

软黏土中水平循环荷载作用下刚性短桩的 $p-y$ 曲线分析

张陈蓉^{1,2}, 俞 剑^{1,2}, 黄茂松^{1,2}

(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: 在反复的水平荷载作用下, 桩周土体中不可恢复的塑性变形会随着循环荷载的作用而逐渐累积, 从而引起桩土相互作用的弱化。通过软黏土中不排水条件下基于 Tresca 准则扩展而来的土体弱化模型和离心试验的结果修正静力双曲线形式 $p-y$ 曲线。从循环荷载下桩土相互作用机理角度考虑水平循环荷载对单桩基础的影响, 并与刚性短桩离心模型试验的结果进行了对比分析, 验证了该方法的合理性。

关键词: 水平循环受荷桩; 累积塑性应变; $p-y$ 曲线

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S2-0078-05

作者简介: 张陈蓉(1982-), 女, 江苏人, 讲师, 从事桩基工程研究。E-mail: zcrong33@tongji.edu.cn。

$p-y$ curve analyses of rigid short piles subjected to lateral cyclic load in soft clay

ZHANG Chen-rong^{1,2}, YU Jian^{1,2}, HUANG Mao-song^{1,2}

(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: With cyclic lateral load, the accumulation of unrecovered plastic deformation in the soil around pile will induce the degradation of pile-soil interaction. The strain-softening soil model, as a simple extension of the elastic-perfectly plastic Tresca model, accompanied with the results of centrifuge model, is used to establish the cyclic $p-y$ curve by modifying static hyperbolic $p-y$ curve. The effects of the lateral cyclic load on the pile behavior are considered by analyzing the pile-soil interaction mechanism. The rationality of the proposed method is verified by comparison with centrifugal model tests on rigid short piles subjected to cyclic lateral load.

Key words: lateral cyclic loaded pile; accumulative plastic strain; $p-y$ curve

0 引 言

水平受荷桩在离岸工程中有着广泛的运用, 传统的如港口码头、石油平台、桥梁基础等, 更有近几年来由于新能源开发而正大力推广的海上风电项目。由于波浪力、风力和大型机电设备如风机机组等运行的荷载作用, 这些构筑物的基础会承受长期循环往复的水平荷载。在实际的设计使用中, 水平循环荷载作用对桩基础的影响是一个不可忽略的因素。与单向静力加载的水平极限承载力问题以及地震、船只撞击等引起的动力问题不一样, 在反复的水平循环荷载作用下, 桩周土体中不可恢复的塑性变形会随着循环荷载的作用而逐渐累积, 从而引起桩土相互作用的弱化和极限承载力的降低。水平受荷单桩的理论分析方法根据采用的地基模量不同主要有 $p-y$ 曲线法和整体数值法。 $p-y$ 曲线法不考虑土体连续介质特性, 桩身任一点的反力仅与该点的桩身挠度有关, 而整体数值法将土体

视为连续体, 借助商业有限元软件建模和数值分析方法直接进行求解。鉴于实际操作时效性和简单明了的物理意义, $p-y$ 曲线法作为各类工程规范编制和设计施工单位普遍接受的分析方法, 具有非常重要的地位和意义。从本质来讲, 在 $p-y$ 曲线的数学表达式中已经考虑了土体连续体的特性。很多学者基于理论分析以及模型试验、原位试验等等提出了各自的 $p-y$ 曲线模型, 如理想弹塑性模型^[1]、双曲线模型^[2-3]、指数模型等^[4]。针对水平循环受荷桩, 则是在单一荷载的 $p-y$ 曲线上进行修正, 较常用的方法是将循环荷载 $p-y$ 曲线刚度的减少以及极限桩侧抗力的降低与循环荷载次数以及水平位移幅值建立联系^[5-6], 经验方法的成分偏重, 没有实质性地从土体的循环荷载加载特性这一最本质的影响因素加以考虑。本文借鉴了

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51008228)

收稿日期: 2011-08-22

Randolph 等^[7-9]针对 T-bar 贯入仪的理论研究, 通过软黏土中不排水条件下基于 Tresca 准则扩展而来的土体弱化模型和离心试验的结果修正静力 $p-y$ 曲线, 从循环荷载下桩土相互作用机理角度考虑水平循环荷载对单桩基础的影响, 并与刚性短桩离心模型试验的结果进行了对比分析, 验证了该方法的合理性。

1 分析方法

$p-y$ 曲线是水平向桩土相互作用的体现, 也即随着水平荷载的增加, 桩周土体抗力的逐步发挥过程。与竖向受荷桩不一样, 水平受荷桩在位移不大的时候, 浅层土体由于围压小, 可能已经屈服, 并且浅层土体有向上走的趋势, 在土体受压区域形成楔形体, 双曲线形式的静载 $p-y$ 曲线与实际吻合度较高, 本文在此采用 Georgiadis 等^[2]采用的静载双曲线形式 $p-y$ 曲线, 其表达式为

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k} + \frac{y}{p_u}} \quad (1)$$

式中, p_u 为桩侧极限土压力, p 为桩侧桩土相互作用分布力, y 为桩的侧向变形, k 为初始侧向刚度, Vesic^[10]基于半弹性地基表面的无限长梁弹性力学解与弹簧系数解的对比得到侧向初始刚度的表达式为

$$k = \frac{0.65}{1 - \nu_s^2} \frac{E_s}{d} \sqrt{\frac{E_s d^4}{E_p I_p}} \quad (2)$$

其中, d 为桩的直径, E_p 为桩身材料的弹性模量, I_p 为桩的截面惯性矩, E_s 为土体的杨氏模量, ν_s 为土体的泊松比。

针对桩侧极限土抗力 p_u , 美国石油工程协会 API 基于 Matlock^[4]现场大型原位土工试验得到了软黏土中桩侧极限土压力, 具体表达式为^[11]

$$p_u = \begin{cases} 3s_u + \gamma x + J \frac{s_u x}{d} & (x < x_R) \\ 9s_u & (x \geq x_R) \end{cases} \quad (3)$$

式中, s_u 为黏土不排水抗剪强度, γ 为土体的有效重度, J 为无量纲经验系数, 一般取 0.25~0.5。 x 为地表以下深度。在桩侧达到极限土抗力时, 桩周浅层土体为楔形破坏, 深层土体为塑性绕流破坏^[12-13]。 x_R 为浅层楔形土体变化区域深度, 对于均质土体, $x_R = 6d / (\frac{rd}{s_u} + J)$ 。对于非均质土体, 由式 (3) 得到两条 $x - p_u$ 曲线, 两线交点处即为 x_R , 对于强度存在突变的土体, 该经验公式不再适用。一般说来, x_R 必须满足 $x_R \geq 2.5d$ 。

水平循环荷载作用下的 $p-y$ 曲线与静载有很大

不同, 最主要的原因是土体在循环荷载作用下的应力应变曲线与单一加载有本质的区别, 如土体的应力应变关系的滞回圈反映了应变对应力的滞后性, 土体在受荷过程中产生的不可恢复的塑性变形在循环荷载作用下的逐渐累积使得土体的强度和刚度进一步弱化, 滞回圈的中心不断偏移, 以及土体结构性的损伤等等。针对循环荷载作用下的土体应力应变关系, 有基于试验结果的经验拟合模型, 将土体的刚度和强度的弱化与动应力比、循环次数等建立联系^[14], 而本构模型方面也相应提出了套叠屈服面模型、边界面模型等各类复杂的模型^[15]。经验模型一般都是针对某一特定区域土体, 无法扩展使用, 而各类复杂的本构模型, 难以与 $p-y$ 曲线建立联系, 且由于其众多参数, 对专业知识的要求和计算的时间成本等等, 失去了 $p-y$ 曲线法与整体数值方法想比而言的明显优势, 背离了此类方法的初衷。鉴于此, 本文借鉴了 Randolph 等^[7-9]在 T-bar 和 Ball 贯入仪的理论及有限元数值研究中提出的应变弱化模型, 根据相应刚性短桩的离心模型试验结果, 提出水平循环荷载作用下基于土体损伤模型的修正 $p-y$ 曲线公式。水平循环荷载作用下, 桩侧土体弱化的范围和水平循环位移的幅值相关, 桩侧土体弱化的程度和循环次数相关。软黏土的不排水抗剪强度 s_u 的衰减规律为

$$s_u = [\delta_{rem} + (1 - \delta_{rem})e^{-3\varepsilon_y / \varepsilon_{95}}] s_{u0} \quad (4)$$

式中, s_{u0} 为没有软化的原状土不排水抗剪强度, $\delta_{rem} = s_{u,rem} / s_{u0}$ 为黏性土灵敏度的倒数, 其中 $s_{u,rem}$ 为完全重塑土的强度, ε_{95} 为引起 95% 的土体重塑, 即当土体强度为 95% ($s_{u0} - s_{u,rem}$) + $s_{u,rem}$ 时对应的累积塑性剪应变, 可以由土单元试验得到, 一般取值范围为 10~50^[7-9], ε_y 为累积的最大塑性剪应变之和。

随着水平位移的反复施加, 土体内的累积塑性变形会相应累积, 为将上述损伤模型引入 $p-y$ 曲线, 必须将宏观的桩的水平位移与微观的土体塑性变形建立联系。在水平受荷桩的推进过程中, 受影响的土体区域随之增加, 影响区域内的土体距离桩越近, 其应力值越高, 土体损伤程度越大, 从而累积的塑性应变会更大, 距离桩越远, 损伤程度会相应减小, 累积塑性应变会相应减小。Matlock 等^[16]和 Reese 等^[17]提出了如下的公式来近似计算静力加载和循环加载条件下水平受荷桩桩周土体的平均应变与水平位移的关系, 表达式为

$$\varepsilon_a = \frac{y}{2.5D} \quad (5)$$

式中, ε_a 为相对应的室内三轴试验的轴向应变, 本文假设该应变全部为塑性应变。

循环荷载作用不仅会降低土体的强度, 土体的刚

度也会随之降低, 众多室内循环三轴试验的应力应变曲线都得到了此规律。土体的初始刚度衰减与积累的塑性应变和土体的围压都有关系。本文没有追踪不排水条件下循环加载中超孔隙水压增加土体强度降低的这一应力路径, 而是在软黏土损伤模型中将累积塑性剪应变与土体的不排水抗剪强度建立联系。基于这个研究角度且进一步发现 Poulos^[18]曾将土体的杨氏模量与不排水抗剪强度建立联系, 并提到 Callanan 等^[19]建议的 E_s/s_u 取值范围为 200~900, 一般取 500。对于短桩, 考虑到浅层土体的超固结特性和干燥引起的裂缝, 该值可取上限值。通过这一途径可将本文模型中提到的累积塑性应变与双曲线 $p-y$ 公式的初始刚度衰减建立联系, 从而进一步修正循环荷载下 $p-y$ 曲线的形状。

笔者等^[20]在软黏土中刚性短桩的离心模型试验研究中发现, 循环荷载对桩侧极限土抗力 p_u 是没有影响的, 因为对应小幅值水平循环位移, 土体的弱化区域有限, 桩体跨过该区域以后, 在未扰动土体区域到达与静载极限荷载同样的桩周土体塑流状态是完全具备条件的。但由于先期扰动土体的原因, 桩侧极限抗力发挥所对应的桩侧水平位移会大于静载对应的位移 (比值大小与循环荷载位移幅值有关)^[20]。在后文实际的计算中发现, 仅仅是根据水平位移幅值累积的塑性应变弱化桩侧初始刚度, 桩顶的荷载位移曲线弱化程度非常小, 可以忽略不计, 这是因为双曲线形式的 $p-y$ 曲线是渐近线, 弱化桩侧初始刚度对曲线的形状变化有限, 且发现即使桩侧刚度变化有一个数量级, $p-y$ 曲线对应桩侧极限抗力的土体位移也几乎没有变化, 因此双曲线模型直接修正桩侧初始刚度不足以描述循环加载后的 $p-y$ 曲线特性, 可以理解为在桩侧循环荷载影响范围的土体区域内, 桩侧刚度和极限抗力都由于累积塑性应变而有所弱化, 跨过该区域后的 $p-y$ 曲线仍与静载的 $p-y$ 曲线一样, 即静载 $p-y$ 曲线的后移。扰动区域后的 $p-y$ 曲线已不是本文的研究内容, 不做赘述。

至此, 本文的研究思路建立, 首先得到静载条件下的双曲线形式 $p-y$ 曲线, 在循环荷载的反复施加过程中, 桩侧土体位移引起累积的塑性应变导致土体不排水抗剪强度的衰减, 据此修正循环荷载下的桩侧 $p-y$ 曲线, 从而分析水平循环受荷桩的相应响应。

2 离心试验的验证

笔者等^[20]进行了 Kaolin 黏土中刚性短桩水平循环荷载作用下的离心模型试验研究。试验 1, 2, 4 施加了双向循环水平位移直至桩周土体抗力达到稳定阶段, 不再明显退化。最大位移幅值分别为 0.125, 0.25,

0.5 倍的桩径。相应的归一化后的桩顶力和位移曲线见图 1。

试验中根据 T-bar 贯入仪的测试结果近似拟合原状土的不排水抗剪强度, 表达式为 $s_u = 2.2 + 3.3\sigma_v^{0.9}$ (kPa)。由循环贯入测试得到土样的灵敏度为 2.5 (见图 2)^[20]。

模型桩采用中空铝管制作, 截面外直径 12 mm, 壁厚 1 mm, 对应原型尺寸分别为 0.6 m, 0.05 m。桩长 90 mm, 埋入土体深度 60 mm, 对应原型埋入深度 3 m, 由桩的柔度比得到该桩可以按刚性桩进行分析。桩侧极限抗力公式中的经验系数 J 取 0.5, E_s/s_u 由于短桩的原因取其上限值 900, 得到静力荷载下的桩顶荷载位移曲线如图 3 所示, 其与试验结果的一致保证了选取参数的合理。由图可以看到, 试验曲线有明显的峰值, 在达到极限承载力后随着位移的增加, 桩顶水平力开始降低, 说明了作为轻超固结试验土样的软化特性, 由于双曲面模型没有考虑这一特点, 故计算曲线没有表现出峰值荷载和后期软化。

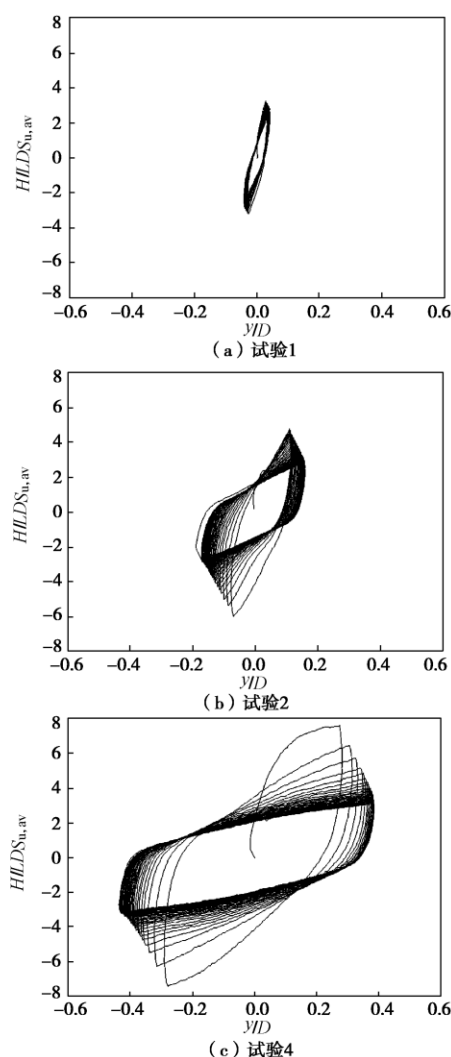


图 1 水平循环荷载作用下单桩荷载位移曲线

Fig. 1 Load-deflection curves of single pile subjected to cyclic

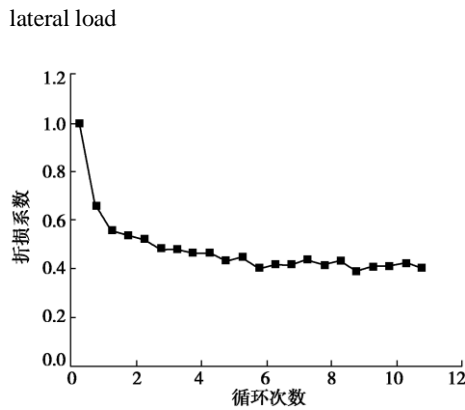


图 2 T-bar 循环贯入测试土体强度折损与循环次数的关系

Fig. 2 Degradation of undrained shear stress with cyclic number for T-bar Penetrometer

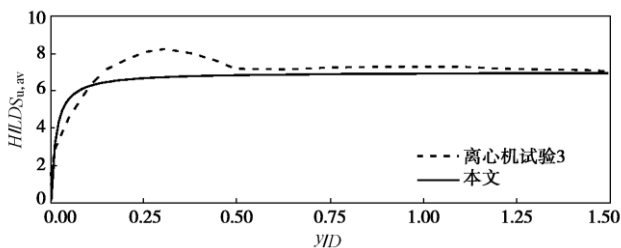


图 3 单桩的静载荷载位移曲线

Fig. 3 Load-deflection curves of single pile subjected to monotonic load

由于试验用 Kaolin 土样对应损伤模型中的参数 ε_{95} 没有进行室内土样试验, 在此取建议值的中间值 30 进行计算。图 4 为本文方法计算得到的割线刚度的衰减与循环荷载次数的关系, 以及相应的离心试验曲线。由结果对比可以看到, 本文方法反应了单桩的割线模量随着循环荷载而降低的特点, 水平位移幅值 $y/D = 0.125$ 时, 本文计算结果与试验吻合较好。而随着水平位移幅值的增加, 针对试验二和试验四, 最初的几次循环理论分析与试验结果误差较大。由图 1 可以看到, 试验中的位移控制并不能做到完全精确, 随着循环次数的增加, 每次循环对应的水平位移一直在增加, 并且试验结果的曲线考虑了加载梁的非完全刚性效应对水平位移有所折减, 如针对试验四其最大的 y/D 仅是 0.4 附近。由图 3 可以看到, 实际静载荷载位移曲线由于土体软化特点而出现峰值, 其割线刚度会先增后减, 双曲线模型没有表现这一特点, 理论分析曲线与试验曲线第一次相交对应的 $y/D = 0.125$, 在其后试验曲线的硬化峰值阶段, 理论曲线的割线刚度就开始小于试验曲线的割线刚度, 直至稳定阶段两者趋于一致。上述两个原因导致了 $y/D = 0.125$ 的小位移幅值理论分析与实测结果的完全吻合, 而 $y/D = 0.25$ 和 $y/D = 0.5$ 的情况, 理论分析

与实测结果在最初的几次循环荷载下误差较大, 但随着土体的完全弱化, 误差减小。此外加载梁对水平位移的误差, 随着水平位移的增加而增加, 因此试验二和试验四的割线刚度始终是小于测试值的。

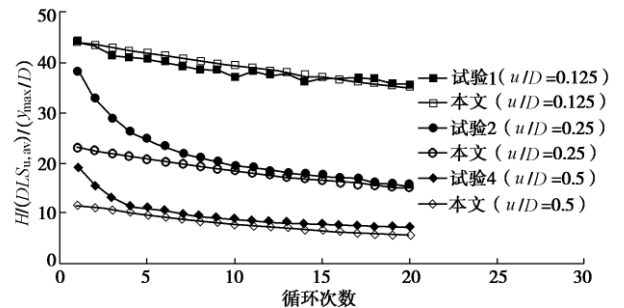


图 4 桩侧割线刚度降低与循环荷载次数曲线

Fig 4 Degradation of secant stiffness with cyclic number

3 几点思考

由上文的理论方法介绍和试验结果的分析对比可以发现, 本文的方法虽然从机理上对水平循环受荷桩的 $p-y$ 曲线进行了细致的探讨, 但在实际应用中还是有其限制的, 仍有非常大的改进空间。Poulos^[18]指出针对循环受荷桩需要考虑桩土相互作用的弱化(包括工作状态和极限状态)、荷载的加载速率以及长期的累积位移。显然, 本文的工作仅仅考虑了工作状态的桩土相互作用弱化, 对其余方面没有涉及。修正的双曲线形式 $p-y$ 曲线模型可以理解为是水平循环荷载下桩土相互作用的骨干曲线, 没有考虑循环荷载作用下的滞回圈和能量耗散。水平受荷桩在桩后会形成空洞, 循环荷载的作用, 会使得空洞出现和闭合反复进行, 对 $p-y$ 曲线的形态也会有影响。另外本文所有的机理分析都是基于刚性短桩离心试验的结果, 对长桩是否适用还需要进一步验证。就本文的研究体系而言, 将宏观的桩的水平位移与微观的土体塑性变形建立联系以及将土体损伤模型与桩侧刚度建立联系, 还需要大量的数值模拟和试验工作, 本文的分析仅是初步的尝试和假设, 远远没有达到与实际对应的情况。另外, 通过室内试验对损伤模型中累积塑性应变参数的确定也需要进一步的理解和思考。

4 结 语

本文对软黏土中水平循环受荷桩的 $p-y$ 曲线进行了理论探讨, 基于 Tresca 准则扩展而来的土体弱化损伤模型和离心试验的结果, 从循环荷载下桩侧土体不可恢复的累积塑性应变角度对静载 $p-y$ 曲线进行修正, 以考虑水平循环荷载的影响。通过与离心试验的对比验证了本文方法的合理性, 并提出了该方法存

在的不足和进一步工作的方向。

参考文献:

- [1] DAWSON T H. Simplified analysis of offshore piles under cyclic lateral loads[J]. *Ocean Engineering*, 1980, **7**: 553 - 562.
- [2] GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C, SAFLEKON S. Cyclic lateral loading of piles in soft clay[J]. *Geotechnical Engineering*, 1992, **23**: 47 - 60.
- [3] KONDER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soil[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1963, **89**: 115 - 143.
- [4] MATLOCK H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay[C]// *Proceedings of the second Offshore Technology Conference*, Houston, 1970: 577 - 588.
- [5] RAJASHREE S, SUNDARAVADIVELU R. Degradation model for onw-way cyclic lateral load on piles in soft clay[J]. *Computers and Geotechnics*, 1996, **19**(4): 289 - 300.
- [6] GRASHUIS A J, DIETERMAN H A, ZORN N F. Calculation of cyclic response of laterally loaded piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 1990, **10**: 287 - 305.
- [7] RANDOLPH M F. Characterisation of soft sediments for offshore application[C]// *Proc 2th Int Conf on Site Characterisaton*, Vol1, Proto, 2004: 2009 - 2231.
- [8] ZHOU H, RANDOLPH M F. Numerical investigations into cycling of full-flow penetrometers in soft clay[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(10): 801 - 812.
- [9] EINAV I, RANDOLPH M F. Combing upper bound and strain path methods for evaluating penetration resistance[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, **65**: 1991 - 2016.
- [10] VESIC A. Bending of beams resting on isotropic elastic solid[J]. *Journal of. The Engineering Mechanics Division, ASCE*, 1961, **87**(2): 35 - 53.
- [11] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design, 21st edn[R]. Washington: American Petroleum Institute, 2000.
- [12] MURFF J D, HAMILTON J M. P-Ultimate for Undrained Analysis of Laterally Loaded Piles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1993, **119**(1): 91 - 107.
- [13] RANDOLPH M F, HOULSBY G T. The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil[J]. *Géotechnique*, 1984, **34**(4): 613 - 623.
- [14] 黄茂松, 李 帅. 长期循环荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(10): 1491-1498.(HUANG Mao-song, LI Shuai. Degradation of stiffness and strength of offshore saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(10): 1491 - 1498. (in Chinese))
- [15] ROUAINIA M, MUIR Wood D. A kinematic hardening constitutive model for naturalclays with loss of structure[J]. *Géotechnique*, 2000, **50**(2): 153 - 164.
- [16] MATLOCK H, REESE L C. Generalized solution for laterall loaded piles[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divison*, 1960, **86**(5): 673 - 694.
- [17] REESE L C, WELCH R C. Lateral loading of deep foundation in stiff clay[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1975, **101**(7): 633 - 649.
- [18] POULOS H G. Pile behavior—theory and application[J]. *Géotechnique*, 1989, **39**(3): 36 - 415.
- [19] CALLANAN J F, KULHAWY F H. Evaluation of procedures for predicting foundation uplift movement[R]. New York: Cornell University, 1985.
- [20] ZHANG Chenrong, WHITE D, RANDOLPH M F. Centrifuge modelling of the cyclic lateral response of a rigid pile in soft clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2011, **137**(7): 717 - 729.

(本文责编 胡海霞)