

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0597

# 砂土中大直径单桩水平循环加载模型试验研究

张纪蒙<sup>1,2</sup>, 张陈蓉<sup>1,2</sup>, 张 凯<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

**摘 要:** 采用电机伺服水平循环加载设备开展了一系列 1g 模型试验, 研究砂土中大直径单桩在水平循环荷载作用下的刚度和变形累积特性。试验结果表明, 一次加卸载产生的残余位移约为峰值位移的 80%; 随着循环次数的增加, 循环加载滞回曲线面积逐渐减小, 表明桩周土体行为从弹塑性向弹性阶段转变; 滞回曲线割线刚度随着循环次数的增加, 呈现先增后减的变化, 为浅层桩周土体逐渐密实以及桩周土体抵抗由浅层向深层发展的趋势引起; 桩顶累积位移随桩径增加而近似等幅减小, 随埋深增加, 位移的减小幅度也逐渐减小, 表明了临界埋深的存在。在指数模型的基础上, 在双对数坐标系中通过线性拟合给出了循环累积位移经验模型, 发现增大桩径对于减小循环累积位移的效果要好于埋深。

**关 键 词:** 大直径单桩基础; 水平循环加载; 1g 模型试验; 累积位移

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)03-0783-07

## Model tests of large-diameter single pile under horizontal cyclic loading in sand

ZHANG Ji-meng<sup>1,2</sup>, ZHANG Chen-rong<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200002, China)

**Abstract:** A series of 1g model tests was carried out using a motor servo horizontal cyclic loading equipment to study the stiffness and cumulative displacement of the large-diameter single pile in sand under horizontal cyclic loading. The test results indicated that the residual displacement generated by one loading and unloading cycle is about 80% of the peak displacement. As the number of cycles increases, the area of the cyclic loading hysteresis curve gradually decreases, indicating that the behavior of soil around the pile changes from elastoplastic to elastic stage. The secant stiffness of the hysteretic curve increases firstly and then decreases with the increase of the number of cycles, which is caused by the trend that the soil around the pile is gradually dense, and the resistance of the soil around the pile is developing from shallow to deep. The secant stiffness of the hysteretic curve increases firstly and then decreases with the increase of the number of cycles, which is caused by the progressive compaction of the soil around the pile in the shallow layer and the tendency of the resistance of the soil around the pile to transfer from the shallow layer to the deep layer. The cumulative displacement of the pile top decreases to approximately the same extent as the pile diameter increases. However, with the increase of burial depth, the reduction of displacement also gradually decreases, revealing the existence of critical burial depth. An empirical model of cyclic cumulative displacement is proposed by linear fitting in a double logarithmic coordinate system based on the exponential model. It is found that the effect of increasing the pile diameter on the reduction of cyclic cumulative displacement is better than that of increasing the buried depth.

**Keywords:** large-diameter single pile foundation; horizontal cyclic loading; 1g model test; cumulative displacement

## 1 引 言

大直径钢管桩是近海海上风电常用的基础形式, 在服役期间风电长期受到风、浪等水平循环荷载的作用, 基础产生累积变形。当桩身变形超过限

值, 会造成上部结构海上风电机组无法正常工作。因此, 研究水平循环荷载作用下桩基的刚度和变形发展, 对于海上风电大直径钢管桩基础的设计具有重要的意义。

为此, 国内外学者开展了一系列试验研究。一

收稿日期: 2020-05-13

修回日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51779175)。

This work was supported by the National Nature Science Foundation of China(51779175).

第一作者简介: 张纪蒙, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要从事桩基工程的研究。E-mail: 1832582@tongji.edu.cn

通讯作者: 张陈蓉, 女, 1982 年生, 副研究员, 主要从事桩基工程的科研与教学工作。E-mail: zcrong33@tongji.edu.cn

些研究着眼于对 API 规范  $p-y$  曲线法的验证改进。Bayton 等<sup>[1]</sup>试验发现 API 规范方法计算得到的大直径桩的挠度和弯矩较实测值低。朱斌等<sup>[2]</sup>进行了砂土中大直径水平受荷单桩的离心模型试验,提出了与循环应力比相关的循环弱化因子,对双曲线型  $p-y$  曲线进行修正,得到了考虑荷载循环次数的  $p-y$  曲线模型。陈仁朋等<sup>[3]</sup>等进行了饱和粉土中桩基水平循环荷载试验,引入可以考虑循环次数的循环效应系数以改进  $p-y$  曲线方法。

还有一些研究关注循环荷载幅值、加载路径、土体相对密实度等因素对桩顶累积位移及桩侧土体刚度的影响。Li<sup>[4]</sup>、王富强<sup>[5]</sup>等分别开展了干砂和饱和砂土中大直径单桩单向循环加载离心模型试验,提出了桩顶累积位移随循环加载次数的对数形式经验公式,探讨了桩周土体变形、超静孔压随循环加载幅值的变化特征。丁楚等<sup>[6]</sup>则针对黏土中单桩与群桩开展了水平循环加载离心模型试验,探讨了桩顶最大位移与残余位移比值、桩身最大弯曲应变与残余弯曲应变比值随循环加载次数的变化特征。Leblanc 等<sup>[7]</sup>提出了描述循环荷载特征的加载路径参数,基于单双向循环加载模型试验,给出了两种砂土相对密实度下水平受荷单桩桩顶累积转角随循环次数变化的指数经验公式。Arshad<sup>[8]</sup>、Richards<sup>[9]</sup>等均开展了单向和双向循环加载模型对比试验,得到了相似的结论,在相同荷载幅值下,不对称双向循环加载比单向循环加载引起的累积位移更大。针对不对称双向循环加载,张勋等<sup>[10]</sup>的模型试验发现一定循环次数下,随着荷载最小值减小,桩顶累积位移呈现先增后减的变化规律。Bayton 等<sup>[11]</sup>开展了变幅值循环加载离心模型试验,并对循环退化模型<sup>[12]</sup>用于循环加载试验分析的可行性进行了验证。

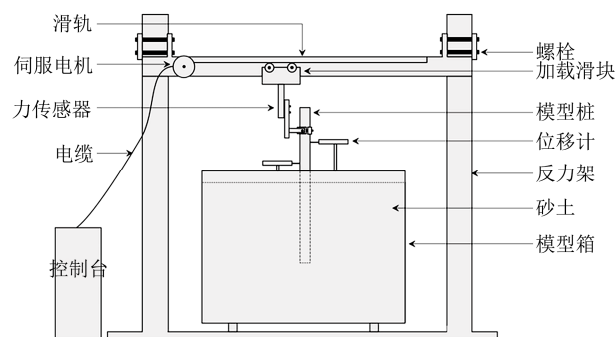
尽管有不少研究进展,但现有的模型试验及对应的循环累积位移预测模型,主要是针对不同的循环加载路径,未考虑桩径及埋深变化对大直径单桩循环特性的影响。为此,本文开展了不同桩径及埋深的大直径单桩水平静载及循环加载 1g 模型试验,分析了静载加、卸载曲线、循环加载滞回圈以及桩顶累积位移响应,探讨了直径及埋深对桩顶累积位移的影响。

## 2 试验设备与方案

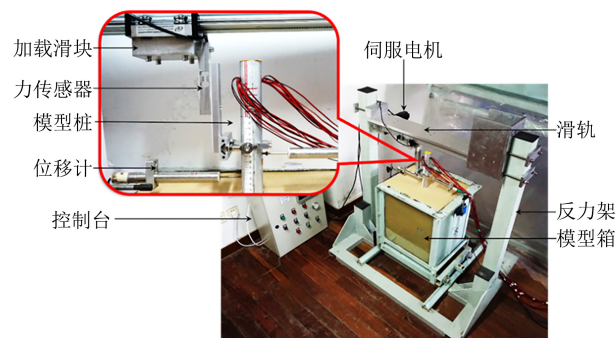
### 2.1 加载系统

静载试验通过配重分级加卸载完成。水平循环加载由伺服电机实现,通过输入循环荷载时程曲线实现力控制循环加载,荷载范围为 $\pm 1$  kN,精度为

$\pm 0.5$  N,加载频率为 0.1 Hz,加载系统如图 1 所示。试验所用模型箱尺寸为 50 cm $\times$ 50 cm $\times$ 50 cm。采用电压式位移计分别测量桩顶以下 3 cm 及地表以上 1 cm 处桩身位移,桩顶荷载采用力传感器测量。



(a) 循环加载试验装置设计图



(b) 循环加载试验装置实物图

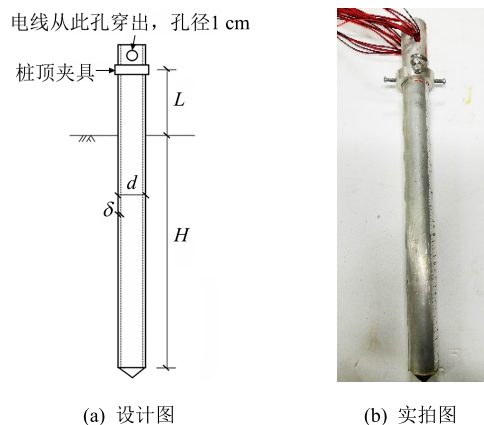
图 1 试验装置图

Fig.1 Test device

### 2.2 模型桩及地基土的制备

模型桩采用铝合金管加工而成,铝合金材料密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 68.9 GPa,泊松比为 0.3。设计桩顶夹具实现作动装置与桩身的连接。具体见图 2,其中  $L$  为加载点距地表处高度, $H$  为桩埋深, $d$  为桩外径, $\delta$  为桩身厚度,大小为 2 mm。

试验采用日本丰浦砂,级配曲线如图 3 所示,



(a) 设计图

(b) 实拍图

图 2 模型桩示意图

Fig.2 Schematic diagram of model pile

砂土平均粒径  $d_{50} = 0.16 \text{ mm}$ , 不均匀系数  $C_u = 1.6$ , 颗粒相对密度  $G_s = 2.64$ , 最大孔隙比  $e_{\max} = 0.916$ , 最小孔隙比  $e_{\min} = 0.609$ 。为模拟天然状态下砂土的堆积特性, 采用砂雨法制样, 制备土样完成后测得土样相对密实度  $D_r = 55.3\%$ , 干砂重度为  $14.54 \text{ kN/m}^3$ 。当模型箱内土样厚度到达桩底高度时放置并固定模型桩, 随后继续砂雨法制样, 使土样厚度满足要求。

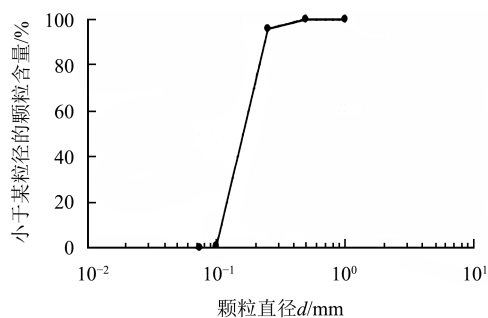


图3 土样级配曲线

Fig.3 Grain size distribution curve of soil sample

### 2.3 试验安排

试验选取了 4 种桩径及 4 种埋深条件进行水平受荷桩的静载及循环加载试验。模型桩尺寸相似比为 1:100, 对应原型桩外径为 2~4 m, 埋深为 20~35 m。各组试验的模型桩直径  $d$ 、埋深  $H$ 、加载高度  $L$ 、单桩极限承载力  $F_u$ 、循环荷载幅值  $F_c$ 、归一化循环加载幅值  $\zeta_b$  及循环加载次数, 如表 1 所示。其中归一化循环加载幅值  $\zeta_b = F_c/F_u$ , 表征循环荷载幅值的相对大小, 单桩极限承载力  $F_u$  由 3.1 节静载试验得到。循环加载采用正弦单向循环加载, 图 4 为加载时程曲线示意图。

表 1 单桩水平极限承载力及循环荷载幅值

Table 1 Horizontal ultimate bearing capacity and cyclic loading amplitude

| 编号 | $d/\text{cm}$ | $H/\text{cm}$ | $L/\text{cm}$ | $F_u/\text{N}$ | 循环荷载<br>$F_c/\text{N}$ | $\zeta_b = F_c/F_u$ | 循环<br>次数/次 |
|----|---------------|---------------|---------------|----------------|------------------------|---------------------|------------|
| E1 | 2.0           | 30            | 10            | 17.0           | 10                     | 0.59                | 6 000      |
| E2 | 2.5           | 30            | 10            | 21.0           | 10                     | 0.48                | 6 000      |
| E3 | 3.0           | 30            | 10            | 23.5           | 10                     | 0.43                | 6 000      |
| E4 | 4.0           | 20            | 10            | 15.0           | 10                     | 0.67                | 6 000      |
| E5 | 4.0           | 25            | 10            | 22.5           | 10                     | 0.44                | 6 000      |
| E6 | 4.0           | 30            | 10            | 26.0           | 10                     | 0.38                | 6 000      |
| E7 | 4.0           | 35            | 10            | 38.0           | 10                     | 0.26                | 6 000      |

## 3 试验结果分析

### 3.1 静载试验

试验得到的静力一次加卸载桩顶荷载转角曲线, 如图 5 所示。由图可见, 一次加卸载曲线的初始加载刚度随桩径增大以及埋深增加而增加, 而初

始卸载刚度受桩径及埋深的影响较小, 各组曲线该值近似相等。以桩顶转角  $0.5^\circ$  对应荷载作为水平受荷桩的承载力  $F_u$ <sup>[13]</sup>, 其具体数值见表 1。

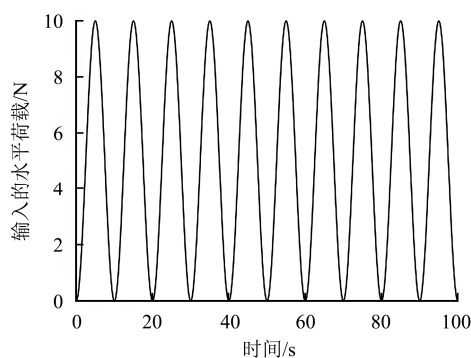
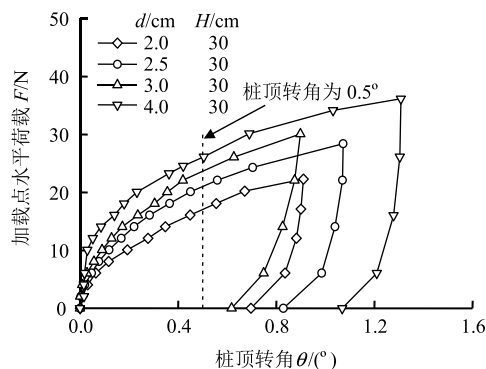
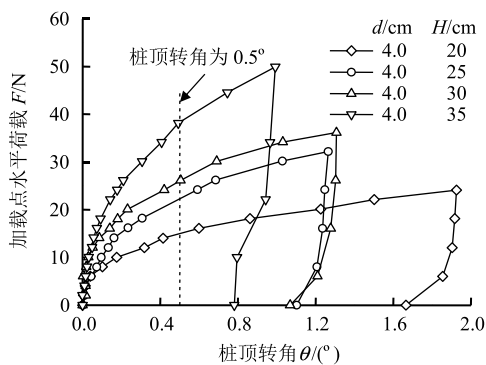


图4 循环荷载时程曲线 (前 100 s)

Fig.4 Time history curve of cyclic loading (the first 100 s)



(a) 桩径变化



(b) 埋深变化

图5 桩顶荷载转角曲线

Fig.5 Load-angle curves at pile top

采用每组静载试验加载段的最大荷载  $F_{\max}$ 、加载点的最大位移  $u_{\max}$  对一次加、卸载荷载位移曲线进行归一化处理, 如图 6 所示。由图可见, 本试验加载条件下的静载试验结果归一化后的加卸载曲线大致落在同一条曲线附近, 一次加卸载产生的累积位移约为加载过程中峰值位移的 80%。对于加载高度及砂土力学性质一定的情况, 水平受荷桩的埋深、桩径及荷载大小对归一化一次加卸载曲线的形状影响不大。图中,  $u$  为每组试验的加载点位移;  $F$ 、 $F_{\max}$

分别为每组试验加载点处的荷载及最大荷载。

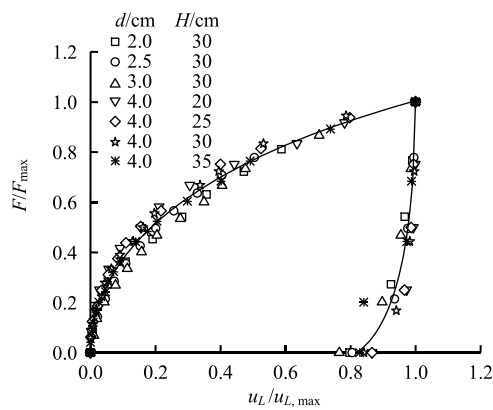
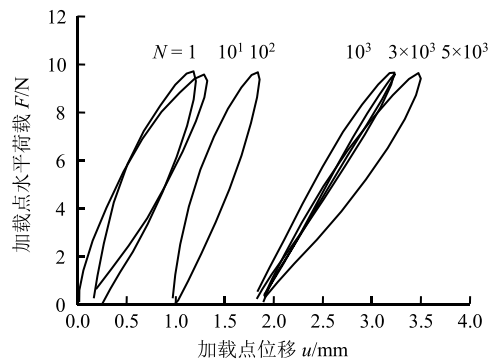


图 6 归一化的荷载位移曲线

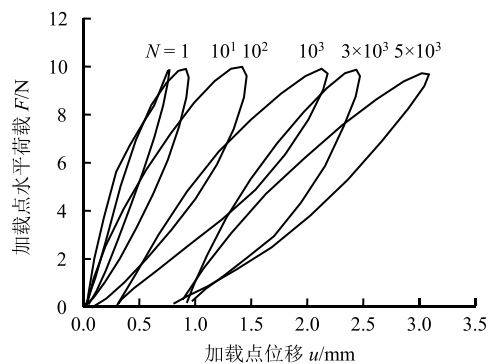
Fig.6 Normalized load-displacement curves

### 3.2 循环加载滞回曲线

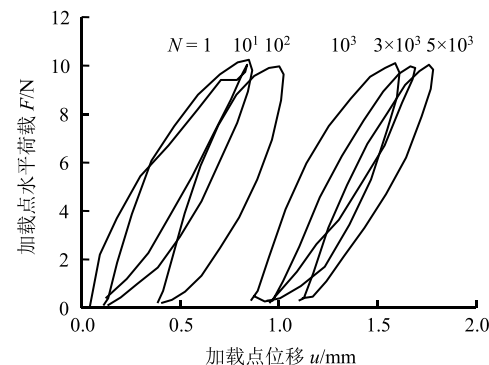
图 7 为 7 组试验第 1、10、100、1 000、3 000



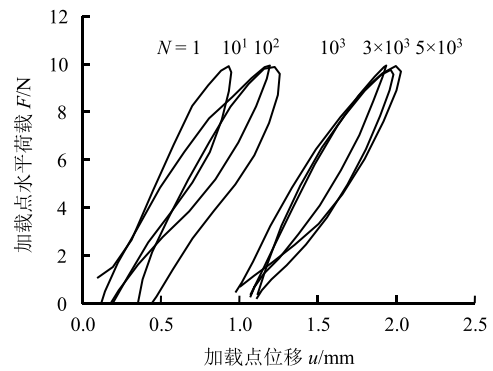
(a)  $d = 2.0$  cm,  $H = 30$  cm



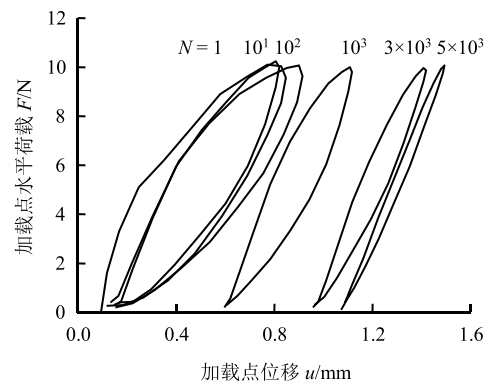
(b)  $d = 2.5$  cm,  $H = 30$  cm



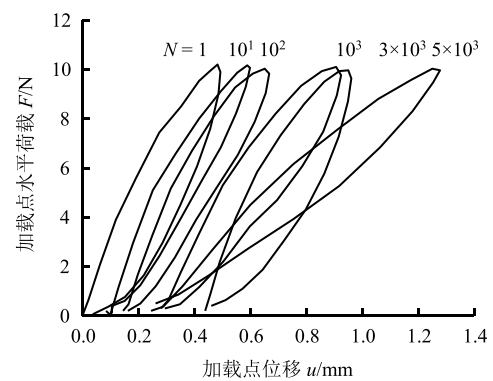
(c)  $d = 3.0$  cm,  $H = 30$  cm



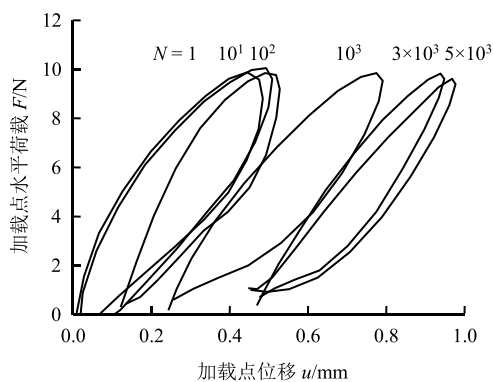
(d)  $d = 4.0$  cm,  $H = 20$  cm



(e)  $d = 4.0$  cm,  $H = 25$  cm



(f)  $d = 4.0$  cm,  $H = 30$  cm

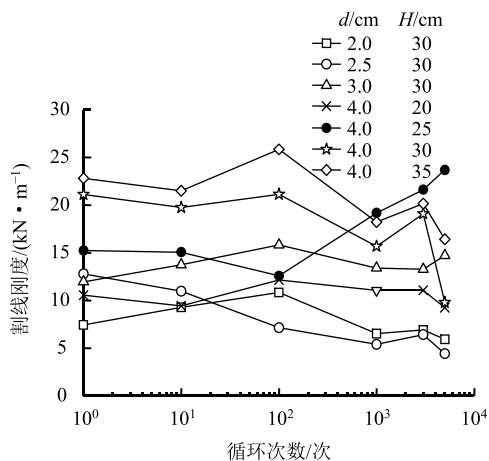


(g)  $d = 4.0$  cm,  $H = 35$  cm

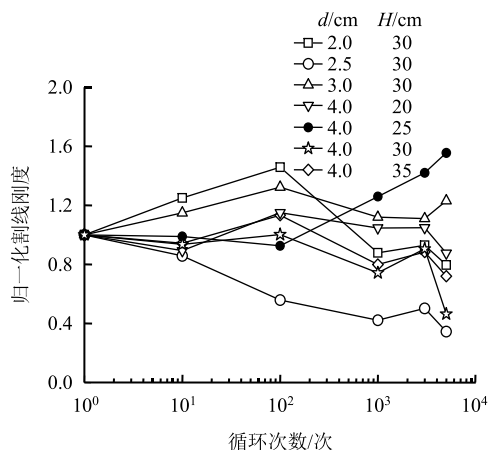
图 7 加载点处的荷载位移曲线  
Fig.7 Load-displacement curves at loading point

及 5 000 次循环加载对应的荷载位移滞回曲线。随着循环次数的增加, 单向循环加载模式下整体滞回圈逐渐右移并产生累积变形。滞回圈的面积逐渐减小, 表明桩周土体行为从弹塑性逐渐向弹性阶段转变。

图 8 为与图 7 对应的 6 个循环加载次数下滞回圈整体割线刚度与循环次数的关系曲线及采用第 1 次割线刚度进行归一化后的曲线。砂土由于剪胀性的存在, 其桩侧刚度变化比较剧烈, 数据相对较为离散。但从图 8(b)仍可以从整体上看出, 第 1、10、100 次的割线刚度呈增大趋势, 而 100 次以后循环加载割线刚度呈减小趋势。可能的解释是初期桩周浅层砂土密实度随着循环荷载的增加而逐渐密实, 而随着循环次数的增加以及桩身变形的累积, 桩侧土体抵抗逐渐向深层传递, 深层土体的土体密实度在循环加载下有所减小, 导致滞回圈整体刚度减小。明显与整体规律不一致的两组数据与伺服加载输出荷载的偏移以及砂土制备的不完全一致有关。



(a) 未归一化结果



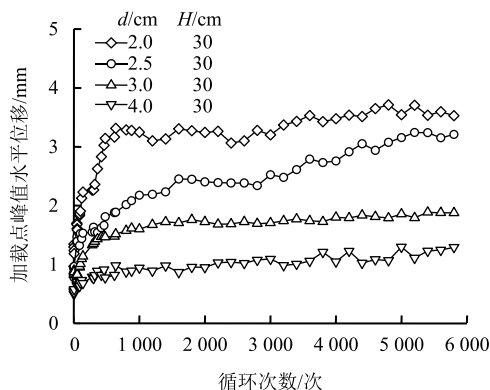
(b) 归一化结果

图 8 割线刚度与循环次数关系

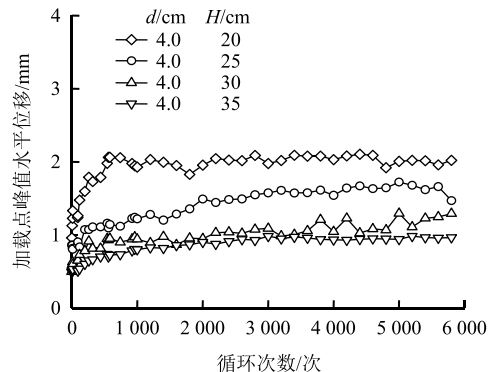
Fig.8 Relationships between secant stiffness and number of cycles

### 3.3 循环加载峰值水平位移

加载点累积峰值水平位移随循环加载次数的变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 前 1 000 次循环加载中, 变形的累积随循环加载次数增速较快, 其后累积变形增速下降。随着直径和埋深的减小, 桩顶累积位移有所增加。在本次试验的直径变化范围内, 直径的等幅增加引起的桩顶累积水平位移降低近似也是等幅的。而随着单桩埋深的增加, 累积变形的下降程度有所减小, 表明存在临界埋深, 对应单桩的桩顶水平累积位移趋于某一稳定值。



(a) 桩径变化



(b) 埋深变化

图 9 桩顶位移与循环次数的关系

Fig.9 Relationships between pile top displacement and number of cycles

## 4 桩顶循环累积位移模型

Little 等<sup>[14]</sup>认为, 砂土中水平受荷桩的桩顶累积位移与循环次数的关系可近似采用指数函数来拟合, 即

$$\frac{u_N}{u_1} = N^t \quad (1)$$

式中:  $u_1$  和  $u_N$  分别为第 1 次的桩顶水平位移和第  $N$  次的循环累积位移;  $t$  为与循环次数相关的经验参

数。如图 10 所示,在双对数坐标系中对桩顶循环累积位移与循环次数进行线性拟合,对应斜率即为参数  $t$ ,  $t = 0.13$ 。

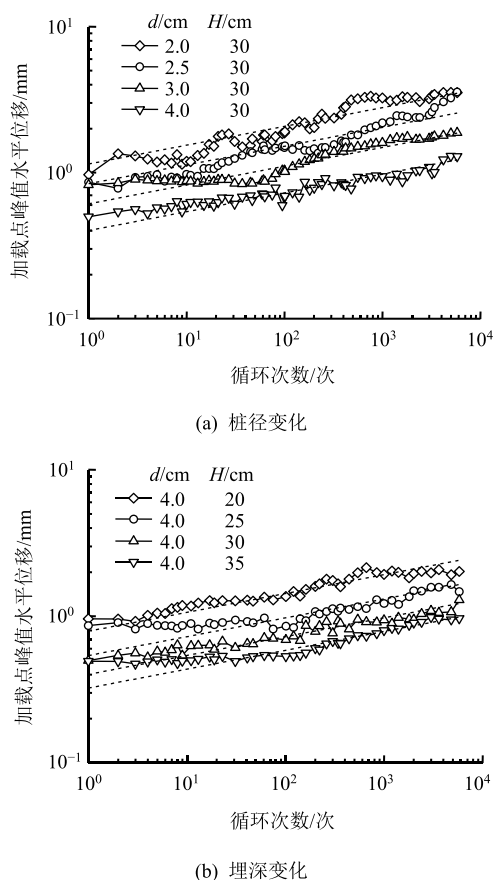


图 10 拟合结果与试验对比  
Fig.10 Comparison of fitting results and experimental results

将图 10 中线性拟合得到的第 1 次桩顶水平位移  $u_1$  与归一化循环加载幅值  $\zeta_b$  的关系显示在图 11 中。由图可见,第 1 次桩顶水平位移  $u_1$  随着荷载幅值  $\zeta_b$  的增加而增加,增加的幅度即斜率与桩径以及埋深的变化有关。桩顶变化所对应的拟合直线斜率

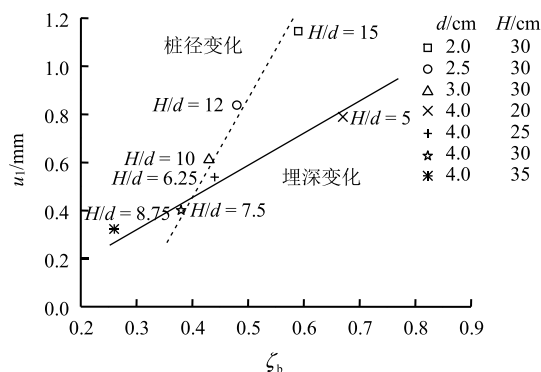


图 11  $u_1$  与  $\zeta_b$  的关系  
Fig.11 Relationship between  $u_1$  and  $\zeta_b$

明显大于埋深的变化。结合式 (1) 可以认为:在实际工程中,增大桩径的措施对于控制桩顶水平累积位移来说,其效果明显比增加桩长要好。

## 5 结 论

(1) 采用最大桩顶荷载和最大桩顶变形对一次加卸载曲线进行归一化,针对本文的试验加载条件,水平受荷桩的残余变形约为最大位移的 80%。归一化荷载位移曲线形状较为一致,与桩径、埋深及荷载大小等因素没有明显关联。

(2) 循环加载滞回圈随着循环次数增加面积逐渐减小,表明桩周土体行为从弹塑性逐渐向弹性阶段转变。

(3) 滞回曲线割线刚度在前期逐渐增大,其后有减小趋势。可能的原因是初期循环荷载作用使得浅层土体密实度逐渐增加,而随着循环次数增加,桩周土体抵抗由浅层向深层传递,深层土体密实度有所降低。

(4) 在本次试验的直径变化范围内,随着直径的等幅增加,桩顶累积水平位移降低近似等幅;随着单桩埋深的增加,桩顶累积位移的下降程度有所减小,表明存在临界埋深,对应单桩的桩顶水平累积位移趋于某一稳定值。

(5) 指数模型能够合理反映桩顶循环累积位移随循环加载次数的增长规律。

(6) 经验模型的分析表明,实际工程中增大桩径对于循环累积位移的控制效果要好于增加埋深。

## 参 考 文 献

- [1] BAYTON M S M, BLACK J A. Evaluating the  $p$ - $y$  curve method of analysis for large-diameter monopiles using Centrifuge Modelling[C]//Geo-Chicago 2016. Chicago: American Society of Civil Engineers, 2016: 418-428.
- [2] 朱斌,朱瑞燕,罗军,等. 海洋高桩基础水平大变位性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 521-530.  
ZHU Bin, ZHU Rui-yan, LUO Jun, et al. Model tests on characteristics of ocean and offshore elevated piles with large lateral deflection[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(4): 521-530.
- [3] 陈仁朋,顾明,孔令刚,等. 水平循环荷载下高桩基础受力性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 1990-1996.  
CHEN Ren-peng, GU Ming, KONG Ling-gang, et al. Large-scale model tests on high-rise platform pile groups

- under cyclic lateral loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(11): 1990-1996.
- [4] LI Z, HAIGH S K, BOLTON M D. Centrifuge modelling of mono-pile under cyclic lateral loads[J]. **Physical Modelling in Geotechnics**, 2010, 2: 965-970.
- [5] 王富强, 荣冰, 张嘎, 等. 水平循环荷载下风电桩基础离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1926-1930.
- WANG Fu-qiang, RONG Bing, ZHANG Ga, et al. Centrifugal model test of pile foundation for wind power unit under cyclic lateral loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 1926-1930.
- [6] 丁楚, 余文瑞, 史江伟, 等. 水平循环荷载下桩基变形特性的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2659-2664, 2711.
- DING Chu, YU Wen-rui, SHI Jiang-wei, et al. Centrifuge studies of pile deformation mechanisms due to lateral cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(8): 2659-2664, 2711.
- [7] LEBLANC C, HOULSBY G Y, BYRNE B W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading[J]. **Geotechnique**, 2010, 60(2): 79-90.
- [8] ARSHAD M, O'KELLY B C. Model studies on monopile behavior under long-term repeated lateral loading[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2016, 17(1): 04016040.
- [9] RICHARDS I A, BYRNE B W, HOULSBY G T. Monopile rotation under complex cyclic lateral loading in sand[J]. **Géotechnique**, 2019: 1-15.
- [10] 张勋, 黄茂松, 胡志平. 砂土中单桩水平循环累积变形特性模型试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 933-941.
- ZHANG Xun, HUANG Mao-song, HU Zhi-ping. Model tests on cumulative deformation characteristics of a single pile subjected to lateral cyclic loading in sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 933-941.
- [11] BAYTON M S M, BLACK J A, KLINKVORT R T. Centrifuge modelling of long term cyclic lateral loading on monopiles[C]//Physical Modelling in Geotechnics-ICPMG 2018, [S. l.]: [s. n.], 2018.
- [12] ANDERSON K H. Bearing capacity under cyclic loading-offshore, along the coast, and on land[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2009, 46(5): 513-535.
- [13] KUO Y S, ACHMUS M, ABDEL-RAHMAN K. Minimum embedded length of cyclic horizontally loaded monopiles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(3): 357-363.
- [14] LITTLE R L, BRIAUD J L. Full scale cyclic lateral load tests on six single piles in sand[R]. [S. l.]: [s. n.], 1988.

---

上接第 782 页

- [9] LUO H, LU H, COOPER W L, et al. Effect of mass density on the compressive behavior of dry sand under confinement at high strain rates[J]. **Experimental Mechanics**, 2011, 51(9): 1-12.
- [10] WANG S, SHEN L, FEDERICO MAGGI, et al. Uniaxial compressive behavior of partially saturated granular media under high strain rates[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2017, 102: 156-168.
- [11] 卢芳云, 陈荣, 林玉亮, 等. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- LU Fang-yun, CHEN Rong, LIN Yu-liang, et al. Hopkinson bar techniques[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [12] LUO H, LU H, LEVENTIS N. The compressive behavior of isocyanate-crosslinked silica aerogel at high strain rates[J]. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, 2006, 10(2): 83-111.
- [13] LUO H, CHURU G, FABRIZIO E F, et al. Synthesis and characterization of the physical, chemical and mechanical properties of isocyanate-crosslinked vanadia aerogels[J]. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, 2008, 48(1-2): 113-134.
- [14] 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收: 耐撞性、包装、安全防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- YU Tong-xi, LU Guo-xing. Energy absorption of structures and materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.