形、桥面板与U肋之间产生的相对转角使焊缝根部因受拉应力过大而导致疲劳开裂;纵向U肋与横隔板刚度不同产生的次应力、U肋的偏转和竖向变形使过焊孔处横隔板受拉开裂;纵向U肋产生的纵向弯矩引起嵌补段裂缝。各主要受力板件的厚度过薄、横隔板过焊孔的形状以及横隔板的拼接方式也会加速疲劳开裂。针对既有正交异性钢箱梁桥的典型病害,提出了正交异性钢桥面板关键部位抗疲劳特性的改进措施:提高桥面板竖向刚度并改进U肋与桥面板的焊接工艺,在横隔板位置处的U肋内部设置小内横隔, U肋嵌补段改用螺栓连接等。

关键词:桥梁工程; 正交异性钢桥面板; 疲劳; 裂纹; 成因分析; 控制措施

中图分类号: U448.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2013)08-0075-06

Cause Analysis and Control Measures of Fatigue Cracks in Orthotropic Steel Deck

ZHANG Yun-shi¹, LI Fa-xiong², XIONG Feng³, ZHOU Xu-dong³, LI Wei³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
3. Guangdong Humen Bridge Co., Ltd., Dongguan Guangdong 523900, China)

Abstract: According to the field investigation of fatigue cracks in bridge's orthotropic deck, the distribution of fatigue cracks in orthotropic deck is discussed. The major causes of fatigue cracks in orthotropic deck are: (1) under the action of vehicle loads, the deck generated partial vertical deformation; (2) the relative angle between deck plate and U ribs generated fatigue cracks at the root of welds because of overlarge tensioning stress; (3) the secondary stresses caused by different stiffnesses between longitudinal U ribs and diaphragm, rotation and vertical deformation of U ribs lead the diaphragm cracks by tension at the welding; (4) longitudinal bending moment generated by U ribs gave rise to the vertical cracks in inlaying section; (5) little thickness of plates, the shape of welding pass holes and the connection of the diaphragm accelerated fatigue cracks. To cope with the typical disease of the existing orthotropic steel box girder bridges, the control measures are proposed to improve the key point's anti-fatigue properties, such as increase the vertical stiffness of the bridge deck, improve the welding technique between U-ribs and deck plates, set up small diaphragm in U rib at the diaphragm, and use bolt connection at the inlaying section of U ribs and so on.

Key words: bridge engineering; orthotropic steel deck; fatigue; crack; cause analysis; control measure

收稿日期: 2012-11-21

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2012H24)

作者简介: 张允士(1988-),男,江苏徐州人,硕士研究生。(yunshi_zhang@sina.com)

0 引言

正交异性钢桥面板因其自重轻,传力整体性好,承载能力大,施工速度快,结构美观的优点^[1-2],在现代大跨度钢箱梁悬索桥以及斜拉桥中应用广泛。但由于早期钢桥建设经验不足,国内外多座大跨度桥梁钢箱梁出现较为严重的疲劳开裂现象:①绝大多数疲劳裂纹集中发现于焊缝位置;②开裂后,对桥面板的维修工作十分困难,维修费用高,且维修后很难有效地抑制桥面板继续开裂;③正交异性钢桥面板的设计目前仍主要参照国外的设计规范和研究成果,国内设计理论发展远远滞后于工程应用需求。

随着近年来对正交异性钢桥面板的研究不断深入,针对正交异性桥面常见的疲劳裂纹形态,许多研究人员提出了很多有益的改进措施。本文通过对

一座实桥正交异性钢桥面板疲劳裂纹进行实地调查,总结正交异性钢桥面板疲劳裂纹主要分布形态,从开裂机理和设计方法2方面阐述正交异性钢桥面板疲劳裂纹的形成原因,最后提出正交异性钢桥面板关键部位抗疲劳特性的改进措施,为今后我国大跨径钢箱梁桥设计和施工提供参考。

2 疲劳裂纹分布形态

以某单跨钢箱梁悬索桥为例,主跨跨径为888 m,采用如图1所示的单幅扁平钢箱梁,箱梁全宽35.6 m,桥面板厚12 mm,纵向U肋厚度为8 mm,U肋上开口及相邻U肋之间的距离为320 mm,横隔板的厚度为10 mm,相邻横隔板间距为4 m。箱梁节段间U肋采用嵌补段对接焊接工艺,桥面板与纵向U肋的连接是采取不完全熔透角焊缝焊接工艺。

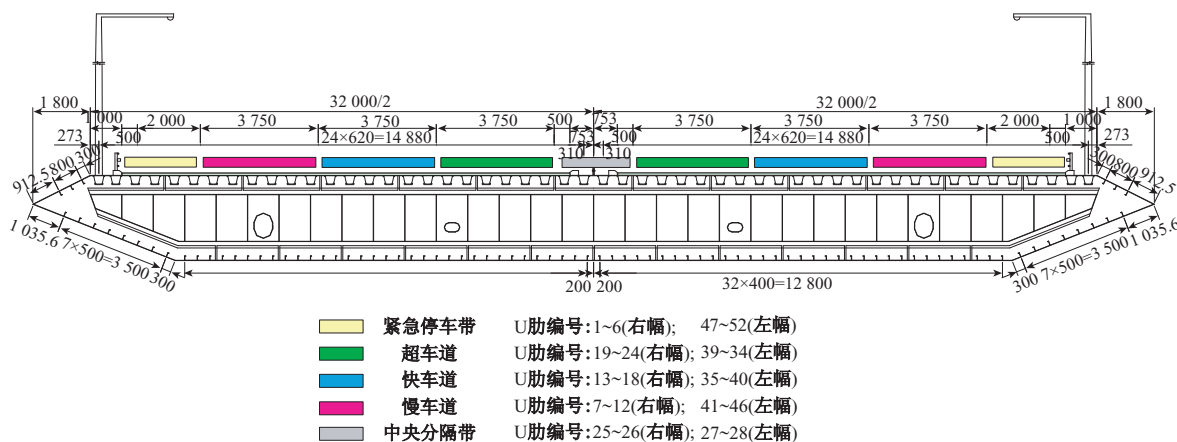


图1 主梁横截面图 (单位: mm)

Fig.1 Section of main girder (unit: mm)

截止2012年,该悬索桥运行至今已15 a,通过对钢箱梁桥保持定期检查发现:钢箱梁内部疲劳裂纹主要存在4类形态:I类裂缝为U肋与顶板连接处的纵向裂缝,横桥向主要分布在重车道的车轮轮迹带,纵桥向发生位置随机;II类裂缝为U肋与横隔板连接处的竖向裂缝,数量庞大,但裂纹长度较短,多表现为横隔板竖向焊缝底部的表面微细裂纹;III类裂缝为横隔板圆弧切口附近的横向裂纹,表现为母材开裂;IV类裂缝为U肋对接嵌补段的焊缝竖向开裂。上述4类疲劳裂纹的分布位置如图2所示。

图3~图5给出该悬索桥钢箱梁箱内I~III类疲劳裂纹横桥向分布统计情况。

从图3~图5可以看出,该桥钢箱梁疲劳开裂情况已较为严重。由于下游幅重车频繁,下游幅箱梁内部的疲劳裂纹明显多于上游幅。I类裂缝一旦出

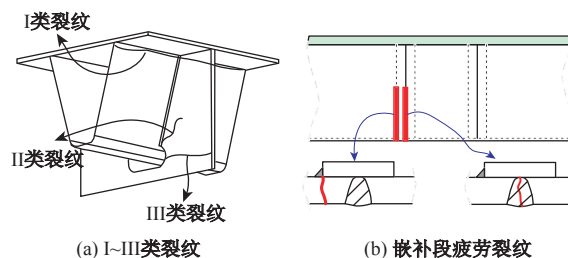


图2 疲劳裂纹分布形态

Fig.2 Distributions of fatigue cracks

现,发展会很快,并顺着纵向的U肋与桥面板的连接处一直向前延伸,直至贯通相邻的2个横隔板;II类裂缝常常从U肋与横隔板的连接处底部开始沿着焊缝向上或者是斜向上发展;III类裂缝表现为过焊孔处横隔板母材开裂,在检查中发现许多横隔板裂纹在打了止裂孔之后仍然继续向前发展,最终在2

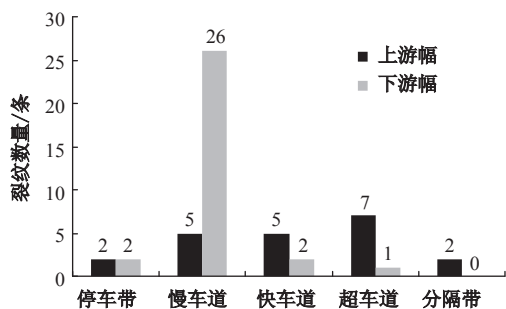


Fig. 3 Transverse distribution of type I fatigue cracks

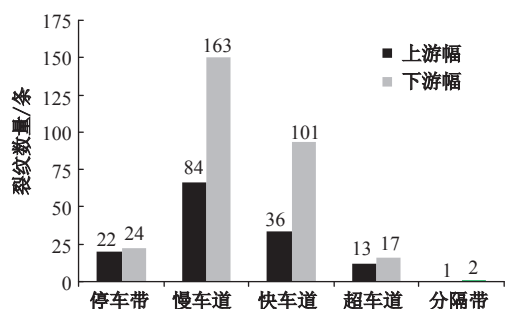


Fig. 4 Transverse distribution of type II fatigue cracks

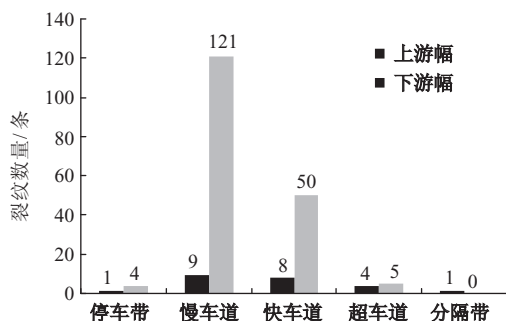


Fig. 5 Transverse distribution of type III fatigue cracks

个U肋之间的横隔板形成贯穿,如图6所示。

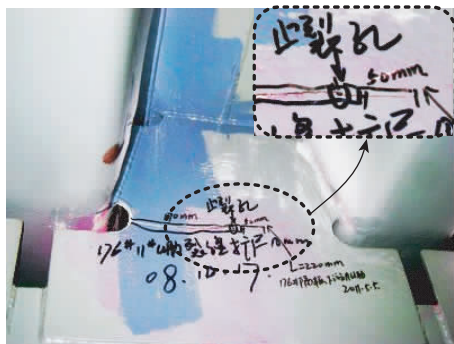


Fig. 6 Transverse cracks in diaphragm

3 疲劳裂纹成因分析

3.1 开裂机理分析

下面将从焊缝类型、构造关系、受力行为等方面对上述4类裂纹的形成原因进行分析。

桥面板与 U 肋的连接焊缝 (I 类裂缝) 如图 7 所示, 裂缝产生的原因主要有以下 3 个方面: ①从构造上看, 由于 U 肋腹板倾斜, 桥面板与 U 肋在焊接时会出现缝隙 (日本规范允许是 2 mm), 容易造成连接缺陷 (图 7 的位置 1); ②从焊接工艺上看, 桥面板与 U 肋在焊接时一半采用半熔透角焊缝, 焊接时温度很高, 焊接完成后会产生焊接残余应力; ③从受力状态上看, 在车辆荷载作用下, 桥面板产生竖向变形, 桥面板与 U 肋之间将产生相对转角, 导致图 7 中 2 的位置的焊缝根部因为受拉产生裂缝, 裂缝向上延伸, 一直贯穿整个桥面板。

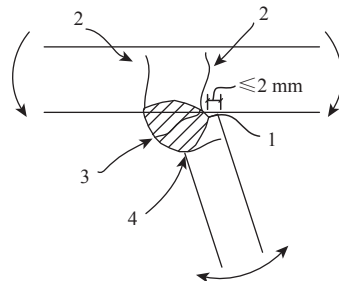


图7 桥面板与U肋疲劳裂纹示意图
Fig.7 Schematic diagram of cracks between
deck and U rib

II 类裂缝形成原因可以从平面内和平面外 2 个方面分别讨论：①实桥中的 U 肋内部未设置小横隔，在车辆荷载作用下，U 肋会产生相对于横隔板的偏心转动（图 8）。在图 8 中 3 的位置会因为弯矩作用而受拉，容易造成竖向焊缝的焊趾裂纹；②在活荷载的作用下，主体桥梁将产生变形，带动纵横桥面系产生纵向变形，由于纵向的 U 肋与横隔板的刚度不一样，会出现变形不协调将在纵横 2 种产生除了竖向的弯曲的作用以外的次应力，形成共同作用，对 II 类裂缝产生更大的影响^[3]。

III 类裂缝成因分析: 横隔板的开裂除了由于车辆活载的作用引起 U 肋的偏转使过焊孔处横隔板受拉外, 还有该实体桥本身的一些构造上的缺陷。例如: ①横隔板的厚度过薄 (10 mm) 母材本身不足以承受如此大的弯矩作用; ②该实桥的横隔板采用拼接式, 这样更容易造成偏心受力; ③该实桥 U 肋下方的过焊孔采用的是圆弧形, 更容易造成图 8 中 4

处的应力集中^[4]。

IV 类裂缝的成因可以从受力状态和施工工艺缺陷两方面进行分析：①纵向 U 肋主要起到梁的作用，U 肋在车辆荷载作用下，会产生 U 肋的竖向变形，在纵向 U 肋上产生了纵向弯矩，嵌补段的竖向裂纹主要由于弯矩产生的循环主应力引起的^[5]；②嵌补段的对接焊采用是仰焊缝，焊接质量不容易保证，容易出现焊接缺陷，造成受力的薄弱区。综合上述 2 个方面原因，造成了嵌补段对接焊缝处疲劳裂纹的出现（图 9）。

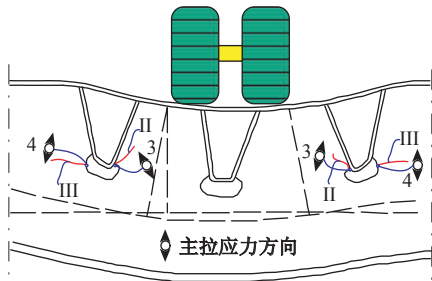


图 8 II、III 类裂缝受力示意图

Fig. 8 Schematic diagram of forces that type II and type III cracks burden



图 9 实体桥嵌补段裂缝

Fig. 9 Schematic diagram of cracks in inlaying section of real bridge

通过对该实桥的疲劳裂纹数量进行统计可以看出：I~IV 类裂缝所占的比例分别约为：2%、88%，9%和 1%。II 类裂纹占据了钢箱梁疲劳裂纹的绝大多数，II 类裂纹数量虽然众多，但裂纹发展相对较轻，绝大多数裂纹仅表现为表面的微细裂纹；需要引起足够重视的是 I 类和 III 类裂纹，尤其是 III 类裂纹，其发展速率很快，大约以每年 3~4 cm 的长度延伸，设置圆形止裂孔并不能阻止其裂纹的发展；该桥于 2009 年对 I 类裂纹进行了维修，目前尚未发现有进一步发展趋势。

3.2 桥面板设计方法

目前我国公路桥梁尚未有针对正交异性钢桥面板的相关设计规范，对钢箱梁的设计仍然以参考欧美以及日本等国规范为主。为更加深刻了解钢箱梁构造连接方式及疲劳裂纹的发展原因，下面将从 3 个方面介绍各国规范对正交异性钢桥面板的规定。

(1) 桥面顶板厚度的设计规定

桥面顶板的厚度直接影响到正交异性钢桥面板的竖向刚度，目前正交异性桥面板的厚度计算公式常采用的是：

$$d \geq 0.004a)(\sqrt[3]{p})^{[5]},$$

式中， a 为相邻纵向开口或闭口肋的最大间距； p 为轮载面压力。

我国早期桥梁修建多采用 12 mm 和 14 mm 厚度顶板，均出现了不同程度的开裂现象，类似问题在国外钢箱梁桥中同样出现，因此各国规范对桥面板厚度均有一套较为严格的规定。各国规范根据自己国家的车辆荷载情况，给出了桥面顶板厚度的建议值如表 1 所示。

表 1 各国规范关于桥面顶板厚度的规定^[5]

Tab. 1 Provisions of thickness of deckplate in different countries	
规范	桥面板厚度 t 规定
AASHTO (2004)	顶板的厚度不得小于 14 mm 或 $4\% \times a$
日本道桥示方书 (2002)	车行道范围内： $t \geq 3.7\% \times a$ (A 类活载)； $d \geq 3.75\% \times a$ (B 类活载)，且 $t \geq 12$ mm； 人行道范围内： $t \geq 2.5\% \times a$ (A 类活载)，且 $t \geq 12$ mm
Euro code 3 (2006)	车行道范围内：当沥青铺装层厚度不小于 70 mm 时， $t \geq 14$ mm；当沥青铺装层厚度不小于 40 mm 时， $t \geq 16$ mm； a 和 t 的比值： $a/t \leq 25$ ，推荐 $a \leq 300$ mm； 人行道范围内或人行桥中： $t \geq 10$ mm， $a/t \leq 40$ ，且 $a \leq 600$ mm。

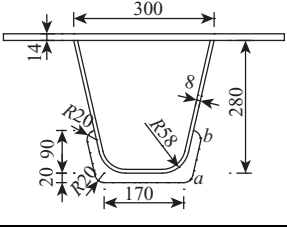
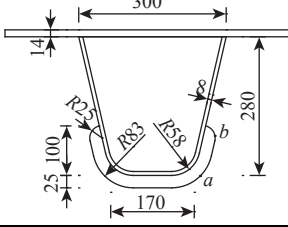
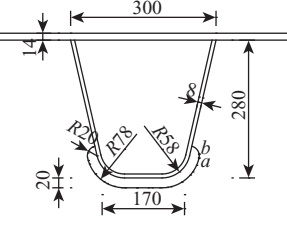
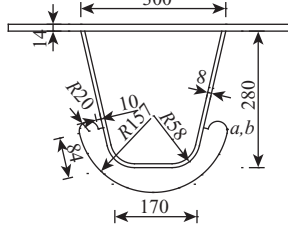
注： a 为相邻纵向开口或闭口肋的最大间距。

(2) 纵向 U 肋的设计规定

为避免冷弯塑性变形对韧性的过大影响，欧洲及美国规范规定：U 肋内侧半径 $R \geq 4d$ ，日本规范规定：U 肋内侧半径 $R \geq 5d$ (d 为纵肋厚度)^[5]。

此外，国外的规范对于相邻纵向 U 肋的间距一般取为 300~320 mm；纵向 U 肋通过横隔板时的过焊孔形式主要采用的是圆形切孔，各国规定推荐的过焊孔构造形式如表 2 所示。

表 2 各国规范关于横隔板过焊孔形状尺寸的规定（单位：mm）

Tab. 2 Provisions of shape and size of welding for diaphragm in different countries (unit: mm)	
EC3 ^[6] 推荐公路桥孔型	AASHTO ^[7] 推荐孔型
	
日本规范 ^[4] 推荐孔型	EC3 ^[6] 推荐铁路桥孔型
	

(3) 横隔板的设计规定

横隔板间距和厚度是一项非常重要的设计参数，Eurocode3 对横隔板间距的规定一般取 2.5 ~ 3.5 m，横隔板的厚度 ≥ 10 mm，纵向 U 肋高度与横隔板的高度之比 ≤ 0.4 ^[8]。

4 裂纹控制措施

我国第一批修建的大跨径钢箱梁桥运行至今近 20 a，这些早期修建的钢桥实际运营荷载较原设计条件已经发生很大的变化。通过对既有钢桥已发现的疲劳裂纹进行深入研究^[9-10]，工程设计人员也不断总结经验，提出一系列正交异性钢桥面板抗疲劳性能改善措施，主要表现在以下几个方面：

(1) 桥面板厚度加大，横隔板间距减小。

早期桥面板的设计中，桥面板厚度主要采用 12 mm，如虎门大桥、江阴大桥和海沧桥；随后增加至 14 mm，如润扬长江大桥，西堠门大桥；随后又增加至 16 mm，如金门大桥、嘉绍大桥。目前，桥面顶板厚度的选择一般为 16 mm，有些重车道的桥面顶板设计厚度为 18 mm。

另外，早期修建的钢箱梁桥横隔板纵向间距偏大，3 ~ 4 m 一道。随着对桥面板受力特性的认识不断深入，目前已建或者在建钢桥相邻横隔板的间距一般取为 2.5 ~ 3.5 m，且通常会在相邻的 2 个横隔板之间增设一道小横隔板。

(2) 改进 U 肋与桥面板的焊接工艺。

正交异性钢桥面板的构造复杂，连接较多，承受车辆荷载的反复作用，以及桥面板自身的缺陷以及设计时对于桥面板工作机理的认识不深透，导致了桥面板容易受到疲劳损伤^[11]。

U 肋与桥面板的焊接主要是采用单边的不完全熔透角焊缝，容易产生残余应力^[12-13]，对该细节的疲劳寿命产生很大的影响。目前主要是通过以下 3 个方面来改进 U 肋与桥面板的焊接工艺：①通过埋弧自动焊来代替人工焊；②通过超声冲击来减小焊接带来的残余应力；③严格控制焊缝达到规范要求。

(3) 在 U 肋的内部设置小内横隔。

由于 U 肋穿过横隔板时，横隔板需要开口。在承受车轮荷载时，容易在 U 肋与横隔板的焊缝连接处出现应力集中现象。为了减小切割横隔板带来的损害，以及防止纵向 U 肋的桥面板发生变形，在焊接前，将一块钢板放在对应横隔板平面 U 肋内，增加其整体性，减小疲劳损伤，如图 10 所示。

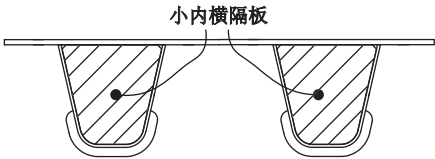


图 10 U 肋内的小内横隔板
Fig. 10 Liner in U rib

(4) 桥面顶板 U 肋嵌补段改用螺栓连接。

由于 U 肋的纵向长度受到施工工艺等的制约，通常采用逐段连接方式。早期的施工工艺是对 U 肋的嵌补段实行对缝焊接的连接方式，但是需要仰焊，会产生焊接缺陷，容易形成疲劳强度薄弱区。于是现在的施工工艺是在嵌补段的连接处使用螺栓连接，这样不会产生施工缺陷，同时螺栓的抗拉强度要比焊缝强，嵌补段承受拉力的能力会增强。

此外，桥面板的对接焊缝不使用永久性的钢垫板，焊缝表面不作机械加工，但需注意趾部无任何缺陷^[14]。

5 结语

本文以某钢箱梁悬索桥为工程背景，介绍了其正交异性钢桥面板疲劳裂纹的分布情况，重点分析各类疲劳裂纹的形成原因，同时对各国关于正交异性钢桥面板的设计规定进行了比较，总结提炼出改善正交异性钢桥面板抗疲劳性能的控制措施。通过本文研究，得到如下几点结论：

(1) 通过对某悬索桥的钢箱梁疲劳裂纹实地调

研究发现,Ⅱ类裂纹在各类裂纹数量中占据比重最大,数量多,分布范围广但长度较小;Ⅰ、Ⅲ类裂纹发展速度较快,在今后同类结构设计、施工及检测中应特别重视这两类裂纹的观察,及时采取措施。

(2) 超重车、交通量、桥面板焊接质量和构造细节是影响桥面板疲劳寿命的关键因素,在桥梁的设计及养护工作中时应从各自方面寻找主要矛盾,采取必要的措施提高或延长桥面板的疲劳寿命。

(3) 我国公路桥梁建设迫切需要一套完善的正交异性钢桥面板设计规范/规程,以吸收多年来的研究成果和工程实践经验。

(4) 本文提出的正交异性钢桥面板疲劳裂纹控制措施可供今后同类桥梁设计与施工参考。

参考文献:

References:

- [1] 周聪,顾萍.铁路正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹寿命估算[J].铁道学报,2012,34(1):97-102.
ZHOU Cong, GU Ping. Estimation of Fatigue Life of Typical Fatigue Cracks of Orthotropic Steel Decks of Railway Bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(1): 97-102.
- [2] 王春生,冯亚成.正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J].钢结构,2009,24(9):10-14.
WANG Chun-sheng, FENG Ya-cheng. Review of Fatigue Research for Orthotropic Steel Bridge Decks[J]. Steel Construction, 2009, 24(9): 10-14.
- [3] 张玉玲,辛学忠,刘晓光.对正交异性钢桥面板构造抗疲劳设计方法的分析[J].钢结构,2009,24(5):33-37.
ZHANG Yu-ling, XIN Xue-zhong, LIU Xiao-guang. Analysis on Fatigue Design Method of Orthotropic Floor Details in Steel Bridge[J]. Steel Construction, 2009, 24(5): 33-37.
- [4] 唐亮,黄李骥,刘高.正交异性钢桥面板横梁弧形切口周边应力分析[J].公路交通科技,2011,28(6):33-37.
TANG Liang, HUANG Li-ji, LIU Gao. FEA of Stress along Cope Hole Edge of Crossbeam in Orthotropic Steel Deck[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(6): 83-90.
- [5] 赵欣欣,刘晓光,张玉玲.正交异性钢桥面板设计参数和构造细节的疲劳研究进展[J].钢结构,2010,25(8):1-7.
ZHAO Xin-xin, LIU Xiao-guang, ZHANG Yu-ling. New Advance of Design Parameter and Structure Details of Orthotropic Deck[J]. Steel Construction, 2010, 25(8): 1-7.
- [6] EN 1993-2, Euro Code 3: Design of steel structures-Part 2: Steel Bridges[S].
- [7] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S]. 3rd ed. 2004.
- [8] 赵欣欣.正交异性钢桥面板疲劳设计参数和构造疲劳细节[D].北京:中国铁道科学研究院,2010.
ZHAO Xin-xin. Research on Fatigue Design Parameters and Structural Details for Orthotropic Deck[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2010.
- [9] 刘晓光.钢桥疲劳研究关键技术分析[J].钢结构,2007,22(4):7-9,43.
LIU Xiao-guang. The Key Technique Analysis on Fatigue Researches of Steel Bridge[J]. Steel Construction, 2007, 22(4): 7-9, 43.
- [10] 任伟平,李小珍,李俊,等.现代公路钢桥典型细节疲劳问题分析[J].公路,2007(4):83-87.
REN Wei-ping, LI Xiao-zhen, LI Jun, et al. Fatigue Problems of Some Typical Details in Modern Steel Highway Bridge Structures[J]. Highway, 2007(4): 83-87.
- [11] 冯亚成,王春生.正交异性钢桥面板纵肋与桥面板连接细节的疲劳评估及修复措施[J].钢结构,2011,26(2):27-30.
FENG Ya-cheng, WANG Chun-sheng. Fatigue Assessment and Repairing Measures of the Rib to Deck Connection in Orthotropic Steel Bridge Decks[J]. Steel Construction, 2011, 26(2): 27-30.
- [12] 余天庆,党志杰,陈勇,等.焊接残余应力对焊接构件疲劳性能的影响[J].桥梁建设,2000(2):4-6.
YU Tian-qing, DANG Zhi-jie, CHEN Yong, et al. Influences of Welding Residual Stress on Fatigue Performances of Welded Components[J]. Bridge Construction, 2000(2): 4-6.
- [13] 卞如冈,崔维成,万正权,等.焊接残余应力对疲劳寿命影响的定量研究[J].船舶力学,2011,15(7):776-783.
BIAN Ru-gang, CUI Wei-cheng, WAN Zheng-quan, et al. A Quantitative Study on the Effect of Welding Residual Stresses on Fatigue Life[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(7): 776-783.
- [14] 钱冬生.关于正交异性钢桥面板的疲劳[J].桥梁建设,1996(2):8-13.
QIAN Dong-sheng. On Fatigue of Steel Orthotropic Deck Structure[J]. Bridge Construction, 1996(2): 8-13.