DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2025.03.007

监测数据驱动的在役高桩码头结构可靠度评估

张 鹏¹, 刘 伟¹, 崔春义¹, 许成顺², 季则舟³, 尤再进¹
 (1.大连海事大学交通运输工程学院 大连,116026)
 (2.北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室 北京,100124)
 (3.中交第一航务工程勘察设计院有限公司 天津,300222)

摘要 为实现在役高桩码头结构安全性能评价,提出了一种基于监测数据与广义 Pareto 分布 (generalized Pareto distribution,简称 GPD)模型的结构可靠度计算方法。首先,基于高桩码头桩基结构响应信息建立广义 Pareto 分布 概率模型,分别采用超阈值均值图法、Hill 图法、最小均方误差法和峰度法确定 GPD 概率模型的阈值参数;其次,结 合滤过泊松过程得到桩基结构响应极值的概率分布函数;最后,采用蒙特卡洛方法计算得到高桩码头整体桩基结构 的失效概率及可靠度指标。实例验证结果表明:GPD 模型对高桩码头整体桩基结构的弯矩数据的尾部数据拟合效 果较好,并能够比较准确地建立高桩码头整体桩基结构弯矩极值的概率分布函数;当服役基准期为 50 a时,计算得 到高桩码头整体桩基结构抗弯能力的可靠度指标为 3.854,满足目标可靠度指标的要求。

关键词 高桩码头;结构可靠度;弯矩极值;广义Pareto分布;滤过泊松过程 中图分类号 U656.113;TU311;TH17

引 言

高桩码头是海港码头设计中常见类型,具有承载能力高、适应能力强等优点,在我国港口码头中应 用广泛。高桩码头结构在服役期内受多种因素影 响,易出现结构构件劣化、工作性能降低等问题。其 中,桩基作为支撑和传递荷载作用的主要构件,容易 发生部分损坏和变形位移等问题,导致码头结构存 在安全隐患。

为保证高桩码头结构安全,对其进行可靠度评估十分必要。王禹迟等^[1]利用非线性有限元数值模型和蒙特卡洛模拟技术,对梁板式高桩码头结构整体极限承载力概率分布模型进行估计,并将其作为结构抗力随机变量,通过一次二阶矩法计算整体结构的可靠度指标。刘震宇等^[2]通过建立高桩框架码头数值模型,拟合得到了以码头整体极限承载力为抗力和以堆货荷载为荷载效应的响应面,运用蒙特卡洛法分析了框架码头整体可靠度。王浩天等^[3]通过建立高桩码头参数化数值模型,综合考虑码头面板位移失效模式和码头桩基强度失效模式之间的联系,采用地震安全联合委员会(Joint Committee on

Seismic Safety,简称 JCSS)所建议的方法得到了码 头水平向可靠度指标。以上研究通过高桩码头有限 元模型,从结构的安全性角度进行可靠度评估,鲜有 直接利用样本数据对高桩码头结构适用性,即正常 使用极限状态进行可靠度评估的研究。

近年来,部分学者对高桩码头监测数据的处理 及应用进行了研究。李端刚等[4]将码头构件上测得 的应变监测数据与有限元模型计算结果进行对比, 验证了现场监测结果的合理性。葛浩等^[5]通过对高 桩码头有限元模型的分析,得到结构中的最大应变 点,并对其进行实时监测。实测数据与有限元模型 模拟结果对比表明,在船舶碰撞力作用下码头的受 力趋势相似。以上研究是将监测数据与高桩码头模 型进行对比分析,并没有直接对监测数据进行分析。 目前,GPD模型广泛应用于地质灾害、健康监测和 可靠性等问题的研究。Pisarenko等^[6]利用GPD对 地震能量数据进行统计分析。Xiang等^[7]利用GPD 和结构健康监测系统的长期测量数据对南京长江三 桥的结构温度和交通荷载效应极值等进行估算。 Deng 等^[8]结合 GPD 和系统可靠性以及结构健康监 测系统的监测结果,提出了大跨桥梁竖向挠度可靠

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2601102);国家自然科学基金资助项目(51808092,52178315);大连理工大学海 岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(DUT-LP2122);海底工程技术与装备国际联合研究中心开放基金 资助项目(3132023362)。 收稿日期:2023-07-05;修回日期:2023-09-20

度评估框架,直接利用GPD建立监测数据的极值概 率模型,并用于结构的可靠度评估。

本研究提出了一种基于GPD模型与监测数据 驱动的在役高桩码头结构可靠度评估方法。相比于 Gamma分布和Weibull分布等常见概率分布,GPD 能够基于理论参数,对各种分布的低密度区域进行 拟合建模;GPD不仅考虑数据的极值,还可以对超 过阈值的数据进行分析。本研究以高桩码头整体桩 基结构的弯矩数据为基础,根据极值分析理论建立 与之相适应的概率模型,构建高桩码头整体桩基结 构可靠度评估体系,并通过具体案例给出高桩码头

1 基于 GPD 模型的可靠度评估框架

本研究提出的基于GPD模型的可靠度评估框架如图1所示,其中:Q-Q图指分位数-分位数图。 首先,该框架对监测数据进行拟合,得到GPD概率 模型参数;其次,结合滤过泊松过程分析,得到桩基 结构弯矩极值的概率分布函数;最后,根据功能函 数,采用蒙特卡洛方法计算得到高桩码头结构整体 失效概率及可靠度指标。



Fig.1 Reliability assessment framework

1.1 广义 Pareto 分布

GPD是极值理论重要分支。根据极值理论,极 值估计结果通常只与样本的尾部分布密切相关,因 此用来拟合随机变量的尾部分布,从而描述超阈值 的极值行为。

选取样本数据 X_i ($i=1,2,\dots,n$)为研究对象,

且样本 X_i 具有共同的分布函数F(x)。令样本数据的阈值为 μ ,得到超阈值样本的分布函数 $F_u(x)$ 为

$$F_{u}(x) = P(X \leq x | X > x) = \frac{F(x) - F(\mu)}{1 - F(\mu)}$$

(x>\mu) (1)

文献[9-10]通过对 GPD 模型的研究发现,当阈 值 μ 足够大时,超阈值样本的分布函数近似服从 GPD 模型,其概率分布函数 $G(x; \mu, \sigma, \xi)$ 及概率密 度函数 $g(x; \mu, \sigma, \xi)$ 分别为

$$G(x; \mu, \sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (2)$$

$$g(x;\mu,\sigma,\xi) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}-1}$$
(3)

其中: $x \ge 0$; $\sigma > 0$; $1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} > 0$; σ 为尺度参数; $\xi \in R$,为形状参数; $\mu \in R$,为位置参数,即阈值。

GPD模型共有3个参数:尺度参数 σ 、形状参数 ξ 和阈值 μ 。当使用GPD模型进行样本拟合时,首 先需要确定阈值 μ ,然后通过阈值 μ 估计尺度参数 σ 和形状参数 ξ 。尺度参数 σ 和形状参数 ξ 可采用极大 似然估计法进行估计。

采用极大似然估计法^[11]对 GPD 模型参数进行 估计具有很高的精度,且步骤简单。假设样本 X_i 满 足条件 $X_1 \ge X_2 \ge \cdots \ge X_k \ge \mu \ge X_{k+1} \ge \cdots \ge X_n$, 根据式(3)得到超阈值样本 $\{X_1, X_2, \cdots, X_k\}$ 的似然 函数为

$$L(\sigma,\xi) = \frac{1}{\sigma^k} \prod_{i=1}^k \left(1 + \xi \frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^{-(1+1/\xi)}$$
(4)

对数似然函数为

$$\ln L = -k\ln\sigma - \left(1 + \frac{1}{\xi}\right)\sum_{i=1}^{k}\ln\left(1 + \xi\frac{X_i - \mu}{\sigma}\right)$$
(5)

利用式(5)分别对参数 σ 、 ξ 一阶求导,令 $\partial \ln L/\partial \sigma = 0$, $\partial \ln L/\partial \xi = 0$,化简后的似然方程组为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{k} \frac{(X_i - \mu)/\sigma}{1 + \xi (X_i - \mu)/\sigma} = \frac{k}{1 + \xi} \\ \sum_{i=1}^{k} \ln \left(1 + \xi \frac{X_i - \mu}{\sigma} \right) = k\xi \end{cases}$$
(6)

求解式(6),即可得到GPD模型参数。

1.2 GPD 阈值估计

选取超阈值均值图法、Hill图法、最小均方误差 法及峰度法4种方法对阈值µ进行估计,通过对比, 选择其中一个阈值作为超阈值样本服从 GPD 的最 佳阈值。

1.2.1 超阈值均值图法

超阈值均值图法是一种图解法,也是最常用的 一种阈值估计方法。该方法通过建立样本平均超出 量函数与阈值的关系曲线图来选取最优阈值^[12]。 对于己知的样本X_i,样本平均超出量函数 e_n(µ)为

$$e_n(\mu) = \frac{1}{N_{\mu}} \sum_{i=1}^{N_{\mu}} (X_i - \mu)$$
(7)

其中:N_µ为样本X_i中超阈值的数量。

点集{ μ , $e_n(\mu)$ }绘制出来的曲线图称为超阈值 均值图。选择 μ_0 >0的样本作为阈值,当 $\mu > \mu_0$ 时, 超过 μ_0 部分的 $e_n(\mu)$ 近似在一条直线附近波动。

1.2.2 Hill图法

假设 $X_1 > X_2 > \dots > X_n$ 为己知的独立同分布 样本 X_i 的次序统计量,其尾部指数的Hill统计量^[13] 可表示为

$$H_{k,n} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} \log \left(\frac{X_{(i,n)}}{X_{(k,n)}} \right) \quad (k \le n)$$
(8)

点 $(k, H_{x,n}^{-1})$ 构成的曲线即为 Hill 图,选取图形 中 $H_{x,n}^{-1}$ 趋于常数的稳定区域起始点的横坐标k所对 应的数据 $X_{k,n}$ 即为阈值 μ_{o}

1.2.3 最小均方误差法

假设 $X_1 > X_2 > \cdots > X_n$ 为己知的独立同分布样本 X_i 的次序统计量,并记为 $D = [X_1 > X_2 > \cdots > X_n]$,根据GPD,形状参数 ξ 估计阈值的具体步骤^[14]如下。

1) 在 *D* 中选取前*k*个样本点即*D_k*= [*X*₁, *X*₂, ..., *X_k*],采用GPD 拟合*D_k*并利用极大似然 估计法计算形状参数 $\hat{\xi}_{k}$,其中,阈值 $\mu = X_{k}$,*k*的取值 需满足估计GPD形状参数需要的最少样本数。

2) 在样本 D_k 中采取有放回抽样方法抽取 k个 样本, 记为 $D_k^{(i)} = [X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_k^{(i)}], 采用 GPD$ 拟合 $D_k^{(i)}$ 并利用极大似然估计法计算形状参数 $\hat{\xi}_{ki}$, 其中,阈值 $\mu = X_k$, 重复抽样 200次可获得 200个形 状参数, 记为 $\{\hat{\xi}_{kl}, \hat{\xi}_{k2}, \dots, \hat{\xi}_{kB}\}_{\circ}$

3) 选取不同 *k* 值, 重复步骤 1 和 2, 采用均方差 (mean squared error, 简称 MSE) 计算

$$MSE(\hat{\xi}_{k}) = \left(\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} \hat{\xi}_{ki} - \hat{\xi}_{k}\right)^{2} + \frac{1}{199} \sum_{i=1}^{200} (\hat{\xi}_{ki} - \hat{\xi}_{k})^{2}$$
(9)
通 过 式 (9) 得 到 对 应 的 均 方 差 记 为

 $\left[MSE(\hat{\xi}_{ki}), MSE(\hat{\xi}_{ki}), \cdots, MSE(\hat{\xi}_{ki}) \right], 选取其中最$ $小值对应的样本点 <math>D_k$ 作为阈值。

1.2.4 峰度法

样本X_i的次序统计量D的峰度系数K的计算式^[14]为

$$K = \frac{E(X_i - \bar{X})^4}{\left[E(X_i - \bar{X})^2\right]^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

其中:*x*为样本均值。

如果 $K \ge 3$,选择 $|X_i - \bar{X}|$ 值最大的样本点 X_i 并从样本中剔除,重复计算,直到满足条件K < 3, 在保留的样本点中选择最大的样本作为阈值。

超阈值均值法和Hill图法估计的阈值会随着样本容量的增大而增大;不同样本的超阈值均值图和 Hill图得出的阈值结果有较大的不稳定性,一些样本难以判断阈值的位置。最小均方误差法估计的阈 值相对比较稳定,但计算量太大。峰度法估计的阈 值会根据选取的底分布而不同。在实际工程中,需 要根据具体的数据集选取适当的阈值估计方法来保 证估计的阈值最佳。

在实际计算阈值的过程中,需进行主观判断,根 据样本数量以及计算出来的阈值大小来选择最合适 的阈值,也可用分位数-分位数(quantile-quantile plot,简称Q-Q)图来选取合理的阈值。Q-Q图是一 种散点图,通过把某一样本的分位数与已知分布的 另一样本数据的分位数进行比较,从而检验数据的 分布情况。若Q-Q图对直线y=x的偏离程度较小, 则说明样本与GPD 拟合较好,阈值取值较为合理; 若偏离程度较大,则说明样本与GPD 拟合效果较 差,阈值取值不合理。

1.3 极值概率模型

选取在码头面板上堆货荷载作用下的整体桩基 结构弯矩样本数据作为研究对象,采用GPD建立高 桩码头整体桩基结构弯矩尾部样本的超阈值概率模 型。根据文献[15]可知,滤过泊松过程可被用作描 述堆货荷载的概率模型。堆货荷载作用引起的高桩 码头整体桩基结构的弯矩与堆货荷载本身具有相似 性,可采用滤过泊松过程来建立高桩码头整体桩基 结构弯矩样本极值的概率模型。

堆货荷载效应产生随机脉冲的峰值与峰值之间 有一定的时间间隔,符合随机点过程的特征。用滤 过泊松过程来表示堆货荷载效应随机过程的概率模 型,其表达式为

$$\begin{cases} X(t) = \sum_{n=0}^{N(t)} \omega(s_i, t, \tau_i) & (t \ge 0) \\ \omega(s_i, t, \tau_i) = \begin{cases} s_i & (t \in \tau_i) \\ 0 & (t \notin \tau_i) \end{cases} \end{cases}$$
(11)

其中:X(t)为堆货荷载效应随机过程模型; { $N(t), t \ge 0$ }为泊松过程;N(t)为时间t内堆货荷 载峰值产生的个数;{ $s_i, i = 0, 1, \cdots$ }为一组服从独 立同分布的随机序列; s_i 为第i个峰值; τ_i 为 s_i 出现 的时间。

基于滤过泊松过程的随机过程理论,可以得到 服役基准期T内堆货荷载效应引起的高桩码头整体 桩基结构弯矩极值的概率分布函数为

$$F_{M}(x) = \begin{cases} \exp[-\lambda T(1 - F(x))] & (x \ge 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases}$$
(12)

其中:*T*为服役基准期;λ为泊松过程强度,表示单位 时间段内超阈值的数量^[16]。

将式(2)代入
$$F_{M}(x)$$
,则简化为
$$F_{M}(x) = \exp\left[-\lambda T \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right] \quad (13)$$

1.4 可靠度计算方法

以高桩码头整体桩基结构弯矩数据和GPD模型为基础,采用可靠度理论对码头面板上堆货荷载作用下的高桩码头整体桩基结构抗弯能力进行评估。设正常使用极限状态功能函数为

 $Z = g(R, S) = R - S \tag{14}$

其中:R为结构抗力,表示结构抵抗破坏或变形的能力;S为荷载效应;Z>0表示结构处于可靠状态, Z<0表示结构处于失效状态,Z=0表示结构处于 极限状态。

式(14)中结构抗力R可根据结构类型及相关规范进行选取。本研究关注大管桩抗裂极限状态,因此采用大管桩抗裂弯矩Mac作为结构抗力R,根据文献[17]其计算表达式为

$$M_{\rm cr} = (\sigma_{\rm pc} + \gamma f_{\rm tk}) W_0 \tag{15}$$

其中:M_{er}为管桩抗裂弯矩;σ_{pe}为有效预压应力;γ为 受拉区混凝土塑性影响系数;f_{tk}为混凝土抗拉强度 标准值;W₀为截面模量。

W。的计算式为

$$W_0 = 2I/D \tag{16}$$

其中:D为管桩外径;I为截面惯性矩。

I的计算式为

$$I = \frac{\pi (R^4 - r^4)}{4} + \frac{[(E_s/E_c) - 1]A_p r_p}{2} \quad (17)$$

其中:r、R分别为管桩内、外半径;E_s、E_c分别为预应 力钢绞线、混凝土的弹性模量;A_p为全部预应力钢 绞线的截面面积;r_p为预应力钢绞线分布圆的半径。

基于式(13)获得结构响应极值的概率分布函数 $F_M(x)$,把采用马尔科夫链蒙特卡洛方法(Markov chain Monte Carlo,简称MCMC)^[18]对 $F_M(x)$ 采样的结果作为荷载效应。

MCMC是一种随机采样方法,适用于处理具有 多元随机变量、非标准密度函数以及不独立随机变量 分量的情况。基本思想是:利用某采样方法进行重复 抽样,建立一个平稳分布的马尔科夫链,得到概率密 度函数的样本,然后对这些样本进行蒙特卡洛模拟。

使用蒙特卡洛方法计算可靠度指标及失效概率。蒙特卡洛方法是一种基于随机模拟的数值计算方法,可以通过随机抽取大量样本来近似计算某些复杂问题的解^[19]。随着模拟次数的增加,蒙特卡洛法的计算结果逐渐趋近于精确解。

在结构可靠度的计算中,采用蒙特卡洛法对随 机变量进行大量随机抽样,将这些随机样本代入功 能函数*Z*,得到相应的函数值。通过分析这些函数值 的分布情况,得到结构的可靠度指标及失效概率为

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$
(18)

其中:β为可靠度指标;P_f为失效概率。

2 实例分析

2.1 数据获取

以某在役高桩码头为实例,该码头总长为 1500m,码头顶面高为5.2m,共17个结构分段。 码头结构采用高桩梁板式结构,排架间距为10.5m。 上部结构为现浇桩帽节点,预制横梁和纵向梁系,预 制现浇叠合面板结构。每榀排架布置12根基桩,其 中,A轴和H轴为双桩,其他轴为单桩。桩基采用直 径为1200mm的B1-1型预应力混凝土组合管桩。 其混凝土强度等级为C60,外径D为1200mm,内 径d为1050mm。采用32根直径为15.2mm、标准 强度为1860MPa的低松弛预应力钢绞线。图2为 码头断面图,其中,A~K为桩号。

选取码头某一结构段进行分析。通过获取在码 头面板上堆货荷载作用下的高桩码头A轴到K轴桩 基的180d的弯矩数据,对其进行高桩码头整体桩基 结构的可靠度分析。图3为高桩码头结构B轴桩基 180d的弯矩时程曲线。



2.2 概率模型分析

以获取的高桩码头整体桩基结构的弯矩数据为研究对象,采用Gamma分布、对数正态分布及Weibull分布这3种常用分布模型对其进行拟合,并进行Kolmog-Smirnov(简称K-S)检验,常用分布模型拟合结果如图4所示,其左侧纵坐标为概率密度函数(probability density function,简称PDF),右侧纵坐标为累计分布函数(cumulative distribution function,简称CDF)。



Fig.4 The fitting curves of common used distributions

经过 K-S 检验,弯矩样本数据不服从上述 3 种 常用分布,故采用 GPD 分布建立超阈值数据的概率 模型及极值概率模型。选用 4 种阈值估计方法来估 计 GPD 的阈值 µ。

1)采用超阈值均值图法估计阈值。图5为将已 知的样本数据集代入式(7)得到的超阈值均值图。可 见,当阈值 $\mu \ge 1253.8500$ 时,纵坐标平均超出量近 似在一条直线附近波动,确定阈值 $\mu_1 = 1253.8500$ 。



2) 采用 Hill 图法估计阈值。将样本数据集进 行降序排序,将其代入式(8)并绘制 Hill 图,如图 6 所示。Hill 图中,纵坐标趋于常数的稳定区域,起始 点的横坐标 k 为 2 023,其对应的数据值 $X_{k:n}$ = 16.005 8,即阈值 μ_2 = 1 246.819 0。



3) 采用最小均方误差法估计阈值。使用 Matlab 软件对最小均方误差法的计算步骤进行编程,并对 MSE 进行 50次计算。选取计算结果中最小的 MSE 值(MSE_{min} = 6.74×10^{-4})对应样本点,最终确定阈 值 $\mu_3 = X_{233} = 1518.7780$ 。

4)采用峰度法估计阈值。使用 Matlab 对峰度 法的计算步骤编程,逐次计算峰度系数K,并剔除样 本数据。经若干次迭代后,得到峰度系数K= 2.4483,满足K < 3。选取此时保留的样本点中的最大样本作为阈值,即阈值 $\mu_4 = 1549.7700$ 。

使用极大似然估计法对得到的4种阈值进行参数估计,表1为GPD参数估计结果。

表 1 GPD 参数估计结果 Tab.1 Estimation results of the GPD parameters

阈值估计方法	μ	Ę	σ
超阈值均值图法	$1\ 253.850\ 0$	-0.6330	295.236 1
Hill图法	1 246.819 0	-0.6268	296.818 6
最小均方误差法	1 518.778 0	-0.3804	82.467 9
峰度法	1 549.770 0	-0.2065	52.131 7

图 7 为 4 种阈值的广义 Pareto 分布的 Q-Q 图。 可以看出:当 μ_4 =1549.77时,其散点图对y=x直 线的偏离程度较大;当 μ_1 =1253.85、 μ_2 =1246.819 及 μ_3 =1518.778时,散点图对y=x直线偏离程度 较小;超阈值均值图法和Hill图法通过阈值计算得 到的形状参数 ξ 均小于-1/2。此时,由于GPD的 厚尾特性,对数似然函数会变得非常平坦或多峰。 这意味着在参数空间中,存在多个使对数似然函数 相近的值,从而难以确定真正的最大值。综上,选取 阈值 μ_3 =1518.7780时的参数 ξ =-0.3804和 σ = 82.4679作为最终结果。



Fig.7 Q-Q plots of GPD with four different thresholds

图 8 为广义 Pareto 分布累计分布函数(cumulative distribution function,简称 CDF)图及概率密度 函数(probability density function,简称 PDF)图。经 K-S检验,GPD能较好地拟合超阈值样本数据。

在确定 GPD 参数 $\mu_{\lambda} \xi \partial_{\sigma} c$ 后,需确定滤过泊 松过程的参数 λ 和 T。当阈值为 1 518.778 0 时,有 232 个数据超过阈值,故取 $\lambda = 232$ 。 T为服役基准 期,这里取 50 a。根据上述参数,得到高桩码头在服 役基准期 T堆货荷载引起的高桩码头整体桩基结构 弯矩的极值概率模型 $F_{M}(x)$ 。图 9 为极值概率模型 的 CDF 图及 PDF 图。



图 8 广义 Pareto 分布 CDF 图及 PDF 图 Fig.8 CDF plot and PDF plot of GPD



Fig.9 CDF plot and PDF plot of the extreme value probability model

2.3 可靠度评估

设结构的正常使用极限状态功能函数为Z = g(R,S) = R - S。在本次可靠度计算时,结构抗力 R为桩基的抗裂弯矩限值,根据高桩码头桩基数据 及式(15)~(17),得到R = 1576.614 kN·m。荷载效 应S为用马尔科夫链蒙特卡洛方法对概率分布函数 $F_M(x)$ 采样的结果。

根据已知功能函数,使用蒙特卡洛方法计算可 靠度指标及失效概率,并与目标可靠度指标进行比 较。根据文献[15],选取安全等级为二级所对应的 可靠度指标 β =3.5。最终得到的高桩码头整体桩 基结构抗弯性能的失效概率 P_f =1.5×10⁻⁴,高桩 码头整体桩基结构抗弯性能的可靠度指标 β = $-\Phi^{-1}(P_f)$ =3.854,满足目标可靠度指标的要求。

3 结 论

1) GPD 对高桩码头整体桩基结构的弯矩数据 超阈值样本的拟合度较好,可以依据数量有限的监 测弯矩数据,准确建立服役基准期内高桩码头整体 桩基弯矩极值的概率模型。

2)采用4种阈值估计方法对GPD的阈值μ进行估计,确保了阈值取值的合理性。采用Q-Q图法

对多种不同阈值的GPD进行拟合,得到了最优阈值 参数μ。

3) 通过对某在役高桩码头结构进行实例研究, 以获取的高桩码头整体桩基结构的弯矩样本数据为 基础,建立在役高桩码头结构可靠度评估体系,得到 整体桩基结构抗弯性能的可靠度指标。当服役基准 期*T*为50 a时,可靠度指标为3.854,满足目标可靠 度指标的要求。

4)本研究仅考虑了堆货荷载引发的结构响应, 未考虑其他荷载作用以及多种荷载的联合作用。本 研究仅采用弯矩监测数据对在役高桩码头的桩基结 构进行可靠性分析,未采用其他监测数据。

参考文献

- [1] 王禹迟,王元战,龙俞辰,等.梁板式高桩码头结构整体可靠度计算方法[J].海洋工程,2015(1):58-65.
 WANG Yuchi, WANG Yuanzhan, LONG Yuchen, et al. Calculation method of structure system reliability of beam-slab piled wharf [J]. The Ocean Engineering, 2015(1):58-65.(in Chinese)
- [2] 刘震宇,韩时琳.基于ANSYS的高桩框架码头可靠 度分析[J].中国水运,2017,17(3):156-159.
 LIU Zhenyu, HAN Shilin. Reliability analysis of highpile frame wharf based on ANSYS [J]. China Water Transport, 2017, 17(3): 156-159.(in Chinese)
- [3] 王浩天,董胜.水平荷载作用下高桩码头整体可靠度研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2021,51(8): 65-71.

WANG Haotian, DONG Sheng. Study on reliability of high-pile wharf subjected to horizontal loads[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2021, 51(8): 65-71. (in Chinese)

- [4] 李瑞刚,朱明友.高桩码头应变监测与结果分析[J]. 水运工程,2021(10):236-240.
 LI Ruigang, ZHU Mingyou. Strain monitoring and results analysis of high-piled wharf[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(10):236-240.(in Chinese)
- [5] 葛浩,黄坤耀,朱鹏字.高桩码头在船舶撞击力作用下的应变监测研究[J].水运工程,2015(1):63-69.
 GE Hao, HUANG Kunyao, ZHU Pengyu. Strain monitoring of pile-supported wharf under action of ship collision[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(1):63-69. (in Chinese)
- [6] PISARENKO V F, SORNETTE D. Characterization of the frequency of extreme events by the generalized pareto distribution [DB/OL]. (2000-11-09) [2023-01-10]. https://arxiv.org/abs/cond-mat/0011168.
- [7] XIANG X, YONLIN X, YUAN R, et al. Site-specific extreme load estimation of a long-span cable-stayed

bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(4): 05021001.

- [8] DENG Y, LI A Q, CHEN S R, et al. Serviceability assessment for long-span suspension bridge based on deflection measurements [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(11): 2254.
- [9] BALKEMA A A, HAAN L D. Residual life time at great age[J]. The Annals of Probability, 1974, 2(5): 792-804.
- [10] PICKANDS III J. Statistical inference using extreme order statistics[J]. The Annals of Statistics, 1975, 3(1): 119-131.
- [11] ZHOU G D, YI T H, CHEN B, et al. A generalized pareto distribution-based extreme value model of thermal gradients in a long-span bridge combining parameter updating [J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(2): 202-213.
- [12] 史道济.实用极值统计方法[M].天津:天津科学技术 出版社,2006:65-68.
- [13] 赵旭.广义 Pareto 分布的统计推断[D].北京:北京工业 大学,2012.
- [14] 阳霞.基于应变极值估计的桥梁车辆荷载与温度效应 分析[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [15] 国家市场监督管理总局.港口工程结构可靠性设计统 一标准[S].北京:中国计划出版社,2010.
- [16] 陈水生,赵辉,李锦华,等.基于广义 Pareto 分布的桥梁 车致荷载效应极值估计[J].铁道工程学报,2022,39(3): 69-74.

CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, LI Jinhua, et al. Extreme value estimation of vehicle-induced load effect of bridge based on generalized Pareto distribution[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(3): 69-74. (in Chinese)

- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.JGJ/T 406-2017 预应力混凝土管桩技术标准[S].北京:中国建筑工业 出版社,2017.
- [18] 吴迪.基于马尔可夫链蒙特卡洛法的天然气管道腐蚀 可靠性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [19] 武清玺.结构可靠度理论、方法及应用[M].北京:科学 出版社,2014:122-123.



第一作者简介:张鹏,男,1984年4月 生,博士、副教授。主要研究方向为结 构健康监测。

E-mail: peng.zhang47@dlmu.edu.cn

通信作者简介:崔春义,男,1978年5月 生,博士、教授。主要研究方向为桩承 结构系统。

E-mail: cuichunyi@dlmu.edu.cn