第 36 卷 第 1 期
2019 年 1 月

建筑科学与工程学报
Journal of Architecture and Civil Engineering

Vol. 36 No. 1
Jan. 2019

文章编号:1673-2049(2019)01-0120-07

西北地区光伏支架微型抗拔类基础优化设计及试验研究

张广平[1],黄雪峰[2],张沛然[2],李玉润[1],奚增红[1]

(1. 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司,甘肃 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:为了解决西北地区光伏支架基础的设计和应用问题,在传统抗拔类基础之上提出了微型锚杆复合桩。通过在西北某光伏电站砂砾石场地的现场足尺试验,由竖向位移观察装置及埋设在不同深度处的应力计对加载过程中各试桩的位移变形和轴力变化情况进行了全时动态监测,对比分析了传统抗拔基础和微型锚杆复合桩的承载特性及相关工程应用问题。结果表明:传统抗拔类基础的荷载-位移曲线形态因桩型不同而异,微型锚杆复合桩呈现缓变型;传统抗拔类基础的极限承载力普遍低于 15 kN,而微型锚杆复合桩普遍高于 60 kN,承载能力大幅度提高,但微型锚杆复合桩承载力随桩长提高方面存在临界长度(4 m);微型锚杆复合桩抗拔承载特性优化参数分别从承载力、位移变形及复合优化效果 3 个方面定量表征了相近桩基尺寸下微型锚杆复合桩的优越抗拔工作性能;建议在西北砂砾石场地适度推广应用微型锚杆复合桩作为光伏支架抗拔基础,其中桩长设计可控制在 4 m 以内。

关键词:桩基工程;抗拔优化设计;现场试验;微型锚杆复合桩;位移;承载力

中图分类号:TU448 **文献标志码**:A

Optimal Design and Experimental Research of Photovoltaic Support Micro Anti Pull-out Foundation in Northwest China

ZHANG Guang-ping[1], HUANG Xue-feng[2], ZHANG Pei-ran[2], LI Yu-run[1], XI Zeng-hong[1]

(1. China Energy Engineering Group Gansu Electric Power Design Institute Co., Ltd, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to solve the design and application of photovoltaic support foundation in northwest China, the composite pile with micro anchor composite pile was put forward on the basis of traditional anti pull-out foundation. The field full-scale test of sand gravel site was carried out in a photovoltaic power station in northwest China, the displacement and axial force changes of the test piles during the loading process were monitored dynamically at full time by the vertical displacement observation device and the stress gauges embedded in different depths. The bearing capacity and engineering application of the traditional anti pull-out foundation and micro anchor composite piles were compared and analyzed. The results show that the load-displacement curves of the traditional anti pull-out foundation vary with the pile type, and the curves of micro anchor composite pile exhibit slow change type. The ultimate bearing capacity of the traditional

收稿日期:2018-06-18
基金项目:中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司科学技术项目(JL06.02c)
作者简介:张广平(1964-),男,甘肃甘谷人,教授级高级工程师,E-mail:zhangguangping8570@163.com。

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

anti pull-out foundation is generally lower than 15 kN, while that of the micro anchor composite pile is generally higher than 60 kN. The bearing capacity of micro anchor composite pile increases greatly, but it has critical length (4 m) with the increase of pile length. The optimal parameters of anti pull-out bearing characteristic of micro anchor composite pile reflect excellent working performance with similar pile size in three aspects quantitatively, including the bearing capacity, displacement and composite optimal effect. It is suggested that the micro anchor composite pile can be applied as the pull-out foundation of the photovoltaic support in the northwest sand gravel site, and the design of pile length can be controlled within 4 m.

Key words: pile foundation engineering; anti pull-out optimization design; field test; micro anchor composite pile; displacement; bearing capacity

0　引　言

近年来，中国能源结构改革推动了光伏发电等新能源项目的建设和发展。在中国西北地区分布着面积较广的砂砾石地质场地，同时该地区具有丰富的太阳能辐射日照资源[1]，因而积极开发和建设光伏电站成为推动当地经济发展的必然选择。然而在西北地区光伏电站的建设中发现，受区域性风力条件等作用影响，光伏支架基础承受着较大的拉拔荷载，而受压荷载相对较小[2-3]。同时结合笔者多年来在西北地区光伏发电项目的建设经验，发现传统抗拔基础不同程度地存在造价高、工艺复杂及抗拔承载性能低等问题，因而基于传统形式的光伏支架抗拔基础优化设计成为推动西北地区光伏发电项目快速建设的重要环节。

目前，许多学者通过试验研究，发现抗拔桩与抗压桩在桩体位移、轴力分布及侧摩阻力分布方面均有所差异[4-11]。与抗压桩相比，对抗拔桩的理论和试验研究还不够充分及完善，针对于西北砂砾石地区的抗拔桩试验研究更是鲜少。张忠苗等[9]通过单桩抗拔及抗压试验，发现在 2 种不同荷载类型下，桩基侧摩阻力及端阻力差异较大，抗拔桩端头存在弱化现象。何泓男等[10]针对抗拔桩不同桩土破裂面形态，对抗拔桩的极限承载力预测方法进行总结对比分析，并就各种方法的预测值与实际试验值进行了对比分析。近年来，周俊鹏等[12-14]针对西北地区光伏支架基础的工程应用问题分别在西部黄土区做了大量微型抗拔类基础试验研究及数值模拟分析，其中针对微型抗压与抗拔桩的承载特性进行了试验对比研究，发现抗拔桩的桩顶位移及位移增长速率均大于抗压桩，抗拔桩桩端侧阻存在弱化现象，试验结果对于微型抗拔基础的理论研究和工程应用提供了重要参考价值，但缺少针对于砂砾石场地的研究结果。

本文在传统抗拔基础的形式之上，基于边坡支护锚杆的抗拔特性提出了一种适于西北地区光伏支架基础快速一体化施工的微型锚杆复合桩，并通过现场试验对传统抗拔基础和微型锚杆复合桩在拉拔荷载下的位移变形、轴力变化特征进行了分析研究，对比探讨了微型锚杆复合桩相较传统抗拔基础的承载特性优化情况。本文的试验结果能够为西北地区光伏支架基础的设计和实践提供一定参考和指导。

1　光伏支架基础优化设计思路

1.1　传统抗拔基础形式及问题

目前，在光伏支架基础的设计和建设中，使用较多的基本形式包括条形基础、T 型独立基础、扩大头预制基础及等截面预制基础等。上述传统抗拔基础普遍存在的主要施工和抗拔承载现状问题包括：

(1)传统抗拔形式施工流程基本为开挖地基→桩基布设→回填夯实等，其中原有地基的开挖造成原状性地基土体的结构破坏，强度损伤，地基土的应力状态发生改变[15-17]，再次回填以后虽经夯实处理，但无法恢复地基土的原有结构和力学性状。在上部拉拔荷载作用下桩基极易拔出，工作失效。

(2)地基的开挖及回填不可避免产生大量土方工程(现有工程实践表明土方量基本为基础形式体积量的 5 倍～8 倍)，因而同步引起工程造价的增加以及施工工期的延长。不利于光伏发电项目的快速推广建设。

(3)西北地区特别是恶劣环境下砂砾石地质的戈壁滩场地，自然生态系统较为脆弱[18]，在该地区进行大面积的开挖作业不利于当地的生态保护。

1.2　微型锚杆复合桩抗拔基础设计的提出

锚杆或锚索在边坡、基坑支护等支挡结构工程中的应用取得了较好的工程技术经济效果，且其钻

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

孔所产生的土方量较小。本文除在保留锚杆的基本形式和设计施工参数工艺之外，基于光伏支架及其基础快速施工一体化的考虑，提出在西北地区通过空气钻等机械钻取（在自稳性较好的黄土区，也可采用人工掏孔）桩径 D 为 150～220 mm 的桩孔，在其内布设抗拔受力筋和光伏支架与基础连接的预埋件，后经注浆工艺形成尺寸较小的微型锚杆复合桩，作为新型光伏支架抗拔基础形式。复合是指在抗拔基础需要满足一定承压（如光伏支架及面板等的竖向自重荷载、风力形成的水平推力）工作要求的设计及服役应用条件下，可将传统锚杆注浆液换为混凝土，以提高其工作承载性能，进而将锚杆从传统单一抗拔工作状态扩展应用至抗拔和抗压协同工作状态。

2 试验概况

2.1 试验场地

试验场地位于西北某地百万千瓦级光伏产业园，属于细砾质堆积型砂砾石土场地，其地层剖面主要特征为：表层覆盖不同粒径的砾石，其下有细砂，深部为砂砾混合层，且混合层中填充有大量黏性土。具体地质物理力学性质指标见表 1[19-20]。试验场地地下水位较深，因而本次试验忽略地下水对各抗拔试验桩的影响。

表 1 砂砾石场地地层物理力学性质

Tab. 1 Physical and Mechanical Properties of Sand and Gravel Site

土层类别	层厚/m	天然重度 γ/(kN·m^{-3})	内摩擦角 φ/(°)	承载力特征值 f_{ak}/kPa
细砂	0.8	16.8	28	130
砂砾混合	4.0	20.3	35	250

2.2 试验方案

本文拟通过传统光伏支架抗拔基础与微型锚杆复合桩的现场静载拉拔试验，从位移变形、抗拔极限承载力及侧摩阻力等方面对比分析微型锚杆复合桩的优化特征，为此设计了 18 根试桩，各试桩桩型及参数见表 2。

各试桩拉筋均采用 HRB400 级 ϕ22 螺纹钢筋，测试用钢筋测力计采用 HXG 型钢弦应力计，根据设计布置位置及数量与拉筋连接。传统抗拔基础 1#～10# 试验桩采用强度 C35 混凝土。各试桩桩顶与地面平齐，养护 28 d 后按相关桩基试验规范进行各项静载试验[6]。本次试验加、卸载均采用慢速维持荷载法。按照预估承载力值分 10～15 级加载，第 1 次直接加 2 级荷载；卸载分 3～5 级。要求加、卸载时，荷载传递均匀、连续、无冲击，每级荷载在维持过程中的变化幅度不宜超过分级荷载的±10%[19]。试验加载装置如图 1 所示。

表 2 现场试桩桩型及参数

Tab. 2 Test Pile Types and Parameters of Field Test

桩号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
桩长 L/m	2.0	2.0	1.5	1.5	2.0	2.0	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0	4.0	4.0	9.0	9.0
桩径 D/mm	400	500	200	300	200	300	200	300	200	300	150	220	150	220	150	220	150	220
应力计个数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	6	6
桩型	TX	TX	KDT	KDT	KDT	KDT	DJM	DJM	DJM	DJM	WX	WX	WX	WX	WX	WX	WX	WX

注：TX，KDT，DJM，WX 分别指 T 型独立预制基础、扩大头预制基础、等截面预制基础及微型锚杆复合桩；T 型独立预制基础桩径指翼缘宽度，扩大头预制基础扩大头部分高度皆为 300 mm。

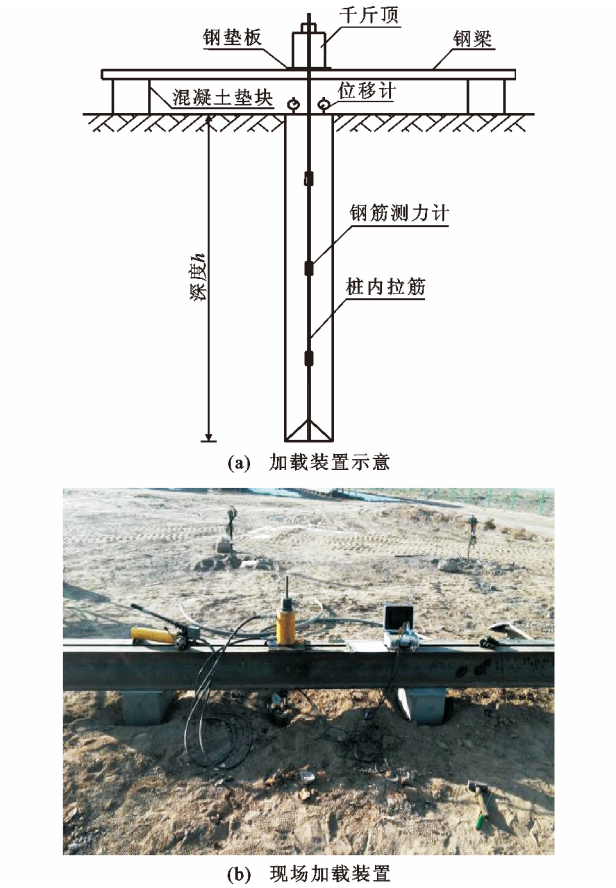
3 试验结果与分析

3.1 传统抗拔基础荷载-位移（P-S）变化特征分析

传统抗拔基础的极限抗拔承载力与桩型、桩径及桩长有关（图 2～4）。各试桩的抗拔极限承载力随桩径及桩长的增大而提高（表 3），但个别试桩结果出现异常，可能存在的原因是传统抗拔基础为预制型桩基，试桩埋入桩孔后的土方回填压实标准较难掌握，因而直接影响预制桩的抗拔性能，说明传统预制桩在应用上存在工程合格率控制的问题。同时各传统抗拔试桩的抗拔极限承载力普遍低于 15 kN，抗拔性能较弱。

试桩的拉拔破坏特征因桩型而异，如 T 型独立基础（TX）荷载-位移曲线存在明显的稳态段及陡降段，说明在到达极限抗拔承载力以前试桩的抗拔工作状态相对较稳定，而在上部荷载超过极限抗拔承载力以后，位移变形急剧发展，各试桩进入抗拔承载失效工作状态。扩大头预制基础（KDT）的荷载-位移曲线发展形态基本为连续发展型，除个别试桩存在明显的极限抗拔承载力特征点外，其余桩型无明显特征点，原因可能在于扩大头预制基础扩大头部分以上为镀锌钢管，在拉拔过程中，试桩与桩周土的摩阻力发挥相对较少，镀锌钢管可能为典型的弹塑性变形状态，进而综合表现为扩大头部分与钢管的

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



(a)　加载装置示意

(b)　现场加载装置

图 1　单桩抗拔静载试验装置

Fig. 1　Single Pile Anti Pull-out Static Loading Test Device

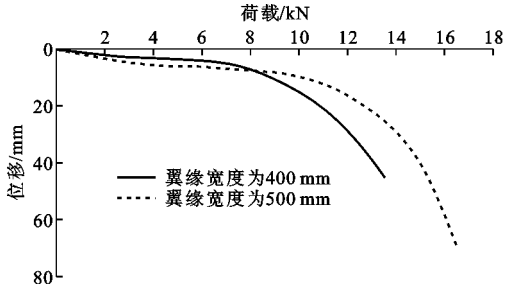


图 2　T 型独立基础竖向抗拔 *P-S* 曲线

Fig. 2　Vertical Anti Pull-out *P-S* Curves of T Type Independent Foundation

共同拉拔工作状态，因而在扩大头预制基础的研究中应注意位移控制的抗拔极限承载力确定方法选择。等截面预制基础(DJM)与 T 型独立基础(TX)的荷载-位移曲线发展形态相似，曲线为稳态段和陡降段，存在明显的极限抗拔承载力特征点，为典型的摩擦型桩。

从表 3 可以看出，传统抗拔基础在极限承载力接近的情况下，加载上拔位移相差较大，传统抗拔基础的回填压实水平较难控制，因此造成各试桩的加载位移变形不稳定，有位移突变等情况出现，对工程

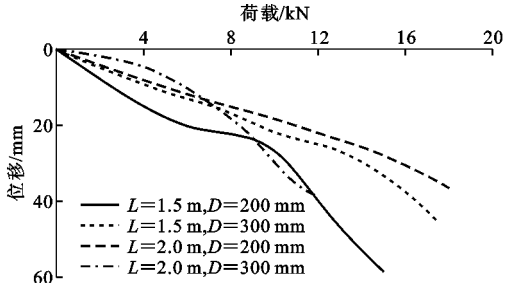


图 3　扩大头预制基础竖向抗拔 *P-S* 曲线

Fig. 3　Vertical Anti Pull-out *P-S* Curves of Prefabricated Foundation with Enlarged Head

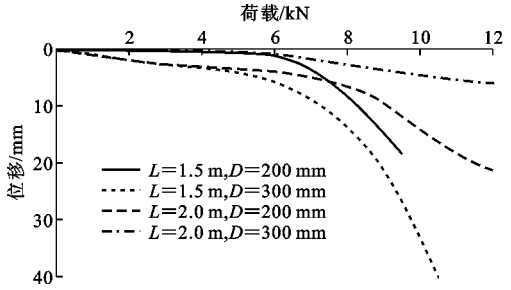


图 4　等截面预制基础竖向抗拔 *P-S* 曲线

Fig. 4　Vertical Anti Pull-out *P-S* Curves of Equal Section Prefabricated Foundation

表 3　传统抗拔基础极限承载力与极限上拔位移

Tab. 3　Ultimate Bearing Capacity and Ultimate Uplift Displacement of Traditional Anti Pull-out Foundation

桩号	1#	2#	3#	4#	5#	7#	8#	9#
极限承载力 Q_u/kN	10.5	12.0	10.0	12.5	13.5	8.0	9.0	9.0
极限上拔位移 S/mm	17.49	16.08	23.43	24.98	25.25	7.65	19.44	8.77
桩型	TX	TX	KDT	KDT	KDT	DJM	DJM	DJM

应用而言，容易造成上部结构变形不协调、结构失稳等。因此，传统抗拔基础的极限承载力及位移变形控制问题值得进一步关注和研究。

3.2　微型锚杆复合桩荷载-位移变化特征分析

图 5 为微型锚杆复合桩抗拔荷载-位移曲线。由图 5 可以看出，微型锚杆复合桩的极限抗拔承载力与桩长 L、桩径 D 相关联，其中抗拔极限承载力均随桩长、桩径的增大而提高。然而，值得关注的是，在极限承载力随桩长增加的过程中存在一个临界长度(表 4)。本次试验结果表明，在桩长从 4 m 增加到 9 m 的过程中，不同桩径试桩的极限承载力提高程度均较低，并且现场试验在加载至极限承载力时，9 m 试桩出现桩体开裂(图 6)，说明微型锚杆复合桩的桩长过度增加并不会对其极限承载力有连续大幅度增加的贡献。

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

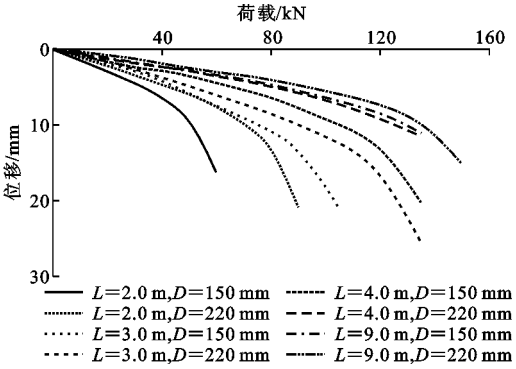


图 5 微型锚杆复合桩竖向抗拔 *P-S* 曲线

Fig. 5 Vertical Anti Pull-out *P-S* Curves of Micro Anchor Composite Pile

表 4 微型锚杆复合桩极限承载力与极限上拔位移

Tab. 4 Ultimate Bearing Capacity and Ultimate Uplift Displacement of Micro Anchor Composite Pile

桩号	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
极限承载力 Q_u/kN	60	90	105	135	135	150	150	150
极限上拔位移 S/mm	16.21	20.60	21.22	20.26	25.53	19.20	18.59	14.98

图 6 微型锚杆复合桩竖向抗拔试桩破坏现场

Fig. 6 Failure Site of Vertical Anti Pull-out Test Pile of Micro Anchor Composite Pile

建议在工程应用上，采纳本次试验结果的临界长度 4 m 作为微型锚杆复合桩桩长设计参考值，以在保证充分抗拔承载力的前提下降低工程造价。桩径的增加在提高微型锚杆复合桩极限承载力的同时，不同程度减小了桩体的极限上拔位移，说明桩径对于上拔位移的控制具有一定意义。工程上若需同时考虑承载力提高及位移变形有效控制，可适度增大微型锚杆复合桩桩径。微型锚杆复合桩的荷载-位移曲线呈现稳态段和陡降段，为典型的摩擦型桩。试桩极限承载力为 60～150 kN，相较传统抗拔基础(15 kN)而言，承载力大幅度提高。

3.3 抗拔桩承载特性和相关参数优化对比分析

从上述试验结果及分析可以看出，笔者所提出的微型锚杆复合桩相较传统抗拔类基础而言，承载力大幅度提高，位移变形同步得到较好控制。为从定量角度分析微型锚杆复合桩相较传统抗拔类基础的承载特性优化效果，笔者定义了优化特征参数 m_Q，m_S，m，即

$$m_Q=\frac{Q_{wx}}{Q_{ct}} \tag{1}$$

$$m_S=\frac{S_{wx}}{S_{ct}} \tag{2}$$

$$m=k_L\frac{m_Q}{m_L} \tag{3}$$

$$k_L=\frac{L_{wx}}{L_{ct}} \tag{4}$$

式中：m_Q 为极限承载力优化系数；m_S 为位移变形控制优化系数；m 为复合优化系数；Q_{wx}，Q_{ct} 分别为微型锚杆复合桩和传统抗拔类基础极限承载力；S_{wx}，S_{ct} 分别为微型锚杆复合桩和传统抗拔类基础极限位移变形；L_{wx}，L_{ct} 分别为微型锚杆复合桩和传统抗拔类基础桩长；k_L 为桩长折减换算系数。

优化系数 m 综合反映极限承载力提高和位移变形控制特征[11]。计算不同桩长微型锚杆复合桩和传统抗拔类基础的复合优化系数 m 时引入桩长折减换算系数 k_L。考虑到本次试验数据较多，并结合光伏支架基础的抗拔工作要求，表 5 只列出桩长为 2 m 时不同桩径(150，220 mm)微型锚杆复合桩与传统抗拔类基础的对比分析参数。

从表 5 可以看出，微型锚杆复合桩相较传统抗拔类基础极限承载力的优化系数 m_Q 因传统桩型的不同而异。与扩大头预制基础相比 m_Q 普遍大于 4.44，与 T 型独立基础比较 m_Q 值在 5.0 以上，而较等截面预制基础 m_Q 则普遍在 6.67 以上。同时，随着微型锚杆复合桩桩径的增大，与上述对应 3 种传统抗拔基础的极限承载力比较，其优化系数 m_Q 将分别增大至 6.67，7.50 和 10.00，说明桩径的增加对于微型锚杆复合桩的极限承载力提高具有积极贡献作用。本次试验结果的极限承载力优化系数 m_Q 总体反映出微型锚杆复合桩相较各类传统抗拔基础具有较高的极限承载力发挥水平特征。

对微型锚杆复合桩相较传统抗拔类基础的位移变形控制优化系数 m_S 对比可知，与扩大头预制基础比较 m_S 普遍小于 0.69，与 T 型独立基础相比 m_S 普遍低于 1.01，而与等截面预制基础比较的结果中 m_S 大于 1 和小于 1 的情况均存在。随着微型锚杆复合桩桩径的增大，与上述对应 3 种传统抗拔基础的位移变形比较，位移变形控制优化系数 m_S 有所

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

表 5　微型锚杆复合桩承载特性优化分析参数

Tab. 5　Optimal Analysis Parameters of Bearing Capacity of Micro Anchor Composite Pile

对比桩号		1#	2#	3#	4#	5#	7#	8#	9#
k_L		1.00	1.00	1.33	1.33	1.00	1.33	1.33	1.00
微型锚杆复合桩 桩径 D=150 mm	m_Q	5.71	5.00	6.00	4.80	4.44	7.50	6.67	6.67
	m_S	0.93	1.01	0.69	0.65	0.64	2.12	0.83	1.85
	m	6.17	4.96	11.56	9.86	6.92	4.72	10.66	3.61
微型锚杆复合桩 桩径 D=220 mm	m_Q	8.57	7.50	9.00	7.20	6.67	11.25	10.00	10.00
	m_S	1.18	1.28	0.88	0.82	0.82	2.69	1.06	2.35
	m	7.28	5.85	13.65	11.64	8.17	5.57	12.58	4.26
桩型		TX	TX	KDT	KDT	KDT	DJM	DJM	DJM

增大，说明桩径的增加对于微型锚杆复合桩极限承载力提高的同时一定程度上有位移变形增加的趋势。

为综合评价微型锚杆复合桩承载特性的优化特征，可观察复合优化系数 m 的变化特征，微型锚杆复合桩相较传统抗拔类基础的复合优化系数 m 与扩大头预制基础比较普遍高于 6.92，与 T 型独立基础相比普遍高于 4.96，而与等截面预制基础比较则普遍高于 3.61。同时，随着微型锚杆复合桩桩径的增大，与上述对应 3 种传统抗拔基础的位移变形比较，复合优化系数 m 分别增大至 8.17，5.85 和 4.26，说明桩径的增加对于微型锚杆复合桩的综合承载特性优化具有一定意义。通过上述不同优化参数的对比分析可以认为，微型锚杆复合桩较传统抗拔类基础而言，极限承载力大幅度提高，位移变形变化特征不一，但综合考察极限承载力提高及位移变形控制而言，承载特性综合优化效果明显，满足光伏支架基础的抗拔工作状态要求，并且其施工快速，造价较低，因而建议在西部砂砾石场地推广应用本文所提出的微型锚杆复合桩。

4　结　语

(1)基于西北地区光伏支架基础的工程应用现状，在传统抗拔类基础之上提出了微型锚杆复合桩。传统抗拔类基础及微型锚杆复合桩的现场足尺试验表明，传统抗拔基础的荷载-位移曲线分为缓变型和连续型 2 种曲线形态；微型锚杆复合桩为缓变型曲线，其桩体承载工作状态较好。

(2)传统抗拔类基础的极限承载力普遍低于 15 kN，而微型锚杆复合桩的极限承载力一致高于 60 kN。微型锚杆复合桩的极限承载力随桩长和桩径增加而显著提高，但在桩长方面存在承载力提高的临界长度(4 m)，工程应用上可采用桩长 2～4 m 和桩径 D 为 150～220 mm 的微型锚杆复合桩。

(3)分别从承载力优化、位移变形控制及复合优化效果 3 个方面定义了微型锚杆复合桩承载特性优化的定量描述参数，通过与传统抗拔基础的对比分析发现，微型锚杆复合桩的承载特性优化效果较好，满足光伏支架抗拔基础的工作要求。建议在西北砂砾石地区推广应用微型锚杆复合桩。

参考文献：

References：

[1] 沈　义. 我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价[D]. 兰州：兰州大学，2014.
SHEN Yi. The Spatial Distribution of Solar Energy and the Comprehensive Potential Evaluation of Regional Exploitation and Utilization in China [D]. Lanzhou：Lanzhou University，2014.

[2] 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(增)：252-255.
XING Ke-yong，HUANG Wen-li. Study of Design Innovation for Photovoltaic Module Bracket Foundations[J]. Engineering Journal of Wuhan University，2013，46(S)：252-255.

[3] 闫　健，刘健全. 大型光伏电站扰动区支架基础选型的探讨[J]. 太阳能，2013(23)：36-39.
YAN Jian，LIU Jian-quan. Discussion on Selection of Support Foundation for Disturbed Area of Large Photovoltaic Power Station[J]. Solar Energy，2013(23)：36-39.

[4] 刘祖德. 抗拔桩基础[J]. 地基处理，1995，6(4)：1-12.
LIU Zu-de. Uplift Pile Foundations[J]. Foundation Treatment，1995，6(4)：1-12.

[5] 马　杰，赵　建，赵延林. 抗压桩与抗拔桩受力特性的现场破坏性试验[J]. 西南交通大学学报，2013，48(2)：283-289，296.
MA Jie，ZHAO Jian，ZHAO Yan-lin. Destructive Field Test on Properties of Uplift and Compression Piles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，

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

2013,48(2):283-289,296.

[6] 陈小强,赵春风,甘爱明.成层土中抗拔桩与抗压桩的模型试验研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(增2):1537-1541.
CHEN Xiao-qiang,ZHAO Chun-feng,GAN Ai-ming. Study on Model Test of Uplift and Compression Piles in Layered Soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2009,5(S2):1537-1541.

[7] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
JGJ 94—2008,Technical Code for Building Pile Foundations[S].

[8] 罗少锋,杨文星.黄土地基中抗拔桩与抗压桩对比试验研究[J].工业建筑,2012,42(10):78-82.
LUO Shao-feng,YANG Wen-xing. Comparative Test Research on Uplift Pile and Compressive Pile in Loess Ground[J]. Industrial Construction,2012,42(10):78-82.

[9] 张忠苗,吴庆勇,张广兴.抗拔桩和抗压桩受力性状异同性研究[J].工程勘察,2006(6):4-9.
ZHANG Zhong-miao, WU Qing-yong, ZHANG Guang-xing. Study on the Differences of Bearing Behavior of Anti Pull-out Pile and Compression Pile[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2006(6):4-9.

[10] 何泓男,戴国亮,龚维明.等截面抗拔桩的极限承载力计算综述[J].公路交通科技,2014,31(6):63-69,132.
HE Hong-nan,DAI Guo-liang,GONG Wei-ming. A Review of Computation of Ultimate Bearing-capacity of Uplift Piles with Uniform Cross-section[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2014,31(6):63-69,132.

[11] 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 Xiao-qiang,ZHAO Chun-feng,GAN Ai-ming. Study of Model Test of Uplift and Compression Piles in Sand[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(3):738-744.

[12] 周俊鹏,黄雪峰,刘自龙,等.微型抗拔桩基础受力特性研究[J].工程勘察,2017(2):19-24.
ZHOU Jun-peng, HUANG Xue-feng, LIU Zi-long, et al. Mechanical Properties Research on Mini-pile Foundation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2017(2):19-24.

[13] 周俊鹏,黄雪峰,刘自龙,等.黄土地基中微型抗压与抗拔桩对比试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):121-125.
ZHOU Jun-peng, HUANG Xue-feng, LIU Zi-long, et al. Experimental Study of Micro Compression and Uplift Pile in Loess Foundation [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(1):121-125.

[14] 黄雪峰,周俊鹏,刁 钰,等.不同试验方法下微型抗拔桩的受力特性对比分析[J].兰州理工大学学报,2017,43(3):117-121.
HUANG Xue-feng, ZHOU Jun-peng, DIAO Yu, et al. Comparative Analysis of Stress Characteristics of Micro-anti-uplift Pile Subjected to Different Modes of Test[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2017,43(3):117-121.

[15] 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 Mao-song, LI Jian-jun, WANG Wei-dong, et al. Loss Ratio of Bearing Capacity of Uplift Piles Under Deep Excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(9):1291-1297.

[16] 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 Jian-jun, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong, 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.

[17] 王卫东,吴江斌.深开挖条件下抗拔桩分析与设计方法[J].建筑结构学报,2010,31(5):202-208.
WANG Wei-dong,WU Jiang-bin. Design and Analysis of Uplift Pile Under Deep Excavation[J]. Journal of Building Structures,2010,31(5):202-208.

[18] 姚裕春.边坡开挖工程活动对环境影响研究[D].成都:西南交通大学,2005.
YAO Yu-chun. Study on Influence of Slope Cutting to Environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2005.

[19] 朱中华.微型抗拔桩桩-土位移剪切破坏模型试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2017.
ZHU Zhong-hua. Experimental Study on the Model of Pile-soil Displacement Shear Failure in Micro Uplift Pile[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2017.

[20] 刘自龙.微型桩抗拔承载性状试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2017.
LIU Zi-long. Experimental Study on Bearing Capacity of Uplift Micro Pile[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2017.

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