

DOI: 10.11779/CJGE201501015

砂土中螺旋锚上拔承载特性模型试验研究

郝冬雪, 陈 榕, 符胜男

(东北电力大学建筑工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 螺旋锚基础因其能够利用深层土体抗力且具有快速安装和承载的优势而广泛应用于各类岩土工程问题中。多锚片螺旋锚上拔承载特性受埋深、锚片间距、数量、土质条件等因素影响。相邻锚片相互影响导致土体破坏区域重叠, 从而影响破坏模式和极限承载力, 然而多锚片螺旋锚承载特性的理论及试验研究有限。针对砂土中螺旋锚锚片间距及数量对上拔承载特性及极限上拔承载力影响进行室内 1g 模型试验研究。结果表明, 在中密砂及密砂中, 单锚埋深比分别超过 6.0 和 10.5 时可认为是深埋锚。中密砂中深埋多片螺旋锚锚片间距在 $3.0D \sim 4.5D$ 时, 各锚片承载能力能够独立发挥, 承载量破坏模式发生; 密砂中浅埋多片螺旋锚保证承载量破坏模式的锚片间距超过 $6.0D$, 但间距为 $6.0D$ 时, 螺旋锚发挥效率超过 90%。增加锚片数量可适当提高上拔承载力, 但当锚片数量增加使得锚片间距小于某一临界值时, 柱状破坏模式发生, 螺旋锚承载力不再增加; 中密砂中此临界间距约为 $1.5D$, 密砂中临界间距约为 $2.0D$ 。

关键词: 多锚片螺旋锚; 上拔承载特性; 临界埋深比; 锚片间距; 锚片数量

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2015)01 - 0126 - 07

作者简介: 郝冬雪(1981 -), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事输电线路基础承载特性及原位测试机理研究工作。E-mail: haodongxue2005@126.com。

Experimental study on uplift capacity of multi-helix anchors in sand

HAO Dong-xue, CHEN Rong, FU Sheng-nan

(School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Helical anchors are widely used to resist uplift loading for a variety of applications involving a wide range of soil conditions. The performance and ultimate capacity of multi-helix anchors depends on the depth of embedment, spacing and number of helixes and soil conditions. The interaction of adjacent helixes can make the overlapping of soil failure zone, which thus will affect the failure mode and ultimate uplift resistance. However, there is very limited experimental study on the problem. The behavior of multi-helix anchors in medium and dense sand is investigated by performing a series of small-scale pullout tests. The embedment ratios for deep anchors in medium and dense sand are regarded as 6 and 10.5 respectively. The critical spacing of helixes of deep anchors in medium sand that makes individual bearing capacity occur is between $3.0D$ and $4.5D$. The critical spacing of helixes of shallow anchors in dense sand is greater than $6.0D$, which can reach the efficiency of more than 90%. The uplift resistance will increase with the increasing number of helixes. However, cylindrical failure mode will happen when the spacing decreases to some value due to the increase in number of helixes, which can no longer produce higher uplift resistance. The critical values of spacing are about $1.5D$ and $2.0D$ for the medium and dense sand respectively.

Key words: multi-helix anchor; uplift capacity; critical embedment ratio; spacing of helix; number of helix

0 引 言

螺旋锚是一种利用深层土体抗力的锚固结构, 由一片或多片螺旋板等间距或非等间距焊接在圆形或方形长螺杆或钢杆上, 通过机械方式在螺杆顶部施加一定扭矩使之旋入土层中。20 世纪 50 年代作为一种锚固技术在国外逐渐发展, 最初应用于输电线路工程, 因其具有快速安装、快速承载及较强的抗拔能力而广泛应用于其它岩土工程问题中, 如坑壁及边坡支护、海上结构物拉索、土工测试反力装置等, 并取得了十

分可观的经济效益。中国螺旋锚的引进与使用始于 20 世纪 90 年代初, 在电力、交通、水利、石油、市政、建筑等方面逐步得到推广应用^[1-3], 多用于有抗拔要求的基础。在设计中, 根据具体情况, 可以选择等尺寸的单锚片、双锚片或多锚片, 或者下小上大的多锚片螺旋锚。螺旋锚上拔行为和承载力依靠锚的具体几何

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308095); 中国电机工程学会电力青年科技创新项目 (20110515)

收稿日期: 2014 - 05 - 12

特征, 如尺寸, 螺纹开口, 锚盘数量, 锚杆形状和尺寸, 埋深和场地土条件。然而, 根据国外研究资料, 多层螺旋锚上拔工作性能的理论预测与现场试验结果存在很大误差, 其承载力理论基本二十年保持不变^[4]。2011年, 国家电网公司发布的企业标准“架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范”^[5](以下简称标准)在总结了近十年辽宁丹东、营口、盘锦等地大量开展的架空输电线路螺旋锚基础试验研究和工程实际应用成果的基础上编制而成。标准中计算螺旋锚上拔承载力包含圆柱剪切法、土重法和承载量法, 各方法的适用条件仅由埋深和锚片数量决定。实际上采用何种理论估算螺旋锚上拔承载力与土体变形破坏模式有关, 土体滑裂面的发展除与锚片埋深相关外, 主要受锚片间距的影响, 但标准中未对其影响进行解释和说明。目前, 关于锚片间距对螺旋锚上拔承载力的影响尚不明确。

国外螺旋锚设计预测其上拔承载力有圆柱剪切(bearing plus cylindrical shear)、承载量法(individual bearing)和安装扭矩法(installation torque)3种方法。安装扭矩法一般为锚板制造商提供的方法, 根据安装扭矩经验估计螺旋锚上拔承载力。根据螺旋锚顶片锚板安装深度分为浅埋和深埋, 判定标准为土体破坏滑裂面是否开展至地表。螺旋锚制造商A. B. CHANCE公司以顶片锚埋深 H 与锚板直径 D 比值5做为浅深模式的界限^[6], EPC (earth contact products) 建议埋深比 H/D 为6^[7]。浅埋锚上拔承载力简单估算方法采用倒锥法。深埋锚上拔力理论根据锚片间距采用圆柱法和承载量法。图1为两种理论的土体破坏模式。当锚片间距较小时, 在极限状态下, 锚片间土体整体移动, 形成柱状剪切面, 锚杆对整体承载力无贡献, 抗力由两部分构成, 上层锚片提供的承载力和各锚片间土体圆柱面上的抗剪强度, 即“圆柱剪切法”。当锚片间距很大, 相互间无影响, 每个锚片承载力能够独立发挥, 上拔承载力等于各锚片上拔承载力之和, 即“承载量法”。在一指定场地中, 当锚片间距为某一值时, 两种承载力算法能给出近似相同的结果, 许多螺旋锚制造商认为这一间距为三倍锚板直径。

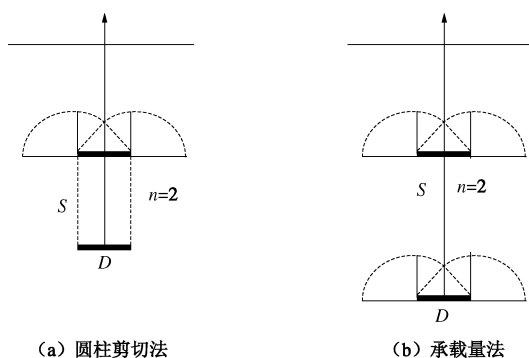


图1 螺旋锚破坏模式 (深埋锚)

Fig. 1 Failure modes of multi-helix anchor (deep anchor)

然而, 很少有足尺或现场试验数据证明多锚片螺旋锚锚片间距为 $3D$ 即能保证各锚片上拔行为相互独立。基于有限的数据^[8-11], 似乎平均3倍锚板直径的间距不会使各锚片行为独立。除研究影响破坏模式的锚片间距外, 从实际角度出发, 有必要研究锚片个数的影响。在实际工程中, 若锚片间距大, 虽能保证锚片影响相互独立, 但可能会使锚杆过长而不能埋置在同一土层, 使得各锚片不能同时发挥作用, 从而影响其抗拔力的发挥。在这种情况下, 需要考虑选择可埋置在同一土层的多片近间距螺旋锚, 但锚片数量对上拔承载力的影响研究有限。因此, 本文采用室内小比尺模型试验, 不考虑安装扰动影响, 研究砂土中锚片间距及数量对多片螺旋锚上拔行为及极限上拔力的影响。

1 螺旋锚拉拔模型试验

1.1 砂样制备及加载方式

试验所用砂土为超细石英砂, 砂土物理特性指标: 比重 $G_s=2.65$, 中值粒径 $d_{50}=0.17$ mm, 不均匀系数 $C_u=1.63$, 曲率系数 $C_c=0.97$, $\rho_{dmax}=1.774$ g/cm³, $\rho_{dmin}=1.461$ g/cm³。40 kPa 围压时密砂峰值内摩擦角为 36.7° , 中密砂内摩擦角为 32° , 临界内摩擦角为 29° 。采用砂雨法制备土样, 分别制备相对密实度 $D_r=44\%$ 的中密砂和 $D_r=78\%$ 的密砂。模型槽为 38 mm 厚不锈钢板制作, 内部长宽高为 650 mm×390 mm×325 mm。螺旋锚采用预埋的方式, 底片锚板距槽底 20 mm。为避免洒砂过程中锚片对下面土样产生影响, 多锚片螺旋锚采用预埋再连接的方式。在模型槽内部画上刻度线, 当铺砂至指定位置时, 安放底部第一片锚板及锚间的锚杆, 当铺砂至第二片锚埋深时, 连接第二片螺旋锚, 依次进行直至顶部锚片。采用吸尘装置将砂面刮平至指定高度。

采用电动作动器进行位移加载, 最大竖向位移 250 mm, 竖向力 7 kN。对于干砂, 位移加载率对上拔承载力基本无影响, 上拔采用的位移加载率为 0.3 mm/s。作动器上固定连接杆, 依次连接荷载传感器及与螺旋锚连接的钩子。通过数据采集软件实现作动器控制和数据传输。

1.2 螺旋锚模型

为保证强度和刚度要求, 螺旋锚由钢材加工而成, 锚片厚为 1 mm, 直径 D 为 20 mm, 螺距为 5 mm, 锚杆直径 d 为 4.7 mm, 如图 2 所示。为与作动器连接杆上钩子相连, 螺旋锚顶部安装圆柱形帽。锚杆光滑, 锚杆与土体间摩擦可忽略。



图2 螺旋锚模型

Fig. 2 Models of multi-helix anchors

1.3 试验方案及布局

为研究螺旋锚间距及锚片数对上拔承载特性的影响,设计不同间距和数量的多锚片螺旋锚,试验方案如表1所示。根据螺旋锚上拔过程土体影响范围布置螺旋锚在模型槽中的位置。上拔过程土体变形范围与土体剪胀角有关^[12],砂土剪胀角一般小于 25° ^[13],因此按照 25° 剪胀角计算影响范围。中密和密砂中螺旋锚布局相同。

表1 试验方案

Table 1 Test programs

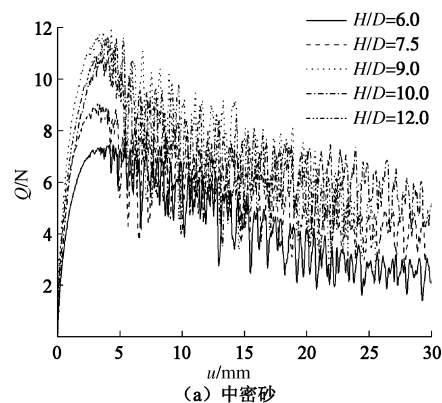
编号	影响因素	H/D	锚片数	锚片间距	相对密实度
1	埋深比	6.0	1	0	44%, 78%
2		7.5			
3		9.0			
4		10.5			
5		12.0			
6	锚片间距及锚片数	6.0, 7.5	2	1.5D	44%, 78%
7		6.0, 10.5		3.0D	
8		6.0, 12		4.5D	
9		6.0, 9.0		6.0D	
10	锚片数	6.0, 7.5, 9.0	3	1.5D	44%, 78%
11		6.0, 9.0, 12.0	3	3.0D	
12		6.0, 8.0, 10.0, 12.0	4	2.0D	

2 单片螺旋锚上拔承载特性

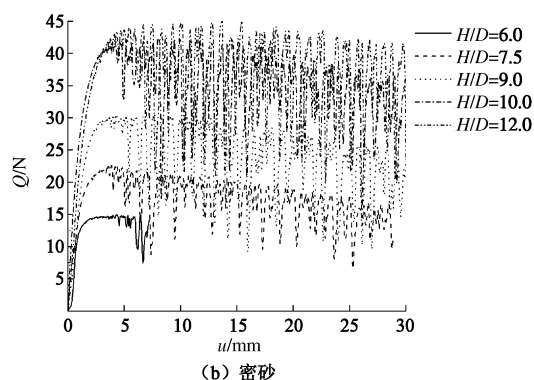
2.1 荷载-位移关系曲线

单片螺旋锚荷载位移关系曲线如图3所示,上拔位移达到1.5倍锚片直径。荷载位移关系曲线 $Q-u$ 在达到峰值后或接近峰值时出现波动,峰值后,波动幅度更大。这是因为当锚板上拔达到极限承载力后,锚板底部出现缝隙,锚板上部土体被挤压到一定程度后从锚板边缘塌落到底部缝隙,另一方面因为锚片螺旋的影响,土体可能从螺缝流动至锚片底部,使得来源锚板上方土体的承载力下降。随着上拔位移增加,锚板上部土体再被挤压,上拔力再次增大。这种现象同样被Rowe等^[14-16]文献所报道。随着锚板埋深增加,

峰值附近荷载位移关系曲线波动越大。中密砂中,锚板上拔力达到峰值后很快下降;密砂中锚板达到峰值后尽管上拔阻力波动很大,但可以持续很长一段,埋深越大,峰值保持时间越长。



(a) 中密砂



(b) 密砂

图3 单片螺旋锚荷载位移关系曲线

Fig. 3 Uplift resistance-displacement curves

2.2 极限上拔力及临界埋深

图4为中密和密砂中单片螺旋锚不同埋深比时极限上拔力 Q_u 及其对应的上拔位移 u_f ,下面称破坏位移。除中密砂埋深比 $H/D=6$ 外,螺旋锚上拔破坏位移均随着埋深比增加而增大,密砂更明显。中密砂中破坏位移与锚片直径比 u_f/D 在0.16~0.24之间,密砂在0.13~0.34之间。中密砂中,埋深比超过9,螺旋锚极限上拔力不再随埋深增加,即出现了“临界埋深现象”。密砂中埋深比在12以内未出现如中密砂中的临界埋深现象,但在埋深比超过10.5以后,极限上拔力增加缓慢。对上拔力进行归一化处理,上拔承载力系数 $N_r = Q_u / \gamma A H$, γ 为土的重度, A 为锚片面积, H 为螺旋锚埋置深度。图5为不同埋深比 N_r 时,对于密砂, $H/D=10.5$ 时, N_r 出现峰值, H/D 小于10.5,随着 H/D 增加, N_r 明显增加;对于中密砂, $H/D=6\sim 9$, N_r 值变化很小,当 H/D 超过9时,随着 H/D 增加, N_r 减小。Das等^[17]提出根据 N_r 判定浅深破坏模式过渡的临界埋深比, N_r 极限值对应的埋深比为临界埋深比,则对于密砂,临界埋深比为10.5,中密砂临界埋深比

可认为是 6。

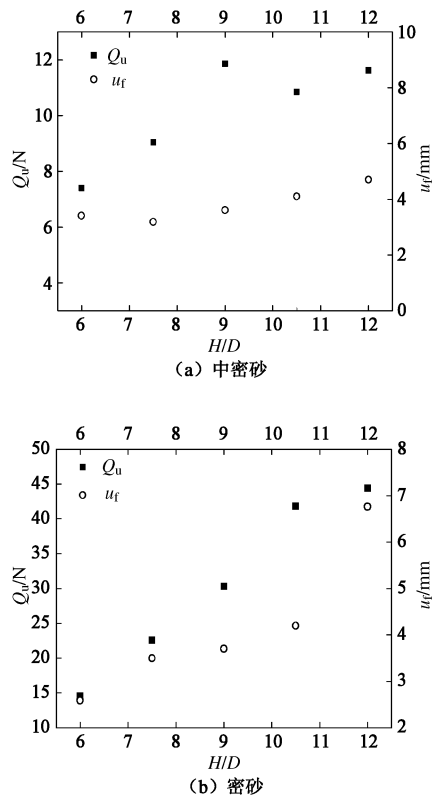


图 4 不同埋深比时单片螺旋锚极限上拔力和破坏位移

Fig. 4 Ultimate uplift capacities and failure displacements under various embedment ratios

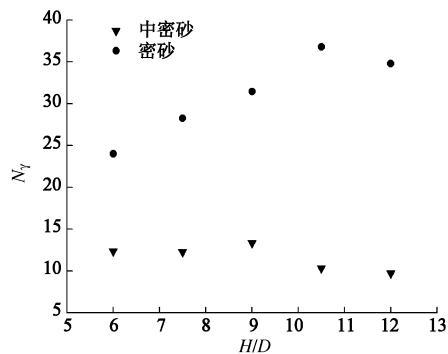


图 5 不同埋深比时归一化上拔系数

Fig. 5 Variation of breakout factor N_f with embedment ratio H/D

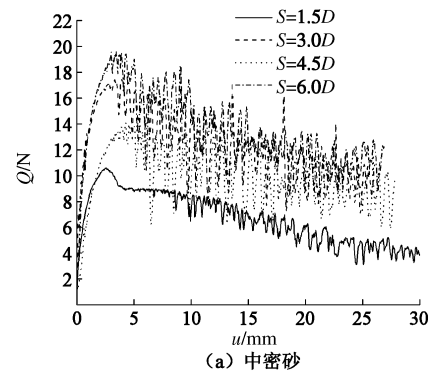
3 多锚片螺旋锚上拔承载特性

多锚片螺旋锚上拔承载力受几何形状如锚片直径、螺距、锚片个数和间距、锚杆形状和尺寸、埋深及场地土质条件等影响。本文主要分析砂土中锚片间距 S 及锚片数量 N 对螺旋锚上拔行为及极限上拔力影响。

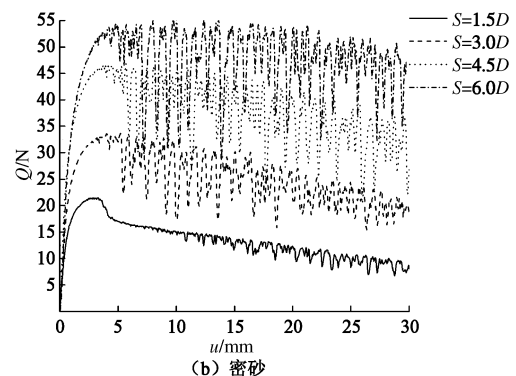
3.1 锚片间距影响

为分析锚片间距的影响, 在中密及密砂中进行不

同间距双片螺旋锚上拔试验。第一片锚片埋深相同, 为 $6.0D$, 间距 S 分别为 $1.5D$, $3.0D$, $4.5D$, $6.0D$ 。图 6 为中密及密砂中双锚片螺旋锚上拔荷载位移关系曲线。锚片间距为 $3.0D \sim 6.0D$ 时荷载与位移曲线与单锚相似; 间距为 $1.5D$ 时荷载位移曲线在峰值之后一段位移仍保持光滑, 且在峰值后出现明显的上拔力跌落。荷载位移曲线光滑因为锚片间距足够近, 锚片间土体随着位移发展同时被向上带动, 锚间土不向侧向及底部滑落, 同时第一片锚片底部未出现缝隙, 使得其上部土体不会向下塌落, 双锚片间土体破坏模式为柱状破坏。



(a) 中密砂



(b) 密砂

图 6 不同间距双锚片螺旋锚上拔荷载位移关系曲线

Fig. 6 Relationship between uplift resistance and displacement of double-helix anchors with various spacings

螺旋锚承载力发挥程度可用多锚片螺旋锚上拔承载力与各单锚上拔力之和的比值来定义:

$$\eta = Q_{MU} / \sum Q_{IU} \times 100\% \quad (1)$$

式中, η 为效率, Q_{MU} 为多锚片螺旋锚上拔力极限值, Q_{IU} 为各单锚上拔力极限值。

表 2 为中密及密砂中单锚及双锚极限上拔力 Q_u 及螺旋锚发挥效率 η 。将不同间距双片锚承载力发挥效率绘于图 7。对于中密砂, 埋深比超过 6.0 为深埋锚, 第二片锚片为深破坏模式。由图可见, $S = 3.0D$ 时, 双锚片发挥效率达到 90% 以上, $S \geq 4.5D$, 锚片间距互不影响, 双锚片螺旋锚各单片抗拔能力能够独立发

挥。对于密砂，埋深比超过 10.5 为深埋锚， $S \geq 4.5D$ 时，第二片锚为深破坏模式。随着锚片间距增加，螺旋锚发挥效率明显增大， $S = 1.5D$ 时，上锚片严重影响下锚片承载力的发挥，螺旋锚发挥效率小于 60%； $S = 6.0D$ 时，螺旋锚发挥效率超过 90%，接近单独破坏模式。

表 2 单片及双片螺旋锚极限上拔力及效率

Table 2 Ultimate uplift capacities and efficiencies of single-helix anchors and double-helix anchors

$D_f/\%$	N	S	H/D	Q_u/N	$\eta/\%$
44	1	0	6.0	7.40	100
	1	0	7.5	9.04	100
	1	0	9.0	11.86	100
	1	0	10.5	10.85	100
	1	0	12.0	11.62	100
	2	1.5D	6.0, 7.5	10.59	64.4
	2	3.0D	6.0, 9.0	17.42	90.4
	2	4.5D	6.0, 10.5	18.71	102.5
	2	6.0D	6.0, 12.0	19.50	102.5
78	1	0	6.0	14.60	100
	1	0	7.5	22.50	100
	1	0	9.0	30.30	100
	1	0	10.5	41.82	100
	1	0	12.0	44.40	100
	2	1.5D	6.0, 7.5	21.50	57.9
	2	3.0D	6.0, 9.0	33.60	74.8
	2	4.5D	6.0, 10.5	46.50	82.4
	2	6.0D	6.0, 12.0	54.30	92.0

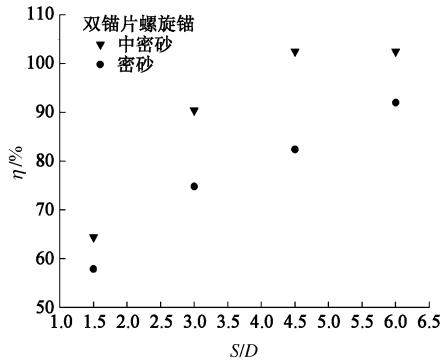


图 7 不同间距双片螺旋锚发挥效率

Fig. 7 Variation of efficiency of double-helix anchors with spacing

3.2 锚片数量影响

除了研究锚片间距影响来判断采用哪种承载力理论估计螺旋锚上拔承载力外，从实际的角度出发，有必要考虑近间距锚片上拔行为。为讨论锚片数量对上拔承载行为及极限上拔力的影响，在同样间隔距离内插入不同数量锚片。 $H/D = 6 \sim 9$ 之间安装 2 片及 3 片锚片， $H/D = 6 \sim 12$ 之间安装 2~4 片锚片，中密砂及密砂中上拔荷载位移关系曲线如图 8，9 所示。

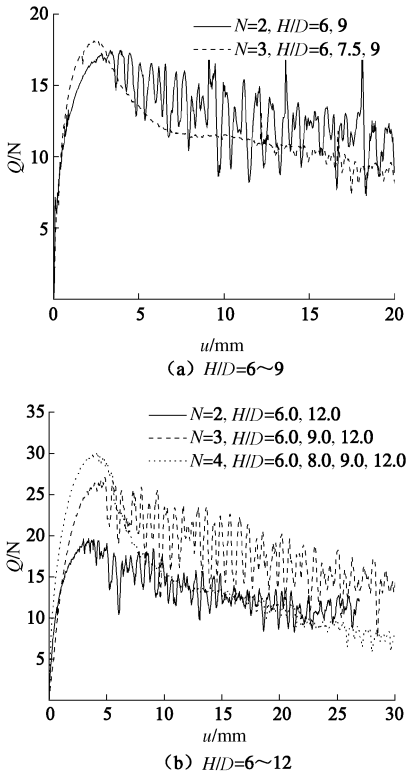


图 8 中密砂中多片螺旋锚上拔荷载位移关系曲线

Fig. 8 Uplift resistance-displacement curves of multi-helix anchors in medium sand

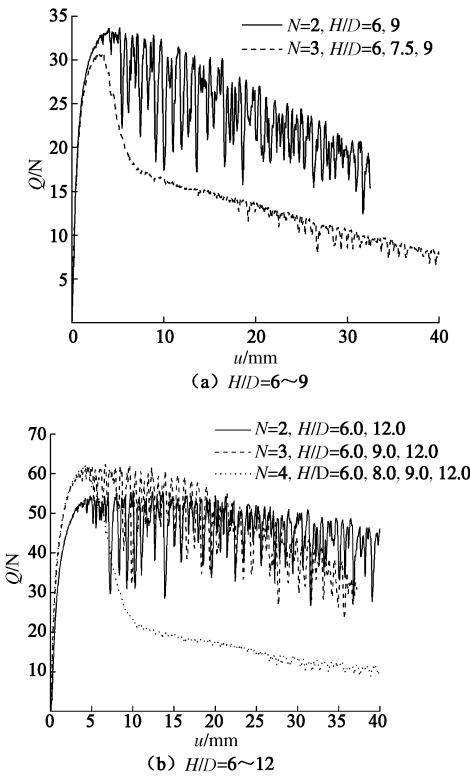


图 9 密砂中不同锚片数上拔荷载位移关系曲线

Fig. 9 Uplift resistance-displacement curves of multi-helix anchors in dense sand

$H/D = 6 \sim 9$ 及 $6 \sim 12$ 范围内分别安装 3 片 ($S =$

表 3 多锚片螺旋锚极限上拔力及效率

Table 3 Ultimate capacities and efficiencies of multi-helix anchors

$D_r/\%$	N	S	H/D	Q_u/N	$\eta/\%$
44	2	3.0D	6.0, 9.0	17.416	90.40
	3	1.5D	6.0, 7.5, 9.0	18.130	64.00
	2	6.0D	6.0, 12.0	19.500	102.50
	3	3.0D	6.0, 9.0, 12.0	27.040	87.60
	4	2.0D	6.0, 8.0, 10.0, 12.0	30.085	74.90
78	2	3.0D	6.0, 9.0	33.600	74.80
	3	1.5D	6.0, 7.5, 9.0	30.647	45.50
	2	6.0D	6.0, 12.0	54.300	92.00
	3	3.0D	6.0, 9.0, 12.0	61.500	68.90
	4	2.0D	6.0, 8.0, 10.0, 12.0	61.860	50.74

1.5D) 和 4 片锚片 ($S = 2.0D$) 时荷载位移关系曲线变得光滑,表明锚片间距小于 2.0D 时各锚片间土体破坏接近柱状破坏。当多片螺旋锚出现柱状破坏模式时,在柱状滑裂面内增加锚片对螺旋锚抗拔基本无贡献。表 3 为中密及密砂中不同锚片数量螺旋锚的极限上拔力及效率。其中在计算 $N = 4, S = 2.0D$ 螺旋锚效率时,埋深比 $H/D = 8$ 和 10 单片锚上拔承载力通过插值确定。表中数据表明,随着锚片数量增加,各锚片发挥效率明显减小。

图 10 为在固定间距内安装不同数量锚片的多片螺旋锚与双片螺旋锚上拔力比值 Q_N/Q_2 与锚片数量 N 的关系。随着锚片数增加,螺旋锚上拔承载力提高程度放缓,锚片数增加,锚片间距离减小,锚周围土体滑裂面向柱状模式发展,当间距达到某一临界值 S_{cr} 时,增加锚片数量上拔承载力不再提高。密砂中, $H/D = 6 \sim 12$ 之间, Q_4/Q_2 与 Q_3/Q_2 接近,临界间距 $S_{cr} \approx 2.0D$; $H/D = 6 \sim 9$ 之间加入一片锚片,即 $S = 1.5D < S_{cr}$,土体从过渡破坏模式改变为柱状破坏模式,上拔承载力未升高反而下降。中密砂中, $H/D = 6 \sim 12$ 之间加入 1 片及 2 片锚片承载力分别提高 38.7%和 54.3%; $H/D = 6 \sim 9$ 之间加入一片锚片, Q_3/Q_2 为 1.04,上拔承载力基本未增加,则中密砂中, $S_{cr} \approx 1.5D$ 。

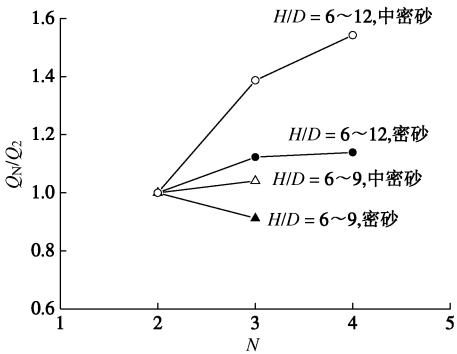


图 10 锚片数量影响

Fig. 10 Effects of number of helixes

4 结 论

对砂土中单锚及多锚片螺旋锚上拔行为及上拔极限承载力进行室内模型试验研究,探讨单锚临界埋深、多锚片螺旋锚锚片间距及数量对土体破坏模式及上拔极限承载力的影响。

(1) 对于单片螺旋锚,通过上拔承载力系数与埋深比关系确定浅深破坏模式过渡的临界埋深比,中密砂中单片螺旋锚临界埋深比约为 6,密砂中临界埋深比约为 10.5。

(2) 通过对不同间距双片螺旋锚上拔承载力效率进行分析,中密砂中深埋锚锚片间距超过 4.5D 时,螺旋锚效率达到 100%,各锚片破坏模式互不影响的临界间距在 3.0D~4.5D 之间;密砂中浅埋锚单独破坏模式的临界间距超过 6.0D,但间距为 6.0D 时,螺旋锚效率发挥已超过 90%。因此,在土层厚度允许情况下,建议考虑采用上述能够使锚片充分独立发挥作用的间距。

(3) 在一定埋深范围内安装锚片,随着锚片数量增加,螺旋锚承载力增加,螺旋锚发挥效率降低。但当锚片数量增加使得锚片间距小到某一临界值时,增加锚片数量承载力不再提高。中密砂及密砂中此临界间距分别为 1.5D 和 2.0D。

参考文献:

[1] 王 钊, 刘祖德, 程葆田. 螺旋锚的试制和在基坑支护中的应用[J]. 土木工程学报, 1993, 26(4): 47 - 53. (WANG Zhao, LIU Zu-de, CHENG Bao-tian. Trial-produce of screw anchor and its application in fencing foundation pit[J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(4): 47 - 53. (in Chinese))

[2] 侍 倩, 刘一亮, 李翠华, 等. 螺旋锚基础在输电线路中应用的试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(4): 29 - 32. (SHI Qian, LIU Yi-liang, LI Cui-hua, et al.

- Experimental research on application of screw anchored foundation to transmission route[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1998, **31**(4): 29 - 32. (in Chinese))
- [3] 王 杰, 杜秋男, 孙海峰, 等. 砂土中螺旋锚极限抗拔承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报, 2009, **25**(1): 66 - 70. (WANG Jie, DU Qiu-nan, SUN Hai-feng, et al. Study on the ultimate uplift bearing capacity of screw anchor[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2009, **25**(1): 66 - 70. (in Chinese))
- [4] MERIFIELD R S. Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2011, **137**(7): 704 - 716.
- [5] Q/GDW 584—2011 架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范[S]. 2011. (Q/GDW 584—2011 Technical regulation for design screw anchor foundation of overhead transmission line[S]. 2011. (in Chinese))
- [6] CHANCE A B. Basic guidelines for designing helical piers for underpinning[M]. 1993. www.abchance.aom.
- [7] Earth Contact Products. Utility industry anchor design and maintenance manual[M]. 2011. www.Earthcontactproducts.Com.
- [8] CLEMENCE S P, CROUCH L K, STEPHENSON R W. Prediction of uplift capacity for helical anchors in sand[C]// Proceedings of the 2nd Geotechnical Conference. Cairo, 1994: 332 - 343
- [9] SAKR M. Performance of helical piles in oil sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(8): 1046 - 1061.
- [10] TSUHA C, AOKI N. Relationship between installation torque and uplift capacity of deep helical piles in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(5): 635 - 647.
- [11] LUTENEGGER A J. Behavior of multi-helix screw anchors in sand[C]// 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference. Toronto, 2011.
- [12] LIU J Y, LIU M L, ZHU Z D. Sand deformation around an uplift plate anchor[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(6): 728 - 737.
- [13] ANDERSEN K H, SCHJETNE K. Database of friction angles of sand and consolidation characteristics of sand, silt and clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2013, **139**(7): 1140 - 1155.
- [14] ROWE R K, DAVIS E H. The behaviour of anchor plates in sand[J]. Géotechnique, 1982, **32**(1): 25 - 41.
- [15] DICKIN E A. Uplift behavior of horizontal anchor plates in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **114**(11): 1300 - 1317.
- [16] MURRAY E J, GEDDES J D. Uplift of anchor plates in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(3): 202 - 215.
- [17] DAS B M, SEELEY G R. Breakout resistance of shallow horizontal anchors[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, **101**(GT9): 999 - 1003.