

靠船墩疲劳可靠度研究

陆明生, 刘 宁, 郭志川

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 将疲劳力学理论引入靠船墩结构分析, 探讨靠船墩的疲劳破坏问题, 并进行疲劳可靠度研究. 提出了靠船墩疲劳可靠度计算方法, 据此可进行靠船墩的疲劳寿命预报, 直接指导工程优化设计和施工, 分析桩空间布置对结构受力状况和疲劳强度的影响, 增大结构的刚度, 从而达到经济、安全的目的.

关键词 靠船墩; 疲劳力学; 可靠度分析; 寿命预报

中图分类号 :TU311.2 ;U656.1+22 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2003)04-0444-05

高桩墩台结构是港口工程、海洋工程中应用最广泛的结构形式之一. 然而受结构本身特点所限, 其承载能力有限, 耐久性(包括结构材料本身的耐久性和结构体系的耐久性)问题尤为突出. 靠船墩作为高桩墩台结构的代表性构筑物, 不仅具有一般结构物的特点, 而且承受着船舶的频繁冲击作用, 疲劳失效分析已成为关系到结构使用安全性和经济性的一个重要环节. 本文重点探讨靠船墩结构体系的耐久性, 即靠船墩在频繁的冲击荷载作用下, 结构强度逐渐降低, 安全性亦逐渐减小的疲劳可靠度问题.

国内外众多学者对一般结构的疲劳问题已进行了较为深入的研究, 但已有的海洋结构疲劳可靠性分析主要是针对焊节点的疲劳破坏研究^[1~3], 尚未涉及港口工程墩式结构的疲劳分析和寿命预报. 本文用 m 法和 P-Y 曲线法, 考虑地基土性参数和荷载的随机性^[4], 对靠船墩进行随机力学分析, 得到结构内力和应力的统计特征值. 在此基础上, 引入疲劳分析中值 S-N 曲线, 同时考虑其随机特性, 采用响应面法对靠船墩进行疲劳可靠度分析, 并根据疲劳可靠度对其进行寿命预报.

1 随机内力分析

由于荷载、土性参数存在随机性, 故结构响应变位、内力、应力也存在随机性, 一般采用一阶统计特征量均值和二阶统计特征量标准差反映. 对桩截面变位、内力、应力均值, 可按确定性方法求得; 对变位、内力、应力的标准差可采用一阶 Taylor 展开式近似求得. 结构响应 $S = f(X)$, 其中 X 为基本随机变量参数. 将 S 在参数均值点进行一阶 Taylor 展开, 有

$$S = S_0 \Big|_{X=\bar{X}} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial S}{\partial X_i} \Big|_{X_i=\bar{X}_i} (X_i - \bar{X}_i) \tag{1}$$

则 S 的方差

$$\text{Var}[S] \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial S}{\partial X_i} \Big|_{X_i=\bar{X}_i} \frac{\partial S}{\partial X_j} \Big|_{X_j=\bar{X}_j} \text{Cov}(X_i, X_j) \tag{2}$$

S 的标准差为

$$\sigma_S = \sqrt{\text{Var}[S]} \tag{3}$$

式(2)中的偏导数可采用偏导数法或直接差分法求得. 偏导数法是在进行结构响应分析的过程中进行的. 该方法计算精度较高, 有精确的理论保证, 但其计算工作量较大, 程序实现较复杂. 直接差分法根据导数定义, $\frac{\partial S}{\partial X_i} = \frac{\Delta S}{\Delta X_i}$, 式中 ΔX_i 为基本随机变量参数的差分步长, ΔS 为结构响应在基本随机变量参数均值点差

收稿日期 2002-09-03
作者简介 陆明生(1968—), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事港口工程规划设计、结构工程研究.

分步长下的微小变化.该方法概念清晰明了,易被工程人员接受,且计算简单实用,程序实现方便,但其差分步长不易确定.文献[5]指出,对于一般问题,差分步长取 $1/100 \sim 1/10\,000$,其精度能得到满足.本文采用直接差分法,其差分步长取 $1/10\,000$,计算结果表明该方法是可行的.

2 结构疲劳强度、疲劳寿命

靠船墩结构计算采用前苏联格尔谢瓦诺夫教授^[6]提出的计算方法.该方法以桩台变位六要素(包括水平变位、竖向变位和转角)为未知数,根据作用在桩台上力的平衡条件,建立六元联立方程式,求解桩台变位六要素,然后求解各桩头变位、内力,最后由内力求解应力.

靠船墩由于长期受到船舶反复撞击和波浪的作用,其结构内部将产生不断变化的应力.文献[1]指出,海洋结构内的应力循环次数可达 10^8 之多,这将引起结构的疲劳破坏.因此,疲劳破坏一直被认为是海洋工程结构的一种主要破坏形式.通过疲劳可靠度研究,旨在以经济性为基点,在规定工作条件下、完成规定功能下及预定使用寿命期间,使结构因疲劳强度不足而失效的可能性减至最低程度,也为结构的优化设计提供依据.工程中常用 S 与 N 之间的关系来表示结构的疲劳强度. S 是交变应力的应力范围, N 是结构在应力范围为 S 的恒幅交变应力作用下达到破坏所需要的应力循环次数,即疲劳寿命.本文通过靠船墩三维计算,得出桩的应力变量,再依据疲劳力学分析方法,用中值 $S-N$ 曲线,分析结构的应力变量与疲劳寿命的关系,从而预报结构的疲劳寿命.

在疲劳分析中,通常用中值 $S-N$ 曲线.在双对数坐标系中,中值 $\lg S-\lg N$ 曲线常常接近直线,据此把中值 $S-N$ 曲线的表达式写成

$$\lg N = \lg A - b \lg S \tag{4}$$

当应力范围水平 S 较低时,寿命 N 较高,式(4)不再适用.本文采用文献[1]建议的近似处理方法,把高寿命区的 $S-N$ 曲线用斜率为 b' ($b' > b$)的直线来表示.

$$\begin{cases} \lg N = \lg A - b \lg S & N \leq N_Q \\ \lg N = \lg A' - b' \lg S & N > N_Q \end{cases} \tag{5}$$

式中 $\lg A' = \lg N_Q + b'(\lg A - \lg N_Q)/b$.在工程实际中常取 $b' = 2b + 1$ 或 $b' = 2b + 2$, N_Q 取 10^7 .式(5)中的参数 b 和 A 可通过最小二乘法或极大似然估计法统计分析得到.

采用最小二乘法得到的参数 b 和 $\lg A$ 分别为

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \lg S_i \lg N_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg S_i \sum_{i=1}^n \lg N_i}{\sum_{i=1}^n (\lg S_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \lg S_i)^2} \tag{6}$$

$$\lg A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n \lg S_i \tag{7}$$

对于靠船墩而言,结构破坏主要由桩的破坏引起,故结构安全性可由最危险单桩的安全性表示.桩主要为钢筋混凝土桩或钢管桩,在进行可靠度分析时,结构功能函数采用单桩最大弯矩或最大应力建立.采用弯矩,则结构的功能函数为

$$g(X) = M_{\text{允}} - M_{\text{max计}} \tag{8}$$

式中 $M_{\text{允}}$ ——允许承受弯矩; $M_{\text{max计}}$ ——单桩承受的最大弯矩计算值.

如采用应力,则结构的功能函数为

$$g(X) = \sigma_{\text{允}} - \sigma_{\text{max计}} \tag{9}$$

式中 $\sigma_{\text{允}}$ ——允许应力; $\sigma_{\text{max计}}$ ——单桩最大应力计算值.

功能函数建立后,即可进行结构可靠度分析.常规的结构可靠度求解方法主要有一次二阶矩法、JC法、几何法及蒙特卡罗法.本文采用 JC 法进行可靠度计算分析,分析中需用到功能函数对基本随机变量的偏导数.在实际工程中,由于分析结构响应是一个较为复杂的过程,故响应与基本变量之间的关系一般很难表达成显式函数,加之设计验算点在可靠度计算迭代过程中不断变化,故偏导数的求解计算工作量十分巨大,甚至让人难以承受.近年来逐渐发展起来的响应面法为该问题的解决提供了一条有效的途径,其思路是用一个

待定的响应面函数逐步逼近实际的功能函数.

为了提高响应面法计算结构可靠度的精度,要求选取的响应面函数尽可能贴近实际极限状态函数.由于大多数的结构可靠度分析中,在设计验算点附近极限状态函数的非线性程度不高,用一次多项式函数产生的误差不大,尽管有不少学者提出用二次多项式函数,但其计算量将大幅度增加,且有时精度效果并不显著,相比之下一次多项式函数的精度一般亦能满足工程需要,因此本文选用一次多项式函数作为响应面函数,其表达式如下:

$$g(X) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i$$

(10)

同时选取适宜的样本点是保证响应面函数计算精度的关键,目前大多数文献均只取 $n + 1$ 个样本点.事实上,由于样本点的个数有 2^n 个,只取 $n + 1$ 个,致使样本点没有得到充分利用,这样的取法带有人为因素.不同的取法会导致不同的结果,且可能导致方程无解,无法得到满意的结果.为此,本文提出一种新的方法来解决该问题.选取所有的 2^n 个样本点,得到 2^n 个功能函数值,则有 2^n 个方程,由于在式(10)中只有 $n + 1$ 个系数,可通过求解矛盾方程组,得到 $n + 1$ 个系数.此方法避免了前述方法的缺陷,同时精度也得到了提高,只是计算量有所增加.

由于疲劳寿命 $S-N$ 曲线为结构疲劳破坏时的应力值与疲劳寿命的关系,相应地采用应力进行可靠度分析,结构的疲劳可靠度可定义为应力计算值小于允许值的概率.根据可靠度理论,疲劳可靠度的功能函数为

$$Z = g(X) = S_0 - S(X)$$

(11)

式中: S_0 ——疲劳寿命 N 次时 $S-N$ 曲线上对应的 S 值,即达到疲劳破坏时的应力值; S ——应力计算值.在进行疲劳寿命预报时,先选取 N 为一个较小的值,在 $S-N$ 曲线上有一个对应的 S 值,将其代入式(10)进行计算.如果计算可靠指标小于结构允许可靠指标,则增大 N 值;如果计算可靠指标大于结构允许可靠指标,则减小 N 值.如此迭代,直到计算可靠指标等于结构允许可靠指标时对应的 N 值即为结构的疲劳寿命.

3 工程计算实例

本项研究的对象是我国第 1 座双层汽车渡轮码头靠船墩,包括东、西各两个泊位,1992 年初建成并投入使用.据统计,该码头靠船墩日均靠泊次数 100 多次,所处土层为第四系地层和燕山期侵入的花岗岩、石英斑岩,第四系地层主要为河海混合相沉积层.涨潮最大流速为 116 cm/s,落潮最大流速为 112 cm/s,汛期流速可达 150 cm/s.该工程靠船墩结构由上部承台和 5 根钢管桩组成,平面布置及桩编号如图 1 所示(y 坐标垂直向下,满足右手坐标系法则.斜桩坡度比为 3:1,第②、③号桩轴线与 x 轴分别成 30°和 45°夹角).上部墩台尺寸为 3 m×3.2 m×4.5 m(长×宽×高),钢管直桩长为 25.87 m(泥面以上部分长 6.95 m),斜桩长 27.25 m(泥面以上部分长 7.32 m),桩径均为 800 mm,管壁厚度 12 mm.

有关技术计算参数取值如下:疲劳中值 $S-N$ 曲线方程取为 $\lg N = 12.355 - 3\lg S$,根据《港口工程结构可靠度设计统一标准》,结构允许可靠指标取为 3.7.各计算参数均值、标准差及分布形式见表 1.船舶每小时撞击墩台次数为 4 次.

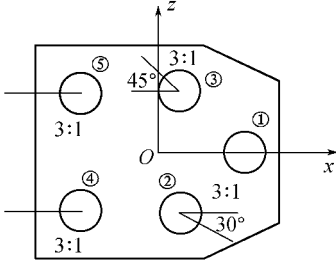


图 1 靠船墩结构平面布置
Fig.1 Plane layout for a pier structure

表 1 计算参数
Table 1 Calculating parameters

参 数	P-Y 曲线法				m 法				
	凝聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)	土容重 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	地基反力 系数 K_h ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	疲劳 参数 A	疲劳 参数 b	m 值 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-4}$)	疲劳 参数 A	疲劳 参数 b
均 值	2.0	6.0	8.0	3000	12.355	3	6000	12.355	3
变异系数	0.3	0.3	—	0.1	0.025	—	0.1	0.025	—
分布形式	正 态	正 态	—	正 态	对数正态	—	正 态	对数正态	—

当墩台上作用有 z 轴正向的船舶撞击力 700 kN,其变异系数为 0.1,P-Y 曲线法与 m 法两种计算方法下其疲劳寿命预报值分别为 10.97 a 和 7.87 a.两种方法的疲劳寿命预报值均较小,小于结构设计寿命,主要是

由于在 z 向结构的刚度较小,位移、弯矩和应力较大,故该方向不宜作为受力方向。

当墩台上作用有 z 轴正向和 x 轴负向的船舶撞击力 50t,其变异系数均为 0.1,P-Y 曲线法与 m 法两种计算方法下其疲劳寿命预报值分别为 53.87 a 和 39.50 a(见图 2、图 3)与结构设计寿命基本一致。

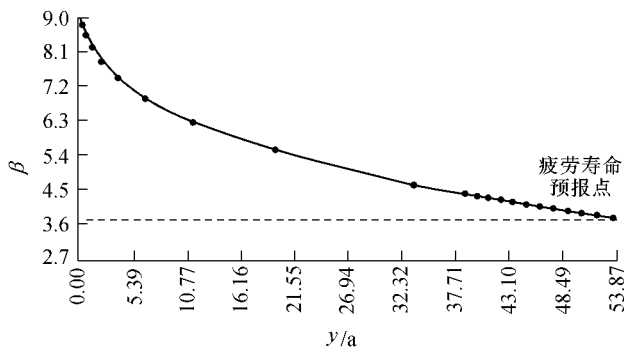


图 2 P-Y 曲线法可靠指标 β 与疲劳寿命 y 的关系

Fig.2 Reliability index β vs. fatigue life y of P-Y curve method

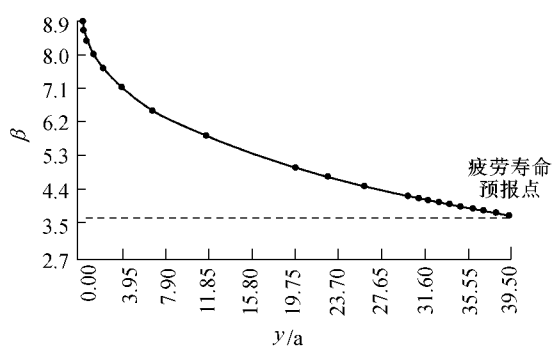


图 3 m 法可靠指标 β 与疲劳寿命 y 的关系

Fig.3 Reliability index β vs. fatigue life y of m curve method

分析该工程的实际运行情况,经过近 10 a 的使用,靠船墩已经出现局部疲劳破坏的迹象。通过采用潜水探摸、超声波透射、低应变反射相结合的方法,对靠船墩进行了全面检测分析,结果表明墩下桩基损坏程度较严重(共检测 38 根桩,有 12 根为Ⅲ类桩,而且每个靠船墩(研究对象包括 8 个靠船墩)下均有Ⅲ类桩,其中 1 号桩 3 根 3 号桩 6 根 4 号桩 1 根 5 号桩 2 根)。从肉眼观察,墩台与钢管桩的连接均有不同程度的损坏,致使整体性变差,在渡轮靠泊时一般有 20 cm 的变位,现已进行了修复加固,总体使用情况良好。修复加固的主要手段是补打钢管桩,加强上部结构整体刚度,特别是 z 方向的刚度。

4 结 论

a. 本研究取得的理论成果不仅可以从不确定性的角度对高桩墩式结构进行设计的优化分析,而且可以对结构进行寿命预报,具有显著的工程价值,可望对靠船墩的工作性态、不确定因素的影响以及重复荷载作用下结构的使用年限有一个较为清楚的认识,从而直接指导工程优化设计和施工,对旧码头的加固处理、改造升级等也具有较大的工程实际意义,该研究成果可对类似工程的设计和施工提供科学依据。

b. 通过对靠船墩的疲劳可靠度分析可知,在荷载及参数条件等工况相同的情况下,结构的空间布置对其受力状况有很大影响,会导致结构的疲劳寿命变化很大。因此,在设计方案的选取中应合理优化,以达到经济、合理、安全的目的。此外,为减小位移和应力,提高结构的疲劳寿命,还可通过增大结构的刚度来实现。

c. 对于高桩墩台结构物,由于长期受到海水的侵蚀,桩(尤其是钢管桩)的横截面面积会逐渐减小,导致结构受力发生变化,此外,结构强度也会逐渐减小。如何综合解决这一问题,尚待进一步研究。

参考文献:

[1] 胡毓仁,陈伯真. 船舶及海洋工程结构疲劳可靠性分析[M]. 北京:人民交通出版社,1996. 86—125.
[2] 胡毓仁,陈伯真. 海洋结构管节点疲劳失效的模糊定义及可靠性分析[J]. 上海交通大学学报,1995,29(2):21—27.
[3] FANG H C,DUAN M L,XU F Y,et al. Reliability analysis of ice-induced fatigue and damage in offshore engineering structures[J]. China Ocean Engineering,2000,14(1):15—24.
[4] ZEITOUN D G,BAKER R,UZAN J. Application of random elasticity to soil engineering[J]. Structure Safety,1988(5):79—85.
[5] 郭志川,刘宁. 地基沉降的随机有限元法和可靠度计算[J]. 土木工程学报,2001,34(5):62—67.
[6] 横山幸满著. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 唐业清,吴庆荪译. 北京:中国铁道出版社,1984. 218—233.

Reliability analysis of fatigue of pier structures

LU Ming-sheng , LIU Ning , GUO Zhi-chuan

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 ,China)

Abstract :In accordance with an analysis of pier structures by the theory of fatigue mechanics , the fatigue failure of pier structures is discussed , and a method is proposed for calculation of the reliability of fatigue of pier structures . The method also provides a basis for prediction of the fatigue life of pier structures , direct guidance to the optimal design and construction of engineering projects , and analysis of the influences of the spatial arrangement of piles on the stress and fatigue strength of structures , so as to intensify the stiffness of structures and ensure less cost and high safety .

Key words : pier structure ; fatigue mechanics ; reliability analysis ; life prediction

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于1957年,是我国中文核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得全国优秀高校自然科学学报二等奖,以及中国期刊方阵“双效期刊”、全国水利系统优秀期刊称号。

本刊每逢单月出版,国内外公开发行。国内邮发代号:28-63,每期定价:8.00元,全年订费48.00元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址:南京市西康路1号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部,邮政编码:210098。