

# 风电空心锥形基础水平承载特性 及土压力分布规律模型试验研究

张 玉<sup>1</sup>, 李大勇<sup>1,2</sup>, 梁 昊<sup>2</sup>, 张雨坤<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘 要:** 空心锥形基础是一种新型陆地风电基础形式。开展粗砂中空心锥形基础的水平单调加载模型试验, 研究基础尺寸、加载高度对水平承载力、基础周围土压力分布规律的影响。研究表明锥形基础水平承载力随底板直径增加而显著提高, 随加载高度增加而降低。当无量纲化加载高度  $H/D_0$  ( $H$  为加载高度,  $D_0$  为基础顶板直径) 由 0.5 增至 1.0 时, 锥形基础水平承载力减小约 43%。相同顶板直径和基础高度条件下, 基础底板与顶板直径之比大于 0.28 时, 锥形基础水平承载力高于圆型基础。水平荷载作用下, 空心锥形基础绕一点发生转动, 转动点沿加载方向基础前侧移动。加载过程中, 沿加载方向基础前侧土体处于被动土压力区, 土压力随基础埋深近似呈倒三角形分布, 被动土压力区范围值随水平荷载增加而逐渐减小。基于极限平衡法, 提出了水平荷载下基础与土体脱空面积的计算方法, 采用模型试验数据验证了其准确性, 模型试验与计算结果误差为 4.5%。

**关 键 词:** 空心锥形基础; 模型试验; 水平承载力; 转动点; 土压力

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 05-1404-09

## Model tests on horizontal bearing capacity and earth pressure distribution of hollow cone-shaped foundation under horizontal monotonic loading

ZHANG Yu<sup>1</sup>, LI Da-yong<sup>1,2</sup>, LIANG Hao<sup>2</sup>, ZHANG Yu-kun<sup>2</sup>

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** The hollow cone-shaped foundation is an innovative foundation for onshore wind turbines. Model tests were carried out to investigate the influences of foundation sizes and loading eccentricity on the bearing behavior and earth pressure distribution along the foundation embedded depth under monotonic horizontal loading. Results show that the horizontal bearing capacity of the cone-shaped foundation increases with the increase in the diameter of the foundation and the decrease in the loading eccentricity. When the normalized loading eccentricity,  $H/D_0$  ( $H$  is the loading eccentricity and  $D_0$  is the diameter of the foundation top plate), increases from 0.5 to 1.0, the bearing capacity decreases by approximately 43%. When the ratio of the base plate diameter to the top plate diameter of the cone-shaped foundation is higher than 0.28, the bearing capacity of the cone-shaped foundation is larger than that of the regular circular gravity-based foundation under the same top plate diameter and foundation height. During horizontal loading, the cone-shaped foundation rotates about the rotation center. The rotation center moves downwards and forwards with the increase in horizontal loading, and then tends to be a stable position. The sand in front of the foundation is in the passive earth pressure zone. The size of the passive earth pressure zone decreases with the increase in the horizontal load. A method of predicting the effective area between the foundation and the sand is proposed in terms of the force equilibrium. The effective area predicted using the proposed method agrees well with the model test results. The error between the calculated result and the test result is 4.5%.

**Keywords:** hollow cone-shaped foundation; model tests; horizontal bearing capacity; rotation center; earth pressure

## 1 引 言

风能具有零污染、零排放等优点, 是经济价值

的可再生能源之一。风机及塔架属于高耸结构物, 服役中主要长期受到水平风荷载作用, 水平荷载通过塔架传递给基础。因此, 水平荷载是风电基础的

收稿日期: 2020-07-29

修回日期: 2020-12-30

基金项目: 山东科技大学科研创新团队项目 (2015TDJH104)。

This work was supported by the Research Fund of Shandong University of Science and Technology (2015TDJH104).

第一作者简介: 张玉, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事多场耦合岩土材料稳定性方面的研究工作。E-mail: zhangyu@upc.edu.cn

通讯作者简介: 张雨坤, 男, 1987 年生, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事土力学试验与地基基础理论方面研究。E-mail: philc007@163.com

主控荷载。

重力式扩展基础是目前陆地风电基础的主要形式,由大体积钢筋混凝土浇筑而成,建造成本较高,且基础与塔架的连接属于刚性连接,极端荷载作用下上部塔架易弯折,发生脆性破坏。另外,基础开挖将产生大量渣土,对周围环境造成污染。为了克服上述山区风电基础不足,提出了一种新型基础——山区风电钢筋混凝土空心锥形柔性基础(简称空心锥形基础)<sup>[1]</sup>。如图1所示,基础底板、侧壁、顶板均为钢筋混凝土结构,内部采用开挖地基的渣土进行回填,既节省了混凝土用量,同时避免渣土堆积对周围环境造成破坏。基础与地基间设置一层橡胶柔性垫层,允许基础在水平荷载下产生微动,从而释放受到的巨大水平荷载和弯矩。橡胶柔性垫层理念借鉴了土木工程中广泛应用的橡胶隔震垫的理念,既可以释放基础受到的巨大弯矩和瞬时荷载作用,也可以增强基础承载力和稳定性。前期研究已证实,相比于圆形基础,锥形基础具有承载力高、回弹性能好、水平位移小等优点<sup>[2]</sup>。

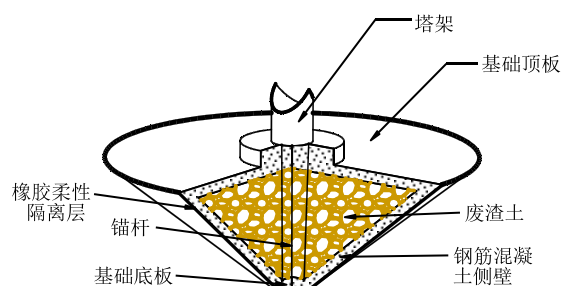


图1 空心锥形基础

Fig.1 Schematic diagram of the hollow cone-shaped foundation

目前对于空心锥形基础的研究处于起步阶段,传统风电基础的研究方法和内容具有很好的借鉴作用。近年来,许多国内外学者采用理论分析、数值模拟、模型试验研究了风电基础的水平承载特性。Wakile<sup>[3]</sup>、Govoni<sup>[4]</sup>等研究了基础尺寸、砂土相对密度、内摩擦角等因素对水平承载力的影响,得出基础的运动形式和周围土体的破坏机制。Wu等<sup>[5]</sup>将数值模拟、极限分析和模型试验进行对比分析,探究了水平荷载作用下基础的承载力,结果表明:3种方法所得结果较为吻合。肖忠等<sup>[6]</sup>对比分析了带十字内隔板与不带十字内隔板的桶形基础单向承载特性,得到了基础的水平承载力及破坏模式。李大勇等<sup>[7]</sup>通过模型试验研究了加载高度对水平承载力的影响,结果表明随着加载高度增加,基础的水平承载力有不同程度的降低。许建朋<sup>[8]</sup>、李大勇<sup>[9]</sup>、

高乾丰<sup>[10]</sup>等对水平荷载作用下基础的土压力特征展开研究,得出土压力的分布规律,并将土压力与位移分析法所得转动点进行对比,结果表明转动点均位于0.6~0.9倍基础埋深之间。刘梅梅<sup>[11]</sup>、金书成<sup>[12]</sup>和刘金龙<sup>[13]</sup>等基于极限平衡理论,通过假定简单的破坏模式,得到水平极限承载力计算公式,并提出基底脱空面积及最大基底反力。已有研究通过位移控制对空心锥形基础进行了水平加载模型试验,然而转动点及土压力还需进一步研究。

开展水平单调加载模型试验,研究砂土中空心锥形基础的水平承载力特性、转动点及土压力分布规律。采用密实砂土地基以模拟山区强风化岩地基。基于极限平衡法,提出锥形基础的脱空区面积计算公式,研究成果可为今后空心锥形基础设计提供理论指导。

## 2 模型试验

### 2.1 试验用砂与试验装置

#### 2.1.1 试验用砂

模型试验所用砂土的颗粒级配曲线如图2所示,其物理参数为:砂土重度 $\gamma_s = 16 \text{ kN/m}^3$ ,不均匀系数 $C_u = 6.17$ ,曲率系数 $C_c = 1.63$ ,平均粒径 $D_{50} = 1.2 \text{ mm}$ ,属于级配良好的中粗砂。试验用砂最大孔隙比 $e_{\max}$ 、最小孔隙比 $e_{\min}$ 分别为1.102和0.663,砂土地基初始相对密度 $D_r = 0.52$ ,为中等密实砂土。《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)<sup>[14]</sup>规定,采用压实系数 $\lambda_c$ 衡量回填土压实效果,其中 $\lambda_c = P_d / P_{d\max}$ , $P_d$ 和 $P_{d\max}$ 分别为砂土地基的初始干密度和最大干密度。规范规定,回填土地基初始持力层压实系数 $\lambda_c$ 应大于0.97。本文砂土地基干密度 $P_d$ 由初始孔隙比 $e$ 推算得出,最大干密度 $P_{d\max}$ 通过击实试验确定。经计算,试验砂土压实系数为0.974,表明砂土地基夯实效果满足要求。重复上述过程,直至1.2 m高的砂土地基填筑完成。

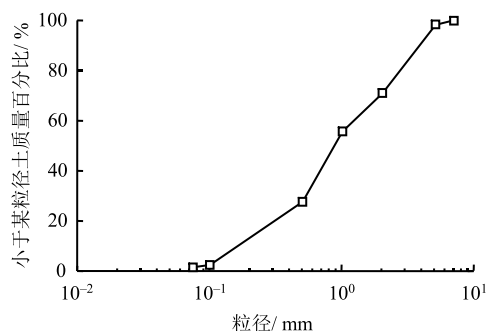


图2 颗粒级配曲线

Fig.2 Particle-size distribution curve

为了使砂土地基具有良好的试验材料相似性,对砂土地基进行处理,将砂土与凡士林、石蜡按照一定比例混合,使其强度满足相似材料要求。最终确定了满足试验要求的相似材料配比为:石蜡:凡士林:石膏=1:1:8。砂土地基详细制备过程参考文献[2]。

### 2.1.2 模型试验箱与基础模型

如图 3 所示,圆形模型试验箱采用不锈钢板焊接而成,为消除边效应影响,模型试验箱尺寸为直径 $\times$ 高=1.0 m $\times$ 1.5 m。



图 3 模型试验箱  
Fig.3 Model tests tank

图 4 分别为空心锥形基础与圆形基础模型,圆形基础直径 $D=300$  mm,高度 $H_1=60$  mm,该模型尺寸是按青岛某山区风电塔架基础 1:60 比例缩小。本文主要研究内容为空心锥形基础的水平承载特性,假定基础为刚体,模型采用钢材制作。基础模型尺寸和重量均按照原型基础进行一定比例缩小,从而使试验满足相似性原则。原型基础尺寸与基础模型尺寸之比为 $\lambda$ ,原型基础重量与基础模型重量之比为 $\gamma_m \lambda^3$ ,其中 $\gamma_m$ 为基础模型重度,表 1 为模型尺寸,锥形基础 A、B、C 自重分别为 44、46、48 N。基础中央设有加载杆固定端,可与加载杆连接,开展不同高度的加载试验。

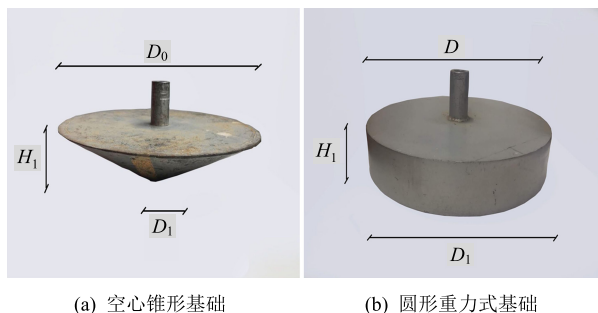


图 4 基础模型  
Fig.4 Foundation models

表 1 空心锥形基础尺寸

| 基础编号   | 顶面直径 $D_0$ | 底板直径 $D_1$ | 高度 $H_1$ |
|--------|------------|------------|----------|
|        | / mm       | / mm       | / mm     |
| 锥形基础 A | 300        | —          | 60       |
| 锥形基础 B | 300        | 50         | 60       |
| 锥形基础 C | 300        | 85         | 60       |
| 圆形基础   | 300        | 300        | 60       |

### 2.1.3 试验仪器

试验中位移采用量程为 50 mm 的 LVDT 位移传感器进行测量,其中加载点处位移使用 LVDT1 测量;沿竖向布置两只 LVDT,分别记做 LVDT2、LVDT3,以获得基础转动点的位置,另将精度为 $0.05^\circ$ 的电子水平仪安装在加载点处,记录基础水平转角的变化。本文规定与基础沿加载方向一侧为前侧,反之为基础后侧,按基础高度均匀布置(布设在埋深为 0、20、40、60 mm 处)土压力计,前后侧各布置 4 只,量程为 200 kPa,以测量加载过程中基础周围土压力变化,具体试验仪器布置如图 5 所示。

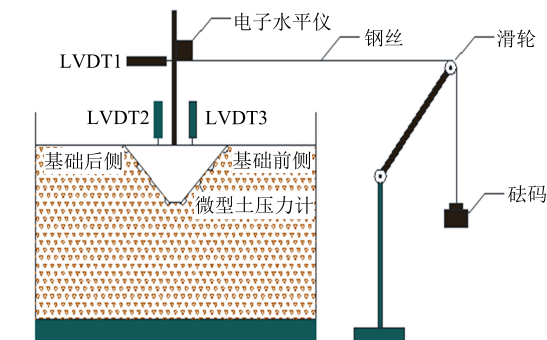


图 5 模型试验示意图  
Fig.5 Layout of transducers

### 2.2 试验方案

为使试验具有可靠性和可重复性,需严格控制试验条件,每次试验前先松动模型箱中 3 倍基础高度范围的砂土,把基础及微型土压力计埋入预设位置,将砂土回填并用夯实锤夯击周围砂土,确保每次试验具有相同密实度,夯实结束后将砂面刮平,在指定位置处架设加载装置及量测装置。

本试验对基础分别进行 4 个不同高度( $H=15、20、25、30$  cm)的加载,采用砝码逐级施加荷载,每级荷载为 3.84 N,试验前先核准并记录位移传感器及电子水平仪的数据,然后添加砝码,当一级荷载作用下 LVDT1 读数无变化或每 10 min 变化 0.01 mm 时,施加下一级荷载,当一级荷载作用下 LVDT1 读数持续增加,直至基础倾覆失稳,此时基

础所受荷载为极限承载力。每个工况的试验至少重复3次,以确保试验结果具有可重复性和可比较性。

### 3 水平承载特性分析

将试验结果进行无量纲化处理<sup>[15]</sup>,其中无量纲水平荷载表达式为 $F/(2\pi R^3 \gamma_s)$ ,式中 $F$ 为水平荷载, $R$ 为基础模型顶面半径;无量纲水平位移表达式为 $s/D_0$ , $s$ 为LVDT1所测水平位移量;水平转动点表达式为 $S/R$ ,其中 $S$ 为转动点沿加载方向到轴线的距离, $R$ 为基础模型顶面半径;竖向转动点表达式为 $h/H_1$ , $h$ 为转动点与基础顶面之间距离, $H_1$ 为基础高度。

#### 3.1 基础尺寸对水平承载力的影响

以加载高度为15 cm ( $H/D_0=0.50$ )的空心锥形基础与圆形基础水平单调加载试验为例,对比分析不同基础对水平承载性能的影响。

由图6可以看出,空心锥形基础与圆形基础荷载-位移关系曲线的变化趋势基本一致,均可分为3个阶段(弹性变形阶段、塑形变形阶段、基础失稳阶段);对于空心锥形基础,其水平承载力随底板直径增大而增大,这是因为底板直径增大,基础的自重增加,且重心沿埋深方向下移,进而基础的抗倾覆能力提高;与圆形基础相比,锥形基础A水平极限承载力低于圆形基础12.5%,锥形基础B承载力与圆形基础相同,而锥形基础C承载力高于圆形基础6.25%,具体极限承载力如表2所示。相同顶板直径和基础高度条件下,当基础底板与顶板直径之比大于0.28时,锥形基础水平承载力高于圆型基础。

图7给出了无量纲化荷载-转角关系曲线,随着荷载逐级增加,锥形与圆形基础的水平转角均沿加载方向不断增大,其中,锥形基础C水平承载力最高,圆形基础次之。相比于锥形基础,圆形基础失稳阶段前的水平转角变化更小,而进入失稳阶段后,其转角急剧增大。

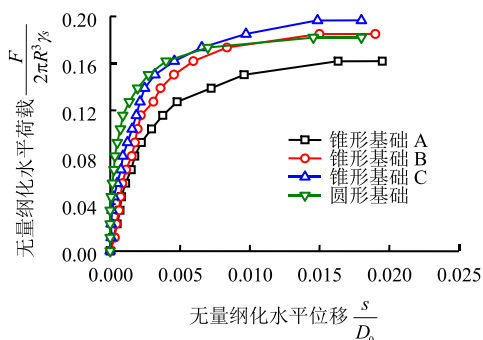


图6 无量纲化水平荷载-位移关系曲线

Fig.6 Relationships between dimensionless horizontal load and displacement

表2 无量纲化水平极限承载力  
Table 2 Ultimate horizontal bearing capacity

| 锥形基础 | 无量纲化水平极限承载力 | 增长比例 / % |
|------|-------------|----------|
| A    | 0.162       | -12.50   |
| B    | 0.185       | 0.00     |
| C    | 0.197       | 6.25     |

注: 极限承载力为无量纲化形式:  $F_U/(2\pi R^3 \gamma_s)$ , 其中  $F_U$  为极限承载力。

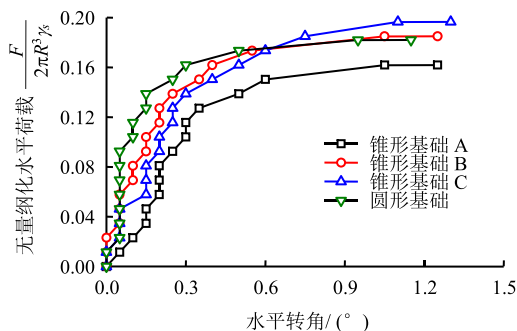


图7 水平荷载-转角关系曲线

Fig.7 Relationships between dimensionless horizontal load and angle

#### 3.2 加载高度对水平承载力的影响

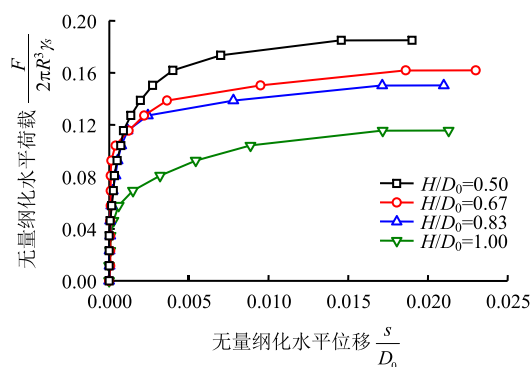
对基础分别进行4个无量纲化加载高度 $H/D_0$ 分别为0.50、0.67、0.83、1.00的水平单调加载试验,得到荷载-位移关系曲线如图8所示。随着加载高度增加,锥形与圆形基础水平承载力均出现不同程度减小,当加载高度 $H/D_0$ 由0.50增加至1.00时,圆形基础水平承载力减小了38%,锥形基础A、B、C水平承载力分别减小47%、44%、41%。这是因为随着加载高度增加,作用于基础顶面的倾覆力矩增大,从而降低了基础的水平承载力。由此可知,加载高度增加使基础更易发生倾覆失稳破坏。

不同加载高度下基础水平极限承载力如图9所示。此图直观比较了空心锥形基础与圆形基础的极限承载力,当加载高度 $H/D_0$ 从0.50增加到1.00时,圆形基础水平承载力均低于锥形基础C,而高于锥形基础A和B,以加载高度 $H/D_0=0.67$ 为例,锥形基础C水平承载力高于圆形基础6.67%,锥形基础A、B分别低于圆形基础14.28%和7.14%。

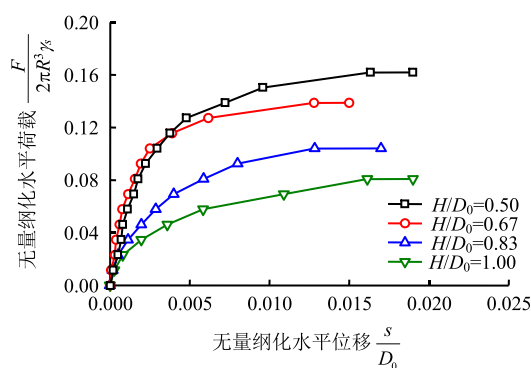
#### 3.3 转动点的分布规律

以加载高度15 cm ( $H/D_0=0.5$ )为例进行阐述。图10(a)为无量纲化水平转动点-转角变化曲线,分析可知,初始加载时,水平转角为 $0^\circ$ ,此时水平转动点位于基础中轴线附近;随着转角增加,转动点沿加载方向基础前侧移动。当转角达到 $1^\circ$ 时,转动点趋于稳定的范围,与3.1节中荷载-转角曲线对照可知,此时基础已失稳。

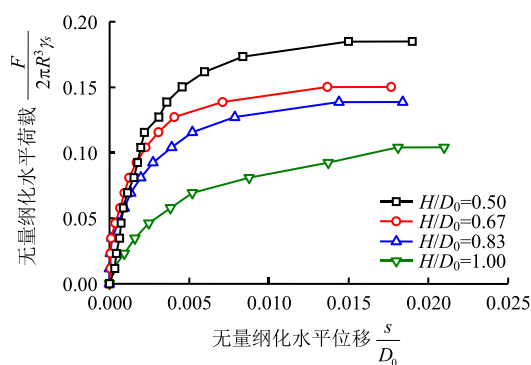
空心锥形基础与圆形无量纲化竖向转动点分布如图10(b)所示。由图分析可知,当水平转角较小



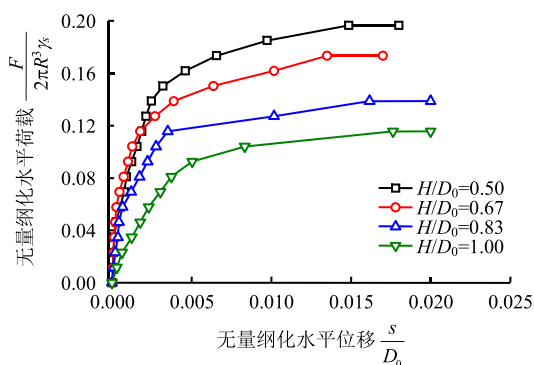
(a) 圆形基础



(b) 锥形基础 A



(c) 锥形基础 B



(d) 锥形基础 C

图 8 水平荷载-位移关系曲线

Fig.8 Relationships between horizontal load and displacement

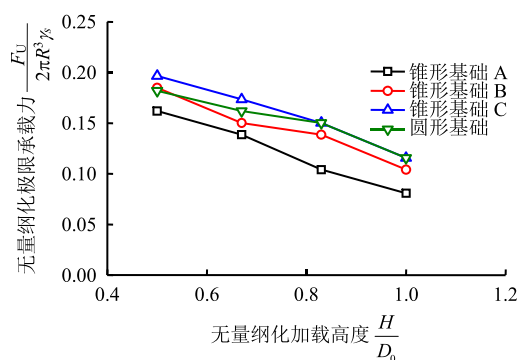
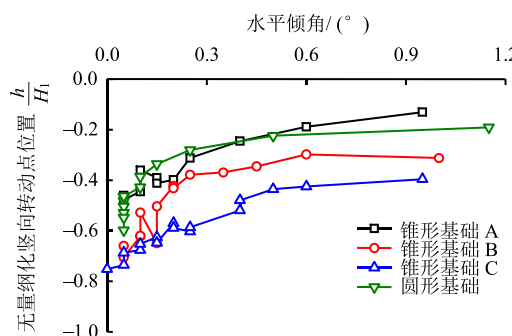
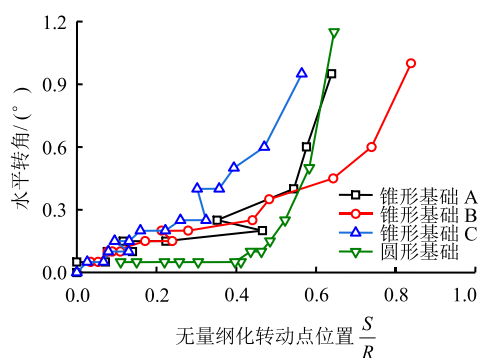


图 9 水平极限承载力-加载高度关系曲线

Fig.9 Relationships between horizontal ultimate bearing capacity and load eccentricity



(a) 竖向转动点-水平转角



(b) 水平转动点-水平转角

图 10 转动点-水平转角关系曲线

Fig.10 Relationships between rotation center position and rotation angle

时, 竖向转动点在初始位置上下移动, 随着转角增大, 竖向转动点沿埋深方向逐渐上移, 直至基础失稳前竖向转动点达到稳定, 不同基础的转动点分布虽略有不同, 但大部分集中于顶板以下 0.1~0.7 倍基础高度范围内。

## 4 土压力分布规律

### 4.1 土压力分布特性

图 11~13 为空心锥形基础各测点土压力增量随埋深变化曲线。当测点土压力增量为负时, 表明基础受主动土压力作用; 当测点土压力增量为正时,

基础受被动土压力作用。

如图 11(a)所示,随着荷载逐级增加,基础前侧土压力分布沿埋深方向减小,埋深为 0 mm 处土压力增量为正值,该测点始终位于被动土压力区,其最大增量值为 2.4 kPa;埋深为 20 mm 处土压力增量先增大后减小,基础破坏时,土压力增量为-0.17 kPa,为主动土压力;埋深为 40 和 60 mm 处土压力增量逐渐减小,当水平荷载达到 31.32 N 时,埋深为 60 mm 处土压力不再减小,说明该区域基础与土体发生脱离,脱离使基础前侧土压力重新分布,进而导致地基塑形区范围增大,加速了失稳破坏的过程。

图 11(b)所示基础后侧埋深为 0、20、40 mm 处土压力增量均为负值,因为基础受水平荷载作用发生了侧移,与地基土产生主动土压力;相反,基础后侧 60 mm 处土压力增量值较大,最高为 3.4 kPa,这是因为基础发生转动使得该区域土体受到挤压,测点位于被动土压力区。

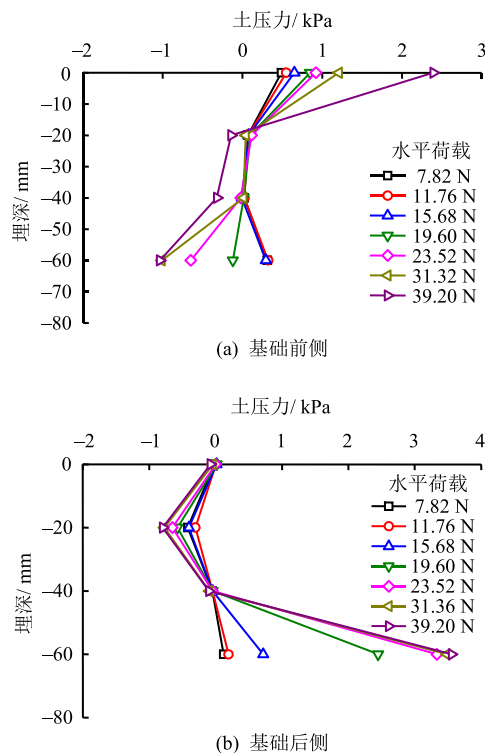


图 11 锥形基础 A 土压力增量分布  
Fig.11 Earth pressure distributions of cone foundation A

图 12 和图 13 分别对应有底板的锥形基础 B 和锥形基础 C,各测点土压力增量随埋深的变化曲线如图所示。与图 11 相比,初始受荷时,基础前侧埋深为 20、40 mm 处土压力增量变化较大,随着荷载增加,土压力增量的变化规律逐渐与锥形基础 A 相似,沿基础侧壁呈倒三角形分布,破坏时基础前侧

被动区土压力增量最大值分别为 5.7、4.7 kPa;基础后侧被动土压力增量为 1.3 和 1.4 kPa,远低于相同位置处锥形基础 A 的土压力增量(3.4 kPa),这是因为锥形基础 B、C 的底板为基础后侧分担了部分土抗力,使后侧被动土压力增量减小。

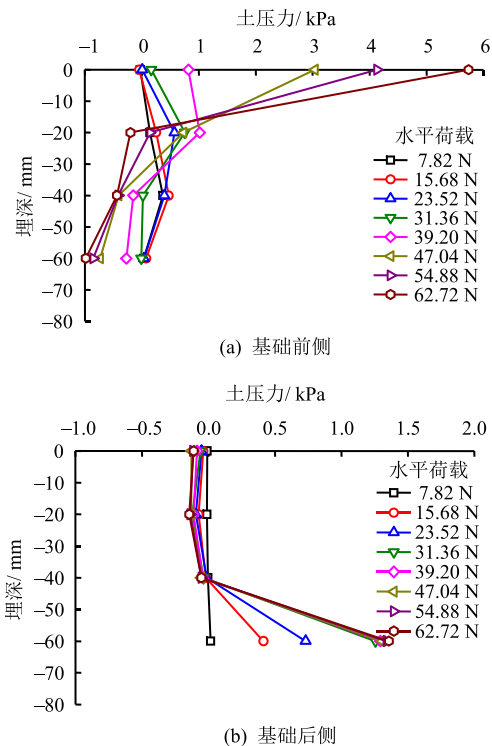


图 12 锥形基础 B 土压力增量分布  
Fig.12 Earth pressure distributions of cone foundation B

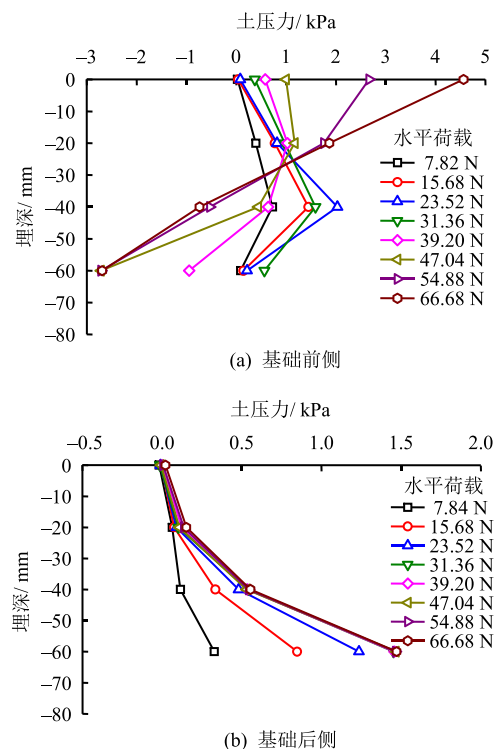


图 13 锥形基础 C 土压力增量分布  
Fig.13 Earth pressure distributions of cone foundation C

根据风电机组地基基础设计规定<sup>[16]</sup>,当基础遇极端荷载工况时,其脱离面积不允许超过基底面积 25%,本文以锥形基础前侧脱离为研究对象,测得脱离 25%时基础所受水平荷载如表 3 所示。由表可知,基础前侧脱离 25%时,所需水平承载力与基础底板直径呈正相关,说明增加底板直径有利于提高基础的稳定性。

表 3 基础的脱离面积 (25%)

Table 3 Foundation pavement area (25%)

| 锥形基础 | 水平荷载<br>/ N | 增长比例<br>/ % |
|------|-------------|-------------|
| A    | 31.36       | —           |
| B    | 47.04       | 50          |
| C    | 54.88       | 75          |

#### 4.2 脱离面积确定方法

图 14 为空心锥形基础受荷示意图。为了建立极限状态下基础的静力平衡方程,本文采用以下假定条件:

(1) 空心锥形基础沿加载方向后侧土压力值忽略不计。

(2) 在  $xoz$  平面内,  $\theta=0$  ( $\theta$  为加载方向与基础侧壁沿  $xoy$  方向夹角) 处,基础前侧脱离区以上砂土地基反力呈倒三角形分布,最大值为  $P_{\max}$ ,最小值为 0。

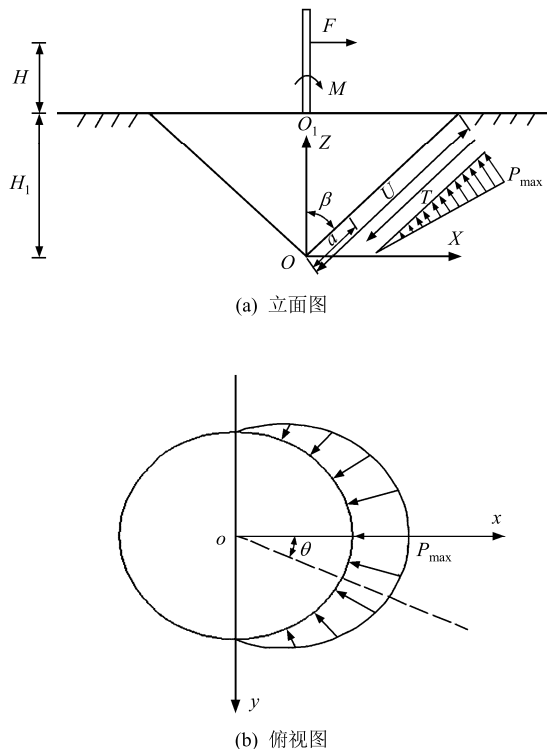


图 14 空心锥形基础受力示意图

Fig.14 Forces acting on the foundation

(3) 在  $xoy$  平面内,地基反力服从 Winkler 假定。

因此,  $xoz$  平面内,  $\theta=0$  处,基础前侧土体水平及竖向反力分别为  $\sigma_{p1}$ 、 $\sigma_{p2}$ , 计算公式为

$$\sigma_{p1} = P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \cos \beta \quad (1)$$

$$\sigma_{p2} = P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \sin \beta \quad (2)$$

式中:  $P_{\max}$  为最大地基反力;  $U$  为基础侧壁长度;  $a$  为脱离区长度;  $\beta$  为轴线与基础侧壁夹角;  $r$  为沿加载方向上基础侧壁某点至底部距离 ( $a \leq r \leq U$ )。

基础前侧摩阻力  $T$  与该处土压力成正比,方向如图 14(a)所示,则  $xoz$  平面内,当  $\theta=0$  时,摩阻力水平分力  $t_{s1}$  与竖向分力  $t_{s2}$  分别为

$$t_{s1} = f P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \sin \beta \quad (3)$$

$$t_{s2} = f P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \cos \beta \quad (4)$$

式中:  $f$  为基础与地基间摩擦系数。

在  $xoy$  平面内,地基土  $\sigma_r$  反力在基础周围水平反力  $\sigma_{r1}$  与竖向反力  $\sigma_{r2}$  呈三角函数分布,其形式为

$$\sigma_{r1} = P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \cos \beta \cos \theta \quad (5)$$

$$\sigma_{r2} = P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \sin \beta \cos \theta \quad (6)$$

摩阻力  $t_r$  在基础周围水平分力  $t_{r1}$  及竖向分力  $t_{r2}$  分别为

$$t_{r1} = f P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \sin \beta \cos \theta \quad (7)$$

$$t_{r2} = f P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \cos \beta \cos \theta \quad (8)$$

在  $xoy$  平面内,由于地基水平反力与摩阻力水平分力方向均指向空心锥形基础中心,则地基水平反力沿  $x$  轴方向分量  $\sigma_x$  为

$$\sigma_x = \sigma_r \cos \theta = P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \cos \beta \cos^2 \theta \quad (9)$$

摩阻力水平分力沿  $x$  轴方向分量  $t_x$  为

$$t_x = t_r \cos \theta = f P_{\max} \frac{r-a}{U-a} \sin \beta \cos^2 \theta \quad (10)$$

已知空心锥形基础土体抗力及摩阻力作用区域为扇形,扇形区上的任一微平面  $dA = r d\theta dr$ , 水

平外荷载  $F$  与地基反力及摩阻力水平方向分量的平衡方程为

$$F = 2P_{\max} \cos \beta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \theta \int_a^U \frac{r-a}{U-a} r dr d\theta + 2fP_{\max} \sin \beta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \theta \int_a^U \frac{r-a}{U-a} r dr d\theta \quad (11)$$

基础自重  $V$  与地基反力及摩阻力竖向分量平衡方程如下所示:

$$V = 2P_{\max} \sin \beta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \int_a^U \frac{r-a}{U-a} r dr d\theta - 2fP_{\max} \cos \beta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \int_a^U \frac{r-a}{U-a} r dr d\theta \quad (12)$$

将水平外荷载  $F$  与基础自重  $V$  分别代入式(11)、(12), 可求得  $P_{\max}$  和  $a$ , 通过  $a$  计算出基础前侧脱离面积, 进而求得脱空率。

#### 4.3 解析解验证

以锥形基础 A 为例, 基础前侧脱离 25% 时, 得到此时基础所受水平荷载  $F = 32.9$  N, 与试验误差为 4.5%, 表明解析公式可靠。

表 4 脱空率 (25%) 的计算参数

Table 4 Calculation parameters of pavement area (25%)

| $U$<br>/ m | $a$<br>/ m | $V$<br>/ N | $f$ | $\beta$<br>/ (°) |
|------------|------------|------------|-----|------------------|
| 0.162      | 0.081      | 44         | 0.4 | 68               |

## 5 结 论

本文以粗砂地基中的空心锥形基础为分析对象, 采用模型试验研究了水平单调荷载作用下基础的承载特性, 并与圆形基础进行对比分析, 总结出以下几点结论:

(1) 基础尺寸与加载高度均对空心锥形基础水平荷载影响显著, 空心锥形基础水平荷载随底板直径增加显著增大, 随加载高度增加而降低。相同顶板直径和基础高度条件下, 当基础底板与顶板直径之比大于 0.28 时, 锥形基础水平荷载高于圆型基础。

(2) 锥形与圆形基础水平转动点均沿加载方向基础前侧移动, 分布在偏离中心线 0~0.8 倍基础半径内, 竖向转动点沿埋深方向向上移动, 最终在基础失稳前趋于稳定, 大部分集中于基础顶板以下 0.1~0.7 倍基础高度内。

(3) 加载初期, 基础前侧受到被动土压力, 随着水平荷载增加被动土压力区范围逐渐减小。根据规范要求, 脱空面积不允许超过基底面积 25%。当

基础底面脱空 25% 时, 锥形基础水平承载力随底板直径增加逐渐增大。

(4) 基于极限平衡法和土压力分布规律, 建立了求解基础脱离面积的平衡方程。通过对比研究, 发现模型试验与理论计算误差为 4.5%, 表明所提出的解析解可用于空心锥形基础脱空面积的计算。

## 参 考 文 献

- [1] 李大勇, 翟汉波, 张雨坤, 等. 钢筋混凝土空心锥体山区风电柔性基础及其施工方法[P]. 中国, 201410654756.8. 2015-12-09.  
LI Da-yong, ZHAI Han-bo, ZHANG Yu-kun, et al. Cone-shaped hollow flexible reinforced concrete foundation and construction method[P]. China, 201410654756.8. 2015-12-09.
- [2] 李珊珊. 山区风电钢筋混凝土空心锥形柔性基础承载特性[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.  
LI Shan-shan. Bearing behavior of cone-shaped hollow flexible reinforced concrete foundation for mountain wind turbines[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [3] WAKILE A Z E. Horizontal capacity of skirted circular shallow footings on sand[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2010, 49(4): 379-385.
- [4] GOVONI L, GOTTARDI G, GOURVENEC S. Centrifuge modelling of circular shallow foundations on sand[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2010, 10(2): 35-46.
- [5] WU K, FAN Q L. Study on bearing capacity of bucket foundation subjected to horizontal loading[J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 73(1): 511-515.
- [6] 肖忠, 葛博睿, 王元战, 等. 十字形内隔板对桶形基础各单向承载力和破坏模式的影响分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3136-3144.  
XIAO Zhong, GE Bo-rui, WANG Zhan-yuan, et al. Influence of cruciform inner clapboards on uniaxial bearing capacity and failure mode of bucket foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3136-3144.
- [7] 李大勇, 冯凌云, 张雨坤, 等. 饱和细砂中裙式吸力基础水平单调加载模型试验——承载力及变形分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2030-2037.

- LI Da-yong, FENG Ling-yun, ZHANG Yu-kun, et al. Model tests on horizontal bearing capacity and deformation of skirted suction caissons in saturated fine sand under horizontal monotonic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(11): 2030-2037.
- [8] 许建朋, 陈旭光, 姜育科. 吸力式桶型基础水平静力加载试验承载特性与稳定性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(3): 61-65.
- XU Jian-peng, CHEN Xu-guang, JIANG Yu-ke. Analysis of bearing capacity and stability of horizontal static loading model for suction bucket foundation[J]. **Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)**, 2018, 40(3): 61-65.
- [9] 李大勇, 郭彦雪, 高玉峰, 等. 水平单调荷载作用下饱和细砂中裙式吸力基础土压力特性分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 112-119.
- LI Da-yong, GUO Yan-xue, GAO Yu-feng, et al. Earth pressure distribution of skirted suction caissons embeded in saturated fine sand under monotonic horizontal loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(1): 112-119.
- [10] 高乾丰. 山区大型水平轴风力机地基基础风致动力响应研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- GAO Qian-feng. Wind induced dynamic response of large horizontal axis wind turbine foundation in mountainous area[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [11] 刘梅梅, 杨敏, 王海军. 陆上风力机圆形扩展基础基底反力及冲切特性研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(5): 1130-1135.
- LIU Mei-mei, YANG Min, WANG Hai-jun. Study on subgrade reaction and punching of circular spread foundation for onshore wind turbines[J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**, 2015, 36(5): 1130-1135.
- [12] 金书成, 张永涛, 杨炎华, 等. 饱和砂土地基中吸力式桶形基础水平承载力研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 221-227.
- JIN Shu-cheng, ZHANG Yong-tao, YANG Yan-hua, et al. Research on horizontal ultimate bearing capacity of suction bucket foundation in saturated sand ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Suppl. 1): 221-227.
- [13] 刘金龙, 陈陆望, 王吉利, 等. 海上风机分段斜壁桶形基础的水平承载力计算方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2750-2758.
- LIU Jin-long, CHEN Lu-wang, WANG Ji-li, et al. Method for calculating the horizontal bearing capacity of segmentally-tapered bucket foundation of offshore wind turbines[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2750-2758.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. GB/T 500007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [15] ZHANG Y K, LI D Y, GAO Y F. Earth pressures on modified suction caisson in saturated sand under monotonic lateral loading[J]. **Journal of Renewable and Stainable Energy**, 2016, 8(5): 053312-1-16.
- [16] 水电水利规划设计总院. FD003—2007 风电机组地基基础设计规范试行[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- China Renewable Energy Engineering Institute. FD003—2007 Design regulations on subgrade and foundation for wind turbine generator system[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.