DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.028

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

周细辉，黄坤

（南昌市城市规划设计研究总院，江西 南昌 330000）

摘要：针对钢桥面板纵肋对接焊缝中典型的疲劳开裂情况，为研究萌生于该处的疲劳裂纹在后期扩展过程中所表现的特征，以及根据其扩展机理采用在纵肋底板栓接钢板的加固效果的评估，利用Ansys软件建立了纵肋对接焊缝处的疲劳裂纹有限元模型，采用相互作用积分与有限元相结合的方法得到的裂纹前缘应力强度因子来对研究对象进行分析。结果表明：纵肋对接焊缝处疲劳裂纹的扩展过程中Ⅰ型应力强度因子K_{I}与等效应力强度因子K_{eff}之间数值差距很小，Ⅰ型（张开型）开裂模式在扩展过程中占主导地位；Ⅰ型应力强度因子K_{I}随着裂纹扩展尺寸的增加一直处于增大的趋势，由于应力强度因子是裂纹扩展速率的主要参量，疲劳裂纹扩展速率随着裂纹扩展的进行而逐渐增大；通过对纵肋底板栓接钢板加固措施的理论分析，该加固方法能够大幅改善纵肋对接焊缝疲劳裂纹前缘的应力强度因子，使疲劳裂纹的扩展得到有效控制。

关键词：正交异性钢桥面板；纵肋对接焊缝；断裂力学；疲劳开裂加固；应力强度因子

正交异性钢桥面板凭借其轻质高强、适用条件广、造型美观以及便于装配式施工等诸多优点，广泛应用于中国大、中跨径桥梁。此类结构在现代社会建设中的应用和发展已成为衡量国家工业设计和制造水平的重要考察指标。事物往往存在两面性，该类结构虽然存在上述多种优点，但是在后期多年来的使用过程中，工程界以及学术界均发现了其存在着不可忽视的一项缺陷——疲劳破坏。正交异性钢桥面板自问世以来，伴随着的疲劳问题就一直困扰着其在工程领域的表现。科研工作者们经过几十年的研究和探索，认识到

****

动调用平、纵、横数据，计算高程及各参数，计算放样坐标数据及工程量，并自动绘制锥坡图纸，其中包括变高围墙锥坡各控制点高程，结构尺寸、椭圆参数，围墙放样极坐标等。

此种改进的变高围墙锥坡已在吉林省内各条高速公路建设中广泛使用，有的高速已经建成通车（如京哈高速长平段改扩建工程、鹤大高速、长春至双辽高速等），并且取得了很好的效果，降低了工程造价，增加了整体美观程度。

5 结论

（1）采用新型变高围墙锥坡防护结构可以使桥梁整体更加美观、协调；有利于桥下排水，使水流顺畅，减少冲刷；可以减少混凝土用量，降低工程造价。

（2）采用编程开发出图，生成极坐标控制数据，有利于后期施工放样，降低施工难度。

（3）该文变高围墙锥坡形式也可应用于大中桥收坡脚、前坡设一定高度挡墙的桥梁中，可扩展应用范围较强。

参考文献：

[1] 叶鸿瀛.椭圆锥坡[M].北京：人民交通出版社，1981.

[2] 廖朝华.（公路桥涵设计手册）墩台与基础[M].北京：人民交通出版社，2013.

[3] 孙文圃，等.锥坡的解析计算[J].公路交通科技，2007(8).

[4] 同济大学数学系.高等数学[M].上、下册.北京：高等教育出版社，2007.

收稿日期：2018－10－12

基金项目：国家自然科学基金资助项目（编号：51578455）；南昌市规划院2017年资助项目（编号：Ky2017－29）

作者简介：周细辉，男，高级工程师.E－mail:519873478@qq.com

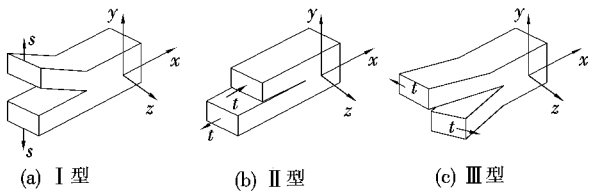
钢桥面板疲劳问题之所以不能得到有效的根治，根本原因在于针对此类结构形式中的疲劳裂纹的扩展机理没有深入和系统的认识。

由于正交异性钢桥面板的疲劳问题过于突出，行业内专家学者针对其展开了相关的改善及加固措施研究。20 世纪英国塞文桥纵肋端头连接横梁处出现疲劳开裂，采用的维修加固措施是于纵肋下缘与横梁上焊接钢板，然后用小锤敲击焊缝焊趾，以起到提高疲劳开裂细节处疲劳抗力的效果；Choi 等针对钢桥面板纵肋与横隔板连接处产生的疲劳裂纹，在其裂纹尖端引入止裂孔，但试验荷载循环次数仅 1.5 万次后在止裂孔边缘发现新的疲劳裂纹，试验结果显示设置止裂孔并非是一种抑制裂纹的有效措施；王春生等采用粘贴角钢方法对横隔板弧形开孔处疲劳开裂进行加固，通过实桥试验和理论分析确定其能有效降低疲劳易损细节处应力，并抑制裂纹的进一步扩展。既有研究对纵肋对接焊缝处出现的疲劳裂纹的扩展特性及快速加固措施两者之间系统分析的文献非常少，相关方面的研究不够详细和深入。该文通过建立某公路桥梁单 U 肋节段有限元模型，以纵肋对接焊缝部位作为研究对象，对其扩展特性展开研究。并且基于对纵肋对接焊缝处疲劳裂纹的开裂形式特征的认识，采取相应的装配式快速加固措施，并对其加固效果进行评估。

1　线弹性断裂力学基础

1.1　裂纹扩展类型

根据文献[7]中的相关介绍，材料中存在的开裂形式经归纳总结可分为主要的 3 类：Ⅰ型（张开型）、Ⅱ型（滑开型）和Ⅲ型（撕开型），如图 1 所示。



(a) Ⅰ型　(b) Ⅱ型　(c) Ⅲ型

图 1　开裂形式

多种裂纹扩展模式中，最危险的模式是Ⅰ型疲劳开裂，原因在于其容易导致低应力脆断现象。

1.2　裂纹扩展判定标准

在线弹性断裂力学中，通常采用等效应力强度因子 K_{eff} 进行评判裂纹前缘特征，BS 7910 中推荐的计算公式为：

$$K_{\mathrm{eff}}=\sqrt{K_{\mathrm{Ⅰ}}^2+K_{\mathrm{Ⅱ}}^2+\frac{K_{\mathrm{Ⅲ}}^2}{1-\nu}} \tag{1}$$

式中：$K_{\mathrm{Ⅰ}}$、$K_{\mathrm{Ⅱ}}$、$K_{\mathrm{Ⅲ}}$ 分别为Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型 3 种开裂模式对应的裂纹应力强度因子；ν 为材料泊松比。

线弹性断裂力学中裂纹是否扩展主要是根据 LEFM 的应力强度因子准则，裂纹扩展判据为：

$$K_{\mathrm{eff}}\geqslant K_{\mathrm{th}} \tag{2}$$

式中：K_{th} 为材料疲劳裂纹应力强度因子扩展阈值。

根据目前线弹性断裂力学中研究结果，只有当裂纹前缘的等效应力强度因子 K_{eff} 大于材料的疲劳开裂应力强度因子阈值 K_{th} 时，裂纹将继续扩展。参考 BS 7910，纵肋对接焊缝细节处出现的疲劳裂纹位于焊接影响区域，因此该文研究对象的疲劳裂纹应力强度因子扩展阈值取推荐值 $K_{\mathrm{th}}=63\ \mathrm{MPa}\cdot\ \mathrm{mm}^{1/2}$。

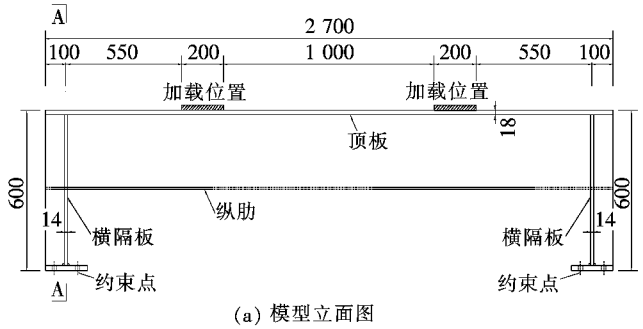
2　纵肋对接焊缝疲劳裂纹扩展特性研究

2.1　有限元模型的建立

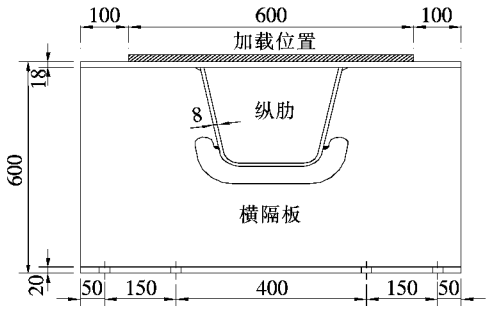
根据国内外学者已有的针对钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳性能研究成果，可以使用单个 U 肋段模型分析该细节处的疲劳裂纹。因此，采用 Ansys 软件建立了某公路大桥钢桥面板单 U 肋节段数值模型。有限元模型当中的约束条件参照文献[10]中对应的足尺疲劳试验中对应试件模型实际的边界条件进行处理，有限元模型中下翼缘对应部分的节点群的自由度进行全约束处理，该种计算模型的约束方法通过了相关试验以及文献[13]的检验和验证。有限元模型顺桥向取 2 个横隔板，横桥向包含 1 个纵肋，模型长2 700 mm，其中两端横隔板间距2 500 mm，顶板宽 800 mm，模型高 600 mm；U 肋尺寸为 300 mm×280 mm×8 mm，顶板厚度为 18 mm，两边横隔板厚度为 14 mm，横隔板下翼缘厚度为 20 mm。模型与加载方案示意如图 2 所示。

有限元模型中关于钢材的弹性模量设为 210 GPa，泊松比取 0.3。在纵肋对接焊缝部位建立含裂纹的子模型，纵肋对接焊缝设置位置参照文献[12]定于节段模型 U 肋底板的中间部位，其具体的尺寸参数参考文献[2]确定，此处不再赘述。有限元模型见图 3。

根据目前学者们关于钢桥面板受力性能的研究分析成果，车辆荷载的作用影响线较短，呈现出非常明显的局部效应。因此，对于该模型中的加载可考虑为单侧加载。



(a) 模型立面图



(b) A-A 截面

图 2 模型及加载方案示意图(单位：mm)

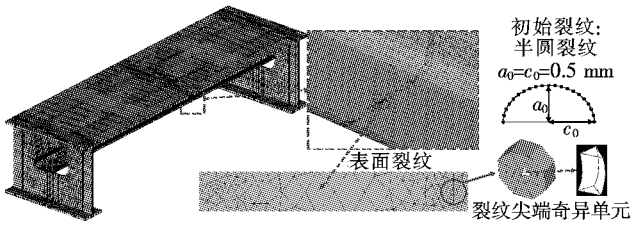


图 3 有限元模型

计算模型中的加载车辆根据 JTG D60－2015《公路桥涵设计通用规范》采用 480 kN 标准单车疲劳模型，车轮着地面积为 200 mm×600 mm，如图 4 所示。该文的有限元模型中所施加的汽车荷载为两个车轮对称施加，具体布置方案如图 2 所示，单个轮载为 60 kN。

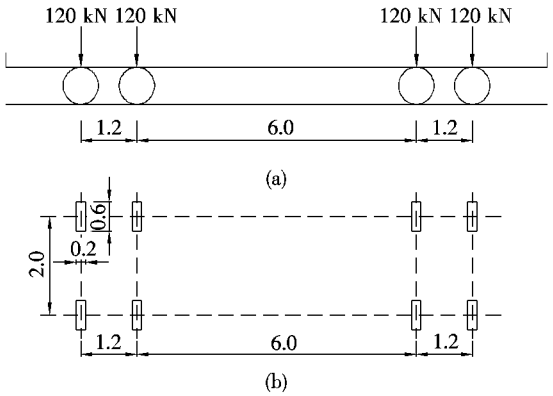


图 4 标准单车疲劳荷载计算模型(尺寸单位：m)

2.2 疲劳裂纹扩展特性分析

该文研究对象为单 U 肋节段模型，在对称轮载作用效应的影响下，纵肋对接焊缝处主要承受顺桥向的拉应力，相对应该细节处产生的疲劳裂纹表面长度为 60 mm，变形位移云图如图 5 所示。

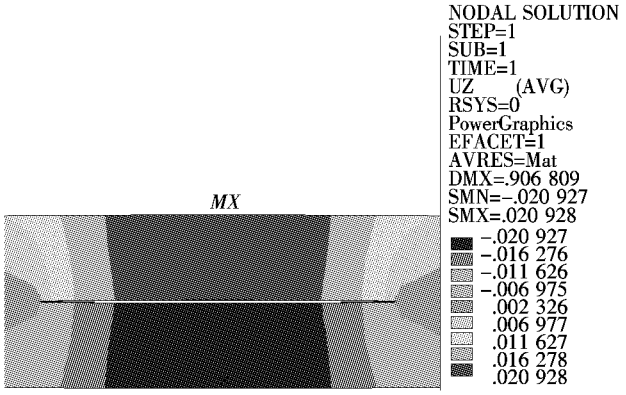


图 5 荷载作用下单 U 肋疲劳裂纹开裂位移云图(单位：m)

根据图 5 中纵肋对接焊缝处疲劳开裂在荷载作用下的位移变形情况可以大概了解到，该细节处疲劳裂纹表面主要呈张开状，裂纹上下表面分离，扩展中有明显的Ⅰ型(张开型)开裂模式占主导作用的趋势。

为了方便后续分析，此处首先需要定义疲劳裂纹前缘关注点，如图 6 所示，裂纹朝板件厚度方向上扩展时该方向裂纹前缘关注点设为 B 点，裂纹沿纵肋底板表面扩展时裂纹前缘在构件表面的关注点设为 A 点。根据文献[11]中关于纵肋对接焊缝处疲劳裂纹前缘应力强度因子的初步分析，表明该处 A 点的应力强度因子在整个裂纹扩展过程中均要大于 B 点处。因此，该文后续的研究分析工作中主要以 A 点作为关注点。

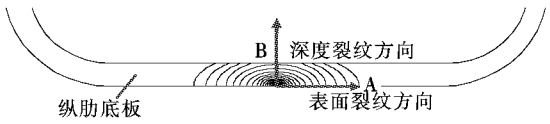


图 6 裂纹前缘关注点示意图

实际钢桥面板结构在使用过程中，随着服役年限的增长，相对应的桥面上荷载作用次数随之增加，其中存在的疲劳裂纹也将发生扩展。因此，需要对疲劳裂纹由初始裂纹直至扩展至一定尺寸的过程中疲劳裂纹前缘应力强度因子 K 进行统计分析，并基于该数据对研究对象——纵肋对接焊缝处疲劳裂纹扩展特性进行研究。疲劳裂纹前缘 A 点对应的三类应力强度因子 K_{I}、K_{II}、K_{III} 以及根据式(1)计算得出的 K_{eff} 在裂纹扩展过程中的变化过程，如图 7 所示。

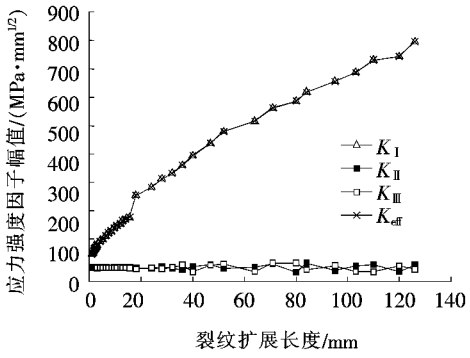


图 7　应力强度因子随裂纹扩展长度变化关系图

由图 7 可知：

(1) 张开型断裂Ⅰ型应力强度因子 K_{I} 与复合型断裂等效应力强度因子 K_{eff} 均随着裂纹扩展长度发展而增大，并且整个过程中二者之间数值的差别很小，表明纵肋对接焊缝处疲劳开裂以Ⅰ型(张开型)为主，与图 5 中开裂形态得出的结论一致。

(2) 滑开型断裂和撕开型断裂对应的应力强度因子 K_{II}、K_{III} 在疲劳裂纹整个扩展过程中一直处于数值 0 的附近，与Ⅰ型应力强度因子 K_{I} 的数值相比而言基本可以忽略不计，表明该细节处疲劳裂纹的扩展没有由单一的Ⅰ型(张开型)开裂方式向复合型开裂扩展模式发展的趋势。

(3) 将应力强度因子与裂纹扩展速率之间建立相应的联系，通过对图 7 进行分析，应力强度因子 K_{I} 和 K_{eff} 一直表现为增长的趋势，表明该细节处疲劳裂纹扩展速率会随着裂纹扩展的进行而逐渐增大，对结构的不良影响也会越来越大。

3　基于断裂力学的加固结构疲劳性能分析

3.1　装配式加固方案

传统的修复方式以机械修复和热修复为主。传统修复方式通常施工工艺复杂，同时又容易引入新的缺陷(如焊接)，加固效果难以保证。

基于前文针对纵肋对接焊缝处产生的疲劳裂纹扩展特性的研究和认识，该细节处疲劳裂纹通常受拉压应力作用，呈现的表现形式为张开型扩展模式。因此，应当在安全有效，便于施工，不引入新的材料缺陷等加固原则的基础上，对该类型的疲劳裂纹开裂模式进行加固。经过研究和分析，对纵肋对接焊缝处疲劳开裂采取装配式栓接钢板加固方法进行加固，如图 8 所示。

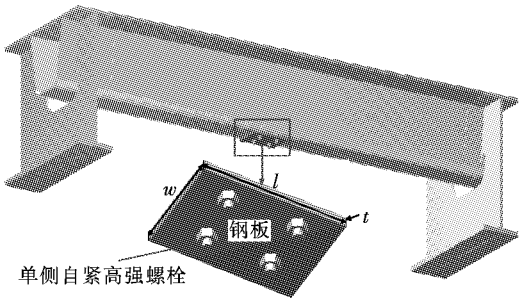


图 8　栓接钢板加固方法

为了避免在原结构中引入新的疲劳缺陷，同时又能够将钢板紧密有效地与原结构连接在一起协同受力，该加固过程中不采用焊接和在纵肋底板位置开手孔的方法，而是采用单侧自紧高强螺栓进行连接，该类螺栓如图 9 所示。该类单侧自紧螺栓的具体施工方法可以参照文献[14]。

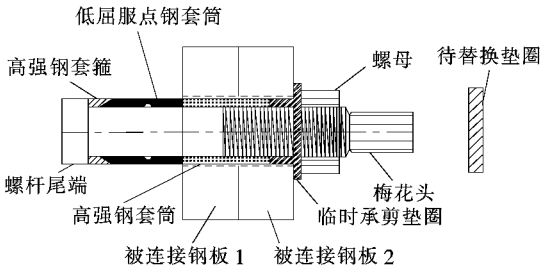


图 9　单侧自紧螺栓构造设计图

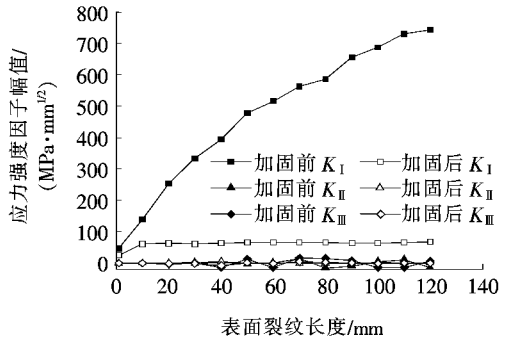
3.2　加固效果评估

在有限元模型中可以近似将钢板与原结构之间分别建立接触单元 Conta174 和目标单元 Targe170，然后通过多点约束方程(MPC)进行连接，使两者达到类似于固结的状态。

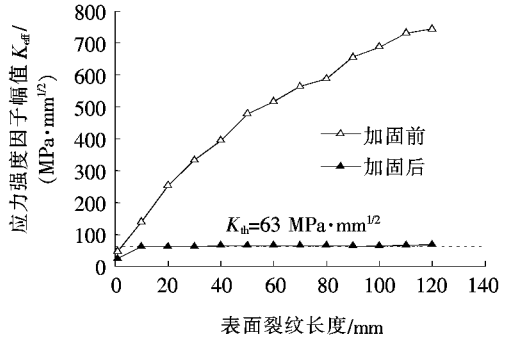
针对钢桥面板纵肋对接焊缝处疲劳开裂情况采用栓接钢板的装配式加固方法进行研究，此处所采用的钢板的尺寸为：厚度 t 取 12 mm，长度 l 定为 200 mm，宽度 w 则与纵肋底部宽 130 mm 保持一致。裂纹长度由初始裂纹 1 mm 直至表面扩展至 120 mm 过程中 13 个阶段加固前后应力强度因子数据具体变化如图 10 所示。

由图 10 可知：

(1) 栓接钢板加固方式对Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型应力强度因子 K_{I}、K_{II}、K_{III} 的改善作用非常明显，其中Ⅰ型开裂在扩展过程中占主导作用，采用该加固方式后 K_{I} 降幅最大达到了 90%以上。对于其余两类应力强度因子 K_{II}、K_{III}，加固前数值非常小，加固之后仍保持很小，表明该加固方式能够有效改善原本的Ⅰ型(张开



(a) 三类应力强度因子加固前后变化



(b) 等效应力强度因子加固前后变化

图 10 栓接钢板加固前后应力强度因子变化情况

型)开裂模式,并且不会加剧其他类型开裂模式的产生。

(2) 疲劳裂纹前缘等效应力强度因子 K_{eff} 在加固之后出现非常明显的下降趋势,降幅最高达 90%左右。其中值得关注的是,加固之后的疲劳裂纹尖端的等效应力强度因子 K_{eff} 基本都保持在疲劳裂纹扩展阈值 K_{th}(63 MPa·mm$^{1/2}$)以下,表明采用在纵肋底板外侧栓接钢板的加固方法在理论上能够有效抑制纵肋对接焊缝处疲劳裂纹的进一步扩展。

4 结论

(1) 纵肋对接焊缝处产生的疲劳裂纹扩展过程中,Ⅰ型应力强度因子 K_{I} 与复合裂纹等效应力强度因子 K_{eff} 相差很小,表明Ⅰ型(张开型)开裂模式在研究对象部位扩展过程中占主导地位。

(2) 根据研究结果,该文研究对象处产生的疲劳裂纹,应力强度因子会随着裂纹扩展的不断进行而一直处在增长趋势中,表明该细节处疲劳裂纹扩展速率会随着裂纹扩展的进行而逐渐增大,对结构的不良影响也会越来越大。

(3) 通过在纵肋底板栓接钢板的装配式加固措施的理论分析,该加固方法能够有效将裂纹前缘的应力强度因子大幅降低,抑制疲劳裂纹的进一步扩展。

(4) 该文中针对纵肋对接焊缝处疲劳性能以及加固效果的研究是基于裂纹前缘的应力强度因子,裂纹尖端相对于结构整体性能而言具有一定的局限性。结合实际桥梁结构荷载谱等资料,对于纵肋对接焊缝处产生的疲劳开裂情况采取加固处理措施从结构体系剩余寿命角度对加固效果进行评估是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] 张清华,卜一之,李乔.正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J].中国公路学报,2017(3).

[2] 刘益铭,张清华,崔闯,等.正交异性钢桥面板三维疲劳裂纹扩展数值模拟方法[J].中国公路学报,2016(7).

[3] 朱伟,吉伯海,傅中秋.轮迹位置对钢桥面板 U 肋对接焊缝疲劳性能的影响[J].广西大学学报,2015(4).

[4] 钱冬生.关于正交异性钢桥面板的疲劳——对英国在加固其塞文桥渡时所作研究的评价[J].桥梁建设,1996(2).

[5] Choi J H, Kim D H. Stress Characteristics and Fatigue Crack Behavior of the Longitudinal Rib-to-Cross Beam Joints in an Orthotropic Steel Deck[J]. Advances in Structural Engineering, 2008, 11(2): 189-198.

[6] 王春生,翟慕赛,HOUANKPO T N O,等.正交异性钢桥面板冷维护技术及评价方法[J].中国公路学报,2016(8).

[7] 张行,崔德渝,孟庆春,等.断裂与损伤力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.

[8] 土木学会鋼構造委員会.厚板溶接継手に関する調査研究小委員会報告書[R],2007.

[9] BS 7910: 2005 Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures[S].

[10] 孟凡超,张清华,谢红兵,等.抗疲劳钢桥面板关键技术[M].北京:人民交通出版社,2015.

[11] 杨绍林,卜一之,崔闯,等.U 肋对接焊缝三维疲劳裂纹应力强度因子分析[J].桥梁建设,2015(5).

[12] 孟凡超,卜一之,李军平,等.连续钢箱梁正交异性钢桥面板抗疲劳性能关键技术——小试件模型试验研究报告[R],2012.

[13] 刘益铭,张清华,张鹏,等.港珠澳大桥正交异性钢桥面板 U 肋对接焊缝疲劳寿命研究[J].中国公路学报,2016(12).

[14] 刘飞.单面螺栓连接及装配式钢结构节点理论与试验研究[D].东南大学硕士学位论文,2015.