



船舶撞击力作用下高桩码头的安全评估

刘晓曦, 张云

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对高桩码头水平承载力, 应用极限概率理论分析了荷载效应的统计参数; 根据构件破坏准则, 确定了码头破坏模式和功能函数; 依托某码头实例, 建立响应模型, 计算其失效概率及可靠指标。分析的结果认为, 船舶撞击能和船舶撞击力符合极值 I 型分布; 高桩码头的主要破坏为桩基础的正截面受弯破坏和水平位移过大; 结合某码头工程实例, 利用 ANSYS 有限元分析软件建立结构响应模型和 PDS 模块, 采用蒙特卡罗的方法进行可靠性分析, 共进行了 10 万次抽样, 抽样的结果显示, 码头受船撞作用失效的概率为 $2.073\ 05 \times 10^{-3}$, 可靠指标为 3.76, 安全结构等级为 2 级。

关键词: 高桩码头; 可靠度; 船舶撞击力; 蒙特卡罗法

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0055-05

Safety assessment of piled wharf under ship impact force

LIU Xiao-xi, ZHANG Yun

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Based on a piled wharf under the horizontal load, we apply the probabilistic limit state design method to obtain the statistical parameters of load effects variables, study the resistance of structural and distribution of statistical parameters; ascertain the failure criterion, and establish the structural response model by ANSYS PDS with a wharf case. The analysis results show that the impact energy and the impact force fit the extreme type I distribution best, and the bending failure and displacement criterion are leading controls. Taking a terminal project for example, we establish the structural response model and PDS module of ANSYS finite element. The Monte Carlo method is used during reliability analysis. The sampling results of a total of 100 000 times of samples show that the failure probability of the terminal under ship impact force is $2.073\ 05 \times 10^{-3}$, and the reliable indicator is 3.76, which meet the secondary standard specifications.

Keywords: piled wharf; reliability; ship impact force; Monte Carlo

高桩码头构件易损坏且难以修复, 但片面地提高码头安全水平会大幅提高结构的造价。实际上, 在港口工程结构的全寿命周期中, 荷载效应和抗力都是随机变量。概率理论应该更合理地体现在结构设计和安全评估中。目前针对高桩码头建筑物结构可靠性的评估工作和成果还很少。根据概率极限状态法, 建立随机荷载与结构响应模

型, 可以得到合理的结构可靠性分析结果。研究高桩码头结构在其全寿命周期内的可靠性, 能够量化结构可靠性的变化规律, 得到更加合理的高桩码头结构可靠性设计和评估方法。

1 工程概况

选取了某高桩码头工程作为实例, 计算其在

收稿日期: 2015-11-03

作者简介: 刘晓曦 (1989—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事水运工程设计与研究工作。

船舶撞击力作用下的失效概率和可靠度，并进行安全评估。码头结构采用透空式高桩梁板结构，码头长700 m、宽30 m，共11个分段。码头上部结构为预制和现浇迭合面板，预制纵梁、预制预应力轨道梁以及现浇横梁，排架结构使用C40强度混凝土。码头前沿设上、下两层带缆系统，码头下部基桩采用φ800型PHC管桩基础，排架间距为7 m，每榀排架布置10根桩。选取第7结构段作为分析对象，共9个排架。码头断面见图1。

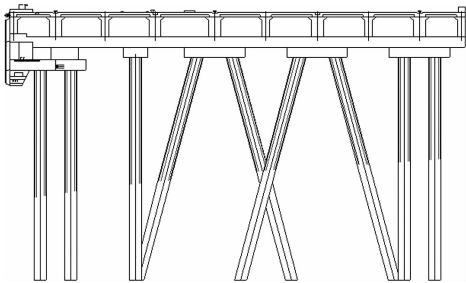


图1 码头结构断面

2 船舶撞击力的荷载效应分析

2.1 船舶撞击力计算

船舶靠岸时的撞击力应用有效撞击能量原理，根据橡胶护舷性能曲线和靠船结构的刚度确定，计算公式为：

$$E_0 = \frac{1}{2} C_m C_e m v_n^2 \tag{1}$$

2.2 随机变量的统计分布

2.2.1 船舶法向速度的分布

文献[1]对船舶靠岸速度的现场观测数据进行统计分析，船舶的靠岸速度服从极值I型分布，平均值和方差分别为0.059 m/s和0.021。

2.2.2 有效动能系数的分布

影响有效动能的因素包括考虑船舶回转的偏

式中： E_0 为船舶靠岸时的有效撞击能； C_e 为偏心率，是考虑船舶回转的折减系数； C_m 为附加质量系数； m 为船舶质量； v_n 为船舶靠岸的法向速度。

船舶靠岸时的有效撞击能量由防冲设备和码头建筑物共同吸收，变形不可忽略。则

$$E_0 = \frac{1}{2} k_s \Delta_s^2 + E_f + \frac{1}{2} k_d \Delta_d^2 \tag{2}$$

式中： k_s 为船体的弹性刚度系数； k_d 为平台的弹性刚度系数； Δ_s 为船体的变形； Δ_d 为平台的变形； E_f 为护舷吸收的能量。

船舶撞击力与护舷反力的值相等，则

$$F_x = F_f = k_s \Delta_s = k_d \Delta_d \tag{3}$$

式中： F_x 为船舶靠岸撞击力(kN)； F_f 为护舷反力(kN)。则

$$E_0 = \frac{F_f^2}{2 k_s} + E_f + \frac{F_f^2}{2 k_d} \tag{4}$$

结合式(1)与(4)，则

$$(k_s + k_d) F_f^2 + 2 k_s k_d E_f - k_s k_d \rho m v_n^2 = 0 \tag{5}$$

由式(5)可知，当已知船舶靠岸时法向速度一定，船舶撞击力的值随护舷吸收的能量变化而变化。因此，确定护舷吸收能量以及护舷吸收能量与护舷反力之间的关系，即可获得船舶撞击力。

根据最小二乘法原理拟合出的YGCH2500(RH)型护舷拟合公式为：

$$F_f = \begin{cases} 12.19 E_f - 0.015 E_f^2 + 6.5 \times 10^{-6} E_f^3 & 0 \leq E_f < 1\,098.63 \\ 0.52 (E_f - 1\,098.63) - 7.4 \times 10^{-4} (E_f - 1\,098.63)^2 + 2.3 \times 10^{-7} (E_f - 1\,098.63)^3 + 3\,940.1 & 1\,098.63 \leq E_f < 2\,995.4 \\ 0.01 (E_f - 2\,995.4) + 9.6 \times 10^{-5} (E_f - 2\,995.4)^2 + 1.0 \times 10^{-8} (E_f - 2\,995.4)^3 + 3\,972.49 & 2\,995.4 \leq E_f < 4\,576 \end{cases} \tag{6}$$

心率折减系数 C_e 、附加质量系数 C_m 。文献[1-2]表明 C_e 、 C_m 均服从对数正态分布，其平均值和变异系数分别为0.531、0.03和1.877、0.036。

2.2.3 船舶实际载质量的分布

文献[1]给出了船舶实际排水吨位的统计资料，船舶实际载质量吨位服从对数正态分布，其平均值和变异系数为47 565.091 t、0.073。

2.2.4 计算模式的不确定性

计算模式的不确定性主要是指撞击力计算中采用的基本假定不完全符合实际和计算公式的近似等引起的变异性。这些假定和简化必然会造成计算的撞击力和实际撞击力的差异。采用随机变量 K_p 表达。文献[2]表明, 计算模式的不确定性变量服从对数正态分布, 其平均值和变异系数分别为 1.02 和 0.15。

3 构件破坏准则

目前针对构件的损伤、破坏的准则主要是针对静力设计和抗震设计而言的。归纳起来, 主要的构件破坏准则有强度破坏准则、变形破坏准则、能量破坏准则以及变形能量破坏准则。

1) 强度破坏准则。

强度破坏准则以钢筋、混凝土材料的应力指标作为破坏的标准。强度破坏准则原理简单、方便应用, 在静力设计中应用广泛。承载能力极限状态设计的构件普遍采用了强度破坏准则, 破坏准则的形式为:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (7)$$

2) 变形破坏准则。

变形破坏准则以构件的位移、应变等变形参数作为性能指标, 要求结构的最大位移值在容许的变形范围内。正常使用极限状态设计的构件采用了变形破坏准则, 在抗震设计中也引用了变形破坏准则, 其形式为:

$$\Delta_{\max} \leq [\Delta] \quad (8)$$

3) 能量破坏准则。

能量破坏准则以能量耗散和损伤模型作为研究对象, 通过能量的概念描述结构抗力, 主要应用于抗震设计中。但是这种破坏准则的建立较为复杂, 在实际工程中应用存在一定的困难。

4) 变形和能量破坏准则。

变形和能量破坏准则以结构的变形和能量两个方面综合考虑结构的抗力, 主要应用于抗震设计。

4 高桩码头水平承载力效应分析

影响构件抗力的主要因素为结构构件的材料性能 M (如强度、泊松比、弹性模量)、截面几何参数 A (如截面尺寸、跨度、惯性矩) 以及计算模式的不确定性 P , 这些不确定性因素一般可以处理为相互独立的随机变量。结构构件抗力的计算模式大多为 $Y = X_1 X_2 X_3 \dots$ 或 $Y = X_1 X_2 X_3 + X_4 X_5 X_6 \dots$ 等形式的表达式, 概率论中的中心极限定理理论指出, 结构构件抗力 R 近似服从对数正态分布。

4.1 桩的水平位移功能函数

管桩在船舶撞击力的作用下会发生变位, 促使桩周土体发生变形而产生抗力。当管桩的变形增长到码头不能容许的程度时, 桩土体系趋于破坏。工程中一般通过控制桩的水平位移来控制码头的水平承载力。在这种破坏模式下, 根据位移破坏准则, 要保证桩顶水平位移 d 不超过容许值 d_{\max} , 即^[3]

$$d \leq d_{\max} \quad (9)$$

因此, 水平位移破坏时的功能函数表达式为:

$$z_d = d_{\max} - d \quad (10)$$

根据规范规定^[4], 最大的容许水平位移值为 10 mm。最大水平位移容许值的确定与入土深度、桩身刚度和地基刚度等很多因素有关, 文献[5-6]表明水平位移容许值的变异系数 $\delta_{d_{\max}}$ 为 0.01。

4.2 桩身弯矩的功能函数

工程实践及文献试验表明^[7-8], 水平受力桩的受弯破坏多数是从最大弯矩的截面开始的。桩在弯矩的作用下, 将沿弯矩最大的截面发生破坏, 即正截面破坏。在这种情况下, 根据强度破坏准则, 要保证构件不发生弯曲破坏, 构件可能承受的弯矩 M_s 与抗弯能力 M_R 之间就要满足:

$$M_s < M_R \quad (11)$$

受弯破坏时的功能函数表达式为:

$$z_M = M_R - M_s \quad (12)$$

PHC800 管桩的极限抗弯能力为 556 kN·m。抗力的平均值 μ_{M_R} 为 628.28 kN·m, 变异系数 δ_{M_R} 为 0.1。

5 基于 ANSYS 的高桩码头结构可靠度分析

实际工程中的高桩码头结构十分复杂,无法直接通过随机参数得到结构响应。有限元法求解结构响应是一种十分有效的方法。结合随机理论与有限元法,可以解决具有随机参数的结构系统的可靠度分析。

5.1 建立模型

5.1.1 嵌固深度的计算

《港口工程桩基规范》规定,弹性长桩的受弯嵌固点深度可用 m 法按下式计算:

$$t = \eta T \quad (13)$$

式中: t 为受弯嵌固点距泥面的深度(m); η 为系数,一般取 1.8 ~ 2.2, 桩顶铰接或桩的自由长度较大时取较小值, 桩顶嵌固或桩的自由长度较小时取较大值; T 为桩的相对刚度系数(m)。

$$T = \sqrt{\frac{EI}{mb_0}} \quad (14)$$

式中: EI 为桩的横向抗弯刚度($\text{kN} \cdot \text{m}^2$); m 为桩侧地基土的水平抗力系数随深度增长的比例系数($\text{kN} \cdot \text{m}^4$); b_0 为桩的换算宽度(m), 取 $2d$, d 为桩径。

取 $b_0 = 16 \text{ m}$, $m = 4\,500 \text{ kN} \cdot \text{m}^4$, $EI = 5.674\,5 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, $\eta = 2.1$, 计算得桩的相对刚度系数 $T = 8.877\,6 \text{ m}$, $t = 18.6 \text{ m}$ 。则等效桩长取为 36 m 。

5.1.2 模型单元的选取

文献[9]证明: 实体建模和空间梁板简化建模的内力计算结果基本一致, 简化模型的内力计算结果略小于实体模型。这是由于简化模型无法模拟桩帽, 忽略了桩帽的削峰作用, 计算的码头整体刚度偏大。但是实体建模的运算量巨大, 在较大次数的重复抽样过程中难以实现。空间梁板简化建模的方式较为简单, 可以直接获得梁和桩的弯矩和剪力, 压缩可靠度循环抽样的运算时间。本文在建立高桩码头模型的时候, 使用了空间梁板简化模型。简化的模型中所有的材料参数以及截面参数都与实体模型相同。

本文采用自下而上的建模方式, 通过关键点定义线和面并划分网格, 建立梁板的空间模型。

码头的纵横梁和桩基础用梁单元 (beam 188) 进行模拟, 板面用壳单元 (shell63) 进行模拟。面板和纵横梁之间采用刚性连接, 纵横梁和桩基础之间采用固接。桩基依据地质条件确定桩基嵌固点的位置, 将其嵌固点处截断并弹性嵌固, 桩底端为固定约束。船舶靠泊荷载使用水平荷载进行模拟。计算中的材料参数见表 1。

表 1 模型计算参数

材料	弹性模量/GPa	密度/(kg/m^3)	泊松比 ν
φ800PHC 管桩	39.0	2 500	0.167
梁板结构	32.5	2 500	0.167

5.2 可靠度计算方法

根据荷载效应随机变量的统计分析, 进行船舶撞击力的蒙特卡罗抽样。抽样次数取 10 万次, 随机数的抽取通过 matlab 完成。将产生的船舶撞击力随机数作为随机输入变量输入 ANSYS 程序中的 PDS 模块进行计算。在求解阶段计算并提取弯矩和最大水平位移, 建立功能函数, 将功能函数作为随机输出变量。

撞击力的抽样历史见图 2, 弯矩功能函数的抽样历史见图 3, 位移功能函数的抽样历史见图 4。

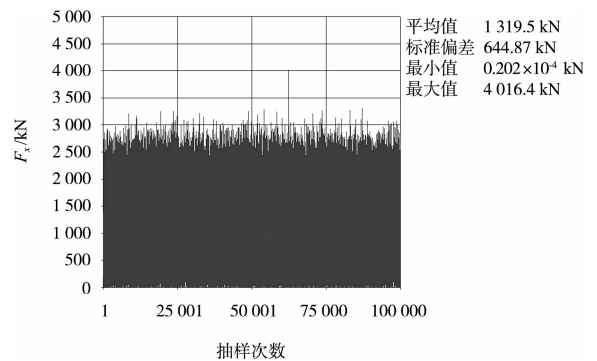


图 2 撞击力抽样历史

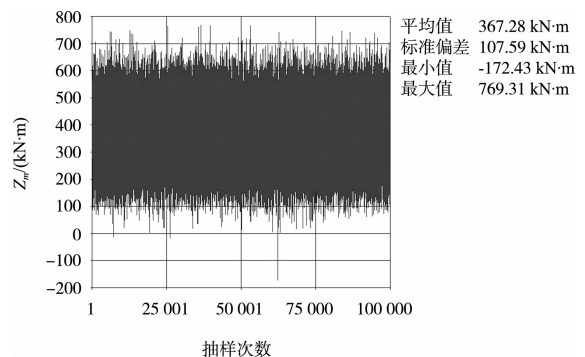


图 3 弯矩功能函数抽样历史

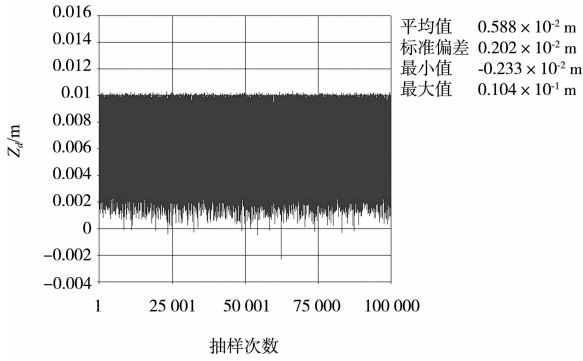


图 4 位移功能函数抽样历史

根据本文的 10 万次抽样计算, 失效概率的计算结果见表 2, 置信区间为 95%。相应的可靠指标分别为 4.0 和 3.6。

表 2 失效概率计算结果

功能函数	下限	失效概率	上限
$Z_m < 0$	1.01336×10^{-5}	3.50999×10^{-5}	8.51655×10^{-5}
$Z_d < 0$	7.3334×10^{-5}	1.37749×10^{-4}	2.23639×10^{-4}

6 结论

目前针对高桩码头建筑物结构可靠性的评估工作和成果还很少。根据概率极限状态法, 建立随机荷载与结构响应模型, 可以得到合理的结构可靠性分析结果。研究高桩码头结构在其全寿命周期内的可靠性, 能够量化结构可靠性的变化规律, 得到更加合理的高桩码头结构可靠性设计和评估方法。

1) 本文通过研究船舶撞击力计算理论, 建立船舶撞击力与船舶撞击能的对应关系。对荷载效应随机变量进行研究, 分析随机变量的统计参数和概率模型, 通过蒙特卡罗法分析撞击能和撞击力的统计分布, 并对其分布进行假设检验。统计和分析的结果认为, 船舶撞击能和船舶撞击力比较符合极值 I 型分布。

2) 本文确定了构件破坏准则和船舶撞击力作用下桩的破坏模式, 并建立相应的极限方程。认为船舶撞击力作用下, 高桩码头的主要破坏为桩基础的正截面受弯破坏以及受水平位移限制的破坏。

3) 利用 ANSYS 有限元分析软件建立结构响应模型, 利用 PDS 模块, 采用蒙特卡罗的方法进行可靠性分析, 共进行了 10 万次抽样。抽样的结果显示, 南京某码头受船撞作用失效的概率为 2.07305×10^{-3} , 可靠指标为 3.76。

参考文献:

- [1] Shigeru U, Toshihiko H, Satoru S, et al. Statistical design of fender for berthing ship [C]. Proceeding of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference. Japan: [s. n.], 2002.
- [2] 王建超. 轻型码头结构荷载标准与可靠度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [3] Ng A M, Lm Z. Probabilistic limiting tolerable displacements for serviceability limit [J]. Geotechnique, 2005, 55 (2): 151-161.
- [4] JGJ 106—2003 建筑桩基技术规范[S].
- [5] 孙安. 管桩水平承载力可靠度分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [6] 李强, 罗书学, 彭雄志. 抗滑桩可靠度分析与计算[J]. 路基工程, 2006(4): 67-70.
- [7] 张国勋. PHC 管桩水平承载力试验与数值模拟研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2012.
- [8] 刘俊伟, 张忠苗, 于秀霞, 等. 预应力混凝土管桩抗弯及抗剪性能试验研究[J]. 建筑技术, 2010(12): 32-35.
- [9] 王婷婷, 陈振民, 何文钦. 高桩梁板码头结构设计中的空间有限元分析[J]. 水运工程, 2009(7): 118-123.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。