

管节点疲劳寿命估算 的统计分析方法

张延宏 柳春图 梅红

(中国科学院力学研究所)

提 要

本文用概率断裂力学的方法研究了海洋平台管节点的疲劳强度。对7个T型管节点的疲劳寿命试验进行了计算。在处理原始数据方面,本文提出了对疲劳裂纹扩展数据进行统一处理的方法。此外,还对各参量对寿命的影响进行了分析,并对与计算有关的一些问题作了讨论。

一、引 言

结构或构件的疲劳寿命可分为两部分:裂纹萌生寿命与裂纹扩展寿命。对于海洋工程中所用的大型焊接结构来说,由于在焊缝附近不可避免地存在一些原始缺陷,裂纹便常常在这里萌生并扩展,因此结构的疲劳寿命主要是裂纹扩展寿命。根据裂纹扩展速率估算寿命的断裂力学方法也因此而日益受到人们的重视。

但是由于疲劳寿命的估算与多种因素有关,这些因素又往往具有不确定性,这种不确定性来自两个方面,一方面是客观事物的不确定性,如材料性能参数的分散性,初始裂纹尺寸的随机性等,特别对于海洋平台结构来说,要受到多种瞬变载荷(如风载、波载)的作用,这就使得这种不确定性更为突出;另一方面是人们认识的局限性,例如载荷计算、结构分析以及局部应力的计算等,都很难作到十分准确。这些不确定性的存在,使得由断裂力学分析得到的疲劳裂纹扩展特性以及描述它的断裂力学参数,也都显示出很大的分散性。

近年来,国外一些学者开始将概率统计的思想与方法引入断裂力学,形成了“概率断裂力学”,并将其应用于工程实践中^[1, 2, 13]。国内这方面的工作还刚刚开始^[3]。这种方法的主要特点是将具有不确定性的一些参量看作是随机变量,并采用计算机模拟随机现象的技术(即Monte-Carlo方法),根据计算的需要,产生出这些参量的随机样本,并由此计算出一批寿命。通过对寿命的样本进行统计推断,得到疲劳寿命的分布及有关统计值。用这种概率统计的方法研究疲劳问题比用确定性方法分析更为合理,而与传统的对试验得到的寿命值进行统计分析的方法相比,其最大优点是经济性。由于采用了计算机模拟随机现象的技术,使得只需很少的投资,在很短的时间内即可得到一批寿命的样本,给出寿命的分布。

本文应用这种方法对海洋平台管节点的疲劳强度进行了分析研究,针对在工程实际中

可供分析用的疲劳试验数据往往较少的情况,我们提出了对疲劳裂纹扩展速率的原始数据采用统一处理的方法,使得在试验数据较少的情况下,也可以对材料参数进行统计推断,为概率断裂力学方法在工程实际中的应用带来了很大的方便。本文对7个T型管节点的疲劳寿命进行了计算,给出了贯穿壁厚寿命的有关统计值,并与相应的试验值进行了比较。此外还对一些参量对疲劳寿命的影响进行了分析与讨论。

二、计算过程

在用概率断裂力学方法估算疲劳寿命时,所用的基本公式仍是Paris公式,即:

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m \quad (1)$$

$$\int_{N_c}^{N_f} dN = \int_{a_0}^a \frac{da}{c(\Delta K)^m}$$

只是公式中的一些参数不再是常量,而是随机变量,例如初始裂纹尺寸 a_0 与 c_0 、材料性能参数 c 与 m 等,

计算的主要步骤如下:

1. 处理原始数据

计算机模拟随机现象,需要以试验观察为基础,因此首先要对作为随机变量处理的各参量的试验数据进行分析,尽可能准确地确定其分布类型与分布参数,然后再根据这些统计特性产生出计算寿命所需的随机样本(也称作伪随机数)。

(1) 对材料参数 c 与 m 的统计推断 材料参数 c 与 m 是根据试验所得的疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 与应力强度因子幅值 ΔK 的关系算出来的。通常是对每一根试件计算出一个 c 与 m ,然后对一批试件的 c 与 m 作统计分析。这就要求试件的数量足够多,才能使结果具有统计意义。然而由于疲劳试验是很费时的,因此,可供分析用的试件数量往往很有限,针对这种情况,我们提出了对来自不同试件的所有数据点进行统一处理,因为从统计学的观点来看,在材料相同、制备条件与试验条件也都相同的条件下,所得到的试验数据可以认为是来自同一母体。用这种统一处理的方法,不仅可以得到材料参数 c 与 m 的最小二乘估计值,还可以利用从总的的数据样本中随机抽取子样本的方法,对 c 与 m 作出统计推断。这样做可以最大限度地利用原始试验数据提供的信息,即使试件根数较少,也可以对材料参数进行统计分析。

(2) 对其余各参数的统计推断 在计算中作为随机变量的其他参数,如初始裂纹尺寸 a_0 、 c_0 等,只要原始数据足够多,便可以进行分布参数估计与分布拟合优度检验,所得到的结果作为下一步用计算机产生随机样本的依据。

2. 产生各参数的随机样本

根据统计学的原理,任意分布函数为 $F(x)$ 的随机子样都可以通过在 $[0,1]$ 上均匀分布的随机变量的子样产生出来,因此当各个参数的分布函数确定了以后,就可以根据计算

的需要, 利用计算机产生出具有任意容量的随机样本, 作为估算疲劳寿命的数据。

3. 估算疲劳寿命

在对海洋平台结构进行分析时, 通常将初始缺陷简化为表面裂纹。对于表面裂纹, 试验表明, 裂纹沿长度方向 c 与深度方向 a 的扩展都可用Paris公式描述, 因此相应有两个公式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dN} &= c_a (\Delta K_a)^{m_a} \\ \frac{dc}{dN} &= c_c (\Delta K_c)^{m_c} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 c_a 、 m_a 与 c_c 、 m_c 分别为 a 方向与 c 方向上的材料参数。

由于 ΔK 是裂纹尺寸 a 与 c 的函数, 因此在对寿命进行积分计算时, 不论是 $\frac{da}{dN}$ 还是 $\frac{dc}{dN}$ 的计算, 都与另一方向的尺寸有关。鉴于目前人们对于表面裂纹在疲劳扩展过程中的形状变化情况还不够了解, 我们在计算中对 a 与 c 的关系未作任何假定, 而是采用了递推法, 具体作法是: 对于任意一组随机子样值, 以初始裂纹尺寸 a_0 与 c_0 为初值, ΔN 为计算步长, 可得到:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \int_0^{\Delta N} c_a [\Delta K_a(a_0, c_0, \sigma)]^{m_a} dN + a_0 = f_a^{(1)} \Delta N + a_0 \\ c_1 &= \int_0^{\Delta N} c_c [\Delta K_c(a_0, c_0, \sigma)]^{m_c} dN + c_0 = f_c^{(1)} \Delta N + c_0 \\ N_1 &= \Delta N \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将得到的 a_1 与 c_1 代入 ΔK , 进行下一步计算:

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= \int_{N_1}^{N_1+\Delta N} c_a [\Delta K_a(a_1, c_1, \sigma)]^{m_a} dN + a_1 = f_a^{(2)} \Delta N + a_1 \\ c_2 &= \int_{N_1}^{N_1+\Delta N} c_c [\Delta K_c(a_1, c_1, \sigma)]^{m_c} dN + c_1 = f_c^{(2)} \Delta N + c_1 \\ N_2 &= N_1 + \Delta N \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

经过 n 次计算后, 当 a_n 或 c_n 达到终值 a_f 或 c_f 时(一般取 a_f =壁厚, 为控制值), 计算即结束, 此时的循环次数 N 即为疲劳寿命 N_f 。

4. 对疲劳寿命的统计推断

对各个参数进行一次随机抽样可得到一个寿命 N_f , 经过 k 次抽样后, 就得到了寿命 N_f 的容量为 k 的样本, 对这个样本进行统计分析, 可以得到寿命 N_f 的统计分布及有关统计值。

三、计算实例

本文对郑州机械研究所技术文件OTR-01-01中给出的7个T型管节点疲劳寿命的试验数据进行了计算。对试验中已给出的原始数据(包括应力集中系数)计算与试验是一致的,对于试验中未给出的数据,如一些参量的分布参数等,则参照有关文献^[4-12]确定。

计算所用数据如下:

材料:主管A131,支管API-5LB;几何尺寸:主管 $\phi 508 \times 19.1 \text{ mm}$,支管 $\phi 406 \times 19.1$

表 1

载荷 (kN)	热点应力幅值 $\Delta\sigma$ (N/mm ²)	N_{50} (10 ⁵)	N_{50} (10 ⁵)			
			均值	标准差	N_{\min}	N_{\max}
±166.6	150.9	8.77	25.0	9.62	7.80	64.05
±205.8	186.2	8.47	13.25	5.47	4.07	36.55
±235.2	212.7	6.10	8.79	3.67	2.69	26.85
±274.4	248.2	2.45	5.45	2.28	1.67	16.64
±137.2	124.5	85.50	44.16	15.76	14.16	109.90
±245.0	235.2	5.17	6.43	2.69	1.97	19.66
±196.0	177.4	19.70	11.32	4.70	3.47	32.27

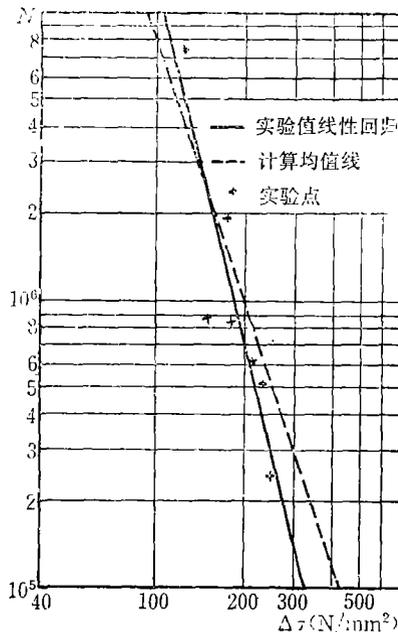


图1 试验与计算的S-N曲线

mm; 弹性模量 $E=2.12 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 泊松比 $\nu=0.3$; 加载方式为轴向载荷; 应力集中系数 $SCF=10.5$; 假定在裂纹深度与长度方向上材料参数相同, $m=3.1$, c 服从对数正态分布, 即 $\ln c \sim N(-29.84, 0.1641)$, 初始裂纹尺寸 a_0 服从三参数威布尔分布, $a_0=0.15 \text{ mm}$, $0.05 < a_0 < 0.5$, 三参数为 $\alpha=2.101$, $\beta=0.024$, $\delta=0.00002$, $a_0/c_0=0.15$ 。

对于每一个应力水平, 取 450 个随机样本进行计算, 求出贯穿壁厚寿命 N 的分布及有关统计值。计算结果表明, 寿命 N 服从三参数威布尔分布。表 1 给出了在 7 种不同应力水平下寿命的均值、标准差以及最大、最小值。为了便于比较, 将试验结果也列在表 1 中。

从表1中可以看出: 试验值落在计算值的范围内, 即有 $N_{min} < N_i < N_{max}$ 。

对试验值与计算均值分别作线性回归, 所得结果如下:

$$\text{试验值} \quad \lg N = 15.32 - 4.11 \lg \Delta \sigma$$

$$\text{计算值} \quad \lg N = 12.91 - 3.0 \lg \Delta \sigma$$

图1为试验与计算的 $S-N$ 曲线。可以看出, 两条曲线是很接近的。

用概率断裂力学的方法, 在HP-9 000/320计算机上进行计算。在一个给定的应力水平下, 只需20分钟左右, 即可得到450个寿命的随机样本, 并作出统计推断, 该方法的 经济性是显而易见的。

四、参数敏感性分析

由于对各参量的统计推断是以原始数据为依据的, 因此原始数据的数量与数值对统计推断的准确程度有很大影响, 为了了解对各参量的统计推断的误差对于寿命估算的影响, 我们依次分析了当某一参量的均值或标准差发生变化时, 寿命的均值与标准差将发生怎样的变化, 也就是寿命对某一参量的敏感性。

1. 寿命对材料参数 c 与 m 的敏感性

(1) 对均值变化的敏感性 若以 \bar{c}^* 、 \bar{m}^* 表示材料参数 c 与 m 均值的参考值, \bar{N}^* 为相应的寿命均值参考值, \bar{c} 、 \bar{m} 与 \bar{N} 分别为变化后的值, 则

$$\bar{N}/\bar{N}^* = (\bar{c}/\bar{c}^*)^{-1} \quad (5)$$

$$\ln \bar{N}/\ln \bar{N}^* - 1 = A(1 - \bar{m}/\bar{m}^*) \quad A \approx 2.2 \quad (6)$$

可以看出, 在概率统计分析中, 材料参数均值与寿命均值的关系和确定性分析中材料参数与寿命的关系是相似的。

(2) 对标准差变化的敏感性 材料参数标准差的变化对寿命的影响是很大的, 主要表现为对寿命分散度的影响, 若以 $c_{v,c}$ 、 $c_{v,m}$ 与 $c_{v,N}$ 分别表示 c 、 m 与 N 的变异系数 (变异系数 $c_v = \text{标准差}/\text{均值} \times 100\%$), 则

$$c_{v,N} \approx 30c_{v,c} \approx 20c_{v,m} \quad (7)$$

$c_{v,N}$ 随 $c_{v,c}$ 或 $c_{v,m}$ 的增大而迅速增大, 虽然对于寿命的均值影响很小, 但对寿命分布曲线的左端却有很大影响, 将使与95%存活率相对应的寿命值 $N_{.95}$ 大大降低。

2. 寿命对初始裂纹尺寸的敏感性

目前各文献中对初始裂纹深度 a_0 的分布情况说法不一, 有对数正态分布、指数分布以及三参数威布尔分布等三种不同的说法, 对于 a_0 的均值与取值范围也给出了不同的结果^[2, 4-9]。这不仅由于检测的客观对象可能确有差异, 而且也与检测手段的精度有关。

(1) a_0 的分布类型对寿命的影响 在 a_0 均值相同的条件下, 我们对假定 a_0 为指数分布与假定 a_0 为威布尔分布这两种情况进行了计算, 结果表明, 当 a_0 为指数分布时, 所得到

的寿命均值与变异系数都比 a_0 为威布尔分布时的值要大,但是当 a_0 较小时,例如 $\bar{a}_0 = 0.1$ 时,根据两种分布计算出的寿命均值相差不大。此外,对寿命分布曲线左端在两种情况下给出相近的结果,如 $N_{0.5}$ 在 a_0 的两种不同分布下得到的值比较接近。从设计角度来看,主要关心的是寿命分布曲线的左端,因此,这部分对 a_0 分布类型不敏感是很有利的。

(2) a_0 均值对寿命的影响 令 \bar{a}_0^* 表示 \bar{a}_0 的参考值, \bar{N}^* 为相应的 \bar{N} 的参考值, \bar{a}_0 与 \bar{N} 为变化后的值,计算结果表明:

$$\left. \begin{array}{l} a_0 \text{ 为指数分布 } \quad \bar{N} / \bar{N}^* \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{a}_0}{\bar{a}_0^*} \right)^{-1} \\ a_0 \text{ 为威布尔分布 } \quad \bar{N} / \bar{N}^* \approx \left(\frac{\bar{a}_0}{\bar{a}_0^*} \right)^{-1} \end{array} \right\} \quad (8)$$

这说明当 a_0 为指数分布时, \bar{N} 对 a_0 的变化不敏感。计算结果还显示出寿命分布曲线的左端对 a_0 的变化更不敏感, $N_{0.5}$ 的值很稳定。

(3) a_0 标准差对寿命的影响 a_0 标准差的变化对寿命分散度的影响不及材料参数 c 与 m 的影响大,一般来说, $c_{v_n} \approx 10c_{v_0}$,考虑到在实际中 a_0 的取值范围是有限的,例如根据各文献中给出的结果 a_0 的取值范围在(0.025, 0.5)之间,令 a_0 仅在这个范围内取值,则寿命分布曲线左端受 a_0 分散度变化的影响更小,例如当 c_{v_0} 从10增大到150时, $N_{0.5}$ 的值仅降低20%。

3. 初始裂纹形状 a_0/c_0 对寿命的影响

文献中对于初始裂纹形状给出了不同的假定,我们选 $a_0/c_0 = 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 1.0$ 五种情况进行了计算。 $\bar{N}_{1.0}$ 以及 $\bar{N}_{0.15}$ 分别表示在 $a_0/c_0 = 1.0$ 以及 $a_0/c_0 = 0.15$ 时寿命的均值,则在 a_0 为威布尔分布时,有

$$\frac{\bar{N}_{1.0}}{\bar{N}_{0.15}} \approx 3$$

这说明初始裂纹形状对寿命的影响不大,这是因为在疲劳裂纹扩展过程中,裂纹形状将按照一定的规律自行调整,趋于某一定值。

以上所作的关于寿命对某一参数的敏感性分析,是在仅取该参量为随机变量,其他参量均看作是常量的情况下进行的。当各个参量均为随机变量时,对寿命产生的影响并不是各参量影响的简单叠加。此时,每个参量产生的影响因彼此覆盖而有所减弱。

五、若干问题的讨论

1. 管节点应力强度因子的计算

由于裂纹通常在管节点焊趾根部萌生并扩展,而该处几何形状与受力状态都很复杂,

因此目前国内外均未有计算管节点应力强度因子的精确方法。其中,一种计算管节点表面裂纹应力强度因子的近似方法¹⁾,该方法以无裂纹管节点应力应变场为计算裂纹尖端的远场条件,以平板表面裂纹的数值解为基础,通过乘以鼓胀系数作曲率修正,得到管节点表面裂纹的应力强度因子。这种方法有严格的理论基础与较高的计算精度,是目前已有的近似方法中较为可靠的。

本文在计算中即是采用这种近似方法,其中平板表面裂纹的解是采用 Newman 公式^[14],鼓胀系数则按经验公式进行计算¹⁾。

2. 对材料参数 c 与 m 随机性的处理

在 Paris 公式中, c 与 m 是反映材料性能的两个参量,是根据疲劳裂纹扩展速率的试验数据确定的。已经证明,即使很严格地控制试验条件,对于同一种材料由试验数据计算出来的 c 与 m 仍有一定的分散性,因此将材料参数看作是随机变量是有道理的。但是在计算中如何体现 c 与 m 的随机性,都可以有几种不同的作法:(1) m 是确定的, c 是随机的;(2) c 是确定的, m 是随机的;(3) m 与 c 是不相关的随机变量;(4) m 与 c 是相关的随机变量。

我们对在 c 与 m 取不同的分布参数情况下得到的计算结果进行了分析。我们认为,当 c 与 m 的分散度不是很大时,将这两个参数取为不相关的随机变量是可以的,但是当 c 与 m 的分散度均较大时,则不宜这样处理,因为这时若任意抽取 c 与 m ,便可能会出现很小的 c 配以很小的 m 以及很大的 c 配以很大的 m 这样差异很大的组合,这不仅会使得寿命的分散度变得过大,而且这样差异过大的组合实际上已超出材料分散性的范围,因此这时最好将 m 与 c 看作是相关的随机变量或将其中的一个作为确定的。

3. 表面裂纹在疲劳扩展过程中的变化

表面裂纹形状在疲劳扩展过程中是如何变化的,这仍是一个尚未解决的问题,人们对此提出了不同的假设,如设 $a/c=1$ 及 $a/c=0.15$ 等等。我们考察了在 a/c 取不同值时寿命的变化情况,结果表明,寿命对 a/c 的变化比对 a_0/c_0 的变化要敏感得多。对 a/c 作不同的假设,所得到的寿命值有很大的差异。表2为部分计算结果。

在本文的计算中,对于裂纹形状未作任何假定,而是在裂纹深度与长度两个方向上分

表 2

$a/c (=a_0/c_0)$	\bar{N}	c	N_{50}	N_{95}
1	56 962	87.5	38 842	23 456
0.5	19 337	89.6	13 038	7 704
0.25	17 328	92.7	7 508	4 295
0.2	10 242	94.1	6 737	3 800
0.15	9 409	96.8	6 093	3 320

1) 柳春图、李英治、张延宏、张端重,管节点应力强度因子分析,中国科学院力学所工作报告,1988。

别应用Paris公式,并用递推法来进行积分计算.我们分析了计算过程中 a 与 c 的关系变化,发现在两个方向取相同的材料参数的条件下,不论初始裂纹形状 a_0/c_0 如何,经过若干步的计算后, a/c 的变化过程便趋于一致,而且在裂纹贯穿壁厚时,均有 $a/c=0.7$.这一结论正确与否还有待于试验验证.

六、结 论

(1) 本文应用概率断裂力学的方法对海洋平台管节点的疲劳强度进行了研究,对7个T型管节点疲劳寿命试验进行了计算,得到了与试验曲线很接近的 $S-N$ 曲线.

(2) 本文提出了对疲劳裂纹扩展试验数据进行统一处理的方法,使得在试件数目很少的情况下,也可对材料参数进行统计推断,从而估算疲劳寿命,为概率断裂力学在工程实际中的应用提供了有利条件.

(3) 本文对各参量对寿命的影响进行了分析,结果表明,材料参数 c 与 m 的均值与标准差的变化对寿命的影响较大,特别是 c 与 m 的分散度对寿命分散度有很大的影响;初始裂纹尺寸 a_0 变化的影响次之,寿命对初始裂纹形状的变化不敏感.

(4) 在本文的计算过程中,对裂纹形状未作任何假定.为了了解裂纹形状对疲劳寿命的影响,本文对 a/c 取不同值的情况作了一些计算.结果表明,疲劳寿命对扩展过程中裂纹形状的变化比对初始裂纹形状的变化要敏感得多,因此裂纹在疲劳扩展过程中的形状是估算寿命时应注意的一个因素.

参 考 文 献

- [1] Lidiard A. B., Probabilistic Fracture Mechanics, in Fracture Mechanics ed. by R. A. Smith (1979).
- [2] Knat M, Engesvik and Torgeir Moan, Probabilistic Analysis of the Uncertainty in the Fatigue Capacity of Welded Joints, Eng. Frac. Mech. Vol. 18, No. 4, (1983).
- [3] 吴敬梓、刘建新、陈新增, 疲劳裂纹扩展的概率断裂力学分析, 第五届全国断裂学术会议论文集, 1988.5.
- [4] Signes, E. G. et al., Factors Effecting the Fatigue Strength of Welded High Strength Steels, British Weld. Journ. March, 108—116 (1967),
- [5] Watkinson, F. et al., The Fatigue Strength of Welded Joints in High Strength Steels and Methods for its Improvement, Proc. Conf. on Fatigue of Welded Structures, Brighton, Paper 7, 97—113 (1970).
- [6] Eide, O. I., Fatigue Crack Initiation and Propagation at the Weld Toe of Cruciform Joints, M. Sc. Thesis, Div. of Ship Structure, NTH, Trondheim (in Norwegian), (1976).
- [7] Bokalrud, T. and Karlsen, A., Probabilistic Fracture Mechanics Evaluation of Fatigue Failure from Weld Defects in Butt Weld Joints, Proc.

- Conf. on Fitness for Purpose Validation of Welded Constructions, London, Paper 28 (1981).
- (8) Recho, N., Potential Use of Fracture Mechanics in the Fatigue Design of Fillet Welded Joints, Proc. 5th European Conference on Fracture, Lisbon, Vol. 1, 159—170 (1984).
- (9) Becher, P. E. and Hanson, B. (1974), Statistical Evaluation of Defects in Welds, Danish Institute of Welding.
- (10) Johnston, G. O., Statistical Scatter in Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Rate Data, ASTM STP 798 pp. 22—66 (1983).
- (11) Snijder, H. H. et al., Probabilistic Fracture Mechanics Approach of Fatigue and Brittle Fracture in Tubular Joints, Proc. Steel in Marine Structures, Amsterdam, The Netherlands.
- (12) DnV (1984).
- (13) Madsen, H. O., Skjong, R. and Kirkemo, F. (1987), Probabilistic Fatigue Analysis of Offshore Structures—Reliability Updating Through Inspection Results, IOS'87, Glasgow, U. K. September, 28—29.
- (14) Newman, J. C. and Raju, I. S., NASA, TP—1578 (1979).

THE FATIGUE LIFE PRODUCTION OF WELDED JOINTS BY USING STATISTICAL ANALYSIS METHOD

Zhang Yanhong, Liu Chuntu and Mei Hong

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT

The paper deals with fatigue life of welded joints of offshore structures by using the method of probabilistic fracture mechanics. The unitary processing method has been proposed to deal with fatigue data of fatigue crack propagation tests. The fatigue life for seven T-type welded joints have been calculated. The influence of several parameters on fatigue life and some calculation problems are discussed.