

# 正交异性钢桥面板纵肋与顶板焊接细节 疲劳性能评估

龚代勋, 肖虎, 李佳, 张安宇  
(四川蜀道高速公路集团有限公司, 四川 成都 610095)

**摘要:** 钢桥面板中纵肋与顶板连接部位为最严重的疲劳控制细节之一。依靠双面焊新型焊接技术能有效避免传统单面焊焊根位置处“类裂纹”缺陷,从而达到提高连接焊缝疲劳抗力、改变疲劳开裂控制模式的目的。为评估纵肋与顶板双面焊疲劳抗力和疲劳寿命,对焊趾、焊根位置疲劳性能评估创新性地选用了等效结构应力法。研究表明:焊趾、焊根处的疲劳抗力性能可以通过等效结构应力法进行有效评估,同时具有网格不敏感性、计算效率高等系列优点;与传统单面焊相比,采用双面焊技术时外侧顶板焊趾已取代焊根位置作为疲劳开裂控制部位,其疲劳性能更加优异。

**关键词:** 钢桥面板;纵肋与顶板连接细节;新型双面焊连接细节;疲劳性能;等效结构应力法;主S-N曲线  
**中图分类号:** U441+.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2025)05-0087-05

## Evaluation on Welding Detail Fatigue Performance of Longitudinal Rib and Roof of Orthotropic Steel Bridge Deck

GONG Daixun, XIAO Hu, LI Jia, ZHANG Anyu  
(Sichuan Shudao Expressway Group Co., Ltd., Chengdu 610095, China)

**Abstract:** The junction of longitudinal rib and roof in steel bridge deck is one of the most serious fatigue control details. The use of new double-sided welding technology can effectively avoid the “crack like” defect in the traditional single-sided welding root position so as to achieve the purpose of improving the fatigue resistance of joint welds and changing the fatigue cracking control mode. To assess the double-side welding fatigue resistance and fatigue life of longitudinal rib and roof, the equivalent structural stress method is innovatively chosen to assess the fatigue performances at the position of welding toe and welding root. The results show that the equivalent structure stress method can be used to effectively assess the fatigue resistance at the position of welding toe and welding root, and has the advantages of grid insensitivity, high computational efficiency. Compared with the traditional single-sided welding, when the double-sided welding technology is adopted, the welding toe of the outer roof has replaced the welding root as the control part of fatigue cracking. Its fatigue performances are more excellent.

**Keywords:** steel bridge deck; connecting details of longitudinal rib and roof; new double-sided welding connecting details; fatigue performances; equivalent structural stress method; main S-N curve

### 0 引言

正交异性钢桥面板具有强度高、质量轻等优点,在世界范围内得到了广泛运用,其中纵肋与顶板连接焊缝是疲劳问题最为严重的细节之一。疲劳开裂模式主要有焊根、焊趾为裂纹源的4种开裂模式<sup>[1-2]</sup>,见图1。该部位疲劳裂纹被发现时,一般已经沿着厚度方向几乎贯穿顶板,沿着长度方向也扩展较长,这

将直接导致钢桥面板局部刚度降低,进而造成铺装层开裂、桥面渗漏和钢箱梁腐蚀等一系列破坏效应。目前对于纵肋与顶板连接焊缝疲劳开裂问题并无可靠的加固方法,因而极大制约了钢桥面板的推广和应用。

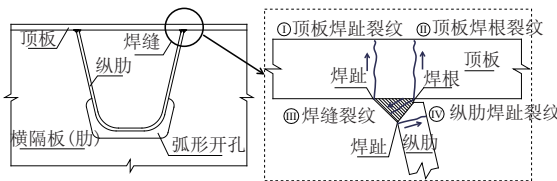


图1 纵肋与顶板连接焊缝典型开裂模式

为了提升纵肋与顶板连接焊缝疲劳抗力性能,各国研究者开展了大量工作。田洋等<sup>[3-5]</sup>研究发现,

收稿日期: 2024-01-30

作者简介: 龚代勋(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁与隧道工程设计工作。

通过控制焊喉深度、焊缝熔透率可以改变第Ⅲ和第Ⅳ类疲劳开裂模式。文献[1,3-8]提出了镡边U肋构造形式、大焊脚焊缝构造形式、双面焊等3种新型构造细节。其中:镡边U肋构造形式和大焊脚焊缝构造形式均期望通过优化局部构造来提升纵肋与顶板连接焊缝的疲劳性能,但这2种构造形式并不能避免焊根位置处“类裂纹”构造,焊根疲劳开裂仍困扰着正交异性钢桥面板的正常使用;采用双面焊技术则有望消除焊根位置处“类裂纹”构造,从而有效控制焊根位置疲劳开裂,进一步提高其疲劳性能。

目前通常使用名义应力法、热点应力法进行疲劳抗力评估<sup>[6]</sup>。采用名义应力法进行评估时,需要对焊接接头进行分类,并且对于名义应力的定义也存在争议,这导致了评估结果具有一定的离散性;热点应力法一般依托线性外推的方法开展计算,并且具有较强的网格敏感性。考虑到以上情况,本文拟采用等效结构应力法<sup>[9]</sup>进行纵肋与顶板连接焊缝的疲劳抗力评估和疲劳寿命计算,该方法具有网格不敏感性等优点,于2007年被纳入了ASME<sup>[10]</sup>标准中。

## 1 等效结构应力法基本原理

### 1.1 结构应力的定义

在焊趾等部位,应力沿着板厚方向非线性分布。可将焊趾等假想裂纹面处的正应力分解成非线性峰值应力 $\tau_m$ 、膜应力 $\sigma_m$ 、弯曲应力 $\sigma_b$ (见图2),则结构应力 $\sigma_s$ 应是 $\sigma_b$ 和 $\sigma_m$ 的合力。

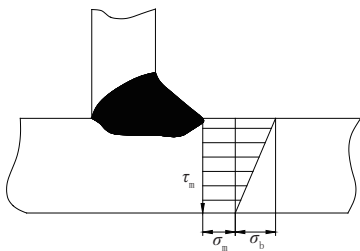


图2 结构应力组成

若已知假想裂纹面上线荷载 $f$ 、线弯矩 $m$ 和板厚 $t$ ,那么结构应力 $\sigma_s$ 可以表示为:

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = f/t + 6m/t^2 \quad (1)$$

### 1.2 等效结构应力的定义

等效结构应力是以结构应力 $\sigma_s$ 为控制参数来计算疲劳寿命的。转换方程为:

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{(2-m)/2m} \cdot I(r)^{1/m}} \quad (2)$$

式中: $\Delta S_s$ 为等效结构应力幅; $\Delta \sigma_s$ 为结构应力幅; $I(r)$ 为弯曲应力比 $r$ 的无量纲多项式函数; $m$ 取3.6。

疲劳寿命计算公式为:

$$N = \frac{C_d^{1/h}}{\Delta S_s^{1/h}} \quad (3)$$

式中: $N$ 为达到疲劳寿命的载荷循环次数; $C_d$ 和 $h$ 为试验常数,可以通过主 $S-N$ 曲线得到。

ASME(2007)标准整理的主 $S-N$ 曲线见图3。

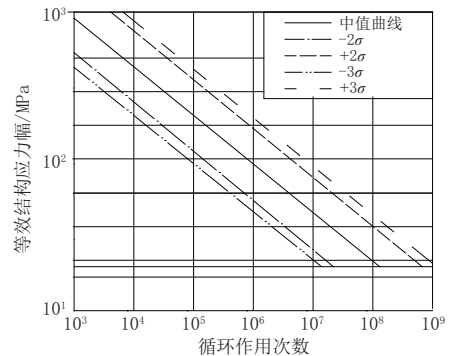


图3 主 $S-N$ 曲线

由图3可知,基于名义应力的 $S-N$ 曲线与主 $S-N$ 曲线形态上基本一致,但因主 $S-N$ 曲线中的等效结构应力幅考虑了多个综合因素的影响,因此主 $S-N$ 曲线对于任何类型的焊缝都是有效的。

### 1.3 主 $S-N$ 曲线

通过主 $S-N$ 曲线可以得到试验常数 $C_d$ 和 $h$ 。针对纵肋与顶板连接焊缝连接细节,考虑到材料属性不同以及构造细节的特殊性,为了更加准确地对钢桥面板进行疲劳抗力评估,提出具有更好适用性和针对性的主 $S-N$ 曲线常数,可通过参考国内相关试验数据进行分析归纳。

参考文献[11-15]中的相关试验数据,并将其转换为焊趾、焊根2种开裂模式下的等效结构应力幅数据(见图4、图5),最后采用线性拟合的方法将这些数据整理成适用于纵肋与顶板连接细节的回归曲线方程。回归方程表达式为:

$$\lg S = 4.369 - 0.293 \lg N \quad (4)$$

当标准差为0.137、保证率为93.7%时,将式(4)减去2个标准差的回归曲线下限为:

$$\lg S = 4.095 - 0.293 \lg N \quad (5)$$

计算时,试验常数 $h=-0.293$ 、 $C_d=12\ 445.15$ 。

由图4、图5可知,等效应力幅试验数据的分布与ASME推荐的主 $S-N$ 曲线高度吻合,说明主 $S-N$ 曲线和相关试验常数可以较好地运用于正交异性钢桥面板疲劳抗力评估当中。

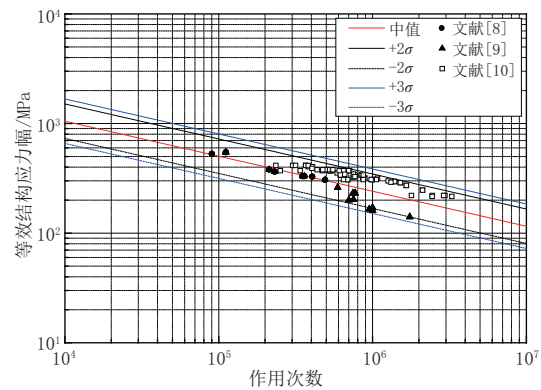


图4 焊趾开裂模式下相关试验数据(1)

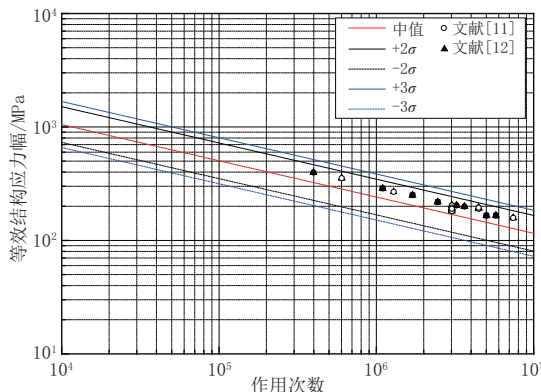


图5 焊趾开裂模式下相关试验数据(2)

2 参数分析

2.1 参数选取

典型双面焊连接细节见图6。  
研究表明:对于常规单面焊连接焊缝,纵肋腹板厚度 $t_1$ 、顶板厚度 $t_2$ 等局部构造参数会不同程度地影响纵肋与顶板连接焊缝的疲劳性能。基于此,本文拟重点考虑纵肋腹板厚度 $t_1$ 、顶板厚度 $t_2$ 和焊缝熔透率这3个参数来开展参数分析工作。其中 $t_1$ 、 $t_2$ 、焊缝

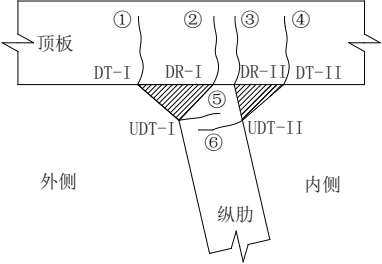


图6 纵肋与顶板双面焊典型开裂模式

熔透率分别取8 mm、16 mm、80%。

2.2 节段模型

节段有限元模型见图7。

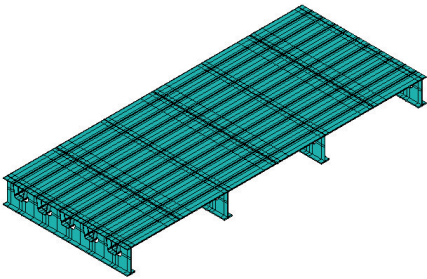


图7 节段有限元模型

节段模型包含4个横隔板和5个纵肋。模型全长、宽、高分别为7 500、2 600、500 mm。横隔板厚14 mm;纵肋腹板厚8 mm、顶板厚16 mm,纵肋上部开口宽300 mm、高280 mm、底缘宽200 mm。采用实体单元 SOLID45,其中泊松比取0.3、弹性模量取 $2.06 \times 10^5$  MPa。选用Eurocode 疲劳荷载模型 III 进行单轮加载,其中单轮轮重60 kN。

模型边界条件如下:(1)限制侧面顶板节点X位移;(2)限制单侧顶板和纵肋节点Y位移;(3)限制底部所有节点Z位移。

2.3 参数分析计算结果

参数分析计算结果见图8。

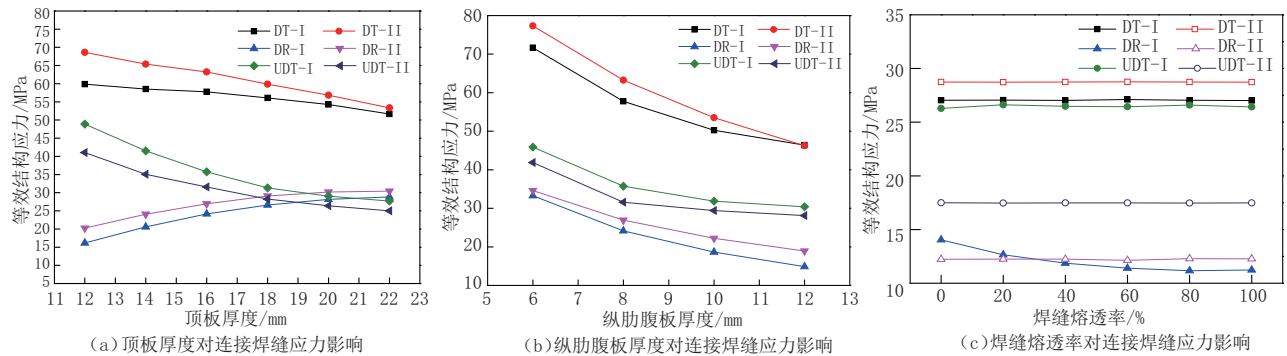


图8 参数分析计算结果

由图8(a)可见:随着顶板厚度的增加,顶板焊趾、腹板焊趾处等效结构应力呈现下降趋势;顶板焊根位置等效结构应力呈现上升趋势,考虑到该处不

作为疲劳开裂控制部位且等效结构应力幅相对较小,因此可不作重点考虑。

由图8(b)可见:随着纵肋腹板厚度的增加,顶板

焊趾、顶板焊根、纵肋腹板焊趾处等效结构应力呈现下降趋势。

由图8(c)可见:随着焊缝熔透率增加,DR-I处等效结构应力呈现下降趋势。综合考虑经济性等多重因素影响,推荐顶板厚度、纵肋腹板厚度、焊缝熔透率分别取16~18 mm、8 mm、70%~80%。

### 3 纵肋与顶板新型双面焊疲劳抗力评估

#### 3.1 节段模型

根据参数分析计算结果,选取纵肋与顶板新型双面焊节段模型相关构造参数为:纵肋腹板厚度8 mm、顶板厚度16 mm、焊缝熔透率80%,据此建立3跨5纵肋节段模型(见图7)。

采用Eurocode规定的疲劳荷载模型III进行加载,疲劳车辆为单车模型,四轴车,每轴重120 kN。

由于节段模型的尺寸有限,所以只考虑加载标准疲劳车辆的1个车轮,再通过影响线叠加的方式得到整个疲劳车辆的计算结果。

#### 3.2 疲劳寿命分析

在横桥向标准疲劳车辆作用下,各疲劳关注细节加载应力历程如图9所示,其中横坐标原点为横桥向中心点位置。在纵桥向最不利加载位置进行加载,得到的各疲劳关注细节加载应力历程如图10所示。计算结果表明,各疲劳关注细节对应的横桥向加载位置并不相同。在横桥向最不利加载位置进行纵向加载,可以确定当1辆标准疲劳车通过时所引起的结构应力幅值及其相对应的作用次数。其中通车量数据取文献[16]中港珠澳大桥的相关年份通车量,取值14万次。

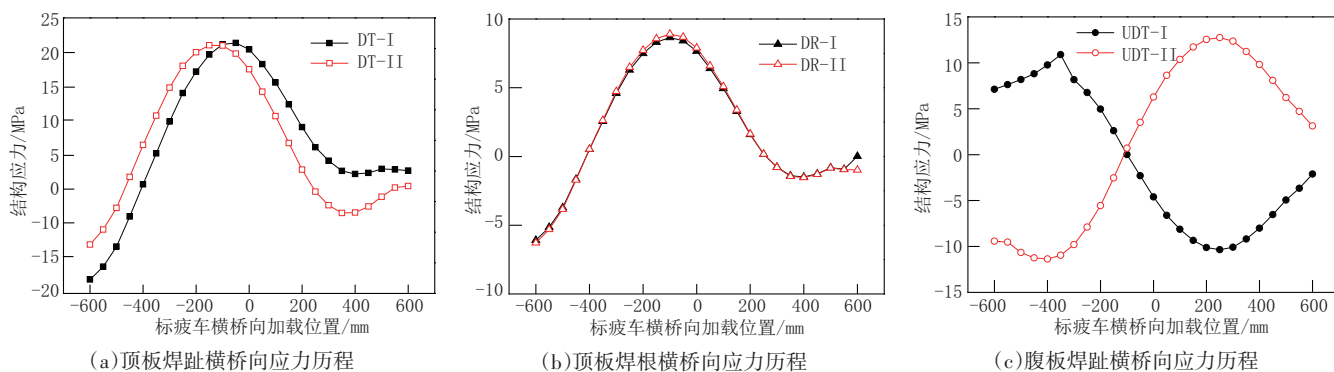


图9 纵肋与顶板双面焊连接疲劳易损部位横桥向应力历程

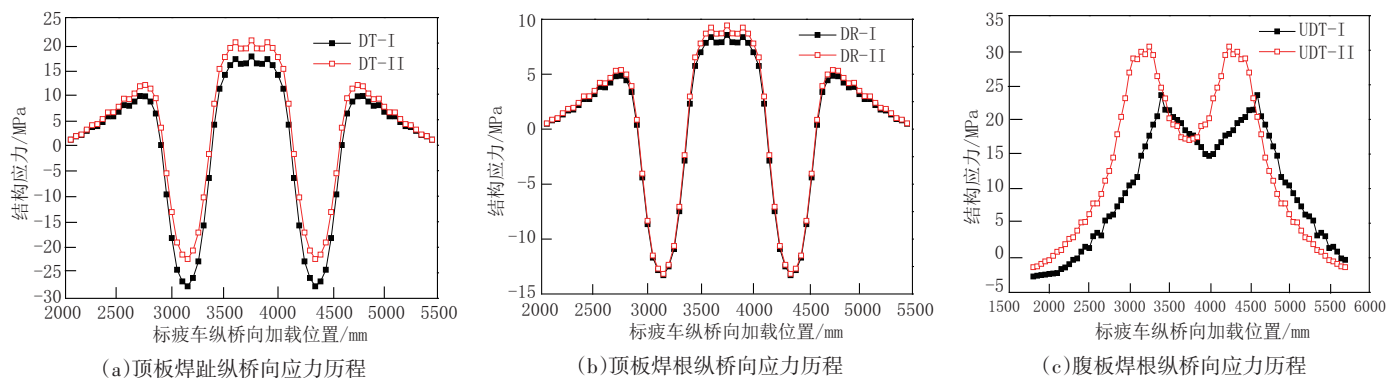


图10 纵肋与顶板双面焊连接疲劳易损部位纵桥向应力历程

#### 3.3 纵肋与顶板新型双面焊疲劳抗力分析结果

计算结果表明:DT-I处的疲劳寿命为109.3 a、DT-II为198.3 a;DR-I、DR-II、UDT-I、UDT-II处均大于200 a,如表1所示(表中损伤度为应力幅作用次数与常应力幅情况下循环试验作用次数的比值)。

由此可以看出,DT-I已成为疲劳开裂控制部位,同时也进一步说明采用新型双面焊可以改变疲劳开裂控制模式,全方位有效提高该细节疲劳抗力

性能。

表1 双面焊各疲劳易损部位损伤度和疲劳寿命

| 疲劳关注细节 |        | 损伤度      | 疲劳寿命/a |
|--------|--------|----------|--------|
| 顶板焊趾   | DT-I   | 0.009 15 | 109.3  |
|        | DT-II  | 0.005 04 | 198.3  |
| 顶板焊根   | DR-I   | 0.000 54 | >200   |
|        | DR-II  | 0.000 25 | >200   |
| 腹板焊趾   | UDT-I  | 0.000 52 | >200   |
|        | UDT-II | 0.001 08 | >200   |

3.4 单面焊对比分析

在同等条件下,对单面焊进行建模计算。可得到最不利荷载情况下单面焊疲劳关注细节应力历程,见图 11。单面焊各疲劳易损部位损伤度和疲劳寿命见表 2。

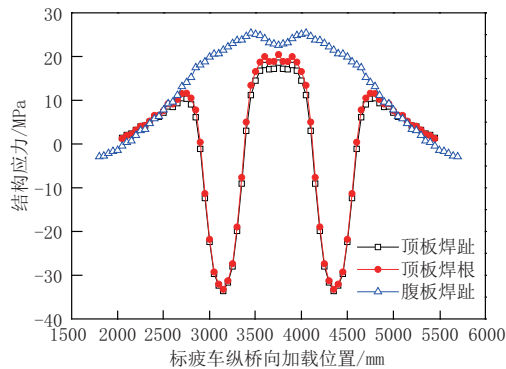


图 11 单面焊疲劳关注细节应力历程

表 2 单面焊各疲劳易损部位损伤度和疲劳寿命

| 疲劳关注细节 | 损伤度      | 疲劳寿命/a |
|--------|----------|--------|
| 顶板焊趾   | 0.010 59 | 94.4   |
| 顶板焊根   | 0.012 99 | 77.0   |
| 腹板焊趾   | 0.000 63 | >200   |

计算结果表明,在反复车辆荷载作用下,疲劳开裂控制部位为单面焊顶板焊根位置,其疲劳抗力性能要弱于双面焊。采用双面焊,可以将疲劳开裂控制部位从单面焊焊根位置转移到双面焊的外侧焊趾 DT-I 位置,并且整体疲劳寿命相较于单面焊提高了 41.95%。

4 结 语

(1)通过线性拟合,将国内外相关试验数据换算为等效结构应力幅,并通过计算整理出可以适用于钢桥面板的主  $S-N$  曲线、试验常数  $C_d$ (取值 12 445.15)和  $h$ (取值 -0.293)。

(2)利用等效结构应力法进行计算分析,结果表明双面焊连接细节中焊根位置不再作为疲劳开裂控制部位,疲劳开裂控制部位已转移到顶板外侧焊趾

DT-I 位置处。

(3)单面焊受焊根位置“类裂纹”构造影响,其抗疲劳性能较差。通过建模计算分析,发现双面焊各疲劳关注细节的疲劳抗力要优于传统单面焊。

参考文献:

[1] 曾志斌. 正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析[J]. 钢结构, 2011, 26(2): 9-15; 26.

[2] 龚代勋. 钢桥面板纵肋与顶板新型双面焊构造细节疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

[3] 田洋, 李运生, 张德莹, 等. 正交异性板 U 肋与桥面板焊缝连接的静力及疲劳试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(2): 34-39.

[4] KOLSTEIN M. H. Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks[D]. TU Delft: Delft University of Technology, 2007.

[5] LI M. Fatigue Evaluation of Rib-to-Deck Joint in Orthotropic Steel Bridge Decks[D]. Kyoto: Kyoto University, 2014.

[6] 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, 30(3): 14-30; 39.

[7] 梅大鹏, 廖贵星. 新型嵌边 U 肋与面板连接焊缝切口应力分析[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 65-70.

[8] 黄懋科. 新型嵌边 U 肋正交异性钢桥面板疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

[9] Dong P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(10): 865-876.

[10] The American Society of Mechanical Engineers. ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, Alternative Rules, Rules for Construction of Pressure Vessels[S]. 2007 Edition. New York, 2007.

[11] 赵欣欣. 正交异性钢桥面板疲劳设计参数和构造细节研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2011.

[12] 陈一馨, 吕彭民, 郭成军, 等. 钢桥面板 U 肋与盖板焊缝构造细节疲劳性能评估[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, (1): 49-55.

[13] OCEL J M, CROSS B, WRIGHT W J, et al. Optimization of Rib-to-Deck Welds for Steel Orthotropic Bridge Decks[R]. 2017.

[14] 张清华, 李乔, 李俊, 等. 青山大桥重载交通钢桥面构造试验研究专题报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2016.

[15] KAINUMA S, YANG M, JEONG Y S, et al. Experiment on fatigue behavior of rib-to-deck weld root in orthotropic steel decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 119(3): 113-122.

[16] 孟凡超, 张清华, 苏权科, 等. 正交异性钢桥面板抗疲劳关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.