

文章编号: 1005-2992(2018)04-0070-06

# 黏土中螺旋锚几何尺寸对上拔承载力影响的数值分析

郝冬雪<sup>1</sup>, 宋 阳<sup>2</sup>, 陈 榕<sup>1</sup>, 赵鹏举<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 南方电网茂名供电局, 广东 茂名 525000; 3. 国网锦州市供电公司, 辽宁 锦州 121200)

**摘 要:** 近年来, 螺旋锚因其快速安装和立即承受荷载的特性而被广泛应用于输电线路工程中。然而, 螺旋锚不同几何尺寸对上拔承载特性影响较大。采取有限元分析对可塑黏性土中螺旋锚的上拔承载特性进行研究, 分析螺旋锚几何尺寸对上拔承载力的影响。研究表明: 随着螺旋锚埋置深度的增大, 螺旋锚上拔力增大, 当埋深比  $H/D > 9$  时, 上拔力增大幅度缓慢, 上拔力系数基本保持不变。对于双盘螺旋锚, 当锚盘间距  $S = 4.5D$  时, 螺旋锚发挥效率大于 90%, 每个锚盘相互影响较小的临界间距约为  $4.5D$ ; 间距及锚盘平均直径相同的三盘螺旋锚, 非等直径螺旋锚上拔力略低于等直径螺旋锚, 但考虑安装易操作性, 宜优选非等直径螺旋锚。

**关键词:** 螺旋锚; 上拔承载特性; 几何尺寸; 有限元分析

**中图分类号:** TU432

**文献标识码:** A

近年来, 螺旋锚因其能够快速安装和立即承受荷载的特性而被广泛的应用于输电线路工程中<sup>[1~2]</sup>。然而螺旋锚不同几何尺寸对上拔承载特性影响较大, 如锚的埋置深度、锚盘间距、锚盘直径等。郝冬雪等<sup>[3~4]</sup>通过室内模型试验对砂土中平板锚及螺旋锚承载特性进行研究, 探讨了锚盘型式、锚盘埋深比和锚盘间距比对上拔力承载力的影响, 提出了不同密实度砂土中单锚上拔承载力的计算方法, 建议了发生“独立破坏模式”和“圆柱破坏模式”的锚盘临界间距。董天文等<sup>[5~6]</sup>使用极限平衡理论和 Meyerhof 深基础承载力理论, 提出抗拔螺旋桩首层叶片界限埋深和叶片控制间距, 提出了多片螺旋桩竖向上拔破坏模式, 并基于深基础承载力理论对螺旋桩基础的抗拔承载性状进行分析, 提出了叶片距宽比的修正参数。Ilamparuthi 等<sup>[7]</sup>在松砂、中密及密砂中进行了不同埋深比、不同板径的圆形锚的上拔试验, 给出荷载位移关系曲线, 观察不同埋深比土体的破坏模式, 提出一系列不同内摩擦角砂土中圆形锚板上拔力因数的经验公式, 并与 14 次现场试验结果对比, 验证极限承载力计算方法的有效性。Merifield<sup>[8~10]</sup>采取有限元分析方法探讨了在饱和黏土 ( $\phi_u = 0$ ) 中首层锚盘浅埋和深埋两种情况时锚盘间距比及数目对螺旋锚上拔力的影响, 给出不同情况的上拔承载力公式。对于浅埋锚, 每个锚片承载力系数 (无重量土中) 与锚片埋深比无关, 仅与锚片间距有关; 对于深埋锚, 随着锚片间距的变化, 会发生整体破坏和局部化破坏两种模式, 两者发生转化的临界间距约为  $1.58D$ 。整体深埋破坏时, 整个螺旋锚上拔力是锚片间距比和锚片数目的函数, 局部化深破坏模式时, 上拔力为各锚盘上拔力之和。Wang 等<sup>[11]</sup>对非均质饱和黏土中多锚

收稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308095, 51409045); 吉林省科技厅优秀青年人才基金项目 (20170520105JH)

第一作者: 郝冬雪 (1981-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 输电线路基础承载特性及原位测试机理研究

通讯作者: 陈 榕 (1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 软土及冻土地基加筋机理研究

电子邮箱: haodongxue2005@126.com (郝冬雪); 706652755@qq.com (宋阳); lg1316cih@126.com (陈榕); 837467150@qq.com (赵鹏举)

片螺旋锚进行大变形分析,认为锚盘间距比  $S/D \leq 3.2$  时圆柱剪切破坏模式发生,  $S/D \geq 5$  时,承载力破坏模式发生。

上述螺旋锚上拔承载力的研究基本分别针对砂土和饱和黏土 ( $\phi_u = 0$ ) 的情况,而实际上螺旋锚基础不仅适用于砂土、淤泥质软土地基,对于可塑及硬塑的黏土地基仍适用,尤其当作为输电杆塔或拉线基础时,线路跨越范围内会出现不同的土质条件。但针对可塑黏性土地基中螺旋锚的上拔承载力特性及数值模型分析很少。因此,本文基于有限单元法研究可塑黏性土地基中螺旋锚基础的上拔承载特性,重点探讨其几何尺寸对破坏模式和抗拔能力的影响。

## 1 螺旋锚有限元模型建立

### 1.1 计算模型

由于荷载和结构是完全对称的,所以取整个模型的 1/4 作为计算模型,根据《架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范》<sup>[12]</sup> 中基本规定,锚盘直径宜取 20 cm ~ 70 cm,螺旋锚杆径宜为 8 cm ~ 13 cm。故本文中直径锚盘直径  $D$  取 40 cm,锚杆直径  $d$  取 10 cm,螺旋锚尺寸图,如图 1 所示。为了消除边界条件的影响,计算域以锚片底部向下取 1 倍锚杆长度,径向边界取 20 倍的锚片直径。约束土体下表面  $x, y, z$  方向上位移,即  $U_1 = U_2 = U_3 = 0$ ;侧面约束  $x, z$  方向的位移和绕  $y$  轴上的旋转,即  $U_1 = U_3 = UR_2 = 0$ ;锚顶面与刚性表面 tie 连接,荷载施加在刚性面的参考点上,采用位移加载方式。由于上拔过程中螺旋锚周围土体会产生较大变形,对螺旋锚周围一定范围内土体进行网格加密处理,锚体和土体均采用 C3D8R 实体单元进行划分,螺旋锚网格详图,如图 2 所示。

### 1.2 本构模型及模型参数

假定土为均质、连续、各向同性弹塑性材料,服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。螺旋锚达到极限荷载时,锚身一般不发生破坏,故螺旋锚采用线弹性本构模型。模型参数如表 1 所示,其中土性参数根据《架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范》<sup>[12]</sup> 中可塑黏土参数范围选取。锚-土之间的接触型式为摩擦接触,分析过程中螺旋锚和土之间的摩擦系数保持不变(摩擦系数  $\mu = \tan\phi = 0.12$ ,  $\phi$  为摩擦角)。

表 1 螺旋锚模型的物理参数

类型	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	弹性模量 (MPa)	泊松比	内摩擦角 ( $^\circ$ )	剪胀角 ( $^\circ$ )	黏聚力 (kPa)
锚	7 800	206 000	0.3	—	—	—
土体	1 490	3	0.3	7	5	40

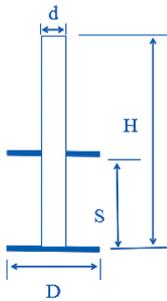


图 1 螺旋锚几何图形

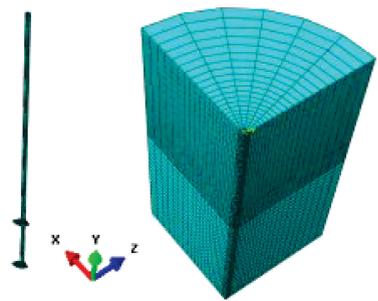


图 2 锚和土体网格划分

## 2 螺旋锚几何尺寸对抗拔承载特性影响

### 2.1 埋置深度的影响

为研究螺旋锚埋置深度对上拔承载力的影响,建立不同埋深单盘螺旋锚模型,锚盘埋深  $H$  与直径  $D$

之比  $H/D=4, 6, 8, 9, 10, 11, 12$ .

不同埋深比时的上拔荷载 - 位移关系曲线, 如图 3 所示. 可知, 在施加位移荷载早期, 荷载增长量较大, 随着位移的增大, 荷载增量逐渐减小, 对于埋深比  $H/D = 4$  和 6 情况,  $Q - u$  曲线为陡降型, 即当位移增大到一定程度时, 荷载不再增加或增量很小; 当  $H/D > 6$  后, 荷载位移曲线向缓变型发展, 即随着位移增加, 荷载增速放缓, 但仍在逐渐增加. 随着埋深比加大, 荷载位移曲线拐点出现时对应的位移值加大. 若以 0.45 m 对应的上拔力进行比较,  $H/D = 4, 6, 9$  和 12 时上拔力分别为 46.9 kN、85.9 kN、146.5 kN 和 189.9 kN, 上拔力较上一级埋深比时荷载值提高量分别是 82.9%、69.7% 和 28.7%. 对上拔力进行无量纲化处理, 上拔力系数,  $K_r = Q/\gamma AH$ ,  $\gamma$  为土体重量,  $A$  为锚盘面积, 绘制不同埋深比与上拔力系数关系曲线, 如图 4 所示,  $H/D \leq 9$  时, 上拔力系数呈直线趋势增长; 当埋深比  $H/D > 9$  时, 基本保持不变. 由此可见, 随着埋深比的增大, 上拔力逐渐增大, 当埋深比  $H/D > 9$  时, 上拔力增大幅度放缓, 上拔力系数略有减小. 因此, 在实际施工设计时, 满足埋深比  $H/D > 9$ , 可使螺旋锚发挥最大效率.

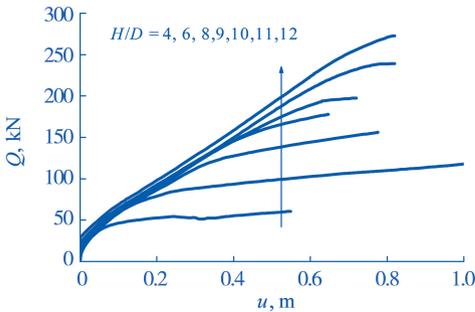


图 3 不同埋深比的  $Q-u$  曲线

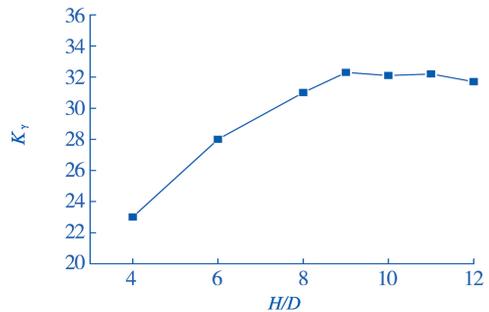


图 4 埋深比与上拔力系数曲线

## 2.2 锚盘间距的影响

为研究锚盘间距比的影响, 对具有不同锚盘间距的等直径双盘螺旋锚进行数值模拟. 保持锚盘直径、埋深比、杆径大小不变, 改变锚盘间距大小. 根据上面单锚计算结果, 当单锚埋深比  $H/D > 9$  时, 螺旋锚发挥效果最好. 因此研究双锚盘螺旋锚和多锚盘螺旋锚几何尺寸时, 设置埋深比大于 9 即可, 故在下面分析计算中埋深比  $H/D$  固定为 12. 锚盘间距  $S$  与锚盘直径  $D$  之比分别是 1, 2, 2.5, 3, 4.5, 6.

螺旋锚上拔力发挥效率定义为多锚盘螺旋锚上拔力与每个单锚上拔力之和的比值:

$$\eta = \frac{Q_{MU}}{\sum Q_{U}}, \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为效率;  $Q_{MU}$  为多锚盘螺旋锚上拔力;  $Q_U$  为单锚上拔力.

不同锚盘间距比时螺旋锚上拔位移 - 荷载曲线, 如图 5 所示. 图 5 中各锚上拔荷载 - 位移曲线特征相似, 当上拔位移  $u < 0.25$  m 时, 随着位移增加, 上拔力增长迅速, 此后上拔力增长缓慢, 当上拔位移超过 0.4 m 后, 荷载 - 位移曲线接近水平, 故将上拔位移为 0.4 m 对应的上拔力作为各锚极限上拔力, 并由式(1) 计算双盘锚发挥效率  $\eta$ , 如表 2 所示. 随着锚盘间距比的变大, 螺旋锚发挥效率变大.  $S = 1D$  时, 两锚盘互相影响较大, 螺旋锚发挥效率小于 70%;  $S =$

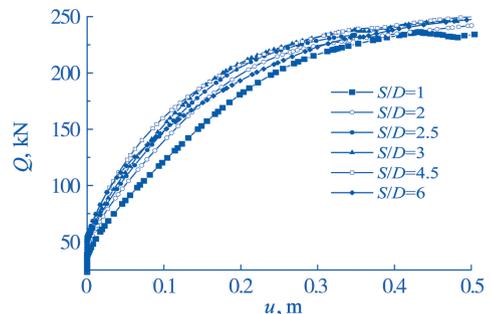


图 5 不同间距比的  $Q - u$  曲线

4.5D 时, 螺旋锚发挥效率达到 91.3%,  $S = 6D$  时, 螺旋锚发挥效率达到 92.6%, 接近单独破坏形式. 然而考虑实际工程应用时, 锚盘间距  $S = 4.5D$  相比于  $S = 6D$  螺旋锚, 更容易将锚盘设置在持力性较好的同一种土层中, 而且  $S = 4.5D$  和  $S = 6D$  螺旋锚发挥效率非常相近, 故建议锚盘间距取 4.5D.

表 2 单盘及双盘螺旋锚上拔承载力及效率

$n$ (锚盘个数)	$S/D$	$H/D$	$Q_u/kN$	$\eta(100\%)$
1	0	6	92.76	-
1	0	7.5	120.12	-
1	0	9	144.45	-
1	0	10	145.18	-
1	0	11	148.35	-
1	0	12	157.51	-
2	1	11,12	210.67	68.8
2	2	10,12	227.69	75.1
2	3	9,12	241.55	80.0
2	4.5	7.5,12	242.47	91.3
2	6	6,12	239.04	92.6

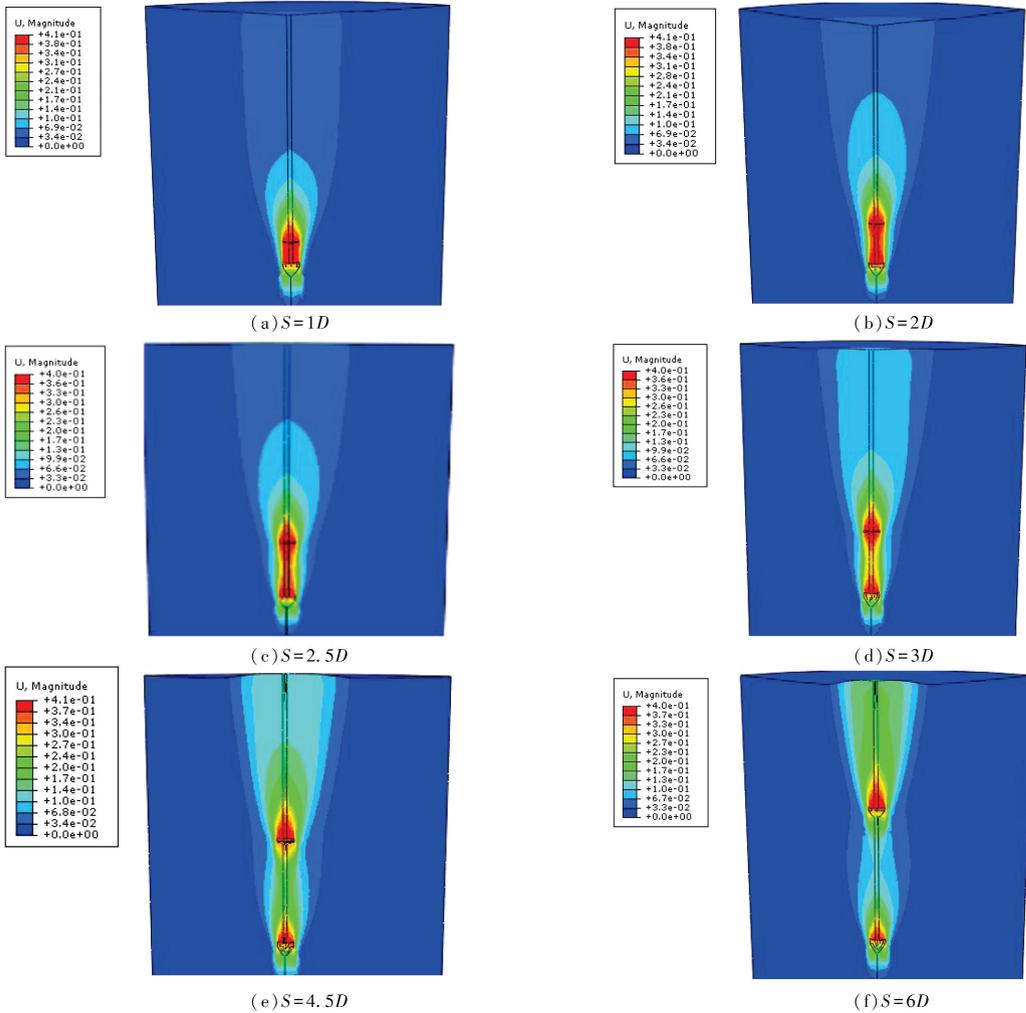


图 6 不同间距比时土体的位移云图( $u=0.4\text{ m}$ )

不同间距比时土体的位移云图,如图 6 所示。可知,红色区域表示位移比较大部分,当锚盘间距  $S=1D、2D$  时,锚盘之间土体呈现红色,也就是说对于锚盘间距  $S \leq 2D$  时,随着螺旋锚向上位移的增大,锚盘间土体整体上移,呈现出一个圆柱滑裂面,破坏模式属于圆柱剪切破坏模式。而对于锚盘间距  $S \geq 4.5D$  时,随着锚盘上拔位移的增加,锚盘间土体位移也有所增加,但是随着锚盘间距的增大,锚盘间土体位移增加幅度减小,接近单独破坏模式,土体破坏形式属于承载力破坏模式。

### 2.3 锚盘直径的影响

多锚盘螺旋锚有等直径和非等直径两种,为分析直径变化对抗拔力的影响,建立不同锚径的三盘螺旋锚模型,如图7所示。其中,锚盘平均直径 $D=40\text{ cm}$ ,间距为效率发挥较好的间距 $S=4.5D$ ,锚杆直径 $d=10\text{ cm}$ 。螺旋锚 $a$ 为等直径锚;螺旋锚 $b$ 自上而下锚盘直径依次减小,为 $50\text{ cm}, 40\text{ cm}, 30\text{ cm}$ 。

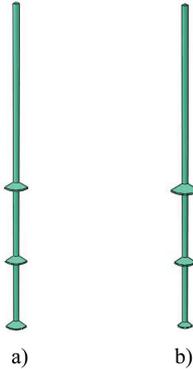


图7 等直径和非等直径螺旋锚模型

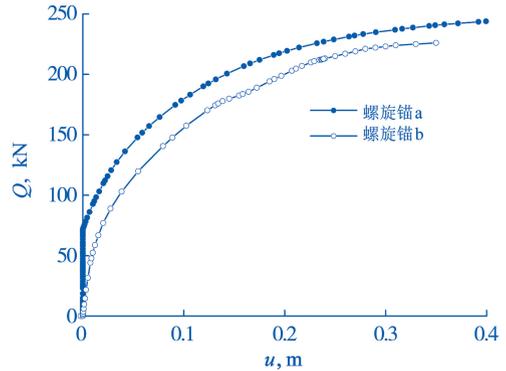


图8 不同直径螺旋锚 $Q-u$ 曲线

两种直径时 $Q-u$ 曲线,如图8所示。当上拔位移超过 $0.3\text{ m}$ 后,荷载-位移曲线接近水平,故将上拔位移为 $0.3\text{ m}$ 对应的上拔力作为各锚极限上拔力,当锚盘上拔位移达到 $0.3\text{ m}$ 时,螺旋锚 $a$ 和 $b$ 的上拔力分别为 $236\text{ kN}$ 和 $223\text{ kN}$ ,锚 $b$ 较锚 $a$ 承载力降低了 $5.5\%$ 。但在实际工程施工时,锚 $b$ 锚盘上大下小的型式更利于安装,相比于等直径锚 $a$ 的上拔力降低量又较少,所以在实际工程中优选非等直径螺旋锚。

## 3 结 论

本文通过建立三维有限元模型,对可塑黏性土地基中不同几何尺寸的螺旋锚上拔力进行分析,主要得出以下结论:

(1) 随着螺旋锚埋置深度的变大,螺旋锚上拔力变大,埋深比 $H/D > 9$ 时,上拔力增加幅度缓慢,上拔力系数趋于稳定。在实际施工设计时,满足埋深比 $H/D > 9$ ,可使螺旋锚发挥较大效率。

(2) 经过对可塑黏土中不同间距比双盘螺旋锚上拔力效率进行研究, $S=4.5D$ 时,螺旋锚发挥效率超过 $90\%$ ,各锚盘破坏模式影响较小的临界间距约为 $4.5D$ 。

(3) 通过对平均直径及间距相同的等直径和非等直径三盘螺旋锚上拔力进行分析,非等直径螺旋锚的上拔力略低于等直径螺旋锚,但是考虑在实际工程施工时,非等直径螺旋锚更容易钻进,故建议实际工程问题中采用非等直径螺旋锚。

## 参 考 文 献

- [1] 陈榕,高宇聪,孟宪彬,等.我国输电线路基础型式对比及其适用性分析[J].东北电力大学学报,2015,35(6):78-85.
- [2] 龚靖,刘宇,徐佩洪.新型螺杆桩技术及其工程应用[J].东北电力大学学报,2016,36(3):91-95.
- [3] 郝冬雪,符胜男,陈榕.砂土中锚板拉拔模型试验及其抗拔力计算[J].岩土工程学报,2015,37(11):2101-2106.
- [4] 郝冬雪,陈榕,符胜男.砂土中螺旋锚上拔承载特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(1):126-132.
- [5] 董天文,李士伟,张亚军,等.软土地基螺旋桩竖向抗拔极限承载力计算方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):3057-3062.
- [6] 董天文,梁力.竖向受压螺旋桩荷载沉降函数解[J].岩土工程学报,2007,29(10):1483-1487.
- [7] K. Ilamparuthi, E. A. Dickin, K. Muthukrisnaiah. Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(5): 648-664.
- [8] R. S. Merifield. Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay[J]. Geotech. Geoenviron. Eng., 2011, 137(5): 704-716.
- [9] S. Merifield, A. V. Lyamin, S. W. Sloan. Three-dimensional lower-bound solutions for the stability of plate anchor in sand[J]. Geotech-

nique,2006,56(2):123-132.

- [10] R. S. Merifield, S. W. Sloan. The ultimate pullout capacity of anchors in frictional soils[J]. Can. Geotech. ,2006,43(8):852-868.
- [11] Dong Wang, Yuxia Hu, F. Mark. Three-dimensional large deformation finite-element analysis of plate anchors in uniform clay[J]. Geotech. Geoenviron. Eng. ,2010,136(2):355-365.
- [12] 国家电网公司企业标准. 架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范:Q/GDW 584-2011[S]. 北京:中国电力出版社,2011.

## Numerical Analysis of Influences of Helical Anchor Geometry on Uplift Capacity in Clay

Hao Dongxue<sup>1</sup>, Song Yang<sup>2</sup>, Chen Rong<sup>1</sup>, Zhao Pengju<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012; 2. Maoming Power Supply Company of Southern Power Grid, Maoming Guangdong 525000; 3. State Grid Jinzhou Power Supply Company, Jinzhou Liaoning 121200)

**Abstract:** In recent years, the helical anchor is widely used in the transmission line engineering because of its rapid installation and immediately undertaking load. However, the different geometry size of helical anchor has great influence on uplift capacity. In this paper, the finite element method is used to study the uplift behavior of helical anchors in plastic clay soil, and the influence of geometric size of helical anchors on uplift capacity is analyzed. It is concluded that uplift resistance of helical anchor increases with the increase of embedment depth. When the buried depth ratio  $H/D > 9$ , uplift resistance rises slowly, the breakout factor remains unchanged. The efficiency of helical anchor is more than 90% when the spacing of the double-helix anchor is up to  $4.5D$ . The critical spacing that may yield individual failure mode is at least  $4.5D$ . The uplift capacity of the nonequant triple-helix anchor is slightly lower than the equant triple-helix anchor with the same spacing and average diameter. Nevertheless, nonequant helical anchor is recommended in practice considering the operability of installation.

**Key words:** Helical anchor; Uplift capacity; Geometry size; Finite element analysis