

# 复合加载模式下海上风机桩基础破坏机制研究

王俊岭 闫澍旺 霍知亮

(天津大学建筑工程学院 天津市 300072)

**提 要** 利用有限元数值分析软件对复合加载模式下海上风机桩基础破坏机制进行了详细地研究,确定了竖向荷载  $V$ 、水平荷载  $H$  和力矩荷载  $M$  共同作用下桩基础的破坏模式及在荷载空间( $V-H-M$ )中的破坏包络面。采用固定位移比加载方法对桩基础在  $V-H$ 、 $V-M$ 、 $H-M$  荷载平面内的破坏模式分别进行了三维有限元分析研究,分析得到海上风机桩基础在不同荷载分量组合条件下的失稳破坏机制和  $V-H-M$  荷载空间内的破坏包络面。由此可根据破坏包络面与实际桩基受力状态之间的相对关系,评价实际荷载状态下海上风力发电机桩基础的稳定性。

**关键词** 海上风力发电机 桩基础 破坏模式 破坏包络面 复合加载

## Study of Failure Patterns of Monopile Foundation for Offshore Wind Turbines under Combined Loading

Wang Junling Yan Shuwang Huo Zhiliang

(School of Civil Engineering, Tianjin University)

**Abstract** The failure patterns of monopile foundation for offshore wind turbines under combined loading are studied by virtue of finite element numerical simulation software in detail, and the failure envelopes and failure mechanisms of monopile foundation under combined loading in the design of offshore wind turbines which are usually subjected to vertical load  $V$ , horizontal load  $H$  and moment component  $M$  simultaneously. Based on fixed displacement ratio loading method, three dimensional finite element numerical analyses are conducted to explore the failure mechanisms of monopile in different loading planes, such as  $V-H$ ,  $V-M$ ,  $H-M$ . The failure patterns of monopile foundation for offshore wind turbines under various combinations of load components and the failure envelopes in different loading spaces are obtained. According to the relationship between the computed failure envelopes and the actual combined loading, the stability of monopile foundation for offshore wind turbines could be evaluated.

**Keywords** offshore wind turbine; monopile foundation; failure mechanism; failure envelope; combined loading

## 1 引言

与陆上风电场相比,海上风电场具有节省土地资源、风速高而且持续,没有复杂地形对于气流的影响,对周围环境影响小等优点,因此是当前国际风电发展的一个重要方向<sup>[1]</sup>。在水利、港口、海岸和近海工程中,建筑物和地基除了承受巨大的竖向自重荷载长期作用之外,往往还会遭受暴风、波浪、水流

等引起的水平荷载以及力矩的共同作用。以上荷载通过基础传到地基上,导致地基土体同时受到水平荷载、竖向荷载和力矩荷载共同作用的受力模式,称为复合加载模式<sup>[2]</sup>。在水平荷载  $H$ 、竖向荷载  $V$  和力矩荷载  $M$  的共同作用下,地基土体达到整体破坏标准时各个荷载分量的组合在三维荷载空间( $V-H-M$ )中将形成一个外凸的曲面,称为地基的破坏包络面,可依此对实际荷载条件下地基的稳定性进行评价<sup>[3]</sup>。作用在海上风机桩基础上的荷载和位移如图 1 所示。

作者简介:王俊岭(1986-),男,硕士研究生,岩土工程专业。

收稿日期:2012-09-18

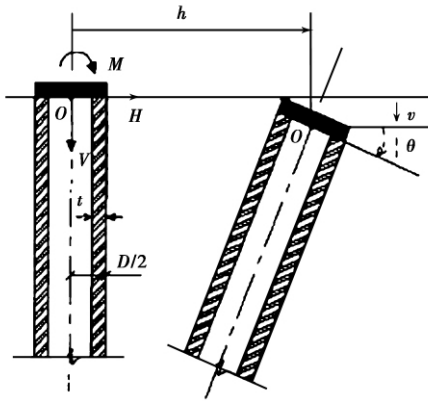


图1 作用在海上风机桩基础上的荷载和位移

海上风机桩基础占用海床面积最小,具有承载力高,沉降量小且均匀等特点,它承受竖向和水平向荷载以及风机振动等动力作用的能力强,适用的工程地质范围较广,在海上风机工程中应用较多<sup>[4]</sup>。国内外学者 Murff<sup>[5]</sup>、Bransby 和 Randolph<sup>[6]</sup>、Gourvenec 和 Randolph<sup>[7]</sup>、张其一等<sup>[8]</sup> 对其进行了大量数值研究。本文基于大型有限元软件 ABAQUS,采用基于 Mohr - Coulomb 屈服准则的理想弹塑性本构模型,对于软土地基上海上风机基础在竖向荷载  $V$ 、水平荷载  $H$ 、力矩荷载  $M$  构成的荷载空间内的海上风机桩基破坏模式和破坏包络面特性进行了数值模拟,得到了  $V-H-M$  荷载空间内的破坏包络面。

### 2 有限元数值模型

海上风机单桩桩径 6.0m,壁厚 0.06m,埋入土内桩长 60m。桩体材料为钢材,其材料强度远高于土体的强度,因此采用线弹性本构模型,弹性常数分别取  $E = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ ,  $\nu = 0.3$ 。模型如图 2 所示:桩周围土体为多层土,土体采用基于 Mohr - Coulomb 屈服准则的理想弹塑性本构模型;桩体及土体均采用 8 节点缩减积分单元 (C3D8R) 模拟,土层计算厚度 100m,模型径向范围取 20 倍桩径 = 120m,这样的区域基本上可以消除边界效应对计算结果的影响。采用了对称的一半结构进行模拟分析,在有限元模型的底面边界上约束三个方向的自由度,在周围面边界上约束  $x、y$  方向上的自由度。桩与土体之间的摩擦接触形式采用“硬”接触,其相对滑动关系为小滑动,在桩体与土体之间的摩擦模型选用的是库仑摩擦模型,土体与桩体间的摩擦行为用摩擦系数来描述,取摩擦系数为 0.3。

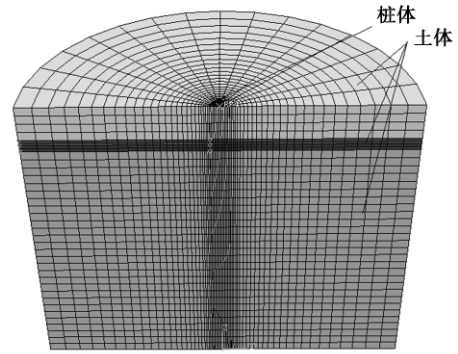


图2 海上风机单桩基础有限元模型

### 3 复合加载方法

为了求解复合加载模式下地基破坏包络曲线,通常有限元数值计算是通过荷载控制方法或位移控制方法进行加载。为了能得到更加准确的包络面轨迹,Supachawarote 等<sup>[9]</sup> 建议采用固定位移比分析法,采用常位移比加载模式对基础进行加载时,需要在基础中心上同时施加  $i$  方向和  $j$  方向的位移  $u_i$  和  $u_j$ ,且在有限元计算过程中始终保持  $du_i/du_j$  为常量,此时加载路径收敛于包络面上的某点。通过多次固定位移比加载试验,可以得到包络面上的一系列点,从而来构造桩基的地基承载力破坏包络面<sup>[10]</sup>。加载模式如图 3 所示。

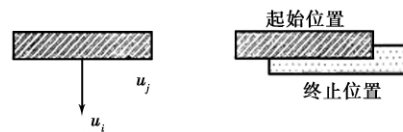


图3 固定位移比加载方法

### 4 桩基破坏机制研究

#### 4.1 V-H 荷载空间

利用建立的有限元模型进行计算,从而确定  $V-H$  荷载空间作用下海上风机单桩基础的破坏模式。图 4 给出了在  $V-H$  荷载空间作用下海上风机单桩基础的合位移矢量图,由图 4 可知单桩基础在  $V-H$  荷载空间作用下,桩体发生旋转,主动区桩身与土体发生分离,产生裂缝,在一定深度范围内,土体向桩体方向产生斜向下的位移;而超过这个范围,土体则向远离桩体方向产生斜向下的位移。被动区土体受到挤压,在一定深度范围内,土体向远离桩体方向产生斜向下的位移。桩体下端周围土体向远离桩体的方向发展,且从桩身向四周方向发展不断减小。

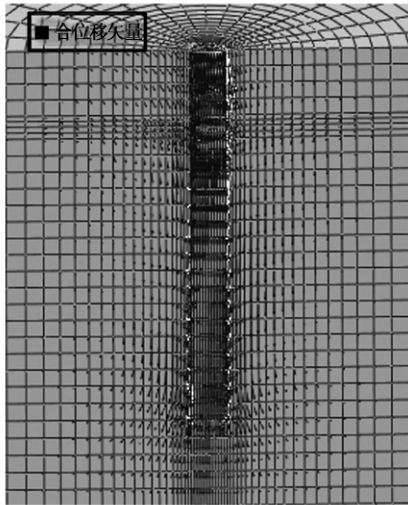


图 4 V-H 荷载空间作用下桩土合位移矢量

取两个方向的位移增量之比分别为  $\delta v/\delta h = 1, 2.5, 10$  等 4 种情况, 从而得到包络面上的若干控制点, 以确定在  $V-H$  荷载空间上海上风机单桩基础的破坏包络面, 见图 5。

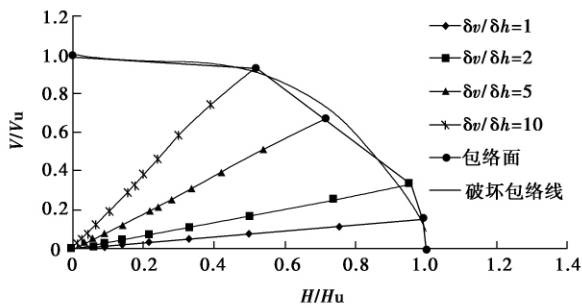


图 5 V-H 荷载空间中的破坏包络线

### 4.2 V-M 荷载空间

图 6 给出了在  $V-M$  荷载空间作用下海上风机单桩基础的合位移矢量图, 由图可知单桩基础在  $V-M$  荷载空间作用下, 桩体发生旋转, 主动区桩身与土体发生分离, 产生裂缝, 在一定深度范围内, 土体向桩体方向产生斜向下的位移, 超过这个深度, 土体则向远离桩体方向产生斜向下的位移; 被动区土体受到挤压, 在一定深度范围内, 土体向远离桩体方向产生斜向下的位移, 超过这个深度, 土体则向桩体方向产生斜向下的位移。土体运动像是绕着某一点发生旋转运动, 产生绕那点的整体位移。在没有竖向荷载分量时, 被动区土体在一定的范围内产生了远离桩体的斜向上的位移运动, 在施加竖向荷载分量之后, 被动区的土体则发生变化, 产生了远离桩体

的斜向下的位移运动。桩体下端周围土体向远离桩体的方向发展, 且从桩身向四周方向发展不断减小。

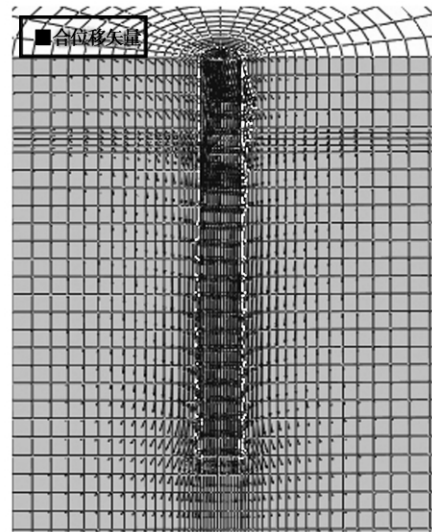


图 6 V-M 荷载空间作用下桩土合位移矢量

取两个方向的位移增量之比分别为  $\delta v/\delta D\theta = 0.5, 1, 2.5, 10$  等 5 种情况, 从而得到包络面上的若干控制点, 以确定在  $V-M$  荷载空间上海上风机单桩基础的破坏包络面, 见图 7。

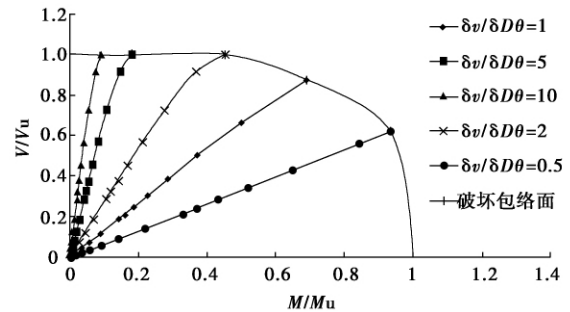


图 7 V-M 荷载空间中的破坏包络线

### 4.3 H-M 荷载空间

图 8 给出了在  $H-M$  荷载空间作用下海上风机单桩基础的合位移矢量, 由图可知单桩基础在  $H-M$  荷载空间作用下, 主动区桩身与土体发生分离, 产生裂缝, 在桩上部一定深度范围内, 土体向桩体方向产生斜向下的位移; 被动区土体受到挤压, 在桩体上部一定深度范围内, 土体向远离桩体方向产生斜向上的位移, 超过这个深度, 土体则向远离桩体方向产生斜向下的位移。桩体周围土体位移向四周发展趋势不断减小, 在桩体中部以下的深度范围内基本可以不考虑土体位移的变化。

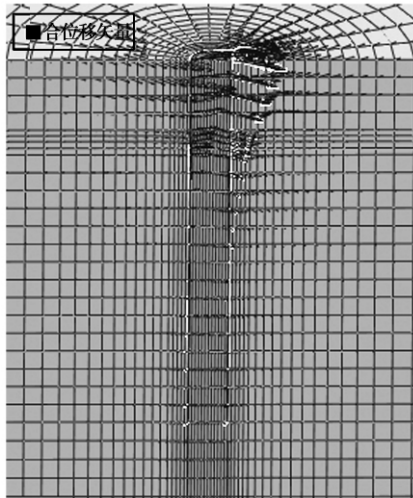


图8  $H-M$  荷载空间作用下桩土合位移矢量

取两个方向的位移增量之比分别为  $\delta h/\delta D\theta = -0.15, -0.1, -0.05, -0.025, 0.05, 0.1, 0.15$  等7种情况,从而得到包络面上的若干控制点,以确定在  $H-M$  荷载空间上海上风机单桩基础的破坏包络面。

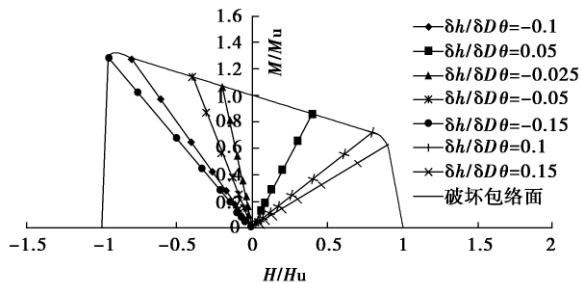


图9  $H-M$  荷载空间中的破坏包络线

## 5 结论

利用有限元分析软件对海上风机桩基础进行模拟分析,对复合加载下桩基的破坏模式进行了分析和研究,得出如下结论:

1) 通过对不同荷载分量组合下桩基的三维有限元分析研究,得到了桩基础在  $V-H$ 、 $V-M$ 、 $H-M$

荷载平面内的破坏模式,分析了其失稳破坏机制。

2) 利用固定位移比加载方法得到了海上风机桩基础在  $V-H$ 、 $V-M$ 、 $H-M$  荷载组合平面内的破坏包络线,与可能承受的荷载组合点的相对位置进行对比分析,可以判断桩基础地基是否处于失稳破坏状态。

## 参考文献

- [1] 姚兴佳,隋红霞,刘颖明,等. 海上风电技术的发展与现状. 上海电力, 2007, (2): 111~118
- [2] 栾茂田,金崇磐,林皋. 非均质地基上浅基础的极限承载力. 岩土工程学报, 1988, 10(4): 14~27
- [3] 栾茂田,赵少飞,袁凡凡,等. 复合加载模式作用下地基承载性能数值分析. 海洋工程, 2006, 24(1): 34~40
- [4] 黄维平,尚景宏,王建丰. 国外海上风力发电机组基础结构现状. 见: 中国可再生能源学会海洋能专业委员会成立大会暨第一届学术讨论会论文集. 2008: 51~58
- [5] Murff J D. Limit analysis of multi-footing foundation systems//Siriwardane H J, Zaman M M. Proceedings of the 8th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam: Balkema, 1994: 233~244
- [6] Bransby M F, Randolph M F. Combined loading of skirted foundation. Geotechnique, 1998, 48(5): 637~655
- [7] Gourvenec S, Randolph M. Effect of strength non-homogeneity on the shape of failure envelopes combined loading of strip and circular foundations on clay. Geotechnique, 2003, 53(6): 575~586
- [8] Zhang Qiyi, Luan Maotian, Wang Zhongtao. Study on failure mechanism and bearing capacity of three-dimensional rectangular footing subjected to combined loading. China Ocean Engineering, 2008, 22(2): 313~330
- [9] Supachawarote C, Randolph M F, Gourvenec S. Inclined pull-out capacity of suction caissons. Proceedings of 14th ISOPE. Toulon, France, 2004
- [10] 范庆来,栾茂田.  $V-H-T$  荷载空间内海上风机桶形基础破坏包络面特性分析. 土木工程学报, 2010, 43(4): 113~118