

钢桥面板-肋双面焊构造细节疲劳失效模式研究

吴波

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

摘要: 设置高疲劳抗力构造细节是提升钢桥面板疲劳寿命的有效途径之一, 以一种钢桥面板-肋双面焊构造细节为研究对象, 基于线弹性断裂力学原理, 利用 ABAQUS 有限元软件建立了该细节疲劳裂纹扩展子模型, 研究了疲劳加载工况下各裂纹萌生点处初始裂纹扩展能力。同时通过应力强度因子幅值对比分析, 进一步确定了该钢桥面板-肋双面焊构造细节主导疲劳失效模式。

关键词: 钢桥面板; 板-肋双面焊构造; 断裂力学; 应力强度因子幅值; 疲劳失效模式

中图分类号: U443.31

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)06-0250-03

0 引言

正交异性钢桥面板由三个不同方向的板件通过焊接连接而形成, 具有自重轻、承载能力突出等优势。作为 21 世纪大跨度桥梁中广泛应用的桥面板形式, 其静力特性、制造工艺和疲劳损伤等方面也被越来越多的学者进行研究, 其中疲劳损伤问题是钢桥面板最为关键的问题。近年来, 由于车流量增大, 重车比例增多的趋势更加显著, 钢桥面板众多构造细节往往在尚未到达设计使用年限前出现一系列疲劳裂纹, 对于钢桥面板-肋焊接细节而言, 随着疲劳损伤逐渐累积, 裂纹将裂穿顶板导致 U 肋锈蚀, 威胁结构行车安全^[1-2]。

近年来, 国内桥梁建设中陆续采用 U 肋内焊技术, 形成钢桥面板-肋双面焊构造细节以期提高疲劳抗力, 罗鹏军^[3]和张清华等^[4]分别从切口应力法和模型试验法角度证明了板-肋双面焊构造能够改善传统单面焊的疲劳抗力。然而, 获取钢桥面板典型构造细节疲劳失效模式力学特征是认识该细节疲劳性能的基础, 目前关于钢桥面板-肋双面焊构造细节的相关研究依然有待更为系统的提升与完善。断裂力学分析方法作为一种最为直接有效的手段是探究该细节疲劳特性的重要工具, 本文基于线弹性断裂力学原理, 在钢桥面板-肋双面焊构造细节裂纹萌生点处引入初始裂纹, 采用 ABAQUS 有限元软件

建立包含裂纹体的有限元模型, 通过分析裂纹潜在的扩展能力, 从而确定该细节各疲劳失效模式的疲劳性能, 在此基础上确定主导疲劳失效模式。

1 研究对象

钢桥面板板-肋构造细节根据所处位置分为横隔板节间内(RD 细节)和横隔板位置处(RDF 细节)两类^[5]。目前研究中, 横隔板节间内疲劳裂纹是主要研究热点, 且其实桥中疲劳开裂占比较大。此处主要以横隔板节间内的板-肋双面焊构造细节为研究对象, 其中全熔透双面焊技术由于焊接工艺难以保证, 分析时以工程中常见的外侧 75% 熔透的部分熔透焊为研究对象, 该细节共包含 8 种疲劳失效模式, 钢桥面板构造细节分类与双面焊疲劳失效模式见图 1。

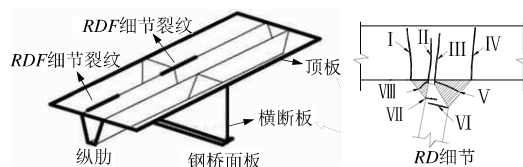


图1 钢桥面板构造细节分类与双面焊疲劳失效模式

2 节段模型选取和有限元模型建立

2.1 疲劳节段模型尺寸

以某斜拉桥工程钢桥面板为分析对象, 为反映模型实桥受力状态, 参考相关研究文献^[3], 纵向选取三跨, 即 4 个横隔板间距(横隔板间距为 2.5 m)、横向选取 5 个 U 肋作为疲劳节段模型进行分析, 主要板件厚度为: 顶板厚 18 mm, 横隔板厚 14 mm, U 肋尺寸 300 mm × 300 mm × 8 mm (上开口宽 × 高 × 板厚), U

收稿日期: 2020-12-01

作者简介: 吴波(1988—), 男, 本科, 工程师, 从事路桥设计工作。

肋横向间距为 600 mm,考虑到对称性,关注位置取第 2 跨跨中中间 U 肋与顶板相交处,所选取的疲劳节段模型与板-肋双面焊构造细节尺寸见图 2,图 2 中参数 α 和 β 分别为 50° 和 130° 。

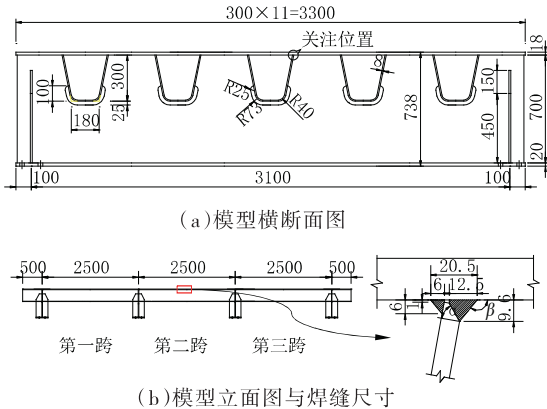


图2 疲劳节段模型和板-肋双面焊相关尺寸(单位:mm)

2.2 初始焊接缺陷和加载工况

相关研究文献表明面状缺陷相比于体缺陷更为不利,为真实反映焊接工艺所引起的初始焊接缺陷的影响,参考文献^[6],选取初始裂纹形式为半圆形裂纹,初始裂纹深度 a_0 与 $1/2$ 裂纹长度 c_0 均为 0.5 mm,节段模型疲劳车轮荷载采用欧规(Eurocode 3)标准疲劳车辆荷载模型Ⅲ形式(单车模型)^[7],单轮轮载面积为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,轴重为 120 kN,考虑 3 倍超载影响,选取的受力较为不利加载位置为单侧前后轮对称作用于第二跨板-肋双面焊构造细节跨中关注位置处。

2.3 有限元模型

采用 ABAQUS 有限元软件建立了适合本文疲劳失效模式分析的有限元模型,见图 3。

建模过程如下:先建立三跨 5U 肋疲劳节段有限元模型,模型横隔板底部区域 $200\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ (横向 $\times$ 纵向)进行 X 向、Y 向和 Z 向位移约束,以模拟实际横隔板远离约束部分处于弹性支承状态。然后跨中加载区域中间位置横向取 150 mm,纵向取 400 mm,竖向取 U 肋高度作为裂纹扩展有限元子模型,并对板-肋双面焊构造细节焊缝区域进行网格细化,焊缝区域网格尺寸控制在 3 mm 内,以确保分析结果的准确性。疲劳节段有限元模型实体单元为 C3D8R,裂纹扩展子模型实体单元为 C3D20R,偏安全考虑,不计铺装层对轮载的扩散作用。

3 各疲劳失效模式结果分析

3.1 应力强度因子

应力强度因子反映了裂纹的扩展能力,其数值

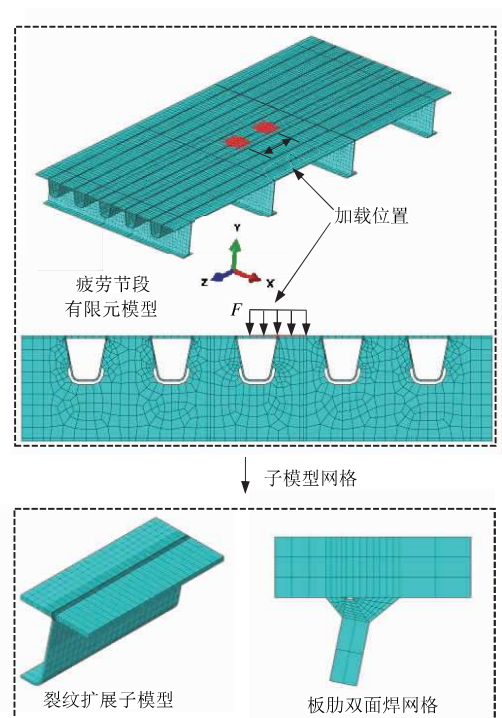


图3 有限元模型

越大,裂纹扩展越快。基于线弹性断裂力学原理,采用相互作用积分方法裂尖 I 型(张开型)、II 型(滑开型)和 III 型(撕开型)应力强度因子,参考文献^[6],等效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 可由 I 型应力强度因子幅值 ΔK_I 、II 型应力强度因子幅值 ΔK_{II} 和 III 型应力强度因子幅值 ΔK_{III} 通过式(1)计算得到。

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

当等效应力强度因子幅值达到扩展阈值 ΔK_{th} ($\Delta K_{th} = 63\text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$) 时裂纹开始扩展,其数值越大扩展能力越强。

3.2 疲劳失效模式分析

相关文献研究表明焊缝熔透率达到 75% 可避免沿焊缝扩展的疲劳裂纹^[1],即图 1 中的模式 V 和模式 VIII,本次疲劳失效模式分析主要针对沿顶板开裂的模式 I 到模式 IV,及沿 U 肋开裂的模式 VI 和模式 VII。

将初始焊接缺陷引入到各疲劳失效模式裂纹萌生点处,以模式 I 为例,裂纹位置示意图 4。

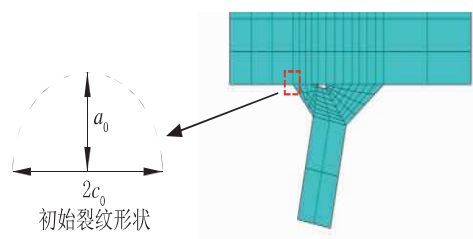


图4 模式 I 裂纹位置示意图

通过有限元数值计算,提取各失效模式裂纹前缘点等效应力强度因子幅值,将裂尖前缘路径按照从0到1进行划分,计算结果见图5。

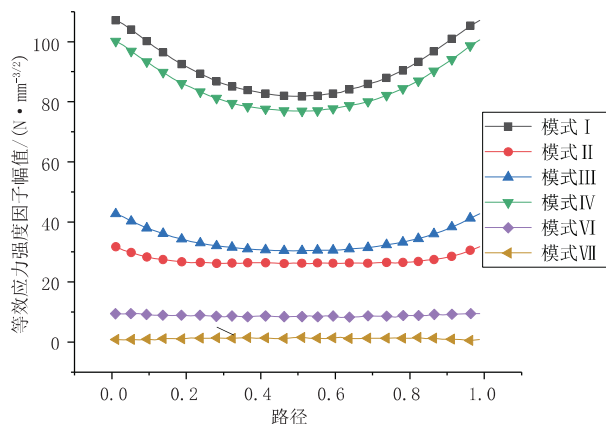


图5 等效应力强度因子幅值变化曲线

由图5得到:(1)失效模式I和失效模式IV等效应力强度因子幅值达到扩展阈值,裂纹具有扩展能力;(2)板-肋双面焊构造细节焊根部位在本文所选取的初始焊接缺陷下不会引起构造细节疲劳开裂,该部位不是焊接质量控制的重点;(3)沿U肋厚度方向开裂的疲劳失效模式能够承受实桥3倍的超载影响,其扩展能力低于沿顶板厚度方向开裂的疲劳失效模式。

当疲劳荷载较大时,由本文计算结果来看,沿顶板开裂的失效模式I更容易产生疲劳裂纹,国内研究者通过对深中通道钢桥面板双面焊构造细节足尺模型试验,获得了该失效模式的疲劳裂纹^[8],见图6。

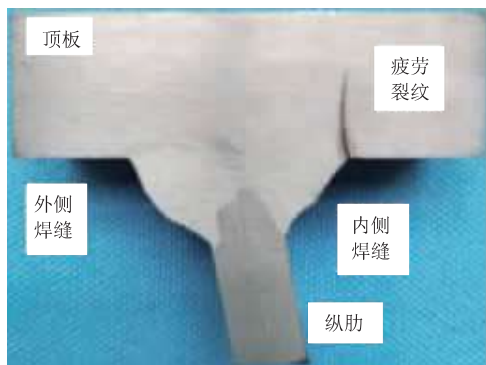


图6 文献[8]图片

由于沿顶板厚度方向开裂的疲劳失效模式I和失效模式IV初始裂纹前缘等效应力强度因子幅值数值较为接近,并且均具有扩展能力,此处以裂纹扩展至板厚1/2(即9mm)为疲劳失效判据,裂纹扩展步长控制在0.4mm左右,得到两种疲劳失效模式的等效应力强度因子幅值随裂纹深度方向的变化曲线见图7。

计算结果表明:(1)疲劳失效模式I和失效模式

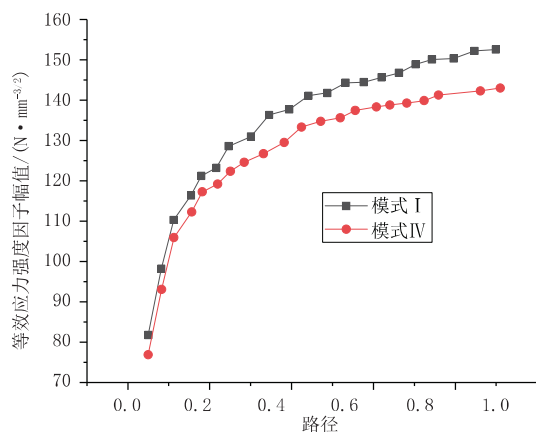


图7 模式I和模式IV等效应力强度因子幅值对比

IV在达到9mm前,二者扩展速率始终不断增大,随裂纹深度增加,扩展速率的变化率逐渐减小,在达到9mm时两者扩展速率有达到最大值的趋势;(2)在本文加载工况下,模式I为板-肋双面焊构造细节主导疲劳失效模式,其扩展速率始终大于模式IV;(3)两种疲劳失效模式在扩展过程中,由于等效应力强度因子幅值较大其扩展阈值,表明裂纹整体均具有较强的扩展能力,在焊接过程中应避免顶板焊趾处引入夹杂等缺陷,从源头控制裂纹的发生。

4 结论

本文基于线弹性断裂力学基本理论,采用ABAQUS有限元软件,建立了包含裂纹体的钢桥面板-肋双面焊构造细节的数值有限元分析模型,在本文节段模型尺寸条件下主要得到以下结论:

(1)采用ABAQUS有限元软件,实现了疲劳裂纹扩展数值模拟。

(2)分析了板-肋双面焊构造细节各疲劳失效模式等效应力强度因子幅值水平,阐明了较为容易发生疲劳裂纹的失效模式。

(3)在本文加载工况下,确定了疲劳失效模式I为板-肋双面焊构造细节的主导疲劳失效模式。

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,2017,30(3):14-30.
- [2] KLOSTEIN M. H. Fatigue Classification of Welded Joints in Orthotropic Steel Bridge Decks [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2007.
- [3] 罗鹏军,张清华,龚代勋,等.钢桥面板U肋与顶板双面焊连接疲劳性能研究[J].桥梁建设,2018,48(2):19-24.
- [4] 张清华,李俊,郭亚文,等.正交异性钢桥面板结构体系的疲劳破坏模式和抗力评估[J].土木工程学报,2019,52(1):71-81.
- [5] 赵秋.钢桥[M].北京:人民交通出版社,2017.
- [6] 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

(下转第277页)

- [5] GB/T 51336—2018, 地下结构抗震设计标准[S].
- [6] 杜修力, 刘洪涛, 路德春, 等. 装配整体式地铁车站侧墙底节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4):38-47.
- [7] 周龙壮, 高向宇, 陈娟, 等. 钢管混凝土 Y 形柱及混凝土平台结构抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2015, 45(3):31-38.
- [8] H. Huo, A. Bobet, G. Fernandez, etc. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: Evaluation of the failure of the Daikai station [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12):1522-1533.
- [9] GBJ 11—89, 建筑抗震设计规范[S].
- [10] 马宏旺, 吕西林, 陈晓宝. 建筑结构“中震可修”性能指标的确定方法[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(5):26-32.
- [11] FEMA 273. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Rehabilitation of Buildings [M]. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. September, 1996.
- [12] California Office of Emergency Services, Vision 2000: Performance based seismic engineering of buildings, Structural Engineering Association of California[M]. Vision 2000 Committee, California, 1995.
- [13] FEMA 356. Pre-Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings [M]. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
- [14] EC8. Euro code 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. General rules, Seismic Actions and Rules for Buildings [M]. EN1998-1:2003, British Standards Institution, London, 2003.
- [15] Building Center of Japan. Report of development of new engineering framework for building structures[R]. Integrated Technical Development Project, Ministry of Construction.
- [16] 门进杰. 不规则钢筋混凝土框架结构基于性能的抗震设计理论和方法[D]. 陕西西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [17] 田小红, 苏明周, 连鸣, 等. 高强钢组合 K 形偏心支撑框架结构振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3):56-63.
- [18] 杨勇, 王婷, 陈伟, 等. 预应力钢带加固震后混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2016, 48(1):29-35.
- [19] 黄远, 张锐, 朱正庚, 等. 含三明治外墙挂板框架结构抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(2):152-157.
- [20] 张耀庭, 杜晓菊, 杨力. RC 框架结构基于构件损伤的抗震性能评估研究[J]. 湖南大学学报, 2016, 43(5):9-21.
- [21] 邓雪松, 张超, 曹均勇, 等. 装配式减震墙板 RC 框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5):170-176.
- [22] 黄远, 张锐, 朱正庚, 等. 现浇柱预制梁混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1):44-50.
- [23] 杨伟松, 郭迅, 许卫晓, 等. 翼墙 - 框架结构振动台试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(2):96-103.
- [24] 樊禹江, 余滨杉, 王社良. 再生混凝土框架结构地震作用下随机损伤与评估分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5):97-102.
- [25] 吕西林, 张翠强, 周颖, 等. 半再生混凝土框架的抗震性能[J]. 中南大学学报, 2014, 45(4):1214-1226.
- [26] 余江滔, 张远森, 陆洲导, 等. 注胶修复混凝土框架结构模型振动台试验[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增 1):208-212.
- [27] 程春兰, 周德源, 王斌. 双钢板混凝土组合剪力墙试验研究及结构弹塑性时程分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(1):255-260.
- [28] 钱嫁茹, 韩文龙, 赵作周, 等. 钢筋套筒灌浆连接装配式剪力墙结构三层足尺模型子结构拟动力试验[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3):26-38.
- [29] 王啸霆, 王涛, 李文峰, 等. 装配整体式钢筋混凝土剪力墙子结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6):1-11.
- [30] 王飞, R. Shahneam. 基于振动台实验的结构损伤识别研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38(1):129-135.
- [31] 李刚, 黄小坤, 刘瑄, 等. 底部预留后浇区钢筋搭接的装配整体式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5):193-200.
- [32] 梁兴文, 辛力, 邓明科, 等. 高强混凝土剪力墙抗震性能及其性能指标试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11):37-45.
- [33] 祁勇, 朱慈勉, 钟树生. 不同肢厚比框支短肢剪力墙斜柱式转换层结构抗震试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(12):155-159.
- [34] 韩春, 李青宁, 姜维山. 框架 - 剪力墙组合结构的拟动力试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(1):23-28.
- [35] 邓明科, 梁兴文, 辛力. 剪力墙结构基于性能抗震设计的目标层间位移确定方法[J]. 工程力学, 2008, 25(11):141-148.

(上接第 252 页)

- 值模拟方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7):89-95.
- [7] European Committee for Standardisation. Eurocode 3, Design of Steel Structures[S]. EN1993-2, Brussels, Belgium, 2005.
- [8] 张清华, 李俊, 袁道云, 等. 高疲劳抗力钢桥面板的疲劳问题 I: 模型试验 [J/OL]. 中国公路学报 :1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20201217.1008.002.html>.