

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.140

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



大锚片螺旋锚在粉质黏土中的下压承载性能

屈讼昭¹, 郭咏华², 王仪¹, 张斌², 张建明², 孙清³

(1. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467036; 2. 中国电建集团河南省电力勘测设计院有限公司, 郑州 450000; 3. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049)

摘要:为研究大锚片螺旋锚在粉质黏土中竖向受压荷载下的受力性能,基于螺旋锚现场静载试验,讨论了确定其极限承载力方法的差异;考虑螺旋锚对周边土的挤压效应,建立精细化有限元模型,并将数值分析结果与试验结果进行对比,验证了有限元模型的合理性;基于验证的有限元模型,分析不同荷载等级下沿基础深度范围内的锚杆内力和侧摩阻力的变化规律,以及侧阻和锚片端阻承担荷载的比例关系。结果表明:用lg $P-s$ 方法确定大锚片螺旋锚基础极限受压承载力较合适;螺旋锚与土之间的摩阻力随下压位移的增加而增大,锚片附近区域的摩阻力由于锚片变形而发生较大的波动;螺旋锚锚片分担荷载的比例占据螺旋锚基础受荷的75%以上,各锚片间分担荷载比例最大差异约为6%,锚杆端阻可忽略不计。

关键词:螺旋锚;粉质黏土;现场试验;数值分析;极限承载力;受力性能

中图分类号:TU476 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)05-0034-11

Bearing capacity of screw anchor with large anchor plate in silty clay

QU Songzhao¹, GUO Yonghua², WANG Yi¹, ZHANG Bin², ZHANG Jianming², SUN Qing³

(1. School of Civil and Traffic Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, Henan, P. R. China; 2. PowerChina Henan Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd, Zhengzhou 450000, P. R. China; 3. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China)

Abstract: In this paper, in order to study the mechanical performance of the screw anchor with large anchor pieces under vertical compressive load in silty clay, the differences of the methods to determine its ultimate bearing capacity based on the on-site static load test of the screw anchor have been discussed; Secondly, a refined finite element model considering the squeezing effect of the screw anchor on the surrounding soil has been established. And the numerical analysis results have been compared with the experimental findings to verify the rationality of the finite element model; Finally, based on the verified finite element model, the change pattern of the internal force and side friction resistance of the anchor within the depth range of the foundation under different load levels has been analyzed. The proportional relationship between the side resistance and the end resistance of the anchor plate to bear the load has been analyzed. The results show that the lg $P-s$ method is suitable to determine the ultimate bearing capacity of the screw anchor foundation with large anchor pieces; The frictional resistance between the screw anchor and the soil increases with the

收稿日期:2020-04-15

基金项目:国家电网有限公司科学技术项目(SGHAJG00AJJS1900148);河南省高等学校重点科研项目(20A560007)

作者简介:屈讼昭(1987-),男,博士,主要从事输电塔结构及基础研究,E-mail:qusongzhao@hncj.edu.cn.

Received:2020-04-15

Foundation items: Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGHAJG00AJJS1900148); Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province (No. 20A560007)

Author brief: QU Songzhao (1987-), PhD, main research interests: transmission tower structure and foundation, E-mail: qusongzhao@hncj.edu.cn.

increase of the downforce displacement. The frictional resistance of the area near the anchor plate fluctuates greatly due to the deformation of the anchor plate; The proportion of load shared by anchor pieces accounts for more than 75% of the load on the screw anchor foundation. The maximum difference in the load sharing ratio between the anchor pieces is about 6%, and the end resistance of the anchor foundation is negligible.

Keywords: screw anchor; silty clay; field tests; numerical analysis; ultimate bearing capacity; mechanical performance

螺旋锚基础是一种由螺旋锚和上部承台等构件组成,主要利用深层土体抵抗上部结构作用的锚固结构体。该基础以钢构件为主,施工工序少、施工简单,可显著减少或避免使用混凝土材料,从而极大程度上缩短施工周期。同时,螺旋锚施工时不必大范围开挖,地表破坏范围相对较小,环保效益明显,尤其对生态脆弱地区。此外,螺旋锚对土体的扰动小,能充分发挥原状土体固有强度,实现基础材料节省。鉴于螺旋锚基础的上述优点,工程中对其进行了一定的探索性应用^[1-2]。2016年,巴西某500 kV双回线路工程中,针对软土地基采用单腿7根螺旋锚倾斜布置基础。在该项工程中,螺旋锚基础应用300余基,应用率超过50%。2017年,淄博齐林电力设计院有限公司在济青高铁朱台牵引站供电工程(吴磨—朱台牵引站220 kV线路部分)对3基双回路直线塔采用螺旋锚基础,土质以粉质黏土和粉土为主。为了加速推进该基础在输电线路工程中的应用,国家电网公司于2018年设定了关于螺旋锚基础的多个试点工程,包括:平原黏性土地地区,山东潍坊官亭(高密)500 kV变电站220 kV送出工程和淄博千乘至芦湖(至高清)220 kV线路工程;祁连山地草原环境地区,青海海北默勒至祁连110 kV线路工程。

为了对该基础类型提供理论支撑,较多学者对其受力性能等方面进行了一定的研究。目前,关于螺旋锚基础承载力的研究主要集中在抗拔性能方面, Demir等^[3]对在黏土中的单锚进行室内拉拔试验,并且基于数值模拟对比分析不同埋深比多锚片螺旋锚抗拔性能的影响规律。胡伟等^[4]通过对处于中砂内的单叶片螺旋锚上拔试验研究,初步揭示了锚片表面土压力的分布规律。Wang等^[5-7]对处于冻土中的螺旋锚基础上拔承载力进行了试验研究和数值分析,阐明螺旋锚几何尺寸对其抗拔性能的影响规律。张昕^[8]详细归纳螺旋锚基础上拔性能方面的研究成果,发现岩土的性质对螺旋锚上拔性能及破坏模式影响很大,并基于对螺旋锚上拔受力过程中周边土体(砂土)变形场的研究,阐明了螺旋锚上拔破坏的力学机理,建立了螺旋锚抗拔承载力

计算模型,提出砂土中螺旋单锚上拔承载力的计算方法。而在实际工程中,螺旋锚除了承受上拔荷载之外,还要承受较大的竖向荷载。王希云^[9]、邵康等^[10]对砂质土地地区中的三盘螺旋锚进行了竖向抗压承载力试验研究和数值模拟分析,论证了确定螺旋锚承载力取值方法的适用性,揭示了在竖向荷载作用下螺旋锚锚杆侧阻、锚片端阻以及锚杆端阻所占的比重,阐明了螺旋锚承载力随锚盘间距改变的变化趋势。对于其他土质中螺旋锚的抗压性能研究报道较少。

上述螺旋锚锚片的最大直径为300 mm。美国乔斯林公司曾生产螺旋锚叶片最大直径为395 mm,前苏联使用的最大锚片直径为460 mm,日本九州电力公司在TACSR工程中使用的螺旋锚基础锚片最大直径为420 mm。中国目前使用的螺旋锚锚片直径一般都在360 mm以下^[11]。大锚片可以更大程度地提高该类型基础的承载力,但基于常规锚片提出的承载力判别条件,以及螺旋锚基础的破坏模式和相关参数对极限承载力的影响规律是否适用,需要进一步研究确定。笔者基于黏性土地地区的多叶片大直径螺旋锚基础静载试验,对比讨论现有极限承载力判别条件的适用性;建立螺旋锚基础精细化有限元模型,通过与现场静载试验结果对比,验证有限元模型的合理性,在此基础上分析大叶片螺旋锚基础在竖向压力作用下锚杆侧阻、叶片端阻的荷载分担规律。

1 试验场地土层评价

试验场地在河南省驻马店市上蔡县蔡沟乡,该地区处于淮河冲洪积平原地带,地貌单一,地形平坦,地势开阔。现场静力触探发现,地层土质较均匀,从地表至31.5 m深度处以粉质黏土为主,黏土状态为可塑~硬塑,具中压缩性。土质呈褐黄、褐灰、灰黄等色,含铁锰氧化物,零星见小钙质结核与蜗牛壳碎片,夹粉土,其中,地表1.0~2.0 m为耕土,深度14.5~16.5 m范围内局部为粉土。试验中锚杆的埋深位于9~12 m,在锚杆的埋深范围内可

以把周围的土质视为均匀分布的粉质黏土,土层物理性质指标以及力学性质指标见表 1。

表 1 土层物理性质指标以及力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of subsoil

土质	密度/(kg·m ⁻³)	压缩模量 E/MPa	泊松比
粉质黏土	1 900	20	0.35
内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	黏聚力/kPa	地下水位/m
8	4	50	2.5

2 螺旋锚抗压静载试验与结果分析

2.1 试验概况

螺旋锚现场原位试验布置如图 1 所示,现场采用塔位处的灌注桩基础作为反力桩,螺旋锚 1、3、5 和 7 分为位于反力桩间约三等分点处。现场将反力梁与灌注桩上的预埋地脚螺栓相连,通过千斤顶向螺旋锚顶部施加压力,如图 2 所示。螺旋锚抗压静载试验采用快速荷载维持法,加载按照每级 60 kN 依次递增,每级加载保持 10 min,加载至锚杆顶部竖向位移超过 40 mm 停止,卸载采用相同的方式。试验中采用压力表测定千斤顶油压来换算得到施加的荷载,千斤顶量程为 5 000 kN,螺旋锚竖向位移通过安装在千斤顶下部的位移传感器测量。

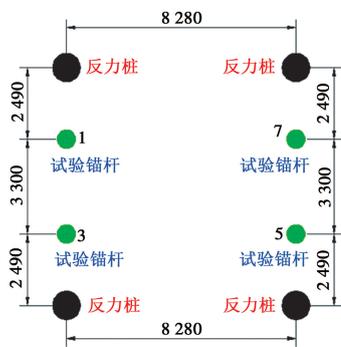


图 1 静载试验布置(单位:mm)

Fig. 1 Layout of static load test (unit: mm)

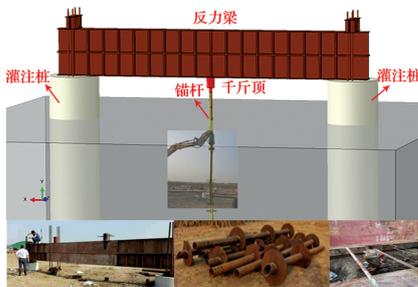


图 2 静载试验装置

Fig. 2 Static load test device

对 4 个螺旋锚进行受压试验研究,其中 1 号为

埋深 9 m 的两盘螺旋锚,具体尺寸如图 3(a)所示。3 号为埋深 9 m 的三盘螺旋锚,具体尺寸如图 3(b)所示。5 号为埋深 12 m 的两盘螺旋锚,加工尺寸同 1 号螺旋锚。7 号初始设计为埋深 12 m 的 3 盘螺旋锚,但在钻入施工时由于土质较硬,当钻入约 9 m 时发现施工困难,现场临时改为埋深为 9 m 的三盘螺旋锚。螺旋锚锚盘和锚杆均采用 Q345B 级钢材。

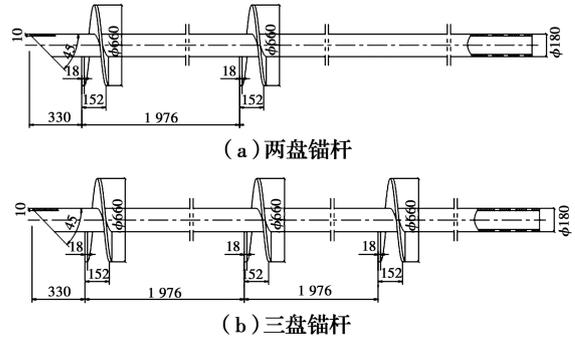


图 3 螺旋锚加工尺寸(单位:mm)

Fig. 3 Machining dimension of screw anchor (unit: mm)

2.2 试验结果

对于单锚受压,其锚顶荷载-位移曲线如图 4 所示,整个受力过程主要可以分为 3 个区间:开始加载阶段曲线近似为线性变化,中间阶段曲线为非线性变化,最后阶段曲线再转变为近似线性变化。在卸载过程中,荷载位移曲线呈现非线性变化,且在相同荷载下对应卸载曲线的切线斜率大于加载曲线的切线斜率,说明卸载时螺旋锚周围土的回弹模量大于其初始弹性模量。

7 号与 3 号均为 3 锚盘螺旋锚基础,埋深均为 9 m。根据试验结果,7 号承载力为 3 号承载力的 1.15 倍,而 5 号承载力位于两者之间,三者均大于 1 号螺旋锚。可见,单锚抗压承载力随锚盘数量的增加而增大,随埋深的增加而增大,3 盘 9 m 的单螺旋锚基础抗压承载力与 2 盘 12 m 的单螺旋锚基础承载力相当。

2.3 极限承载力确定方法对比

螺旋锚在确定极限承载力时,均以锚杆端阻发挥程度作为判断的标准^[12-13]。目前关于螺旋锚基础承载力常用的确定方法如表 2 所示,并根据对应的方法计算得出锚杆相应的极限承载力。由于研究对象均为大锚片螺旋锚基础,由前两种方法计算出在极限状态下对应的位移均比较大,基本都在 60 mm 以上,通过试验曲线无法得到对应的极限荷载。第 3 种方法首先将螺旋锚顶部荷载-位移曲线处理为理想的 lg P-s 曲线,如图 5 所示,通过对曲线做切

线,找出相应陡降变化线性段。将陡降变化的起始点作为螺旋锚的极限承载力,该方法确定的位移和

极限承载力见表 2。

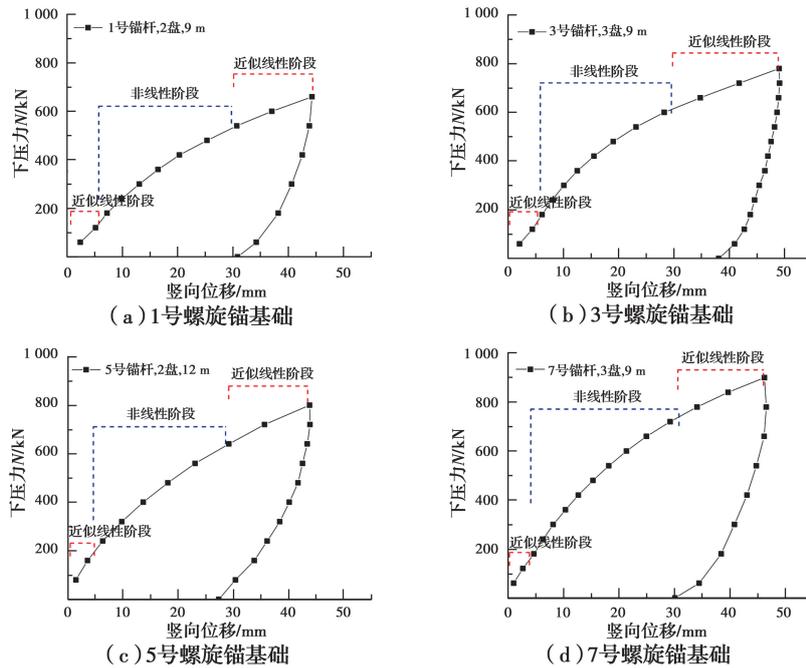


图 4 静载试验结果

Fig. 4 Static load test results

表 2 不同方法确定螺旋锚承载力

Table 2 Different methods to determine the bearing capacity of test screw anchor

来源	方法	1 号		3 号		5 号		7 号	
		极限承载 力/kN	位移/ mm	极限承载 力/kN	位移/ mm	极限承载 力/kN	位移/ mm	极限承载 力/kN	位移/ mm
Livneh & El. Naggar 法 ^[12]	对应极限承载力桩顶位移: $s = \frac{PL}{AE} + 0.08D_{max}$	58.34		59.34		61.65		60.35	
修正 Davisson 方法 ^[14]	对应极限承载力桩顶位移: $s = \frac{PL}{AE} + 0.1D_{avg}$	71.54		72.54		74.85		73.55	
lg P-s 法 ^[15]	首先将桩顶荷载-位移曲线 (P-s) 处理为 lg P-s 曲线, 找出相应的陡降初始点为极限荷载。	540	30.7	600	28.31	640	29.21	780	34.08

注: L 为锚杆的总长度; P 为桩顶荷载; A 为锚杆截面面积; E 为钢材弹性模量; D_{max} 和 D_{avg} 分别为锚盘的最大直径和平均直径, 试验中锚盘直径都相同, $D_{max} = D_{avg}$ 。

2.4 极限承载力确定方法讨论与建议

通过上述针对极限承载力确定方法的对比发现, 轴向压力作用下, 由于锚片直径较大, 基础锚杆侧摩阻力完全发挥时对应的位移与锚片直径的比值较小。如果仍然按照常规螺旋锚基础极限承载力判别条件, 通过锚盘直径一定比例的位移对应的荷载作为承载力, 则此时承载力会偏大甚至无法得到。可见, 前两种方法不适用于大叶片螺旋锚基础。第 3 种方法通过对处理后的曲线做切线, 找到陡降段

的起始点, 如图 5 所示。该方法能够较合理地找到螺旋锚基础对应的极限状态, 说明该方法适用于黏土地层中的大锚片螺旋锚基础。

3 静载试验数值模拟与结果分析

3.1 计算模型

利用有限元软件 ABAQUS 对螺旋锚进行竖向加载数值模拟, 为了消除边界条件对计算结果的影

响,计算模型中,土体水平范围取为锚盘直径的 10 倍,土体竖向范围取为螺旋锚埋入深度的 2 倍,如图 6 所示。根据实际试验条件,对土体底部约束 3 个方向的平移自由度,土体侧面约束水平两个方向的平移自由度。螺旋锚基础与土体建立接触,接触面的本构关系即为相互作用的力学模型,其中包括两个部分,分别是:接触面的切向作用和法向作用^[16]。在模拟接触作用中法向使用硬接触模块“Hard Contact”,这种接触对于两个物体来说只有在压紧的状态下才会传递法向压力,并且保证限制住了穿透现象的发生;切向作用使用的是“Penalty”罚函数,允许发生弹性滑移变形,并且设定摩擦系数为 0.14。

在对螺旋锚基础数值分析中,通常为了提高计算收敛效果,将螺旋盘简化成平盘进行计算^[17-20]。为了充分验证锚盘形式对基础承载力的影响,在同样的边界条件和荷载作用下,分别对锚盘为螺旋状和平盘状的基础进行数值分析,对比压力荷载下计算结果的差异性,如图 7 所示。其中,在对螺旋锚盘与锚杆连接部分划分网格时,先对锚杆壁沿螺旋线进行切割,以绘制出高质量的网格。

通过对比平盘和螺旋盘两种不同形式螺旋锚基础下压分析结果发现,两者从变形到应力分布基本一致,唯有锚盘的应力分布形式存在差异,如图 7 所示。将两种螺旋锚的压力-位移曲线与试验结果进行对比,如图 8 所示,两个数值模型的计算结果与试验结果吻合较好,并且两种模型之间的最大差异在 3% 以内。可见,锚盘的形式对螺旋锚下压承载力的影响不大。综合分析效率和整体吻合性,建议选择平盘锚代替螺旋锚作为数值分析模型。

3.2 参数选取

对于土体,摩尔库伦模型应用最为广泛,它不仅是在理论上更是在试验上反映出了土体的变形特性。而且,它的模型参数相对更容易确定,即依靠设定土的内摩擦角和黏聚力来确定土体的抗剪强度,可以较好地反映土体的受力特征。土体采用线弹性联合摩尔-库伦弹塑性模型,具体土体参数详见表 1。

对于锚杆,ABAQUS 用连接给定数据点的一系列直线来逼近材料光滑的应力-应变曲线,* PLASTIC 选项中的数据将材料的真实屈服应力定义为真实塑性应变的函数,选项的第一个数据定义材料的初始屈服应力,塑性应变值应该为 0。将钢材的本构关系选取为理想的弹塑性模型,相关参

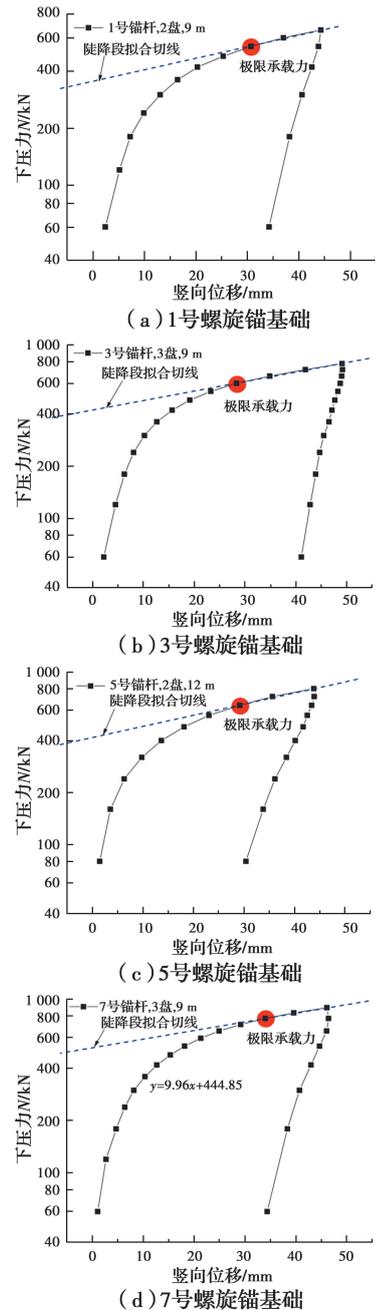


图 5 lg P-s 法确定螺旋锚杆承载力
 Fig. 5 Ultimate bearing capacity of screw anchor determined by lg P-s method



图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

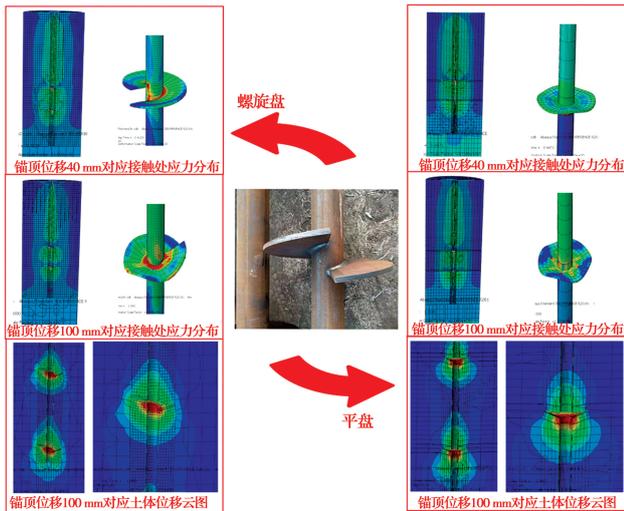


图 7 不同锚盘形式数值分析结果对比

Fig. 7 Comparison of numerical analysis results of different types of anchor plates

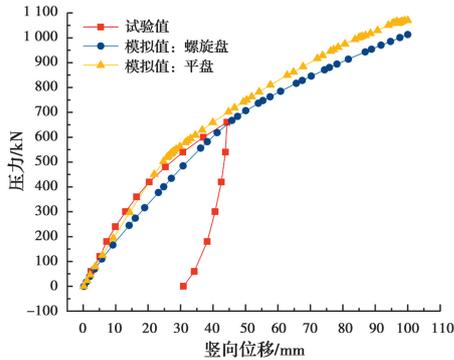


图 8 1 号螺旋锚基础下压荷载位移曲线

Fig. 8 Load displacement curve of compression test of No. 1 screw anchor

数见表 3。

表 3 金属本构的相关参数

Table 3 Parameters of the steel material in the FE model

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/MPa	泊松比	屈服强度/ MPa
7 850	2.1×10^5	0.26	345

3.3 有限元模型验证

为了能够较准确地模拟螺旋锚基础在土中的受力情况,数值分析的第一步是进行地应力平衡。由于初始状态的土单元在重力作用下会发生较大的竖向压缩变形,在土与锚杆接触面上,由于相对滑动过大而造成计算难以收敛。为了提高计算效率,在地应力平衡计算中不激活接触面,以便较快且准确地得到初始地应力场。

为了能够较真实地模拟锚杆周边土体对其摩阻

力,需要考虑螺旋锚钻入土的过程中对周边土体的挤压效应。地应力平衡分析完成之后,激活螺旋锚与土之间的接触面,但在此状态下锚杆与周围土的相互挤压力很小,此时,螺旋锚在竖向荷载作用下,其锚顶压力主要由锚盘承担,而锚杆上的侧摩阻力近似为 0,显然不符合基础的实际受力状态。为了更加真实地模拟压力作用下的螺旋锚在土中受力情况,需要在接触面上设置初始挤压力。初始挤压力的施加通过螺旋锚与土接触面之间的过盈分析来实现,过盈量取锚轴的半径。

在完成上述两步分析之后,初始地应力场如图 9 所示。在此基础上,对螺旋锚顶部中心点施加位移荷载以模拟现场的加载过程,同时记录锚顶的反力,得到锚顶荷载-位移曲线。将数值分析结果与试验结果进行对比,如图 8 和图 10、图 11 所示,两者荷载-位移曲线拟合较好,数值模型可靠。

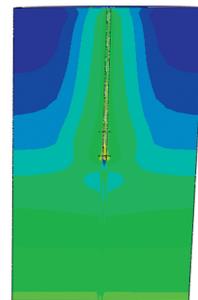


图 9 下压分析初始地应力场

Fig. 9 Initial geostress field of numerical analysis

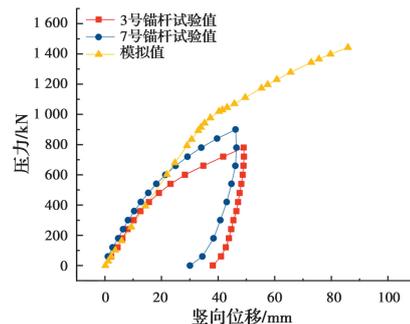


图 10 3 号、7 号螺旋锚基础数值模拟与现场实测对比

Fig. 10 Comparison between numerical simulation results and test results of No. 3 and No. 7 screw anchors

4 竖向荷载下螺旋锚受力性能

数值分析结果与试验结果的对比验证了有限元模型的可靠性。采用数值分析方法分析不同等级荷载下螺旋锚轴力、侧摩阻力分布和荷载分担规律。

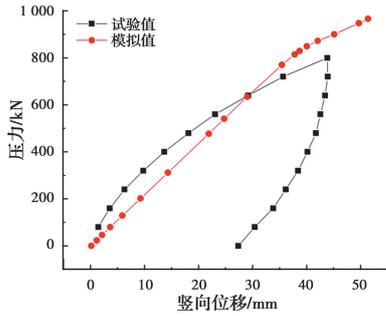
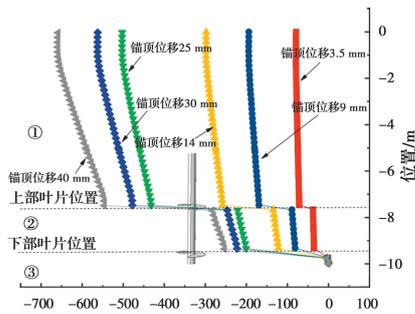


图 11 5号螺旋锚基础数值模拟与现场实测对比

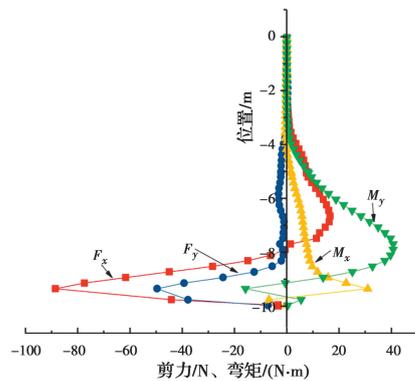
Fig. 11 Comparison between numerical simulation results and test results of No. 5 screw anchor

4.1 内力变化规律

基于有限元计算结果,提取锚杆沿纵向的轴力、剪力和弯矩,如图 12~图 14 所示。通过对比分析可知,螺旋锚在轴向压力作用下,锚杆上的剪力和弯矩非常小,可忽略不计。



(a) 1号受压锚杆轴力图



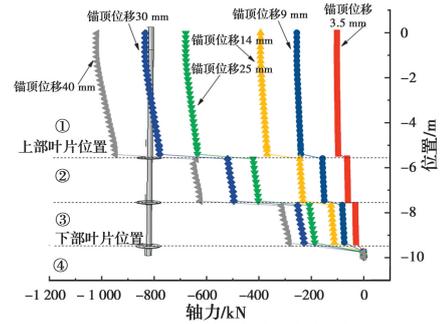
(b) 1号受压锚杆剪力弯矩图(对应40 mm)

图 12 1号螺旋锚基础的锚杆内力图

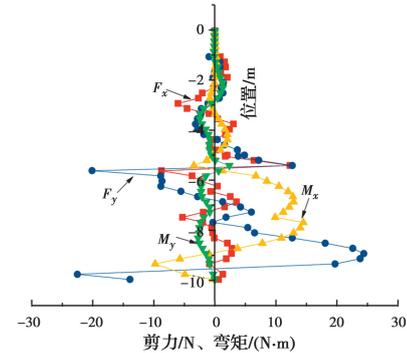
Fig. 12 Internal force diagram of screw anchor 1

对于锚杆轴力,随着锚顶位移的增加,轴力图①区段斜率逐渐增大,说明随着施加荷载增加,锚杆侧摩阻力逐渐增大。同时,在不同锚顶位移对应的螺旋锚基础的锚杆轴力在锚片附近均发生突变,说明锚片在螺旋锚基础的整个受力过程中均参与分担,即使初始加载时荷载和位移都很小。

如图 12(a)中的区段②、13(a)中的区段②和③



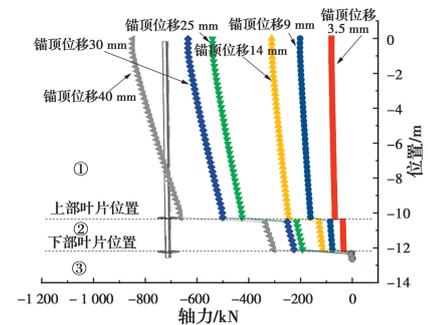
(a) 3、7号受压锚杆轴力图



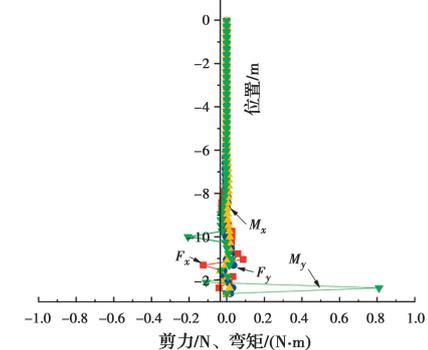
(b) 3、7号受压锚杆剪力弯矩图(对应40 mm)

图 13 3、7号螺旋锚基础的锚杆内力图

Fig. 13 Internal force diagram of screw anchor 3 and 7



(a) 5号受压锚杆轴力图



(b) 5号受压锚杆剪力弯矩图(对应40 mm)

图 14 5号螺旋锚基础的锚杆内力图

Fig. 14 Internal force diagram of screw anchor 5

以及 14(a)中的区段②所示,随着锚顶位移的增加该区段内的轴力图斜率也逐渐增加,说明锚片之间的锚杆侧阻对抵抗外部压力是有贡献的,并且与区

段①保持着同样的规律,但是该区段轴力图的斜率要小于区段①。

如图 12(a)中的区段③、13(a)中的区段④以及 14(a)中的区段③所示,该部分的轴力在 0 附近,说明该区段以上的锚盘端阻力和锚杆侧摩阻基本上已经全都抵消掉了外部压力的作用,同时也说明了锚杆底部端阻在整个受力过程中几乎不发挥作用。

4.2 侧向摩阻力变化规律

通过对锚杆内力的分析可知,锚杆侧摩阻在螺旋锚基础的整个受力过程中发挥着重要作用,如图 15~图 17 所示,随着锚顶位移的增加,锚杆侧摩阻逐渐增大。这是由于螺旋锚在轴向压力作用下会发生向下的整体位移,土体与螺旋锚的接触面存在摩擦力,螺旋锚周边的土体会随着基础一同发生向下的压缩变形。随着压力的增大,土体的竖向压缩也随之增大,土体越来越密实并且对螺旋锚基础的挤压力也越来越大,锚杆的侧摩阻也随之增大。

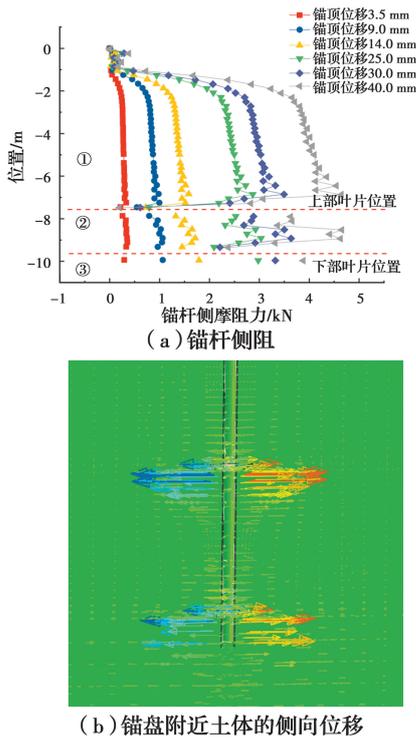


图 15 1号螺旋锚基础的锚杆侧向摩阻力

Fig. 15 Shaft friction of screw anchor 1 along depth

如图 15~图 17 所示,螺旋锚基础叶片附近的锚杆侧阻会突变减小。对叶片附件的土体变形分析可知,螺旋锚叶片在压力作用下会发生下凸变形,变形后的叶片会对周围土体产生侧向外推,从而使叶片附近的土体与锚杆脱离,如图 15~图 17 中的(b)所示,脱离部分的摩阻力为 0,未脱离部分仍然保持

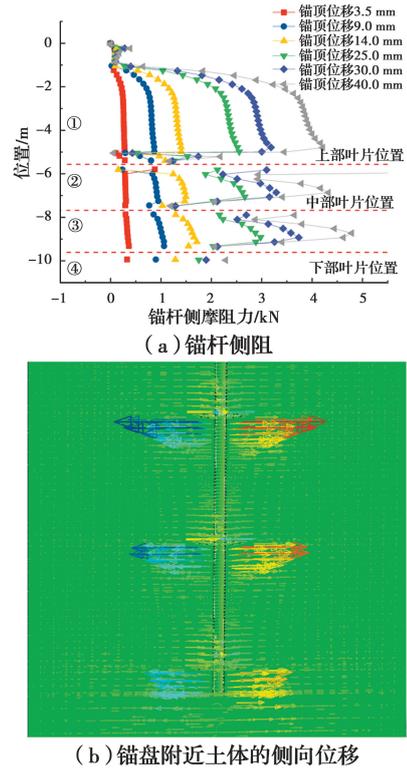


图 16 3、7号螺旋锚基础的锚杆侧向摩阻力

Fig. 16 Shaft friction of screw anchor 3 and 7 along depth

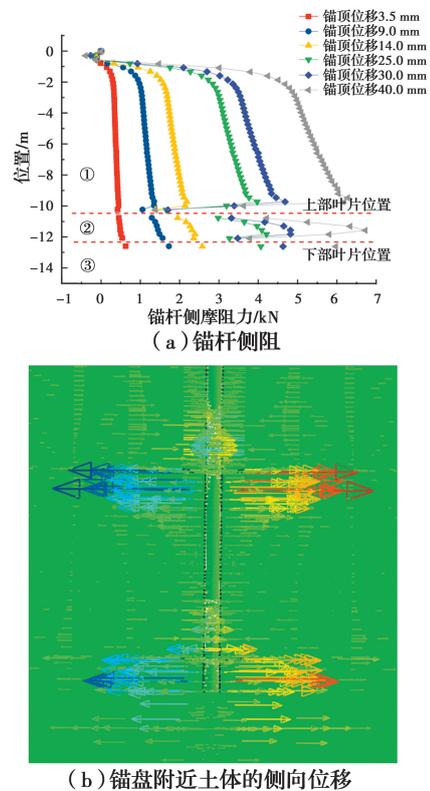


图 17 5号螺旋锚基础的锚杆侧向摩阻力

Fig. 17 Shaft friction of screw anchor 5 along depth

着原有的摩阻力,但叶片之间的锚杆侧摩阻整体来说还是削弱了。

4.3 荷载分担规律

通过分析可知,螺旋锚基础在轴向压力的作用下,其抵抗力主要由锚杆侧摩阻和锚片端阻来提供,锚杆端阻基本上不发挥作用,螺旋锚基础的荷载分担如图 18 所示。对于小叶片砂土中的螺旋锚基础,在竖向受荷过程中,首先是锚杆侧摩阻发挥作用,其次各个叶片由上至下相继发挥端承作用,最后下部叶片和锚杆底部发挥端承作用继续承担上部荷载^[10]。但是,对于大锚片黏土中的螺旋锚却显示出不一样的分担规律,见表 4~表 6,在荷载施加过程中,不同锚片之间分担的荷载基本相等,且锚片端阻分担的荷载占螺旋锚基础上总荷载的 75%~90%,

可见大叶片螺旋锚基础可以视为端承摩擦型桩。

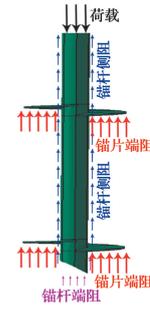


图 18 螺旋锚基础的荷载分担示意图

Fig. 18 Loading sharing diagram

表 4 1 号螺旋锚基础荷载分担比例

Table 4 Load sharing proportion of screw anchor 1

锚顶位移/mm	压力/kN	上锚片承担力/kN	下锚片承担力/kN	上锚片承担比例/%	下锚片承担比例/%	锚盘承担比例/%
3.5	78.75	33.52	34.43	0.43	0.44	0.86
9	193.86	80.44	79.51	0.41	0.41	0.83
14	297.74	123.75	119.73	0.42	0.40	0.82
25	502.31	210.80	197.29	0.42	0.39	0.81
30	562.10	231.01	218.89	0.41	0.39	0.80
40	659.00	262.50	249.11	0.40	0.38	0.78

表 5 3、7 号螺旋锚基础荷载分担比例

Table 5 Load sharing proportion of screw anchor 3 and 7

锚顶位移/mm	压力/kN	上锚片承担力/kN	中锚片承担力/kN	下锚片承担力/kN	上锚片承担比例/%	中锚片承担比例/%	下锚片承担比例/%	锚片承担比例/%
3.5	102.07	34.14	28.01	28.99	0.33	0.27	0.28	0.89
9	255.10	82.61	68.50	72.69	0.32	0.27	0.28	0.88
14	393.74	125.00	108.24	110.38	0.32	0.27	0.28	0.87
25	679.13	212.31	195.18	184.98	0.31	0.29	0.27	0.87
30	833.84	259.54	243.60	225.60	0.31	0.29	0.27	0.87
40	1 019.09	308.66	310.20	282.11	0.30	0.30	0.28	0.88

表 6 5 号受压锚荷载分担比例

Table 6 Load sharing proportion of screw anchor 5

锚顶位移/mm	压力/kN	上锚片承担力/kN	下锚片承担力/kN	上锚片承担比例/%	下锚片承担比例/%	锚盘承担比例/%
3.5	79.95	30.82	32.50	0.39	0.41	0.79
9	201.56	76.12	74.62	0.38	0.37	0.75
14	311.29	118.64	111.67	0.38	0.36	0.74
25	540.16	211.39	187.91	0.39	0.35	0.74
30	634.49	250.10	219.91	0.39	0.35	0.74
40	848.99	328.00	297.57	0.39	0.35	0.74

对比表 4 和表 6 可知,对于大叶片螺旋锚基础,

当叶片数量不变时,随着埋深的增加锚杆侧摩阻所

占的比重增加。对比表4和表5可知,螺旋锚基础埋深不变时,随着锚片数量的增加,锚杆侧摩阻所占的比重降低。

随着施加荷载的增大(表4),螺旋锚基础最上部锚片和最下部锚片承担荷载的比例都有所降低。其主要原因是,锚片弯曲变形降低了与土体的有效接触面,从而减少了锚片的承担荷载比例,且上部锚片承担的荷载比例基本上均略大于下部锚片。

随着施加荷载的增大(表5),螺旋锚基础最上部锚片承担荷载的比例随之降低,中部锚片承担的比例同步增加,下部锚片承担荷载比例基本不变。说明随着荷载的增大,上部锚片的变形要大于中部锚片,随着变形的不断加大,上部锚片承担的部分荷载传递到中部锚片。在螺旋锚受力过程中,上部锚片承受荷载的比例最大,中部锚片随着施加荷载的增加,承担荷载的比例逐渐增大,并且在锚顶位移大于25 mm时,其承担比例大于下部锚片。

随着施加荷载的增大(表6),螺旋锚基础最上部锚片承担荷载的比例基本不变,而下部锚片承担的荷载比例逐渐减小。

综上所述,大叶片螺旋锚基础随着施加荷载的增加,在不同锚片个数以及不同埋深的条件下,各个锚片端阻和锚杆侧摩阻分担荷载的比例发生不同规律的变化,最大变化幅值约为8%。锚片分担荷载的比例占据螺旋锚基础受荷过程的总荷载75%以上,各个锚片分担荷载比例最大差异约为6%。

5 结论

基于粉质黏土场地的大锚片螺旋锚基础的现场静载试验和数值模拟,分析基础在竖向压力作用下极限承载力的确定方法和荷载传递特性,得到以下结论:

1)对于大锚片螺旋锚基础,采用lg P - s 方法确定极限承载力较Livneh & EL. Naggar法与修正的Davisson法更合理。

2)螺旋锚在轴向压力作用下,锚杆上的剪力和弯矩与轴力相比非常小,可忽略不计。随着施加荷载增加,锚杆侧摩阻力逐渐增大。在不同锚顶位移对应下的螺旋锚基础的锚杆轴力在锚片处均发生突变,锚片在螺旋锚基础的整个受力过程中均参与承担外部压力。

3)大锚片螺旋锚基础随着施加荷载的增大,在

不同锚片个数以及不同埋深的条件下,各个锚片端阻和锚杆侧摩阻分担荷载的比例发生不同规律的变化,最大变化幅值约为8%。锚片分担的荷载占据螺旋锚基础受荷过程的主要部分(75%以上),各个锚片分担荷载比例最大差异约为6%。建议在实际工程中尽可能将叶片布置在承载力较高的土层中,并且各个锚片可近似认为对基础的承载力贡献相同。

未来的研究工作中需进一步对大锚片螺旋锚基础在不同的锚片数量和间距下进行参数分析,以揭示大锚片螺旋锚基础在压力荷载作用下的内力传递机理和不同锚片之间的分配机制,为该类型基础承载力计算理论研究提供支撑。

参考文献:

- [1] 王钊,刘祖德,程葆田.螺旋锚的试制和在基坑支护中的应用[J].土木工程学报,1993,26(4):47-53.
WANG Z, LIU Z D, CHENG B T. Trial-produce of screw anchor and its application in fencing foundation pit [J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(4): 47-53. (in Chinese)
- [2] CLEMENCE S P, LUTENEGGER A J. Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks [J]. DFI Journal - the Journal of the Deep Foundations Institute, 2015, 9(1): 21-41.
- [3] DEMIR A, OK B. Uplift response of multi-plate helical anchors in cohesive soil [J]. Geomechanics and Engineering, 2015, 8(4): 615-630.
- [4] 胡伟,刘顺凯,张亚惠,等.单叶片全尺寸螺旋锚桩竖向拉拔试验研究[J].土木建筑与环境工程,2017,39(5):31-39.
HU W, LIU S K, ZHANG Y H, et al. Uplift loading test on full-scale single blade screw anchor pile [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(5): 31-39. (in Chinese)
- [5] WANG T F, LIU J K, ZHAO H G, et al. Experimental study on the anti-jacking-up performance of a screw pile for photovoltaic stents in a seasonal frozen region [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2016, 17(7): 512-524.
- [6] WANG T F, LIU J K, TIAN Y D, et al. Frost jacking characteristics of screw piles by model testing [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 138: 98-107.
- [7] 王腾飞,刘建坤,邵博文,等.螺旋桩冻拔特性的模型试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(6):

- 1084-1092.
WANG T F, LIU J K, TAI B W, et al. Model tests on frost jacking behaviors of helical steel piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (6): 1084-1092. (in Chinese)
- [8] 张昕. 螺旋锚锚周土体变形试验与抗拔承载力计算模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014: 3-6.
ZHANG X. Experimental analysis of soil deformation around uplifting screw anchors and theoretical research of uplifting capacity models [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014: 3-6. (in Chinese)
- [9] 王希云. 螺旋钢桩设计参数对抗压承载性能的影响研究[J]. 路基工程, 2019(3): 57-61.
WANG X Y. Study on influence of design parameters of steel spiral pile on compressive bearing capacity [J]. Subgrade Engineering, 2019(3): 57-61. (in Chinese)
- [10] 邵康, 苏谦, 刘凯文, 等. 竖向受压下考虑安装扰动螺旋钢桩数值模拟分析与现场载荷试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2570-2581.
SHAO K, SU Q, LIU K W, et al. Field test and numerical analysis of a helical steel pile under vertical compression loads considering installation effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2570-2581. (in Chinese)
- [11] 黄连壮, 陶文秋, 刘利民, 等. 大锚盘螺旋锚基础试验与应用[J]. 电力勘测设计, 2007(5): 10-13.
HUANG L Z, TAO W Q, LIU L M, et al. Testing of foundation of the screw anchor [J]. Electric Power Survey & Design, 2007(5): 10-13. (in Chinese)
- [12] LIVNEH B, EL NAGGAR M H. Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(8): 1142-1155.
- [13] ELKASABGY M, EL NAGGAR M H. Axial compressive response of large-capacity helical and driven steel piles in cohesive soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(2): 224-243.
- [14] PERKO H A. Helical piles: A practical guide to design and installation [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009: 205-207.
- [15] 沈保汉. 评价桩工作特性的新方法——P/PU-S/Su 曲线法[J]. 建筑技术开发, 1994, 21(2): 11-21.
SHEN B H. A new method for evaluating the working characteristics of pile-P/PU-S/Su curve method [J]. Building Technology Development, 1994, 21(2): 11-21. (in Chinese).
- [16] 张伟建. ABAQUS 6.12 有限元分析从入门到精通 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 57-68.
ZHANG W J. ABAQUS 6.12 finite element analysis from introduction to mastery [M]. Beijing: China Machine Press, 2014: 57-68. (in Chinese)
- [17] 金成云. 螺旋锚基础的上拔理论研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2006.
JIN C Y. Research on the uplift theory of screw anchor foundation [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2006. (in Chinese)
- [18] 郝冬雪, 宋阳, 陈榕, 等. 黏土中螺旋锚几何尺寸对上拔承载力影响的数值分析[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(4): 70-75.
HAO D X, SONG Y, CHEN R, et al. Numerical analysis of influences of helical anchor geometry on uplift capacity in clay [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(4): 70-75. (in Chinese)
- [19] 符胜男. 砂土中螺旋锚上拔承载特性研究[D]. 吉林吉林市: 东北电力大学, 2016: 22-24.
FU S N. The uplift capacity of helical anchors in sand [D]. Jilin, Jilin: Northeast Dianli University, 2016: 22-24. (in Chinese)
- [20] 袁驰, 张新, 郝冬雪, 等. 松砂中螺旋锚上拔承载力及破坏模式数值分析[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39 (6): 50-57.
YUAN C, ZHANG X, HAO D X, et al. Numerical analysis of the uplift capacity and the failure mode of helical anchors in loose sand [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019, 39(6): 50-57. (in Chinese)

(编辑 章润红)