

现浇 X 形混凝土桩与圆形桩承载性状对比试验研究

张敏霞^{1,2}, 刘汉龙^{1,3}, 丁选明^{1,3}, 王智强^{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. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000;
3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过现浇 X 形混凝土桩与等截面圆形桩、等周长圆形桩足尺模型静载试验, 对比分析了试验各桩桩身轴力分布、桩侧摩阻力以及桩端阻力的发展情况, 并对 X 形桩的荷载传递机理进行了深入研究。试验结果表明: 对于本次研究对象的 X 形桩, 与等截面圆形桩相比: 其极限承载力及桩身单位体积混凝土极限承载力均为等截面圆形桩的 1.32 倍, 与等周长圆形桩相比: 其极限承载力及桩身单位体积混凝土极限承载力分别为等周长圆形桩的 0.84 倍与 1.47 倍。从提高桩基承载力, 节约桩身混凝土用量角度来看, X 形桩是一种具有较高的竖向承载力且造价低的新型桩, 因此该桩在软土地基中有广泛的推广和应用价值。

关键词: 现浇 X 形混凝土桩; 静载荷试验; 荷载传递机理; 极限承载力

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)09-1469-08

作者简介: 张敏霞(1979-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事地基处理与土动力学方面的教学与科研工作。E-mail: zhangminxia@126.com。

Comparative tests on bearing capacity of cast-in-situ X-shaped concrete piles and circular pile

ZHANG Min-xia^{1,2}, LIU Han-long^{1,3}, DING Xuan-ming^{1,3}, WANG Zhi-qiang^{1,3}

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

2. College of Civil Engineering of Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through the full scale static load model tests on the cast-in-situ X-shaped concrete piles and circular piles with the same cross-section area and circular piles with the same perimeter, the distribution of pile axial force and the development of pile shaft resistance and pile toe resistance are comparatively analyzed, and the load transfer mechanism of the X-shaped piles is studied. The test results show that: for the X-shaped piles, the ultimate bearing capacity and the bearing capacity per unit volume of pile concrete are both 1.32 times those of the circular pile in the same area, and 0.84 times and 1.47 times respectively those of the circular piles with the same perimeter. From the view of improving the bearing capacity of the pile and saving the amount of pile concrete, the X-shaped pile is a new pile with is high vertical bearing capacity and low cost, therefore it has the extremely high promotion and application value in soft soil foundation.

Key words: cast-in-situ X-shaped concrete pile; static load test; load transfer mechanism; ultimate bearing capacity

0 引言

近年来国内外学者一直致力于提高单桩承载力的研究, 目前提高单桩承载力的途径主要可分为两大类: 一是增加桩端阻力, 如: 扩底桩^[1-2]、桩底注浆^[3-4]、哑铃桩^[5]等; 二是提高桩侧摩阻力的如: 楔形桩^[6-7]、桩侧注浆^[8-9]、DX 桩^[10-11]、Y 形桩^[12-13], 与增加桩端阻力的研发相比, 增加桩侧摩阻力措施的研发思路发展相对缓慢。现浇 X 形混凝土桩(简称 X 形桩)根据等桩截面异形周边扩大原理, 派生于传统的圆形灌

注桩, 是在传统圆形灌注桩的基础上加以改进发展而成的一种新桩型。现浇 X 形混凝土桩技术是河海大学自主研发开发的一项专利技术^[14]。该技术振动打桩机振动头下部连接盖板, 盖板连接 X 形钢制套管, X 形钢制套管中间是空腔, X 形钢制套管下端连接预制 X

基金项目: 江苏省自然科学基金创新学者攀登项目(BK2008040); 江苏省青蓝工程创新团队项目; 教育部博士点基金项目(2010516211); 河海大学中央高校基本科研业务费与专项资金项目(2010B29914)
收稿日期: 2010-06-29

形钢筋混凝土桩靴，启动振动头向下带动X形钢制套管向下，在预制X形桩靴的保护下打入地基中，混凝土向X形钢制套管空腔内注入，振动头振动将X形钢制套管向上拔出地面，X形钢筋混凝土桩靴留在地基中，形成现浇X形钢筋混凝土桩。由于具有较大的周长面积比，因而可以在不增加桩身混凝土用量的前提下大大提高单桩承载力，从而提高性价比。目前该技术已经在江苏高速公路和市政工程软基处理中推广应用。

X形桩保持了传统灌注桩的优点，充分利用等截面非圆形桩侧表面积与惯性矩增加，进而增加桩侧摩阻力与水平承载性能。现有的试验研究表明：X形桩与传统的同截面面积圆形灌注桩相比，其竖向极限承载力与水平极限承载力均有了较大幅度的提高^[15,16]。X形桩与其它地基加固方法相比具有自身的合理性、先进性及适用性，许多合适情况下的因地制宜采用，可以起到较好的经济效益和社会效益。但由于X形桩自身的特点，与圆形桩相比，X形桩桩身轴力和桩侧摩阻力分布的均匀性，X形桩的竖向承载性状及荷载传递机理与圆形桩的区别，X形桩极限端阻力及极限承载力及与圆形桩的区别等内容都需要进行深入研究。

本文在X形桩与等截面圆形桩、等周长圆形桩足尺模型对比试验基础之上，对X形桩的荷载沉降特性及荷载传递机理进行深入研究，同时对X形桩的经济性进行评价。

1 足尺模型试验

1.1 模型槽系统简介

本次试验采用河海大学大型桩基模型试验系统，该系统由试验场地（模型槽），加载系统以及监测系统组成。模型槽尺寸长×宽×高=5 m×4 m×7 m，可以开展长达 6.5 m 的桩基足尺寸模型试验，模型槽全景如图 1 所示，系统详情见文献[17]。



图 1 试验模型槽全景

Fig. 1 Full view of model test system

1.2 试验土体

试验桩周土体分为两层，上层 2.4 m 为砂土，所需土样体积约为 48 m³，填砂时控制一定的落砂高度，分层整平压实，以保证装填密度一致；下层为粉质黏土，厚 3.9 m，所需体积为 78 m³，土体近似为均质材料。填筑土体前进行了室内土工试验，具体参数见表 1，填筑过程按干密度控制。

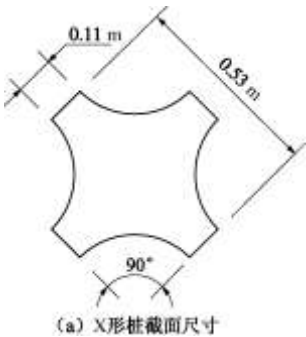
表 1 土的力学性质参数

Table 1 Mechanical parameters of soils

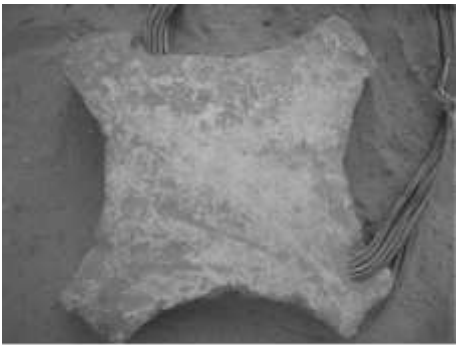
材料	黏聚力 <i>c</i> /kPa	摩擦角 <i>φ</i> /(°)	含水率 <i>w</i> /%	天然密度 <i>ρ</i> (g cm ⁻³)
砂土	17.6	25.9	5.1	1.5
黏土	27.6	21.2	16.7	1.9

1.3 试桩施工情况

试验模型桩共有 3 根，其中 X 形桩 1 根，与 X 形桩等截面圆形桩 1 根（编号为 C₁），等周长圆形桩 1 根（编号为 C₂），各桩具体参数如表 2 所示。各桩桩身混凝土强度等级均为 C25，桩长 5 m，主筋 4φ 12，箍筋 φ 6.5@300，由钢丝作为绑筋，主筋均匀布置，在模型槽内通过人工支模布筋浇筑混凝土而成，浇筑好的 X 形桩截面和形状如图 2 所示。浇桩 28 d 后进行低应变检测，桩身完好，静载试验结束后，开挖现场 X 形桩与圆形桩桩身均完好无损。



(a) X形桩截面尺寸



(b) 浇筑好的X形桩桩头

图 2 X 形桩截面形状

Fig. 2 Section of X-shaped pile

1.4 测试元件布置及测试情况

由于振弦式钢筋测力计具有抗干扰能力较强、受温度影响较小、零飘较小、性能相对稳定可靠、寿命较长等优点，适应在恶劣环境中长期、远距离观测。

因此桩身轴力采用振弦式钢筋测力计量测, 将振弦式钢筋测力计焊接于试桩主筋上, 运用频率仪量测钢筋测力计频率变化, 进而换算各截面桩身轴力, 推求桩侧摩阻力。

表 2 试桩桩身参数表

参数名称	试桩编号		
	X	C ₁	C ₂
横截面面积/m ²	0.1425	0.1425	0.2462
截面周长/m	1.7604	1.3401	1.7604
外包方形边长/m	0.5303	—	—
开弧间距/m	0.11	—	—
开弧角度/(°)	90	—	—
直径/m	—	0.426	0.560
桩长/m	5.0	5.0	5.0

注: 圆形桩 C₁ 与 X 形桩同截面面积, 圆形桩 C₂ 与 X 形桩同截面周长。

试验每根试桩设置 9 个量测断面, 钢筋测力计均匀布置, 每个断面对称布置 2 只, 第一测个点距桩顶 0.26 m, 最下一个测点距桩底 0.26 m, 其余均匀布置在中间, 间距为 0.56 m。试桩静荷载试验每级荷载(或卸载)作用下沉降稳定时进行钢筋应力量测。测试过程中除试桩 C₂ 中间两个测试断面各有一个钢筋测力计数据异常(异常数据已剔除)外, 其余钢筋测力计反应均正常。

桩端阻力采用振弦式土压力盒, 将振弦式土压力盒埋设于桩底, 运用频率仪量测土压力盒频率变化, 进而换算成桩端阻力。试验每根试桩底部埋设 1 只土压力盒, 整个测试过程中, 土压力盒均正常反应。

1.5 加载设计

试验加卸载、沉降观测、极限承载力判定等均按照《建筑地基基础设计规范(GB50007—2002)》^[18]及《建筑桩基技术规范 JGJ94—2008》^[19]中的相关内容执行。

2 试验结果对比分析

2.1 荷载沉降曲线对比分析

由图3试验各桩的荷载沉降曲线图上可知: X形桩与圆形桩C₂的荷载沉降曲线为缓变型, 而圆形桩C₁的荷载沉降曲线呈陡降型, 当荷载超过极限荷载后, 圆形桩C₁桩底土首先达到破坏, 发生大量塑性变形, 引起桩发生较大或较长时间仍不停止的沉降, 所以在Q-s曲线上出现了明显的拐点。根据图3及《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008)^[19]极限承载力的判断方法可知: X形桩的极限承载力为119 kN, 圆形桩C₁的极限承载力为90 kN, 圆形桩C₂的极限承载力140 kN。

从X形桩与相等截面圆形桩C₁静荷载对比试验可

看出: 如图3所示, 在第一级荷载15 kN作用下X形桩沉降大于圆形桩C₁的沉降, 原因为相同的桩身截面面积, X形桩具有较大的桩身侧表面积, 所以可加速桩侧阻力向下传递到桩端, 引起更大的桩身压缩变形。在第二级荷载30 kN作用下X形沉降明显小于圆形桩C₁, 其主要原因为相同侧阻力和相同端阻力的情况下, X形桩在地基内任意点产生的附加应力小于圆形桩。相同截面面积的X形桩与圆形桩实际桩侧摩阻力与桩端阻力的分担比例存在明显差别。

从X形桩与相同截面周长的圆形桩C₂静荷载对比试验可看出: X形桩与圆形桩C₂的荷载沉降曲线均为缓变型, 但在试验各级荷载作用下, X形桩的沉降均大于圆形桩的C₂沉降。其原因可能是由于X形桩凹弧处为反拱, 凹弧内半封闭土体存在一定程度的闭塞效应, 使得桩侧摩阻力的发挥不如同周长圆形桩充分^[20], 因此其桩顶沉降比圆形桩C₂大。

对于相同条件下X形桩与等截面圆形桩和等周长圆形桩的沉降差异均有待更深一步的研究。

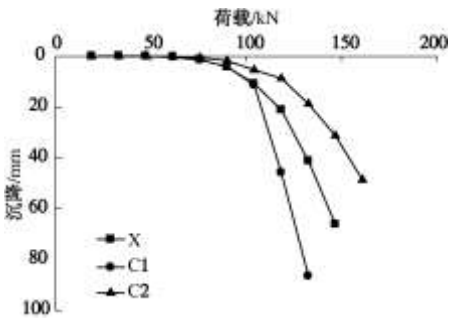


图 3 试桩荷载 - 沉降 (Q - S) 曲线

Fig. 3 Load-settlement (Q - S) curves of test piles

2.2 极限承载力对比分析

表3为X形桩与圆形桩C₁、C₂的极限承载力对比分析表, 具体分析情况如下。

表 3 X 形桩与圆形桩极限承载力对比分析

Table 3 Comparative analysis of bearing capacity of X-shaped piles and circular piles

方法	试桩编号		
	X	C ₁	C ₂
(1) 极限承载力/kN	119.00	90.00	140.00
与 X 形桩极限承载力之比值	1.00	0.76	1.18
与 C ₁ 桩极限承载力之比值	1.32	1.00	1.56
与 C ₂ 桩极限承载力之比值	0.85	0.64	1.00
(2) 桩身混凝土用量/m ³	0.71	0.71	1.23
与 X 形桩桩身混凝土用量之比	1.00	1.00	1.73
与 C ₁ 桩桩身混凝土用量之比	1.00	1.00	1.73
与 C ₂ 桩桩身混凝土用量之比	0.58	0.58	1.00
(3) 桩身单位体积混凝土极限承载力/(kN m ⁻³)	166.90	126.23	113.73
与 X 形桩桩身单方混凝土极限承载力之比值	1.00	0.76	0.68
与 C ₁ 桩桩身单位体积混凝土极限承载力之比值	1.32	1.00	0.90

与 C2 桩桩身单位体积混凝土极限承载力之比	1.47	1.11	1.00
------------------------	------	------	------

(1) 等面积情况下的对比

在等面积情况下, X形桩与圆形桩 C_1 截的桩身混凝土用量相同, 截面周长为圆形桩 C_1 的1.31倍、极限承载力为圆形桩 C_1 的1.32倍。试验结果表明在等截面情况下, X形桩极限承载力的提高与桩侧表面积的增加效果不仅同样明显, 而且还略微优于桩侧表面积的增加效果。

(2) 等周长情况下的对比

在等周长相同情况下, X形桩桩身混凝土用量仅为圆形桩 C_2 的0.58倍、而极限承载力为圆形桩 C_2 的0.84倍。X形桩的极限承载力没有等周长圆形桩 C_2 的高, 虽然桩侧表面积相同, 但其截面面积仅为圆形桩 C_2 的0.58倍, 从节约桩身混凝土用量增加桩承载力角度来看, X形桩的极限承载性能优于等周长圆形桩 C_2 。

(3) 桩身单位体积混凝土极限承载力对比

圆形桩 C_1 、 C_2 与X形桩的桩身混凝土用量之比为: $C_2 : C_1 : X = 1.73 : 1.00 : 1.00$, 桩身单位体积混凝土极限承载力之比为: $C_2 : C_1 : X = 1.00 : 1.11 : 1.47$, 从桩身混凝土节约用量及提高桩身单位体积混凝土极限承载力角度来看, X形桩优于圆形桩 C_1 , 圆形桩 C_1 优于圆形桩 C_2 。

由上述试验结果对比分析可知, 在相同的条件下, X形桩承载力学特性较圆形桩好, 而同是圆形桩的情况下, 细桩的单位承载力学特性较粗桩好。

2.3 荷载传递机理对比分析

(1) 桩身轴力对比分析

图4~6为X形桩与圆形桩 C_1 、 C_2 的桩身轴力分布图。由桩身轴力分布图可知, X形桩与传统的圆形桩相比, 其桩身轴力整体规律一致, 自桩顶向桩端依次减小, 说明X形桩与一般桩的荷载传递规律相似。在前几级荷载作用下, 桩身每个断面的轴力增幅较大, 在最后一级荷载作用下, 桩身与桩周土体发生剪切破坏, 桩侧摩阻力达到最大值, 桩身沉降量剧增, 桩的承载力达到极限。此后桩顶所加荷载大部分由桩端土体承担。

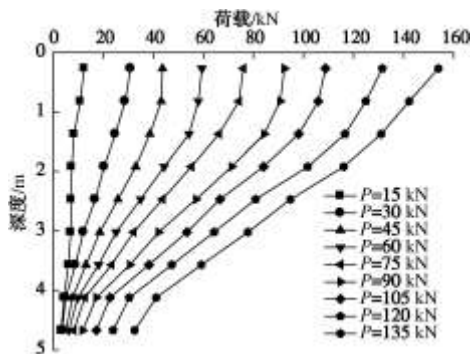


图4 X形桩桩身轴力分布图

Fig. 4 Distribution of shaft force of X-shaped piles

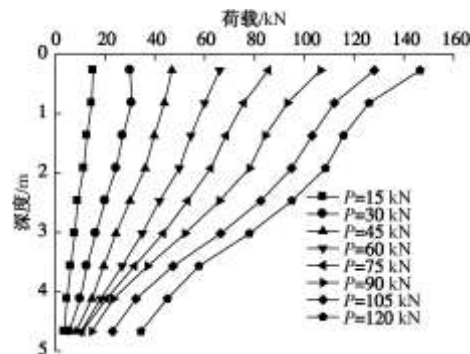


图5 圆形桩 C_1 桩身轴力分布图

Fig. 5 Distribution of shaft force of circular pile C_1

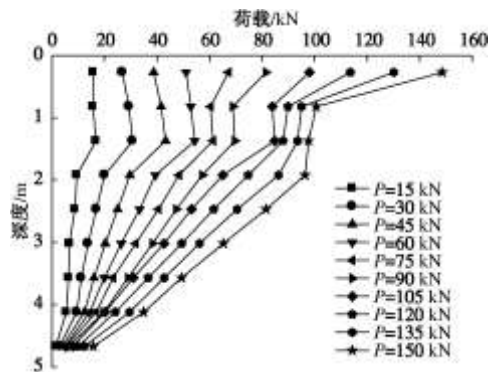


图6 圆形桩 C_2 桩身轴力分布图

Fig. 6 Distribution of shaft force of circular pile C_2

(2) 桩侧摩阻力对比分析

图7(a)~9(a)分别是X形桩与圆形桩 C_1 、 C_2 桩侧摩阻力随桩顶荷载的变化曲线, 图7(b)~9(b)分别是X形桩与圆形桩 C_1 、 C_2 桩侧摩阻力随桩顶沉降的变化曲线。结合图7~9试桩桩侧摩阻力发展变化图和图3试桩荷载沉降曲线图, X形桩与圆形桩 C_1 、 C_2 桩侧摩阻力发展情况对比分析如下:

共同承载特性: 在加载初期, 各试桩的桩侧摩阻力 Q_s 明显地参与承载作用, 并随着桩顶荷载 Q 的增加, 其桩侧摩阻力 Q_s 也不断的增大; 当桩顶荷载 Q 达到极限后, 其桩侧摩阻力 Q_s 也达到了极限。

不同承载特性: 在试桩达到极限荷载之前, 圆形桩 C_1 、 C_2 的桩侧摩阻力-桩顶荷载曲线均近似呈直线状态, 而X形桩的桩侧摩阻力-桩顶荷载曲线在加载的前几级几乎呈直线状态, 而之后其桩侧摩阻力随着桩顶荷载的增加, 其增加速度有减缓的趋势, 这由于为X形桩具有较大的桩周面积比, 所以在加载初期, 其桩侧摩阻力增长速度较快, 而在加载后期, 其桩侧摩阻力增长相对缓慢。由图9(a)和(b)中可以看出, 圆形桩 C_1 的桩侧摩阻力随桩顶荷载、桩顶沉降的变化

图与该桩的荷载沉降曲线一致, 均为陡降型, 而 X 形桩与圆形桩 C₂ 的桩侧摩阻力随桩顶荷载、桩顶沉降的变化图与该桩的荷载沉降曲线也一致, 均为缓变型。

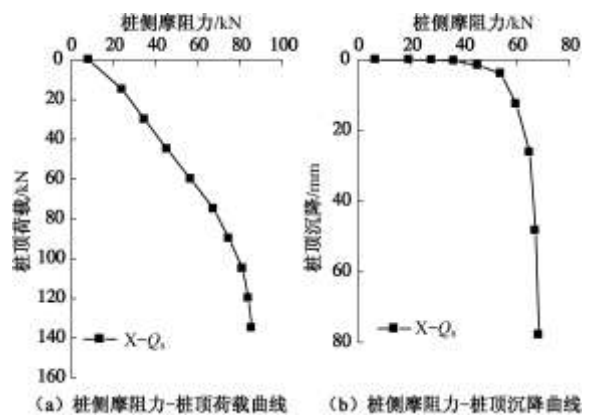


图 7 X 形桩桩侧摩阻力 - 桩顶荷载、桩顶沉降曲线

Fig. 7 Curves of pile side resistance-load and settlement of X-shaped piles

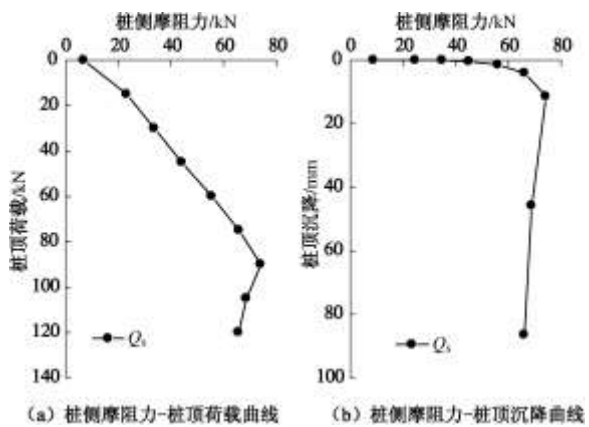


图 8 圆形桩 C₁ 桩侧摩阻力 - 桩顶荷载、桩顶沉降曲线

Fig. 8 Curves of pile side resistance-load and settlement of circular pile C₁

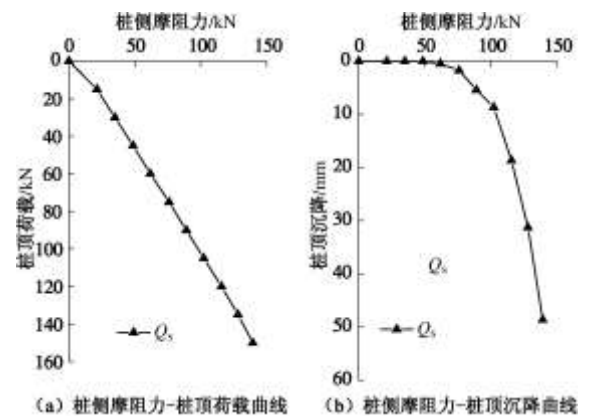


图 9 圆形桩 C₂ 桩侧摩阻力 - 桩顶荷载、桩顶沉降曲线

Fig. 9 Curves of pile side resistance-load and settlement of circular pile C₂

(3) 桩端阻力对比分析

图 10 (a) ~ 12 (a) 分别是 X 形桩与圆形桩 C₁、C₂ 的桩端阻力随桩顶沉降的变化曲线。图 10 (b) ~

12 (b) 分别是 X 形桩与圆形桩 C₁、C₂ 的桩端阻力随桩顶荷载的变化曲线。结合图 10~12 试桩桩端阻力发展变化图和图 3 试桩荷载沉降曲线图, X 形桩与圆形桩 C₁、C₂ 桩端阻力发展情况对比分析如下:

共同承载特性: 在加载初期, 各试桩的桩端阻力 Q_p 就开始参与承载作用, 并随着桩顶荷载 Q 的增加, 其桩端阻力 Q_p 也不断的增大; 当桩顶荷载 Q 达到极限后, 其桩端阻力 Q_p 也达到了极限。X 形桩与圆形桩 C₁、C₂ 桩端阻力随桩顶沉降的变化曲线相似, 均呈缓变状态。

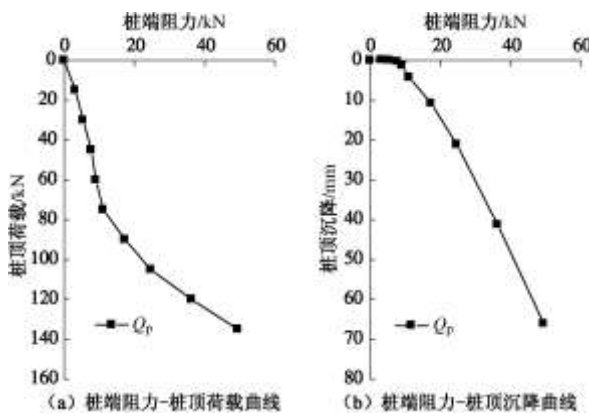


图 10 X 形桩桩端阻力 - 桩顶荷载、桩顶沉降曲线

Fig. 10 Curves of pile toe resistance-load and settlement of X-shaped piles

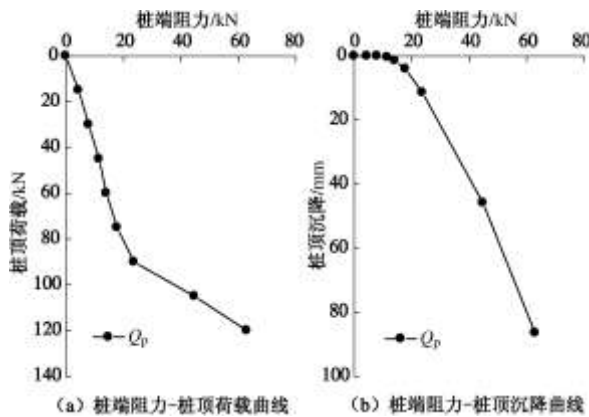


图 11 圆形桩 C₁ 桩端阻力 - 桩顶荷载、桩顶沉降曲线

Fig. 11 Curves of pile toe resistance-load and settlement of circular pile C₁

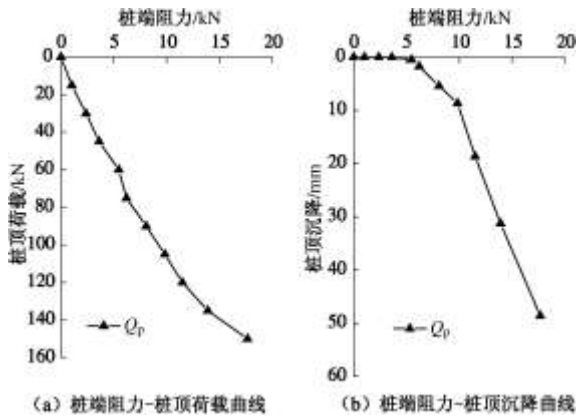


图 12 圆形桩 C_2 桩端阻力-桩顶荷载、桩顶沉降曲线
Fig. 12 Curves of pile toe resistance-load and settlement of circular pile C_2

不同承载特性：圆形桩 C_1 的桩端阻力 Q_p 随桩顶荷载变化曲线为陡变型，在桩顶荷载达到极限后，其桩端阻力 Q_p 的增长速度陡然减小，这一点在图 12 中却表现为 Q_p/Q 突然增大，主要是因为其桩侧摩阻力突然 Q_p 减小，导致其所占比例的突变；而 X 形桩与圆形桩 C_2 桩端阻力发展无论随桩顶荷载或桩顶沉降的变化相对都比较平缓。

(4) 桩侧摩阻力与桩端阻力分配对比分析

在桩的总承载力中，对桩侧摩阻力 Q_s 和桩端阻力 Q_p 进行分配，并作出定量的评价，是单桩承载力机理研究的主要内容。本文根据足尺模型静载荷试验的实测数据，对各试桩的桩侧摩阻力和桩端阻力进行了分离，试验各桩桩侧摩阻力与桩端阻力所占的比例如图 13 所示，X 形桩与圆形桩的桩侧摩阻力与桩端阻力分配比例对比分析如下：

共同特性：刚加载时由于桩体弹性模量远大于土体，所以桩体变形较小，桩与土体相对位移较小，桩侧摩阻没有得到充分的发挥。随着荷载的增大，桩身变形变大，桩土相对位移加大侧摩阻得到进一步的发挥，同时桩端土体被压密。随着荷载的进一步加大，桩土相对位移进一步加大，桩土接触面的剪应力达到土体的抗剪强度，桩侧摩阻力得到充分的发挥，达到极限荷载时，桩顶荷载增量主要由桩端土体承担。

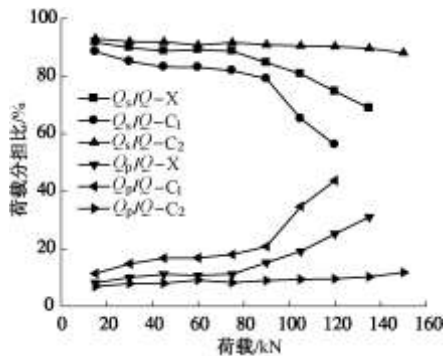


图 13 各试桩桩侧摩阻力与桩端阻力所占比例

Fig. 13 Sharing ratio of pile side resistance and toe resistance of test piles

不同特性：与等截面圆形桩 C_1 相比，X 形桩的桩侧摩阻力分担桩顶荷载的比例 Q_s/Q 一直高于圆形桩的桩侧摩阻力分担桩顶荷载的比例 Q_s/Q ，由图 3 可知，圆形桩 C_1 荷载曲线为陡降型，当荷载超过极限荷载后，圆形桩 C_1 桩底土首先发生了破坏，此后桩顶荷载增量基本由桩端土体承担，所以 C_1 桩的 Q_s/Q 也呈陡降型，相应的其 Q_p/Q 曲线呈陡升型，而 X 形桩的 Q_s/Q 与 Q_p/Q 曲线与同截面周长的圆形桩 C_2 的 Q_s/Q 与 Q_p/Q 曲线一样均为缓变型；与等周长圆形桩 C_2 相比，X 形桩的 Q_s/Q 比例一直低于圆形桩 C_2 的 Q_s/Q 比例，其主要原因是由于 C_2 桩的桩端面积比较大，可能存在桩侧摩阻力与桩端阻力的相互强化。

表 4 为极限承载力所对应的桩端阻力及其与桩侧摩阻力各自所占的百分比。计算结果表明，在极限状态时，试验各桩桩侧摩阻力所占比重也较大，桩侧摩阻力和桩端阻力都得到了充分的发挥。

表 4 极限荷载时试桩桩侧摩阻力与桩端阻力所占比例

Table 4 Pile side resistance and toe resistance ratio of test piles in ultimate state

桩型	极限荷载 /kN	桩端阻力 /kN	桩端阻力 占比例/%	桩侧摩阻力 占比例/%
X	119	28.86	24.45	75.55
C_1	90	18.75	20.83	79.17
C_2	140	15.37	10.98	89.02

3 X 形桩的经济性评价

目前评价桩基础常用的经济指标为桩身单位体积混凝土承载力。由上述表 2 可知，在相同条件下，与等截面圆形桩 C_1 相比，X 形桩与圆形桩 C_1 桩身混凝土用量相同，但其承载力增加而沉降减少，在极限状态时，X 形桩极限承载力为提高了 32%，相应的其单位体积混凝土极限承载力也提高了 32%；与等周长圆形桩 C_2 相比，X 形桩比圆形桩 C_2 的桩身混凝土用量节约了 42%，但其单位体积混凝土极限承载力却提高了 47%。圆形桩 C_1 和 C_2 相比，圆形桩 C_1 为 C_2 的 58%，但 C_1 比 C_2 单位体积混凝土极限承载力却提高了 11%。从提高单位体积混凝土承载力，节约桩身混凝土用量来看，X 形桩优于圆形桩 C_1 ，圆形桩 C_1 优于圆形桩 C_2 。

4 结 论

(1) 足尺静载荷试验结果表明：在竖向荷载作用下，X 形桩的与圆形桩 C_2 的荷载沉降曲线为缓变型，而圆形桩 C_1 的荷载沉降曲线为陡降型；X 形桩与圆形

桩 C_1 、 C_2 的极限承载力分别为 119, 90, 140 kN。

(2) 与等截面圆形桩 C_1 相比, X形桩与 C_1 桩身混凝土用量相同, 其桩周侧表面积为 C_1 , 极限承载力为 C_1 的 1.32 倍, 可见 X形桩的极限承载力的增加与桩侧表面积的增加效果同样明显, 且可能还存在桩侧摩阻力与桩端阻力的相互作用, 因此 X形桩极限承载力的增加还稍大于侧表面积的增加。

(3) 与同截面周长的圆形桩 C_2 相比, X形桩的桩身混凝土用量为 C_2 的 0.58, 而极限承载力却为圆形桩 C_2 的 0.84 倍, 从节约桩身混凝土用量, 提高桩基极限承载力角度分析, X形桩的承载性能优于圆形桩 C_2 。

(4) X形桩与圆形桩 C_1 、 C_2 的桩身混凝土用量之比为 $C_2 : C_1 : X = 1.73 : 1.00 : 1.00$, 单方混凝土极限承载力之比为 $C_2 : C_1 : X = 1.00 : 1.11 : 1.47$, 即在相同的条件下, X形桩桩身混凝土用量最小, 但单方混凝土极限承载力却最高、 C_1 次之、 C_2 最小。

(5) 从 X形桩与圆形桩 C_1 、 C_2 的荷载传递机理对比分析可知: X形桩的桩身轴力沿桩身长度的分布与圆形桩 C_1 、 C_2 相似, 但其桩侧摩阻力及桩端阻力的发展与圆形桩 C_2 相似, 相对平缓; 极限状态时, 试验各桩的桩侧阻力及桩端阻力均得到了充分发挥。

(6) X形桩是一种新型异形桩, 在因地制宜推广应用的同时, 还需在理论上加以深入研究。如 X形桩单桩沉降的研究、在长期荷载作用下桩侧土体受力后变形及荷载传递机制研究等, 以推进该技术的进步和发展。

参考文献:

- [1] CHARLES W W N, TERENCE L Y Y, JONATHAN H M L, et al. Side resistance of large diameter bored piles socketed into decomposed rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, **127**(8): 642 - 657.
- [2] 高广运, 蒋建平, 顾宝和. 砂卵石层上大直径扩底桩墩竖向承载力性状[J]. 岩土力学, 2004, **25**(3): 359 - 362. (GAO Guang-yun, JIANG Jian-ping, GU Bao-he. Vertical bearing behavior large diameter short-belled pier in sand-cobble layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(3): 359 - 362. (in Chinese))
- [3] 张忠苗, 吴世明, 包 风. 钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 681 - 686. (ZHANG Zhong-miao, WU Shi-ming, BAO Feng. Study of mechanism and application on bored pile end grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 681 - 686. (in Chinese))
- [4] DAN Brown. Effect of construction on axial capacity of drilled foundations in piedmont soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2002, **128**(12): 967 - 973.
- [5] 沈 扬, 陈育民, 胡志刚, 等. 哑铃桩模型试验与承载力计算方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, **29**(4): 428 - 432. (SHEN Yang, CHEN Yu-min, HU Zhi-gang, et al. Model tests and calculation method study on dumbbell pile's bearing capacity[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, **29**(4): 428 - 432. (in Chinese))
- [6] WEI Jin qi, HESHAM M. Experimental study of axial behaviour of tapered piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**: 641 - 654.
- [7] MAHMOUD Ghazavi. Analysis of kinematic seismic response of tapered piles[J]. Geotech Geol Eng, 2007(25): 37 - 44.
- [8] 葛中华, 殷宗泽, 马智杰. 提高超高层建筑大直径灌注桩承载力的试验和研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 31 - 33. (GE Zhong-hua, YIN Zong-ze, MA Zhi-jie. The study and test to enhance bearing capacity of the large diameter pile under the high rise building[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 31 - 33. (in Chinese))
- [9] 周国庆, 梁恒昌, 赵光思. 桩侧土注浆提高单桩承载力试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, **34**(3): 265 - 269. (ZHOU Guo-qing, LIANG Heng-chang, ZHAO Guang-si. Test of grouting surrounding pile for improving bearing capacity[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, **34**(3): 265 - 269. (in Chinese))
- [10] 沈保汉, 贺德新, 刘振亮, 等. DX 多节挤扩桩的产生及特点[J]. 工业建筑, 2004, **34**(3): 1 - 8. (SHEN Bao-han, HE De-xin, LIU Zheng-liang, et al. DX pile with multi-unde-extruding branches[J]. Industrial Construction, 2004, **34**(3): 1 - 8. (in Chinese))
- [11] 吴兴龙, 李光茂, 魏章和. DX 桩单桩承载力设计分析[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(5): 581 - 585. (WU Xing-long, LI Guang-mao, WEI Zhang-he. Design and analysis for the end-capacity of the single DX pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(5): 581 - 585. (in Chinese))
- [12] 陆见华, 陆小曼. Y 形-异形沉管灌注桩的试验研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2002, **14**(4): 40 - 42. (LU Jian-hua, LU Xiao-man. Field test and study of Y-shaped pile-an unusual type of driven cast-in-situ concrete pile[J]. J Zhejiang Wat Cons & Hydr, 2002, **14**(4): 40 - 42. (in Chinese))

- [13] 王新泉, 陈永辉, 刘汉龙. Y 型沉管灌注桩荷载传递机制的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 615 - 623. (WANG Xin-quan, CHEN Yong-hui, LIU Han-long. In-situ study on load transfer mechanism of Y-shaped vibro-pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 615 - 623. (in Chinese))
- [14] 刘汉龙. 现浇 X 形钢筋混凝土桩技术[P]. 专利号 200710020306, 2007. (LIU Han-long. Cast-in-situ X-shaped reinforced concrete piles[P]. Patent No. 2007100203063, 2007. (in Chinese))
- [15] 王智强. 现浇 X 形桩竖向承载特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2009. (WANG Zhi-qiang. Study on the vertical bearing characteristics of cast-in-place X-section concrete pile[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [16] 袁 佶. X 形桩水平承载性能足尺模型试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2009. (YUAN Ji. Research on full-scale model test for the behavior of X-section pile under lateral load[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [17] 刘汉龙, 谭慧明, 彭 劫, 等. 大型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. (in Chinese))
- [18] 中华人民共和国建设部. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (The People's Republic of China Ministry of Construction. GB 50007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [19] 中华人民共和国建设部. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (The People's Republic of China Ministry of Construction. JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [20] 刘汉龙, 刘芝平, 雍 君, 等. 现浇 X 型混凝土桩的荷载传递机理初探[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 267 - 272. (LIU Han-long, LIU Zhi-ping, YONG Jun, et al. Study on load transfer mechanism of cast-in-place x-shaped piles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 267 - 272. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京金土木软件技术有限公司
封 3 重庆市永固工程拉筋带厂有限公司
封 4 国网电力科学研究院南京南端集团公司
后插 1 广州中海达卫星导航技术股份有限公司
后插 2 台州市建元工程勘察仪器有限公司
后插 3 北京理正软件设计研究院有限公司
后插 4 徕卡测量系统贸易(北京)有限公司