

海洋工程结构物疲劳分析和寿命估算方法概述

曾 春 华

(中国科学院力学研究所)

提 要

本文深入地分析和讨论了海洋工程结构物的疲劳分析和寿命估算方法。疲劳分析包括海洋工程结构物的原始资料、所受载荷、材料特性、结构布局、应力集中以及疲劳累积损伤等的分析。疲劳寿命估算包括疲劳裂纹形成阶段和疲劳裂纹扩展阶段寿命的估算方法。最后还对今后这些课题的研究提出了建议。

一、引 言

海洋工程结构物,特别是采油平台,不管是固定式平台、半固定式平台、可移动式平台,还是系泊式平台,通常都是一个大尺寸的复杂装置。它由各式各样的部件组成,这些部件又由不同的材料组成,所受的载荷历史和环境条件又十分复杂,绝大多数是随机性质的,因此它所涉及的疲劳问题比起地面其它方面的结构来说更加突出。就以固定式导管架平台来说,它一般是由管状构件组成的空间结构,管状接头形式多样,数量很大,比如一个工作水深一百米的导管架平台,桁架腿就有三百多个接头。接头处往往产生很高的应力集中,它不仅影响结构的静强度,也严重地影响结构的疲劳强度。实践表明,不少实际钻探和采油平台的破坏往往都是由于管状接头承受交变波浪载荷的疲劳破坏引起的。因此对于一个海洋工程结构物来说,要确保它安全使用,最重要的研究项目之一,就是要对结构物进行疲劳分析和疲劳寿命估算。

二、海洋工程结构物的疲劳分析

一般说来,海洋工程结构物疲劳分析所包括的内容是十分广泛的,这里仅将最重要的内容进行分析和讨论。

1. 结构所受潮荷的分析

海洋工程结构物可能遭受到恶劣的环境条件,如浪、风、流、冰和地震载荷或它们组合载荷的作用,但是,在大多数情况下考虑的是波浪载荷。波浪对海工结构所产生的流体动力作用是最基本的载荷形式。最近 30 年来,由于近海结构物如钻探和采油平台以及水下油库等的兴建,近海波浪载荷的研究和分析就显得更为重要了。

波浪一般分为规则波浪和非规则(随机)波浪两大类,因此目前将海况条件转化为近海结构物上的流体动力载荷也有两种方法,即确定性方法和随机方法。

在规则波中,作用在海洋工程结构物上的运动和波浪载荷,可用六个相关微分方程表示^[1],对于每个自由度,有

$$(m+a)\ddot{x}+b\dot{x}+cx=F_a+F_s+F_f$$

方程左边是在静水中运动的物体力,包括惯性力、阻尼力和复原力。右边是带有附加质量的波浪扰动力 F_a , 耗散力 F_s 和傅汝德-克雷洛夫力 F_f , 前两项也叫绕射力,是由于物体的存在引起压力变化而产生的,而傅汝德-克雷洛夫力是由未经扰动的波浪沿着结构物边界的压力分布造成的。

对于细长结构物,运动方程组可用二维切片理论求解^[2]。如果结构物不是细长或比波长要大,则必须运用三维理论^[3]。对于大型结构,在表面处绕射力是反作用于傅汝德-克雷洛夫力的。对于固定的结构物,方程左边变换为反作用力,例如地基力。对于细长结构物,比如

$$\frac{\text{波长 } \lambda}{\text{直径 } D} > 5$$

的圆柱,耗散力可以忽略,附加质量和傅汝德-克雷洛夫力汇合成 Morison 方程的惯性力

$$F_i = (1+C_m)\rho A\ddot{\xi}$$

其中 C_m 是附加质量系数,对于圆柱 $C_m=1.0$,对于小型结构物,当 $\frac{\lambda}{D} > 10$ 时,拖曳力也要考虑

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{\xi}^2$$

这里 C_d 是拖曳力系数。在湍振流中对于平滑的柱体, $C_d=0.7$,对于海生物生长引起粗糙表面的柱体, $C_d=1.1\sim 1.4$ ^[4]。对于飞溅区域的构件应该考虑砰击,砰击力可用类似于拖曳力的方程计算,但具有较高的系数,一般砰击系数 C_s 取 $3.0\sim 6.0$ ^[5]。

离岸海面的波浪实际是一随机现象,它与风速、吹风时间、水深和海底特性等许多因素有关。波浪环境是由一系列海况及每一海况出现的概率表示的。每一海况可由一个或多个参数来说明,最简单的仅用一个参数(如波高)来表示,由于这种表示没有考虑到波浪的频率,一旦波浪的频率接近于结构的自振频率将引起较大的误差。因此比较合理的是用波高与频率两个参数来描述海况,集合各海况就可得到波浪分布图。

目前,对于垂直于波浪之中单一圆柱构件的波载计算,通常采用 Morison 方程,即将波载看作流体阻力和惯性力的线性叠加。最近几年,深水大型结构发展很快,计算大型海洋工程结构物的波载不能采用 Morison 方程,这时 λ 射波浪作用到物体后,从物体向外形成散射波浪,计算此种波载的方法称为波浪绕射理论。简单而常用的绕射理论是线性理论,此理论归结为解拉普拉斯方程。

在随机波浪中,通常采用波谱分析法,这种分析方法是用统计方法来描述海况。目前一般认为海面升起的时间历程是符合高斯概率分布,并且是具有窄带功率谱密度的平稳随机过程。因此,对于每一海况,可用其功率谱密度函数来反映其特性。波谱分析法中,除了由实测波浪记录得到海况的波浪谱外,还可根据海况参数(如有义波高 H_s 和平均跨零周期 T_m 选用适当的波谱来表达,最常用的是 Pierson-Moskowitz 谱^[6] 表达式

$$S_\eta(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right)$$

式中 ω 为圆频率, $A = 4B \left(\frac{H_s}{4}\right)^2$, $B = \frac{16\pi^2}{T_m^4}$ 。

谱分析法的关键是确定将波浪谱转换为波载谱的传递函数。传递函数是圆频率 ω 的函数,其物理意义就是单位波高引起的应力范围。在结构是确定性的情况下,求传递函数完全是一个确定性问题,不包含概率问题。目前,线性波谱的传递函数可作理论计算,当要考虑非线性效应和形状复杂的结构物时,可通过实验求出传递函数。

2. 构件原始资料的分析

原始资料系指海洋工程结构物在服役前的全部历史、构件的使用历史和疲劳破坏时的现场情况等。分析服役前的全部历史,就是首先要了解构件的设计依据、参数和图纸是否满足设计要求,其次要了解构件的生产和加工工艺,包括冷、热加工和热处理过程是否严格按照操作规程和方法,然后要了解构件的各种物理性质、力学性能和化学成分的实验报告是否达到了设计指标,最后还要了解构件的安装情况。分析构件的使用历史包括查阅操作人员的工作记录,分析构件的实际运行情况和实际工作时间,特别是构件工作时的实际受力情况以及构件所处的环境,例如温度的变化、介质浓度等。现场记录就是指一旦出现疲劳破坏,分析人员要亲临现场,了解事故发生时的各种情况和破坏过程,特别要注意整体构件的宏观外形及破坏构件在整个设备中的位置和作用等,取得第一手资料。

3. 材料特性的分析

材料特性是指材料在交变载荷作用下性质的变化。在常幅交变载荷作用下材料的疲劳特性,一般是用 $S-N$ 曲线或疲劳曲线来描述的。

目前人们主要通过两条途径去得到材料的疲劳特性^[1]。一条途径是根据材料的其它机械性质,寻找应力 S 与疲劳寿命 N 之间的变化规律,得到一个预期材料基本疲劳特性的分析表达式,如指数函数公式,幂函数公式,斜率公式,Weibull公式,Freudenthal公式等。另一条途径是通过疲劳试验得到,对于海洋工程结构来说,最好是做管状接头实物的疲劳试验,但这样做要试验很多个接头,十分费钱和花时间,因此一般都只能做有限的几个试样。由于疲劳试验得到的数据一般都比较分散,所以目前大都通过数理统计方法从有限的试验数据中得出较切合的基本疲劳特性。当前常用的整理 $S-N$ 曲线试验数据的方法有逐点描迹法,直线拟合法,最小二乘法,带概率的 $P-S-N$ 曲线法,加权回归分析法等^[1]。在分析材料基本特性的时候,往往还要考虑平均应力或循环应力比,应力集中,加载形式,不同结构等因素的影响。

4. 结构布局和应力集中的分析

海洋工程结构物,因为任务、载荷、应力,材料和可能遇到的环境等各方面有很大的差异,所以结构布局是十分重要的。好的结构布局能显著地减少可能存在的疲劳问题,好的细节、节省重量和结构紧凑是密切相关的,这些特点的组合结果必然会带来花资少、制造容易、使用寿命较长和可靠性增加。通常,海洋工程结构物的结构布局应遵循这些原则,即根据费用、允许强度、制造能力和环境影响合理地选择材料。把结构元件安排成使它们的纵向平行于主要载荷的合力方向,对产生应力集中的接头应仔细设计并对接头进行实验室试验,并与设计要求的疲劳寿命进行比较。无论什么时候都要尽可能减少接头和配件的偏心度,作为增强部分的结构截面不能突然变化,去掉所有尖锐的边缘,抛光危险应力区,提供足够大的圆角半径。在结构布局时还要避免缺口重叠,对腐蚀疲劳应予高度重视等。为了使结构布局更加合理,设计师还必须与能够完成复杂动应力分析的专家紧密合作以得出最佳的布局。

实践和理论表明,管状接头具有很高的应力集中,疲劳破坏往往起源于接头高应力区的初始缺陷处,因而,无论是采用 $S-N$ 曲线的试验统计方法还是采用断裂力学方法作疲劳分析,都首先要弄清各种类型管状接头在不同载荷作用下的应力分布特征。

对于管状接头,一般认为载荷是由支管传给主管,在这种情况下,由于支管与主管在连接处几何形状很不规则,因此在该处的应力分布较复杂,最大应力通常发生在支管与主管相交处的最低点,即热点。热点的最大应力与支管在外力作用下的名义应力之比,定义为该管状接头的应力集中系数。从疲劳角度考虑,焊接接头的应力集中系数与接头外形有密切关系。对较大复杂型的接头,必须用实验或其它方法才能确定其应力集中系数。

目前研究接头强度和应力集中的方法大致有四种,即光弹性试验法,钢质模型试验法,塑料模型试验法以及计算方法^[8]。

5. 疲劳累积损伤分析

海洋工程结构中绝大多数构件都承受着波浪载荷的重复作用,人们通过长期的经验积累和观察分析,逐渐认识到材料在交变载荷作用下会产生局部循环滑移和屈服,从而造成疲劳损伤,导致疲劳裂纹的产生和扩展,最后引起疲劳破坏。

疲劳损伤就是指材料在交变载荷作用下的损坏程度,就是在循环载荷作用下,微观裂纹不断发展和深化,从而使结构有效工作面积减少的程度。或者说,疲劳损伤是由于循环加载时材料的变化,这种变化包括裂纹几何尺寸、循环应变硬化和残余应力等。

疲劳损伤目前还不能直接量度,只能用一些抽象的参数来描述它,由它的变化来反映裂纹的扩展程度。至于它的定量表达,只能根据常应力时,裂纹扩展的定性变化来推测。现在,人们已能用疲劳过程中某些可测量的量,如强度极限 σ_s 、疲劳极限、常应力寿命、裂纹长度等参数来描述疲劳损伤了^[9]。

疲劳损伤理论目前大致可以归纳为三种类型,即线性累积损伤理论,修正线性损伤理论和其它一些理论^[9]。线性累积损伤理论认为,试件在各个应力下的疲劳损伤是独立的,并且认为总损伤可以线性地累加起来,累加值达到某一数值时,试样就发生疲劳破坏,其中最具有代表性的就是 Miner 线性累积损伤理论^[14]。

修正线性理论则认为材料在各个应力下的损伤不能简单地线性累加,应该考虑各个应力之间的相互作用,因而对线性累积损伤理论进行修正,其中最具有代表性的是 Corten-Dolan 理论^[15]。

除了线性理论和修正线性理论外,还有一些从实验或分析中推出的疲劳累积损伤理论,这些多半是属于经验和半经验公式。

疲劳累积损伤理论虽然已提出了几十个公式,但是对于海洋工程结构物来说,应用得最广泛的仍是 Miner 理论。因为这个理论比较简单和方便。但是这个理论有两个缺点,一是没有考虑应力之间的相互作用,另一是没有计及低于疲劳极限下应力的影响。

三、海洋工程结构物的疲劳寿命估算

任何结构的疲劳破坏,大致都经历着四个过程,即疲劳成核期,微观裂纹增长期,宏观裂纹扩展期以及最后断裂期。在工程实践中,人们又常常把这个时期综合为两个阶段,也就是疲劳裂纹形成阶段和疲劳裂纹扩展阶段。形成阶段包括成核期和微观裂纹增长期,扩展阶段包括宏观裂纹扩展期和最后断裂期。形成阶段和扩展阶段的界限,目前尚无科学的准则,只是根据实践经验规定其分界线。一般认为,能用实验室中的观测手段观察到的裂纹尺寸或肉眼能见到的裂纹尺寸作为形成阶段的结束和扩展阶段的开始。

(I) 裂纹形成阶段的疲劳寿命估算方法

对于海洋工程结构物, 裂纹形成阶段的疲劳寿命估算方法有确定性分析法, 局部应变法, 局部应力—应变法, 谱分析法, 简化的谱分析法等。

1. 确定性分析法

确定性分析法又叫离散波法^[10], 这个方法实际上是以静力分析为基础的方法, 它是用下列步骤估算疲劳寿命的:

1) 确定疲劳载荷谱。对于海洋工程结构, 主要考虑波浪载荷, 因此需要建立长期的波浪统计特性, 典型的作法是绘制一年内出现各种波高及频率的直方图, 从而得出波浪分布图或波高累积频次曲线。

2) 进行结构的动力分析。按每一波高及周期范围, 对主要作疲劳校核的各个节点求出最大应力范围。一般应考虑不同波并计入流的影响, 最理想的是对各种情况作完全的动力分析。假若不可能进行完全的动力分析, 则要对静力计算所得的应力, 按所考虑的每一频率范围乘上一个动力放大系数。这个动力放大系数是反映动载荷产生的应力比静载荷条件下所增大的值, 它可由简单的动力理想化方法求得, 这样便可得出波高—应力水平曲线。

3) 选取合适的 $S-N$ 曲线。目前在海洋平台结构强度计算中, 广泛使用的 $S-N$ 曲线是由美国焊接协会 AWS 提供的, 并为美国石油学会 API 推荐采用的曲线。这族曲线是根据大量的试验结果得到的, 并在实践基础上不断修改完善。

4) 累积损伤分析。计算对应每一应力水平的波高在整个使用期出现的次数 n_i , 并从 $S-N$ 曲线查出此应力水平下的破坏循环次数 N_i , 计算每一波高及周期范围引起的 $\frac{n_i}{N_i}$ 值, 再应用 Miner 线性累积损伤理论, 求出各节点一年内的 $\Sigma \frac{n_i}{N_i}$ 值。

5) 计算寿命。任一节点的疲劳寿命可由公式

$$\frac{1}{\Sigma \left(\frac{n_i}{N_i} \right)}$$

给出。

2. 局部应变法

局部应变法^[11]是这样的一种方法, 它把疲劳寿命的计算建立在最危险的缺口或其它应力集中部位的应力和应变的局部计算上, 目的是用分析方法去代替各种试验程序。这种方法估算疲劳寿命的步骤为:

1) 首先将载荷—时间历程转化为应力集中部位的应变—时间历程, 一般可借助于载荷—应变标定曲线得到。

2) 根据循环应力—应变曲线计算局部应力—时间历程和应力—应变响应。

3) 用雨流计数法确定应力—应变循环。

4) 根据应变幅值的大小计算疲劳损伤。

5) 按照 Miner 线性累积损伤理论将上面的损伤累加起来得到疲劳寿命。

3. 局部应力—应变法

局部应力—应变法基于这样的假定^[11]: 如果一个结构在危险部位的应力和应变能够与实验室光滑试件的循环应力和应变联系起来, 那么结构的疲劳裂纹形成寿命将和试件的寿命相同。这种方法估算疲劳寿命的步骤为:

1) 输入一系列现场载荷或名义应变, 这些现场载荷或名义应变预先经过数字转换成波峰

和波谷序列。

- 2) 利用循环载荷—应变曲线将载荷—时间历程转换为应变—时间历程。
- 3) 借用“有效矩阵”法及循环应力—应变曲线将应变—时间历程转换为应力—时间历程。
- 4) 利用 Neuber 公式将名义应力和应变转换为缺口根部的局部应力和应变。Neuber 公式为

$$K_t^2 = K_\sigma K_\epsilon = \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta s}\right) \left(\frac{\Delta\epsilon}{\Delta e}\right)$$

式中 K_t 为理论应力集中系数, K_σ 为真实应力集中系数, K_ϵ 为真实应变集中系数, Δs 和 Δe 是名义应力和应变, $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\epsilon$ 是缺口根部应力和应变。

- 5) 应用 Miner 线性累积损伤理论计算寿命, 即

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \text{ 时破坏}$$

式中 n_i 为应变幅是 $\frac{\Delta\epsilon_i}{2}$ 的迟滞回线的循环次数, N_i 为与 $\frac{\Delta\epsilon_i}{2}$ 对应的材料的疲劳寿命, N_i 可以直接从应变—寿命曲线查出。

4. 谱分析法

谱分析法是一种考虑到波浪的随机特性, 并用统计方法来描述海况的方法。这种方法估算疲劳寿命的步骤为:

- 1) 根据实测波浪得出海况波浪谱或根据海况参数选用适当的波谱来表达, 如常用的 Pierson-Moskowitz 谱表达式^[6]。

- 2) 根据波浪理论计算出水质点的速度和加速度谱, 例如可用 Stokes 五阶波和 Airy 波等。

- 3) 按照 Morison 公式计算出波力谱, 由于公式中要计入非线性的拖曳项, 所以还要将 Morison 公式线性化。

- 4) 计算结构中各杆件的应力响应谱。对于线性体系来说, 输入谱和响应谱的关系可通过传递函数来联系, 即

$$S_\sigma(\omega) = [T \cdot F(\omega)]^2 S_\eta(\omega)$$

式中 $S_\sigma(\omega)$ 为应力响应谱, $S_\eta(\omega)$ 为输入谱, $T \cdot F(\omega)$ 为传递函数。通过计算传递函数即可得出各杆件的应力响应谱。

- 5) 用 Miner 线性损伤理论计算疲劳寿命。

5. 简化谱分析法

简化谱分析法是一个较为简便和实用的方法^[12]。这种方法估算疲劳寿命的步骤为:

- 1) 求出单位波高下各杆件在不同频率下的应力差及应力水平, 绘出单位波高不同频率的应力水平平方曲线, 即传递函数平方值曲线。

- 2) 假定第一振型是主要的, 则求出单位外力作用下在基频时的动力放大系数, 并绘出 $|T_D|^2$ 曲线。

- 3) 绘出波面功率谱。

- 4) 三者相乘即可得出应力响应谱, 该曲线所包围的面积即为应力响应方差。

- 5) 通过有效频率求得总循环数, 从而推出疲劳寿命。

(II) 裂纹扩展阶段的疲劳寿命估算方法

裂纹扩展阶段的疲劳寿命估算一般都采用断裂力学方法。在常幅加载情况下, 用这种方

法估算疲劳寿命的步骤为:

1. 确定构件上的初始裂纹尺寸 a_0 。初始裂纹尺寸一般包括材料的冶金缺陷(非金属夹杂和第二相粒子等), 冷热加工和装配过程中构件表面产生的最大裂纹尺寸, 以及使用中受环境腐蚀而产生的裂纹尺寸等。上述这些裂纹可用无损探伤和无损检验的方法确定。

2. 确定应力强度因子 K 。对于具体的结构件, 可用公式计算或查表定出应力强度因子, 例如对于有限宽度和厚度的构件, 应力强度因子可用下式求出:

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$$

式中 a 是裂纹长度, σ 是名义应力, α 是几何效应因子, α 一般为 $\alpha = f\left(\frac{a}{W}\right)$ 关系。 W 是构件的宽度。

3. 确定破坏判据, 并通过破坏判据确定临界裂纹尺寸 a_c 。临界裂纹尺寸就是构件发生破坏时的裂纹尺寸。对于不同的韧性材料, 应有不同的确定原则: 高韧性、低中强度材料, 可根据构件净面积应力达到材料拉伸强度极限时的裂纹长度来定出 a_c ; 低韧性、高强度材料, 可根据材料的临界应力强度因子 K_{Ic} 或 K_{IIc} 所确定的临界裂纹尺寸来定出 a_c 。

4. 确定疲劳寿命, 即确定裂纹从初始尺寸 a_0 扩展到临界尺寸 a_c 所需要的循环次数 N_f 。通常, 疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 与应力强度因子幅值 ΔK 之间服从某一规律, 例如 Paris 公式

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n$$

对上式求定积分便可得出裂纹扩展阶段的疲劳寿命

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^n}$$

式中 C 和 n 是由材料确定的常数, 对于海洋工程结构物, C 和 n 常取下列数值:^[13]

n, C 值			
材料状态	n	C(牛顿·毫米)	
		平均值	95%置信度的上限
空气中的焊缝	3.0	1.7×10^{-13}	4.6×10^{-13}
受海水作用的焊缝	3.7	1.1×10^{-14}	4.3×10^{-14}

对于变幅加载或随机加载, 用断裂力学方法估算疲劳寿命则按下列步骤:

1) 给出 $\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n$ 所表示的常幅载荷下的 $\frac{da}{dN}$ 与 ΔK 的关系曲线。

2) 给出对应于特定载荷序列的变幅载荷下 $\frac{da}{dF} \sim K$ 关系曲线, 即裂纹每小时的扩展长度

$$\frac{da}{dF} = \sum_{i=1}^k \left[n_i \left(\frac{da}{dN} \right)_i \right]$$

式中 n_i 是每小时内第 i 种交变载荷出现的数目, k 是给定载荷谱中各种交变载荷出现的数目。

3) 根据载荷谱下 $\frac{da}{dF} \sim K$ 关系, 利用数值积分法求得裂纹扩展阶段的疲劳寿命 F ,

$$F = \int dF = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{\sum_{i=1}^k \left[n_i \left(\frac{da}{dN} \right)_i \right]}$$

四、结 束 语

本文仅就海洋工程结构物的疲劳分析和寿命估算方法作了综述和分析,但是,由于海洋工程结构物大多是一个大尺寸的复杂装置,它又由各种结构部件组成,而且这些部件又是由各种材料制造的,它所经历的加载历史和环境条件是随机的和复杂的。环境载荷由于结构物本身的存在,又产生大范围的变化,结构物有动态惯性载荷,自身应力或残余应力,温度效应,腐蚀疲劳,不均匀沉陷和应力重新分布,还有基础与桩或土壤与结构物之间的相互作用等,使得海洋工程结构物的疲劳分析和寿命估算变得十分复杂,有些问题本文未曾涉及,也有一些问题尚待进一步探讨。

持续风暴往往造成长波,其显著能量集中于低频,所以对于浅水结构物来说,一般取百年或五十年一遇的极值波按准静载进行分析。当水深超过一百米时,结构物基频向常规波浪频谱中能量峰带靠拢,引起动力放大,这种常规波高不大,但它长年累月地作用于结构上,每年有数百万次的载荷循环,会引起结构和地基疲劳破坏。这种结构物目前可按 Miner 线性损伤理论估算疲劳寿命,对于一般金属材料,当 $\Sigma \frac{n}{N} = 1$ 时代表疲劳破坏,但对于海洋工程结构物,由于环境复杂,寿命估算一般取 $\Sigma \frac{n}{N} < 1$ 。

对于海洋工程结构物的疲劳分析和寿命估算,各国都在努力地探索和完善。目前比较常用的是离散波法和谱分析法,离散波法的特点是以静力分析为基础,也可作动力分析,它不受波浪理论、拖曳项等非线性项的影响,因此计算疲劳寿命比较简便。谱分析法的特点是比较真实地模拟了波浪,较精确地反映了海洋工程结构在波浪载荷作用下的动力特性,但它考虑了拖曳项等非线性项的影响,计算比较复杂。

由于海洋工程结构物,特别是导管架平台,有时虽然外加应力是在弹性范围,但在接头处局部应力常进入塑性范围。由于塑性变形会引起残余应力,从而改变原来的应力状态和分布,影响实际疲劳寿命。为了提高疲劳寿命估算的精确性,可以根据载荷历程中的弹塑性变形来修正构件中应力集中区的循环应力与应变。局部应变法和局部应力—应变法就是在这个基础上发展起来的估算疲劳寿命的方法。这两种方法理论上较合理,可以定量地研究构件的残余应力并考虑应力之间的相互作用,特别是电子计算机高速发展的今天,可以迅速地用这两种方法给出疲劳寿命。

断裂力学方法主要用来估算裂纹扩展阶段的疲劳寿命,对于大型焊接接头来说,裂纹形成阶段的疲劳寿命几乎可以忽略,因为疲劳裂纹一般将从焊接缺陷处扩展,或者说从应力集中区开始,这时用断裂力学方法可以提供可靠的疲劳寿命数据。

在深水设计平台,由于水较深,流速较高和波浪条件较差,因此必须对结构物进行动力分析才能给出较合理的疲劳分析和疲劳寿命。实际上,由于波浪载荷、桩基刚度、结构材料性能都有许多不明确的因素,所以建议采用可靠性分析方法来作疲劳分析。

应该看到,一个完整的海洋工程结构物疲劳分析所包括的内容是相当广泛的。由于环境恶劣多变,影响因素很多,所以要做到很精确的疲劳分析和寿命估算,目前尚有一定的困难,在

这种情况下,本文所综述的较符合实际的简化计算和分析是具有现实意义的。

参 考 文 献

- [1] Calsen, C.A., Nordenstrom, N., "International Symposium on Advances in Marine Technology", 1979. P643-670.
- [2] Salvesen, N., Tuck, E.O., and Faltinsen, O., "Ship Motions and Sea Loads", SNAME, Annual Meeting, 1970.
- [3] Faltinsen, O. and Loken, A., "NV459, Wave Forces on Large Objects of Arbitrary Form", DnV report No.74-13-S, 1974.
- [4] Nordenstrom, N., Olsen, O.A., Loken, A and Torset, O.P., 5th Int. Ocean Development Conference, Tokyo, 1978.
- [5] Miller, B.L., RINA, April, 1977.
- [6] Kinra, R.K., Vugts, J.H., OTC 2608, 1976.
- [7] 曾春华, "疲劳曲线的测定", 理化检验物理分册, 1980 第 2 期, P8~13。
- [8] 石理国等, "近年来国内外海洋钢结构管柱接头强度研究进展", 力学进展, 1982 第三期, P238~253。
- [9] 曾春华, "疲劳累积损伤理论探讨", 机械强度, 1980 第 11 期, P19~24。
- [10] Hallam, M.D., Heaf, N.J., and Wootton, L.R., "Dynamics of Marine Structures", 1977.
- [11] 曾春华, 伍义兰, "复杂载荷下疲劳寿命的估算方法", 固体力学学报, 1982 第二期, P293~301。
- [12] 高明, 全国海岸带和海涂资源综合调查及海岸工程学术会议论文集, 下册, 1982, P463~476。
- [13] 挪威船级社, "近海结构物的设计、建造和检验规范"附录 C, 1977 年版。
- [14] Miner, M.A., J.App.Mech., 12.A.159(1945)。
- [15] Corten, H & Dolan, T., Internatinal Conference on Fatigue of Metal, London, Sept. 1956.

AN INTRODUCTION TO THE FATIGUE ANALYSIS AND LIFE PREDICTION OF OCEAN ENGINEERING STRUCTURES

Zeng Chunhua

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

SUMMARY

In this Paper the fatigue analysis and life prediction of ocean engineering structures are analyzed and discussed. Analysis of initial data, loading, material properties, structure layout, stress concentration and fatigue cumulative damage of ocean engineering structures are discussed in the section of fatigue analysis. Estimate methods of the fatigue life for initial and propagation stages of fatigue crack are described in the section of fatigue life prediction. Finally, some suggestions are given.