第41卷 第2期
2020年2月

太 阳 能 学 报
ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA

Vol. 41, No. 2
Feb., 2020

文章编号:0254-0096(2020)02-0262-06

光伏支架抗拔锚固微型桩作用机理研究

孔 洋[1], 阮怀宁[1], 黄雪峰[2,3], 石 崇[1], 罗曼璐[4], 王 迪[1]

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050;
3. 解放军后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 401331; 4. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100)

摘 要: 通过原位静载荷试验、数值模型抗拔试验与理论分析开展黄土地区微型桩承载特性、传力机理及破坏模式等方面的研究工作。随着拉拔荷载的增加,桩身轴力向下传递,其数值逐渐减小且表现出不同的递减规律,桩身底部侧摩阻力抵抗拉拔力的作用越来越强;微型桩破坏面下部桩土界面破坏区的上拔力主要由桩身侧摩阻力抵抗,上部一定深度内的上拔力主要有土体剪切抵抗,且上下部破坏性形式的转折点为临界埋置深度;基于上述研究成果提出的理论公式可较准确地预测极限抗拔承载力值。

关键词: 光伏; 桩基础; 锚固; 试验; 黄土; 微型桩; 抗拔

中图分类号: TK519; TU473 **文献标志码**: A

0 引 言

近年来,我国西部地区光伏电站建设蓬勃发展[1-2]。大规模的光伏电站支架数量较多,上覆载荷小,故支架锚固基础的单个工程量较小但数量巨大[3]。图1为光伏支架立面示意图。为使光伏组件具有最大的太阳光辐射角,光伏组件通常被设计成与水平面具有一定角度,因此不可避免地承载风荷载的作用[1],特别是逆风状态下,光伏支架应当满足抗倾覆要求。基于此,支架后柱锚固基础的抗拔承载特性、传力机理与破坏模式等方面的研究成为光伏支架基础设计的重点和难点。

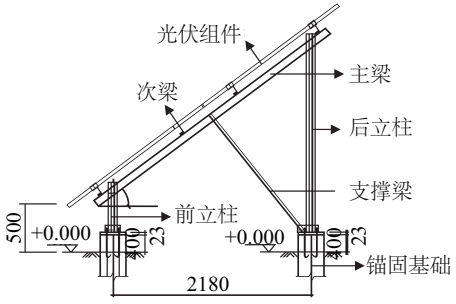

图1 光伏支架立面示意图(mm)

Fig. 1 Schematic diagram of PV surpport bracket(mm)

在光伏支架基础选型方面,由于光伏支架基础受环境因素影响较大,各地区基础形式和作用机理差异较大,尚未行程成熟的理论体系。明杰等[2]对内蒙古呼和浩特地区无地基情况下光伏支架的稳定性进行了研究,建议光伏电站建设时采用无地基形式安装支架;邢克勇等[4]对新疆塔里木盆地新型空心薄壁基础形式进行了研究,文中涉及的基础形式达到了工程量小、承载力高的要求;王腾飞等[5]对青海季节性冻土地区螺旋管桩基础形式进行了一系列室内模型试验研究,研究成果促进了该地区光伏基础设计施工。

综合考虑西北黄土地区的地层条件和工程经济性,由于光伏支架单个基础体量小、埋深较浅,直径通常小于300 mm,满足一种典型的微型桩形式,但关于西北黄土地区抗拔锚固微型桩作用机理的研究较少。在抗拔桩原位静载荷试验方面,国内外学者已取得一定成果,但既有抗拔桩原位试验主要针对软土和砂土地基[6-7],关于黄土地区抗拔桩原位和模型试验研究较少[8-9],故黄土地区抗拔锚固微型桩极限抗拔承载力、桩身轴力传递、侧摩阻力分布情况及临界状态的破坏模式等研究不足。在抗拔桩数值模拟方面,对光伏支架抗拔锚固微型桩承载特性、受力机制与破坏模式的数值分析较少,通过对既有研究成果的分析与总结,数值分析软件在处理桩土接触面时往往存在一些误差。常用数值分析软件主要有FLAC3D[10-12]与ABAQUS[13-14],结合原位试验与新桩型模式,促进了抗拔桩作用机理的研

收稿日期: 2017-07-24
基金项目: 国家自然科学基金(51579081; 51679071); 国家重点基础研究发展(973)计划(2015CB057903); 中央高校基本科研业务费专项(2016B43414)
通信作者: 孔 洋(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事特殊土、基础工程与节理岩体等方面的研究。gongzuo99033@163.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究。综上所述，对黄土地区抗拔锚固微型桩作用机理方面的不成熟，尚未形成统一的理论体系，因此通过原位静载荷试验、数值模型抗拔试验与理论分析开展黄土地区抗拔锚固微型桩承载特性、传力机理及破坏模式等方面的研究显得尤为重要。

1　微型桩抗拔现场试验

1.1　场地概况

试验场地位于兰州市七里河区，场地覆盖厚度大于 40 m 的马兰黄土，土质均匀、杂质少，地形平坦。通过探井取样进行室内物理力学特性实验，测得埋深 5 m 范围内土样湿密度为 1.57~1.59 g/cm^3，含水率为 11.0%~11.3%，土层压缩模量约为 13.75 MPa，黏聚力约为 17.6 kN，摩擦角约为 28°，泊松比取 0.28。

1.2　试验方案

本次试验包含 4 组单桩抗拔试验与成孔质量检测工作。为减少对周围土体的扰动，本次试验采用洛阳铲人工挖孔作业，4 组微型桩分别编号为 1#~4#，长度 L 和直径 D 依次为：$L=2$ m，$D=200$ mm；$L=3$ m，$D=200$ mm；$L=4$ m，$D=200$ mm；$L=2$ m，$D=150$ mm。

在桩孔中心布设直径 22 mm HRB400 螺纹钢筋作为抗拔试验的拉筋，钢筋底部设有支架。将螺纹钢筋与钢筋计用高强套筒连接并焊接好后垂直放入桩孔中心，用 C35 混凝土现浇作为桩体材料，将桩体灌注至与地面平齐后养护 28 d 作为抗拔试验用桩。应变式钢筋计用以测量桩身轴力传递及计算侧摩阻力分布情况，对应的埋置深度分别为 0.5、1.5、2.5、3.5 m，即 1#~3#桩分别埋入 2~4 个。加/卸载采用慢速维持荷载法，抗拔试验操作步骤与试验设备布设严格按照相关规范进行。

1.3　试验结果分析

1.3.1　桩顶载荷位移曲线分析

加载稳定的判别条件是桩顶位移稳定，记录数据得到抗拔锚固微型桩的桩顶轴向位移与上拔荷载关系曲线如图 2 所示（图中 λ 为长径比，$\lambda=L/D$）。由图 2 可看出：1）抗拔锚固微型桩的桩顶轴向位移与上拔荷载关系曲线形式为突变型曲线，即当 1#~4#桩上拔荷载分别为 35、55、80、25 kN 时，桩顶轴向位移急剧增加，当位移稳定后继续加载，位移计读数不再发生变化，认为桩达到破坏状态，则可认为 1#~4#的极限抗拔承载力 Q_1 为前一级荷载，即分别为 30、50、75、20 kN，对应的上拔量分别为 4.0、7.3、11.2、3.4 mm；2）抗拔锚固微型桩在临界状态后破坏时，桩身与土体紧紧粘结在一起，桩土界面未发生相对滑移，即破坏形式并非沿桩土界面剪破，原位观测发现破裂面发生在桩周一定范围的土体内，表明微型桩在上拔时不仅受到桩侧摩阻力影响，还受到上部土体的剪切抗阻的影响。

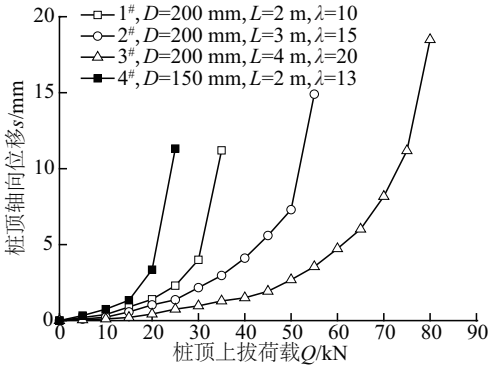

图2　桩顶载荷-位移曲线

Fig. 2　Curves of pile axis displacement and uplift load

1.3.2　抗拔锚固微型桩轴力传递分析

试验桩通过布设应变式钢筋计可测量桩身轴力，钢筋计与螺纹钢筋通过套筒连接并焊死，可认为钢筋计的应变 ε_{si} 与该段微型桩的应变 ε_{pi} 相等，则桩身轴力 N_i 可由式（1）计算：

$$N_i=E_{pi}A_{pi}\varepsilon_{pi} \tag{1}$$

式中，E_{pi}、A_{pi}——第 i 段桩单元处的弹性模量与横截面积。

同时，试验完成后桩身完整性较好，由于桩端轴力无法准确测量，在计算轴力传力和侧摩阻力分布时将桩端轴力设为零[8]，则 2#抗拔锚固微型桩（长径比 $\lambda=15$）的桩身轴力沿桩身的分布曲线如图 3 所示。

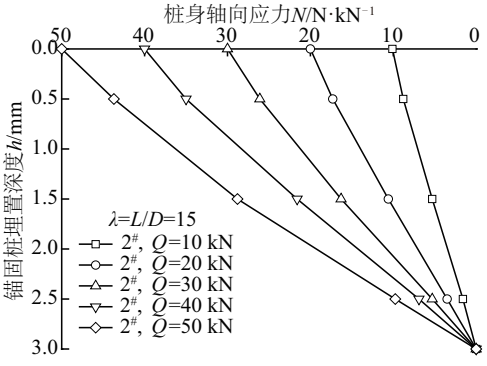

图3　桩身轴力传递曲线

Fig. 3　Transfer curves of axis force along with depth

限于篇幅，本文仅给出 2#试验桩的桩身轴力传递曲线，其他相似。由图 3 可看出：1）试验桩在每级拉拔荷

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

载作用下，轴力均随桩深的增大而减小；随着拉拔力的增大，轴力的传递曲线表现出不同的斜率（即递减速率不同）；由侧摩阻力的计算公式可知，轴力递减曲线的斜率反映了桩身侧摩阻力的大小；2）在较低的上拔荷载作用下，轴力沿桩身的递减曲线较为均匀，随上拔荷载的增加，桩身轴力的递减曲线变得不再均匀，同时斜率越来越大，桩身下部表现得尤为明显；3）根据上述分析可知，抗拔桩随上拔荷载的增加，轴力逐渐向下传递，向下传递的轴力主要由桩身侧摩阻力承担。

1.3.3 抗拔锚固微型桩侧摩阻力分布分析

桩身侧摩阻力由桩-土界面提供，已知轴力情况下，各土层单元的桩侧摩阻力平均值 f_i 可由式（2）计算：

$$f_i = \frac{N_i - N_{i+1}}{A_{pi}} \tag{2}$$

式中，f_i——抗拔锚固微型桩侧摩阻力；A_{pi}——第 i 段桩单元处的横截面积；N_i、N_{i+1}——第 i 段与第 $i+1$ 段桩单元处的轴力。

限于篇幅，本文仅给出最后一级上拔力作用下1#~3#试验桩的桩身侧摩阻力沿桩深方向的分布曲线如图 4 所示。

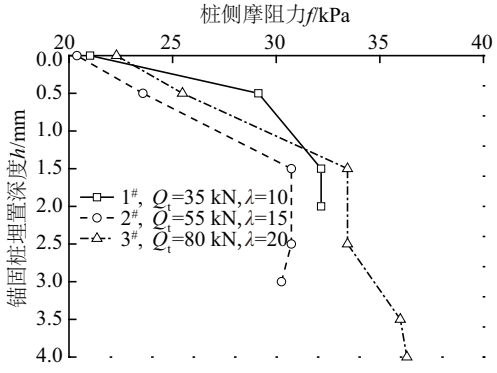

图4 桩身侧摩阻力分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of skin friction along with depth

由图 4 可看出：1）3#试验桩侧摩阻力随桩埋设深度基本表现为逐渐增大的特性，2#桩侧摩阻力在桩端表现出一定的弱化现象，1#桩在最后 2 级荷载下，桩身的侧摩阻力并未增加，而是保持一致；2）2#桩侧摩阻力在桩端表现出一定的弱化现象，即在相同桩径情况下，长径比 λ=15 时表现出独特的力学特性，其沿桩身的侧摩阻力明显小于其他工况，分析原因可能与试验操作有关，同时试验场地条件也会造成一定影响。

2 数值模型试验

对光伏支架抗拔锚固微型桩承载特性、受力机制与破坏模式的数值分析较少，通过对既有研究成果的分析与总结，数值分析软件在处理桩土接触面时往往存在误差。本文拟采用基于显式有限差分求解场控制微分方程的 FLAC^{3D} 程序进行数值试验，同时该程序应用混合单元离散模型，可较准确地模拟材料的屈服、塑性与大变形等特性[12]。

2.1 材料参数与计算模型

利用 FLAC^{3D} 建立三维模型，微型桩与土体均采用实体单元，如前所述微型桩由 C30 混凝土现浇，故桩体本构模型采用弹性模型，土体假定为 Morh-Coulomb 弹塑性材料，土体单元模型与微型桩尺寸根据试验场地概况和试验方案确定，材料参数如表 1 所示。

表1 模型材料力学参数表

Table 1 Mechanical properties of materials in model

指标		混凝土桩	黄土
物理指标	干密度/kg·m^{-3}	2360	1421
	湿密度/kg·m^{-3}	–	1580
弹性指标	弹性模量/MPa	30000	13.75
	泊松比	0.20	0.25
	体积模量/MPa	16700	9.17
	剪切模量/MPa	12500	5.50
强度指标	黏聚力/kPa	–	17.6
	内摩擦角/(°)	–	28.0

如前所述，对于桩土接触面的定义是数值计算分析的难点，本文采用库伦剪切模型来模拟桩土之间的摩擦力学行为。在设置模型时，为方便加载，留设 0.1 m 桩头。

2.2 计算结果

限于篇幅，本文仅给出 1#桩上拔荷载 Q 与桩顶位移 s 实测与数值模拟数据对比结果（如图 5 所示）。实测曲线与数值计算曲线符合度较好，说明模型建立方法与及所选取的物理参数较为可靠。数值计算结果与载荷试验在加载初期的吻合度较高，随着加荷的增大二者误差增大，于丹等[11]认为加载方式、土体固结状态及群桩效应等是误差产生的原因。

微型桩在极限上拔荷载作用下的临界破坏状态可由 Z 向剪应变率反映，数值试验临界状态 Z 向剪切应变率云图表明土体变形存在一定的边界，该边界与土体塑性区边界基本一致，该边界内土体发生显著的位移，边界外土体位移基本可忽略。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

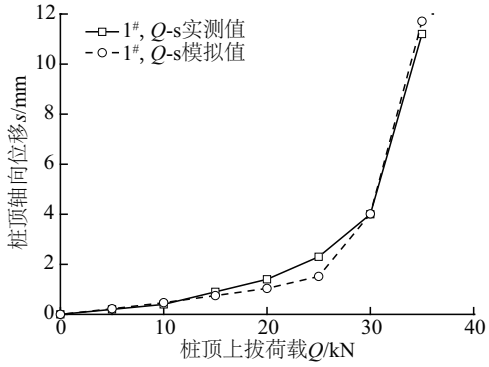

图5　1#桩 Q-s 曲线实测值与模拟值对比

Fig. 5　Comparison of measured and calculated Q-s curves for No.1 pile

3　抗拔锚固微型桩作用机理

3.1　微型桩破坏模式

由现场试验与数值模型可看出，黄土地区抗拔锚固微型桩在临界状态后破坏时，桩身与土体紧紧粘结在一起，桩土界面未发生相对滑移，即破坏形式并非沿桩土界面剪破；原位观测发现破裂面发生在桩周一定范围的土体内，数值试验临界状态 Z 向剪切应变率云图与塑性区云图表明土体变形存在一定的边界，该边界可确定土体中破坏面位置，即临界状态的破坏面分为 2 部分：1）下部桩土界面破坏区，该部分的上拔力（由轴力传递产生）主要由桩身侧摩阻力抵抗；2）上部一定深度内，土体中形成斜向破裂面，该部分的上拔力主要有土体剪切抵抗，桩土粘结在一起共同上移。

Hong Won-Pyo 等[15]基于一些列室内可视化模型试验与土体变形试验，验证了微型桩中该种破坏形式的存在，认为上部土体的破坏面可由与垂直方向呈 β 角的滑移面表征。同时，上下部分破坏形式的转折深度为微型桩的临界埋置深度 L_{cr}，当微型桩的有效埋置深度 L 小于 L_{cr} 时，破坏形式仅表现为第 2 种形式；当 L 大于 L_{cr} 时，破坏形式表现为前述复合破坏形式。Das 等[16]认为 L_{cr} 与土体相对密度有关。

综上分析，抗拔锚固微型桩的作用机理如图 6 所示（Q_t 为极限上拔承载力）。破坏面是土体弹区与塑性区的边界。在塑性区内，土体的变形与剪切应变率较大；在塑性区之外，土体处于弹性状态，几乎无位移。

3.2　极限抗拔承载力理论计算公式

如图 6 所示，在进行极限平衡分析时可将微型桩极限抗拔承载力分为 2 个部分[15]：1）土体破坏面上的剪切阻抗 Q_{SR}；2）微型桩侧摩阻力阻抗 Q_{SK}。

总抗拔承载力 Q_t 的计算公式为：

$$Q_t = Q_{SR} + Q_{SK} + W_p \tag{3}$$

其中：

$$Q_{SR} = 2\pi\gamma(K_m + \cot\theta)(\frac{L^3}{6}\cot\theta + \frac{dL^2}{4}) - \pi\gamma(\frac{dL^2}{2}\cot\theta + \frac{d^2L}{4}) + \pi c(L^2\cot\theta + dL) \tag{4}$$

$$Q_{SR} = \pi d(L - L_{cr})(c + \gamma L_{cr} K_u \tan\delta) \tag{5}$$

式中，W_p ——桩身自重；γ ——单位土体的重度；θ ——滑移面与水平面的夹角，$\theta = \pi/2 - \beta$，$\beta = \phi/2$；k ——滑移面上水平应力与竖向应力的比值，$K_m = (\cos\theta + k\sin\theta)\tan\phi$，其中 ϕ 为土层的内摩擦角；L ——微型桩的有效埋置深度；d ——微型桩的桩径；c ——土层的粘聚力；L_{cr} ——微型桩的临界埋置深度，与微型桩的临界长径比有关，具体取值见文献[16]；K_u ——上拔力系数，根据土体内摩擦角的不同，取值范围为 0.6~4.0；δ ——桩身侧摩阻力抵抗区桩土接触面的摩擦角，其值与 ϕ 相等；。

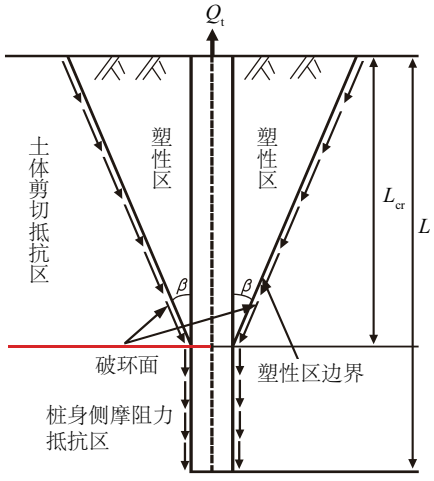

图6　抗拔锚固微型桩的作用机理示意图

Fig. 6　Schematic diagram of mechanism of action of anchoring micropiles

3.3　试验、数值与理论计算结果对比分析

综合前述研究结果，基于场地物理力学参数与表 1 所示的材料性质，将极限抗拔承载力实测值、数值模型计算值、理论公式计算值与建筑桩基技术规范[17]公式计算值的结果进行对比分析如表 2。由表 2 可看出，极限抗拔承载力理论公式计算值与实测值、数值模型计算值一致性较好，上述理论公式可较好地预估土体极限抗拔

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

承载力值。现行桩基规范过高地估计了极限抗拔承载力,且其结果离散性较大。式(3)计算值虽与实测值较接近,但仍较低估算了极限抗拔承载力值,分析其原因主要为:1)与现场实测与模型试验不同,式(3)建立在二维尺度情况,与桩土实际工况有一定差别;2)如前述,微型桩的临界埋置深度 L_{cr} 是该计算公式中非常重要的变量,其值与土体相对密度有关,但土体相对密度很难得到准确值,因此造成计算误差。

表2 极限抗拔承载力计算值与实测值比较

Table 2 Comparison of calculate values and measured values of critical anti-uplift bearing capacity

微型桩编号	1#	2#	3#	4#
原位测量值/kN	30.00	50.00	75.00	20.00
模型计算值/kN	30.00	50.00	75.00	20.00
理论计算值/kN	28.56	48.73	73.52	18.79
规范计算值/kN	43.96	65.94	87.92	32.97

4 结 论

1)试验桩在每级拉拔荷载作用下,轴力均随桩深的增大而减小。在较低的上拔荷载作用下,轴力沿桩身的递减曲线较为均匀,随上拔荷载的增加,桩身轴力的递减曲线变的不再均匀,同时斜率越来越大,桩身下部表现得尤为明显。

2)抗拔桩随着上拔荷载的增加,越靠近底部,随着轴力的传递,侧摩阻力抵抗拉拔力的作用越强。

3)黄土地区抗拔锚固微型桩在临界状态后破坏时的破坏面分为2部分:下部桩土界面破坏区,该部分的上拔力(由轴力传递产生)主要由桩身侧摩阻力抵抗;上部一定深度内,土体中形成斜向破裂面,该部分的上拔力主要有土体剪切抵抗,桩土粘结在一起共同上移。

4)上下部分破坏形式的转折深度为微型桩的临界埋置深度 L_{cr},当微型桩的有效埋置深度 L 小于 L_{cr} 时,破坏形式仅表现为第二种形式;当 L 大于 L_{cr} 时,破坏形式表现为前述复合破坏形式。

5)极限抗拔承载力理论公式计算值与实测值、数值模型计算值一致性较好,理论公式(式(3)~式(5))可较好地预估土体极限抗拔承载力值。

致 谢:感谢甘肃省电力设计院李玉润、张广平、奚增红、何凡等各位领导、工程师提供经费及场地支持;感谢兰州理工大学朱中华、刘自龙、张沛然与陆军勤务学院周俊鹏。

[参考文献]

[1] 陈源. 光伏支架结构优化设计研究[J]. 电气应用, 2013, 17: 76-80.

[2] 明杰, 刘志璋, 王平. 无地基状态下光伏支架的稳定性测试[J]. 太阳能学报, 2012, 33(12): 2068-2073.
MING J, LIU Z Z, WANG P. Exploration of PV bracket without foundation [J]. Acta energiae solaris sinica, 2012, 33(12): 2068-2073.

[3] 何文俊, 郑少平, 周于程, 等. 光伏电站支架基础型式对比分析及选型探讨[J]. 太阳能, 2016(1): 26-32.
HE W J, ZHENG S P, ZHOU Y C, et al. Comparative analysis and selection of foundation types of Photovoltaic power station supports [J]. Solar energy, 2016(1): 26-32.

[4] 邢克勇, 黄文莉. 光伏支架基础设计创新研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(S1): 252-255.
XING K Y, HUANG W L. Study of design innovation for photovoltaic module bracket [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(S1): 252-255.

[5] WANG T F, LIU J K, ZHAO H G, et al. Experimental study on the anti-jacking-up performance of a screw pile for photovoltaic stents in a seasonal frozen region [J]. Journal of Zhejiang University- Science A: applied physics & engineering, 2016, 17(7): 512-524.

[6] 吕凡任, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 99-105.
LYU F R, CHEN R P, CHEN Y M, et al. Field tests on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground [J]. China civil engineering journal, 2005, 38(3): 99-105.

[7] 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 J D, CHEN R P, CHEN Y M, et al. Field test study on up-lift characteristics of micropiles [J]. Journal of geotechnical investigation & surveying, 2006(8): 14-19.

[8] 陈小强, 赵春风, 甘爱明. 砂土中抗拔桩与抗压桩模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 738-744.
CHEN X Q, ZHAO C F, GAN A M. Study of model test of uplift and compression piles in sand [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(3): 738-744.

[9] 苏荣臻, 童瑞铭, 杨文智. 灌注细石混凝土微型桩基础上拔试验研究[J]. 工程勘察, 2012, 40(1): 16-19.
SU R Z, TONG R M, YANG W Z. Experimental study on uplift bearing capacity of micropiles by concreting method [J]. Geotechanical investigation & surveying,

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2012，40(1)：16-19.

[10] 辛建平，郑颖人，唐晓松，等. 微型桩破坏机理的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报，2013，9(6)：1326-1332.
XIN J P，ZHENG Y R，TANG X S，et al. Numerical simulation of failure mechanism of micro-piles[J]. Chinese journal of underground space and engineering，2013，9(6)：1326-1332.

[11] 于丹，杜鹏祥，张海洋，等. 抗拔桩单桩承载特性试验及数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2014，30(5)：818-825.
YU D，DU P X，ZHANG H Y，et al. Numerical simulation and experimental study on bearing behavior of single tension pile[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(natural science)，2014，30(5)：818-825.

[12] 邓稀肥，伍军，梁超，等. 抗拔桩实验确定地层变形模量的模拟研究[J]. 地下空间与工程学报，2016，12(1)：77-83.
DENG X F，WU J，LIANG C，et al. A numerical study on determination of the deformation modulus of soil based on pull-out test of uplift-pile[J]. Chinese journal of underground space and engineering，2016，12(1)：77-83.

[13] 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(S1)：657-663.
CHANG L Y，WANG W D，WU J B. Numerical simulation analysis of uplift behavior of enlarged base piles based on uplift ultimate bearing capacity tests[J]. Rock and soil mechanics，2015，36(S1)：657-663.

[14] 周佳锦，王奎华，龚晓南，等. 静钻根植抗拔桩承载性能数值模拟[J]. 浙江大学学报：工学版，2015，49(11)：2135-2141.
ZHOU J J，WANG K H，GONG X N，et al. Numerical simulation on behavior of static drill rooted pile under tension[J]. Journal of Zhejiang University(engineering science)，2015，49(11)：2135-2141.

[15] HONG W-P，CHIM N. Prediction of uplift capacity of a micropile embedded in soil[J]. KSCE journal of civil engineering，2015，19(1)：116-126.

[16] DAS B M. A procedure for estimation of uplift capacity of rough piles[J]. Soils and foundation，1983，23(3)：122-126.

[17] JGJ 94—2008，建筑桩基技术规范[S].

STUDY ON MECHANISM OF ACTION OF ANTI-UPLIFT ANCHORING MICROPILES FOR PV SURPPORT BRACKET

Kong Yang[1]，Ruan Huaining[1]，Huang Xuefeng[2,3]，Shi Chong[1]，Luo Manlu[4]，Wang Di[1]

(1. *College of Civil and Transportation Engineering*，*Hohai University*，*Nanjing* 210098，*China*；
2. *School of Civil Engineering*，*Lanzhou University of Technology*，*Lanzhou* 730050，*China*；
3. *Department of Architectural Engineering*，*Logistical Engineering University of PLA*，*Chongqing* 401331，*China*；
4. *College of Energy and Electrical Engineering*，*Hohai University*，*Nanjing* 211100，*China*)

Abstract：A systematic study is carried out to research the bearing characteristic，force transfer mechanism and failure mode of micropiles through the in-situ static load test，the numerical model anti-uplift test and the theoretical analysis in loess area. The values of axial force decrease gradually and show some different decline laws along with the pile embedded depth. In the meanwhile，the effect of skin friction resistance against the uplift load at the pile bottom is more and more strong. The uplift force of the pile-soil interface failure zone at the lower part of the failure surface of micropiles is mainly resisted by the skin friction resistance of the pile body. The uplift force of the upper part of the failure surface is mainly resisted by soil shearing resistance. The turning point of the upper and the lower failure modes is the pile critical embedded depth. Based on the above research results，the deduced theoretical formula can predict critical anti-uplift bearing capacity accurately.

Keywords：photovoltaic；pile foundations；anchor；testing；loess；micropiles；anti-uplift

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net