

基于断裂力学的波形钢腹板结构疲劳分析研究

黎海堤, 杨磊

(广东省冶金建筑设计研究院, 广东 广州 510062)

摘要:为了研究波形钢腹板结构的疲劳分析评估方法,对试验模型梁进行等幅疲劳荷载试验,并引用国内外其他试验,得到此种结构的基础疲劳试验数据。采用有限元子模型法获取构造细节处应力分布函数,继而利用权函数法推导裂纹处的应力强度因子。采用断裂力学法 Paris 公式推导波形钢腹板结构的 S-N 曲线,并与疲劳试验结果比较分析表明:初始裂纹深度取 $a_0=t/20$,并计入板厚影响,计算结果与试验结果更加符合。

关键词:疲劳性能;断裂力学法;波形钢腹板结构;模型试验

中图分类号: U441+.4

文献标志码: A

0 引言

波形钢腹板梁以波形钢腹板代替了传统混凝土腹板,具有自重轻、跨越能力大、受力明确、避免腹板开裂等突出优点,因而被广泛应用到各种跨径桥梁和建筑结构中^[1-3]。但波形钢腹板梁构造细节处受力复杂,加上中国公路超载现象严重,因此对其构造细节的疲劳分析非常迫切。20世纪60年代, Harrison^[4]首先对波形钢腹板钢梁进行了疲劳试验。随后多名学者^[5-8]相继进行了波形钢腹板梁的疲劳试验研究。研究者基本认为疲劳裂纹萌生于波折钢腹板的斜线段与翼缘钢板结合部位的焊趾处;研究方法主要是基于名义应力 S-N 曲线的传统疲劳分析方法。波形钢腹板梁相关疲劳试验总体的样本数较少,采用名义应力法确定其典型疲劳细节的疲劳等级归属缺乏充足的试验数据支持。同时波形钢腹板梁的构造细节受力复杂,很难明确定义其名义应力。断裂力学法克服了上述方法的不足,适用于复杂焊接结构的疲劳性能分析评估^[9]。

针对上述问题,本文首先以疲劳裂纹扩展原理为基础,探讨焊接细节的疲劳分析和疲劳寿命计算方法。接着,描述所进行的波形钢腹板梁疲劳试验

及其他相关试验数据。然后,建立试验梁有限元模型,采用断裂力学权函数法计算得到模型梁的应力强度因子曲线。最后,基于断裂力学 Paris 公式进行波形钢腹板梁典型疲劳细节 S-N 曲线的推导,并与疲劳试验结果进行对比分析。

1 焊接构造疲劳裂纹扩展分析

1.1 疲劳裂纹的扩展模型

断裂力学认为构件的疲劳破坏按裂纹的发展可分为两部分,即裂纹的初始产生和裂纹的扩展。但焊接构造中不可避免地具有初始裂纹(初始缺陷),疲劳破坏分析时只需分析初始裂纹的疲劳扩展部分。同时,由于焊接构造存在焊接残余应力,在实际计算中焊接结构可不考虑应力比的影响,疲劳裂纹扩展的门槛值也非常小。因此,分析焊接构造细节的疲劳破坏过程时,采用形式较为简单的 Paris 公式与其他方法所得结果基本一致。Paris 公式可用积分形式表示如式(1)所示。

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

式中: N 为疲劳寿命; a_0 为初始裂纹尺寸; a_f 为临界裂纹尺寸; ΔK 为应力强度因子幅值; m 为指数参数; C 为与材料有关的参数; a 为裂纹深度。

收稿日期:2021-12-30(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51978257);花都交通局科技项目

作者简介:黎海堤,男,高级工程师.E-mail:422311274@qq.com

1.2 应力强度因子

采用断裂力学方法分析疲劳裂纹扩展问题的最核心环节是应力强度因子 K 的确定。国际焊协(IIW)规范^[10]推荐了一种相对简便同时又高效的求解疲劳裂纹应力强度因子计算方法,即权函数方法。这种方法将应力强度因子的两个影响因素:荷载和几何,开展了变量分离。断裂力学权函数法计算应力强度因子 K 可表示为:

$$K = \int_0^a M(a, x) \sigma(x) dx \quad (2)$$

式中: $M(a, x)$ 为权函数; $\sigma(x)$ 为无裂纹体中假想裂纹处的应力分布函数。

权函数在一定的裂纹形状条件下是确定的,与荷载相独立。无裂纹体中假想裂纹处的应力分布函数的求解通常使用有限元法来实现。此方法的简便高效性也表现在有限元模型建模计算时,只需求解假想裂纹处的应力而无需对裂纹本身进行模拟建模。

1.3 表面裂纹权函数

对于非承载焊接接头,焊缝处往往存在较大的应力集中和残余应力,同时由于焊接工艺等原因焊趾表面往往存在初始裂纹(缺陷),在疲劳荷载的作用下此处初始裂纹极易持续发展而导致构件疲劳破坏。因此,运用断裂力学方法来进行非承载焊接接头的疲劳分析时,可假定其焊趾处存在一定深度和形状的初始表面裂纹。对于此类表面裂纹的裂纹扩展分析,Shen等^[11]提出了三维权函数分析计算方法,其表面裂纹最深处 a 点和表面处 c 点的权函数表达式为:

$$M_a(x, a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left[1 + M_{1a} \left(1 - \frac{x}{a} \right)^{\frac{1}{2}} + M_{2a} \left(1 - \frac{x}{a} \right) + M_{3a} \left(1 - \frac{x}{a} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (3)$$

$$M_c(x, a) = \frac{2}{\sqrt{\pi x}} \left[1 + M_{1c} \left(1 - \frac{x}{a} \right)^{\frac{1}{2}} + M_{2c} \left(1 - \frac{x}{a} \right) + M_{3c} \left(1 - \frac{x}{a} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (4)$$

该公式适用于:

$$0 < a/t < 0.8, 0.2 < a/c < 1.$$

式中: a 为裂纹深度; c 为裂纹宽度的一半; t 为板厚。

2 疲劳试验

2.1 试验梁模型梁

建造8根尺寸相同的波形钢腹板试验梁(图1~3)。简支梁长度为4.2 m,净跨为4.0 m;波形腹板为Q345钢板,厚度4 mm;翼缘钢板为Q345钢板,厚度6 mm;顶、底板及横隔板混凝土标号为C50;顶板构造钢筋为 $\phi 8$ 钢筋;底板普通钢筋为 $\phi 12$ 钢筋;设置2根 $\phi 15.24$ 钢绞线;采用翼缘型剪力连接件连接波形钢腹板与混凝土顶底板。各材料力学指标见表1。

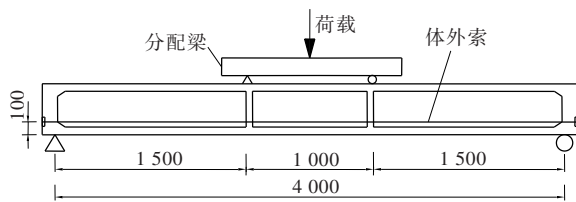


图1 纵断面图(单位:mm)

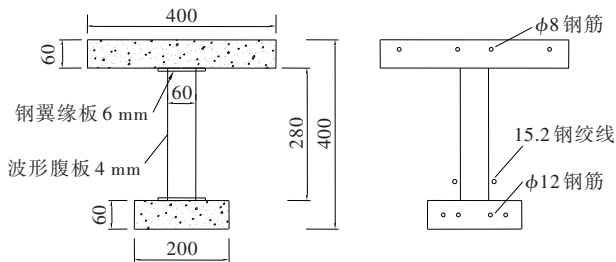


图2 横断面图(单位:mm)

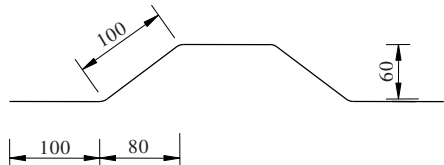


图3 波形钢腹板示意图(单位:mm)

表1 试验梁材料力学性能

材料	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	抗压强度(立方体)/MPa	弹性模量/GPa
钢腹板	408.4	595.8	—	206.0
钢翼板	378.5	541.6	—	206.0
φ12筋	345.3	490.4	—	205.0
φ8筋	480.4	630.2	—	200.0
混凝土	—	—	57.7	40.9

试验梁严格按施工规范制作。波形钢腹板一次成型。腹板与翼板的焊接为全熔透焊。体外预应力

钢绞线采用一端分级张拉。混凝土顶、底板及横隔板浇筑成型后,进行了及时养护。

2.2 疲劳试验结果

此次试验将1根试验梁作为参照梁进行了静载试验,对其余7根试验梁进行了等荷载幅疲劳试验。如图4所示,疲劳试验加载方式为中横隔板处对称加载,疲劳机为PMS-500脉动疲劳机,加载频率为2~4 Hz。典型疲劳断裂细节如图5所示,当荷载作用一定次数后,初始裂纹首先被发现在钢腹板斜折段与翼缘钢板相接焊缝的焊趾处位置,随后裂纹快速在翼缘钢板发展,直至断裂。表2为在等幅疲劳荷载作用下,7根试验梁的下部翼缘钢板应力幅值和其对应的翼缘钢板发生疲劳断裂时的荷载作用次数(疲劳寿命)。

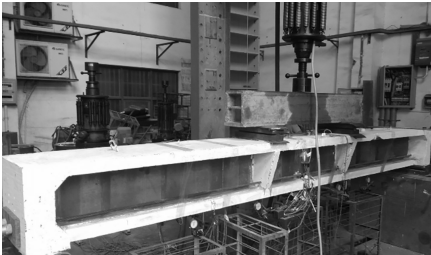


图4 疲劳试验加载

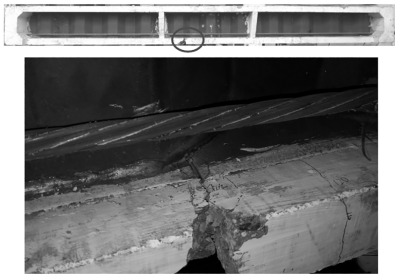


图5 典型疲劳断裂细节

表2 疲劳试验数据

梁体 编号	翼缘钢板 应力幅值 S_r/MPa	疲劳寿命 $N/10^4$ 次	梁体 编号	翼缘钢板 应力幅值 S_r/MPa	疲劳寿命 $N/10^4$ 次
JL-2	169	67.7	PL-1	150	135.3
JL-3	184	79.5	PL-2	160	217.3
JL-4	145	195.3	PL-3	126	297.4
JL-5	126	266.1			

2.3 其他疲劳试验

由于本文中试验样本数较少,为了更能有效验

证该文所述断裂力学计算模型对波形钢腹板结构疲劳计算的准确性,引用了 Ibrahim 等^[6-7]和 Sause 等^[8]等进行的波形钢腹板工形钢梁疲劳试验数据,部分试验数据列于表3。

表3 Ibrahim 和 Sause 的试验数据

试验梁	翼缘钢板 应力幅值 S_r/MPa	疲劳寿命 $N/10^4$ 次	试验梁	翼缘钢板 应力幅值 S_r/MPa	疲劳寿命 $N/10^4$ 次
G1A	138.0	144.80	WG1	97.0	261.00
G1B	110.0	350.00	WG2	65.0	1 761.00
G2A	138.0	141.81	WG3	142.0	160.00
G4A	138.0	130.35	WG4	137.0	181.00
G4B	138.0	198.00	WG5	162.0	124.00
G6A	103.0	256.34	WG6	97.0	934.00

3 有限元模型分析

断裂力学权函数法求解应力强度因子核心环节是求解假想裂纹处沿裂纹扩展方向上的应力分布函数。该文通过有限元程序 Workbench 建模的方式来求解波形钢腹板梁典型疲劳细节处即假想裂纹处的应力分布函数。有限元模型的建立与网格划分如图6所示。波形钢腹板建模时采用了子模型技术对关键细节进行局部细化。同时,进行了网格无关性验算。对于建模时关键参数焊趾半径 r 的设定,采用了 $r=t/25$, t 为主材翼板厚度;焊缝的焊接角度 $\theta=45^\circ$ 。此处的 r 值和 θ 值与试验梁实测数据吻合,同时也与 IIW 规范建议值保持了一致。

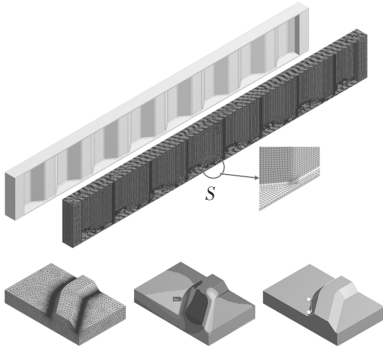


图6 试验梁有限元模型

如图6所示,有限元模型中应力最大值(应力集中点)出现在波形钢腹板斜线段与翼缘钢板结合部

位靠近转角处的焊趾位置,此位置与波形钢腹板梁疲劳试验中的疲劳裂纹萌生位置基本一致,因此在权函数法的假想裂纹处应力分布函数计算中可以指定此位置为应力提取位置。提取此应力集中点(S 点)沿板厚方向的应力,并除以翼缘钢板的名义应力,可得到假想裂纹处沿裂纹扩展方向的应力集中系数,计算结果如图7所示。

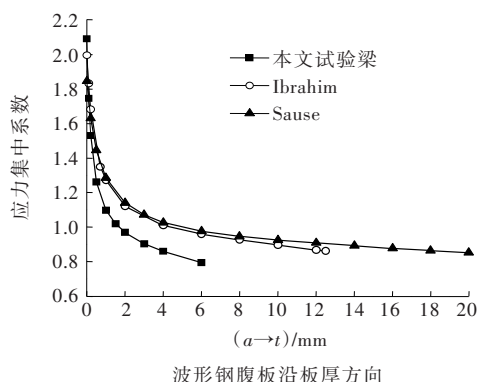


图7 假想裂纹处沿板厚方向应力集中系数

依据断裂力学权函数法计算原理,指定应力集中点表面焊趾存在裂纹并假定裂纹形状,采用Glinka提出的式(3)、(4),计算得到此裂纹的权函数。然后,运用式(2)计算裂纹的应力强度因子。图8为计算得到的波形钢腹板梁典型疲劳细节处在裂纹最深点沿板厚方向的应力强度因子分布图。同时,图中也列出了相同材质、厚度平钢板,在相同外荷载条件下,裂纹最深点沿板厚方向的应力强度因子分布图,用以进行对比分析。考虑到文章篇幅,图中只画出了裂纹在 $c=4a$ 和 $c=a$ 两种形状比条件下的计算结果。

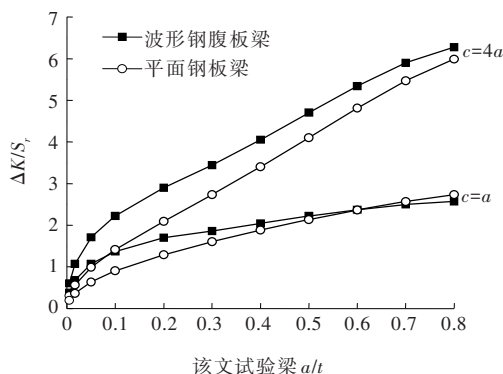


图8 裂纹最深点沿板厚方向应力强度因子

将波形钢腹板梁典型疲劳细节裂纹处应力强度因子与相同条件下平面钢板发生同种裂纹的应力强度因子的比值定义为强度因子扩大系数 M_k 。将应力

强度因子扩大系数的分布曲线即两者的比值沿板厚方向的分布曲线,列于图9中。

4 断裂力学推导S-N曲线

当指数参数 $m=3.0$,Paris公式表示为:

$$N = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{\Delta K^3} da \quad (5)$$

进行公式转化为:

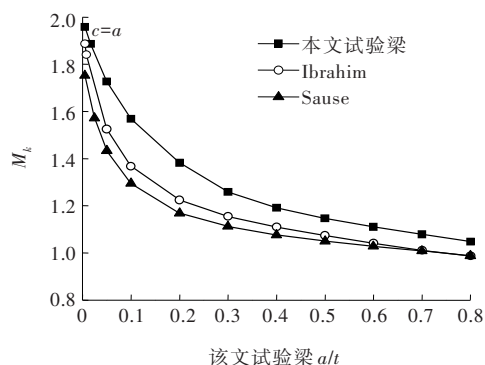


图9 裂纹最深点沿板厚方向应力强度因子扩大系数

$$\log N = \left[\log \left(\int_{a_0}^{a_f} \left(\frac{\Delta K}{S_r} \right)^{-3} da \right) - \log C \right] - 3 \log S_r \quad (6)$$

对于式中各参数的选取,IIW推荐了一组参数如下:初始裂纹尺寸 $a_0=0.1$ mm;裂纹形状比 $a_i/c_i=1$;临界裂纹尺寸 $a_f=\min(t/2; 12.5 \text{ mm})$ (t 为主板厚度);材料相关的常数 $C=3.00 \times 10^{-13}$ 。

由图8已知 $\frac{\Delta K}{S_r}$ 随板厚度变化曲线,由此可计算 $\log \left(\int_{a_0}^{a_f} \left(\frac{\Delta K}{S_r} \right)^{-3} da \right)$ 并代入式(6),于是得到该试验梁及Ibrahim试验梁、Sause试验梁的S-N曲线,并采用双对数模式[式(7)]表示,详细对比结果见表4。

$$\log N = \log A - 3 \log S_r \quad (7)$$

式中: A 为疲劳细节类别常数。

对比3个采用断裂力学法推导的S-N曲线双对数模式表达式,发现其与板厚效应理论并不一致。板厚效应理论认为:在同样裂纹深度和峰值应力的条件下,裂纹在厚板中扩展更容易,因而其抗疲劳性能较薄板要差些。各试验梁的翼缘钢板厚度为:该文试验梁6 mm、Ibrahim试验梁12.5 mm、Sause试验

梁 20 mm,如果严格按照板厚效应相关原理,式中的 $\log A$ 值应该随主材板厚的增加而减小。从表 4 可以看到:试验梁疲劳试验数据拟合曲线公式是符合这一规律的,但是采用断裂力学法推导的 $S-N$ 曲线双对数模式表达式与之不符。分析其产生的原因在于:初始裂纹深度统一采用了定值 $a_0=0.1\text{ mm}$,这与工程实际不符。在工程焊接中,由于焊接工艺的原因,在尺寸较大构件的焊缝处,焊接缺陷存在概率和缺

陷的尺寸都会大些。因此,采用断裂力学研究裂纹时,应当考虑焊接初始裂纹尺寸与焊接板材的厚度相联系。笔者根据多次试算的结果,建议初始裂纹取 $a_0=t/20$ 。现将假定初始裂纹尺寸分别取 $a_0=0.1\text{ mm}$ 和 $a_0=t/20$,并基于该文断裂力学法推导的波形钢腹板梁典型疲劳细节 $S-N$ 曲线公式和由试验数据拟合得到的波形钢腹板梁典型疲劳细节 $S-N$ 曲线公式列于表 4 中,进行比较分析。

表 4 波形钢腹板梁典型疲劳细节 $S-N$ 曲线对比分析

试验模型	断裂力学推导		试验数据拟合
	取 $a_0=0.1\text{ mm}$	取 $a_0=t/20$	
该文试验梁	$\log N=12.485-3\log S_r$	$\log N=12.672-3\log S_r$	$\log N=12.727\ 6-3.0\log S_r$
Ibrahim 试验梁	$\log N=12.575-3\log S_r$	$\log N=12.632-3\log S_r$	$\log N=12.674\ 0-3.0\log S_r$
Sause 试验梁	$\log N=12.584-3\log S_r$	$\log N=12.584-3\log S_r$	$\log N=12.586\ 0-3.0\log S_r$

通过比较分析可得出:

(1) 采用基于断裂力学权函数法推导得到的波形钢腹板典型疲劳细节的疲劳曲线与试验数据拟合得到的疲劳曲线总体上是一致的,断裂力学权函数法分析评估波形钢腹板梁疲劳性能效果较好。

(2) 采用断裂力学法对波形钢腹板典型疲劳细节进行疲劳分析研究时,应当计入板厚对初始裂纹尺寸的影响,推荐假定初始裂纹尺寸为 $a_0=t/20$ 。

5 结论

(1) 疲劳试验和有限元分析表明:波形钢腹板结构典型疲劳细节位于钢腹板斜折段与翼缘钢板结合位置的焊趾处。

(2) 采用权函数法获取应力分布函数,进而利用 Paris 公式推导的 $S-N$ 曲线与试验结果较为吻合,断裂力学法分析波形钢腹板梁疲劳性能具备工程适用性。

(3) 断裂力学法分析波形钢腹板梁典型疲劳细节时,应当计入板厚对初始裂纹尺寸的影响,推荐假定初始裂纹尺寸取 $a_0=t/20$ 。

参考文献:

[1] 王志宇,王清远.波形钢腹板梁疲劳特性的研究进展[J].公路交通科技,2010,27(6):64-71.
[2] 张建勋,赵谔笛.日本大跨径波形钢腹板 PC 矮塔斜拉桥:生野大桥设计与施工[J].中外公路,2021,41(3):89-91.

[3] 张建勋,赵谔笛.目前世界最大跨度波形钢腹板 PC 箱梁桥:安威川大桥的设计特点[J].中外公路,2021,41(2):87-90.
[4] HARRISON J D. Exploratory fatigue tests on two girders with corrugated webs[J].British Welding Journal,1965,12(3):121-125.
[5] 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 to stresses[J].International Journal of Fatigue,2005,27:373-381.
[6] IBRAHIM S A,EI-DAKHAKHNI W W,Elgaaly M. Fatigue of corrugated-web plate girders: experimental study[J]. Journal of Structural Engineering,2006,132(9):1 371-1 379.
[7] IBRAHIM S A, EI-DAKHAKHNI W W, ELGAALY M. Fatigue of corrugated-web plate girders: analytical study[J]. Journal of Structural Engineering,2006,132(9):1 381-1 392.
[8] SAUCE R,ABBAS H H,FISHER J W. Fatigue life of girders with trapezoidal corrugated webs[J]. Journal of Structural Engineering,2006,132(7):1 070-1 078.
[9] 李立峰,肖小艳,刘清.波形钢腹板 PC 组合箱梁疲劳损伤对抗弯承载能力的影响研究[J].土木工程学报,2012,45(7):111-119.
[10] HOBACHER A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Springer International Publishing,2016.
[11] SHEN G, PLUMTREE A, GLINKA G. Weight function for the surface point of semi-elliptical surface crack in a finite thickness plate[J].Engineering Fracture Mechanics,1991,40(1):167-176.