



基于蒙特卡洛法的框架码头 桩基的可靠度分析

邹智¹, 王多银², 石兴勇¹, 易振友¹

(1. 广西壮族自治区交通规划勘察设计研究院, 广西南宁 530029;

2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要: 依托处于三峡库区常年回水区的某集装箱框架码头, 基于Monte Carlo法, 以弯矩效应为控制条件对框架码头的桩基进行可靠度分析。发现在7种工况组合作用下, 各桩的可靠指标都基本满足规范的要求; 虽然都采用直径为1 600 mm的钻孔灌注桩, 但桩1~4的可靠指标过大, 建议对桩基进行优化。

关键词: Monte Carlo法; 弯矩; 桩基; 可靠指标; 优化

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0177-06

Reliability analysis of frame pier's pile foundation based on Monte Carlo method

ZOU Zhi¹, WANG Duo-yin², SHI Xing-yong¹, YI Zhen-you¹

(1. Guangxi Communications Planning Surveying and Designing Institute, Nanning 530029, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Reliability is carried out on frame pier's pile foundation based on Monte Carlo method and taking the moment effects the control condition. It is found that under combined effect of seven working conditions, the reliability index of each pile can basically meet the specification requirements. Although all bored piles'diameter is 1600mm, the reliability index of pile 1~4 is too large, thus it is suggested to optimize on the pile foundation .

Key words: Monte Carlo method; moment; pile foundation; reliability index; optimization

随着可靠度理论的研究越来越深入, 成果越来越趋于成熟, 可靠度在港口工程领域的应用也会越来越广泛。国内专家学者们对框架码头的力学性能做了很多的分析, 但未曾对这种形式进行过系统可靠度的分析。本文以内河框架码头的桩基为研究对象, 结合蒙特卡洛法和有限元软件对其进行可靠度分析, 希望能够为今后三峡库区的港口码头的建设提供参考和借鉴。

1 Monte Carlo法

蒙特卡罗法的基本原理^[1]: 结构失效的概率就是结构发生失效次数占总抽样数的频率。假设

在产生伪随机数和已知随机变量分布类型的基础上, 得到 n 个独立的随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n , 其对应的概率密度函数分别为 $f_{x_1}, f_{x_2}, \dots, f_{x_n}$, 极限状态函数为:

$$Z=g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

设抽样数为 N , 每组变量对应的功能函数值为 Z_i , 且 $Z_i \leq 0$ 的次数为 L , 则在大批抽样计算后结构的失效概率为:

$$P_f=L/N \quad (2)$$

计算结果的精度与抽样数 N 有着重要的关系。一般建议用95%的置信度以控制蒙特卡罗法的误差:

收稿日期: 2013-03-30

作者简介: 邹智(1961—), 男, 高级工程师, 主要从事水运工程方面的设计和研究工作。

$$\varepsilon = [2(1 - P_f) / (NP_f)]^{1/2} \quad (3)$$

由此可见，结构模拟次数 N 越大，误差 ε 越小。因此，要达到一定的计算精度， N 必须满足^[2]： $N \geq 100P_f$

蒙特卡洛法进行可靠度分析的流程见图1。

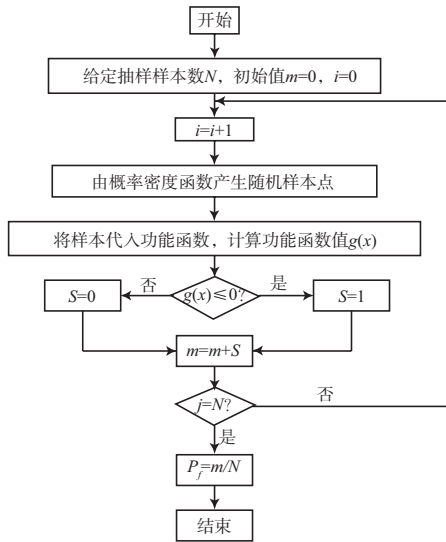


图1 蒙特卡洛法进行可靠度分析的流程

2 工程概况

本框架码头作业平台排架间距为7 m，共37榀，每榀排架设6根 $\phi 1\ 600$ 钢筋混凝土钻孔灌注桩。基桩和上部横梁连接采用 $\phi 1\ 300$ 钢筋混凝土立柱，立柱间相隔一定高度设纵横撑连接。平台上部结构由横梁、纵梁、轨道梁、前后边梁、靠船立柱及面板组成，靠船立柱间设置纵向系靠船梁。平台前方及系船梁上设有450 kN系船柱，平台排架前沿竖向布置DA-A500HL1500型橡胶护舷，平台前沿竖向共设7层系缆平台，由连续的系靠船梁形成，层间距约4.5 m。装卸船作业采用岸边集装箱起重机。岸边集装箱起重机的轨距为16 m，基距14 m，并机轮距2.26 m，最大轮压为280 kN。码头排架剖面见图2。

3 有限元模型的建立

根据码头结构形式及力学特点，将其简化为杆件系统建模。结合《高桩码头设计与施工规范》^[2]和有限元原理，采用有限元软件ANSYS对全直桩框架码头的横向排架进行平面计算，桩与横梁采用嵌固连接，桩的计算长度根据嵌固点法

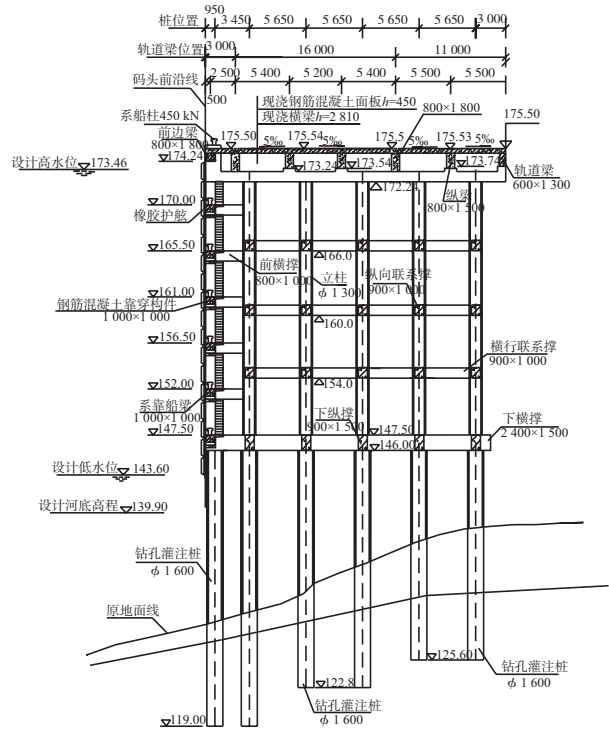


图2 集装箱码头泊位(排架)剖面图

确定，桩端固结约束所有自由度。建模时采用可以考虑剪切变形影响的BEAM189梁单元模拟杆件系统，取混凝土的弹性模量为 3.15×10^4 MPa，泊松比为1/6。有限元模型见图3，模型划分为925单元，2 754节点。

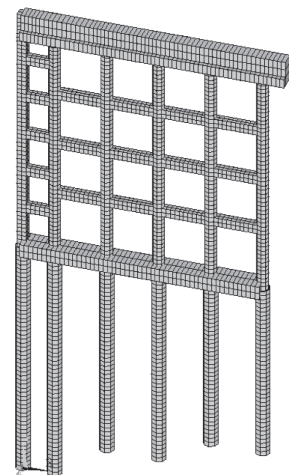


图3 有限元模型

4 作用荷载

4.1 作用

1) 永久作用。

结构自质量，按 $\rho=2.5$ t/m³计算。面板传递给横梁的自重力，按 $\rho=2.5$ t/m³计算。

2) 可变作用。

①船舶荷载。系缆力按风速 $v=22$ m/s, 流速 $v=2.5$ m/s计算; 撞击力按风速 $v=22$ m/s, 流速 $v=2.5$ m/s计算。②集装箱装卸桥(岸吊): 轨

距16 m, 轮距0.8 m, 基距为14 m(最大轮压为280 kN, 4个支腿, 32个轮子)。集装箱装卸桥受力见图4。③堆荷 30 kN/m²。

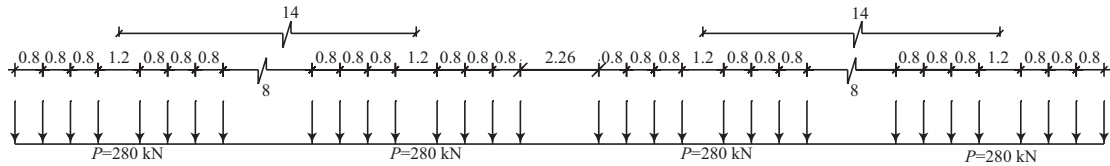


图4 集装箱装卸桥受力

4.2 作用效用分析

1) 永久作用产生的作用效应。

①横梁、桩、靠船构件、柱、横撑、下横撑和前撑等构件的自重可在ANSYS中设置参数后软件自动施加, 重力加速度取 $g=9.8$ m/s², 密度取 $\rho=2500$ kg/m³。

②面板传给横梁的自重, 面板按间支板计算: $q_1=73$ kN/m。

③排架两端大的系船梁、纵撑、轨道梁、钢质轨道自重、下纵撑、其它纵梁以集中力的方式施加于其所在的节点上, 大小分别为: 系船梁 $P_1=210$ kN; 纵撑 $P_2=158$ kN; 轨道梁 $P_3=252$ kN; 其它纵梁 $P_6=189$ kN; 钢质轨道自重 $P_4=10$ kN; 下纵撑 $P_5=262$ kN。

2) 可变作用产生的作用效应。

①船舶荷载。

系缆力 $N=450$ kN; 系缆力的水平分力 $N_x=225$ kN; 系缆力的垂直分力 $N_y=390$ kN; N_x 对横梁中和轴产生的力矩 $M=335$ kN·m。

撞击力: 橡胶护舷为DA500H-L1500, 反力 $F_x=1030$ kN, 分配系数见文献[6]。 F_x 对横梁中和轴产生的力矩 $M=1620$ kN·m。

②集装箱装卸桥(岸吊)。

集装箱装卸桥产生的作用由轨道梁传给横梁, 轨道梁按5跨弹性支撑连续梁计算。利用ANSYS对岸吊进行移动荷载分析, 轮压力按0.2 m/s匀速移动的常量力施加, 对移动荷载分76个荷载步进行加载。从跨中支座反力的时间历程曲线(图5)可知: 轨道梁传给横梁的最大反力为1800 kN。

③堆荷 30 kN/m²。堆荷由面板传递给横梁,

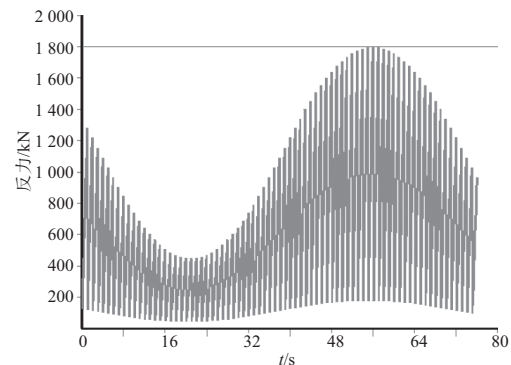


图5 时间历程曲线

其值为 $q_2=195$ kN/m。

4.3 荷载工况

《高桩码头结构设计与施工规范》^[2]规定, 大水位差码头通常指的是设计水位差10~17 m, 设置3~4层系靠船构件或浮式系靠船设施的高桩码头。本项目处于三峡库区常年回水区, 水工结构采用架空直立式框架结构, 设计水位差超过30 m, 共设7层系缆平台, 撞击力为1030 kN, 这远远超过了大水位差码头设计规范的最大设计要求。基于这种结构的特殊受力情况, 本文在进行作用效应组合时: 撞击力作为可变荷载按实际大小考虑7种工况(图6); 结构自重作为恒载按实际大小作为1种工况计算; 堆载作为可变荷载按实际大小布满横梁工况计算; 岸吊荷载作为可变荷载按实际大小作为一种工况计算。

4.4 工况组合

结合前面所述, 考虑码头结构实际可能出现的作用, 按承载能力极限状态结合相应的设计工况, 将每一个撞击力工况和结构自重、堆载、岸吊荷载以及门机荷载相组合, 共计7种工况组合。

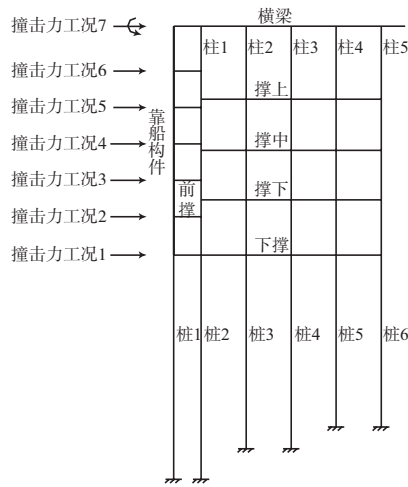


图6 冲击力计算工况

5 随机变量参数的选取

5.1 荷载参数的选取

GB 5018—1992《港口工程结构可靠度统一设计标准》^[4]编制组曾对国内海港和河港码头的堆货荷载、门式起重机机械荷载和船舶撞击力进行过统计分析，给出了港口工程荷载统计参数及其概率分布(表1)。由于荷载统计调查距今已接近20 a的时间，在这段时间内随着航运经济的发展，船舶吨位、生产作业方式、货物种类以及吊装机械、车辆运输方式等都发生了很大变化，这必然导致港口工程的结构荷载发生很大的变化，由于目前尚没有得到最新的统计数据，所以本文进行分析时仍以表1的统计参数为基础，因此分析的可靠指标只具有相对意义。

表1 港工结构荷载统计参数

| 荷载类型 | 时间 | 平均值/标准值 | 变异系数 | 概率分布类型 |
|--------|-----|---------|---------|--------|
| 恒载 | 基准期 | 1.020 | 0.040 0 | 正态 |
| 码头堆货荷载 | 1 a | 0.450 | 0.244 0 | 极值I型 |
| 门机荷载 | 基准期 | 0.820 | 0.037 2 | 极值I型 |
| | 基准期 | 0.920 | 0.033 2 | 极值I型 |
| 船舶撞击力 | 1 a | 0.470 | 0.094 4 | 极值I型 |
| | 基准期 | 0.753 | 0.081 4 | 极值I型 |

5.2 抗力参数的选取

在本文提到的可靠度分析中，抗力是指与截面荷载效应（如位移、应力、轴力、弯矩等）相对应的截面抗力。严格来讲，截面的抗力是与时间有关的。但由于这个过程进行得非常缓慢，加以适当的养护，可以将其对可靠指标的影响程度

减少到可控的范围。为简化起见，本文暂将抗力简化为与时间无关的随机变量。影响截面抗力的因素很多，对结构进行可靠度分析时，可将其分为3种：几何参数的不确定性，材料性能的不确定性，计算模式的不确定性。

当然，以上3种并不是影响构件截面抗力的所有因素。分析结构的可靠度时，常常将抗力 R 视为综合随机变量来考虑。假定构件由两种以上材料组成，计算其抗力时要考虑以上提到的3种因素，其表达式如下：

$$R=K_p R_c \tag{4}$$

$$R_c=R(f_{c_i}, a_i)=R[(K_{f_i} \omega_{o_i} f_{k_i}), (K_{a_i} a_{k_i})] \tag{5}$$

式中： $i=1, 2, \dots, n$ ； R_c 为计算确定的结构抗力值； f_{c_i} 为第 i 种材料的性能值； a_i 为与第 i 种材料相应的构件几何参数； K_{f_i} ， f_{k_i} 为构件种第 i 种材料性能随机变量及其构件标准值； K_{a_i} ， a_{k_i} 分别为第 i 种材料相应的构件几何参数随机变量及其标准值； $R(\cdot)$ 为抗力函数。

由式(4)，(5)可知 R 综合考虑了几何参数、材料性能、计算模型的不确定性，将多个随机变量简化为一个总的随机变量 R 。《港口工程结构可靠度统一计划标程》^[4]提到：一般情况下，港工钢筋混凝土构件的含钢率为0.7%左右，表2给出此含钢率对应的各类受力构件的抗力统计参数。

表2 抗力统计参数

| 受力状态 | 平均值/标准值 | 变异系数 | 概率分布类型 |
|-------|---------|-------|--------|
| 受弯 | 1.11 | 0.144 | 对数正态分布 |
| 轴心受压 | 1.40 | 0.173 | 对数正态分布 |
| 大偏心受压 | 1.29 | 0.153 | 对数正态分布 |
| 小偏心受压 | 1.42 | 0.179 | 对数正态分布 |
| 受扭 | 1.04 | 0.292 | 对数正态分布 |

计算圆形截面的抗弯承载能力时，根据工程经验取 $\alpha=0.25$ 。结合配筋图7和计算公式，求得桩的抗弯承载力为2 924 kN·m。将有限元模型在各工况组合作用下进行静力计算，对结果进行模型后处理并统计分析，发现弯矩最大处的截面均为小偏心受压。

6 结果分析

本文以弯矩效应为控制条件，基于蒙特卡洛

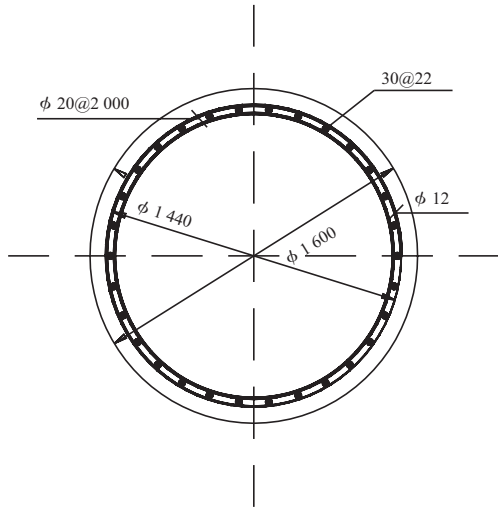


图7 桩的截面配筋

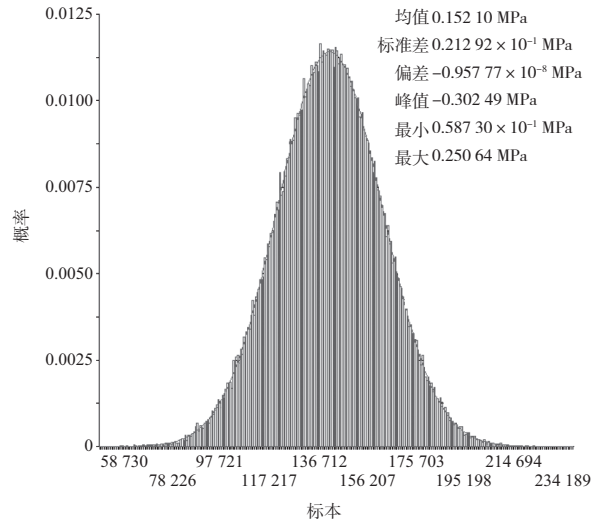


图8 堆载效应直方图

法建立可靠度分析文件,以 $Z=R-S$ (R 为抗力, S 为荷载效应)为功能函数,在后处理文件中得到 $Z \geq 0$ 的概率即为可靠度。为了满足港口工程结构可靠指标精度的要求,将静力计算过程仿真循环10万次计算构件的可靠指标。

图8表示服从正态分布的堆载的直方图是接近概率函数的比较光滑的曲线,说明选取的样本数量足够充分。

本文将弯矩视为随机输出变量,为了解其在仿真循环后的累积分布函数,利用ANSYS的后处理功能得到可靠指标对应的概率水平条件下各构件弯矩的极限数据,它反映各构件要满足规范要求可靠指标时应具备最小的(弯矩)抗力是多少。表3所示是置信度水平为0.95,可靠指标为3.5的条件下,各构件受到的弯矩效应的最大值。

表3 各构件受到的弯矩效应的最大值

| 构件 | 工况组合1 | 工况组合2 | 工况组合3 | 工况组合4 | 工况组合5 | 工况组合6 | 工况组合7 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 桩1 | 1.286 | 1.264 | 1.257 | 1.254 | 1.247 | 1.241 | 1.287 |
| 桩2 | 1.346 | 1.342 | 1.338 | 1.341 | 1.338 | 1.334 | 1.347 |
| 桩3 | 1.885 | 1.924 | 1.913 | 1.929 | 1.934 | 1.937 | 1.887 |
| 桩4 | 1.887 | 1.920 | 1.916 | 1.930 | 1.934 | 1.940 | 1.888 |
| 桩5 | 2.479 | 2.523 | 2.516 | 2.533 | 2.537 | 2.543 | 2.483 |
| 桩6 | 2.389 | 2.418 | 2.401 | 2.414 | 2.415 | 2.419 | 2.393 |

由于失效概率表示为 $P_f = \Phi(-\beta)$,说明 β 值与失效概率 P_f 是一一对应的关系。跟其他变量一样,功能函数 Z 随模型每循环一次则产生一个样本,在执行完循环文件后,利用ANSYS的后处理可产生任意构件对应的功能函数的样本曲线。本文仅给出6根桩在7种工况组合作用下的样本曲线(图9)。

对数据进行处理,得到桩基在不同的工况组合作用下的可靠指标散点(图10, 11),可知:

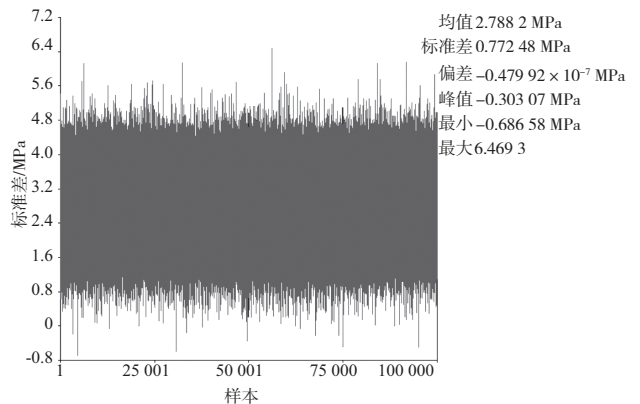


图9 桩6的弯矩效应样本曲线

表4 各构件的可靠指标

| 构件 | 工况组合1 | 工况组合2 | 工况组合3 | 工况组合4 | 工况组合5 | 工况组合6 | 工况组合7 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 桩1 | 4.879 | 4.899 | 4.917 | 4.921 | 5.032 | 5.026 | 4.878 |
| 桩2 | 4.724 | 4.728 | 4.814 | 4.823 | 4.790 | 4.878 | 4.724 |
| 桩3 | 4.207 | 4.069 | 4.197 | 4.212 | 4.193 | 4.081 | 4.312 |
| 桩4 | 4.202 | 4.071 | 4.193 | 4.209 | 4.190 | 4.077 | 4.312 |
| 桩5 | 3.562 | 3.490 | 3.492 | 3.466 | 3.456 | 3.446 | 3.506 |
| 桩6 | 3.653 | 3.613 | 3.589 | 3.588 | 3.593 | 3.573 | 3.594 |

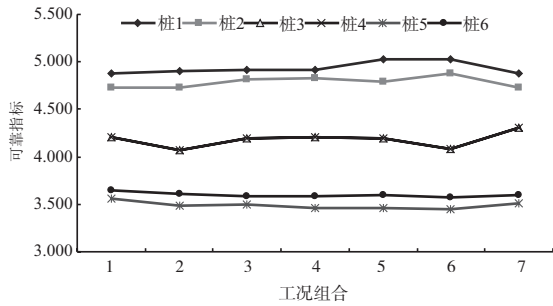


图10 可靠指标散点

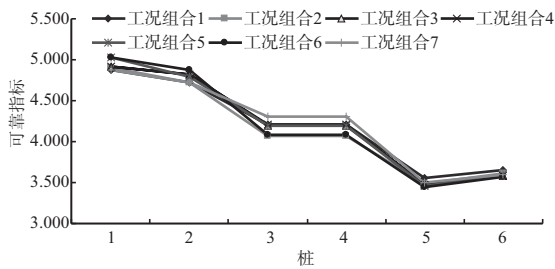


图11 可靠指标散点

1) 在7种工况组合作用下, 各桩的可靠指标都基本满足规范要求。

2) 在7种工况组合作用下, 6根桩的最小可靠指标接近3.5, 满足规范的要求。由散点图可以看出, 各桩的可靠指标存在差异。随着船舶撞击力位置的提高, 各桩的可靠指标变化不显著, 其波动程度不会超过±0.15。

3) 总的来说, 桩1到桩5的可靠指标有从5减小至3.5的趋势, 其中桩3和桩4基本相同, 桩6的可靠指标略高于桩5。从设计的角度出发, 桩5和桩6基本达到了可靠性与经济性的最佳平衡点。而桩1~4的桩径虽然与桩5相同, 但其可靠指标却明显高于规范要求的3.5, 构件在满足安全、适用、耐久的要求以外还有很大程度的富余, 这将无疑造成资源的浪费、增加了工程的投资, 说明设计

的构件偏离了可靠性与经济性的最佳平衡点, 可以对桩1~4的桩径做出适当的优化。

7 结论

1) 7种工况组合作用下, 各桩的可靠指标都满足规范要求。

2) 在水位差大于30 m的水文环境中, 码头在不同的工况组合作用下, 各桩的可靠指标波动很小, 说明这种结构布置的合理、实用。

3) 码头排架虽然都采用直径为1 600 mm的钻孔灌注桩, 但桩1~4的可靠指标偏高, 从弯矩效应角度出发, 可以对桩基进行优化。

4) 与桩1相比, 桩6的可靠指标明显偏低。说明靠岸侧的桩基虽然不直接承受船舶撞击力(水平横向荷载)的作用, 但其对码头排架抗弯承载能力的贡献最大。在此类码头结构的设计中, 应引起足够的重视。

5) 钢筋混凝土结构发生破坏的原因很多, 本文仅仅从弯矩效应的角度对构件进行可靠度分析。要全面衡量构件的可靠度, 今后还应该从应力、位移、裂缝等方面着手对构件的可靠度做进一步的研究。

参考文献:

[1] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.

[2] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].

[3] JTJ 212—2006 河港工程总体设计规范[S].

[4] GB 5018—1992 港口工程结构可靠度统一设计标准[S].

(本文编辑 武亚庆)