

文章编号:1001-7372(2013)04-0094-08

波形钢腹板组合箱梁疲劳性能试验与理论分析

彭 鲲,李立峰,肖小艳,裴必达,侯嘉庆

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:为了给波形钢腹板组合箱梁的疲劳设计和施工提供参考,制作了试验模型梁,并对其进行疲劳荷载试验,得到了这种结构的典型疲劳破坏特征。结合有限元分析,利用已有的研究资料,比较了波形钢腹板组合箱梁与波形钢腹板钢梁应力状态的相似性。采用断裂力学分析方法,对比有限元分析和模型梁试验结果,研究了波形钢腹板组合箱梁疲劳寿命的计算模式,进而推导出这种结构的 S-N 曲线。研究结果表明:对于波形钢腹板组合箱梁的疲劳设计,在有限疲劳寿命设计与计算中建议偏安全地采用美国规范 AASHTO 2007 提供的设计参考中的 C 类标准。

关键词:桥梁工程;波形钢腹板组合箱梁;模型试验;疲劳性能;S-N 曲线

中图分类号:U441.4

文献标志码:A

Experimental and Theoretical Analysis on Fatigue Performance of Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs

PENG Kun, LI Li-feng, XIAO Xiao-yan, PEI Bi-da, HOU Jia-qing

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to provide reference for design and construction of composite box girder with corrugated steel webs (CBCW), test beams were made for fatigue experiment and the typical fatigue failure characteristics were obtained from the experiment. Based on test results and finite element analysis, the comprehensive comparative analysis on similarity of the stress state between steel beam and CBCW was conducted. By fracture mechanics analysis and comparison between the test and finite element analysis results, the fatigue life calculation model was studied and the S-N curves of CBCW were derived. The results show that, for design of CBCW, the category C design standard of the AASHTO 2007 specifications is recommended for finite life fatigue design calculation for safety.

Key words: bridge engineering; composite box girder with corrugated steel web; model test; fatigue performance; S-N curve

0 引言

波形钢腹板组合箱梁是一种新型钢-混凝土组合结构,它以波形钢腹板代替了传统混凝土腹板和平钢腹板,具有自重轻、跨越能力大、受力明确,避免腹板开裂等优点。近年来,中国关于波形钢腹板组

合箱梁的抗弯、抗剪、抗扭和稳定性能的研究已经取得了一定成果并开始应用于实际工程,然而针对其疲劳特性的研究才刚起步。

1965 年, Harrison 等^[1]首次进行了 2 根波形钢腹板工形钢梁的疲劳试验,结果表明波形钢腹板钢梁的疲劳强度比设置加劲肋的平直钢腹板梁提高

收稿日期:2012-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51278183);陕西省交通运输厅科技项目(12-21K)

作者简介:彭 鲲(1979-),男,湖南龙山人,工学博士研究生,E-mail:hdpk@hnu.edu.cn。

25%~50%。Korashy 等^[2]指出斜向折板处会出现应力集中,斜折板与梁纵向的夹角是应力集中的主要影响因素。随后陆续有学者对这种结构的参数(主要是波形腹板)进行调整并研究了其疲劳特性^[3],研究中发现:疲劳裂纹几乎均在波形腹板的直线段与曲线(或折线)段结合部位附近的焊趾处萌生扩展;影响连接焊缝部分应力集中的几何参数主要是波形倾斜边倾角和曲率半径。Ibrahim 等^[4-5]依据试验和断裂力学方法提出了波形钢腹板钢梁疲劳寿命预测公式,Sause 等^[6]提出了其疲劳寿命计算公式,并认为其疲劳寿命介于 AASHTO 疲劳设计 S-N 曲线的 B 级和 C 级疲劳细节之间,建议取 B9 级。

由于混凝土翼板的作用,使得波形钢腹板组合箱梁疲劳行为相比波形钢腹板钢梁更加复杂。日本对波形钢腹板组合箱梁的疲劳性能开展了一些研究,但主要围绕嵌入式连接件的梁体展开,而对于采用翼缘型连接件的此类型梁的研究非常少。在中国,长安大学对采用翼缘型连接件的波形钢腹板组合箱梁疲劳性能进行了有限元分析和试验研究,结果表明波形倾斜边倾角和曲率半径是影响焊缝部位应力集中的主要几何参数,试验主要研究了疲劳荷载对挠度和应变的影响,但试验梁未发生疲劳破坏^[7-9]。对于此类梁的疲劳破坏特性、疲劳寿命计算模式和疲劳设计方法仍是急需研究的问题。

本文中针对以上问题进行了疲劳破坏试验,通过比较采用翼缘型连接件的波形钢腹板组合箱梁与波形钢腹板钢梁疲劳特性的差异,并结合模型试验、有限元分析和断裂力学理论,对采用翼缘型连接件的波形钢腹板组合箱梁的疲劳破坏特性、疲劳寿命计算模式及疲劳设计方法进行了分析。

1 模型梁疲劳试验

1.1 试验模型概况

本文试验依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ D62—2004),并参照了日本新开桥的尺寸按一定比例缩小后,设计确定试验梁的构件尺寸和钢筋布置。设计了2根相同的简支试验梁(图1~3),梁长5 m,计算跨径4.8 m;顶、底板采用 C50 混凝土,弹性模量实测结果为42.9 GPa;梁内共设置2根 1860 级 $\Phi 15.24$ 钢绞线,永存力为279.3 kN;混凝土顶、底板内配置 I 级普通钢筋,实测屈服强度为390 MPa,面积分别为503,302 mm²;钢腹板实测厚度为2.35 mm;钢盖板宽为80 mm,

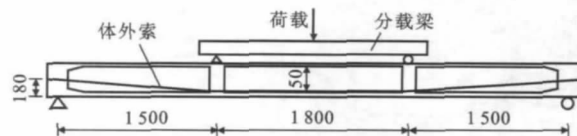


图1 试验梁纵向布置(单位:mm)

Fig. 1 Elevation of Test Beam (Unit:mm)

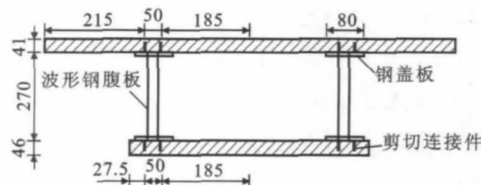


图2 横断面尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Cross Section of Test Beam (Unit:mm)

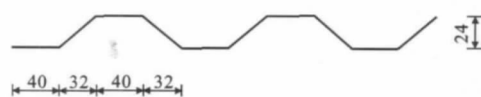


图3 波形大样(单位:mm)

Fig. 3 Corrugation of Steel Web (Unit:mm)

实测厚度为2.73 mm;波形钢腹板与混凝土顶、底板之间采用翼缘型剪力连接件。

1.2 加载试验方案

模型梁的疲劳试验采用三点加载,初始时采用较低的荷载幅(上限和下限分别为50,15 kN),频率为5 Hz。试验梁经过200万次加载后未发生破坏,随即提高疲劳荷载上限至80 kN,继续按5 Hz加载,加载20万次后在跨中附近一侧钢腹板开裂,发生疲劳破坏。两阶段疲劳试验过程均采用等幅正弦波加载方式,试验加载装置见图4。



图4 疲劳试验加载装置

Fig. 4 Fatigue Test Loading Device

2 波形钢腹板组合箱梁疲劳破坏模式

在以往的波形钢腹板梁的疲劳试验研究中,研究人员都发现一个共同的疲劳破坏特征,如图5所示,即裂纹几乎均在波形腹板的直线段与曲线(或折线)段结合部位附近的焊趾处萌生扩展,并最终导致下缘受拉翼缘钢板和腹板的开裂破坏。

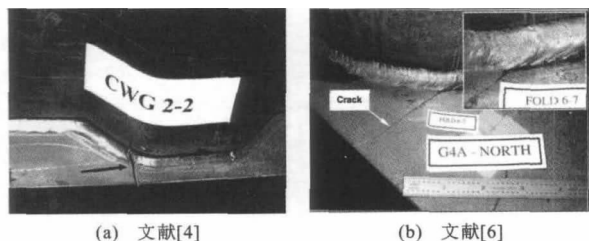


图 5 文献[4]和文献[6]的试验结果

Fig. 5 Test Results of Reference [4] and Reference [6]

本文疲劳试验中,当第 2 级荷载循环至 18 万次左右时,试验梁跨中附近底板翼缘钢盖板开裂,该部位的钢腹板也开始出现竖直向上发展的裂缝;当荷载循环至 20 万次时,腹板裂缝总长约 3 cm。裂缝部位在波形钢腹板平行折板与斜折板的交接处,开裂位置如图 6 所示,由于该处轴向刚度的突变引起应力集中,最终导致疲劳破坏。抗剪连接件始终粘结良好,钢-混结合面未发现有明显滑移和剪切破坏,说明采用翼缘型剪力连接件较为可靠,采用较薄的翼缘钢盖板具有较好的变形协调性能。



图 6 疲劳破坏形态

Fig. 6 Fatigue Failure Mode

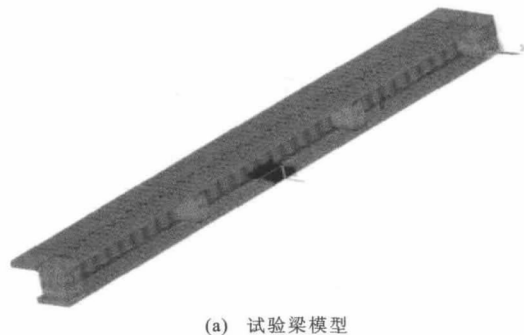
本文疲劳试验裂缝出现位置与文献[4],[6]试验结果一致,即波形折角处。对于疲劳破坏而言,疲劳强度主要取决于局部的应力状态,由于局部的应力集中现象,结构的疲劳破坏正是从这些疲劳源即薄弱部位产生。通常疲劳荷载作用下的名义应力要小于材料的屈服应力。比较上述的试验结果,可以推测波形钢腹板组合箱梁中的腹板及钢盖板也应该有类似于波形钢腹板工形钢梁的应力状态,至少在波形折角处也应是最大的应力集中点。基于此,后文将结合波形钢腹板梁的应力状态分析对其疲劳特性进行探讨。

3 波形钢腹板组合箱梁应力状态

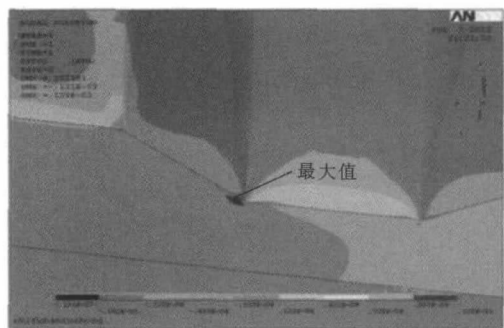
结构的疲劳性能与其应力状态相关,为了解预应力波形钢腹板组合箱梁中波形钢腹板及其抗剪连接件钢盖板的应力状态,本文中对试验梁波形折板

和钢盖板的应变进行了测量,同时结合有限元模型对其应力状态进行了对比分析。

采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 程序,对模型梁进行了分析,特别对钢盖板处的应力分布进行了细部研究,有限元模型如图 7(a)所示。应力分析结果表明在波形钢腹板平行折板与斜折板的交接处发生了应力集中现象,如图 7(b)所示。发生应力集中的位置与疲劳试验中裂缝出现位置是一致的。



(a) 试验梁模型



(b) 应力集中现象

图 7 试验梁有限元分析

Fig. 7 Finite Element Analysis of Test Beam

在此基础上,通过改变有限元模型的相关参数,研究了波形钢腹板组合箱梁的钢盖板和波形腹板的应力分布状态,并结合试验对波形钢腹板组合箱梁与波形钢腹板钢梁的应力分布状态进行比较(图 8)。将本文中体外预应力波形钢腹板钢-混组合试验梁的结果与文献[4]中的波形钢腹板工形钢梁试验结果及 2 个有限元模型(分别改变了试验梁的钢盖板厚度、宽度)的计算结果进行对比(图 9~11)。从图 9~11 可知,与传统的组合箱梁和工形钢梁相似,静荷载作用下,处于弹性受力阶段的波形钢腹板梁,其顶部和底部钢翼缘板的应变是呈线性增加的;由于波形腹板梁的腹板与传统组合箱梁、工形钢梁的腹板受力状态不同,其应变随荷载增加呈线性增加,但是其水平段应变明显比折线段大很多,在同一高度时,水平段腹板应变为折线段的 2.5~3.5 倍。

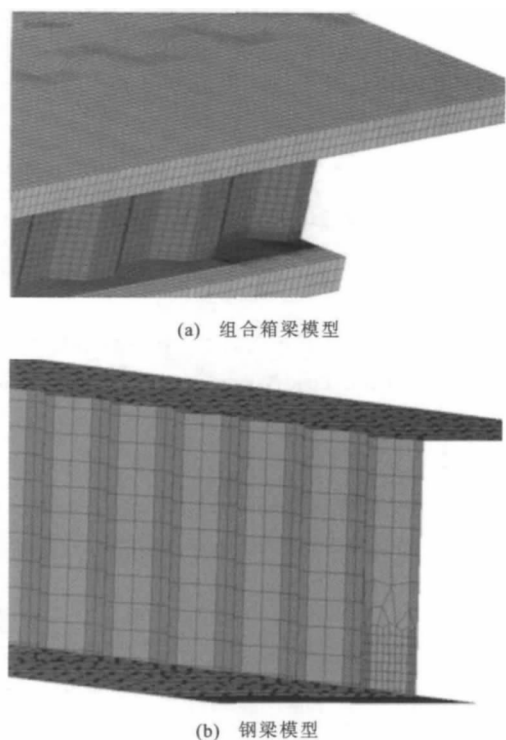


图8 组合箱梁及钢梁有限元模型对比
Fig. 8 Comparison of Composite Beam and Steel Beam Finite Element Model

对于波形钢腹板梁体,不论静载还是动载作用下,由于纵向刚度在波形折角处出现突变,其应力也在这些刚度突变点出现集中现象;顶、底钢板受压和受拉应力都呈线性分布,而波形钢腹板的水平段应力要比折线段大得多(主要取决于波折角的大小)。基于此,可以认为不论是波形钢腹板钢梁还是波形钢腹板组合箱梁,其顶、底钢盖板及波形腹板都具有类似的应力状态。

4 波形钢腹板梁的 S-N 曲线

第3节中,组合模型梁的试验结果与波形钢腹板钢梁的研究资料对比分析表明:不论是典型破坏特征,还是钢盖板、钢腹板的应力状态都是基本一致的。可以认为采用翼缘型连接方式的波形钢腹板组合箱梁和波形钢腹板钢梁的疲劳特征和基本疲劳性能具有一致性,因而在研究其疲劳问题时作为基本一致的结构进行研究是可行的。

为了研究波形钢腹板组合箱梁的疲劳性能,本文中拟从以下3个方面来进行研究:①参照 AASHTO^[10]进行波形钢腹板组合箱梁的抗疲劳设计;②以文献[4],[6]的试验结果为基础,拟合 S-N 曲线进行研究;③运用断裂力学推导此种结构的疲劳寿命计算模式和方法,并通过试验结果来进行验

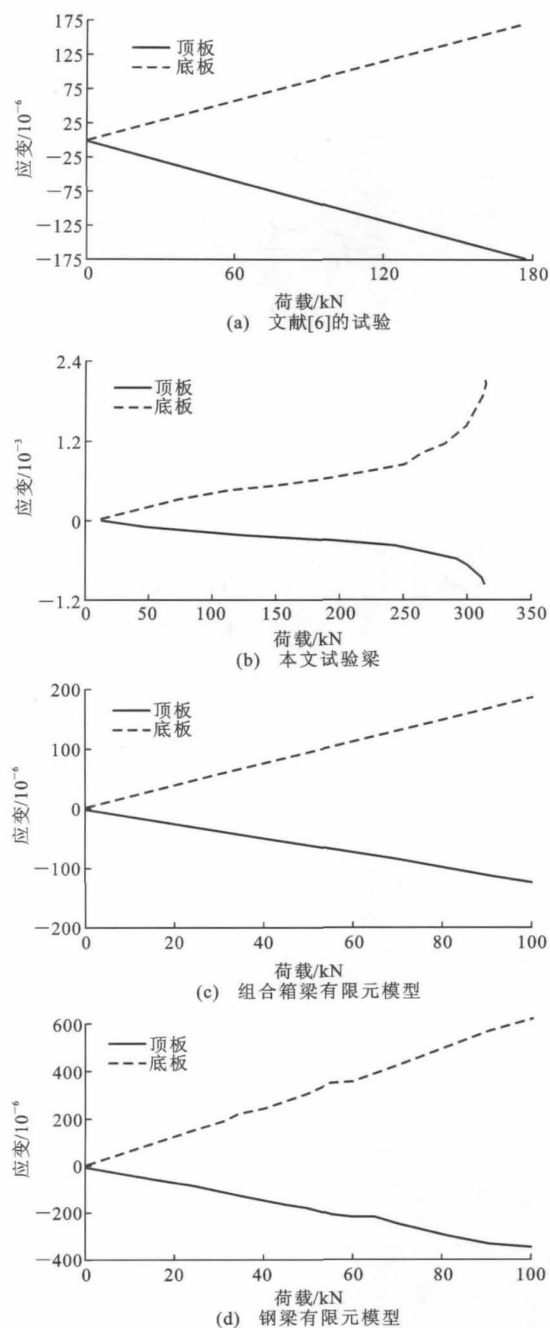


图9 静载时顶、底钢盖板的荷载-应变关系

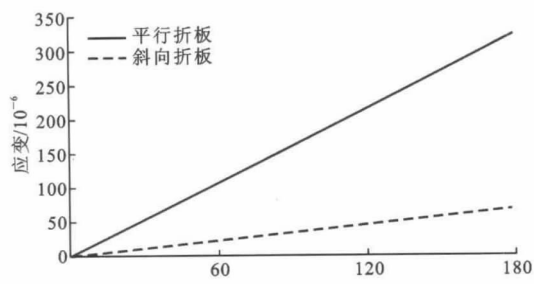
Fig. 9 Static Load Versus Strain in Steel Cover Plates
证分析。

4.1 设计规范

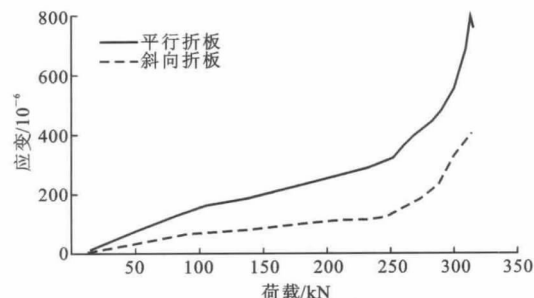
基于 Fisher 的理论基础, AASHTO 根据结构的特点及形式将钢结构的疲劳问题分成 8 个类别来计算,调整每个类别相应的系数以达到修正不同结构形式对疲劳寿命的影响,但总体上可以用双双对数模式表示,即

$$\lg(N) = \lg(A) - B \lg(S_r) \quad (1)$$

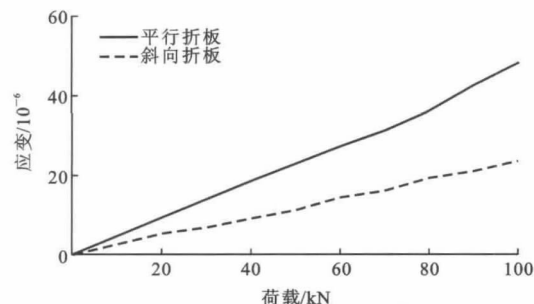
式中: N 为疲劳寿命; A, B 为对应不同类别的系数;



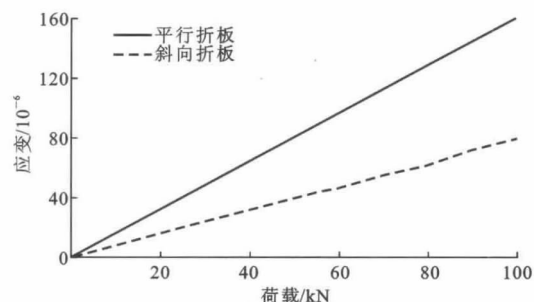
(a) 文献[4]的试验



(b) 本文试验梁



(c) 组合箱梁有限元模型



(d) 钢梁有限元模型

图 10 静载时平行折板和斜向折板荷载-应变关系

Fig. 10 Static Load Versus Strain in Parallel and Inclined Folded Webs

S_r 为受拉钢盖板上缘应力幅。

通过修正数据的标准差得到了偏安全的 $S-N$ 曲线,标准差的修正通过式(2)实现

$$\lg(A_{\text{lower}}) = \lg(A_{\text{mean}}) - 1.96s \quad (2)$$

式中: $\lg(A_{\text{lower}})$ 为曲线下界; $\lg(A_{\text{mean}})$ 为曲线中值; s 为标准差。

根据以上的理论原则,Keating 等^[11]对疲劳设计经验公式进行了大量的试验研究,并得到了修正

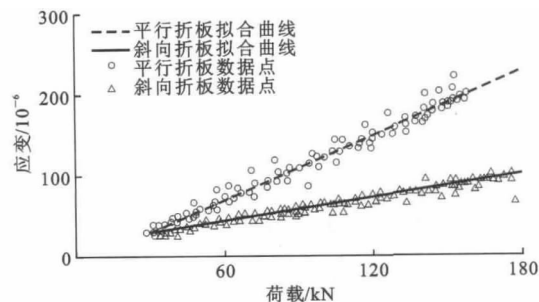


图 11 动载时水平折板和斜向折板荷载-应变关系

Fig. 11 Dynamic Load Versus Strain in Parallel and Inclined Folded Webs

公式,式(1)中双对数线的斜率统一取-3,并提出了各类别的疲劳极限应力(CAFL)。美国在此基础上提出了新的钢结构疲劳寿命计算建议,其具体参数取值如表 1 所示。

表 1 AASHTO 计算分类

Tab. 1 Calculation Classification of AASHTO

分类	$\lg(A_{\text{lower}})$	标准差 s	$\lg(A_{\text{mean}})$	CAFL 值/MPa
A	12.913 8	0.221	13.347 0	165.0
B	12.599 4	0.147	12.882 5	110.0
B'	12.301 0	0.147	12.589 2	82.7
C	12.158 4	0.063	12.281 8	69.0
C'	12.158 4	0.063	12.281 8	82.7
D	11.857 9	0.108	12.069 6	48.3
E	11.557 5	0.101	11.755 5	31.0
E'	11.107 2			17.9

4.2 S-N 曲线试验拟合

Ibrahim 等^[4-6]在总结前人研究成果的基础上,分别设计了 6 根,8 根波形钢腹板工形钢梁的疲劳试验,试验结果见表 2。

表 2 基于 Ibrahim 和 Sause 试验数据的 $S-N$ 曲线分析Tab. 2 Analysis of $S-N$ Curves From Test

Data of Ibrahim and Sause

编号	S_r /MPa	N /万次	$\lg(S_r)$	$\lg(N)$	$\lg(A)$
CWG-1	97.0	261.00	1.986 8	6.416 6	12.377 0
CWG-2	65.0	1 761.00	1.812 9	7.245 8	12.684 5
CWG-3	142.0	160.00	2.152 3	6.204 1	12.661 0
CWG-4	137.0	181.00	2.136 7	6.257 7	12.667 8
CWG-5	162.0	124.00	2.209 5	6.093 4	12.722 0
CWG-6	97.0	934.00	1.986 8	6.970 3	12.930 7
G1A	138.0	144.80	2.139 9	6.160 8	12.580 4
G2A	138.0	141.81	2.139 9	6.151 7	12.571 3
G3A	103.0	>764.51	2.012 8		
G4A	138.0	130.35	2.139 9	6.115 1	12.534 7
G5A	103.0	>731.65	2.012 8		
G6A	103.0	256.34	2.012 8	6.408 8	12.447 3
G1B	110.0	350.00	2.041 4	6.544 1	12.668 2
G4B	138.0	198.00	2.139 9	6.296 7	12.716 3

对表2的数据进行拟合,得到波形钢腹板梁S-N曲线的经验公式,可表示为

$$\lg(N) = 12.676 - 3\lg(S_r) \quad (3)$$

将式(3)与表1进行比较可知,波形钢腹板梁在结构类别的B类与C类之间,略高于B'类。

4.3 断裂力学分析

大量焊接钢桥疲劳破坏实例表明,疲劳裂纹均起源于细节中存在初始缺陷的地方。疲劳裂纹寿命主要包含2个部分:①裂纹萌生阶段,指细节在循环荷载作用下形成0.0001~0.2 mm大小的裂纹;②裂纹扩展阶段,即裂纹从萌生发展到临界裂纹大小。对于钢桥焊接细节来说,由于制造工艺精度要求的限制,焊接细节处一般均会存在较大的初始缺陷(0.02~0.2 mm),因此认为其均不存在裂纹萌生阶段,即钢桥细节的疲劳寿命仅包含裂纹扩展阶段。使用断裂力学进行疲劳寿命评估的关键工作就是研究存在初始缺陷条件下的疲劳裂纹扩展规律及疲劳裂纹扩展寿命计算模型^[12]。

Paris等^[13]指出构件疲劳寿命主要与材料裂纹的形成与扩展过程及应力集中程度有关,并提出了著名的疲劳寿命计算公式,即

$$N_r = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{\Delta K^m} da \quad (4)$$

式中: N_r 为疲劳寿命; ΔK 为应力强度因子幅度; a 为裂缝深度; a_0 为裂缝的初始深度,取0.12 mm; a_f 为裂缝的最终深度,取钢板厚度; m, C 为与材料有关的参数,根据文献^[12]取 $C = 2.18 \times 10^{-13}$, $m = 3$ 。

Anderson^[14]提出常幅荷载钢材疲劳损伤裂缝尖端的应力集中幅度计算式为

$$\Delta K = S_r \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

对于波形钢腹板钢梁结构,Fisher等^[15]基于大量的试验研究进一步将应力集中系数的计算具体化,表达式为

$$\Delta K = F_E F_S F_W F_G S_r \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

式中: F_E, F_S, F_W, F_G 分别为裂纹形状、自由表面、有限板宽、非均匀应力修正系数,根据文献^[16]可表示为

$$\left. \begin{aligned} F_E &= [1 + 1.464(\frac{a}{b})^{1.65}]^{-1/2} \\ F_S &= 1.211 - 0.186 \sqrt{a/b} \\ F_W &= 1 \\ F_G &= \frac{K_t}{1 + 0.88a^{0.576}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: b 为焊趾处椭圆微裂缝半长度; K_t 为应力集

中系数SCF。

将式(7)代入式(6)后可得

$$\Delta K = [1 + 1.464(\frac{a}{b})^{1.65}]^{-1/2} (1.211 - 0.186 \times \sqrt{a/b}) (\frac{K_t}{1 + 0.88a^{0.576}}) S_r \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

应力集中系数 K_t 可表示为

$$\left. \begin{aligned} K_t &= 0.827 9a^{0.236} \\ \tan(\alpha) &= \sin(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: α 为焊趾的角度; θ 为腹板波折角度。本文中试验梁所采用的波折角 θ 为 37° ,计算得应力集中系数 K_t 为1.873。

a 与 b 的关系目前没有定论,参考不同文献中的取值,Fisher等^[17]指出

$$b = 1.506a^{1.241} \quad (10)$$

综合式(4),(9),对式(4)积分后两边求对数得

$$\lg(N) = 12.695 - 3\lg(S_r) \quad (11)$$

根据文献^[6]可知

$$\lg(N) = 12.680 - 3\lg(S_r) \quad a/b = 0.65 \quad (12)$$

$$\lg(N) = 12.702 - 3\lg(S_r) \quad a/b = 0.75 \quad (13)$$

对比式(11)~(13)与表1可知,波形钢腹板梁落在结构类别的B类与C类间,略高于B'类。

4.4 S-N曲线的试验结果对比

依据P-M准则,则可根据以上所得S-N曲线计算本次试验梁的疲劳寿命,结果分析见表3,4;总累积损伤结果见表5。

表3 试验梁第1级疲劳荷载损伤计算

Tab. 3 Damage Calculations in Fatigue Load One

S-N 曲线	S_{r1}	n_1 /万次	N_1 /万次	D_1
式(3)	116.7	200	298.4	0.670
式(11)	116.7	200	311.7	0.642
式(12)	116.7	200	301.1	0.664
式(13)	116.7	200	316.8	0.631
平均值	116.7	200	307.0	0.652

注: S_{r1}, n_1, N_1, D_1 分别为第1级荷载作用下的应力幅、循环次数、疲劳寿命、Miner损伤值。

表4 试验梁第2级疲劳荷载损伤计算

Tab. 4 Damage Calculations in Fatigue Load Two

S-N 曲线	S_{r2} /kN	n_2 /万次	N_2 /万次	D_2
式(3)	187.5	20	71.94	0.278
式(11)	187.5	20	75.17	0.266
式(12)	187.5	20	72.61	0.276
式(13)	187.5	20	76.38	0.262
平均值	187.5	20	74.03	0.271

注: S_{r2}, n_2, N_2, D_2 分别为第2级荷载作用下的应力幅、循环次数、疲劳寿命、Miner损伤值。

表 5 试验梁 2 级疲劳荷载总累积损伤

Tab. 5 Gross Accumulated Damages in Two Fatigue Loads

S-N 曲线	D
式(3)	0.948
式(11)	0.908
式(12)	0.940
式(13)	0.893
平均值	0.923

注: D 为 2 级疲劳荷载总累积 Miner 损伤值。

从总损伤值来看,结果与 P-M 准则 $D=1$ 时破坏的假定接近,其中最大值为 0.948,误差为 5.2%,最小值为 0.893,误差为 10.7%;结果表明波形钢腹板工形钢梁的 S-N 曲线计算翼缘形钢盖板连接件的波形钢腹板组合箱梁损伤值时,与试验值吻合较好。无论是试验数据拟合曲线还是用断裂力学推导的 S-N 曲线,用来计算组合箱梁的损伤时,其损伤 D 皆小于 1,结果是偏于不安全的。其主要原因在于组合箱梁钢翼缘板受到了混凝土的约束,相对波形钢腹板钢梁而言腹板转折处应力集中效应更明显,疲劳问题也更突出。建议对应力集中系数进行修正,将式(9)修正为

$$K_t = 0.827 9 \alpha^{0.236} \beta \quad (14)$$

β 为修正系数,笔者根据试验结果和有限元计算对比分析取 $\beta=1.05$,则

$$K_t = 0.869 3 \alpha^{0.236} \quad (15)$$

从而,式(11)~(13)变为

$$\lg(N) = 12.632 - 3\lg(S_r) \quad (16)$$

$$\lg(N) = 12.617 - 3\lg(S_r) \quad (17)$$

$$\lg(N) = 12.639 - 3\lg(S_r) \quad (18)$$

应力集中系数 K_t 修正后,式(16)~(18)计算试验梁损伤总值 D 分别为 1.04, 1.08, 1.03, 计算结果偏于安全。

通过以上试验与理论分析可知,波形钢腹板组合箱梁的 S-N 曲线总体上位于 AASHTO 分类标准中的 B 类与 C 类之间,略高于 B 类。考虑到波形钢腹板的加工及焊接阶段形成的初始缺陷,同时鉴于相同结构的疲劳试验资料有限,试验数据难免出现一定的离散和偏差,建议在具体工程设计时,可偏安全地采用 AASHTO 分类标准中的 C 类低值位进行设计,此时相应的 S-N 曲线为

$$\lg(N) = 12.158 4 - 3\lg(S_r) \quad (19)$$

5 结 语

(1) 波形钢腹板组合箱梁在疲劳破坏过程中,底

板抗剪连接件钢盖板最先开裂,裂缝部位在波形钢腹板平行折板与斜折板的交接处,该处轴向刚度的突变引起应力集中,最终导致疲劳破坏。

(2) 采用翼缘型连接件的波形钢腹板组合箱梁的腹板及钢盖板的应力状态与波形钢腹板钢梁具有一致性。

(3) 采用试验数据拟合曲线和用断裂力学推导的 S-N 曲线计算组合箱梁的疲劳损伤时,其结果与试验值较接近,但偏于不安全,必须进行修正。

(4) 修正后得到的波形钢腹板梁的 S-N 曲线,与试验结果比较吻合,对于波形钢腹板组合箱梁疲劳计算比较适用。

(5) 对于波形钢腹板组合箱梁的设计,在有限疲劳寿命设计计算中建议偏安全的采用 AASHTO 中的 C 类标准。

(6) 本文中研究了采用翼缘形连接件的波形钢腹板组合箱梁的疲劳特性及计算模式,但对于采用嵌入型连接件的波形钢腹板组合箱梁的疲劳特性有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] HARRISON J D. Exploratory Fatigue Tests of Two Girders with Corrugated Webs[J]. British Welding Journal, 1965, 12(3): 121-125.
- [2] KORASHY M, VARGA J. Comparative Evaluation of Fatigue Strength of Beams with Web Plate Stiffened in the Traditional Way and by Corrugation[J]. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, 1979, 89: 309-346.
- [3] ANAMI K, SAUSE R, ABBAS H H. Fatigue of Web Flange Weld of Corrugated Web Girders: 1. Influence of Web Corrugation Geometry and Flange Geometry on Web Flange Weld Toe Stresses[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(4): 373-381.
- [4] IBRAHIM S A, EL-DAKHAKHNI W W, ELGAA-LY M. Fatigue of Corrugated-web Plate Girders: Experimental Study[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(9): 1371-1380.
- [5] IBRAHIM S A, EL-DAKHAKHNI W W, ELGAA-LY M. Fatigue of Corrugated-web Plate Girders: Analytical Study[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(9): 1381-1392.
- [6] SAUSE R, ABBAS H H, DRIVER R G, et al. Fatigue Life of Girders with Trapezoidal Corrugated Webs [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(7):

- 1070-1078.
- [7] 刘晓娣. 波形钢腹板组合梁桥疲劳性能参数研究[D]. 西安:长安大学,2006.
- LIU Xiao-di. Fatigue Performance Parameters of Composite Beam with Corrugated Steel Webs[D]. Xi'an:Chang'an University,2006.
- [8] 杨 丽. 波纹钢腹板组合箱梁疲劳性能研究[D]. 西安:长安大学,2009.
- YANG Li. Research on Fatigue Property of Box Girder with Corrugated Steel Webs[D]. Xi'an:Chang'an University,2009.
- [9] 周绪红,林新元,谭冬莲,等. 波纹钢腹板组合箱梁疲劳试验[J]. 中国公路学报,2010,23(4):33-38,69.
- ZHOU Xu-hong, LIN Xin-yuan, TAN Dong-lian, et al. Fatigue Test of Composite Box Beams with Corrugated Steel Webs[J]. China Journal of Highway and Transport,2010,23(4):33-38,69.
- [10] AASHTO LRFD SI-2007, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S].
- [11] KEATING P B, FISHER J W. Evaluation of Fatigue Tests and Design Criteria on Welded Details [M]. Washington DC: Transportation Research Board, 1986.
- [12] 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,2008.
- REN Wei-ping. Fatigue Behavior and Fatigue Life Evaluation of Structural Details in Welded Steel Girder Bridges [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2008.
- [13] PARIS P C, ERDOGAN F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws[J]. Journal of Basic Engineering,1963,85(4):528-533.
- [14] ANDERSON T L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press,1995.
- [15] FISHER J W, FRANK K H, HIRT M A, et al. Effects of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams [R]. Washington DC: Highway Research Board,1970.
- [16] ALBRECHT P, YAMADA K. Rapid Calculations of Stress Intensity Factors[J]. Journal of the Structural Division,1977,103(2):377-389.
- [17] FISHER J W, ALBRECHT P A, YEN B T, et al. Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments[R]. Washington DC: Transportation Research Board,1974.
-
- (上接第93页)
- 劳寿命[J]. 起重运输机械,1999(10):9-12.
- GUO Jian-sheng, SUN Guo-zheng. Fracture Mechanics Method for Estimating the Fatigue Life of Welded Steel Structure[J]. Hoisting and Conveying Machinery,1999(10):9-12.
- [4] 王宇航,聂建国. 基于断裂力学的组合梁栓钉疲劳性能[J]. 清华大学学报:自然科学版,2009,49(9):35-38.
- WANG Yu-hang, NIE Jian-guo. Fatigue Behavior of Studs in a Composite Beam Based on Fracture Mechanics[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2009,49(9):35-38.
- [5] LEE P G, SHIM C S, CHANG S P. Static and Fatigue Behavior of Large Stud Shear Connectors for Steel-Concrete Composite Bridge[J]. Journal of Constructional Steel Research,2005,61(9):1270-1285.
- [6] JOHNSON R P. Resistance of Stud Shear Connectors to Fatigue[J]. Journal of Constructional Steel Research,2000,56(2):101-116.
- [7] HANSWILLE G, PORSCH M, USTUNDAG C. Resistance of Headed Studs Subjected to Fatigue Loading Part I: Experimental Study[J]. Journal of Constructional Steel Research,2007,63(4):475-484.
- [8] CIVJAN S A, SINGH P. Behavior of Shear Studs Subjected to Fully Reversed Cyclic Loading[J]. Journal of Structural Engineering,2003,129(11):1466-1474.
- [9] NAITHANI K C, GUPTA V K, GADH A D. Behavior of Shear Connectors Under Dynamic Loads[J]. Materials and Structures,1988,21(5):359-363.
- [10] LEE P G, SHIM C S, CHANG S P. Design of Shear Connection in Composite Steel and Concrete Bridges with Precast Decks [J]. Journal of Constructional Steel Research,2001,53(7):203-219.
- [11] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构: 试验、理论与应用[M]北京:科学出版社,2005.
- NIE Jian-guo. Steel-concrete Composite Beam Structures; Experiment, Theory and Application[M]. Beijing: Science Press,2005.
- [12] XIE E. Fatigue Strength of Shear Connectors[R]. Guimaraes: University of Minho,2011.
- [13] OEHLERS D J. Deterioration in Strength of Stud Connectors in Composite Bridge Beams[J]. Journal of Structural Engineering,1989,116(12):3417-3431.
- [14] BRO M, WESTBERG M. Influence of Fatigue on Headed Stud Connectors in Composite Bridges[D]. Lulea: Lulea University of Technology,2004.