

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240206001

考虑软黏土循环弱化效应后超长桩屈曲稳定性分析*

贺林林^{1,2}, 范富贤¹, 梁越^{1,2}, 邓申谊¹, 何景生¹

(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)

摘要: 超长桩因能适应软基深水条件被广泛应用于外海码头建设之中, 然而超长桩由于桩身长度、桩身自由长度均较传统桩基更长, 长细比更大, 存在屈曲失稳的风险。在波浪、海流等循环荷载作用下, 桩侧软黏土会产生强度弱化与刚度衰减的循环弱化效应, 进一步加剧了超长桩发生屈曲失稳的风险。鉴于此, 首先基于ABAQUS有限元软件二次开发平台, 借助USDFLD子程序并采用FORTRAN语言对已有试验获得的软黏土强度弱化与刚度衰减规律计算模型进行数值开发, 并将数值计算结果与离心机试验结果进行对比, 验证了本研究中所建立的软黏土强度弱化与刚度衰减子程序的合理性与可靠性。然后建立了软基深水超长桩数值计算模型, 开展了超长桩屈曲稳定性研究, 明确了超长桩发生屈曲失稳的可能性, 并进一步研究了单独考虑强度弱化、刚度衰减以及同时考虑强度弱化与刚度衰减后对超长桩屈曲稳定性的具体影响情况。研究表明, 超长桩屈曲临界荷载值分别降低了3.5%、7.9%、11.0%, 屈曲失稳时桩身最大剪力分别降低了3.6%、17.1%、22.1%, 表明软黏土循环弱化效应显著增加了超长桩屈曲失稳破坏的风险。研究成果可为同类工程问题研究提供参考借鉴。

关键词: 超长桩; 屈曲失稳; 深水软基; 强度弱化; 刚度衰减

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1281-10

Analysis of Buckling Stability of Super-long Piles Considering Cyclic Weakening Effect of Soft Clay

HE Linlin^{1,2}, FAN Fuxian¹, LIANG Yue^{1,2}, DENG Shenyi¹, HE Jingsheng¹

(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)

Abstract: Super-long piles are widely used in offshore wharf structures due to their adaptability to soft clay grounds and deep-water conditions. However, given their greater pile length and free length compared to conventional pile foundations, super-long piles have a higher slenderness ratio and are at risk of buckling instability. Under cyclic loading from waves and ocean currents, the soft clay around the pile may experience cyclic weakening effects characterized by strength weakening and stiffness degradation, further increasing the risk of buckling instability in super-long piles. In view of this, this study first developed the calculation model for the strength weakening and stiffness degradation patterns of soft clay, derived from existing experimental data based on the ABAQUS secondary development

* 收稿日期: 2024-02-06; 修回日期: 2024-04-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52379097)、重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0873)资助

作者简介: 贺林林(1983—), 女, 副教授, 硕导, 博士。主要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研究。E-mail: helinl@126.com

platform and with the help of USDFLD subroutine and FORTRAN language. The numerical results were then compared with centrifuge test results, validating the rationality and reliability of the established subroutine for soft clay strength weakening and stiffness degradation. Subsequently, a numerical calculation model of super-long piles in deep-water soft clay grounds was established to investigate the buckling stability of super-long piles. This study clarified the possibility of buckling instability and further investigated the specific effects on buckling stability under three scenarios: considering strength weakening alone, stiffness degradation alone, and the combined impact of strength weakening and stiffness degradation. The results showed that the critical buckling load of super-long piles decreased by 3.5%, 7.9%, and 11.0%, respectively, under these three scenarios. The maximum shear force in the pile at buckling instability decreased by 3.6%, 17.1%, and 22.1%, respectively, indicating that the cyclic weakening effect of soft clay significantly increased the risk of buckling instability failure of the super-long piles. The findings can provide a valuable reference for research on similar engineering problems.

Keywords: super-long piles; buckling instability; deep-water soft clay grounds; strength weakening; stiffness degradation

0 引言

随着全球经济贸易的快速发展,港口吞吐量逐年大幅增加,促进了船舶的大型化发展,船舶大型化要求港口建设向离岸深水发展^[1-2]。而离岸深水港建设往往需要面临恶劣外海环境、软基及深水条件,钢管桩因能较好地满足上述建设条件,且承载力高、对生态环境影响小,成为解决该类码头建设的优选基础型式之一^[3]。然而,为了满足结构稳定性要求,桩基入土深度通常可达50 m以上;又由于大型船舶吃水深度大、干舷高度高,桩身自由长度必须较长才能满足工程建设与正常使用的要求,在实际工程中,桩身自由长度通常可达30 m以上;因此,软基深水码头桩基础是桩身长度与桩身自由长度均较长的超长桩^[4-5],尤其桩身自由长度较传统桩基显著加长。

此外,软基深水超长桩受到恶劣外海环境荷载和多种形式工作荷载的共同作用,受荷情况十分复杂。其中,竖向力主要包括:上部结构(面板、纵/横梁等大尺寸厚重混凝土结构)及桩体自身重量、码头地面使用荷载(重型起重设备及堆货荷载等),以及桩身中下部的桩侧摩阻力;水平力主要包括:作用于桩身上部的船舶撞击荷载、作用于桩身中部的长期波浪循环荷载,以及作用于桩身下部的桩侧土抗力。可见,软基深水超长桩是典型承受多元荷载共同作用的桩基础形式。多元荷载共同作用以及

波浪循环荷载长期作用引起的土体循环弱化效应均会导致桩基实际受力变形情况以及失稳破坏模式更为复杂,超长桩多元受荷情况及复杂受力变形特性示意图如图1所示。

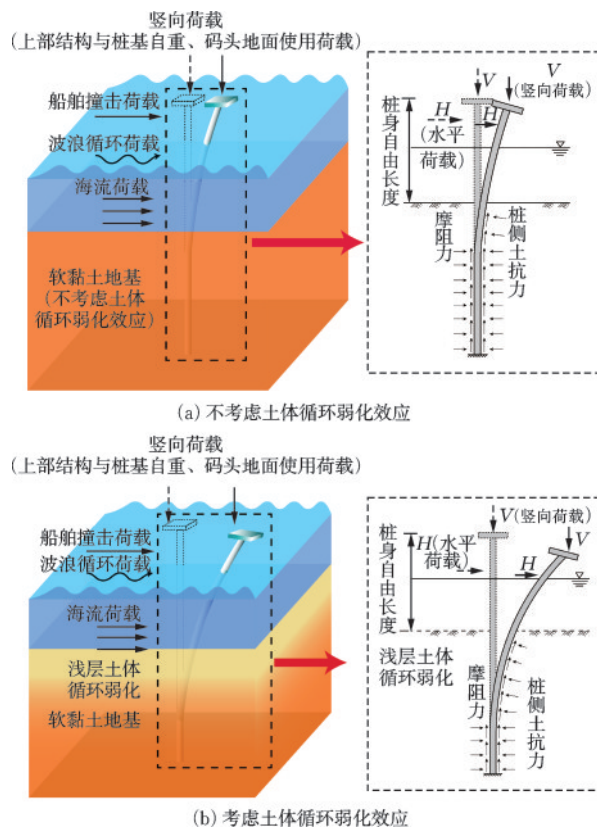


图1 超长桩多元受荷情况及复杂受力变形特性示意

Fig.1 Schematic diagram of multiple-load conditions and complex mechanical deformation characteristics of super-long piles

目前国内外学者针对桩基的沉降破坏与弯曲失稳开展了较多研究,而关于桩基屈曲失稳破坏研究较少^[6-7]。但是K. Fleming等^[8]指出当桩建在软土层内或桩的自由长度过长时,桩的设计需要考虑屈曲失稳问题。大量试验研究也表明,当桩身自由长度较长时,尤其是在软弱土层中的桩基础,极有可能产生屈曲失稳破坏,导致突发的结构强度和功能失效,给工程建设与运营造成巨大的安全隐患和经济损失^[9-11]。S. Bhattacharya^[6]指出屈曲是一种不稳定的失效机制,即达到临界荷载时就会突然发生,然后S. Bhattacharya等^[12]、J. A. Knappett等^[13]进行了桩基的离心模型试验,观察了液化土壤中桩的屈曲破坏机制,研究表明轴向荷载作用下长细比是桩基发生屈曲失稳破坏的关键参数。W. El Kamash等^[14]采用Flac3D建立三维数值模型来研究端承桩的屈曲行为,研究了土体刚度和抗弯刚度对端承桩在加载和卸载两种情况下的屈曲受力性能的影响。本文作者^[15]虽已初步明确了屈曲失稳的确是超长桩可能发生的一种失稳破坏模式,但尚未开展考虑波浪循环荷载作用引起的土体循环弱化效应对超长桩屈曲承载特性和失稳破坏模式的复杂影响情况。而黄茂松等^[16]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。吴宜鹏等^[17]也采用ABAQUS建立软土深埋式大圆筒结构数值模型,发现考虑软土应变软化效应时,大圆筒结构的承载力明显降低。

鉴于此,本文首先基于ABAQUS有限元软件二次开发平台,借助USDFLD子程序并采用FORTRAN语言对已有试验获得的软黏土强度弱化与刚度衰减规律计算模型进行数值开发,并与离心机试验结果进行对比验证。然后建立软基深水超长桩屈曲稳定性分析数值计算模型,在已明确超长桩可能发生的屈曲失稳破坏的基础上,进一步研究单独考虑软黏土强度弱化、刚度衰减以及同时考虑软黏土强度弱化与刚度衰减对超长桩的屈曲稳定性具体影响情况。

1 软黏土强度弱化与刚度衰减理论规律模型

1.1 饱和软黏土土体强度弱化规律模型

K. H. Andersen等^[18]通过软黏土三轴试验建立

了循环强度的计算公式,即在一定循环次数荷载作用下,土体达到破坏标准时作用在剪切面上的初始静剪应力和循环动剪应力之和,如式(1)所示。其中,土体静强度是土体在静荷载的作用下的土体抗剪强度,土体循环强度是静荷载和一定循环次数的低频循环荷载作用下的土体抗剪强度。

$$\tau_{f,d} = (\tau_s + \tau_d)_f \quad (1)$$

式中, $\tau_{f,d}$ 为 N 次循环荷载作用后土体的循环强度; τ_s 为土体静强度; τ_d 为土体循环强度;下标 f 表示达到破坏标准时。

J. Wang等^[19]通过对海洋环境下的软黏土进行大量动三轴试验得出了不固结不排水条件下的软黏土循环强度曲线,其中选取的破坏标准 ϵ_f 和循环次数 N 分别为10%和1000次,且得到的循环强度曲线可以进行较好的拟合,肖忠^[20]基于此建立了拟合后的循环强度计算公式,如式(2)。鉴于该弱化规律模型已被多名学者^[20-21]认可采纳并进行考虑软黏土强度弱化后海工建筑物的承载能力分析,因此本文拟采用该规律模型开展考虑软黏土强度弱化后软基深水超长桩屈曲承载能力研究。

$$\frac{\tau_{f,d}}{\tau_f} = \begin{cases} 0.300 + 1.082 \frac{\tau_j}{\tau_f}, & 0 \leq \frac{\tau_j}{\tau_f} \leq 0.61 \\ 0.897 + 0.103 \frac{\tau_j}{\tau_f}, & 0.61 \leq \frac{\tau_j}{\tau_f} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, τ_f 为土体破坏时的静强度; τ_j 为土单元的初始静应力。

1.2 饱和软黏土土体刚度衰减规律模型

K. Yasuhara等^[22]建立了软化指数与循环次数之间关系的半对数表达式:

$$\delta_d = 1 - d \lg N \quad (3)$$

式中, δ_d 为软化指数; N 为循环次数; d 为软化参数。

黄茂松等^[16]通过对循环荷载作用下刚度衰减特性进行分析,发现软化参数 d 是可以反映有效固结应力、动应力和静偏应力影响的参数。由于土体抗剪强度 q_{ult} 已经考虑到有效固结应力和固结静偏应力的因素,因此可以采用动偏应力水平 D_d 来描述软化参数的变化,其中动偏应力水平 D_d 由式(4)得来,黄茂松得到软化参数与动偏应力水平的线性关系,经拟合得到式(5)。

$$D_d = q_d / q_{ult} \quad (4)$$

式中, q_d 为动偏应力; q_{ult} 为土体抗剪强度。

$$d = a D_d \quad (5)$$

式中, a 为试验参数, $a=0.166$; D_d 为动偏应力水平。

基于此, 得到软化指数 δ_d 与动偏应力水平、循环次数的关系, 如式(6)。鉴于该软黏土刚度衰减规律模型可以较好地模拟出软化指数 δ_d 与循环系数 N 之间的非线性关系, 并能反映土体的动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, 本文拟采用该规律模型开展考虑软黏土刚度衰减后超长桩屈曲承载能力研究。

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

2 ABAQUS 子程序的二次开发与验证

2.1 子程序的二次开发

基于 ABAQUS 二次开发平台采用 FORTRAN 语言将上述软黏土强度弱化和刚度衰减的规律模型编写入 USDFLD 子程序, 然后将该子程序嵌入到数值计算模型中。软黏土强度弱化与刚度衰减的循环弱化效应具体实现思路如下:

(1) 建立三维有限元模型, 进行桩土系统地应力平衡, 输出土体单元的初始静剪应力 τ_j 和大主应力以及小主应力即 $\sigma_1^{(1)}$ 和 $\sigma_3^{(1)}$ 。

(2) 桩顶施加循环荷载, 输出新的土体单元的大主应力 $\sigma_1^{(2)}$ 和小主应力 $\sigma_3^{(2)}$, 而且加载过程中时刻提取着土体单元的静应力 τ_s 与土体单元的循环强度 $\tau_{f,d}$ 。

(3) 将输出的 $\sigma_3^{(1)}$ 作为土体单元的围压水平, 将提取的 $\sigma_1^{(2)}$ 与 $\sigma_1^{(1)}$ 计算出差值, 即为土体单元受到的动偏应力 q_d , 最后将提取的这些状态变量, 代入到上述的强度弱化与刚度衰减计算模型, 从而实现循环荷载作用下软黏土的循环弱化特性。

2.2 USDFLD 子程序二次开发验证

为验证基于 USDFLD 子程序二次开发的考虑软黏土强度弱化与刚度衰减计算程序的有效性与正确性, 选取文献[23]中的离心机试验结果进行对比分析。在 ABAQUS 中建立的数值模型单桩尺寸和土样参数与离心机试验中采用的单桩原尺寸和土样参数一致, 具体数值如下: 单桩尺寸高度为 4.5 m, 直径为 0.6 m, 埋入土中深度为 3 m。土体模型边界至桩身轴线的距离取 15 倍桩径即 9 m, 土体垂直方向长度取 2 倍的入土深度即 6 m, 土体区域足够大, 可以避免边界效应的影响。土体侧向边界分

别约束 X 与 Y 方向位移, 土体底部约束 3 个方向的平移, 针对试验中相关尺寸建立的数值计算模型如图 2 所示。

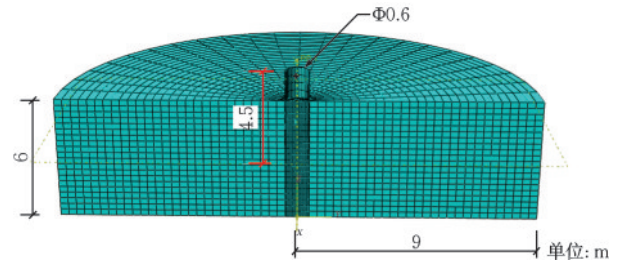


图 2 USDFLD 子程序验证计算模型示意

Fig.2 Validation calculation model of USDFLD subroutine

土体本构的设置参照文献[24]的做法, 把饱和和不排水黏土假定为理想弹塑性材料, 满足 Tresca 屈服准则, 泊松比 $\nu=0.49$ 。土体的不排水抗剪强度 $s_{u,z}$ 随土体深度变化, 如式(7)所示。

$$s_{u,z} = 2.2 + 3.3z^{0.9} \quad (7)$$

式中, z 为距离土体上表面的深度(m); $s_{u,z}$ 为距土表以下 z 深度土的不排水抗剪强度(kPa)。

经过对桩头施加周期为 300 s、幅值为 0.075 m 的双向循环位移, 共循环 20 次之后提取每次循环桩头达到峰值位移时的桩头反力进行无量纲化处理并与离心机试验结果对比, 对比结果如图 3 所示。可见, 数值计算结果与离心机试验结果比较吻合, 验证了基于 USDFLD 子程序二次开发的考虑软黏土强度弱化与刚度衰减计算程序的有效性与正确性, 并且考虑土体循环弱化比不考虑土体循环弱化的数值计算结果与试验数据更为接近, 也说明了进行循环荷载作用下软黏土中桩基承载特性分析时考虑土体循环弱化效应的必要性。

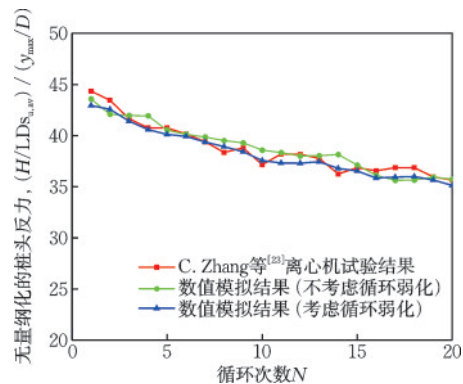


图 3 单桩离心机试验与数值模拟结果对比

Fig.3 Comparison between centrifuge test and numerical simulation results of single pile

3 有限元计算模型

为探明软黏土循环弱化效应对超长桩屈曲稳定性影响情况,选取典型软基深水码头超长钢管桩作为研究对象,桩身采用壁厚 22 mm、 $\Phi 1\ 800$ mm 的 Q345 钢管桩,桩长 90 m,其中自由高度 L_0 为 40 m,桩基入土深度 L_u 为 50 m。软黏土土体参数则取桩基埋深 25 m 处的不排水抗剪强度表征整个土体的抗剪强度进行简化分析^[25],钢管桩和土体材料参数见表 1。

表 1 钢管桩及土体材料参数

名称	弹性模量/MPa	泊松比 ν	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	最小屈服应力/MPa	最小断裂应力/MPa	黏聚力/kPa
钢管桩	2.1×10^5	0.3	7 850	355	510	/
饱和软黏土	15	0.49	1 933	/	/	30

材料本构选取:桩体材料为钢材,由于该钢管桩自由长度较长,结构柔性较大,相同幅值荷载作用下结构变形明显增大,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。

桩土接触设置:桩-土相互作用在 ABAQUS 有限元软件中通过设置接触对实现,在接触对的设置中,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 0.25^[26]。

边界条件及网格划分:土体模型边界水平方向取 15 倍桩径,即 27 m,竖直方向长度取 2 倍的入土深度,即 100 m。对模型土体底部采取全部约束 ($U_1=U_2=U_3=0, UR_1=UR_2=UR_3=0$),对模型土体两侧分别进行 X 方向的约束 ($U_1=0$) 与 Y 方向的约束 ($U_2=0$)。为了综合考虑计算效率和计算精度,有限元模型网格均采用 C3D8R 三维八节点减缩积分实体单元,桩土数值模型有限元网格单元总数为 31 160 个,其中钢管桩单元数量为 376 个,地基土体单元数量为 30 784 个,数值计算模型的网格划分结果如图 4 所示。

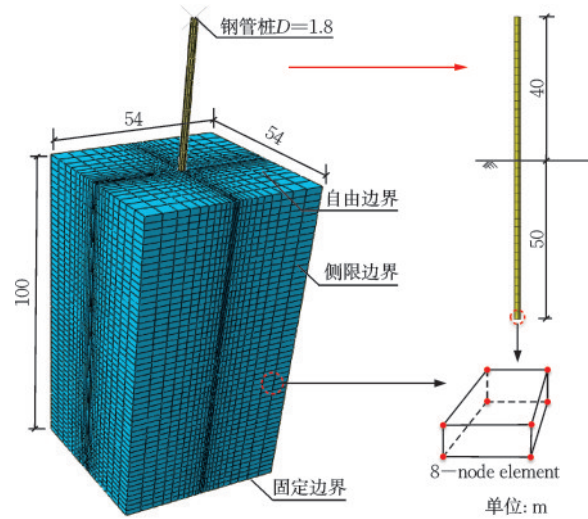


图 4 超长桩数值计算模型网格示意

Fig.4 Mesh diagram of numerical calculation model for super-long pile

地应力平衡:初始地应力的平衡精度将直接影响数值分析的准确性,本文采用笔者提出的设置生死单元的方法对超长桩-软黏土三维有限元计算模型进行地应力平衡的简便方法进行地应力平衡^[27],结果如图 5 所示,可见,该模型地应力平衡效果良好。

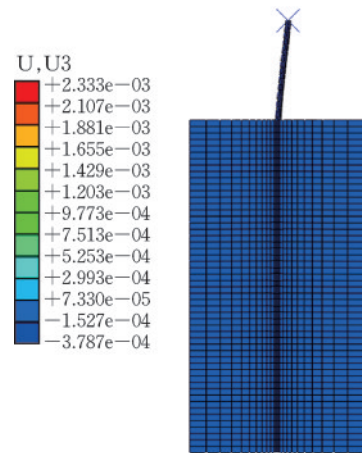


图 5 超长桩-软黏土地应力平衡结果

Fig.5 Results of in-situ stress balance between super-long pile and soft clay

荷载条件:海洋桩基经常会受到波浪往复荷载、风荷载、机器动荷载及人工激振等动力荷载作用^[28],这里将实际的不规则波以理想的正弦波来代替^[29],为了更好地模拟软黏土软化效果,采用幅值曲线的双向循环拟静力加载方式和荷载控制的方法,荷载幅值选取 $30\% H_{ult}$ ^[30],周期 T 为 5 s,图 6 为采

用静力通用分析方法得到的桩顶水平荷载—横向挠度图,可以看到软基深水超长桩的极限水平荷载 H_{ult} 为 600 kN。超长桩屈曲分析时先用 Buckle 分析步做线性屈曲分析,再用 Riks 分析步做后屈曲分析。

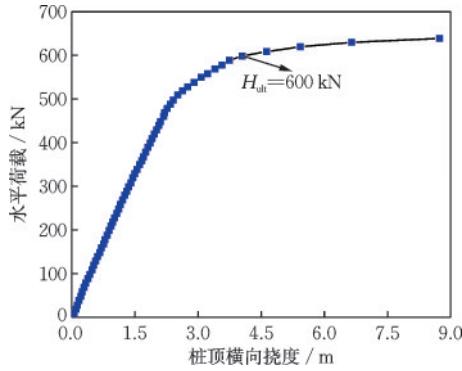


图6 水平荷载—桩顶横向挠度曲线

Fig.6 Horizontal load—lateral deflection curve of pile top

4 结果分析

4.1 软基深水超长桩屈曲失稳机制研究

为阐明软基深水超长桩屈曲失稳机制,采用第3节中的数值计算模型和 Riks 弧长法进行分析。图7为采用 Riks 弧长法进行屈曲稳定分析时桩顶竖向荷载—桩顶横向挠度关系曲线图,图8为采用静力通用分析法进行沉降稳定分析时桩顶竖向荷载—桩顶竖向沉降关系曲线图。通过对比分析,在屈曲稳定分析中,横向挠度随着桩顶竖向荷载的增加而不断增大,超长桩的平衡路径从直线逐渐变弯曲,表明桩在初始弹性变形后开始发生弹塑性变形。当桩顶竖向荷载达到 7 797 kN 时,虽然竖向荷载增加很小,但桩顶横向挠度突然增大直至破坏,即超长桩基发生屈曲失稳破坏。因此,屈曲破坏模式也是深水软土地基中超长桩的一种可能的破坏模式。参照文献[31-32]对于确定桩极限承载力的做法,本文利用图7平衡路径曲线上水平位移突然增加的起点 A,得出超长桩屈曲稳定分析的临界屈曲荷载 $P_{cr} = 7\,797\text{ kN}$ 。而由图8平衡路径曲线上竖向变形突增的起点 B 为沉降稳定分析中超长桩的极限承载力,得 $P_{ult} = 29\,885\text{ kN}$ 。可得,沉降破坏模式下的 P_{ult} 远大于屈曲破坏模式下的 P_{cr} ,即超长桩在发生沉降失稳之前已发生屈曲失稳。进一步说明屈曲破坏模式是超长桩的一种可能的失稳破坏模式。

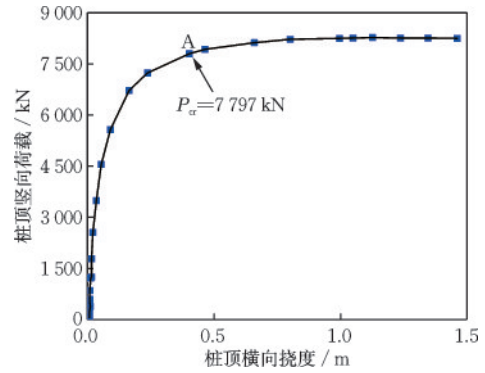


图7 桩顶竖向荷载—桩顶横向挠度曲线

Fig.7 Vertical load—lateral deflection curve of pile top

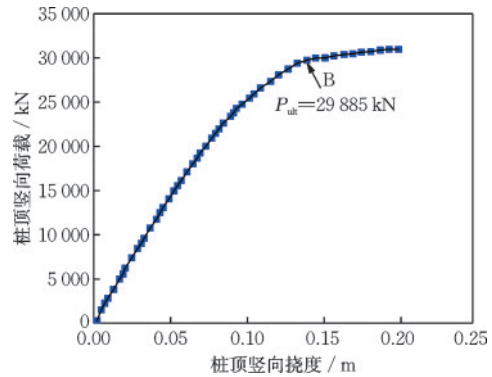


图8 桩顶竖向荷载—桩顶沉降曲线

Fig.8 Vertical load—settlement curve of pile top

4.2 土体循环弱化对超长桩屈曲承载特性影响研究

由4.1节分析可知,屈曲失稳的确是超长桩的一种可能的失稳破坏模式。而在波浪、海流等长期循环荷载作用下,桩侧软黏土会产生循环弱化效应,进一步加剧超长桩发生屈曲失稳的风险。为了明确土体循环软化效应对超长桩屈曲承载特性的具体影响情况,以下分别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,软基深水超长桩屈曲承载特性研究。

4.2.1 仅考虑土体强度弱化对超长桩屈曲承载能力影响分析

图9为考虑软黏土土体强度弱化前、后超长桩屈曲承载能力分析对比图,由图可知,当考虑循环荷载作用导致的软黏土强度弱化后,超长桩的屈曲临界荷载值 P_{crs} 为 7 529 kN。可见考虑饱和软黏土强度弱化后,软基深水超长桩的屈曲承载能力会有一定的降低,屈曲临界荷载值减小了 3.5%。图10为考虑软黏土土体强度弱化前、后超长桩达到屈曲

临界状态时桩身的剪力图,由图可知,超长桩在土体强度弱化前桩身最大剪力值为 356.6 kN,在土体强度弱化后桩身最大剪力值为 343.6 kN,相比减少了 3.6%。桩侧软黏土强度弱化后土体的黏聚力降低,土体的抗剪强度下降,桩侧土体抵抗桩基发生屈曲失稳变形能力下降,从而超长桩的屈曲临界荷载值降低,桩身最大剪力随之降低。

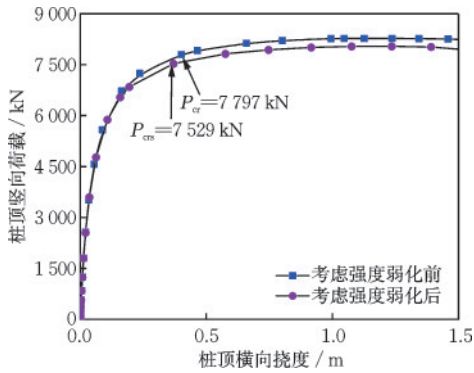


图9 土体强度弱化前、后屈曲承载力对比

Fig.9 Comparison of buckling bearing capacity before and after soil strength weakening

17.1%。可见,考虑软黏土刚度衰减后超长桩的屈曲承载能力下降明显,比土体强度弱化对超长桩屈曲承载能力的影响要大,进一步说明了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,目前多数研究主要关注软黏土土体强度弱化而忽略了刚度衰减对结构物稳定性影响的做法是不全面的。

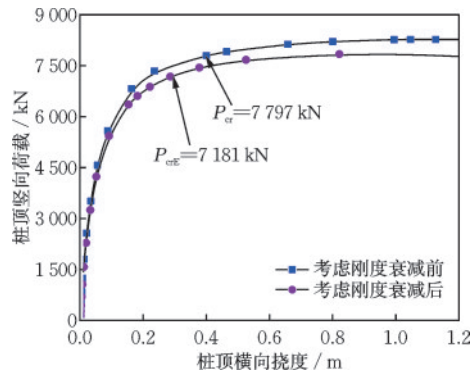


图11 土体刚度衰减前、后屈曲承载力对比

Fig.11 Comparison of buckling bearing capacity before and after soil stiffness degradation

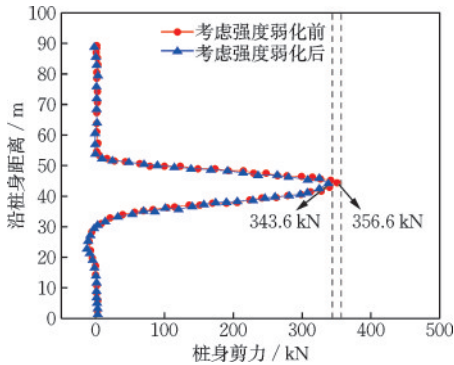


图10 土体强度弱化前、后桩身剪力对比

Fig.10 Comparison of pile shear force before and after soil strength weakening

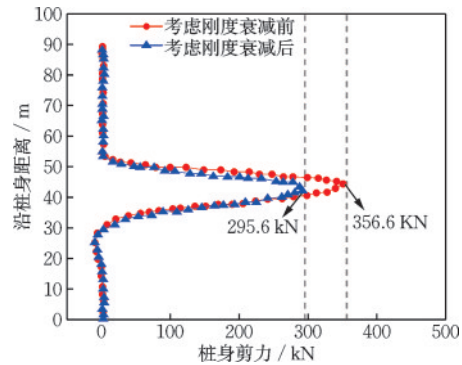


图12 土体刚度衰减前、后桩身剪力对比

Fig.12 Comparison of pile shear force before and after soil stiffness degradation

4.2.2 仅考虑土体刚度衰减对超长桩屈曲承载力影响分析

图 11 为考虑软黏土土体刚度衰减前、后超长桩屈曲承载力分析对比图,由图可知,当考虑循环荷载作用导致的软黏土刚度衰减后,超长桩的屈曲临界荷载值 P_{cr} 为 7 181 kN。可见考虑饱和软黏土刚度衰减后,软基深水超长桩的屈曲承载能力会产生一定程度的降低,屈曲临界荷载值减幅减小了 7.9%。图 12 为土体刚度衰减后超长桩达到屈曲临界状态时桩身的剪力图,由图可知,在土体刚度衰减后桩身最大剪力值为 295.6 kN,比衰减前减少了

4.2.3 同时考虑土体强度弱化与刚度衰减对超长桩屈曲承载力影响分析

基于上述两节分析已知软黏土土体强度弱化与刚度衰减均会对超长桩屈曲特性产生不利影响,但是实际工程中,土体强度弱化与刚度衰通常是同时发生的,因此,本节开展同时考虑软黏土的强度弱化与刚度衰减效应下超长桩屈曲承载特性研究。

图 13 为同时考虑软黏土强度弱化和刚度衰减前、后超长桩屈曲承载力分析对比图,由图可知,同时考虑软黏土强度弱化和刚度衰减后超长桩的屈曲临界荷载值 P_{cr} 为 6 939 kN,屈曲临界荷载降低

明显,减幅达到了11.00%。图14为同时考虑软黏土强度弱化和刚度衰减前、后超长桩达到屈曲临界状态时桩身的剪力对比图,由图可知,同时考虑软黏土强度弱化和刚度衰减后桩身最大剪力值为277.8 kN,比循环弱化前减小了22.1%。

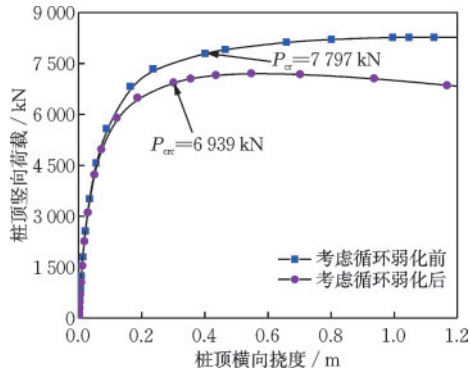


图13 土体循环弱化前、后屈曲承载能力对比

Fig.13 Comparison of buckling bearing capacity before and after soil cyclic weakening

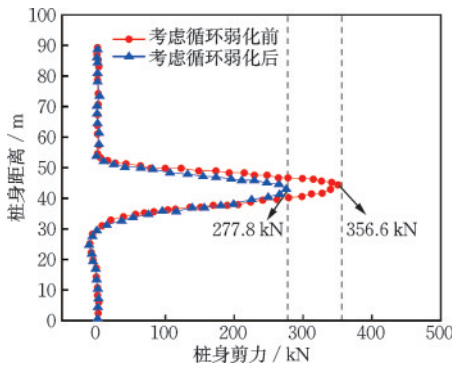


图14 土体循环弱化前、后桩身剪力对比

Fig.14 Comparison of pile shear force before and after soil cyclic weakening

图15为同时考虑土体强度弱化和刚度衰减前、后超长桩达到屈曲临界状态时的土体位移变形云图,由图可知,考虑土体循环弱化效应后桩身周围的土体的变形范围及变形值均增大,其中循环弱化前土体的最大变形值为0.0094 m,循环弱化后土体的变形值达到了0.0542 m,可见土体变形增加较大。

图16为同时考虑土体强度弱化和刚度衰减前、后桩身周围土体的Mises应力云图,由图可知,考虑土体循环弱化效应后土体的Mises应力明显降低。

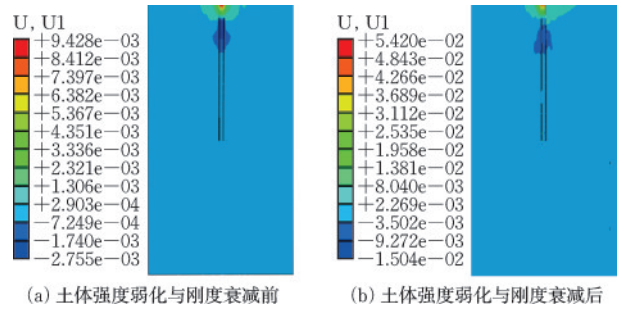


图15 土体强度弱化和刚度衰减前、后土体位移云图

Fig.15 Soil displacement contour maps before and after soil strength weakening and stiffness degradation

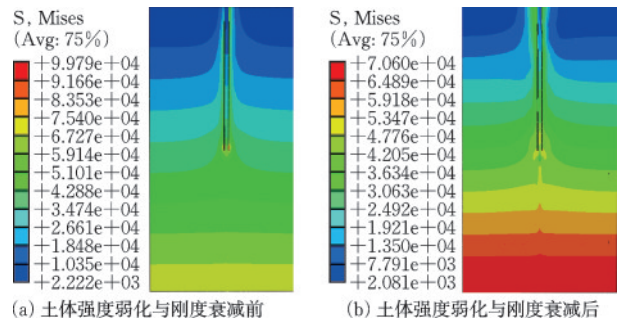


图16 土体强度弱化和刚度衰减前Mises应力云图

Fig.16 Mises stress contour maps before soil strength weakening and stiffness degradation

5 结论

通过已有的饱和软黏土强度弱化和刚度衰减模型,利用USDFLD子程序进行二次开发与验证,建立了软基深水超长桩-软黏土三维数值计算模型,明确了超长桩有可能发生屈曲失稳破坏的风险,进一步分别研究了考虑强度弱化、刚度衰减及循环弱化效应后软基深水超长桩的屈曲承载能力影响情况,具体结果表明:

(1) 超长桩在竖向荷载作用下,会产生较大水平变形,且沉降破坏模式下的极限承载力 P_{ult} 远大于屈曲破坏模式下的屈曲临界荷载值 P_{cr} ,说明屈曲破坏模式确实是超长桩的一种可能的破坏模式。

(2) 单独考虑强度弱化、刚度衰减以及同时考虑强度弱化和刚度衰减后对超长桩的屈曲承载能力具体影响情况,研究结果表明超长桩屈曲临界荷载值分别降低了3.5%、7.9%、11.0%,屈曲临界荷载时桩身最大剪力分别降低了3.6%、17.1%、22.1%,可见软黏土循环弱化效应增加了超长桩的屈曲失稳风险。

(3)考虑软黏土刚度衰减后超长桩的屈曲承载能力下降明显,而且比考虑强度弱化后超长桩屈曲承载能力的减幅要大,说明了土体弹性模量比黏聚力对超长桩的屈曲承载能力影响大。且考虑软黏土土体循环弱化效应后桩周土体的变形范围及变形值均增大,土体的 Mises 应力降低。

参考文献:

- [1] 张志明,杨国平.我国沿海深水港口建设技术进展、发展趋势和面临的关键技术问题[J].水运工程,2011(增1):57-63.
Zhang Z M, Yang G P. Technology development, development trend and key technical problems of construction of China's coastal deep-water ports[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(Sup1): 57-63. (in Chinese)
- [2] 王元战,贺林林,王朝阳.离岸深水全直桩码头动力简化计算方法研究[J].岩土力学,2014,35(10):2969-2976.
Wang Y Z, He L L, Wang C Y. Research on dynamic simplified calculation method of all-vertical-piled wharf in offshore deep-water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2969-2976. (in Chinese)
- [3] 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.
He L L. Research on bearing behavior and simplified calculation methods of all-vertical-piled wharf in offshore deep water[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [4] Zou X, Zhao M. Axial bearing behavior of super-long piles in deep soft clay over stiff layers[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(7): 2008-2016.
- [5] 姚文娟,蔡晨雨.一种新的超长桩荷载传递模型[J].岩土力学,2016,37(增2):783-787.
Yao W J, Cai C Y. A new load transfer model of super-long pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup2): 783-787. (in Chinese)
- [6] Bhattacharya S. Pile instability during earthquake liquefaction[D]. United Kingdom: Cambridge University, 2003.
- [7] 张效禹.强震下液化场地桥梁桩基屈曲失效特性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
Zhang X Y. Analysis of buckling characteristics of bridge pile foundations in liquefiable ground under strong earthquakes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [8] Fleming K, Weltman A, Randolph M, et al. Piling engineering[M]. Boca Raton FL: CRC press, 2008.
- [9] Reddy A S, Valsangkar A J. Buckling of fully and partially embedded piles[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(6): 1951-1965.
- [10] 赵明华.桥梁桩基的屈曲分析及试验[J].中国公路学报,1990(4):47-56.
Zhao M H. Buckling analysis and tests of bridge piles [J]. China Journal of Highway and Transport, 1990(4): 47-56 (in Chinese)
- [11] Haldar S, Babu G L S. Failure mechanisms of pile foundations in liquefiable soil: Parametric study[J]. International Journal of Geomechanics, 2010, 10(2): 74-84.
- [12] Bhattacharya S, Bolton M. Errors in design leading to pile failures during seismic liquefaction [J]. Structural Engineering Forum of India, 2004: 13-17.
- [13] Knappett J A, Madabhushi S P G. Influence of axial load on lateral pile response in liquefiable soils. Part I: physical modelling [J]. Geotechnique, 2009, 59 (7) : 571-581.
- [14] El Kamash W, El Naggar H. Numerical study on buckling of end-bearing piles in soft soil subjected to axial loads[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36: 3183-3201.
- [15] He L L, Li Z S, Xie Y S, et al. Buckling failure mechanism and critical buckling load prediction method of super-long piles in soft-clay ground in deep water [J]. Ocean Engineering, 2023, 276: 114216.
- [16] 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.
Huang M S, Li S. Degradation of stiffness and strength of offshore saturated soft clay under long-term cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1491-1498. (in Chinese)
- [17] 吴宜鹏,范庆来,任增乾,等.考虑软土应变软化效应的深埋式大圆筒承载性状分析[J].防灾减灾工程学报,2022,42(4):859-865.
Wu Y P, Fan Q L, Ren Z Q, et al. Bearing behavior of deeply - embedded large - diameter cylindrical structure considering strain softening effect of soft clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 859-865. (in Chinese)
- [18] Andersen K H, Lauritzsen R. Bearing capacity for foundations with cyclic loads[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(5): 540-555.
- [19] Wang J, Li C, Moran K. Cyclic undrained behavior of soft clays and cyclic bearing capacity of a single bucket foundation [C]//Proceedings of the 15th International

- Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul Korea; International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2005: 392-399.
- [20] 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.
Xiao Z. Stability analysis for new types of breakwaters on soft foundation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [21] 冯楚杰. 考虑软粘土强度与刚度弱化效应离岸深水码头承载特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
Feng C J. Research on bearing characteristics of offshore deep-water wharf considering the weakening effect of soft clay strength and rigidity[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [22] Yasuhara K, Hyde A F L, Toyota N, et al. Cyclic stiffness of plastic silt with an initial drained shear stress [C]//Pre-failure deformation behaviour of geomaterials. [S.l.]: Thomas Telford Publishing, 1998: 373-382.
- [23] Zhang C, White D, Randolph M. Centrifuge modeling of the cyclic lateral response of a rigid pile in soft clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(7): 717-729.
- [24] 慕东霖, 田英辉, 王乐, 等. 考虑软土软化效应时单桩基础水平循环受荷的有限元数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 740-748.
Mu D L, Tian Y H, Wang L, et al. Finite element numerical simulation of single pile under horizontal cyclic loading considering softening effect of soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 740-748. (in Chinese)
- [25] 周晓洁, 李娜, 卢力强, 等. 水平循环荷载下大直径单桩承载变形特性有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1279-1286.
Zhou X J, Li N, Li L Q, et al. Finite element analysis on bearing and deformation behaviors for large-diameter monopile under lateral cyclic loads[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1279-1286. (in Chinese)
- [26] 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.
Hu A F, Xiao Z R, Jiang J H, et al. Cumulative lateral displacement of single pile foundation under lateral and vertical cyclic loadings[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2020, 54(1): 85-91. (in Chinese)
- [27] 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.
He L L, Jia R, Jiao Y Q, et al. Research on automatic geo-stress balance method for harbor structure calculation model based on ABAQUS[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(11): 178-185. (in Chinese)
- [28] 张小玲, 徐英铎, 王丕光, 等. 端承桩-土动力相互作用的频域子结构分析方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 701-711.
Zhang X L, Xu Y D, Wang P G, et al. A frequency domain substructure analysis model for dynamic interaction between end bearing piles and soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 701-711. (in Chinese)
- [29] 范庆来, 韩彦青, 麻世林, 等. 循环荷载作用下海上风机桶形基础力学响应数值分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(3): 646-657.
Fan Q L, Han Y Q, Ma S L, et al. Numerical analysis of response of bucket foundations for offshore wind turbines subjected to cyclic loading[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(3): 646-657. (in Chinese)
- [30] 赵爽, 王奎华, 吴君涛. 水平循环荷载下砂土中斜单桩累积变形特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(7): 1310-1319.
Zhao S, Wan K H, Wu J T. Accumulated response of single batter pile under lateral cyclic loading in sand[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(7): 1310-1319. (in Chinese)
- [31] 贾强, 王浩东, 张鑫. 桩周土开挖状态下钢管桩稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(9): 102-109.
Jia Q, Wang H D, Zhang X. Study on bucking stability of steel tube pile during surrounding soil excavation [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(9): 102-109. (in Chinese)
- [32] Cosgun S I, Kaya A, Gencturk B. Computational modeling of the axial behavior of corroded and buckled short steel piles strengthened using concrete-filled GFRP jackets[J]. Engineering Failure Analysis. 2023, 147(2): 107147.

(本文编辑: 苏泽云)