

黏土中水平动荷载作用下刚性短桩 刚度衰减数值分析^①

曾树平, 冷 建, 叶冠林

(上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要:水平动荷载作用下桩的水平承载力和桩侧土的刚度变化是桩基设计时的重点考虑因素。采用基于移动硬化弹塑性本构模型的水土完全耦合有限元法, 建立二维桩土共同作用模型, 探讨黏土中刚性短桩在水平动荷载作用下水平力与位移的关系, 以及割线刚度的衰减规律。并对比水平循环荷载作用下与静载作用下桩的水平承载力的差异, 得到一些对研究和设计都有参考价值的结论。

关键词:黏土; 短桩; 水平承载能力; 刚度衰减; 水土耦合有限元

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 2-0181-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.增刊 2.0181

Numerical Analysis of Stiffness Degradation of a Rigid Short Pile in Clay under Horizontal Dynamic Loads

ZENG Shu-ping, LENG Jian, YE Guan-lin

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The horizontal response of a loaded pile under the sea has attracted more and more attention in recent years. The ultimate horizontal capacity and stiffness of the horizontal response are two principal aspects of a pile response to a horizontal load that require assessment by the designer. This paper is based on the cyclic mobility model and soil-water coupled FEM, reports a study of the relationship of the horizontal load and displacement and the regulation of the stiffness degradation of a rigid pile under horizontal dynamic load. It also accounted for the difference of the horizontal ultimate pile capacity between dynamic and static horizontal load and conclusions are made that may assist in future design and investigation of this phenomenon.

Key words: clay; short pile; horizontal load bearing capacity; stiffness degradation; soil-water coupled FEM

0 引言

桩基受水平交变荷载作用的建筑和构筑物有很多, 例如海上的钻井平台、海边的防波堤、大型船舶进出的港口和码头, 长期受水流和波浪作用, 有的还受船舶的冲击荷载。如果遇到像台风这样的极端气候条件和处在地震多发地带, 还可能处于极端的受力环境中。这些建筑和构筑物的基础一般都采用桩基, 因此水平荷载作用下桩基的设计也越来越受到

重视。国内外对桩基受水平力作用的研究有很多: Matlock^[1]在 1970 就提出了 p - y 曲线计算方法, 被美国 API 规范采用; Reese 等^[2]在 1994 年又对 p - y 曲线计算方法进行了修正和发展; 近年来, Nikos Gerolymos 等^[3]用动力 Winkler 地基梁法研究了砂土中桩受水平循环荷载作用下的力-位移的关系; K T Chau 等^[4]用有限元方法结合 ABAQUS 软件对

① 收稿日期: 2015-04-01

作者简介: 曾树平(1989-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: zspwode@126.com。

通信作者: 叶冠林(1975-), 男, 海南文昌人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程数值计算、盾构隧道的研究。E-mail: ygl@sytu.edu.cn。

桩-土之间的相互作用进行了计算分析;张陈蓉等^[5]用基于 Tresca 准则扩展而来的土体弱化模型和离心试验进行了模拟和试验。这些研究取得了许多有借鉴和实践意义的成果,但是用有限元方法描述水平动荷载作用下非线性的桩-土之间相互作用的并不多。

水平循环交变荷载作用下的桩基设计中需考虑的主要因素有三个:(1)桩的水平极限承载力;(2)循环荷载作用下土体刚度的变化;(3)桩身变形与土体变形的相互作用。这三个因素导致桩-土动态交互作用的机理复杂化,增加了有限元分析中同时考虑桩、土自身变形的难度,因而本文只考虑刚性短桩的工况。

本文采用基于上下负荷面概念发展而来的旋转硬化弹塑性模型^[6-7]和水土耦合有限元法研究黏土中刚性短桩在水平循环荷载作用下的力-位移关系,建立二维桩-土相互作用模型,进行动力有限元计算,初步揭示水平循环荷载作用下桩的水平承载能力和桩侧割线刚度(滞回曲线一个循环内加载方向变化的两点的斜率)的变化规律。

1 有限元模型和计算工况

图 1 为二维有限元模型。地层长 20 m,高 9 m。桩直径为 0.6 m,总长 4.5 m,其中入土深度 3 m。土的材料参数见表 1。

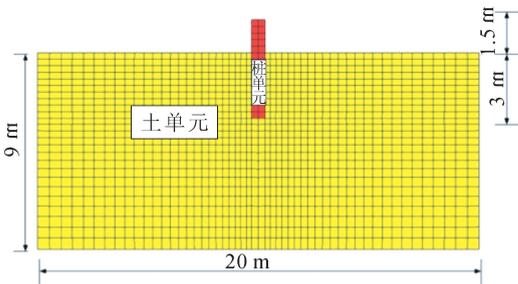


图 1 桩-土有限元模型
Fig.1 Pile-soil FEM model

表 1 土的材料参数

Table 1 Soil parameters

压缩指数 λ	0.155
膨胀指数 κ	0.02
临界状态应力比 M	3.5
孔隙比 N ($p = 98$ kPa on NCL)	0.74
泊松比 ν	0.3
超固结状态变化参数 m_R	1.2
结构衰退参数 m_R^*	0.1
各向异性发展速度控制参数 b_r	0.4
超固结应力 P_c /kPa	100
各向异性 ζ_0	0.0

本文考虑四种不同工况,在桩顶施加循环位移荷载,详情见表 2。其中, test1~3 是水平双向循环加载,而且在循环结束、桩回复到垂直位置后施加一个单向位移荷载,测试水平极限承载力。test4 仅施加一个单向荷载。模型中地层表面设为排水边界,并根据文献^[8]运动速率 $v < 1$ mm/s 能确保土体处于不排水剪切状态,给桩施加 $X \geq 2D$ (D 为桩径)的水平位移可使桩周土发生破坏,在本文计算中取加载速率 1 mm/s,位移荷载最大值为 $2D$,循环荷载为 20 个三角正弦波。

表 2 四种不同的工况

Table 2 Four operating conditions

工况	循环次数	循环等效位移 X/D 的幅值	静载
test1(循环+静载)	20	0.125	$2D$
test2(循环+静载)	20	0.25	$2D$
test3(循环+静载)	20	0.5	$2D$
test4(静载)	单向位移荷载		$2D$

注: D 是桩径

2 计算结果和讨论

2.1 桩的水平承载力

4 种工况单向加载得到的力-位移曲线见图 2。图中位移取为等效位移,即水平位移 X 与桩径 D 之比。其中 test1~3 是在水平动荷载作用之后施加的。由图可见, test4 在位移为 $0.1D \sim 0.25D$ 时发现明显屈服,而 test1~3 的曲线大致呈线性,无明显屈服。test4 的水平荷载明显大于其他 3 个工况,说明循环荷载会降低桩的水平极限承载力。比较 test1~3 的曲线可知,在位移小于 $1D$ 时 3 种工况的水平抗力基本相同;当位移大于 $1D$ 后,先期水平循环荷载越大的桩,其水平抗力越小,但相差不大。上述现象说明先期水平循环荷载会降低桩的水平承载力,而且使得力-位移曲线上没有明显屈服;力-位移关系受循环荷载幅值影响较小,尤其是位移小于 $1D$ 时。

2.2 桩土相对刚度

test1~3 循环加载的力-位移曲线如图 3 所示。3 个 test 的位移幅值分别为 $0.125D$ 、 $0.25D$ 、 $0.5D$,一共施加了 20 次循环荷载。由图 3 可知在经过约 10 个循环后,滞回曲线割线刚度的下降趋势趋缓,表明 20 次循环足够描述桩土共同作用的刚度衰减规律。

图 4 是桩-土之间的割线刚度折减曲线。纵坐标是桩-土的等效刚度,即等效强度 F_x/LDS_u 与等

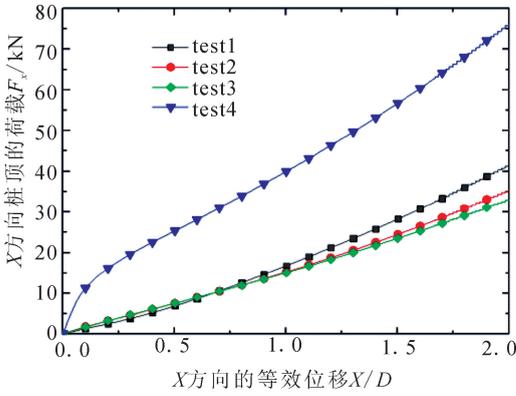


图 2 桩顶的力-位移曲线

Fig.2 Force-displacement curves of the pile top

效位移 X/D 的比值。 F_x 是桩顶的水平力, L 是桩的入土深度, D 是桩径, X 是桩顶水平位移, S_u 为土体的平均剪切强度。根据文献[8] $S_u = 2.2 + 3.3 Z^{0.9}$, Z 是深度, 本文的 S_u 取 6.75。本文中的刚度是割线刚度, 其值为一个滞回圈中荷载最大值和最小值之间连线的斜率。由图 4 可知, test1 的割线刚度随循环次数增加下降较快, 其次是 test2 和 test3; 所有 test 的刚度在初期下降较快, 其后逐渐趋缓。

test1~3 中的割线刚度变化可结合 test4 中的力-位移曲线加以说明。由图 2 可知 test1 的位移刚达到 $0.125D$ 时, 模型中土体还未发生屈服, 荷载循环作用时滞回曲线中力的峰值下降幅度大, 直到土体屈服才减缓; test2 的位移幅值是 $0.25D$, 更接近土体屈服点, 荷载循环作用时土体更易屈服而力的峰值下降幅度较 test1 小; test3 中土体已发生屈服, 力的峰值下降不明显。力的峰值下降幅度正好对应图 4 中各工况刚度的变化。

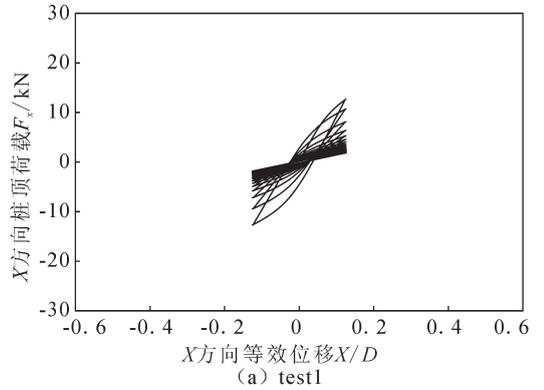
3 结语

本文利用有限元方法分四种工况对黏土中刚性短桩受水平循环荷载作用的二维桩-土相互作用模型进行计算, 研究了桩的水平承载力和桩-土之间割线刚度的变化, 得到以下结论:

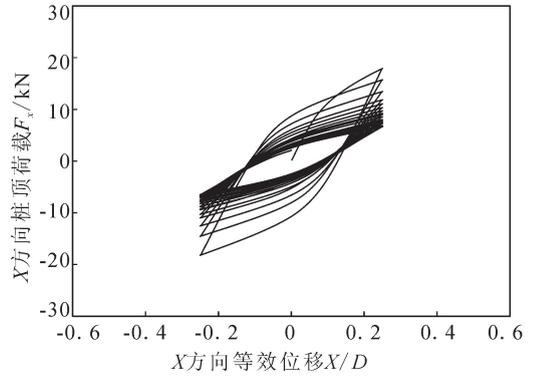
(1) 先期水平循环荷载会降低桩的水平承载力, 而且使力-位移曲线上没有明显屈服; 力-位移关系受循环荷载幅值影响较小, 尤其是位移小于 $1D$ 时。

(2) 不同工况, 桩受水平循环位移荷作用位移幅值小的 ($0.125D$) 桩顶力的峰值在循环前期下降得快; 位移幅值越大的 ($0.25D$ 和 $0.5D$) 前期下降得越慢。

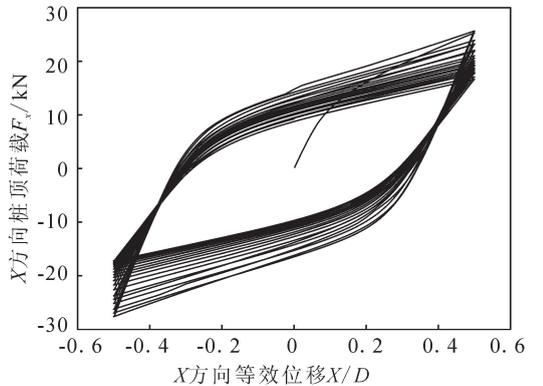
(3) 同一种工况, 桩-土之间的割线刚度在循环



(a) test1



(b) test2



(c) test3

图 3 循环荷载作用下力-位移滞回曲线

Fig.3 Force-displacement hysteresis curves under cyclic loads

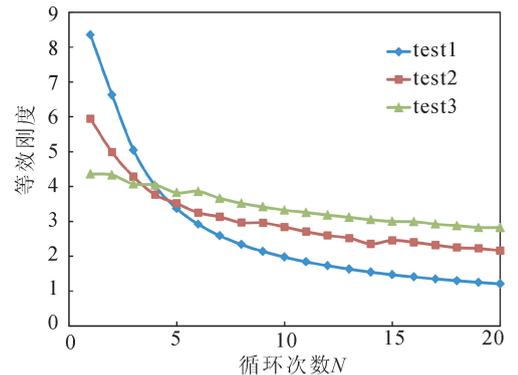


图 4 桩-土之间割线刚度折减曲线

Fig.4 Reduction curves of secant stiffness between pile and soil

前期下降幅度大,后期都趋于稳定。

参考文献

- [1] Matlock H. Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay[C]// Proc 2nd Annu Offshore Tecnol Conf, 1970: 577-594.
- [2] Reese L C, Welch R C. Lateral Loading of Deep Foundation in Stiff Clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 1975, 101(6): 633-649.
- [3] Nikos Gerolymos, Sandra Escoffier, George Gazetas, et al. Numerical Modeling of Centrifuge Cyclic Lateral Pile Load Experiments[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 8(1): 61-76.
- [4] K T Chau, C Y Shen, X Guo. Nonlinear Seismic Soil-pile-structure Interactions: Shaking Table Tests and FEM Analyses[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, (29): 300-310.
- [5] 张陈蓉, 俞剑, 黄茂松. 软黏土中水平循环荷载作用下刚性短桩的 p - y 曲线分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊2): 78-82.
- [6] 张锋, 叶冠林. 计算土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [7] Ye B, Ye G, Zhang F, et al. Experiment and Numerical Simulation of Repeated Liquefaction Consolidation of Sand[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(3): 547-558.
- [8] ZHANG Chen-rong, David White, Mark Randolph. Centrifuge Modeling of the Cyclic Lateral Response of a Rigid Pile in Soft Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(7): 717-729.