

# Tests on Uplift Behavior of Rock Socket Foundation

Wenzhi Yang, Ruiming Tong, Xianlong Lu

Geotechnical Engineering Laboratory, China Electric Power Research Institute, Beijing  
Email: angelywz@163.com

Received: Apr. 15<sup>th</sup>, 2019; accepted: Apr. 30<sup>th</sup>, 2019; published: May 7<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In order to study the uplift behaviors and sensitivity of rock foundation under uplift load, load tests on straight shaft type and belled type rock socket foundations with different buried depths, shaft diameter and belled-butt diameter were carried out. Test results show that there is a positive linear correlation between the uplift capacity of rock socket foundation and the foundation-rock contact area. Therefore, the calculation model of uplift capacity of rock socket foundation represented by pile foundation code is more reasonable. The uplift capacity to the foundation volume ratio is negatively correlated with the shaft diameter, and positively correlated with the foundation depth and diameter enlargement. However, the uplift capacity to the foundation volume ratio is not obviously influenced until enlargement to shaft diameter ratio is greater than a critical value. In the design of rock socket foundation, belled foundation with enlargement to shaft diameter ratio  $\geq 2.0$  is recommended; and it is of top priority to increase the foundation depth to increase the uplift capacity of rock socket foundation. In the range of 4.5 times depth to diameter ratio, no critical buried depth was found for rock socket foundation.

## Keywords

Rock Socket Foundation, Uplift Capacity, Belled Foundation

---

# 岩石地基挖孔基础承载特性试验研究

杨文智, 童瑞铭, 鲁先龙

中国电力科学研究院有限公司, 岩土工程研究室, 北京  
Email: angelywz@163.com

收稿日期: 2019年4月15日; 录用日期: 2019年4月30日; 发布日期: 2019年5月7日

---

## 摘要

为研究岩石地基挖孔类基础的上拔承载特性及影响规律, 开展了不同埋深、立柱直径和扩径率的直柱型

和扩底型挖孔基础的试验研究。试验结果表明, 岩石地基挖孔基础上拔承载力与地基-基础接触侧面积的线性正相关。因此, 以桩基规范为代表的嵌岩桩上拔承载力计算模型具有合理性。混凝土效率与立柱直径负相关, 与基础埋深和扩径率正相关; 但扩径率对混凝土效率的影响存在临界现象。在岩基挖孔基础工程设计中, 建议采用扩底型挖孔基础, 扩径率可取为 $\geq 2.0$ ; 并优先通过增加基础埋深的方法来提高基础设计承载力。4.5倍深径比范围内, 并未发现岩基挖孔基础存在临界埋深现象。

## 关键词

挖孔类基础, 上拔承载力, 扩底基础

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

岩石地基挖孔类基础, 指利用人工(或机械)在天然岩基中开挖出基础大小一样的基坑, 支立钢筋骨架, 然后以石代模直接在基坑内浇筑混凝土, 从而形成岩基包裹混凝土于一体的结构体。该类基础充分利用了岩石本身的抗剪强度, 并且混凝土和钢筋的用量都较小, 同时也可减少基坑土石方量, 且浇制混凝土不需要模板, 施工费用较低, 具有适用范围广、施工技术成熟等特点, 是目前我国山区高压输电线路工程中应用最为广泛的一类基础型式。根据外形的差异, 输电线路岩基挖孔类基础可分为直柱型、扩底型、圆台型三种基础型式, 如图1所示。

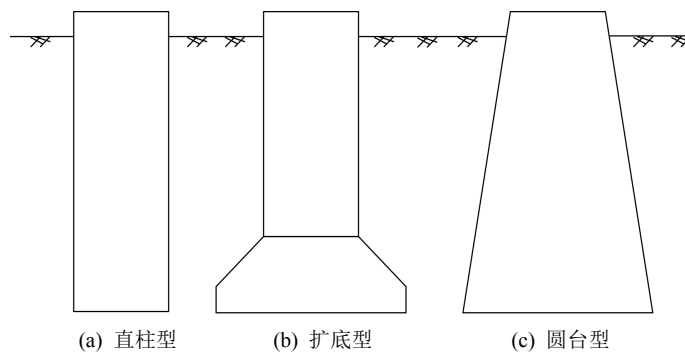


Figure 1. Type of rock socket foundation  
图1. 岩基挖孔基础主要结构型式

输电线路杆塔基础的设计荷载包括竖向力(即上拔力和下压力)、横向水平力以及由此产生的弯矩等。岩石地基中, 挖孔基础的设计主要受上拔稳定性控制[1], 而上拔稳定性计算的关键参数是基础的抗拔承载力。因此, 准确获得挖孔基础上拔荷载作用下的变形破坏特征和抗拔承载力是此类工程设计中的关键环节。针对岩石地基挖孔类基础上拔极限承载力计算, 目前可供参考的计算模型有圆弧滑动面剪切模型[2]、45°倒锥体破坏模型[2][3]、以桩基规范为代表的扩底嵌岩桩模型[4]和以港口工程桩基规范为代表的直柱嵌岩桩模型[5][6][7]。现行规范未明确岩石地基中挖孔类基础如何选择计算模型, 不同的模型计算出的基础尺寸差别较大, 影响工程造价及环保水平。

针对岩石地基挖孔基础抗拔承载力计算模型和参数取值不统一、主观化等问题, 本课题开展了岩石

地基直柱型和扩底型挖孔基础的试验研究，分析了立柱直径、基础埋深、扩径率等因素对岩基挖孔基础承载特性的影响规律，研究成果可为岩石地基挖孔基础抗拔承载力的计算模型选取与优化设计方法研究提供参考。

## 2. 场地条件

### 2.1. 地质条件

场地为云斜煌岩地基。肉眼观察：岩石呈褐棕色，全自形粒状结构，块状构造。镜下观察：岩石具全自形粒状结构，块状构造。矿物成分为斜长石 54%~56%，黑云母 38%~42%，黑色不透明矿物 4%~6%，少量石英。斜长石：呈长板条状，正低突起，宽聚片双晶发育，可见泥化、绢云母化，粒径(长) 0.40 mm~0.45 mm，分布无序，呈三角形格架状，可见石英、不透明矿物充填其中。黑云母：自形，片状，具多色性，可见蛭石化，片径(长) 0.4 mm~0.6 mm，分布无序。石英：他形，分布于斜长石与黑云母形成的空隙中，含量较少。不透明矿物：自形、他形粒状，均匀分布于斜长石、黑云母晶粒间，粒径 0.03 mm~0.05 mm，如图 2 所示。

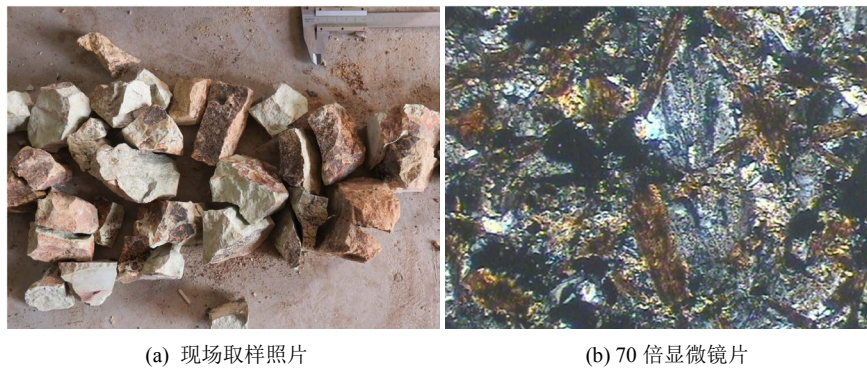


Figure 2. Rock sample photo  
图 2. 样品照片

### 2.2. 试验设计

为研究基础型式、立柱直径、埋深等对基础承载性能的影响，试验方案对应设计了不同尺寸的直柱型和扩底型两种挖孔类基础，基础尺寸详见表 1，基础立面图见图 3。

Table 1. Test foundation dimensions  
表 1. 试验基础尺寸

基础编号	基础型式	$d$ (mm)	$D$ (mm)	$t$ (mm)	$h_1$ (mm)	$h_2$ (mm)	$h_3$ (mm)	$H$ (mm)	荷载位移曲线类型
P1	直柱	1200	/	200	/	/	/	7200	软化型
P2	扩底	1200	2400	200	2800	800	200	3600	软化型
P3	扩底	1200	2400	200	6400	800	200	7200	渐进型
P4	扩底	1200	2400	200	10,000	800	200	10,800	硬化型
P5	扩底	800	2400	200	6400	800	200	7200	渐进型
P6	扩底	1600	2400	200	6400	800	200	7200	渐进型

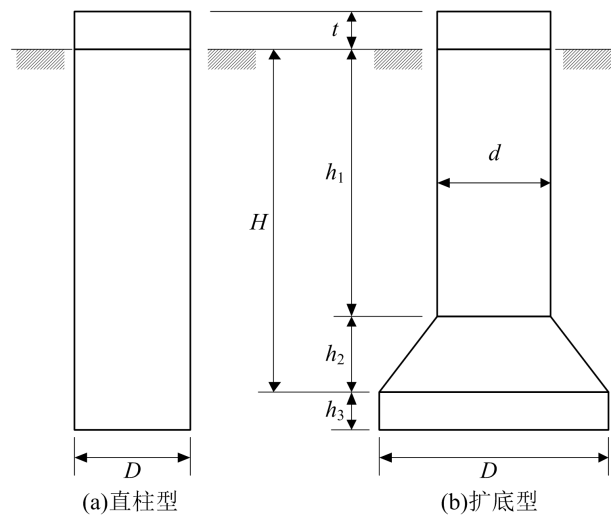
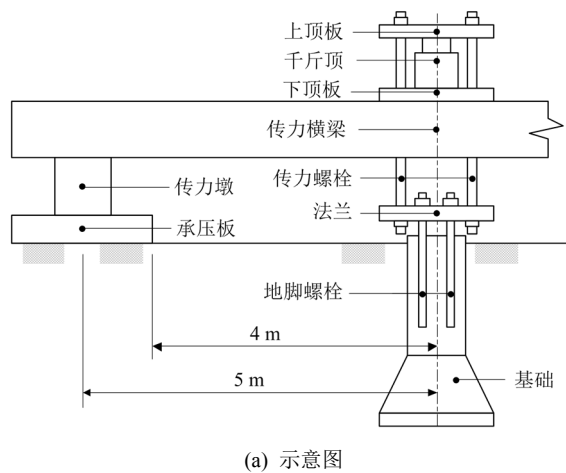


Figure 3. Sketch of foundation  
图 3. 基础尺寸示意图

### 3. 加载装置与方案

#### 3.1. 加载装置

上拔力加载系统主要由传力螺杆、千斤顶、横梁、反力支座组以及连接板成，如图 4 所示。上拔加载系统中，千斤顶是动力源，它依次通过上顶板、传力螺杆和地脚连接板对基础施加拔荷载，由此产生的地反力又依次通过下顶板、横梁和反力支座转移到远处地基。



(a) 示意图

(b) 加载实况

Figure 4. Assembly of uplift test  
图 4. 竖向加载装置

#### 3.2. 加载方法

试验采用维持荷载法分级加载，荷载分级不少于 10 级，试验的最大加载至破坏或试验设备最大加载能力。

1) 试验加载采用维持荷载法逐级等量加载；分级荷载宜为最大加载量或预估极限承载力的 1/10，其中第一级可取分级荷载的 2 倍，试验的最大加载至破坏或试验设备最大加载能力。

2) 加、卸载时应使荷载传递均匀、连续、无冲击, 每级荷载在维持过程中的变化幅度不得超过分级荷载的 $\pm 10\%$ 。

3) 对于基础在上拔与下压工况下, 每级荷载施加后按第 5min、10 min、15 min、45 min、60 min 测读基础顶沉降量, 以后每隔 15 min 测读一次, 连续 2 次测读出的基础顶部上拔量均小于 0.1 mm 时, 认为在该级荷载下的位移已达到稳定状态, 可继续施加下一级荷载。

### 3.3. 试验终止条件

基础试验终止条件如下: 1) 当某级荷载维持不住或变形不止、荷载加不上时; 2) 当位移量超过试验基础规定的极限位移量时, 上拔极限位移取 25 mm~30 mm; 3) 已达到基础设计要求的最大加载量或加载系统设计最大许可加载量。

## 4. 试验结果

### 4.1. 荷载-位移曲线

上拔荷载 - 位移曲线如图 5 所示。通过对上拔荷载 - 位移曲线后段变化特征的分析, 可将试验所得荷载 - 位移曲线概化为 3 种类型: “软化型”曲线、“渐近型”曲线和“硬化型”曲线。“软化型”曲线为单峰曲线, 当上拔荷载加载至峰值点以后, 上拔荷载随上拔位移的增加而减小, 如对应 P1 和 P2 基础的上拔荷载 - 位移曲线; “渐近型”曲线为单调递增曲线, 在加载末段, 上拔荷载随位移的增加而增加但有界(即曲线存在一水平渐近线)或稳定于一常值不变, 如对应 P3、P5 和 P6 基础的上拔荷载 - 位移曲线; “硬化型”曲线为单调递增曲线, 在整个加载阶段, 上拔荷载随位移的增加而单调增加, 如对应 P4 基础的上拔荷载 - 位移曲线。

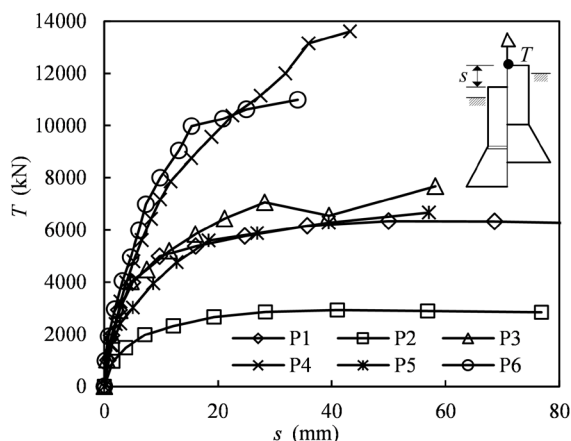


Figure 5. Uplift load-deformation curves

图 5. 上拔荷载 - 位移曲线

对试验所得的 6 条上拔荷载 - 位移曲线类型的划分同样列入了表 1。由前述 3 种上拔荷载 - 位移曲线类型的划分可知, 浅埋深 - 扩底型基础或直柱型基础的上拔荷载 - 位移曲线趋于渐进型或软化型, 当外荷载超过某界限值后, 基础即发生不可控制的上拔变形; 而大埋深 - 扩底型基础的荷载 - 位移曲线趋于硬化型, 其承载力将随上拔位移的增大而持续发挥出来, 安全裕度相对较高。

### 4.2. 承载力影响因素分析

#### 4.2.1. 极限承载力取值标准

上拔荷载 - 位移试验曲线有弹性极限和承载极限 2 个典型特征状态, 物理力学意义上, 弹性极限即

对应上拔荷载、位移能够恢复至初始值的最大荷载、位移状态；承载极限状态即对应地基或基础失稳破坏，或发生设计不允许的变形的状态。几何意义上，弹性极限在上拔荷载 - 位移曲线初始线性段的上限值附近并偏上；而对承载极限的几何判定方法，不同学者有不同见解[8] [9] [10]，并因曲线类型的不同而形成了位移限值、峰值荷载以及其它曲线特征点法。

表 2 和图 6 中所示的与承载极限状态对应的荷载、位移按如下标准取值：1) 对在 25 mm 以内呈硬化型的上拔荷载 - 位移曲线，取 25 mm 为承载极限上拔位移，取 25 mm 上拔位移所对应的外荷载为承载极限荷载；2) 对在 25 mm 以内呈软化型的上拔荷载 - 位移曲线，取峰值点对应的荷载、位移分别为承载极限状态上拔荷载和上拔位移。

Table 2. Ultimate limit state of test foundation

表 2. 基础荷载-位移极限状态点汇总

基础编号	弹性极限		承载极限		$T_u/T_e$	弹性极限荷载预测值 $T_{e,j}$ (kN)	$T_e/T_{e,j}$	地基基础接触侧面积 $M$ (m <sup>2</sup> )	基础埋入体积 $V$ (m <sup>3</sup> )	$T_u/M$ (kN/m <sup>2</sup> )	$T_u/V$ (kN/m <sup>3</sup> )
	极限荷载 $T_e$ (kN)	极限位移 $S_e$ (mm)	极限荷载 $T_u$ (kN)	极限位移 $S_u$ (mm)							
P1	3977	4.96	5774	25	1.45	4036	0.99	55.8	8.1	103.50	526.9
P2	961	1.52	2780	25	2.89	1237	0.78	35.4	5.3	78.47	724.4
P3	4018	4.7	6773	25	1.69	3824	1.05	62.6	9.3	108.23	801.7
P4	7159	9.83	10759	25	1.50	7998	0.90	89.7	13.4	119.91	647.6
P5	2417	2.77	5592	18.32	2.31	2254	1.07	46.6	5.0	120.10	709.2
P6	6987	7.31	9983	15.36	1.43	5948	1.17	78.6	15.4	127.02	724.4

注：  $T_e$  列与  $S_e$  列数据的回归函数为  $T_{e,j} = 813.652 \times S_e$ ，将  $S_e$  带入该回归式即得  $T_{e,j}$ 。

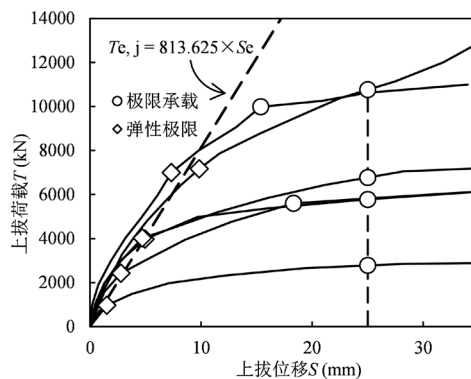


Figure 6. Ultimate limit state of test foundation

图 6. 基础荷载 - 位移极限状态点汇总

由表 2 和图 6 可知：试验基础的弹性极限点分布在一过原点的直线附近，该直线回归表达式为  $T_{e,j} = 813.652 \times s$ ，由回归公式和试验得到的弹性极限承载力比值  $T_{e,j}/T_e$  分布在 0.99 附近(标准差为 0.14，变异系数为 14.17%)；相较于弹性极限状态点，承载极限状态分布点较为离散；且从上拔 - 荷载位移曲线分别类型来看(P4 基础除外)，当上拔位移大于 25 mm 时，上拔荷载 - 位移曲线接近峰值点或变化率接近水平，因此对于岩石地基上拔荷载 - 位移曲线以 25 mm 作为承载极限位移是合理的；从试验得到的承载极限荷载与弹性极限荷载的比值  $K = T_u/T_e$ ，可以将试验结果分为 2 组，其中对应 P1、P3、P4 和 P6 基础的  $K$  值分布在 1.52 附近，对应 P2 和 P5 基础的  $K$  值分布在 2.60 附近。

### 4.2.2. 基础埋深/深径比对承载特性的影响

根据表 2，可得基础埋深  $H$  (深径比  $\lambda = H/D$ ) 对岩基挖孔基础上拔承载特性的影响，如图 7(a) 所示。图 7(b) 对比显示了不同埋深基础的上拔荷载-位移曲线。由图 7 可知：弹性极限荷载  $T_e$  和承载极限荷载  $T_u$  均与基础埋深  $H$  和基础深径比正相关，基于圆弧剪切模型[2]、45°倒锥体冲切破坏模型[2] [3]、以桩基规范为代表的扩底嵌岩桩模型[4]和以港口工程桩基规范为代表的直柱嵌岩桩模型[5] [6] 上拔承载力计算公式可以反映此承载规律； $T_e-H$  曲线与  $T_u-H$  曲线近乎平行；由表 2 可知 P2、P3 和 P4 基础的  $T_u/T_e$  值分别为 2.89, 1.69, 1.50，即随  $H$  增加而减小；基础埋深可以改变基础的上拔荷载-位移曲线类型，如图 7(b) 所示，基础埋深从 3.6 m ~ 10.8 m，上拔荷载-位移曲线类型依次经历了软化型、渐近型和硬化型；试验所涉埋深范围 ( $1.5 \leq \lambda \leq 4.5$ ) 并未出现临界埋深现象，亦即岩基挖孔基础临界深径比  $\lambda_c \geq 4.5$ 。

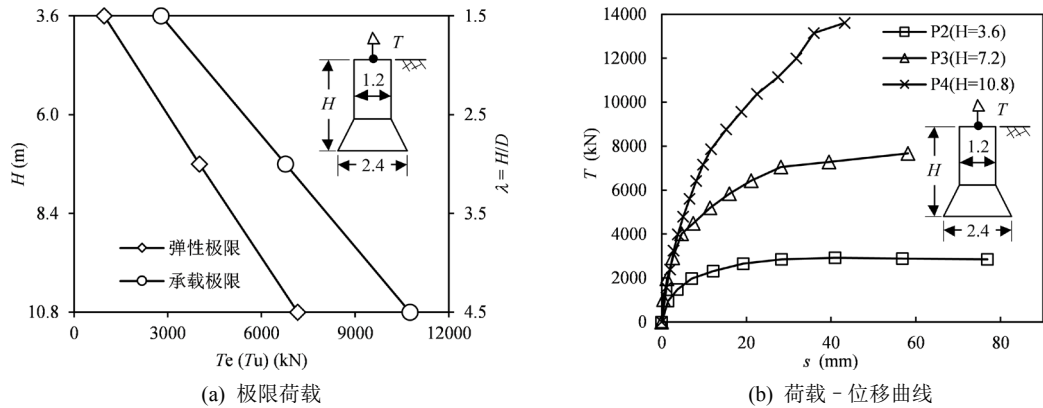


Figure 7. Foundation embedment depth influence on uplift behavior (P2, P3, P4)  
图 7. 基础埋深对承载特性的影响(P2、P3、P4)

### 4.2.3. 立柱直径对承载特性的影响

根据表 2，可得扩底尺寸和基础埋深不变条件下基础立柱直径  $d$  对岩基挖孔基础上拔承载特性的影响，如图 8(a) 所示。图 8(b) 对比显示了不同立柱直径基础的上拔荷载-位移曲线。由图 8 可知：在扩底尺寸相同条件下，弹性极限荷载  $T_e$  和承载极限荷载  $T_u$  均与  $d$  正相关，以桩基规范为代表的扩底嵌岩桩模型[4]的上拔承载力计算公式可以反映此承载规律； $T_e-d$  曲线与  $T_u-d$  曲线近于平行；由表 2 可知，P5、P3 和 P6 基础的  $T_u/T_e$  值分别为 2.31, 1.69, 1.43，即随基础立柱直径的增大而减小。

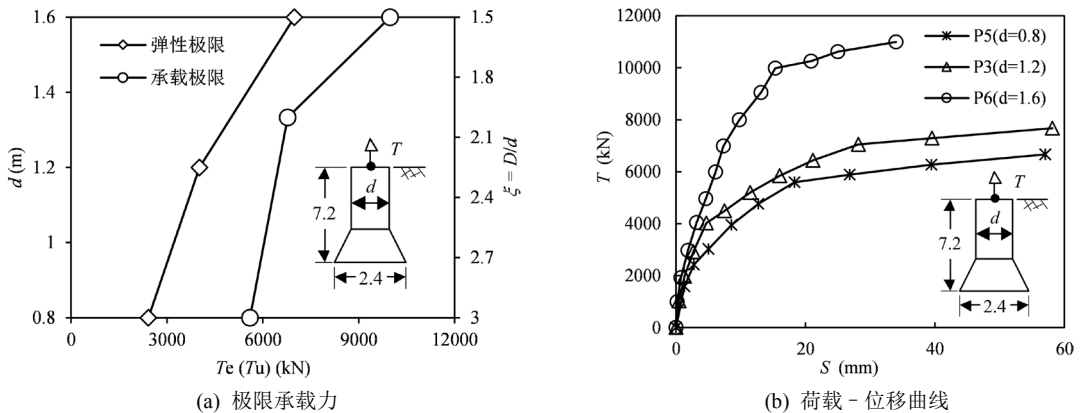


Figure 8. Column diameter influence on uplift behavior (P5, P3, P6)  
图 8. 立柱直径对承载特性的影响(P5、P3、P6)

#### 4.2.4. 扩底对承载特性的影响

根据表 2 可得基础扩底对岩基挖孔基础上拔承载特性的影响,如图 9(a)所示。通过线性插值,图 9(b)显示了直柱部分(P1)和扩底部分(P3-P1)对岩基扩底基础(P3)上拔荷载-位移曲线的贡献。由图 9 可知:当  $S \leq 11.45 \text{ mm}$  时,两基础的上拔荷载-位移曲线接近,弹性极限状态点也接近,可知其初始承载特性主要受直柱段影响;当  $S > 11.45 \text{ mm}$  时,扩底对承载能力的贡献逐渐发挥,相同位移下扩底基础的荷载逐渐高于直柱基础,最终扩底基础的承载极限荷载高出高于直柱基础 17.3%;扩底可在一定程度上优化基础的承载性能,即提高上拔荷载-位移曲线的硬化程度或降低上拔荷载-位移曲线的软化程度。基于圆弧剪切模型[2]、45°倒锥体冲切破坏模型[2][3]、以桩基规范为代表的扩底嵌岩桩模型[4]的上拔承载力计算公式可以体现此承载规律。

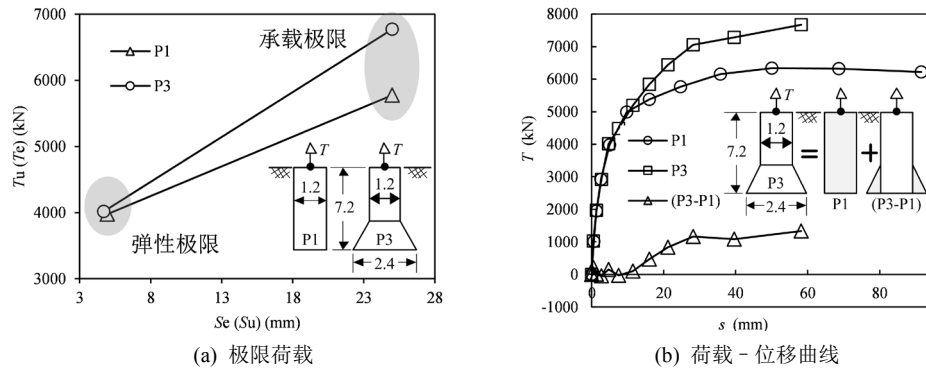


Figure 9. Belled butt influence on uplift behavior (P1, P3)  
图 9. 扩底对承载特性的影响(P1、P3)

#### 4.2.5. 地基-基础接触面积对承载特性的影响

前述分析了基础的基本几何参数对岩基挖孔基础承载特性的影响,结果表明岩石地基挖孔基础的极限承载力与基础埋深、扩底尺寸和立柱尺寸均呈正相关关系。地基-基础接触侧面积  $M$  是与基础埋深、扩底尺寸和立柱尺寸正相关的综合参数,则研究  $M$  参数对基础承载特性的影响可以涵盖更多样本。图 10 显示了全部 6 个试验样本的承载极限荷载  $T_u$  和弹性极限荷载  $T_e$  与地基-基础接触面积的  $M$  的散点图,回归分析表明,回归系数均大于 0.966,  $T_u$ - $M$  和  $T_e$ - $M$  均具有良好的线性相关性,而且这一相关性是基于全部 6 个试验样本的回归分析得到的。基于以桩基规范为代表的扩底嵌岩桩模型[4]的上拔承载力计算公式可以反映此承载规律。

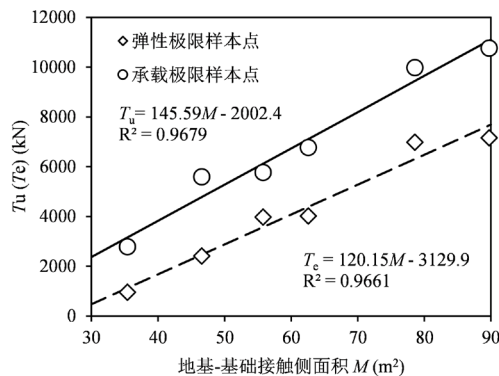


Figure 10. Rock-foundation contact area influence on uplift behavior  
图 10. 地基-基础接触面积对承载特性的影响



#### 4.2.6. 挖方体积对承载特性的影响

混凝土体积既是基础混凝土材料用量又反映了岩石地基开方的量, 则承载极限荷载和基础混凝土体积比值  $T_u/V$  反映了混凝土效率, 是基础优化选型设计的重要指标, 该比值同样列入表 2。由表 2 对比分析可知基础埋深、扩径率和立柱直径对混凝土效率的影响规律, 如图 11 所示, 可知:

1) 虽然基础承载极限荷载与基础埋深(P2、P3 和 P4 组)和立柱直径(P5、P3 和 P6 组)均正相关, 但是混凝土效率分别与二者呈正相关和负相关, 因此增加基础埋深应是基础优化设计的优先选择;

2) P1、P3 和 P5 ( $D/d$  分别为 1.0、2.0 和 3.0)组反映了通过增大扩径率的方法来提高混凝土效率存在临界值, 只有当扩径率超过该临界值时, 增大扩径率才会显著提高基础承载极限荷载和混凝土效率。这是由于岩石地基中地基 - 基础界面有较高的抗剪强度, 因此可以在一定范围的地基形成抗拔塑性区, 当扩底尺寸较小时, 扩底塑性区与立柱塑性区有较大的重叠, 因此在提高基础承载极限荷载和混凝土效率方面不显著; 而当扩底尺寸较大时, 则地基内部会形成相对独立的立柱塑性区和扩底塑性区, 基础承载极限荷载和混凝土效率也会有显著提高。

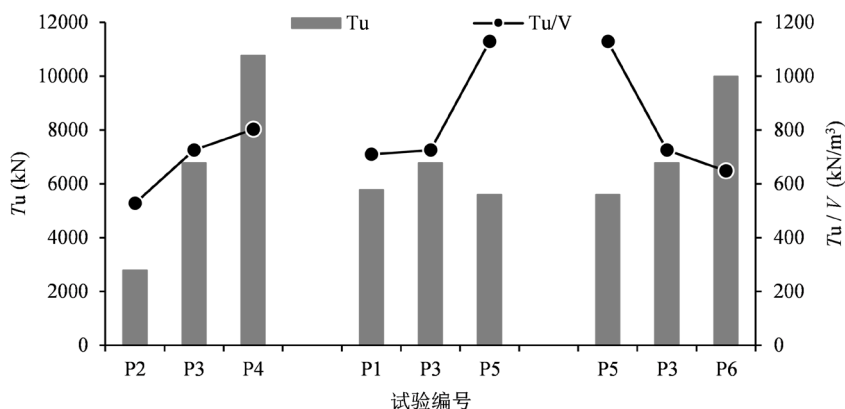


Figure 11. Concrete volume influence on uplift behavior

图 11. 混凝土体积对承载特性的影响

## 5. 结论

1) 通过对岩基挖孔基础上拔荷载 - 位移全过程曲线变化特征的分析, 可以概化出“软化型”、“渐进型”和“硬化型”3种曲线类型。增加基础埋深、立柱直径、扩底直径均可优化基础的上拔承载特性, 即增加相同位移下基础的上拔荷载或减轻(增强)基础上拔荷载 - 位移曲线的软化(硬化)特性。

2) 除与基础埋深和扩底直径正相关外, 岩石地基挖孔基础上拔承载力还与立柱直径、地基 - 基础接触侧面积的正相关。因此, 以桩基规范为代表的嵌岩桩上拔承载力计算模型具有合理性。

3) 混凝土效率与立柱直径负相关, 与基础埋深和扩径率正相关; 但扩径率对混凝土效率的影响存在临界现象。在岩基挖孔基础工程设计中, 建议采用扩底型挖孔基础, 扩径率可取为 $\geq 2.0$ ; 并优先通过增加基础埋深的方法来提高基础设计承载力。

4) 由于在 4.5 倍深径比埋深范围内, 基础上拔承载力与埋深线性正相关, 因此岩基挖孔基础的临界深径比  $\geq 4.5$ 。

## 基金项目

国家电网有限公司总部科技项目: 山区输电线路岩石地基挖孔类基础工程设计优化技术研究(GCB 17201600230)资助。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 国家能源局. DL/T5219-2005 架空送电线路基础设计技术规定[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [3] 鲁先龙, 杨文智, 满银, 等. 岩石等代极限剪切强度现场试验与应用[J]. 建筑科学, 2016, 32(Sup II), 51-56.
- [4] 中华人民共和国建设部. JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. JTS 167-4-2012 港口工程桩基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. JTJ 285-2000 港口工程嵌岩桩设计与施工规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [7] 史佩栋, 顾晓鲁. 桩基工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015: 224-227.
- [8] 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.
- [9] Chen, Y.-J., Chang, H.-W. and Kulhawy, F.H. (2008) Evaluation of Uplift Interpretation Criteria for Drilled Shaft Capacity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**, 1459-1468.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:10\(1459\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:10(1459))
- [10] Hirany, A. and Kulhawy, F.H. (1989) Interpretation of Load Tests on Drilled Shafts. 2: Axial Uplift. In: Kulhawy F.H., Ed., *Foundation Engineering: Current Principles and Practices* (GSP 22), ASCE, New York, 1150-1159.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)