

扩底抗拔桩承载变形特性模型试验研究

曹卫平^{1,2}, 陶 鹏¹, 李 升¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了解扩底抗拔桩的承载特性和桩身内力的分布, 本文通过室内模型试验研究了长径比、桩身表面粗糙程度这两个因素对扩底桩极限抗拔承载力、桩身轴力和桩侧摩阻力分布的影响, 并与等截面桩进行了对比研究。结果表明: (1) 当桩身长径比 L/d 为 15 和 40 时, 扩底桩能显著提高等截面桩的极限抗拔承载力, 提高幅度为 30.8%~85.7%。(2) 扩底桩抗拔力主要由等截面段桩侧摩阻力和扩大头抗力两部分构成, 前者占总抗拔承载力比重随加载的增加而线性减小, 后者占总抗拔承载力比重随加载的增加而线性增大。极限状态时, 对 $L/d=15$ 与 40 的扩底桩, 扩大头抗力占总抗拔极限承载力的比例分别为 50%和 35%。(3) 扩底桩在桩端附近的轴力小于等截面桩, 且轴力值随加载的增加呈线性增长趋势。(4) 扩底桩在桩端附近的桩侧摩阻力由于扩大头的侧向挤土效应而显著大于等截面桩对应位置处的侧摩阻力。极限状态时, 前者的值约为后者的 3.8 倍。(5) 当扩底桩达到极限抗拔承载力时, 扩底桩在桩端附近处的桩侧摩阻力未达到最值, 有进一步增大的趋势。该研究成果可为扩底抗拔桩的桩身结构设计提供有益参考。

关键词: 扩底抗拔桩; 模型试验; 承载力; 内力

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0030-08

Model experiment on bearing deformation behavior of uplift pedestal piles

CAO Weiping^{1,2}, TAO Peng¹, LI Sheng¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical & Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to reveal the bearing deformation behavior of uplift pedestal piles in sand, model experiments were conducted in sand to investigate the impact of the length to its diameter and the roughness of pile-soil interface on the bearing capacity, axial force and friction resistance of pile side. And the group of straight-shaft piles were set in comparison. The results show that: (1) when the $L/d=15$ and 40, the bearing capacity of straight-shaft pile with enlarged base can be improved and the improving range from 30.8% to 85.7%. (2) the bearing capacity of pedestal pile mainly consists of two parts; the friction resistance of pile side of the equal section, and the resistance of the enlarged base. The former decreases linearly with the increase of the load and the latter increases linearly with the increase of the load. When the bearing capacity increases to its maximum, the sharing portions of the enlarged base are about 50% and 35% for the pedestal pile in $L/d=15$ and 40. (3) the axial force at the end of the pedestal pile is larger than the same position of the straight-shaft pile, and the value of it increases linearly with the increase of loading. (4) the side friction resistance of the enlarged section of the pedestal pile is larger than the corresponding section of the straight-shaft pile owing to the lateral squeezing effect of the enlarged base, and the side friction resistance of the former is about 3.8 times the latter when the bearing capacity reach the maximum. (5) when the bearing capacity reaches the maximum, the side friction near the pile end of the pedestal pile does not appear softening, and there is a tendency to further increase. The conclusions drawn from the study can provide valuable references for the structure design of uplift pedestal piles.

Key words: uplift pedestal pile; model test; bearing capacity; internal force

扩底抗拔桩具有良好的抗拔性能, 近年来在输电线路杆塔基础、浮式海洋结构基础、斜拉桥基础等工程中广泛使用^[1-3]。与对等截面抗拔桩的承载变形特性已经开展了大量的研究相比, 目前对扩底抗拔桩的承载变形性状的研究还很少。扩

底抗拔桩主要依靠扩头段的抗力和等截面段的侧摩阻力共同来承担上拔荷载, 这使得扩底抗拔桩的承载变形性状较仅依靠桩侧摩阻力来承担上拔荷载的等截面抗拔桩而言更为复杂。因此, 深入认识和理解扩底抗拔桩的承载变形特性对工程实

践非常重要。

目前,国内外学者对扩底抗拔桩的承载变形特性已经进行了一系列的研究。王卫东等^[4]基于软土中 $8\sim 12^\circ$ 小扩展角扩底桩原位试验,指出桩端扩底能显著提高抗拔桩的承载力。K. Ilamparuthi等^[5-6]基于砂土中不同类型土工织物加固扩大头周围土体的模型试验,发现土工格室加筋土层能进一步提高扩底桩抗拔承载力。王卫东和常林越^[7-8]分别基于现场足尺试验和数值手段,分析了极限荷载状态下扩底桩抗拔承载力的组成以及破坏模式,指出抗拔承载力由等截面段桩侧摩阻力和扩大头抗力组成。吴江斌等^[9]采用数值方法分析了上拔过程中扩大头抗力的组成以及各组成部分在上拔过程中的变化规律,得出扩大头抗力主要由侧摩阻力和法向压力在竖向的分力组成,两者在上拔过程中不断增大,但前者对抗拔承载力的贡献远大于后者。这些研究分析了扩大头尺寸,以及扩大头抗力的组成对抗拔桩承载力的影响。此外,也有一些学者针对扩大头的承载变形机理以及扩大头与周围土体的相互作用,建立了相关的理论模型,进而推导出计算扩底抗拔桩承载力的理论公式。如孙晓立等^[10]通过将扩大头简化为荷载传递弹簧,并假设桩-土间荷载传递关系为理想弹塑性模型,推导出扩底抗拔桩的承载力与上拔位移关系的解析解。Xu等^[11-12]运用轴对称弹塑性有限元法对扩底抗拔长桩的扩大头周围土体位移及塑性变形进行了分析,用对数螺旋函数建立了土体塑性区包络模型和滑移面模型,并提出了一种计算扩底抗拔长桩承载力的理论方法。由于上述抗拔桩的埋深较浅,不能反映深开挖条件下抗拔桩的承载变形特性。故黄茂松、郦建俊^[13-14]分别采用极限平衡法和离心机模型试验研究了深开挖条件下扩底抗拔桩承载力的损失比,得出损失比随开挖半径的增加而增大,随有效桩长增长而减小。

综上所述,目前对扩底抗拔桩的研究主要集中在对承载特性的研究,对扩底抗拔桩的荷载传递机理以及桩身内力分布的研究鲜有报道。而实际工程中为防止桩身产生显著拉裂缝或被拉断,这就需要对抗拔桩的承载力和桩身内力分布有一定清楚的认识。故本文基于室内砂土中上拔荷载作用下扩底桩的模型试验,研究了长径比和桩身表面粗糙程度这两个因素对扩底桩的极限承载力、桩身轴力、桩侧摩阻力的大小及分布的影响,并与等截面桩进行了对比研究,分析了两者在承载特性和桩身内力分布上的异同,以期对扩底抗拔

桩的桩身结构设计提供有益参考。

1 试验过程

1.1 试验设备

试验设备包含土工模型槽、加载系统、测量系统三部分。模型槽尺寸为 $1.47\text{ m}(\text{长})\times 0.8\text{ m}(\text{宽})\times 2.9\text{ m}(\text{高})$,如图1所示。模型槽骨架用角钢和钢板焊接而成,4个侧面及底面用厚度为 10 mm 的钢化玻璃制作。加载系统由钢梁、定滑轮、砝码、钢绞线组成,为保证竖向上拔荷载与桩轴线位于同一平面且钢绞线传力路径始终竖向,定滑轮可实现前后左右四个方向微调。桩顶荷载采用DYLY-104型轴力传感器测量,桩身应变采用BF120-3AA型电阻式应变片测量,该型应变片基座尺寸为 $6.6\text{ mm}\times 3.4\text{ mm}$,敏感栅尺寸为 $3.0\text{ mm}\times 2.4\text{ mm}$,电阻值为 $121.3\pm 0.1\ \Omega$,灵敏系数为 $2.1\pm 1\%$,室温应变极限为 $20\ 000\ \mu\text{m}/\text{m}$ 。采用CML-1H-32型电子应变仪采集应变值,桩顶竖向位移采用百分表读取。

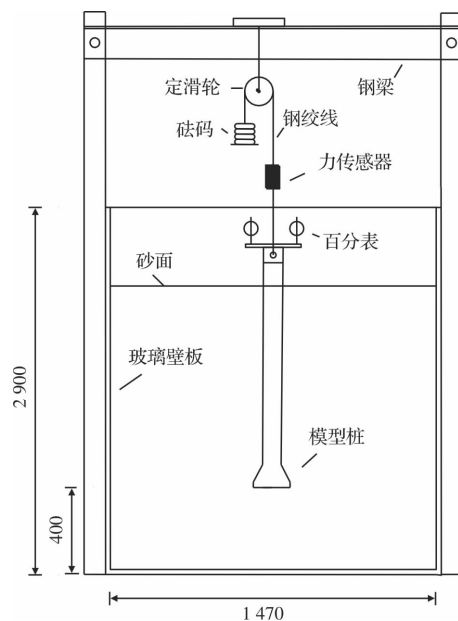


图1 试验装置图(单位: mm)

Fig. 1 Layout of test setup(Unit: mm)

1.2 试验方案

试验分两组,第一组长径比 $L/d=15$ (简称“短桩”),第二组长径比 $L/d=40$ (简称“长桩”)。每组包含2根桩身表面光滑和粗糙的等截面桩以及2根桩身表面光滑和粗糙的扩底桩。试验方案如表1所示。

1.3 试验材料

模型桩用外径为 40 mm 、壁厚 2.0 mm 的硬质PVC管制作,桩长为 600 mm 、 $1\ 600\text{ mm}$ 。首先,

两次后即可加下一级荷载. 某级荷载作用下的桩顶竖向位移大于前一级荷载作用下的 2 倍且 24 h 尚未稳定, 则终止加载. 每级荷载施加后每第 5 min、10 min、15 min 时各测读一次桩顶竖向位移, 以后每隔 15 min 读一次, 累计 1 h 后每半小时读一次, 各级荷载作用下桩顶竖向位移稳定后对桩身各截面处的应变进行一次采集.

2 试验结果及其分析

2.1 桩顶上拔荷载与上拔位移关系曲线及桩的上拔

图 4 为桩顶上拔荷载 U 与上拔位移 Δ 的关系曲线. 不论长径比是 15 还是 40, 对桩身表面粗糙程度相同的等截面桩与扩底桩而言, 图中曲线可分为以下三个阶段. (1) 当上拔荷载较小时, 扩底桩与等截面桩的 $U-\Delta$ 曲线基本重合, 此时扩底桩抗拔承载力全由等截面段侧摩阻力提供, 扩头段没有发挥抗拔力. (2) 当上拔荷载逐渐增加, 扩底桩与等截面桩的 $U-\Delta$ 曲线存在差异, 同一桩顶位移下, 扩底桩所受上拔荷载要大于等截面桩, 此时扩底桩的抗拔力由等截面段侧摩阻力和扩头段抗拔力共同承担, 扩头段开始提供抗拔力. (3) 当上拔荷载进一步增大, 扩底桩与等截面桩的 $U-\Delta$ 曲线差异更加显著, 等截面桩 $U-\Delta$ 曲线出现陡升, 而扩底桩 $U-\Delta$ 曲线继续保持增长趋势, 此时等截面段侧摩阻力逐渐发挥至极限值, 与此对应的等截面桩抗拔承载力达到峰值. 而扩底桩在等截面段侧摩阻力发挥至极限值后, 由于扩大端的作用进一步发挥, 使得抗拔力继续增大, 直至扩大端周围土体发生破坏, 抗拔承载力达到极限值.

从图 4 还可以看出, 当长径比相同时, 不论等截面桩还是扩底桩, 桩身表面粗糙抗拔桩的 $U-\Delta$ 曲线比表面光滑抗拔桩的 $U-\Delta$ 曲线更为平缓. 同一上拔荷载下, 前者的桩顶位移要小于后者. 另外, $U-\Delta$ 曲线均为陡变形曲线. 参考规范[17], 对陡变形曲线, 单桩竖向抗拔极限承载力取相应于陡升段起点的荷载值. 各单桩竖向极限抗拔承载力如表 2 所示.

由表 2 可见扩底桩的极限抗拔承载力显著大于等截面桩. 对于 $L/d=15$ 的短桩, 当桩身表面光滑和粗糙时, 抗拔承载力提高幅度分别为 85.7% 和 66.7%. 对于 $L/d=40$ 的长桩, 这个幅度分别为 30.8% 和 5.9%. 由此说明, 桩长增加, 扩大头对抗拔桩承载力的贡献率降低. 当长径比相同时, 不论等截面桩还是扩底桩, 桩身表面粗糙比光滑时能承受更高的上拔荷载. 对 $L/d=15$ 的扩底短

桩, 提高幅度降低 19%, $L/d=40$ 的扩底长桩, 提高幅度降低 25%.

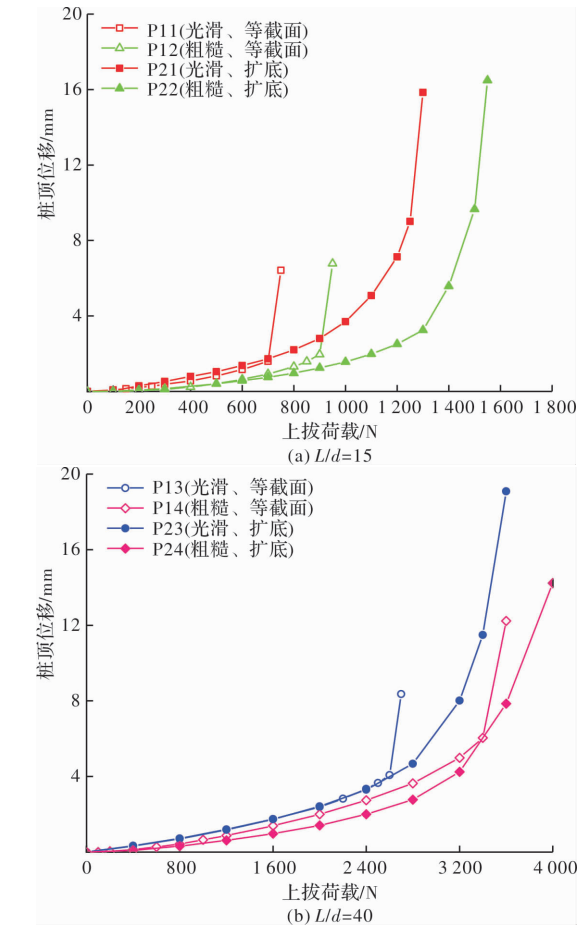


图 4 $U-\Delta$ 曲线

Fig. 4 The curve of $U-\Delta$

表 2 单桩极限抗拔承载力

Tab. 2 The ultimate uplift capacity of single piles

| 长径比 L/d | 桩表面 | 等截面桩 | 极限 | | 极限 | |
|--------------|-----|------|---------|----------|---------|-------------------------|
| | | | 上拔承载力/N | 扩底桩承载力/N | 上拔承载力/N | 扩底桩比等截面桩极限抗拔承载力增加的百分比/% |
| 15 | 光滑 | P11 | 700 | P21 | 1 300 | 85.7% |
| | 粗糙 | P12 | 900 | P22 | 1 500 | 66.7% |
| 40 | 光滑 | P13 | 2 600 | P23 | 3 400 | 30.8% |
| | 粗糙 | P14 | 3 400 | P24 | 3 600 | 5.9% |

扩底桩抗拔力由等截面段桩侧摩阻力、扩大头抗力、桩端吸力三部分组成. 图 5 为不同上拔荷载下这三部分占上拔荷载的比重. 从中可以看出, 当上拔荷载较小时, 侧摩阻力占上拔荷载的比重较高, 扩大头与桩端吸力占上拔荷载的比重较低. 此时, 扩底桩抗拔力主要由等截面段侧摩阻力提供, 桩端吸力和扩大头抗力提供的抗拔力很小. 随着加载的增大, 扩大头抗力占上拔荷载的比重

随上拔荷载的增加近似成线性增长趋势,如图中的线 l_1 与线 l_2 ,桩侧摩阻力占上拔荷载的比重随加载的增加近似成线性减少趋势,如图中的线 l_3 、 l_4 。此过程中桩端吸力占上拔荷载的比重很低,且逐渐为零,这说明桩端吸力几乎不贡献抗拔力。当上拔荷载达到极限抗拔承载力时, $L/d=15$ 的短桩桩侧摩阻力与扩大头抗力占抗拔极限承载力的比重均约50%, $L/d=40$ 的长桩桩侧摩阻力、扩大头抗力占抗拔极限承载力的比重分别约为75%、35%。

从图5还可以看出:(1) l_2 的起点落后 l_1 。这说明,随着上拔荷载的逐渐施加,桩侧摩阻力由桩顶向桩端逐渐传递,而长桩比短桩增加的桩长使得长桩的扩大头抗拔力的发挥要滞后于短桩。(2)同一上拔荷载作用下,线 l_1 陡于 l_2 且 l_1 高于 l_2 。这说明短桩、长桩的扩大头虽然位于同一砂土中,且扩大头尺寸相同,但埋置深度对扩大头发挥抗力有显著影响,当上部荷载一定时,扩大头埋置深度越浅,越有利于扩大头发挥抗拔作用。此外,由上述分析可知长桩抗拔力的增量主要来源于增加桩长的侧摩阻力提供。因此,桩长增加后,扩大头对抗拔力的贡献率降低。

从图5中还可以看出,同一长径比下,桩身表面粗糙的扩底桩扩大头占上拔荷载的比重低于桩身表面光滑的扩底桩。这说明,桩身表面粗糙相比桩身表面光滑,扩大头对抗拔力的贡献率降低。

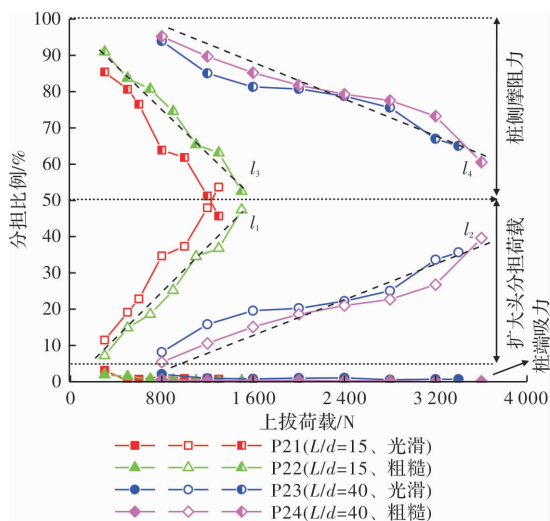


图5 扩底桩上拔力各组成部分随上拔荷载的变化
Fig. 5 The sharing proportion of each part of bearing capacity of pedestal piles varies with the uplift load

2.2 扩底桩桩身轴力的分布特征

抗拔直桩在桩顶上拔荷载作用下桩身横截面轴力可由下式求得,即

$$N_i = \bar{\epsilon}_i E_p A \quad (1)$$

式中: N_i 为桩身第 i 截面轴力; $\bar{\epsilon}_i$ 为桩身第 i 截面处两个应变片的应变平均值; E_p 为模型桩桩材弹性模量; A 为模型桩横截面面积。

图6为等截面桩与扩底桩在不同上拔荷载作用下桩身轴力的分布曲线。从中可见,不论短桩、长桩,桩身轴力均随桩顶荷载的增大而增加,沿桩身深度的增加而减小。与等截面桩桩端桩身轴力处于较低水平不同的是,扩底桩由于扩大头的存在,使得桩端附近的桩身轴力处于较高的水平,且轴力值随着加载不断增大(图6中的虚线框)。由桩端受力平衡可知,用桩身最后一个测点的轴力可近似等于扩头段提供的抗力,而前文分析得扩头段提供的抗拔力随上拔荷载的增加成图5中线性增长趋势。故扩底桩桩端附近的轴力随加载的增加成线性增长趋势。

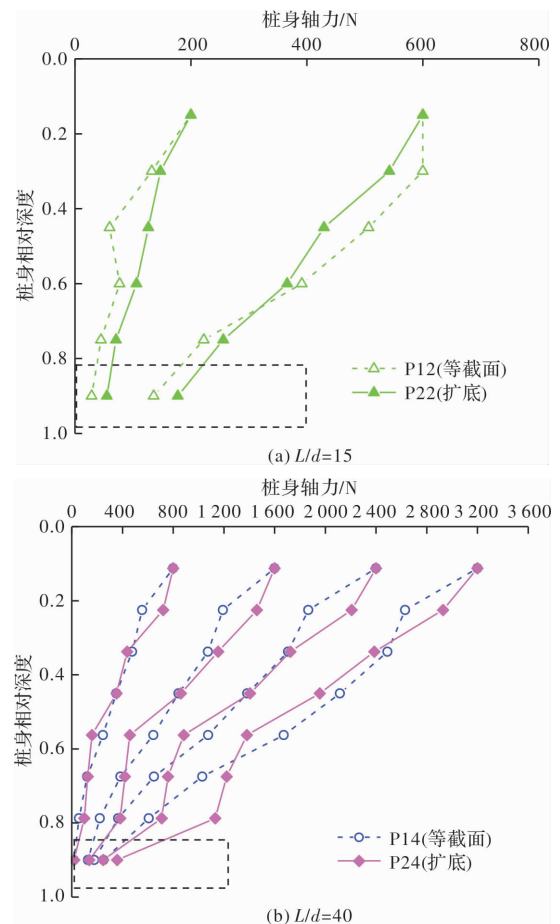


图6 轴力沿桩身的分布

Fig. 6 Distribution of axial force along pile shaft

2.3 扩底桩桩身侧摩阻力的分布特征

2.3.1 不同荷载水平下扩底桩侧摩阻力沿深度的分布

桩顶上拔荷载作用下,抗拔直桩桩侧某段的平均侧阻力可按下式计算,即

$$q_{si} = \frac{N_i - N_{i-1}}{ul_i} \quad (2)$$

式中: q_{si} 为桩侧第 i 段的平均侧阻力; N_i 、 N_{i-1} 分别为桩身第 i 截面及第 $i-1$ 截面处轴力; u 为桩身周长; l_i 为桩身第 i 截面与第 $i-1$ 截面间的桩段长。

图 7 为不同上拔荷载水平下等截面桩与扩底桩桩侧平均侧摩阻力沿深度分布曲线。从图 7(a) 可以看到, 当上拔荷载水平较低时, 等截面桩与扩底桩桩侧摩阻力沿深度分布比较均匀, 分布形态基本一致, 此时两者的上拔荷载主要由桩侧等截面段侧摩阻力提供, 对扩底桩而言, 扩大头未发挥显著抗拔力。随着荷载水平的逐渐增加, 等截面桩与扩底桩的桩侧摩阻力进一步发挥增大, 侧摩阻力分布曲线形态差异较大, 等截面桩与扩底桩的侧摩阻力分别在桩身相对深度 0.67、0.83 处逐渐产生峰值。当上拔荷载增至各桩的极限承载力时, 扩底桩的侧摩阻力峰值约为前者的 2.7 倍。在桩端附近(桩身相对深度 0.83), 扩底桩的侧摩阻力显著大于等截面桩, 处于极限状态时, 前者的值约为后者的 4.3 倍。

从图 7(b) 可以看到, 当桩顶荷载水平较低时, 等截面桩与扩底桩侧摩阻力沿桩身分布比较均匀, 形态基本一致。此时, 两者的上拔力主要由桩侧等截面段侧摩阻力提供, 对扩底桩而言, 扩头段未提供抗力。随着上拔荷载的逐渐增加, 等截面桩与扩底桩侧摩阻力沿桩身分布形态差异较大。等截面桩的侧摩阻力分布形态依旧比较均匀, 在相对深度 0.62 处逐渐产生摩阻力峰值。而扩底桩的侧摩阻力在相对深度 0.84 处逐渐产生侧摩阻力峰值。当上拔荷载增至各桩的极限承载力时, 扩底桩的侧摩阻力峰值约为等截面桩侧摩阻力峰值的 1.2 倍。在桩端处(桩身相对深度 0.84), 扩底桩的侧摩阻力显著大于等截面桩, 处于极限状态时, 前者的值约为后者的 1.9 倍。

综上所述, 不论 L/d 为 15 还是 40, 等截面桩侧摩阻力沿桩身分布比较均匀, 在桩身相对深度 0.6 处均会出现侧摩阻力峰值, 该深度对应长径比 $L/d=15$ 、40 分别约为 $9d$ 、 $24d$ 。扩底桩侧摩阻力沿桩身分布差异较大, 在桩身相对深度 0.8 处, 侧摩阻力显著大于其余桩段, 加载至极限状态时, 桩端附近的侧摩阻力值约为等截面桩对应深度处侧摩阻力值的 3~4 倍, 该深度对应长径比 $L/d=15$ 、40 分别约为 $12d$ 、 $32d$ 。

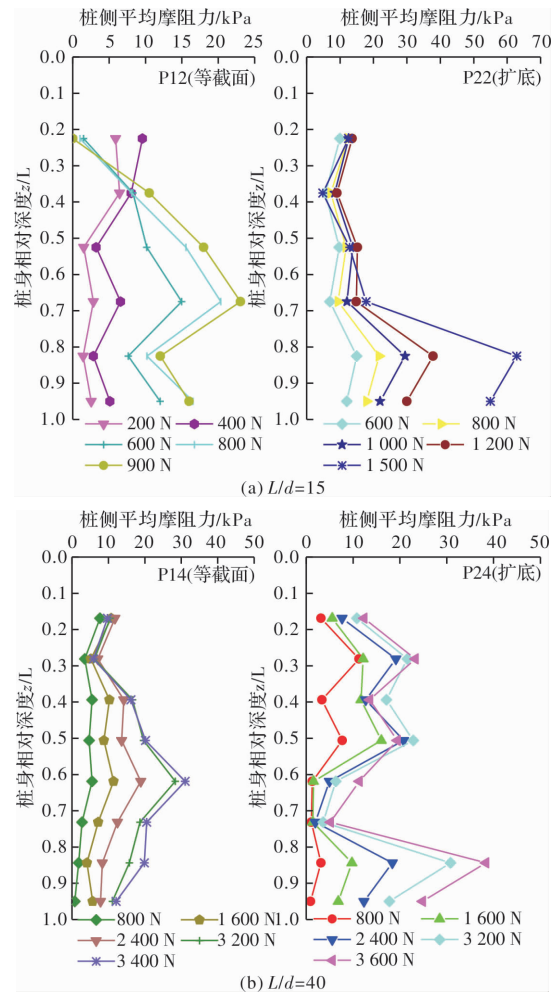


图 7 桩侧平均摩阻力沿深度的变化

Fig. 7 Distribution of average skin friction along pile shaft

2.3.2 扩底桩桩端附近桩侧摩阻力随不同荷载水平的分布特征

对扩底桩而言, 由于扩大头的存在而使得扩头段侧摩阻力较等截面桩对应位置处更加复杂。图 8 为相对深度为 0.8 处(以下简称“桩端”)桩侧摩阻力随荷载水平的变化。从图中可见, 各桩侧摩阻力随加载的增加而增大, 未出现软化现象, 且有继续增加的趋势, 说明侧摩阻力还可进一步发挥。同一上拔荷载下, 桩侧摩阻力大小依次为, 桩身表面光滑的扩底桩 > 桩身表面粗糙的扩底桩 > 桩身表面光滑的等截面桩 > 桩身表面粗糙的等截面桩。

从图 8(a) 中可见, 当上拔荷载从 0 开始增加时, 对于 $L/d=15$ 的短桩, 桩端附近侧摩阻力便开始发挥作用, 而对于 $L/d=40$ 的长桩, 桩端附近侧摩阻力未开始发挥作用(图 8(b) 中虚线框)。由此说明, 对于 $L/d=15$ 的短桩, 加载初期, 桩顶荷载便能传递到桩端, 而对于 $L/d=40$ 的长桩, 加载初期, 桩顶荷载主要由增加的等截面段桩侧

摩阻力承担,故长桩桩端侧摩阻力的发挥要滞后于短桩。

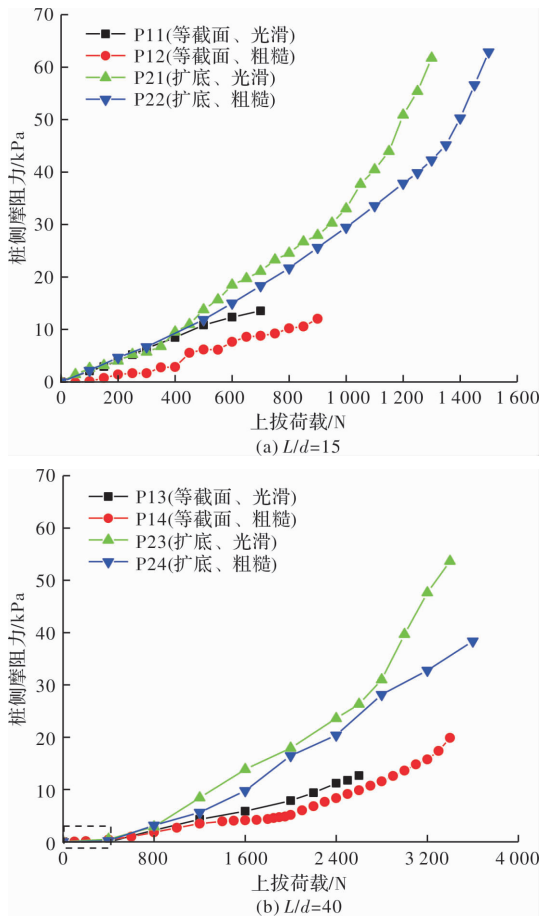


图8 桩端附近桩侧平均摩阻力随上拔荷载的变化

Fig. 8 Variations of average skin friction near pile bottom versus uplift load

当上拔荷载进一步增加,桩端附近处,扩底桩的侧摩阻力逐渐大于等截面桩,说明扩底桩的侧摩阻力发挥程度比等截面桩更充分。随后等截面桩达到承载力极限值,而扩底桩桩端处侧摩阻力则进一步发挥直至达到承载力极限值。

达到抗拔极限承载力时,不论长径比、桩身表面粗糙程度,桩端处,扩底桩的侧摩阻力约在60 kPa左右,等截面桩的侧摩阻力约在16 kPa左右,前者约为后者的3.8倍。这说明扩大头的侧向斜面在上拔过程中对周围土体产生挤压而使得扩底桩桩-土界面上的法向力比等截面桩同样位置处的法向力要大的多,因而使得扩底桩桩端附近桩侧摩阻力值比等截面桩同样位置处桩侧摩阻力值有显著增加。

从图8还可以发现,桩侧摩阻力峰值与极限承载力的出现并不是同步的。在桩端处,当桩达到极限抗拔承载力时,侧摩阻力还有继续发挥的潜力,并未出现软化的现象。

3 结论

(1)扩底桩能显著提高等截面桩的极限抗拔承载力,桩长越短,桩表面粗糙程度越低,提高幅度越大。对于 $L/d=15$ 的扩底短桩,提高幅度为66.7%~85.7%,而对于 $L/d=40$ 的扩底长桩,提高幅度仅为5.9%~30.8%。

(2)扩底桩抗拔力主要由等截面段侧摩阻力、扩头段抗力两部分构成,等截面段侧摩阻力随加载的增加而线性减小,扩大头抗力随加载的增加而线性增大,桩端吸力对抗拔承载力的贡献可忽略不计。极限状态时, $L/d=15$ 的扩底桩桩侧摩阻力、扩大头抗力占抗拔极限承载力比重均约50%, $L/d=40$ 的扩底桩桩侧摩阻力、扩大头抗力占抗拔极限承载力比重分别约为75、35%。 $L/d=40$ 比 $L/d=15$ 的扩底桩抗拔承载力的增加值由增加桩长的等截面段侧摩阻力提供。此外,当扩底桩的桩身表面粗糙程度增加时,扩大头对扩底桩抗拔承载力的贡献率降低。

(3)扩底桩在等截面段桩身轴力分布与等截面桩在同样桩身位置处桩身轴力分布相比无明显差异。在桩端附近,与等截面桩桩端附近处轴力近乎为零不同的是,扩底桩在桩端处的轴力小于等截面桩,且轴力值随加载的增加而呈线性增长趋势。

(4)扩底桩在桩端附近的侧摩阻力由于扩大头的侧向挤土效应而显著大于桩身其余桩段侧摩阻力和等截面桩对应位置处的侧摩阻力。当上拔荷载达到极限承载力时,扩底桩桩端附近的侧摩阻力未出现软化现象,有进一步增大的趋势。此时扩底桩的侧摩阻力值约为等截面桩对应位置处摩阻力值的3.8倍。

(5)本文研究得到的结论可以为抗拔桩桩身结构设计提供有益的参考。但需要说明的是上述结论是建立在砂土地基中模型试验的基础上,对粘性土不一定适用,需另外开展相关研究工作。

参考文献 References

- [1] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
- [2] 滕延京, 王卫东, 康景文, 等. 基础工程技术的新进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(4): 1-21.
TENG Yanjing, WANG Weidong, KANG Jingwen et al. The new development of the technology of building foundation engineering [J]. China Civil Engineering

- Journal, 2016, 49(4):1-21.
- [3] 吴江斌,王向军,王卫东. 桩侧注浆与扩底抗拔桩的极限载荷试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1):154-161.
- WU Jiangbin, WANG Xiangjun, WANG Weidong. Comparison on bearing behavior of uplift piles with side-grouting and enlarged base by full-scale tests[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(1):154-161.
- [4] 王卫东, 吴江斌, 许亮, 等. 软土地区扩底抗拔桩承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1418-1422.
- WANG Weidong, WU Jiangbin, XU Lianget al. HUANG Shaoming. Full-scale field tests on uplift behavior of piles with enlarged base[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1418-1422.
- [5] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A. The influence of soil reinforcement on the uplift behaviour of belled piles embedded in sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(1): 1-22.
- [6] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A. Predictions of the uplift response of model belled piles in geogrid-cell-reinforced sand [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(2): 89-109.
- [7] 王卫东, 吴江斌, 王向军. 基于极限载荷试验的扩底抗拔桩承载变形特性的分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1330-1338.
- WANG Weidong, WU Jiangbin, WANG XiangJun. Ultimate load tests on bearing and deformation behavior of uplift piles with enlarged base[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (7): 1330-1338.
- [8] 常林越, 王卫东, 吴江斌. 基于极限承载力试验的扩底抗拔桩承载特性数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 665-671.
- CHANG Lingyue, WANG Weidong, WU Jiangbin. Numerical simulation analysis of uplift behavior of enlarged base piles based on uplift ultimate bearing capacity test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (S1): 665-671.
- [9] 吴江斌, 王卫东, 黄绍铭. 扩底抗拔桩扩大头作用机制的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2115-2120.
- WU Jiangbin, WANG Weidong, HUANG Shaoming. Uplift mechanism of enlarged base of pedestal piles by numerical analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2115-2120.
- [10] 孙晓立, 莫海鸿. 扩底抗拔桩变形的解析计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(z1):3008-3008.
- SUN Xiaoli, Mo Haihong. An analytical calculation method for displacement of under-reamed tension piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Z1):3008-3008.
- [11] XU H F, YUE Q Z Q, QIAN Q H. Failure model of soil around enlarged base of deep uplift piles[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2012, 165(5): 275-288.
- [12] XU H F, YUE Z Q, QIAN Q H. Predicting uplift resistance of deep piles with enlarged bases[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2009, 162(4): 225-238.
- [13] 黄茂松, 郦建俊, 王卫东, 等. 开挖条件下抗拔桩的承载力损失比分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1291-1297.
- HUANG Maosong, LI Jianjun, WANG Weidong, et al. Loss ratio of bearing capacity of uplift piles under deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1291-1297.
- [14] 郦建俊, 黄茂松, 王卫东, 等. 开挖条件下抗拔桩承载力的离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 388-396.
- LI Jianjun, HUANG Maosong, WANG Weidong, et al. Centrifugal model tests on bearing capacity of uplift piles under deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 388-396.
- [15] 曹卫平, 陆清元, 樊文甫, 等. 竖向荷载作用下斜桩荷载传递性状试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3048-3056.
- CAO Weiping, LU Qingyuan, FAN Wenfu, et al. Experimental study of load transfer behavior of batter piles under vertical loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3048-3056.
- [16] 曹卫平, 夏冰, 赵敏, 等. 砂土中水平受荷斜桩的 p-y 曲线及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 743-753.
- CAO Weiping, XIA Bing, ZHAO Min, et al. p-y curves of laterally loaded single battered piles in sand and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(03): 743-753.
- [17] 中华人民共和国行业标准编写组. 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.