



基于性能的高烈度区内河高桩 框架式货运码头抗震分析*

王培银¹, 刘平¹, 黄喜双¹, 袁浩¹, 韦领新², 方火浪²

(1. 中交四航局第三工程有限公司, 广东湛江 524022; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江杭州 310058)

摘要: 针对高桩框架式码头缺乏性能化抗震评价体系的问题, 以东川港格勒中心作业区码头为研究对象, 开展系统的性能化抗震分析。基于 OpenSees 平台, 建立考虑土-桩-结构相互作用的三维精细化有限元模型, 输入多遇、设防和罕遇地震动进行非线性动力时程分析, 获取结构在不同地震水准下的动力反应。结合国内外抗震设计规范, 以上部框架层间位移角和桩顶位移为关键性能指标, 提出适用于该类结构的多水准抗震性能评价体系及量化控制标准, 并对结构抗震性能进行全面评估。结果表明: 在多遇、设防和罕遇地震作用下, 上部框架最大层间位移角分别为 1/1 429、1/417 和 1/167, 桩顶最大位移分别为 0.006、0.026 和 0.060 m, 均未超过对应性能水准限值, 结构整体性能表现良好, 满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标。

关键词: 高桩框架式码头; 抗震设计; 土-桩-结构相互作用; 非线性动力时程分析; 抗震评价体系; 性能化抗震分析

中图分类号: U656.1+13; TU375

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0060-12

Performance-based seismic analysis of high-piled frame freight wharf in inland rivers of high intensity areas

WANG Peiyin¹, LIU Ping¹, HUANG Xishuang¹, YUAN Hao¹, WEI Lingxin², FANG Huolang²

(1. The Third Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Zhanjiang 524022, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To address to the lack of a performance-based seismic evaluation system for high-piled frame wharves, a systematic performance-based seismic analysis is conducted on the wharf in the Gele central operation area of Dongchuan Port. On the basis of the OpenSees platform, a three-dimensional refined finite element model considering the soil-pile-structure interaction is built. Nonlinear dynamic time-history analysis is performed by inputting frequent, fortified, and rare earthquake motions to obtain the dynamic response of the structure at different earthquake levels. On the basis of domestic and international seismic design codes, a multi-level seismic performance evaluation system and quantitative control standards applicable to this type of structure are proposed, with the upper frame inter-story displacement angle and pile top displacement as key performance indicators, and the seismic performance of the structure is comprehensively evaluated. The results show that under frequent, fortified, and rare earthquake actions, the maximum inter-story displacement angles of the upper frame are 1/1 429, 1/417, and 1/167, respectively, and the maximum displacements of the pile top are 0.006, 0.026, and 0.060 m,

收稿日期: 2025-08-31 录用日期: 2025-10-07

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878605)

作者简介: 王培银(1985—), 男, 高级工程师, 从事港口工程设计与施工工作。

通信作者: 方火浪(1962—), 男, 博士, 研究员, 从事防灾减灾工程研究工作。E-mail:fanghuolang@zju.edu.cn

respectively, all of which do not exceed the corresponding performance level limits. The overall performance of the structure is good, meeting the fortification goals of “no damage during small earthquakes, repairable during medium earthquakes, and no collapse during large earthquakes”.

Keywords: high-piled frame wharf; seismic design; soil-pile-structure interaction; nonlinear dynamic time-history analysis; seismic evaluation system; performance-based seismic analysis

随着“长江经济带”发展战略的深入推进,金沙江下游白鹤滩、乌东德等大型梯级水电站相继建成并投入运行,库区水位抬升形成了稳定、深邃的航道条件,显著提升了金沙江中上游地区的水运通航能力。在此背景下,云南省正加快推进东川港等内河港口基础设施建设,以打通区域综合交通瓶颈,促进沿江资源开发与经济社会发展。东川港一期工程拟建设高桩框架式货运码头,作为区域水陆联运的关键节点,其结构安全直接关系到人民生命财产安全与区域交通系统的韧性。然而,金沙江流域地处青藏高原东南缘,位于印度板块与欧亚板块碰撞带附近,构造活动强烈,地震频发,属高烈度设防区。在此地质环境下,高桩框架式码头的抗震安全性面临严峻挑战,亟需开展系统、科学的抗震性能评估与设计方法研究。

在水运工程领域,我国现行的 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》^[1]主要采用基于承载力的单水准设防设计方法,强调结构在设防烈度下的强度与稳定性要求^[2]。该方法在弹性设计阶段较为成熟,但在评估结构进入弹塑性阶段后的损伤演化、变形能力及整体性能表现方面存在明显局限。尤其对于高桩框架式码头这类柔性结构体系,其破坏模式复杂,涉及桩-土相互作用、节点塑性铰发展、结构整体失稳等多种机制,传统方法难以准确反映其真实抗震性能。近年来,基于性能的抗震设计理念在建筑工程领域已广泛应用,其核心是通过多水准地震动输入(如多遇地震、设防地震、罕遇地震),评估结构在不同性能目标下的反应特征,实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的分级设防目标。然而,该理念在水运工程中的应用仍处于探索阶段,尚未形成适用于内河码

头的系统性评价框架。为推动码头抗震分析技术的发展,国内外学者开展了大量研究。例如,Shafieezadeh 等^[3]和 Vytiniotis 等^[4]利用 OpenSees 平台建立考虑土-桩-结构相互作用的非线性有限元模型,对粉砂土地基中桩基码头的动力反应进行了模拟,揭示了地基土特性对结构位移和内力重分布的显著影响; Su 等^[5]通过对比不同边坡加固方案,系统评估其对桩支撑码头抗震性能的提升效果,表明地基处理对整体稳定性具有关键作用;许建武等^[6]针对高桩码头开展多烈度地震下的位移反应分析,探讨结构在不同地震强度下的非线性行为,但未建立明确的性能评价指标体系;李哲等^[7]采用有效应力法分析板桩码头在地震作用下的变形机制,强调孔隙水压力累积对结构失稳的影响;高树飞等^[8]研究不同阻尼模型对码头位移反应预测的影响,提出在非线性时程分析中应合理选择阻尼参数。进一步地,李金强等^[9]对比传统承载力设计与性能化设计在码头工程中的适用性,指出后者更能体现结构全生命周期内的性能演化,契合现代韧性基础设施建设需求;孙艺等^[10]系统解读了美国的 *Seismic Design of Piers and Wharves*^[11],为引入多水准地震分析框架与性能水准划分标准提供了国际经验借鉴。

综上所述,尽管现有研究在码头结构地震反应机理、数值模拟方法及设计理念转型方面取得了一定进展,但仍存在以下不足:1)多数研究集中于单一地震水准下的反应分析,缺乏多水准地震作用下性能的系统性评估;2)针对内河高桩框架式码头的性能化评价体系尚未建立;3)考虑土-桩-结构耦合作用的精细化三维非线性时程分析仍不充分,尤其在复杂地形与高烈度区的应用有

待深化。为此，本文以东川港一期高桩框架式货运码头为工程背景，开展以下工作：基于 OpenSees 平台建立考虑土-桩-结构相互作用的精细化三维非线性有限元模型；人工合成多组符合场地特征的地震动，开展多水准非线性时程分析，研究结构在不同地震强度下的动力反应特征；结合国内外抗震规范与性能化设计理念，构建适用于内河高桩框架式码头的抗震性能评价体系；对其整体抗震性能进行系统评估。

1 工程概况和数值模型建立

1.1 工程概况

云南省东川港格勒中心作业区位于白鹤滩库区的金沙江小江段，规划布置 6 个 1 000 吨级货运泊位，项目分两期建设。一期工程包括 2 个 1 000 吨级通用泊位，设计年吞吐量为 174 万 t，综合通过能力达到 175.6 万 t/a。后方陆域占地面积为 4.49 万 m²，配置有生产生活辅助建筑、水电及消防等配套设施。码头水工建筑物采用三级直立平台布局，各级平台均采用高桩多层框架结构。相邻平台间通过栈桥形式的连接道路相连，在高、中平台道路之间根据地形设置转弯平台，以便于交通转换。高水位平台后方两侧分别通过两座引桥与陆域连接，确保码头与后方陆域的有效衔接和物流畅通。格勒中心作业区一期工程的高桩框架式货运码头竣工效果见图 1。



图 1 码头竣工效果

Fig. 1 Completion rendering of wharf

1.2 有限元分析模型

选取高水位平台作为分析对象，其典型断面见图 2。该平台设计最高作业水位为 825.17 m，

基础采用钻孔灌注桩，桩长介于 40~50 m。上部结构为整体现浇的钢筋混凝土架空直立式框架，仅在顶层设置厚度为 0.4 m 的混凝土面板，其余层无水平楼板，形成开放式的多层承重框架体系。平台框架共设 4 层，局部区域为两层，各层层高分别为：顶层(第 4 层)7.9 m、第 3 层 7.43 m、第 2 层及底层(第 1 层)均为 6.5 m。整个高水位平台沿纵向划分为 3 个独立的结构段，相邻结构段之间设有宽度为 40 mm 的锯齿形结构缝，以适应温度变化、混凝土收缩及地震作用下的相对位移。

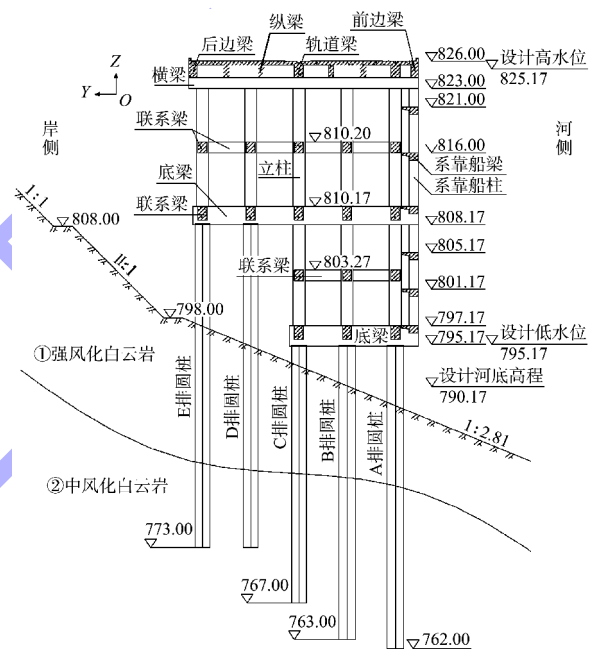


图 2 高水位平台断面(单位:m)

Fig. 2 Section of high water level platform(unit:m)

OpenSees 软件^[12]作为地震工程领域内广泛认可的开源有限元分析工具之一，其可靠性已在众多国内外研究成果中得到验证。本文利用 OpenSees 软件构建高桩框架式码头结构的精细化三维有限元模型，见图 3a)。该模型由 4.421 0 万个节点和 5.517 9 万个单元组成。在模型中，梁、柱和桩采用纤维截面梁单元进行建模，见图 3b)，以精确捕捉这些关键构件在地震作用下的非线性行为；混凝土面板则使用线性板单元建模；结构缝通过接触单元模拟，确保相邻结构段之间的相对运动能够被准确反映；桩-土相互作用采用非线性弹簧单元表示。

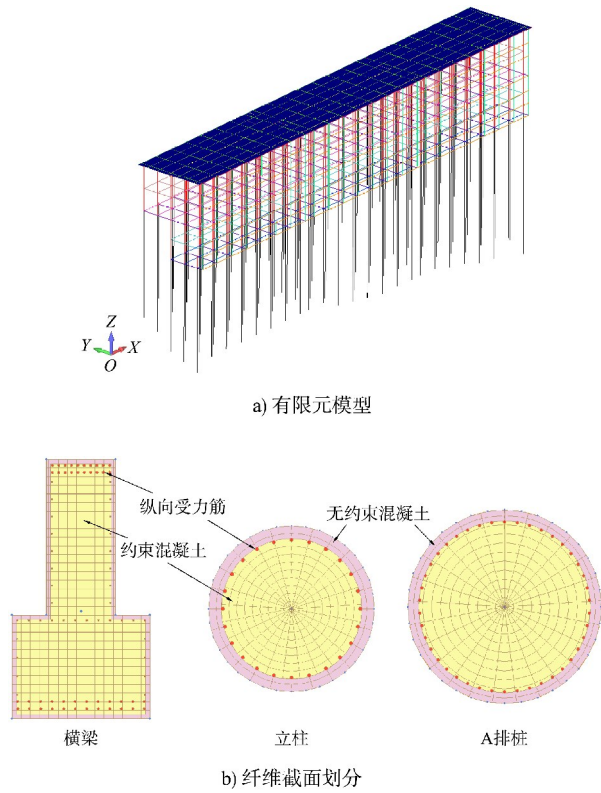


图 3 有限元模型和纤维截面划分

Fig.3 Finite element model and fiber section division

1.3 材料本构模型及计算参数

钢筋和混凝土的本构关系分别采用 OpenSees 软件中的 Steel02 和 Concrete02 模型进行模拟。对于钢筋, 选用等向应变硬化修正的 Giuffrè-Menegotto-Pinto 模型定义其本构关系, 该模型能够有效考虑

地震循环荷载作用下钢筋的包辛格效应, 从而提高模拟精度。混凝土的本构关系则采用修正的 Kent-Park 模型, 此模型不仅能够反映混凝土在受压状态下的非线性行为, 还考虑了横向约束钢筋对核心区混凝土约束作用引起的强度提高效应。在 OpenSees 软件中, Steel02 模型的参数设置包括: 屈服强度 f_y 、初始弹性模量 E_s 、应变硬化率 α 、以及骨架曲线形状相关的控制系数 R_0 、 C_{R1} 和 C_{R2} ; Concrete02 模型的参数包括: 箍筋约束范围内的核心区混凝土抗压强度提高系数 K 、峰值抗压强度 f_{pc} 、峰值压应变 ϵ_{pc} 、残余抗压强度 f_{pcu} 、起始残余压应变 ϵ_{pcu} 、残余压应变后的卸载刚度与初始刚度的比值 λ 、峰值抗拉强度 f_t 和拉伸线性软化刚度绝对值 E_{ts} 。混凝土的物理力学参数设定如下: 重力密度 24.0 kN/m^3 , 弹性模量 30.0 GPa , 泊松比 0.2 。Steel02 和 Concrete02 模型的具体参数取值分别见表 1 和 2。由于约束区混凝土的强度参数受到截面尺寸、箍筋配置等多种因素的影响, 因此表 2 仅提供部分典型截面的 Concrete02 模型参数取值。

表 1 Steel02 模型参数
Tab.1 Parameters of Steel02 model

f_y/MPa	E_s/GPa	α	R_0	C_{R1}	C_{R2}
455.0	200.0	0.01	18	0.925	0.15

表 2 Concrete02 模型参数
Tab.2 Parameters of Concrete02 model

构件	K	f_{pc}/MPa	$\epsilon_{pc}/10^{-3}$	f_{pcu}/MPa	$\epsilon_{pcu}/10^{-3}$	f_t/MPa	λ	E_{ts}/GPa
横梁	1.085 994	24.33	2.172	4.87	9.779	2.43	0.1	3.0
前边梁	1.092 968	24.48	2.186	4.90	10.247	2.45	0.1	3.0
后边梁	1.083 446	24.27	2.167	4.85	9.608	2.43	0.1	3.0
纵梁	1.123 743	25.17	2.247	5.03	12.316	2.52	0.1	3.0
轨道梁	1.143 954	25.62	2.288	5.12	13.674	2.56	0.1	3.0
系靠船柱	1.118 323	25.05	2.237	5.01	11.951	2.51	0.1	3.0
立柱	1.035 045	23.19	2.070	4.64	6.355	2.32	0.1	3.0
次梁	1.100 982	24.66	2.202	4.93	10.786	2.47	0.1	3.0
AB 排桩	1.012 369	22.68	2.025	4.54	4.831	2.27	0.1	3.0
C 排桩	1.014 018	22.71	2.028	4.54	4.942	2.27	0.1	3.0
DE 排桩	1.014 018	22.71	2.028	4.54	4.942	2.27	0.1	3.0

码头地基主要由两层土体构成, 上层为强风化白云岩, 下层为中风化白云岩。根据现场土工

试验的结果, 在土体处于饱和状态下, 两类土层的主要物理力学参数见表 3。

表3 土体物理力学参数
Tab.3 Physical and mechanical parameters of soil

土层	饱和密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	桩尖极限承载力/kPa	桩侧极限摩阻力/kPa
强风化白云岩	2 400	70	35	0.28	2 500	135
中风化白云岩	2 550	180	38	0.32	3 800	160

根据现场剪切波速测试结果，基于一维地基假设，可将实测剪切波速转换为初始剪切模量，并建立其与土层平均有效应力之间的关系，其表达式为：

$$G_0 = 1\,797 p_a (\sigma'_{m0}/p_a)^{0.54} \quad (1)$$

式中： G_0 为初始剪切模量； σ'_{m0} 为平均有效应力； p_a 为大气压。

1.4 桩-土相互作用模型

桩-土相互作用采用非线性弹簧单元进行模拟。弹簧单元一端与桩基相连，另一端连接至自由场土体，用于反映桩与周围土体之间的动力耦合关系，见图4。

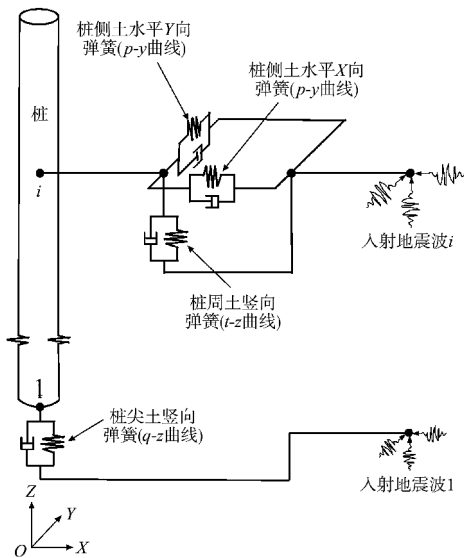


图4 桩-土相互作用模型

Fig.4 Pile-soil interaction model

弹簧单元包括桩侧土水平 X 向和 Y 向的 p - y 弹簧单元、桩周土竖向 t - z 弹簧单元以及桩端土竖向 q - z 弹簧单元(p 、 t 、 q 分别为桩侧土水平抗力、桩周土竖向抗力与桩尖土承载力)，分别依据 p - y 曲线、 t - z 曲线和 q - z 曲线模型进行定义，以模拟不同方向上的土抗力特性。桩周土水平弹簧单元、桩周土竖向弹簧单元和桩尖土竖向弹簧单元均采用 OpenSees 软件中的 Steel02 模型，其骨架曲线则

分别按照上述 p - y 曲线、 t - z 曲线和 q - z 曲线进行设定。

p - y 曲线采用针对该土石混合体深厚覆盖层导得的 Davidenkov 曲线模型^[13]，可表示为：

$$p = \begin{cases} k_i y - k_i y \left[\frac{(k_i y/p_u)^b}{1 + (k_i y/p_u)^b} \right]^a & (y < y_u) \\ p_u & (y \geq y_u) \end{cases} \quad (2)$$

式中： p 为桩侧土水平抗力； k_i 为桩侧土水平初始刚度； y 为桩身水平位移； y_u 为极限水平位移； p_u 为桩侧土极限水平抗力； a 、 b 为参数。

t - z 曲线采用双曲线模型^[14]，弹簧初始刚度和极限抗力的计算方法如下：

$$k_{svi} = \frac{\pi E}{(1 + \nu) \ln(2r_m/D)} \quad (3)$$

$$t_u = \pi D f_u \quad (4)$$

其中：

$$r_m = 2.5 E_{eq} L (1 - \nu) / E_L \quad (5)$$

式中： k_{svi} 为桩周土竖向弹簧初始刚度； E 为土体弹性模量； ν 为土体泊松比； D 为桩身直径； L 为桩长； E_{eq} 为桩长范围内的土体等价弹性模量； E_L 为桩端土弹性模量； t_u 为桩周土竖向弹簧极限抗力； f_u 为桩周土极限侧摩阻力； r_m 为桩的极限影响半径。

q - z 曲线采用双曲线模型^[15]，初始刚度和极限抗力的计算方法如下：

$$K_{bi} = \frac{DE}{1 - \nu^2} \quad (6)$$

$$Q_u = \frac{\pi}{4} D^2 q_u \quad (7)$$

式中： K_{bi} 为桩尖土竖向弹簧初始刚度； Q_u 为桩尖土竖向弹簧极限抗力； q_u 为桩尖土极限承载力。

1.5 结构缝碰撞模型

结构缝的碰撞行为采用接触单元进行模拟。这种单元只能承受压力，抗拉刚度为零，因此非常适合用于模拟地震过程中相邻结构段间可能发

生的接触和碰撞现象。根据 Jankowski 等^[16]的研究,模拟碰撞时每个间隙单元的抗压刚度可以通过下式计算:

$$K_x = \frac{E_c A_z}{n L_z} \quad (8)$$

$$K_y = \frac{E_c l_j d_m}{n B_m} \quad (9)$$

式中: K_x 、 K_y 分别为沿缝宽方向和垂直缝宽方向的单元刚度; E_c 为混凝土弹性模量; A_z 为纵向主梁的横截面面积; L_z 为主梁的长度; l_j 为锯齿伸出长度; d_m 为混凝土面板的厚度; B_m 为混凝土面板宽度; n 为每条结构缝处的总单元数。

1.6 结构重力二阶效应、土体阻尼与惯性效应以及动水压力

结构重力二阶效应($p-\Delta$ 效应)是指侧向位移 Δ 下竖向荷载 p 产生附加弯矩的现象。OpenSees 软件能够通过特定的建模技术和单元类型考虑柱、桩等竖向支撑构件的重力二阶效应。

桩周土体阻尼由材料阻尼和辐射阻尼组成。材料阻尼通过桩-土非线性弹簧单元在滞回行为中体现;辐射阻尼采用 Gazetas 等^[17]提出的黏滞阻尼模型进行计算,其表达式为:

$$c_r = 2D\rho_s(v_s + v_p) \quad (10)$$

式中: c_r 为黏滞阻尼; ρ_s 为土体密度; v_s 为剪切波速; v_p 为土体 P 波波速。

桩周土体的惯性效应主要表现为附加动土质量,可采用 Gazetas^[18]提出的简化方法进行计算,并将其计入结构动力分析中,以反映桩-土协同运动的影响。计算公式为:

$$m_a = \alpha \rho_s A_p \quad (11)$$

式中: m_a 为单位长度的附加动土质量; α 为无量纲系数; A_p 为桩截面面积。

用附加质量法模拟结构振动引起的水体惯性效应,并结合 Morison 方程^[19]进行水动力计算,其表达式为:

$$m_w = C_m \rho_w \pi D'^2/4 \quad (12)$$

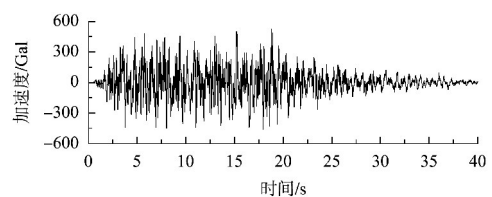
式中: m_w 为单位长度的动水压力附加质量; C_m 为惯性力系数; ρ_w 为水的密度; D' 为构件的迎水面投影宽度。

1.7 瑞利阻尼系数

采用瑞利阻尼模拟地震波传播过程中能量的衰减特性。瑞利阻尼由质量矩阵和刚度矩阵的线性组合构成,其阻尼系数通过两个特定频率及其对应的阻尼比确定。在工程实践中,通常选取结构的基频作为第一频率,地震波的主频作为第二频率,以使该频率区间内的阻尼特性更接近目标阻尼比。因此,选取结构基频(第一频率)0.931 Hz 和地震波主频(第二频率)6.0 Hz 作为控制频率点,并设定对应模态的阻尼比均为 0.05,由此计算得到瑞利阻尼模型的质量比例系数和刚度比例系数分别为 0.506 和 0.002 3。

1.8 地震动加速度时程

东川港位于小江断裂带附近,由于该区域地震活动频繁,其抗震设防烈度设定为 8 度,是高烈度地震区内的重要建设项目。依据《东川港工程场地地震安全性评价报告》^[20]提供的基岩加速度反应谱及其峰值加速度,采用三角级数法合成了分别对应多遇地震、设防地震和罕遇地震的 3 向人工地震动时程。这 3 组地震波分别代表不同的地震强度水平,对应的 50 a 内超越概率分别为 63%(多遇地震)、10%(设防地震)和 2%(罕遇地震),相应的重现期分别是 50、475 和 2 475 a。所有加速度时程的时间步长均为 0.02 s,地震持续时间为 40 s。对于竖向的目标反应谱,采用水平向目标反应谱值的 2/3 作为参考标准。通过上述方法合成的人工地震波,不仅考虑了不同地震强度下的动态反应特性,同时也确保了设计地震动参数能够准确反映东川港所在地区的地震风险特征。限于篇幅,仅给出罕遇地震的地震加速度时程及其反应谱,见图 5。



注:峰值加速度为524 Gal。

a) 水平X向加速度时程

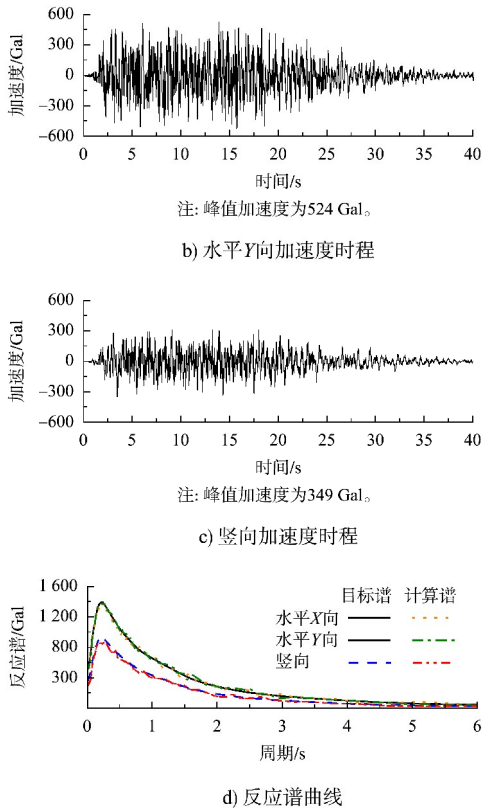


图 5 罕遇地震加速度时程及反应谱曲线
Fig. 5 Acceleration time histories and response spectrum curves of rare earthquake

2 地震反应分析

基于已建立的高桩框架式货运码头精细化三维有限元模型，采用 OpenSees 软件对结构在多遇、设防和罕遇地震动作用下的非线性动力反应进行了时程分析。以下将围绕主要计算结果，重点探讨结构在不同地震强度下的动力反应特征及其抗震性能表现。

2.1 峰值加速度反应

在多遇地震作用下，水平 X 向、水平 Y 向和竖向的最大加速度分别为 125、142 和 128 Gal，对应的放大倍数分别为 1.60、1.82 和 2.16 倍；在设防地震作用下，3 向最大加速度分别为 546、542 和 450 Gal，放大倍数依次为 2.06、2.05 和 2.16 倍；在罕遇地震作用下，最大加速度进一步增至 911 (X 向)、1 060 (Y 向) 和 825 Gal (竖向)，对应放大倍数为 1.74、2.02 和 2.36 倍。上述结果表明，随着地震烈度的提高，结构各方向的加速度反应显著增大，且不同方向的动力反应特性存在差异。

限于篇幅，仅给出罕遇地震作用下结构的峰值加速度分布，见图 6。可以看出，水平 X 向和 Y 向的最大加速度主要集中于梁柱构件，说明这些部位在水平地震作用下承受较大的惯性力；而竖向的最大加速度则多出现在平台面板区域，反映出结构对竖向地震动的敏感性较强，地震能量在楼板体系中较为集中。

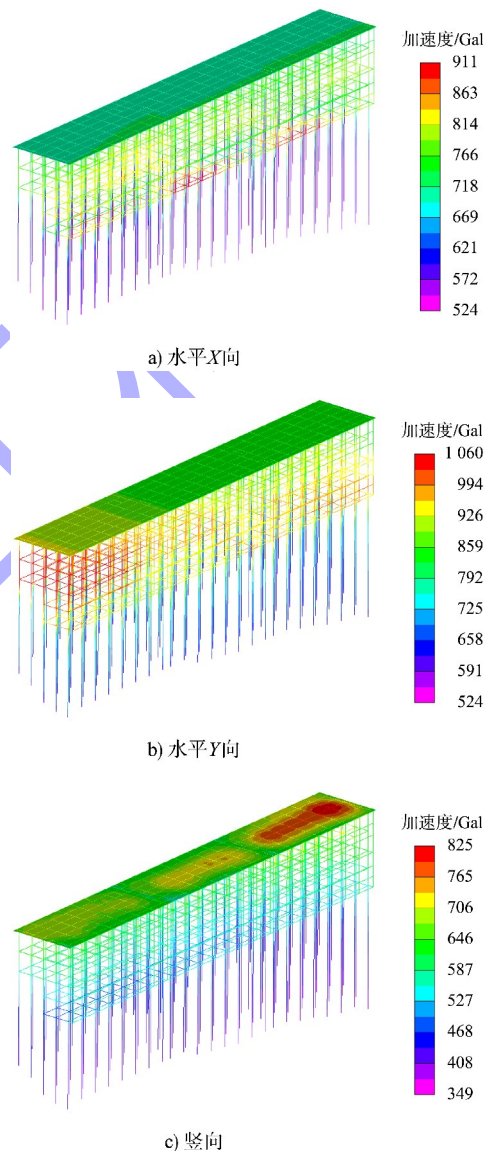


图 6 罕遇地震作用下峰值加速度分布
Fig. 6 Peak acceleration distributions under rare earthquake action

2.2 上部框架层间位移角反应

在多遇地震作用下，第 1~4 层的 X 向最大层间位移角均为 0.000 4，Y 向最大层间位移角分别为 0.000 7、0.000 7、0.000 6 和 0.000 6；在设防

地震作用下, X 向最大层间位移角分别为 0.002 3、0.002 1、0.002 2 和 0.002 0, Y 向分别为 0.002 4、0.002 4、0.001 9 和 0.001 9; 在罕遇地震作用下, X 向最大层间位移角分别为 0.004 9、0.004 5、0.004 6 和 0.004 2, Y 向分别为 0.006 0、0.005 6、0.004 9 和 0.004 7。限于篇幅, 仅给出罕遇地震作用下结构第 1 层的层间位移角时程, 见图 7。可以看出, 3 个结构段在 X 向和 Y 向的层间位移角反应存在一定差异。

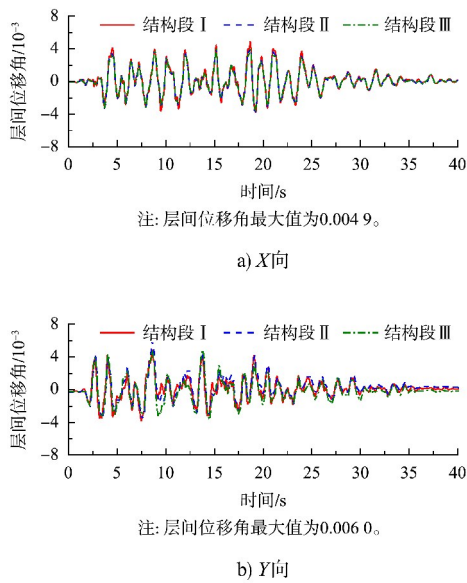


图 7 罕遇地震作用下第 1 层的层间位移角时程
Fig. 7 Time histories of inter story displacement angles of first layer under rare earthquake action

2.3 桩顶位移反应

在多遇地震作用下, 桩顶 X 向和 Y 向的最大位移分别为 0.5 和 0.6 cm; 在设防地震作用下, 分别增至 2.6 和 2.4 cm; 在罕遇地震作用下, 进一步增大至 6.0 和 5.6 cm。上述结果表明, 随着地震强度的增加, 桩基顶部位移呈现非线性增长趋势。限于篇幅, 仅给出罕遇地震作用下典型桩基顶部的水平位移时程, 见图 8。可以看出, 结构段 I 的桩顶水平位移明显小于结构段 II 和 III, 表现出更优的位移控制能力。该差异主要源于各段桩基嵌固条件的不同。受场地地形影响, 结构段 II 和 III 桩顶外露长度较大, 有效嵌固深度减小, 侧向刚度削弱, 导致桩顶位移增大; 相比之下,

结构段 I 桩身埋置较深, 土体约束更充分, 整体抗侧刚度更高, 因而位移反应更小。

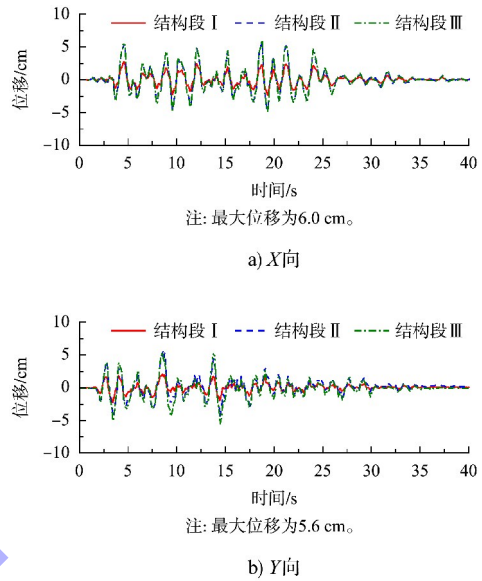
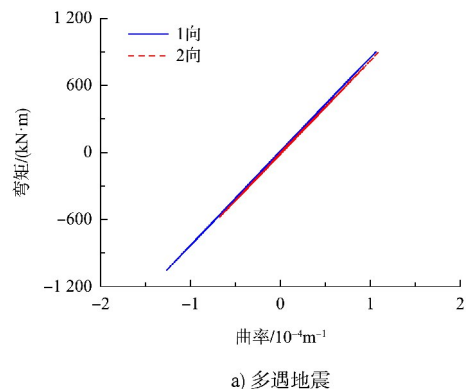


图 8 罕遇地震作用下典型桩顶位移时程
Fig. 8 Displacement time histories of typical pile top under rare earthquake action

2.4 桩身截面弯矩-曲率滞回曲线

典型桩身截面在不同地震水准下的弯矩-曲率滞回曲线见图 9。其中, “1 向”和“2 向”分别代表截面局部坐标系中两个相互正交的方向。可以看出: 多遇地震下滞回曲线接近直线, 弯矩反应小, 表明桩身处于弹性状态; 设防地震下曲线呈非线性, 环面积增大, 结构进入弹塑性阶段, 耗能能力增强; 罕遇地震下滞回环出现明显捏缩和刚度退化, 塑性铰形成并发展, 变形达到峰值; 此外, 受钢筋 Bauschinger 效应影响, 正负向加载曲线不对称, 反向刚度与承载力降低, 尤其在强震下更为显著, 影响结构延性和耗能。



a) 多遇地震

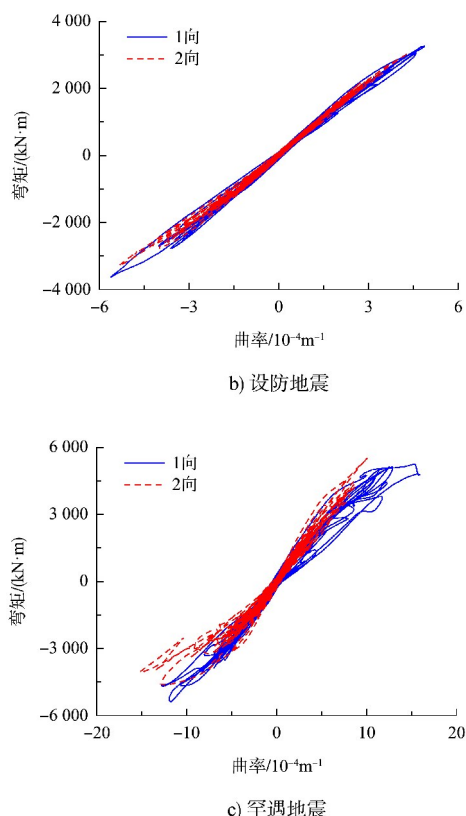


图9 典型桩身截面弯矩-曲率滞回曲线

Fig. 9 Bending moment-curvature hysteretic curves of typical pile body section

3 抗震性能评估

3.1 抗震性能水准和损伤等级划分

随着现代抗震设计理念由“强度主导”向“性能可控”转变，基于性能的抗震设计已成为港口工程结构抗震评估与设计的重要发展方向。在此框架下，美国的 *Seismic Design of Piers and Wharves* 率先提出一套以桩基截面材料应变为控制指标的性能化设计方法，并明确了3个层级的地震作用水准：运营水准地震 (operating level earthquake, OLE)、偶遇水准地震 (contingency level earthquake, CLE) 和设计水准地震 (design earthquake, DE)。其中，OLE 对应 50 a 超越概率为 50% 的地震动，CLE 对应 50 a 超越概率 10%，而 DE 则取 50 a 超越概率 2% 地震动强度的 $2/3$ 。该分级体系不仅体现了对不同风险等级地震事件的功能响应要求，也建立了明确的性能目标映射关系：OLE 旨在实现“最小损伤”，要求结构基本处于弹性工作状态，震后无显著残余变形，具备即时恢复运营的能力；CLE

对应“可控且可修复损伤”，允许关键构件在受控范围内进入塑性阶段，但需确保震后通过有限修复即可恢复功能；DE 聚焦于“生命安全防护”，强调在强震作用下维持结构的整体稳定性与竖向承载能力，防止发生局部或整体倒塌，保障人员安全疏散。值得注意的是，该三水准设防体系与我国的 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[21] 中提出的“多遇地震、设防地震、罕遇地震”3 阶段设防理念具有高度的对应性与协同性：OLE 大致对应多遇地震，CLE 接近设防地震，而 DE 则介于设防地震与罕遇地震之间，体现了不同国家和地区在性能化设计路径上的趋同演化。此外，国际航运协会 (Permanent International Association of Navigation Congresses, PIANC) 发布的 *Seismic Design Guidelines for Port Structures*^[22] 提出了双地震水准框架，即水准 1 (50 a 超越概率 50%) 和水准 2 (50 a 超越概率 10%)，并据此将结构损伤划分为 4 个等级：基本完好、可控损伤、广泛损伤以及完全倒塌。

综合以上国内外抗震标准，可系统整合形成适用于高桩框架式码头的 4 级性能水准体系 (也可称为性能极限状态)：正常使用 (LS1)、可修复使用 (LS2)、生命安全 (LS3) 和防止倒塌 (LS4)。与之对应的损伤状态则细分为 5 个递进等级：基本完好 (DS1)、轻微损伤 (DS2)、中等损伤 (DS3)、严重损伤 (DS4) 和完全破坏 (DS5)。在基于性能的抗震设计框架下，码头结构的抗震性能目标通过地震强度水准与相应性能水准的匹配关系予以明确。通常，在多遇地震作用下，码头结构应满足“正常使用”的性能要求，保持基本弹性状态，无明显损伤，确保震后功能持续运行。当遭遇设防地震，码头结构可进入轻微至中等程度的非线性状态，允许出现可控损伤，其性能目标对应为“可修复使用”或“生命安全”，即震后虽需要维修，但可在较短时间内恢复运营。而在罕遇地震，码头结构可能经历严重损伤，但仍须维持整体稳定性与竖向承载能力，其性能目标应达到“生命安全”或“防止倒塌”，以确保人员安全撤离，避免发

生灾难性坍塌。

3.2 上部框架性能水准量化指标及抗震性能评估

尽管码头上部框架与建筑结构在设计理念上存在差异,但目前国内外尚未制定专门针对高桩框架式码头的性能化设计标准。因此,本文参考 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》中的相关控制指标,并结合许民泽等^[23]的研究成果,针对上部框架引入弹性层间位移角限值 θ_e 与弹塑性层间位移角限值 θ_p 作为关键性能控制参数,并据此确定各性能极限状态对应的层间位移角阈值:正常使用(LS1)取为 θ_e ,可修复使用(LS2)取为 $2\theta_e$,生命安全(LS3)取为 $4\theta_e$,防止倒塌(LS4)取为 θ_p 。根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》, θ_e 取 1/550, θ_p 取 1/50。由此计算得各极限状态对应的最大层间位移角限值,见表 4。该方法实现了性能目标的量化控制,为上部框架的抗震性能评估提供了明确的变形判据。

表 4 最大层间位移角限值

Tab. 4 Limit values of inter story displacement angles

性能水准	极限状态	位移角限值
正常使用	LS1	1/550
可修复使用	LS2	2/550
生命安全	LS3	4/550
防止倒塌	LS4	1/50

将多遇、设防和罕遇地震作用下最大层间位移角计算值与表 4 中对应于 LS1、LS3 和 LS4 的层间位移角限值进行比较,结果见表 5。可以看出,在 3 种地震设防水准下,上部框架的最大层间位移角均未超过限值。据此可判定,该码头上部框架在“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准设防目标下均满足抗震性能要求,具备良好的整体抗震性能,符合相关抗震设计规范的规定。

表 5 最大层间位移角计算值与规范限值对比

Tab. 5 Comparison between calculated maximum inter story displacement angles and code limit values

地震水准	计算值	规范限值	是否满足要求
多遇地震	1/1 429	1/550	满足
设防地震	1/417	4/550	满足
罕遇地震	1/167	1/50	满足

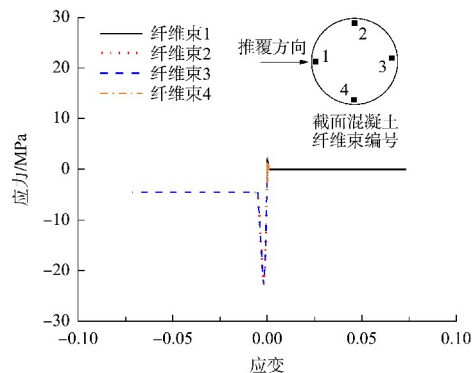
3.3 桩基性能水准量化指标及抗震性能评估

根据 *Seismic Design of Piers and Wharves*, 不同地震水准下对应的混凝土与钢筋应变限值见表 6。为评估码头桩基的抗震性能,对结构在两个正交水平方向(X 向和 Y 向)开展静力推覆分析。典型桩顶截面纤维束的应力-应变关系曲线见图 10,图中同时标注了混凝土与纵向受力钢筋各纤维束的分布位置及编号。在分析过程中,当图 10 中桩顶截面的混凝土压应变或纵向受力钢筋拉应变首次达到表 6 中对应损伤状态的应变限值时,即判定该桩基进入相应的极限状态。此时,结构所对应的桩顶最大水平位移被定义为该损伤状态下的桩基水平位移限值。通过对各结构段在 X 向和 Y 向的基底剪力-桩顶位移关系曲线进行对比分析,最终确定结构段 I 在 Y 向的桩基水平位移限值作为抗震性能评估的控制指标,见图 11 与表 7。其中,图 11 中标注的“线弹性限值”定义为基底剪力-桩顶位移关系曲线中初始线性段结束、刚度开始退化的转折点所对应的桩顶位移,表征桩基由弹性工作阶段向非线性反应阶段过渡的临界状态,用于确定正常使用极限状态(LS1)的判定阈值。

表 6 混凝土与钢筋应变限值

Tab. 6 Strain limit values for concrete and steel bars

地震水准	混凝土应变限值	钢筋应变限值
OLE	0.005	0.015
CLE	0.025	0.06
DE	无限值	0.08



a) 混凝土纤维

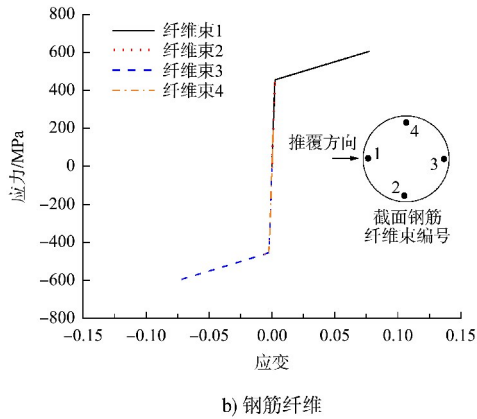


图 10 典型桩顶截面纤维应力-应变关系
 Fig. 10 Stress-strain relationship of fiber in typically pile top section

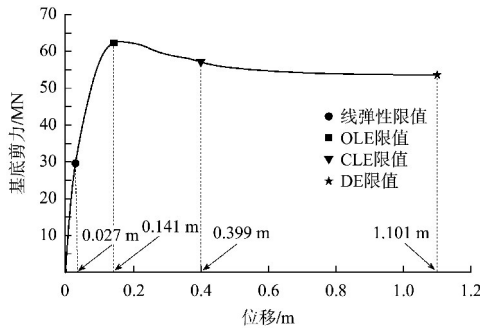


图 11 基底剪力-桩顶位移关系
 Fig. 11 Relationship between base shear force and pile top displacement

表 7 桩顶位移限值

Tab. 7 Limit values of pile top displacement

性能水准	极限状态	位移限值/m
正常使用	LS1	0.027
可修复使用	LS2	0.141
生命安全	LS3	0.399
防止倒塌	LS4	1.101

将多遇地震、设防地震和罕遇地震作用下最大桩顶位移计算值与表 7 中对应于 LS1、LS3 和 LS4 的桩顶位移限值进行比较, 结果见表 8。可以看出, 在这 3 种地震水准下, 计算所得的最大桩顶位移均小于对应性能水准下的位移限值。该结果表明, 码头桩基在不同强度地震作用下均具备足够的变形能力与抗震储备, 其实际反应未超出按相关规范方法确定的性能控制要求, 符合基于性能抗震设计预期。

表 8 最大桩顶位移计算值与规范限值对比

Tab. 8 Comparison between calculated pile top displacements and code limit values

地震水准	位移计算值/m	位移规范限值/m	是否满足要求
多遇地震	0.006	0.027	满足
设防地震	0.026	0.399	满足
罕遇地震	0.060	1.101	满足

4 结语

1) 本文通过三维精细化有限元非线性动力时程分析, 揭示高桩框架式货运码头在不同地震水准下的动力反应特征, 识别其典型破坏模式及关键薄弱部位, 为高烈度区此类结构的抗震设计提供了参考。

2) 结合国内外抗震设计规范, 本文以上部框架层间位移角和桩顶位移为关键性能指标, 提出适用于高桩框架式码头的多水准性能化抗震评价体系及量化控制标准。经实际工程验证, 该体系合理可行, 为同类结构的性能化设计提供了可操作的技术路径。

3) 在多遇、设防和罕遇地震作用下, 该码头上部框架层间位移角和桩顶水平位移均满足各性能水准限值要求, 结构反应可控, 损伤可修, 无失稳或倒塌风险, 全面实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标, 表明其具有良好的抗震性能与安全可靠性。

4) 上部框架层间位移角的性能划分参照我国的 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》, 桩身应变控制标准借鉴美国的 *Seismic Design of Piers and Wharves*, 体现了规范融合的探索。然而, 相关指标的适用性仍需通过更多工程实践、试验数据及数值模拟进一步验证与完善, 以提升评价体系的科学性与普适性。

参考文献:

[1] 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
 Code for seismic design of water transport engineering: JTS 146-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

- [2] 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, 160(6): 1-8.
GAO S F, GONG J X, FENG Y F. Advances 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.
- [3] SHAFIEE D A, DESROCHES R, RIX G J, et al. Three-dimensional wharf response to far-field and impulsive near-field ground motions in liquefiable soils[J]. Journal of structural engineering, 2013, 139(8): 1395-1407.
- [4] VYTINIOTISA A, PANAGIOTIDOU A I, WHITTLE C A J. Analysis of seismic damage mitigation for a pile-supported wharf structure [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2019, 119: 21-35.
- [5] SU L, WAN H P, LUO Y Z, et al. Seismic performance assessment of a pile-supported wharf retrofitted with different slope strengthening strategies[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2020, 129: 105903.
- [6] 许建武, 郭隆洽. 液化天然气高桩码头结构抗震非线性时程分析[J]. 水运工程, 2020(9): 77-84.
XU J W, GUO L G. Seismic non-linear time-history analysis for liquefied natural gas high-pile wharf structure [J]. Port & waterway engineering, 2020(9): 77-84.
- [7] 李哲, 赵丁凤, 潘强, 等. 可液化场地 20 万吨级卸荷式板桩码头地震反应分析[J]. 水运工程, 2023(4): 43-50.
LI Z, ZHAO D F, PAN Q, et al. Seismic analysis of 200,000 tonnage sheet-pile wharf with relieving platform in liquefiable ground[J]. Port and waterway engineering, 2023(4): 43-50.
- [8] 高树飞, 冯云芬, 贡金鑫. 等效阻尼比模型对高桩码头地震位移需求的影响分析[J]. 水运工程, 2022(7): 63-72, 161.
GAO S F, FENG Y F, GONG J X. Influence analysis of equivalent damping ratio models on seismic displacement demand of pile-supported wharf [J]. Port & waterway engineering, 2020(7): 77-84.
- [9] 李金强, 王多银, 余神光. 基于性能的高烈度地区高桩码头结构设计方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8380-8388.
LI J Q, WANG D Y, YU S G. Method of performance-based design for piled wharf structure in high seismic intensity area [J]. Science technology and engineering, 2020, 20(20): 8380-8388.
- [10] 孙艺, 孙英. 美国高桩码头抗震设计规范 ASCE/COPRI 61-14 解读[J]. 水运工程, 2021(1): 73-80.
SUN Y, SUN Y. Interpretation for American seismic design code of pile-supported wharves ASCE/COPRI 61-14 [J]. Port & waterway engineering, 2021(1): 73-80.
- [11] Seismic design of piers and wharves: ASCE/COPRI 61-14[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [12] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees users manual [R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2004.
- [13] 韦领新, 曾章波, 黄华, 等. 地震弱化土石混合体地基单桩 $p-y$ 曲线[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(9): 35-39.
WEI L X, ZENG Z B, HUANG H, et al. A $p-y$ curve of single pole in seismic weakening soil-rock mixture foundation[J]. Low temperature architecture technology, 2023, 45(9): 35-39.
- [14] CARTER D P. A non-linear soil model for predicting lateral pile response[D]. Auckland: University of Auckland, 1984.
- [15] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups [J]. Géotechnique, 1979, 29(4): 423-439.
- [16] JANKOWSKI R, WILDE K, FUJINO Y. Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1998, 27(5): 487-502.
- [17] GAZETAS G, DOBRY R. Horizontal response of piles in layered soils[J]. Journal of geotechnical engineering, 1984, 110(1): 20-40.
- [18] GAZETAS G. Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations [J]. Journal of geotechnical engineering, 1991, 117(9), 1363-1381.