

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.009

# 近断层脉冲型地震动作用下高桩码头的 随机动力响应与可靠度分析

李庆洲<sup>1</sup>, 冯榆舒<sup>2</sup>, 陈颖<sup>3</sup>, 陈柯好<sup>4</sup>, 庞锐<sup>4</sup>

(1. 辽宁省交通运输事务服务中心, 辽宁 沈阳 110003;

2. 桂林市交通运输服务中心, 广西 桂林 541199;

3. 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038;

4. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 近断层地震动通常包含显著的低频脉冲特征, 其随机性与强度变化对高桩码头的地震安全性具有重要影响。首先, 从实测地震记录中提取低频脉冲分量, 并基于 Kanai-Tajimi 谱生成高频分量, 二者叠加获得多组具有随机特性的近断层脉冲型地震动。然后, 建立土-桩-码头三维有限元模型, 在不同峰值加速度(0.1g、0.2g、0.4g)输入下开展大规模非线性动力时程分析。结合直接概率积分法, 从确定性结果中提取位移响应的概率密度演化规律与时变可靠度特征。结果表明: 低频脉冲作用时刻会引发位移突增及可靠度骤降, 且随地震动强度增加, 响应幅值与变异性均显著增大, 结构失效风险明显提升。

**关键词:** 高桩码头; 直接概率积分法; 近断层地震动; 随机动力分析; 可靠度分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0063-08

## Stochastic Dynamic Response and Reliability Analysis of High-pile Wharf Under Near-fault Pulse-type Ground Motion

LI Qingzhou<sup>1</sup>, FENG Yushu<sup>2</sup>, CHEN Ying<sup>3</sup>, CHEN Kehao<sup>4</sup>, PANG Rui<sup>4</sup>

(1. Liaoning Provincial Transportation Affairs Service Center, Shenyang, Liaoning 110003, China;

2. Guilin Transportation Service Center, Guilin, Guangxi 541199, China;

3. Southeast Sichuan Geological Team, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing, 400038, China;

4. Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** Near-fault ground motions often contain pronounced low-frequency pulse components, whose randomness and intensity variations have significant impacts on the seismic safety of high-pile wharves. In this work, low-frequency pulse components were first extracted from recorded earthquake motions, and high-frequency components were generated based on the Kanai-Tajimi spectrum. By superimposing the two parts, multiple sets of near-fault pulse-like ground motions with stochastic characteristics were obtained. A three-dimensional finite element model of the soil-pile-wharf system was then established, and large-scale nonlinear dynamic time-history analyses were carried out under different peak ground accelerations (0.1g, 0.2g, and 0.4g). Using the direct probability integration method, the probabilistic density evolution of displacement responses and the time-dependent reliability characteristics were further derived from the deterministic analysis results. The findings indicate that the occurrence of low-frequency pulses triggers sudden increases in displacement and sharp drops in reliability, while the response amplitude and variability grow markedly with increasing ground motion intensity, leading to a significantly elevated failure risk.

**Keywords:** high-pile wharf; direct probability integral method; near-fault ground motion; random dynamic analysis; reliability analysis

收稿日期: 2025-07-17

修稿日期: 2025-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52479094, 52279096); 辽宁省科技计划联合计划(2023JH2/101700339)

作者简介: 李庆洲(1992—), 男, 工程师, 主要从事港口工程等方面工作。E-mail: lnportalert@163.com

通讯作者: 庞锐(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程抗震风险评价研究。E-mail: pangrui@dlut.edu.cn

近断层地震动因其独特的脉冲效应显著区别于远场地震动,对工程结构安全构成严重威胁。大量震害调查表明,近断层区域地震动常包含长周期、大振幅的速度脉冲(如 1999 年台湾 Chichi 地震),易诱发低频敏感结构的大位移响应甚至导致破坏<sup>[1-3]</sup>。高桩码头作为港口枢纽工程的核心设施,其桩基-上部结构体系对低频脉冲极为敏感,传统基于远场地震动的抗震设计方法难以有效保证其在近断层区域的安全性。因此,准确评估近断层脉冲型地震动作用下高桩码头的动力响应特性与抗震可靠度,对于提升港口工程的抗震韧性具有重要的工程意义和科学价值。

已有研究<sup>[1,4-5]</sup>通过考虑桩-土相互作用,对高桩码头的地震响应特征进行了深入分析,揭示了桩基非线性屈服与土体变形对结构动力性能的影响。然而,大多数研究基于有限数量的地震记录进行确定性分析,未能充分考虑近断层脉冲型地震动在时程形态和频谱特性上的随机性。已有研究表明<sup>[6-7]</sup>,同一峰值强度的随机地震可以导致结构响应相差数十倍,传统的确定性分析方法难以全面反映高桩码头的地震响应规律。因此,发展能够考虑地震动随机性并高效求解复杂非线性系统的可靠度分析方法,是近断层区域高桩码头抗震性能研究的关键问题。

在复杂随机地震序列作用下,多自由度结构体系的随机动力响应与可靠度分析仍面临显著挑战。传统的概率分析方法在处理强非线性系统时,通常面临精度不足、计算时间过长以及样本量需求大的问题。近年来,概率密度演化法(PDEM)因其能够高效处理非线性系统复杂随机性的优势得到了广泛应用,尤其在面对大自由度、强非线性问题时,能显著降低计算成本和所需样本量<sup>[8]</sup>。在此基础上,陈国海<sup>[9-10]</sup>进一步发展了直接概率积分法(DPIM),通过 $\delta$ 函数平滑近似简化积分求解过程,显著提升了该方法在复杂结构可靠度分析中的适用性与精度。众多学者<sup>[11-13]</sup>已成功将 DPIM 应用于大型工程结构的可靠度分析,验证了其高效性和准确性。

本文集合近断层随机地震动生成方法和 DPIM,构建高桩码头的可靠度水平分析框架,系统研究近断层脉冲型地震动的随机性与强度变化对高桩码头动力响应及可靠度的影响规律。首先,由真实地震动记录提取低频脉冲,并基于 Kanai-Tajimi 功率谱生成高频分量,二者叠加生成一系列随机近断层脉冲型地震动;将随机地震输入高桩码头三维有限元

模型,开展大批量非线性动力时程分析;采用 DPIM 从确定性时程分析中获取高桩码头响应的概率与统计信息;全面评估高桩码头的随机地震响应特征和可靠度水平,为提升港口工程抗震韧性提供理论依据。

## 1 近断层地震动生成方法与直接概率积分法

### 1.1 近断层地震动生成方法

近断层地震动的生成方法可以通过低频部分和高频部分的叠加来实现。首先使用低通滤波器滤除加速度时程中的高频成分,然后采用等效速度脉冲模型(Equivalent Velocity Pulse, EPV)<sup>[14]</sup>获取低频脉冲。低频脉冲幅值 $V_p$ 随时间的变化可以表示为:

$$V_p(t) = \begin{cases} \frac{V_p}{2} \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{N_c T_p} (t - T_{pk}) \right] \right\} \times \\ \cos \left[ \frac{2\pi}{T_p} (t - T_{pk}) + v \right] & t_s < t \leq t_e \\ 0 & t \leq t_s, t > t_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: $V_p$ 为脉冲幅值; $T_p$ 为脉冲周期; $N_c$ 为脉冲旁瓣循环个数; $T_{pk}$ 为峰值地面速度对应时刻; $v$ 为脉冲相位; $t_s = T_{pk} - \frac{N_c \times T_p}{2}$ 和 $t_e = T_{pk} + \frac{N_c \times T_p}{2}$ 分别为脉冲的起始时刻和终止时刻,如图 1 所示。

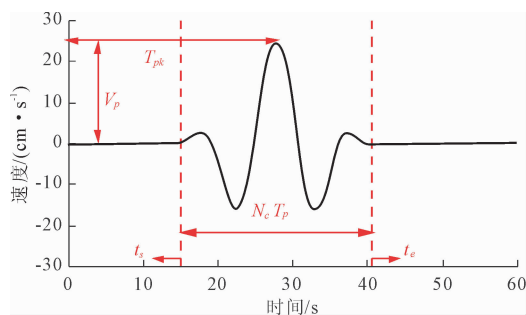


图 1 等效速度脉冲模型

为快速准确识别地震动中的脉冲参数,本文采用人工蜂群<sup>[14]</sup>(Artificial Bee Colony, ABC)算法。ABC 算法模拟蜜蜂的觅食行为,通过探索与开发进行全局优化,尤其适用于高维、多峰、非线性优化问题。相较于传统方法,ABC 算法在全局搜索能力和计算效率方面优势显著:它能够有效避免陷入局部最优解,且对目标函数的连续性或导数无依赖性,因而可高效处理复杂、不规则的优化问题,在需要高精度与短计算耗时的优化任务中表现尤为突出。以台

湾 Chichi 地震脉冲型记录 NGA1494 为例,应用 ABC 算法成功提取了其低频脉冲成分(见图2)。

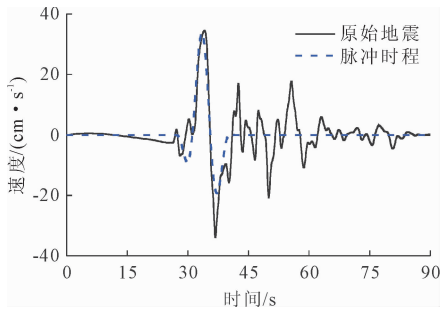


图2 脉冲时程提取

地震加速度时程中的高频部分可由下式生成<sup>[15]</sup>:

$$a(t_i) = e(t_i) \sum_{k=0}^N \sqrt{2S(\omega_k) \Delta\omega} [\cos(\omega_k t_i + \varphi_k) + \sin(\omega_k t_i + \varphi_k)] \quad (2)$$

式中: $S(\omega)$  为功率谱函数; $\Delta\omega$  为频率间隔; $\omega_k$  为离散圆频率; $N$  为离散点数量; $\varphi_k$  是均匀分布在 $[0, 2\pi]$  的随机变量。 $e(t_i)$  为包络函数:

$$e(t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ \left(\frac{t-t_0}{t_{pk}-t_0}\right)^\alpha & t_0 \leq t \leq t_{pk} \\ \exp[-\beta(t-t_{pk})] & t > t_{pk} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $t_0$  为脉冲的起始时刻; $t_{pk}$  为脉冲的峰值时刻; $\alpha$  为控制脉冲初期上升速率的指数系数, $\beta$  为控制脉冲衰减速率的系数,影响脉冲衰减的快慢。本文采用 Kanai-Tajimi 功率谱函数生成高频加速度时程:

$$S(\omega) = \frac{\omega^2}{\omega^2 + \left(\frac{1}{\Gamma}\right)^2} \cdot \frac{1 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} S_0 \quad (4)$$

式中: $S_0$  为谱强度因子; $\omega_g$  为场地卓越频率; $\xi_g$  为场地阻尼比; $\Gamma$  为 Brune 震源参数。

通过将低频和高频部分叠加,可以得到完整的近断层脉冲型地震动时程。详细的合成过程可参考作者之前的研究<sup>[14]</sup>。如图3展示了人工合成地震动作用下 $\xi=0.05$  单自由度结构的反应谱。由图3可知,生成地震动的反应谱与目标值拟合良好,响应谱曲线的峰值与高频部分一致,准确反映了短周期高频成分的特征,证明所合成的地震动能够有效地模拟高频和低频脉冲的动态响应特性,捕捉到地震动的频谱特征变化。

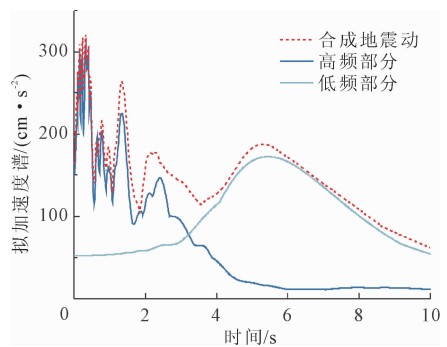


图3 单自由度结构在合成地震动下作用下的反应谱

## 1.2 直接概率积分法

地震动作用下的高桩码头是一个复杂的多维非线性系统,传统的可靠度分析方法在处理复杂问题时常面临精度不足和效率低下的问题。近年来,陈国海等<sup>[10]</sup>在 DPIM 研究方面为复杂系统的概率密度演化提供了极为高效的解决方案。通过避免求解复杂的偏微分方程,DPIM 利用  $\delta$  函数平滑近似技术,简化了积分方程的求解过程,极大地提高了大规模、多自由度系统分析的适用性和求解速度。系统中所有可能状态的概率总和在任意时刻保持不变的现象被称为概率守恒原理,数学表达式如下所示<sup>[16]</sup>:

$$\int_{\Omega_Y} p_Y(y, t) dy = \int_{\Omega_\Theta} p_\Theta(\theta, t) d\theta \quad (5)$$

式中: $\Theta$  为一种随机输入向量,包含了所有在初始时刻引入系统的随机因素; $Y$  表示随机输出向量; $p_\Theta(\theta, t)$  和  $p_Y(y, t)$  分别为  $\Theta$  和  $Y$  在时刻  $t$  的概率密度函数(PDF)。

随机输入和随机输出向量的映射关系可以表示为:

$$Y(t) = g[\Theta_s, X(\Theta_f, t)] = g(\Theta, t) \quad (6)$$

式中: $\Theta = [\Theta_s, \Theta_f]$  为该系统的随机变量; $g$  为响应映射函数。

响应的概率密度函数可以表示为:

$$\begin{aligned} p_Y(y, t) &= |J_{g^{-1}}(y)| p_\Theta[\theta = g^{-1}(y, t)] \\ &= \frac{1}{|J_g(\theta)|} p_\Theta[\theta = g^{-1}(y, t)] \end{aligned} \quad (7)$$

结合映射函数并利用狄拉克函数的变元公式,概率直接积分方程可以表示为:

$$p_Y(y, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} p_\Theta(\theta) \delta[y - g(\theta, t)] d\theta \quad (8)$$

进一步地,采用  $\delta$  函数平滑近似的方法简化积分方程,则式(8)可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$p_Y(y, t) \approx \sum_{q=1}^N \left\{ \delta[y - g(\theta_q, t)] \int_{\Omega_{\theta_q}} p_\Theta(\theta) d\theta \right\}$$

$$\approx \sum_{q=1}^N \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-[y-g(\theta_{q,t})]^2/(2\sigma^2)} P_q \right\} \quad (9)$$

式中： $\theta_q$  表示概率空间中的第  $q$  个代表点； $\Omega_{\theta,q}$  表示第  $q$  个代表点所占据的代表区域； $N$  为代表点数的总数； $\sigma$  为平滑参数； $P_q$  表示第  $q$  个代表点的分配概率。可靠度的详细求解过程可以参考陈国海等<sup>[10]</sup> 的研究。

## 2 高桩码头的有限元模型

本文选取宁波大榭高桩码头的典型直桩段作为研究对象。大榭码头位于浙江省宁波市北仑大榭岛西北侧，泊位岸线总长 1 500 m，最大水深 -17.5 m，堆场面积 807 000 m<sup>2</sup>，地处中国大陆海岸线中部、长江三角洲南翼，正处于长江黄金水道与黄金海岸线“T”型交汇处，紧邻全球最繁忙的国际主航道，区位优势优越。所采用的工程数据来源于大榭高桩码头直桩段的设计图纸，其断面布置如图 4 所示，包括上部结构和桩基。该断面共包含七根桩基，按从前线

到后线的方向编号为 1~7，桩长分别为 61 m、59 m、56 m、52 m、46 m、42 m、41 m，桩径为 2.3 m，码头面板宽度为 55.8 m。混凝土强度等级为 C40，桩身周围配筋采用对称布置，钢筋数量为 45 根直径 28 mm 的钢筋(45Φ28)，箍筋布置为 Φ12@250。依据工程设计图，本文基于 ABAQUS 平台建立了土-桩-码头三维有限元模型，网格剖分以及详细尺寸如图 5 所示。模型中的桩、梁和坡体都是三维实心单元，单元类型为 8 节点 C3D8 单元。钢筋部分通过 SFM3D4 四节点面单元嵌入。模型共有 10 510 个单元和 13 018 个节点。桩-土附近土体采取网格加密处理以准确模拟桩-土相互作用。在桩土接触部分，桩体为主控制面，土体为从属面。法向接触采用硬接触，切向接触采用罚函数法模拟，摩擦系数为 0.5。模型平行于 XOY 的两个边界约束法向方向，平行于 YOZ 的两个边界采用 MPC 约束以模拟地震波的剪切作用<sup>[17]</sup>，底部约束 Y 和 Z 方向位移，地震以加速度的形式从 X 方向输入。

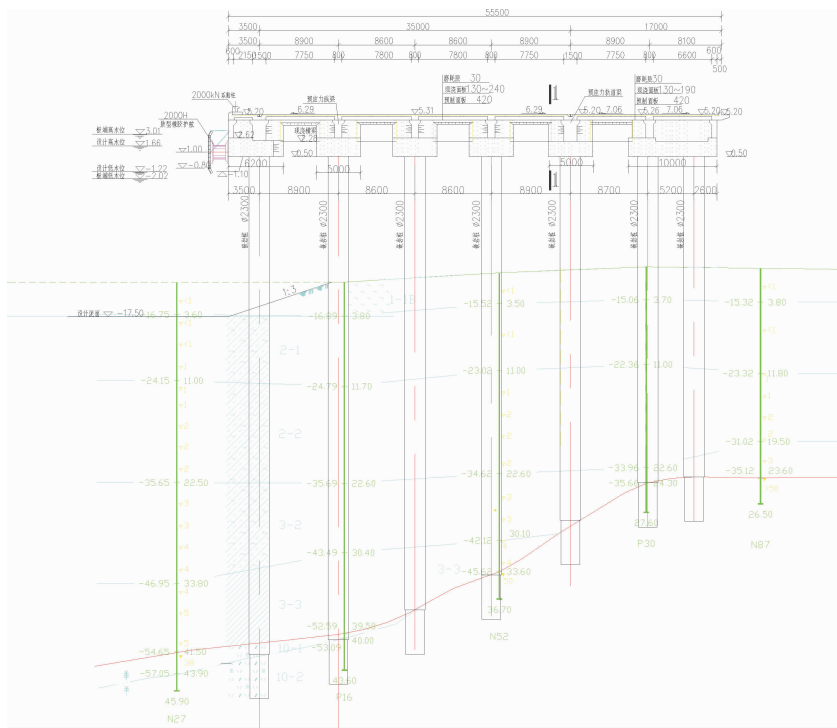


图 4 大榭高桩码头设计图

钢筋采用线弹性本构模型，其弹性模量为  $2 \times 10^5$  MPa，泊松比为 0.3，密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>。混凝土采用塑性损伤本构，弹性模量为  $3.25 \times 10^4$  MPa，泊松比为 0.2，密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>，膨胀角为 30°，偏心率为 0.1，双轴抗压强度与单轴抗压强度之比  $f_{10}/f_{c0}$  取值为 1.16，混凝土屈服形态的影响参数  $K$  值为 0.667，黏性参数  $\mu$  为 0.0005。土体采用

摩尔库仑本构，参数如表 1 所示。

查询中国地震局的《中国地震动参数区划图》<sup>[18]</sup> (GB 18306—2015) 可以确定大榭码头所在的浙江省宁波市北仑区地震设防烈度为 7 度，峰值加速度为 0.1g。此外，《建筑抗震设计规范》<sup>[19]</sup> (GB 50011—2010) 中规定抗震设防烈度为 7、8、9 分别对应地震峰值加速度为 0.1g、0.2g、0.4g。因

此,为了全面揭示高桩码头的地震响应与可靠度水平,本文将所生成的地震动调幅至峰值加速度为 $0.1g$ 、 $0.2g$ 和 $0.4g$ 。最终本文对该模型输入了时长为 $60\text{ s}$ ,峰值加速度为 $0.1g$ 、 $0.2g$ 和 $0.4g$ 的近断层脉冲型地震动,共计开展了 $300$ 次动力隐式分析。

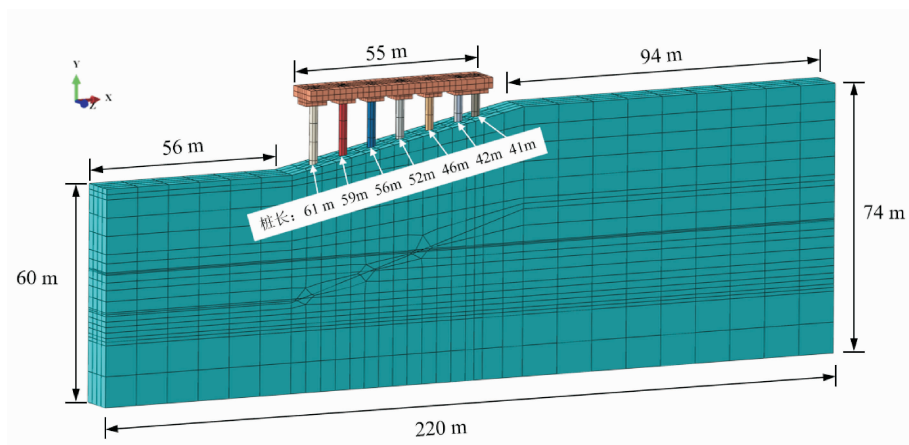


图5 高桩码头三维有限元模型

表1 土体参数

弹性模量 /MPa	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	黏聚力 /kPa	摩擦角 $\psi$ /( $^\circ$ )
11.65	1700	0.3	13	11

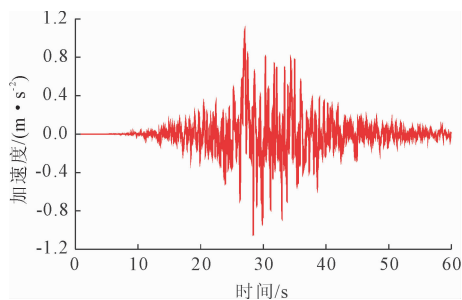


图6 典型近断层脉冲地震动时程

## 3 随机响应分析与可靠度分析

### 3.1 随机响应分析

本研究以高桩码头面板的水平位移为评价指标,探究了近断层地震动的随机性与峰值加速度(PGA)强度对其动力响应的影响规律。针对峰值加速度为 $0.1g$ 、 $0.2g$ 和 $0.4g$ 的近断层地震动,进行了码头面板位移响应的统计分析。图7展示了不同峰值加速度地震动作用下码头面板位移的均值与标准差时程。结果表明,在近断层地震动作用下,码头面板发生了明显的位移响应,且随着地震动峰值加速度的增大,位移逐渐增大。具体表现为:在 $0.1g$ 地震动下,最大平均位移为 $0.02\text{ m}$ ;在 $0.2g$ 地震动

图6展示了生成的地震动时程,波形呈现出明显的单一脉冲特征。高桩码头属于低频敏感结构,强烈的低频脉冲可能会对其产生强烈的振动和位移响应。因此,在进行高桩码头的地震分析中,考虑此类脉冲地震动对准确评估高桩码头抗震性能至关重要。

下为 $0.05\text{ m}$ ;而在 $0.4g$ 地震动下,最大平均位移增至 $0.11\text{ m}$ 。

从动力时程结果(见图7)可以明显观察到,低频脉冲作用时刻伴随结构响应的突增,无论是位移的均值与标准差曲线,还是可靠度随时间的变化曲线,均在该时刻出现显著波峰或骤降。这种集中于单一时间段的能量释放与响应峰值分布,是近断层脉冲型地震动区别于远场地震动的核心特征之一,也印证了其对高桩码头这类低频敏感结构的放大效应。相比之下,现有基于远场地震动或未区分脉冲与非脉冲特性的研究结果<sup>[2,5]</sup>表明,高桩码头在此类地震动作用下的位移响应和内力分布通常较为平缓,峰值幅度相对较小,且未呈现明显的单峰集中现象。本文的结果显示,在近断层脉冲型地震动作用下,响应幅值更大、集中性更强,且在脉冲时刻伴随可靠度的急剧下降。这种显著差异说明,若在抗震设计中忽略近断层脉冲效应,可能低估高桩码头在极端地震情景下的失效风险。

本文采用DPIM从一系列确定性时程结果中获取了码头面板位移的概率密度(PDF)演化规律。图8—图10分别展示了在峰值加速度为 $0.1g$ 、 $0.2g$ 和 $0.4g$ 的近断层脉冲地震作用下,码头面板位移的概率密度演化信息。图8(a)—图10(a)展示了 $27\text{ s}$ 处的典型概率密度,可以看出随着地震动强度的增大,概率密度峰值下降且位移分布范围更广,说明地震动强度越大引起的位移响应越显著。从

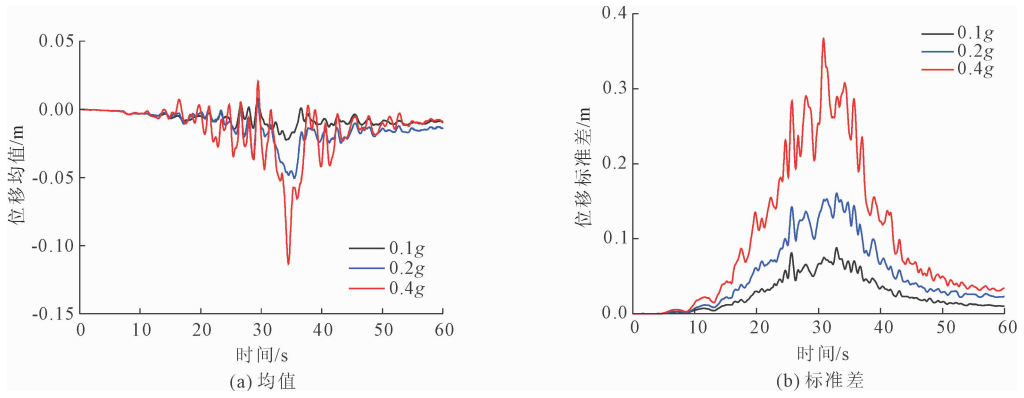


图 7 不同峰值加速度地震动作用下码头面板位移的均值与标准差时程

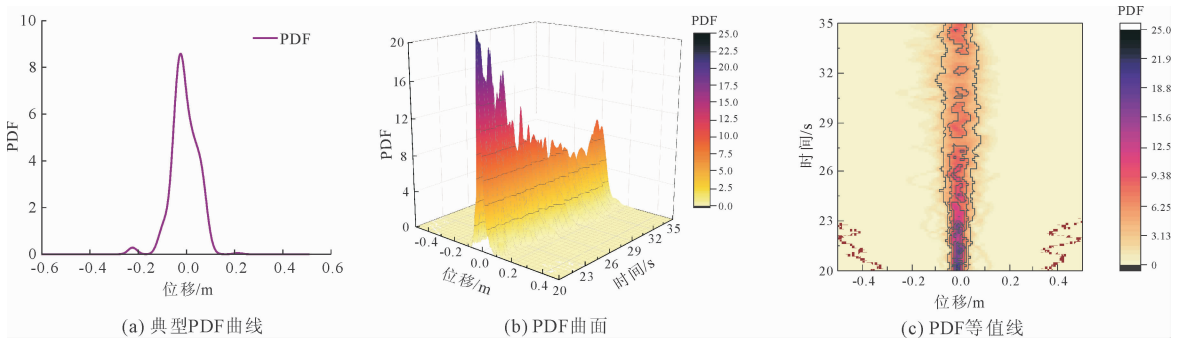


图 8 0.1g 地震动作用下码头面板位移的概率密度演化信息

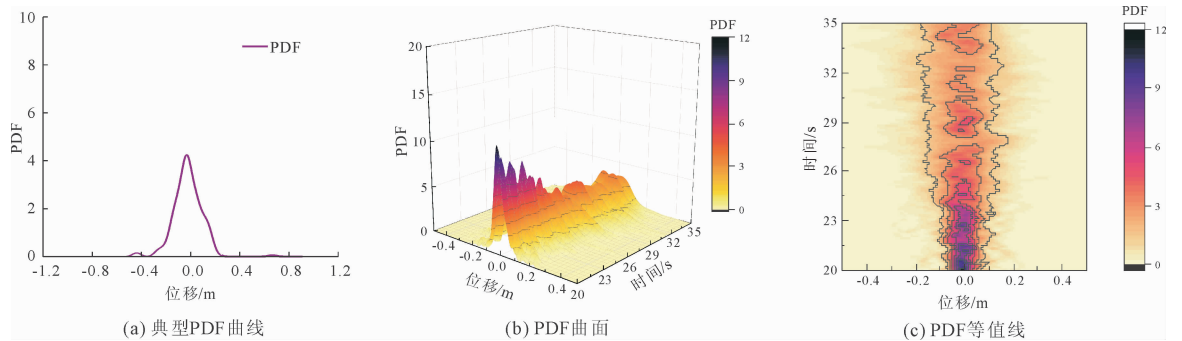


图 9 0.2g 地震动作用下码头面板位移的概率密度演化信息

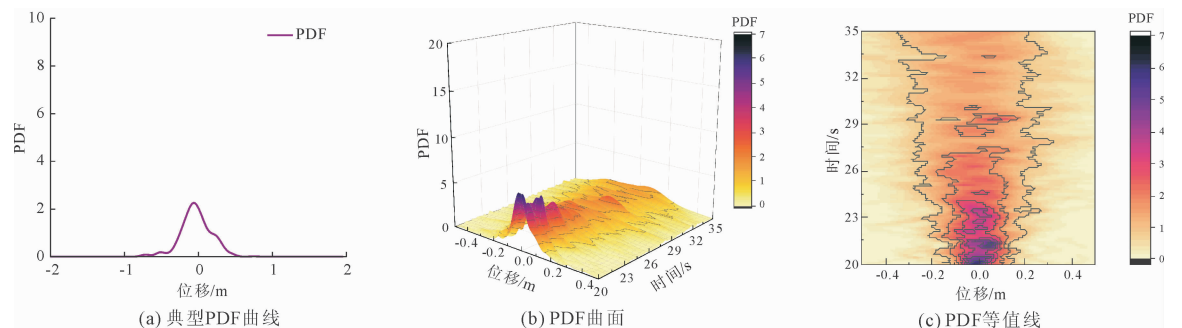


图 10 0.4g 地震动作用下码头面板位移的概率密度演化信息

图 8(b)—图 10(b)、图 8(c)—图 10(c)可以看出, 概率密度曲面呈现多峰特征且分布范围广泛, 充分

表明在随机近断层脉冲地震动作用下, 土-桩-码头系统的动力响应具有高度变异性。随着峰值加速度

增加,概率密度曲面的峰值逐渐降低,分布范围逐渐拓宽,与典型概率密度曲线规律一致。在 $0.1g$ 地震动作用下,概率密度曲线呈现高且尖锐的形态,意味着大部分位移集中在较小的范围内。随着峰值加速度增大至 $0.2g$ 和 $0.4g$ ,概率密度曲线显著平缓且分布更为分散,清晰反映了结构响应变异性的显著增强。由此表明,在强震作用下,结构位移不仅幅值增大,其不确定性也同步增强。因此,从概率统计角度评估高桩码头的抗震性能至关重要。

### 3.2 可靠度分析

图11—图12分别展示了在峰值加速度为 $0.1g$ 和 $0.4g$ 的近断层脉冲型地震动作用下,码头面板水平位移的累积分布函数(CDF)及可靠度水平(可靠度阈值设定为 $0.2\text{ m}$ )。随着峰值加速度从 $0.1g$ 增加到 $0.4g$ ,累积分布函数曲线(图11(a),图12(a))

的斜率逐渐变缓,表明随着地震动强度的增大,码头面板位移的概率分布范围显著扩大,位移响应的变异性增大。随着峰值加速度的增大,可靠度曲线(图11(b),图12(b))斜率显著增陡,表明更强烈的地震动显著增大了面板的水平位移。具体来说,在 $0.1g$ 地震动下,可靠度阈值为 $0.2\text{ m}$ 时,高桩码头面板的可靠度约为 $80\%$ 。在 $0.4g$ 地震动作用下,35 s时的动态可靠度几乎降为零。结果表明,随着地震强度的增加,结构的抗震性能和安全性显著降低,结构在强震中的失效风险显著增加,这与结构的地震风险水平一致。可靠度在脉冲时刻的骤降,源于低频脉冲长周期、大振幅的特性对高桩码头结构产生的强烈冲击力,导致位移突变。这凸显了在抗震设计与可靠度评估中,充分考虑地震动频谱特性(尤其是低频脉冲)的重要性。

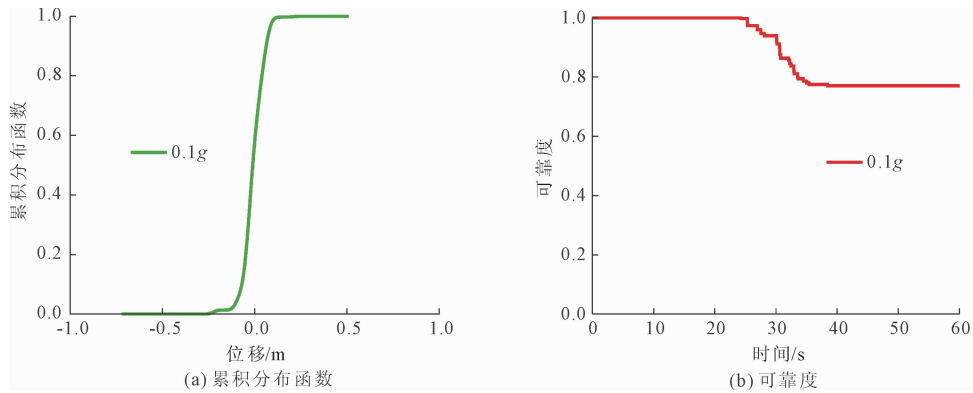


图11  $0.1g$ 地震动作用下码头面板位移的累积分布函数和可靠度

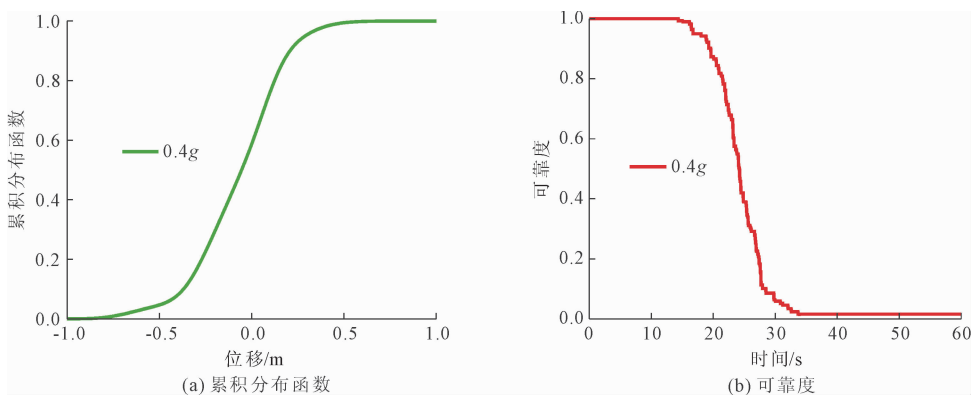


图12  $0.4g$ 地震动作用下码头面板位移的累积分布函数和可靠度

## 4 结论

本文针对近断层脉冲型地震动作用下高桩码头的抗震可靠度问题,结合随机地震动生成方法与直接概率积分法,从概率与统计的角度揭示了结构响应与时变可靠度特征,主要结论如下:

- (1) 利用人工蜂群算法从实测记录提取低频脉冲,并结合谱表示-随机函数法生成高频成分,构建了能够保留脉冲特征的随机近断层地震动时程。
- (2) 不同峰值加速度( $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.4g$ )下的分析表明,地震动随机性导致高桩码头响应具有显著变异性,且随地震强度增加,位移幅值和不确定性

均明显增大。

(3) 概率密度演化结果显示,强震作用下位移分布更分散,低频脉冲时刻伴随可靠度骤降,进一步印证了脉冲效应对结构失效风险的放大作用。

### 参考文献:

- [1] 周扬,刘明亮,庞锐.复杂因素影响下高桩码头静动力规律研究[J].大连理工大学学报,2025,65(2):152-160.
- [2] 王龙龙,苏雷,王建峰,等.考虑腐蚀效应的高桩码头地震响应研究[J].地震工程学报,2025,47(1):122-132.
- [3] 周扬,李思瀚,庞锐,等.考虑混凝土耐久性-地震随机性的高桩码头时变可靠度研究[J].水利与建筑工程学报,2024,22(6):98-105,165.
- [4] 刘明亮.多因素影响下高桩码头岸坡-桩基-上部结构数值模拟及时变可靠度研究[D].大连:大连理工大学,2024.
- [5] 苏雷,王龙龙,王建峰,等.考虑氯离子侵蚀的高桩码头时变地震易损性分析[J].振动工程学报,2024,37(7):1259-1268.
- [6] Chen Kehao, Pang Rui, Xu Bin. Stochastic dynamic response and seismic fragility analysis for high concrete face rockfill dams considering earthquake and parameter uncertainties[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023,167:107817.
- [7] Pang Rui, Chen Kehao, Fan Qunying, et al. Stochastic ground motion simulation and seismic damage performance assessment of a 3-D subway station structure based on stochastic dynamic and probabilistic analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 126:104568.
- [8] Pang Rui, Xu Bin, Zhou Yang, et al. Seismic time-history response and system reliability analysis of slopes considering uncertainty of multi-parameters and earthquake excitations[J]. Computers and Geotechnics, 2021,136:104245.
- [9] Li Xiaolan, Chen Guohai, Cui Haichao, et al. Direct probability integral method for static and dynamic reliability analysis of structures with complicated performance functions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021,374:113583.
- [10] Chen Guohai, Yang Dixiong, Liu Yunhe, et al. System reliability analyses of static and dynamic structures via direct probability integral method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022,388:114262.
- [11] 徐斌,陈柯好,王星亮,等.液化土中管道随机地震响应分析与可靠度评价研究[J].岩土工程学报,2024,46(1):81-89.
- [12] Pang Rui, Zai Dezhi, Xu Bin, et al. Stochastic dynamic and reliability analysis of AP1000 nuclear power plants via DPIM subjected to mainshock-aftershock sequences[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 235:109217.
- [13] Pang Rui, Zhou Yang, Chen Guohai, et al. Stochastic mainshock-aftershock simulation and its applications in dynamic reliability of structural systems via DPIM[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2023, 149(1):04022096.
- [14] 庞锐,陈柯好,宋佚博,等.近断层脉冲型随机地震动模拟方法及结构动力可靠度研究[J].大连理工大学学报,2024,64(6):633-640.
- [15] Liu Zhangjun, Lv Kangxuan, Liu Zixin, et al. Dimension-reduction of stochastic wave forces and probability density evolution analysis of wave-excited pile foundation[J]. Ocean Engineering, 2022,243:110159.
- [16] 敬明远.主余震随机地震动模拟及高土石坝随机动力分析研究[D].大连:大连理工大学,2025.
- [17] Cheng Xinglei, Wang Tianju, Zhang Jianxin, et al. Dynamic response analysis of monopile offshore wind turbines to seismic and environmental loading considering the stiffness degradation of clay[J]. Computers and Geotechnics, 2023,155:105210.
- [18] 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [19] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.