

黏土中螺旋锚盘径比对上拔承载力影响数值分析

陶振东¹, 郝冬雪^{1,2}

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²东北电力大学建筑工程学院, 吉林 吉林

收稿日期: 2025年6月21日; 录用日期: 2025年7月11日; 发布日期: 2025年7月24日

摘要

螺旋锚是一种具有良好抗拔承载性能的基础型式, 且具有施工便捷、适应性强和经济环保等优点, 当前正在被大量应用于建筑、电力、交通、水利等多个领域的工程实践中。本文采用有限元方法建立盘径比 $D/d = 1\sim 6$ 的单盘螺旋锚拉拔数值计算模型, 重点分析可塑黏性土中盘径比对螺旋锚上拔承载力及土体破坏模式的影响。结果表明: 锚盘对上拔承载力起主要贡献。不同盘径比的螺旋锚, 位移荷载曲线变化趋势基本一致, 初始刚度与盘径比成反比, 盘径比越小初始刚度越大。固定锚盘直径, 随着锚杆直径增加, 侧摩阻力增加, 螺旋锚上拔承载力增加; 但当锚杆直径增大到一定值时, 由于锚盘净面积减小而明显影响锚盘承载力的发挥, 螺旋锚上拔承载力反而下降。当 $D/d = 2$ 时, 螺旋锚发挥较好的抗拔性能。因此, 建议在可塑黏性土应用螺旋锚时, 为充分发挥锚盘上拔承载力, 盘径比不应小于2。

关键词

螺旋锚, 盘径比, 上拔承载特性, 有限元分析

Numerical Analysis of the Influence of Disc-Diameter Ratio of Helical Anchor in Clay on Uplift Bearing Capacity

Zhendong Tao¹, Dongxue Hao^{1,2}

¹School of Civil Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin

Received: Jun. 21st, 2025; accepted: Jul. 11th, 2025; published: Jul. 24th, 2025

文章引用: 陶振东, 郝冬雪. 黏土中螺旋锚盘径比对上拔承载力影响数值分析[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1707-1714.
DOI: 10.12677/hjce.2025.147184

Abstract

Spiral anchor is a kind of foundation type with good uplift bearing performance, and has the advantages of convenient construction, strong adaptability, economy and environmental protection. At present, it is widely used in construction, electric power, transportation, water conservancy and other fields. In this paper, the finite element method is used to establish the pull-out numerical calculation model of single disc screw anchor with diameter ratio of helix and shaft $D/d = 1\sim 6$, and the influence of disc diameter ratio on the pull-out bearing capacity of screw anchor and soil failure mode in plastic cohesive soil is mainly analyzed. The results show that the anchor plate plays a major role in the uplift capacity. For spiral anchor with different diameter ratio of helix and shaft, the variation trend of displacement load curve is basically the same, and the initial stiffness is inversely proportional to the diameter ratio of helix and shaft. The smaller the diameter ratio of helix and shaft, the greater the initial stiffness. When the diameter of anchor plate is fixed, with the increase of anchor rod diameter, the side friction resistance increases, and the uplift bearing capacity of spiral anchor increases; However, when the bolt diameter increases to a certain value, the bearing capacity of the anchor plate is obviously affected by the decrease of the net area of the anchor plate, and the uplift bearing capacity of the spiral anchor decreases instead. When $D/d = 2$, the spiral anchor has better pull-out performance. Therefore, it is suggested that when the spiral anchor is applied to the plastic cohesive soil, in order to give full play to the uplift bearing capacity of the anchor disc, the diameter ratio of helix and shaft should not be less than 2.

Keywords

Helical Anchor, Diameter Ratio of Helix and Shaft, Uplift Capacity, Finite Element Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

螺旋锚由锚杆和锚盘组成, 能够将来自上部结构的上拔力和倾覆力矩传递至深层土层, 发挥深层地基土体抗力作用, 具有较高的抗拉和抗压承载能力。与传统基础相比, 螺旋锚基础还具有施工效率高、对原状土破坏小、成本低等优点[1][2]。作为一种高效的基础型式和地基稳定加固技术, 被广泛应用于桥梁、塔架、边坡防护等结构中, 近些年在世界各地使用率显著的增长。

随着工程需求的日益增长, 对螺旋锚承载力的研究显得尤为重要。目前, 已经有许多学者对冻土及未冻土中螺旋锚水平、上拔和下压承载展开了研究[3]-[5]。胡伟等[6]对单螺旋锚桩水平拉拔承载力进行研究, 探讨了埋深比对计算水平承载力的影响。郝冬雪等[7]对砂土中螺旋锚上拔承载力进行了模型试验研究, 分析了锚片间距及数量对上拔承载力影响。张新春等[8]对砂土中螺旋桩承载力受桩体几何结构影响进行了研究, 讨论了叶片与桩身直径比对承载特性的影响。Salehzadeh 等[9]通过离心机模型试验和粒子图像测速分析(PIV)研究了多螺旋锚在砂土中的破坏机制。马艺琳等[10]通过对不同规格螺旋桩基础进行现场试验, 讨论了叶片直径、叶片个数、桩径以及降水情况对螺旋桩基础抗压承载力的影响。Nazir 等[11]通过小比例模型进行室内试验, 探究了在干砂中埋深比、砂土密度对单螺旋锚的上拔承载力的影响。

螺旋锚上拔承载力包含锚盘抗力和锚杆摩擦力, 通常锚盘上拔承载力计算不考虑锚杆的影响。然而, 锚盘与锚杆的直径比 D/d (盘径比)影响锚盘的承载力发挥机制, 且研究多集中于砂土地基, 针对一般黏性

土中的承载研究较少。因此, 本文基于有限单元法研究黏性土地基中单盘螺旋锚基础盘径比对上拔承载特性的影响。

2. 螺旋锚有限元模型建立

2.1. 计算模型

采用 ABAQUS 软件建立单盘螺旋锚的精细化有限元模型。根据《架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范》[12]中基本规定, 螺旋锚锚盘直径宜取 0.2 m~0.7 m。故本文取中等锚盘直径 $D=0.3$ m, 变化锚杆直径 d , 盘径比 $D/d=1\sim6$ 进行计算分析。螺旋锚尺寸如图 1 所示。为了消除边界条件的影响, 土体的纵向取 1 倍锚杆长度, 径向取锚盘直径的 15 倍。由于锚盘采用螺旋盘划分的网格质量较差, 会对结果产生不利影响, 而采用平盘会得到高质量的网格。已有研究将平盘与螺旋盘在上拔荷载作用下的数值模拟结果与现场试验结果进行了对比[13], 对比表明, 锚盘型式的简化对计算结果影响很小, 最大偏差约 5%, 故文中采用平盘进行建模计算。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[14], 螺旋锚网格详图, 如图 1 所示。螺旋锚与周围土体的相互作用, 设置法向为硬接触, 切向作用采用罚函数法, 摩擦系数设为 0.14。土体侧面约束 x 、 y 方向上的位移, 即 $U_1=U_2=0$; 土体底部约束 x 、 y 、 z 方向上的位移, 即 $U_1=U_2=U_3=0$ 。首先对模型进行地应力平衡, 之后通过设置的锚顶参考点与顶面耦合, 在参考点施加位移实现螺旋锚的竖向拉拔。

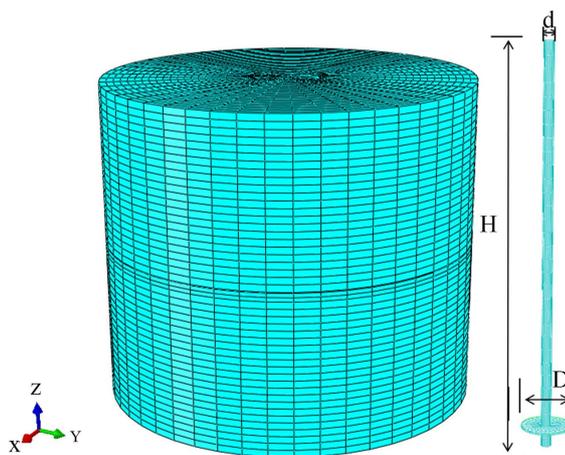


Figure 1. Grid division of screw anchor and soil
图 1. 螺旋锚及土体网格划分图

2.2. 本构模型及参数

Table 1. Model parameters of screw anchor and soil
表 1. 螺旋锚及土体模型参数

类型	密度(kg/m ³)	弹性模量(MPa)	泊松比	内摩擦角(°)	黏聚力(kPa)
锚	7800	210000	0.33	-	-
土体	1900	20	0.35	8	40

数值模型中土体采用弹塑性本构模型, 假设土体均匀、连续、各向同性, 服从 Mohr-Coulomb 屈服准

则。螺旋锚达到极限承载力时一般不发生破坏, 故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《架空输电线路基础设计技术规程》[12]中可塑性黏土参数范围选取。

3. 模拟方案

针对锚杆直径对锚盘及锚顶上拔承载力的影响, 采用控制变量法, 通过固定埋深比($H/D=11$)和锚盘直径($D=0.3\text{ m}$), 变化锚杆直径 d , 建立单盘螺旋锚有限元模型, 具体模型几何参数如表 2, 获得黏土中不同盘径比螺旋锚上拔荷载 - 位移曲线、荷载传递及土体破坏模式, 分析螺旋锚盘径比对承载力的影响机理。

Table 2. Analysis conditions

表 2. 分析工况

模型编号	锚杆直径 d (m)	盘径比 D/d	加载方式
1	0.05	6	位移加载
2	0.1	3	位移加载
3	0.15	2	位移加载
4	0.2	1.5	位移加载
5	0.25	1.2	位移加载
6	0.3	1	位移加载

4. 螺旋锚模拟结果分析

4.1. 上拔承载力

不同盘径比螺旋锚荷载 - 位移关系曲线, 如图 2 所示。 $D/d=1$ 时为等直径桩, 其荷载位移曲线与其它情况明显不同, 在位移 $u=18\text{ mm}$ 时, 曲线弯曲且急速进入水平段。表明, 桩侧摩阻力发挥到极值所需的位移较小。但增加锚盘时, 由于锚盘提供抗力且锚盘承载力发挥所需的位移更大, 其它各曲线特征表现为三个阶段: 在加载初期, 荷载增长速度较快, 近似线性增长; 随着位移增大, 荷载增长速度逐渐减缓, 曲线进入弯曲段; 在加载末期, 荷载位移曲线近似斜直线缓慢增长或出现水平段。对于锚盘净面积(锚盘面积与锚杆面积差)较小的情况($D/d=1.2$ 和 1.5), 位移加载范围内, 出现了上拔承载力极限值, 其它情况未出现承载力极限值, 因此, 后面分析中选择位移量为 $10\% D$ 时对应的荷载为极限上拔承载力[15]。比较各曲线发现, 螺旋锚盘径比对初始刚度存在影响, 盘径比越大, 初始刚度越小, 即在荷载增长前期, 荷载增长速率与盘径比成反比。

图 3 为盘径比与上拔承载力关系。由图可知, 上拔承载力随盘径比(D/d)增大表现为先加速增大后逐渐衰减两段式发展特征。螺旋锚上拔承载力由锚杆侧摩阻和锚盘端阻共同提供。 $D/d=1$ 时, 上拔承载力完全由杆侧摩阻力提供, 承载力最低; 一旦 $D/d>1$, 由于锚盘的抗力作用, 上拔承载力快速提升; 尽管锚杆直径减小, 侧摩阻力降低, 但与锚盘的作用相比, 其贡献很小; 但当 $D/d>2$ 后, 螺旋锚极限上拔承载力反而有所下降, 这是锚盘与锚杆共同作用的结果, 后面会进一步分析。由此可见, 存在使得螺旋锚承载力发挥最好的最佳盘径比, 对于可塑黏性土, 最佳值 $(D/d)_{op}=2$ 。

因此, 在实际施工设计时, 螺旋锚的盘径比不宜低于 2。当锚盘直径固定时, 可以优先考虑大盘径比, 这样不仅可以节约材料, 还可以使螺旋锚发挥较好的抗拔性能, 在保证承载力的同时, 优化设计提高工程经济性。

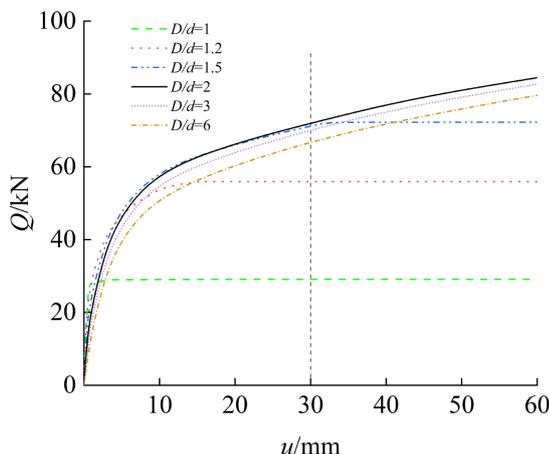


Figure 2. Load-displacement curve of screw anchor with different diameter ratio of helix and shaft
图 2. 不同盘径比螺旋锚荷载 - 位移曲线图

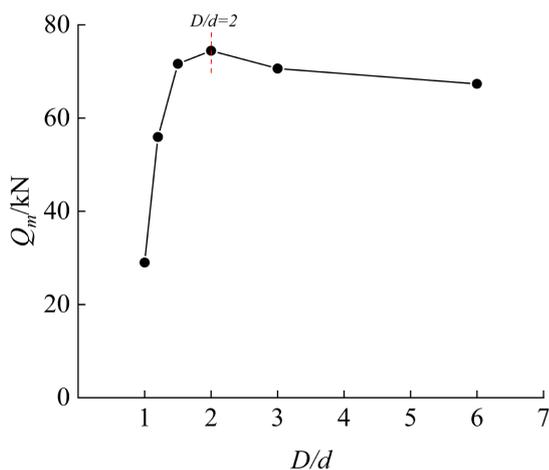


Figure 3. Uplift capacity of screw anchors with different diameter ratio of helix and shaft
图 3. 不同盘径比螺旋锚的上拔承载力

4.2. 上拔荷载传递过程分析

4.2.1. 轴力变化

提取不同位移时各螺旋锚模型锚杆的轴力, 绘制沿着杆身变化轴力图, 如图 4 所示。不同盘径比的锚杆总体变化趋势基本一致, 除 $D/d=1$ 时, 其余轴力均为先线性减小, 到达锚盘位置加速衰减, 降低幅度增大。在截面未到达锚盘时, 轴力变化也存在区别, 锚杆轴力随着盘径比增大, 轴力沿杆身减小幅度降低, 以 $D/d=2$ 为临界值, 盘径比小于 2 的螺旋锚, 轴力沿杆身减小幅度大, 呈现斜直线状传递; 盘径比大于 2 的螺旋锚, 轴力沿杆身以垂线状减小形式传递, 轴力几乎没有变化。螺旋锚的抗拔承载力在很大程度上取决于滑裂面范围内土体的自重以及滑裂面上的土抗剪强度。随着截面位置加深, 达到锚盘时, 锚盘挤压周围土体, 发生相对位移而逐渐形成滑裂面, 而滑裂面剪阻力的竖直分量会传递至锚盘抵抗上拔力, 导致锚盘位置截面轴力急剧降低。

锚杆顶部轴力约等于上拔力, 不同盘径比的锚杆顶部轴力达到极限承载力值所用时间不同, 盘径比越小, 所用时间越短, 这也进一步呼应了 4.1 中盘径比越小初始刚度越大的现象, 在相同位移下, 盘径比越小, 杆径越粗, 锚杆侧摩阻增大, 当锚盘还未破坏土体时, 锚杆侧摩阻承载力占比大, 所以加载前期,

盘径比小的螺旋锚的初始刚度大。

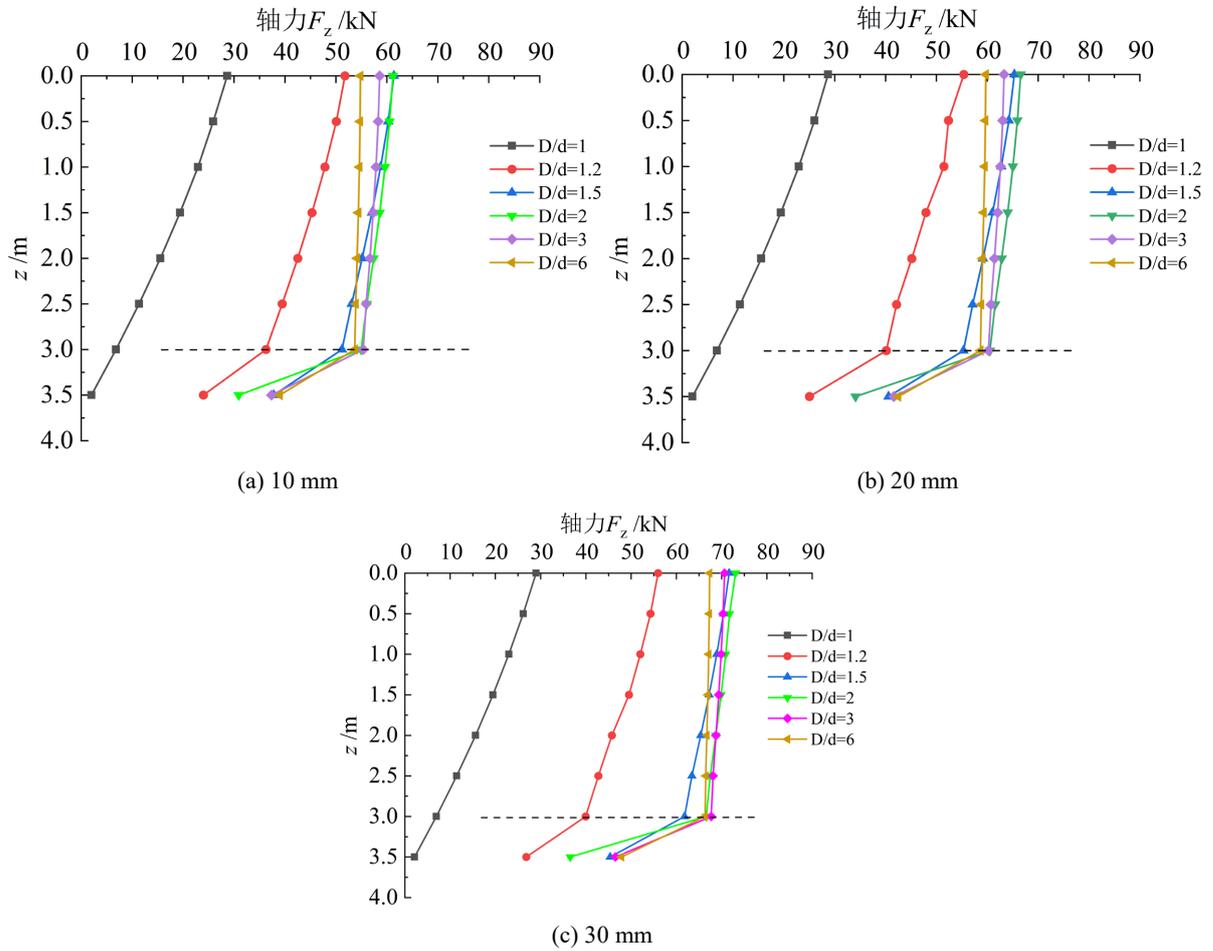


Figure 4. Axial force diagram of anchor rods with different displacements
图 4. 不同位移锚杆轴力图

4.2.2. 锚杆与锚盘荷载分担比

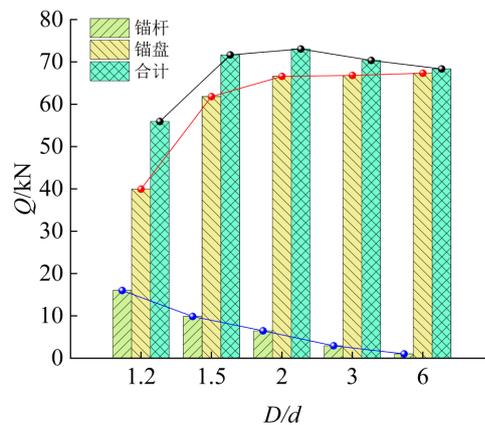


Figure 5. Load sharing ratio between anchor rod and anchor plate
图 5. 锚杆与锚盘荷载分担比

绘制极限荷载时(位移 30 mm), 不同盘径比锚杆与锚盘荷载分担比柱状图, 如图 5 所示, 直观的看出螺旋锚各部分所分担的荷载。由图可知, 整体来看以 $D/d=2$ 为临界值, 随着盘径比增大, 锚承担的总荷载先增加后减小, 呈二段式变化。各部分单独来看, 首先盘径比增大, 锚盘承担荷载量增大, $D/d > 2$ 后锚盘承载力几乎没有提升; 其次, 盘径比增大, 锚杆承载荷载量减小, 且减小速率基本不变。因此, 当盘径比大于 2 时, 锚盘承载荷载量增加值小于锚杆减小值, 从而导致螺旋锚承载力出现与盘径比成反比情况, 4.1 结论得到证实。螺旋锚承载力主要由锚盘与锚杆提供, 当盘径比大于 2 后, 虽然盘径比增大导致锚盘净面积增大, 但其提供的承载力并未有明显提升, 而锚杆侧摩阻随盘径比增大而保持减小趋势, 从而导致承载力“减大于增”, 出现反比现象。

4.3. 破坏模式

图 6 为不同盘径比螺旋锚在承受极限上拔荷载时土的等效塑性应变云图, 为了更直观显示出来, 图中等效塑性应变(PEEQ)大于 0.2 的区域用灰色显示。由图可见, 以 $D/d=2$ 为界值, $D/d=1.2$ 、1.5 时, 塑性区域逐渐扩大, 位移带动土体体积增大, 上拔承载力提升。 $D/d=2\sim 6$ 时, 锚盘带动的塑性区基本相同, 所以锚盘提供的承载力相近, $D/d=2$ 时锚盘承载力发挥最优, 随盘径比增大, 锚杆直径减小导致侧摩阻减小, 受两者共同作用, 螺旋锚的承载力变化不大, 证实了盘径比增大一定值后(本文 $(D/d)_{op} = 2$), 缩小杆径增大锚盘净面积对承载力没有提高作用, 也呼应了 4.2 的荷载分析。

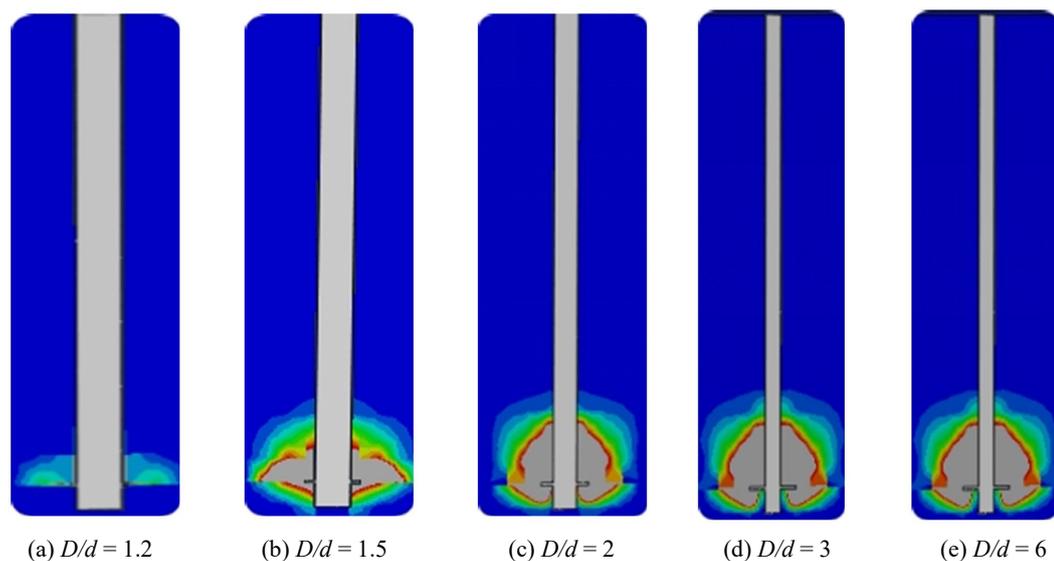


Figure 6. Equivalent plastic strain cloud map
图 6. 等效塑性应变云图

5. 结论

本文通过建立黏性土地基中不同杆径的单盘螺旋锚有限元模型, 分析盘径比对螺旋锚上拔力的影响, 值模拟获取了螺旋锚上拔荷载 - 位移曲线, 提取了锚杆轴力, 重点讨论了杆径对锚盘发挥抗拔力的影响, 确定了抗拔力效果最佳的盘径比, 得出以下结论:

- (1) 不同盘径比的螺旋锚, 位移荷载曲线变化趋势基本一致, 初始刚度与盘径比成反比, 盘径比越小初始刚度越大。
- (2) 在可塑黏性土地基中, 单盘螺旋锚的盘径比 D/d 存在临界值, 当 $D/d=2$ 时, 螺旋锚发挥更好的抗拔性能。

当盘径比大于 2 时, 随盘径比增大, 锚盘所提供的承载力提升不明显, 锚盘与锚杆所提供的承载力出现“减大于增”现象, 在实际工程中, 盘径比取 2 为宜。

参考文献

- [1] 张文涛. 螺旋锚复合基础在软土地基中的应用[J]. 吉林电力, 2015, 43(1): 38-40.
- [2] 吴立晴, 邵国栋, 盛寒柯, 王文明. 螺旋锚在软黏土中上拔承载力计算与数值模拟分析[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(10): 120-124.
- [3] 胡伟, 林天宇, 林志, 等. 砂土地基中螺旋锚上拔承载特性试验与理论研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(8): 1582-1595.
- [4] 屈讼昭, 郭咏华, 王仪, 等. 大锚片螺旋锚在粉质黏土中的下压承载性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 34-44.
- [5] 李绪勇, 杨忠平, 刘纲, 等. 隔离式螺旋桩抗压承载与抗地基冻融特性[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(6): 1187-1196.
- [6] 胡伟, 孟建伟, 刘顺凯, 等. 单螺旋锚桩水平承载机理试验与理论研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 158-167.
- [7] 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.
- [8] 张新春, 韩春雨, 白云灿, 等. 螺旋桩承载特性受桩体几何结构影响的试验研究[J]. 结构工程师, 2019, 35(2): 178-183.
- [9] Salehzadeh, H., Nuri, H. and Rafsanjani, A.A.H. (2022) Failure Mechanism of Helical Anchors in Sand by Centrifuge Modeling and PIV. *International Journal of Geomechanics*, **22**, Article 04022111.
- [10] 马艺琳, 王毅娟, 魏新良. 竖向承压螺旋桩承载力影响因素对比分析[J]. 北京建筑大学学报, 2017, 33(4): 22-26.
- [11] Nazir, R., Chuan, H.S., Niroumand, H., et al. (2014) Performance of Single Vertical Helical Anchor Embedded in Dry Sand. *Measurement*, **49**, 42-51.
- [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.
- [13] 屈讼昭, 郭咏华, 王仪, 等. 大锚片螺旋锚在粉质黏土中上拔受力性能的原位试验研究及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3655-3668.
- [14] 韦芳芳, 邵盛, 陈道申, 等. 黏土中倾斜螺旋桩的水平承载性能数值模拟及理论研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 463-472.
- [15] 陈斌, 朱照清, 冯炳, 等. 地基螺旋锚抗拔承载性能原位试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(5): 71-74+132.