

文章编号: 1000-4750(2014)Suppl-0036-05

风力发电机岩石锚杆基础静力弹塑性分析与应力状态监测

阎 石¹, 宋壁丞¹, 孙 威¹, 阎 寒², 于琦乐¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168; 2. 辽宁电力勘测设计院, 沈阳 110179)

摘 要: 采用大型通用有限元分析软件 ABAQUS, 对国电铁岭开发区风电场新建工程风机岩石锚杆基础进行有限元 Pushover 分析。探讨了其受力特性, 与传统重力式基础的应力状态进行对比, 同时与安装在其上的压电式结构健康监测系统的监测数据进行比对。结果表明: 这种新型的基础与传统的基础相比较有很大的优势, 完全可以替代传统的重力式基础; 另外, 结构健康监测系统运转正常, 基础工作状态良好。

关键词: 风力发电机岩石锚杆基础; 弹塑性有限元分析; Pushover 分析; 结构健康监测系统; 压电智能骨料

中图分类号: TU470 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.S013

PUSHOVER ANALYSIS ON ROCK ANCHOR FOUNDATION FOR WIND TURBO-GENERATOR AND STRESS STATE MONITORING

YAN Shi¹, SONG Bi-cheng¹, SUN Wei¹, YAN Han², YU Qi-le¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. Liaoning Electric Power Survey & Design Institute, Shenyang 110179, China)

Abstract: The finite element pushover analysis on a rock anchor foundation of a wind turbo-generator located at Guo Dian Tie Ling development zone is numerically performed by using ABAQUS of a large general-purpose software. The mechanics characteristics of the rock anchor foundation are discussed and the stress states are compared with a traditional gravity foundation, meanwhile, the numerical results are compared with the received data from the PZT-based structural health monitoring system installed in the foundation. The results show that the new-type foundation has greater advantages than those of a traditional one and it may completely replace the traditional gravity foundation in the future. Furthermore, the structural health monitoring system is operating well and the foundation works in a good condition.

Key words: rock anchor foundation of wind turbo-generator; elastic-plastic finite element analysis; Pushover analysis; structural health monitoring; piezoelectric smart aggregates

风能是一种绿色、可再生能源, 具有广阔的发展潜力。然而, 目前风力发电机基础通常为重力式, 型式过于单一^[1-2]。根据相关学者的研究, 由于受“基础底面均应处于受压状态”条件制约, 基础底

面尺寸往往较大, 导致基础抗压能力有余、抗弯效率不高、开挖量大、开挖难度大等缺点^[3-4]。国电铁岭开发区风电场新建工程首次将扩底岩石锚杆基础应用到风机基础上, 不仅大幅减小了风机基础

收稿日期: 2013-03-29; 修改日期: 2013-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278313); 辽宁省自然科学基金项目(201202180); 辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2012214); 辽宁电力勘测设计院2012年科研项目(Q421S)

通讯作者: 阎 石(1962—), 男, 辽宁人, 教授, 工学硕士, 博导, 主要从事结构健康监测研究(E-mail: syan1962@163.com)。

作者简介: 宋壁丞(1988—), 男, 辽宁人, 硕士生, 主要从事结构健康监测研究(E-mail: songbicheng@sina.com);

孙 威(1979—), 男, 辽宁人, 讲师, 博士, 主要从事结构健康监测研究(E-mail: lgl_315@126.com);

阎 寒(1956—), 男, 辽宁人, 高级工程师, 工学学士, 主要从事沿途稳定分析研究(E-mail: yanhan@lepd.com.cn);

于琦乐(1989—), 男, 湖南人, 工学硕士, 主要从事结构健康检测研究(E-mail: 249577342@qq.com)。

的尺寸, 而且提高了其抗倾覆能力。本文采用 ABAQUS 软件建立风机基础三维模型, 考虑“基础环”与混凝土之间和基础与地基之间的非线性接触, 对这种新型风机锚杆基础进行静力弹塑性分析; 通过安装的压电式健康监测系统对基础的受力状态进行监测, 并将监测数据与有限元分析结果进行对比。

1 工程概况与结构健康监测系统

国电铁岭开发区风电场新建工程拥有 33 台 1.5MW 风力发电机组, 其中部分采用岩石锚杆钢筋混凝土基础。基础直径为 9.6m, 锚杆的主体钢材为 6.8 级, 规格为 M60, 风机基础结构的基本尺寸如图 1 所示。设计时采用了径向、环向配筋的方式, 中心处设置“基础环”, 用于与主体塔筒的连接。

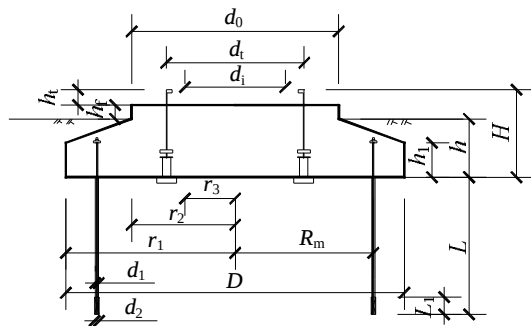


图 1 岩石锚杆风机基础剖面图

Fig.1 The cross-sectional view of the rock anchor RC foundation

有关健康监测技术, 相关研究已经很成熟^[5-6]。在基础施工时, 安装了压电式传感器监测系统, 用于监测混凝土的应力状态。传感器水平方向沿圆周均匀布置, 分内外两层, 同时在主风向进行加密布置; 竖向分两层布置, 高度分别为-1.6m 和-0.8m, 传感器现场布置如图 2 所示。

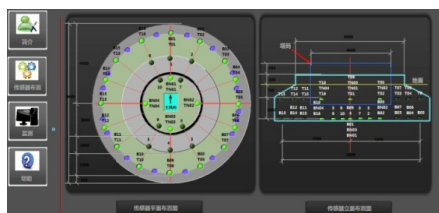


图 2 压电传感器布置图

Fig.2 Arrangement of the PZT sensors

2 弹塑性有限元分析

2.1 有限元模型的建立

风力发电机岩石锚杆基础整体有限元模型如图 3 所示, 其中混凝土基础部分如图 4 所示。经过

试算, 地基模型在深度方向取 2 倍基础直径深度, 径向取 1 倍基础直径宽度可以很好的对基础进行模拟分析; 主要材料参数如表 1 所示。混凝土选用损伤塑性模型。为了更好地模拟“基础环”与混凝土及钢筋混凝土基础与垫层间可能的脱开、滑动等情况, 在这些特殊部位分别设置摩擦接触^[7]。

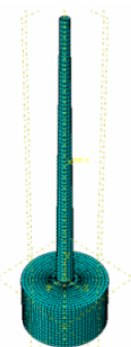


图 3 岩石锚杆风机基础有限元模型

Fig.3 The FEA model of rock anchor RC foundation

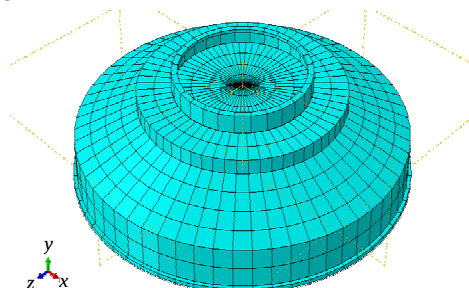


图 4 钢筋混凝土基础有限元模型

Fig.4 The RC foundation with steel stub in detail

国内相关风机基础的分析方法有很多^[8], 但是采用 Pushover 方法进行锚杆基础的很少。采取极端荷载进行设计法, 地基基础受力有水平合力 F_{rk} 、水平合力矩 M_{rk} 。选取极限荷载^[9-10]下逐渐加大弯矩直至基础破坏。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
钢筋和基础环	200	0.3	7800
混凝土 C35	31.5	0.167	2500
岩石地基	80	0.25	300

3 结果分析

3.1 位移分析

对风机基础加至 15 倍设计荷载作用下, 发生较大的竖向位移。位移最大处发生在“基础环”受拉侧下方, 其原因是“基础环”在弯矩作用下受拉侧向上移动, 带动基础混凝土向上位移, 最大位移为 2cm, 如图 5 所示。基础底面沿直径方向位移如

图 6 所示,在弯矩作用下,“基础环”的位移也很大,为 2.85cm。

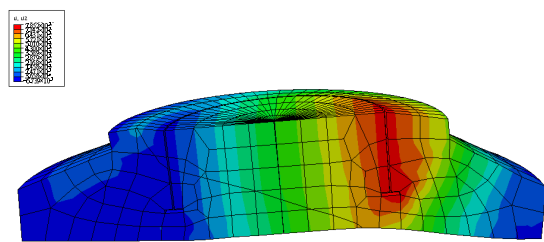


图 5 基础混凝土位移云图

Fig.5 The vertical displacement contours of the RC foundation

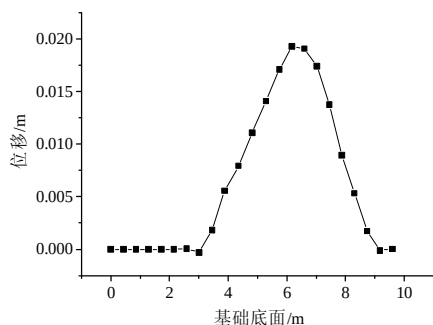


图 6 基础底面沿直径方向位移分布图

Fig.6 The displacement distribution of the RC foundation's bottom surface in the diameter direction

3.2 应力状态分析

经 Pushover 分析,混凝土大范围进入塑性状态。基础的塑性应变云图如图 7 所示。基础塑性应变较大的区域有三处,一处是“基础环”受压上侧的混凝土,另一处是“基础环”受压下侧的混凝土,塑性应变最大的区域为“基础环”受拉下侧的混凝土。提取这三处的混凝土的应力应变曲线,如图 8~图 10 所示,基础已经通过极限应变进入破坏状态。

经过 Pushover 分析,基础是由于“基础环”受拉下侧混凝土被拉坏,“基础环”受压下侧混凝土以及“基础环”受压上侧混凝土被压坏导致基础混凝土产生较大的竖向位移而倾覆。在这一个过程中锚杆的平均拉应力为 9.8MPa,说明锚杆在基础中发挥了作用且工作状态良好。

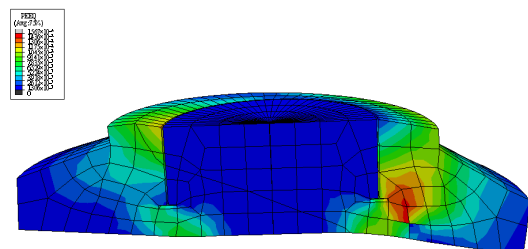


图 7 基础混凝土的塑性应变云图

Fig.7 The plastic strain contours of the RC foundation

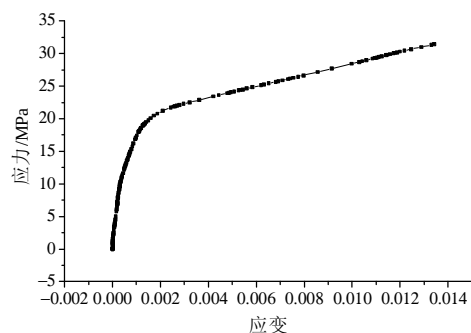


图 8 “基础环”受压上侧混凝土应力-应变曲线

Fig.8 The stress-strain curve at the compressive region on the upper side of the foundation steel stub

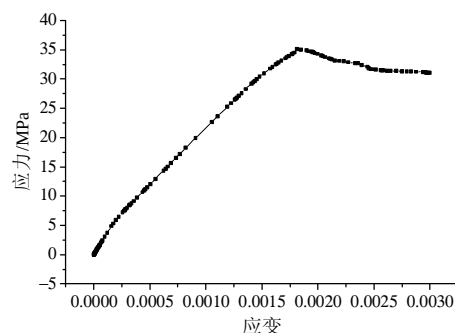


图 9 “基础环”受压下侧混凝土应力-应变曲线

Fig.9 The stress-strain curve at the compressive region on the underside of the foundation steel stub

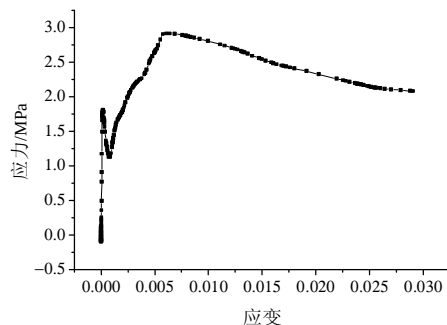


图 10 “基础环”受拉下侧混凝土应力-应变曲线

Fig.10 The stress-strain curve at the tension region on the underside of the foundation steel stub

3.3 与无锚杆的风机基础进行对比

重新建立一个相同尺寸无锚杆的风机基础模型,并进行 Pushover 分析。加载之后,在 10 倍的设计荷载下基础已经进入塑性状态,竖向位移为 4.5cm,远大于有锚杆的基础。在“基础环”受拉下侧的混凝土塑性应变非常大,属于在“基础环”受拉侧混凝土破坏,产生较大的竖向位移导致基础倾覆。可见有锚杆的基础是非常有优越性的。

3.4 与结构应力状态监测数据的比对

图 11~图 14 为风机基础部分测点的实测应力与正常运行载荷工况下数值计算结果对比。可以看

出, 实测结果记录了风机基础内部不同位置应力, 并与数值模拟变化规律一致, 由于现场荷载相对于数值计算所加荷载的多变性, 二者数值上存在一定的差异。基础内部混凝土拉压应力以及基础环的应力均小于其强度设计值和理论计算值, 说明目前风机基础设计是偏于保守的。

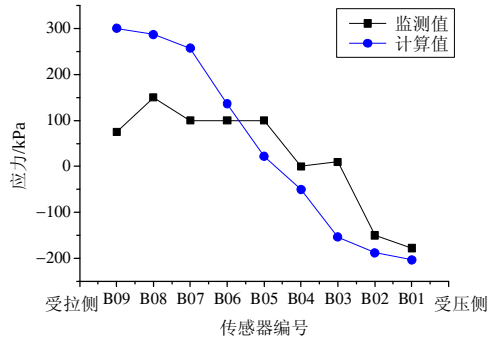


图 11 基础外缘底部实测应力与计算应力对比

Fig.11 Comparison of the foundation's stress with the numerical results and the received data on the outer edge of the bottom

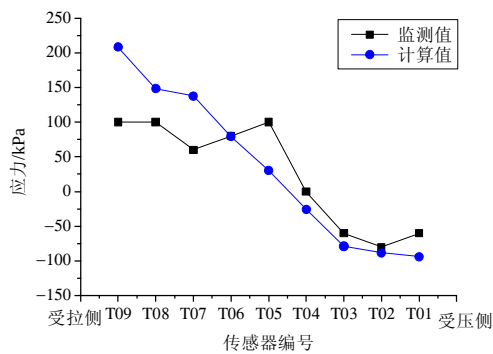


图 12 基础外缘上部实测应力与计算应力对比

Fig.12 Comparison of the foundation's stress with the numerical results and the received data on the outer edge of the upper part

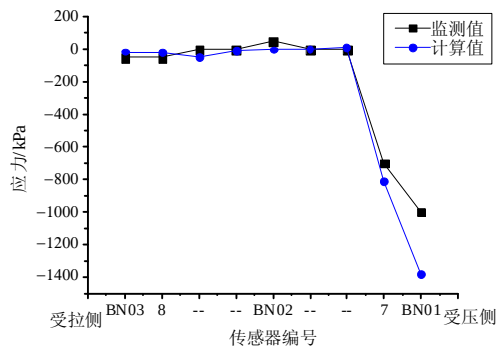


图 13 基础环内侧底部实测应力与计算应力对比

Fig.13 Comparison of the foundation steel stub's stress with the numerical results and the received data on the inside of the bottom

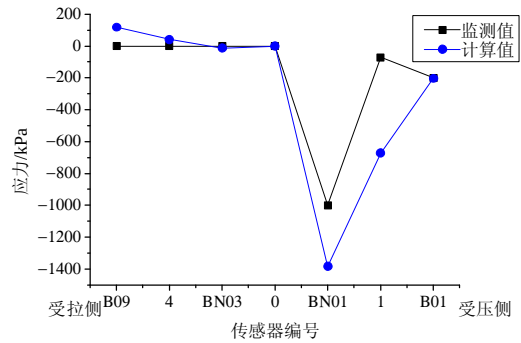


图 14 基础主风向中轴线实测应力与计算应力对比

Fig.14 Comparison of the foundation's stress with the numerical results and the received data at the central axis of main wind direction

4 结论

(1) 在单调增加的静力荷载作用下, 基础混凝土在“基础环”受拉下侧、受压下侧以及“基础环”受压上侧产生较大的应力集中, 最后由于基础竖向位移较大导致基础倾覆, 建议在设计时对“基础环”上下翼缘附近需要进行特别关注。

(2) 正常运行时, 在复杂受力作用下, 基础大部分仍处于受压状态, 说明新型的岩石锚杆基础虽然在尺寸上较传统的基础缩小一半, 但在岩石锚杆的作用下, 使得基础内部的应力发生重分布, 其各项指标均满足规范的设计要求。

参考文献:

- [1] 李静, 孙亚盛. 海上风力发电机组的基础形式[J]. 上海电力, 2008(3): 314—317.
Li Jing, Sun Yasheng The form of wind turbine foundation at sea [J]. Journal of Shanghai Electric Power, 2008(3): 314—317. (in Chinese)
- [2] 刑作霞, 陈雷. 海上风力发电机组基础的选择[J]. 能源工程, 2005(6): 34—37.
Xing Zuoxia, Chen Lei. Selection of offshore wind turbine foundation [J]. Journal of Energy Engineering, 2005(6): 34—37. (in Chinese)
- [3] 叶必炎, 李有生. 岩土锚杆基础受力性能与承载力的分析[J]. 东北电力学院学报, 1997, 17(3): 73—77.
Ye Biyan, Li Yousheng. Analysis of force property and bearing capacity of rock- soil anchor's foundation [J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1997, 17(3): 73—77. (in Chinese)
- [4] 陆萍, 黄珊秋. 风力机筒形塔架结构静动态特性的有限元分析[J]. 太阳能学报, 1997, 18(4): 359—364.
Lu Ping, Huang Shanqiu. The finite element analysis on static and dynamic characteristic of the conical tube tower structure for the wind turbine [J]. Journal of ACTA Energiae Solaris Sinica, 1997, 18(4), 359—364. (in Chinese)

- Chinese)
- [5] Pines D, Aktan A E. Status of structural health monitor of long-span bridges in the united states [J]. Journal of Progress Structure Engineering and Materials, 2002(4): 372—380.
- [6] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, et al. Structural control: past, present, and future [J]. Journal of ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9): 897—971.
- [7] 武科, 马明月. 扭剪荷载作用下桶形基础与土相互作用机理模型试验[J]. 江苏大学学报, 2013, 34(1): 86—90.
Wu Ke, Ma Mingyue. Mechanism model test of interaction between bucket foundation and soil subjected to torsional resistance [J]. Journal of Jiangsu University, 2013, 34(1): 86—90. (in Chinese)
- [8] 武帅, 杨华. 李子箐风电场风机基础三维有限元分析[J]. 云南水力发电, 2011, 27(2): 1—3.
Wu Shuai, Yang Hua. The three-dimensional finite element analysis of the foundation for wind turbo-generator units of Liziqing wind farm [J]. Journal of Yunnan Water Power, 2011, 27(2): 1—3. (in Chinese)
- [9] FD 003-2007, 风电场机组地基基础设计规定[S]. 2007. FD 003-2007, Design regulations on subgrade and foundation for wind turbine generator system [S]. 2007. (in Chinese)
- [10] 楼文娟, 孙炳楠. 风与结构的耦合作用及风振响应分析[J]. 工程力学, 2000, 10(5): 21—22.
Lou Wenjuan, Sun Bingnan. Wind-structure-coupling effects and buffeting responses [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 10(5): 21—22. (in Chinese)

(上接第 31 页)

- [7] 于青. FRP的特点及其在土木工程中的应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(6): 76—79.
Yu Qing. The characteristics of FRP and its application in civil engineering [J]. Journal Of Harbin Architecture University, 2000, 33(6): 76—79. (in Chinese)
- [8] 王全凤, 杨勇新, 岳清瑞. FRP复合材料及其在土木工程中的应用研究[J]. 华侨大学学报, 2005, 26(1): 1—6.
Wang Quanfeng, Yang Yongxin, Yue Qingrui. FRP composites and its application in civil engineering research [J]. Journal of Huaqiao University, 2005, 26(1): 1—6. (in Chinese)
- [9] 马建勋, 宋松林, 赖志生, 等. 粘贴碳纤维布加固钢构件受拉承载力试验研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(2): 1—4.
Ma Jianxun, Song Songlin, Lai Zhisheng, et al. Pasting CFRP reinforcement steel tensile bearing capacity test research [J]. Industrial Construction, 2003, 33(2): 1—4. (in Chinese)
- [10] 冯鹏, 叶列平, 沙吾列提·拜开依. 一种采用纤维增强复合材料抗屈曲加固金属结构技术[P]: 中国: ZL 2009 1 0085913.7, 2012.
Feng Peng, Ye Lieping, Sawulet Bekey. A metal structure strengthened with fiber reinforced composite buckling technology [P]. China: ZL 2009 1 0085913.7, 2012. (in Chinese)
- [11] Feng Peng, Sawulet Bekey, ZhangYanhua, et al. Experimental study on buckling resistance of steel members strengthened using FRP [J]. International Journal Stability and Dynamics, 2012, 12(1): 153—178.
- [12] 沙吾列提·拜开依, 冯鹏, 叶列平, 张龔华. FRP快速抗屈曲加固轴压钢构件方法的试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 105—113.
Sawulet Bekey, Feng Peng, Ye Lieping, Zhang Yanhua. FRP rapid resistance to buckling of axial compression steel reinforcement component method of experimental study [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 105—113. (in Chinese)
- [13] Sridhara B N. Sleeved compression member [P]. USA: 5175972, 1993.
- [14] Prasad B K. Experimental investigation of sleeved column [C]. Proceedings of the 33rd AIAA/ASCE Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Dallas, USA: AIAA/ASCE, 1992: 991—999.
- [15] Domokos G, Holmes P, Royce B. Constrained Euler Buckling [J]. Journal of Nonlinear Science, 1997, 7(3): 281—314.