

橡胶层对空心锥体基础水平承载性能的影响

李珊珊¹, 张雨坤², 李大勇³

(1. 潍坊学院 建筑工程学院, 山东 潍坊 261061; 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; 3. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:空心锥体基础是一种新型的山区风电基础型式, 克服了传统基础混凝土用量大、地基开挖堆积的渣土破坏山区环境、缺乏一定的柔性使其适应上部风机变形能力不足等缺点。为研究基础侧壁铺设的橡胶层对基础水平承载力、基础位移、岩石压力分布及基础耗能能力的影响, 在循环荷载作用下进行模型试验与有限元分析。研究表明: (1) 基础的主要承载部位位于埋深方向距离基础顶板0.63倍基础高度范围内; 与未设置橡胶层相比, 橡胶层会使基础的水平承载力稍有降低, 但基础的累积竖向位移将显著减小, 表明橡胶层能有效控制基础上拔, 而且基础侧壁的岩石压力减少了10%~30%, 可知橡胶层能缓冲、减小外荷载对地基基础的破坏, 进而延长基础的使用寿命。(2) 橡胶层还起到吸能、耗能作用, 从而减小了作用于基础上的倾覆力矩, 使基础的稳定性显著提高。(3) 橡胶的弹性还能提高基础的柔性及耗能能力, 但耗能能力受到基础尺寸、橡胶层厚度、橡胶弹性模量岩体地基变形模量的影响。

关键词:山区风电; 空心锥体基础; 模型试验; 数值模拟; 橡胶层; 水平承载特性

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2022)01-0208-10

Effects of Rubber Layer on Lateral Bearing Behaviors of Cone-shaped Hollow Foundation

Li Shanshan¹, Zhang Yukun², Li Dayong³

(1. Centre for Offshore Geotechnical Engineering, WeiFang University, Weifang, Shandong 261061, P. R. China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, P. R. China; 3. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, P. R. China)

Abstract: The cone-shaped hollow foundation (CHF) is a new type of wind power foundation in mountainous area, which overcomes the disadvantages of large amount of traditional foundation concrete, waste soil accumulated in foundation excavation damaging the mountainous environment, lack of certain flexibility and insufficient deformation capacity of upper fan. In this paper, model tests combined with numerical methods are used to analyze the effects of rubber layer on the lateral bearing capacity of the CHF, deflection of the CHF, and the distribution of rock pressure, respectively. Results show that: (1) the super-structure above the CHF is the main part for bearing lateral loads, and in the range of the embedded depth $0.63H$ from the lid of CHF. It also can be found that, compared to the corresponding the CHF without a rubber layer, the lateral bearing capacity of CHF with a rubber layer slightly decreases under cyclic loading, while the vertical displacement of the foundation significantly

:2021-07-12(修改稿)

作者简介:李珊珊(1989—), 女, 山东泰安人, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的理论与应用的研究。E-mail: shanshan3709@163.com

通讯作者:李大勇(1971—), 男, 山东泰安人, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程领域方面的研究。E-mail: ldy@fzu.edu.cn

基金项目:山东科技大学科研创新团队资助项目(2015KYJH104); 山东省青年科学基金(ZR2020QE258); 潍坊学院博士科研启动基金(2019BS18)

reduces as well. The rubber layer decreases rock pressure along the foundation wall by 10%~30%, because the rubber layer absorbs part of the lateral load by its volume deformation, thus extending the service life of the foundation. (2) The rubber layer also plays the role of energy absorption and energy dissipation, so as to reduce the overturning moment acting on the foundation and significantly improve the stability of the foundation. (3) The elasticity of rubber can also improve the flexibility and energy dissipation capacity of foundation, but the energy dissipation capacity is affected by foundation size, rubber layer thickness, rubber elastic modulus and deformation modulus of rock foundation.

Keywords: mountain wind turbines; cone-shaped hollow foundation (CHF); model tests; FEM; rubber layer; lateral bearing response

0 引言

陆地风电是我国“十三五”新能源开发的重要方向,也是“陆海统筹发展战略”的重要组成部分^[1-2],全国各省为陆地风电开发也给予了大力扶持^[3-5]。当前,陆地风电开发逐渐从平原、戈壁地区向距离城市较近的山区转移,这是因为:平原地区风电工程需占用大量的耕地资源,戈壁地区风电工程需配套建造大量的高压输电线路来传输电力,增加了建设成本;而距离城市较近的山区风电不占用耕地,对环境影响小,还便于风电电力的实时输送,以供给城市经济发展的电力需求。

风荷载作用下的水平荷载及倾覆力矩是山区风电塔架基础设计的主控荷载^[6-8]。为进一步提高基础的水平承载性能及抗倾覆承载性能,李大勇等^[9]提出了一种新型的山区风电塔架基础型式——钢筋混凝土空心锥体柔性基础(Cone-shaped Hollow Flexible Reinforce Concrete Foundation),简称空心锥体基础。基础结构示意图如图 1 所示,基础的顶板、底板及侧壁为钢筋混凝土结构,锥体空腔内回填地基开挖的渣土,外侧壁与岩土体间铺设了橡胶层;基础通过高强锚杆与上部风机塔筒连接。其中:①基础空腔内回填地基开挖的渣土,可降低混凝土用量及减少地基开挖堆积的渣土对山区环境的破坏;②基础外侧壁是一斜面,使基础与岩土体的接触面积增加,可调动更多岩土体来抵抗外荷载作用,而且使得基础周围的岩土体沿着径向受压,提高了基础-岩土体界面上的摩阻力,从而使基础承载力提高;③外侧壁铺设的橡胶层可提高基础的柔性,利于协调基础、地基与上部风机结构的变形,避免风机塔筒与地基基础变形差异太大而发生折断。前期研究结果表明:与圆形重力式基础(山区风电工程中使用率最高)相比,在相同混凝土用量下,空心锥体基础的水平承载力提高 33.5%;达到相同水平承载力时,空心

锥体基础的混凝土用量降低 65%^[10]。

风荷载作用下,风机基础与岩土地基发生相互作用,会引起基础位移、基础转角发生变化及周围土体的变形响应,从而影响基础的水平承载性能。空心锥体基础与地基相互作用的研究可借鉴传统山区风机基础的研究方法,当前国内外学者针对山区风电塔架基础已开展大量的研究,譬如:Khosravi 等^[11]通过模型试验探讨了循环荷载作用下圆形重力式基础周围土体变形模量的衰减规律,并探讨基础-地基相互作用下基础位移和土压力分布的变化;Wang 等^[12]则得出圆形重力式基础与地基相对刚度会影响基础的破坏形式与抗倾覆承载性能。Gao 等^[13]和 Michel 等^[14]建立地基-基础-上部风机结构有限元模型,研究了基础与地基界面接触特性对基础应力-应变响应、基底压力分布及周围土体变形的影响。此外,袁万等^[6]和邓宗伟等^[15]探讨了圆形重力式基础与地基相对刚度对基础-地基相互作用和基础位移响应的影响,而韩汀等^[16]和徐世杰^[17]对风荷载下基础的抗倾覆稳定性基础进行了验证,并分析了基础-地基相互作用模型对基础抗倾覆稳定的影响规律。

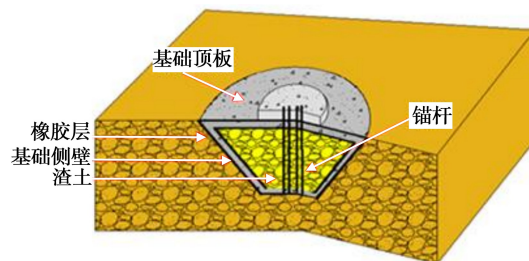


图 1 空心锥体基础结构示意图

Fig. 1 Model of cone-shaped hollow foundation

然而,对于空心锥体基础,其外侧壁铺设的橡胶层会使基础与地基之间呈现柔性接触特性,使得基础-地基之间的相互作用机理与传统圆形重力式基础不同,使基础的水平承载具有独特现象。当前

橡胶层对空心锥体基础水平承载性能的影响研究还未开展,并且不同橡胶层参量下基础周围岩石压力的分布规律、基础的耗能能力也不明确。

因此,本文通过模型试验与数值模拟结合方法,探究了长期循环荷载作用下,橡胶层对空心锥体基础水平承载力、累积位移、岩石压力分布与岩石压力大小、基础耗能能力及荷载卸载后基础回弹量的影响规律。研究结果丰富了山区风电塔架基础设计,为空心锥体基础这种新型的山区风电塔架基础的推广应用提供参考依据。

1 模型试验

1.1 试验装置

1.1.1 基础模型及加载装置

钢制模型箱(图 2)尺寸为:长×宽×高=1 m×1 m×0.8 m,该尺寸能够消除边界效应对试验结果的影响^[10]。空心锥体基础模型如图 3 所示,基础尺寸见表 1;采用钢制基础模型,即不考虑加载过程中基础本身的变形;基础顶板中央设置了加载杆端头,用于连接加载杆。基础外侧壁设置了橡胶层,其厚度为 4 mm;橡胶硬度及弹性模量由单轴拉伸试验测得(依据国家标准 GB/T 528—2009^[18]),具体数值见表 2。

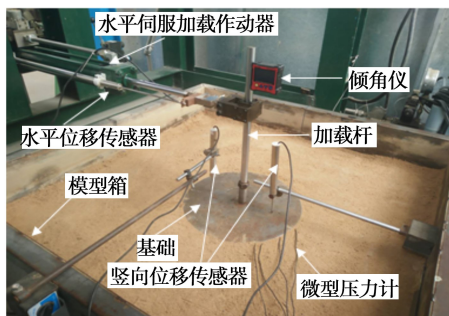
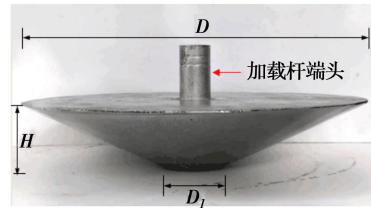


图 2 模型箱及循环加载装置

Fig. 2 Tank and the model test setup

此外,在加载杆上放置 1 支倾角仪(量程为 $\pm 90^\circ$,精度为 0.01°),用于量测循环荷载作用下基础倾角的变化;在基础顶板前、后侧各放置 1 支竖向位移传感器 LVDT(量程为 ± 30 mm,精度为 0.01 mm),用于量测循环加载过程中基础的竖向位移;在基础前侧(首次加载方向),沿埋深方向布置 4 支微型压力计(直径 10 mm,厚度 2 mm),距基础顶板表面的垂直距离分别为 10 mm、

25 mm、45 mm 和 65 mm,并依次命名为 EPT1、EPT2、EPT3 和 EPT4。



(a) 无橡胶层



(b) 有橡胶层

图 3 基础模型

Fig. 3 Foundation models

表 1 基础模型尺寸

Table 1 Dimensions of CHF models

顶板直径 D /mm	底板直径 D_1 /mm	高度 H /mm	重量/N
360	85	72	72

表 2 橡胶层力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the rubber layer

橡胶硬度 H_A	35	43	50
弹性模量 E /MPa	1.400	1.898	2.465

1.1.2 模型箱内风化岩地基制备

由于山区风化岩不宜取样,且难以保证每次试验条件一致,故制备了风化岩相似材料模型试验地基。前人研究表明,配制强度较低的岩土体相似材料时,可采用砂土、粉煤灰、黏性土、粉土、石膏等作为骨料,另选石蜡、松香、凡士林、机油及洗衣液等作为胶结剂^[19-21]。因此,本文采用黄砂和石膏为骨料,以石蜡、凡士林为胶结剂来模拟山区强风化岩。

原型与模型之间具有相同量纲的物理量之比称为相似比尺,常用的相似比尺:几何相似比尺 C_L 、容重相似比尺 C_γ 、应力相似比尺 C_σ 、应变相似比尺 C_ϵ 、位移相似比尺 C_δ 、弹性模量相似比尺 C_E 、力相似比尺 C_F 和摩擦角相似比尺 C_ϕ 等。根据弹性力学中平衡方程、几何方程、物理方程推导各相似比尺之间的关系^[22],可知 $C_\sigma = C_L C_\gamma$ 、 $C_\delta = C_L C_\epsilon$ 和 $C_F = C_E C_\epsilon$ 。本次试验中几何相似比尺 $C_L = 60$ 、

容重相比尺 $C_\gamma = 1$, 进而推出 $C_\mu = C_\phi = C_\varepsilon = 1$ 且 $C_\sigma = C_c = C_E$ 。由单轴、三轴试验(图 4)测得风化岩相似材料的力学参量(见表 3), 得出相似材料配比为砂胶比=8:1, 石蜡:凡士林:石膏=1:1:8。

模型箱内地基的制备过程:按照上述配比称取定量的黄砂、石膏、石蜡和凡士林;将石蜡、凡士林

加热至熔融状态(控制温度为 65 ℃, 防止温度过高破坏材料性质);再将黄砂和石膏放入熔融的石蜡、凡士林中, 边加热边搅拌;快速向模型箱内逐层装填, 并击实;静置 12 h 后, 通过环刀取样法测得风化岩容重、抗压强度、变形模量及抗剪强度。

表 3 风化岩相似材料力学参数
Table 3 Mechanical properties of rock similar material

力学参量	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	变形模量 E/MPa	抗压强度 σ/MPa	泊松比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
原风化岩	18~25	300~1000	3~10	0.30~0.35	10~46	10~40
相似材料	18~25	5~33	0.05~0.16	0.30~0.35	0.2~0.8	10~40
模型材料	19.3	33	0.06	0.32	0.8	25



(a) 不同配比下的试样



(b) 单轴抗压试验

图 4 风化岩相似材料力学参数测定

Fig. 4 Uniaxial compression tests of specimens

1.2 水平循环荷载作用形式

模型试验采用正弦形式的循环荷载, 由参数 ξ_b 和 ξ_c 表征(图 5)。图中 ξ_b 为循环荷载幅值, ξ_c 为循环荷载偏移量, 计算公式为 $\xi_b = F_{\max}/F_{\text{ult}}$ 和 $\xi_c = F_{\max}/F_{\min}$ 。式中, F_{\max} 、 F_{\min} 分别为一个循环周期内荷载的最大值与最小值, F_{ult} 为基础的水平极限承载力(由水平单调加载试验测得)。试验过程中, 取 $\xi_c = 0, \xi_b = 0.2, 0.5$ 和 $1.0F_{\text{ult}}$ 及循环荷载频率 $f = 0.13 \text{ Hz}$; 每组工况循环加载 10 000 次。

2 试验结果与分析

2.1 橡胶层对基础水平承载力的影响

图 6 给出了不同橡胶硬度 H_A 值下空心锥体基础的水平荷载-累积水平位移关系曲线, 当水平荷载不再随着水位移增加而明显增大时, 即当曲线

斜率几乎为零时(图中虚线处), 将该拐点所对应的水平荷载作为空心锥体基础的水平极限承载力。

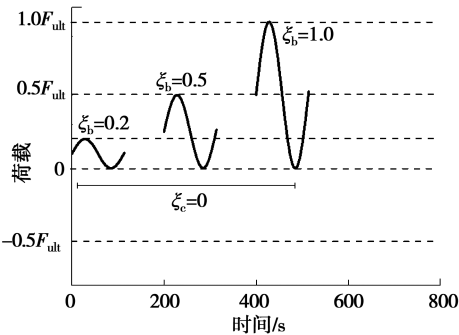


图 5 循环荷载模型

Fig. 5 Models for cyclic loading

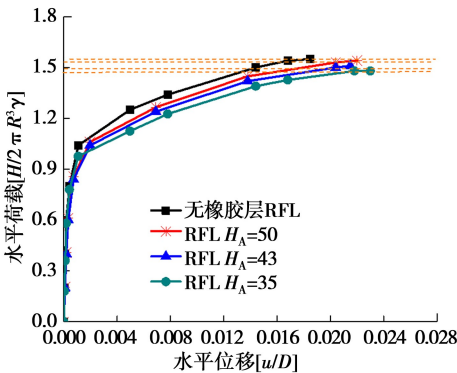


图 6 橡胶层对水平承载力的影响

Fig. 6 Effects of rubber layer on lateral bearing capacity of foundation

由图 6 可知: 与未设置橡胶层(Rubber Flexible Layer, RFL)相比, 基础的水平承载力稍有降低(约降低 9%), 且随橡胶硬度 H_A 值减小而降低, 说明橡胶层越软, 基础的水平承载力降低越显著。此外, 试验过程中还发现, 当水平荷载卸载后,

基础外侧壁铺设橡胶层时空心锥体基础的回弹现象更加明显(回弹量由倾角仪量测),表明橡胶层的设置利于基础回弹。

2.2 橡胶层对基础累积竖向位移的影响

基础的竖向位移量取基础顶板前、后侧竖向位移传感器所测竖向位移量差值的一半^[23]。实际风机基础会受到较大的竖向荷载作用(主要由基础上部塔筒、轮毂、叶轮叶片及基础上覆土自重引起的),而本次循环加载试验中不考虑竖向荷载和基础埋深对基础累积竖向位移的影响,即竖向荷载 $V=0$ 且埋深 $d=0$ 。因此,仅探讨在相同水平荷载及地基岩体条件下基础侧壁设置橡胶层时橡胶层对基础位移的影响规律。

图 7 绘制了循环加载过程中,基础的累积竖向位移-循环次数关系曲线。由图 7(a)可知,基础侧壁未设置橡胶层时,基础累积竖向位移随循环次数增加逐渐增大,且均为正值,表明基础在循环加载过程中呈现上拔现象;循环荷载幅值 ξ_b 数值越大,基础上拔越显著。由图 7(b)可知,基础侧壁设置橡胶层后,基础的累积竖向位移量较未设置橡胶层时显著降低,且橡胶硬度 H_A 值越小,基础的累积竖向位移量降低越明显,表明橡胶层具有控制基础上拔的作用。

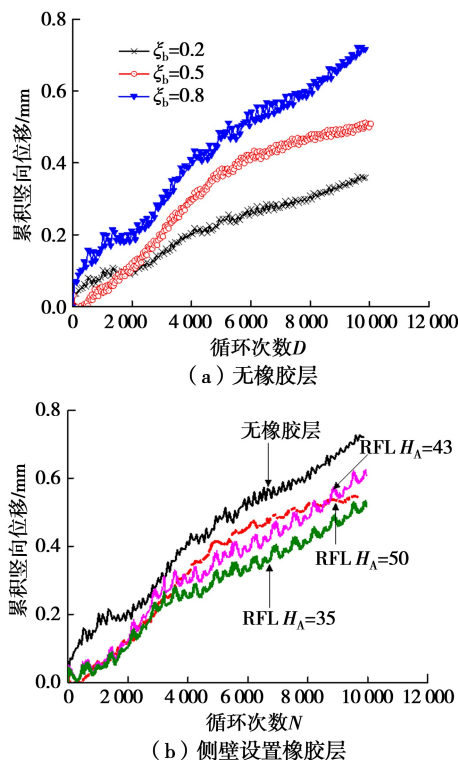


图 7 累积竖向位移-循环次数关系($\xi_c=0, \xi_b=0.8$)

Fig. 7 Cumulative vertical displacement versus loading cycles

2.3 橡胶层对岩石压力分布的影响

图 8 给出了循环荷载 $\xi_b=1.0, \xi_c=0$ 时,基础侧壁岩石压力随循环次数的变化规律。发现:基础侧壁岩石压力约在前 2 000 次循环内相比于初始压力值降低显著,后随着循环次数继续增加而逐渐趋于某一稳定值;不同橡胶硬度 H_A 值条件下,岩石压力的变化规律一致。此外,岩石压力值 $EPT2 > EPT1 > EPT3 > EPT4$,可知沿埋深方向基础侧壁岩石压力先增大后减小,且以距离基础顶板 0.35 倍基础高度处的压力值最高,而 EPT3 和 EPT4 处的压力值较小。表明空心锥形基础主要的承载部位,位于埋深方向距离基础顶板 0.63 倍基础高度范围内。

比较图 8(a)和图 8(b)还发现,相同埋深位置处,橡胶层会使基础侧壁岩石压力波动降低。这是因为,橡胶层使得基础与风化岩界面呈现柔性接触特性,使界面接触压力发生重分布,克服了传统基础与风化岩界面刚性接触下的应力突变或明显波动现象。

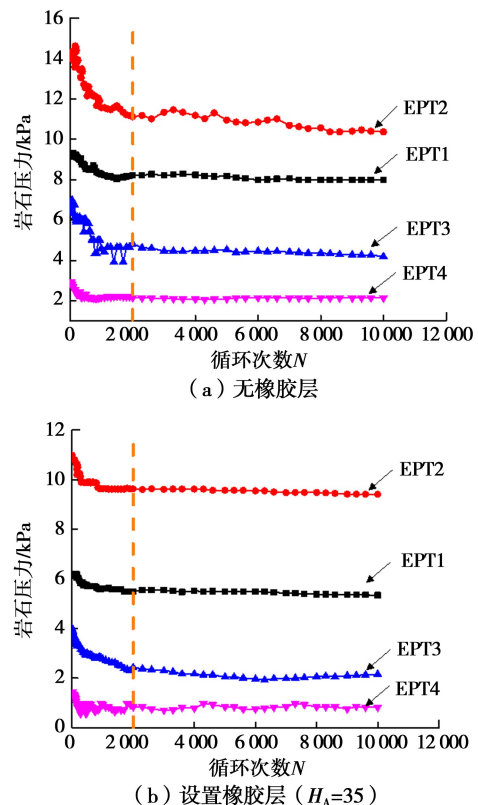


图 8 橡胶层对岩石压力分布的影响

Fig. 8 Effects of rubber layer on the distribution of rock pressure

图 9 比较了有、无橡胶层时,基础周围岩石压力的大小与分布情况。发现:基础侧壁设置橡胶层

后,相同埋深处的岩石压力值减少了 10%~30%,且橡胶硬度 H_A 值越低,岩石压力值降低越显著。这是因为橡胶具有弹性与柔性,其弹性模量远小于风化岩地基的变形模量,在相同外荷载作用下橡胶层的形变显著,即通过牺牲体积形变进行外荷载作用能量的缓冲与吸收,起到了缓冲、减小外荷载的作用,从而使得作用到地基和基础上的外荷载降低,对基础和地基具有保护作用,进而延长了基础的使用寿命。

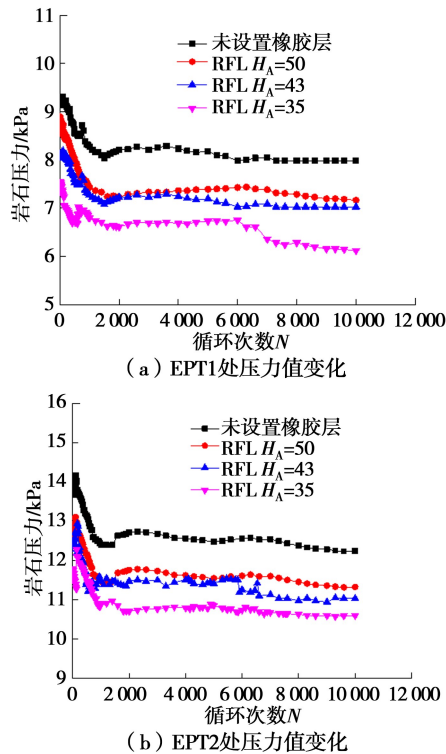


图 9 岩石压力-循环次数关系曲线

Fig. 9 Rock pressure vs. loading cycles

3 橡胶层的耗能性能数值模拟分析

3.1 橡胶层耗能百分比计算方法

水平荷载作用下,橡胶层耗散的能量等于荷载-位移曲线中 OCE 的面积减去 OBD 的面积(图 10),则耗能百分比计算公式为:

$$\eta = \frac{OCE - OBD}{OABD} \times 100\% \quad (1)$$

式中: OCE 、 OBD 及 $OABD$ 为坐标轴与荷载-位移曲线所包围的面积。

3.2 地基-基础-上部风机结构有限元模型

图 11 绘制了地基-基础-上部风机结构体系的有限元模型(采用 ABAQUS 软件),基础尺寸见表 4。基础采用线弹性模型进行模拟,基础顶板、底板

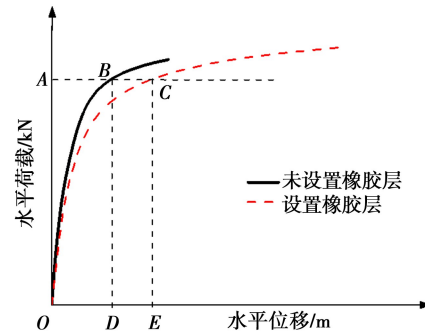


图 10 水平荷载-水平位移关系

Fig. 10 Lateral load vs. horizontal displacement

及侧壁弹性模量 $E=32.5$ GPa、泊松比 $\mu=0.2$ 和密度 $\rho=2\,800$ kg/m³;基础空腔内回填地基开挖的渣土,弹性模量 $E=0.4$ GPa、泊松比 $\mu=0.3$ 和密度 $\rho=1\,900$ kg/m³。岩体地基采用摩尔库伦模型,其力学参量见表 5。基础-地基界面接触属性选取摩尔-库伦摩擦罚函数形式,界面相对滑动摩擦系数 $f=\tan(0.75\Psi)$ [24],其中 Ψ 为岩体内摩擦角。对于基外侧壁的橡胶层,采用 ABAQUS 中橡胶材料 Mooney-Rivlin 模型进行模拟,模型参量由单轴拉伸试验测得 [18]。单轴拉伸试验所得拉伸力-伸长量关系如图 12 所示,进而得出 Mooney-Rivlin 模型参量(见表 6)。另外,采用位移控制法进行加载,水平荷载作用点位于轮毂顶端中心处(依据规范 FD003-2007 [25],塔筒 80 m 时基础的倾斜率允许值 $\tan\theta=0.005$,等效至轮毂顶端中心处的最大水平位移值为 0.4 m,即取水平位移达 0.4 m 时对应的水平荷载为水平极限承载力)。

表 4 空心锥体基础尺寸

Table 4 Sizes of the CHF's

基础编号	I-1a	I-2a	I-3a
顶板直径 D /m	20	20	22
基础高度 H /m	3.5	3.5	3.5
侧壁倾角 $\theta/(\circ)$	22.8	25.8	22.8

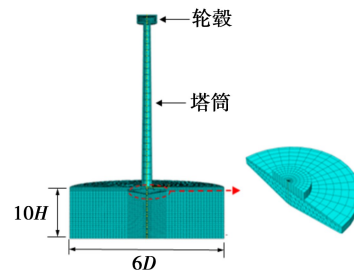


图 11 三维有限元模型

Fig. 11 3D finite element model

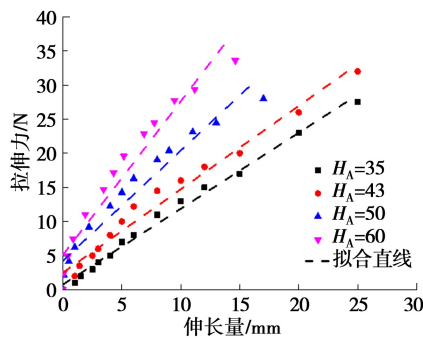


图 12 橡胶试件拉伸试验

Fig. 12 Tensile tests for the rubber specimens

表 5 岩体的力学参量

Table 5 Mechanical parameters of rock mass

变形模量 E_0/MPa	泊松 比 μ	内摩擦 角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚力 c/kPa
20~2 000	0.3	25	20

表 6 Mooney-Rivlin 模型参数

Table 6 Parameters used in Mooney-Rivlin model

橡胶硬度 H_A	43	50	60
弹性模量 E/MPa	1.898 24	2.465 00	3.206 00
C_{10}	0.247 49	0.333 24	0.444 40
C_{01}	0.061 56	0.082 89	0.108 45

3.3 不同工况下橡胶层的耗能百分比

图 13 给出了岩体变形模量由 100 MPa 增至 500 MPa 时,数值模拟所得荷载-位移关系曲线,此时基础外侧壁的橡胶层厚度 $t/D=0.014$ 、硬度 $H_A=50$ 。结果表明:橡胶层的设置使基础水平极限承载力降低了 5%~10%,与模型试验结果一致;相同水平荷载作用下,橡胶层使得基础水平位移较未设置橡胶层时显著增加,主要因为橡胶层具有较好的弹性及形变特性,增加了基础的柔性,在荷载作用下基础的位移增加,从而起到吸能、耗能作用及减小风振响应的作用。

为量化橡胶层的耗能能力,依据计算式(1)得到了橡胶层的耗能百分比值,它随岩体变形模量的变化规律如图 14 所示。分析可知:当橡胶硬度 $H_A=50$ 、岩体变形模量由 100 MPa 增至 1 800 MPa 时,耗能百分比值由 90% 逐渐增加至 180%;而当 $H_A=60$ 时,随岩体变形模量增加,耗能百分比值由 10% 增至 110%,表明橡胶硬度 $H_A=50$ 时橡胶层的耗能效果较好。而且橡胶硬度值越低,其弹性模量

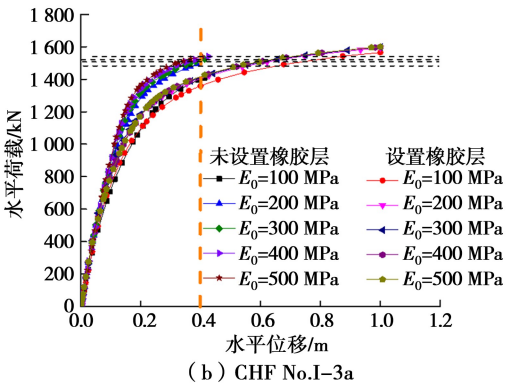
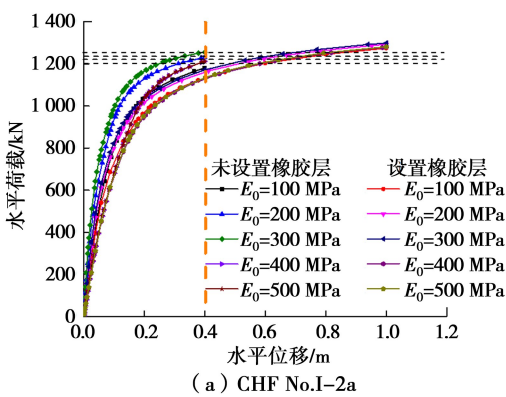


图 13 橡胶层对基础水平承载力的影响

Fig. 13 Effects of RFL on lateral bearing capacity of CHF

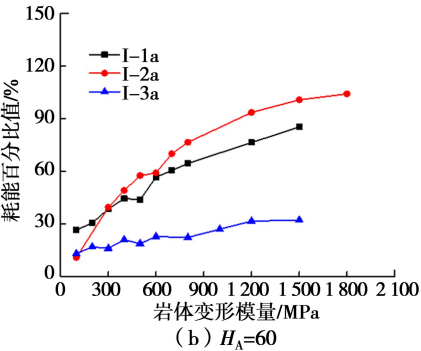
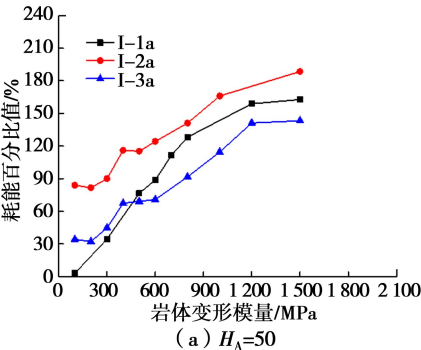


图 14 橡胶层耗能百分比-岩体变形模量关系 ($t/D=0.014$)

Fig. 14 Energy dissipation percentage of rubber layer vs. rock mass deformation modulus ($t/D=0.014$)

越低,与岩体变形模量比值越小,其耗能能力越高,但相应的基础位移越大。因此,设置橡胶层时,需

要综合考虑耗能能力与基础允许位移值。此外,分析还发现,相同条件下以基础 I-2a 的耗能百分比值最高,即耗能能力还受到基础尺寸的影响。

为进一步研究影响橡胶层耗能能力的因素,讨论了耗能百分比值随着橡胶层厚度、橡胶弹性模量与岩体变形模量比值变化规律(图 15,CHF No. I-2a)。由图可知:相同岩体变形模量及橡胶硬度 H_A 值条件下,耗能百分比值随 t/D 值增加显著增大;

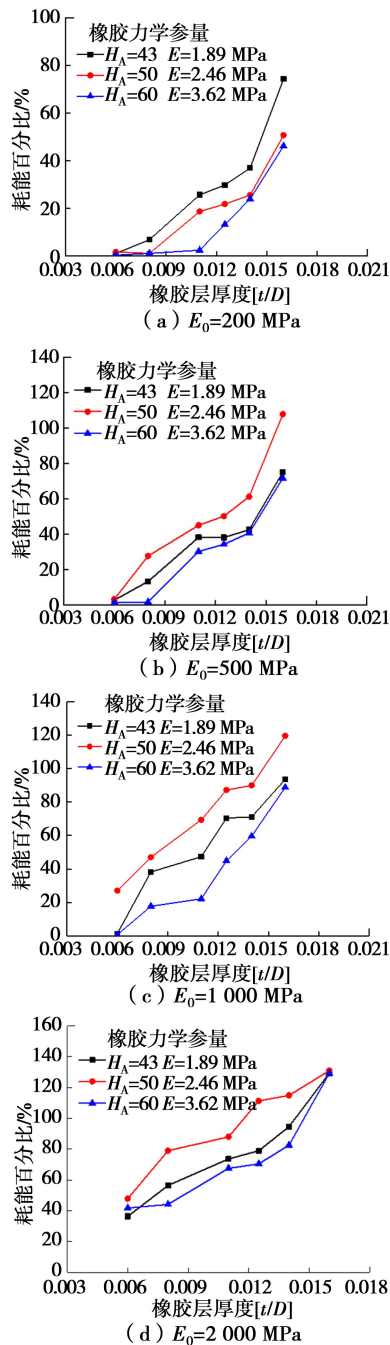


图 15 橡胶层厚度对基础耗能的影响

Fig. 15 Effects of thicknesses of rubber layer on energy dissipation of the foundation

与橡胶硬度 H_A 对耗能能力的影响相比,橡胶层的厚度对其影响效果更为显著。另外,岩体变形模量与橡胶弹性模量比值越高,橡胶层的耗能百分比值越大,以橡胶变形模量 $E=2.46$ MPa 且厚度 $t/D=0.014$ 为例,当岩体变形模量由 200 MPa 增至 2 000 MPa 时,耗能百分比值由 25% 提高至 110%。此外,相同橡胶层厚度 t/D 值下,岩体变形模量为 200 MPa 时,以橡胶硬度 $H_A=50$ 且弹性模量 $E=2.46$ MPa 的耗能百分比值最高,即耗能效果最好;而岩体变形模量继续增加,则以 $H_A=50$ 、 $E=2.46$ MPa 的耗能效果最好,说明岩体变形模量与橡胶弹性模量比值对橡胶层参量选取的影响是不能忽视的。

4 结论

(1) 长期水平循环荷载作用下,空心锥体基础侧壁铺设的橡胶层会使基础的水平承载力减小 9%,但能有效降低基础累积竖向位移量,即控制基础上拔,而且在水平荷载卸除后,橡胶层利于基础回弹。

(2) 橡胶层使得基础侧壁的岩石压力较未设置橡胶层时降低了 10%~30%,表明橡胶层使基础与风化岩地基之间呈现柔性接触特性,能够有效缓冲和减小外荷载对地基、基础的破坏,进而延长了基础的使用寿命。

(3) 橡胶层的弹性可提高基础的柔性及耗能能力,进而降低基础受到的倾覆力矩作用;橡胶层还能提高基础的耗能能力,但其耗能能力受到橡胶层厚度、橡胶硬度、橡胶弹性模型与岩体变形模量比值及基础尺寸的影响。研究得出:与橡胶硬度对耗能能力的影响相比,橡胶层厚度的影响效果更为显著;岩体变形模量与橡胶弹性模量比值越大,基础的耗能能力越高,但相应的基础水平位移越大。

(4) 此外,研究结果表明,空心锥体基础的主要承载部位,位于埋深方向距离基础顶板 0.63 倍基础高度范围内,故可以考虑只在主要承载部位铺设橡胶层。

参考文献 (References)

- [1] Wang S F, Wang S C, Liu J X. Life-cycle greenhouse gas emission of onshore and offshore wind turbines [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210: 804-810.

- [2] Sahu B K. Wind energy developments and policies in China: a short review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81(1): 1393-1405.
- [3] 许杨, 杨宏青, 陈正洪, 等. 湖北省丘陵山区风能资源特征分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(7): 937-985. (Xu Yang, Yang Hongqing, Chen Zhenghong, et al. Feature analysis on wind energy resources of hills and mountains in Hubei Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(7): 937-985. (in Chinese))
- [4] 山东省能源局. 2019年起山东新增核准的集中式陆上和海上风电项目均采取竞争性配置方式 [EB/OL]. 北极星风力发电网, 2019-03-23, https://www.sohu.com/a/303294593_408441. (Shandong Province Energy Bureau. Offshore and On-land wind power projects newly deployed in competitive manner in Shandong from 2019 [EB/OL]. *Polaris Wind Power Network*, 2019-03-23. https://www.sohu.com/a/303294593_408441. (in Chinese))
- [5] Zhang J, Zhang J W, Cai L, et al. Energy performance of wind power in China: a comparison among inland, coastal and offshore wind farms [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143: 836-842.
- [6] 袁万, 彭秀芳, 李剑锋. 山区风电场塔筒-基础-地基相互作用有限元研究 [J]. *太阳能学报*, 2018, 39(7): 2060-2066. (Yuan Wan, Peng Xiufang, Li Jianfeng. Interactions of wind turbine-foundation-ground in mountain wind farm by finite element method [J]. *Acta Energae Solaris Sinica*, 2018, 39(7): 2060-2066. (in Chinese))
- [7] 康明虎, 徐慧, 黄鑫. 基础环形式风机基础局部损伤分析 [J]. *太阳能学报*, 2014, 35(4): 583-588. (Kang Minghu, Xu Hui, Huang Xin. Local damage analysis of near foundation ring in wind turbine foundation [J]. *Acta Energae Solaris Sinica*, 2014, 35(4): 583-588. (in Chinese))
- [8] Li D Y, Feng L Y, Zhang Y K. Model tests of modified suction caissons in marine sand under monotonic lateral combined loading [J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 48: 137-147.
- [9] 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]. 中国专利: ZL 201410654765. 8, 2015-02-25. (Li Dayong, Zhai Hanbo, Zhang Yukun, et al. Concrete hollow cone mountain area wind-powered electricity generation flexible foundation and construction method [P]. *China Patent*: ZL 201410654765. 8, 2015-02-25. (in Chinese))
- [10] Li D Y, Li S S, Zhang Y K. Cone-shaped hollow flexible reinforced concrete foundation (CHF)-Innovative for mountain wind turbines [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(5): 1172-1181.
- [11] Khosravi M, Boulanger R W, Wilson D W, et al. Stress transfer from rocking shallow foundations on soil-cement reinforced clay [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(4): 966-981.
- [12] Wang S Y, Huang Y X, Li L, et al. Dynamic analysis of wind turbines including nacelle-tower-foundation interaction for condition of incomplete structural parameters [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(3): 20-30.
- [13] Gao Q F, Dong H, Deng Z W, et al. Wind-induced dynamic amplification effects on the shallow foundation of a horizontal-axis wind turbine [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 88: 9-17.
- [14] Michel K, Butenweg K. The influence of soil-structure-interaction on the fatigue analysis in the foundation design of onshore wind turbines [J]. *International Conference on Structural Dynamics*, 2017, 199(1): 3218-3223.
- [15] 邓宗伟, 彭文春, 高乾丰, 等. 风力机扩展基础基底压力测试与平面度分析 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(9): 2659-2673. (Deng Zongwei, Peng Wenchun, Gao Qianfeng, et al. Base pressure monitoring and flatness analysis for wind turbine spread subgrade [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(9): 2659-2673. (in Chinese))
- [16] 韩汀, 佟玉辉. 风力发电工程圆形扩展基础稳定性研究 [J]. *风能*, 2019, 5(2): 106-109. (Han Ting, Tong Yuhui. Research on stability of circular foundation of wind power generation [J]. *Wind Energy*, 2019, 5(2): 106-109. (in Chinese))
- [17] 徐世杰. 风机扩展基础力学性能分析及结构优化探究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (Xu Shijie. Mechanics performance analysis and structural optimization probe of wind turbine bases [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese))
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定 (GB/T 528-2009) [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2009. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China, Vulcanized

- or thermoplastic-determination of tensile stress-strain properties (GB/T 528-2009) [S]. Beijing: China National Standardization Management Committee, 2009. (in Chinese))
- [19] 宁奕冰,唐辉明,张勃成,等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩石力学, 2020, 41(6): 1-11. (Ni Yibing, Tang Huiming, Zhang Bocheng, et al. Research on rock similar material proportioning test based on orthogonal design and its application in base friction physical model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1-11. (in Chinese))
- [20] Nurult R, Wisnua A. Analysis of structural and microstructure of lanthanum ferrite by modifying iron sand for microwave absorber material application[J]. Advanced Materials Research, 2014, 896: 423-427.
- [21] Liu Y S, Li J, Wu Q L, et al. Sensitivity analysis and proportioning design of rock burst similar materials[J]. Functional Materials, 2017, 24(3): 496-500.
- [22] 岳哲,叶义成,王其虎,等. 基于量纲分析的岩石相似材料抗压强度计算模型[J]. 岩石力学, 2018, 39(1): 216-228. (Yue Zhe, Ye Yicheng, Wang Qihu. A model for calculation of compressive strength of rock-like materials based on dimensional analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 216-228. (in Chinese))
- [23] Li D Y, Zhang Y K, Feng L Y, et al. Capacity of modified suction caissons in marine sand under static horizontal loading[J]. Ocean Engineering, 2015, 102: 1-16.
- [24] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (Fei Kang, Zhang Jianwei. Application code of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2009. (in Chinese))
- [25] 水电水利规划设计总院. 风电机组地基基础设计规范试行(FD 003-2007) [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (The General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design. Design regulations on subgrade and foundation for wind turbine generator system (FD 003-2007) [S]. Beijing: China Water Conservang and Hydropower Press, 2007. (in Chinese))

(上接 178 页)

- [19] 王天亮,王海航,王鸥,等. 粉土与凹槽结构面抗剪强度特性试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(3): 115-121. (Wang Tianliang, Wang Haihang, Wang Ou, et al. Experimental study on shear strength characteristics of silt and groove structural surface [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(3): 115-121. (in Chinese))
- [20] 金子豪,杨奇,陈琛,等. 粗糙度对混凝土-砂土接触面力学特性的影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 754-765. (Jin Zihao, Yang Qi, Chen Chen, et al. Experimental study on effects of the roughness on mechanical behaviors of concrete-sand interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 754-765. (in Chinese))
- [21] 王永洪,张明义,刘俊伟,等. 考虑超孔隙水压力的桩土界面直剪试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增1): 359-367. (Wang Yonghong, Zhang Mingyi, Liu Junwei, et al. Research on effect of pore water pressure on shear test of pile-soil interface [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Supp. 1): 359-367. (in Chinese))
- [22] 张磊,刘慧,王铁行. 不同泥皮厚度下黄土-混凝土接触面剪切试验[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增2): 564-568, 575. (Zhang Lei, Liu Hui, Wang Tiexing. Shear tests on interface between loess and concrete under various slurry thicknesses [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(Supp. 2): 564-568, 575. (in Chinese))
- [23] 陈高峰,杨帅东,苏涛,等. 不同含水量下土体抗剪强度试验及破坏过程分析[J]. 人民珠江, 2016, 37(12): 37-41. (Chen Gaofeng, Yang Shuaidong, Su Tao, et al. Study on shear strength tests and failure process for soils under different moisture content [J]. Pearl River, 2016, 37(12): 37-41. (in Chinese))