

# 输电线路岩石嵌固基础抗拔试验及数值模拟分析<sup>①</sup>

郑卫锋<sup>1</sup>, 韩杨春<sup>1,2</sup>, 聂兰磊<sup>3</sup>

(1.中国电力科学研究院,北京 100192; 2.中国矿业大学(北京),北京 100083; 3.燕山大学,河北 秦皇岛 066044)

**摘要:**为了研究全风化-强风化地区岩石嵌固基础抗拔性能及土体破坏模式,基于安徽省太湖县岩石嵌固基础抗拔性能现场试验,结合数值模拟对不同埋深、不同型式的岩石嵌固基础的抗拔性能进行分析。发现在基础埋深较浅时,坛子型和掏挖型基础抗拔性能及土体破坏模式大体相近;当基础埋深较深时,掏挖型基础抗拔性能明显优于坛子型。同时,对两种基础型式的经济效益进行比较分析,研究结果表明:掏挖型嵌固基础抗拔性能更优,同时具有更好的经济性和环保性,推荐在风化性较强的岩石地基输电线路工程中推广应用。

**关键词:** 岩石嵌固基础; 抗拔试验; 数值模拟; 坛子型; 掏挖型

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)05-0738-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0738

## Uplift Tests and Numerical Simulation Analysis of Transmission Line with Rock Embedded Foundation

ZHENG Wei-feng<sup>1</sup>, HAN Yang-chun<sup>1,2</sup>, NIE Lan-lei<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Yanshan University, Qinhuangdao 066044, Hebei, China)

**Abstract:** In this study, we use numerical simulation to analyze the uplift performance and failure modes of two types of rock embedded foundations with different buried depths in strongly weathered areas. We performed uplift bearing capacity tests on rock embedded foundations in Taihu county, Anhui province. The results show that the uplift bearing behaviors and failure modes of jar-type and belled-piers foundations are similar when their buried depths are shallow. When the buried depth of the foundation is deep, however, the uplift bearing behavior of the belled-piers foundation is obviously better than that of the jar-type foundation. In addition, we compare and analyze the economic benefits of these two foundation types. Our research results show that the tensile strength, economy, and environmental protection afforded by belled piers are superior. Therefore, we recommend that belled-pier foundations be applied in transmission line projects with strongly weathered rock foundations.

**Key words:** rock embedded foundation; uplift test; numerical simulation; jar type; belled piers

### 0 引言

随着国民经济的高速发展,对电力能源依赖性越来越强,而我国幅员辽阔,能源分布不均,因此建

立完善的输电网络必不可少。输电线路沿线的工程地质条件越来越复杂,所采用的基础型式也多种多样<sup>[1-3]</sup>。在强风化-中等风化的岩石地区通常采用岩

① 收稿日期: 2016-01-31

基金项目: 国家电网公司科技项目(GCB17201400135)

作者简介: 郑卫锋(1977—),男,博士,主要从事电力工程地基基础方面的研究工作。E-mail: zhengwf@epri.ac.cn。

石嵌固基础。岩石嵌固基础是指利用机械或人工在岩石地基中钻挖出基坑形状,下入钢筋骨架后,直接浇筑混凝土并经过一定时间强度养护所形成的基础<sup>[4]</sup>。这种基础适用范围广、材料消耗低、施工简易,具有基坑开挖面积小、环境破坏低、能充分利用原状土承载能力的优点<sup>[5]</sup>。

岩石嵌固基础主要型式包括传统坛子型(TZ)与现在常用的掏挖型(TW)两种型式。目前,常见的岩石嵌固基础埋深和扩大端直径的比值(深径比)一般不超过 4.0,根据 Pacheco 等<sup>[6]</sup>的研究,这种基础破坏模式属于浅基础破坏模式,即上拔荷载作用下基础抗拔土体滑动面将一直延伸到地表,基础抗拔极限承载力随埋深增加而增加。Mors<sup>[7]</sup>、Stas 等<sup>[8]</sup>、鲁先龙等<sup>[9]</sup>先后通过理论研究、模型和现场试验研究了浅基础抗拔承载性能,并提出了上拔极限承载力计算理论。但关于深埋深(>5.0 m)坛子型及掏挖型嵌固基础的抗拔性能及破坏模式对比分析的相关研究文献较少。

本文基于全风化-强风化地区岩石嵌固基础抗拔性能现场试验,结合数值模拟计算,从极限承载力、荷载-位移曲线、岩体破坏模式对比分析不同埋深坛子型及掏挖型基础的抗拔性能,结合经济效益分析,优选出山区输电线路嵌固基础的适用型式,为

全风化-强风化软岩地区电网工程抗拔基础设计提供参考。

## 1 现场试验

### 1.1 工程地质概况

试验场地位于安徽省安庆市太湖县。该场地主要为侏罗系全风化泥质砂岩夹泥岩(残积土)、强风化泥质砂岩、中等风化砂砾岩。场地地层自上而下为:

(1) 全风化泥质砂岩夹泥岩(残积土):灰黄色,全风化,已风化成土状,可见原岩结构,具可塑性,手捏可碎。层厚 0~3 m。

(2) 强风化泥质砂岩:灰黄色,强风化,泥质结构,块状构造。岩体较破碎,裂隙发育完全,岩芯呈短柱状。层厚 3~8.4 m。

(3) 中等风化砂砾岩:青灰色,中风化,模态结构,块状构造,岩屑颗粒较大,泥质胶结,主要成分为石英砂岩、灰岩等。岩体较破碎,裂隙较发育。层厚 8.4~12 m,本层未被揭穿。

### 1.2 基础尺寸

根据现场地形条件及地质条件,设计 8 个试验基础进行现场试验,基础基本形式及尺寸如图 1 所示。

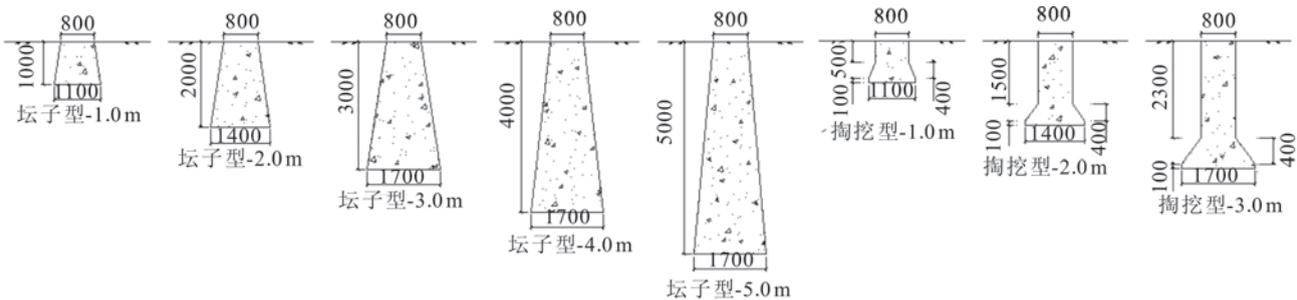


图 1 基础尺寸(单位:mm)

Fig.1 Foundation size (Unit:mm)

### 1.3 加载方案

试验采用慢速荷载维持法,但现场试验过程中,可根据以往类似工程经验对加载初期的低荷载采用快速荷载法。具体加卸载方案、加卸载终止条件均严格参照相关规范进行<sup>[10-11]</sup>。

### 1.4 荷载-位移曲线特征及承载力确定

试验过程中,通过测试基顶位移得到试验基础荷载-位移曲线(图 2)。

参考鲁先龙等<sup>[12]</sup>对戈壁扩底掏挖基础荷载-位移曲线的分析方法,图 2 中荷载-位移曲线可划分为

图 3 所示 3 阶段变化规律。初始弹性直线段  $OL_1$ : 荷载-位移曲线近似直线,基础位移随上拔荷载呈线性增加,此时土体处于弹性状态;弹塑性曲线过渡段  $L_1L_2$ : 基础位移随上拔荷载的增加呈非线性变化,位移变化速率明显大于初始弹性阶段,土体处于弹塑性状态;直线破坏段  $L_2L_3$ : 基础位移随上拔荷载增加而迅速增加,较小的荷载增量即可使基础产生较大位移,且地表裂缝迅速贯通,在地表形成环状和放射状裂缝,此时判断基础完全失稳。因此取直线破坏段起点  $L_2$  对应的荷载、位移为塑性极限承载

力和位移,即基础的极限抗拔荷载。

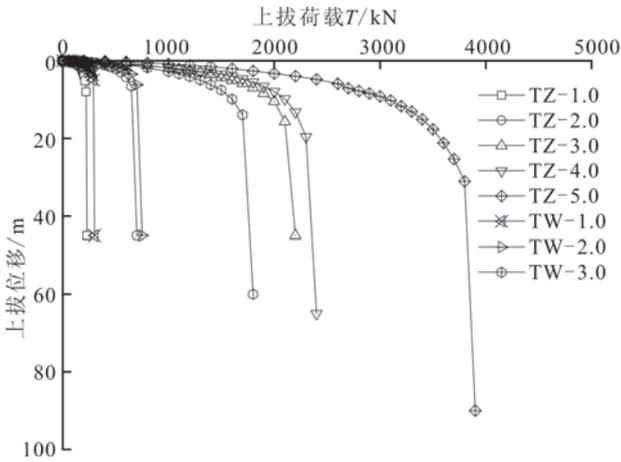


图2 实测荷载-位移曲线

Fig.2 Measured load-displacement curves of all foundations

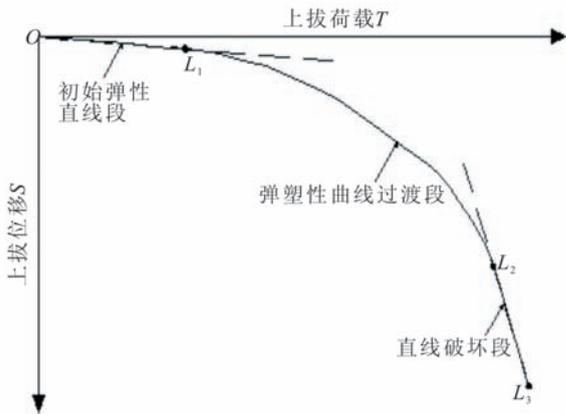


图3 基础抗拔荷载-位移特征

Fig.3 Characteristics of uplift load-displacement curve

## 2 数值模拟分析

实际现场试验条件下,对于埋深超过 5 m 的岩石嵌固基础,基础中锚杆长度较长,锚筋拉断、锚筋抽出、锚固体抽出这 3 种破坏模式最薄弱的环节往往先于岩石剪切破坏模式发生,很难得到相应的岩石剪切破坏的荷载-位移曲线。因此采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件进行研究。通过与现场试验结果的拟合分析,得到合理的计算参数,在此基础上进行埋深大于 5 m 的坛子型及掏挖型岩石嵌固基础的抗拔试验模拟,得到相应的荷载-位移曲线及塑性区示意图,对两种型式的岩石嵌固基础的抗拔性能进行对比分析。

### 2.1 计算模型

计算模型分为内部基础及外部岩体两部分。考虑到模拟对象的荷载和变形均呈空间轴对称,选取 1/2 模型计算以简化计算过程。内部基础的尺寸与

现场试验严格一致(图 1)。对于现场试验并未设计的大埋深基础(5 m 以下坛子型基础及 3 m 以下掏挖型基础),选用与 5 m 坛子型基础及 3 m 掏挖型基础相同的上下底及扩头尺寸,延长垂直方向深度得到计算模型。考虑到计算模型的基础埋深跨度较大(1~10 m),采用相同的外部模型明显不利于提高计算效率,因此结合基础的预估影响范围,设计外部模型长宽为 14 m×7 m,高度由基础高度向下延伸 1 m,例如 3 m 坛子型基础计算模型尺寸为 14 m×7 m×4 m(图 4)。计算过程中,模型侧面施加水平约束,地面施加垂直向约束。

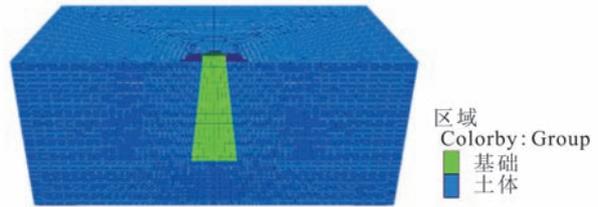


图4 数值模型示意图

Fig.4 Sketch of the numerical model

### 2.2 计算参数

基础及周边岩体的计算参数见表 1。

表 1 岩体及基础参数表

Table 1 Parameters of rock and foundation

材料名称	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$C/\text{kPa}$	$\phi/(^{\circ})$
岩体	340	0.3	18	48	25
基础	30.00	0.2	25	-	-

基础本体设为弹性模型,选用 C30 混凝土基础参数,弹性模量为 30 GPa,泊松比  $\nu=0.2$ 。周边岩体设为 Mohr-Coulomb 模型,岩体参数通过现场力学参数测试得到,现场试验并未直接给出土体的弹性模量及抗拉强度的参数。抗拉强度取土体抗压强度的 3%~5%,弹性模量  $E$  取值范围则是通过实测变形模量  $E_0$  换算得到,换算公式如下:

$$E = (9 \sim 15) \frac{(2\nu - 1)^2 (\nu + 1)}{1 - \nu} E_0 \quad (1)$$

### 2.3 数值模拟结果与现场试验结果拟合分析

采用图 3 所示的分析方法,分析荷载-位移曲线的试验值与模拟值,计算结果如表 2 所列。坛子型基础极限上拔荷载模拟值与试验值的误差最高 32%,最低 7%,平均误差 13.57%;掏挖型基础极限上拔荷载模拟值与试验值的误差最高 25%,最低 3%,平均误差 13.4%。得出结论:基础抗拔性能的数值模拟结果与现场试验结果拟合程度较高,所选

计算参数合理,适宜进行更深埋深基础的数值模拟计算。

表 2 计算结果

Table 2 Computing results

基础型式	基础埋深/m	极限荷载 T/kN		误差/%	上拔位移 S/mm	
		模拟值	试验值		模拟值	试验值
坛子型	1.0	290	220	32	6.37	8.00
	2.0	750	650	15	4.13	6.61
	3.0	1500	1600	6	7.21	7.21
	4.0	2400	2300	4	21.02	19.6
	5.0	3500	3800	7	34.01	31.06
掏挖型	1.0	280	290	3	4.85	5.00
	2.0	800	700	14	5.76	6.22
	3.0	1800	1700	6	12.79	13.90

### 3 岩石嵌固基础抗拔特性分析

#### 3.1 坛子型基础抗拔特性分析

1~10 m 埋深坛子型基础数值模拟试验的荷载-位移曲线如图 5 所示。结合塑性区发展过程图(图 6),分析坛子型基础抗拔特性:

(1) 当基础埋深较浅时(1~3 m),如图 6(a)所示,基础呈浅埋深破坏模式:塑性区最早出现在基础底部周边土体,呈现出自下而上发展的破坏模式,当塑性区完全贯通时,判断基础完全失稳。对应的荷载-位移曲线均出现“陡变式”位移突增,突变点荷载

即为基础的极限上拔荷载。

(2) 当基础埋深较深时(4~5 m),如图 6(b)所示,基础呈现中等埋深破坏模式:塑性区最早出现在基础底部周围土体,并沿基础侧部向上发展,直至与地表贯通,此时基础尚未失稳;塑性区进一步沿水平方向扩张,直至位移出现突增,此时判断基础完全失稳。对应的荷载-位移曲线逐渐表现出“缓变式”特性,曲线中弹塑性过渡段明显增长,但临近极限上拔荷载时,曲线仍出现位移突增。

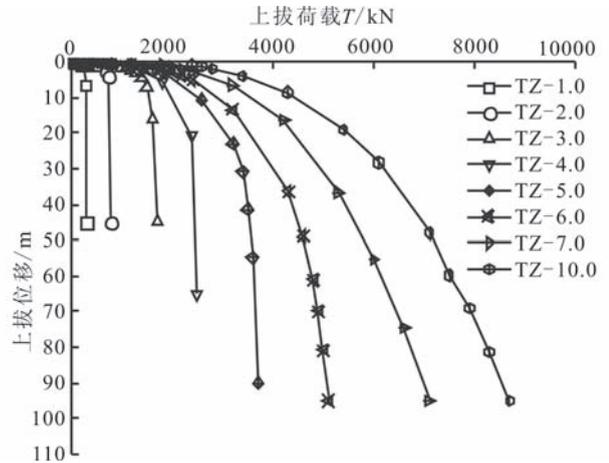


图 5 不同埋深坛子型基础 Q-S 曲线模拟值  
Fig.5 Simulated Q-S curves of jar type foundations with different buried depths

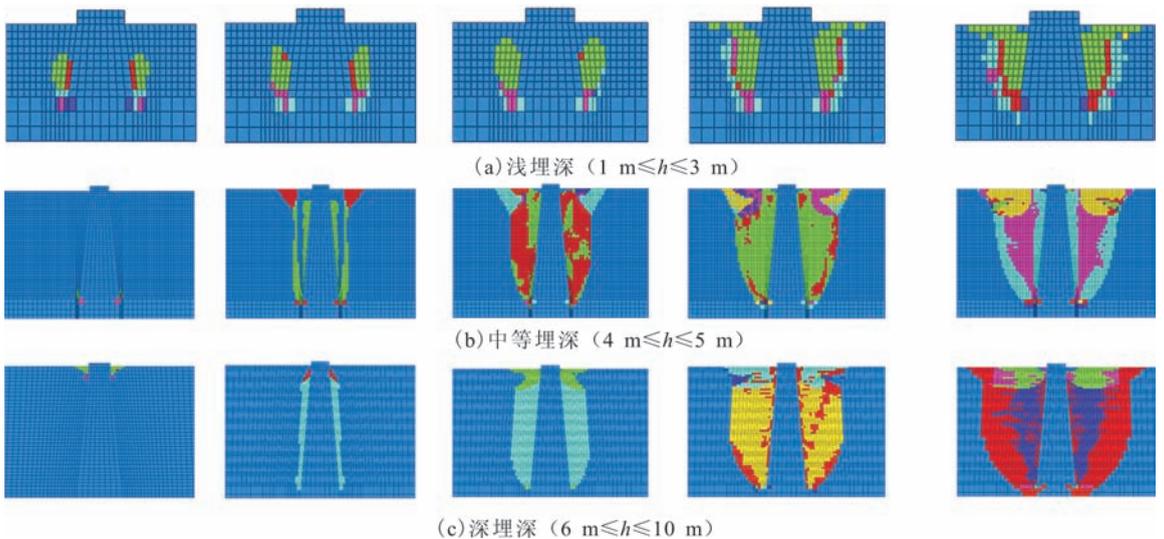


图 6 不同埋深坛子型基础塑性区发展模式

Fig.6 Plastic zone's development model of jar type foundations with different buried depths

(3) 当基础埋深超过 5 m 时,如图 6(c)所示,基础呈现深埋深破坏模式:塑性区最早出现在基础顶部周边土体,并沿基础侧部自上而下发展;与基础底部土体贯通后,塑性区开始沿水平方向自中心向四

周扩张,塑性区体积不断增大,直至很小的荷载增量即可产生很大的上拔位移,此时判断基础完全失稳。对应的荷载-位移曲线完全过渡为“缓变式”,曲线不会出现明显的位移突变点,采用图 3 中直线破坏起

始点  $L_2$  对应的上拔荷载及上拔位移作为基础极限上拔荷载及极限上拔位移。

### 3.2 掏挖型基础抗拔特性分析

1~10 m 埋深掏挖型基础数值模拟试验的荷载-位移曲线如图 7 所示,结合塑性区发展过程图(图 8),分析不同埋深掏挖型基础抗拔特性:

(1) 当基础埋深较浅时(1~2 m),如图 8(a)所示,基础呈现浅埋深破坏模式:塑性区最早出现在基础底部周边土体,呈现出自下而上发展的破坏模式,当塑性区完全贯通时,判断基础完全失稳。相应的荷载-位移曲线出现出“陡变式”位移突增,位移突变点荷载即为基础的极限上拔荷载。

(2) 当基础埋深较深时(3~5 m),如图 8(b)所示,基础呈现中等埋深破坏模式:塑性区最早出现在基础底部周围土体,随着荷载的增加,塑性区自下而上发展的同时,地表相应位置亦出现塑性区,二者逐渐贯通,此时基础尚未失稳;塑性区进一步沿水平向扩张,直至位移出现突增,此时判断基础完全失稳。对应的荷载-位移曲线逐渐表现出“缓变式”特性,曲线中弹塑性过渡段明显增长,当临近极限上拔荷载时,曲线仍出现位移突增。

(3) 当基础埋深超过 5 m 时,如图 8(c)所示,基础呈现深埋深破坏模式:塑性区最早出现在基础底部周边土体,并自下而上发展,发展到基础中段,塑性区逐渐沿水平向扩张形成“球形”塑性区;随着荷载进一步增大,“球形”塑性区体积不再扩大,基础上部则逐渐出现“倒梯形”塑性区,二者逐渐贯通扩

张,直至基础完全失稳,此时塑性区整体呈“U”形分布。对应的荷载-位移曲线完全过渡为“缓变式”,曲线不会出现明显的位移突变点,采用图 3 中直线破坏起始点  $L_2$  对应的上拔荷载及上拔位移作为基础极限上拔荷载及极限上拔位移。

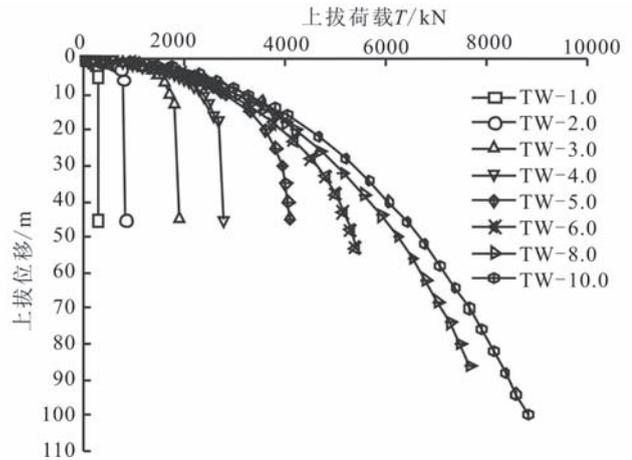


图 7 不同埋深掏挖型基础 Q-S 曲线模拟值  
Fig.7 Simulated Q-S curves of belled piers foundation with different buried depths

### 3.3 坛子型及掏挖型基础抗拔特性对比

不同埋深坛子型及掏挖型基础计算结果如表 3 及图 9 所示,对比分析两种基础抗拔特性:

当基础埋深较浅时(1~3 m),坛子型及掏挖型基础均表现出相近的抗拔特性,基础的破坏模式及极限荷载十分相近。当基础埋深较深时(4~5 m),掏挖型基础极限荷载略大于坛子型基础,二者破坏

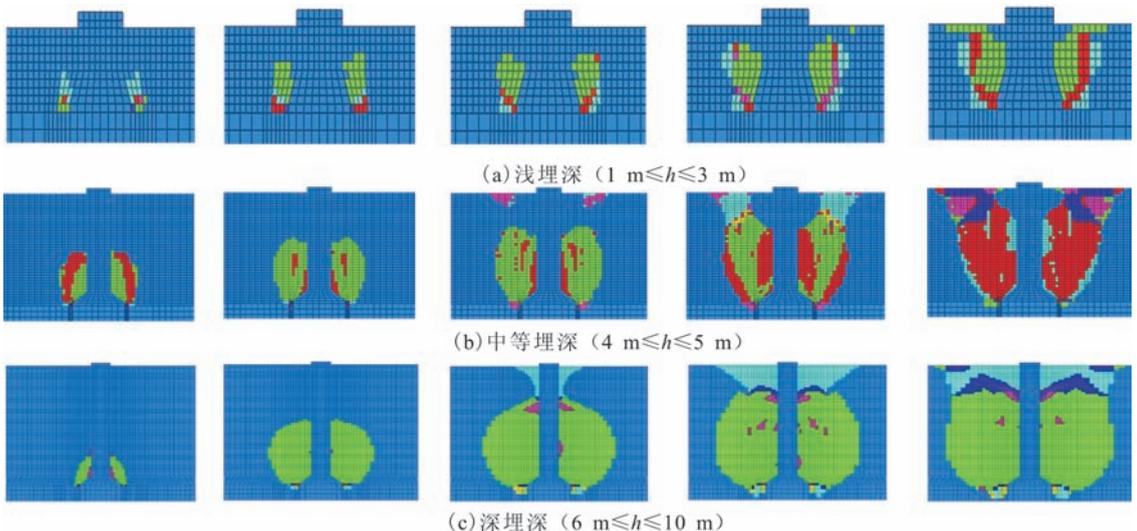


图 8 不同埋深掏挖型基础塑性区发展模式

Fig.8 Plastic zone's development model of belled piers foundations with different buried depths

模式略有不同,但整体规律相近:自下而上贯通,自中心向四周扩张,基础到达极限荷载时塑性区范围不再扩张。当基础埋深超过 5 m 时,掏挖型基础极限荷载略大于坛子型基础,二者破坏模式差异较大:坛子型基础塑性区最初出现在基础地表周围土体,自上而下沿基础侧边贯通后向四周扩张,直至基础失稳;掏挖型基础塑性区则自下而上呈“球形”扩张,上部土体则呈“倒梯形”破坏,二者逐渐贯通直至基础失稳。

表 3 坛子型及掏挖型基础计算结果表

Table 3 Calculation results for jar type foundations and belled piers foundations

基础埋深/m	极限荷载 T/kN							
	1	2	3	4	5	6	8	10
坛子型	290	750	1 500	2 400	3 500	4 800	6 300	7 900
掏挖型	280	800	1 800	2 700	3 935	5 288	6 797	8 297

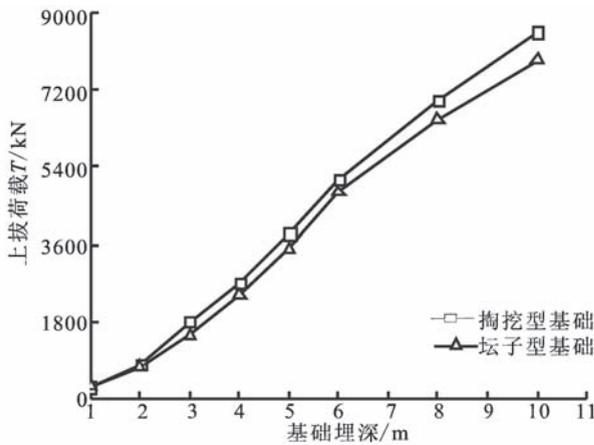


图 9 坛子型及掏挖型基础极限上拔荷载对比  
Fig.9 Ultimate uplift load comparison between jar type foundations and belled piers foundations

### 4 经济效益分析

在满足给定的安全和可靠的前提下,基础造价低、抗拔性能强是所有送电线路杆塔基础设计所追求的目标。对比浅埋深坛子型基础与掏挖型基础经济效益如表 4 所列。

表 4 不同埋深基础经济比较

Table 4 Economic benefit comparison of foundations with different buried depths

埋深/m	混凝土方量/m		单方混凝土提供承载力/(kN·m <sup>-3</sup> )		单方混凝土承载力增量/%
	坛子型	掏挖型	坛子型	掏挖型	
1	0.71	0.63	408	444	9
2	1.95	1.30	385	615	60
3	3.84	2.15	391	837	114

在相同的埋深下,掏挖型基础能耗更少的混凝土方量提供更大的极限承载力,经济效益明显。同时,根据现场施工经验,当基础埋深较深时,坛子型基础侧部坡度施工难度大,且斜坡面土体极易垮塌,养护成本高;而掏挖型基础的施工难点集中在扩头部位,可以借助机械化施工完成,大大降低了施工难度及施工成本。因此掏挖型基础更加符合“资源节约型、环境友好型”输电线路的建设要求。

### 5 结论

基于全风化-强风化地区岩石嵌固基础现场试验及数值模拟分析,认为:(1)基础埋深较浅时,坛子型及掏挖型基础的抗拔性能比较接近,基础的极限荷载差异不大,均表现出浅基础破坏模式。(2)基础埋深较深时,掏挖型基础的抗拔性能强于坛子型基础,且其极限抗拔荷载略大于同埋深的坛子型基础,二者岩体的破坏模式完全不同:坛子型基础自上而下贯通,并向四周扩张直至基础失稳;掏挖型基础自下而上膨胀产生“球形”塑性区,基础上部土体则在临近基础极限荷载时呈“倒梯形”扩展,二者逐渐贯通直至形成“U”形塑性区,此时基础完全失稳。

此外,掏挖型基础在混凝土、钢材、造价方面均有较大节省,具有更好的经济性,符合“资源节约型、环境友好型”输电线路的建设要求,推荐在风化性较强的岩石地基输电线路工程中推广应用。

### 参考文献(References)

[1] 刘振平,贺怀建,白世伟,等.软基中 500 kV 输电桩板塔基现场试验与数值模拟[J].岩土力学,2012,33(4):1031-1039.  
LIU Zhen-ping, HE Huai-jian, BAI Shi-wei, et al. Field Test and Numerical Simulation of Pile-slab Foundation of 500 kV Transmission Line Tower in Silt[J].Rock and Soil Mechanics, 2012,33(4):1031-1039.(in Chinese)

[2] 程永锋,邵晓岩,朱全军.我国输电线路基础工程现状及存在的问题[J].电力建设,2002,23(3):32-34.  
CHENG Yong-feng, SHAO Xiao-yan, ZHU Quan-jun. Current Situation of Foundation Works and Existing Problems for Transmission Lines in China[J].Electric Power Construction, 2002,23(3):32-34.(in Chinese)

[3] 鲁先龙,程永锋.我国输电线路基础工程现状与展望[J].电力建设,2005,26(11):25-27.  
LU Xian-long, CHENG Yong-feng. Current Status and Prospect of Transmission Tower Foundation Engineering in China [J].Electric Power Construction, 2005,26(11):25-27.(in Chinese)

[4] 鲁先龙,乾增珍,童瑞铭,等.戈壁地基扩底掏挖基础抗拔试验及其位移计算[J].岩土力学,2014,35(7):1871-1875.

- LU Xian-long, QIAN Zeng-zhen, TONG Rui-ming, et al. Uplift Field Tests and Displacement Prediction on Belled Piers in Gobi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1871-1875. (in Chinese)
- [5] 鲁先龙, 乾增珍, 崔强. 黄土地基掏挖扩底基础抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 648-652.  
LU Xian-long, QIAN Zeng-zhen, CUI Qiang. Experimental Investigation on Uplift Behavior of Belled Piers in Loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 648-652. (in Chinese)
- [6] Pacheco M P, Danziger F A B, Pereira Pintoc. Design of Shallow Foundations under Tensile Loading for Transmission Line Towers: an Overview[J]. Engineering Geology, 2008, 101(3-4): 226-235.
- [7] MORS H. Methods of Dimensioning for Uplift Foundations of Transmission Line Towers[C]//Conference Internationale des Grands Reseaux Electrique a Haute Tension. Paris: international Council on Large Electric System, 1964, 210: 1-14.
- [8] Stas C V, Kulhawy F H. Critical Evaluation of Design Methods for Foundations under Axial Uplift and Compression Loading[R]. California: Electric Power Research Institute USA, 1984.
- [9] 鲁先龙, 杨文智, 童瑞铭, 等. 输电线路掏挖基础抗拔极限承载力的可靠度分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(1): 9-15, 44.  
LU Xian-long, YANG Wen-zhi, TONG Rui-ming, et al. Reliability Analysis of Ultimate Uplift Bearing Capacity of Belled Pier Foundation in Transmission Line Engineering[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(1): 9-15, 44. (in Chinese)
- [10] GB50007—2011, 建筑地基基础设计技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
GB50007—2011, Code for Design of Building Foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)
- [11] DL/T 5219—2014, 架空输电线路基础设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.  
DL/T 5219—2014, Technical Code for Design Foundation of Overhead Transmission Line[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese)
- [12] 鲁先龙, 程永锋, 戈壁抗拔基础承载性能试验与计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.  
LU Xian-long, CHENG Yong-feng. Experimental and Numerical Study on the Uplift Bearing Capacity of Foundations in Gobi[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese)

\*\*\*\*\*

(上接 737 页)

- [19] 曹金凤, 王旭春, 孔亮. Python 语言在 Abaqus 中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
CAO Jin-feng, WANG Xu-chun, KONG Liang. Application of the Python Language in Abaqus[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 吕西林, 苏宁粉, 周颖. 复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 5(32): 19-25.  
LV Xi-lin, SU Ning-fen, ZHOU Ying. IDA-based Seismic Fragility Analysis of a Complex High-Rise Structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 5(32): 19-25. (in Chinese)
- [21] 林旭川, 陆新征, 廖志伟, 等. 基于分层壳单元的 RC 核心筒结构有限元分析和工程应用[J]. 土木工程学报, 2009(3): 49-54.  
LIN Xu-chuan, LU Xin-zheng, MIAO Zhi-wei, et al. Finite Element Analysis and Engineering Application of RC Core-tube Structures Based on the Multi-layer Shell Elements[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 49-54. (in Chinese)
- [22] Zheng Ming Huang. Inelastic and Failure Analysis of Laminated Structure by ABAQUS Incorporated with a General Constitutive Relationship[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007, 26(11): 1135-1181.