

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.011

钢桥十字形焊接细节应力强度因子的参数敏感性研究*

廖平^{1,2}, 张秀成¹, 朱海峰¹, 许智强², 赵人达²

(1. 莆田学院土木工程学院, 福建莆田 351100; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031)

摘要: 焊接细节断裂参数与其疲劳裂纹扩展和疲劳性能直接相关, 为探讨几何参数和裂纹参数对应力强度因子的影响规律, 选取十字形焊接细节为研究对象。借助 ANSYS 软件建立了含半椭圆形裂纹的三维断裂力学模型, 基于位移法分析了应力强度因子, 讨论了几何参数(焊缝尺寸、板厚、对接焊缝参数)和裂纹参数(裂纹尺寸和裂纹形状比)对其的影响规律, 拟合了裂纹形状修正系数函数。研究表明:(1)应力强度因子随对接焊缝余高和腹板板厚的增大而逐渐减小, 而基本不受焊脚尺寸、翼缘板板厚和对接焊缝宽度的影响;(2)应力强度因子随裂纹形状比的增大而先增大后逐渐减小, 但是随裂纹尺寸的增长而逐渐增大;(3)裂纹形状比和裂纹尺寸对应力强度因子影响最为显著, 其影响幅度达 18.0%。

关键词: 钢桥; 十字形焊接细节; 断裂力学; 位移法; 应力强度因子; 裂纹形状修正系数

中图分类号: U441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0929-07

Parameter Sensitivity Study on Stress Intensity Factors of Cruciform Weld Details in Steel Bridges

LIAO Ping^{1,2}, ZHANG Xiucheng¹, ZHU Haifeng¹, XU Zhiqiang², ZHAO Renda²

(1. School of Civil Engineering, Putian University, Putian 351100, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The fracture parameters of the welded details are directly related to the fatigue crack propagation and fatigue performance. In order to investigate the influence of geometric parameters and crack parameters on the stress intensity factor, the cruciform weld detail was selected as the research object. A three-dimensional fracture mechanical model with a semi-elliptical crack was established by using ANSYS software. The stress intensity factor of each joint on the front edge of the crack was analyzed based on the displacement method. The influence of geometric parameters (including weld size, plate thickness, butt weld parameters) and crack parameters (including crack size and crack shape ratio) on the stress intensity factors was discussed, and the crack shape correction coefficient function was fitted. The results show that the stress intensity factor decreases with the increase of the butt weld reinforcement and web thickness, but has little relationship with the weld size, flange plate thickness and butt weld width. The stress intensity factor increases firstly and then decreases with the increase of the

* 收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2019-02-23

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2016J01253)、莆田学院引进人才科研启动费项目(2018075)资助

作者简介: 廖平(1989-), 男, 讲师, 博士。主要从事钢桥疲劳及桥梁抗震研究。Email: simafeiyun.xiao@163.com

crack shape ratio, but rises with the increase of the crack length. The crack shape ratio and crack length have the greatest influence on the stress intensity factor, and the influence amplitude is as high as 18.0%.

Keywords: steel bridge; cruciform weld detail; fracture mechanics; displacement method; stress intensity factor; crack shape correction coefficient

引言

在国内外大跨度桥梁建设中,由于受钢厂轧制能力等方面的限制,钢桥杆件连接过程中不可避免地存在一些对接焊缝细节^[1]。在疲劳循环荷载作用下,焊接细节的疲劳问题突出,因此国内外学者对其开展了大量的理论分析和试验研究,获得了许多有益的结论^[2-5]。断裂参数—应力强度因子与疲劳裂纹扩展直接相关,研究其断裂参数及其影响因素对疲劳裂纹控制和疲劳裂纹扩展寿命预测具有十分重要的意义。

由于施焊质量等原因,对接焊缝细节焊缝处不可避免地存在一些初始缺陷如微裂纹等,这些微裂纹在疲劳循环荷载作用下将加速其疲劳断裂破坏,对于这种带裂纹的结构常需采用断裂力学来研究^[6]。目前,在求解应力强度因子方面已形成了解析法、数值法和实验法等方法^[7],其中数值法中有限元法和边界元法应用相对广泛^[8]。文献[9]采用FRANC3D和ABQUAS建立了十字形焊接细节的有限元模型,基于线弹性断裂力学的基本理论,研究了不同蚀坑尺寸、裂纹形状和裂纹深度对焊接细节应力强度因子的影响规律,认为焊缝倾斜角度对应力强度因子有显著的影响;文献[10]对腹板连接节点焊缝应力强度因子的参数敏感性进行了研究;文献[11]采用断裂力学和相互作用积分法开展了U肋对接焊缝三维疲劳裂纹的应力强度因子参数分析,研究表明裂纹参数对其应力强度因子存在一定的影响;文献[12]给出了对接焊缝焊接细节与十字形承载和非承载焊接细节应力强度因子的理论计算公式。目前,国内外学者虽已对众多焊接细节的应力强度因子进行了一定的探讨,但针对腹板含对接焊缝的十字形焊接细节应力强度因子及其参数敏感性研究仍较为欠缺,特别是针对焊脚尺寸、对接焊缝余高和对接焊缝宽度等几何参数对其应力强度因子影响规律的研究均鲜有文献报道。

本文选取腹板含对接焊缝的十字形焊接细节

为研究对象,采用位移法研究其应力强度因子,并在此基础上探讨几何参数和裂纹参数对其的影响规律,结合最小二乘法拟合表面裂纹最深点的裂纹形状修正系数函数,可为后期疲劳裂纹扩展寿命预测和疲劳可靠度分析提供理论依据。

1 应力强度因子

根据裂纹体所承受的荷载类型及其位移模式,可将裂纹分为张开型、滑开型和撕开型三种,由于正剪应力的共同存在,常表现为复合型裂纹。应力强度因子可体现裂纹前缘应力场的强弱,决定了裂纹是否扩展和裂纹扩展速率,其大小不仅与结构的几何参数有关,而且与所承受的外荷载和裂纹几何形状等也有直接关系。

对于几何构造简单的含裂纹体结构,其应力强度因子可查询应力强度因子手册,而构造相对复杂的结构常需采用数值法来进行分析。复合型裂纹的渐近位移场表达式如式(1)~式(3)所示^[7],将位移场的三个表达式联立便可求解出相应应力强度因子 K_I 、 K_{II} 和 K_{III} 。从位移场表达式可以知道,应力强度因子 K_{III} 是独立的,仅与位移 w 相关,因此只需联立公式(1)和公式(2)便可求解出对应的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 。

$$u = \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] + \quad (1)$$

$$\frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\kappa + 3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$v = \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \quad (2)$$

$$\frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\kappa - 2) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$w = \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

式中, r 、 θ 为裂纹前缘点的极坐标; u 、 v 、 w 为裂纹前缘点的位移; μ 、 ν 分别为剪切模量和泊松比。当属于平面应变问题时, κ 为 $3-4\nu$,而对于平面应力问

题, κ 应取为 $(3-\nu)/(1+\nu)$ 。

2 三维断裂力学有限元模型

文献[13]开展了钢桁桥主梁对接焊缝细节的疲劳试验,几何尺寸如图1所示,焊接细节局部构造如图2所示。该焊接细节中各板件厚度均为16 mm,焊脚尺寸为8 mm,借助有限元软件ANSYS建立该焊接细节的三维断裂力学实体模型。在建模中,采用三维四分之一节点奇异单元(该单元可由SOLID95单元退化生成)来消除裂纹前缘附近各点的应力奇异性。奇异单元尺寸信息对应力强度因子的分析结果有直接的影响,文献[14]建议其边长与裂纹深度之比应小于0.1,文献[15]建议该比值应为0.05~0.15,而ANSYS软件的技术文件则要求其应小于0.125,本文将此比值取为0.1。

有限元模型中围绕裂纹前缘的第一层单元采用由SOLID95退化所生成的奇异单元,而其余部分采用SOLID45单元以节约计算分析时间。为了研究疲劳裂纹扩展至一定长度时焊接细节的几何参数和裂纹参数对其应力强度因子的影响规律,所引入的疲劳裂纹半长度为12 mm,并在焊接细节一端部施加70 MPa均布拉伸荷载而另一端施加固定约束。

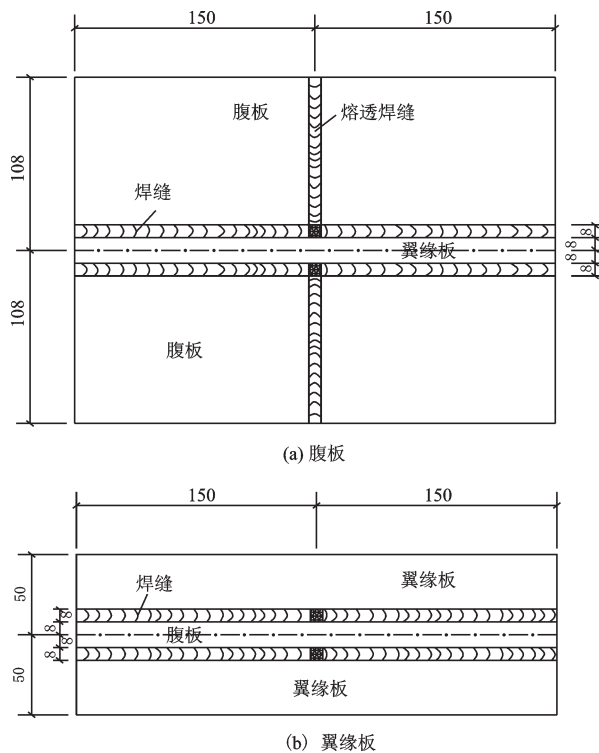


图1 几何尺寸

Fig.1 Geometric dimension

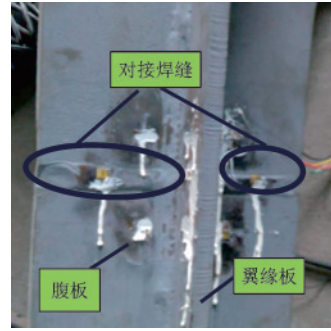


图2 焊接细节局部构造

Fig.2 Local structure of welded details

束。在建模及计算分析中,仅考虑一条裂纹扩展的情形,同时假定疲劳裂纹为表面半椭圆形裂纹和裂纹形状比为2(本文中裂纹形状比为半椭圆形裂纹的长短半轴之比),并位于该焊接细节的腹板上,其三维断裂力学模型如图3所示。

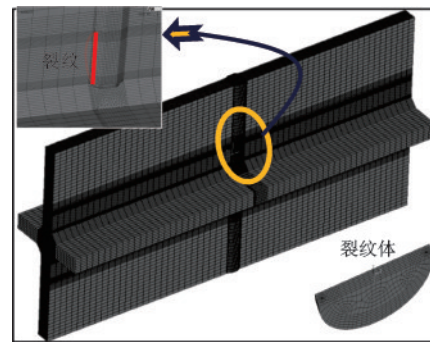


图3 三维断裂力学模型

Fig.3 Three-dimensional fracture mechanical model

为了考查焊接细节三维断裂力学模型的有效性和计算精度,采用ANSYS、FRANC3D分别进行应力强度因子分析,并将计算结果与规范BS7910理论公式计算结果进行对比。对于FRANC3D分析流程如下,首先根据几何尺寸建立不含裂纹的ANSYS模型,再将所建立的模型导入FRANC3D软件,并引入相同的裂纹信息和荷载信息,随后依据相互作用积分法分析焊接细节的应力强度因子。将该焊接细节表面半椭圆形裂纹最深点的应力强度因子 K_I 的ANSYS分析结果、FRANC3D计算结果与BS7910规范中的理论公式计算结果见表1。

从表1可知,基于ANSYS、FRANC3D所计算的应力强度因子与BS7910的理论公式计算结果相差均较小,其中表面点的应力强度因子计算结果相差仅分别为2.7%和4.8%。该对比分析结果表明

表1 应力强度因子计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results of stress intensity factors

位置	计算分析结果/(10 ⁶ Pa·m ^{1/2})		
	ANSYS	FRANC3D	BS7910
最深点	8.53	8.62	7.39
表面点	8.70	8.51	8.94

所建立的 ANSYS 断裂力学模型可较为准确的模拟和分析焊接细节裂纹前缘的应力强度因子,下文将以此模型开展几何参数和裂纹参数的影响研究。

3 应力强度因子的影响因素分析

除了上述奇异单元边长和围绕裂纹前缘的单元数量对应力强度因子有一定的直接影响外,焊接细节的几何参数(如焊脚尺寸、板件厚度、对接焊缝参数等)和裂纹参数(如裂纹尺寸和裂纹形状比等)均将对计算结果有一定的影响。轴向均布荷载作用下该焊接细节的疲劳裂纹表现以 I 型裂纹为主,故下文各对比图中仅呈现应力强度因子 K_I ,并且各图中均为最深点应力强度因子的变化规律。

3.1 几何参数

3.1.1 焊脚尺寸

计算模型中仅改变焊脚尺寸信息,分别取为 6.0、7.0、8.0、9.0、10.0 mm,位移法所获取的应力强度因子结果如图 4 所示。

从图 4 可知,应力强度因子 K_I 基本不受其焊脚尺寸信息的影响。当焊脚尺寸从 6.0 mm 增加到 10.0 mm 时,其应力强度因子变化幅度为 0.24%。

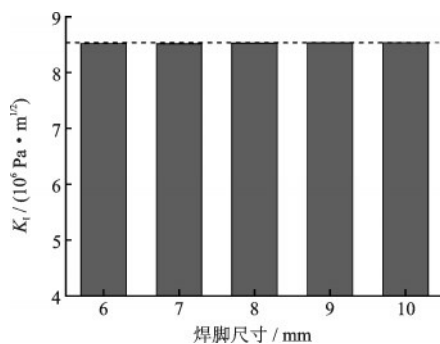


图4 应力强度因子随焊脚尺寸的变化关系

Fig.4 Relationship between stress intensity factor and weld size

3.1.2 腹板板厚

计算模型中仅改变腹板尺寸信息,厚度分别取为 12.0、14.0、16.0、18.0、20.0 mm,位移法所获取的应力强度因子结果如图 5 所示。

从图 5 可知,随着腹板厚度的增加,其应力强度因子 K_I 随之逐渐减小。当腹板厚度从 14 mm 增加到 20 mm 时,其应力强度因子变化幅度为 1.86%,并在腹板厚度为 14 mm 时获得最大值。

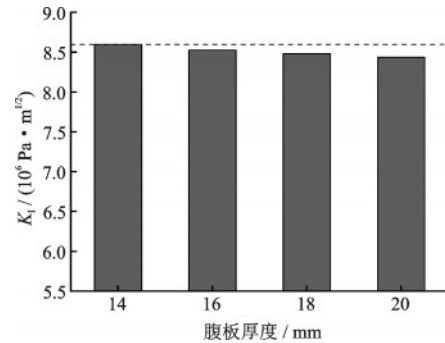


图5 应力强度因子随腹板厚度的变化关系

Fig.5 Relationship between stress intensity factor and web thickness

3.1.3 翼缘板板厚

计算模型中仅改变翼缘板尺寸信息,厚度分别取为 12.0、14.0、16.0、18.0、20.0 mm,位移法所获取的应力强度因子结果如图 6 所示。

从图 6 可知,应力强度因子 K_I 基本不受翼缘板板厚信息的影响。当翼缘板厚度从 12 mm 增加到 20 mm 时,其应力强度因子变化幅度为 0.12%。

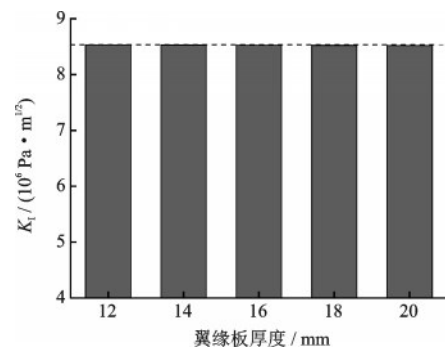


图6 应力强度因子随翼缘板厚度的变化关系

Fig.6 Relationship between stress intensity factor and flange thickness

3.1.4 对接焊缝宽度

计算模型中仅改变对接焊缝信息,宽度分别取为 12.0、14.0、16.0、18.0、20.0 mm,位移法所获取的

应力强度因子结果如图7所示。从图7可知,对接焊缝宽度对其应力强度因子 K_I 的影响较小。当对接焊缝宽度从12 mm增加到20 mm时,其应力强度因子变化幅度为0.48%。

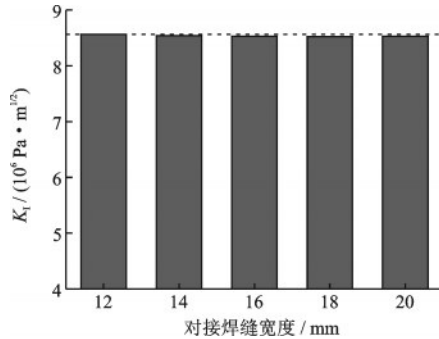


图7 应力强度因子随对接焊缝宽度的变化关系

Fig.7 Relationship between stress intensity factor and butt weld width

3.1.5 对接焊缝余高

计算模型中仅改变对接焊缝信息,余高分别取为1.6、2.0、2.4、2.8、3.2 mm,将位移法获取的应力强度因子结果如图8所示。

由图8可知,应力强度因子 K_I 随着对接焊缝余高的增长而呈逐渐减小的趋势。当对接焊缝余高从1.6 mm增加到3.2 mm时,焊接细节裂纹前缘最深点处应力强度因子变化幅度为1.97%,并在对接焊缝余高为1.6 mm时获得最大值。

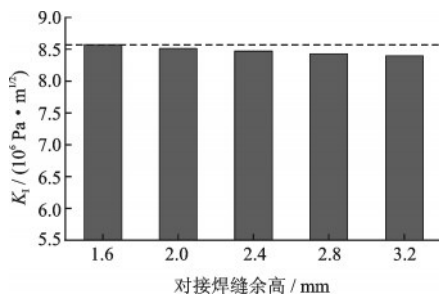


图8 应力强度因子随对接焊缝余高的变化关系

Fig.8 Relationship between stress intensity factor and butt weld reinforcement

3.2 裂纹参数

3.2.1 裂纹尺寸

计算模型中仅改变裂纹尺寸信息,分别取为10.0、11.0、12.0、13.0 mm,位移法获取的应力强度因子结果如图9所示。

从图9可知,应力强度因子 K_I 随着裂纹尺寸的增长而随之增大。当裂纹尺寸从10 mm增加到13 mm时,其应力强度因子变化幅度为14.35%,并在裂纹尺寸为13 mm时获得最大值。

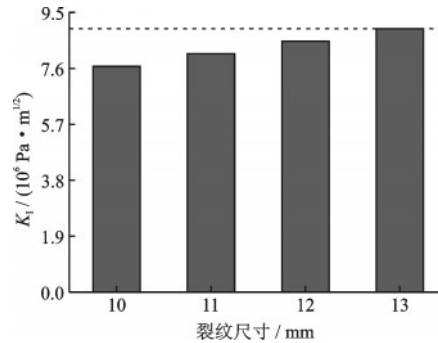


图9 应力强度因子随裂纹尺寸的变化关系

Fig.9 The relationship between stress intensity factor and semi-crack length

3.2.2 裂纹形状比

计算模型中仅改变裂纹形状比,并将其分别取为2.0、2.5、3.0、3.5、4.0,位移法获取的应力强度因子结果如图10所示。

从图10可知,裂纹前缘各节点的应力强度因子 K_I 随着裂纹形状比的增加,表现为先增加后逐渐降低。当裂纹形状比从2增加到4时,其应力强度因子变化幅度为18.0%,并在裂纹形状比为2.5时获得最大值。

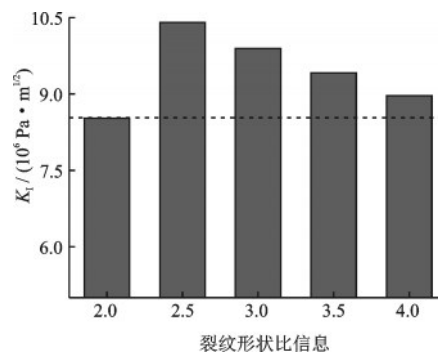


图10 应力强度因子随裂纹形状比的变化关系

Fig.10 The relationship between stress intensity factor and crack shape ratio

4 裂纹形状修正系数

借助ANSYS分析了不同裂纹信息下焊缝细节的应力强度因子,结合MATLAB和最小二乘法原理可拟合出裂纹最深点处的裂纹形状修正系数函

数,其表达式如下:

当形状比为2时,则:

$$F(a) = -1.582\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 3.047\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 1.397\left(\frac{a}{t}\right) + 1.069 \quad (4)$$

当形状比为3时,则:

$$F(a) = -9.093\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 9.789\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 3.043\left(\frac{a}{t}\right) + 1.288 \quad (5)$$

当形状比为4时,则:

$$F(a) = -16.364\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 14.116\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 3.684\left(\frac{a}{t}\right) + 1.364 \quad (6)$$

式中, a 为裂纹深度; t 为裂纹所在板件的厚度; a/t 为0.625~0.875。

从上述公式可知,裂纹形状比和裂纹深厚比对裂纹形状修正系数影响较大。上述公式中裂纹深度与厚度之比主要是针对仅有一条裂纹位于腹板的十字形对接焊接细节拟合出来的,而对存在多条裂纹的裂纹形状修正系数适用性尚需做进一步研究分析。

5 结 论

借助 ANSYS 和四分之一节点位移法分析了轴向荷载作用下腹板含对接焊缝的十字形焊接细节应力强度因子及其参数敏感性,得出以下结论:

(1) 应力强度因子随对接焊缝余高和腹板板厚的增大而逐渐减小,而基本不受焊脚尺寸、翼缘板厚和对接焊缝宽度的影响。

(2) 应力强度因子随裂纹形状比的增大而先增大后逐渐减小,随裂纹尺寸的增长而逐渐增大。

(3) 本文所讨论的几何因素和裂纹因素中裂纹形状比和裂纹尺寸对应力强度因子 K_I 影响最为显著,其影响幅度可达 18.0%。

(4) 拟合所获得的裂纹形状修正系数函数可为焊接细节的疲劳扩展寿命评估和可靠度研究提供理论依据。

参考文献:

[1] 廖平,赵人达,贾毅,等. 钢梁十字形焊接细节的

应力集中效应研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 42-47.

Liao P, Zhao R D, Jia Y, et al. Study of stress concentration effects of cruciform welded details of steel girder [J]. Bridge Construction, 2018, 48(1):42-47. (in Chinese)

[2] Zhou H, Shi G, Wang Y, et al. Fatigue evaluation of a composite railway bridge based on fracture mechanics through global-local dynamic analysis [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 1-13.

[3] Arthur G A, Menzemer C, Shohel M. Fatigue life prediction of heavy-duty riveted steel gratings in bridge decks [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 21(4): 5 592-5 599.

[4] Razmi J. Fracture mechanics-based and continuum damage modeling approach for prediction of crack initiation and propagation in integral abutment bridges [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 41(15): 2 824-2 827.

[5] Leander J, AL-Emrani M. Reliability-based fatigue assessment of steel bridges using LEFM-a sensitivity analysis [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 93(1): 82-91.

[6] 揭志羽. 预腐蚀及复杂应力场下钢桥焊接接头疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

Jie Zh Y. Study on the fatigue performance of welded joints in steel bridges under prior corrosion and complex stress fields[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)

[7] 郭华泾. 带轴向半椭圆表面裂纹的反应堆压力容器的弹塑性分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.

Guo H J. Elastic-plastic analysis of a reactor pressure vessel with a axial semi-elliptical surface crack[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)

[8] 李莹. 公路钢桥疲劳性能及可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

Li Y. Research on fatigue performance and reliability of highway steel bridges [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)

[9] 揭志羽, 李亚东, 卫星, 等. 焊接节点表面裂纹复合型应力强度因子的数值计算研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 127-133.

Jie Zh Y, Li Y D, Wei X, et al. Numerical study of mixed-mode stress intensity factor of surface crack of welded joint [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 127-133. (in Chinese)

[10] 刘洪波, 翟长海, 谢礼立, 等. 腹板连接节点焊缝应力强度因子的参数分析[J]. 浙江大学学报(工学版),

2011,45(6): 1 108-1 112.

Liu H B, Zhai Ch H, Xie L L, et al. Parametric analyse of stress intensity factors of beam-to-column web connections in steel moment frames[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(6): 1 108-1 112. (in Chinese)

[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, 45(5): 54-59.

Yang Sh L, Bu Y Zh, Cui Ch, et al. Analysis of stress intensity factors of 3-dimensional fatigue crack in butt weld joint of U rib[J]. Bridge Construction, 2015, 45(5):54-59. (in Chinese)

[12] Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures; BS 7910—2013[S]. London: British Standards Institution, 2013.

[13] 廖 平, 卫 星, 肖 林, 等. 带过焊孔焊接细节疲劳性能优化及试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(2): 37-41.

Liao P, Wei X, Xiao L, et al. Optimization and experimental study of fatigue performance of welded details with cope holes [J]. Bridge Construction, 2017, 47(2): 37-41. (in Chinese)

[14] Cao J J, Yang G J, Packer J A, et al. Crack modeling in fe analysis of circular tubular joints [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 61(5/6):537-553.

[15] Ingraffea A R, Manu C. Stress-intensity factor computation in three dimensions with quarter-point elements [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1980, 15(10): 1 427-1 445.

(本文责编:赵 霞)



(上接第 891 页)

[12] Structural design actions-Part 2: Wind actions: AS/NZS 1170.2:2002[S]. Australian/New Zealand: Joint Technical Committee, 2011.

[13] AIJ recommendations for loads on buildings: AIJ_RLB 2004[S]. Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan, 2004.

[14] 建筑结构荷载规范: GB50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Load code for the design of building structures: GB50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press 2010.(in Chinese)

[15] Nelsen R B. An introduction to copulas[M]. Portland: Springer Science & Business Media, 2006.

[16] Zhang X , Chen X. Influence of dependence of directional extreme wind speeds on wind load effects with various mean recurrence intervals[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 148:

45-56.

[17] 蒋继伟. 大型屋盖风荷载和风效应方向性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.

Jiang J W. Study on the directionality of wind load and wind effect of saddle roof[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[18] Holmes J. Wind loading of structures[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.

[19] Liu P L, Der Kiureghian A. Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1986, 1(2): 105-112.

[20] 空间网格结构技术规程: JGJ7—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 10-78.

Technical specification for space frame structures: JGJ7—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press 2010:10-78.(in Chinese)