

文章编号:1671-8879(2016)05-0037-08

# 等直径桩、扩底桩、支盘桩承载特性对比

张利鹏, 王晓谋

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**上部荷载作用下不同桩型桩基础的荷载传递规律不同,即不同桩型桩基础的承载特性不同,现行施工条件下可供选择的桩型较多。为研究实际工程中不同桩型桩基础的承载特性及区别,在不同地层条件下合理地选择桩型,对同一场地的人工挖孔等直径灌注桩、人工挖孔扩底灌注桩和人工挖孔支盘灌注桩进行了现场静载荷试验,结合试验结果对比分析了上部荷载作用下 3 种不同桩型的桩身轴力、桩侧摩阻力、桩端阻力、极限承载力和桩身沉降的发挥性状,并研究分析其不同发挥性状产生的原因;结合双曲线拟合法分析了 3 种不同桩型桩基础的极限承载力。研究结果表明:扩底桩极限承载力最大,支盘桩次之,等直径桩最小;同级荷载下,扩底桩沉降最小,支盘桩次之,等直径桩最大;支盘桩的 2 个支盘承担荷载作用显著且表现出明显的时序性,桩身轴力和侧摩阻力在支盘处产生突变,其余桩段的桩身轴力和侧摩阻力发挥性状与等直径桩相似,上支盘分担荷载较下支盘多,支盘桩表现出多支点摩擦端承桩特性;扩底桩端扩底作用显著,其桩端阻力较支盘桩、等直径桩大,扩底上段侧摩阻力突降至 0,扩底下段侧摩阻力随荷载的增加逐渐恢复,扩底桩表现出摩擦端承桩特性。该研究结果可用于类似地质桩型的选择。

**关键词:**岩土工程;等直径桩;扩底桩;支盘桩;荷载传递;极限承载力

**中图分类号:**TU473.11

**文献标志码:**A

## Comparison on load-bearing characteristics among equal diameter pile, belled pile and branch pile

ZHANG Li-peng, WANG Xiao-mou

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The load transfer mechanisms of different types of pile foundation under upper load are different, that is, the bearing characteristics of pile foundation with different types are different. Under the current construction conditions, the choice of pile type is diverse. In order to investigate the bearing characteristics and the differences among different types of pile foundation in practical engineering, a reasonable choice of pile type was made under different stratigraphic conditions. Based on the results of field static load test on man-digged hole equal diameter pile in the same site, belled pile and branch pile, an comparative analysis of the characteristics of pile axial force, pile lateral friction, pile tip resistance, ultimate bearing capacity and pile settlement of the above three types of piles were conducted combining with experimental results. Moreover, the potential reasons for different characteristics were analyzed. Based on hyperbolic fitting method, the ultimate bearing capacities of the three types of pile foundations were analyzed. The

收稿日期:2016-06-28

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(2011205110013)

作者简介:张利鹏(1989-),男,河南郑州人,工学博士研究生,E-mail:772797602@qq.com。

results show that the bearing capacity of belled pile is the largest, the branch pile takes the second place, and the equal diameter pile is the least. Under the same load, the settlement of belled pile is the smallest, and then the branch pile follows, and the equal diameter pile is the maximum. In addition, the bearing load effect of the two branches of the branch pile is significant and shows significant time sequence. The pile axial force and lateral friction change greatly at the place of branch. The axial force and pile lateral friction resistance of the rest segments are similar to those of the diameter pile. The upper branch shares more load than the lower branch, which shows the characteristics of more friction pivot end-bearing pile. And also the belled influence on the end of belled pile is significant, tip resistance of belled pile is larger than those of the equal diameter pile and branch pile, and the lateral friction of upper belled side drops to 0 suddenly and lower belled side gradually recovers with the increasing load, which shows the characteristics of end-bearing pile. The experimental results can be used to select the type of pile in similar geological conditions. 2 tabs, 14 figs, 23 refs.

**Key words:** geotechnical engineering; equal diameter pile; belled pile; branch pile; load transfer; ultimate bearing capacity

## 0 引言

人工挖孔灌注桩由于不受施工设备限制,施工简单,成孔直径大,承载力高等特点,在地形狭窄、山坡陡峻处、考虑造价等条件下适用性比较强,且能直接检验孔壁和孔底土质,能保证成桩的质量<sup>[1]</sup>。人工挖孔灌注桩因其优点而被广泛应用,许多学者对其开展了相关的研究<sup>[2-13]</sup>。

高广运等研究了 4 个场地的 4 组扩底桩与等直径桩的竖向静载对比试验,试验结果表明,扩底桩的承载力分别是等直径桩的 5.5、3.58、1.7、1.09 倍,沉降较等直径桩小<sup>[14]</sup>;黄广龙等通过现场静载试验对同一地质条件下扩底桩和等直径桩的承载特性做了对比分析,分析表明扩底桩能够充分发挥持力层的承载潜力,对提高单桩承载力、减小桩体沉降效果显著,扩底桩极限承载力较等直径桩高 35%<sup>[15]</sup>;王瑞芳建立了大直径扩底桩的单桩解析解模型,并采用 ABAQUS 软件建立等直径桩与扩底桩的有限元模型,分析结果表明扩底桩较等直径桩可显著提高承载力并减小沉降<sup>[16]</sup>;张蕾等通过对大直径扩底桩尺寸效应的影响分析,研究了端阻力与沉降量的关系,并提出扩底桩尺寸效应的影响系数<sup>[17]</sup>;李枫等结合具体工程对支盘桩与等直径桩的承载特性做了分析,表明支盘的存在可分担 50%以上的单桩承载力,可以显著提高支盘桩的承载力,支盘桩承载力较等直径桩承载力高,且沉降小<sup>[18]</sup>;钱德玲依据静载试验结果及三维数值模拟得出支盘最小净间距应小于等于  $2D$  ( $D$  为桩径),并指出支盘的承载特性具有

明显的时间效应和互补效应<sup>[19]</sup>;陈飞等通过大比例尺模型静载试验得出支盘桩比同径、同长的等直径桩承载力高 89%,并指出桩径、支盘数量、盘间距是影响支盘桩承载力的主要因素<sup>[20]</sup>;张航等采用量纲一随机变量极限状态方程对现有的试桩资料进行分析,指出支盘桩的可靠指标较等直径桩大<sup>[21]</sup>。

目前针对 2 种不同桩型之间承载特性的对比研究较多,且大多是针对钻孔灌注桩,对于挖孔灌注桩的对比研究相对较少。随着桩基础技术和理论的发展,可供选择的桩基础形式越来越多,而对于更多不同桩型之间承载特性的对比研究很少。随着工程建设规模的扩大,对桩基础的承载力及沉降要求越来越高,在地质资料明确的情况下,合理地选择桩型以提高桩基础承载力,减小沉降显得越来越重要。鉴于此,本文通过现场静载试验对 3 种不同桩型的人工挖孔灌注桩承载特性做对比研究,以分析不同桩型承载力的发挥性,确定不同桩型的极限承载力和沉降,为类似工程地质条件下的桩基础形式的合理选择提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 地质条件

试验场地位于河南省济源市王屋山风景区附近,属丘陵地带,土层分布均匀,地质特征见下页表 1。

### 1.2 试桩及锚桩方案

现场试验由 3 根试桩组成:等直径桩(SZ1)、扩底桩(SZ2)、支盘桩(SZ3)。3 根试桩均为人工挖孔

表 1 土层概况  
Tab.1 Geological conditions

土层名称	分层厚度/m	土层特征	承载力标准 值/kPa	容许承载 力/kPa	桩周极限摩 阻力/kPa
人工填土	0.6~1.3	褐黄色、稍湿、可塑、中硬、土质较杂,孔深 0.5 m 以上为耕植层			
亚粘土	11.6~12.4	棕红、浅黄色、硬塑、土质不均、局部粘粒含量较高	280	330	60
卵石	2.0~2.1	赫红色、以紫红色石英砂岩、石英岩为主,充填泥质和砂质	500	680	170

灌注桩,桩长 15.6 m,桩径 1.2 m,桩头采用 C40 混凝土,桩体采用 C25 混凝土浇筑。试验过程中试桩不考虑弯拉作用,仅采用结构配筋,主筋为  $\Phi 22$  mm 的Ⅱ级螺旋钢筋 18 根,通长配筋,箍筋采用  $\Phi 8$  mm 的Ⅰ级钢筋,间距 200 mm,试桩形状及尺寸如图 1 所示。

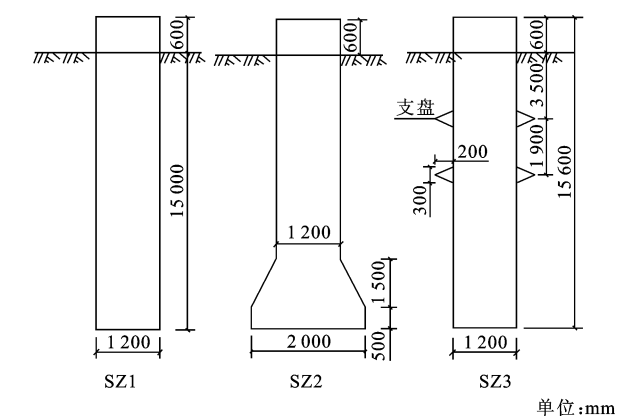


图 1 试桩桩型  
Fig.1 Types of test piles

锚桩(MZ)采用人工挖孔灌注桩,桩体采用 C25 混凝土,桩长 15.6 m,桩径 1.2 m,其为扩底桩,结构形式如 SZ2,桩体主筋为  $\Phi 30$  mm 的Ⅱ级螺旋钢筋 26 根,通长布置,箍筋采用  $\Phi 8$  mm 的Ⅰ级钢筋,间距 200 mm,由于现场试验场地及试验经费的限制,采用了如图 2 的布桩形式。

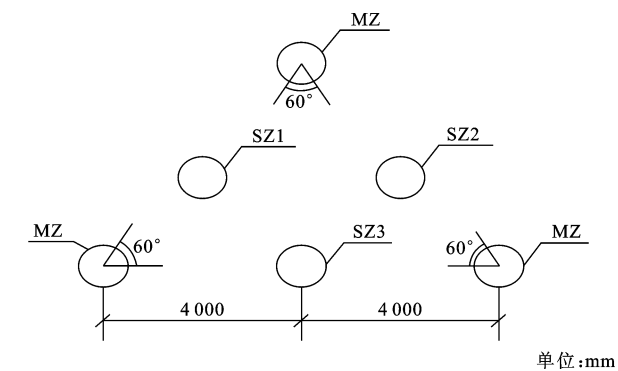


图 2 现场试桩、锚桩布置  
Fig.2 Layout of test pile, anchor pile in filed

1.3 测试元件布置

依据试桩主筋型号选择直径 22 mm 的 JXG-2 型钢筋计作为应力计,其量程为  $-40\sim 60$  kN,经标

定后投入使用。根据土层及桩体埋深确定测试断面,每个断面布置 3 个钢筋计,桩顶正交方向布置 4 个百分表,其量程为 50 mm,量测在荷载作用下试桩的沉降。

1.4 加载方案

加载采用反力梁法,加载装置由 1 根反力梁、2 根锚桩、4 台 5 000 kN 千斤顶组成。SZ1、SZ3 的计算荷载分别为 10 000、11 500 kN,SZ2 的计算荷载为 13 000 kN,试验采用慢速荷载维持法,即逐级加载,第 1 级为 2 000 kN,其余每级 1 000 kN。

2 试验结果及分析

2.1 桩身轴力发挥特性

在竖向荷载作用下,桩身克服桩周摩阻力使桩身轴力向下传递。由图 3、下页图 4、图 5 可以看出,3 根不同桩型的试桩桩身轴力均随埋深的增大而减小,随荷载的增加而增加。3 种不同桩型试桩的桩身轴力在传递过程中表现出不同的性状。

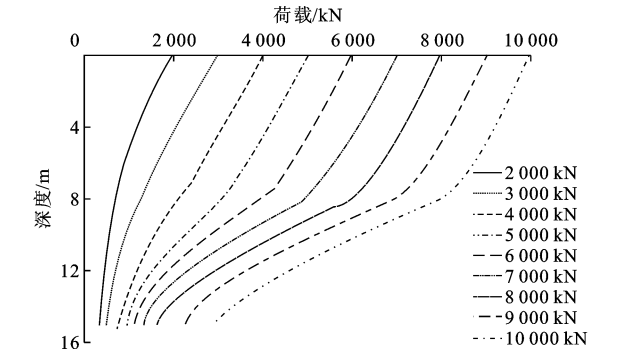


图 3 SZ1 桩身轴力分布曲线  
Fig.3 Curves of SZ1 pile axial force distribution

加载初期 3 根试桩桩身上部轴力与相应的加载值相差较小,说明桩身上部摩阻力没有完全发挥,即桩土间相对位移较小。随着荷载的增加,传至桩底端的荷载逐步增加,SZ3 桩身轴力沿桩身变化最大,SZ1 次之,SZ2 最小。由于支盘的作用,支盘桩在两支盘处的桩身轴力急剧减小,减小值随着荷载的增加而变大,其减小的部分由 2 个支盘承担,说明支盘端承作用显著,支盘将荷载传递到盘底土层中,因此传递到桩底端的轴力较小。SZ2 桩身轴力沿桩身变

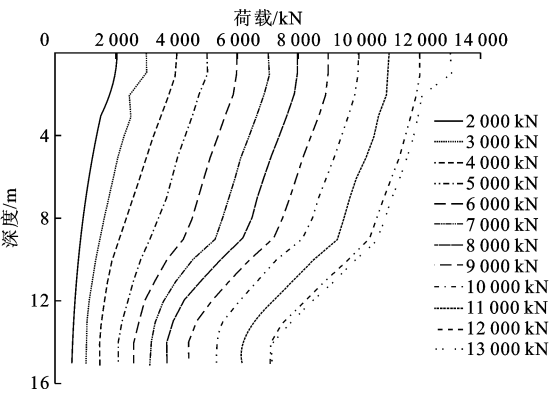


图 4 SZ2 桩身轴力分布曲线

Fig. 4 Curves of SZ2 pile axial force distribution

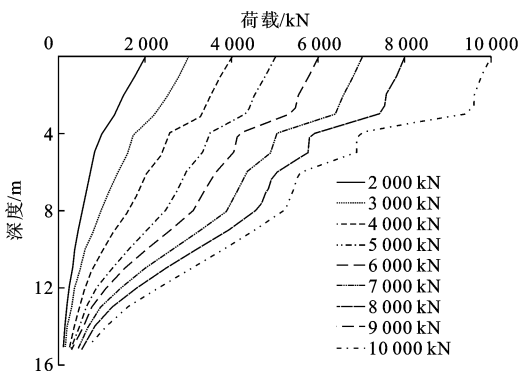


图 5 SZ3 桩身轴力分布曲线

Fig. 5 Curves of SZ3 pile axial force distribution

化相对于 SZ1 较为平缓,说明桩端扩底使得轴力向下传递的比 SZ1 快。在桩身 10 m 以下,桩身轴力较 SZ1 变化小,因为桩端扩底作用使得相应断面处侧摩阻力减小,则相应断面处轴力变化较小。

在最大荷载作用下,SZ3 桩底端轴力占总荷载的 7.1%,但是 2 个支盘承担的荷载占总荷载的 33.7%,桩端轴力占总荷载的 40.8%;SZ1 桩端轴力占总荷载的 28.3%;SZ2 桩端轴力占总荷载的 57.96%,说明桩端扩底作用显著,承载力也明显得到提高。其中 SZ1 属于摩擦型桩,SZ2 属于摩擦端承桩,SZ3 是多支点摩擦端承桩<sup>[7]</sup>。

2.2 桩侧摩阻力发挥特性

由桩身轴力分布可知,桩身轴力沿桩身的减小速率呈非线性关系,说明桩侧摩阻力沿桩身增长速率也呈非线性关系。由图 6、图 7 和下页图 8 可以看出,3 种不同桩型试桩的桩侧摩阻力表现出不同的性状,SZ1 桩侧摩阻力总体趋势为沿桩身先增大后减小,呈现“单峰”现象。由于成孔时间长、侧壁土松弛、桩身土层围压小,SZ1、SZ2 在 0~8 m 范围内桩侧摩阻力较小,即使桩土间有较大的相对位移,侧摩阻力依然较低。随着荷载的增加,桩身下部侧摩

阻力逐渐开始发挥作用,桩端处侧摩阻力没有发挥至极限值,因此桩土间相对位移较小,桩侧摩阻力不能完全发挥,说明桩侧摩阻力的发挥受桩土间相对位移的影响较大。桩土间产生相对位移时,扩底端斜侧面范围内处于临空状态,不能提供摩阻力,因此 SZ2 桩侧摩阻力在 13 m 以下急剧减小,且在 14 m 附近减小为 0,其下部 0.5 m 范围内摩阻力又逐渐增加。SZ3 的 2 个支盘处桩侧摩阻力产生突变,出现“双峰”现象,支盘处摩阻力较等直径处大,上支盘较下支盘摩阻力大,说明支盘分担荷载作用显著,上支盘较下支盘分担荷载多。

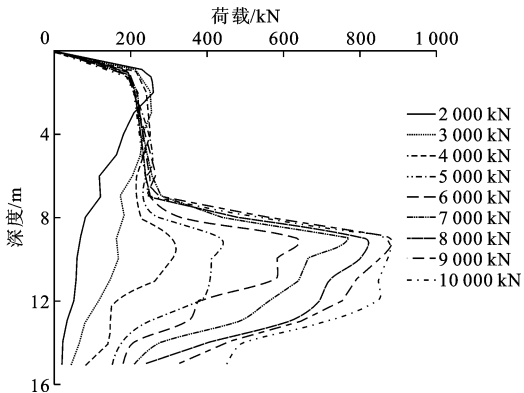


图 6 SZ1 桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 6 Curves of SZ1 pile lateral friction resistance distribution

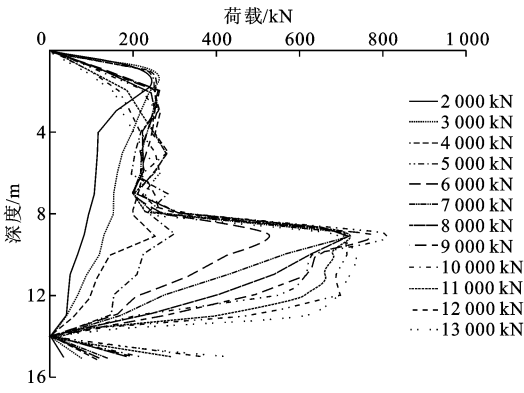


图 7 SZ2 桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 7 Curves of SZ2 pile lateral friction resistance distribution

2.3 桩端阻力及支盘发挥特性

下页图 9 为桩端阻力分布。由图 9 可以看出,在加载初期,3 根试桩的端阻力均较小,这时荷载主要由桩周土层承担,随着荷载的增加,桩端阻力也逐渐增加,但 SZ2 桩较 SZ1、SZ3 的端阻力增长快,因为桩端扩底,荷载较 SZ2、SZ3 传递到桩底端快;SZ3 由于支盘作用,将荷载传递到桩周土体中,桩底端阻力最小。

下页表 2 为试桩端阻力和侧摩阻力的分担情

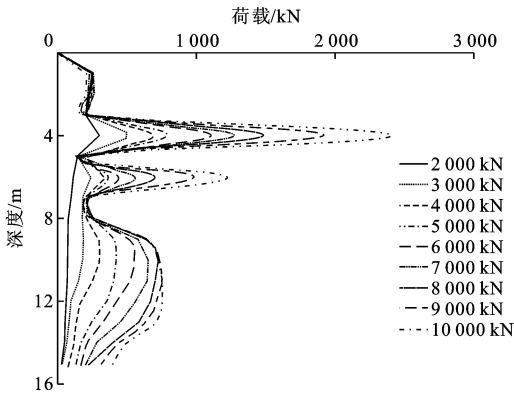


图 8 SZ3 桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 8 Curves of SZ3 pile lateral friction resistance distribution

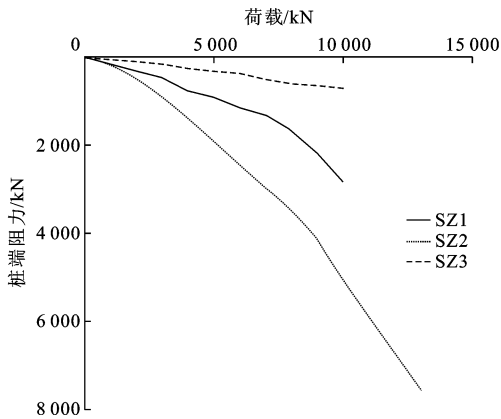


图 9 试桩桩端阻力分布曲线

Fig. 9 Curves of test piles end resistance distribution

况。由表 2 可知,在最大荷载作用下,SZ1 的端阻力为 2 832 kN,占总荷载的 28.3%;显示出摩擦桩的特性,SZ2 的桩端阻力为 7 535.61 kN,占总荷载的 57.9%,因此若桩端持力层土性良好,可以考虑采用扩底桩,以提高桩基承载力,减小沉降;SZ3 的桩底端阻力为 712 kN,占总荷载的 7.1%。

表 2 试桩端阻力和侧摩阻力分担

Tab. 2 Test pile end resistance and lateral friction sharings

试桩 编号	最大加载/ kN	桩端阻力/ kN	桩侧摩阻 力/kN	桩底端阻力 分担比例/%	桩侧摩阻力 分担比例/%
SZ1	10 000	2 832.30	7 167.70	28.3	71.7
SZ2	13 000	7 535.61	5 464.39	57.9	42.1
SZ3	10 000	712.80	9 287.20	7.1	92.9

图 10 为支盘桩(SZ3)的荷载分布曲线。由图 10 可知,2 个支盘分担的荷载为 3 370 kN,占总荷载的 33.7%,支盘分担荷载表现出了明显的时序性;上支盘较下支盘先发挥作用,且分担荷载较下支盘高 111.8%,2 个支盘和桩底端阻力共占总荷载的 40.8%,表现出端承摩擦桩的性质,若桩周存在良好土层可以采用支盘桩提高桩基承载力。

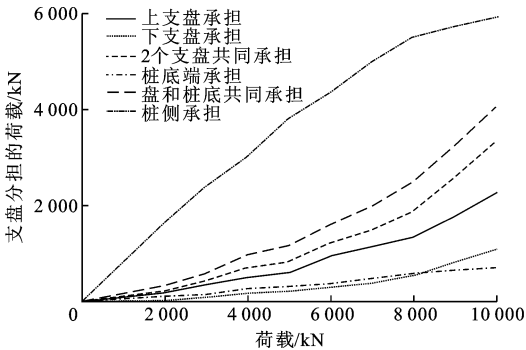


图 10 支盘桩荷载分布曲线

Fig. 10 Curves of branch pile load distribution

## 2.4 试桩极限承载力确定

图 11 为试桩的荷载-沉降曲线。由图 11 可知,3 种桩型的荷载-沉降曲线均属于缓变形,加载过程中试桩均没有出现较大的沉降,没有明显的拐点,因为在最大荷载下锚桩上拔位移过大而产生破坏,致使试验终止。加载初期,3 根试桩沉降值相差不大,此时荷载主要由桩侧摩阻力承担,随着荷载的增加,3 种桩型的沉降差值逐渐变大,同级荷载作用下,SZ1 沉降值最大,SZ3 次之,SZ2 最小;由于锚桩变形过大,在最大荷载作用下试桩仍未破坏。SZ1 累计沉降 9.3 mm,最大回弹值 3.6 mm;SZ2 累计沉降 9.5 mm,最大回弹值 4.6 mm;SZ3 累计沉降 7.8 mm,最大回弹值 2.4 mm。

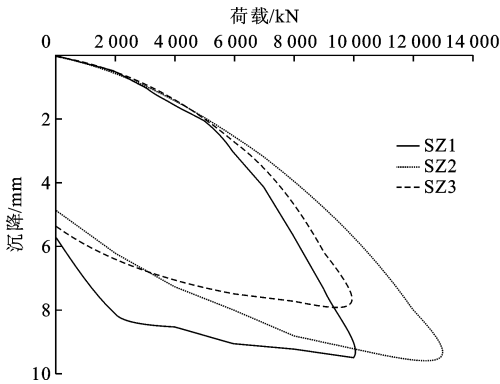


图 11 试桩荷载-沉降曲线

Fig. 11 Load-settlement curves of test piles

在最大荷载作用下试桩没有产生明显的沉降,从荷载-沉降曲线上得不到试桩的极限承载力,因此借助双曲线拟合法预测试桩极限承载力。

双曲线法拟合原理:假定桩顶荷载  $P$  与沉降  $S$  之间呈双曲线关系,即

$$P=\frac{S}{aS+b} \tag{1}$$

桩基础的极限承载力为

$$P_U = \lim_{S \rightarrow \infty} \frac{S}{aS+b} = \frac{1}{a} \tag{2}$$

将式(2)变换得

$$\frac{S}{P} = aS+b \tag{3}$$

即

$$y = ax + b \tag{4}$$

式中: $a$ 、 $b$  均为拟合参数,其中  $y = \frac{S}{P}$ ,  $x = S$ 。

根据 Chin 氏理论, $S/P$  与  $S$  之间存在线性关系,试桩没有加载到破坏时,式(3)中的斜率倒数( $1/a$ )即为试桩的极限承载力。拟合计算时应除去加载前期处于弹性阶段的荷载,试桩的拟合结果见图 12~图 14。因为支盘桩、扩底桩较等直径桩承载特性复杂,由图可以看出,SZ1 拟合趋势较 SZ2、SZ3 好。由计算出的  $a$  反算出 SZ1、SZ2、SZ3 的极限承载力分别为 12 500、15 800、13 900 kN。

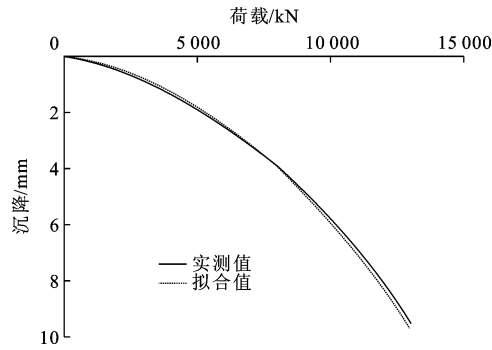


图 12 SZ2 实测值与拟合值荷载-沉降曲线  
Fig. 12 Load-settlement curves of fitting values and measured values of SZ2

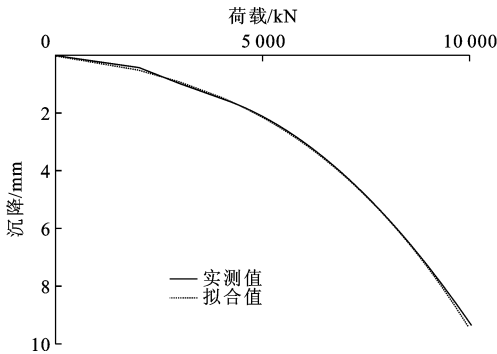


图 13 SZ1 实测值与拟合值荷载-沉降曲线  
Fig. 13 Load-settlement curves of fitting values and measured values of SZ1

3 试桩承载力对比分析

文献[14]中扩底桩承载力较等直径桩承载力分别高出 5.5、3.58、1.7 倍,文献[15]中扩底桩极限承

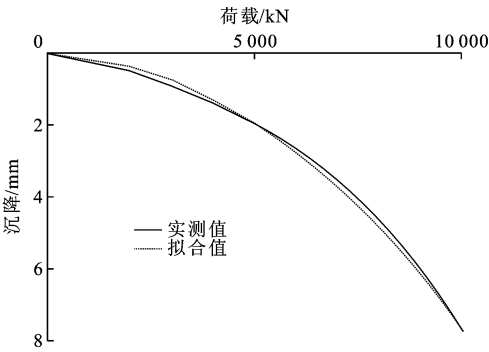


图 14 SZ3 实测值与拟合值荷载-沉降曲线  
Fig. 14 Load-settlement curves of fitting values and measured values of SZ3

载力比等直径桩高 35%;由文献[16]可知,支盘的存在可以显著提高支盘桩的承载力,支盘可分担 50%以上的单桩承载力;文献[20]中支盘桩比同径、同长的等直径桩承载力高 89%,文献[22]中支盘桩承载力较同类型的钻孔灌注桩可提高 1 倍左右。由上述文献知,支盘桩较等直径桩能明显地提高承载力,而本次试验结果的支盘桩较等直径桩承载力仅高出 13%,效果不是很明显,经分析得到试桩承载力提高效果不显著的原因如下。

(1)SZ2 持力层为卵石,能较好地发挥桩端扩底作用,提高桩基承载力,说明持力层良好对提高扩底桩承载力有很大的作用。

(2)支盘直径较小,其外扩长度只有 20 cm,盘高只有 30 cm。文献[23]中得到增大支盘直径有利于支盘桩承载力的提高,但超过 3D 后,效果减弱,设计支盘直径过大,既不符合实际工程也不经济,文献[23]也得到支盘直径常用 2~2.5 倍的主桩径。

(3)支盘数量只有 2 个,文献[22]中提到支盘数的确定应视土层性质的好坏,支盘数不宜过多,因为当达到极限承载力时,并非每 1 个支盘都能发挥作用或都能达到极限值。支盘数量的增加能有效改善支盘桩的承载特性,提高承载力,但受桩长限制和桩周土体性质影响,达到 4 个时效果已不明显<sup>[23]</sup>。

(4)本次试验支盘间距仅有 1.9 m,由文献[22]知支盘的间距不仅需要结合土层性质的好坏,还应考虑支盘间应力叠加效应,一般情况下,支盘间距为 2 倍的支盘直径,或 4 倍的主桩径为宜。

4 结 语

(1)竖向荷载作用下,桩身轴力沿桩身逐渐减小,由于支盘作用,支盘桩在支盘附近的桩身轴力急剧减小;扩底桩的扩底作用显著,表现出端承桩

特性。

(2)桩土产生相对位移时,扩底端斜侧面范围内处于临空状态,不能提供摩阻力,该段内桩身摩阻力急剧减小至0;支盘桩桩身侧摩阻力在支盘处出现“双峰”现象,支盘处摩阻力较等直径处大,上支盘较下支盘分担荷载多,支盘分担荷载作用显著且表现出明显的时序性。

(3)在10 000 kN荷载作用下,扩底桩桩端阻力最大,等直径桩次之,支盘桩最小,在良好的持力层设置扩底,可显著提高承载力;支盘分担荷载作用显著,在最大荷载作用下,两支盘分担荷载占总荷载的33.7%,在良好土层中设置支盘能提高桩基础承载力。

(4)试桩荷载-沉降曲线均为缓变形,在10 000 kN荷载作用下,扩底桩沉降较等直径桩小38.3%、较支盘桩小26.7%,支盘桩较等直径桩小15.9%;扩底桩承载力较等直径桩高43%、较支盘桩高26.5%,支盘桩承载力较等直径桩高13%。

(5)相关文献及研究表明,支盘桩的承载力较扩底桩和等直径桩的承载力大,此次试验的结果表明支盘桩的承载力较扩底桩的承载力小,说明支盘位置的合理设置及尺寸的选择对承载力的影响较大。

(6)实际工程中可供选择的桩型较多,本文仅对比分析了常用的3种桩型,后续研究可针对更多的桩型和不同的地层开展相关研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王晓谋.基础工程[M].第4版.北京:人民交通出版社,2010.  
WANG Xiao-mou. Foundation engineering[M]. 4th ed. Beijing:China Communications Press,2010. (in Chinese)
- [2] 邓友生,龚维明.挤扩支盘桩与直孔桩的对比试验研究[J].建筑结构,2005,35(7):37-38,56.  
DENG You-sheng,GONG Wei-ming. Comparative experimental study on piles with branches and plates and column piles[J]. Building Structure,2005,35(7):37-38,56. (in Chinese)
- [3] 蔡来炳,李永盛,施峰.花岗岩残积土持力层人工挖孔桩承载力研究[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(1):33-37.  
CAI Lai-bing,LI Yong-sheng,SHI feng. Bearing capacity of hand-dug piles embedded on granite residual clay[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2006,34(1):33-37. (in Chinese)

- [4] 陈飞,吴开兴,何书.挤扩支盘桩承载力性状的现场试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(增2):990-993.  
CHEN Fei,WU Kai-xing,HE Shu. Field tests on load transfer performances of squeezed branch piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(S2):990-993. (in Chinese)
- [5] 胡庆红,谢新宇.深长大直径扩底灌注桩承载性能试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(4):151-157.  
HU Qing-hong,XIE Xin-yu. Experimental study on bearing capacity behavior of deep large diameter cast in place belled pile[J]. Journal of Building Structures,2009,30(4):151-157. (in Chinese)
- [6] 高广运,杨成斌,高盟,等.持力层对大直径扩底灌注桩竖向承载性状的影响[J].岩土工程学报,2012,34(7):1184-1191.  
GAO Guang-yun,YANG Cheng-bin,GAO Meng,et al. Influences of bearing stratum on vertical bearing behaviors of large diameter cast-in-place belled piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(7):1184-1191. (in Chinese)
- [7] 高广运,彭争光,蒋建平,等.厚层黄土状土中扩底墩竖向承载性状[J].岩土力学,2007,28(6):1167-1171.  
GAO Guang-yun,PENG Zheng-guang,JIANG Jian-ping,et al. Vertical bearing behavior of belled pier in thick loess-like soil[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(6):1167-1171. (in Chinese)
- [8] 胡庆红,张士乔,谢新宇.深厚软土中大直径灌注扩底桩受力性状试验研究[J].土木工程学报,2007,40(4):87-91,103.  
HU Qing-hong,ZHANG Tu-qiao,XIE Xin-yu. Experimental study on the bearing capacity of large diameter cast-in-place under-reamed pile in deep soft soils[J]. China Civil Engineering Journal,2007,40(4):87-91,103. (in Chinese)
- [9] 张琰,陈培,赵贞欣.软土地基挤扩支盘桩基础试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(增2):994-997.  
ZHANG Yan,CHEN Pei,ZHAO Zhen-xin. Experimental study on squeezed branch pile foundation in soft soil ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(S2):994-997. (in Chinese)
- [10] 陈飞,黄晓琴.挤扩支盘灌注桩作用机理与应用[J].施工技术,2007,36(增1):53-55.  
CHEN Fei,HUANG Xiao-qin. Mechanism and application of cast-in-situ pile with expanded branches and plates[J]. Construction Technology,2007,36(S1):53-55. (in Chinese)
- [11] 邓友生,龚维明,戴国亮,等.多级支盘桩与等截面直孔桩承载力对比试验[J].重庆建筑大学学报,2005,

- 27(5): 52-56.
- DENG You-sheng, GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, et al. Field comparative experimental study on bearing capacity of both bored pile with branches and plates and column bored pile at the same site[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(5): 52-56. (in Chinese)
- [12] 孙树礼. 大直径超长钻孔灌注桩承载特性试验研究[J]. 铁道工程学报, 2011(10): 66-71.
- SUN Shu-li. Research on bearing characteristics of large-diameter and overlength bored pile[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(10): 66-71. (in Chinese)
- [13] 邱英玉. 兰州地区旋挖钻孔灌注桩竖向承载力特性试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 92-94, 126.
- QIU Ying-yu. Experimental research on vertical load bearing behavior of churning driven cast-in-place piles in Lanzhou[J]. Building Structure, 2011, 41(3): 92-94, 126. (in Chinese)
- [14] 高广运, 蒋建平, 顾宝和. 同场地扩底桩和直桩的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 502-506.
- GAO Guang-yun, JIANG Jian-ping, GU Bao-he. Comparative study on belled and equal-diameter piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 502-506. (in Chinese)
- [15] 黄广龙, 惠 刚, 梅国雄. 钻孔扩底桩原型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1922-1926.
- HUANG Guang-long, HUI Gang, MEI Guo-xiong. Comparative experiment study on pedestal piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1922-1926. (in Chinese)
- [16] 王瑞芳. 大直径等截面桩与扩底桩的承载特性研究[J]. 武汉科技大学学报, 2009, 32(6): 654-658.
- WANG Rui-fang. Behaviors of large diameter pile with straight shaft and pedestal pile[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2009, 32(6): 654-658. (in Chinese)
- [17] 张 蕾, 高广运. 大直径扩底桩尺寸效应的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增 2): 83-87.
- ZHANG Lei, GAO Guang-yun. Size effect of large-diameter belled piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 83-87. (in Chinese)
- [18] 李 枫, 宋焕豹, 周云东. 挤扩支盘桩的承载特性[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 202-205.
- LI Feng, SONG Huan-bao, ZHOU Yun-dong. Bearing behaviors of squeezed branch piles[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2010, 38(2): 202-205. (in Chinese)
- [19] 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 371-375.
- QIAN De-ling. Study on loading transfer law and FEM simulation of squeezed branch pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 371-375. (in Chinese)
- [20] 陈 飞, 鄢泰宁, 卢春华. 挤扩支盘桩荷载传递特性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(3): 49-53.
- CHEN Fei, YAN Tai-ning, LU Chun-hua. Test study on load transfer performances of squeezed branch pile[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(3): 49-53. (in Chinese)
- [21] 张 航, 钱德玲. 挤扩支盘桩单桩竖向承载力可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4197-4201.
- ZHANG Hang, QIAN De-ling. Reliability analysis of vertical bearing capacity of single squeezed branch pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4197-4201. (in Chinese)
- [22] 钱德玲. 挤扩支盘桩受力性状的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 494-499.
- QIAN De-ling. Study on bearing behavior of squeezed branch pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 494-499. (in Chinese)
- [23] 唐孟雄, 李 森. 挤扩支盘桩抗拔承载力的有限元分析[J]. 岩土工程技术, 2008, 22(5): 227-231.
- TANG Meng-xiong, LI Sen. Finite element analysis of uplift bearing capacity of squeezed branch pile[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2008, 22(5): 227-231. (in Chinese)