

# 风机锥形基础水平承载力影响因素数值分析

温佳杉<sup>1</sup> 刘依洋<sup>1</sup> 魏耘函<sup>1</sup> 刘聪玮<sup>1</sup> 丁子涵<sup>1</sup> 刘文静<sup>2</sup> 李珊珊<sup>1</sup>

1. 潍坊学院 山东潍坊 261061; 2. 潍坊市市政公用事业服务中心 山东潍坊 261000

DOI: 10.12238/ems.v6i12.10884

[摘要] 锥形基础是一种新形式风机塔筒支撑结构, 适合应用于山区和高原地区。与传统山区风机基础相比, 通过基础与地基之间的柔性接触提高风机基础的耗能能力, 允许基础在极端荷载下产生轻微弹性变形以吸收基础瞬间产生的巨大力矩, 提高风电机组的稳定性。本文通过有限元分析软件 ABAQUS, 对砂土地基上锥形基础的水平承载性能进行数值模拟, 主要探讨不同净高比下锥形基础的失稳破坏模式, 为基础尺寸选型提供参考, 发现: 水平荷载作用下锥形基础前侧形成明显球形旋转破坏面, 转动点位于距离顶面约 0.3 倍基础高度处; 基础径高比对水平承载力影响较弱, 但基础侧壁倾角对水平承载力影响较大。

[关键词] 风机基础; 锥形基础; 水平承载力; 数值模拟

## Numerical Analysis on Influence Factor of Horizontal Bearing Capacity of cone-shaped foundation for onshore wind turbines

Wen Jiashan<sup>1</sup>, Liu Yiyang<sup>1</sup>, Wei Yunhan<sup>1</sup>, Liu Congwei<sup>1</sup>, Ding Zihan<sup>1</sup>, Liu Wenjing<sup>2</sup>, Li Shanshan<sup>1</sup>

1. Weifang University, Weifang, Shandong 261061;

2. Weifang Municipal Public Utilities Service Center, Weifang, Shandong 261000

[Abstract] The cone-shaped foundation is an innovative type of the mountain wind turbine foundation, which outperformed the traditional wind turbine foundations in increasing the bearing capacity of foundations, and in reducing the excavation volumes of foundation. Based on the finite element analysis software ABAQUS, this paper numerically analyzes the influence factors of the horizontal bearing capacity of foundations in sand and discusses the failure mechanism of foundation. The optimal size the pyramid foundation is studied. Results show that the base represents an obvious spherical rotation failure surface in the front if the bases and the rotation center located in the range of 0.3 times height of foundations under horizontal load. The effect of diameter to height ration on the bearing capacity could be relatively not considerable, while the angle of side wall has a substantial effect on bearing capacity.

[Keywords] wind turbine foundation; cone-shaped foundation; lateral bearing capacity; FEM

### 引言

风电利用在中国兴起较晚, 对风电基础的研究经验有限, 在建造过程中过度依赖国外设计标准而缺乏对实际工程地质条件的考虑, 导致了不必要的资金和资源的浪费。且近年来的风机基础损坏事故让我们不禁反思传统常用圆形基础及其他形式基础力学性能是否完美, 鉴于此李大勇教授提出了一种锥形基础, 已获得国家发明专利授权。由于锥形基础形状的特殊性, 不能完全按照圆形、方形等风电基础理论进行计算, 本文采用有限元软件 ABAQUS 对锥形基础进行模拟, 讨论了锥形基础在砂土地基上的水平极限承载力的影响因素。

#### 1 有限元模型

采用有限元软件 ABAQUS 对锥形基础进行模拟。为消除边界效应、降低计算成本, 取半个基础及周围土体进行分析, 地基宽度取  $6D$  ( $D$  为模型基础直径), 高度取  $6H$  ( $H$  为基础高度); 地基土弹塑性模型中塑性分析采用 Drucker-Prager 硬化本构关系, 弹性模量  $E=0.03\text{GPa}$ , 泊松比  $\nu=0.35$ , 土体密度  $\rho=1800\text{kg/m}^3$ , 摩擦角  $\phi=32^\circ$ , 剪胀角  $\psi=25^\circ$ 。基础采用线弹性模型, 弹性模量  $E=200\text{GPa}$ , 泊松比  $\nu=0.16$ ; 地基土体底部限制  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的自由度, 土体侧面限制  $x$ 、 $y$  方向的自由度; 基础与土体间采用非线性“硬”接触处理,

主动-被动接触面算法, 切向采用有摩擦的罚函数, 摩擦系数设置为  $0.36$  (相当于摩擦角  $20^\circ$ ); 基础与地基均采用 C3D8R 实体单元, 此单元对位移求解结果较准确且精度较高。对基础周围土体单元进行渐进加密划分。

#### 2 数值模拟结果

为确定锥形基础最优径高比, 在控制相同材料用量的前提下, 建立了 10 组径高比分别为  $D/H=1、2、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6、6.5$  ( $D$  为锥形基础顶板直径,  $H$  为基础高度) 的有限元模型, 具体尺寸见表 1。在相同加载高度  $e/D=2$  ( $e$  为加载点偏基础顶板高度) 下施加水平荷载。在有限元模拟计算过程中, 采用荷载控制法进行逐级加载, 每级加载  $0.2\text{KN}$ , 加载到不收敛为止; 为统一标准, 取水平位移达到  $0.1D$  时对应的荷载作为基础的水平极限承载力。

##### 2.1 基础破坏机制

图 1 绘制了水平荷载作用下锥形基础的破坏机制, 并分析了基础转动点在不同径高比下随水平荷载的变化规律, 数值均进行了“无量纲”化处理。以  $D/H=1、2$  为例, 由图 1 (a) 知, 沿加载方向的基础前侧形成明显的球形旋转破坏面, 且旋转中心位于距离基础顶面约  $0.3H$  处, 基础前侧土体被挤压形成被动破坏面, 而后侧与土体形成裂缝。图 1 (b) 具体描

绘了 10 组径高比下基础随载荷增加旋转中心点在水平方向上偏离基础中心的变化趋势,发现当  $D/H=1\sim 4$  时,转动点偏离基础顶板中心距离先增大后减小,因为随载荷增加基础逐渐前移,但随载荷增加土压力亦增大,致使基础沿侧壁发生上移,出现相对反转倾向,转动点稍后移;当  $D/H=4\sim 6.5$  时,随载荷增加,转动点偏离基础中心距离逐渐增加,但数值变化不大。图 1 (c) 比较了不同径高比下,基础达到极限破坏状态时的水平侧移量,表明当  $D/H\leq 2$  时,基础发生侧移相对明显,而随  $D/H$  值增大,其侧移量在  $0.015D$  范围内,变化很小。

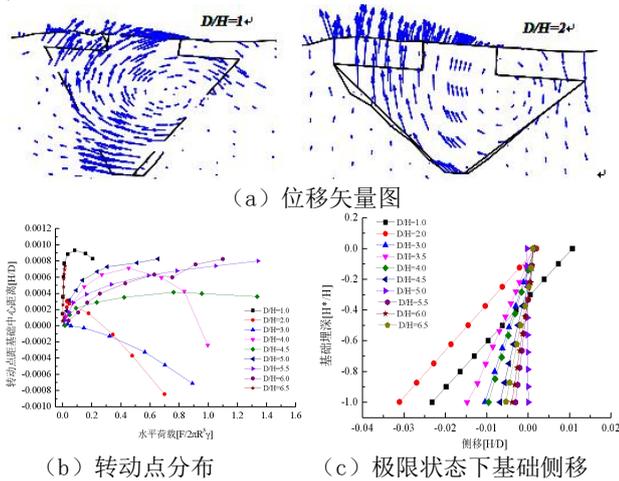


图 1 基础破坏机制及转动点分布

Fig.2 The deformation failure mechanism and variation in rotation center

2.2 水平荷载作用下的应力-应变关系

图 2 为组径高比基础在水平荷载作用下的应力-应变关系曲线,加载高度为  $e/D=2$ ,对数值进行无量纲处理,取水平位移为  $0.1D$  时对应的荷载作为基础的极限承载力。

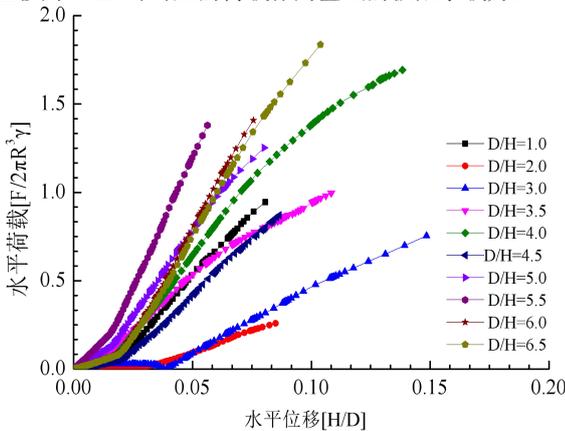


图 2 基础荷载-侧移关系曲线

Fig.3 Curves of lateral load vs. deflection

数值模拟结果表明:锥形基础水平承载力随水平位移增加而逐渐增大,即锥形基础的水平承载力随着基础顶板直径的增大而提高;在一定范围内随着径高比的增大,基础的水平承载能力增加;其中,当  $D/H=1\sim 2$  时水平承载力最低,而当  $D/H=5.5$  时,水平承载力最高。

2.3 侧壁倾角对水平承载力的影响

为研究侧壁倾角对水平承载力的影响,以上文水平承载力最高时的径高比为  $D/H=5.5$  的锥形基础,加载高度  $e/D=2$

为例,倾角用  $\theta$  表示锥形基础侧壁与地基水平地面的夹角,分别取  $\theta=20^\circ、25^\circ、30^\circ、35^\circ、40^\circ$ ,在相同水平荷载作用下加载,得到基础水平承载力-水平位移关系。模拟结果分析表明:当倾角  $\theta$  为  $35^\circ$  时,基础水平承载力最高;当侧壁倾角  $\theta=35^\circ$ ,计算可得,此时基础的顶板与底板的直径比为  $D/D_1=2$ 。极限状态下,基础前侧各测点的侧移分布,分析可知:随倾角增大基础侧移量减小,即适当增大侧壁倾角可控制基础水平侧移量,有利于基础稳定,增大倾角亦代表增加基底面积。

3 结语

通过大型有限元软件 ABAQUS 进行对锥形基础的数值模拟,提出了锥形基础的基础形式,探讨了破坏机理,得出基础的最优尺寸,以下结论:

- 1) 基础的加载前侧形成明显的球形旋转破坏面,旋转中心位于距离基础顶板约  $0.3H$  处;
- 2) 锥形基础的水平承载力随径高比的增加无明显的变化规律,但随水平位移的增加而增加;随着侧壁倾角度数即基础顶板面积的增加,水平承载力先增加后减小。基础的最优尺寸为径高比为  $5.5$  且侧壁倾角为  $35^\circ$  基础顶板-底板面积比为  $2$ 。

上述研究是基于小尺寸模型得到的,但对于普遍规律的研究具有一定的意义。可进一步对基础受力计算并对设计进行优化使之能够更好的适用于不同的地质环境。

【参考文献】

[1]Zheng ChongWei, Zhuang Hui, Li Xin, etc. al. Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea and South China Sea[J]. Science China, 2012, 55 (1): 163-173.

[2]张玉卓,蒋文化,俞珠峰,等. 世界能源发展趋势及对我国能源革命的启示[J]. 中国工程科学, 2015, 17 (9): 140-145.

[3]He Dexin, Wang Zhongying. Perspectives of China's wind energy development[J]. Science Engineering, 2009, 7 (2): 27-31.

[4]Courvenec S, Randolph M. Effect of strength non-homogeneity on the shape of failure envelopes for combined loading of strip and circular foundations on clay[J]. Geotechnique, 2003, 53 (6): 575-586.

[5]于泓,高毅,秦庆芝,等. 岩石锚杆基础应用及效益分析[J]. 电力建设, 2007, 28 (4): 34-35.

作者简介:温佳杉(2003-),女,山东淄博,本科,潍坊学院学生,研究方向为建筑与土木工程。  
刘依洋(2004-),女,山东潍坊,本科,潍坊学院学生,研究方向建筑与土木工程。  
魏耘函(2005-),女,河北石家庄,本科,潍坊学院学生,研究方向建筑与土木工程。  
刘聪玮(2004-),女,河北保定,本科,潍坊学院学生,研究方向建筑与土木工程。  
丁子涵(2005-),女,山东枣庄,本科,潍坊学院学生,研究方向建筑与土木工程。  
刘文静(1986-),女,山东潍坊,本科,潍坊市市政公用事业服务中心科员,研究方向市政工程。  
李珊珊(1989-),女,山东泰安,博士,潍坊学院土木与交通学院,研究方向为岩土工程理论与应用(通讯作者)。  
基金项目:潍坊学院博士科研启动基金(2019BS18);山东省自然科学基金项目(ZR2024ME154)