

建筑技术

# 竖向荷载下斜坡桩基承载力及影响因素数值研究

程刘勇 陈善雄\* 余飞 许锡昌 李剑 秦尚林

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要** 利用有限差分软件FLAC<sup>3D</sup>,开展了竖向荷载下斜坡桩基极限承载力研究。分析了斜坡桩基竖向极限承载力的变化规律及其影响因素。并与平地桩基进行对比,分析了斜坡的存在对承载力的影响。最后给出了斜坡与平地桩基极限承载力比值工程应用表。研究表明:斜坡桩基极限承载力与临坡距呈正比关系,临坡距越大,极限承载力越高;与坡度呈反比关系,坡度越小,极限承载力越大。提出了一种斜坡桩基竖向极限承载力实用计算方法:实际工程中,可以先按传统的设计计算方法确定平地桩基的承载力,然后根据实际坡度和临坡距离,采用插值的方法在比值表中取相应的调整系数,确定斜坡桩基的承载力。

**关键词** 斜坡桩基 极限承载力 数值模拟 FLAC<sup>3D</sup>  
**中图分类号** TU432; **文献标志码** A

随着国民经济建设的高速发展,对电力的需求不断增加,高压送电成为了远距离电力输送的主要型式。我国幅员辽阔,山区丘陵地带较多,在输电线路工程中,山区输电线路工程占有相当比重,为满足铁塔修建的要求,部分桩基不得不修建在斜坡地段甚至悬崖峭壁上。相比地面上的桩基,位于斜坡或陡坡地段的桩基表现出一定的特殊性:①受力的特殊性,桩基除了承受竖向荷载外,还将承受来自坡体的侧向土压力;②条件的特殊性:斜坡桩基与平地桩基周边土体提供的竖向阻力有很大差异;③使用功能的特殊性:同时具有承载与抗滑的双重功能。这些特殊性决定了斜坡桩基受力特性更为复杂。

国内外许多专家和学者对桩基竖向承载特性

展开了深入研究,取得了大量的理论成果。李晋,等<sup>[1]</sup>利用有限元数值方法,研究了不同参数对大直径钻孔预压应力混凝土空心基桩单桩承载力性状的影响。杨岳华,等<sup>[2]</sup>对某大桥钻孔灌注桩静载试验数据进行分析,并根据单桩荷载传递理论建立竖向荷载作用下桩土相对位移沿桩长分布的微分方程。陈铁冰<sup>[3]</sup>应用BP神经网络,对混凝土预制桩单桩竖向极限承载力进行预测,并分析了各种参数对单桩竖向极限承载力的影响。黄生根、龚维明<sup>[4]</sup>结合大直径超长桩试桩资料,应用有限元方法分析了压浆对大直径超长钻孔灌注桩承载性能的影响。吴兴序,等<sup>[5]</sup>对昔格达岩层中13根灌注桩进行了单桩轴向静载试验,研究桩的竖向承载力和影响承载力的因素。赵春风,等<sup>[6]</sup>结合现行规范,在利用高应变动力测试获得单桩极限侧摩阻力和极限端阻力的基础上,提出静力触探估算单桩极限承载力的修正公式,并对其修正系数进行分析。

可见,目前对单桩竖向承载力的研究很多,但所得出的理论成果和工程经验大多都是针对平地桩基,鲜有对斜坡桩基承载力的研究。现采用数值模拟的方法,研究斜坡桩基竖向承载特性,并分析

2013年3月8日收到,3月22日修改 国家自然科学基金项目  
(51079142)、湖北省电力勘测设计院科技项目资助

第一作者简介:程刘勇,男,硕士研究生。研究方向:土体本构关系及地基稳定性。E-mail:578399014@qq.com。

\*通信作者简介:陈善雄,男,博士,研究员,博士生导师。研究方向:特殊土土力学。E-mail:sxchen@whrsm.ac.cn。

影响斜坡桩基竖向承载力的因素。

## 1 数值模拟方案

### 1.1 计算方法

数值模拟是对岩土体受力状态的近似模拟,为方便计算,通常可对复杂的真实岩土体条件进行适当简化,忽略对实际工程影响小的因素,而主要研究对岩土体起主导作用的因素对实际岩土体应力应变的影响。本次数值模拟作以下简化:

- (1) 斜坡坡面按直线处理。
- (2) 采用平面应变问题模拟研究实际工况。
- (3) 桩采用立方体线弹性模型。
- (4) 仅在桩基础上下和左右面设置桩土接触面。

本次数值模拟采用增量应力法来模拟,即通过在桩基础上施加等量应力,同时将桩的刚度设置得较大来实现模拟的方法。斜坡桩基承载的极限状态是斜坡与桩基整体失稳,本次数值模拟采用模型的稳定性作为计算终止的控制条件,即当模型不能平衡时,作为计算终止的标准。

### 1.2 计算模型

本次数值模拟的模型按如下原则建立:取实际斜坡体中桩体进行模拟计算,斜坡的坡度、桩长、临坡距按照预先设定的工况进行设计。鉴于计算工况较多,此处仅给出一个工况的模型网格图(图1)。

模型边界条件为:水平方向上固定模型左右侧边界以限制其  $x$  方向上的水平位移,限制整个模型  $y$  方向上的水平位移。模型地面固定三个方向上的位移,其他边界不设边界条件。

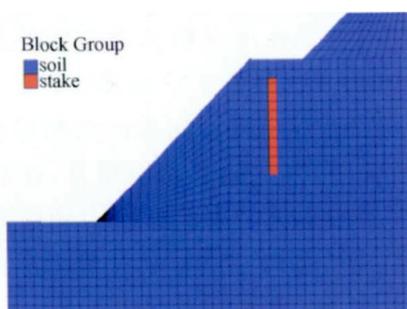


图1 分析计算模型网格图

### 1.3 计算参数

#### 1.3.1 斜坡岩土体的计算参数

本次模拟斜坡土体为中硬地层,土体采用 Mohr-Coulomb 模型,参考《工程地质手册》<sup>[7]</sup>和工程经验,材料参数见表1。

表1 斜坡地基数值模拟参数

弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
60	0.35	35	25

#### 1.3.2 桩体的计算参数

桩体采用线弹性模型,其模型参数为:弹性模量  $E = 30\ 000$  MPa,泊松比  $\mu = 0.25$ ,密度  $\rho = 2\ 500$  kg/m<sup>3</sup>。

#### 1.3.3 接触面的计算参数

接触面参数选取由接触面的不同方式决定,桩土两个面在荷载作用下可产生滑移和分离,故为硬接触面。法向刚度  $k_n$ 、切向刚度  $k_s$  参照文献[8]中建议的公式:

$$k_n, k_s = 10 \max \left[ \frac{k + 4G/3}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

结合经验,参照式(1)计算结果,其模型参数取为:法向刚度  $k_n = 10^8$  Pa/m,切向刚度  $k_s = 10^8$  Pa/m,摩擦角  $\alpha_{\text{fric}} = 20^\circ$ ,黏聚力  $F_{\text{coh}} = 20$  kPa。

### 1.4 计算工况

数值模拟主要研究斜坡桩基在不同工况条件下应力、变形以及承载力,重点考虑斜坡几何尺寸对桩土作用效应的影响,以坡度、临坡距为主要控制因素,分别设计了不同的工况作对比分析,具体见表2。

表2 斜坡桩基数值模拟工况

方案	考察因素	地基条件	桩径 $B$ /m	桩长 /m	临坡距 /m	坡度
1	坡度	中硬	1	10B	2B	1:1/1:2 /1:3
2	临坡距	中硬	1	10B	$B/2B/4B$ $6B/8B/10B$	1:1

## 2 斜坡对桩基极限承载力的影响

对于斜坡地基,由于斜坡的存在和影响,当荷载增大到一定程度时,斜坡上开始出现塑性区,并不断地向桩身一侧扩展,最终形成滑动面,即斜坡达到破坏状态,桩和地基将不能再承受更大的荷

载 此为斜坡桩基的极限承载力。以下将分析不同坡度、临坡距条件下桩基极限承载力的变化规律和影响因素。

2.1 不同坡度对极限承载力的影响

为全面考察坡度对于斜坡桩基承载力的影响, 通过调整斜坡坡度来实现不同斜坡条件下岩土体的承载力问题。表 3 给出不同坡度下斜坡桩基极限承载力计算结果, 为与平地桩基极限承载力进行对比分析, 列出平地桩基极限承载力计算结果。

表 3 不同坡度条件下承载力特征值

坡度	1:1	1:2	1:3	平地地基
承载力/kN	840	1 410	2 100	2 436

从表 3 可以看出, 坡度与极限承载力呈反比关系, 随着坡度的减小, 极限承载力在逐渐增大。分析其原因, 最直观的在于随着坡度的增加, 桩左边界距坡面的距离相对增加, 可以承担载荷的岩土体面积增加, 如图 2 及图 3 所示。当坡度较大时, 斜坡上很容易出现塑性区并能快速发展, 当边坡上的塑性区和桩侧塑性区逐渐贯通后, 斜坡桩基承载力即达到极限状态; 随着坡度的减小, 桩左边界距坡面的距离相对增大, 斜坡的影响减小, 在和坡度大的工况受到同等荷载的条件下, 斜坡面上的塑性区和桩身一侧的塑性区较难以贯通, 其最终的极限承载力较大。

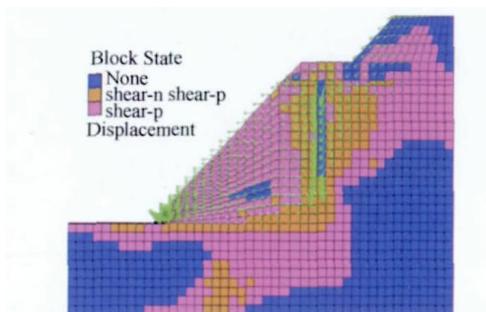


图 2 坡度 1:1 条件下塑性区及潜在滑移面

表 4 不同坡度条件下拐点变形与桩径比

坡度	1:1	1:2	1:3
变形与桩径比	0.039	0.069	0.124

表 4 给出了不同坡度条件下拐点变形与桩径比, 从表中可以看出, 坡度和拐点时变形与桩径比

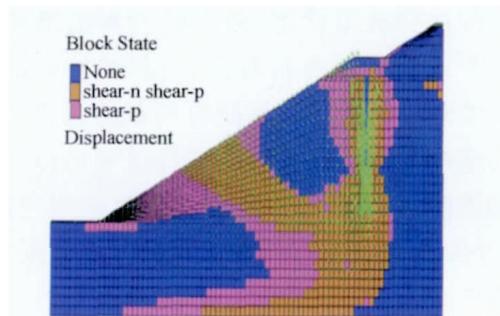


图 3 坡度 1:3 条件下塑性区及潜在滑移面

呈反比关系, 随着坡度的减小, 变形与桩径比在逐渐增大。通过前面分析可知极限承载力随着坡度的增大而减小, 坡度较大的工况其达到极限状态时所发生的变形较小。这主要是因为坡度较大的工况, 由于边坡土的缺失效应, 其桩侧可承受桩作用的面积减小, 当加载到一定力, 变形达到一定程度时斜坡上塑性区将会大面积出现, 并出现滑移面, 斜坡桩基将不能承受更大的荷载, 即达到极限状态的变形。而对于坡度较小的工况, 边坡土的缺失效应相对影响较小, 其桩侧可承受桩作用的面积增大, 可承受的极限荷载增大, 故极限状态时的变形增大。

2.2 不同临坡距对极限承载力的影响

为考察临坡距对极限承载力的影响, 分别设计 6 种临坡距来模拟不同桩埋设的情况, 具体计算结果见表 5。

表 5 不同临坡距条件下承载力

临坡距/m	B	2B	4B	6B	8B	10B	平地地基
极限承载力/kN	690	840	1 020	1 140	1 200	1 260	2 436

从表 5 可以看出, 随着临坡距的增大, 极限承载力逐渐增大, 当临坡距达到一定程度时, 而极限承载力变化幅度减小, 开始趋于稳定在某一个值。其原因分析如下: 临坡距决定着桩周可承载的岩土体体积, 即随着临坡距的增加, 桩左边界距坡面的距离相对增加, 可以承担载荷的岩土体面积增加, 如图 4—图 6 所示。从图中可看出, 当临坡距较小时, 斜坡上很容易出现塑性区并能快速发展, 当边坡上的塑性区和桩侧塑性区逐渐贯通后, 斜坡桩基

承载力即达到极限状态;随着临坡距的增大,桩左边界距坡面的距离相对增大,斜坡的影响减小,在和临坡距小的工况受到同等荷载的条件下,斜坡面上的塑性区和桩身一侧的塑性区较难以贯通,其最终的极限承载力较大。当临坡距达到一定程度时,塑性区分布基本接近平面地基,而极限承载力变化幅度减小,开始趋于稳定在某一个值,上述结论可为现场施工提供一定指导。

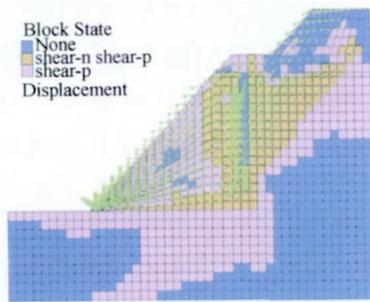


图4 临坡距为  $B$  时潜在滑动面及塑性区

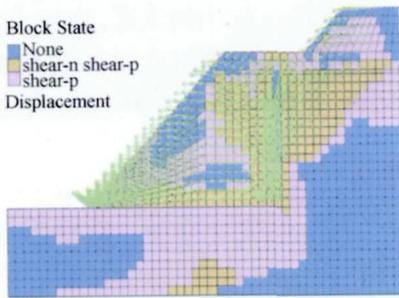


图5 临坡距为  $6B$  时潜在滑动面及塑性区

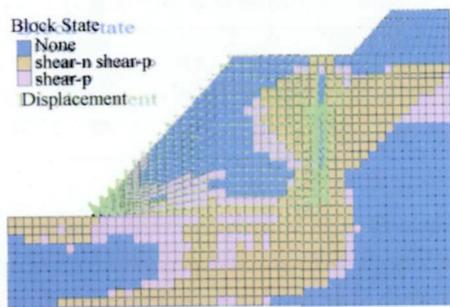


图6 临坡距为  $10B$  时潜在滑动面及塑性区

表6 不同临坡距条件下拐点变形与桩径比

临坡距	$B$	$2B$	$4B$	$6B$	$8B$	$10B$
变形与桩径比	0.031	0.038	0.055	0.063	0.068	0.072

从表6中可以看出,临坡距和拐点时变形与桩径比呈正比关系,随着临坡距的增大,变形与桩径比在逐渐增大。通过前面分析可知极限承载力随着临坡距的增大而增大,临坡距较小的工况其达到极限状态时所发生的变形较小。这主要是因为临坡距较小的工况,由于边坡土的缺失效应,其桩侧可承受桩作用的面积减小,当加载到一定力,变形达到一定程度时斜坡上塑性区将会大面积出现,并出现滑移面,斜坡桩基将不能承受更大的荷载,即达到极限状态的变形。而对于临坡距较大的工况,边坡土的缺失效应相对影响较小,其桩侧可承受桩作用的面积增大,可承受的极限荷载增大,故极限状态时的变形增大。这从图4临坡距为  $B$  条件下达到  $p-s$  曲线拐点时塑性区图可以看出,此时斜坡的塑性区已经贯通,而图6临坡距为  $10B$  条件下达到  $p-s$  曲线拐点时塑性区图可以看出此时斜坡塑性区还没有贯通。

### 3 斜坡桩基竖向承载力实用计算方法

各工况下斜坡桩基极限承载力与平地桩基承载力的比值列于表7。

表7 斜坡与平地桩基极限承载力比值表

影响因素	大小	承载力	平地承载力/kN	比值
边坡坡度	1:1	840	2 436	0.34
	1:2	1 200	2 436	0.49
	1:3	1 300	2 436	0.53
临坡距	$B$	780	2 436	0.32
	$2B$	840	2 436	0.34
	$4B$	970	2 436	0.39
	$6B$	1 060	2 436	0.43
	$8B$	1 120	2 436	0.45
	$10B$	1 190	2 436	0.48

从表中可看出,当临坡距为2倍桩径时,边坡坡度对极限承载力存在显著的影响,坡度较缓时(坡度1:3),极限承载力为平地设计公式估算值的53.3%,而当坡度较大时(坡度1:1),极限承载力减小为平地设计公式估算值的34.4%。

当坡度为1:1时,极限承载力随临坡距的减小会进一步减小,如临坡距为1倍桩径时,两者的比值会减小至32%;当临坡距增大时,极限承载力会有

所增加,与平地设计公式估算值之比会增大到 48.8%。

上述数值模拟仅对部分工况进行了计算,为方便工程应用,同时考虑临坡距和坡度的影响,按正交法则对上述计算进行扩展,可以得到如表 8 的结果。

表 8 斜坡与平坡地基极限承载力比值工程应用表

临坡距	坡度		
	1:1	1:2	1:3
B	32.0	45.7	49.6
2B	34.5	49.3	53.4
4B	39.8	56.9	61.6
6B	43.5	62.2	67.3
8B	46.0	65.7	71.2
10B	48.9	69.8	75.6

可见,对于坡度在 1:1—1:3、临坡距在 10 倍桩径的斜坡桩基,其极限承载力为平地半无限空间上按设计计算公式估算承载力的 32.0%~75.6%。

实际工程中,可以先按传统的设计计算方法确定平地桩地的承载力,然后根据实际坡度和临坡距离,采用插值的方法在表 8 取相应的调整系数,确定斜坡桩基的承载力。

#### 4 结论

本文采用有限差分计算软件 FLAC<sup>3D</sup> 计算了竖向荷载下斜坡桩基极限承载力,并对其影响因素进行分析,主要结论如下。

(1) 斜坡桩基的极限承载力与坡度、临坡距均有不同程度的关系。极限承载力与临坡距呈正比

关系,即:临坡距越大,极限承载力越高。坡度与极限承载力呈反比关系,坡度越小,极限承载力越大。

(2) 斜坡桩基条件下,可适当加大临坡距或桩长来提高极限承载力。地基条件较差时,可考虑削坡减小坡度的方法来提高斜坡的稳定性,也可以通过增加桩长来控制边坡潜在滑动面的位置,防止边坡的整体滑动。

(3) 实际工程中,可以先按传统的设计计算方法确定平地桩基的承载力,然后根据实际坡度和临坡距离,采用插值的方法在表 8 取相应的调整系数,确定斜坡桩基的承载力。

#### 参 考 文 献

- 1 李晋,冯忠居,谢永利. 大直径空心桩承载性状的数值仿真. 长安大学学报(自然科学版),2004;(04):36—39
- 2 杨岳华,刘永健,邓淑飞,等. 沉降控制的单桩竖向承载力及其数值分析方法. 公路工程,2008;(20):133—136
- 3 陈铁冰. 基于神经网络的混凝土预制桩单桩竖向极限承载力参数分析. 公路交通科技,2007;(11):87—90
- 4 黄生根,龚维明. 大直径超长桩压浆后承载性能的试验研究及有限分析. 岩土力学,2007;(02):297—301
- 5 吴兴序,庄卫林,吉随旺,等. 昔格达软岩中灌注桩单桩竖向承载力试验研究. 西南交通大学学报,2006;(06):669—674
- 6 赵春风,蒋东海,崔海勇. 单桩极限承载力的静力触探估算方法研究. 岩土力学,2003;(12):408—410
- 7 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册. 北京:中国建筑工业出版社,2007
- 8 Itasca Consulting Group Inc. FLAC2D(Fast Lagrangian Analysis of Continua) User's Guide. 2001

(下转第 5422 页)

- 2 Machender G , Dhakate R , Prasanna L , *et al.* Assessment of heavy metal contamination in soils around Balanagar industrial area ,Hyderabad India. *Environmental Earth Sciences* ,2011; 63( 5) : 945—953
- 3 Krishna A K , Govil P K. Assessment of heavy metal contamination in soils around Manali industrial area , Chennai , Southern India. *Environmental Geology* 2008; 54( 7) : 1465—1472
- 4 Sayyad G , Afyuni M , Mousavi S F , *et al.* Effects of cadmium , copper , lead , and zinc contamination on metal accumulation by safflower and wheat. *Soil & Sediment Contamination* , 2009; 18( 2) : 216—228
- 5 Feng N , Dagan R , Bitton G. Toxicological approach for assessing the heavy metal binding capacity of soils. *Soil & Sediment Contamination* ,2007; 16( 5) : 451—458
- 6 谢小进,康建成,李卫江,等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析. *环境科学* ,2010; 31( 3) : 768—774
- 7 钱 翌,张 玮,冉德超. 青岛城市土壤重金属的形态分布及影响因素. *环境化学* ,2011; 30( 3) : 652—657
- 8 李亮亮,张大庚,李天来,等. 土壤有效态重金属提取剂选择的研究. *土壤* ,2008; 40( 5) : 819—823
- 9 钟晓兰,周生路,李江涛,等. 土壤有效态 Cd、Cu、Pb 的分布特征及影响因素研究. *地理科学* ,2010; 30( 2) : 254—260

## Research on the Heavy Metal Content and Availability of Farmland Soils in Shenyang

FU Li-hi<sup>1,2</sup> , LIU Qian<sup>1</sup> , JIANG Bin-hui<sup>2\*</sup>

( College of Petroleum Engineering , Liaoning Shihua University<sup>1</sup> , Fushun 113001 , P. R. China;

College of Resources and Civil Engineering , Northeastern University<sup>2</sup> , Shenyang 110004 , P. R. China)

**[Abstract]** The amount of heavy metals as well as the availability was used to evaluate the content of the pollution of the farmland soil in Shenyang. The results indicates: The order of farmland soil polluted in different degrees is Pb > Zn > Cu > As > Ni > Cd > Cr , with a serious Pb pollution and the main pollution factors for transportation. Total content is positive related to the availability , with an order of Cd > Pb > Cu > Zn > Ni > As > Cr. the contents of availability heavy metals in soil profile are of degressive trend , which mainly enriched in the surface soil.

**[Key words]** soil heavy metal availability

(上接第 5403 页)

## Numerical Simulation for Vertical Ultimate Capacity and Influencing Factors of Oblique Slope Pile under Vertical Loads

CHENG Liu-yong , CHEN Shan-xiong<sup>\*</sup> , YU Fei , XU Xi-chang , LI Jian , QIN Shang-lin

( Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Wuhan 430071 , P. R. China)

**[Abstract]** By using the finite-difference software FLAC<sup>3D</sup> , the vertical ultimate bearing capacity of oblique slope pile is studied. And its change law and influence factors are analyzed also. Then it are with the ground pile and the influence of existing slope on the bearing capacity is analyzed. At last the ratio table of limit bearing capacities for the oblique slope pile and the pile on the ground are made. Research shows that the distance is proportional to the ultimate bearing capacity of the oblique slope pile. As slope distance is greater , the ultimate bearing capacity is higher. But the inverse relation with slope , when slope is smaller , the ultimate bearing capacity is the greater. A practical calculation method for the vertical ultimate bearing capacity of oblique slope pile is put forward. In the practical engineering , the bearing capacity of the plain pile foundation can be determined by the conventional designed calculation method , and then the ultimate bearing capacity of oblique slope pile are determined according to the actual slope and the slope distance by the interpolation methods with the adjustment coefficients in the ratio table.

**[Key words]** oblique slope pile ultimate bearing capacity numerical simulation FALC<sup>3D</sup>