

DOI: 10.11779/CJGE2017S2003

# 软黏土中水平受荷桩的静力和循环 $p-y$ 曲线

黄茂松<sup>1, 2</sup>, 马昊<sup>1, 2</sup>, 李森<sup>1, 2</sup>, 俞剑<sup>1, 2</sup>, 张陈蓉<sup>1, 2</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)

**摘要:** 首先介绍了构建软黏土中水平受荷桩静力  $p-y$  曲线的拟三维分析方法, 该方法基于考虑土体特性的二维弹性虚拟加载上限方法和改进的三维极限承载力剖面。基于水平受荷桩的静力  $p-y$  曲线, 引入土体不排水抗剪强度和塑性累积位移间的关系和 Masing 准则, 建立了水平受荷桩的循环  $p-y$  曲线。采用考虑土体应力 - 应变关系及强度衰减的  $p-y$  曲线分析离心机模型试验, 计算结果表明本文方法可较好地模拟黏土中水平受荷桩的静力及循环承载特性。经试验标定土性相关参数后, 本文循环  $p-y$  曲线在不同循环荷载幅值下获得的桩顶荷载 - 位移滞回曲线及相应桩顶荷载衰减曲线均与离心试验结果基本吻合。

**关键词:** 软黏土; 应力 - 应变关系;  $p-y$  曲线; 循环荷载; 强度衰减

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0009-04

作者简介: 黄茂松(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程方面的科研和教学工作。E-mail: mshuang@tongji.edu.cn。

## Static and cyclic $p-y$ curves for laterally loaded piles in soft clay

HUANG Mao-song<sup>1, 2</sup>, MA Hao<sup>1, 2</sup>, LI Sen<sup>1, 2</sup>, YU Jian<sup>1, 2</sup>, ZHANG Chen-rong<sup>1, 2</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)

**Abstract:** A pseudo-three-dimensional analysis method on static  $p-y$  curves of laterally loaded piles in soft clay is conducted. This method is based on the two-dimensional elastic fictitious loading upper bound limit analysis approach considering the stress-strain relationship of soils and the improved profile of three-dimensional ultimate bearing capacity. The cyclic  $p-y$  curves of laterally loaded piles are established by combining the static  $p-y$  curves of laterally loaded piles considering the soil characteristics, the Masing criterion and the relationship between the undrained shear strength and the cumulative plastic displacement of soils. Published centrifuge model tests are analyzed with the proposed  $p-y$  curves simultaneously considering the soil stress-strain relationship and strength degradation. The results show that the proposed method can simulate the static and cyclic behavior of laterally loaded piles in clay with reasonable accuracy. After being calibrated with model tests, the proposed cyclic  $p-y$  curve can be applied in the analysis of laterally loaded piles. Under different cyclic loading amplitudes, the hysteresis load-displacement curves at pile top and the corresponding degradation curves of the mobilized load at pile top obtained by the proposed cyclic  $p-y$  curve are similar to those observed from the centrifuge experiments.

**Key words:** soft clay; stress-strain relationship;  $p-y$  curve; cyclic load; strength degradation

## 0 引言

水平受荷桩在跨海桥梁、海上风电等工程中得到了广泛应用, 其分析方法和承载特性已成为研究热点。目前, 水平受荷桩的桩-土相互作用分析多采用 Winkler 地基模型, 其将桩周土体抽象为相互独立的弹簧, 通过求解桩身挠曲方程获得桩身响应。各类 Winkler 地基模型的差别在于桩周土反力 - 位移关系 ( $p-y$  曲线) 的选取, 其中应用最为广泛是基于现场试验规律提出的 API 规范方法。但以 API 规范方法为代表的  $p-y$  曲线构造方法对土体性质的考虑缺乏理

论依据, 因此受到试验桩型的限制; 此外, API 规范方法通过对桩基极限承载力系数进行折减来考虑循环荷载的影响, 未能合理考虑循环荷载下桩周土体的逐步演化。

黄茂松等<sup>[2]</sup>提出了可通过弹性迭代计算获得塑性变形场和边界荷载的弹性虚拟加载上限方法 (T-EMSD 方法), 并采用弹性虚拟加载上限方法构造

了纯剪流型的桩周极限速度场。之后, 黄茂松等<sup>[3]</sup>在商业化有限元程序中数值实现了弹性虚拟加载上限方法, 扩展了该方法的应用范围。黄茂松等<sup>[4]</sup>应用弹性有限元虚拟加载上限方法对二维水平受荷桩问题进行分析, 讨论了不同土体应力-应变曲线形式及刚度比对桩身响应的影响, 并将分析结果与常规弹塑性数值方法计算结果进行了对比验证。Yu 等<sup>[5]</sup>采用虚拟加载上限分析方法分析二维水平受荷桩问题, 从荷载位移曲线、极限承载力和桩周极限速度场三方面将弹性虚拟加载上限方法分析结果与已有研究进行了对比, 并证明了虚拟加载上限法获得的边界荷载将在极限状态下逼近塑性上限值。

为研究水平受荷桩的循环响应, Zhang 等<sup>[6]</sup>和俞剑<sup>[7]</sup>分别通过离心机试验模拟了弱超固结黏土和正常固结黏土中大直径桩基础在水平循环荷载下的响应。俞剑<sup>[7]</sup>通过 T-bar 试验结果标定桩侧土体不排水抗剪强度随塑性累积应变的衰减规律, 并通过有限元二次开发实现循环荷载下桩侧响应的数值模拟。本文拟在上述研究的基础上提出一种适用于软黏土中水平循环受荷桩分析的  $p-y$  曲线, 其三维静力  $p-y$  曲线构成与文献[2]一致, 并在其基础上引入软黏土不排水抗剪强度随土体塑性累计变形的衰减关系和 Masing 准则来考虑循环荷载的影响。采用本文循环  $p-y$  曲线分析了文献[7]的离心模型试验, 并和试验数据及有限元分析结果进行对比验证。

## 1 水平受荷桩静力分析

$p-y$  曲线的构成包括  $p-y$  骨干曲线, 桩侧极限承载力剖面和桩土初始刚度三部分。在  $p-y$  骨干曲线中考虑土体应力-应变关系的关键是基于二维桩土变形机构建立桩身位移和桩周土体应变水平的关系。二维桩土机构仅能反映横向桩土相互作用, 但忽略了桩基深度方向的影响。为此, 可如图 1 所示将  $p-y$  骨干曲线与三维桩侧极限承载力剖面和三维桩土初始刚度剖面结合以考虑三维效应。

本文采用文献[1, 2]基于土体双曲线型应力-应变关系的  $p-y$  曲线, 其表达式为

$$p = r_0 N_p s_u + \frac{1.5}{M_c} \alpha r_0 s_u + 0.5 \alpha E y - \sqrt{\left( r_0 N_p s_u + \frac{1.5}{M_c} \alpha r_0 s_u + 0.5 \alpha E y \right)^2 - 2 \alpha E N_p r_0 s_u y}, \quad (1)$$

式中  $r_0$  为桩径;  $N_p$  为桩侧极限承载力系数;  $s_u$  为不排水抗剪强度;  $M_c$  为剪应变系数;  $\alpha$  为与初始刚度相关的无量纲系数;  $E$  为土体的弹性模量。水平受荷桩承载力系数  $N_p$  随深度的分布采用 Yu 等<sup>[8]</sup>基于三维剪

流-摩擦机构获得的上限桩基承载力剖面; 桩侧初始刚度采用 Zhang 等<sup>[9]</sup>通过配比无限长桩在 Winkler 地基和集中荷载作用下全弹性空间位移解获得的桩侧刚度公式。黄茂松等<sup>[2]</sup>及 Yu 等<sup>[5]</sup>将虚拟加载上限法与分层环状介质的弹性解析解结合以构造桩周极限速度场, 其对应的剪应变系数  $M_c$  分别为 0.80 (完全胶结) 和 0.90 (光滑桩)。

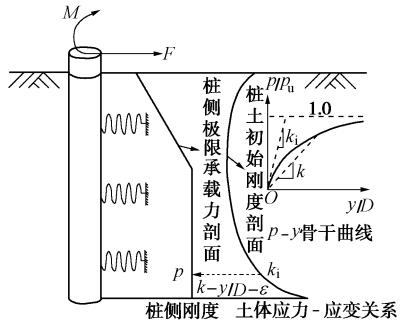


图 1 考虑三维承载力及模量剖面的  $p-y$  曲线<sup>[2]</sup>

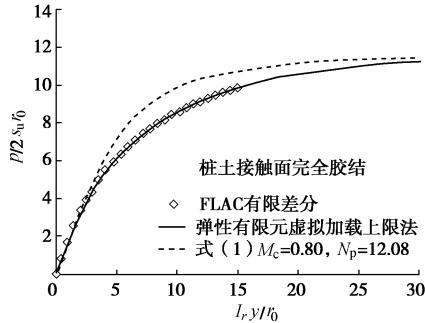
Fig. 1  $p-y$  curves considering the three-dimensional bearing capacity and initial stiffness profiles

本文采用弹性有限元虚拟加载上限方法构造的桩周极限速度场对应的剪应变系数  $M_c$ , 并将不同变形场对应的  $M_c$  列于表 1 中, 其中  $r_n$  为塑性扰动变形区半径。表 1 表明相比于解析弹性虚拟加载上限法获得的剪应变系数  $M_c$ , 弹性有限元虚拟加载上限法构造变形机构对应的  $M_c$  在桩土接触完全胶结情况下降低, 而在桩土接触光滑情况下增大, 其原因是  $M_c$  与  $N_p$  成正比, 并与  $r_n/r_0$  成反比。虽然在各桩土接触条件下弹性有限元虚拟加载上限法计算获得的  $N_p$  值均更低(接近最优上限解), 但弹性有限元虚拟加载上限法给出的变形机构范围  $r_n/r_0$  也小于解析弹性虚拟加载上限法的结果, 导致光滑桩变形机构对应的  $M_c$  值增大。图 2 给出了在式(1)中采用二维水平受荷桩极限承载力系数及弹性有限元虚拟加载上限法构造变形机构对应的  $M_c$  的计算结果, 由图 2 可知式(1)给出的二维水平受荷  $p-y$  曲线接近弹塑性数值分析及弹性有限元虚拟加载上限分析结果。弹性有限元虚拟加载上限法作为数值方法可为变形机构演化提供较大的自由度, 其获得的变形机构也更接近最优解析上限机构, 因此本文中涉及的计算均采用弹性有限元虚拟加载上限法获得的剪应变系数。

表 1 剪应变系数

Table 1 Compatibility factors

虚拟加载上限法	完全胶结桩			光滑桩		
	$N_p$	$r_n/r_0$	$M_c$	$N_p$	$r_n/r_0$	$M_c$
单层介质解析解 <sup>[1]</sup>	14.52	2.85	1.30	10.06	2.40	1.35
多层介质解析解 <sup>[2]</sup>	12.84	3.34	0.80	10.04	2.85	0.90
数值解	12.08	3.22	0.80	9.26	2.30	1.36

图 2  $p-y$  曲线对比Fig. 2 Comparison of  $p-y$  curves

采用本文  $p-y$  曲线方法模拟俞剑<sup>[7]</sup>静力加载试验的结果, 并在图 3 中对比了本文方法、弹塑性有限元及 API 规范法的模拟结果。整体上本文  $p-y$  曲线方法计算获得的桩顶荷载-位移曲线与离心机试验结果相吻合, API 规范法计算误差最大。API 规范结果在位移加载量较小(初始段)或较大(极限段)时均显著低估桩侧抗力。这是由于文献[7]通过试验模拟了大直径单桩, 而 API 规范是基于柔性长桩的现场试验规律总结提出, 因此 API 规范方法并不适用于黏土中大直径单桩的分析。图 3 表明当初始和极限段, 弹塑性有限元获得的荷载与试验值相近, 而本文  $p-y$  曲线结果在整个加载阶段都与离心试验结果相近。有限元分析的误差可能是由于有限元分析<sup>[7]</sup>中采用了理想弹塑性本构模型, 其仅能较好地模拟初始弹性阶段和极限塑性阶段, 而无法合理反映土体弹塑性的发展。相比之下引入土体双曲线型应力-应变关系的  $p-y$  曲线方法在整个加载阶段的模拟结果更接近试验结果。

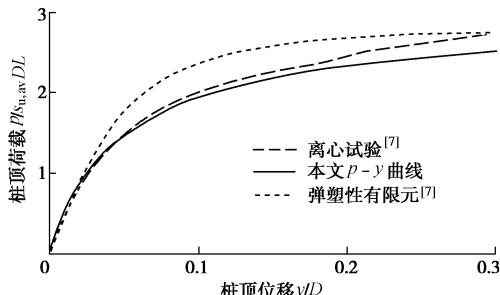


图 3 桩顶荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of laterally loaded piles

## 2 水平受荷桩循环加载分析

在分析水平受荷桩循环荷载作用下的响应时, 主要关注荷载位移滞回曲线以及循环对桩身承载力的影响。为了得到荷载位移滞回曲线, 首先需要将前文所述的引入土体双曲线型应力-应变关系的静力  $p-y$  曲线扩展为循环加载时的  $p-y$  滞回曲线。本文运用 Masing 二倍法进行扩展, 滞回曲线形状与骨干曲线一致, 因而可以根据不同的加卸载条件直接给出  $p-y$

滞回曲线表达式, 具有计算效率高的优点。

为了得到循环荷载对桩身承载力的影响, 在上述  $p-y$  滞回曲线中引入土体不排水抗剪强度随塑性累积变形的演化关系:

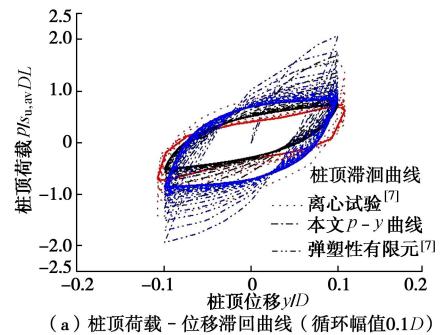
$$\frac{s_u}{s_{u,ini}} = \delta_{rem} + (1 - \delta_{rem}) \exp\left(-\beta \cdot \frac{y_p}{D}\right), \quad (2)$$

式中,  $s_u$  为弱化后的不排水抗剪强度;  $s_{u,ini}$  为初始(未经弱化)不排水抗剪强度;  $\delta_{rem}$  为残余强度占初始强度的比例;  $\beta$  为与土性相关的弱化参数;  $y_p$  桩身运动引起的土体塑性累积位移;  $D$  为桩径。将式(2)与式(1)通过 Masing 准则扩展后的曲线结合, 即可获得考虑循环影响的  $p-y$  曲线。

在增量步计算循环时, 应注意到, 在同一增量步计算中, 桩身不同节点可能会处于不同的加卸载状态, 有着不同的应力历史, 因此, 应对桩身每一节点单独判断其加卸载状态和应力历史。在计算土体塑性累积位移  $y_p$  时, 对于加载和卸载情况分别进行累加, 即对于一次加卸载循环, 进行两次塑性累积位移累加。

为模拟黏土中水平循环受荷单桩试验, 首先对式(2)涉及的参数进行标定, 通过 T-bar 试验结果<sup>[7]</sup>标定的残余强度比  $\delta_{rem}$  为 0.33, 弱化参数  $\beta$  为 4.875。

图 4 显示循环荷载幅值为  $0.1D$  作用下水平受荷单桩的响应, 从桩顶荷载-位移滞回曲线和桩顶承载力衰减两方面将本文循环  $p-y$  曲线计算结果与试验结果及有限元分析结果<sup>[7]</sup>进行对比。图 4(a)表明  $p-y$  曲线方法与试验的桩顶滞回圈发展及其最终稳定状态均较为相近, 而有限元获得的滞回圈偏“胖”。图 4(b)为循环位移荷载幅值为  $0.1D$  时的桩顶承载力衰减曲线, 本文  $p-y$  曲线与有限元方法均可较好模拟桩顶承载力随循环次数增加逐步衰减的趋势, 并且本文  $p-y$  曲线分析结果比有限元分析结果更接近试验结果。循环位移荷载幅值为  $0.1D$  时, 有限元分析结果仅在循环次数较多的情况下接近试验结果, 而在中间阶段高估桩侧抗力, 这可能是由于本构关系采用了较为简化的理想弹塑性模型结合屈服强度随塑性累积应变衰减。在不同位移循环荷载幅值下, 本文  $p-y$  曲线分析结果均与试验结果基本吻合。

(a) 桩顶荷载-位移滞回曲线 (循环幅值  $0.1D$ )

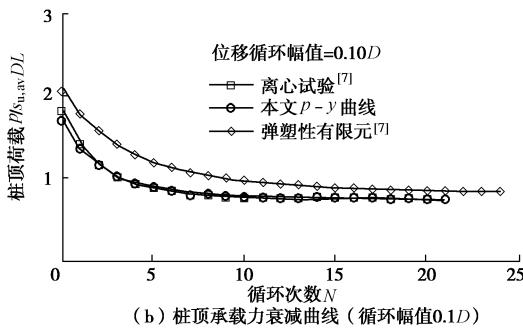


图 4 水平受荷桩循环加载特性

Fig. 4 Cyclic behaviors of laterally loaded piles

### 3 结语

本文综合评述了在黏土中水平受荷桩  $p$ - $y$  曲线方面的理论研究，并基于考虑黏土应力-应变关系的静力  $p$ - $y$  曲线结合 Masing 准则及不排水抗剪强度衰减关系提出了循环  $p$ - $y$  曲线。本文循环  $p$ - $y$  曲线可获得循环荷载作用下桩顶滞回曲线及桩侧刚度弱化规律，可为工程设计提供指导。

经试验标定后本文  $p$ - $y$  曲线方法计算获得的桩顶静力荷载-位移曲线及桩侧刚度循环弱化规律均与离心机试验结果相吻合。本文  $p$ - $y$  曲线与基于单相介质的有限元方法均可较好模拟桩顶承载力随循环次数增加逐步衰减的趋势，二者的分析结果均接近试验结果。本文  $p$ - $y$  曲线方法获得的桩侧刚度弱化规律比将不排水黏土模拟为单相介质的弹塑性有限元分析结果更加符合离心试验结果。后续研究将建立基于合理黏土本构模型的土体应力-应变关系，并将本文  $p$ - $y$  曲线方法与采用相应合理本构的有限元方法进行对比验证。

### 参考文献：

- [1] KLAR A. Upper bound for cylinder movement using “Elastic” fields and its possible application to pile deformation analysis[J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8(2): 162 - 167.
- [2] 黄茂松, 俞 剑, 张陈蓉. 基于应变路径法的黏土中水平受荷桩  $p$ - $y$  曲线[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 400 - 409. (HUANG Mao-song, YU Jian, ZHANG Chen-rong.  $p$ - $y$
- [3] 黄茂松, 李 森, 俞 剑. 基于弹性有限元的虚拟加载上限分析方法[J]. 岩土工程学报, 2016, 28(12): 2295 - 2301. (HUANG Mao-song, LI Sen, YU Jian. A fictitious loading upper bound limit analysis approach based on elastic FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2295 - 2301. (in Chinese)).
- [4] 黄茂松, 李 森, 俞 剑. 水平受荷桩的弹性有限元虚拟加载上限分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2399 - 2403. (HUANG Mao-song, LI Sen, YU Jian. Analysis of laterally loaded pile by elastic finite element based T-EMSD method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 37(8): 2399 - 2403. (in Chinese)).
- [5] YU J, HUANG M, LI S, et al. Load-displacement and upper-bound solutions of a loaded laterally pile in clay based on a total-displacement-loading EMSD method[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 83: 64 - 76.
- [6] 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, 2010, 137(7): 717 - 729.
- [7] 俞 剑. 饱和黏土中大直径单桩水平循环加载特性[D]. 上海: 同济大学, 2015. (YU Jian. Behavior of monopiles in saturated clay subjected to cyclic lateral load[D]. Shanghai: Tongji University, 2015. (in Chinese))
- [8] YU J, HUANG M, ZHANG C. Three-dimensional upper-bound analysis for ultimate bearing capacity of laterally loaded rigid pile in undrained clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1775 - 1790.
- [9] ZHANG C, YU J, HUANG M. Winkler load-transfer analysis for laterally loaded piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(7): 1110 - 1124.
- [10] KLAR A, OSMAN A S. Load-displacement solutions for piles and shallow foundations based on deformation fields and energy conservation[J]. Géotechnique, 2008, 58(7): 581 - 589.

(本文责编 明经平)