



新型装配式螺旋锚基础数值模拟

安忠海¹, 张士波², 李 喆¹, 谢广采¹, 王文明^{2,3}

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101; 3. 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南 250101)

摘要: 为了提高杆塔基础智能建造水平, 文章提出一种新型装配式螺旋锚基础, 并研究该基础在设计荷载下的受力性能。通过有限元分析软件 ABAQUS, 分别建立新型装配式螺旋锚基础和普通现浇螺旋锚基础的精细化有限元分析模型, 分析上拔组合工况和下压组合工况下的受力情况。研究结果表明: 较普通现浇螺旋锚基础, 新型装配式螺旋锚基础在设计工况下的混凝土钢筋用量显著下降, 承载力接近。本文研究成果可为装配式螺旋锚基础在实际工程中的应用提供一定的借鉴与参考。

关键词: 螺旋锚基础; 装配式基础; 力学性能; 受力情况; 有限元分析; 输电线路

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)09-0019-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.09.115

Mechanical performance and application of new prefabricated helical anchor foundations

AN Zhonghai¹, ZHANG Shibo², LI Zhe¹, XIE Guangcai¹, WAN GWenming^{2,3}

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, 250013, Shandong, China;
2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101, Shandong, China;
3. Key Laboratory of Structural Strengthening and Renovation and Underground Space Engineering of the Ministry of Education, Jinan, 250101, Shandong, China)

Abstract: In order to enhance the intelligent construction level of tower foundation, a new prefabricated helical anchor foundation is put forward, and the load-bearing performance of a new type of prefabricated helical anchor foundation under design loads is studied. A finite element analysis models of both the new prefabricated helical anchor foundation and the conventional cast-in-place helical anchor plate foundation are established using ABAQUS software. The research findings indicate that compared to the conventional cast-in-place helical anchor plate foundation, the new prefabricated helical anchor foundation significantly reduces the amount of concrete and steel reinforcement required while maintaining a similar load-bearing capacity under design conditions. The results of this study can provide valuable guidance and reference for the practical application of prefabricated helical anchor foundations in engineering projects.

Key words: helical anchor foundation; prefabricated foundation; mechanical performance; stress conditions; finite element analysis; transmission line

输电线路基础不同于一般的建筑工程基础, 具有送电线路距离长、跨越区域广、沿途地形与地质条件复杂、地基土物理力学性质差异性大等

特点, 因此在设计和施工中需要考虑的边界条件较多^[1]。郑卫锋等^[2]指出, 选择输电塔基础形式时应结合当地的环境和地质条件, 并综合考虑结

收稿日期: 2023-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908340)

作者简介: 安忠海(1983—), 男, 高级工程师, 从事输电线路设计方法研究工作。

构和造价；王开生等^[3]介绍了复合桩基的应用范围和条件，明确了其中的影响因素，分析讨论了复合桩基的设计原理。随着复合基础设计方法的提出，孟克等^[4]提出了钢筋混凝土桩-锚杆复合基础和-锚杆复合基础，分别介绍了结构、原理和适用性；徐再根等^[5]通过研究板式-螺旋锚复合基础在设计荷载下的受力性能发现，该复合基础可以充分利用土体，降低施工难度，提高施工效率，降低造价；吕建国等^[6]利用土重法与桩的弹性抗力法进行中型桩复合基础内力分析与计算，进一步优化和完善了设计理论。

相比传统的桩基建设方式，螺旋锚基础无需进行大规模开挖，不仅降低了施工难度，缩短了施工工期，节省了基础造价，保护了环境^[7]，还能充分发挥深层原状土体固有强度^[8]，增加稳定性，并且螺旋锚杆为工厂化生产，制造精确度和安全性可以得到保障。螺旋锚基础的锚杆部分伸入承台时，为满足锚固强度的要求，承台厚度通常较大。由于锚杆和承台的交界面存在应力集中现象，一般采用增加承台局部配筋或者设置弹簧等方式提高其受力性能。现浇基础存在工期长、劳动力需求大、环保性差等缺点，为提高螺旋锚基础的智能建造水平，本文将提出一种新型装配式螺旋锚基础，通过利用有限元分析软件 ABAQUS 对普通螺旋锚基础与新型螺旋锚基础在上拔工况和下压工况下的受力性能进行对比分析，以期在实际工程应用提供有效依据。

1 新型装配式螺旋锚基础

新型螺旋锚基础包括螺旋锚、连接件和预制钢筋混凝土承台及主柱 3 部分，如图 1 所示。螺旋锚基础包括锚杆和锚盘，长度较大时，可分段安装。螺旋锚端板内置螺纹，通过旋拧锚筋将其与端板连接。连接件包括两端做丝的锚筋、橡胶垫片和锚板。锚板内置孔洞，锚筋穿过锚板后，拧紧螺帽。承台与端板之间，以及锚板和承台之间可设置橡胶垫片。橡胶垫片具有找平的作用，也可有效减小应力集中。承台空腔可通过注入流动性大的水泥基材料，进一步提高连接的可靠性。

与传统的现浇螺旋锚基础相比，新型装配式

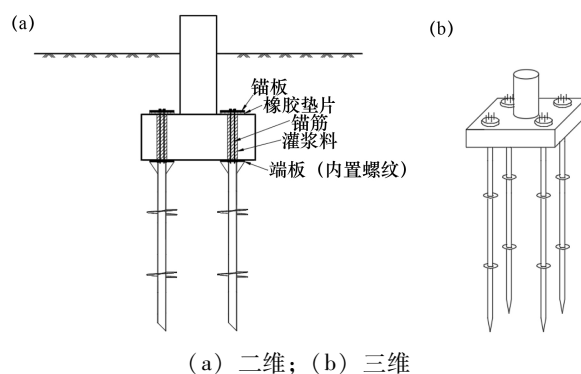


图 1 新型螺旋锚基础

螺旋锚基础采用预制混凝土承台和主柱形式，在施工现场无需进行钢筋绑扎、支模板及混凝土养护，避免了湿作业带来的不便和环境污染。在施工现场，可使用汽车吊进行吊装，操作简便快捷。由于螺旋锚和承台采用机械连接，不需要考虑锚杆的锚固长度问题，承台厚度可以显著减小，从而大幅减少混凝土和钢筋的用量。这种设计不仅缩短了施工工期，还提高了施工效率，并具有良好的环境友好性。

2 模型建立

2.1 单元选择与接触关系

采用有限元软件 ABAQUS 分别建立普通现浇螺旋锚基础和新型装配式螺旋锚基础的数值分析模型，如图 2、3 所示。两个模型圆柱承台相同，底部承台长度、宽度均为 1.7 m。新型装配式螺旋锚基础底部承台厚度为 0.4 m，螺旋锚与承台通过端板连接；现浇式螺旋锚基础的底部承台厚度为 0.8 m，螺旋锚嵌入混凝土承台 0.7 m，以提供足够的承载能力，且满足设计要求和预期荷载。钢筋骨架与混凝土内嵌接触，钢材力学性能参数如表 1 所示，土壤力学性能参数如表 2 所示。

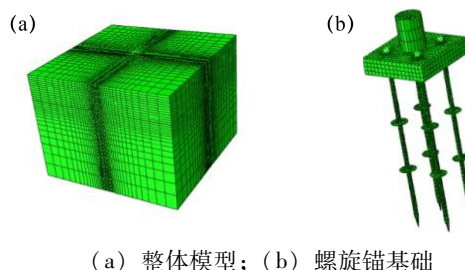
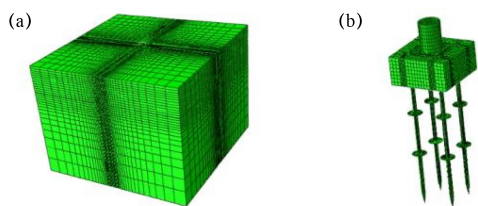


图 2 新型装配式螺旋锚基础有限元模型

在螺旋锚基础中，土体与整个基础采用面-面接触，法向为硬接触，切向为罚接触。在数值



(a) 整体模型; (b) 螺旋锚板式基础

图 3 现浇式螺旋锚基础有限元模型

表 1 钢材力学性能参数

材料	材料屈服强度/MPa	泊松比	弹性模量/GPa
HRB400 钢筋	400	0.27	400
Q345 钢	345	0.20	200

表 2 土壤力学性能参数

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/($^{\circ}$)
黏土	1 800	30	0.35	40	25

模型中,采用接触的方式模拟土体与锚杆之间的相互作用,并通过设置摩擦因数和摩擦面积,计算接触力的大小。对于面-面接触,使用面元素来表示土体的接触面,然后与锚杆进行耦合。另外,为了更准确地模拟实际情况,使用点-面运动耦合接触来模拟力的传递。该方式考虑了基础的运动和变形对土体的影响,以及土体的反力对基础的影响。在黏土土体中,摩擦因数通常取 0.3^[9]。

2.2 荷载布置与边界条件

将重力、上拔-水平组合荷载或下压-水平组合荷载分成两步进行分析。在螺旋锚基础模型承台顶部接触面中心耦合一个受力点,在受力点处施加组合荷载。组合荷载设计值如表 3 所示。在土体侧表面施加两个方向的水平位移约束,对土体下表面施加竖向位移约束。

表 3 基础作用力设计值

作用力类型	X 轴方向 (横向力)	Y 轴方向 (竖向力)	Z 轴方向 (横向力)
上拔力	-228.4	-1 336.8	208.4
下压力	-255.8	1 642.6	276.5

由于土体的竖向变形和相对滑移,基础与土体之间的接触面会发生变化,从而影响基础的受力情况。平衡地应力是指在结构处于平衡状态时,各个节点上的应力分布。通过计算平衡地应力,可以更

准确地描述土体的变形行为,并为基础的受力分析提供准确的边界条件。平衡地应力的计算和分析对于结构的可靠性评估和设计优化非常关键。

2.3 网格划分

新型装配式螺旋锚基础中锚筋、锚板的存在给网格划分带来了挑战。为了获得较高质量的网格,通常对螺旋锚周围土体的网格进行加密。屈讼昭等^[10]通过对螺旋盘与平盘进行上拔荷载作用下的数值模拟并与现场试验结果对比分析,发现锚盘形式对螺旋锚的承载力影响不大,两种模型之间的最大差异在 3% 以内。基于此,将螺旋锚的锚盘简化为平盘进行计算分析,既降低了网格划分的难度,又可以提高计算的收敛性。

3 有限元模拟结果分析

3.1 地基应力状态

下压工况下的两种基础地基竖向压应力状态如图 4 所示。由图 4 可知:在下压工况下,地基应力状态以压应力为主,螺旋锚与土体之间的作用力最大。新型装配式螺旋锚基础基底最大土压应力为 886 kPa,现浇螺旋锚基础基底最大土压应力为 500 kPa。两种基础基底反力均从中心向四周扩大,反力极值出现在基底边缘,基础中心部位压应力与边缘处相差不大,土基受力状态良好。

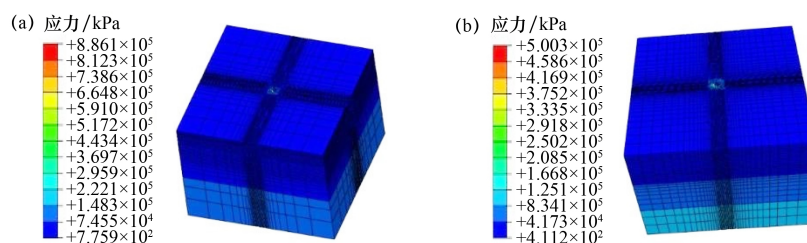
3.2 各构件应力状态

3.2.1 下压工况承台混凝土应力状态

下压工况下的新型装配式螺旋锚基础和现浇式螺旋锚基础混凝土的数值模拟结果如图 5、6 所示。由图 5、6 可知:两者承台的最大应力相差不大,但现浇式螺旋锚基础承台与螺旋锚杆的连接部位应力较为集中,易使混凝土遭受破坏,进而对基础本身产生不利的影响。

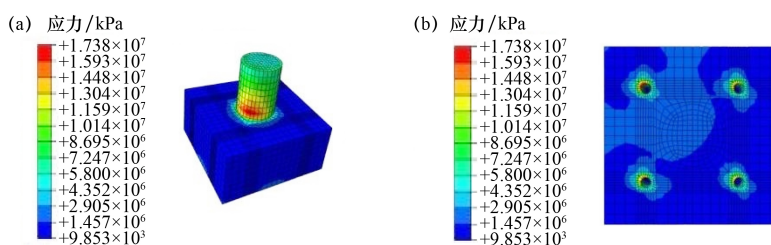
3.2.2 承台钢筋应力状态

下压工况下的新型装配式螺旋锚基础和现浇式螺旋锚基础钢筋笼应力云图如图 7 所示。由图 7 可知:在下压工况下,前者钢筋最大应力达到 97 MPa,后者钢筋最大应力达到 115 MPa。新型装配式螺旋锚基础由于其结构的先进性,虽然配筋只有后者的一半,但总体受力状态比后者要好,有效地避免了应力的集中。



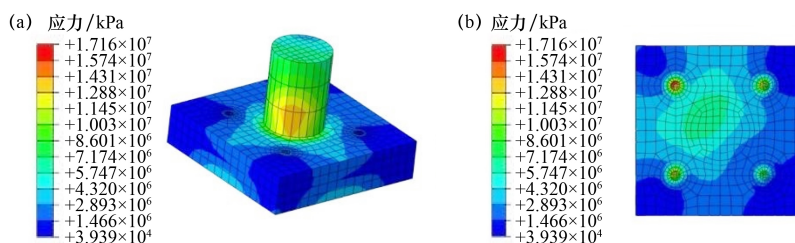
(a) 新型装配式螺旋锚基础；(b) 现浇式螺旋锚基础

图 4 下压工况下两种基础地基竖向压应力状态



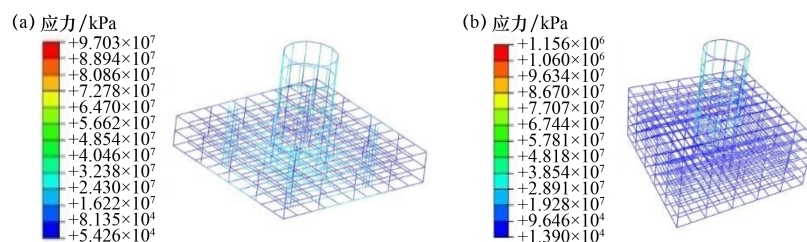
(a) 正视；(b) 仰视

图 5 现浇式螺旋锚基础混凝土受力



(a) 正视；(b) 仰视

图 6 新型装配式螺旋锚基础混凝土受力



(a) 新型装配式螺旋锚基础；(b) 现浇式螺旋锚基础

图 7 钢筋笼 Mises 云图

3.2.3 螺旋锚应力状态

下压工况下的新型装配式螺旋锚基础和现浇式螺旋锚基础螺旋锚应力云图如图 8 所示。由图 8 可知：在下压工况下，前者螺旋锚最大应力为 424 MPa，后者螺旋锚最大应力为 400 MPa。两者的螺旋锚受力差别不大，但新型装配式螺旋锚基础较之前者节约了大约一半的混凝土和钢筋。

3.2.4 上拔工况承台混凝土应力状态

上拔工况下的新型装配式螺旋锚基础和现浇式螺旋锚基础混凝土的数值模拟结果如图 9、10 所示。由图 9、10 可知：两者承台的最大应力相差不大，但现浇式螺旋锚基础承台与螺旋锚杆的连接部位应力较为集中，易使混凝土遭受破坏，进而对基础本身产生不利的影响。

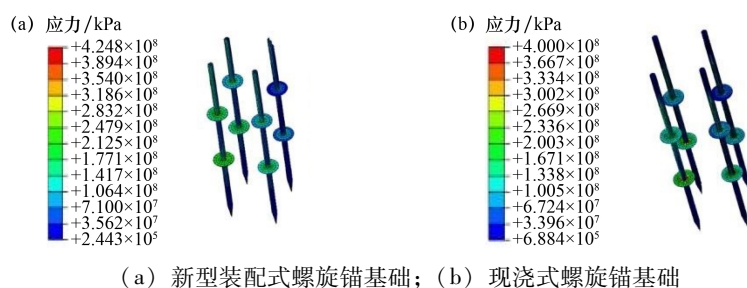


图 8 螺旋锚 Mises 云图

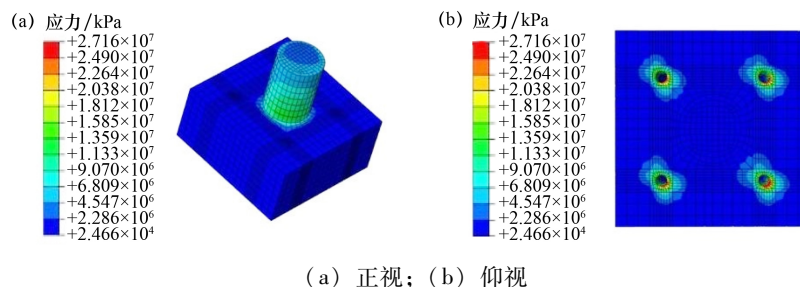


图 9 现浇式螺旋锚基础混凝土受力

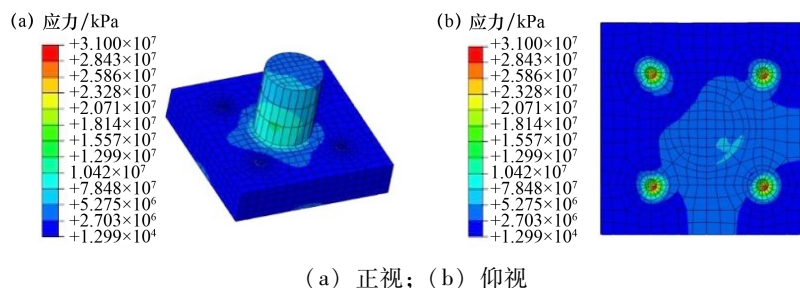


图 10 新型装配式螺旋锚基础混凝土受力

4 结 论

本文通过分析输电塔螺旋锚基础设计现状, 提出一种新型装配式螺旋锚基础设计方案, 并利用有限元分析软件 ABAQUS 研究新型装配式螺旋锚基础和现浇式螺旋锚基础在上拔-水平荷载、下压-水平荷载下的各构件应力; 通过分析相同荷载作用、相同埋深时两种基础各构件的应力水平, 确定新型装配式螺旋锚基础的有益性, 得到结论如下。

(1) 在上拔组合荷载和下压组合荷载作用下, 新型装配式螺旋锚基础与现浇式螺旋锚基础承载力接近, 说明该结构足够安全可靠。

(2) 在承载力相同的前提下, 相比现浇式螺旋锚基础, 装配式螺旋锚基础能够显著减少钢筋和混凝土的用量, 有效降低工程造价, 在工程实践中具有良好的应用前景。

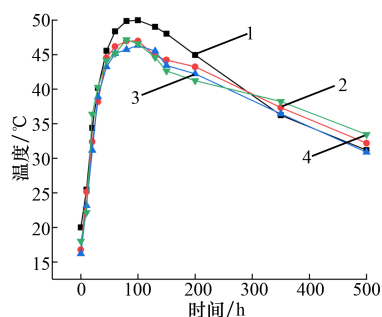
(3) 新型装配式螺旋锚基础采用预制的承台

和钢螺旋锚, 通过模块化的组装方式, 实现了快速、高效的施工。

参考文献:

- [1] 鲁先龙, 程永锋. 我国输电线路基础工程现状与展望[J]. 电力建设, 2005(11): 25-27; 34.
- [2] 郑卫锋, 张天光, 陈大斌. 我国输电线路基础工程现状与研究新进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2): 169-175.
- [3] 王开生, 韩枫, 汪猛. 复合桩基的技术特点与设计[J]. 黑龙江交通科技, 2005(9): 85.
- [4] 孟克, 赵戈, 王文明, 等. 新型输电线路复合基础性能及设计方法研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(12): 7-9.
- [5] 徐再根, 高雅慧, 张丽娟, 等. 螺旋锚复合基础力学性能研究[J]. 工程建设, 2023, 55(3): 6-12.
- [6] 吕建国, 么利中. 板式中型桩复合基础内力分析与计算[J]. 山西电力, 2012(6): 63-68.

(下转第 29 页)



1—数值模拟; 2—测温点 1; 3—测温点 2; 4—测温点 3。

图 10 混凝土中心实测温度时程曲线

5 结 论

(1) 在保证混凝土强度满足要求的前提下, 从源头上降低水泥水化热, 减少水泥用量。此外, 应当合理安排施工, 采用斜面分层浇筑, 尽可能留出散热面; 浇筑完毕后, 保持混凝土表面微热潮湿的状态, 养护时间不得少于 14 d。

(2) 管冷降温是一种相当高效的减少混凝土内外温差的方式, 应当控制好冷凝水的通水时间与流量, 充分利用场地原有水资源, 且在施工前, 可以借用数值模拟的方法, 分析管冷效果, 以确

定适合的管冷参数。

(3) 通过数值分析结果与现场实测结果可知, 混凝土表面达到最高温度时龄期约为 2 d, 之后降温较快; 而混凝土内部约在龄期 4 d 时才达到峰值温度。为了避免混凝土内外温差过大, 产生较大的拉应力裂缝, 宜在龄期 2 d 后在承台表面加盖毛毡, 延缓混凝土表面的降温速度, 或者适当增大冷凝水流量, 加快混凝土内部区域降温。

参考文献:

- [1] 陈东, 魏天酬, 吴鑫, 等. 大体积混凝土早期温度应力有限元数值模拟研究[J]. 广东建材, 2021, 37(12): 1-3.
- [2] 王龙, 鲁乃唯, 王柏文. 大体积混凝土承台水化热分析及管冷参数优化[J]. 工程建设, 2019, 51(4): 1-5; 17.
- [3] 王修山, 侯宁. 水管冷凝对大体积混凝土温度应力的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(8): 15-18.
- [4] 黄泽钦, 王培旭. 大体积混凝土水化热温度应力裂缝控制的试验及有限元仿真分析[J]. 工程建设, 2017, 49(12): 24-29.
- [7] 吴立晴, 邵国栋, 盛寒柯, 等. 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, 28(10): 120-124.
- [8] 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.
- [9] 许宏发, 吴华杰, 郭少平, 等. 桩土接触面单元参数分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002(5): 10-12.
- [10] 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(增刊 2): 3655-3668.

(上接第 23 页)