

文章编号:1006-2467(2020)01-0085-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.01.011

# 双向循环荷载下的单桩基础累积侧向位移

胡安峰<sup>1</sup>, 肖志荣<sup>2</sup>, 江进华<sup>1</sup>, 付鹏<sup>1</sup>, 南博文<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心; 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058;

2. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院, 杭州 310023)

**摘要:** 针对软黏土地基中单桩基础在竖向和水平循环荷载下的累积侧向变形问题, 建立基于双向循环受荷的软黏土刚度衰减模型. 利用有限元软件 Abaqus 进行二次开发实现刚度衰减, 通过数值模拟分析竖向和水平循环荷载耦合作用下单桩基础的累积侧向位移. 结果表明, 水平和竖向循环荷载耦合作用下, 桩顶侧向位移相比于只受水平循环荷载时更大; 存在最小水平循环荷载比, 当水平循环荷载比小于该值时, 桩基不会产生侧向位移累积; 竖向循环荷载对桩基累积侧向变形的影响存在一临界值, 小于该值时, 对桩顶侧向位移的影响很小.

**关键词:** 双向循环荷载; 单桩基础; 侧向位移; 刚度衰减; 循环荷载比

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

## Cumulative Lateral Displacement of Single Pile Foundation Under Lateral and Vertical Cyclic Loadings

HU Anfeng<sup>1</sup>, XIAO Zhirong<sup>2</sup>, JIANG Jinhua<sup>1</sup>, FU Peng<sup>1</sup>, NAN Bowen<sup>1</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering; MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** The stiffness degradation model of soft clay based on bidirectional cyclic loadings was presented to analyze the cumulative lateral displacement of single pile foundation under lateral and vertical cyclic loadings. The finite element software Abaqus was used to realize the stiffness degradation by secondary development method and study cumulative lateral displacement of single pile foundation under lateral and vertical cyclic loadings. Results indicate that under vertical and lateral cyclic loadings, lateral displacement at single pile head is larger than that only under horizontal cyclic loading. Minimum horizontal cyclic loading ratio is found under the analysis. When the horizontal cyclic loading ratio is smaller than the minimum, lateral displacement cannot cumulate in single pile foundation. There is a critical value of vertical cyclic loading in terms of its influence on pile lateral deformation. Lateral displacement of pile cannot be seriously affected by vertical cyclic loading when it is below that critical value.

**Key words:** bidirectional cyclic loadings; single pile; lateral displacement; stiffness degradation; cyclic loading ratio

收稿日期: 2018-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778572, 51978612)

作者简介: 胡安峰(1974-), 男, 山东省枣庄市人, 副教授, 从事海洋岩土工程与桩基工程的研究, E-mail: anfenghu@zju.edu.cn.

随着经济的不断发展,桩基础在港口码头、跨海大桥等工程中应用越来越广泛,这类桩基础破坏机理和变形情况比传统桩基更为复杂.车辆等交通荷载产生竖向作用,风、波浪等产生水平向作用,而且这些荷载作用为长期循环,使桩基容易产生累积变形.因此,研究竖向和水平循环荷载作用下桩基础的累积侧向位移意义重大.

国内外学者对水平循环荷载作用下桩基变形特性做了大量研究.桩基础侧向变形分析方法最普遍的是美国石油协会 (API)<sup>[1]</sup> 建议的  $p$ - $y$  曲线分析法,但在水平循环荷载作用下桩基侧向位移分析中,API 建议的折减系数不能体现循环次数对累积变形的影响.Poulos<sup>[2]</sup> 在采用  $p$ - $y$  曲线法研究桩基循环累积变形时考虑了桩周土体强度和刚度随循环次数衰减的影响,并给出了循环荷载作用下土体强度与刚度弱化因子的计算曲线.Rosquoet 等<sup>[3]</sup> 进行了一系列水平循环加载下桩基特性试验,得出了循环荷载大小与桩身循环变形之间的关系表达式.朱斌等<sup>[4]</sup> 进行了砂土中大直径单桩水平受荷试验,提出了与循环应力比相关的  $p$ - $y$  曲线循环弱化因子和相应的桩基累积变形分析方法.郭玉樹等<sup>[5]</sup> 提出了通过室内循环三轴试验的结果来分析单桩基础在水平循环荷载下变形的办法.罗如平等<sup>[6]</sup> 通过开发有限元用户子程序将刚度衰减模型嵌入到数值分析中,研究了荷载特性与循环次数对桩基累积水平变形的影响.

港口码头和跨海大桥等工作环境复杂,桩基础同时承受水平和竖向循环荷载作用,但以上研究在分析桩基累积侧向变形时没有考虑竖向循环荷载的影响.Parvin 等<sup>[7]</sup> 利用数值模拟和模型试验,分析了水平和竖向循环荷载耦合作用下单桩的特性,表明桩身轴力、桩身弯矩比单向加载时都更大;左殿军等<sup>[8]</sup> 利用数值模拟研究了水平和竖向循环荷载作用下码头群桩基础的受力特性;但两者都没有考虑桩周土体循环弱化发生刚度衰减的特性.本文基于室内循环三轴试验数据,建立考虑双向循环荷载下的软黏土刚度衰减模型,利用商业有限元软件 Abaqus 进行二次开发,通过用户子程序将刚度衰减模型嵌入到有限元分析中,研究竖向和水平循环荷载耦合作用下单桩基础的累积侧向位移特性.

1 刚度衰减模型

许多学者研究了土体在循环荷载作用下的特性,提出了一些软化模型.Idriss 等<sup>[9]</sup> 最早提出了软化指数  $\delta$  的概念,即土体切变模量在第  $N$  次与第 1

次循环时的比值,建立了软化指数与循环次数关系的表达式:

$$\delta = \frac{G_N}{G_1} = N^{-d} \tag{1}$$

式中: $d$  为软化参数.Yasuhara 等<sup>[10]</sup> 在研究砂土循环特性时,提出了软化指数和循环次数之间的半对数表达式:

$$\delta = 1 - d \lg N \tag{2}$$

王军等<sup>[11]</sup> 开展了饱和软黏土的循环三轴试验,发现  $\delta$  与  $\lg N$  之间并不是简单的线性关系,而是存在较明显的曲线关系,因而提出公式如下:

$$\delta = 1 - \alpha \lg N - \beta (\lg N)^2 \tag{3}$$

式中: $\alpha, \beta$  为软化参数.王军等<sup>[12]</sup> 又研究了双向循环荷载作用下饱和软黏土的软化特性,对土样同时施加径向和轴向正弦循环荷载如图 1 所示.

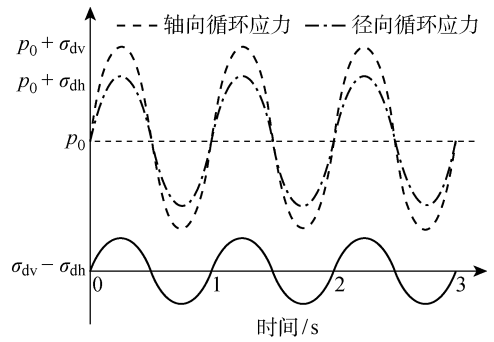


图 1 双向正弦循环荷载曲线<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Bidirectional sinusoidal cyclic loadings<sup>[12]</sup>

图中  $p_0$  为围压, $\sigma_{dh}$  与  $\sigma_{dv}$  分别为径向与轴向循环应力,循环偏应力  $\sigma_d = \sigma_{dv} - \sigma_{dh}$ . 为了便于研究,分别定义了循环偏应力比与径向循环应力比:

$$r_c = \sigma_d / (2\tau_u) \tag{4}$$

$$R_c = \sigma_{dh} / (2\tau_u) \tag{5}$$

式中: $\tau_u$  为土体不排水强度.文中分析了循环偏应力、径向循环应力对软化参数的影响,考虑双向循环荷载作用下土体的软化情况,利用式(3)建立了软化模型.虽然考虑了  $r_c$  和  $R_c$  对  $\delta$  的影响,但模型公式复杂,拟合参数较多,难以确定,在实际工程中应用难度较大.

基于此,本文在其试验数据基础上对软化参数  $\alpha$  和  $\beta$  进行重新拟合,得到较简洁实用的关系式如下,从而改进软化模型.

$$\alpha = ar_c^2 \tag{6}$$

$$\beta = b \frac{r_c}{R_c} + cr_c^2 \tag{7}$$

式中: $a, b, c$  均为拟合参数,分别为 0.010 34, -0.044 52, 0.485 21.图 2 所示为修正刚度衰减模

型与实测数据的对比.从图中可以看出,修正刚度衰减模型曲线与实测数据点吻合得较好,发展变化趋势相同,进一步说明了本文刚度衰减模型的正确性.

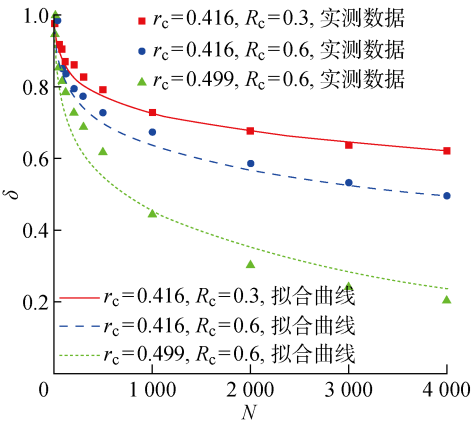


图 2 修正刚度衰减模型

Fig. 2 Modified model of stiffness degradation

表 1 土体及桩基模型参数

Tab. 1 Model parameters of soil and pile

模型	黏聚力 $c/\text{kPa}$	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
土体	6.6	15.7	9	0.49	17.6
桩基	—	—	30 000	0.20	25.0

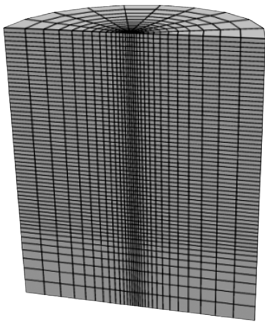


图 3 桩土数值计算模型

Fig. 3 Numerical simulation pile-soil model

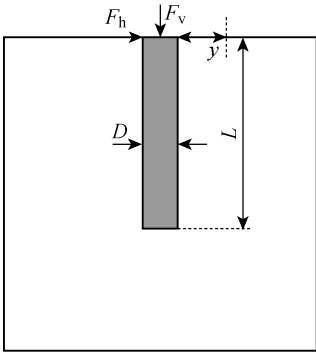


图 4 受荷时桩土模型剖面图

Fig. 4 Profile of pile-soil model under loadings

2 数值模拟

2.1 建立模型

在桩土模型中,饱和软黏土地基采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,参照文献[13]可得相应参数.桩体材料为混凝土,桩基采用线弹性模型,土体及桩基模型参数如表 1 所示.

通过有限元软件 Abaqus 建立三维桩土有限元模型.由于模型及受力的对称性,桩土模型采用半圆柱体.图 3 所示为数值计算模型,单桩直径  $D=1\text{ m}$ 、桩长  $L=20\text{ m}$ ,为了避免模型边界条件对数值模拟结果的影响,桩基中心距水平向边界和桩底距地基底部的距离都取 15 倍桩径<sup>[14]</sup>,桩土之间建立摩擦接触,摩擦因数为  $\tan(0.75\varphi)$ .受荷时桩土模型如图 4 所示.其中,  $y$  为桩顶侧向位移,  $F_h$  与  $F_v$  分别为水平循环荷载和竖向循环荷载.

2.2 刚度衰减模型的实现

建立桩土模型,进行地应力平衡后同时对单桩施加水平循环荷载和竖向循环荷载.要在有限元分析中实现刚度衰减模型,需执行以下 3 个步骤.

(1) 输出施加循环荷载前后每个土体单元的最大主应力和最小主应力,即  $\sigma_1^{(1)}$ 、 $\sigma_3^{(1)}$  与  $\sigma_1^{(2)}$ 、 $\sigma_3^{(2)}$ .

(2) 计算出  $\sigma_1^{(2)}$  与  $\sigma_1^{(1)}$  和  $\sigma_3^{(2)}$  与  $\sigma_3^{(1)}$  的差值,即分别得到  $\sigma_{dv}$  和  $\sigma_{dh}$ ;然后算出循环偏应力  $\sigma_d$ .

(3) 由  $\sigma_d$  和  $\sigma_{dh}$  根据式(4)和(5)求得每个土体单元所受的循环偏应力比与径向循环应力比,再依次利用式(6)、(7)和(3)计算所有土体单元在双向循环荷载作用下的软化指数,最后通过子程序来实现土体刚度衰减模型在有限元分析中的应用.

3 有限元模型的验证

Liao 等<sup>[15]</sup>在近海软黏土中开展了不同水平循环荷载作用下 PVC 管桩侧向位移发展的室内模型试验.在模型试验中,桩长 1 000 mm,嵌入深度 700 mm,桩径为 50 mm,壁厚 5 mm,黏土重度为 17 kN/m<sup>3</sup>,模型桩的水平静力极限荷载为 100 N.采用本文的方法,建立和模型试验参数一致的有限元模型,计算单桩在不同水平循环荷载下的累积侧向位移,再和模型试验结果比较,如图 5 所示.从图中可以看

出,在水平循环荷载作用下,本文结果比原试验略小一些,但发展变化的规律相同.同时,在  $N=1\,000$  后,侧向位移发展趋于平稳.这表明本文提出的刚度衰减模型可用于研究软黏土中单桩基础的侧向位移问题.

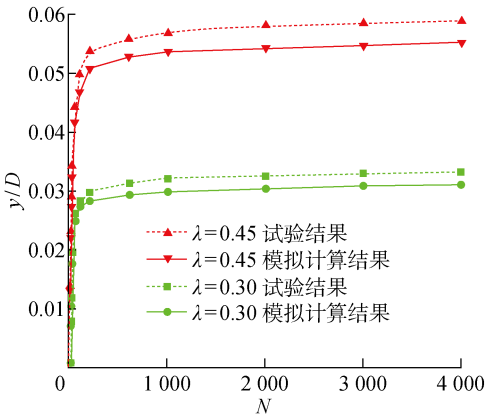


图 5 本文模拟与模型试验结果对比

Fig. 5 Comparison between the proposed model and model test

4 双向循环荷载下桩基侧向位移分析

研究双向循环荷载作用下桩基侧向位移,需要先确定桩基的水平极限承载力  $F_{hu}$  和竖向极限承载力  $F_{vu}$ .参考 Zdravković 等<sup>[16]</sup>研究方法,基于桩顶水平变形  $0.1D$  来确定  $F_{hu}$ ,根据建筑桩基技术规范<sup>[17]</sup>可以确定  $F_{vu}$ .为模拟双向循环荷载作用下单桩基础受力状态,在竖向和水平向同时施加正弦规律变化的循环荷载如下.

$$F_v = \frac{F_{vc}}{2} + \frac{F_{vc}}{2} \sin(\omega_1 t) \tag{8}$$

$$F_h = \frac{F_{hc}}{2} + \frac{F_{hc}}{2} \sin(\omega_2 t) \tag{9}$$

式中:  $\omega_1, \omega_2$  代表荷载频率;  $t$  为加载时间;  $F_{vc}, F_{hc}$  分别是竖向循环荷载幅值和水平循环荷载幅值.借鉴既往研究方法<sup>[18-19]</sup>,取  $\omega_1 = \omega_2 = 1\text{ Hz}$ ,定义竖向循环荷载比  $\eta = F_{vc}/F_{vu}$ ,水平循环荷载比  $\lambda = F_{hc}/F_{hu}$ .取不同的循环荷载比,进行不同幅值循环荷载作用下单桩基础累积侧向位移研究:  $\eta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ;  $\lambda = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ .

4.1 双向循环荷载下桩顶侧向位移的发展

竖向循环荷载幅值恒定( $\eta=0.2$ )时,改变水平循环荷载幅值,桩顶累积侧向位移的发展情况如图 6 所示.从图中可以看出,当水平循环荷载较小时( $\lambda=0.1$ )侧向位移基本保持不变,累积位移不足  $0.01\text{ m}$ .由此可知存在最小水平循环荷载比  $\lambda_{\min}$ ,当

$\lambda \leq \lambda_{\min}$  时侧向位移并不随着循环次数增大而累积.当  $\lambda$  从  $0.2$  到  $0.5$  时,侧向位移随循环次数增大而迅速发展,在  $N=1\,000$  后发展变缓,最后趋于稳定.因此,水平循环荷载产生的循环效应主要集中在循环周期的前面阶段,朱斌等<sup>[4]</sup>在砂土模型试验中也得到类似规律.当  $\lambda > 0.5$  时,桩顶侧向位移随着循环次数急剧增大,桩顶侧向位移并不趋于平稳.基于此,表明存在最大水平循环荷载比  $\lambda_{\max}$ ,从控制变形的角度分析,  $\lambda$  应控制在  $0.5$  以下.

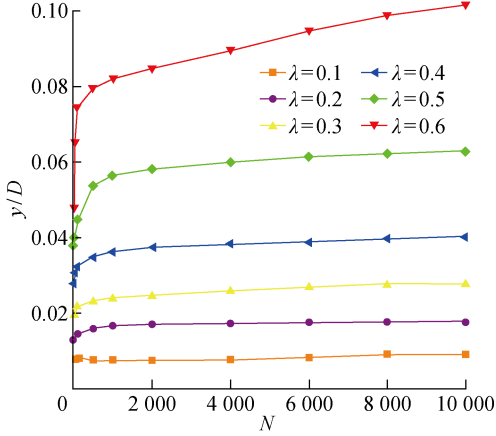


图 6 不同水平循环荷载下的桩顶侧向位移

Fig. 6 Lateral displacements of pile head under various lateral cyclic loadings

图 7 所示当  $\lambda = 0.5$  时,不同竖向循环荷载下桩顶累积侧向位移的发展情况.如图所示:  $\eta$  为  $0.2$  和  $0.3$  时桩顶侧向位移开始时增长较快,后期逐渐趋于平稳;同时随着  $\eta$  增大,桩顶侧向位移的发展速度增快,而且达到稳定时所需要的循环次数也越大.例如  $\eta = 0.2$  时,位移趋于稳定需要约  $1\,000$  次,然而  $\eta = 0.4$  时,循环  $1\,000$  次后累积位移仍持续增长,

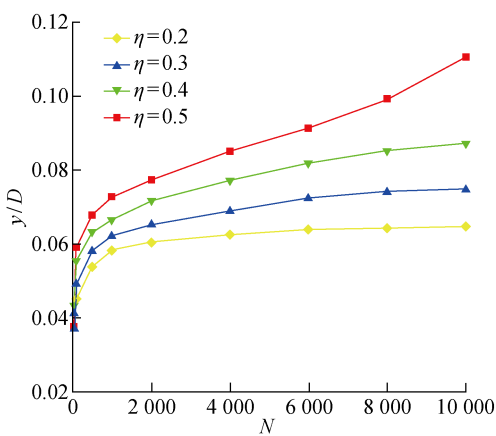


图 7 不同竖向循环荷载下时桩顶侧向位移

Fig. 7 Lateral displacements of pile head under various vertical cyclic loadings

与图 6 中水平循环荷载作用下  $N = 1\,000$  后位移趋于平稳有所不同,说明竖向循环荷载影响桩顶侧向位移的发展,推迟其平稳阶段. 当  $\eta = 0.5$  时,桩顶位移持续增大,  $y/D$  超过 0.1 时桩基已经被破坏. 因此,当竖向与水平循环荷载都比较大时 ( $\lambda = 0.5$ ,  $\eta = 0.5$ ), 桩基础累积位移发展迅速,位移值较大,桩基容易破坏,在实际工程中应避免双向循环荷载都较大的情况.

双向循环荷载作用下桩顶累积侧向位移如图 8 所示 ( $N = 10\,000$ ). 当水平循环荷载较小时 ( $\lambda = 0.1$ ), 桩顶侧向位移很小且几乎不变,说明水平循环荷载较小时竖向循环荷载的增大对桩顶侧向位移影响很小. 当水平循环荷载较大时 ( $\lambda$  为 0.2 ~ 0.5), 随着  $\eta$  增大, 桩顶侧向位移不断增长,而且发展速度加快. 竖向循环荷载比  $\eta$  从 0.1 到 0.2 时, 桩顶侧向位移增长较小, 但  $\eta$  为 0.2 ~ 0.5 时, 桩顶侧向位移增长迅速, 这说明竖向循环荷载比对桩基累积变形的影响存在一个界限值  $\eta_{\text{lim}}$ . 朱斌等<sup>[19]</sup> 在砂土中竖向循环受荷单桩的沉降模试型验中也发现类似规律. 验证了本结论的正确性.

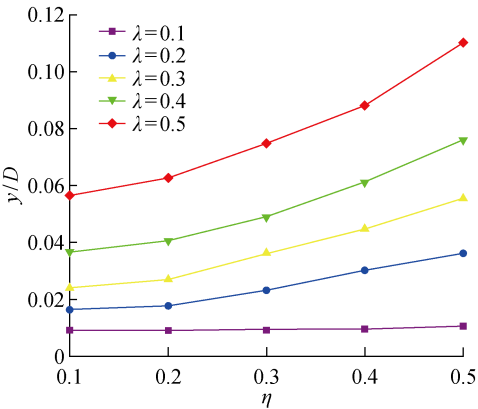


图 8 双向循环荷载下的桩顶侧向位移  
Fig. 8 Lateral displacements of pile head under bidirectional cyclic loadings

4.2 单向与双向循环荷载下桩顶侧向位移的对比

$N = 10\,000$  次时, 桩顶施加竖向静载 ( $0.3F_{\text{vu}}$ ) 与竖向循环荷载 ( $\eta = 0.3$ ) 下的桩顶累积侧向位移对比情况如图 9 所示. 由图可见, 当水平循环荷载较小时, 两者位移相近, 当水平循环荷载较大时, 竖向静载条件下的侧向位移明显小于竖向循环荷载条件下的侧向位移, 且差距不断增大. 这是因为单桩受到双向循环荷载耦合作用时, 桩周土双向受荷, 双向循环荷载作用下土体的强度比单向循环荷载作用下强度低<sup>[20]</sup>. 循环荷载较小时, 应变发展缓慢, 土体的应变较小, 土体内部结构尚未破坏, 故而两者桩顶侧向位

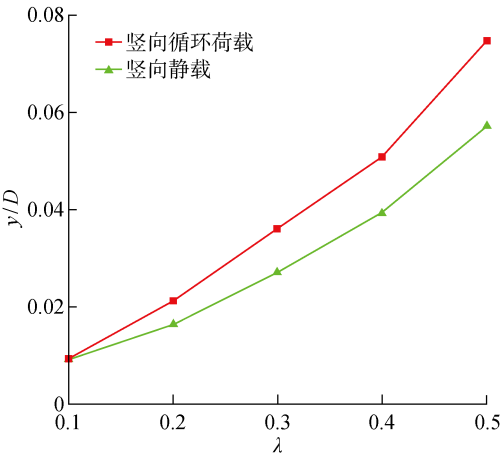


图 9 竖向静载与竖向循环荷载下的桩顶侧向位移  
Fig. 9 Lateral displacements of pile head under vertical static and cyclic loadings

移相近. 循环荷载增大时, 双向受荷土体的应变迅速发展, 土体内部结构较早开始被破坏, 出现应变软化现象, 刚度不断减小, 故而桩基变形更大.

4.3 不同竖向循环荷载下的桩身侧向位移

不同竖向循环荷载下桩身侧向位移的发展情况如图 10 所示 ( $\lambda = 0.3, N = 10\,000$ ), 其中  $z$  为桩基的竖向坐标. 可以看出,  $\eta$  为 0.1 和 0.2 时, 位移零点的位置在埋入深度为 10 m 左右, 之后随着  $\eta$  的增大, 位移零点的位置不断下移, 说明竖向循环荷载的增大加深了桩土变形的区域. 同时, 桩身侧向位移也随着  $\eta$  的增大而不断发展,  $\eta = 0.1$  和 0.2 时, 位移曲线基本重合, 而  $\eta = 0.3$  的零点以上侧移比  $\eta = 0.2$  的零点以上侧移发展更迅速, 说明竖向循环荷载对桩基变形的影响存在一个界限值.

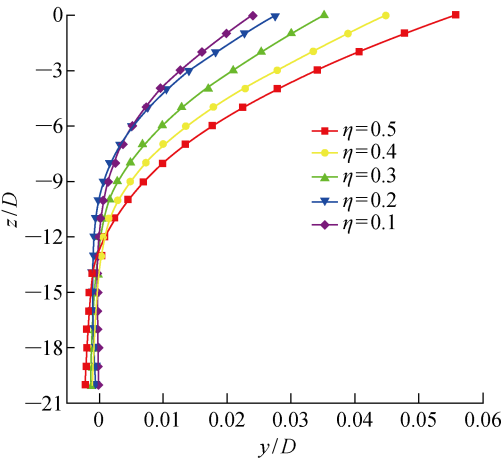


图 10 不同竖向循环荷载作用下的桩身侧移  
Fig. 10 Lateral displacements of pile under various vertical cyclic loadings

## 5 结语

本文建立了基于双向循环受荷的软黏土刚度衰减模型,通过用户子程序将刚度衰减模型嵌入到有限元模型分析中,研究竖向和水平循环荷载耦合作用下单桩基础的累积侧向位移特性,得到如下结论:

(1) 水平和竖向循环荷载耦合作用下,桩周土体双向受荷,应变发展迅速,刚度不断减小,易出现应变软化现象,使得桩顶侧向位移相比于只受水平循环荷载下的位移更大.循环加载一定周期后,桩顶累积侧向位移逐渐趋于平稳,但竖向循环荷载的增大会推迟其平稳阶段,使其达到平稳阶段的循环周期增大.

(2) 水平循环荷载比存在临界值  $\lambda_{\min}$  和  $\lambda_{\max}$ . 当  $\lambda \leq \lambda_{\min}$  时,桩顶侧向位移不会随着循环加载而累积. 当  $\lambda_{\min} < \lambda \leq \lambda_{\max}$  时,循环加载前期桩顶累积侧向位移随着循环次数增大而增大,后期逐渐趋于平稳. 当  $\lambda > \lambda_{\max}$  时,桩顶累积侧向位移迅速增长,后期并不趋于平稳.

(3) 当水平循环荷载较小时,竖向循环荷载对桩顶累积侧向位移影响不大. 当水平循环荷载较大时,竖向循环荷载对累积侧向位移的影响存在一个界限值,即  $\eta_{\lim}$ . 竖向循环荷载比小于该值时,竖向循环荷载对累积侧向位移影响很小.

## 参考文献:

- [1] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms[S]. Washington: American Petroleum Institute, 1993.
- [2] POULOS H G. Single pile response to cyclic lateral load[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1982, 108(3): 355-375.
- [3] ROSQUOËT F, THOREL L, GARNIER J, *et al.* Lateral cyclic loading of sand-installed piles[J]. *Soils and Foundations*, 2007, 47(5): 821-832.
- [4] 朱斌,熊根,刘晋超,等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1807-1815.  
ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jinchao, *et al.* Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(10): 1807-1815.
- [5] 郭玉树,亚克慕斯·马丁,阿布达雷赫曼·哈里. 用循环三轴试验分析海上风力发电机单桩基础侧向位移[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(11): 1729-1734.  
KUO Yushu, ACHMUS Martin, ABDEL-RAHMAN

- Khalid. Estimation of lateral deformation of monopile foundations by use of cyclic triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(11): 1729-1734.
- [6] 罗如平,李卫超,杨敏. 水平循环荷载下海上大直径单桩累积变形特性[J]. *岩土力学*, 2016, 37(Sup. 2): 607-612.  
LUO Ruping, LI Weichao, YANG Min. Accumulated response of offshore large-diameter monopile under lateral cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Sup. 2): 607-612.
- [7] PARVIN A, WANG W. Concrete columns confined by fiber composite wraps under combined axial and cyclic lateral loads[J]. *Composite Structures*, 2002, 58(4): 539-549.
- [8] 左殿军,陈龙,田志伟,等. 双向循环荷载作用下码头群桩基础受力特性数值分析[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(Sup. 1): 51-55.  
ZUO Dianjun, CHEN Long, TIAN Zhiwei, *et al.* Numerical study on mechanical characteristics of pile groups of wharf foundation under lateral and vertical cyclic loadings[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Sup. 1): 51-55.
- [9] IDRIS I M, SINGH R D, DOBRY R. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1978, 104(12): 1427-1447.
- [10] YASUHARA Y, 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*. London: Thomas Telford, 1998: 373-382.
- [11] 王军,蔡袁强,徐长节,等. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1713-1719.  
WANG Jun, CAI Yuanqiang, XU Changjie, *et al.* Study on strain softening model of saturated soft clay under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1713-1719.
- [12] 王军,蔡袁强,潘林有. 双向激振下饱和软黏土应变软化现象试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(2): 178-185.  
WANG Jun, CAI Yuanqiang, PAN Linyou. Degradation of stiffness of soft clay under bidirectional cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(2): 178-185.
- [13] 焉振,王元战,肖忠,等. 循环荷载下软黏土不排水强度弱化分析的动力有限元 ABAQUS 实现[J]. 岩

土力学, 2016, 37(Sup. 2): 735-744.

YAN Zhen, WANG Yuanzhan, XIAO Zhong, *et al.* Dynamic finite element analyses of undrained strength degradation of soft clay in ABAQUS under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Sup. 2): 735-744.

[14] ACHMUS M, THIEKEN K. On the behavior of piles in non-cohesive soil under combined horizontal and vertical loading[J]. **Acta Geotechnica**, 2010, 5 (3): 199-210.

[15] LIAO W M, ZHANG J J, WU J B, *et al.* Response of flexible monopile in marine clay under cyclic lateral load[J]. **Ocean Engineering**, 2018, 147: 89-106.

[16] ZDRAVKOVIC L, TABORDA D M G, POTTS D, *et al.* Numerical modelling of large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications [C]//**Frontiers in Offshore Geotechnics III**. London: Taylor & Francis Group, 2015: 759-764.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 桩基技术规范: JGJ 94-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical specification for pile foundation: JGJ 94-2008[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.

[18] 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.

HU Anfeng, ZHANG Guangjian, JIA Yushuai, *et al.* Application of degradation stiffness model in analysis of cumulative lateral displacement of monopile foundation[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2014, 48(4): 721-726.

[19] 朱斌, 任宇, 陈仁朋, 等. 竖向压循环荷载作用下单桩承载力及累积沉降特性模型试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(2): 186-193.

ZHU Bin, REN Yu, CHEN Renpeng, *et al.* Model test on bearing capacity and accumulated settlement of single pile subjected to axial cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31 (2): 186-193.

[20] 王常晶, 陈云敏. 双向循环荷载下饱和软黏土变形特性的试验研究[J]. **土木工程学报**, 2010, 43(Sup. 1): 573-576.

WANG Changjing, CHEN Yunmin. Experimental study on deformation behavior of saturated soft clay under bidirectional cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2010, 43(Sup. 1): 573-576.

(本文编辑: 蒋霞)