

# 基于 ABAQUS 的下压与上拔工况下钢管杆 变截面桩基础响应分析

马一丹<sup>1</sup>, 高兴林<sup>2</sup>, 张丽娟<sup>1</sup>, 王文明<sup>2,3</sup>

(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:**为解决大直径钢管杆基础经济性差的问题,变截面桩基础的设计应用至关重要。文章采用 ABAQUS 软件在平地工况下分别建立变截面桩以及直桩的精细化有限元模型,以应力和位移为进行控制,进行其在相同控制工况下的响应分析,研究了变截面桩基础大直径部分按照承台和桩进行配筋时不同变截面桩的承载特性,并对变截面桩和直桩进行对比。研究表明:1)在下压及上拔工况下,变截面桩基础与直桩基础相比,两者最大位移相差不大,最大应力均符合强度要求,但是变截面桩基础更加节省材料,因此,选择变截面桩更加经济;2)在下压工况下,按承台设计的变截面桩基础与按桩设计的变截面桩基础相比,两者最大应力与最大位移相差不大,但按桩设计的变截面桩基础其钢筋受力性能更好,在上拔工况下,按桩设计的变截面桩基础竖向位移更小,钢筋受力性能更佳,因此,变截面桩基础可以按桩进行设计。

**关键词:**变截面桩; 输电塔; 土-基础相互作用; 承载特性; 数值模拟

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)04-0036-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.04.046

## Response analysis on pile foundation of variable cross section of steel pipe under compression and uplift condition based on ABAQUS

MA Yidan<sup>1</sup>, GAO Xinglin<sup>2</sup>, ZHANG Lijuan<sup>1</sup>, WANG Wenming<sup>2,3</sup>

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China;

2. Department of Civil Engineering, Shandong Jianzhu university, Jinan 250101, Shandong, China; 3. Renovation of Building Structure and Underground Space Engineering Key Laboratory of Ministry of Education, Jinan 250101, Shandong, China)

**Abstract:** Large diameter steel pipe rod generally adopts straight pile foundation or step foundation, and its economy is poor. When variable cross-section pile foundation is adopted, the large diameter part can be reinforced according to the pile cap and pile. The ABAQUS software is used to establish the refined finite element model of variable cross-section pile and straight pile respectively under the flat ground condition. The stress and displacement are controlled, and the response analysis under the same control condition is carried out. The variable cross-section pile and straight pile are compared. The results show that: 1) Under the conditions of downward pressure and upward uplift, the maximum displacement of the variable cross-section pile foundation is not much different from that of the straight pile foundation, and the maximum stress meets the strength requirements, but the variable cross-section pile foundation is more material-saving, so it is more economical to choose the variable cross-section pile; 2) Under the downward pressure condition, the maximum stress and maximum displacement of the variable cross-section pile foundation designed according to the pile cap are not much

收稿日期: 2024-04-07

作者简介: 马一丹(1993—),女,工程师,从事输电线路工程设计和技术研究工作。

通信作者: 高兴林(2000—),男,硕士研究生,从事输电塔线路基础方面的研究。

different from those of the variable cross-section pile foundation designed according to the pile, but the variable cross-section pile foundation designed according to the pile has better mechanical performance of the steel bar. Under the uplift condition, the vertical displacement of the variable cross-section pile foundation designed according to the pile is smaller, and the mechanical performance of the steel bar is better. Therefore, the variable cross-section pile foundation can be designed according to the pile.

**Key words:** variable cross-section pile; transmission tower; soil - foundation interaction; load bearing characteristics; numerical simulation

随着我国新型电力系统建设的快速发展,输电塔线路工程开始向着绿色智能建造、轻型化方向转型,塔杆基础作为架空输电塔的重要组成,国内外学者对其开展了一些研究。任玉会等<sup>[1]</sup>提到了输电线路杆塔基础设计施工时所遇到的一些问题,给出了塔杆基础在设计 and 实际应用以及塔杆基础类型选择的建议。程永峰等<sup>[2]</sup>总结了我国输电塔基础工程中存在的一些问题,对于我国现有的设计与规范,输电线路基础设计过于保守,基础尺寸较国外大,导致混凝土和钢筋用量过大,造价过高。苏荣臻等<sup>[3]</sup>进行的桩的抗拔真型试验对软土地区的杆塔基础研究具有重要意义。通过试验获得的单桩荷载位移曲线为该地区的杆塔基础设计提供了宝贵的参考数据,进一步完善了单桩的抗拔特性。这项研究成果对于提高杆塔基础在软土地区的抗拔能力,增强电力输配网的可靠性和稳定性具有重要的指导意义。关维坚等<sup>[4]</sup>提到输电塔杆塔基础的发展趋势是提出更加合理的结构,改善基础的受力性能。徐满华等<sup>[5]</sup>提出了一种装配式螺旋钢桩基础,采用有限元模拟的方法,对其承载力进行分析,并与理论计算结果进行比对,验证了装配式螺旋钢桩基础的可靠性。

钢管杆大直径桩基础是一种重要的基础结构形式,在工程领域得到了广泛应用。为了提高这种桩基础的经济性和性能,学者们开始研究采用变截面桩基础的方法。变截面桩基础指的是在桩的长度方向上,桩的截面尺寸或形状逐渐变化的一种结构形式。在这方面,许多学者进行了深入的研究,从桩基础的设计、施工、力学性能等方面进行了探索和实验。通过对变截面桩基础的研究,他们希望能够有效地减少材料的使用量,提高基础的承载能力和抗震性能,从而达到经济、

高效的建造目标。李兵等<sup>[6]</sup>通过建立有限元模型的方法得到了变截面钢桩的临界荷载,并为其设计提供了建议。冯忠居等<sup>[7]</sup>以翔安大桥实体工程为例建立了软土地大直径变截面群桩基础的有限元模型,分析了在地震作用下群桩与土体的相互作用,给群桩的设计给出了建议。冯忠居等<sup>[8]</sup>开展了振动台试验,研究了大直径变截面钢管混凝土复合单桩的桩身加速度、水平位移、弯矩及桩基损伤等变化规律。屈俊童等<sup>[9]</sup>对新型变截面桩进行了数值模拟,通过对比分析安全系数、应力、应变等,为变截面抗滑桩的推广和运用提供参考。冯忠居等<sup>[10]</sup>对比研究大直径变截面桩与等截面桩在横向荷载作用下的承载特性,得出变截面桩基位置在距桩顶1/3以下比较合适。

目前架空输电线路基础主要采用杆塔基础,其基础尺寸受钢管杆直径和长径比控制,设计方法过于保守,尺寸较国外偏大,导致混凝土和钢筋用量过大,造价过高。为了提高大直径钢管杆基础的经济性,可以考虑采用变截面桩基础来替代传统的杆塔基础。近年来,国内外学者对变截面桩基础的承载能力及破坏模式进行了大量研究,变截面处配筋方案对桩基础承载力的影响尚不明确。变截面处按承台配筋钢筋用量多,现场绑扎困难,本文对按承台设计和按桩设计两种不同的设计方法进行对比分析,研究其钢筋混凝土在控制工况下的力学性能,以期可为输电塔大直径钢管杆桩基础的设计和应用提供参考。

## 1 阶梯变截面桩基础介绍

变截面桩指桩身横截面尺寸随桩身轴线变化的桩。根据其常用的型式可分为扩底桩、挤密扩盘桩和阶梯变截面桩。本部分主要围绕受地面位移或者塔脚板尺寸控制,导致桩径被迫增大的阶

梯变截面桩开展优化设计,即:桩基上部尺寸仍采用大桩径设计来满足地面位移或塔脚板对最小桩径的限制;缩小桩基下部桩径尺寸,增加桩长,满足基础承载力设计值,从而达到减小部分桩径,降低基础混凝土量和土方量的目的。通过优化设计阶梯变截面桩,不仅可以有效应对地基移动和承载力需求,还能够实现工程建设过程中的资源节约和环境保护。这种设计理念在工程实践中具有重要意义,为基础工程领域的可持续发展提供了有益借鉴。

阶梯型变截面桩是一种桩身断面随着深度呈阶梯形逐段减小的变截面桩。与常规等截面桩相比,具有以下特点:1) 桩身截面尺寸和形状沿着桩身轴方向发生变化,可较好的适应不同地基条件下的地层变化;2) 通过调整桩径大小,可以有效分配桩基受力,充分利用地基承载力,尤其是在上部需要较大承载力而下部承载力要求较低的情况下;3) 在地质条件复杂的区域,变截面桩能够通过调整截面尺寸来应对不同土层的承载力和变形特性,提高基础的适应性和可靠性。具有以下优点:1) 桩基在承载过程中变截面处有明显的挤土效应,提高了桩侧摩阻力;2) 从桩身的受力性状看,阶梯型变截面桩非常吻合轴力沿桩身向下传递而呈现上大下小的特征。尤其是在层状土中,这种桩更能使地基中各层土的承载潜力完美发挥出来;3) 变截面桩充分利用了桩基在水平荷载作用下弯矩、剪力上大下小的特性,不仅节约了材料,同时也降低了工程造价。

变截面桩基础可按照承台单桩基础,即大直径部分视为承台进行设计;也可按装桩基础进行设计,即大直径部分视为桩进行设计。按承台进行设计时,大直径部分需要设计上部钢筋、下部钢筋、侧面钢筋、箍筋及拉筋;按桩进行设计时,大直径部分只需设计通长筋及箍筋。为优化变截面桩基础设计方法,本文对两种变截面桩基础开展研究分析。图 1 中: $d_1$  为变截面桩上部直径, m;  $d_2$  为变截面桩下部直径, m;  $L_1$  为变截面桩上部长度, m;  $L_2$  为变截面桩下部长度, m。

## 2 数值计算模型

为深入研究变截面桩基础与等截面桩基础的

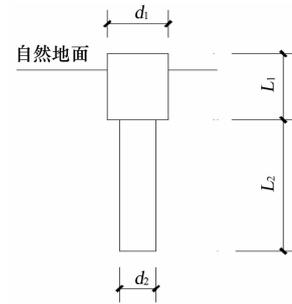


图 1 单阶变截面桩基础

受力性能,建立有限元模型对水平-下压组合荷载作用下的土体与基础进行对比分析。

### 2.1 模型介绍

采用 ABAQUS 有限元软件,分别建立变截面桩基础和等截面桩基础的钢筋-混凝土有限元模型。变截面桩基础模型以一个典型的钢管杆变截面桩基础为原型,按比例进行精确建模。模型的具体参数:上部桩径为 4 m,高度为 4 m;下部桩径为 3 m,高度为 10 m。整个基础的埋深为 13.5 m,露出土体的高度为 0.5 m。模型的尺寸和具体细节如图 2~5 所示,按桩设计变截面桩基础的大直径部分与小部分桩配筋相同。通过这两个不同截面桩基础模型的比较分析,可以深入研究变截面桩基础在实际工程应用中的力学性能以及优势。在 ABAQUS 软件中,详细设置了材料属性和边界条件,以确保模拟结果的准确性和可靠性。通过这些模型,可以更好地评估变截面桩基础在承载力、变形和应力分布等方面的表现,从而为优化设计提供科学依据和技术支持。

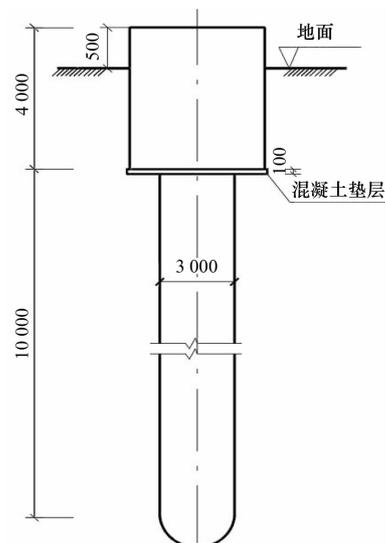


图 2 变截面桩正视图

mm

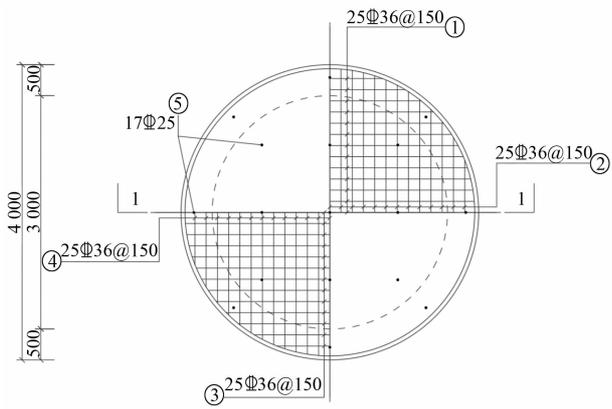


图 3 承台俯视 mm

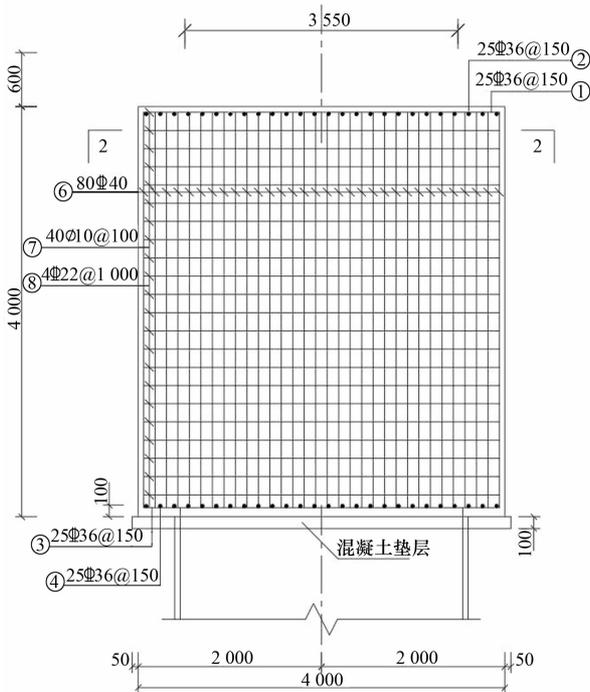


图 4 承台剖面 mm

土体截面尺寸为  $120\text{ m} \times 120\text{ m} \times 120\text{ m}$ , 高度是结构高度的 8 倍, 满足静力计算尺寸的规范要求。在有限元分析中, 网格划分是一个非常重要的步骤, 它将连续的几何体分割成有限个单元(元素), 这使得数值方法可以用来求解复杂的问题。网格的尺寸和质量对最终分析结果的精度和计算效率有很大的影响。土体采用 C3D8R 六面体单元。变截面桩基础具体尺寸如上, 采用 C3D8R 六面体单元, 变截面部分易出现应力集中, 为增加分析的精确性, 采用手动划分, 对变截面处周围土体网格进行加密。等截面桩基础以及变截面桩基础有限元模型如图 6 ~ 8 所示。

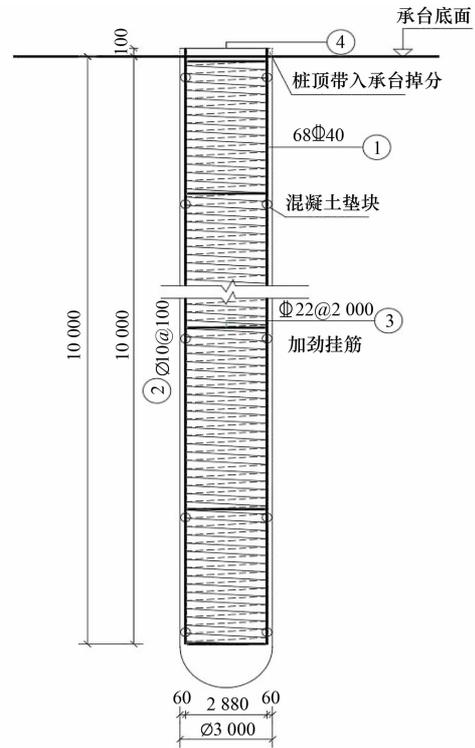
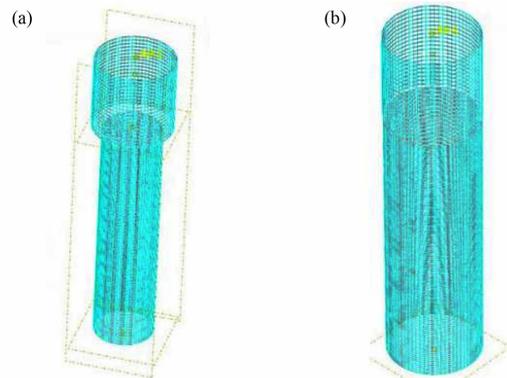
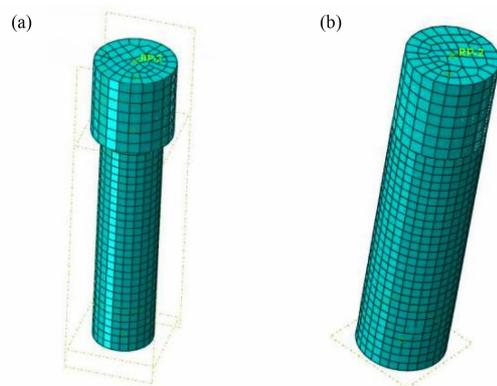


图 5 桩身剖面 mm



(a) 按桩设计的变截面桩钢筋模型; (b) 等截面桩钢筋模型

图 6 桩基础配筋



(a) 变截面桩模型; (b) 直桩模型

图 7 网格划分

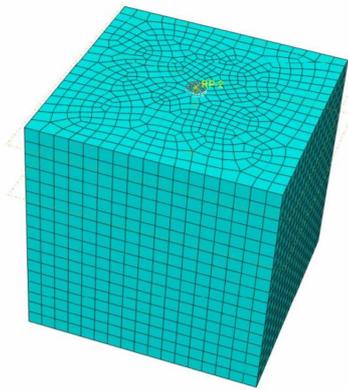


图 8 土体 - 桩基有限元模型

## 2.2 材料本构关系参数取值及接触关系

在 ABAQUS 软件中采用 Embedded 接触, 将钢筋嵌入至混凝土基础中。建立变截面桩基础与土体相互作用模型。土体与变截面桩基础采用面 - 面接触, 变截面桩基础与土体之间在法线方向上采用 Hard 型接触, 在切线方向上采用 Penalty 型摩擦。混凝土采用混凝土损伤塑性本构, 钢筋采用弹塑性本构, 土体采用 Drucker-Prager 本构, 材料本构和参数如表 1 所示。

表 1 材料本构和参数

材料	本构	参数	数值
混凝土	CDP	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2 400
		弹性模量/GPa	32.5
		泊松比	0.20
		拉伸屈服应力/MPa	3
		压缩屈服应力/MPa	30
钢筋	弹塑性	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	7 800
		弹性模量/GPa	200
		屈服应力/MPa	458
硬土	Drucker-Prager	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2 200
		弹性模量/MPa	50
		泊松比	0.3
		摩擦角	25
软土	Drucker-Prager	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1 800
		弹性模量/MPa	10
		泊松比	0.4
		摩擦角	15

## 2.3 荷载布置与边界条件

将重力、下压 - 水平组合荷载或将重力、上拔 - 水平组合荷载分成两步进行分析。首先在基础模型顶部接触面中心耦合一个受力点, 在受力

点处施加基础作用力, 且均采用非线性平滑方式完成加载过程。基础作用力设计值如表 2 所示。

表 2 基础作用力设计值

作用力	x 方向横 向力(水平 力)/kN	z 方向竖 向力(竖向 力)/kN	y 方向 弯矩/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )
下压 - 水平	810	892	30 149
上拔 - 水平	810	-892	30 149

边界条件是约束模型某一部分保持固定不变(零位移)或移动规定量的位移(非零位移)。本文按照设计要求在土体底面及 4 个侧面施加固定约束。

## 2.4 地应力平衡

为避免土体在无应力状态下因自身重力引起土体单元发生竖向变形而导致的结构不收敛的问题, 在设计工况下基础承载模拟之前, 应进行地应力平衡。本文采用 OBD 导入法进行地应力平衡。

## 3 平地的变截面桩和直桩有限元结果对比

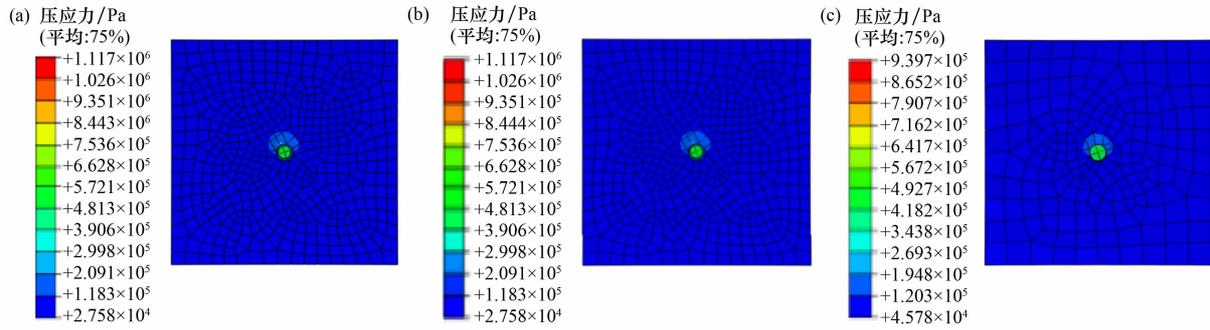
### 3.1 水平 - 下压工况下变截面桩和直桩有限元结果对比

#### 3.1.1 地基应力状态

下压工况下 3 种基础地基的竖向压应力状态如图 9 所示。由图 9 可知: 下压工况下, 地基应力状态以压应力为主, 基础与底部土体之间的作用力最大。按承台基础设计的变截面桩基础最大土压力为 0.94 MPa, 按照桩设计的变截面桩基础最大土压力也为 1.12 MPa, 直桩基础最大土压力为 1.12 MPa。由分析结果可知, 3 种基础所受土压力差别不大。

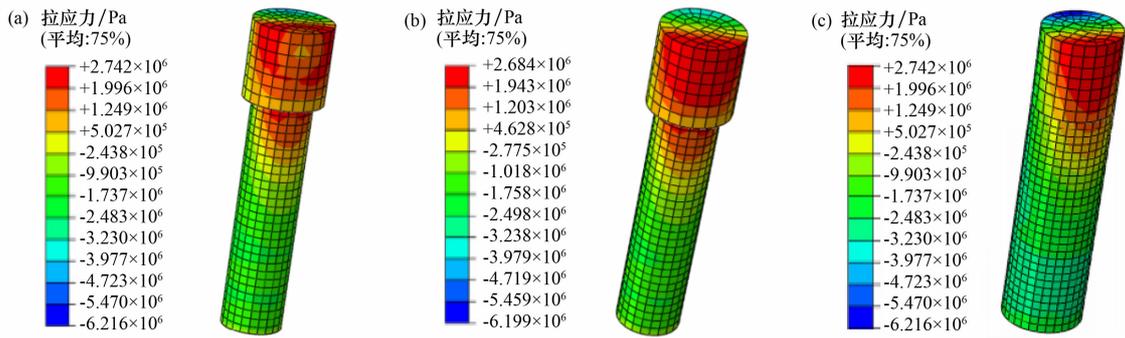
#### 3.1.2 各构件应力状态

下压工况下, 3 种桩基础的数值模拟结果如图 10 所示。由图 10 可知: 按照承台设计的变截面桩基础和按照桩设计的变截面桩基础最大应力出现在变截面位置和靠近桩顶位置, 直桩基础最大应力出现在靠近桩顶的位置。其中按承台设计的变截面桩基础最大拉应力为 2.74 MPa, 按桩设计的变截面桩基础最大拉应力为 2.68 MPa, 直桩基础最大拉应力为 2.86 MPa, 按承台设计的变截面桩基础与按桩设计的变截面桩基础相比, 两者最大



(a) 按承台设计的变截面桩; (b) 按桩设计的变截面桩; (c) 直桩

图 9 下压工况下 3 种基础地基竖向压应力状态



(a) 按承台设计的变截面桩; (b) 按桩设计的变截面桩; (c) 直桩

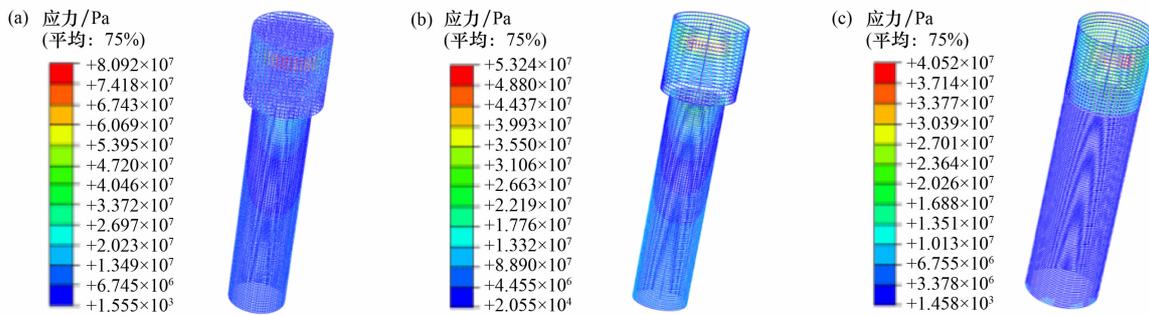
图 10 下压工况下 3 种基础混凝土受力状态

应力相差不大, 但变截面处应力较为集中, 易使混凝土受到集中力而破坏, 对基本本身造成不利影响。

钢筋笼应力云图如图 11 所示。由图 11 可知: 下压工况下, 按承台设计的变截面桩基础钢筋最大应力达到 80.92 MPa, 按桩设计的变截面桩基础钢筋最大应力达到 53.24 MPa, 直桩基础钢筋最大应力达到了 40.52 MPa。钢筋峰值应力均出现在距桩顶约 0.5 m 处。依据应力图可以看出: 按桩基础设计的变截面桩基础虽然配筋少于按承台设计的变截面桩基础, 但总体受力状态比后者要好,

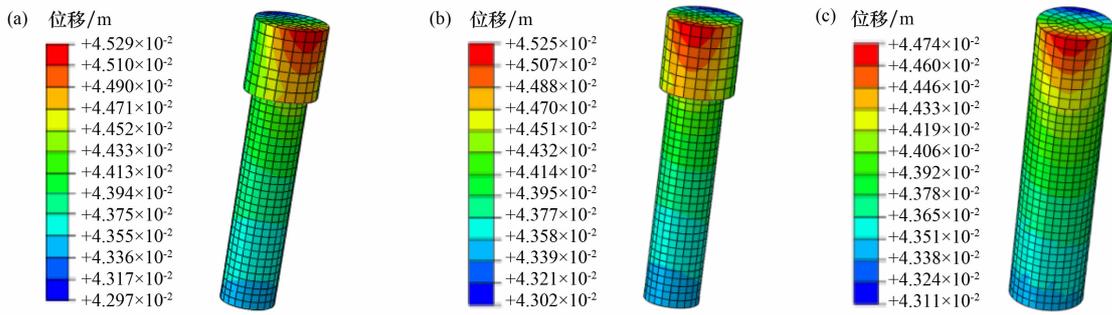
有效的避免了应力的集中。按桩设计的变截面桩基础与直桩基础相比, 受力性能差别不大。

桩位移云图如图 12 所示。由图 12 可知: 在下压工况下, 按承台设计的变截面桩基础最大位移为 45.29 mm, 按桩设计的变截面桩基础桩顶位移为 45.25 mm, 直桩基础最大位移为 44.74 mm。按承台设计的变截面桩基础与按桩设计的变截面桩基础最大位移几乎一样, 相较于直桩基础相差不大, 基础整体变形趋势基本相同, 但是按桩设计的变截面桩基础更加节省材料。



(a) 按承台设计的变截面桩; (b) 按桩设计的变截面桩; (c) 直桩

图 11 钢筋笼 Mises 云图



(a) 按承台设计的变截面桩；(b) 按桩设计的变截面桩；(c) 直桩

图 12 3 种基础的位移 Mises 云图

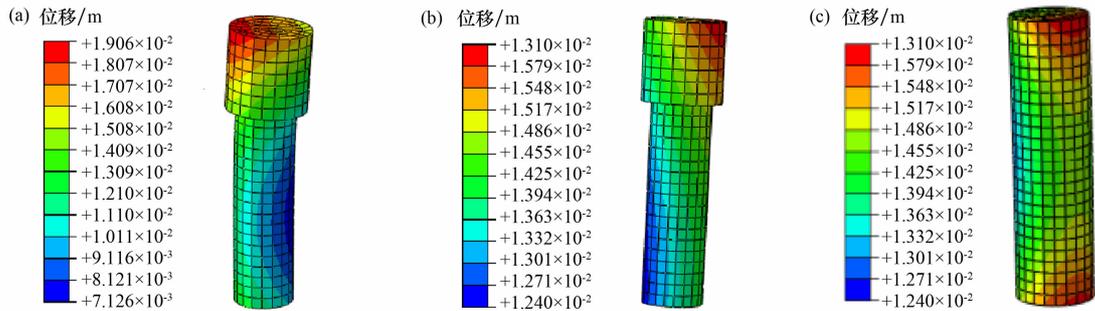
### 3.2 水平 - 上拔工况下变截面桩和直桩有限元结果对比

在上拔工况下，基础混凝土应力较小，混凝土最大拉应力及最大压应力远小于允许值，构件未破坏，破坏模式由位移控制。因此，对柱顶竖向位移及钢筋应力展开分析，竖向位移达 10 mm 时，视为构件达到极限承载能力。

桩竖向位移云图如图 13 所示。由图 13 可知：在上拔工况下，按承台设计的变截面桩基础的桩顶竖向位移为 19.06 mm，按桩设计的变截面桩基础的桩顶竖向位移为 16.10 mm，直桩基础的桩顶竖向位移为 11.36 mm。按承台设计的变截面桩基

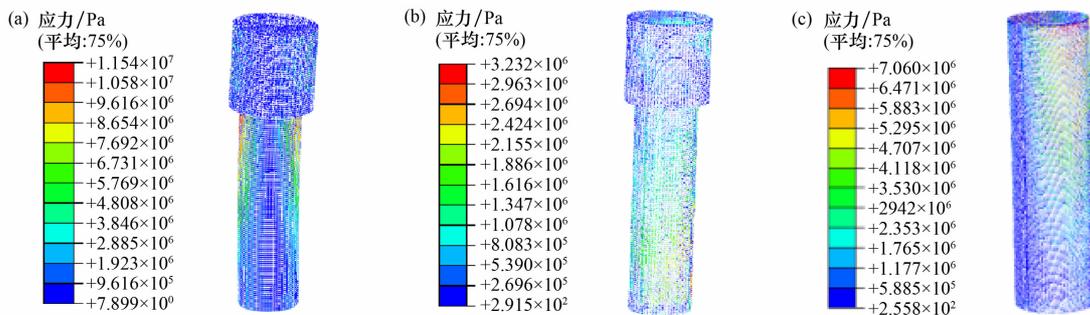
础与按桩设计的变截面桩基础相比，按桩设计的变截面桩基础竖向位移更小，基础整体变形趋势基本相同，但是按桩设计的变截面桩基础更加节省材料。

钢筋笼应力云图如图 14 所示。由图 14 可知：上拔工况下，按承台设计的变截面桩基础钢筋最大应力达到 115.4 MPa，按桩设计的变截面桩基础钢筋最大应力达到 32.32 MPa，直桩基础钢筋最大应力达到了 70.60 MPa。变截面桩基础钢筋峰值应力出现在距桩顶约 0.5 m 处，直桩基础钢筋峰值应力出现在柱顶位置。依据应力图可以看出：按桩基础设计的变截面桩基础虽然配筋少于按承台



(a) 按承台设计的变截面桩；(b) 按桩设计的变截面桩；(c) 直桩

图 13 3 种基础的位移 Mises 云图



(a) 按承台设计的变截面桩；(b) 按桩设计的变截面桩；(c) 直桩

图 14 下钢筋笼 Mises 云图

设计的变截面桩基础,但总体受力状态比后者要好。按桩设计的变截面桩基础与直桩基础相比,受力性能更优。

#### 4 结论

本文基于 ABAQUS 有限元软件,建立平地的变截面桩以及直桩的精细化有限元模型,进行其在相同控制工况下的响应分析。以最大应力和最大位移为分析对象,对变截面桩和直桩进行对比分析,并得出相应结论。

(1) 在下压及上拔工况下,变截面桩基础与直桩基础相比,两者最大位移相差不大,最大应力均符合强度要求,但是变截面桩基础更加节省材料,因此,选择变截面桩更加经济。

(2) 在下压工况下,按承台设计的变截面桩基础与按桩设计的变截面桩基础相比,两者最大应力与最大位移相差不大,但按桩设计的变截面桩基础其钢筋受力性能更好,在上拔工况下,按桩设计的变截面桩基础竖向位移更小,钢筋受力性能更佳,因此,变截面桩基础可以按桩进行设计。

#### 参考文献:

[1] 任玉会,李鑫. 输电线路杆塔基础设计探索[J]. 农

村电气化,2022(9):24-26.

- [2] 程永锋,邵晓岩,朱全军. 我国输电线路基础工程现状及存在的问题[J]. 电力建设,2002(3):32-34.
- [3] 苏荣臻,郑卫锋,鲁先龙,等. 软土地区杆塔基础微型桩抗拔特性试验研究[J]. 电力建设,2008,29(12):23-25.
- [4] 关维坚. 软土地区输电线路桩基础设计与施工技术[J]. 科技创新与应用,2023,13(35):101-104.
- [5] 徐满华,周鲲. 输电线路干作业装配式螺旋钢桩基础模拟分析[J]. 工程建设,2022,54(7):28-33.
- [6] 李兵,王燕,朱淞瑜,等. 考虑自重的变截面钢桩屈曲有限元分析[J]. 石油和化工设备,2023,26(11):23-25.
- [7] 冯忠居,王志浩,张晓光,等. 软土场地大直径变截面群桩动力响应特性的研究[J]. 公路,2023,68(6):233-241.
- [8] 冯忠居,王逸然,蔡杰,等. 桩-震陷土层耦合作用下变截面单桩动力响应[J/OL]. 振动工程学报:1-11 [2023-12-18].
- [9] 屈俊童,崔茂俊,孙再斌,等. 基于有限元的新型变截面抗滑桩工程应用研究[J]. 贵州科学,2023,41(1):88-93.
- [10] 冯忠居,陈露,蔡杰,等. 大直径变截面桩与等截面桩的横向承载特性对比研究[J]. 公路,2022,67(9):189-195.