

# 微型抗拔桩基础受力特性研究

周俊鹏<sup>1</sup>, 黄雪峰<sup>1</sup>, 刘自龙<sup>2</sup>, 朱中华<sup>2</sup>

(1. 后勤工程学院 军事土木工程系, 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 重庆 401311;

2. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050)

**摘要:** 目前微型桩基础在锚定、抗拔方面的研究非常匮乏, 为确定其作为戈壁滩光伏电站抗拔基础的效果, 进行了现场单桩抗拔静载荷试验, 并在试桩桩身布置钢筋应力计, 桩头处测量上拔位移。研究结果表明: 轴力和侧摩阻力沿桩身的变化规律不仅与桩周土层性质有关, 还与桩顶荷载大小有关, 且轴力和侧摩阻力均存在一有效桩长  $H$ 。土体与桩体之间的阻力和钢筋与桩体之间的阻力大小决定了微型桩的破坏模式: 当前者小于后者时, 破坏形式为桩周土体隆起, 并出现径向和环向的裂缝; 当前者大于后者时, 破坏模式为钢筋被拔出, 桩体混凝土出现裂缝。在试验条件下, 微型桩的极限抗拔承载力与极限抗压承载力之比取  $\zeta' = 0.58$  较合适, 建议取  $\zeta' = 0.58$  作为本地区同类型微型桩的计算参数。

**关键词:** 微型桩基础; 单桩抗拔静载荷试验; 桩身轴力; 桩侧摩阻力; 单桩极限承载力

中图分类号: TU44

文献标识码: A

## Mechanical properties research on mini-pile foundation

Zhou Junpeng<sup>1</sup>, Huang Xuefeng<sup>1</sup>, Liu Zilong<sup>2</sup>, Zhu Zhonghua<sup>2</sup>

(1. Logistical Engineering University, Department of Civil Engineering, Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironmental Protection, LEU, Chongqing 401311, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The research on anchorage and uplift of mini-pile is scarce at present. In order to make clear the uplift effect of mini-pile used as the foundation of photovoltaic power station in Gobi desert, single pile static loading test is carried out. Reinforcement stressometer are arranged in the piles shaft and displacement meters are installed on the pile top. The results show that the axial force and lateral friction along the pile are not only related to the level of the pile top load, but also related to the property of surrounding soil, and the axial force and lateral friction are effective within a certain pile length  $H$ . The failure mode of mini-pile is dominated by the resistance between the pile shaft and soil, the steel bar and the pile shaft. When the former is less than the latter, the soil around pile will uplift, and radial and circumferential cracks appears; on the contrary, steel bar will be pulled out and the reinforced concrete cracks. The ultimate uplift bearing capacity of the test mini-pile is 0.58 of ultimate compressive bearing capacity. It is recommended to take 0.58 in the design calculation for the same type of pile in this region.

**Key words:** mini-pile foundation; pile static loading test; axial force; lateral friction; bearing capacity of single pile

## 0 引言

近年来, 我国光伏发电产业迅速崛起, 在戈壁滩已建和在建的光伏发电站更是不胜枚举。由于该地区常年风荷载较大, 因此光伏电站锚固基础的抗拔问题十分突出, 需设置大量的抗拔基础才能满足抗拔要求。目前, 我国常用的几种光伏支架锚固

基础型式主要有钻孔灌注桩基础、植筋基础、条形或独立基础、预制桩基础、钢螺旋桩基础等。综合考虑该地区的地质条件和工程的经济性, 建设方

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-08-18

作者简介: 周俊鹏 (1991 -), 男 (汉族), 山西忻州人, 硕士研究生。

选择采用微型桩基础作为光伏电站的锚固基础。

目前,微型桩<sup>[1]</sup>主要用在建筑物、构筑物的基础托换和土坡滑动防治等方面。吕凡任等<sup>[2]</sup>从微型桩的起源、发展、工程应用和承载性状等方面做出了较全面的总结;杜明芳等<sup>[3]</sup>通过对比不同支护结构在基坑支护中的抗变形能力,得出了微型桩复合土钉墙在基坑支护中的抗变形能力较高的结论;王伯森<sup>[4]</sup>结合实际工程,分析了微型桩处理建筑物地基的效果和规律;魏鉴栋等<sup>[5]</sup>通过进行软土地基中微型桩单桩和群桩的抗拔试验,探讨了微型桩直桩和斜桩的抗拔系数以及群桩效应系数;苏荣臻等<sup>[6]</sup>结合现场试验,对微型桩的水平承载力进行了研究。但是对于微型桩基础在锚定、抗拔方面的研究,还没有形成系统的理论,因此,通过现场试验对微型桩的承载性能和破坏模式进行研究很有必要。

甘肃高台县高崖子滩百万千瓦级光伏产业园是一个大规模的工程项目,以该工程为依托,开展了不同尺寸的微型桩的现场足尺试验,因此可直接认识微型桩在戈壁地区的侧摩阻力分布规律及其发挥特性以及微型桩在上拔荷载下的荷载位移规律。以此为基础,可深入开展承载机理和破坏模式的理论研究,不仅对本工程锚固基础的选择具有十分重要的工程价值,同时还可为戈壁地区其他同类工程中微型桩基础的设计和理论研究提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 场地条件

试验场地位于高崖子滩百万千瓦级光伏产业园的东北角,根据该区域的地质资料,场地属于细砾质堆积型戈壁滩<sup>[7]</sup>,其土层剖面主要特征为:表层覆盖不同粒径的砾石,其下有细砂,随后即为砂砾混合层。具体土层有关参数见表1。试验场地的地下水埋藏较深,故可不考虑地下水对微型桩基础的影响。

表1 地基土物理力学性质指标

Table 1 Physic-mechanical indexes of ground soil

序号	土层	层厚 (m)	重度 $\gamma$ (kN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角 $\phi$ (°)	承载力 $f_{ak}$ (kPa)
1	细砂	0.8	16.8	28	130
2	圆砾	4	20.3	35	250

### 1.2 试验方案

本次现场足尺试验共包括不同尺寸的8根微型桩,其具体尺寸如表2所示。本次试验的目的是对微型桩进行竖向抗拔静载试验,抗拔静载试验方法主要是慢速维持荷载法,具体操作按照现行规范进

行<sup>[8]</sup>。微型桩现场试验装置如图1所示。

表2 微型桩尺寸

Table 2 Size of mini-piles

微型桩编号	长度 (m)	直径 $d$ (mm)	应力计埋设位置 (m)
1#	2	150	0.6、1.5
2#	2	220	0.6、1.5
3#	3	150	0.6、1.4、2.2
4#	3	220	0.6、1.4、2.2
5#	4	150	0.6、2、3.4
6#	4	220	0.6、2、3.4
7#	9	150	0.5、2.1、3.7、5.3、6.9、8.5
8#	9	220	0.5、2.1、3.7、5.3、6.9、8.5



图1 现场试验装置

Fig. 1 Devices in test site

试验采用坦克钻钻孔,成孔后下放钢筋并浇筑混凝土,试桩采用C35混凝土,每根试验桩均插入一根HRB400直径25mm的钢筋。戈壁滩地区砂砾土地层孔隙较大<sup>[9]</sup>,其中填充大量黏性土,由于长时间的固结作用,故钻进时能形成直立钻孔。

为测得试验过程中的完整数据,沿微型桩桩体布设应力计,对于不同长度的微型桩布设位置略有不同,其具体位置详见表2。试验用应力计为HXG型钢弦应力计,在试验过程中,用HQ-16型钢弦式应力数据采集仪对试验数据进行现场采集,对微型桩内力进行观测,以便直观地检测微型桩各位置在荷载作用下的内力。

## 2 试验结果分析

本次试验中,试验数据较多,图2列出了4种长度的微型桩的荷载与顶部位移( $Q-s$ )的变化曲线,而沿微型桩长度范围内的内力则以微型桩轴力和侧摩阻力的形式在下节中予以分析。

由图2可知,这8根微型桩的 $Q-s$ 曲线发展趋势很相近,且可以明显地看出:这些曲线大致可以分成弹性、弹塑性和塑性发展的三个阶段<sup>[10]</sup>。在较小荷载(小于30kN的荷载)作用下,位移均比较小,且随着荷载的增大位移发展比较缓慢,此阶段为弹性阶段;随着荷载的增大,试验微型桩逐渐

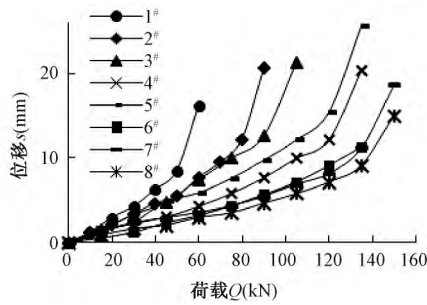


图 2 单桩竖向抗拔静载试验的  $Q-s$  曲线  
Fig. 2  $Q-s$  curves of single mini-pile in vertical static loading test

出现塑性变形, 并随着荷载增大, 塑性变形逐渐增大, 其所占比例也随之不断增大, 此阶段为变形的弹塑性阶段; 随着荷载的继续增大, 微型桩达到了其极限荷载, 此时变形完全为塑性变形。并且由图 2 中可以反推出各根微型桩的极限荷载, 如对于 3# 桩来说, 其极限荷载为 90kN 左右。由图 2 还可以看出: 当未达到极限荷载时, 8 根桩的桩头位移为 10 ~ 15mm 左右, 而当外力增加到极限荷载时, 桩头位移快速增加, 可达 18 ~ 25mm 左右, 这对于上部结构的抗拔很不利。因此, 对于位移控制要求严格的建筑物、构筑物来说, 不仅要控制微型桩位移的发展, 同时也应控制微型桩的外荷载, 使其保持在极限荷载以内。

试验过程中, 7# 桩在荷载达到 160kN 时, 钢筋与桩体之间出现了明显的裂缝; 8# 桩在荷载达到 160kN 时钢筋被拔断。而由图 2 可以看出, 1# ~ 6# 桩的极限荷载不断增大, 且 6# 桩的极限荷载达到 150kN。相对于 6# 桩, 7# 和 8# 桩的极限荷载显得很小, 这是因为 7# 和 8# 桩的埋深较大, 导致桩体与土层之间的摩阻力大于微型桩上部桩体与钢筋之间的摩阻力, 从而其极限承载力由钢筋与桩体之间的侧摩阻力的大小控制, 具体分析见 3.2 节。

### 3 微型桩轴力与侧摩阻力分布规律

#### 3.1 轴力沿微型桩长度的分布

本小节选用 8 根微型桩中不同长度的微型桩各一根, 即选取 1#、3#、5# 和 7# 桩为代表进行分析。图 3 (a) - (d) 分别为上述 4 根微型桩在不同荷载等级下轴力沿微型桩长度的分布图, 从图 3 中可较直观地看到不同埋深处微型桩的受力情况, 进而可比较荷载在不同长度微型桩中的传递特性。微型桩在上拔过程中, 桩端拉力为零。

由于 4 根微型桩的加荷等级和最终加荷大小有所不同, 因此对于 1# 桩取荷载 10kN、30kN 和 60kN

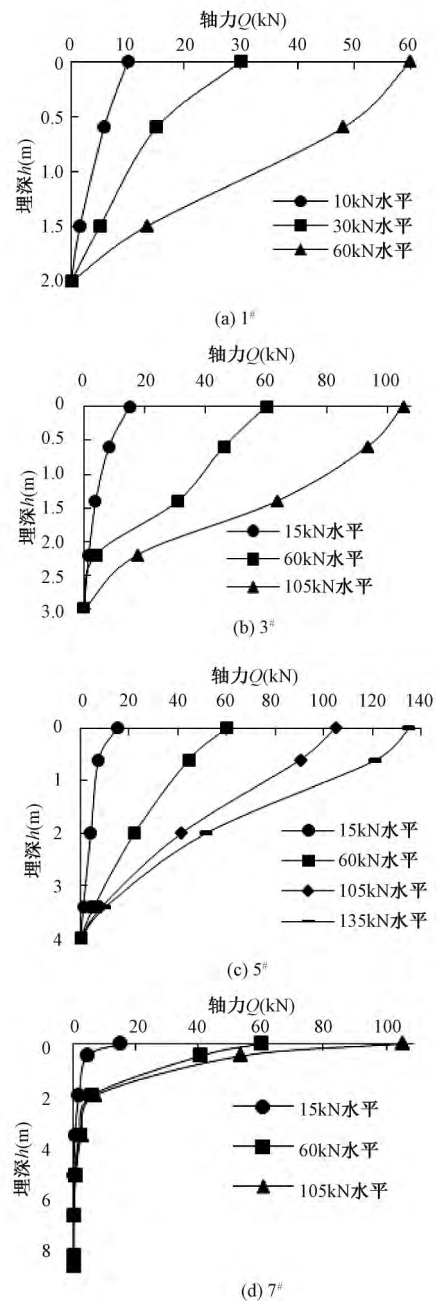


图 3 桩身轴力沿深度的分布曲线  
Fig. 3 Curves of axial force of mini-pile with depth

分别对应低、中和高 3 种荷载水平; 对于 3#、5# 和 7# 桩来说, 取荷载 15kN、60kN 和 105kN 分别对应低、中和高 3 种荷载水平。

由图 3 可知, 抗拔桩处于中等荷载水平时, 微型桩的轴力分布并不是沿桩长均匀分布, 而是随着埋深的增加呈非线性衰减; 当荷载处于高水平范围时, 不同埋深处的轴力相较于中水平荷载的仍然有所增加, 这表明微型桩的强度在此时仍然有发挥的余地。

综合比较图 3 (a) - (d) 可知, 抗拔微型桩

上部桩体的轴力变化幅度较大,而下部桩体轴力变化幅度较小;在不同荷载等级作用下,底部桩体的轴力大小基本不发生变化,而且底部桩体所受到的轴力很小。所以,微型桩抗拔力并不随长度的增加而提高,而是存在一经济合理的临界桩长  $H$ 。这与 N. S. Mattes 和 H. G. Poulos<sup>[11]</sup> 所提出的结论一致,即随着长径比的增加,传递到下部的荷载越小,相应的侧阻发挥越小。朱彦鹏等<sup>[12]</sup> 认为当长径比大于 40 时,传递到下部土层中的力趋于 0,对于本试验中 7<sup>#</sup> 桩,长径比  $l/d = 60$ ,所得结果与文献分析一致。这也正是第二节中 7<sup>#</sup> 和 8<sup>#</sup> 桩极限荷载较小的原因。因此,在设计时,不应通过过度的增加微型桩的长度来提高抗拔微型桩的承载力,以免造成浪费。

### 3.2 侧摩阻力沿微型桩长度的分布

微型桩在受到外力作用后,首先通过钢筋与桩体之间的粘结力传递到桩体,再通过桩体与周围土体相互作用,将外力传递到土层中。通过研究侧摩阻力沿微型桩的分布曲线,可以较直观地认识桩不同埋深处侧阻的发挥情况,进而可比较各微型桩在荷载传递特性方面的差异。

侧阻按照应力计的埋设位置进行分段计算,假定埋深范围内每两个应力计之间的土层侧阻相同,则推算第  $i$  层土的平均摩阻力  $q_{si}$  为:

$$q_{si} = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{A_i} \quad (1)$$

式中:  $q_{si}$  为桩侧摩阻力 (kPa);  $Q_i$  为应力计  $i$  的轴力 (kN);  $Q_{i+1}$  为应力计  $i+1$  的轴力 (kN);  $A_i$  为应力计  $i$  与  $i+1$  间的微型桩侧表面积 ( $m^2$ )。

由式 (1) 计算得到的侧阻沿深度的变化曲线如图 4 所示。图 4 (a) - (d) 分别为 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 和 7<sup>#</sup> 桩在不同荷载水平下侧摩阻力沿微型桩长度的分布曲线,不同微型桩的低、中、高荷载水平所对应的荷载与上一小节相同。

由图 4 的 4 幅图可以看出,当外荷载水平较低时,微型桩上部的荷载主要由靠近地表土层的侧摩阻力所承担,下部土层所承担的侧摩阻力相对较小;随着上部荷载的增大,微型桩所受到的力不断下传,此时不仅微型桩上部土层的侧摩阻力不断增加,微型桩中部土层的侧摩阻力也逐渐开始发挥作用,但微型桩下部土层的侧摩阻力值一直较低,如当 4<sup>#</sup> 桩在 105kN 外力作用下,0 ~ 0.6m 之间的侧摩阻力为 32.35kPa,0.6 ~ 1.4m 之间的侧摩阻力为 49.41kPa,1.4 ~ 2.2m 之间的侧摩阻力为 93.08kPa,而 2.2 ~ 3m 之间的侧摩阻力仅仅只有 21.80kPa。这也就意味着,

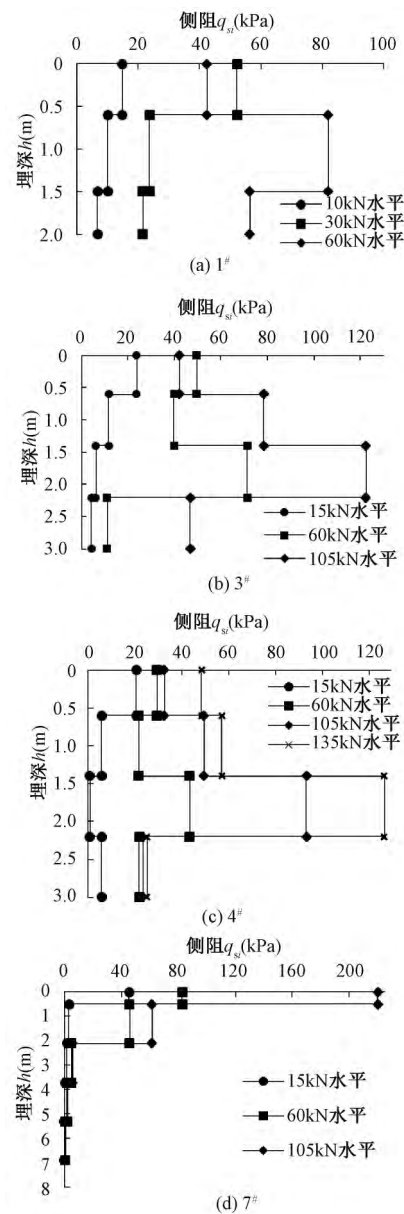


图 4 桩侧摩阻力沿深度的变化曲线

Fig. 4 Curves of frictional resistance of mini-pile with depth

上部土层需要有较高的抗剪强度来承担较大的侧摩阻力,下部土层需要的抗剪强度反而很低,而这正与地质条件相反,因为总的来说,上部土层一般性质较差,而下部土层性质比较优良。所以在这种侧摩阻力上大下小,而地质条件上差下优的情况下,桩体上部最容易发生破坏。

图 4 (a)、(b) 正好验证了上述情况。当荷载增大至高水平时,微型桩上部土层的侧摩阻力反而开始下降,这是因为随着外部荷载的增大,微型桩上部土层的侧摩阻力已经达到其极限值,随着荷载进一步增大,该部分侧摩阻力由于土体的隆起变形

反而降低。这种模式下，微型桩相对应的破坏模式为当外荷载接近极限值后，地表隆起，微型桩周围的土体出现径向和环向的裂缝<sup>[13]</sup>。

图 4 (d) 侧摩阻力沿埋深的分布规律明显与前三个图不同，即随着外部荷载的不断增大，侧摩阻力并未像其他微型桩一样往土体深处传递，而是在微型桩上部的侧摩阻力不断增大，且当外荷载继续增大时，微型桩与钢筋体之间出现裂缝，如图 5 所示。结合图 5 进行分析，这可能是由于 7# 桩埋深太大，因此土体与锚固体之间所能提供的阻力远远大于轴力传递有效深度范围以上部分钢筋与锚固体所能提供的抗拔力，随着外部荷载增大，钢筋与锚固体之间的侧阻也不断增大，直到破坏出现裂缝为止；此时，其极限承载力由钢筋与锚固体之间的侧摩阻力大小控制。这种模式下，微型桩相对应的破坏模式为钢筋被拔出，桩体混凝土出现裂缝。



图 5 7# 微型桩的破坏

Fig. 5 Failure of 7# mini-pile

### 3.3 极限承载力分析

目前，对于微型桩的抗压、抗拔极限荷载，规范<sup>[14]</sup>并未做出明确的规定。FinnoRichard J<sup>[15]</sup>等根据试验结果分析认为，可根据桩侧摩阻力和桩端阻力来计算微型桩的抗压承载力。

$$Q = Q_s + Q_p = \pi D \sum_{i=1}^n h_i q_{sik} + A_p k q_{pk} \quad (2)$$

式中： $Q_s$  为微型桩的桩侧阻力 (kN)； $Q_p$  为微型桩的桩端阻力 (kN)； $D$  为微型桩桩径 (m)； $h_i$  为各土层厚度 (m)； $q_{sik}$  为桩侧各土层摩阻力 (kPa)，根据旁压仪极限压力  $p_t$  和土的类型确定； $A_p$  为微型桩桩底表面积 ( $m^2$ )； $k$  为经验系数，对于砂砾土可取为 1.2； $q_{pk}$  为桩端阻力 (kPa)。

利用该结果对本次试验的微型桩进行承载力预测，对于抗拔试验，可不考虑端阻  $Q_p$  这一项，侧阻  $q_{sik}$  可参考规范<sup>[16]</sup>，其中细砂  $q_{sik} = 60kPa$ ，圆砾  $q_{sik} = 140kPa$ 。计算得到的微型桩的抗压承载力和实测的抗拔承载力对比结果如表 3 所示。

Weathersby David E<sup>[17]</sup> 指出，相同条件下微型桩承受拉力的能力仅为承受压力的能力的一半 (即

表 3  $Q_{u1}$  与  $Q_{u2}$  对比

Table 3 Comparison of calculated  $Q_{u2}$  and measured  $Q_{u1}$

桩号	$Q_{u1}$ (kN)	$Q_{u2}$ (kN)	$Q_{u1}/Q_{u2}$
1#	60	102	0.59
2#	90	149	0.60
3#	105	168	0.63
4#	135	246	0.55
5#	135	234	0.58
6#	150	283	0.53

注： $Q_{u1}$  为试验实测的抗拔承载力 (kN)； $Q_{u2}$  为根据式 (2) 计算得到的抗压承载力 (kN)

$\zeta = Q_{u1}/Q_{u2} = 0.5$ )。吕凡任等<sup>[21]</sup>分析认为，这是由于在受拉方向，混凝土开裂变形而失去了承载力，荷载主要由配筋来承担所造成的。由表 3 可知，对于本次试验的微型桩，其极限抗拔承载力均大于极限抗压承载力的一半，表明文献 17 所提出的系数  $\zeta = 0.5$  略小。由此可对该系数进行修正，取本次试验中  $Q_{u1}/Q_{u2}$  的平均值作为修正后的  $\zeta'$ ，即  $\zeta' = 0.58$ 。根据修正后的系数  $\zeta'$  计算极限抗拔承载力，得到修正值和实测值对比结果见表 4 所示。

表 4  $Q_{u1}$  与  $Q_{u3}$  对比

Table 4 Comparison of calculated  $Q_{u3}$  by the correct method and measured  $Q_{u1}$

编号	$Q_{u1}$ (kN)	$Q_{u3}$ (kN)	$Q_{u1}/Q_{u3}$
1#	60	59	1.01
2#	90	86	1.04
3#	105	97	1.08
4#	135	143	0.95
5#	135	136	0.99
6#	150	164	0.91

注： $Q_{u3}$  为经过修正后的抗拔承载力， $Q_{u3} = \zeta' Q_{u2}$  (kN)

由表 4 可以看出，经过修正后的微型桩极限抗拔承载力与实测的极限抗拔承载力较接近，其误差最大仅为 9%，因此，经过修正后的系数  $\zeta'$  可较好地预测微型桩的极限抗拔承载力。

## 4 结论

结合高崖子滩百万千瓦级光伏产业园光伏电站项目，开展了不同尺寸的微型桩的现场足尺试验，着重对微型桩在戈壁地区的侧摩阻力分布规律及其发挥特性和微型桩在上拔荷载下的荷载位移规律进行了比较与分析，得到如下几点结论。

(1) 抗拔微型桩上部桩体的轴力变化幅度大，而下部桩体不仅轴力变化幅度小而且受到的轴力也小。对于戈壁滩光伏电站来说，微型桩长度在 2 ~ 3m 之间即可满足承载力要求，且在该长度范围内轴力能够沿桩长充分发挥而不至于造成浪费。

(2) 在侧摩阻力上大下小、而地质条件上差下优的情况下,桩周上部土体容易发生破坏。因此,可通过提高桩身上部土体的强度来提高微型桩的抗拔承载力。

(3) 当微型桩埋深较浅时,微型桩的破坏模式为,当外荷载接近极限值后,地表隆起,微型桩周围的土体出现径向和环向的裂缝;当微型桩埋深较大时,微型桩的破坏模式为钢筋被拔出,桩体混凝土出现裂缝。

(4) 在本文条件下,微型桩的极限抗拔承载力与极限抗压承载力之比取  $\zeta' = 0.58$  较合适,建议取  $\zeta' = 0.58$  作为本地区同类型微型桩的计算参数。

### 参 考 文 献

- [1] 史佩栋. 深基础工程特殊技术问题 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 810~815.  
Shi Peidong. Special technical problems in deep foundation engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 810~815. (in Chinese)
- [2] 吕凡任, 陈云敏, 梅英宝. 微型桩研究现状和展望 [J]. 工业建筑, 2003, (4): 56~59.  
Lv Fanren, Chen Yunmin, Mei Yingbao. Recent study and forecast of research on micro pile [J]. Industrial Construction, 2003, (4): 56~59. (in Chinese)
- [3] 杜明芳, 尹正贵, 祖国强. 钢筋混凝土微型桩在复合土钉墙支护中的应用研究 [J]. 河南大学学报 (自然科学版), 2014, (5): 620~624.  
Du Mingfang, Yin Zhenggui, Zu Guoqiang. Application research of concrete micro pile in composite soil-nailed wall [J]. Journal of Henan University (Nature Science Edition), 2014, (5): 620~624. (in Chinese)
- [4] 王柏森. 微型桩径水泥土挤密桩在湿陷性黄土地基处理中的应用 [J]. 水利水电技术, 2013, (7): 84~90.  
Wang Baisen. Application of small diameter cement-soil compaction pile to treatment of collapsible loess foundation [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2013, (7): 84~90. (in Chinese)
- [5] 魏鉴栋, 陈仁朋, 陈云敏等. 微型桩抗拔特性原型试验研究 [J]. 工程勘察, 2006, (8): 14~19.  
Wei Jiandong, Chen Renpeng, Chen Yunmin et al. Experimental study on uplift micropile [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, (8): 14~19. (in Chinese)
- [6] 苏荣臻, 盛孝芳, 曲勇. 微型桩杆塔基础水平承载力计算方法研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39 (2): 182~184.  
Su Rongzhen, Sheng Xiaofang, Qu Yong. Experimental study on design method of horizontal bearing capacity of micropiles for transmission tower [J]. Sichuan Building Science, 2013, 39 (2): 182~184.
- [7] 冯益明, 吴波, 周娜等. 戈壁分类体系与编目研究 [J]. 地理学报, 2014, (3): 391~398.  
Fen Yiming, Wu Bo, Zhou Na. Study of classification system of Gobi [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, (3): 391~398. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国行业标准. 建筑基桩检测技术规范 (JGJ 106-2003) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
The Professional Standards of People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles (JGJ 106-2003) [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 鲁先龙, 郑卫锋, 程永锋等. 戈壁滩输电线路碎石土地基全掏挖基础试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, (11): 1779~1783.  
Lu Xianlong, Zheng Weifeng, Cheng Yongfeng et al. Experimental study on excavated foundation of transmission line gravelly soils in Gobi area of Northwest China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, (11): 1779~1783. (in Chinese)
- [10] 刘文白, 刘占江, 曹玉生等. 沙漠地区输电线路铁塔基础抗拔试验 [J]. 岩土工程学报, 1999, (5): 564~568.  
Liu Wenbai, Liu Zhanjiang, Cao Yusheng et al. Uplift test of foundation of electric power line tower in desert area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, (5): 564~568. (in Chinese)
- [11] Mattes N S, Poulos H G. Settlement of single compressible pile [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1969, 95 (SM1): 189~207.
- [12] 朱彦鹏, 董芸秀, 包泽学等. 超大厚度 Q2 黄土场地单桩承载力试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, (S2): 4375~4383.  
Zhu Yanpeng, Dong Xiuyun, Bao Zexue et al. Experimental study of bearing capacity of single pile in large thickness Q2 loess ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, (S2): 4375~4383. (in Chinese)
- [13] 刘祖德. 抗拔桩基础 [J]. 地基处理, 1995, (6): 1~12.  
Liu Zude. Uplift pile foundation [J]. Ground Improvement, 1995, (6): 1~12. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国国家标准. 光伏电站设计规范 (GB 50797-2012) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.  
The State Standards of People's Republic of China. Code for design of photovoltaic power station (GB 50797-2012) [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [15] Finno Richard J, Perdono Catalina O, Calvello Michele. Compaction-grouted micro piles at the Northwestern University NGES [J]. In: Benait Jean LutenegegerAlean J. National Geotechnical Experimentation Sites. New York: Geotechnical Special Publication, ASCE, 2000, 93: 235~249.
- [16] 中华人民共和国行业标准. 建筑桩基技术规范 (JGJ 94-2008) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
The Professional Standards of People's Republic of China. Technical code for building pile foundations (JGJ 94-2008) [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)
- [17] Weathersby David E, Ludwig Claus J, Lowe James A et al. Mini-pile histories and a tensile load test on an instrumented mini-pile [J]. In: Thomas, L. Brandon. Foundations and Ground Improvement. New York: Geotechnical Special Publication, ASCE, 2001: 928~942.