

大次数循环荷载下钢管桩承载变形特性试验研究

苗本麒¹, 刘开富², 谢新宇^{1,3}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江理工大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310018;
3. 浙江大学 温州研究院, 浙江 温州 325035)

摘要: 钢管桩基在海洋服役过程中受到长期循环荷载的作用, 研究大次数循环荷载下钢管桩的承载变形特性对海上风电工程的建设有重要意义。本文开展了多组双层土中钢管桩基的模型试验, 分析大次数循环荷载下不同循环荷载与静荷载组合对桩基的极限承载力、桩顶沉降、桩身应变的影响。试验结果表明, 在大次数循环荷载的作用下, 上层淤泥质黏土、下层砂土的双层地基中钢管桩的极限承载力先减小后增大, 并趋近稳定; 桩顶沉降及其发展速率随着静荷载与循环荷载的增大而增大; 循环荷载在桩基利用率中占比越高时, 桩基的累积桩顶沉降、桩身应变越大。本文的研究可为钢管桩基在海上风电的应用提供参考。

关键词: 钢管桩; 循环荷载; 极限承载力; 桩顶沉降; 桩身应变

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)04-0285-08

Experimental study on bearing and deformation characteristics of steel pipe piles under large number of cyclic loading

MIAO Ben-qi¹, LIU Kai-fu², XIE Xin-yu^{1,3}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;
3. Institute of Wenzhou, Zhejiang University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China)

Abstract: The steel pipe pile foundation is subjected to long-term cyclic loading during the marine service process. It is of great significance to study the bearing and deformation characteristics of steel pipe piles under large number of cyclic loading for the engineering construction of offshore wind power. In this work, multiple groups of model tests of steel pipe pile in double-layer soil were carried out. The effects of different combinations of cyclic loading and static loading on the ultimate bearing capacity of the pile foundation, pile top settlement and pile strain of steel pile under large number of cyclic loading were analyzed. The test results show that the ultimate bearing capacity of the steel pile first decreases and then increases to an stable value under the large number of cyclic loading in the double-layer soil, whose upper part is mucky clay and the lower layer is sandy soil. Pile top settlement and its development rate increase with the static loading and cyclic loading. The higher proportion of cyclic loading in utilization ratio of pile, the greater the pile top settlement and the pile strain. The experimental results can provide reference for the application of steel pipe pile foundation in offshore wind power.

Key words: steel pipe pile; cyclic load; ultimate bearing capacity; pile top settlement; pile strain

0 引言

近年来, 随着能源需求量的增大, 海上风电的开发得到重视^[1], 我国“十四五”规划指出, 非化石能源占能源消费总量比重重要提高到 20%左右^[2], 并强调了海上风电的重要性。钢管桩具有高强度、变形小的优点^[3], 是海上风电采用最广泛的桩型。钢

管桩基础在服役过程中, 竖向不仅受到上部结构的静荷载作用, 还会受到来自海洋环境等因素导致的循环荷载分量^[4-5]。钢管桩基础长期处于循环荷载下, 承载变形特性十分复杂, 研究大次数循环荷载下钢管桩基础的承载变形特性对海上风电的建设具有重要意义。

目前, 许多学者都对循环荷载下桩基的承载变

形特性进行了研究。由于模型试验具有易控制、操作较便捷、经济性好等优点^[6]，其在循环荷载作用下的桩基特性研究中得到了广泛应用。陈仁朋等^[7]研究了粉土中的桩基在循环荷载下的承载变形特性，发现循环荷载下桩土界面土颗粒重排对有效应力状态影响较大。BEKKI等^[8]研究了砂土中桩基模型在长期循环荷载作用下极限承载力的变化，发现桩基的极限承载力在循环荷载作用下会先增加后减少。朱斌等^[9]通过离心机模型试验研究了桩基的水平受荷特性，发现同一深度处单桩的桩周土反力介于上拔桩与下压桩的桩周土反力之间。郭鹏飞等^[10]研究了黄土中单桩在循环荷载下的沉降特性，发现黄土饱和后单桩的承载力明显下降，单桩的循环荷载位移明显大于静载位移。祝周杰^[11]开展了一系列离心机模型试验，研究了群桩效应和循环荷载下弱化效应对饱和和砂土中桩基的影响。MATOS等^[12]研究了砂土中的桩基在循环荷载作用下的沉降特性，提出一种桩基有限元模型的校准方法。朱姝等^[13]通过模型试验研究了循环荷载下四腿桩基的变形特性，指出API规范的 $p-y$ 曲线在不考虑群桩效应时初始刚度和极限土反力均偏小。WEN等^[14]通过离心机模型试验研究了导管架基础在风浪荷载下的整体变形，指出对角线方向施加横向荷载时，桩基更容易发生破坏。这些研究主要对循环荷载下砂土、粉土及黄土中的桩基进行了位移、承载力、应变等特性的研究，并讨论了循环荷载的次数、幅值及加载方向，群桩效应等理论对桩基承载变形特性的影响。

综上所述，已有研究的对象主要集中于单层土中的桩基，然而海洋地层往往较复杂，海洋中的钢管桩往往处于多层土中^[15]，且海洋荷载存在时间长，变化大，桩基在海洋中受到多种上部结构静荷载及大次数循环荷载的组合作用。因此，需要针对大次数循环荷载（加载次数大于 10^5 ）及静载的不同组合对桩基承载变形特性的影响开展进一步研究。本文根据海洋地层情况开展双层土中钢管桩的1g模型试验，研究大次数循环荷载下不同循环荷载与静荷载组合对极限承载力、桩顶沉降、桩身应变等承载变形特性的影响，以便为海洋风电工程中钢管桩的应用提供参考。

1 试验概述

1.1 试验装置

本文模型试验在浙江理工大学岩土工程模型

试验系统中进行，该系统分为模型箱、伺服加载作动器、计算机控制采集系统3个部分，如图1所示。模型箱采用长方体结构，长宽高尺寸为 $1\,500\text{ mm}\times 900\text{ mm}\times 1\,700\text{ mm}$ 。模型箱上部开口，4个侧面采用钢板围焊，其中1个侧面加装钢化玻璃以便观察内部情况。伺服加载作动器通过控制电动缸的伸缩施加正弦循环荷载，在伺服加载作动器内布设了位移和荷载传感器，当加载板与桩顶接触时，位移传感器记录值在本模型试验中可视为桩基的桩顶沉降。传感器的信号通过VGA连接线传递给高速静态数据采集仪，再通过UTP网线将数据可视化并存储在计算机控制采集系统中。通过操作计算机控制采集系统来控制伺服加载作动器的荷载类型、荷载大小、加载速度、加载时间、采样频率等参数。



图1 岩土工程模型试验系统

Fig. 1 Geotechnical model test system

1.2 试验材料与布置

为了减小原型与模型在几何、物理条件上的误差，本文试验主要考虑了几何相似和物理相似^[16]。根据汪明元等^[17]进行的海洋桩基现场试验，本文模型试验选用接近实际工况的双层土地基。考虑实际原型与模型试验的条件，取长度相似系数 C_L 为 $1:10$ 。测得模型试验所用砂土和淤泥质黏土的物理参数与汪明元等^[17]海洋现场土参数接近，模型和原型的弹性模量相似比近似视为1， $C_E=1$ ；试验为1g模型试验， $C_g=C_E=1$ ；其余试验中研究的物理参数的相似系数均可通过 C_L 、 C_E 及 C_g 换算得到，

以实现模型和原型的几何要素和物理要素相似。通过试验装置, 完成模型与原型的支撑、约束和受力条件的相似性, 实现模型和原型的边界条件相似。模型试验相似系数见表 1。

表 1 模型试验的相似系数

Table 1 Similarity coefficient of model test

物理量	符号	量纲	相似系数
土层厚度	H	L	1/10
桩长	L	L	1/10
桩径	R	L	1/10
弹性模量	E	$ML^{-1}T^{-2}$	1
泊松比	μ	—	1
位移	S	L	1/10
应力	σ	$ML^{-1}T^{-2}$	1
应变	ε	—	1
均布荷载	Q	$ML^{-1}T^{-2}$	1
集中力	F	MLT^{-2}	1/100

桩基模型的布置如图 2 所示, 模型槽中的土体采用分层填筑法布置, 每层填筑完之后人工压实, 待土层填筑并静置完毕后打入钢管模型桩。钢管模型桩长 1.3 m, 嵌入桩基土层中的深度为 1.0 m, 模型桩与实际桩材料相同, 物理性质参数一致。桩基下层为砂土, 厚度 0.6 m; 上层为淤泥质黏土, 厚度 0.8 m。采用不排水三轴剪切试验测得土的抗剪强度指标, 土的物理性质参数如表 2 所示。

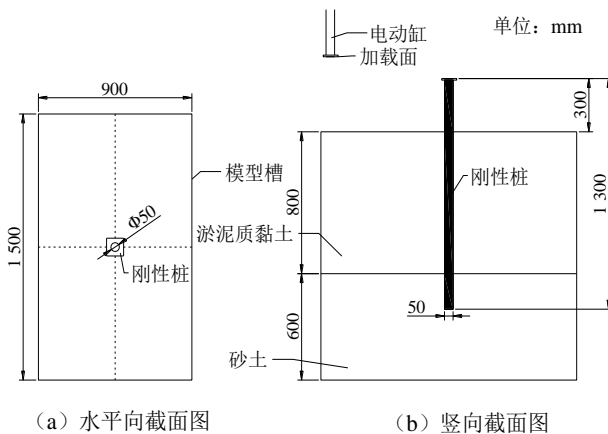
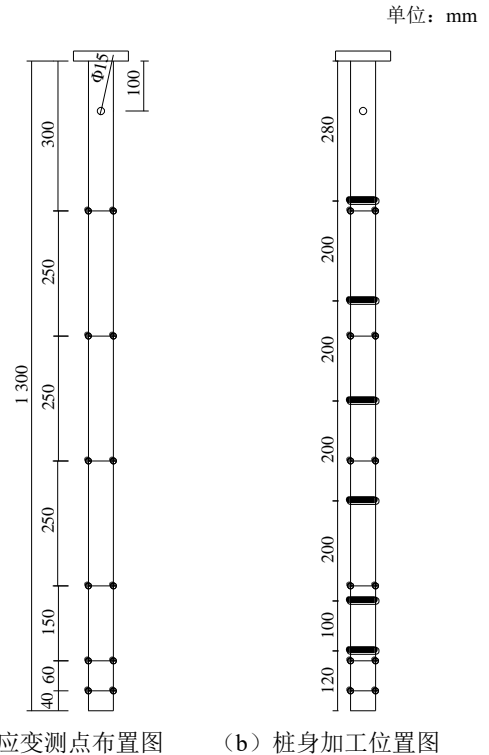


图 2 桩基模型布置图

Fig. 2 Layout of pile foundation model

在桩体内部和桩端使用防水胶粘贴应变片, 以测量加载时的桩身应变并计算桩端轴力, 桩身的应变测点布置如图 3 所示, 钢管模型桩及桩基模型实物如图 4 所示。



(a) 桩身应变测点布置图 (b) 桩身加工位置图

图 3 桩身应变测点布置图

Fig. 3 Layout of pile strain measuring points



(a) 钢管模型桩 (b) 桩基模型

图 4 钢管模型桩及桩基模型实物图

Fig. 4 Steel model pile and pile foundation model

表 2 土的物理性质参数表

Table 2 Physical properties of soils

土	密度 $\rho/(g/cm^3)$	含水率 $w/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	泊松比 ν
淤泥质黏土	1.62	38.7	16.1	12.4	0.35
砂土	1.75	17.1	0	30.0	0.30

1.3 试验方案

本文试验加载分为静载加载和动载加载两种类型。根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[18]采用慢速维持荷载法进行静载试验。静载试验中桩的极限承载力应根据桩顶沉降随荷载变化的特征确定,取荷载-桩顶沉降曲线发生明显陡降对应的荷载值作为桩的极限承载力。动载加载包含静荷载和正弦循环荷载两种类型。通过施加静荷载来模拟桩基上部结构的自重力,施加正弦循环荷载来模拟海洋中桩基受到的竖向海洋荷载作用力。通过改变循环荷载的幅值及频率来模拟不同程度的海洋荷载,最终施加的荷载为:

$$F(t)=P_a+\frac{P_b}{2}+\frac{P_b \sin(\omega_F t)}{2} \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为施加在桩顶的荷载; P_a 为静荷载; P_b 为循环荷载的幅值; ω_F 为循环荷载的圆频率; t 为开始施加循环荷载的时间。文中引用静荷载比(Static

Load Ratio, SLR)、循环荷载比(Cyclic Load Ratio, CLR)和API规范^[19]中定义的桩基利用率(Utilization Ratio, UR)来描述竖向循环荷载的参数取值:

$$SLR=P_a/P_u \quad (2)$$

$$CLR=P_b/P_u \quad (3)$$

$$UR=\max[F(t)]/P_u=SLR+CLR \quad (4)$$

式中: P_u 为桩的极限承载力。

API规范^[19]建议桩基利用率(UR)不超过1.0,本文基于此并结合工程实际情况,对动载加载选取6组不同的SLR和CLR荷载组合,如表3所示(N 为循环次数, f 为加载频率)。采用“静载加载-动载加载-静载加载”循环的加载顺序,在每组动载加载的前后各进行一组静载加载试验,以获得大次数循环荷载下桩的极限承载力的变化。

表3 动载加载方案
Table 3 Dynamic loading schemes

编号	SLR	CLR	UR	N /万次	f /Hz
1	0.2	0.6	0.8	20	2
2	0.4	0.4	0.8	20	2
3	0.4	0.6	1.0	20	2
4	0.6	0.2	0.8	20	2
5	0.6	0.4	1.0	20	2
6	0.8	0.2	1.0	20	2

2 试验结果与分析

2.1 极限承载力结果分析

桩的极限承载力按照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[18]建议的慢速维持荷载法进行静载加载试验得到并获得桩基的桩顶沉降、桩端轴力随荷载变化的关系曲线。图5为动荷载施加前静载加载的荷载-桩顶沉降曲线。由图5可知,桩顶沉降随着荷载的增加而增加,当静载荷载达到3 600 N后继续加载,荷载-桩顶沉降曲线发生明显陡降,根据规范^[18]可知其极限承载力为3 600 N。

图6为静载试验中桩端轴力随荷载的变化曲线。由图6可知,静载荷载加载前期(0~2 700 N),桩端轴力增加速率较为稳定,土体以弹性变形为主;静载荷载增大时(2 700~3 600 N),桩端轴力增加速率有增大的趋势,土体出现塑性变形;当静载荷载达到3 600 N后,桩端轴力也出现较大变化,

桩端轴力在桩顶荷载最大时为736 N,占总荷载的19%。

图7为不同循环次数后静载加载的荷载-桩顶沉降曲线,图8为桩极限承载力及桩端轴力随循环次数变化曲线。由图7可知,0~40万次循环后,桩的荷载-桩顶沉降曲线拐点逐渐左移,桩的极限承载力逐渐减小;40~120万次循环后,桩的荷载-桩顶沉降曲线拐点逐渐右移。由图7与图8可知,上淤下砂的双层土钢管桩基的极限承载力在大次数循环荷载作用下先减小后增大至稳定值,桩端轴力与极限承载力随循环次数的变化趋势基本一致。0~40万次循环后,桩极限承载力由3 600 N减小至3 300 N,减小了8%,而桩端轴力由736 N减小至500 N,减小了32%;40~100万次循环后,桩极限承载力由3 300 N增加至3 900 N,增加了18%,而桩端轴力增加至978 N,增大了95%;100~120万次循环后,桩的极限承载力无明显变化,仍为

3 900 N, 而桩端轴力仅增加了 8 N, 变化较小。这与 LEE^[20] 在单层砂土中桩基的研究结果不同, 但与陈仁朋等^[6] 的软黏土管桩试验规律相似, 这说明循环荷载下桩的极限承载力变化规律会受到桩类型和桩基所处土层的影响。同时极限承载力在 80 万次循环之后开始大于循环前的初始值 3 600 N, 比陈仁朋等^[6] 软黏土管桩现场试验得到的 70 万次增加了 14%。

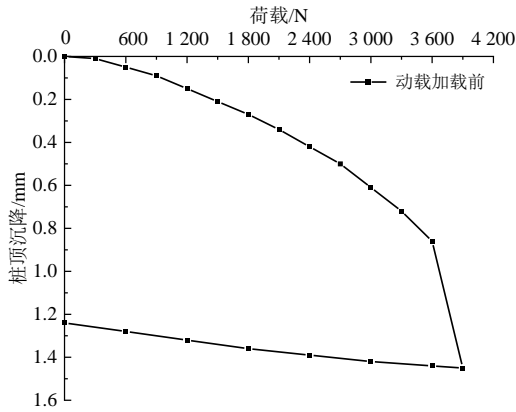


图 5 静载加载的荷载-桩顶沉降曲线

Fig. 5 Load-pile top settlement curve under static loading

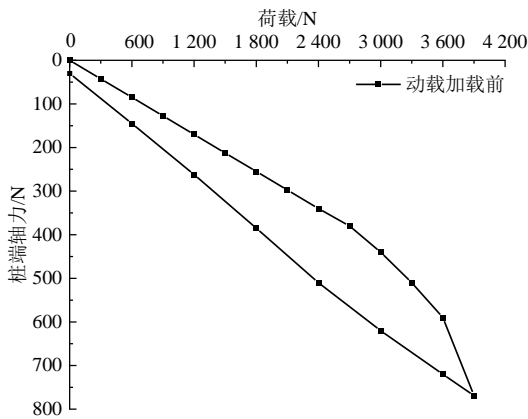


图 6 静载加载的桩端轴力-桩顶荷载曲线

Fig. 6 Pile end axial force-load curve under static loading

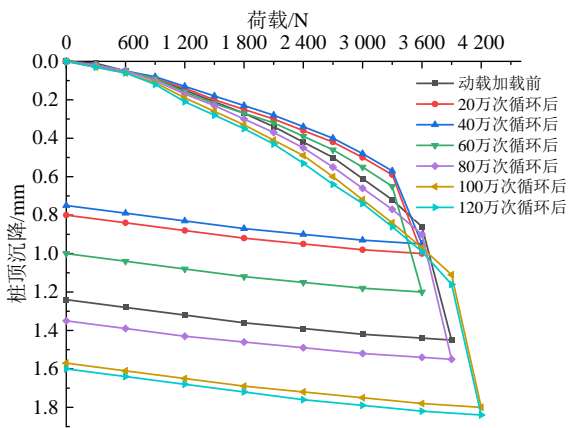


图 7 不同循环次数后静载加载的荷载-桩顶沉降曲线

Fig. 7 Load-pile top settlement curves under static loading after different cyclic cycles

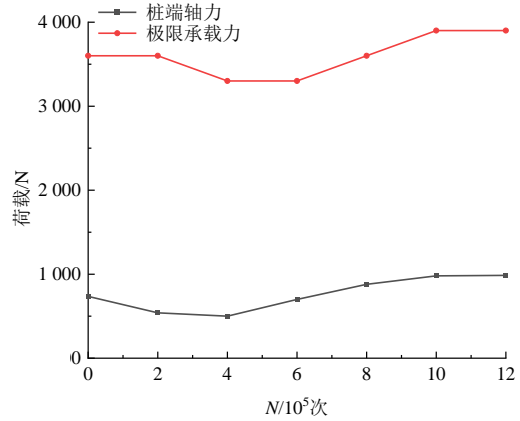


图 8 桩极限承载力及桩端轴力-循环次数变化曲线

Fig. 8 Ultimate bearing capacity and pile end axial force-different cyclic cycle curves

2.2 桩顶沉降分析

图 9 为大次数循环荷载下桩基的归一化桩顶沉降 s/D 随循环次数的变化曲线 (s 为桩基的桩顶沉降, D 为桩径)。由图 9 可见, 桩基的桩顶沉降随循环荷载次数的增大而增大, 桩顶沉降的增大速率随循环荷载次数的增大而减小, 这与 BEKKI 等^[8] 及胡娟等^[21] 在砂土中进行的桩基循环荷载试验得到的结论一致。同时从图 9 中还可以发现, 桩基的累积桩顶沉降会随着静载 (SLR) 和循环荷载 (CLR) 的增大而增大, 当从 SLR=0.6 & CLR=0.2 变化至 SLR=0.8 & CLR=0.2, SLR 增大了 0.2 时, 桩基的 20 万次循环累积桩顶沉降 (s/D) 增大了 0.03%; 当从 SLR=0.6 & CLR=0.2 变化至 SLR=0.6 & CLR=0.4, CLR 增大了 0.2 时, 桩基的累积桩顶沉降增大了 2.18%。增大 0.2 的 CLR 增加的累积桩顶沉降比增大 0.2 的 SLR 要大 2.15%, 由此可见, 循环荷载对累积桩顶沉降的影响比静荷载的更大。CLR=0.2, SLR 从 0.6 增大到 0.8 时归一化桩顶沉降达到 0.12% 需要的循环次数减少了 8 000 次, 而 SLR=0.6, CLR 从 0.2 增大到 0.4 时归一化桩顶沉降达到 0.12% 需要的循环次数减少了 15 000 次, SLR 和 CLR 增大后达到相同沉降量所需要的循环次数变少。由此可见, 桩顶沉降的发展速率会随着静载和循环荷载的增大而增大。

图 10 为桩基利用率 (UR) 相同时不同静载 (SLR) 和循环荷载 (CLR) 组合的桩顶沉降随循环次数的变化曲线。由图 10 可知, 桩基的累积桩顶沉降会随着循环荷载在桩基利用率中占比的增大而增大。当 CLR 在桩基利用率中的占比分别为 20% (0.2)、40% (0.4)、60% (0.6) 时, 桩基的归一化累积桩顶沉降 (s/D) 在 20 万次循环后分别为 0.15%、2.3%、3.3%。这是因为土体在循环荷载作用下弱化,

随着循环荷载在桩基利用率中占比的增大导致弱化影响加大，因此累积桩顶沉降增加。

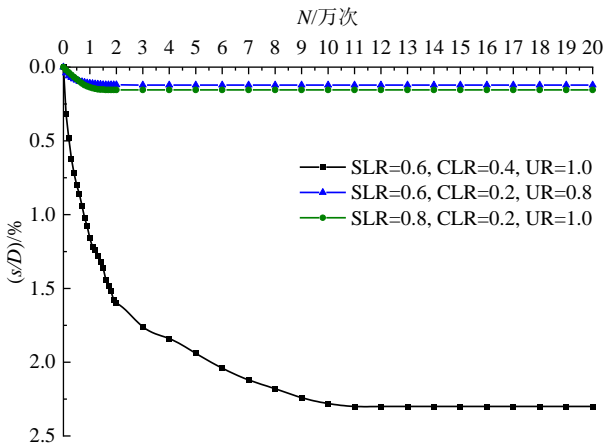


图9 不同工况下的归一化桩顶沉降-循环次数曲线
Fig. 9 Normalized pile top settlement-cycle number curves under different working conditions

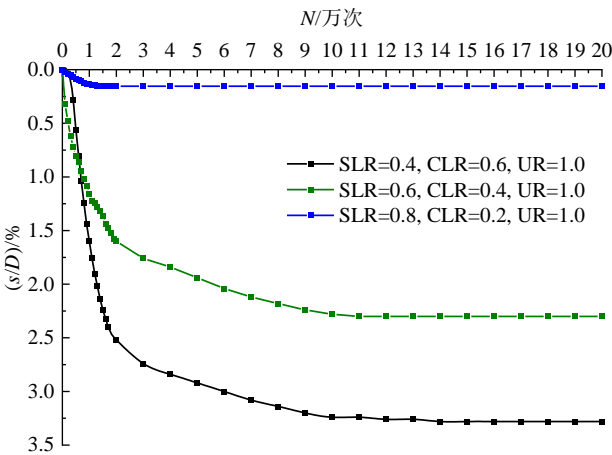


图10 相同UR下不同荷载组合的归一化桩顶沉降-循环次数曲线
Fig. 10 Normalized pile top settlement-cycle number curves for different load combinations under the same UR

2.3 桩身应变分析

图11所示为SLR=0.6 & CLR=0.4时，桩身应变随桩深的变化曲线。由图11可见，循环荷载下钢管桩的桩身应变随深度的增大而减小，桩身应变随循环次数的增大而增大，桩身应变的增大速度随循环荷载次数的增大而减小。循环次数从0次增大到8万次时，桩顶的桩身应变增大了1.5 με，桩底的桩身应变增大了0.9 με；循环次数从8万次增大到20万次时，桩顶的桩身应变增大了1.3 με，桩底的桩身应变增大了0.4 με。桩顶和桩底的桩身应变在20万次循环后共增大了2.8 με、1.3 με，8万次循环后桩顶和桩底的桩身应变增大值分别达到了20万次循环后总增大值的54%、70%。当循环次数达到16万次时，桩身应变与20万次的差值小于0.5 με，

已达到最大桩身应变的98%以上。由此可见，16万次循环时，桩身应变已基本达到稳定，大次数循环荷载下桩身应变有逐渐稳定的趋势。

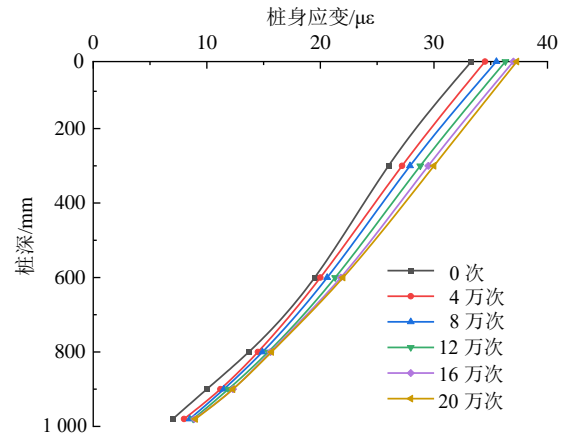


图11 SLR=0.6 & CLR=0.4 桩顶荷载最大时的桩身应变-桩深曲线
Fig. 11 Pile strain-pile depth curves under the largest pile top load when SLR=0.6 & CLR=0.4

图12为不同工况下钢管桩的桩身应变随桩深变化曲线。由图12可知，桩身应变会随着静载（SLR）和循环荷载（CLR）的增大而增大，循环荷载对桩身应变的影响更大，当CLR=0.2，SLR从0.6增大到0.8时，20万次循环后桩顶的桩身应变增大了14%（4.3 με）；而SLR=0.6，CLR从0.2增大到0.4时，20万次循环后桩顶的桩身应变增大了22%（6.8 με）。相比于SLR增大0.2，CLR增大0.2后桩身应变的增大值更大。

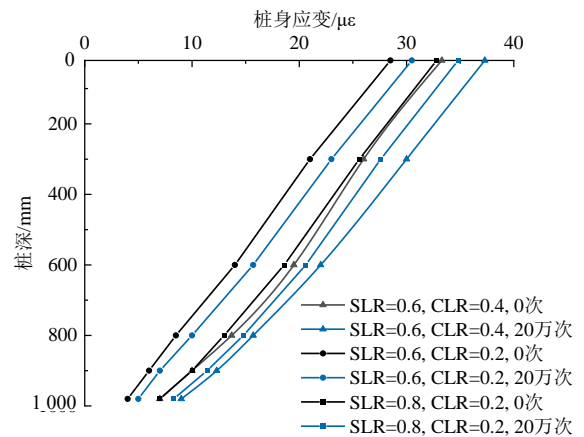


图12 不同工况下的桩身应变-桩深曲线
Fig. 12 Pile strain-depth curves under different working conditions

图13为桩基利用率（UR）为1时不同静载（SLR）和循环荷载（CLR）组合的桩身应变随桩深的变化曲线。由图13可知，20万次循环后的桩身应变随循环荷载在桩基利用率中占比的增大而增

大。当 CLR 在桩基利用率的占比分别为 20%、40%、60% 时, 钢管桩桩顶 20 万次循环的桩身应变分别为 $34.8 \mu\epsilon$ 、 $37.3 \mu\epsilon$ 、 $39 \mu\epsilon$, 比循环开始前的桩身应变分别增加了 $2 \mu\epsilon$ 、 $3.8 \mu\epsilon$ 、 $6.1 \mu\epsilon$, 这是因为土体在循环荷载下出现弱化现象, 循环荷载在桩基利用率中占比的增大使得弱化效应更明显所导致。

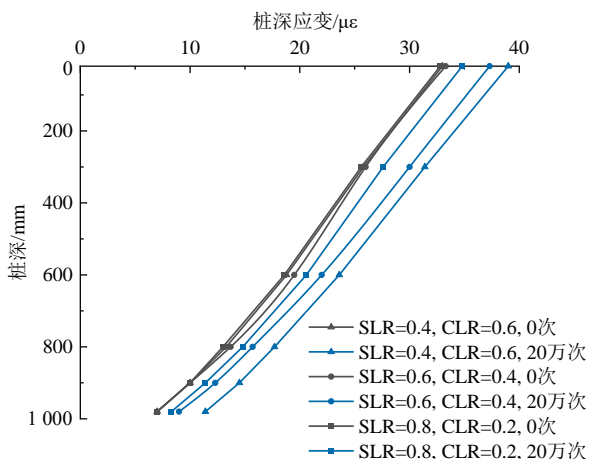


图 13 UR=1 时不同荷载组合的桩身应变-桩深曲线

Fig. 13 Pile strain-depth curves under different load combinations when UR=1

3 结 论

根据海洋桩基的现场工况开展了多组大次数循环荷载下双层土钢管桩基础的模型试验, 主要得出以下结论:

(1) 大次数循环荷载的作用下, 上部位于淤泥质黏土、下部位于砂土中的钢管桩极限承载力及桩端轴力随循环次数的增大先减小后增大, 且极限承载力会趋近稳定。

(2) 累积桩顶沉降及其发展速率会随静荷载与循环荷载的增大而增大, 循环荷载在桩基利用率中占比越高, 累积桩顶沉降越大。

(3) 大次数循环荷载下桩身应变的增长速率逐渐减小, 桩身应变有逐渐稳定的趋势, 循环荷载对桩身应变的影响比静荷载更大, 桩身应变的发展速率随循环荷载在桩基利用率中占比的增大而增大。

参考文献

[1] 章艺. 新时期我国新能源发展现状分析[J]. 中国电力企业管理, 2019, 34(12): 62-63.
ZHANG Yi. Analysis of my country's new energy development status in the new era[J]. China Electric Power Enterprise Management, 2019, 34(12): 62-63.

[2] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2021-12-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

State Council of the PRC. Outline of the 14th five-year plan (2021-2025) for national economic and social development and vision 2035 of the People's Republic of China[EB/OL]. (2021-03-13) [2021-12-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

[3] 段郎峰, 冉红玉, 李凤丽. 海上风电场风机基础的选择设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(1): 129-131.

DUAN Yun-feng, RAN Hong-yu, LI Feng-li. Selection and design of fan foundation of offshore wind farm[J]. Chinese Journal of Hydraulic and Architectural Engineering, 2010, 8(1): 129-131.

[4] ACHMUS M, ABDEL-RAHMAN K, SCHAEFER D, et al. Capacity degradation method for driven steel piles under cyclic axial loading[C]//Proceedings of the Twenty-Seventh International Ocean and Polar Engineering Conference. San Francisco, CA, USA, 2017: 362-368.

[5] 元国凯, 汤东升, 刘晋超, 等. 海上风电机组基础灌浆技术应用与发展[J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 10-17.
YUAN Guo-kai, TANG Dong-sheng, LIU Jin-chao, et al. Application and development of foundation grouting technology for offshore wind turbines[J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 10-17.

[6] 陈仁朋, 彭春银, 汪健夫, 等. 竖向循环荷载下软黏土地基管桩累积沉降特性[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3): 119-128.

CHEN Ren-peng, PENG Chun-yin, WANG Jian-fu, et al. Cumulative settlement characteristics of soft clay foundation pipe piles under vertical cyclic loading[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2021, 54(3): 119-128.

[7] 陈仁朋, 任宇, 陈云敏. 刚性单桩竖向循环加载模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1926-1933.

CHEN Ren-peng, REN Yu, CHEN Yun-min. Model test study of rigid single pile vertical cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1926-1933.

[8] BEKKI H, CANOU J, TALI B, et al. Evolution of local friction along a model pile shaft in a calibration chamber for a large number of loading cycles[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2013, 341(6): 499-507.

[9] 朱斌, 李涛, 毕明君. 海上四桩导管架基础水平受荷离

- 心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1822-1830.
- ZHU Bin, LI Tao, BI Ming-jun. Centrifugal model test for horizontal loading of offshore four-pile jacket foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1822-1830.
- [10] 郭鹏飞, 王旭, 杨龙才, 等. 长期竖向循环荷载作用下黄土中单桩沉降特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 551-558.
- GUO Peng-fei, WANG Xu, YANG Long-cai, et al. Model test study on settlement characteristics of single piles in loess under long-term vertical cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 551-558.
- [11] 祝周杰. 海上风机四桩导管架基础群桩效应与循环效应试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- ZHU Zhou-jie. Experimental study on pile group effect and circulation effect of four-pile jacket foundation for offshore wind turbines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [12] MATOS R, PINTO P, REBELO C, et al. Axial monotonic and cyclic testing of micropiles in loose sand[J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 41(3): 526-542.
- [13] 朱姝, 陈仁朋. 软黏土中导管架基础水平循环加载离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 2): 204-208.
- ZHU Shu, CHEN Ren-peng. Horizontal cyclic loading centrifugal model test of jacket foundation in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 204-208.
- [14] WEN K, WU X, ZHU B. Numerical investigation on the lateral loading behavior of tetrapod piled jacket foundations in medium dense sand[J]. Applied Ocean Research, 2020, 100(5): 102193.
- [15] 孔令伟, 吕海波, 王稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002(9): 82-88.
- KONG Ling-wei, LV Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and microscopic mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 82-88.
- [16] 宁奕冰, 唐辉明, 张勃成, 等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2009-2020.
- NING Yi-bing, TANG Hui-ming, ZHANG Bo-cheng, et al. Research on rock-like material ratio based on orthogonal design and application of bottom friction physical model test[J]. Geotechnical Mechanics, 2020, 41(6): 2009-2020.
- [17] 汪明元, 单治钢, 饶锡保, 等. 基于近海钢管桩现场试验的海洋土参数反演[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 143-148.
- WANG Ming-yuan, SHAN Zhi-gang, RAO Xi-bao, et al. Inversion of marine soil parameters based on field test of offshore steel pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 143-148.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [19] American Petroleum Institute (API). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design[S]. America: API Publishing Services, 2000.
- [20] LEE C Y. Cyclic response of axially loaded pile groups[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(9): 1399-1413.
- [21] 胡娟, 宋一凡, 贺拴海. 静载及循环荷载下砂土中复合桩基承载特性模型试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(3): 305-311.
- HU Juan, SONG Yi-fan, HE Shuan-hai. Research on model tests of bearing capacities for composite pile foundation under static and cyclic loading in sand[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(3): 305-311.