Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2020.04.001

水平循环荷载作用下桩基 p-y 曲线模型研究进展

王兆耀[1]，刘红军[1,2]，胡瑞庚[1]
(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院，山东 青岛 266100；2. 山东省海洋环境地质工程重点实验室，山东 青岛 266100)

摘 要：p-y 曲线法常用于水平静力受荷桩的分析，但海洋工程中的桩基除静力外还承受波、流等循环荷载作用，将静力 p-y 曲线直接用于循环荷载下桩基的设计研究时，往往会产生误差。本文梳理了水平循环荷载作用下 p-y 曲线模型的研究成果，按照得到循环 p-y 曲线的不同方式，将其分为总体调整法和参数修正法。在参数修正法中，根据修正时考虑的因素不同，分为考虑荷载特性的修正和考虑桩土相互作用的修正。最后通过对循环荷载作用下 p-y 曲线研究现状的总结对比，评价了不同方法的特点，讨论了当前研究存在的问题并给出了建议。

关键词：海洋工程；桩基础；p-y 曲线；水平循环荷载；修正方法
中图分类号：P75；TU43 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-6932(2020)04-0401-07

The review of p-y curve model for lateral cyclic loaded pile

WANG Zhaoyao[1], LIU Hongjun[1,2], HU Ruigeng[1]
(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Qingdao 266100, China)

Abstract: P-y curve method is often applied to analysis of piles subjected to lateral monotonic loads, but the piles in ocean engineering also bear the lateral cyclic loads induced by wave and current, and errors often occur when monotonic p-y curve was directly used for the design and research of cyclic loaded piles. In this paper, the current research progress of cyclic p-y curve model is introduced. According to the different ways of obtaining cyclic p-y curve, the method is classified into overall adjustment method and parameter modification method. In parameter modification method, according to the different factors considered in the process, it can be subdivided into correcting by cyclic load characteristics and pile-soil interaction. At last, based on summary and comparison, the characteristics of different methods are discussed, then problems and suggestions of existing researches are put forward.

Keywords: ocean engineering; pile foundation; p-y curve; lateral cyclic load; correction method

在分析水平受荷桩的响应时，常用到 p-y 曲线法（McClelland et al，1958），其中 p 代表土反力，y 代表位移。这种模型将桩侧土体离散为沿深度分布的一系列非线性弹簧，假定各个弹簧之间相互独立，其性质可以用土反力-桩的位移曲线来描述，因此不同深度处的弹簧就可以用不同的 p-y 曲线描述。p-y 曲线法作为一种非线性分析方法，在几十年的发展中不断完善。国外学者 Matlock（1970）与 Reese 等（1975）分别给出了软黏土和硬黏土中的 p-y 曲线构造方法，Reese 等（1974）给出了砂土中 p-y 曲线的表达式，美国石油协会 API（1993）给出的 p-y 曲线构造方法在世界范围

收稿日期：2019-09-20；修订日期：2019-12-17
基金项目：国家自然科学基金（41572247）；山东省科技攻关资助项目（2014GGX104007）
作者简介：王兆耀（1995-），硕士研究生，主要从事岩土工程研究。电子邮箱：zoyowong@163.com
通讯作者：刘红军，博士，教授。电子邮箱：hongjun@ouc.edu.cn

内都得到了广泛的应用。国内的研究起步相对较晚，代表性工作有王惠初等（1991）与章连洋等（1992）提出的 p-y 曲线计算方法。表 1 简要列举了几个经典 p-y 曲线模型，王成华等（2005）对静力 p-y 曲线的研究现状做了详细总结，本文不再赘述。

与静力荷载不同，跨海大桥、海上风电、钻井平台等海洋工程中的桩基础还承受波流等引起的循环荷载作用，对桩基设计研究时不考虑荷载的循环效应，往往会产生误差（李涛，2015；Long et al，1994）。

表 1 经典静力 p-y 曲线

	表达式	注释
Matlock（软黏土）	$\frac{p}{p_u}=0.5(\frac{y}{y_{50}})^{1/3}, y\leqslant 8y_{50}$；$\frac{p}{p_u}=1, y>8y_{50}$	p_u:极限土反力；y_{50}:到达极限土反力一半时对应的位移值
河海大学（黏土）	$\frac{p}{p_u}=\frac{y/y_{50}}{a+by/y_{50}}, y\leqslant\beta y_{50}$；$\frac{p}{p_u}=1, y>\beta y_{50}$	$a=\frac{\beta}{\beta-1}, b=\frac{\beta-1}{\beta-2}$，其中$\beta$由三轴试验获得
API（砂土）	$p=A\cdot p_u\ \tanh(\frac{kx}{A\cdot p_u}y)$	A:经验系数；k:初始地基反力模量；x:距泥面处距离 $K=kx$:地基反力模量

本文将获得循环荷载作用下 p-y 曲线的方法分为两类（图 1）：（1）总体调整法。即根据循环荷载作用下的试验或数值模拟等结果，对静力 p-y 曲线做整体的经验调整以反映循环效应。（2）参数修正法。将循环效应与荷载特性建立联系，根据循环次数、幅值等对静力 p-y 曲线中的具体参数做量化修正；或将循环效应直接与桩土相互作用的力学行为建立联系，根据循环荷载作用下的土体累积塑性应变、桩土界面特性等对静力 p-y 曲线进行修正，得到考虑循环效应的 p-y 曲线。根据对循环 p-y 曲线研究现状的总结对比，本文提出了当前研究存在的问题和建议，为研究人员理清思路。

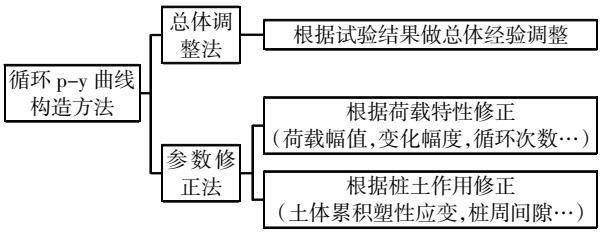

图 1 循环 p-y 曲线模型构建方法分类

1 总体调整法

早期的 p-y 曲线在考虑循环荷载效应时，一般是对静力 p-y 曲线做总体的经验调整，直接给出循环荷载作用下的 p-y 曲线表达式。如 API（1993）是将静力 p-y 曲线中的经验系数 A 取值为 0.9，构建循环荷载作用下的 p-y 曲线，张方等（2017）建议将表征循环效应的系数 A 取值为 0.52。Matlock 等（1970）、Reese 等（1974，1975）、Murchison 等（1984）、章连洋等（1992）在构建循环 p-y 曲线时，都是将荷载简单区分为静力和循环两种情况，给出不同的极限土反力计算公式，田平等（1993）和蔡亮（2003）也是直接给出循环荷载作用下的经验 p-y 曲线。

总体调整法不能根据循环荷载幅值、循环次数等对静力 p-y 曲线具体参数做相应的量化调整，也不能考虑循环荷载下桩土相互作用等因素影响，其纯经验调整所得结果往往与实测值存在差别（Yan et al，1992；Tak et al，2004；Ashour et al，2000；Fan et al，2005；龚维明 等，2015）。

2 参数修正法

2.1 根据荷载特性修正

循环荷载的特性可以由 4 个参数确定：幅值、变化幅度、循环次数和频率。频率是动力响应的关键因素，但鉴于海洋工程中所涉及循环荷载频率较低，本文所讨论的循环荷载皆未考虑频率的影响和动力效应。

2.1.1 荷载幅值与变化幅度

Rosquoet 等（2007）通过砂土离心机试验，根据荷载幅值和变化幅度折减土反力，并认为循环效应主要表现在前 15 次，武亚军等（2018）在此基础上进一步考虑了多级循环荷载的影响。Liao 等（2018）通过柔性桩模型试验，观察到循环荷载变化幅度越大，p-y 曲线的割线刚度衰减越明显。Li 等（2010）和吴金标（2017）分别研究了循环荷载幅值对桩侧向累积变形与桩身刚度的影响。

2.1.2 荷载方向

单向和双向循环荷载作用下的 p-y 曲线也不同。Brown 等（1988）在研究砂土中水平受荷群桩

的响应时，认为双向循环荷载作用下砂土发生了明显的局部密实，土反力降低相对较少。单向荷载作用下这种密实化程度较弱，因而土反力降低相对较多。Jeong 等（2017）进一步给出了单向和双向循环加载时各自的折减系数，还考虑了不同内摩擦角情况对极限土反力的折减。祝周杰(2015)关注了这一效应在砂土与黏土地基之间的差异，发现单向循环荷载作用下软黏土地基的循环弱化特性较砂土地基更为显著。需要指出的是，Brown 等（1988）和 Jeong 等（2017）并未考虑相对密实度的影响，而相对密实度的影响不可忽视。例如，Baek 等（2015）通过饱和砂土中的模型试验，得出循环荷载下 p–y 曲线的初始地基反力模量在不同相对密实度下变化不同：在饱和松砂中，循环荷载使得相邻土体密实，初始地基反力模量增大；在饱和中密砂中，循环荷载使得相邻土体扰动，初始地基反力模量减小。因此，Brown 等（1988）和 Jeong 等（2017）的结论能否外推还不能确定，应用时需谨慎。

2.1.3　循环次数

考虑循环次数对 p–y 曲线的影响主要有以下几种思路。第一种是对刚度的折减，如 Jeanjean（2009）通过离心机试验研究了黏土中循环荷载次数对 p–y 曲线割线刚度的折减，认为 200 次以后的循环对割线刚度几乎没有影响，与 Dunnavant 等（1989）的研究结果一致。Niemann 等（2018）关注循环次数对初始刚度的改变，发现随着循环次数增加初始刚度逐渐减小。陈仁朋等（2012）同样强调先期循环加载对桩身刚度有明显影响。朱斌等（2013）通过离心机试验得出了循环次数与桩身变形的近似对数线性相关关系。另一种思路是对强度折减，即根据循环次数折减土反力，如 Rajashree 等（1996）、Basack 等（2007）通过模型试验，给出了土反力随循环次数的对数退化模型。马明泊（2015）则给出了土反力随循环次数的半对数退化模型。Kim 等（2015，2016）研究的独特之处在于，通过原位 CPT 数据构造黏土和砂土的 p–y 曲线，运用 Bienen 等（2011）的修正方法，根据循环次数折减土反力。Little 等（1988）也是建议在桩身位移 y 不变的前提下折减土反力。Long 等（1994）通过对前人实验数据的总结和分析，综合上述两种思路，同时折减土反力 p 和桩身变形 y，根据循环次数、应力比、成桩方式和土体密度等，构建循环荷载下的 p–y 曲线（表 2）。

表 2　Long 等（1994）的修正方式

应力比 R_H 对 F_L 的影响		成桩方式对 F_I 的影响		土体密度对 F_D 的影响	
R_H=$Load_{min}/Load_{max}$	F_L	成桩方式	F_I	土体密度	F_D
–1.0	0.2	打入	1.0	松	1.1
–0.25	0.4	振动	0.9	中密	1.0
0.0	1.0	回填	1.4	密	0.8
0.5	1.0	回填并压实	1.0		
1.0	0.0	钻孔	1.3		

注：$p_N = p_1 \cdot N^{-0.4t}$；$y_N = y_1 \cdot N^{0.6t}$；$t = 0.17 \cdot F_L \cdot F_I \cdot F_D$

2.2　根据桩土相互作用修正

根据循环荷载下的桩土相互作用，如考虑土体的循环弱化，桩周间隙的发展等构建 p–y 曲线，也可以反映循环效应的影响。

2.2.1　土体累计塑性应变

俞剑等（2016）和黄茂松等（2017）借助 Masing 准则，建立循环荷载下土体累积塑性应变与 p–y 曲线的联系。朱斌等（2012）通过现场试验，引入 Poulos 的土体循环弱化模型（1982）来建立水平循环荷载作用下的双曲线型 p–y 曲线模型。Zhang 等（2016）采用 Andersen 等（2015）建议的方法通过循环直接单剪试验的参数建立循环 p–y 曲线，同时可以考虑桩土界面特性的影响。

2.2.2　桩周间隙

Dunnavant 等（1989）强调循环荷载作用下桩周间隙的重要性，并提出了桩顶位移阈值 0.01D 的概念：位移低于该阈值时，循环荷载的影响可以忽略，位移超过阈值时，循环效应才会显现。Gerber 等（2008）认为桩周间隙可以反映在 p–y 曲线中斜率接近 0 的部分，Pender 等（1996）认为桩周间隙的发展与桩顶约束情况密切相关，Carswell 等（2016）通过折减埋深（图 2）的概念

描述桩周间隙效应，即假定泥面下某一深度内的土体由于受到扰动，对 p–y 弹簧的刚度没有贡献，以反映短期循环荷载作用下土体刚度退化的影响。但是，现有研究对这种间隙的形成与发展还缺乏定量的描述方法。

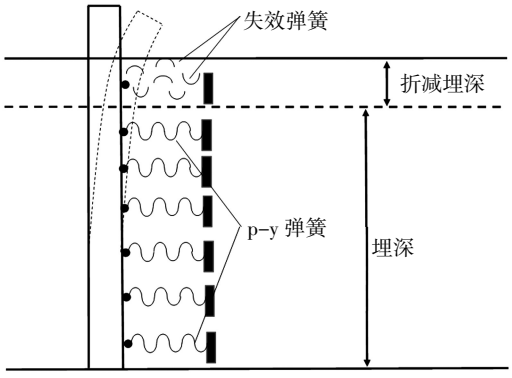

图 2 折减埋深示意

3 讨论

（1）在总体调整法中，p–y 曲线对循环效应的考虑多是基于有限的场地条件而做的纯经验调整，不能根据循环荷载的特性和循环荷载导致的桩土相互作用等进行相应的调整，在应用到其他场地时结果往往不太理想，其结论难以外推。因此，通过这种方式考虑循环效应时，需格外谨慎。

（2）在参数修正法中，不同研究关注的重点不同，其所选择的静力 p–y 曲线与修正的参数（如土反力、桩身位移、地基反力模量、初始刚度、割线刚度等）也不同，在工程中很难对各种修正方法进行对比和评价。因此，分析的精确程度不仅取决于修正方法，还取决于选择的静力 p–y 曲线。选取与实际情况吻合的静力 p–y 曲线，综合考虑荷载特性与桩土相互作用的影响，并提出更为统一的修正方式，将有利于循环 p–y 曲线在实际工程中的推广使用。

将荷载特性与 p–y 曲线中的具体参数建立联系，根据循环次数与幅值等进行相应折减来考虑循环效应，较总体调整法精度得到了提高，但应注意到其本质仍然是一种经验调整法。在实际海洋工程中，波流循环荷载往往具有随机性，其荷载特性很难用确定的荷载幅值和循环次数表达，因而导致根据荷载特性进行修正也存在难度并会产生误差。Zhang 等（2016）介绍的等效概念是值得借鉴的，即通过统计原理，将无规律的循环荷载先转换为按不同幅值和循环次数分类的多组荷载，再通过等效原则，一般以累积孔压（砂土）或循环剪应变（黏土）作为等效标准，将幅值不同、出现次数不同的多组循环荷载等效为幅值最大的循环荷载作用一定的次数。这种方法虽然会高估循环效应，但从地基承载力角度来说相对保守。在对循环效应缺乏有效评价手段的当下，这种等效方法可以综合考虑循环荷载特性与桩土相互作用，具有一定的工程意义。

根据循环荷载下的桩土相互作用进行修正，其优点在于将循环弱化效应直接与土体强度和刚度的衰减等建立定量关系（俞剑 等，2016；黄茂松 等，2017；Andersen et al，2015），而不必将循环效应与荷载特性建立经验关系，再根据荷载特性对 p–y 曲线中的参数修正。这种方法不再是对试验结果的经验总结，而是对桩土作用规律和本质的归纳描述。因此，其力学概念更加清晰，理论依据更加充分。

（3）静力荷载和循环荷载作用下的 p–y 曲线研究大多是基于小直径柔性桩的实验结果，对于海上风电等大直径单桩的适用性还不能确定。章刘洋（2018）通过模型试验发现，折减土反力来考虑循环效应的方法对于大直径单桩并不适用。由于高昂的成本限制，大直径单桩的现场测试难以开展，借助数值模拟或模型试验，不断提高计算的精度，可能是未来一段时间内最现实的手段。

（4）基于单一土质得出的循环 p–y 曲线，在成层土中其经验公式是否适用尚不能确定。在实际海洋工程经常会遇到“上软下硬”“上硬下软”等土层条件，由于变形与破坏模式不同，运用模型试验中单一土质所得的 p–y 曲线公式不够准确（李芬花 等，2017）。Jin 等（1993）根据摩尔库伦准则和朗肯土压力理论，考虑上覆土压力的影响，推导了成层土中极限土反力计算公式，可以在此基础上分析循环荷载作用下成层土中 p–y 曲线的特点。

（5）已有修正方法对于粉土的适用性评价尚不明确。王腾等（2009）提出了适用于粉土的 p–y 曲线，图 3 为按照不同修正方式所得循环 p–y 曲线，可以看到不同修正方法所得结果差距较大。

因此，有必要研究粉土在循环荷载作用下 p–y 曲线的规律。

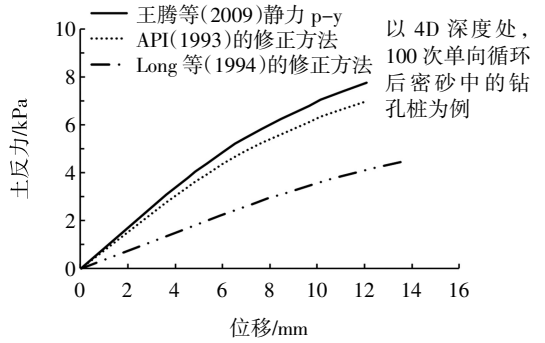

图 3　不同修正方法下粉土循环 p–y 曲线

（6）循环荷载的影响范围问题还需要深入研究。一方面，循环效应在空间上存在临界值，即影响主要集中在一定深度范围内。如 Rosquoet 等（2007）认为循环荷载的影响深度主要集中在 5B（B 为桩径）深度以内。另一方面，在循环荷载所能影响的范围内变化趋势也不同，如 Verdure 等（2003）通过密砂中的单向循环荷载实验，给定了临界深度 2.4 m 或 3.3D（D 为桩径）：临界深度以内的土反力随着循环次数的增加而降低，临界深度以下的土反力随着循环次数的增加而增大。Liao 等（2018）和 Kim 等（2015，2016）也都考虑了不同深度处的修正方法。

循环效应在时间上存在临界值，即影响主要集中在一定循环次数以内（Rosquoet et al，2007；Dunnavant et al，1989；Jeanjean，2009）。而且对于砂土和黏土，循环荷载次数影响的临界值差异很大，而硬黏土与软黏土之间的差异很小，这种差异与联系值得进一步研究。此外，在大周数循环（超过 1 000 次）下的研究由于存在诸多限制而开展相对较少：对于模型试验，这种限制主要来源于加载装置的工作性能，施加长期稳定的循环荷载存在困难；而对于数值模拟，大周数循环导致的误差积累会造成计算不易收敛和结果失真。海洋工程中桩基础承受长期的循环荷载，研究长期循环荷载作用下桩土系统的响应具有现实意义，这需要提高加载装置和数值模拟软件的工作性能和效率。

（7）冲刷是海洋工程中必须要考虑的问题，现有研究更多关注冲刷对承载力的影响（胡丹 等，2015；戴国亮 等，2018；刘红军 等，2018），而很少考虑其对 p–y 曲线产生的影响。可以考虑运用 Carswell 等（2016）折减埋深的概念，来构建考虑冲刷作用影响的循环 p–y 曲线。冲刷作用会导致桩土界面的力学行为更加复杂，如 Dunnavant 等（1989）观察到水力冲刷会加剧桩周间隙的影响，循环荷载作用下桩土界面的弱化过程和机制研究可以作为未来研究的一个方向。

（8）港口工程和海洋工程中的桩基还会承受竖向荷载、撞击荷载、地震作用等多荷载作用。现有循环 p–y 曲线模型仅仅考虑了单一荷载的作用，即只考虑水平循环荷载的单独作用。已有学者开展了静力 p–y 曲线在复合荷载作用下的适用性研究（Abdel–Rahman et al，2006；余世章 等，2018），复合荷载作用下的循环 p–y 曲线研究相对较少，海洋工程桩基础在多荷载耦合作用下的循环 p–y 曲线还需进一步研究。

参　考　文　献

蔡亮, 2003. 往复荷载作用下单桩P–Y 曲线研究[D]. 南京: 河海大学.

陈仁朋, 顾明, 孔令刚, 等, 2012. 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, 34(11): 1990–1996.

戴国亮, 代浩, 杨炎华, 等, 2018. 冲刷作用下水平承载单桩计算方法及承载特性[J]. 中国公路学报, 31(8): 104–112.

黄茂松, 马昊, 李森, 等, 2017. 软黏土中水平受荷桩的静力和循环 p–y 曲线[J]. 岩土工程学报, 39(S2): 9–12.

龚维明, 霍少磊, 杨超, 等, 2015. 海上风机大直径钢管桩基础水平承载特性试验研究[J]. 水利学报, 46(S1): 34–39.

胡丹, 李芬, 张开银, 2015. 冲刷作用下单桩水平承载特性试验研究及数值模拟[J]. 水利学报, 46(S1): 263–266.

李芬花, 邓丹平, 周子楠, 2017. 基于 ANSYS 的近海工程桩基础 p–y 曲线研究[J]. 水利水电技术, 48(6): 60–65.

李涛, 2015. 近海风机导管架基础水平受荷特性研究[D]. 杭州: 浙江大学.

刘红军, 杨奇, 2018. 局部冲刷对风机支撑系统承载性能的影响[J]. 岩土力学, 39(2): 722–727.

马明泊, 2015. 循环荷载下海上风电单桩基础水平承载性能退化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学.

田平, 王惠初, 1993. 粘土中横向周期性荷载桩的 P–Y 曲线统一法[J]. 河海大学学报, (1): 9–14.

王成华, 孙冬梅, 2005. 横向受荷桩的 p–y 曲线研究与应用述评[J]. 中国港湾建设, (2): 1–4.

王惠初, 武冬青, 1991. 粘土中水平静载桩 P—Y 曲线的一种新的统一法[J]. 河海大学学报(自然科学版), (1): 9–17.

王腾, 王天霖, 2009. 粉土 p–y 曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 30(5): 1343–1346.

吴金标, 2017. 水平循环荷载下近海软土地基离岸单桩基础模型试验

和三维数值分析[D]. 成都: 西南交通大学.

武亚军, 卢晨阳, 李卫超, 等, 2018. 应用于海洋工程中水平受荷桩特性分析的修正 P-y 曲线模型[J]. 大连理工大学学报, 58(5): 511-518.

俞剑, 黄茂松, 张陈蓉, 2016. 黏土中两种不同直径单桩水平循环加载模型试验与分析[J]. 岩土力学, 37(4): 973-980.

余世章, 李飒, 2018. 复合荷载下海上钢管桩基础 p-y 曲线法研究[J]. 水力发电学报, 37(1): 101-109.

张方, 刘继滨, 吴金标, 2017. 软黏土海床中单桩基础水平循环承载与变形特性试验研究[J]. 四川建筑科学研究, (6): 56-60.

章连洋, 陈竹昌, 1992. 计算黏性土 p-y 曲线的方法[J]. 海洋工程, (4): 50-58.

章刘洋, 2018. 地基对大直径桩的水平静力和循环抗力数值分析研究[D]. 杭州: 浙江大学.

朱斌, 熊根, 刘晋超, 等, 2013. 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, 35(10): 1807-1815.

朱斌, 杨永垚, 余振刚, 等, 2012. 海洋高桩基础水平单调及循环加载现场试验[J]. 岩土工程学报, 34(6): 1028-1037.

祝周杰, 2015. 近海风机导管架基础水平受荷特性研究[D]. 杭州: 浙江大学.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1993. Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms [M]. Dalas: American Petroleum Institute.

ABDEL-RAHMAN K, ACHMUS M, 2006. Numerical modeling of the combined axial and lateral loading of vertical piles [C]. Proceedings of the 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering - Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Graz, Austria: 575-581.

ANDERSEN K H, 2015. Cyclic soil parameters for offshore foundation design [M]// Frontiers in offshore geotechnics III. London, Taylor & Francis Group.

ASHOUR M, NORRIS G, 2000. Modeling lateral soil-pile response based on soil-pile interaction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(5): 420-428.

BAEK S H, KIM J Y, LEE S H, et al, 2015. Effect of Cyclic Lateral Loads on p-y Curve for Pile Foundations in Saturated Sand [C]. The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.

BASACK S, PURKAYASTHA R D, 2007. Behaviour of single pile under lateral cyclic load in marine clay [J]. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 2007, 8(4): 443-458.

BIENEN B, DÜHRKOP J, GRABE J, et al, 2011. Response of piles with wings to monotonic and cyclic lateral loading in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(3): 364-375.

BROWN D A, MORRISON C, REESE L C, 1988. Lateral load behavior of pile group in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 114(11): 1261-1276.

CARSWELL W, ARWADE S R, DEGROOT D J, et al, 2016. Natural frequency degradation and permanent accumulated rotation for offshore wind turbine monopiles in clay [J]. Renewable Energy, 97: 319-330.

DUNNAVANT T W, O'NEILL M W, 1989. Experimental p-y Model for Submerged, Stiff Clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 115 (1): 95-114.

FAN C C, LONG J H, 2005. Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand [J]. Computers and Geotechnics, 32(4): 274-289.

GERBER T M, ROLLINS K M, 2008. Cyclic P-Y curves for a pile in cohesive soil [C]//Proceedings of the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV: 1-10.

JEANJEAN P, 2009. Re-assessment of p-y curves for soft clays from centrifuge testing and finite element modeling [C]. Offshore Technology Conference.

JEONG S, PARK J, KO J, et al, 2017. Analysis of soil resistance on drilled shafts using proposed cyclic p-y curves in weathered soil [J]. Geomechanics and Engineering, 12(3): 505-522.

JIN W, ZHU Y, LI L, 1993. Evaluation of application of p-y curve method in offshore engineering foundation [J]. China Ocean Engineering, 7 (4): 451-466.

KIM G, KYUNG D, PARK D, et al, 2015. CPT-based p-y analysis for mono-piles in sands under static and cyclic loading conditions [J]. Geomechanics and Engineering, 9(3): 313-328.

KIM G, KYUNG D, PARK D, et al, 2016. CPT-based p-y analysis for piles embedded in clays under cyclic loading conditions [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 20(5): 1759-1768.

LI Z, HAIGH S K, BOLTON M D, 2010. Centrifuge modelling of mono-pile under cyclic lateral loads [J]. Physical Modelling in Geotechnics: 965-970.

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

LITTLE R L, BRIAUD J L, 1988. Full scale cyclic lateral load tests on six single piles in sand [R]. Miscellaneous Paper GL-88-27, Geotechnical Div Texas A&M Univ, College Station.

LONG J H, VANNESTE G, 1994. Effects of cyclic lateral loads on piles in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 120(1): 225-244.

MATLOCK H, 1970. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay [C]. 2nd Offshore Tech Conf.Houston.1970: 577-594.

MCCLELLAND B, FOCHT J A, 1958. Soil modulus for laterally loaded piles [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 123(1): 1049-1063.

MURCHISON J M, O'NEILL M W, 1984. Evaluation of py relationships in cohesionless soils [C]//Proc of theConference on Analysis and Design of Pile Foundations, SanFrancisco, California: 174-213.

NIEMANN C, O'LOUGHLIN C, TIAN Y, et al, 2018. Response of pile groups in sand due to lateral cyclic loading [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics: 1-13.

PENDER M J, PRANJOTO S, 1996. Gapping effects during cyclic lateral loading of piles in clay [C]//Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico: 23-28.

POULOS H G, 1982. Single pile response to cyclic lateral load [J]. Journal

of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 108(GT3): 355-375.

RAJASHREE S S, SUNDARAVADIVELU R, 1996. Degradation model for one-way cyclic lateral load on piles in soft clay [J]. Computers and Geotechnics, 19(4): 289-300.

REESE L C, COX W R, KOOP F D, 1974. Analysis of laterally loaded piles in sand [C]//6th Offshore Tech Conf.Houston: 600-619.

REESE L C, WELCH R C, 1975. Lateral loading of deep foundations in stiff clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 101(ASCE# 11456 Proceeding).

ROSQUOET F, THOREL L, GARNIER J, et al, 2007. Lateral cyclic loading of sand-installed piles [J]. Soils and foundations, 47 (5): 821-832.

TAK KIM B, KIM N K, JIN LEE W, et al, 2004. Experimental load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(4): 416-425.

VERDURE L, GARNIER J, LEVACHER D, 2003. Lateral cyclic loading of single piles in sand [J]. International journal of physical modelling in geotechnics, 3(3): 17-28.

YAN L I, BYRNE P M, 1992. Lateral pile response to monotonie pile head loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 29(6): 955-970.

ZHANG Y, ANDERSEN K H, KLINKVORT R T, et al, 2016. Monotonic and cyclic p-y curves for clay based on soil performance observed in laboratory element test [C]. Offshore Technology Conference. Houston, USA.

（本文编辑：崔尚公）