

钢桥面板 U 肋与盖板焊缝构造细节疲劳性能评估

陈一馨¹, 吕彭民¹, 郭成军², 李大涛¹, 王斌华¹

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 辽宁省公路工程监理咨询有限公司, 辽宁 沈阳 110005)

摘 要:为了评估正交异性钢桥面板 U 肋与盖板焊缝构造细节的疲劳性能,以九江长江公路大桥钢箱梁实际结构为研究对象,设计疲劳试样进行疲劳试验,得到用于该构造细节处疲劳寿命评估的失效概率分别为 50% 及 2.3% 的 $\Delta\sigma-N$ (应力幅-循环次数) 曲线,参照欧洲 EC. 3 规范规定,将所得疲劳曲线延长至长寿命区,提出适合该细节处的疲劳设计曲线及其方程。依据实测车辆荷载谱及简化的钢桥有限元模型,选择合理的加载方式与荷载冲击系数,计算得到构造细节疲劳关注点的应力-时间历程曲线及名义应力谱,并对该构造细节的疲劳寿命进行评估。研究结果表明:在实测车辆荷载谱作用下,该构造细节处最大应力幅为 45.39 MPa,小于疲劳截止限,该细部构造满足疲劳设计要求;研究成果可为公路大桥维修保养和健康监控等提供参考依据。

关键词:桥梁工程;焊接细节;疲劳设计曲线;疲劳强度;疲劳验算

中图分类号:U441.4

文献标志码:A

Study on fatigue performance of orthotropic steel bridge deck U-rib and cover weld structure

CHEN Yi-xin¹, LU Peng-min¹, GUO Cheng-jun², LI Da-tao¹, WANG Bin-hua¹

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology & Equipment of the Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Liaoning Road & Bridge

Construction Group Co Ltd, Shenyang 110005, Liaoning, China)

Abstract: To study the fatigue performance of orthotropic steel bridge deck U-rib and cover weld structure, the steel box girder in the Jiujiang Yangtze bridge was chosen as the object and the fatigue samples were designed for fatigue test. The $\Delta\sigma-N$ curves of the weld structure, whose failure probabilities were 50% and 2.3% respectively, were obtained by the fatigue test. This paper extended the fatigue curves to the long-life span and proposed adequate fatigue design curves and calculation equation for the weld structure following the specification of EC. 3. Based on the measured data of the vehicle load spectrum and simplified finite element model of the steel bridge, the stress-time curves and the nominal stress spectrum were obtained using reasonable loading method and load impact coefficient and the fatigue strength of the weld structure was evaluated. The results show that the maximum stress amplitude value of the weld structure is 45.39 MPa under the vehicle load spectrum, which is less than the fatigue cut-off limit, and the fatigue strength of the weld structure meets the fatigue design requirements. The results could provide reference for maintenance and health monitoring of the bridge. 6 tabs, 11 figs, 14 refs.

Key words: bridge engineering; weld structure; fatigue design curve; fatigue strength; fatigue evaluation

0 引 言

正交异性钢桥面板因其轻质、高强、施工快的优点已在国内外大中跨度的桥梁中得到广泛应用^[1]。正交异性钢桥面板是在 20 世纪 50 年代初期出现的。开始时纵肋为开口截面,20 世纪 60 年代逐渐改为闭口截面^[2]。然而,正交异性钢桥面板结构构造复杂,由于焊接造成的残余应力、焊接缺陷、施工质量等因素的影响,容易产生疲劳损伤,U 肋与盖板焊缝连接处是正交异性钢桥面板中疲劳问题最易发生的地方之一。

U 肋与顶板焊缝焊根处出现疲劳裂纹在日本正交异性钢桥上数十年前已经被发现,而且受到了越来越多的关注^[3-4]。Xiao 等对正交异性钢桥面板 U 肋与桥面板连接处焊缝进行了较精细的应力分析与疲劳评估,得出 U 肋与顶板焊缝开裂主要是焊趾和焊根处的裂纹^[5];Samol 等对正交异性钢桥面板 U 肋与桥面板焊缝构造细节进行了疲劳试验并评估其疲劳性能,根据试验结果得出,焊根位置比焊趾位置更容易发生裂纹^[6]。中国某桥在 2008 年进行裂缝检查,发现大量桥面板裂缝,超声波检测结果表明:裂缝发端于 U 肋与顶板焊缝的焊根处,裂缝从焊根处斜向上沿焊缝与母材边界向上延伸直至裂穿顶面^[7],若不及时维修加固,会不断扩展,导致钢箱梁承载力下降,给大桥带来极大的安全隐患。

本文以九江长江公路大桥主桥钢箱梁结构为研究对象,根据该桥钢箱梁实际结构设计疲劳试样模拟 U 肋和盖板焊缝构造细节处开裂。通过疲劳试验得到该构造细节处的 $\Delta\sigma-N$ 曲线。本文疲劳强度验算时,采用课题组实地测量整理所得的典型车辆荷载谱,选取了合理的荷载冲击系数,利用 ANSYS APDL 编写命令流进行结构分析及应力计算,得到典型车辆荷载作用下关注点的时间-应力历程,通过雨流计数法得到应力循环峰值谱,并对结构细部构造进行疲劳强度评估。

1 钢桥面板 U 肋与盖板焊缝构造细节疲劳试验

为研究正交异性钢桥面板 U 肋和盖板焊缝构造细节的疲劳失效情况,本次试验共进行了 13 组试样的疲劳试验。U 肋与盖板通过单面施焊,焊缝形式为开坡口的贴角焊,试样焊接工艺与实桥相同。试样结构尺寸如图 1 所示;试验及布片如图 2 所示,图中,1~9 表示应变片位置。

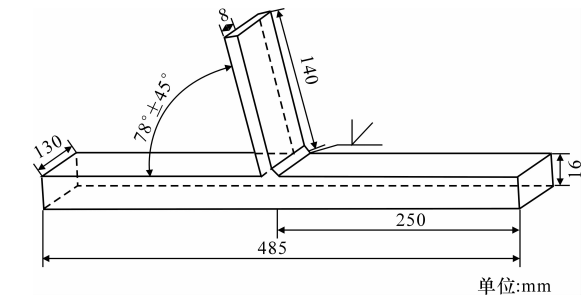


图 1 试样结构尺寸
Fig. 1 Structure and size of sample

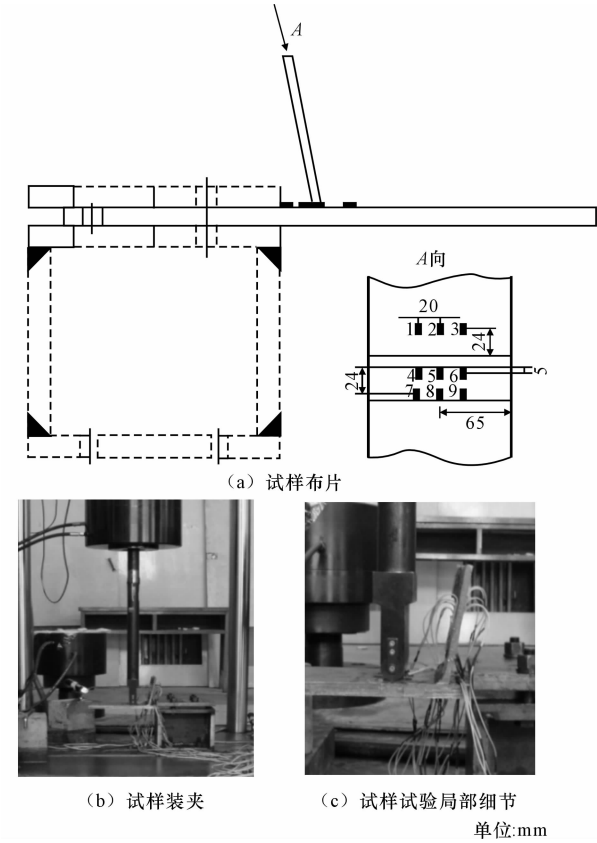


图 2 试样试验

Fig. 2 Sample test

疲劳试验得到有效数据共计 9 组,见表 1。

表 1 试样有效数据结果汇总
Tab. 1 Test results of samples

试样编号	应力幅 $\Delta\sigma$ /MPa	循环次数 N /次	$\lg(\Delta\sigma)$	$\lg(N)$
SY-1-1-3	144.26	999 303	2.159 1	5.999 7
SY-1-1-4	181.79	701 201	2.259 6	5.845 8
SY-1-1-6	156.77	751 784	2.195 3	5.876 1
SY-1-1-7	131.75	952 206	2.119 7	5.978 7
SY-1-1-8	125.49	1 744 220	2.098 6	6.241 6
SY-1-1-9	156.77	745 307	2.195 3	5.872 3
SY-1-1-10	156.77	1 000 852	2.195 3	6.000 4
SY-1-1-11	156.77	769 714	2.195 3	5.886 3
SY-1-1-12	156.77	593 259	2.195 3	5.773 2

根据试验数据,通过最小二乘法对此构造细节应力幅和疲劳循环次数进行回归统计,得到该处 $\lg(\Delta\sigma)$ - $\lg(N)$ 图(图 3)及 $\Delta\sigma$ - N 曲线回归方程(失效概率为 50%)即

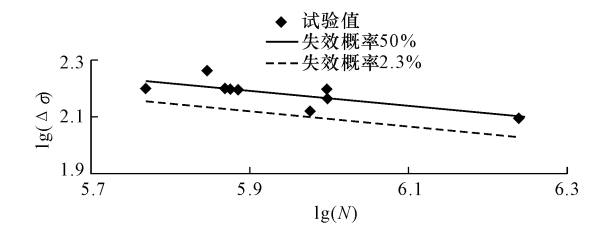


图 3 $\lg(\Delta\sigma)$ 与 $\lg(N)$ 的曲线
Fig. 3 Curves of $\lg(\Delta\sigma)$ - $\lg(N)$

$$\lg(N)=14.03-3.704\lg(\Delta\sigma) \tag{1}$$

当 $N=200\times10^4$ 次时,应力幅 $\Delta\sigma=122.1$ MPa。
相关系数 $|\gamma|=|-0.772|=0.772>0.602$ 。
 $\lg(N)$ 的标准差 $s=0.1360$ 。
将式(1)的均值线减去 2 倍的 $\lg(N)$ 的标准差(2s),得到 95% 置信度的下限值方程(失效概率为 2.3%)

$$\lg(N)=13.758-3.704\lg(\Delta\sigma) \tag{2}$$

当 N 为万次时,应力幅 $\Delta\sigma=103.09$ MPa。
根据试验发现裂纹是从桥面板中间焊根位置产

生并向两侧扩展,最终裂纹沿板厚方向扩展直至断裂,如下页图 4 所示。

2 钢桥面板关注点应力谱计算

2.1 加载方式及采用的车辆荷载谱

2.1.1 加载方式

公路桥梁疲劳验算时车辆荷载如何施加,在中国现行的桥规中尚未有细则。英国 BS 5400 规范对一般桥梁的疲劳验算制定了较详细的规定,其中车辆加载是将一辆疲劳车或车辆荷载谱中的每一车辆分别沿每一车道独立行驶,假设在任何时刻只有一辆车在某一车道上行驶^[8]。美国 AASHTO 规范在荷载布置时,亦不考虑多车道的效应^[9]。

钢桥面板的应力状况主要是受车辆轮载局部作用的影响,同一车道以及不同车道的多辆车不会对某一验算部位的应力产生显著的叠加效应。因此,本文在正交异性钢桥面板的应力计算时不考虑多车效应,按照所验算截面横向最不利的情况在单车道加载。

2.1.2 车辆荷载谱

本文计算所用的九江长江公路大桥的车辆荷载频值谱见表 2^[10]。

表 2 模型车辆荷载频值谱
Tab. 2 Vehicle load frequency spectra

模型车 编号	轴数	图示(轴重 kN,轴距 mm)	双向车辆 数/veh	总重/kN	占总交通量 的比率/%
M1	2		143 741	135	14.78
M2	3		20 800	222	2.14
M3	3		6 764	286	0.70
M4	4		40 249	319	4.14
M5	5		1 228	389	0.13
M6	6		12 588	387	1.29
M7	7		135 386	468	13.92
合计					37.10

注:各类车辆的前轴均为 2 个轮胎,每侧着地面积 0.3 m×0.2 m;其他轴均为 4 个轮胎,每侧着地面积 0.6 m×0.2 m;轮距均取 1.8 m。

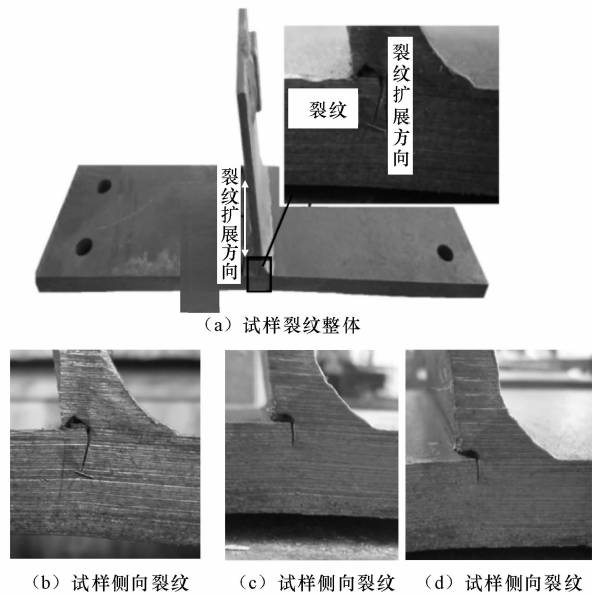


图 4 裂纹照片
Fig. 4 Photos of sample's cracks

九江长江公路大桥沥青铺装层的厚度为 0.055 m,考虑桥面铺装层对车辆轮胎着地面积的影响,轮载沿 45°方向扩展到桥面板,参考《公路桥涵设计通用规范》(JTC D60—2004),则加载时,轮胎着地面积修正后前轮为 0.41 m×0.31 m,其余轮胎着地面积为0.71 m×0.31 m^[11]。

九江长江公路大桥设计标准为双向 6 车道,目前仍在建,无法现场调查车辆的车道车辆分布特征。因此参考文献[7,10]采用的车道分布系数。九江长江大桥 2 轴车型的车道分布比例见表 3。3 轴及 3 轴以上的多轴车辆在不同车道的分布比例见表 4。

表 3 两轴车型的车道分布比例

Tab. 3 Lane distribution ratios of two-axis vehicles				
车质量/t	九江长江大桥对应车型	内车道	中间车道	外车道
0~2	V2(小汽车、轻型客车)	0.699	0.248	0.054
2~8	V3(中巴、公交车)	0.244	0.372	0.384
	V6(2 轴货车 I 型)			
>8	V4(2 轴大客车)	0.042	0.650	0.309
	V7(2 轴货车 II 型)			
	V8(2 轴货车 III 型)			

表 4 多轴车辆在不同车道的分布比例

Tab. 4 Lane distribution ratios of multi-axis vehicles				
车轴类型	日均车辆数/veh	内车道	中间车道	外车道
3 轴	1 171	0.076	0.435	0.489
4 轴	3 384	0.043	0.310	0.648
5 轴	1 284	0.067	0.401	0.533
6 轴	543	0.091	0.420	0.488

2.2 钢桥结构简化分析模型及应力计算

2.2.1 钢桥结构简化分析模型

根据全桥有限元分析,选取活载作用下应力变化最大的钢梁节段 E1 作为疲劳验算的计算梁段。E1 节段长为 15 m,顶板边缘板厚 20 mm,对应 U 肋板厚 10 mm,高 296 mm;顶板中间部分和底板板厚均为 16 mm,对应 U 肋板厚 8 mm,高 300 mm;U 肋上口宽 300 mm,下口宽 180 mm,基本间距600 mm;横隔板间距为 3.75 m,板厚分别为 12 mm 和 14 mm。钢箱 1/4 有限元分析模型如图 5 所示。

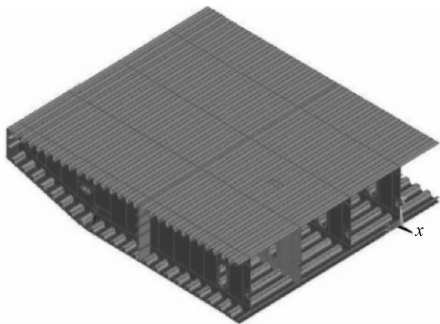


图 5 钢箱 E1 节段有限元模型
Fig. 5 Finite element model of section E1 of steel girder

依据圣维南原理建立钢箱梁简化的有限元模型如图 6 所示,模型纵桥向长度为 11.25 m (3.75 m×3),横桥向长度为 4.8 m(0.6 m×8),钢板弹性模量取 210 GPa,泊松比 0.3。模型 8 个纵向加劲肋,3 跨 4 块横隔板,采用板壳单元 shell 63 模拟。

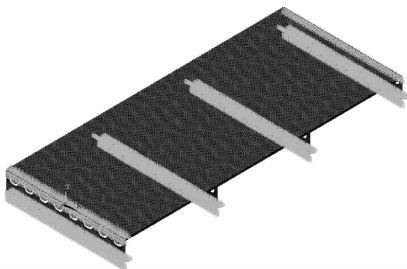


图 6 钢箱梁 E1 节段简化有限元模型
Fig. 6 Simplified finite element model of section E1 of steel girder

2.2.2 正交异性钢桥面板计算关注点的选取及最不利加载位置的确定

在车轮荷载作用下,桥面板弯曲使得 U 肋和桥面板焊接处产生较大的弯矩应力,U 肋和桥面板焊接区域产生面外弯矩,盖板和 U 肋的表面弯曲应力较大,此外,此处一般存在较大的焊接残余应力,从而此处的疲劳裂纹可能在应力集中程度较高的焊根处萌生和扩展。因此,关注点选在钢箱梁第 2 跨跨

中 U 肋和桥面板焊接处距焊缝位置,如图 7 所示。

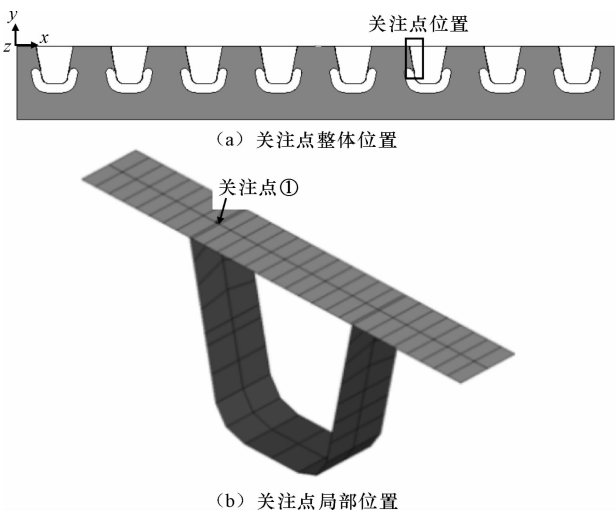


图 7 关注点位置示意(钢箱梁第 2 个横隔与第 3 个横隔之间)

Fig. 7 Location of concerned point

将车轮荷载沿桥面横向移动,得到车轮横向最不利加载位置。进行有限元计算时,选取轮载大小为 61 kN(模型车 2 后轴一边的轴重)。计算得到关注点应力-时间历程曲线,如图 8 所示;同时得到关注点的横向最不利加载位置如图 9 所示。

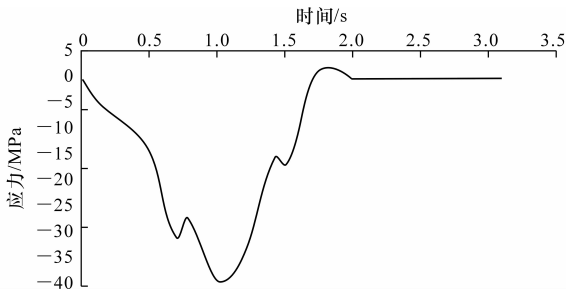


图 8 关注点应力-时间历程曲线

Fig. 8 Stress-time curve of concerned point

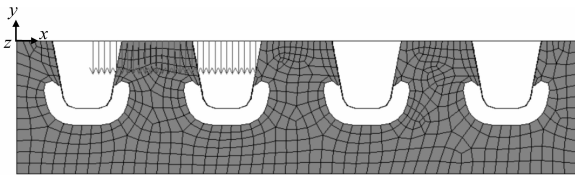


图 9 关注点车辆荷载加载的最不利位置

Fig. 9 Most disadvantageous position of loading at concerned point

2.2.3 钢桥结构应力计算及应力频值谱

弹性理论计算得到的应力应计入车辆荷载的冲击影响,美国 Schilling 的试验和理论研究指出,在实际交通状况下单辆货车引起的冲击系数一般小于 0.25^[12]。美国 AASHTO 钢桥指导性规范根据现场测试数据,提出采用 0.15 的冲击系数^[9]。本文采用 0.15 的冲击系数。

根据 2.1.2 节车辆荷载谱,编写命令流依次让其中的每一模型车前轴从桥面板模型纵向的一端行驶至后轴离开桥面板另一端,车辆按每个载荷步向前移动 0.05 m,对每个载荷步记录一次计算关注点的应力,从而得到相应的应力历程。关注点的应力历程如下页图 10 所示,图中数据拉应力符号为正,压应力符号为负。

取实际调查所得日均车流量数据,并对关注点应力历程进行雨流计数统计,得到模型车辆荷载谱作用下计算关注点的 24 h 名义应力谱,见表 5。

表 5 关注点应力范围及相应的循环次数(24 h)

Tab. 5 Stress range and corresponding number of cycles of concerned point (24 h)

应力等级	$\Delta\sigma$ 分级/MPa	循环次数 N /次
1	0~5	2 156
2	5~10	2 856
3	10~15	0
4	15~20	0
5	20~25	1 207
6	25~30	2 285
7	30~35	1 320
8	35~40	478
9	40~45	704
10	45~50	124
合计		11 130

3 钢桥面板关注点疲劳验算

3.1 桥面板与 U 肋沿焊缝焊根处纵向开裂

正交异性钢桥板与 U 肋焊根处的裂纹萌生在焊根位置,裂纹贯穿桥面板,并沿桥面板板厚方向扩展。且此裂纹位于焊根,很难监测。Xiao 等利用有限元软件,分 3 种工况对此细部结构进行了深入的分析,焊根位置所受的压应力较大,通常认为压应力不产生裂纹,而实桥上此处焊根处的裂纹比较常见^[5]。其根本原因是由于该焊缝位置存在着较大的残余拉应力,使焊根处实际上一一直处于拉应力状态。拉达伊. D 研究表明,在焊接接头的熔化或压力作用区以及热影响区可发生较高的多轴残余应力(残余应力源区)^[13];最大残余应力一般达到屈服极限(无硬化)。

综上所述,此处焊缝位置存在较大残余拉应力,尽管 2.2.3 节中有限元计算得到该细节处关注点的应力幅为压应力,但焊根处实际上一一直处于拉应力状态。因此,可以采用关注点应力谱对该构造细节的疲劳寿命进行评估。

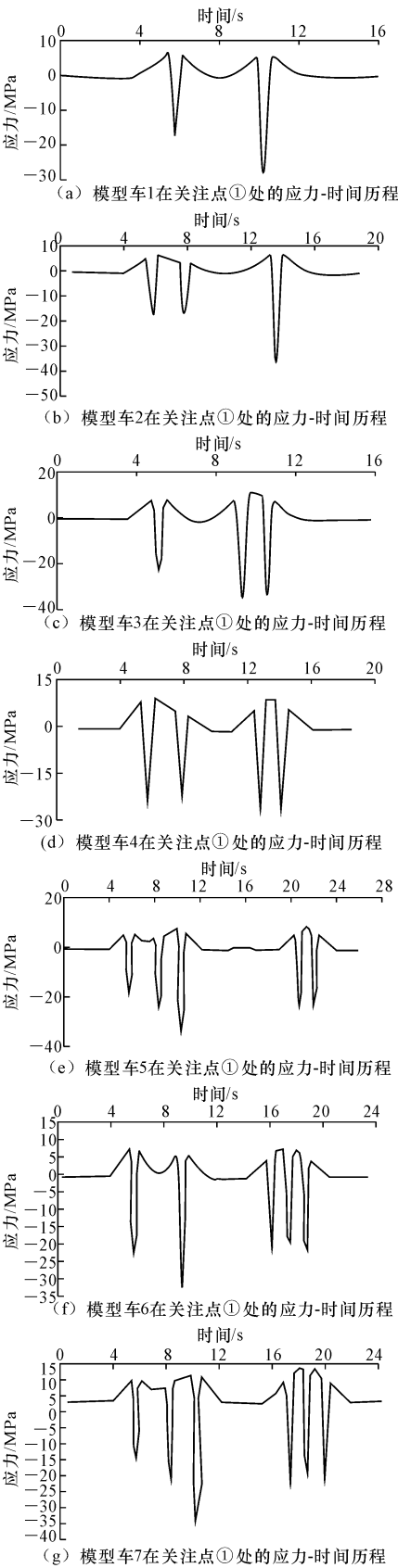


图 10 各模型车在关注点①处的应力-时间历程
Fig. 10 Stress-time curves of various vehicles at concerned point

3.2 根据疲劳试验所得 $\Delta\sigma$ - N 曲线计算疲劳寿命

欧洲 EC. 3 规范规定,指定寿命 $N=2\times 10^6$ 时的疲劳强度,称细节类型号^[14];指定寿命 $N=5\times 10^6$ 时的疲劳强度为常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_L$;指定寿命 $N=10^8$ 时的疲劳强度,称为疲劳截止限 $\Delta\sigma_{cut}$ 。当所有的公称应力幅值低于特定细节的常幅疲劳限时,无需进行疲劳评估。应力谱中所有低于特定细节截止限的应力循环可忽略不计。

根据欧洲 EC. 3 规范对 $\Delta\sigma$ - N 曲线进行扩充,所得 $\Delta\sigma$ - N 曲线方程为

可靠度 $R=50\%$ 时

$$\begin{cases} N(\Delta\sigma)^{3.704}=10^{14.03}, \Delta\sigma\geq 95.33 \\ N(\Delta\sigma)^{5.704}=9.74\times 10^{17}, 56.38\leq \Delta\sigma<95.33 \end{cases} \quad (4)$$

可靠度 $R=97.7\%$ 时

$$\begin{cases} N(\Delta\sigma)^{3.704}=10^{13.758}, \Delta\sigma\geq 80.50 \\ N(\Delta\sigma)^{5.704}=3.71\times 10^{17}, 47.61\leq \Delta\sigma<80.50 \end{cases} \quad (5)$$

所得 $\Delta\sigma$ - N 曲线如图 11 所示, m 为试验拟合曲线概率的例数。循环次数对应的应力幅值见表 6。

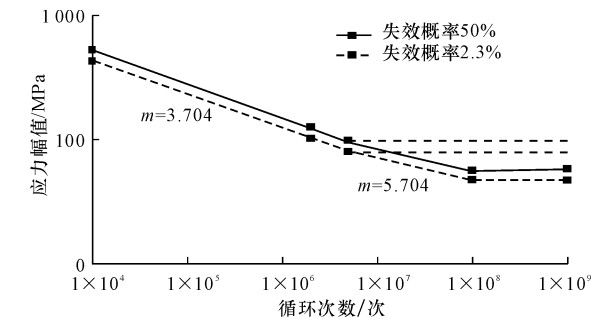


图 11 欧洲 EC. 3 规则扩充所得 $\Delta\sigma$ - N 曲线
Fig. 11 Extended $\Delta\sigma$ - N Curve following EC. 3

表 6 循环次数对应的应力幅值
Tab. 6 Cycle number corresponding to stress range

循环次数/次	应力幅值/MPa (失效概率 50%)	应力幅值/MPa (失效概率 2.3%)
2×10^6	122.08	103.09
5×10^6	95.33	80.50
1×10^8	56.38	47.61

根据试验结果可得,当失效概率为 50% 时,该细节处的指定寿命 $N=5\times 10^6$ 时的常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_{L50\%}=95.33$ MPa;指定寿命 $N=1\times 10^8$ 时的疲劳截止限 $\Delta\sigma_{cut50\%}=56.38$ MPa。与该细部构造对应的关注点①最大的应力幅值 $\Delta\sigma=45.39$ MPa <56.38 MPa。

当失效概率为 2.3% (即可靠度 97.7%) 时,该细节处的指定寿命 $N=5\times 10^6$ 时的常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_{L2.3\%}=80.50$ MPa;指定寿命 $N=1\times 10^8$ 时疲劳

截止限 $\Delta\sigma_{\text{cut}2.3\%} = 47.61 \text{ MPa}$ 。与该细部构造对应的关注点①,最大的应力幅值为 $\Delta\sigma = 45.39 \text{ MPa} < 47.61 \text{ MPa}$ 。

由于载荷谱中最大应力幅小于疲劳截止限 $\Delta\sigma_{\text{cut}}$,故认为该处不会产生疲劳损伤。

4 结 语

(1)通过疲劳试验得到失效概率为 50% 以及可靠度 97.7% 时,U 肋和盖板焊缝构造细节的 $\Delta\sigma$ - N 曲线,将该曲线延长至长寿命区,提出适合焊缝构造细节的疲劳设计曲线及方程,得到不同失效概率所对应疲劳截止限分别为 $\Delta\sigma_{\text{cut}50\%} = 56.38 \text{ MPa}$ 及 $\Delta\sigma_{\text{cut}2.3\%} = 47.61 \text{ MPa}$ 。

(2)采用有限元法建立梁段有限元模型,选取疲劳试验裂纹位置为疲劳验算关注点,利用实测所得典型车辆荷载谱,选择合理的加载方式与荷载冲击系数,加载计算并整理得到关注点的名义应力谱,关注点最大应力幅值为 45.39 MPa,小于对应疲劳截止限,表明该细部构造满足疲劳强度要求。

(3)本文未对该部位焊接残余应力进行量化测试分析,进一步研究将在试验与有限元计算时,考虑并加入焊接残余应力进行更为精细的计算研究。

参考文献:

References:

- [1] 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.
TONG Lei-wei, SHEN Zu-yan. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 16-21. (in Chinese)
- [2] 钱冬生. 关于正交异性钢桥面板的疲劳-对英国在加固其赛文桥渡时所作研究的评价[J]. 桥梁建设, 1996(2): 7-13.
QIAN Dong-sheng. On fatigue of steel orthotropic deck structure-comments on researches for strengthening the severn crossing in UK[J]. Bridge Construction, 1996(2): 7-13. (in Chinese)
- [3] Miki C, Suganuma H, Tomizawa T, et al. Case study of fatigue damage in orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Structure Mechanical and Earthquake Engineering, 2005, 780(73), 57-69.
- [4] Ya S, Yamada K, Ishikawa T. Fatigue evaluation of rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(4): 492-499.
- [5] Xiao Z G, Kentaro Y, Samol Y, et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. International Journal of Fatigue, 2008(30): 1387-1397.
- [6] Samol Y, Kentaro Y, Toshiyuki L. Fatigue evaluation of rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(4): 492-499.
- [7] 周怡斌. 公路大桥正交异性钢桥面板裂缝成因研究与局部疲劳分析[D]. 北京: 清华大学, 2010.
ZHOU Yi-bin. Crack study and local fatigue analysis of orthotropic steel decks on bridges[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [8] 英国标准协会. 英国标准 BS5400: 钢桥、混凝土桥及结合桥(1978-82 版)[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1986.
British Standards Institution. British standard 5400 (1978-82): steel, concrete and composite bridges[M]. Chendu: Southwest Jiaotong University Press, 1986. (in Chinese)
- [9] 美国各州公路和运输工作者协会(AASHTO). 美国公路桥梁设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
American Association of State Highway and Transportation Officials. American highway bridge design specifications [M]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese)
- [10] 邵雨虹. 大跨径桥梁疲劳设计车辆荷载谱研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
SHAO Yu-hong. Study of fatigue load spectrum for long span bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [11] JTC D60—2004, 公路桥涵设计通用规范[S].
JTC D60—2004, General code for design of highway bridge and culverts[S]. (in Chinese)
- [12] Schilling C G. Impact factors for fatigue design[J]. Journal of Structural Division, 1982(9): 2034-2044.
- [13] 拉达伊 D. 焊接热效应[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
Radaj D. Welding thermal effect [M]. Beijing: China Machine Press, 1997. (in Chinese)
- [14] DD EVN 1993-1-1: 1992. Eurocode 3: design of steel structures part 1.9: fatigue[S].