

文章编号: 1000-7598 (2010) 11-3430-05

X形混凝土桩抗拔特性试验研究

雍君¹, 陆晓敏¹, 刘汉龙^{2,3}

(1. 河海大学 工程力学系, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098;
3. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘要: 利用自行开发的大型土工试验模型槽, 进行了等截面X形桩和圆形桩抗拔性能对比试验研究, 比较了二者轴力、桩侧摩阻力及位移的分布和变化规律。X形桩相比圆截面桩侧表面积增加了31.5%, 试验结果表明, 二者桩侧摩阻力分布规律相同, 沿桩长可分为提高区域、衰退区域; 摩阻力发挥充分的区域在埋深1.50~3.00 m, 此区域中X形桩摩阻力的最小值和峰值都较圆形桩大, 相同的桩头位移下X形桩的侧摩阻远大于圆形桩, 其极限抗拔力高出圆形桩约16.7%。

关键词: X形混凝土桩; 模型试验; 抗拔试验; 桩侧摩阻力

中图分类号: TU 528

文献标识码: A

Model test study of anti-pulling property of X-shaped concrete pile

YONG Jun¹, LU Xiao-min¹, LIU Han-long^{2,3}

(1. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 21098, China)

Abstract: Comparative test study of anti-pulling property of X-shaped pile and circular section pile with constant section is carried out in the self-developed large-scale soil test model chamber. The distributions of axial forces, lateral frictions and displacement are analyzed. the lateral surface of The X-shaped pile is 31.5% greater than the circular section pile; but the distributions of lateral friction force along pile shaft are almost the same, which consist of two different zones, raising zone and decay zone. The friction force is fully exerted from 1.5 m to 3 m away the pile head, and the minimum value and peak value of X-shaped pile in the area are larger than circular section pile. Under the same settlements, the lateral friction force of X-shaped pile is greater than circular pile. The results show that the ability of X-shaped pile to resist uplift force is 16.7% higher than that of the circular pile.

Key words: X-shaped concrete pile; model test; anti-pulling test; pile lateral friction

1 引言

异形桩与传统桩相比能更好地发挥地基土和桩本身的潜在能力^[1]。现浇X形截面桩(简称X形桩)由河海大学岩土工程科学研究所自主研发的具有自主知识产权的地基处理专利技术^[2-3], 是在传统圆形桩基础上通过改变截面形状而增大承载力的一种新桩型^[4]。通过增加等截面异形桩侧表面积, 进而增加桩侧摩阻力、充分发挥桩身材料潜力的一项新技术, 其截面形状如图1所示。X形桩可以应用于大型水池、高耸建筑物等结构的地基加固处理。实际工程中, 由于受地下水的浮力、膨胀土等因素的影响和某些特殊结构的要求, 桩体必需具有较高的抗拔性能^[5-7]。X形桩具有较高的摩阻力, 但很难

在理论上定量地分析其抗拔性能的提高, 因此, 对其开展试验研究, 不仅能了解X形桩的工作机制和优点, 还可以为理论分析提供可靠的科学依据。

2 试验概况

2.1 试验目的

为得到X形桩受上拔力作用下竖向荷载传递规律以及桩顶位移荷载曲线, 综合评价X形桩的抗拔能力, 同时也进行了1根同桩长、同截面面积的圆桩同类试验, 以对比X形桩和圆桩的抗拔性能。

2.2 试验设备

试验在大型模型槽系统^[8]中进行, 模型槽尺寸(长×宽×高)为5 m×4 m×7 m, 加载系统由千斤顶, 传力钢架, 支撑钢架, 垫块等组成。千斤顶提供最

收稿日期: 2009-12-18

基金项目: 江苏省“333”高层次人才项目(No. B08003); 江苏省青蓝工程创新团队项目; 河海大学自然科学基金项目(No. 2009423711)资助。
第一作者简介: 雍君, 男, 1983年生, 硕士研究生, 主要从事桩基性能方面的研究。E-mail: 99468244@hhu.edu.cn

大荷载为 500 kN, 其最大行程为 150.00 mm。支撑钢架材料为 Q345 特种钢, 梁跨度为 4 000 mm, 梁高度为 600 mm。传力钢架由反力梁和传力杆组成。反力梁使用 2 根 25C 槽钢对焊而成, 传力杆使用 2 根 20B 槽钢。梁和杆之间采用焊接和螺栓双重连接, 如图 2 所示。



图 1 试验桩截面形状

Fig.1 The cross-section of the pile



图 2 反力梁和传力杆

Fig.2 Reaction beam and dowel bar

2.3 土料制备

设置土层 2 层, 上部为砂土, 厚 2.40 m, 土方量为 48 m³; 下部为黏土, 厚 3.90 m, 土方量为 78 m³。填筑时, 先在最下层铺设 300 mm 的碎石形成排水通道, 土层分布情况如图 3 所示。

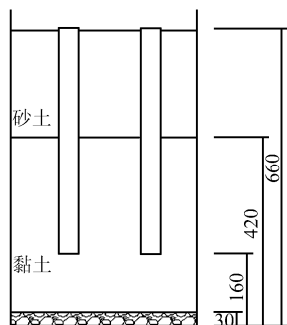


图 3 土层分布 (单位: mm)

Fig.3 Distribution of different soil layers(unit: mm)

填筑的土料通过控制干密度来控制, 填筑前先击实得到最大干密度和最优含水率, 然后测量现场土料的天然含水率, 并计算单位土料所需要添加的

水量, 分批分层进行填筑到设计高度。最后通过室内试验, 测量含水率和密度, 力学性质指标见表 1。

表 1 土的力学性质参数

Table 1 Mechanical parameters of soils

类型	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	含水率 $W/\%$	天然密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$
砂土	17.6	25.9	5.10	1.40
黏土	27.6	21.2	16.70	1.90

2.4 模型桩的制作

从模型槽底部回填土至设计高度, 在此水平面上架设模板, 投钢筋笼, 浇筑混凝土。成桩后拆除模板, 继续回填。模型桩采用 C25 混凝土制作, 桩长 5 m。外包方形边长 530 mm, 开弧间距为 110 mm, 开弧角度为 90°, 选用直径为 426 mm 的圆截面桩进行对比, 具体尺寸见图 4 和见表 2。桩内钢筋笼主筋采用 4 根直径为 12 mm 的 HRB335 钢筋, 箍筋直径为 6.5 mm, 间距为 300 mm。在混凝土达到强度后, 通过小应变检验了桩体内部的质量, 检测结果良好。

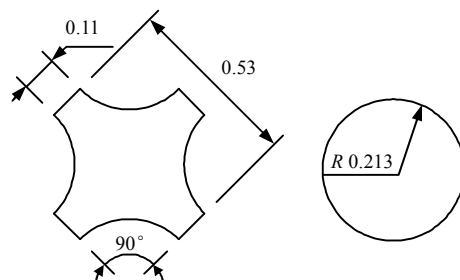


图 4 试验桩截面尺寸 (单位: m)

Fig.4 The size of the pile's cross-section under the test (unit: m)

2.5 仪器的埋设

钢筋应力计采用 GJJ-1010 形振弦式测力计, 规格为 $\phi 12 \text{ mm}$ 。应力计埋设 2 排, 每排 9 根, 顶端离桩顶 280 mm, 底端离桩底 280 mm, 其余均匀布置, 间距约为 560 mm。采用点焊焊接在钢筋笼上。通过埋设在桩身内的钢筋应力计得出各级荷载下桩身轴力的变化。

3 模型试验设计

3.1 试验装置设计

试验加载设备如图 5 所示。加载设备放置在支撑钢架上, 支撑钢架与模形槽基础永久连接, 其在满载 2 400 kN 情况下的设计挠度为 4 mm, 本次试验最大加载未超过 100 kN, 不考虑支撑钢架的挠

度。支撑钢架上部为千斤顶,千斤顶上放置反力计,反力计上面放置 1 个直径为 281 mm、厚 30 mm 的铸铁砧码,反力梁搁置在砧码上。传力杆与反力梁的两端连接。形成一个以砧码为支点的扁担梁。传力杆下部用同上部反力梁的构件焊接,作为焊接平台,焊接平台与桩中受力钢筋用 4 组钢筋连接,由于设置了焊接平台,从而有足够的空间,使得焊接平台、连接钢筋、桩中受力钢筋处在同一个铅直的线上,保证桩中 4 根受力钢筋均匀受力,尽量减小桩中受力钢筋受到的水平向外力。整个传力钢架为一个长的回字形。经验算有足够的强度和刚度,能满足试验要求。百分表架在桩顶与支撑钢架之间的角钢上面,角钢直接与支撑钢架进行连接。

表 2 试验桩截面参数

Table 2 Section parameters of test piles

参数	X 形桩	圆截面桩
横截面积/ m^2	140 000	140 000
截面周长/mm	1 760	1 340
外包方形边长/mm	530	
开弧间距/mm	110	
开弧角度/ $^\circ$	90	
半径/mm		210

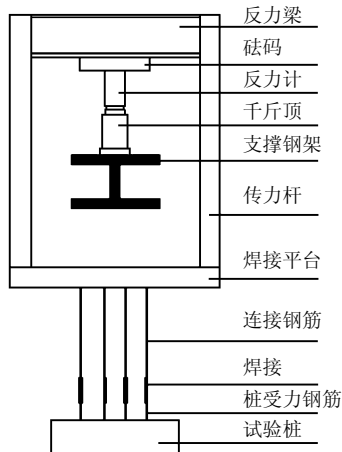


图 5 试验加载设备示意图

Fig.5 Sketch of test loading equipment

3.2 荷载设计

初始施加荷载为 25.6 kN,以平衡桩体和传力钢架的自重。然后,以 5.0 kN 为荷载增量逐级加载。预计加载 10 级。根据规范规定^[9]终止加载条件为:桩顶荷载为桩受拉钢筋总极限承载力的 0.9 倍时;某级荷载作用下桩顶变形量为前一级荷载作用下的 5 倍,累计上拔量超过 100 mm。考虑到实际试验中可能发生的情况,将荷载无法稳定维持设为停止加载的条件。

3.3 试验情况

试验通过千斤顶加载,向上推动反力计和反力梁,使整个传力钢架向上移动,通过连接钢筋将向上的力传到桩中的受力钢筋,使桩受上拔力的作用。抗拔桩试验中,X 形桩因在荷载为 85.6 kN 时桩端累计上拔量超过 100 mm 停止加载。圆形桩最终因在 75.6 kN 时荷载无法稳定维持停止加载。

4 试验结果分析

本次试验所加荷载大小是通过反力计频率读数计算得出,桩体沉降值是架设在桩头的百分表读数的平均值。

4.1 抗拔极限荷载

桩抗拔破坏主要有 3 种形式^[10]:①桩身被拉坏;②桩土接触面破坏;③桩周土破坏。本次试验验算了配筋,避免了桩身被拉坏,试验后的小应变检测证明桩身没有破坏。图 6 为试验桩的荷载-位移曲线,X 形截面桩为陡降形破坏。圆形桩的曲线用双折线函数模拟^[11]得出,如图 7 所示,可见 X 形桩的抗拔极限承载能力为 70.0 kN (图中 70.6 kN 包含了传力系统自重),圆形桩的极限抗拔承载能力为 56.1 kN。抗拔桩的承载能力主要是由桩侧的摩阻力提供,X 形桩的周长比试验用 426 圆形桩周长约高出 31.5%,而 X 形截面桩的极限抗拔能力比圆形桩高约 16.7%,摩阻力的提高幅度小于接触面面积的扩大幅度。

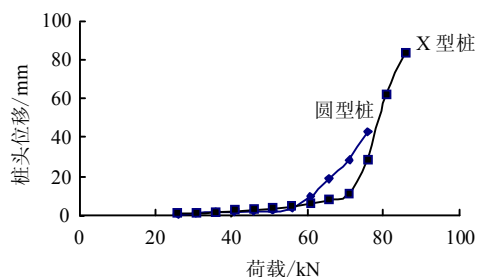


图 6 荷载-桩头位移曲线

Fig.6 Load vs. the displacement curves line of the pile head

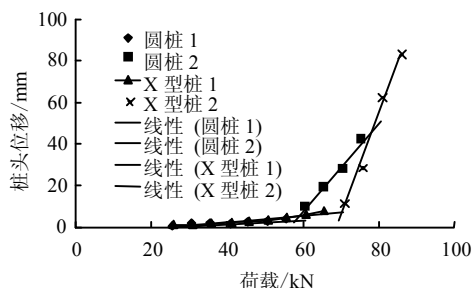


图 7 荷载-桩头位移趋势线

Fig.7 Load vs. the trend line for the displacement of pile head

X 形截面桩在出现极限承载力前的桩头位移很小, 累计不到 10 mm, 但当极限承载力出现后桩头位移迅速扩大, 一级荷载下的位移接近 20 mm, 破坏很突然, 几乎没有征兆, 与其破坏形式有关。而圆形桩在极限承载力出现后, 位移也迅速扩大, 但速度没有 X 形桩的快, 可能与单位桩长的侧摩阻力小于 X 形桩, 桩侧摩阻力退出工作的绝对量较小有关。

4.2 桩身轴力

通过埋设在桩中的钢筋应力计读数计算出钢筋的应变, 根据变形协调原理得出桩身的应变, 从而计算出桩身轴力。图 8 为相同的条件下 X 形桩和圆形桩桩身轴力的变化, 荷载的传递路径。由图可见, 桩身的轴力通过桩土接触面, 扩散到土中, 轴力在逐级减小。二者轴力变化规律基本一致, 符合一般规律。X 形桩所承受轴力大于圆形桩主要是由于抗拔桩的工作机制决定。桩受上拔力作用后, 桩身钢筋受拉, 通过钢筋将拉力向下传递, 钢筋混凝土共同受力变形, 桩身与桩侧土产生相对运动的趋势, 桩侧摩阻力开始工作阻止相对运动的趋势产生。随着相对运动的趋势加大直至相对位移的产生, 桩侧的摩阻力也在增加。当上拔力增大到一定程度时, 土受剪破坏, 无法继续提供足够的侧摩阻力, 桩土结构被破坏。

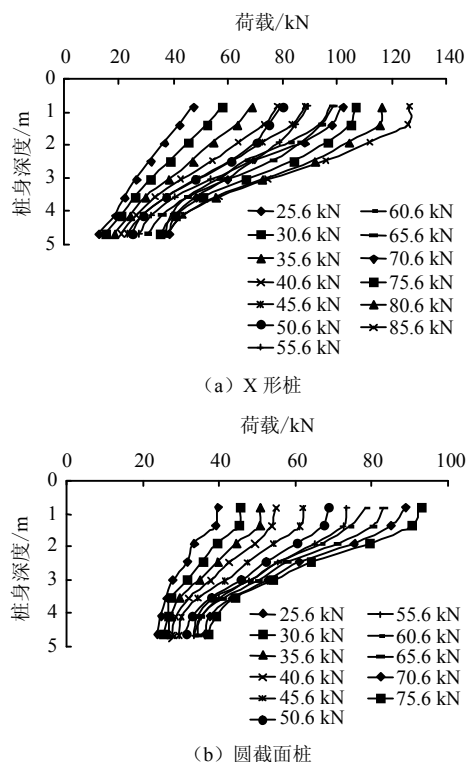


图 8 桩身轴力沿桩身随荷载的变化曲线
Fig.8 Curves for the axial force along the pile body varying with the change in load

4.3 桩侧摩阻力

桩侧摩阻力由相邻两截面的轴力相减可得

$$p_{i+1/2} = N_i - N_{i+1} \quad (1)$$

式中: $p_{i+1/2}$ 为第 i 个断面与第 $i+1$ 个断面之间的桩身侧摩阻力; N_i 为第 i 个断面的桩身轴力; N_{i+1} 为第 $i+1$ 个断面的桩身轴力。

图 9 为 X 形桩侧摩阻力变化曲线, 由式 (1) 计算结果绘制, 反映了不同荷载作用下 X 形桩和圆形桩各个截面受到的侧摩阻力。由图 9 可见, 整个桩侧摩阻力沿桩身的变化是一个先渐渐增大再逐渐减小的过程^[12], 在 1.5~3.5 m 处峰值的大小影响整个桩侧摩阻力的大小, X 形桩在该平台的最小值和峰值均大于圆形桩, 试验中 X 形桩所受侧摩阻力较圆形桩大约 15%~20%, 与极限抗拔能力得出的结果基本上一致。X 形桩的侧摩阻力峰值出现在埋深 2.5~3.0 m 处, 而圆形桩出现在埋深 2.5 m 处, 处在桩身中段, 侧摩阻力效果发挥最充份。当侧摩阻力进入衰退区域时, 摩阻力下降速度非常快, 超过初期的摩阻力提高区域的变化速度。

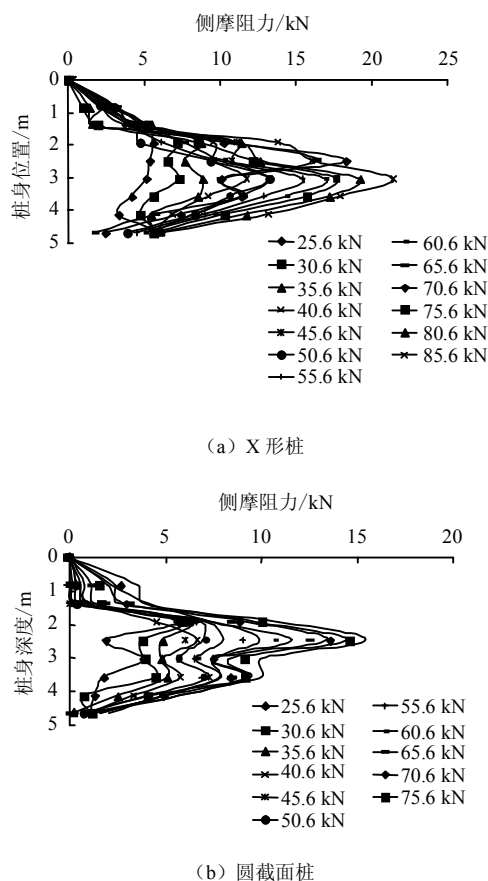


图 9 截面桩侧摩阻力变化曲线
Fig.9 Curves for the lateral friction force of pile

图 10 为桩身总侧摩阻力-桩顶位移的关系。由图可见, 桩身总侧摩阻力是对桩身各监测点摩擦力求和, 随着桩头位移的增加, 桩侧摩阻力迅速提高, 位移继续扩大时, 侧摩阻力增速开始放缓, 最终的趋势是位移继续扩大但侧摩阻力增长缓慢, 趋于停止增长。侧摩阻力在桩头位移在 5 mm 以内增速最快, 在其后的区域内放缓。X 形桩侧摩阻力迅速增加的区间明显大于圆形桩, 且在相同的桩头位移情况下 X 形桩的侧摩阻力远大于圆形桩。

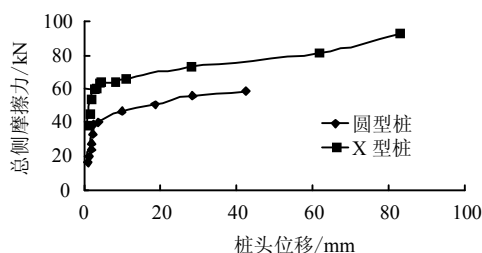


图 10 桩身总侧摩阻力-桩顶位移曲线

Fig.10 Curves of total lateral friction force around the pile vs. displacement of the pile head

5 结 论

(1) X形桩的极限抗拔能力比同截面面积的圆形桩提高约16.7%。桩土接触面面积与摩阻力提高不同步, 摩擦力的提高幅度小于接触面面积的扩大幅度。

(2) X形桩和圆形桩轴力的分布及变化规律基本一致, 从上部向下传递, 并逐级减小。X形桩的最大轴力和各级轴力均大于圆形桩, 说明桩侧摩阻力大于圆桩。

(3) X形桩桩侧摩阻力的分布与圆桩基本一致, 沿桩身分为提高区域、衰退区域。在摩阻力发挥最充分的区域, X形桩的侧摩阻力明显高于与其对比的圆桩。在衰退区域, 侧摩阻力减小的速度非常快, 远快于侧摩阻力在提高区域的增加速度。

(4) 定性地分析了总侧摩阻力和桩头位移的关系, 桩头位移5 mm内的侧摩阻力迅速提高, 随着位移的增大, 侧摩阻力的增速放缓。整个试验中X形桩在相同位移情况下总侧摩阻力大于圆桩。

参 考 文 献

[1] 林天健. 现代异形桩及其力学特点的理论评述[J]. 力学与实践, 1998, 20(5): 7—11.
LIN Tian-jian. Theoretical discussion on modern special form piles and their mechanical characteristics[J].

Mechanics and Engineering, 1998, 20(5): 7—11.

- [2] 刘汉龙. 现浇 X 形钢筋混凝土桩施工方法: 中国, 2007100203063[P]. 2007-02-12.
- [3] 刘汉龙. 现浇 X 形桩沉模装置[P]. 中国专利: 200720036892.6, 2008-02-27.
- [4] 刘汉龙, 刘芝平, 王新泉. 现浇 X 形混凝土桩截面几何特性的分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 17—23
LIU Han-long, LIU Zhi-ping, WANG Xin-quan. Analysis on section geometry character of X style vibro-pile[J] *China Railway Science*, 2009, 30(1): 17—23
- [5] 刘祖德. 抗拔桩基础[M]//刘金励. 桩基工程技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1996: 642—674.
- [6] MEYERHOF G G, ADAMS J I. The ultimate uplift capacity of foundations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1968, 5(4): 225—244.
- [7] KIM N K. Performance of Tension and compression anchors in weathered soil[J]. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2003, 12: 1138—1150
- [8] 刘汉龙, 谭慧明, 彭劼, 等. 大形桩基模型试验系统的开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 452—457
LIU Han-long, TAN Hui-ming, PENG Jie, et al. Development of large scale pile foundation model test system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(3): 452—457.
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [10] 何思明. 抗拔桩破坏特性及承载力研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 308—310.
HE Si-ming. Study on bearing capacity and failure of uplift pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(3): 308—310.
- [11] EMILIOS M. COMODROMOS CHRISTOS T. ANAGNOSTOPOULOS, MICHAEL K. GEORGIADIS Numerical assessment of axial pile group response based on load test[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, 30: 505—515.
- [12] 许宏发, 罗国煜, 廖铁平. 等截面桩的抗拔机理研究[J]. 工程勘察, 2003, 30(3): 4—6, 34.
XU Hong-fa, LUO Guo-yu, LIAO Tie-ping. Study on uplift mechanism of uniform section piles[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2003, 30(3): 4—6, 34.