

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

全直桩高桩码头结构的地震易损性分析

吴志浩¹, 崔春义¹, 冷淇程¹, 许民泽¹, 苏健²

1) 大连海事大学土木工程系, 辽宁大连 116026; 2) 大连海洋大学海洋与土木工程学院, 辽宁大连 116023

摘要: 为研究全直桩高桩码头的地震易损性问题, 以某全直桩高桩码头为工程背景, 考虑场地和地震动特性的不确定性影响, 借助岩土有限元软件 Midas GTS NX, 建立全直桩高桩码头-地基土相互作用非线性数值模型. 将地基土内最大桩基应变作为破坏损伤指标, 基于增量动力分析法对所选地震动进行调幅, 并逐一进行数值计算, 得到全直桩高桩码头的地震易损性曲线, 分析了全直桩高桩码头在不同强度地震动作用下不同破坏状态的超越概率. 研究表明, 当地面峰值加速度 $< 0.80g$ 时, 全直桩高桩码头结构的破坏状态主要为轻度损伤以及中度损伤; 当地面峰值加速度 $\geq 0.80g$ 时, 发生严重损伤的概率基本超过了 50%, 码头结构丧失运营能力. 以地基土内桩基损伤为指标的易损性分析, 描述了地震对全直桩高桩码头结构造成的影响, 可为高桩码头的抗震设计和防灾预测提供参考.

关键词: 海洋工程与技术; 全直桩高桩码头; 增量动力分析; 桩基损伤; 地震易损性; 超越概率
中图分类号: U655.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2022.04432

Seismic vulnerability analysis of vertical pile-supported wharf structure

WU Zhihao¹, CUI Chunyi¹, LENG Qicheng¹, XU Minze¹, and SU Jian²

1) Department of Civil Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning Province, P. R. China

2) College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning Province, P. R. China

Abstract: In order to study the seismic vulnerability of pile-supported wharf structure, taking a vertical pile-supported wharf as the research object and considering the influence of the site, seismic spectrum characteristics and the uncertainty of ground motion intensity, we establish a dynamic nonlinear numerical model of structure-foundation soil coupling of vertical pile-supported wharf by using the geotechnical finite element software of Midas GTS NX. Selecting the maximum strain of pile foundation in soil as the damage index, we obtain the seismic vulnerability curves and the corresponding damage state probability based on the the incremental dynamic analysis method. The analysis results show that when peak ground acceleration is less than $0.80g$, the wharf structure is mainly in mild damage state or moderate damage state, otherwise the probability of serious damage basically exceeds 50% and the structure will lose operational capacity. Based on the vulnerability analysis of pile foundation damage in foundation soil, the influence of earthquake on the vertical pile-supported wharf is described from macroscopic and quantitative point of view, which can provide reference for seismic design and disaster prevention prediction of vertical pile-supported wharf.

Received: 2021-05-31; **Revised:** 2021-10-15; **Accepted:** 2022-03-01; **Online (CNKI):** 2022-06-26

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51578100); United Navigation Foundation of Liaoning Province (2020-HYLH-48); Special Funds for "Double First-Class" Construction (SSCXXM017); Key Discipline Major Project of Dalian Science and Technology Innovation Fund (2020JJ25CY016)

Corresponding author: Professor CUI Chunyi. E-mail: cuichunyi@dlnu.edu.cn

Citation: WU Zhihao, CUI Chunyi, LENG Qicheng, et al. Seismic vulnerability analysis of vertical pile-supported wharf structure [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(4): 432-439. (in Chinese)



Key words: ocean engineering and technology; vertical pile-supported wharf; incremental dynamic analysis; pile foundation damage; seismic vulnerability; exceedance probability

港口工程是中国“一带一路”战略的重要支撑工程, 不同形式的码头结构安全都获得了深入研究. 高桩码头因具有用料少、挖方小、波浪反射小和泊稳条件好等结构特征, 在港口工程建设中得到广泛应用^[1].

地震荷载是码头结构设计时需要考虑的主要破坏荷载之一, 许多学者对地震作用下高桩码头桩基动力响应进行分析研究. WANG等^[2]采用基于塑性铰的全直桩高桩码头破坏准则, 提出了全直桩高桩码头水平极限承载力的简化计算方法, 并与有限元法进行了比较, 验证了简化方法的合理性. LI等^[3]采用有限元方法对两次地震中码头桩基的断裂机理进行了分析, 通过分析隔震前后桩体的动力响应, 发现隔震支座可以有效地吸收地震能量, 保证了码头结构在强震下的安全. ZHANG等^[4]建立了钢混高桩码头结构动力分析三维有限元模型, 从结构模态分析和瞬态分析的角度对高桩码头的刚度进行了研究.

结构地震易损性是结构在地震作用下发生不同破坏状态的概率^[5]. KO等^[6]以台湾花湾港板桩码头为原型建立了二维有限元模型, 以桩顶最大残余变形作为损伤指标, 划分了相应的损伤等级, 开展了结构的易损性分析. SHAFIEZADEH^[7]以峰值加速度作为地震强度参数, 对美国某液化场地的高桩码头进行了易损性分析, 给出了不同构件的易损性曲线. CHIOU等^[8]以峰值地面加速度为地震动强度指标, 选取码头上部结构的横向位移定义损伤级别, 对台湾某典型高桩码头进行易损性分析. YANG等^[9]基于OpenSees开源程序平台对美国西部某高桩码头进行非线性动力时程分析, 构建了不同破坏状态的易损性曲线. THOMOPOULOS等^[10]通过基于性能的非线性动力分析获得高桩码头的易损性曲线, 探究了分析次数对易损性精度的影响. HEIDARY等^[11]基于FLAC软件, 采用增量动力分析法获得了含叉桩码头体系的地震易损性曲线. 冯云芬等^[12]通过条带法和云图法, 考虑地震动不确定性, 基于桩身材料应变限值定义码头的破坏状态, 建立了基于位移的易损性分析方法. 徐玉明等^[13-14]考虑锈蚀作用对材料性能的影响, 将甲板位移延性系数和钢管截面曲率延性系数作为结构损伤参数, 进行高桩码头结构的地震易损性分析. 孟畅^[15]基于增量动力分

析法和正态分布假设, 提出了便于实际工程运用的高桩码头地震易损性分析流程.

然而, 地震作用下高桩码头的桩基会产生不同程度的塑性变形, 且桩基的塑性铰区多发生在桩顶和地基土内的桩基部分^[16-17], 针对该问题的全直桩高桩码头易损性研究尚不多见. 本研究选取地基土内桩基的塑性变形程度为损伤指标定义相应的破坏状态, 以增量动力分析法分别对所选地震动进行调幅, 整合数值计算结果, 进行全直桩高桩码头结构地震易损性分析, 并求得不同强度地震动作用下相应的破坏概率, 为高桩码头的抗震设计和防灾预测提供参考.

1 数值模型建立

基于Midas GTS NX有限元程序平台, 以某全直桩高桩码头为原型, 建立高桩码头结构数值计算模型. 设计高桩码头结构模型的长为170 m, 高为40 m. 划分的土体网格横向由两侧3 m至中间码头部分渐变为0.8 m, 纵向由两侧1.6 m至中间码头部分渐变为0.8 m. 模型底部完全固定约束, 左右为自由场边界. 通过Midas析取功能增设桩单元, 以保证桩-土单元间网格节点的连贯性, 有限元模型及结构尺寸如图1, 结构和土体参数如表1.

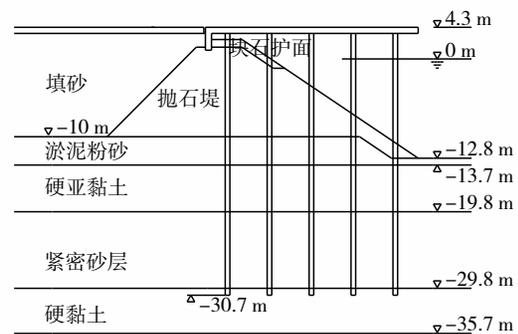


图1 高桩码头结构截面图

Fig. 1 The cross section of pile-supported wharf structure.

土体本构采用Drucker-Prager屈服准则, 该准则的偏平面屈服面为圆形, 比Mohr-Coulomb屈服准则的六边形屈服面具有更优的数值收敛性. 屈服函数为:

$$f(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} - aI_1 - k = 0 \quad (1)$$

表 1 结构与土体主要物理参数

Table 1 Main physical parameters of structure and soil

材 料	标高 / m	弹性模量 / kPa	容重 / (kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力 / kPa	摩擦角 / (°)
混凝土(桩)	—	3.00 × 10 ⁷	24.50	0.15	2 × 10 ³	47
混凝土(承台和路面)	1.3 ~ 4.3	3.45 × 10 ⁷	25.00	0.18	2 × 10 ³	47
块石护面	-1.0 ~ 2.7	1.00 × 10 ⁵	15.20	0.33	7	40
抛石堤	-12.8 ~ 1.7	2.10 × 10 ⁵	20.00	0.30	7	41
填砂	-10.0 ~ 3.5	1.37 × 10 ⁴	13.24	0.33	7	36
淤泥与粉砂	-13.7 ~ -10.0	4.55 × 10 ⁴	15.20	0.35	9	30
硬亚黏土	-19.8 ~ -13.7	2.50 × 10 ⁵	17.65	0.31	25	30
紧密砂	-29.8 ~ -19.8	3.57 × 10 ⁵	19.12	0.32	15	38
硬黏土	-35.7 ~ -29.8	8.72 × 10 ⁵	20.10	0.27	40	31

其中, a 和 k 为系数, 取值与土体材料的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 有关; I_1 为应力张量第 1 不变量; J_2 为应力张量第 2 不变量; I_1 和 J_2 的表达式为

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3)$$

其中, σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第 1 主应力、第 2 主应力和第 3 主应力. Drucker-Prager 弹塑性材料本构模型在 Midas GTS NX 中采用的是外角外接圆准则, 如图 2, 相应的 a 和 k 为

$$a = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (4)$$

$$k = \frac{6c \cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (5)$$

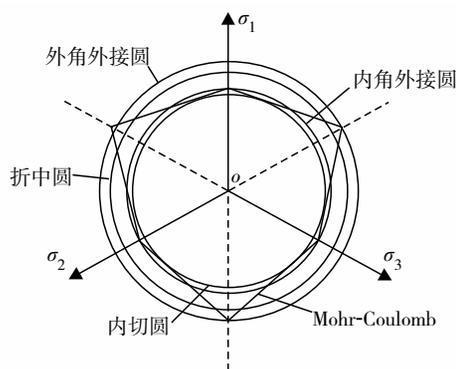


图 2 Drucker-Prager 本构模型

Fig. 2 Drucker-Prager constitutive model.

选取与场地条件相符但时间地点不同的地震动, 可以充分地模拟地震的随机性. 在增量动力分析过程中, 为了使结构地震动响应较为接近实际情况, 应合理选取 10 ~ 20 条地震动^[18]. 因此, 本研究进一步选择了 20 条地震动作为输入.

常见的地震动参数有峰值位移、峰值速度和峰值加速度等, 本研究采用地面峰值加速度 (peak ground acceleration, PGA) 作为地震动强度指标, 将选取的各地震动 PGA 依次调幅为 0.05g、0.10g、0.20g、0.30g、0.40g、0.50g、0.60g、0.70g、0.80g 和 0.90g. 其中, g 为重力加速度.

2 结构性能水准及量化指标的确定

在地震作用下高桩码头的下部结构损毁最为严重, 且主要集中于桩基础上^[1], 采取桩基塑性铰变形对结构的性能水准进行划分, 对码头结构体系损伤分布情况的反应更加接近实际^[13,17]. 本研究选取结构地基土内桩基最大塑性铰应变 (DS) 作为地震需求指标来定量地描述高桩码头结构的地震损伤情况, 如表 2. 其中, ρ_s 为箍筋体积配筋率; ε_{ml} 为桩顶混凝土配筋的峰值应变值; ε 为结构发生的应变.

为了定义结构在地震作用下发生损伤的级别, 应当选用合理的损伤指标. ASCE61-14 中关于高桩码头的抗震性能描述为 3 个地震水平, 形式上与我国“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的设防目标类似^[19]. 具体描述如下.

最小破坏 PL₁: 码头结构损伤轻微, 不影响正常运营, 对码头上人员安全无影响.

可控且可修复破坏 PL₂: 码头结构出现一定程度的破坏, 通过相关的维修后可以继续运营.

可保障生命安全破坏 PL₃: 码头结构出现严重的破坏, 难以维修, 无法继续运营, 但是没有完全损毁, 可允许人员撤离.

根据结构在地震作用下的性能指标值, 对损伤等级进行相应划分. 当 $DS \leq PL_1$ 时, 桩体等结构完

好, 高桩码头体系可正常服务, 结构损伤等级记为基本完好; 当其性能指标值DS在PL₁与PL₂之间时, 桩体出现部分塑性铰区段, 通过修复码头结构体系仍可运营, 结构损伤等级记为轻度损伤; 当DS在PL₂与PL₃之间时, 桩体出现多处塑性铰区段, 部分区段损坏较重, 修复困难, 结构损伤等级记为中度损伤; 当其性能指标值DS超过时PL₃时, 桩体发生严重破坏, 码头结构承重能力丧失无法维持平衡, 变形严重, 甚至坍塌, 结构中度损伤, 结构损伤等级记为严重损伤。

表2 损伤状态划分

Table 2 Damage state classification

破坏等级	材料	桩顶	土内
PL ₁	混凝土	$\varepsilon \leq 0.005$	$\varepsilon \leq 0.005$
	钢筋	$\varepsilon \leq 0.015$	—
PL ₂	混凝土	$\varepsilon \leq 0.005 + 1.1\rho_s \leq 0.025$	$\varepsilon \leq 0.005 + 1.1\rho_s \leq 0.008$
	钢筋	$\varepsilon \leq 0.6\varepsilon_{md} \leq 0.06$	—
PL ₃	混凝土	—	$\varepsilon \leq 0.005 + 1.1\rho_s \leq 0.012$
	钢筋	$\varepsilon \leq 0.8\varepsilon_{md} \leq 0.08$	—

在桩的延性区, 螺旋箍筋的体积配筋率 ρ_s 应同时满足式(6)和式(7), 且 ρ_s 的值不超过0.02.

$$\rho_s = 0.25 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(0.5 + 1.4 \frac{P}{f'_c A_g} \right) \quad (6)$$

$$\rho_s \geq 0.12 \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(0.5 + 1.4 \frac{P}{f'_c A_g} \right) \quad (7)$$

其中, A_g 为桩的横截面积; A_{ch} 为约束核心区面积; f'_c 为混凝土养护28d抗压强度; f_{yh} 为螺旋钢筋名义屈服强度; P 为桩轴向设计载荷. 进一步通过指标限值来划分结构的损伤等级, 如表3.

表3 损伤量化指标

Table 3 Damage quantification index

损伤等级	性能指标	量化限值
基本完好	$\leq PL_1$	$\varepsilon \leq 0.005$
轻微损伤	$PL_1 < DS \leq PL_2$	$0.005 < \varepsilon \leq 0.008$
中度损伤	$PL_2 < DS \leq PL_3$	$0.008 < \varepsilon \leq 0.012$
严重损伤	$DS > PL_3$	$\varepsilon > 0.012$

3 地震概率需求与易损性分析

增量动力分析法的应用步骤为: 按一定比例系数将同一条地震动峰值加速度依次放大成一组不同

强度的地震动, 以动力弹塑性时程分析为基础进行结构非线性时程分析, 得到每次分析的最大地震响应结果; 绘制相应的结构性能参数与地震动强度参数曲线, 分析地震作用下破坏的全过程. 单条增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)曲线可以反映在特定地震动输入下结构动力响应的发展过程, 而多条地震动样本形成的IDA曲线则可以较真实地反映结构的抗震性能, 进而对结构的抗震性能进行评估^[20-21].

本研究以高桩码头结构性能水准划分为基础, 借助Midas GTS NX有限元程序建立全直桩高桩码头-地基土相互耦合体系数值模型, 考虑场地和地震动特性不确定性的影响, 将前文中依次调幅的地震动记录作为输入, 分别进行非线性动力时程分析, 得到全直桩高桩码头的地震动响应数据, 以此来绘制IDA曲线簇, 并进一步构建全直桩高桩码头的易损性曲线.

首先, 将各级地震作用下高桩码头结构地基土内最大桩基应变进行统计, 得到地基土内最大桩基应变的基本分布状况和IDA曲线簇, 如图3. 表4为各地震动强度作用下结构地基土内最大桩基应变的对数均值、对数标准差和变异系数. 图4为各级PGA下结构的概率密度分布曲线.

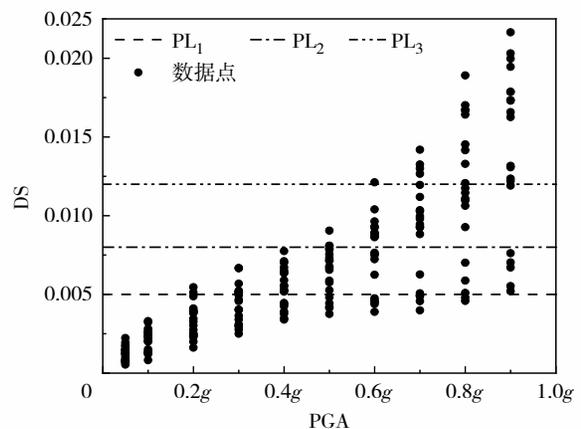


图3 最大桩基应变分布

Fig. 3 Maximum strain distribution of pile.

为了进一步研究全直桩高桩码头地震需求指标(demand index, DI)与地震动强度参数IM之间的关系, 需对以上数据进行回归分析. 根据目前易损性分析研究成果, DI与IM之间满足^[22]:

$$\ln(DI) = A \ln(IM) + B \quad (8)$$

其中, A 和 B 为回归系数.

对本研究中结构地基土内桩基应变的地震响应

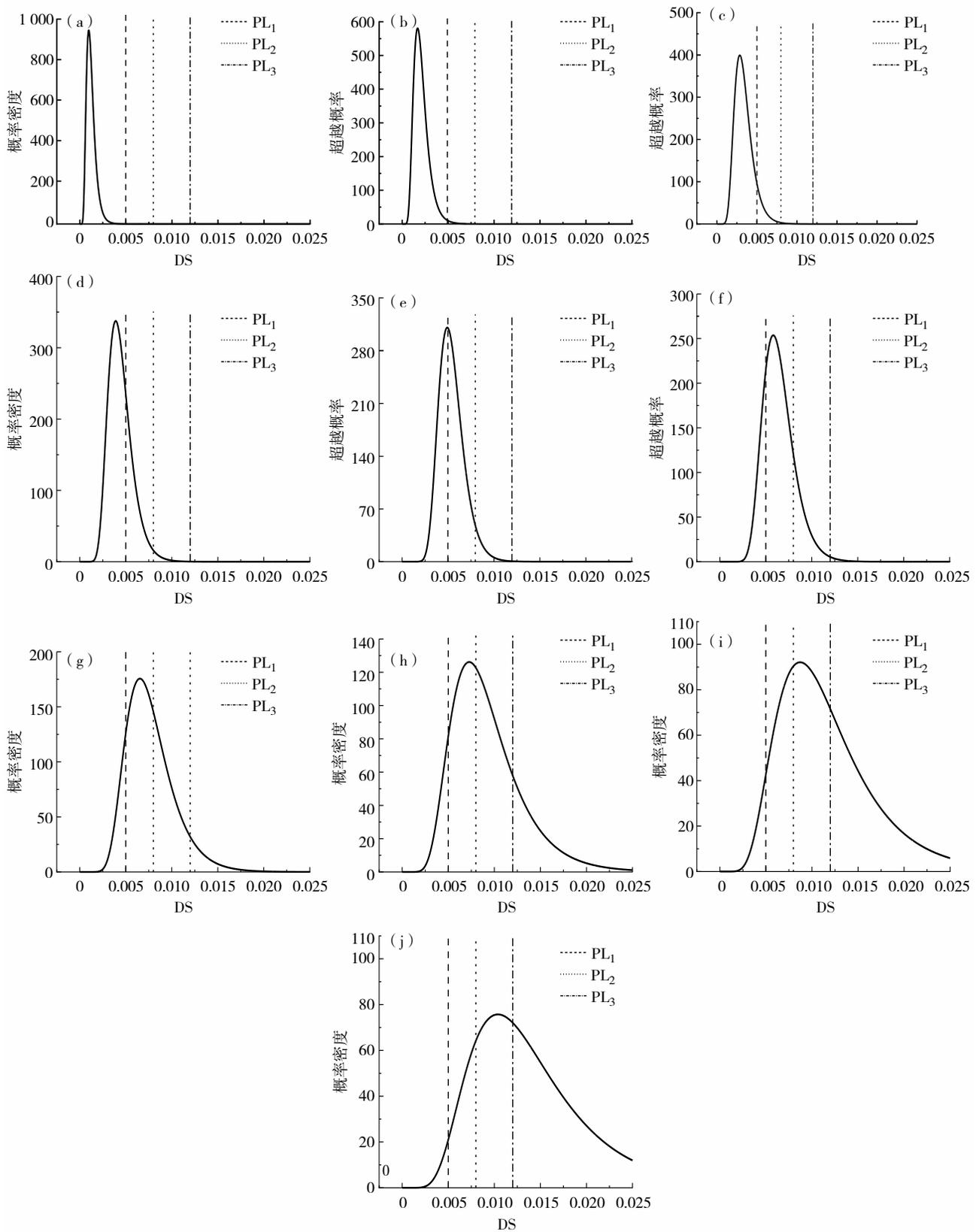


图4 (a) 0.05g、(b) 0.10g、(c) 0.20g、(d) 0.30g、(e) 0.40g、(f) 0.50g、(g) 0.60g、(h) 0.70g、(i) 0.80g 和 (j) 0.90g 条件下最大桩基应变概率密度分布

Fig. 4 Maximum strain probability density distributions of pile with (a) 0.05g, (b) 0.10g, (c) 0.20g, (d) 0.30g, (e) 0.40g, (f) 0.50g, (g) 0.60g, (h) 0.70g, (i) 0.80g, and (j) 0.90g.

表4 地震需求统计
Table 4 Seismic demand statistics

PGA	对数均值	对数标准差	变异系数
0.05g	-6.772 6	0.393 8	0.378 7
0.10g	-6.772 6	0.379 7	0.342 2
0.20g	-5.746 5	0.330 3	0.318 9
0.30g	-5.460 9	0.290 1	0.278 9
0.40g	-5.249 1	0.250 1	0.240 4
0.50g	-5.079 2	0.261 4	0.242 1
0.60g	-4.921 6	0.329 1	0.296 6
0.70g	-4.762 5	0.401 1	0.348 8
0.80g	-4.540 9	0.449 4	0.382 4
0.90g	-4.357 9	0.456 8	0.378 5

数据进行统计分析, 结果如图5. DS与PGA间的回归方程为

$$\ln(DS) = 0.7543 \ln(PGA) - 4.3389 \quad (9)$$

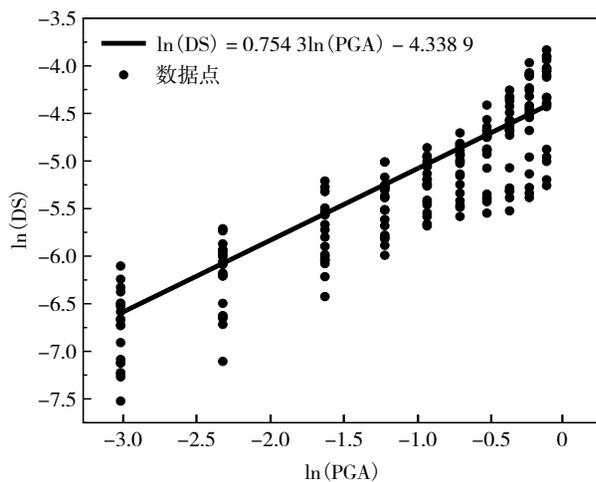


图5 结构最大桩基应变回归分析
Fig. 5 Regression analysis.

结构的地震易损性曲线是以地震动强度参数为横坐标, 以超过特定的损伤等级概率为纵坐标的变化曲线. 基于DI、PL_i以及IM, 超越概率可表示为

$$P_i = P(DI \geq PL_i/IM), \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

结构响应参数和结构损伤指标限值满足对数正态分布关系, 因此全直桩高桩码头的地震易损性可进一步表示为

$$P_i = \Phi \left[\frac{\ln(DI/DC)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (11)$$

其中, Φ 为高斯累积分布函数; DC为全直桩高桩码头不同破坏损伤状态的指标限值; β_c 和 β_d 分别为地震需求与结构承载能力的对数标准差, 当地震动

强度参数选取PGA时, $\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}$ 取值0.5较为合理^[23].

结合全直桩高桩码头结构的量化指标限值、DS与PGA之间回归分析的结果, 通过计算可以得到各地震动强度幅值作用下结构地基土内桩基应变在不同损伤等级状态下的超越概率, 如表5, 以及不同性能水准的全直桩高桩码头结构易损性曲线, 如图6.

表5 超越概率分布
Table 5 Exceeding probability distribution

PGA	PL ₁	PL ₂	PL ₃
0.05g	0.003	0.000	0.000
0.10g	0.048	0.005	0.000
0.20g	0.213	0.041	0.005
0.30g	0.437	0.136	0.028
0.40g	0.563	0.217	0.056
0.50g	0.724	0.364	0.124
0.60g	0.835	0.514	0.219
0.70g	0.905	0.644	0.329
0.80g	0.954	0.771	0.473
0.90g	0.985	0.888	0.658

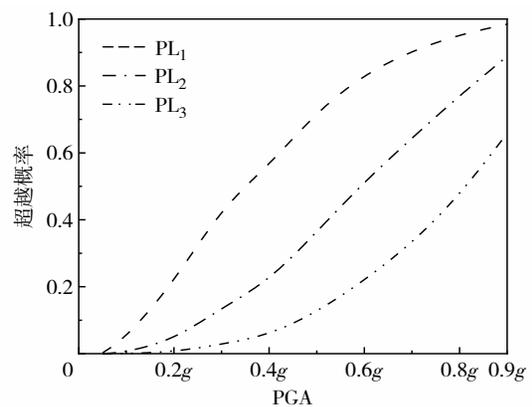


图6 全直桩高桩码头结构地震易损性曲线

Fig. 6 Seismic fragility curves of vertical pile-supported wharf.

由表5和图6可见:

1) 当PGA = 0.05g时, 全直桩高桩码头破坏损伤超越PL₁的概率为0.260%, 超越PL₂的概率为0.009%; 当PGA = 0.10g时, 破坏损伤超越PL₁的概率为4.760%, 超越PL₂的概率为0.450%. 表明在PGA ≤ 0.10g时, 全直桩高桩码头处于基本完好状态, 损伤程度超过轻度损伤的概率基本为0.

2) 当PGA = 0.20g时, 全直桩高桩码头破坏损伤超越PL₁的概率为21.350%, 超越PL₂的概率为4.140%, 超越PL₃的概率为0.550%; 当PGA =

0.30g 时, 破坏损伤超越 PL_1 的概率为 43.700%, 超越 PL_2 的概率为 13.600%, 超越 PL_3 的概率为 2.800%; 当 $PGA = 0.40g$ 时, 破坏损伤超越 PL_1 的概率为 56.260%, 超越 PL_2 的概率为 21.700%, 超越 PL_3 的概率为 5.550%. 表明 PGA 在 $0.20g \sim 0.40g$ 时, 全直桩高桩码头的损伤状态以基本完好和轻度损伤为主。

3) 当 $PGA = 0.50g$ 时, 全直桩高桩码头破坏损伤超越 PL_1 的概率为 72.360%, 超越 PL_2 的概率为 36.450%, 超越 PL_3 的概率为 12.350%; 当 $PGA = 0.60g$ 时, 超越 PL_1 的概率为 83.500%, 超越 PL_2 的概率为 51.370%, 超越 PL_3 的概率为 21.870%; 当 $PGA = 0.70g$ 时, 超越 PL_1 的概率为 90.480%, 超越 PL_2 的概率为 64.410%, 超越 PL_3 的概率为 32.940%. 表明 PGA 在 $0.50g \sim 0.70g$ 时, 全直桩高桩码头的损伤程度在轻度损伤和中度损伤均有较大分布, 并伴随着向严重损伤发展的趋势。

4) 当 $PGA \geq 0.80g$ 时, 全直桩高桩码头发生严重损伤已不可避免, 发生严重损伤的概率基本超过了 50.000%, 码头结构丧失运营能力。

4 结 论

借助岩土有限元软件 Midas GTS NX, 建立全直桩高桩码头—地基土相互作用非线性数值模型, 采取地基土内最大桩基应变作为损伤指标, 通过增量动力分析法对所选地震动进行调幅, 并逐一进行数值计算, 最终整合出全直桩高桩码头的地震易损性曲线, 并求得其在不同幅值地震动作用下相应损伤破坏的超越概率。计算结果与分析表明:

1) 综合基于 IDA 与概率密度的分析方法, 以最大桩基应变为全直桩高桩码头结构损伤指标, 定量反映出地震作用下高桩码头结构不同程度的破坏状态, 从而判断出码头结构的抗震性能以及失效情况。

2) 当 $PGA < 0.80g$ 时, 全直桩高桩码头以发生轻度损伤和中度损伤为主, 当 $PGA \geq 0.80g$ 时, 全直桩高桩码头发生严重损伤已不可避免, 发生严重损伤的概率超过 50%, 这一发展趋势亦从地基土内最大桩基应变的概率密度分布中得到验证。

3) 地震作用下, 高桩码头的下部结构破坏程度较上部结构更为严重, 以地基土内桩基应变为损伤指标进行高桩码头结构地震易损性分析, 从宏观

角度描述了地震强度对全直桩高桩码头结构造成的影响, 可为全直桩高桩码头的抗震设计和防灾预测提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51578100); 辽宁省航运联合基金资助项目 (2020-HYLH-48); “双一流”建设专项资助项目 (SSCXXM017); 大连市科技创新基金重点学科重大资助项目 (2020JJ25CY016)

作者简介: 吴志浩 (1996—), 大连海事大学硕士研究生。研究方向: 结构抗振减振。E-mail: wuzhihao1208@163.com

引 文: 吴志浩, 崔春义, 冷淇程, 等. 全直桩高桩码头结构的地震易损性分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(4): 432-439.

参考文献 / References:

- [1] 高树飞, 贡金鑫, 冯云芬. 国内外高桩码头抗震性能和设计方法研究进展 I: 震害和抗震设计方法[J]. 水利水运工程学报, 2016, 6: 1-8.
GAO Shufei, GONG Jinxin, FENG Yunfen. Advance in research on seismic performance and design methods for pile supported wharves part I: earthquake damage and seismic design methods [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016, 6: 1-8. (in Chinese)
- [2] WANG Y Z, HE L L. Simplified calculation methods for all-vertical-pile-supported wharf in offshore deep water [J]. China Ocean Engineering, 2017, 31(2): 182-191.
- [3] LI Y, SHAN H L, HUANG S. Simulation analysis on seismic damage and isolation measures of high-piled piers [C]// 2018 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2018: 541-544.
- [4] ZHANG X L, DUAN B C, WANG C Z, et al. Dynamic response analysis of lateral impact force of frame wharf with rock-socketed piles in inland river steel sheath [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 1: 1-15.
- [5] 张景威, 周晶. 地下综合管廊结构的易损性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 48-53.
ZHANG Jinghui, ZHOU Jing. Vulnerability analysis of underground utility tunnel [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(3): 48-53. (in Chinese)
- [6] KO Y Y, YANG H H. Deriving seismic fragility curves for sheet-pile wharves using finite element analysis [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 265-277.
- [7] SHAFIEEZADEH A. Seismic vulnerability assessment of wharf structures [D]. Atlanta, USA Georgia Institute of Technology, 2011.
- [8] CHIOU J S, CHIANG C H, YANG H H, et al. Developing

- fragility curves for a pile-supported wharf [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(5): 830-840.
- [9] YANG C S W, DESROCHES R, RIX G J. Numerical fragility analysis of vertical-pile-supported wharves in the western United States [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2012, 16(4): 579-594.
- [10] THOMOPOULOS C, LAI C G. Preliminary definition of fragility curves for pile-supported wharves [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2012, 16: 83-106.
- [11] HEIDARY T H, BARGI K, AMIRABADI R, et al. Fragility estimation and sensitivity analysis of an idealized pile-supported wharf with batter piles [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 61-62: 92-106.
- [12] 冯云芬, 高树飞. 基于位移的高桩码头地震易损性分析[J]. *水利水运工程学报*, 2019, 3: 76-84.
FENG Yunfen, GAO Shufei. Seismic vulnerability analysis of pile-supported wharves based on displacement [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019, 3: 76-84. (in Chinese)
- [13] 徐玉明. 随机点蚀损伤钢管桩码头的地震易损性分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
XU Yuming. Seismic Fragility analysis of steel pipe pile wharf damaged by random by random pitting [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
- [14] LI X, YU X, XU Y M, et al. Structural behavior of double-CFT-pile foundations under cyclic loads [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 128: 94-101.
- [15] 孟畅. 可液化场地高桩码头抗震性能与易损性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
MENG Chang. Seismic performance and fragility analysis of the pile-supported wharf in liquefiable soils [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [16] 李梦玥. 中美高桩码头抗震设计方法对比分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
LI Mengyue. Comparative analysis of seismic design method for pile-supported wharves in Chinese and American code [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 周清泉, 陶桂兰, 阮健, 等. 地震作用下高桩码头钢管桩塑性区及损伤特性研究[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(5): 112-115, 171.
ZHOU Qingquan, TAO Guilan, RUAN Jian, et al. Research on plastic zone and damage characteristic of steel pipe pile of high-piled wharf under earthquake action [J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(5): 112-115, 171. (in Chinese)
- [18] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Applied incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(2): 523-553.
- [19] JOHNSON G S, ARULMOLI A K, ASAVAREUNGCHAI S, et al. *Seismic design of piers and wharves* [M]. [S. l.]: ASCE, 2014.
- [20] 李宏男, 李钢, 郑晓伟, 等. 工程结构在多灾害耦合作用下的研究进展[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(5): 1-14.
LI Hongnan, LI Gang, ZHENG Xiaowei, et al. Research progress of engineering structures under the coupling action of multiple disasters [J]. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 2021, 54(5): 1-14. (in Chinese)
- [21] 黄炜元, 张超, 周云, 等. 基于IDA的铅黏弹性阻尼减震结构地震易损性研究[J]. *土木与环境工程学报*, 2021, 43(3): 75-82.
HANG Weiyuan, ZHANG Chao, ZHOU Yun, et al. Seismic vulnerability of lead viscoelastic damping structures based on IDA [J]. *Chinese Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(3): 75-82. (in Chinese)
- [22] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB50011—2010 Code for seismic design of building [S]. (in Chinese)
- [23] 李宏男, 成虎, 王东升. 桥梁结构地震易损性研究进展述评[J]. *工程力学*, 2018, 35(9): 11-26.
LI Hongnan, CHENG Hu, WANG Dongsheng. A review of advances in seismic fragility research on bridge structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(9): 11-26. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】