

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.12.006

基于 WIM 数据和断裂力学方法的 钢桥疲劳强度评估

赵少杰^{1,2}, 任伟新^{1,3}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008;
3. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了准确评估钢桥焊接结构的疲劳强度, 基于断裂力学 K 判据对于高周疲劳的适用性分析, 采用 Paris 公式并结合有限元方法和 G^* 积分理论, 计算获得了钢桥典型构造细节的应力强度因子表达式。结果表明: 钢桥棱角焊缝构造细节和 T 形接头对接焊缝构造细节的应力强度因子均与结构裂纹尺寸密切相关, 其表示式可以由裂纹尺寸、工作应力及结构尺寸等参数联合表达。以构造细节的应力强度因子为基础, 计算得到了典型构造细节的等效 200 万次疲劳强度, 并与各国规范及疲劳试验结果进行了对比分析。结果表明: 采用断裂力学方法获得的疲劳强度结果与规范值及试验值均吻合良好, 对应棱角焊缝构造细节的计算偏差基本在 10% 以内; 对应 T 形接头对接焊缝细节的计算偏差在 20% 以内, 且 T 形接头构造细节的疲劳强度远低于棱角焊缝构造细节的疲劳强度, 设计和施工中需引起重视。基于坝陵河大桥动态称重系统实测数据, 计算获得了钢桁梁节点构造的等效应力幅, 并采用上述断裂力学方法评估了该节点构造的疲劳强度和寿命。通过坝陵河大桥节点疲劳模型试验, 进一步验证了该方法在钢桥疲劳强度评估上的适用性, 研究成果可为钢结构桥梁的强度评估提供借鉴和参考。

关键词: 桥梁工程; 应力强度因子; 断裂力学; 疲劳强度; 构造细节; WIM 数据

中图分类号: U441+.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2017) 12-0037-07

Evaluation of Fatigue Strength of Steel Bridge Based on WIM Data and Fracture Mechanics Method

ZHAO Shao-jie^{1,2}, REN Wei-xin^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;
2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute, Changsha Hunan 410008, China;
3. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: For exactly evaluating the fatigue strength of welded structure in steel bridge, based on the analysis the applicability of the K criterion of fracture mechanics to high cycle fatigue, the expressions of stress intensity factor for typical structure details of steel bridges are obtained by using Paris formula combining with finite element method and G^* integral theory. The result shows that the stress intensity factors of the arris weld structure detail and the butt weld of T-joint structure detail for steel bridges are closely related to the crack size of welded structures, and the expressions can be expressed by the parameters of crack size, working stress and structure size. Based on the stress intensity factor of structure details, the equivalent 2 million times fatigue strength of the typical structure details are calculated and comparatively analysed with the specified values of many countries and fatigue test results. The result shows that (1) the calculation

收稿日期: 2016-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078357)

作者简介: 赵少杰 (1982-), 男, 湖南张家界人, 博士研究生, 高级工程师. (shaojiez@126.com)

values using the method of fracture mechanics are in good agreement with the specified and experimental values, the calculation deviation is about less than 10% for the arris weld structure detail, the calculation deviation is less than 20% for the butt weld of T-joint structure detail, and the fatigue strength of T-joint structure detail is far lower than that of the arris weld structure detail, which must be paid attention in design and construction. Based on the measured WIM data of Baling River Bridge, the equivalent stress amplitudes of the steel truss girder joints are obtained by calculation, and the above fracture mechanics method is applied to evaluate the fatigue strength and lifetime of the welded joint structure. By the joint fatigue model test of Baling River Bridge, the applicability of this method in fatigue strength evaluation for steel bridges is further verified. The research result can provide a reference for strength evaluation of steel structure bridges.

Key words: bridge engineering; stress intensity factor; fracture mechanics; fatigue strength; structure detail; WIM data

0 引言

近年来,桥梁断裂垮塌事故频发,很多是桥梁在重车荷载作用下发生了疲劳断裂所致。疲劳断裂作为桥梁结构最常见的破坏形式,是钢桥在设计、施工及运营管养中需要特别注意的问题。大型钢结构桥梁因其焊接节点的构造和受力均较复杂,目前钢桥设计规范对其疲劳强度并没有明确规定。基于 $S-N$ 曲线的名义应力法和热点应力法等常规疲劳强度评估方法均存在较大的局限,如均忽略了材料的初始缺陷、复杂结构的名义应力较难定义、疲劳裂纹的扩展阶段无法描述等^[1-2],故工程中常需要借助疲劳试验对钢桥结构的疲劳强度进行验证,既费时也费力,而断裂力学方法在结构疲劳强度评估方面具有先天优势。断裂力学假定材料存在初始缺陷,注重研究含缺陷材料在外界荷载作用下裂纹的扩展开裂等规律,结合现代无损探伤及长期监测技术,能够克服传统强度理论的局限,近年来逐渐得到了重视和应用。王春生等^[3]提出了基于钢筋 $S-N$ 曲线和断裂力学模型的既有混凝土桥梁剩余寿命评估方法。郑淳^[4]从概率断裂力学的角度研究了公路钢桥疲劳寿命预测及可靠度计算方法。邓扬等^[5]基于健康监测数据对钢箱梁顶 U 肋焊接细节的疲劳断裂可靠性进行了分析等。上述研究多基于理想断裂力学模型,缺乏对具体构造细节的选取和其应力强度因子的计算,而疲劳强度断裂力学评估方法的难点在于准确地获得构造细节的应力强度因子^[6]。本研究基于断裂力学理论,采用现代有限元计算和理论分析等多种方法,获得了典型构造细节的应力强度因子式,以此为依据采用裂纹扩展理论反算得到结构的疲劳强度,并与试验值和规范值进行了比较分析。通过工程实例及试验,结合桥梁动态称重(WIM)

系统监测数据,进一步验证该断裂力学方法在钢桥疲劳强度评估方面的适用性和准确性。

1 钢桥疲劳强度的断裂力学分析方法

1.1 应力强度因子及 K 判据

应力强度因子是断裂力学的基本概念之一。断裂力学研究在 Irwin 提出应力强度因子概念后才获得重大突破并快速发展起来^[7]。断裂力学假设材料中存在初始裂纹,并分为 3 种类型:张开型(I型)、滑移型(II型)、撕裂型(III型)。其中 I 型裂纹对结构受力最不利,易引起结构断裂破坏,是本研究的重点研究对象。应力强度因子定义为:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{c}, \quad (1)$$

式中, Y 为裂纹形状修正因子,与结构受力、裂纹类型及位置等有关; σ 为工作应力; c 为裂纹尺寸。

结构不发生低应力断裂的 K 判据定义为:

$$K_I \leq K_{IC}, \quad (2)$$

式中 K_{IC} 为临界应力强度因子即断裂韧性,可通过试验测定。

1.2 断裂力学判据的适用范围

K 判据适用于材料的低应力脆性破坏,要求构件工作应力不能太大,裂纹尺寸和材料屈服强度不能太小,一般要求临界断裂应力 $\sigma_c < 0.63\sigma_s$ (σ_s 为材料屈服强度)。对于工程上出现的微小裂纹,一般用弹塑性断裂力学来分析。但对高周疲劳,在远低于屈服应力的疲劳荷载作用下,构件整体的力学响应是线性的,裂纹的扩展仍可采用线弹性断裂力学的 K 判据进行。事实上大量试验也证实了这一点^[8],疲劳裂纹扩展速率 dc/dN 与应力强度因子的幅值 ΔK 存在如下函数关系:

$$\frac{dc}{dN} = f(\Delta K), \quad (3)$$

式中 N 为应力循环次数。

1.3 焊接钢桥典型构造细节的应力强度因子计算

焊接钢桥的构造细节很多, 本研究重点分析角焊缝和对接焊缝中有代表性的两种典型焊接构造细节, 即角接头棱角焊缝和 T 形接头对接焊缝构造细节。分别采用有限元方法和解析的 G^* 积分法对其应力强度因子进行计算, 并以此作为评估结构构造细节疲劳强度的依据。其他构造细节可以采用类似方法处理。本研究裂纹考虑为 I 型裂纹, 因为 I 型裂纹是低应力断裂的主要原因, 是最危险的情况。材料统一取 14MnNbq 钢材, 屈服强度为 370 MPa, 弹性模量为 2.1×10^5 MPa, 泊松比为 0.3。

考虑箱形弦杆棱角焊缝中存在垂直拉力方向的表面半椭圆裂纹, 结构简化成空间箱形弦杆, 结构受力及裂纹位置示意如图 1 所示。一般裂纹位置需要由实际探伤决定, 对于未探伤或探伤未发现裂纹的构件, 假设裂纹出现在焊缝区。因一般箱形弦杆在 4 个角点处应力最大, 而棱角焊缝及裂纹也正位于该处, 符合裂纹出现位置最不利原则。假设计算模型的半椭圆裂纹尺寸为 c , 采用有限元方法计算不同的裂纹尺寸 c 下的应力强度因子, 并拟合获得相应的应力强度因子表达式。

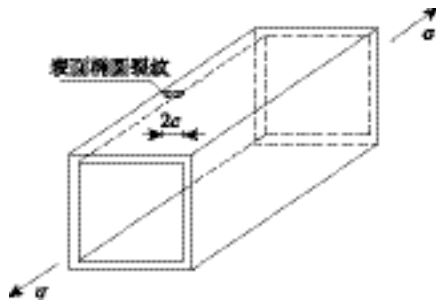


图 1 棱角焊缝裂纹位置及受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of crack location and force in arris weld

采用由垂直于裂纹前沿线的平面单元先沿裂纹前沿自动生成二维奇异单元, 然后采用体扫略划分网格方式来生成三维奇异单元^[9], 生成的三维模型及裂纹局部见图 2。由此模型可计算出相应的应力强度因子。

由 1.1 节知, K 值的变化取决于 Y 值的变化, 研究表明 Y 值主要与裂纹半长 c 有关^[10], 故可将 Y 值表达成 c 的函数。取 c 为参数, 计算不同 c 下的 K 值, 然后采用最小二乘法拟合, 获得形状修正因子 Y 值与裂纹半长 c 的变化关系, 最后得到 K 值的表达式如下:

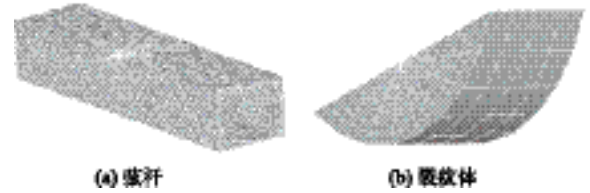


图 2 弦杆有限元模型及裂纹体网格划分

Fig. 2 Finite element model of chord and cracked body meshing

$$K = (0.0049\sqrt{c} + 1.0575 + 0.0039/\sqrt{c})\sigma\sqrt{c}, \quad (4)$$

式中, $c \neq 0$; 拟合相关系数为 0.99。

(2) T 形接头对接焊缝构造细节

考虑裂纹出现在 T 形接头板间焊接的焊缝中部, 如图 3 所示, 为贯穿直裂纹情况。根据裂纹边界非自发扩展能量释放率的概念, 假设把贯穿直裂纹看成由椭圆孔当其短半轴趋向于 0 时退化而成, 运用 G^* 积分守恒性计算其应力强度因子。计算获得的 K 值表达式为:

$$K = \left(M\sqrt{\frac{\pi}{It}} + N\sqrt{\frac{\pi}{Lt^2}} \right) \sqrt{\frac{f(\beta)}{1-\mu^2}}, \quad (5)$$

式中, M 为端截面弯矩; I 为板截面抗弯惯矩; t 为板件厚度; N 为板端拉力; L 为平联板宽度; μ 为材料的泊松比; $\beta = c/L$ 。

$$f(\beta) = \frac{\arctan \sqrt{(1+2\beta)/(1-2\beta)}}{2\beta\sqrt{1-4\beta^2}} - \frac{\pi}{8\beta} - \frac{1}{2}. \quad (6)$$

1.4 构造细节的疲劳强度断裂力学计算结果及与试验和规范值的对比

1.4.1 角接头棱角焊缝构造细节

由 Paris 公式,

$$dN = \frac{dc}{C(\Delta K)^m}, \quad (7)$$

即有:

$$N = \int_{c_0}^{c_c} \frac{dc}{C(\Delta K)^m}, \quad (8)$$

式中, m 为疲劳强度曲线常数, 与材料有关; C 为与材料等因素有关的系数, 对于无试验资料的桥梁结构钢^[11], 可取 $C = (1.315 \times 10^{-4})/895.4^3$; c_c 为临界断裂裂纹尺寸; c_0 为初始裂纹尺寸。

断裂韧性 K_{IC} 参考文献 [12] 取 59.5 MPa。 K_{IC} 中对应的 σ 为实际构件断裂时的最大工作应力。对于桥梁用钢, 其基本弯曲和轴向容许应力约为其屈

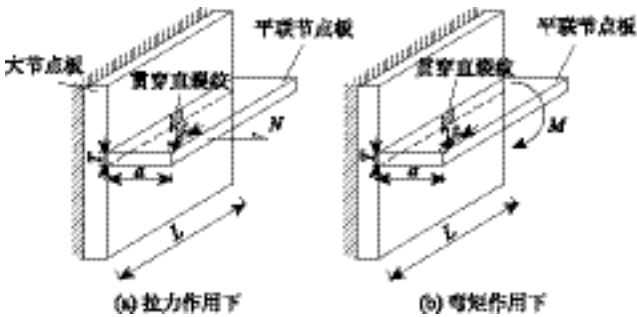


图 3 T 形接头对接焊缝中裂纹位置及受力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of crack location and force in butt weld of T-joint

服强度的 0.6 倍,而一般主梁设计应力控制在容许应力的 0.8 ~ 0.95 倍^[13],故实际最大工作应力为 (0.48 ~ 0.57)σ_s。在文中统一取 σ_c = 0.5σ_s,满足小范围屈服的控 制条件 σ_c < 0.63σ_s 的假定。由前面获得的应力强度因子计算式,反算 c_c 为 84.9 mm。c₀ 一般根据无损探伤确定,当无裂纹时,可假定为焊件中无损探伤灵敏度的下限值,参考文献 [14] 取 2.5 mm。根据式 (1),结合上述参数采用数值积分方法,计算得:

$$N = \frac{1}{1.832 \times 10^{-13} \times \Delta\sigma^3} \times 0.843。 \quad (9)$$

对应等效 200 万次疲劳强度,令上式等于 2.0 × 10⁶,可得容许等效应力幅:

$$\Delta\sigma = 132.0 \text{ MPa}。$$

1.4.2 T 形接头对接焊缝构造细节

为了与试验结果及规范值有一定的对比性,T 形接头的平联板宽度 L 取 200 mm,板厚 t 取 10 mm,将式 (5) 变换后有:

$$\Delta K = 22.3 \times \Delta\sigma \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{f(\beta)}{1 - \mu^2}}, \quad (10)$$

式中,Δσ 为工作应力幅值;σ_c, c₀, K_{IC} 取值同前,计算临界断裂裂纹尺寸 c_c = 71.5 mm,代入 Paris 公式,同理运用数值积分后并令 N = 2.0 × 10⁶,得:

$$\Delta\sigma = 59.0 \text{ MPa}。$$

1.4.3 各细节断裂力学计算值与疲劳试验值、规范值的对比

上述各构造细节疲劳强度计算结果,其相应的等效 200 万次疲劳强度 (容许应力幅) 的国外规范值^[15-18]、试验值^[19-20] 的对比分析见表 1。

对比可见,采用断裂力学方法计算获得的等效 200 万次的疲劳强度值与规范值及试验值均吻合良

表 1 构造细节疲劳强度计算值与各国规范值、试验值对比

Tab. 1 Comparison of calculated structure detail fatigue strengths with specified values and test values of different countries

规范名称	等效 200 万次疲劳强度 (容许应力幅) /MPa		备注
	①角接头	②T 形接头	
	棱角焊缝	对接焊缝	
英国规范 (BS)	91	50	取值范围在这两者之间。
	124	68	
日本钢结构规范 (JSSC)	125	65	构造①对应规范构造细节 C 级;构造②对应规范构造细节 F 级。
欧洲钢结构规范 (ECCS)	112	50	构造①单侧施焊;构造②对应无圆弧过渡的纵向附连件长 L > 100 mm 的情况。
美国规范 (AREA)	102	56	构造①对应规范构造细节 B 级;构造②端部不磨修。
铁科院疲劳试验结果	120	71	构造①为 V 形坡口不熔透纵向角焊缝正应力疲劳试验;构造②为平联节点板焊在 I 形梁腹板上的疲劳试验,端部打磨。
芜湖大桥疲劳试验结果	122	73	构造①为角焊缝正应力疲劳试验;构造②为端部打磨情况,为试验推荐值。
本研究计算方法结果	132	59	

好,特别是角接头棱角焊缝构造细节的偏差值基本在 10% 内,计算精度是令人满意的。其中 T 形接头对接焊缝细节的偏差稍大,但也在 20% 以内。引起偏差的主要原因有:规范值及试验值采用的构造细节与本研究计算模型之间的差异、初始裂纹形状尺寸及位置的假设误差、参数 C 和 m 的取值误差、焊接残余应力的影响等。

对比上述两种构造细节的疲劳强度可知,T 形接头构造细节的疲劳强度远低于棱角焊缝正应力构造细节的疲劳强度,故在设计 and 施工时应特别注意 T 形接头构造。

2 基于 WIM 系统数据和的断裂力学方法的钢桥疲劳强度评估工程实例

2.1 桥梁概况

镇胜高速公路坝陵河大桥为主跨 1 088 m 的简支钢桁加劲梁悬索桥,桥跨布置为 (248 + 1 088 + 228) m。

加劲梁采用钢桁梁结构, 桁高为 10 m, 标准节间长为 10.8 m。上弦杆、下弦杆及斜腹杆均选用闭口箱形断面, 双向四车道。大桥在修建时安装了长期健康监测, 以实时了解桥梁的健康运营状况, 其中在桥面安装了荷载动态称重系统, 如图 4 所示。坝陵河大桥钢桁加劲梁采用焊接整体节点, 节点外拼接, 在修建时该技术在国内外首次在悬索桥钢桁梁中应用。由于整体节点板材之间采用焊接连接, 故节点的焊接强度, 特别是疲劳可靠性, 是工程重点关注的问题。本节针对钢桁梁节点构造的疲劳强度展开实例研究。

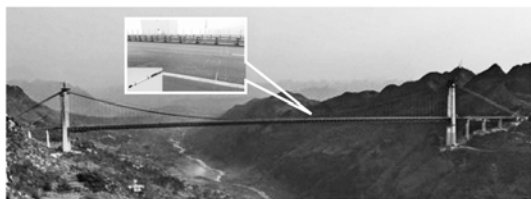


图 4 坝陵河大桥及其桥面 WIM 系统

Fig. 4 Baling River Bridge and WIM system in bridge deck

2.2 钢桁梁节点构造的疲劳强度评估

2.2.1 基于 WIM 系统监测数据的等效应力幅值计算

为了更准确地对焊接钢桥的疲劳强度进行评估, 通过桥梁健康监测系统采集的数据, 分析获取受力关键构件的应力幅, 并结合断裂力学方法进行疲劳评估。如果桥梁在结构关键受力部位安装了应力传感器, 则可以通过长期实测数据直接对该结构进行疲劳强度评估计算。如果桥梁安装了实时 WIM 系统, 则可通过实测交通荷载数据, 结合全桥有限元仿真计算分析, 间接获取结构的等效应力幅。坝陵河大桥节点构造的疲劳强度评估采用后一种方法。

(1) 实际交通量统计

表 2 给出了坝陵河大桥 WIM 系统实测 1 个月的车辆荷载通行情况。

表 2 坝陵河大桥实测车辆荷载通行情况

Tab. 2 Measured traffic loads on Baling River Bridge

车重/kN	<30	30 ~ 200	200 ~ 400	400 ~ 550	>550	总数	日平均 交通量
数量/veh	361 774	70 234	29 741	22 080	4 800	488 629	15 763
百分比/%	74.0	14.4	6.1	4.5	1.0	100.0	3.2

从表 2 可见, 日平均双向通行车辆为 15 763 veh, 其中超过 30 kN 的车辆荷载数量约占总数的 26%。

(2) 等效 200 万次疲劳内力幅和应力幅

英国 BS5400、美国 AASHTO 等规范均规定对于

轴重较小的小型车 (一般取车重小于 30 kN), 在计算疲劳损伤时可以忽略不计。由表 2 数据可知, 能引起桥梁疲劳损伤的日平均单向货车交通量为:

$$ADTT = 0.5 \times 15\,763 \times 0.26 = 2\,050 \text{ veh/d.}$$

由此按照 AASHTO 规范可计算设计寿命 100 a 内单车道的交通车辆数 $ADTT_{sl}$ 及内力循环次数 N :

$$ADTT_{sl} = P \times ADTT = 0.85 \times 2\,050 = 1\,743 \text{ veh/d,} \quad (11)$$

$$N = 1\,743 \times 365 \times 100 = 63\,619\,500 \text{ 次,}$$

式中 P 为单车道系数, 按规范取值 0.85。

按照 Miner 线形疲劳累积损伤理论, 结合坝陵河大桥 WIM 系统实测数据, 可计算得到实际交通的等效疲劳车重:

$$W_e = \left[\sum f_i W_i^m \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (12)$$

式中, W_i 为第 i 种产生疲劳影响的实测车辆重量; f_i 为 W_i 在所有产生疲劳影响的车辆总数目中所占的比例; m 为疲劳强度曲线参数。

然后通过在桥梁上加载获得上弦杆的等效内力幅, 结合上述单车道内力循环次数, 运用疲劳累积损伤等效原则, 即考虑变幅与常幅内力幅之间的关系, 可求出坝陵河大桥节点杆件等效 200 万次疲劳内力幅。其中变幅与常幅内力幅之间的换算关系与式 (9) 类似, 即式中 W_i 为第 i 个变幅内力幅, f_i 为第 i 个内力幅作用次数占总内力幅作用次数的比例, 则 W_e 即为等效内力幅。计算获得的上弦杆等效 200 万次疲劳内力幅为 3 422 kN, 换算得等效应力幅值 $\Delta\sigma$ 为 45.5 MPa。

2.2.2 节点构造的疲劳强度评估

钢桁梁节点构造的弦杆主要承受轴力, 其弦杆的角接头棱角焊缝为主要承受疲劳荷载的受力焊缝, 故疲劳评估针对弦杆的角接头棱角焊缝构造进行。钢桁梁材料为 Q345D 钢材, 参考文献 [8], K_{lc} 取 50 MPa, 屈服强度 σ_s 为 325 MPa, 取构件临界断裂应力 $\sigma_c = 0.5\sigma_s$ 。由式 (2) 反算临界断裂裂纹尺寸 c_c 为 80.0 mm。节点构造经探伤未发现裂纹, 故同上节假定焊件中初始裂纹尺寸为 2.5 mm。由 (4) 式可得:

$$\Delta K = (0.004\,9\sqrt{c} + 1.057\,5 + 0.003\,9/\sqrt{c})\Delta\sigma\sqrt{c}. \quad (13)$$

根据上节取 $C = 1.832 \times 10^{-13}$, $m = 3$, 由式 (8) 结合上式及相关参数计算得:

$$N = 4.88 \times 10^7 > 2.0 \times 10^6.$$

可见, 断裂力学计算结果显示该焊接节点构造

疲劳强度满足设计要求,节点构造具有足够的疲劳寿命。

2.3 节点构造疲劳强度的模型试验验证

为了验证坝陵河大桥钢桁梁节点构造的实际疲劳强度是否与断裂力学的评估结论一致,选择受力最不利的钢桁梁上弦杆吊点节点连接构造(以下简称节点构造)进行疲劳模型试验验证。该节点将承受的恒载及桥面活载通过吊杆传递到主缆,根据实桥结构按1:1的比例设计了钢桁梁节点模型,以尽可能地反映实桥结构的受力特性及连接构造细节。

试验模型共包括:节点模型试件、加载分配梁及连接梁、加载支墩、支墩横梁等部分。试验模型在顺桥向长3.42 m,包含整个节点构造细节,主要有以下几种:(1)弦杆角接头棱角焊缝构造细节;(2)T形接头角焊缝构造细节;(3)箱形弦杆与横隔板交叉焊缝构造细节。其中第1种构造细节为主要承力焊缝细节。对该节点模型在MTS疲劳试验机上进行常幅200万次疲劳试验加载,以验证该节点构造的疲劳强度情况。为了加载方便,节点模型疲劳试验采用杠杆原理进行加载。试验时将模型倒转,使节点耳板朝下,通过耳板连接梁把试件和加载分配梁连起来。试验模型及加载布置如图5所示。

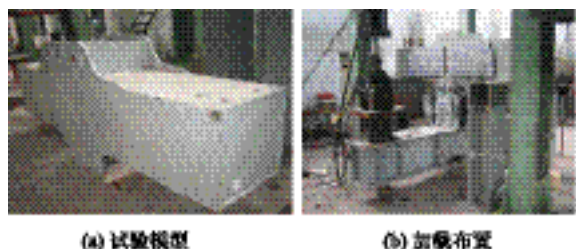


图5 疲劳试验模型及加载布置

Fig.5 Fatigue test model and loading arrangement

试验结果:整个疲劳加载过程模型试件未发现异常现象,试件工作正常。每次停机静载试验后,检查模型试件及其焊缝,均未发现裂纹。200万次疲劳试验后,对模型试件进行检查,未发现裂纹。继续加载至240万次,检查模型试件及焊缝,仍未发现裂纹。故说明该节点构造的疲劳强度满足设计要求。

由2.2节断裂力学的理论分析知,该节点构造的疲劳强度也满足设计要求。故试验结果和断裂力学的理论评估结论一致,这也从侧面证明了2.2节的断裂力学评估结论和相应应力强度因子计算结果

的正确性。

3 结论

基于断裂力学方法,对焊接钢结构桥梁的几种典型构造细节进行了应力强度因子计算,并以此为基础评估了焊接钢桥结构的疲劳强度。主要结论有:

(1)采用有限元及 G^* 积分法获得了焊接钢桥角接头棱角焊缝和T形接头对接焊缝构造细节典型受力状态的应力强度因子表达式。

(2)由应力强度因子计算获得的等效200万次疲劳强度结果与各国规范值、试验值均吻合良好,特别是棱角焊缝构造细节的计算误差基本在10%以内,说明了应力强度因子计算和疲劳强度评估结果的准确性。

(3)工程实例及疲劳模型试验也进一步表明,基于WIM系统监测数据和断裂力学方法的钢桥结构疲劳强度评估方法力学判据明晰,评估结论可靠。

当然,该方法在桥梁疲劳强度评估方面还面临一些挑战,其评估的准确性和有效性还依赖很多相关因素,如初始裂纹大小及分布假设的合理性、各构造细节应力强度因子计算的准确性、相关材料参数测定的准确性、疲劳荷载数据统计的充分代表性等。但可以预见,随着结构无损探伤和桥梁健康监测等技术的发展及断裂力学研究的不断深入,基于断裂力学理论和长期健康监测数据的桥梁结构强度评估方法将会得到不断的发展和广泛的应用。

参考文献:

References:

- [1] 何东升,肖海珠,张晓勇.公路正交异性钢桥面板细节疲劳研究[J].公路交通科技,2016,33(1):77-81.
HE Dong-sheng, XIAO Hai-zhu, ZHANG Xiao-yong. Research on Detail Fatigue of Orthotropic Steel Deck in Highway Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(1): 77-81.
- [2] NOROOZI A H, GLINKA G, LAMBERT S. Prediction of Fatigue Crack Growth under Constant Amplitude Loading and a Single Overload Based on Elasto-plastic Crack Tip Stresses and Strains [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(2): 188-206.
- [3] 王春生,周江,吴全友,等.既有混凝土桥梁疲劳寿

- 命与安全评估 [J]. 中国公路学报, 2012, 25 (6): 101–107.
- WANG Chun-sheng, ZHOU Jiang, WU Quan-you, et al. Fatigue Life and Service Safety Assessment for Existing Concrete Bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25 (6): 101–107.
- [4] 郑淳. 基于断裂力学的公路钢桥疲劳寿命可靠度方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- ZHENG Chun. Research on Fatigue Life Reliability Evaluation of Highway Steel Bridges Based on Fracture Mechanics [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [5] 邓扬, 丁幼亮, 李爱群, 等. 钢箱梁桥焊接细节的疲劳断裂可靠性分析 [J]. 工程力学, 2012, 29 (10): 122–127.
- DENG Yang, DING You-liang, LI Ai-qun, et al. Fracture Fatigue Reliability of Welded Details in Bridge Steel Box Girders [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (10): 12–127.
- [6] POPA C O, HARAGÂŞ S. Some Considerations about the Influence of the Stress Intensity Factors $K_{\min}$, K_{IImax} and K_{eq} in Fatigue Crack Propagation in the Substrate of the Gear Teeth [J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 823: 23–29.
- [7] 李庆芬, 胡胜海, 朱世范. 断裂力学及其工程应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2008.
- LI Qing-fen, HU Sheng-hai, ZHU Shi-fan. Fracture Mechanics and Engineering Application [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2008.
- [8] 刘宝琛. 实验断裂、损伤力学测试技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 157–166.
- LIU Bao-chen. Experimental Fracture, Damage Mechanics and Testing Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1994: 157–166.
- [9] 王锋, 黄其青, 殷之平. 三维裂纹应力强度因子的有限元计算分析 [J]. 航空计算技术, 2006, 36 (3): 125–129.
- WANG Feng, HUANG Qi-qing, YIN Zhi-ping. Analysis of Emulational Limited Element Method for the Three-dimensional Stress Intensity Factors [J]. Aeronautical Computing Technique, 2006, 36 (3): 125–129.
- [10] 孙宏才, 高磊, 徐关尧, 等. 矩形板中心裂纹有限元数值分析 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2006, 7 (3): 271–275.
- SUN Hong-cai, GAO Lei, XU Guan-yao, et al. Finite Element Numerical Analysis in Center-cracked Rectangular Panel [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 7 (3): 271–275.
- [11] 霍立兴. 焊接结构工程强度 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 270–290.
- HUO Li-xing. Engineering Strength of Welded Structure [M]. Beijing: China Machine Press, 1995: 270–290.
- [12] 李国清, 祝时召, 李建兵, 等. 14MnNbq 焊接件全范围疲劳裂纹扩展性能研究 [J]. 桥梁建设, 2006 (4): 33–37.
- LI Guo-qing, ZHU Shi-zhao, LI Jian-bing, et al. Study of Full Range Fatigue Crack Growth Behavior of 14MnNbq Welds [J]. Bridge Construction, 2006 (4): 33–37.
- [13] 吴冲. 现代钢桥 (上册) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 181–190.
- WU Chong. Modern Steel Bridge (Volume 1) [M]. Beijing: China Communications Press, 2006: 181–190.
- [14] 崔洪斌, 石德新, 李晗, 等. 潜艇锥柱结合壳焊缝焊趾处初始裂纹尺寸评定 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27 (4): 492–500.
- CUI Hong-bin, SHI De-xin, LI Han, et al. Evaluation the Size of Initial Crack in Welding Toes of Joint of Cylinder and Cone [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27 (4): 492–500.
- [15] BS5400-2—2006, Steel, Concrete and Composite Bridges—Part 2: Specification for Loads [S].
- [16] JSSC. 2003, Fatigue Design Recommendations for Steel Structures [S].
- [17] EN1993-1-9: 2005, Design of Steel Structures—Part 1-9: Fatigue [S].
- [18] AREMA 2007, Manual for Railway Engineering [S].
- [19] 任伟平. 焊接钢桥结构细节疲劳行为分析及寿命评估 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009: 90–105.
- REN Wei-ping. Fatigue Behaviour Analysis and Fatigue Life Evaluation of Structural Details in Welded Steel Girder Bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009: 90–105.
- [20] 张玉玲, 潘际炎, 张建民, 等. 芜湖长江大桥钢梁细节疲劳强度的研究 [J]. 中国铁道科学, 2001, 22 (5): 15–21.
- ZHANG Yu-ling, PAN Ji-yan, ZHANG Jian-min, et al. Research on Fatigue Strength for Steel Girder Details of Wuhu Yangtze River Bridge [J]. China Railway Science, 2001, 22 (5): 15–21.