

· 港口 ·



# 多元荷载作用下软基深水高桩码头结构 承载特性研究\*

贺林林<sup>1,2</sup>, 谢院仕<sup>1</sup>, 杜亦忠<sup>1</sup>, 刘洋<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;  
3. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331)

**摘要:** 软基深水高桩码头结构受到恶劣外海环境荷载及复杂工作荷载等多元荷载的共同作用。研究表明, 船舶撞击荷载是该结构水平向控制荷载, 但波浪长期循环荷载作用会引起桩周土体软化, 进而导致码头结构在其它荷载作用下承载特性的劣化。鉴于此, 首先基于 ABAQUS 有限元软件建立了深水高桩码头结构-地基土体相互作用的三维弹塑性有限元模型; 然后, 借助 USDFLD 子程序实现了同时考虑土体强度弱化和刚度衰减的模拟, 进而开展了未考虑土体软化、仅考虑土体强度弱化、仅考虑土体刚度衰减以及同时考虑土体强度弱化和刚度衰减对码头结构承载特性影响的对比分析。研究结果表明, 与未考虑土体软化时撞击荷载作用下码头结构安全系数相比, 仅考虑土体强度弱化时其值降低 14.72%, 仅考虑土体刚度衰减时其值降低 15.28%, 同时考虑土体强度弱化和刚度衰减时其值降低 19.44%, 且考虑土体软化后桩周土体的塑性应变范围明显增大, 极限状态时桩身应力值减小, 结构稳定性显著降低。

**关键词:** 软基深水高桩码头; 多元荷载; 承载特性; 强度弱化; 刚度衰减

**中图分类号:** U656.1; TU431

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2024)06-0032-09

## Bearing characteristics of pile-supported wharf in soft soil ground in deep-water under multiple loadings

HE Linlin<sup>1,2</sup>, XIE Yuanshi<sup>1</sup>, DU Yizhong<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>3</sup>

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** The pile-supported wharf structure in soft soil ground in deep-water is subjected to multiple loads such as environment loads and complex work loads. The research shows that ship impact load is the horizontal control load, yet long-term cyclic wave loads will cause the softening of the soft clay soil around piles, leading to the deterioration of the bearing capacity of the wharf structure under other loads. In view of this, a 3D elastoplastic finite element calculation model of wharf structure-foundation soil is established using ABAQUS, in which both weakening of soil strength and degradation of soil stiffness are considered with the help of the USDFLD subroutine. Furthermore, the comparative analyses of the bearing characteristics of the wharf without considering soil softening, only considering weakening of soil strength, only considering degradation of soil stiffness, and both considering weakening of soil strength and decaying of soil stiffness degradation are carried out. The results show that the safety

**收稿日期:** 2023-09-27

**\*基金项目:** 重庆市自然科学基金专项 (CSTB2023NSCQ-MSX0873)

**作者简介:** 贺林林 (1983—), 女, 博士, 副教授, 从事港口海岸及近海工程结构设计理论及计算方法、土与结构相互作用等方面研究工作。

factor of the wharf under the impact load considering the softening of soil strength is reduced by 14.72% when compared with only considering the weakening of the soil strength, and that is reduced by 15.28% when compared with only considering the decaying of soil stiffness, yet that is 19.44% when compared with both considering weakening of soil strength and decaying of soil stiffness. Besides, the plastic deformation range of the soil around the pile is significantly increased and the stress of pile body decreases slightly in the ultimate state, and the structural stability is significantly reduced.

**Keywords:** pile-supported wharf in soft soil ground in deep-water; multiple loads; bearing capacity; strength weakening; stiffness degradation

随着全球经济贸易的快速发展及港口吞吐量的大幅增加, 码头靠泊船舶逐渐趋向大型化, 而船舶的大型化使得港口建设逐渐向离岸深水海域发展<sup>[1-2]</sup>。离岸深水码头结构所处地基多为软黏土, 高桩码头结构是适用于该软基深水条件下的优良结构形式。然而, 软基深水高桩码头结构不仅要承受由风、浪、流引起的恶劣外海环境荷载, 还要承受船舶撞击荷载与码头地面使用荷载等复杂工作荷载。软基深水高桩码头结构是典型的受到多元荷载共同作用的复杂结构, 而多元荷载作用下软基深水高桩码头结构的受力特点与承载特性尚未进行充分研究。

针对离岸深水码头结构, 宗泽<sup>[3]</sup>、王朝阳<sup>[4]</sup>通过理论分析和数值模拟论证了全直桩码头结构是适用于外海软基、深水、大浪、急流等恶劣环境条件下的高桩码头结构形式。王元战等<sup>[5]</sup>初步研究了该类软基深水高桩码头结构的承载特性, 并指出船舶撞击荷载是该结构的水平向控制荷载。王元战<sup>[6]</sup>和贺林林<sup>[7]</sup>还开展了考虑波浪长期循环荷载作用引起的软黏土强度弱化特性对码头结构水平承载特性影响的研究。胡安峰等<sup>[8-10]</sup>基于已有软黏土刚度衰减规律模型, 建立了可以考虑动偏应力、循环累积孔压影响的刚度衰减规律模型, 利用 ABAQUS 有限元软件开展了海上风电机组单桩基础在长期波浪循环荷载作用下的累积侧向位移研究。李威等<sup>[11]</sup>采用改进的  $t-z$  模型研究循环荷载作

用下桩土界面强度弱化规律。可见, 虽然现有研究文献已指明船舶撞击荷载是软基深水高桩码头结构的水平向控制荷载, 但是在实际工程中, 码头结构受到波浪长期循环荷载作用会引起软黏土强度的弱化和刚度的衰减, 进而导致结构承载特性的劣化, 而现有文献对于软基深水高桩码头结构承载特性的研究仅考虑了船舶撞击荷载或波浪荷载的作用, 并未考虑多元荷载作用对其承载特性的影响。此外, 目前对于软黏土循环软化效应对深水高桩码头结构承载特性的影响也仅单独考虑了土体强度的弱化。但黄茂松等<sup>[12]</sup>通过一系列三轴试验研究指出, 长期循环荷载作用下软黏土强度弱化和刚度衰减都是近海桩基础设计必须考虑的因素。

为此, 本文依托实际工程建立软基深水高桩码头结构-地基土体相互作用的三维弹塑性有限元数值计算模型, 对比研究单一波浪荷载、单一撞击荷载以及波浪荷载与撞击荷载共同作用下码头结构的承载特性。然后, 基于已有试验研究得到的强度弱化与刚度衰减规律模型, 利用 ABAQUS 有限元软件, 借助 USDFLD 子程序, 开发出可以同时考虑土体强度弱化与刚度衰减功能的计算模型。最后, 开展仅考虑土体强度弱化、仅考虑土体刚度衰减以及同时考虑土体强度弱化和刚度衰减后对船舶撞击荷载作用下软基深水高桩码头结构承载特性影响的对比分析, 以期为同类港口与海洋工程提供参考与借鉴。

## 1 有限元计算模型

### 1.1 结构尺寸

本文依托某实际离岸深水港高桩码头结构,选取该码头结构一榀横向排架作为研究对象,采用 ABAQUS 有限元软件建立码头结构-地基土体相互作用的三维弹塑性有限元计算模型进行相关分析。该码头上部结构尺寸为:码头面板厚 0.5 m,横梁尺寸为 1.5 m×1.2 m×42.4 m,纵梁尺寸为 1.5 m×1.5 m×15.0 m,桩帽尺寸为 3.0 m×3.0 m×0.8 m。桩基础为钢管桩,桩长 80 m,首尾桩中心距 36 m,入土深度 45 m,桩壁厚 22 mm,桩径 1.8 m。上部结构为混凝土材料,桩身均采用 Q345 钢管桩,钢管桩及混凝土材料参数见表 1,钻孔所得海底面以下各土层分布情况及强度指标见表 2。

表 1 钢管桩及混凝土材料参数

材料名称	弹性模量/ GPa	泊松比 $\nu$	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	最小屈服 应力/MPa	最小断裂 应力/MPa
钢管桩	210	0.3	7 850	355	510
混凝土	35	0.2	2 500	—	—

表 2 土层参数

软土层名称	海底以下深度/ m	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	黏聚力/ kPa	泊松比 $\nu$	弹性模量/ MPa
1	0.0~13.5	1 785	15	16.3	0.35	4.07
2	13.5~27.0	1 930	34	3.0	0.31	9.50
3	27.0~34.0	2 050	36	5.0	0.28	16.00
4	34.0~42.0	1 900	18	30.0	0.25	18.00
5	42.0~90.0	2 050	36	5.0	0.28	16.00

### 1.2 有限元模型

#### 1.2.1 材料本构选取

高桩码头上部结构为混凝土材料,采用弹性本构模型。桩体材料为钢材,由于依托工程的钢管桩自由长度较长,柔性较大,因此采用基于 Mises 屈服准则的弹塑性本构模型。地基土体采用基于 Mohr-Coulomb 屈服准则的本构模型,岩土材料非关联流动准则通过设置剪胀角  $\psi=0.1^{\circ}$  实现<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.2 钢管桩力学参数等效计算

高桩码头结构钢管桩外径  $D=1.8\text{ m}$ ,壁厚  $t=22\text{ mm}$ 。在对钢管桩进行实体建模计算时,可能会

因网格单元长宽比过大而引起模型计算不收敛、计算结果失真等,因此采取加厚钢管桩壁厚的方式对钢管桩进行建模计算,取钢管桩壁厚为 0.22 m。根据质量等效、抗弯刚度等效、最小屈服应力和最小断裂应力等效原理,计算得出有限元计算模型中的钢管桩密度为  $883.37\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 29.36 GPa,最小屈服应力为 49.63 MPa,最小断裂应力为 71.31 MPa。

#### 1.2.3 桩土接触设置

泥面以下桩与土之间的相互作用在 ABAQUS 有限元软件中通过设置接触对实现。选取刚度较大的钢管桩表面为主面、土体表面为从面,接触形式采用 surface-to-surface contact 接触类型,桩土法向接触力学行为采用“hard” contact 定义,切向接触力学行为采用 Coulomb 摩擦系数定义,摩擦系数为  $\tan(0.75\varphi)$ 。

#### 1.2.4 土体尺寸计算

为降低边界效应对计算结果的影响,土体模型尺寸取  $180\text{ m}\times 15\text{ m}\times 90\text{ m}$ ,且通过计算已验证该模型尺寸继续增大时,结构应力和位移变化极小,可忽略不计,即所选择模型尺寸是合理的。

#### 1.2.5 网格划分及边界条件

有限元网格划分基于主次原则,桩土接触面附近网格适当密集,远离接触部位网格适当稀疏,高桩码头上部结构、钢管桩、土体全部选用三维八节点减缩积分实体单元 C3D8R 进行模拟。高桩码头结构有限元网格单元总数为 3.007 4 万个,其中上部结构单元数量为 1 500 个,钢管桩单元数量为 2 000 个,地基土体单元数量为 2.657 4 万个。基于 ABAQUS 有限元软件建立的码头结构-地基土体相互作用三维弹塑性有限元计算模型边界条件及网格划分如图 1 所示。

#### 1.2.6 地应力平衡

初始地应力的平衡精度将直接影响结构与岩土工程数值分析的准确性,本文采用生死单元法进行地应力平衡<sup>[14]</sup>。地应力平衡结果如图 2 所示,该模型在 U3 方向的整体位移量级在  $10\text{ }\mu\text{m}$  范围内,平衡效果较好,可以进行后续数值分析。

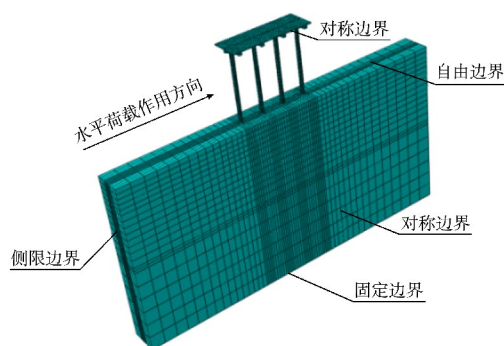


图1 结构-地基土体相互作用三维有限元模型

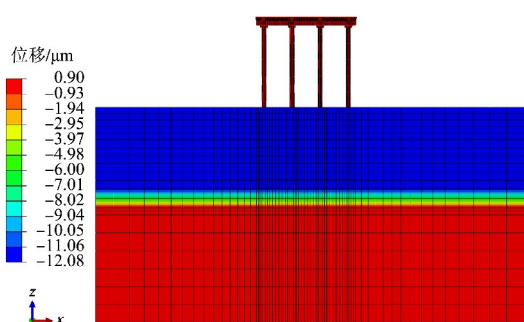


图2 地应力平衡

## 2 码头结构承载特性

### 2.1 设计荷载计算

在进行波浪荷载计算时,选取一组典型的深水波浪条件进行结构计算分析。已知海床泥面高程为-25 m,设计高水位为3.82 m,设计波高为6.07 m,波长为145.54 m,波浪周期为10.5 s。工程中的钢管桩属于小尺度直立桩柱,故可采用Morison方程计算直立桩柱所受的波浪荷载作用<sup>[15]</sup>。钢管桩波浪力计算如图3所示,位于钢管桩任意高度 $z$ 处的一个单位长度的微段受到的水平波浪力按Morison方程进行计算,见式(1),并通过ABAQUS二次开发平台,利用分布荷载子程序DLOAD施加在钢管桩上。

$$f_H = f_D + f_I = \frac{1}{2} C_D \rho D u |u| + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} \quad (1)$$

式中: $f_H$ 为水平波浪力; $f_D$ 和 $f_I$ 分别为黏性力和惯性力; $C_D$ 和 $C_M$ 为水动力系数,分别取1.2和2.0<sup>[16]</sup>; $\rho$ 为水的密度; $D$ 为直立桩柱的直径; $u$ 为水质点的速度, $\dot{u}$ 为水质点的加速度,他们均

与水深有关。在计算中采用Airy波理论确定 $u$ 和 $\dot{u}$ :

$$\begin{cases} u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\omega H}{2} \cdot \frac{\cosh[k(d+z)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \\ \dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\omega^2 H}{2} \cdot \frac{\cosh[k(d+z)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为线性波流体速度势; $x$ 为波浪传播方向, $x$ 轴位于静水面上; $t$ 为时刻; $H$ 为波高; $\omega$ 为圆频率; $d$ 为水深; $z$ 为桩柱距海底高程; $k$ 为波数。

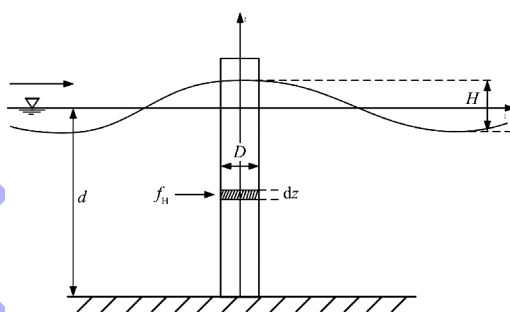


图3 钢管桩波浪力计算

船舶靠泊撞击荷载依照相关文献及规范进行计算<sup>[17-19]</sup>。首先通过荷载规范的动能公式计算船舶有效撞击能,见式(3),然后根据选定的橡胶护舷的力学性能曲线查得船舶撞击力,最后通过分配系数计算单排架下船舶撞击力。工程选用TD-A2500H型橡胶护舷,通过上述步骤计算得到一榀横向排架所受船舶撞击荷载为1 625 kN。高桩码头一榀横向排架受荷如图4所示。

$$E_0 = \frac{\rho}{2} M v_n^2 \quad (3)$$

式中: $E_0$ 为船舶靠岸时的有效撞击能; $\rho$ 为有效动能系数,取0.8; $M$ 为设计船型满载排水量; $v_n$ 为船舶法向靠泊速度,取0.15 m/s。

### 2.2 失稳判别方法

为了便于表征计算结果,定义关键结点A如图4所示。在有限元的计算中,为了明确计算中施加荷载与设计荷载的关系,引入一个表征加载程度的加载系数 $\alpha$ <sup>[20]</sup>,定义为:

$$\alpha = P/P_D \quad (4)$$



式中:  $P$  为有限元计算过程中施加荷载,  $P_D$  为设计荷载。

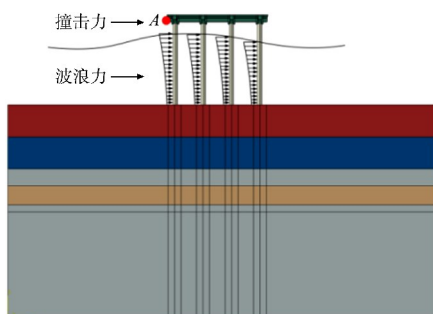
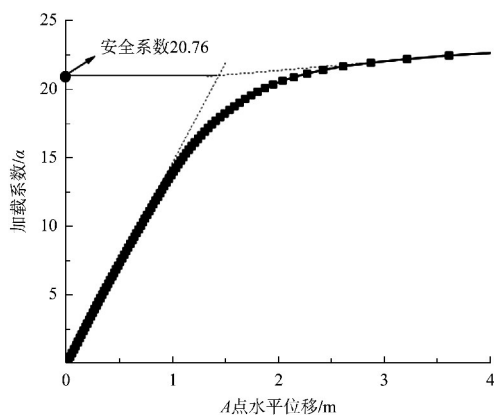


图4 结构关键结点及受荷

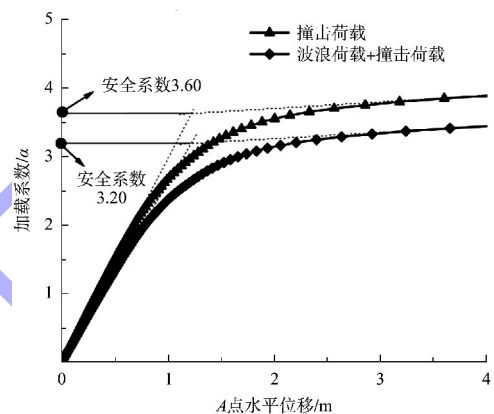
失稳判别标准: 计算结构极限承载性能时采用荷载控制方式, 通过逐级施加外荷载, 得到关键结点 A 的位移-加载系数曲线, 并通过双切线法确定码头结构的安全系数<sup>[21]</sup>。

### 2.3 承载特性分析

由图 5 可知, 仅考虑波浪荷载作用时结构安全系数为 20.76, 即波浪荷载作用对结构的稳定性影响较小; 仅考虑船舶撞击荷载作用时结构安全系数为 3.60, 而当结构受到波浪荷载后再受到船舶撞击荷载作用时, 结构安全系数为 3.20。可见, 考虑波浪荷载先期作用后, 船舶撞击荷载作用下的结构安全系数减小了 11.11%, 即波浪荷载单独作用对码头结构稳定性影响较小, 但是在长期波浪循环荷载作用后再施加其它荷载时, 码头结构安全系数将明显减小, 结构稳定性降低。对于软基深水高桩码头结构, 波浪荷载是典型的环境荷载, 长期波浪循环荷载作用会引起桩周土体发生强度弱化与刚度衰减的软化效应, 进而导致码头结构在其他荷载作用下承载特性的劣化, 即使得其他荷载作用下结构稳定性进一步降低。因此, 需要考虑波浪等循环荷载作用下软土地基强度弱化与刚度衰减特性对软基深水高桩码头结构承载特性影响情况进行深入研究。



a) 波浪荷载作用下



b) 撞击荷载、撞击荷载与波浪荷载共同作用下

图5 不同荷载作用下的位移-加载系数曲线

## 3 土体循环软化规律模型

### 3.1 软黏土强度弱化规律模型

王建华等<sup>[22-23]</sup>对海洋环境下的软黏土进行了大量的循环三轴试验研究, 得出软黏土在不同循环振次、不同静应力水平下的循环强度曲线。考虑到在一次典型风暴浪潮作用下波浪荷载频率约为 0.1 Hz, 作用历时约 3 h, 相当于基础遭受 1 000 次循环荷载作用。因此, 选取破坏标准  $\varepsilon_f = 10\%$  和循环次数  $N = 1\,000$  次对应的循环强度曲线进行相关计算。肖忠<sup>[24]</sup>基于该循环强度曲线和动三轴试验将该强度弱化规律模型扩展至能够计算内摩擦角不为零的情况, 使循环强度弱化规律更具有一般性, 建立了便于数值计算的循环强度公式:

$$\frac{\sigma_{f,cy}}{\sigma_f} = \begin{cases} 0.300 + 1.082 \frac{\sigma_j}{\sigma_f} & (0 \leq \frac{\sigma_j}{\sigma_f} \leq 0.61) \\ 0.897 + 0.103 \frac{\sigma_j}{\sigma_f} & (0.61 \leq \frac{\sigma_j}{\sigma_f} \leq 1) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{f,cy}$  为  $N$  次循环荷载作用后土体的循环强度,  $\sigma_f$  为土体破坏时的静强度,  $\sigma_j$  为土单元的初始静应力。

鉴于本文依托工程所处区域为外海离岸深水海域, 且地基土体为软黏土, 因此选取上述土体循环强度弱化规律模型开展相关研究。

### 3.2 软黏土刚度衰减规律模型

黄茂松等<sup>[25]</sup>借鉴 Yasuhara 等<sup>[26]</sup>对软土建立软化指数与循环次数之间半对数关系的方法, 对三轴试验数据进行分析, 采用动偏应力水平  $D_d = q_d/q_{ult}$  描述软化参数的变化, 提出了新的软黏土刚度衰减规律表达式:

$$\delta_d = 1 - d \ln N = 1 - a D_d \ln N = 1 - a (q_d/q_{ult}) \ln N \quad (6)$$

式中:  $\delta_d$  为软化指数;  $d$  为软化参数;  $N$  为土体循环次数;  $a$  为试验常数, 由黄茂松等通过拟合  $d$  与  $D_d$  得出;  $q_d$  为动偏应力;  $q_{ult}$  为土体不排水抗剪强度。

软黏土刚度衰减规律模型可以反映土体的动应力比、固结偏应力等因素对循环荷载作用下土体刚度衰减的综合影响, 并能较好地模拟出软化指数与循环次数  $N$  之间的非线性关系, 因此选取上述土体刚度衰减规律模型开展相关研究。

### 3.3 强度弱化与刚度衰减规律模型的数值实现

本文基于 FORTRAN 语言和 ABAQUS 二次开发平台, 利用场变量子程序 USDFLD 将软黏土强度弱化规律模型和刚度衰减规律模型分别嵌入有限元数值计算模型中, 应用步骤如图 6 所示, 从而分别实现了土体强度弱化和刚度衰减规律的模型功能。

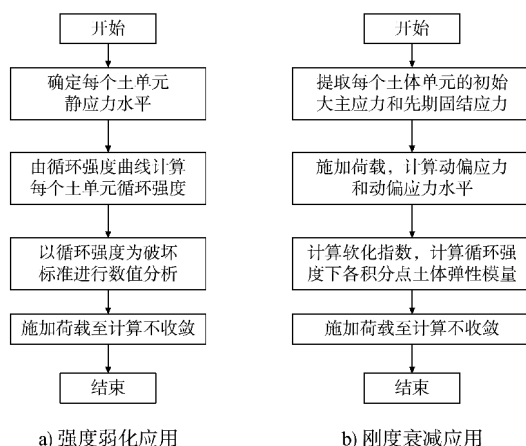


图 6 软化规律模型应用流程

软黏土强度弱化子程序和刚度衰减子程序利用 FORTRAN 语言可以编写在一个 USDFLD 子程序中, 并在 Property 模块中进行以下步骤设置, 即可同时实现土体强度弱化和刚度衰减规律模型的应用。1) 在 General 中选择 User Defined Field 和 Depvar 板块, 即启用用户自定义场变量和非独立变量个数的设置。2) 在 Mohr-Coulomb Plasticity 板块中的 Plasticity 和 Cohesion 选项卡中将 Number of Field Variables 设为 1, 场变量名称为 Field 1, 再设置 Field 1 变化数值分别为 0.1 和 1, 使得运算过程中的材料强度参数能够通过插值获得对应的数据。3) 在 Elastic 板块将 Number of Field Variables 设为 2, 在 Field 1 列设置场变量变化数值分别为 1 和 1, 再在 Field 2 列设置场变量变化数值分别为 0.1 和 1, 使得运算过程中的材料刚度参数能够通过插值获得对应的数据。

上述定义 Field 1 和 Field 2 是为了分别计算材料强度和刚度参数。步骤 3) 中, Field 1 列设置场变量变化数值分别为 1 和 1, 是为了在计算材料强度参数时, 禁止材料刚度参数发生变化。通过以上步骤设置, 即可在 ABAQUS 有限元软件中, 结合 USDFLD 子程序同时实现土体强度弱化和刚度衰减的功能。

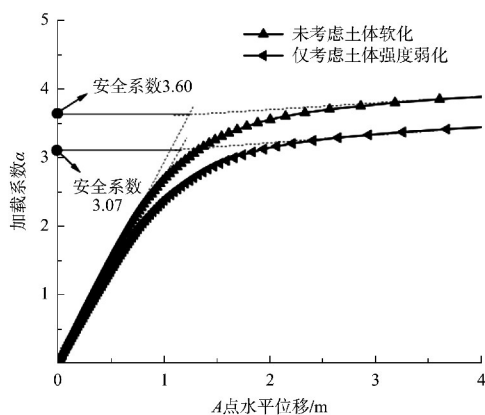
## 4 计算结果分析

### 4.1 仅考虑土体强度弱化或刚度衰减

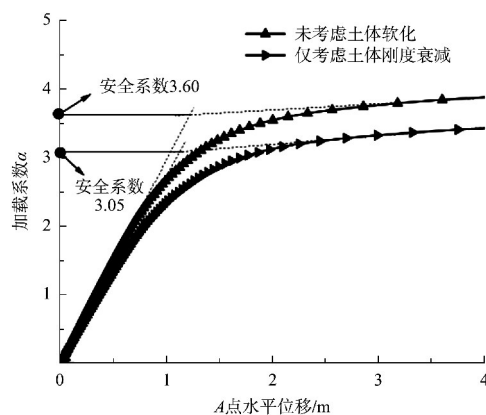
由图 7a)、b)可知,仅考虑波浪长期作用引起的土体强度弱化或刚度衰减时,软基深水高桩码头结构在船舶撞击荷载作用下的安全系数分别为 3.07 与 3.05,与未考虑土体软化时软基深水高桩码头结构在船舶撞击荷载作用下的安全系数 3.60 相比,分别减小了 14.72% 和 15.28%,由此可知,仅考虑土体强度弱化或仅考虑土体刚度衰减时,码头结构安全系数均有一定程度的降低。而在以往计算该类码头结构的水平承载特性时,并未考虑到长期波浪循环荷载造成的土体强度弱化和刚度衰减对码头结构承载特性的影响,这一定程度上高估了该类码头结构的承载能力,偏于不安全。因此,在对软基深水高桩码头结构水平承载特性进行计算时,应考虑土体强度弱化与刚度衰减的影响。

### 4.2 同时考虑土体强度弱化和刚度衰减

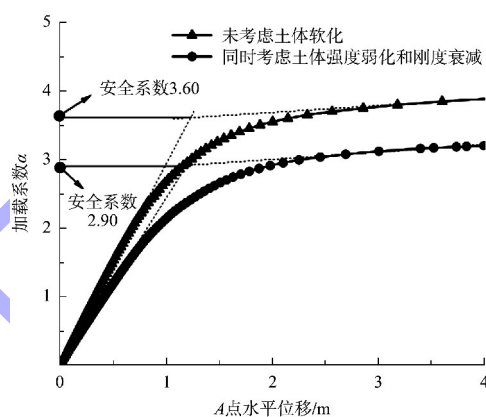
由图 7c)可知,同时考虑长期波浪循环荷载作用引起的土体强度弱化和刚度衰减后,软基深水高桩码头结构在船舶撞击荷载作用下的安全系数为 2.90,比未考虑土体强度弱化和刚度衰减的码头结构安全系数 3.60 减小 19.44%,下降程度更为明显。因此,同时考虑长期波浪循环荷载作用引起的土体强度弱化和刚度衰减是很必要的。表 3 为考虑不同软化情况下的软基深水高桩码头结构安全系数。



a) 仅考虑土体强度弱化



b) 仅考虑土体刚度衰减



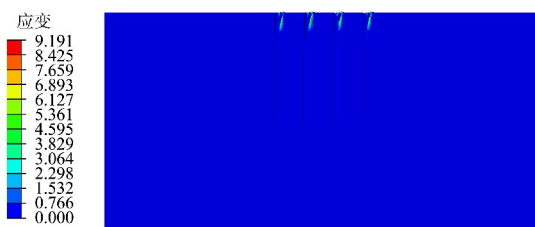
c) 同时考虑强度弱化和刚度衰减

图 7 3 种不同情况下的位移-加载系数曲线

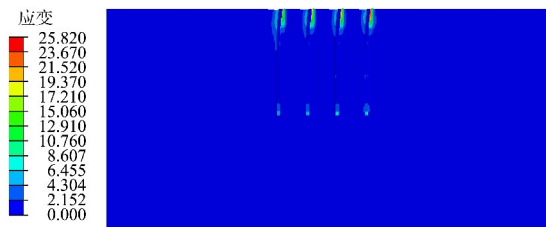
表 3 不同情况下的结构安全系数比较

计算状态	安全系数	降低比率/%
未考虑土体软化	3.60	—
仅考虑土体强度弱化	3.07	14.72
仅考虑土体刚度衰减	3.05	15.28
同时考虑土体强度弱化和刚度衰减	2.90	19.44

由图 8 可知,未考虑土体软化的桩周土体塑性应变的区域范围较小,仅集中在靠近桩土交界处一侧小范围内,同时考虑土体强度弱化和刚度衰减后桩周土体塑性应变的区域明显增大,从桩土泥面处沿桩身横向和轴向延伸,且最大塑性应变值也显著增大。



a) 未考虑土体软化

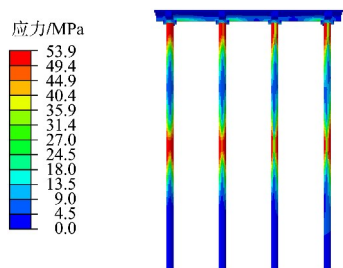


b) 同时考虑土体强度弱化和刚度衰减

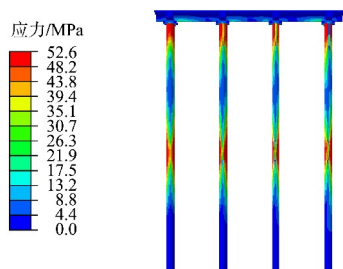
图8 桩周土体塑性应变云图

由图9可知, 未考虑土体软化时, 码头结构的应力值比同时考虑土体强度弱化和刚度衰减时的要大, 这是由于考虑土体强度弱化与刚度衰减效应后, 桩周土体特性减弱, 降低了土体对桩的约束作用。

为更好地研究波浪条件对高桩码头结构承载力的影响, 增加了5组波高分别为1.07、2.07、3.07、4.07、5.07 m的同周期波浪荷载。由图10可知, 随着波高的减小, 撞击荷载作用下的码头结构安全系数增加, 说明不同波高的波浪循环荷载作用引起的土体软化效应对码头结构水平承载力的影响不同。



a) 未考虑土体软化



b) 同时考虑土体强度弱化和刚度衰减

图9 极限状态下的码头结构应力场分布云图

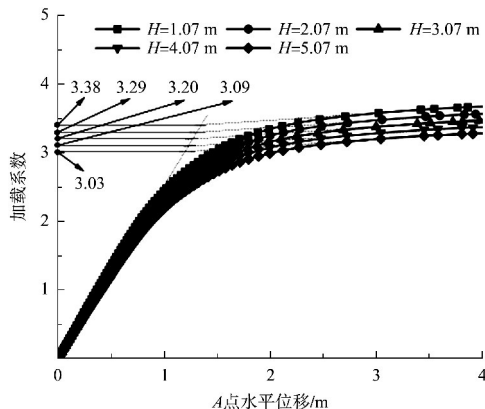


图10 不同波高引起土体循环软化效应的结构安全系数

## 5 结论

1) 考虑波浪荷载先期作用后, 再受到船舶撞击荷载作用时深水高桩码头结构安全系数减小了11.11%, 即长期波浪循环荷载作用会引起桩周土体发生强度弱化与刚度衰减的软化效应, 导致码头结构在其他荷载作用下承载特性的劣化, 使得其结构稳定性进一步降低。

2) 与未考虑土体软化效应相比, 考虑土体强度弱化与刚度衰减后, 深水高桩码头结构在船舶撞击荷载作用下的安全系数分别减小了14.72%和15.28%。可见, 未考虑土体循环软化效应在一定程度上高估了软基深水高桩码头结构的承载能力, 使计算结果偏于不安全, 存在安全隐患。因此, 在进行该类码头结构承载特性分析时, 考虑土体强度弱化与刚度衰减更加符合实际情况。

3) 同时考虑长期波浪循环荷载作用引起的土体强度弱化和刚度衰减效应后, 软基深水高桩码头结构在船舶撞击荷载作用下的安全系数减小了19.44%, 下降程度更为显著, 且桩周土体塑性应变范围也明显增大, 结构破坏时桩身应力值明显减小。因此, 同时考虑长期波浪循环荷载作用引起的土体强度弱化和刚度衰减是很必要的。



## 参考文献:

- [1] 季则舟, 杨兴宴, 尤再进, 等. 中国沿海港口建设状况及发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1211-1217.
- [2] 陈宇, 石运东, 孙熙平. 离岸深水全直桩码头的地震损伤分析[J]. 振动工程学报, 2020, 33(1): 111-119.
- [3] 宗泽. 离岸深水码头全直桩结构分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [4] 王朝阳. 离岸深水全直桩码头动力计算方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [5] 王元战, 贺林林. 离岸深水全直桩码头承载性能有限元分析[J]. 海洋工程, 2013, 31(6): 45-52.
- [6] 王元战, 贺林林. 倒 T 型导管墙桩基防波堤循环承载力有限元分析[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 53-60.
- [7] 贺林林. 离岸深水全直桩码头结构承载特性及简化计算方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [8] 胡安峰, 张光建, 贾玉帅, 等. 刚度衰减模型在大直径桩累积侧向位移分析中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(4): 721-726.
- [9] 胡安峰, 付鹏, 江进华, 等. 软土地基中风机单桩基础累积侧向位移分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(9): 2257-2263.
- [10] 胡安峰, 肖志荣, 江进华, 等. 双向循环荷载下的单桩基础累积侧向位移[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(1): 85-91.
- [11] 李威, 周文杰. 一种可以描述桩端位移累积的新型 Q-z 模型[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 219-225.
- [12] 黄茂松, 李帅. 长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1491-1498.
- [13] SHI L, YUAN Z Y, YUAN Z H, et al. On load-bearing and soil-reacting characteristics of hybrid pile-bucket foundationssubjected to static horizontal loading [J]. Marine structures, 2022, 84(7): 103222. 1-103222. 20.
- [14] 贺林林, 贾瑞, 焦钰祺, 等. 基于 ABAQUS 的港工结构计算模型自动地应力平衡方法研究[J]. 水运工程, 2021(11): 178-185.
- [15] DET NORSKE VERITAS. Design of offshore wind turbine structures: DNV-OS-J101 [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2013.
- [16] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [17] 刘松. 高桩码头排架船舶撞击力分配系数的空间整体研究[J]. 港工技术, 1998(2): 24-34, 60.
- [18] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [19] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 高桩码头设计与施工规范: JTS 167-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [20] 王刚, 陈杨, 张建民. 大圆筒结构倾覆稳定分析的有限元法[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 238-241.
- [21] CHANDA D, SAHA R, HALDAR S. Behaviour of piled raft foundation in sand subjected to combined V-M-H loading[J]. Ocean engineering, 2020, 216: 107596.
- [22] WANG J H, Li C, Moran K. Cyclic undrained behavior of soft clays and cyclic bearing capacity of a single bucket foundation [C]//Proceedings of 15th international offshore and polar engineering conference. Seoul: [s. n. ], 2005: 392-399.
- [23] 王建华, 曲延大. 循环应力作用下饱和软黏土的不固结不排水强度与破坏准则 [J]. 水利学报, 2011, 42(6): 672-677.
- [24] 肖忠. 软土地基上新型防波堤结构的稳定性分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [25] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891-895.
- [26] YASUHARA K, HYDE A F L, TOYOTA N, et al. Cyclic stiffness of plastic silt with an initial drained shear stress [J]. Geotechnique. Pre-failure deformation behavior of geomaterials, 1998: 371-382.

(本文编辑 王传瑜)