

钢桥面板横隔板新型开孔构造细节疲劳寿命评估

高锦纯

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 为研究钢桥面板横隔板新型开孔构造细节的疲劳性能, 借助实体有限元软件, 对潜在疲劳裂纹萌生点扩展情况进行了数值模拟。在同一加载条件下, 横隔板单孔形式纵肋腹板围焊趾处的疲劳应力为 51.4 MPa, 新型开孔形式纵肋腹板和纵肋底板围焊趾处的疲劳应力分别为 5.1 MPa 和 39.6 MPa, 可见新型开孔形式导致的疲劳应力较小; 以裂纹扩展至板厚 1/2 为疲劳失效判据, 横隔板单孔形式和新型开孔形式疲劳寿命分别为 356 万次和 1 833 万次, 说明新型开孔形式在疲劳性能上具有显著优势。

关键词: 钢桥面板; 横隔板新型开孔形式; 数值模拟; 疲劳寿命

中图分类号: U441.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0092-04

Assessment on Fatigue Life of New Perforated Structure Details for Diaphragms of Steel Bridge Deck

GAO Jinchun

(Northwest Design and Research Institute of China Municipal Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: In order to study the fatigue performance of a new perforated structure details for diaphragms of the steel bridge deck, the potential propagation of fatigue crack initiation points is numerically simulated by using the solid finite element software. Under the same loading conditions, the fatigue stress at the weld toe around the longitudinal rib web in the single hole form of the diaphragm is 51.4 MPa, while the fatigue stress at the weld toe around the longitudinal rib web and longitudinal rib bottom plate in the new perforating form is 5.1 MPa and 39.6 MPa respectively. It is showed that the fatigue stress of the new perforating form is smaller. Based on the fatigue failure criterion of crack propagation to 1/2 of the plate thickness, the fatigue life of the single hole form and the new perforating form of the diaphragms are 3.56 million and 18.33 million times, respectively, which explains that the new perforating form has significant advantages in fatigue performance.

Keywords: steel bridge deck; new perforating form of diaphragms; numerical simulation; fatigue life

0 引言

主梁结构和材料是制约大跨度桥梁发展的重要因素, 在过去的几十年中, 大跨度桥主梁逐渐从宽高比较小的单箱多室、多箱单室、多箱多室和疏/密肋式等截面形式向以宽高比较大的扁平钢箱梁为代表的轻质截面转变。国内外已建成的千米级斜拉桥和悬索桥主梁大多采用扁平钢箱梁, 桥面板也逐渐从开口肋钢桥面板逐步发展为闭口纵肋钢桥面板, 横隔板开孔构造细节则逐步由早期的横隔板不开孔、纵肋不连续通过向横隔板开孔、纵肋连续通过转变。参考美国土木工程学会(ASCE)的调查结果, 钢结构

80%以上的失效和疲劳紧密相关^[1]。随着交通压力的不断上升和大件运输重型车辆比重的不断提高, 国内外钢桥面板在应用中暴露出了大量的疲劳损伤案例, 甚至一些桥梁后期加固费用超过建设期的建安费。在日本对典型高速公路疲劳裂纹的统计结果中, 横隔板开孔构造细节占比约 38.2%^[2], 国内钢桥在典型构造细节上也同样出现了类似的疲劳损伤, 严重威胁了行车安全并制约钢桥发展。

钢桥面板疲劳的研究对象多种多样, 涉及数值理论分析和节段试验分析。吴丽丽等对钢桥面板力学性能、存在问题和发展前景进行了较为详细的探讨^[3]; 邹春蓉和王春生等分别对节段模型试验和数值模型试验进行研究, 补充了钢桥的疲劳试验方法与实现路径^[4-5]; 王晓等对国内规范和欧洲规范中规定的横隔板开孔细节疲劳应力进行了对比分析, 表

收稿日期: 2024-07-05

作者简介: 高锦纯(1981—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

明相同荷载下轮载尺寸效应越集中,疲劳损伤越大^[6];杨威对横隔板开孔细节面内变形疲劳试验的模型尺寸进行了优化设计^[7];李学钦和何志刚等对横隔板开孔构造细节开裂特征与开孔形式进行了研究^[8-9];何邦等采用粘贴角钢对横隔板弧形开孔疲劳裂纹的加固效果进行了数值模拟分析,并探讨了加固件参数的影响规律^[10]。

上述已有研究主要围绕横隔板的既定开孔形状或改变开孔大小而开展,而开孔的本身特征并未发生变化。本文以横隔板新型开孔的构造细节为研究对象,基于断裂力学理论方法,对其疲劳寿命进行评估,为该细节疲劳抗力的优化设计提供思路。

1 横隔板新型开孔构造细节

目前钢桥中纵肋处的横隔板开孔细节通常采用单个开孔形式,如图 1 所示,如武汉军山长江大桥、武汉青山长江大桥、港珠澳大桥等。横隔板单个开孔便于安装和焊接,对组装误差要求不高,但对纵肋的约束作用减弱,纵肋腹板围焊附近受弯扭作用明显,疲劳裂纹多出现在围焊焊趾处。

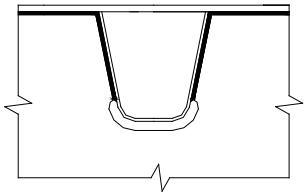


图 1 横隔板单个开孔形式

鉴于横隔板不开孔会引起强约束与高应力状态,且横隔板单个开孔易使疲劳损伤集中出现在纵肋腹板围焊处,故此处参考国内相关研究成果^[11],为分散横隔板开孔构造细节的应力集中效应,将纵肋底部下方开孔进行局部封闭,并保留两侧开孔,可以适当约束纵肋的扭转效应,减少单个开孔纵肋腹板围焊的疲劳损伤程度,横隔板新型开孔的构造细节如图 2 所示。弧形开孔采用一定半径的圆曲线连接,纵肋底板与横隔板连接部位采用角焊缝连接,焊缝端部同样采用围焊形式,该类细节疲劳应力主要关注圆弧线端部的围焊焊趾,即纵肋腹板围焊焊趾和纵肋底板围焊焊趾。

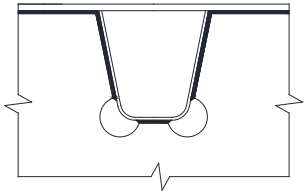


图 2 横隔板新型开孔形式

2 研究方法

疲劳寿命评估方法较多,除断裂力学外,其余方法均依托 $S-N$ 曲线,该曲线需要大量疲劳试验数据拟合得到。对于新型构造细节而言,国内外规范尚无对应的疲劳细节作为疲劳性能评估的依据,并且,疲劳试验耗时耗力,短时间得到 $S-N$ 曲线存在困难,因此断裂力学评估方法对于缺乏疲劳资料的新型构造细节直接有效。断裂力学范畴存在三种基本的开裂形式,如图 3 所示。

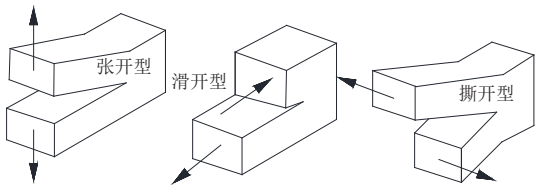


图 3 三种基本开裂形式

应力强度因子幅值是裂纹扩展的重要参数,三种基本开裂形式对应的应力强度因子幅值分别为 ΔK_I 、 ΔK_{II} 、 ΔK_{III} ,实际裂纹往往是三种基本开裂形式的组合,参考相关文献^[7,12],等效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 可由式(1)求解得到,裂纹扩展角 θ 可由式(2)求解得到。在得到了 ΔK_{eff} 和 θ 的基础上,通过设置裂纹扩展步长 da ,可以实现裂纹的扩展,并得到每一扩展步下裂纹尖端应力强度因子。以裂纹扩展至板厚 1/2 为疲劳失效判据,则对于裂纹扩展的全过程,根据 Paris 公式^[13],即式(3),可以求得每一扩展步下的疲劳次数 dN ,将 dN 进行累加即可得到疲劳寿命。

$$\Delta K_{eff} = \sqrt{\Delta K_I^2 + \Delta K_{II}^2 + \frac{\Delta K_{III}^2}{(1 - \nu)}} \quad (1)$$

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{\Delta K_I (1 - \sqrt{1 + 8\Delta K_{II}^2 / \Delta K_I^2})}{4\Delta K_{II}} \right) \quad (2)$$

式中: ν 为泊松比,钢材取 0.3。

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^m \quad (3)$$

式中: $C=5.21 \times 10^{-13} \text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$, $m=3$ ^[7]。

将初始裂纹特征化为面状形式相较于体状裂纹更为不利,结合裂纹扩展规律设定裂纹扩展步长,初始裂纹尺寸一般不大于 1 mm,本文取 0.5 mm,形状为半圆形。

3 疲劳分析简化模型

3.1 节段几何模型

对于横隔板开孔的构造细节而言,主要受到轮载作用于横隔板上方的面内荷载,因此在进行数

值模拟分析和试验研究时,均可取构造模型进行分析,而不用考虑全桥或多个横隔板节段的影响。荷载取英国规范 The Standard for Steel, Concrete and Composite Bridges: Specification for Materials and Workmanship, Steel(BS 540—1999)^[14]中的200 mm×200 mm轮载^[7],并考虑一定的超载作用。考虑以上因素,同时疲劳效应主要受单个轮载的影响,因此节段几何模型纵向取1个横隔板、横向取3个纵肋对单个开孔和新型开孔进行分析,几何模型尺寸如图4所示,加载位置位于2#纵肋腹板的正上方。

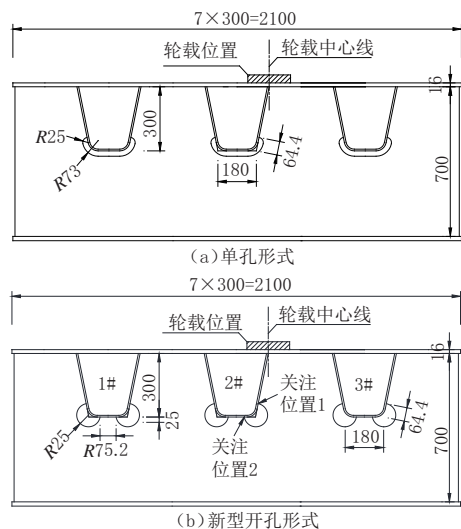


图4 几何模型尺寸(单位:mm)

模型中顶板、纵肋和横隔板的厚度分别为16、8、14 mm,单孔形式关注位置为2#纵肋右侧纵肋腹板围焊处,新型开孔形式关注位置1和2分别位于2#纵肋右侧纵肋腹板围焊和纵肋底板围焊焊趾处,焊缝焊脚尺寸为8 mm。

3.2 有限元模型

借助实体有限元分析软件,考虑焊缝的实际尺寸,对关注位置的周围区域采用Solid95单元,以确保应力结果的精度,其余区域采用Solid45单元,建立疲劳分析有限元模型,如图5所示。模型中对横隔板下方的底板进行固结约束,以模拟横隔板横向支承于钢箱梁腹板的约束作用。

4 疲劳寿命

4.1 应力分析

计算得到横隔板开孔构造细节主应力分布,分别如图6和图7所示。结果表明:在面内荷载作用下,单孔形式纵肋腹板围焊焊趾第一主应力和第三主应力分别为51.4 MPa和10.3 MPa,新型开孔形式纵肋腹板围焊焊趾第一主应力和第三主应力分别为

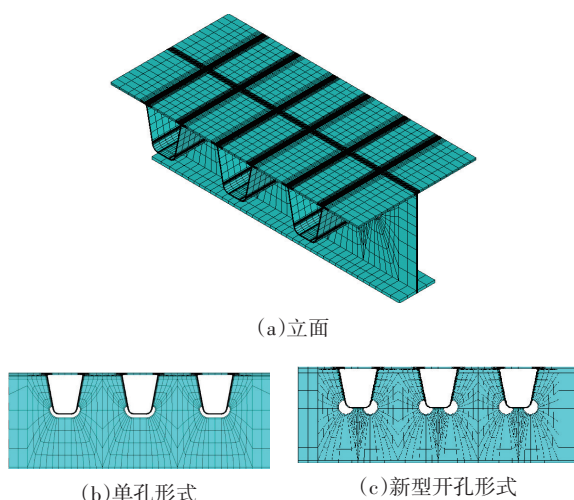


图5 有限元模型

-1.6 MPa和-5.1 MPa,纵肋底板围焊焊趾第一主应力和第三主应力分别为-7.9 MPa和-39.6 MPa,可见采用新型开孔后构造细节由主拉应力转变为了主压应力,且应力数值有所降低。新型开孔形式纵肋底板围焊焊趾拉应力幅为32.1 MPa。

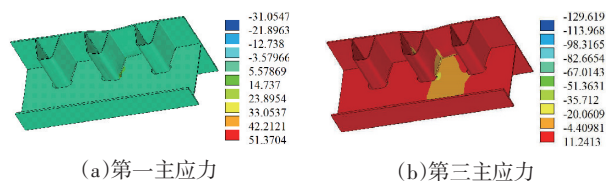


图6 单孔形式主应力分布(单位:MPa)

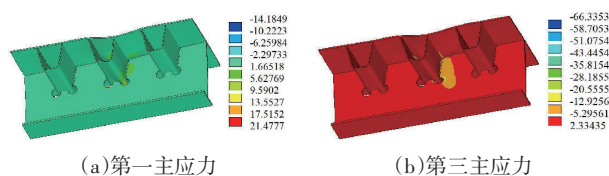


图7 新型开孔形式主应力分布(单位:MPa)

4.2 疲劳寿命

根据应力计算结果,横隔板单孔形式不利应力由纵肋腹板围焊控制,而采用新型开孔形式后,不利应力由单孔形式的纵肋腹板围焊焊趾转移至双孔形式的纵肋底板围焊焊趾。分别在单孔形式纵肋腹板围焊焊趾和新型开孔形式纵肋底板围焊焊趾处垂直于纵肋厚度方向插入初始裂纹,初始裂纹采用半径为0.5 mm的半圆形面状缺陷形式^[7],裂尖网格采用楔形体单元和Solid95单元模拟,在裂纹扩展至1/2板厚的过程中,中裂纹(即裂纹深度方向)裂尖处等效应力强度因子幅值随裂纹深度变化的规律如图8所示。

随裂纹深度增加,等效应力强度因子幅值逐渐增大,表明裂纹扩展速度逐渐加快。在裂纹扩展至板厚1/2的全过程中,等效应力强度因子幅值均大于

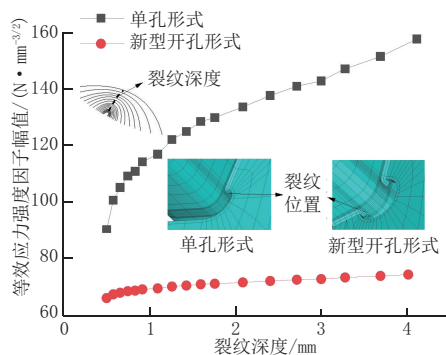


图8 等效应力强度因子幅值变化曲线

阈值 $63 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ [7],单孔形式裂纹扩展能力较强。在得到等效应力强度因子幅值的基础上,通过Paris公式,计算得到横隔板单孔形式和新型开孔形式构造细节疲劳寿命分别为356万次和1 833万次,表明横隔板新型开孔形式的疲劳性能更优。

5 结 语

本文以钢桥面板横隔板新型开孔的构造细节为研究对象,基于实体有限元软件,得到了其疲劳应力分布,并在此基础上,结合断裂力学理论对纵肋底板围焊疲劳裂纹进行了数值模拟,得到主要结论如下。

(1)相比于单孔形式,横隔板新型开孔形式的疲劳应力有所降低,且由拉应力转变为压应力,其中纵肋腹板围焊焊趾和纵肋底板围焊焊趾的主压应力分别为5.1 MPa和39.6 MPa,总体而言,横隔板新型开孔形式产生的应力水平不高。

(2)在纵肋底板围焊焊趾处引入初始缺陷,得到了等效应力强度因子幅值的变化规律。随裂纹深度增加,扩展能力逐渐加强。以裂纹扩展至1/2板厚为疲劳失效判据,钢桥面板横隔板新型开孔形式的疲

劳寿命为1 833万次,相比于单孔形式在疲劳性能上具有显著优势,下一步可对圆弧开孔半径进行优化设计,进一步提高该细节的疲劳性能。

参考文献:

[1] Doebling S W, Farrar C R. The State of the Art in Structural Identification of Constructed Facilities[R]. The ASCE committee on Structural Identification of Constructed Facilities. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1999.

[2] 周维,于浩楠.钢桥面板纵肋与横隔板交叉细节疲劳应力有限元分析[J].城市道桥与防洪,2021(11):189-191;202.

[3] 吴丽丽,姚超,郑贺崇.正交异性钢桥面板的研究进展[J].公路与汽运,2022(3):112-117;121.

[4] 邹春蓉,曹文.公路钢桥面板抗疲劳性能的模型试验方法研究[J].四川建筑,2022,42(4):223-225;229.

[5] 王春生,冒宇博,李璞玉,等.斜拉桥钢桥面板顶板-U肋-横隔板过焊孔细节群数字疲劳试验[J]交通运输工程学报,2022,22(6):67-83.

[6] 王晓,孔凯歌,伍晓伟.中外规范下钢桥面板纵肋与横隔板围焊处疲劳应力对比分析[J].西部交通科技,2023(3):169-171.

[7] 杨威.钢桥面板横隔板面内变形疲劳试验模型优化与裂纹扩展特性分析[J].广东公路交通,2021,47(2):36-39.

[8] 李学钦.钢桥面系横隔板疲劳开裂及优化研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.

[9] 何志刚,蔺鹏臻.钢箱梁横隔板弧形切口疲劳性能及构造优化研究[J].桥梁建设,2021,51(1):37-43.

[10] 何邦,吉伯海,袁周致远,等.钢箱梁横隔板弧形缺口角钢加固效果分析[J].扬州大学学报(自然科学版),2023,26(2):65-72.

[11] 张清华,李俊,袁道云,等.深圳至中山跨江通道钢桥面板结构疲劳试验研究[J].土木工程学报,2020,53(11):102-115.

[12] BS7910—1999, Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures[S].

[13] Paris P.C., Erdogan F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws [J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.

[14] BS 540—1999, The Standard for Steel, Concrete and Composite Bridges: Specification for Materials and Workmanship, Steel[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

