

文章编号:1671-6833(2015)02-0022-06

钢桥面板 U 肋与顶板焊根疲劳寿命预测方法对比分析

杨沐野¹, 吉伯海¹, 傅中秋¹, 徐汉江²

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 苏州市航道管理处, 江苏 苏州 215000)

摘 要: 为了对正交异性钢桥面板 U 肋与顶板焊缝疲劳细节进行轮载作用下受力分析及损伤度预测影响因素分析, 以南京长江三桥及实测车流数据为背景, 建立多种有限元模型, 对不同的疲劳效应计算方法进行对比分析. 结果表明: 钢桥面板的应力幅计算中, 采用国内车轮横向分布模型所计算的轮迹修正系数约为欧洲规范车轮横向分布模型的 0.7~0.8 倍. 基于累计损伤破坏准则, 名义应力法偏安全; 有效缺口应力法的预测稳定性不够; 针对文中钢桥面板细节的有限元疲劳寿命预测, 1 mm 热点应力法理论性强, 结果稳定性好, 结果最为精确. 建议使用该方法对钢桥面板顶板与横隔板细节进行疲劳预测.

关键词: 钢桥面板; 疲劳寿命预测; 轮载横向分布; 有限元模型

中图分类号: U441+.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.006

0 引言

正交异性钢桥面板在国内外大跨径钢桥中得到广泛应用. 日本、欧美等国家较早使用正交异性钢桥面板, 这些国家发现钢桥面板焊接结构疲劳开裂问题普遍存在, 有些甚至在短时间内引发桥梁脆断事故^[1-2]. 国内一些大跨径缆索支承桥梁在建成运营不久后, 也发现有疲劳开裂的情况, 主要出现在顶板、U 肋及横隔板位置^[3]. 在常见钢桥面板疲劳裂纹危害中钢桥面板顶板与 U 肋连接处的疲劳裂纹危害最为严重, 焊接缺陷引起的顶板裂纹多发生在焊趾处或焊跟处, 并沿顶板厚度方向贯通, 如图 1 所示.

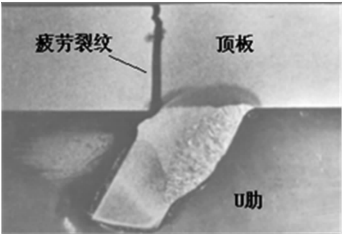


图 1 钢桥面板顶板贯穿裂纹

Fig. 1 Fatigue cracks through deck-plate

正交异性钢桥面板受桥面体系与盖板体系的共同影响, 一旦出现疲劳裂纹, 维修、加固困难. 桥

梁运营阶段长期的车辆荷载是导致正交异性钢桥面板疲劳破坏的主要原因^[4], 随着我国交通流量急剧增加, 重载和超载车辆增多, 在对桥面板构件进行长期疲劳损伤预测研究时, 需要对交通流进行同步预测. 钢桥面板构件细节局部应力计算是分析疲劳损伤的重要依据. 针对顶板部位疲劳细节, 国际焊接协会 IIW、欧洲规范 Eurocode 对其局部应力计算提供了相关建议; 文献[5]采用板壳单元模型对顶板细节的应力进行计算^[5]; 对于横隔板处的顶板细节, 文献[6]简化顶板并考虑桥面铺装、轮迹分布的影响.

笔者以南京长江三桥及其实测车流数据为背景, 通过非线性回归的方法给出交通流预测数学模型, 对钢桥面板顶板的两处疲劳细节进行轮载作用下受力分析及影响因素分析. 为讨论模型对疲劳损伤预测准确性的影响, 建立多种局部模型, 基于不同的疲劳效应计算方法, 对细节处损伤度及寿命进行对比分析.

1 交通流统计预测

将南京长江三桥的交通流数据作为基础, 采用基于概率论的统计预测方法进行交通流量预测. 一般认为仅载重较大的车辆才会引起桥梁结

收稿日期:2014-10-25; 修订日期:2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278166); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120094110009); 江苏省交通科学研究计划项目(2011Y09-1, 2012Y13)

作者简介: 杨沐野(1989-), 女, 江苏常州人, 河海大学博士生, 主要从事钢桥疲劳与维护研究, E-mail: ymy410@163.com.

构的疲劳损伤,因此疲劳车辆荷载通过对大桥 50 kN 以上的实测车流统计得到^[7]. 据 2006 年~2010 年 8 月各类货车等效轴重均值统计分析,不同车型的车辆轴重及轴距如表 1 所示. 采用最大轴载 140 kN(即车轮荷载 70 kN)的单车轮进行加载分析,单轮接触面积为 200 mm×300 mm.

由大桥 2006~2010 年 7 月、8 月的交通流数据可知,大桥 50 kN 以上的车流量年增长率为 29.0%、7.2%、4.8% 及 14.2%. 为准确描述交通流量未来的发展规律,这里采用非线性组合回归方法,建立基于多项式回归与对数表达式回归的交通流量数学模型,如图 2 所示. 由图 2 可知,2006~2025 年大桥日平均交通流量增长较快,2025~2070 年大桥交通流量呈缓和增长趋势,2070 年后交通流量趋于饱和.

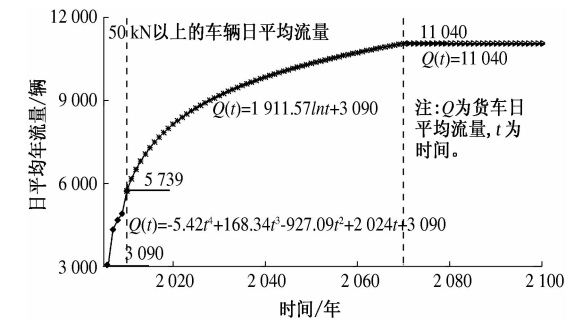
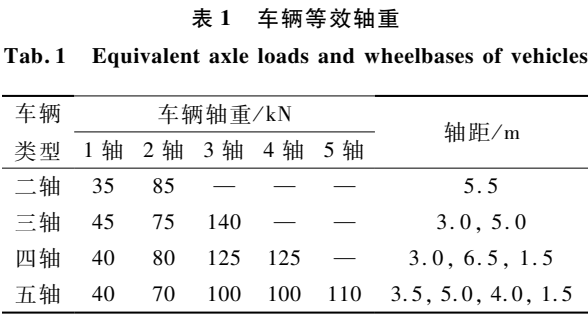


图 2 日平均交通流量组合回归曲线

Fig.2 Composite curve of bridge average daily traffic flow

2 损伤度预测影响因素

2.1 全桥与局部模型的影响

以南京长江三桥作为工程背景,该桥为国内第一座钢塔斜拉桥.主跨跨径为 648 m,主梁采用连续扁平钢箱梁,并采用闭口 U 肋加劲的正交异性钢桥面构造.

大桥有限元模型通过 ANSYS 软件建立.跨中节段的钢箱梁采用壳单元 Shell63 模拟,其余位置的钢箱梁、主塔采用梁单元 Beam4 模拟,拉索采用杆单元 Link10 模拟.假设主梁变形符合平截面

假定,跨中节段的钢箱梁与相邻钢箱梁间建立刚域.跨中节段的钢箱梁模型,网格尺寸为 0.2 m,车轮加载位置进行局部细化,网格尺寸为 0.01 m×0.01 m.为了模拟车辆荷载作为质量-弹簧模型在钢桥面板上运行的过程,采用 Mass21 质量单元模拟车辆重量,并通过 Combine14 弹簧单元将质量单元与主梁进行连接.图 3 所示为大桥的全桥混合单元模型.

文献[8]认为钢桥面板模型横向取 6 根及以上 U 肋,纵向取 3 个以上横隔板间距时,其计算结果与整体模型的计算结果相差不大.为节约计算空间,可建立钢桥面板局部板壳模型.在钢桥面板横向取 7 根 U 肋,纵向取 6 个横隔板间距,如图 4 所示.

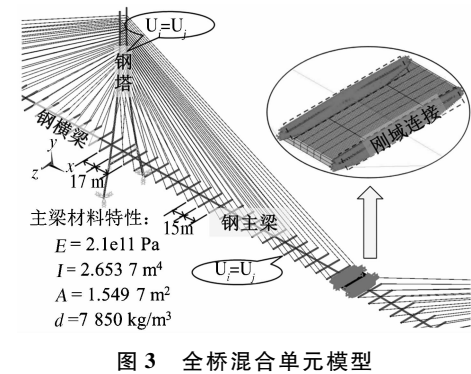


图 3 全桥混合单元模型

Fig.3 Hybrid finite element model of bridge

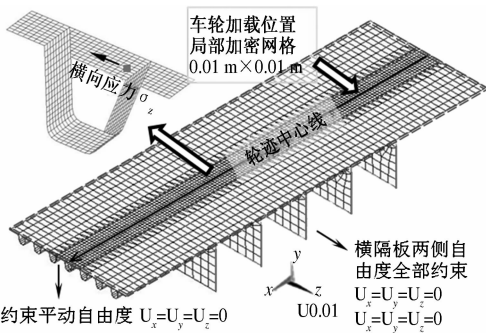


图 4 钢桥面板局部模型

Fig.4 Local model of orthotropic steel deck

由于顶板疲劳裂纹主要沿垂直于纵向焊缝开展,根据国际焊接协会推荐,取距离焊缝 1.5 t(顶板厚度)的横向应力作为参考指标^[9].图 5 为钢桥面板顶板疲劳细节示意图.

图 6 为钢桥面板顶板细节在两种模型下分析得到的应力影响线.横隔板处、横隔板间顶板细节的应力影响线形状一致.车轮到达计算点位置时,横向应力峰值明显.两模型分析得到的顶板细节应力幅相差均小于 5.0%.采用局部板壳模型分

析得到的结果合理,且可以提高计算效率,下文中采用钢桥面板局部模型进行讨论.

2.2 纵向应力幅叠加效应

在分析多轴车轮作用下车轮间相互影响时,采用的表 1 中三轴车的轴重与轴距加载. 图 7 为三轴、单轴车轮作用下顶板细节的应力影响线,采用单轮 P_1 的横向加载方式. 在三轴车轮作用下,顶板细节出现 3 个明显的横向应力峰值,后轴横向应力峰值最大. 单轴作用引起的横向应力峰值与三轴加载吻合,车轮纵向间的相互影响很小. 在钢桥面板的应力幅计算中,可以忽略车轮作用的

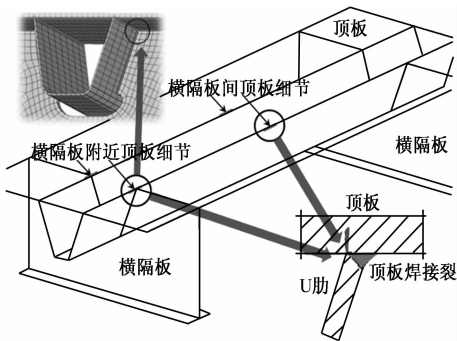


图 5 钢桥面板顶板疲劳细节
Fig.5 Fatigue details of orthotropic steel deck plate

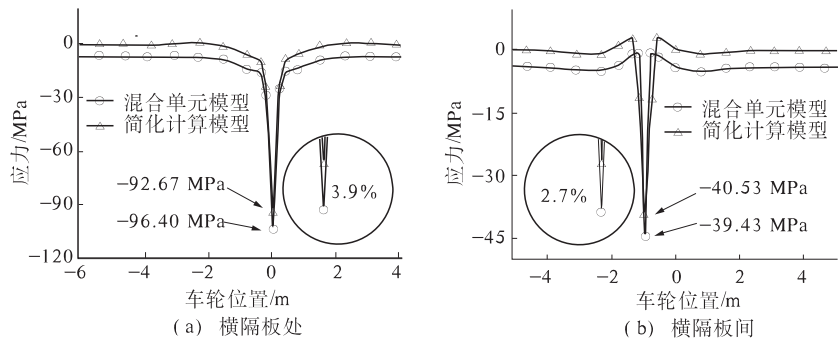


图 6 顶板疲劳细节应力影响线
Fig.6 Stress influence line of fatigue details in deck plate

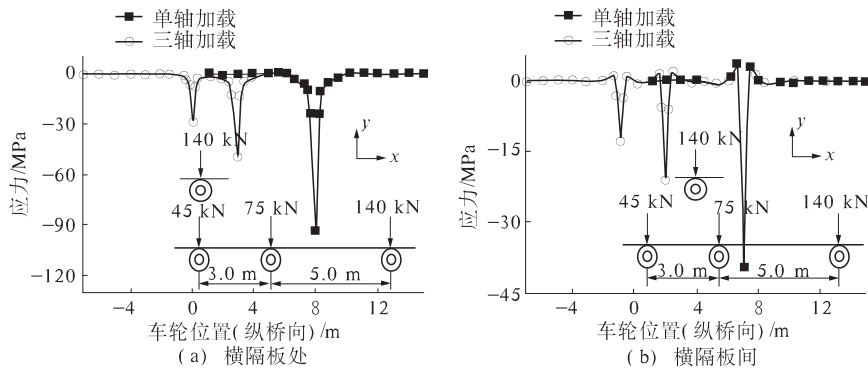


图 7 三轴、单轴车轮作用下顶板疲劳细节应力影响线
Fig.7 Stress influence line of fatigue details under triaxle and uniaxial vehicle load

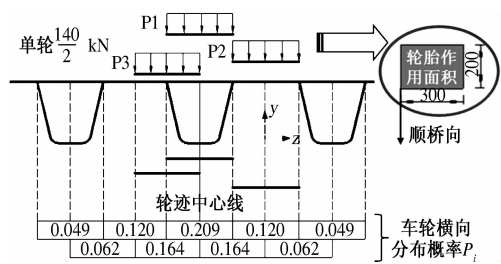
相互影响作用^[10],因此,在以下计算分析中,在顺桥向仅考虑单轴车轮效应.

2.3 车轮横向分布的影响

对钢桥面板局部模型进行加载分析,参考虎门大桥车轮轨迹统计分析结果,假定横桥向以 150 mm 为一种分布情况^[11]. 因车轮在某些位置行驶概率较小,这里只分析 P1,P2,P3 3 种,加载工况及车轮横向分布概率如图 8 所示.

图 9 为单轮作用下,横向 3 种加载位置对应

的顶板细节应力影响线. 在横隔板处,P1 位置对疲劳细节受力较为不利,横向应力峰值达到 -93.04 MPa;单轮 P2 作用下,疲劳细节应力峰值为正值,这是由 U 肋与横隔板交接处刚度突变引起的. 在横隔板间,单轮 P2 加载对疲劳细节受力较为不利,横向应力峰值达到 -73.62 MPa. 由图 9 可知,对于两个不同纵向位置的顶板细节,横向不利加载位置并不一致,这与横隔板对顶板与 U 肋刚度的局部补强作用有关.



应力计算模型如图 10 所示,顶板细节考虑焊缝未熔透率为 40%. 疲劳细节位置网格细化尺寸为 1 mm.

(4)有效缺口应力法. 在焊接接头处,不规则的焊缝缺陷采用有效半径 $r=1\text{ mm}$ 半径的虚拟圆孔模拟缺口^[12]. 图 11 为顶板细节的有效缺口应力计算模型.

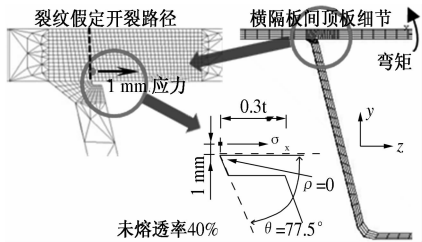


图 10 1 mm 热点应力法计算模型

Fig. 10 1 mm hot spot method example of FEM model

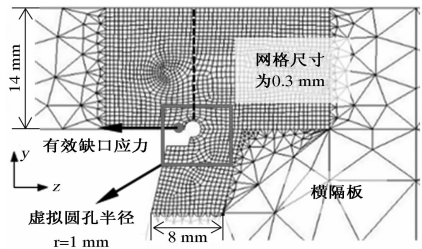


图 11 有效缺口应力计算模型

Fig. 11 Notch stress method example of FEM model

这 4 种方法的计算应力幅等效换算与局部板壳单元法一致. 将以上这 4 种应力计算方法,与上文中钢桥面板局部板壳模型的计算结果进行对比,并用前文中得到的细节处修正系数对等效应力幅进行修正,修正系数 = 冲击系数 \times 轮迹修正系数.

3.2 疲劳细节预测方法对比

为比较各疲劳评估方法对应的顶板细节损伤情况,需根据实际情况选择合适的 S - N 曲线. 在失效概率 2.28% 情况下,这 4 条 S - N 曲线如图 12 所示.

参照上文预测未来 120 年的日交通量确定荷载循环数,由累积损伤定律进行损伤度计算. 表 3 列出了顶板上两处细节在同一失效概率 2.28% 下使用 50 年后的损伤度.

对于两类细节,名义应力法计算得到的疲劳损伤度都为最大,都为 1 mm 热点应力法对应的疲劳损伤度的 2 倍以上;有效缺口应力法对两类细节计算的损伤度最不稳定. 对该类钢桥面板细节的损伤预测,理论上是热点应力法最为精确,但

在工程应用中依然是名义应力最为适用. 缺口应力在焊缝处的局部应力变化陡峭,且缺口应力受到缺口半径与板厚之比 r/t 影响,在有限元模拟时相较其他方法更为不稳定,仍需对模型细节进行修正.

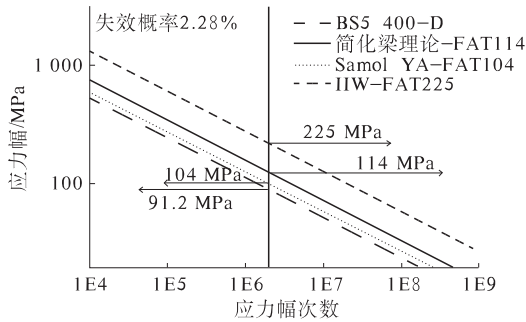


图 12 顶板细节 S - N 曲线

Fig. 12 S - N curves of deck plate details

表 3 不同方法计算的疲劳损伤度
Tab. 3 Fatigue damage corresponding to different methods

疲劳评价方法	50 年损伤度		两细节寿命比
	横隔板处	横隔板间	
板壳	1.14	1.09	1.04
名义	1.63	1.52	1.06
热点	0.80	0.69	1.08
缺口	1.60	0.76	1.80

4 结论

(1)采用局部模型分析疲劳受力具有合理的精度. 同时在钢桥面板的应力幅计算中,可以忽略纵向车轮间的相互影响作用,车轮横向分布情况对顶板细节疲劳寿命预测影响较大.

(2)基于累计损伤破坏准则,名义应力法偏安全,建议作为构件理想状态下寿命评估参考值;有效缺口应力法仍需对模型细节进行更深入的研究修正以确保预测结果的稳定性.

(3)针对文中钢桥面板细节的有限元疲劳寿命预测,1 mm 热点应力法理论性强,结果稳定性好,结果最为精确. 建议使用该方法对钢桥面板顶板与横隔板细节进行疲劳预测.

参考文献:

[1] WOLCHUK R. Lessons from weld cracks in orthotropic decks on three european bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(1):75 ~ 84.
[2] CUNINGHAME J R, BEALES C. Fatigue crack locations in orthotropic steel decks[C]. International Association for Bridge and Structural Engineering, 1990.

- [3] 童乐为, 沈祖炎. 正交异性钢桥面板疲劳验算[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 16–21.
- [4] 郭彤, 李爱群. 基于长期监测数据的桥面板焊接细节疲劳寿命评估[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6): 66–72.
- [5] SUSUMU I. Wheel trucking test for weld of U-shaped rib and deck plate in the orthotropic steel deck[R]. Japan Bridge Association, 2006.
- [6] DE J F B P, KOLSTEIN M H, BIJLAARD F S K. Research project TU delft; behaviour conventional bridge decks and development of renovation techniques [C] Proc. of 2004 Orthotropic Bridge Conference, ASCE, Sacramento, CA, 2004: 25–27.
- [7] BSI. BS7608. Code of practice for Fatigue design and assessment of steel astructures[S]. BSI. 1993.
- [8] SAMOL Y, KENTARO Y. Fatigue durability evaluation of trough to deck plate welded Joint of orthotropic steel deck[J]. Japan Society of Civil Engineers A, 2008, 64(3): 603–616.
- [9] HOBACHER A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components [M]. Shaker Heights, OH; Welding Research Council, 2009.
- [10] 周泳涛, 刘延芳, 翟辉, 等. 公路钢桥疲劳设计横向多车效应分析[J]. 公路交通科技, 2010, 27(9): 80–84.
- [11] 崔冰, 吴冲, 丁文俊, 等. 车辆轮迹线位置对钢桥面板疲劳应力幅的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(3): 19–23.
- [12] HOBACHER A F. The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components-A comprehensive code recently updated [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(1): 50–58.

Contrastive Analysis of Fatigue Life Prediction Methods for Welding Roots in U-Rib and Orthotropic Steel Bridge Deck

YANG Mu-ye¹, JI Bo-hai¹, FU Zhong-qiu¹, XU Han-jiang²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Suzhou Waterways Management Division, Suzhou 215000, China)

Abstract: Based on the 3rd Nanjing Yangtze River Bridge and the measured data of traffic, the analysis of the stress and damage prediction influencing factors of the fatigue details on welding roots in U – Rib and orthotropic steel bridge deck under the and the wheel load is made. Based on the cumulative damage failure criterion, fatigue damage degree calculated by nominal stress method is more reliable and notch stress is not stable while compare to other methods. For the steel deck plate details in this paper, FE analysis prediction of fatigue life showed that 1mm hot spot stress method is of strong theory and most accuracy results. This approach is recommended for predicting the fatigue life of details on welding roots in U – Rib and orthotropic steel bridge decks.

Key words: orthotropic steel deck; fatigue life prediction; transverse running locations distribution; FEM analysis