

力学

斜坡桩基上拔极限承载力数值模拟研究

程刘勇 陈善雄* 余飞 许锡昌 李剑

(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^{3D},开展了斜坡桩基上拔极限承载力研究。分析了斜坡桩基上拔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,给出了斜坡影响度的概念。研究表明:影响度大小呈现一定规律:随临坡距的增加呈现减小趋势;随坡度的增大呈现增大趋势,随桩长的增大呈现先增大后减小的趋势。实际工况中可以通过增大桩长、增大临坡距、减小坡度来提高斜坡上桩基的上拔承载力。当临坡距大于2倍桩径或边坡坡度小于1:1.5时,再通过增大临坡距或减小坡度来提高斜坡桩基的上拔承载力效果并不显著。

关键词 斜坡桩基 上拔承载力 数值模拟 FLAC^{3D}

中图分类号 O316; 文献标志码 A

抗拔桩基础是建筑物基础的一种重要型式,已广泛应用于输电线路基础、高耸构筑物基础、水闸基础等工程中。与承压桩相比,抗拔桩基除受上部结构重量的作用外,必然还受到上拔荷载的作用。因此,在桩基设计时,其抗拔承载能力也是设计必须考虑的重要内容。我国幅员辽阔,山区丘陵地带较多,输电工程中,山区输电线路工程占有相当比重,为满足输电铁塔修建的要求,部分桩基不得不修建在斜陡坡地段甚至悬崖峭壁上。斜坡对于输电塔桩基础的影响是显而易见的,斜坡地基与普通地基最明显的区别在于边坡面临空而没有横向约束,降低了岩土体强度。斜坡上抗的抗拔承载力确定是工程中面临的一个技术难题。

对于抗拔桩的工作机理,不少学者已做大量研究。Kulhawy^[1]曾对等截面抗拔桩进行了广泛研究,认为等截面抗拔桩主要破坏形态为沿着桩-土侧壁

界面上可能发生土的圆柱形剪切破坏、倒锥台剪破,或者混合剪切面破坏。刘文白^[2]通过大量的现场试验及模型试验,分析了抗拔桩的抗拔机理、破坏模式,得出了抗拔承载力和上拔位移量的计算公式。刘祖德^[3]系统介绍了抗拔桩的破坏形态及其机理、抗拔承载力的计算方法、抗拔试验确定抗拔力的方法、等截面抗拔群桩的抗拔承载力。数值模拟方法自从20世纪60年代引入岩土工程领域以来,桩基工程领域的数值模拟取得了较大的进步。De Nicola和Randolph^[4]利用FLAC软件模拟了Gibson砂土中在拔和压荷载作用下桩的侧摩阻力发挥性态。杨什生^[5]用ANSYS定性分析了软土地基中等截面抗拔桩的受力和变形特性。Baars(1999)^[6]为确定抗拔桩的极限上拔承载力,利用Plaxis有限元程序建立了数值模型,发现数值模型确定的极限上拔承载力比基于经验计算公式的分析模型具有更高的精度。

对于斜坡上的抗拔桩基,目前研究较少,更没有形成完善的成熟的计算理论体系。本文将利用FLAC^{3D}软件进行斜坡桩基的数值模拟计算,分析不同工况下其上拔极限承载力的变化规律和影响因素。

2013年3月5日收到 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。

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,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。本次数值模拟做以下简化:

- (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) 在桩基础上下和左右面设置桩土接触面。

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,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

数值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。

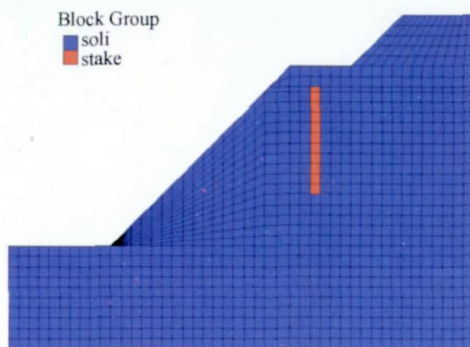


图1 分析计算模型网格图

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,材料参数参考《工程地质手册》^[7]和工程经验选取,具体见表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/m³。

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,参照公式(1)计算结果,其模型参数取为:法向刚度 $k_n = 1 \times 10^8$ Pa/m,切向刚度 $k_s = 1 \times 10^8$ Pa/m,摩擦角 $fric = 20^\circ$,黏聚力 $coh = 20$ kPa。

1.4 计算工况

这里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、桩长为主要控制因素,设计了若干工况(表2),以资对比。

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
3	桩长	中硬地基	1	5B, 10B 15B, 20B	2B	1:1

2 斜坡对桩基上拔极限承载力的影响

对于斜坡上的桩基,由于斜坡的存在和影响,当上拔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,此为斜坡桩基的上拔极限承载力。以下将分析不同坡度、临坡距、桩长条件下桩基上拔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

设计 5 种坡度来考察斜坡坡度对极限承载力的影响,计算结果见表 3 和图 2。

表 3 不同坡度条件下承载力

坡度	1:1	1:1.5	1:2	1:2.5	1:3	平地
承载力/kN	360	390	390	390	390	450

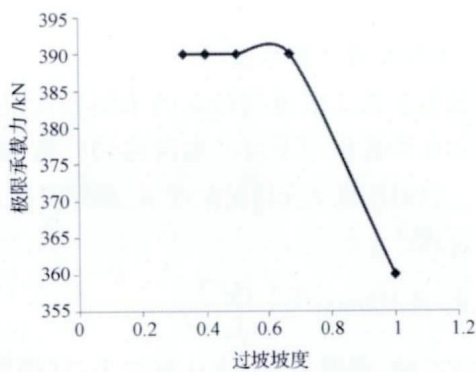


图 2 极限承载力随坡度变化

从表 3 和图 2 可看出,不同坡度条件桩基抗拔承载力有所差别,但差别不大。当坡度为 1:1 时,其值为 360 kN,当坡度进一步减小到 1:1.5 时,其值增大为 390 kN,再进一步减小坡度,承载力值不再增大。这说明斜坡对桩基抗拔承载力有一定影响,但当坡度减小时,这种影响减小,当坡度小于 1:1.5 时,这种影响可忽略不计。

其原因是由于边坡的存在,桩基外侧土体的缺失,无法提供足够的土抗力,从而导致了斜坡上拔承载力较平坡低。随着陡坡坡度减小,桩基外侧土体的缺失度减小,斜坡对承载力的影响减小。

2.2 不同临坡距对极限承载力的影响

设计 6 种临坡距来考察临坡距对极限承载力的影响,计算结果见表 3 和图 3。

表 4 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	360	364	370	390	390	390	450

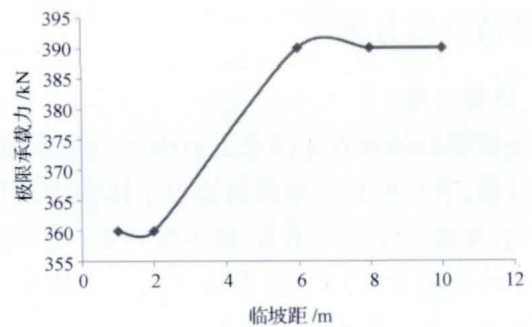


图 3 极限承载力随临坡距变化

从图 3 可看出,临坡距对极限承载力有较大影响。当临坡距为 B (1 倍桩径) 时,极限承载力为 360 kN,而当坡度为 $6B$ 时,桩基拐点法承载力为 390 kN,提高值为 30 kN。再进一步增大临坡距,承载力不再继续增大。

其原因是由于边坡的存在,桩基外侧土体的缺失,无法提供足够的土抗力,从而导致了斜坡上拔承载力较平坡低。随着临坡距的减小,桩基外侧土体的缺失相对更加严重,斜坡对水平承载力的影响进一步增大,从而导致斜坡上拔承载力进一步减小。当临坡距达到一定程度时(6 倍桩径),斜坡的影响可忽略不计。

2.3 不同桩长对极限承载力的影响

为考察桩长对极限承载力的影响,设计 4 种桩长工况,具体计算结果见表 5 和图 4。

表 5 不同桩长条件下承载力

桩长/m	5B	10B	15B	20B	平地地基
极限承载力/kN	240	360	540	720	450

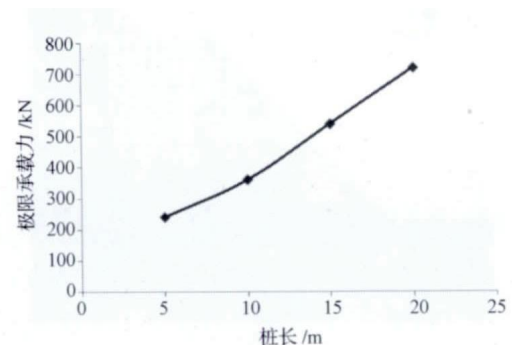


图 4 不同桩长条件下极限承载力

从图 4 可看出,随着桩长的增大,极限承载力不断增大。当桩长为 $5B$ (5 倍桩径) 时,极限承载力为

240 kN,而当桩长为 $20B$ (20 倍桩径) 时,极限承载力为 720 kN,提高值为 480 kN,极限承载力提高 2 倍。说明桩长对桩基上拔极限承载力的影响很大。其原因是由于随着桩长的增加,桩侧摩阻力不断增大,而桩基上拔力的大小等于桩侧摩阻力与桩自重之和,故其值随桩长的增加而不断增大。

3 斜坡桩基上拔承载力影响度分析

为方便分析斜坡各因素对桩基上拔极限承载力的影响,现定义斜坡上拔极限承载力影响度 a ,将计算结果列入表 6。

$$a = \frac{H_p - H_x}{H_p}$$

式中 H_p 表示任意工况桩基的抗拔承载力; H_x 表示对应的平坡桩基抗拔承载力。

表 6 斜坡桩基极限承载力与平坡地基承载力对比表

影响因素	坡度	临坡距	桩长	承载力	平地承载力/kN	影响度
边坡坡度	1:1	$2B$	$10B$	360	450	0.25
	1:1.5	$2B$	$10B$	390	450	0.15
	1:2	$2B$	$10B$	390	450	0.15
	1:2.5	$2B$	$10B$	390	450	0.15
	1:3	$2B$	$10B$	390	450	0.15
临坡距	1:1	B	$10B$	360	450	0.25
	1:1	$2B$	$10B$	364	450	0.23
	1:1	$6B$	$10B$	370	450	0.21
	1:1	$10B$	$10B$	390	450	0.15
	桩长	1:1	$2B$	$5B$	240	270
1:1		$2B$	$10B$	360	450	0.25
1:1		$2B$	$15B$	540	630	0.17
1:1		$2B$	$20B$	720	840	0.16

从表 6 可看出,当临坡距为 $2B$,桩长为 $10B$ 时,对比分析斜坡和平坡条件的极限承载力,斜坡对极限承载力的大小有一定影响,斜坡影响度随着坡度的减小呈减小趋势。如当坡度为 $1:1$ 时,影响度为 0.25 ,当坡度减小为 $1:1.5$ 时,影响度减小至 0.15 ,当坡度进一步减小时,影响度不再减小。从以上分析中可知,随着坡度的减小,斜坡对桩基水平承载力的影响逐渐减小,在实际工程中可以通过减小坡度来降低斜坡的影响,把影响度控制在一定的范围之内。当边坡坡度为 $1:1$,桩长为 $10B$ 时,不同临坡距条件下斜坡影响度随着临坡距的增大而呈现减

小趋势。如当临坡距为 B 时,斜坡的影响度为 0.25 ;当临坡距增大为 $10B$ 时,斜坡影响度减小为 0.15 。因此,在实际工程中可以通过增加临坡距来降低斜坡的影响,把影响度控制在一定的范围之内。

当边坡坡度为 $1:1$,临坡距为 $2B$ 时,不同桩长条件下斜坡影响度随着桩长的增大呈现先增大后减小的趋势。如当桩长为 $5B$ 时,斜坡影响度为 0.13 ,当桩长增大为 $10B$ 时,斜坡影响度增大为 0.21 ,当桩长为 20 倍桩径时,斜坡影响度减小为 0.16 。这是因为在上拔荷载下不同长度的桩-土体系破坏模式不同。当桩长较小时,外荷载对桩-土体系的影响范围较小,其引起的附加应力没有完全扩展到斜坡面上,故斜坡的存在对上拔极限承载力影响相应较小;随着桩长的增加,其影响范围扩大,斜坡影响度不断增大。但当桩长增加到一定程度时,桩侧土缺失效应相对减弱,斜坡对极限承载力的影响相应减小。

4 结 论

本文采用有限差分计算软件 $FLAC^{3D}$ 计算了上拔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) 数值模拟方法计算斜坡桩基上拔极限承载力,克服了传统方法众多假设的缺点,考虑了材料的应力应变关系。该方法可计算各种工况条件下的斜坡桩基上拔极限承载力,并且可反映实际斜坡桩基的变形与破坏过程。

(2) 斜坡桩基上拔承载力受斜坡坡度、临坡距影响较小,受桩长变化的影响相对较大。可以通过增大桩长来提高斜坡上桩基的上拔承载力。当临坡距大于 2 倍桩径或边坡坡度小于 $1:1.5$ 时,再通过增大临坡距和减小坡度来提高斜坡桩基的上拔承载力效果并不显著。

(3) 定义了斜坡上拔承载力影响度 a ,影响度呈现一定规律:随临坡距的增加呈现减小趋势,随坡度的增大呈现增大趋势,随桩长的增大呈现先增大后减小的趋势。

参 考 文 献

- 1 Kulhawy F H, Kozera D W, Wilham J L. Uplift testing of model

- drilled shaft in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1979; 105 (GT1) : 31—47
- 2 刘文白,刘利民. 桩基工程的理论进展与工程实践. 北京: 中国建材工业出版社, 2002
 - 3 刘祖德,刘金励. 桩基工程技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1996: 642—674
 - 4 De Nicola A ,Randolph M F. Tensive and compressive shaft capacity of piles in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993; 119 (12) : 1952—1973
 - 5 杨仕生. 软土地基中抗拔桩的受力与变形性状研究. 杭州: 浙江大学, 2003
 - 6 Van Baars S , Van Niekerk W J. Numerical modelling of tension piles Int Symposium Beyond 2000 in Computational Geotechnics , Balke- ma , Lisse NL ,1999
 - 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

Numerical Simulation for Vertical Ultimate Bearing Capacity of Piles in Sloped Ground

CHENG Liu-yong ,CHEN Shan-xiong* ,YU Fei ,XU Xi-chang , LI Jian

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering , Institute of Rock and Soil Mechanics ,

Chinese Academy of Sciences , Wuhan 430071 , P. R. China)

[Abstract] By using the finite-difference software FLAC^{3D}, the uplift ultimate bearing capacity of oblique slope pile is studied on. And its variation and influence factors are also analyzed. Then it with the ground is compared pile and analyzed the influence of slope on the bearing capacity. At last the degree of influence is defined about slopes. Research shows that the degree of influence presents certain laws: it presents the trend of decrease with increase of the distance to the slope; it presents the trend of increase with increase of the slope ratio; it increases firstly and then decreases with increase of the length of pile. The uplift ultimate bearing capacity of oblique slope pile by increasing the length of pile can be improved, the distance to the slope or reducing the slope ratio in the actual working conditions. If the distance to the slope is two times more than the pile diameter or the slope ratio is less than 1: 1.5, the effect is not obvious through increasing the distance to the slope or reducing the slope ratio.

[Key words] oblique slope pile uplift bearing capacity numerical simulation FALC^{3D}