

港区堆场服役期不均匀沉降的量化 评估方法研究及应用验证

王广禄, 王泽仁*, 刘永辉
(天津水运工程研究院有限公司, 天津 300456)

摘要: 港区堆场作为货物存储与转运的核心枢纽, 其服役状态直接关联港口运营效率。在 JTS 310—2025《港口基础设施维护技术规范》中关于堆场检测的要求以定性描述为主, 缺乏量化指标, 且判定标准主观性较强。研究以堆场不均匀沉降量指标为例, 运用广义 Pareto 分布(GPD)方法进行量化评估分析。以天津港某在役堆场为例, 验证了该模型在量化评估堆场平整度及技术状态方面的适用性与准确性, 为港口基础设施的科学维护提供了理论依据。

关键词: 港区堆场; 平整度; 检测评估; 不均匀沉降; 广义 Pareto 分布; 极值概率

中图分类号: U6; U652.6; TU433

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2026)08-0019-06

doi: 10.7640/zggwjs202608004

Quantitative evaluation method for differential settlement of port yard during service period and its application verification

Wang Guanglu, Wang Zeren*, Liu Yonghui
(Tianjin Water Transport Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: As the core hub for cargo storage and transshipment, the service status of port yards is directly related to port operation efficiency. Addressing the problems in the JTS 310—2025 *Technical Code for Maintenance of Port Infrastructure* regarding yard inspection, such as being dominated by qualitative descriptions, lacking quantitative indicators, and having highly subjective judgment criteria, this study proposes a quantitative evaluation method for differential settlement of port yards based on the Generalized Pareto Distribution(GPD). Taking an in-service yard in Tianjin Port as an example, the applicability and accuracy of the model in quantitatively evaluating yard flatness and technical status are verified, providing a theoretical basis for the scientific maintenance of port infrastructure.

Key words: port yard; flatness; differential settlement; inspection and evaluation; differential settlement; Generalized Pareto Distribution (GPD); extreme value probability

0 引言

港区堆场作为港口货物存储、转运的核心基础设施, 其结构安全性、使用性与耐久性直接关系到港口运营效率和供应链稳定。随着港口吞吐量的持续增长、货物堆存强度的提升以及服役年限的延长, 堆场面临着面层破损、不均匀沉降、地基承载力衰减等多重问题, 长期以来形成的

“重建设、轻维护”发展模式, 进一步放大了此类安全风险。当前, 我国港区堆场的维护管理工作, 主要遵循 JTS 310—2025《港口基础设施维护技术规范》的相关要求^[1]。但该规范仅明确了日常检查的基本要求, 在检测指标参数量化方面缺乏具体方法, 导致实际检测评估工作主观为主, 难以精准反映堆场真实技术状态。而 JTS 257—2008《水

收稿日期: 2025-12-24 修回日期: 2026-01-24

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (TKS20240801); 天津水运工程研究院有限公司科研创新基金项目 (SJIY202508)

作者简介: 王广禄 (1982—), 男, 辽宁抚顺人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为勘察测绘。

*通讯作者: 王泽仁, E-mail: 982855219@qq.com

运工程质量检验标准》虽对堆场平整度等指标有明确的量化验收要求,但主要针对新建工程竣工验收阶段^[2]。

在结构可靠性评估领域,概率统计模型已成为解决量化难题的重要方法。广义帕累托分布(Generalized Pareto Distribution, GPD)作为极值理论体系中的核心分析工具,凭借对数据尾部特征的出色拟合性能,已被广泛应用于桥梁健康监测、地质灾害预警及码头结构可靠度分析中,相关学者利用 GPD 模型结合长期监测数据,成功实现了大跨度桥梁荷载效应及高桩码头桩基弯矩极值的精准估算^[3-7]。借鉴上述经验,本研究将 GPD 模型引入堆场沉降评估中,旨在通过建立基于实测数据的量化指标体系,填补堆场平整度量化评估的方法空白。GPD 模型的核心优势在于能够依托理论参数对各类分布的低密度尾部区域开展针对性拟合建模,既可以聚焦数据极值特征,又能实现对超阈值样本的精细化分析。其尾部分布形态与形状参数 ξ (无量纲)密切相关:当 $\xi < 0$ 时, GPD 呈现薄尾分布特征,尾部概率衰减较快;当 $\xi > 0$ 时,呈现厚尾分布特性,极端值出现概率更高;当 $\xi = 0$ 时,尾部概率呈指数级衰减^[8-10]。

本研究将 GPD 模型引入堆场不均匀沉降评估中,构建适配堆场不均匀沉降的量化指标体系,明确数据采集与处理方法;确定 GPD 模型阈值的物理意义及科学选取方法,建立风险与工程表现的关联关系。通过工程实例验证方法的适用性与准确性,为堆场维护决策提供量化依据。

1 量化评估方法研究

1.1 量化评估思路

现行行业标准如《港口基础设施维护技术规范》在港区定期检查中,虽然纳入了沉降位移观测项目,但其将设施状态仅划分为“好、较好、一般、差”4个等级,评判标准主要依赖主观经验。其中,对沉降描述采用了“基本无沉降”、“无明显沉降”、“有明显沉降,不影响整体稳定性”及“沉降严重,影响整体稳定性”等定性表述^[1],难以实现精确的量化分级。

工程实践表明,不均匀沉降是衡量堆场技术状态的关键要素。然而,由于许多老旧堆场缺乏原始设计图纸与竣工验收数据,直接利用现有地形反演绝对沉降量极具挑战性。鉴于堆场平整度客观上映射了不均匀沉降的程度,建立一套基于

平整度的量化评价指标成为解决这一难题的有效途径。

本研究提出的指标采集方案采用网格化离散处理,即将堆场划分为特定尺寸的单元网格,提取每个网格内的高程极差(最大值与最小值之差)作为基础指标,从而构建全场指标序列。随后,引入广义帕累托分布(GPD)模型对该序列进行分析,以实现技术状态的量化评估。

1.2 测量方法与数据获取

本研究采用千寻定位系统对堆场主要区域进行高程测量,该系统可实现厘米级高精度定位,能够满足堆场沉降量检测的精度要求。测量范围覆盖堆场全部作业区域,测量点按照均匀布点原则布设,同时要保证堆场的主要荷载区域有观测点位,数据能够完整反映堆场的高程分布特征。

测量获得的数据为堆场各测点的高程值,数据属性包括测点平面坐标(X, Y)和对应的高程值 H 。

1.3 数据集构建与预处理

1) 网格化离散处理

将堆场划分为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的正方形单元网格,该网格尺寸综合考虑堆场作业设备的作业半径和沉降变形的影响范围来确定,既能保证数据的代表性,又能降低计算复杂度。

2) 指标提取

对每个网格内的所有测点高程值进行统计,提取网格高程极差作为基础指标,计算公式为:

$$R_i = H_{i,\max} - H_{i,\min} \quad (1)$$

式中: R_i 为第 i 个网格的高程极差, m ; $H_{i,\max}$ 为第 i 个网格内的最大高程值, m ; $H_{i,\min}$ 为第 i 个网格内的最小高程值, m 。

剔除无测点的空网格数据,最终形成由所有有效网格高程极差组成的数据集 $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$,其中 n 为有效网格数量。

1.4 基于 GPD 的极值概率模型构建

1.4.1 超阈值样本分布函数

设网格高程极差数据集 $\{X_i\}$ 为独立同分布的样本序列,服从统一分布函数 $F(x)$ 。定义样本阈值为 μ ,其物理意义为堆场不均匀沉降的临界控制值,超过该值的样本即为需要重点关注的沉降异常样本。超阈值样本的分布函数 $F_u(x)$ 为^[11]:

$$F_u(x) = \frac{F(x) - F(\mu)}{1 - F(\mu)} \quad x > \mu \quad (2)$$

式中: $F_u(x)$ 为超阈值样本的分布函数值; $F(x)$ 为样本序列的分布函数; $F(\mu)$ 为阈值 μ 对应的分布函数值; μ 为样本阈值, m。

1.4.2 GPD 模型参数定义与公式

通过文献调研可知, 对于广义帕累托分布 (GPD), 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 $g(x; \mu, \sigma, \xi)$ 分别如式 (3)、式 (4) 所示^[12-16]:

$$G(x; \mu, \sigma, \xi) = 1 - (1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}} \quad x \geq \mu \quad (3)$$

$$g(x; \mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} (1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi} - 1} \quad x \geq \mu \quad (4)$$

式中: μ 为样本阈值也即超阈值样本的划分阈值, 作为函数的位置参数, 对应堆场不均匀沉降的临界值, m; σ 为尺度参数, $\sigma > 0$, m, 反映超阈值样本的离散程度, σ 越大表示沉降异常程度的差异越显著; ξ 为形状参数, $\xi \in$ 非零实数集, 无量纲, 决定尾部分布特征 ($\xi < 0$ 为薄尾分布, 极端沉降值概率低; $\xi > 0$ 为厚尾分布, 极端沉降值概率高); 约束条件 $(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}) > 0$, 确保分布函数的有效性。

1.4.3 阈值选取方法

阈值 μ 的选取直接影响模型拟合效果, 本研究采用超阈值均值图法和最小均方误差法 (MMSE) 相结合的方式确定最优阈值, 并通过 Q-Q 图验证拟合效果。

1.4.4 基于滤过泊松过程的沉降差极值概率模型

考虑到堆场荷载分布具有独立随机性, 沉降差异亦呈现相应的随机特征, 基于滤过泊松过程 (Filtered Poisson Process) 的随机过程理论, 可推导出 N 个网格内由堆载效应诱发的沉降差极值概率分布函数为:

$$F_M(x) = \begin{cases} \exp[-\lambda N(1 - F(x))] & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_M(x)$ 为沉降差极值概率分布函数值; N 为堆场有效网格数量; λ 为泊松过程强度, 表示序列内超阈值的数量。

将式 (3) 代入式 (5), 则简化为:

$$F_M(x) = \exp[-\lambda N(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}}] \quad (6)$$

1.5 判定准则与处理建议

本研究以 JTS 168—2017《港口道路与堆场设计规范》中地面坡度要求为依据, 确定判定准则: 堆场地面坡度宜采用 0.3%~1%, 取 1% 作为控制

标准^[17]。对于 20 m×20 m 的网格, 允许的最大高程极差 (即允许最大沉降差) 为 0.2 m。根据模型计算得到的沉降差超过允许值的概率, 建立风险等级与工程处理措施的关联关系。

1) 概率 > 90%: 高风险, 堆场平整度严重不足, 需立即对局部区域开展注浆加固或面层翻修;

2) 50% ≤ 概率 ≤ 90%: 中风险, 需加强监测频率, 制定预防性维护计划;

3) 概率 < 50%: 低风险, 维持常规巡检即可。

2 应用验证

2.1 工程概况

选取天津港某在役堆场作为验证对象, 堆场分为空箱区、装箱区、PTI 区和修箱区, 其中空箱区最高堆箱 7 层, 装箱区堆箱 1 层, 据调查资料显示堆场早期有重箱存放历史。采用千寻系统对堆场主要部位进行测量。通过测量数据分析可知堆场面积约 48 000 m², 堆场高程值介于 5.63~6.17 m, 高程平均值为 5.95 m, 通过高程测量平面图可知, 堆场地形呈西南低东北高的态势, 见图 1。

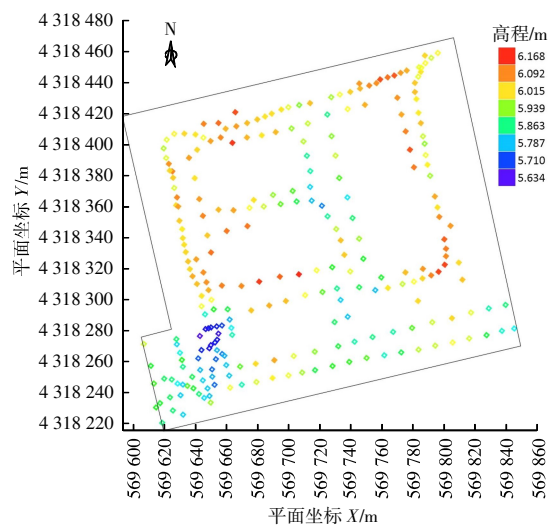


图 1 堆场平面高程散点图

Fig. 1 Scatter plot of planar elevation of port yard

2.2 数据处理与阈值确定

根据上述评估指标设计, 本案例采用 20 m×20 m 网格划分高程数据, 并整理每个网格内最大高程差, 去掉空值共有 266 个数据, 可以通过 vba 编程建立数据集。

采用超阈值均值图法, 当 μ 取某个值时, 对应的平均超出量函数值近似沿某一直线上下小幅波动, 此时表明超阈值样本已满足 GPD 拟合的前

提假设, 本案例计算 $\mu=0.18$ m(见图 2); 采用最小均方误差法, 通过计算不同次序统计量对应形状参数估计的偏差平方与方差之和得到均方误差, 选取均方误差最小时对应的样本点作为最优阈值, 本案例计算 $\mu=0.04$ m(见图 3)。

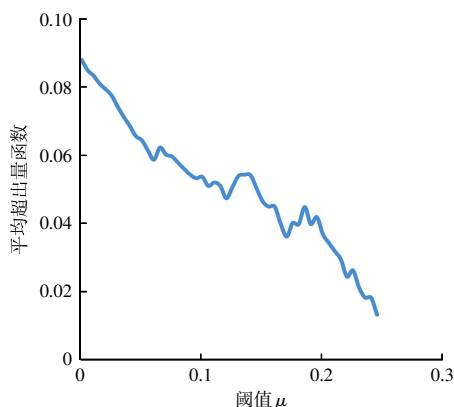


图 2 超阈值均值图

Fig. 2 Mean value plot of exceedance threshold

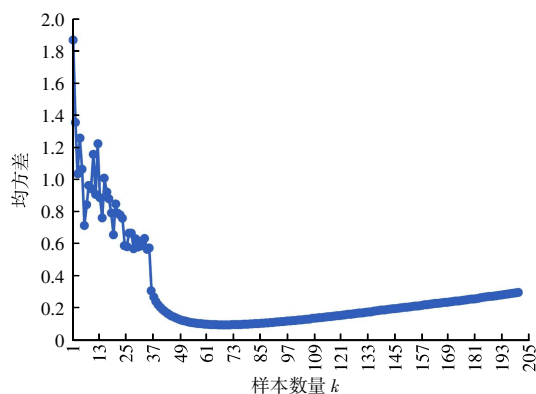


图 3 最小均方误差图

Fig. 3 Minimum mean square error plot

2.3 GPD 模型参数估计

采用极大似然估计法对超阈值样本的形状参数 ξ 和尺度参数 σ 进行估计, 该方法具有估计精度高、计算流程简洁的特点。同时, 采用矩估计法进行对比验证, 参数估计结果见表 1。

表 1 不同阈值计算的 GPD 参数

Table 1 GPD parameters calculated with different thresholds

超阈值均值图法		最小均方误差法	
ξ	σ	ξ	σ
-1.175 3	0.550 0	-0.242 0	0.146 7

采用广义 Pareto 分布的 Q-Q 图来判断参数选取是否合理, 判断过程通过 matlab 函数实现, μ 取 0.04 时偏离度较小, 本次分析取用此阈值, 见图 4。

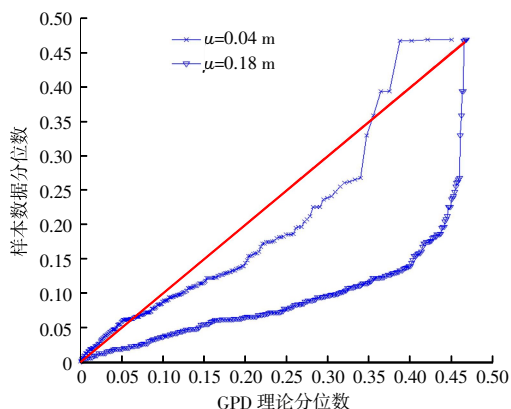


图 4 样本数据的 GPD 分布 Q-Q 图

Fig. 4 GPD distribution Q-Q plot of sample data

2.4 极值概率分析与工程状态判定

确定 GPD 模型参数后, 结合滤过泊松过程确定参数 λ 和 N : 当 $\mu=0.04$ m 时, 超阈值样本数量为 212 个, 故取 $\lambda=212$; 堆场长宽方向上网格数最多为 10 个, 故取 $N=10$ 。

根据式(6)计算沉降差极值的累计分布函数和概率密度函数, 结果见图 5。结合判定准则, 该堆场允许最大沉降差为 0.2 m, 模型计算结果表明, 沉降差超过 0.2 m 的概率接近 99%, 极值外推显示最大可能沉降差达 0.492 m。

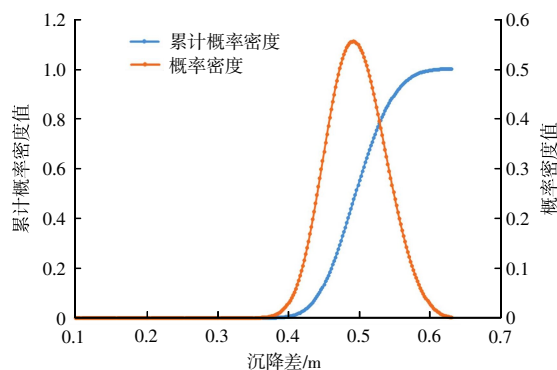


图 5 极值概率模型的累计分布概率与概率密度图

Fig. 5 The cumulative distribution probability and probability density plot of the extreme value probability model

结果表明, 该堆场不均匀沉降程度严重, 已显著影响使用功能, 属于高风险等级, 建议立即对局部沉降严重区域开展注浆加固或面层翻修。

2.5 钻探成果分析

为从机理层面揭示堆场不均匀沉降的内在原因, 进一步佐证基于 GPD 模型量化评估方法的可靠性, 本项目在堆场东北高地势区域和西南低地势区域分别选取 1 个典型孔位开展钻探取土与土

工试验。

室内土工试验与地基沉降密切相关的核心指标包括物理和力学性质指标, 其中物理性质指标: 天然含水率 w 、天然密度 ρ 、孔隙比 e ; 力学性质指标: 压缩模量 E_s 、固结系数 C_v 。2 个孔位的土层分布及关键土工参数测试结果见表 2。

表 2 典型孔位土工参数对比表

Table 2 Comparison table of geotechnical parameters for typical borehole positions

孔位位置	典型土层	天然含水率 $w/\%$	孔隙比 e	压缩模量 E_s/MPa	固结系数 $C_v/(10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$
东北区域	粉质黏土	22.5	0.78	12.6	4.5
西南区域	淤泥质粉质黏土	39.8	1.21	5.2	1.8

由表 2 可知, 2 个区域的土体性质存在显著差异: 西南区域淤泥质粉质黏土天然含水率高、孔隙比大、压缩模量低, 土体抗压缩变形能力弱, 在长期堆载作用下易产生累积沉降; 东北区域粉质黏土性能更优, 沉降变形潜力小, 这种土体性质差异直接导致堆场地形西南低、东北高的格局。

钻探成果通过土工参数从机理上解释了不均匀沉降的发生本质, 明确了土体压缩性差异是区域整体沉降概率分布的核心控制因素, 验证了不均匀沉降的内在成因, 为 GPD 模型的整体概率推断结果提供了内在机理依据。GPD 评估方法不依赖复杂的检测方法, 通过数据分析即可推断较为准确的检测成果, 展现出便捷高效、经济性好、量化准确的优势, 为港区维护决策提供了便捷可靠的依据。

3 结语

本研究围绕在役港区堆场不均匀沉降问题, 结合 GPD 模型量化分析与钻探土工试验, 从现象推断与机理溯源开展研究, 得出以下结论:

1) GPD 模型可有效支撑港区堆场不均匀沉降的区域整体概率推断。基于网格高程极差构建数据集, 结合超阈值均值图法与最小均方误差法确定最优阈值(0.04 m), 所建立的极值概率模型能够反映区域不均匀沉降的整体概率分布特征, 可为堆场维护决策提供量化参考。

2) 土体物理力学性质差异是该堆场不均匀沉降的核心内在因素。堆场西南区域淤泥质粉质黏土与东北区域粉质黏土在含水率、孔隙比及压缩模量上的显著差异, 导致两地沉降变形程度不同,

且该机理与 GPD 模型推断的区域不均匀沉降概率分布特征相契合。

3) 钻探土工试验为沉降量化推断结果提供了机理支撑, 使不均匀沉降评估从概率推断延伸至成因解析, 完善了评估逻辑链。本次研究选取的典型孔位可反映堆场关键区域的土体特性, 但受限于孔位数量, 暂无法完全覆盖全堆场土体空间分布差异。

深入研究可扩大钻探孔位布设范围, 结合地质雷达等技术补充土体空间分布数据, 进一步提升沉降概率推断的空间代表性; 同时引入长期沉降监测数据, 分析沉降时间演化规律, 为在役堆场动态维护与全寿命周期管理提供更全面的支撑。

参考文献:

- [1] JTS 310—2025 港口基础设施维护技术规范[S].
JTS 310—2025 Technical code for maintenance of port infrastructure[S].
- [2] JTS 257—2008 水运工程质量检验标准[S].
JTS 257—2008 Standard for quality inspection of port and waterway engineering construction[S].
- [3] 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 S S, Zhao H, Li J H, 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.
- [4] 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 H T, Dong S. Study on reliability of high-pile wharf subjected to horizontal loads[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(8): 65–71.
- [5] 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, 33(1): 58–65.
Wang Y C, Wang Y Z, Long Y C, et al. Calculation method of structure system reliability of beam-slab piled wharf[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(1): 58–65.
- [6] 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 R G, Zhu M Y. Strain monitoring and results analysis of high-piled wharf[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(10): 236–240.
- [7] 高欣, 王磊. 在役桥梁车辆荷载效应极值概率模型建模方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(8): 995–999.
Gao X, Wang L. Modeling method for extreme traffic-load effect probabilistic model of an existing bridge[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(8): 995–999.
- [8] 赵旭. 广义 Pareto 分布的统计推断[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
Zhao X. Statistical inference of the generalized Pareto distribution

- [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [9] 武清玺. 结构可靠度理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Wu Q X. Structural reliability theory, methods and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [10] 史道济. 实用极值统计方法[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2006.
- Shi D J. Practical extreme value statistical methods[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2006.
- [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] James Pickands III. Statistical inference using extreme order statistics[J]. The Annals of Statistics, 1975, 3: 119–131.
- [13] Balkema A A, De Haan L. Residual life time at great age[J]. The Annals of Probability, 1974, 2(5): 792–804.
- [14] De Zea Bermudez P, Kotz S. Parameter estimation of the generalized Pareto distribution—Part I[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2010, 140(6): 1353–1373.
- [15] Liu J, Shi D J, Wu X R. Estimation of poisson-generalized pareto compound extreme value distribution by probability-weighted moments and empirical analysis[J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(1): 50–54.
- [16] Hüsler J, Li D, Raschke M. Estimation for the generalized Pareto distribution using maximum likelihood and goodness of fit[J]. Communications in Statistics: Theory and Methods, 2011, 40(14): 2500–2510.
- [17] JTS 168—2017 港口道路与堆场设计规范[S].
- JTS 168—2017 Design code of road and storage yard for port area [S].

~~~~~  
(上接第 12 页)

- [3] 康啊真, 殷瑞涛, 祝兵, 等. 基于 LES 的跨海桥梁施工期围堰波流力数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 537–544, 589.
- Kang A Z, Yin R T, Zhu B, et al. Numerical simulation of wave-current forces acting on cofferdam for sea-crossing bridge based on large eddy simulation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 537–544, 589.
- [4] 韩嘉怡, 卢宝洁, 祝兵. 规则波浪作用下对称八边形沉井受力数值模拟研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(1): 94–100.
- Han J Y, Lu B J, Zhu B. Numerical study of regular wave forces on symmetrical octagonal caisson[J]. Bridge Construction, 2023, 53(1): 94–100.
- [5] 杨吉新, 孙进. 波浪作用下深水沉井的动力响应分析[J]. 工程与建设, 2024, 38(5): 1099–1103.
- Yang J X, Sun J. Analysis of dynamic response of deepwater caisson under wave action[J]. Engineering Construction, 2024, 38(5): 1099–1103.
- [6] 陈明林, 黄博, 薛泽辰, 等. 复杂海况下跨海桥梁钢沉井基础下放过程及影响优化[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(2): 513–523.
- Chen M L, Huang B, Xue Z C, et al. Steel caisson lowering process for cross-sea bridges under complex marine conditions and influence optimization[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(2): 513–523.
- [7] 伍敏. 复杂海洋环境大型钢沉井定位下放波流荷载效应研究[J]. 桥梁建设, 2025, 55(1): 103–109.
- Wu M. Numerical analysis of wave-current loads on large steel caisson in complex marine environments during sinking process[J]. Bridge Construction, 2025, 55(1): 103–109.
- [8] 康啊真, 张东明, 闫宝磊, 等. 波浪作用下分体式沉井定位体系动力响应特征及耦合共振机制[J]. 土木工程学报, 2026, 59(2): 86–96.
- Kang A Z, Zhang D M, Yan B L, et al. Dynamic response characteristics and coupling resonance mechanism of split type caissons positioning system under wave action[J]. China Civil Engineering Journal, 2026, 59(2): 86–96.
- [9] Han J Y, Zhu B, Lu B J, et al. The influence of incident angles and length-diameter ratios on the round-ended cylinder under regular wave action[J]. Ocean Engineering, 2021, 240: 109980.
- [10] Wei C X, Zhou D C, Ou J P. Calculation method of wave forces on large round-ended caisson foundation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Science), 2019, 24(2): 184–189.
- [11] 周远洲, 遆子龙, 张明金, 等. 跨海桥梁大尺度基础波浪荷载计算方法对比研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 387–394, 404.
- Zhou Y Z, Ti Z L, Zhang M J, et al. A comparative study on wave load calculation methods regarding to large-scale foundation for sea-crossing bridge[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 387–394, 404.