

正交异性钢桥面板焊接节点应力集中系数

张启伟, 张鹏飞

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 以千米级斜拉桥苏通大桥为工程背景, 建立桥面板纵肋与盖板节点有限元模型, 基于国内外现有的几种焊接节点热点应力计算方法, 对节点焊缝周围的热点应力和应力集中系数进行数值计算, 全面分析单元类型、网格划分对计算结果的影响, 并通过将现场实测的应力集中系数与数值分析的相应结果进行比较, 从而确立热点应力的有效计算方法, 获得了节点焊缝周围的应力分布规律和应力集中系数. 最后分析了板件几何参数对热点应力集中的影响.

关键词: 焊接节点; 应力集中; 热点应力; 应力测试

中图分类号: U 448.27

文献标识码: A

Hot Spot Stress Concentration Factor for Welded Joints in Steel Orthotropic Decks

ZHANG Qiwei, ZHANG Pengfei

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The finite element models for rib-to-deck joints of Sutong Yangtze River bridge are established, the hot-spot stress along the weld toe and the stress concentration factor at weld toe are studied with several methods for determining hot-spot stress, and the influence of element type and meshing requirement on computing results are comprehensively analyzed. In order to validate numerical analysis results, the test for stress distribution along the weld toe is carried out. As a result, the effective methods for computing hot-spot are founded, the stress distribution along weld toe and its stress concentration factor are gained. At last, the effect of some geometrical parameters on the stress concentration in the hot spots stress region is investigated.

Key words: welded joint; stress concentration; hot-spot stress; test validation

工方便等优点在大跨径钢结构桥梁中已得到广泛应用. 它由盖板、纵向加劲肋与横隔板 3 种薄板件焊接而成. 在各板件的焊接部位, 应力状态复杂, 存在着应力集中与残余应力, 在循环荷载作用下, 容易发生疲劳破坏. 尤其是盖板与纵肋的焊接节点, 直接承受车辆的轮载作用, 其焊趾是疲劳裂纹最易萌生的部位. 为了确保正交异性钢桥面板在运营期间不至发生疲劳破坏, 对盖板与纵肋的焊接节点进行疲劳寿命预测就显得尤为重要.

在焊接节点疲劳性能研究中, 应力集中系数 (SCF) 是评价其疲劳寿命的重要参数. 目前, 国内和国际上评估焊接节点疲劳寿命应用较为广泛的是基于热点应力幅的疲劳-寿命 (S-N) 曲线法. 热点应力决定了疲劳裂纹的扩展方式, 是节点疲劳寿命的主要影响因素, 可由应力集中系数计算而得. 国内外对于焊接节点应力集中系数的研究已有一些报道^[1-4]. 但大部分研究工作主要针对海洋平台和船舶的焊接节点, 对于桥梁结构焊接节点应力集中系数的研究则相对较少. 同时, 现有的研究多半是通过有限元数值模拟, 缺乏有效的试验验证; 即使是数值方法, 同一个焊接节点采用不同的热点应力法、不同的单元类型及网格划分方式计算出的应力集中系数有时也会有很大的差异. 因此, 笔者结合千米级斜拉桥苏通长江大桥的正交异性钢桥面板对纵肋与盖板焊接节点的应力集中系数进行试验和数值研究.

1 热点应力数值模拟

1.1 热点应力计算方法

焊接结构中, 热点应力是指最为可能发生疲劳裂纹的起始点处的应力. 通常认为热点应力主要由薄膜应力和弯曲应力组成, 是构件表面热点处薄膜应力与弯曲应力之和的最大值, 它不包括焊缝形状、

正交异性钢桥面板由于自重轻、承载能力高、施

收稿日期: 2009-09-09

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2006BAG04B01)

作者简介: 张启伟 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁健康监测与损伤诊断. E-mail: zhangqw@tongji.edu.cn

裂缝、切口等引起的局部应力集中,只依赖于构件连接部位的几何尺寸和荷载参量.热点应力可由应力集中系数来表达.应力集中系数定义为热点应力与名义应力的比值.名义应力是指远离焊缝的区域的应力,其应力值一般不受几何形状与焊接引起的应力集中的影响.根据国际焊接学会的推荐,可取距离焊趾 $1.5t$ (t 为板厚)处的应力作为名义应力.

对于热点应力的计算,目前国内外主要有2种方法:外推法和Dong氏法^[5].外推法是通过距离热点(焊趾)“足够距离”处2点或3点的应力外推得到热点应力值.所谓“足够距离”是指在这一距离处焊缝形状和切口等因素引起的非线性峰值不再发生影响,应力基本呈线性分布.挪威等船级社推荐以距离热点 $0.5t$ 和 $1.5t$ 为参考点进行线性外推;国际焊接学会IIW^[6]推荐以距离热点 $0.4t$ 和 $1.0t$ 为参考点进行线性外推.外推原理如图1所示.Dong氏法是将焊趾处的热点应力简化成式(1)和式(2)所示的薄膜应力 σ_m 与弯曲应力 σ_b 之和,根据力的平衡方程,通过距离焊趾 δ 处截面的应力推算出热点处弯曲应力 σ_b ,从而得到热点应力,推算原理如式(1)、式(2)和图2所示.与外推法一样,距离 δ 的选择应确保所选的截面应力基本不受局部非线性应力峰值的影响.

$$\sigma_m = t^{-1} \int_0^t \sigma_x(y) dy \quad (1)$$

$$\sigma_m t^2/2 + \sigma_b t^2/6 = \int_0^t \sigma_x(y) y dy + \delta \int_0^t \tau_{xy}(y) dy \quad (2)$$

式中: $\sigma_x(y)$, $\tau_{xy}(y)$ 为距焊趾距离为 δ 的截面沿板厚各点的应力分量; y 为沿板厚方向的坐标.

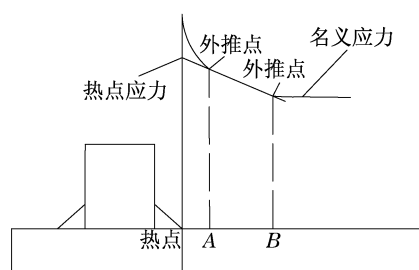


图1 焊接节点热点应力的外推计算示意图
Fig.1 Hot-spot stress of welded joints calculation by surface stress extrapolation

1.2 有限元模型的建立

用有限元法分析焊接节点热点应力,计算结果的精度很大程度上取决于所建立的有限元模型是否合理.尤其是网格划分、单元类型、边界条件以及焊缝的模拟等直接影响了计算结果.考虑到计算精度

的要求和计算存储的限制,在对盖板与纵肋焊接节点划分网格时,须采用分区域网格法.即焊缝附近的区域,因为应力集中的存在,应力梯度较大,网格需要划分得较密一些,而在远离焊缝的区域是非重要区域,应力梯度较小,网格可划分得稀疏一些.在单元类型的选择上,由于壳单元不能反映应力在板厚度方向上的变化,而且在模拟焊缝形状上也有缺陷,因此应采用三维实体单元来模拟焊缝及整个节点.

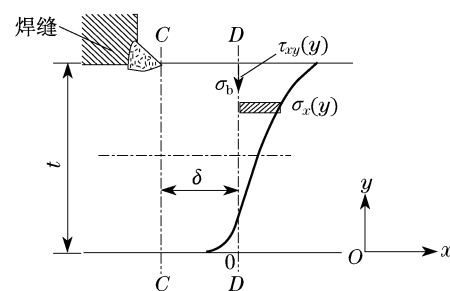


图2 焊接节点热点应力 Dong 氏法计算示意图
Fig.2 Definition of hot-spot stress of welded joints according to Dong

鉴于以上因素的考虑,在苏通大桥动静载试验^[7]全桥整体及箱梁局部有限元应力分析的基础上把箱梁局部有限元模型作为粗糙模型(原始模型),将盖板与纵肋的焊接节点从粗糙模型中“萃取”出来,运用大型有限元软件 ANSYS 建立该节点有限元子模型.节点几何构造如图3所示,子模型如图4b(mesh1)所示.在该模型中,单元类型选用8结点体单元 solid45,网格划分方式采用映射网格与扫掠网格相结合.对于盖板,除了焊接区域内采用扫掠网格划分外,其他均采用映射网格划分.在板的宽度方向距离焊趾 $0\sim 1.6t$ 区域内划分成4个单元;焊接区域内划分成4个单元.对于U肋的腹板,靠近焊缝区域内采用扫掠网格划分,远离焊缝区域采用映射网格划分.而对于焊缝,则完全采用扫掠网格划分,整个焊缝划分成5个单元.无论是盖板还是U肋的腹板,在远离焊缝区域网格都划分得比较稀疏.

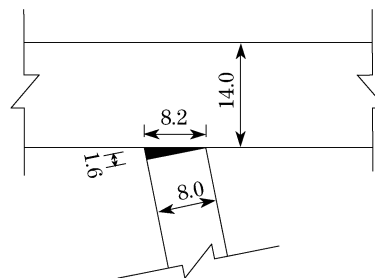


图3 节点几何构造(单位:mm)
Fig.3 Configuration of a rib-to-deck joint(unit:mm)

为了分析单元类型、网格划分对有限元计算结果的影响,对图4b所示的模型进行2次网格自动加密,加密后的每个实体单元在宽度方向将分别被平均分成2份和4份,如图4c(mesh2)和图4d(mesh3)所示.同时,基于这3种网格划分方案,采用20结点

体单元 solid95 建立了与图4b~4d所示的网格划分方式相对应的3种模型.

至于所有这些子模型在计算时边界条件的确定则根据子模型法由粗糙模型中切割边界结点的位移插值得到.

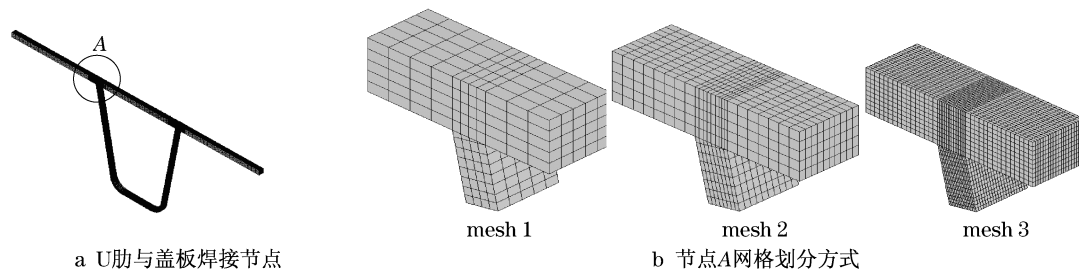


图4 U肋与盖板焊接节点有限元模型

Fig.4 Finite element models of a rib-to-deck welded joint

1.3 热点应力计算结果

1.3.1 外推法

采用前面建立的有限元模型分析文献[8]中箱梁对称加载工况下U肋与盖板节点焊缝周围的应力分布,计算结果如图5所示,图中 t_1 为U肋腹板的厚度.分别选用 $0.4t, 1.0t$ 和 $0.5t, 1.5t$ 作为参

考点,通过线性外推法计算该节点的热点应力集中系数,如表1、表2所示.由于焊缝周围垂直于焊趾的应力是疲劳裂纹张开的主要驱动力,对疲劳破坏起主导作用,因而本文给出的应力分布及热点应力即是垂直于焊趾方向的应力.

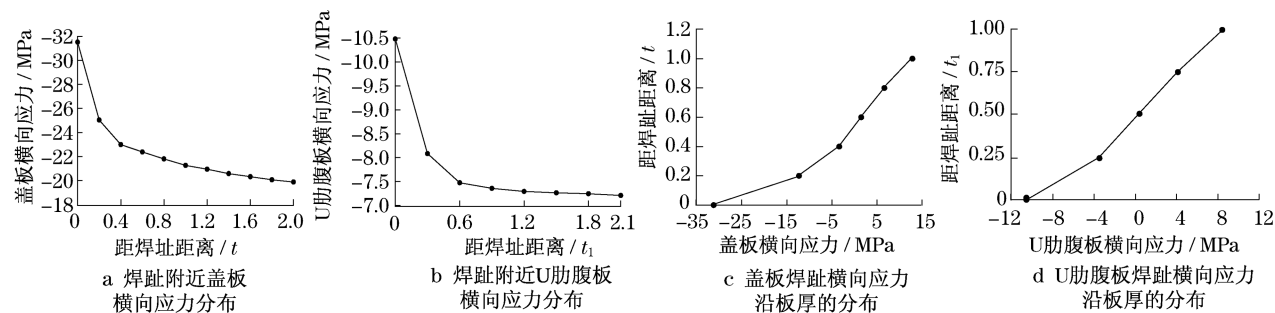


图5 焊缝周围应力分布

Fig.5 Stress distribution along the weld toe

表1 盖板焊趾外推法应力集中系数(SCF)计算结果

Tab.1 Calculation results of stress concentration factor for weld toe of deck plate by surface stress extrapolation

外推参考点	solid45			solid95		
	mesh1	mesh2	mesh3	mesh1	mesh2	mesh3
$0.4t, 1.0t$	1.332	1.197	1.183	1.254	1.151	1.158
$0.5t, 1.5t$	1.276	1.192	1.182	1.253	1.169	1.173

表2 U肋焊趾外推法应力集中系数(SCF)计算结果

Tab.2 Calculation results of stress concentration factor for weld toe of rib wall by surface stress extrapolation

外推参考点	solid45			solid95		
	mesh1	mesh2	mesh3	mesh1	mesh2	mesh3
$0.4t_1, 1.0t_1$	1.283	1.175	1.155	1.193	1.135	1.132
$0.5t_1, 1.5t_1$	1.242	1.171	1.157	1.187	1.145	1.142

1.3.2 Dong 氏法

为了分析式(2)中 δ 对计算结果的影响,选用 solid95 单元和 mesh2 的网格划分,分别取 δ 的长度为 $0.2t, 0.4t, 0.6t$ 和 $0.8t$ 进行计算,见表3. 针对 $\delta=0.4t$,采用6种模型分析了盖板焊趾应力集中系数,结果如表3、表4所示.

表3 不同 δ 值的应力集中系数(SCF)计算结果

Tab.3 Calculation results of stress concentration factor by different δ according to Dong

δ	应力集中系数	δ	应力集中系数
$0.2t$	1.251	$0.6t$	1.167
$0.4t$	1.159	$0.8t$	1.173

表4 不同有限元模型的应力集中系数(SCF)计算结果

Tab.4 Calculation results of stress concentration factor by different models according to Dong

网格划分	solid45	solid95
mesh1	1.142	1.165
mesh2	1.138	1.159
mesh3	1.142	1.163

2 应力集中系数现场测试

为了验证热点应力有限元计算结果,确定合理的数值计算方法,对盖板与纵肋焊接节点的应力集中系数进行了现场测试.根据国际焊接学会的推荐,在盖板和U肋腹板上距离焊趾 $0.4t, 1.0t$ 以及 $1.5t$ 处布置测点,如图6所示.对于盖板的每个测点,分别布置平行于焊缝与垂直于焊缝2个方向

的应变片,U肋的测点布置三向应变片,测试U肋与焊趾平行、垂直以及成 45° 角3个方向的应力.测试数据的采集采用数据同步采集系统.该系统具有同步多通道数据采集功能,能同时跟踪各测点应变随加载值的变化历程.在加载过程中实时对一部分数据进行分析,与理论数据进行对比,以确定数据采集装置是否正常工作.

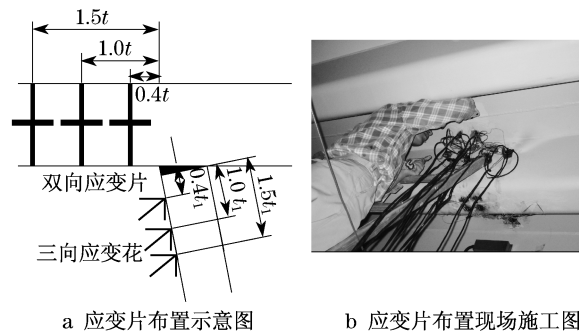


图6 盖板和U肋应变片的布置

Fig.6 Configuration of strain gauge instrumentation on deck plate and rib wall

将外推参考点的应变实测值通过线性外推得到盖板与U肋焊趾处的热点应变,把热点应变与名义应变相比求得应变集中系数 S_{NCF} (SNCF).根据文献[9]推导出的应力集中系数和应变集中系数的转换关系式(3)确定热点应力集中系数 S_{CF} (SCF).测试和计算结果比较如图7所示.

$$S_{CF} = \left(1.10 + 0.33 \frac{\epsilon_p}{\epsilon_c} \right) S_{NCF} \quad (3)$$

式中: ϵ_p, ϵ_c 分别为平行于焊缝和垂直于焊缝的应变.

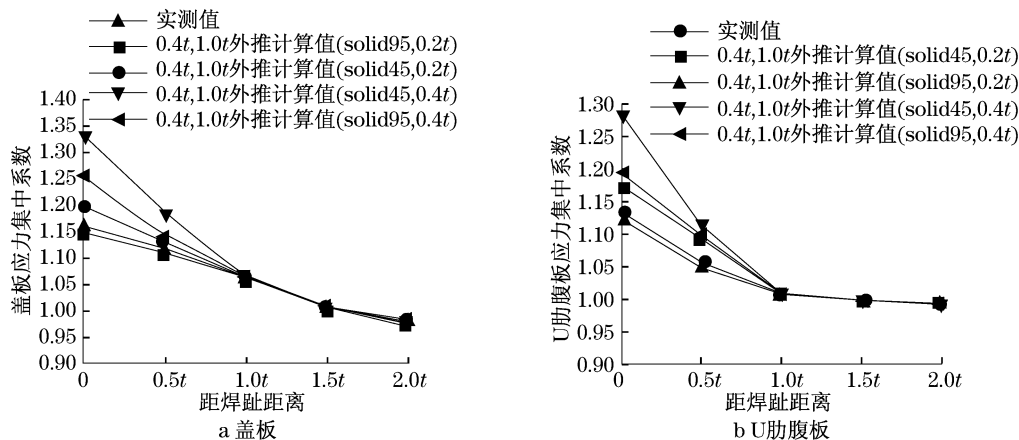


图7 测试和计算结果比较

Fig.7 Comparison of test results and calculation results

3 测试和计算结果分析

从图5给出的焊缝周围各板件横向应力值与距

焊趾距离的关系曲线中可以发现,在焊趾附近 $0 \sim 0.4t$ 范围内,各曲线斜率急剧变化,应力集中非常严重,尤其在焊趾处有着明显的应力峰值;随着与焊

趾距离的增大,应力集中逐渐减小,应力分布曲线近似呈直线形状,当距焊趾距离大于 $1.5t$ 时,各曲线逐步趋于平缓,应力集中基本消失.由此可以看出:焊趾附近受焊缝形状、裂缝、切口等引起的局部应力集中影响的区域只有 $0.4t$ 左右,当超出这一区域,各板件的应力值就只受几何应力集中的影响.因而,在热点应力分析中选择 $0.4t, 1.0t$ 和 $0.5t, 1.5t$ 作为线性外推参考点是合理的.

在图5中,盖板焊趾处的应力大于U肋腹板焊趾处的应力;与U肋腹板相比,盖板更易受应力集中的影响;而且表1、表2的数据也表明盖板焊趾处的应力集中大于U肋腹板焊趾处的应力集中,因此,正交异性桥面板的疲劳裂缝一般出现在盖板下缘的焊趾处.

表1~4的数据表明:单元类型与网格划分对于热点应力线性外推的计算结果影响较大.同一种单元类型,网格划分得越粗糙,计算出的应力集中系数越大.同样的网格划分,低阶单元的计算结果大于高阶单元;当选择 $0.4t, 1.0t$ 作为外推参考点、网格尺寸较大时,单元类型的影响尤为显著.如表1中采用 mesh1 的网格划分,低阶单元计算的 SCF 比高阶单元高出 6.2%,而 mesh2, mesh3 的网格划分,低阶单元计算结果比高阶单元分别只高 3.9% 和 2.0%.与 $0.4t, 1.0t$ 外推计算值相比,选择 $0.5t, 1.5t$ 作为外推参考点,同样的网格划分,不同单元类型计算结果的差异相对较小;在表1中,3种网格划分方式,低阶单元的计算值与高阶单元最大相差 2.0%.但同一个数值模型,2种外推方法的计算结果相差甚小.对于 Dong 氏法,在局部应力集中影响区域之外,热点应力计算值随 δ 的增大而增大;单元类型与网格划分对计算结果的影响较小.当采用 20 节点高阶体单元,网格细化到一定程度以后,无论是外推法还是 Dong 氏法,由单元密度引起的计算结果的差异都

变得很小.如表1、表2中采用 solid95 单元, mesh2 与 mesh3 计算出的应力集中系数相差还不到 1%.而且此时这2种热点应力法计算出的应力集中系数也几乎一致.

从图7测试和计算结果比较来看,各有限元模型计算出的应力集中系数分布与试验实测基本吻合.其中, solid95 单元与 mesh2 的网格划分计算结果与实测结果最为接近.随着单元阶数变低和网格尺寸变大,计算值将逐步偏离实际值.当网格划分较密,低阶单元模型计算的 SCF 比网格尺寸粗糙,高阶单元模型的计算值更接近实际值.由此可见,单元网格密度对热点应力计算的影响大于单元类型.若采用高阶体单元,网格尺寸划分得小于 $0.2t$, 计算出的热点应力可以保证具有良好的精度.

4 几何参数对热点应力集中的影响

在不考虑焊接缺陷的情况下,焊趾附近的应力集中主要是由节点几何形状决定的.对于U肋与盖板的焊接节点,其主要几何参数是盖板的厚度 t 、U肋腹板的厚度 t_1 以及两板件的夹角.但实际工程中不同桥梁间盖板与U肋腹板夹角的变化相对较小,因此本文主要讨论盖板厚度和U肋腹板厚度对焊趾应力集中的影响.盖板厚度 t 分别取 10, 14, 18, 22, 26 mm, U肋腹板厚度 t_1 分别取 6, 8, 10, 12, 14 mm, 采用 solid95 单元与 mesh2 的网格划分,对不同几何参数的节点热点应力进行数值计算.计算结果如图8~9所示.

从图8~9的曲线可以看出,盖板厚度对盖板焊趾和U肋腹板焊趾的热点应力及应力集中均有显著的影响.同样的载荷条件下,盖板厚度越大,焊趾热点应力集中越严重,热点应力值却越小.U肋腹板的厚度的变化对各板件焊趾热点应力值和应力集中系

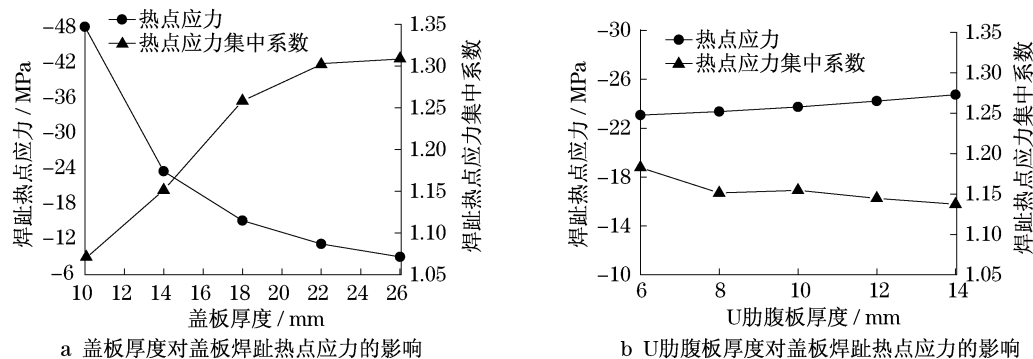


图8 盖板焊趾热点应力及应力集中系数随几何参数的变化

Fig.8 Hot-spot stress and SCF at weld toe of deck plate with different geometrical parameter

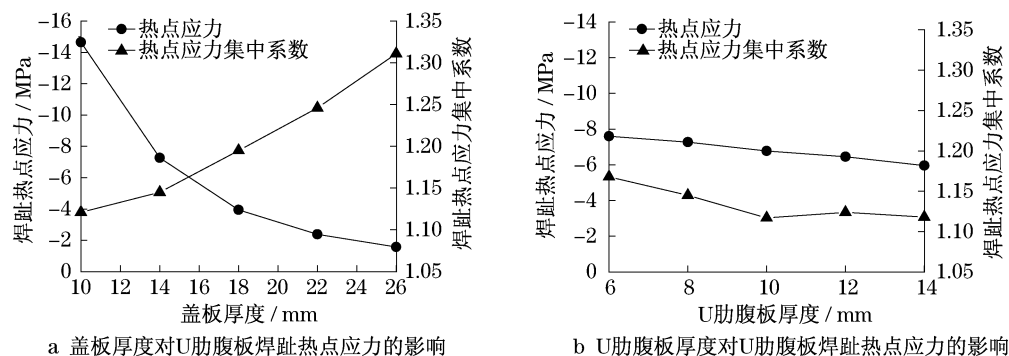


图9 U肋腹板焊趾热点应力及应力集中系数随几何参数的变化

Fig.9 Hot-spot stress and SCF at weld toe of rib wall with different geometrical parameters

数的影响甚微. 虽然增加盖板厚度会导致各板件焊趾热点应力集中的加重, 但应力集中增大的幅度远小于热点应力减小的幅度. 如图8中, 当U肋腹板厚度保持不变, 盖板厚度从10 mm增加到26 mm, 焊趾应力集中系数增幅22.4%, 热点应力减幅81.1%. 因此, 盖板厚度是正交异性桥面板疲劳寿命的主要因素, 实际工程中可通过适当增加盖板厚度来延长桥面板的疲劳寿命.

5 结论

通过数值模拟、试验测试研究了车辆荷载作用下正交异性钢桥面板U肋与盖板焊接节点的热点应力集中系数. 从研究结果中可以得出以下结论:

(1) 盖板与U肋焊接节点的焊趾附近受焊缝形状、裂缝、切口等引起的局部应力集中影响的区域只有 $0.4t$ 左右, 当超出这一区域, 各板件的应力值就只受几何应力集中的影响, 应力近似呈直线分布. 盖板焊趾处的应力及应力集中系数都大于U肋腹板焊趾处的相应值.

(2) 采用的数值模拟方法考虑了焊缝对节点强度的影响. 试验和有限元计算结果比较证明, 当采用20节点的高阶单元、网格尺寸划分得小于 $0.2t$ 时, 无论是外推法还是Dong氏法计算出的热点应力都跟实测结果吻合得很好.

(3) 盖板厚度对焊趾热点应力的影响很大. 同样的载荷条件下, 盖板厚度越厚, 焊趾热点应力集中越严重, 热点应力值却越小. U肋腹板的厚度对盖板焊趾热点应力值和应力集中系数几乎无影响.

参考文献:

[1] Efthymiou M, Durkin S. Stress concentrations in T/Y and gap/

overlap K-joints[C]// Proceedings of Conference on Behaviour of Offshore Structures. Amsterdam: Pergamon Publisher, 1985: 429 - 440.

- [2] Smedle P, Fisher P. Stress concentration factors for simple tubular joints [C] // Proceedings of the First International Offshore and Polar Engineering Conference. Edinburgh: International Society of Offshore & Polar Engineers Publisher, 1991: 475 - 483.
- [3] Soh A K, Soh C K. Stress concentrations of K tubular joints subjected to basic and combined loadings [J]. Structures and Buildings, 1996, 116: 19.
- [4] Fricke W. Recommended hot spot analysis procedure for structural details of ships and FPSOs based on round-robin FE analysis [J]. Int J Offshore Polar Eng, 2002, 12(1): 40.
- [5] Dong P. A structural stress definition and implementation for fatigue analysis of welded joints [J]. Int J Fatigue, 2001, 23(10): 865.
- [6] Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of weld joints and components [R]. Cambridge: Abington Publishing, 1996.
- [7] 张启伟. 苏通长江大桥动静载试验报告 [R]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2008.
- ZHANG Qiwei. Report on static and dynamic load test of Sutong Yangtze River Bridge [R]. Shanghai: Tongji University. Department of Bridge Engineering, 2008.
- [8] 张启伟. 苏通大桥斜拉桥运营阶段的结构静力性能测试与研究报告 [R]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2008.
- ZHANG Qiwei. The structural static performance test and research of cable-stayed bridge based on the Sutong Yangtze River Bridge [R]. Shanghai: Tongji University. Department of Bridge Engineering, 2008.
- [9] 邵永波, LIE Seng Tjhen. K节点应力集中系数的试验和数值研究方法 [J]. 工程力学, 2006, 23(1): 79.
- SHAO Yongbo, LIE Seng Tjhen. Experimental and numerical studies of the stress concentration factor (SCF) of tubular K-joints [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(1): 79.