

循环荷载下劲性微型桩单桩模型试验研究

曲 进, 孙剑平, 高 翔

(山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101)

摘 要: 以 1/7 比例进行室内模型试验, 采用荷载控制加载的拟静力试验方法, 通过在桩顶施加侧向循环荷载, 对劲性微型桩单桩的滞回曲线、骨架曲线和滞回特性进行研究, 同时探讨了循环荷载下劲性微型桩的弯矩分布及破坏机制。研究表明, 劲性微型桩在循环荷载作用下荷载-位移关系具有稳定的滞回环, 且表现出刚度退化的特性; 在上部土体范围内产生桩土脱开效应, 滞回曲线发生捏拢现象; 桩身弯矩主要集中在桩顶下 17 d 的范围内, 最大弯矩位于桩顶下 6 d 附近。

关 键 词: 劲性微型桩; 模型试验; 循环荷载

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Model test study of single stiffened micropile under cyclic load

QU Jin, SUN Jian-ping, GAO Xiang

(School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: The physical model tests of stiffened micropiles with similarity ratio of 1/7 are carried out. By using the pseudo-static test method in which the force control load and imposing load on the top of the micropile are used, the hysteretic curves, skeleton curves, the hysteretic characteristics, the bending moment and the failure mechanism of single stiffened micropile under circulating load are obtained. The tests results show that, the load-displacement relation has the stable hysteresis loop and the characteristics of the stiffness degradation; the separation effect between the micropile and soil happened in the upper soil under the lateral cyclic load; and the atrophy phenomenon is found in the hysteresis curve; the bending moment of micropile mainly concentrated within the scope where the distance below the top of the pile is about 17 times diameter of micropile; and the maximum bending moment is located below the top of the pile with the distance about 6 times diameter of micropile.

Key words: stiffened micropile; model test; cyclic load

1 前 言

微型桩一般指桩径在 150~300 mm, 长细比大于 30, 采用钻孔、强配筋和压力注浆工艺施工的小直径桩^[1]。自 20 世纪 50 年代由意大利的 Lizzi 提出这一概念以来, 它被广泛的应用于增层改造、房屋加固、建筑物纠偏、建筑物加固防震、地基加固、基础托换、边坡加固等工程中。一般情况下, 微型桩仅承受竖向荷载, 但在地震设防区、海洋波浪和机械振动影响下桩体往往还要承受水平方向的动力荷载。由于劲性材料承受水平荷载的能力较强, 一般将桩内增强体设为钢管或工字钢等劲性材料, 称为劲性微型桩。

近几十年来, 国内外学者相继对侧向循环荷载作用下的桩基动力响应进行研究, 1989 年, 韩英才、Novak^[2]采用边界层模型分析了水平激振作用下单桩的动力反应, 并进行了大尺寸模型桩的动力试验研究, 将理论分析与试验结果进行对比, 认为桩顶动力反应呈现典型的非线性特性, 在重复荷载作用下桩周土产生松动和脱离, 从而导致桩的刚度和阻尼均降低。1997 年, 赵振东、傅铁铭^[3]利用三维显式有限元模型, 对桩土系统的侧向动力性能进行研究, 侧向荷载作用下桩土间有一定的滑移发生, 同时桩、土间的分离也以不断减小的幅值连续向下传播。众多学者研究后认为, 随着循环次数的增加, 造成横向受荷桩挠度增加的原因有以下两种: 一种

是在多次循环荷载作用下桩身积累有残余变形,待残余变形趋于稳定后,桩将产生“震荡”破坏;另一种是由于循环荷载作用,土体产生退化,土体的压缩性和强度均降低^[4-5]。

由于目前针对劲性微型桩在侧向循环荷载作用下的研究资料较少,设计理论不完善,笔者对劲性微型桩进行了室内模型试验,通过拟静力试验,研究其在侧向循环荷载下的工作性状。

2 模型设计工作与制作

2.1 相似关系

以山东五莲某发酵罐的劲性微型桩抗振加固工程作为研究对象,对其进行单桩模型试验。试验模型选取 1:7 的比例模型,为使模型试验结果能够更加真实地反映原型的性状,必须考虑原型与模型之间的相似性。室内模型试验中几何相似、荷载相似、边界条件相似较容易实现,但材料相似难以实现。由于模型试验需要考虑尺寸效应,试件的大小将对材料特性产生明显的影响。本次试验只考虑几何相似、荷载相似以及边界条件相似,并没有考虑材料相似,仅对微型桩在低周往复荷载下的工作机制、动力响应等问题进行定性分析。

本次试验以几何相似比 $C_l = 1/7$, 弹性模量相似比 $C_E = 1$ 为基础相似比,根据相似理论原理^[6]列出 π 项式,各物理量的相似比计算结果如下:
 $C_p = 1/49$, $C_\sigma = 1$, $C_\varepsilon = 1$, $C_u = 1/7$, $C_M = 1/343$, $C_\gamma = 7$, 其中 P 为桩顶所受集中力; σ 为桩身应力; ε 为桩身应变; u 为桩顶位移; M 为桩身弯矩; γ 为微型桩重度。根据相似比例,模型桩的重度为原型的 7 倍,本次试验中劲性微型桩以承受水平荷载作用为主,因此桩的重度对试验结果的影响并不大,可降低此要求。

2.2 模型材料

(1) 模型箱

模型箱净尺寸(长×宽×高)为 1.45 m×1.45 m×1.85 m。模型箱的四角及底面由 75 mm×6 mm 的角钢焊接而成,模型箱内壁采用壁厚 25 mm 的木板拼接而成。在模型箱内壁上贴上塑料薄膜,减小砂土的边界效应。

(2) 模型土

试验采用过筛风干后的中粗砂,分层填筑,夯填后对桩周砂土的基本物理力学参数进行测定。砂土密度 $\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$, 含水率 $\omega = 3.36\%$, 孔隙比 $e = 0.671$, 孔隙率 $n = 40.1\%$ 。

(3) 模型桩

劲性微型桩尺寸: 桩长 1.6 m, 桩径为 36 mm

($l/d = 44.4$)。根据相似关系,可以模拟桩长 11.1 m, 桩径为 250 mm 的原型桩。微型桩芯材是外径为 19 mm、壁厚 1 mm 的不锈钢管,采用 M30 水泥净浆浇注,水泥强度等级为 42.5R。

为模拟现场的施工工艺,采用现场灌注。首先将内径为 36 mm 的 pvc 管预埋在砂土中,通过定位器将不锈钢管置于 pvc 管中心。然后,通过插入 pvc 管内的软管,在自然重力作用下向 pvc 管内注入水泥净浆,边注浆边振捣,待 pvc 管中水泥浆注满后,缓慢拔出 pvc 管,并迅速补浆。桩体浇注完成养护 28 d 后进行试验加载。

2.3 测试系统

测试系统包括测试元件和数据采集系统。试验中采用的测试元件包括应变计以及百分表,数据采集系统应变应力综合测试仪。本次试验的主要量测内容: ①桩身弯矩: 在不锈钢管前后沿深度每隔 0.2 m 埋设一对应变片,测试劲性微型桩各深度处的弯矩。②位移: 在砂土表面处及砂土表面上 0.07 m 处布设百分表,测试不同荷载下桩顶及砂土表面处的水平位移,在砂土下设置水平位移计测量桩体的水平位移。

2.4 加载设计

模型制作完成后,采用力控制于桩顶分七级施加水平往复荷载,每级加载反复 3 次。每次荷载施加完毕待各测量数据基本稳定后,再施加下一级荷载。

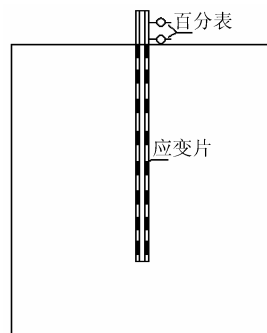


图 1 模型试验布置图

Fig.1 The arrangement of model tests

3 试验结果分析

3.1 滞回曲线及骨架曲线研究

(1) 滞回曲线

循环荷载作用下加载、卸载过程中应变落后于应力,使得加载线与卸载线不重合而形成了一条滞回曲线。在循环荷载作用下绘制出桩顶水平力和桩顶侧移之间的滞回曲线^[7],骨架曲线是每次循环的

荷载-位移曲线达到最大的峰点轨迹^[7], 它能够构件或结构的变形履历过程。在正反交替往复荷载作用下骨架曲线与滞回曲线可以反映构件的强度、刚度、

延性、耗能能力等特性。

各级荷载作用下绘制出砂土表面桩顶的滞回曲线如图 2 所示。

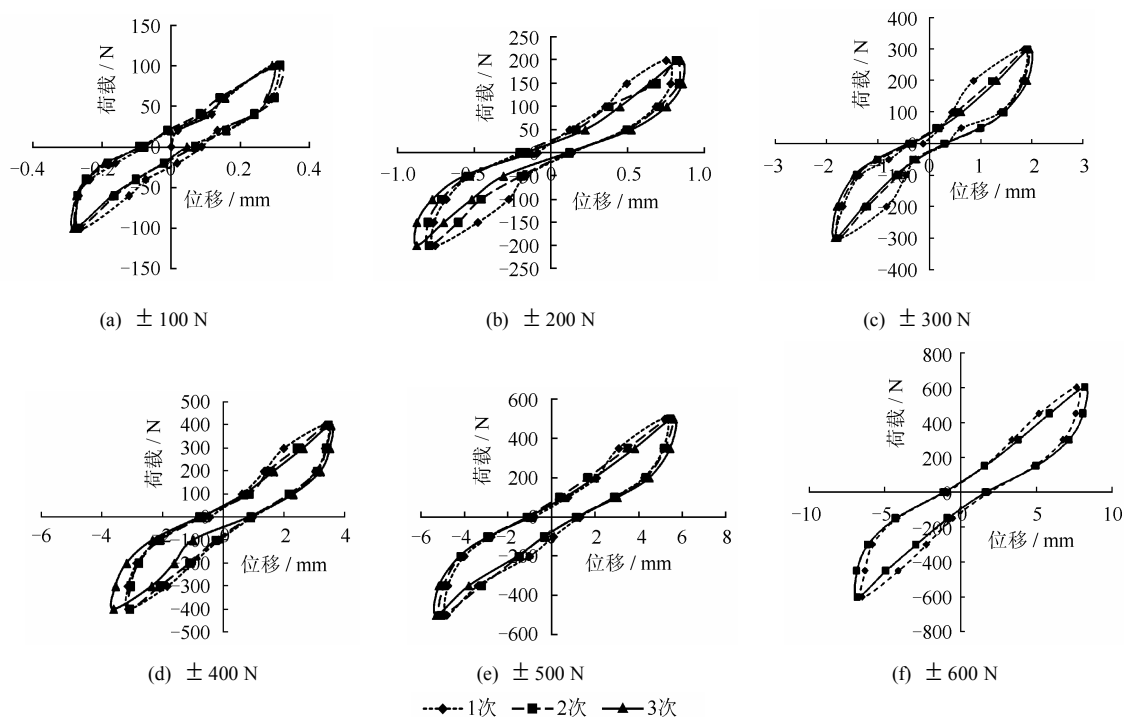


图 2 各级荷载下滞回曲线

Fig.2 Hysteresis curves under various load

图 2 中, 1 次、2 次、3 次分别表示同一荷载下的加载次数。由图可以看出, 劲性微型桩在循环荷载作用下 (每级荷载循环 3 次), 荷载不变时桩周土体产生松动, 土体强度降低, 桩体刚度降低, 桩顶位移继续增加。在循环荷载作用下桩体和砂土之间的接触面发生松动和脱开现象 (图 3)。



图 3 桩土脱开

Fig.3 Pile-soil separation

桩土脱开后桩体在脱开区域内循环运动, 这一区域的土体退出工作, 从而导致桩-土体系刚度降低, 桩体位移相应加大, 在脱开区域内, 位移的变化速率明显大于荷载的变化速率。当桩与土体接触后, 桩土共同承担侧向荷载, 刚度增大, 在滞回环中表现出捏拢现象 (图 4)。

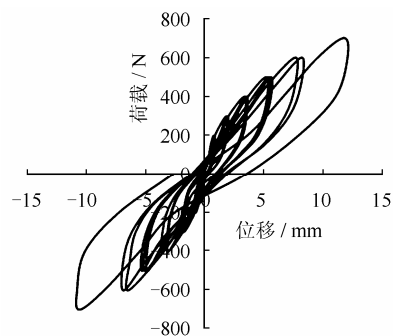


图 4 滞回曲线

Fig.4 Hysteresis curves

(2) 骨架曲线

劲性微型桩的骨架曲线 (图 5) 有如下特点: 侧向荷载较小时, 骨架曲线表现为斜率较大的直线段; 随着荷载的加大, 桩周土体由上到下逐渐失效, 桩体的侧向刚度逐渐降低, 骨架曲线表现为斜率较小的曲线段。

3.2 耗能能力

结构在抗震中的耗能能力可以通过等效黏滞系数进行判别。Jacobson 于 1930 年提出了等效黏滞阻尼概念, 现被广泛的应用到工程抗震中。等效黏滞阻尼系数 H_e 按照耗能相等原则进行换算。利用

各级荷载作用下的滞回曲线计算出各工况下的等效黏滞阻尼系数,见表1。

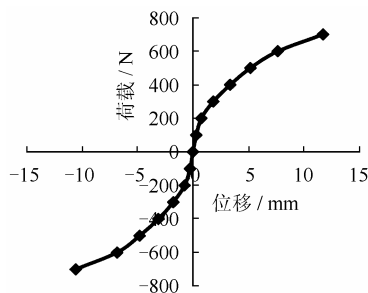


图5 骨架曲线
Fig.5 Skeleton curve

表1 等效黏滞阻尼系数

Table 1 Equivalent viscous damping coefficient

荷载/N	100	200	300	400	500	600
H_e	0.089	0.094	0.096	0.125	0.115	0.103

由表1可以看出,随着循环荷载的增加,等效黏滞阻尼系数先增大后减小。桩-土在侧向循环荷载作用下桩周砂土由于反复挤压密实,砂土的横向承载力逐渐增大,阻尼系数在100~400 N区间表现出增大的趋势。随着荷载的增大,微型桩与上部土体之间产生间隙,导致桩与土体分离。施加循环荷载时,桩体运动首先存在一段自由运动距离,然后桩与土体接触,共同承受水平荷载。桩土之间的间隙逐渐加大,并逐渐向下开展延伸,阻尼系数在400~600 N区间表现出减小趋势。

3.3 桩身截面弯矩

根据梁的弯曲变形与应力分析理论,桩身任一截面处的弯矩可按式计算:

$$M = \frac{EI\Delta\varepsilon}{b_0} \quad (1)$$

式中: b_0 为同一测试断面处两应变片之间的距离; EI 为桩的抗弯刚度; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_+ - \varepsilon_-$, 其中 ε_+ 、 ε_- 分别为同一截面处的拉压应变。

根据桩的标定资料和实测桩身应变值,利用公式(1)计算桩身弯矩。由图6可以看出:弯矩反弯点出现在桩身0.65 m附近处。随着荷载的增加,弯矩变化主要集中在桩上部1/3处,下部桩身弯矩无明显变化。弯矩最大值出在距桩顶0.2 m ($z/d = 5.56$)处。在循环荷载作用下,桩土之间的间隙逐渐增大,并逐渐向下开展,桩身弯矩最大值位置应有下移趋势,但由于本次试验应变片粘贴位置间隔较远,在20 cm与30 cm处没有粘贴应变片,无法反映出桩身最大弯矩点下移的现象。

在桩身0.2、0.6、1.0 m位置处布置自制位移量测设备,通过检测,桩身0.6、1.0 m的位移在整个试验过程中基本无变化。与图6中桩身0.6、1.0 m处的弯矩较小相吻合。

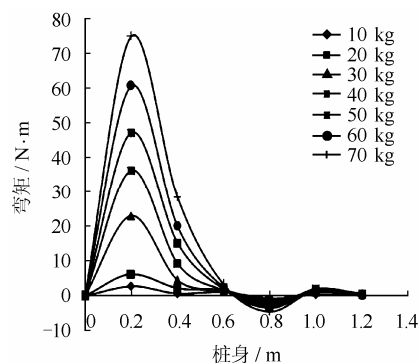


图6 桩身弯矩图
Fig.6 Bending moments of pile bodies

3.4 劲性微型桩侧向循环荷载作用下破坏机制

劲性微型桩承受侧向水平荷载能力主要源于桩身与土之间的竖向摩阻力以及桩周土体的横向抗力。随着荷载的增加,桩侧土逐渐失效,桩头附近土体与桩产生间隙,桩的受力模式发生改变,从温克勒地基梁逐渐转变成成为悬臂梁。随着荷载的不断增大,桩与桩周土不断分离,桩身所承受的弯矩不断增加。由于劲性微型桩桩体内加入增强体,桩体在较大位移情况下并未出现桩身断裂,只在距砂土表面下24 mm位置处的水泥浆体上出现了一条半环形裂缝,如图7所示。

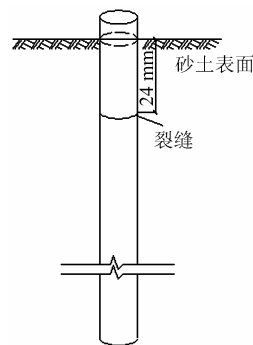


图7 桩身处裂缝
Fig.7 The crack in the pile body

4 结 论

(1) 劲性微型桩在循环荷载作用下荷载-位移关系具有稳定的滞回环,且具有刚度退化的特性。

(2) 侧向循环荷载作用下桩土之间产生间隙,桩的受力模式将发生改变,从温克勒地基梁逐渐转变成成为悬臂梁。滞回曲线整体表现出捏拢现象。

(3) 骨架曲线由斜率较大的直线段与斜率较

小的曲线段两部分组成。

(4) 针对本研究中的情形, 桩身弯矩主要集中在桩上部 $17d$ 范围内, 桩身最大弯矩出现在桩身 $6.7d$ 深度处, 桩身位移主要发生在距桩顶 $0.6m$ ($z=16.7d$) 的范围内。

参 考 文 献

- [1] 吕凡任, 陈云敏, 梅英宝. 小桩研究现状和展望[J]. 工业建筑, 2003, 33(4): 56—59.
LÜ Fan-ren, CHEN Yun-min, MEI Ying-bao. Recent study and forecast of research on micropile[J]. **Industrial Construction**, 2003, 33(4): 56—59.
- [2] 韩英才, NOVAK M. 水平荷载作用下单桩的动力分析[J]. 地震工程与工程振动. 1989, 9(2): 97—106.
HAN Ying-cai, NOVAK M. Dynamic analysis for a single pile under horizontal loading[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**. 1989, 9(2): 97—106.
- [3] 赵振东, 傅铁铭, 土岐宪三. 桩头侧向集中荷载作用下桩-土系统的非线性动力性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(3): 100—109.
ZHAO Zhen-dong, FU Tie-ming, TOKI K. Nonlinear dynamic behaviors of pile-soil systems under lateral impulsive head-loading[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**. 1997, 17(3): 100—109.
- [4] 武思宇, 宋二祥, 刘华北, 等. 刚性桩复合地基抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 77—82.
WU Si-yu, SONG Er-xiang, LIU Hua-bei, et al. Shaking table test study on aseismic behavior of rigid pile composite foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 77—82.
- [5] 黄小明, 赵利平. 水平循环荷载作用下桩-土相互作用机理的研究现状[J]. 湖南交通科技, 2003, 29(1): 87—89.
HUANG Xiao-ming, ZHAO Li-ping. Current situation on study of pile-soil interaction mechanism under the action of horizontal load[J]. **Hunan Communication Science and Technology**, 2003, 29(1): 87—89.
- [6] 王娴明. 建筑结构试验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] 金伟良, 宋志刚. 水平循环荷载作用下单桩动力特性的数值模拟[J]. 海洋工程, 2003, 21(1): 13—18.
JIN Wei-liang, SONG Zhi-gang. Numerical simulation of pile dynamic characteristics under lateral recycling load[J]. **The Ocean Engineering**, 2003, 21(1): 13—18.
- [6] 郭莹, 陈珍. 成样方法对饱和中砂静力三轴固结排水剪切试验结果的影响[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊 2): 306—311.
GUO Ying, CHEN Zhen. The influence of sample-preparing methods on experiment results of saturated medium sand in static tri-axial consolidation drained shear test[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2010, 43(Supp.2): 306—311.
- [7] 郭莹, 王跃新. 原状与重塑粉土固结不排水剪切特性的对比试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 68—75.
GUO Ying, WANG Yue-xin. Comparative test study on consolidation un-drained shear characters of undisturbed and remolding silt[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2011, 42(1): 68—75.
- [8] 郭莹. 复杂应力条件下饱和松砂的不排水动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

上接第 328 页