

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.017

现浇 X 形混凝土桩模型试验

刘芝平^{1 2} 陈育民^{1 3}

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

摘要 : 为了对 X 形混凝土桩荷载传递机理有更深入的认识 , 以自行研发的大型土工试验模型槽为
依托 , 进行了 X 形混凝土桩、同外包直径圆形桩的静载荷对比试验 . 利用埋设在 X 形混凝土桩中的
监测仪器对桩身轴力、桩端阻力以及桩体沉降等进行了直接量测 , 分析比较了在桩顶竖向荷载作用
下 X 形混凝土桩与同外包直径圆形桩的荷载-沉降曲线、侧阻力及端阻力的发挥、桩身侧阻力的分
布等 . 试验结果表明 : X 形混凝土桩中出现了类似于 H 形桩的“半封闭土塞”及 X 形混凝土桩的桩
端阻力承载力系数小于圆形桩的情况 , 体现了 X 形混凝土桩截面形状的影响 .

关键词 : X 形混凝土桩 ; 试验分析 ; 侧阻力 ; 端阻力

中图分类号 : TU472 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2009)02-0206-05

现浇 X 形混凝土桩是河海大学岩土工程科学研究所研制的一种新型异型桩^[1] , 其采用 X 形的钢模代替
传统的沉管灌注桩圆形钢模 , 从而形成一种 X 形的现浇混凝土桩 . X 形混凝土桩具有较大的单位体积材料比
表面积 , 可达到节省材料、提高单方混凝土承载力的目的 . 但作为一种新桩型 , X 形混凝土桩的承载机理及计
算方法的研究尚少 . 本文通过大型土工试验模型槽系统 , 对 X 形混凝土桩的承载性能进行了研究 , 并与常规
圆形桩进行了对比分析 .

1 试验方案

为了分析 X 形混凝土桩几何形状特点对承载性能的影响 , 试验共设计了 4 根单桩竖向承载力试验 , 其中
包括 2 根 X 形混凝土桩(标记为 X1 和 X2) 2 根圆形桩(标记为 C1 和 C2) . 4 根桩的桩长均为 3 m , 其中 X1 , X2
和 C1 这 3 根桩的外包圆半径均为 0.150 m . X1 的开弧间距取为 0.4 倍外包圆半径 , 即 0.06 m , 开弧深度选为
0.025 m , 从而使得 X1 的桩截面周长与 C1 的相同 . C2 的半径选为 0.124 m , 使得其桩截面面积与 X1 相同 . X2
的开弧间距与 X1 的相同 , 但开弧深度较深 , 选为 0.05 m . 4 根桩截面形状见图 1 , 周长及面积见表 1 .

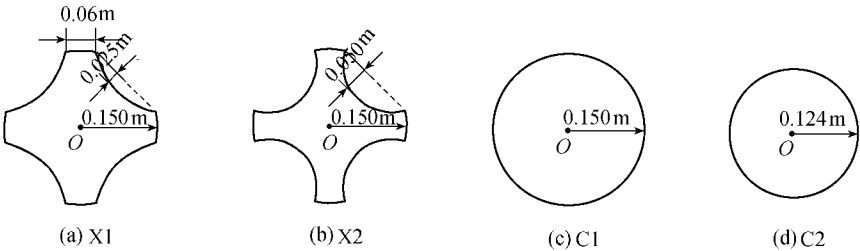


图 1 试验桩截面示意图

Fig. 1 Sections of test piles

2 试验设备

加压系统包括加压设备和加压控制系统 , 即油泵总成、多路稳压器、终端压力输出千斤顶和压力输出控
制面板 . 试验中采用千斤顶对桩顶施加轴向荷载 , 为了对 X 形混凝土桩均匀加载 , 在桩顶设置与桩截面相同

收稿日期 : 2008-04-03
作者简介 : 刘芝平(1959 —) , 女 , 江苏南京人 , 高级工程师 , 主要从事土木工程专业管理研究 .

的钢板。

监测系统包括监测元件和数据采集系统,其中监测元件包括百分表、压力盒和应变仪。百分表布置在桩顶,以测量桩顶沉降。桩端布置沉降板并引出土体,以测量桩端沉降。桩身应变分布由智能选点应变仪测量,从而可推求桩身轴力及侧阻力的分布。桩侧土压力由振弦传感式读数仪采集。

试验中采用的土工试验模型槽为河海大学“十五”和“211工程”的建设子项目“新型软基处理桩基模型试验系统”的模型槽。槽长5 m,宽4 m,高7 m,由钢筋混凝土浇筑而成。土工试验模型槽的一面位于河海大学岩土工程科学研究所旁边一天然土坡坡脚侧,将天然坡面稍加处理后作为本次试验的通道^[2]。

3 模型制作

3.1 试验用土

试验所用土样为风干石英砂。砂土样的基本物理力学性质如下:不均匀系数1.68,曲率系数0.92,最大和最小干密度分别为1.68 g/cm³和1.38 g/cm³。

图2为直剪试验得到的试验土样密实度与内摩擦角之间的关系曲线,反映了摩擦角随着密实度的增加而增加。

3.2 试验桩制作

试验桩采用钢筋混凝土浇筑,桩身混凝土强度等级为C20,水泥强度等级为42.5R。试验桩在土工试验模型槽外现场采用PVC管浇筑,用卡环固定土工试验模型槽壁以保证PVC管稳定。为了防止混凝土与PVC管之间黏结紧密造成脱模困难,在PVC管表面裹上一层泡沫塑料保护层并且压密,使其具有一定的强度,这不影响浇筑质量。另取混凝土进行室内试验,确定其弹性模量为18.2 GPa,泊松比为0.2,密度为2.4 g/cm³。试验桩成型之后,在桩侧贴应变片,并涂环氧树脂保护。试验时将桩吊装到土工试验模型槽内,按分层填筑的方法堆砂。该方法对桩周土没有挤土效应,桩的特性应类似于钻孔桩。第一个应变片布置在桩顶处,应变片竖直间隔为300 mm,桩周边对称布置2列,共20个。

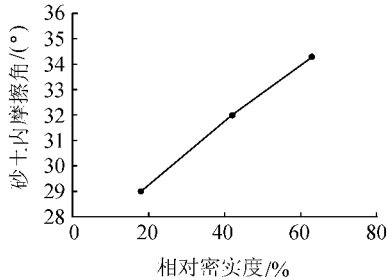


图2 试验土样的内摩擦角与相对密实度的关系

Fig. 2 Relationship between friction angle and relative density of test sand samples

4 试验结果及分析

按照试验桩制作方法准备就绪后,就可进行土工试验模型槽内的单桩静载荷试验。加载前首先对各仪器进行标定,采集初始读数,将百分表和应变仪读数归零。单桩静荷载试验的具体过程参考相关规定^[3-6]执行。每级荷载施加中需测量各仪器读数,供后续分析时采用。试验要求加载到各试验桩破坏为止,其控制标准是:若某级荷载作用下,桩的沉降量为前一级荷载作用下沉降量的5倍,加载终止;若荷载沉降曲线无明显破坏点,当沉降量达到0.1倍桩径时(即30 mm)时,加载终止。

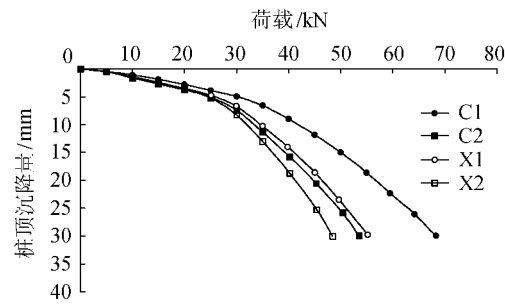


图3 各试验桩荷载沉降曲线

Fig. 3 Load-settlement curves of test piles

4.1 荷载沉降曲线

图3为4根桩的荷载沉降曲线。由图3可以看到,4根桩的荷载沉降曲线显示出相似的特性:在加载的初期,荷载沉降曲线的形状主要受桩侧阻力发挥的控制,桩外侧阻力随着桩顶荷载的增加而线性增长,荷载沉降曲线近似为直线。虽然4根桩桩周长的差别在10%~18%之间,但是由于试验中桩侧阻力占总承载力的比例相对较小,4根桩的曲线相对集中。另外,荷载沉降曲线的起始直线段范围相对较小,这是因为试验中桩身刚度较大,桩顶沉降与桩端位移基本相同,此时桩端土体受到一定的压缩,桩端阻力也承担了一部分荷载。由于C1的桩端面积最大,在

相同的荷载作用下,沉降最小,因而其荷载沉降曲线与其他 3 根桩逐渐分离.随着荷载的增加,桩外侧土体和桩之间开始滑移,桩侧阻力逐渐发挥后,新增荷载主要传向桩端,由桩端阻力承担,荷载沉降曲线开始弯曲,但未出现明显的拐点,这是因为试验中桩承载力以桩端阻力为主.

目前有很多解释荷载沉降曲线的方法,然而各方法对荷载沉降曲线上破坏荷载点或极限承载力点的定义有所不同^[7].考虑到在土木工程设计中通常要求结构变形特征值必须小于某一限定值,对于桩基而言,变形的特征值常可用 S/B 来表示,其中 S 是沉降量, B 是桩的宽度或直径.本文按 $S/B = 0.1$ 确定的 C1、C2、X1 和 X2 的承载力分别为 68.2 kN、52.7 kN、55.2 kN 和 48.5 kN.

图 4 分别为桩端阻力和桩侧阻力随桩顶沉降的发挥过程,其中桩端阻力发挥曲线由应变片结果推求而得,桩侧阻力发挥曲线由总荷载沉降曲线减去桩端阻力发挥曲线而得.由图 3 和图 4 可以看出,桩侧阻力在桩顶沉降量为 5~10 mm 时已经完全发挥,此时, C1、C2、X1 和 X2 的桩侧总阻力分别为 18.5 kN、15.5 kN、20.1 kN 和 21.6 kN,分别占总荷载的 27%、29%、36% 和 44%.显然 X 形混凝土桩侧阻力所占的比例要大一些.而桩端总阻力曲线呈现持续上升的趋势,但在曲线的后段上升斜率有所减小.

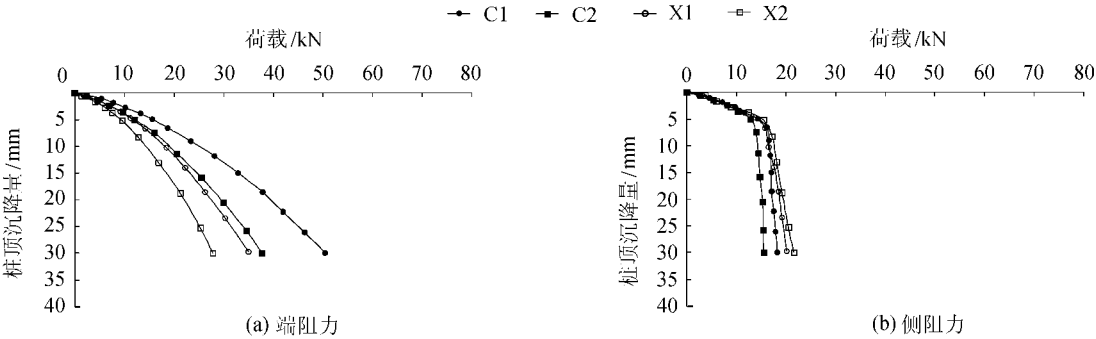


图 4 各试验桩阻力发挥曲线

Fig. 4 Load-settlement curves of test piles under mobilization of resistance

注意到 C1 和 X1 周长相同,即桩侧阻力作用的面积相同,但 X1 桩侧阻力要大一些,这是否是由于 X 形混凝土桩几何截面的特点,现有的试验数据还不足以分析.基于已有的数据,C1 和 X1 两者承载力之间的差异应主要为桩端阻力的差异.而桩端阻力为桩端阻力分量乘以桩端面积,除了桩端面积的差异之外,可能还包含 X 形桩与圆形桩分布荷载作用下桩端阻力分量的区别.类似地,虽然 C2 和 X1 的桩端面积相同,但两者承载力之差除了桩侧总阻力带来的差别之外,还包含桩端阻力引起的差异.对比图 4(a)中桩端阻力的发挥曲线,在 $S/B = 0.1$ 时 C2 端阻力要大于 X2,但由图 3 可以看出 $S/B = 0.1$ 时 X1 比 C2 的承载力要大一些.虽然试验中桩侧阻力占总承载力的比例较小,承载力提高的幅度不是很大,但可以预见,X 形混凝土桩的这一优势将随着桩侧阻力所占总荷载比例的增加而增加.另外,注意到 X2 的桩端面积虽然只有 C1 的 51%,但其承载力达到了 C1 的 71%;X2 的桩端面积约为 C2 的 75%,但其承载力达到了 C2 的 92%,这些从侧面反映了 X 形混凝土桩的优势.

4.2 桩身轴力及侧阻力

图 5 分别给出了 4 根桩在加载的不同时刻桩身轴力沿桩身深度的分布,图中 p 为压力, p_u 为极限承载力.某一深度轴力是根据该深度 2 个应变片测试结果平均而得.

正如预料的那样,X 形混凝土桩桩身轴力分布和圆形桩都呈现出桩顶轴力最大,桩端轴力最小的特点.桩身轴力分布曲线的斜率则代表了桩侧阻力的发挥.按照各桩轴力分布推求的桩侧阻力分布曲线见图 6.

由图 6 可以看到 4 根桩共有的特点.注意到摩阻力是由轴力的量测结果推求而得,具体数值精度可能略低一点.但是 X 形混凝土桩与圆形桩侧阻力分布的异同还是可以很清楚地区分.如在桩顶荷载较小的情况下,桩身侧阻力呈线性分布,这是因为桩身刚度较大,桩体本身的压缩变形很小,桩土间的相对位移相对均匀,而桩侧土压力随深度基本线性增加,因而桩侧阻力也基本上呈线性分布.随着荷载的增加,桩身深度较深的地方侧阻力增加的幅度较大.当桩顶荷载为 30 kN 之后,由图 3 可以看出,各桩的桩顶沉降在 5~10 mm 之间,从图 4(b)可以认为此时桩侧阻力已经基本发挥.这说明了图 6 中为什么在荷载大于 30 kN 之后桩侧阻力的分布集中在一个狭小的区域之内.在荷载较高的情况下,各桩上部侧阻力都出现了不同程度的凸起,这可

能是由于这部分的土体受到径向挤压,压力较大的缘故.

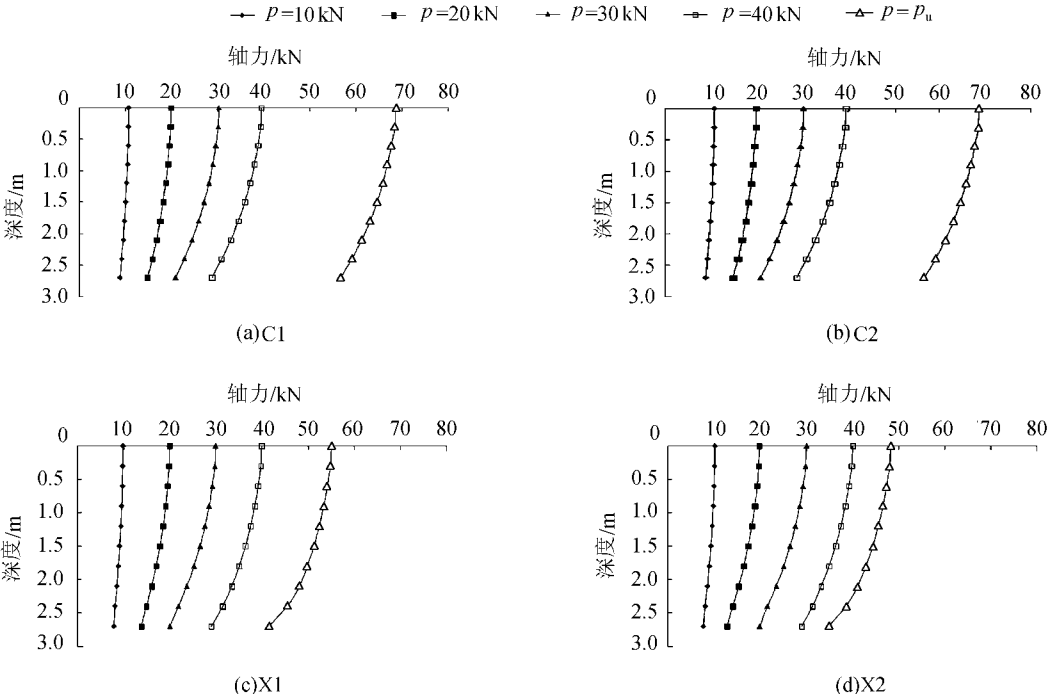


图 5 轴力沿桩身的分布

Fig. 5 Distribution of axial forces along pile depth

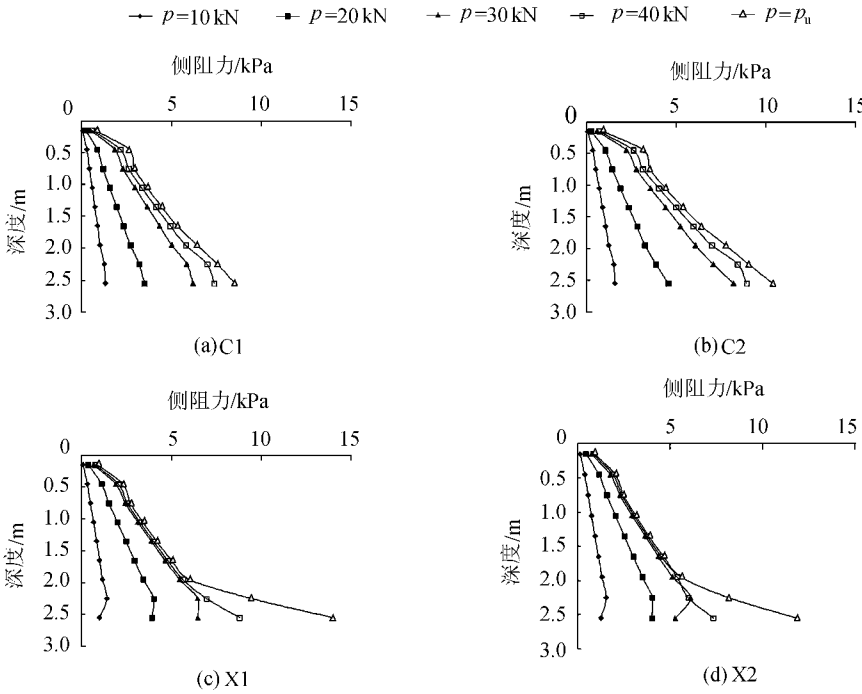


图 6 侧阻力沿桩身的分布

Fig. 6 Distribution of skin friction along pile depth

另外值得注意的是,对于 X 形混凝土桩(X1 和 X2),桩端附近的侧阻力有一个突然的增加,且从数值上来看要高于圆形桩,这可部分解释为土塞效应的影响.费康等^[8-9]在研究管桩的土芯特性和管桩内摩阻力时曾指出,管桩内的土芯常会出现“闭塞”,即土塞效应,具体表现为土芯底部的内摩阻力在端部局部增大,其分布图形为喇叭形,但内摩阻力的发挥需要的位移较大,往往和桩端阻力发挥所需要的位移水平相当.这些土塞效应的特点和 X 形混凝土桩的特性似乎有相似之处.实际上,由于 X 形混凝土桩是将圆形截面对称地挖除 4 块区域(图 1),那么这些被挖除部分的土体的承载特性与桩外周的土体是不同的,而是有点类似于 H 形

桩中半封闭的土塞。

5 结 论

a. 4 根桩的荷载沉降曲线显示出相似的特性,桩截面尺寸最大的桩(C1)在相同的荷载作用下沉降最小。按 $S/B=0.1$ 确定的 C1、C2、X1 和 X2 的承载力分别为 68.2 kN、52.7 kN、55.2 kN 和 48.5 kN。由于 X 形混凝土桩的周长比相同材料用量的圆形桩周长大,因此承载力较高。

b. 在侧阻力作用下,当面积相同时,X 形混凝土桩侧阻力比圆形桩要大,而 X 形混凝土桩端阻力比圆形桩要小,体现了 X 形混凝土桩截面形状的影响。X 形混凝土桩中出现了类似于 H 形桩的“半封闭土塞”,桩端附近的侧阻力有较明显的增加,且高于圆形桩相同位置的侧阻力。

c. X 形混凝土桩桩身轴力分布和圆形桩区别不大,都呈现出桩顶轴力最大、桩端轴力最小的特点。在荷载较高的情况下,各桩上部侧阻力都出现了不同程度的凸起,这可能是由于这部分的土体受到径向挤压,压力较大的缘故。

参考文献:

- [1] 刘汉龙. 现浇 X 形钢筋混凝土桩施工方法: 中国 2007100203[P]. 2007-02-17.
- [2] 谭慧明. PCC 桩复合地基褥垫层特性足尺模型试验研究及分析[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [3] JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S].
- [4] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[K]. 北京: 中国建工业出版社, 1995.
- [5] 刘金砺. 桩基础设计施工与检测[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.
- [6] 杨克己. 实用桩基工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [7] HORVITZ G E, STETTLER D R, CROWSER J C. Comparison of predicted and observed pile capacity[C]//Proceedings of a Session Sponsored by the Geotechnical Engineering Division at the ASCE National Convention. Reston: ASCE Publications, 1981: 413-433.
- [8] 费康. 现浇混凝土薄壁管桩的理论与实践[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [9] 刘汉龙, 费康, 周云东, 等. 现浇混凝土薄壁管桩内摩阻力的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 211-216.

Model tests of behaviors of X-shaped cast-in-place piles

LIU Zhi-ping^{1,2}, CHEN Yu-min^{1,3}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 21098, China;

3. Research Academy of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to deeply understand the load transfer mechanism of X-shaped concrete piles under vertical loads, static load tests of X-shaped concrete piles and circular piles were performed in the test room developed for large-scale tests. The axial force, end resistance and settlement of the X-shaped concrete piles were directly measured with the pre-arranged instruments. The load-settlement curves, the development of skin friction and end resistance as well as the distribution of shaft resistance along the pile depth were compared. The test results show that the X-shaped concrete piles exhibit a similar partial soil plug to the H-shaped piles, and the bearing capacity factor of end resistance of the X-shaped concrete piles is smaller than that of the circular piles, indicating the effect of the X-shaped section.

Key words: X-shaped cast-in-place pile; test analysis; skin friction; end resistance