

斜桩负摩擦及弯曲特性研究

杨征宇¹, 王天慧¹, 杨 剑^{2,3}, 程永锋⁴

(1. 新疆兵团农一师勘测设计院, 新疆 阿克苏 843000; 2. 河海大学岩土工程水利部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092; 4. 国家电网北京电力建设研究院, 北京 100055)

摘要 针对软土地区设计桩基础遇到的最普遍问题——负摩擦, 通过三维数值模拟研究斜桩在超载作用下的负摩擦和下拉力特性。指出由于桩身倾斜, 超载不仅引起桩身负摩擦, 还产生附加弯矩。参数分析结果表明 随着桩身倾斜角度的增加可减小桩身负摩擦力和下拉力, 桩顶约束时在桩身中部产生较大的弯矩, 而桩顶自由时则在桩身下部产生弯矩 桩身下拉力及负摩擦力的变化主要取决于地面超载和轴向荷载, 在桩顶施加轴向荷载之前先加超载比先施加轴向荷载后再加超载可大幅度减少桩身负摩擦。

关键词 斜桩 负摩擦 下拉力 数值分析

中图分类号 TV473.1

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2009)05-0032-05

Study on negative skin friction and flexural behavior of batter pile//YANG Zheng-yu¹, WANG Tian-hui¹, YANG Jian^{2,3}, CHENG Yong-feng⁴ (1. Survey and Design Institute of the First Agricultural Division, Aksu, Xinjiang 843000, China; 2. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Shanghai 200092, China; 4. Electric Power Construction Research Institute, State Power Corporation, Beijing 100055, China)

Abstract : Negative skin friction is perhaps one of the most common problems in the design of pile foundations in soft soils. Three-dimensional elasto-plastic numerical analyses were carried out to evaluate the development of negative skin friction and drag load for a single batter pile subjected to surcharge, which not only causes the negative skin friction but also causes increased bending moments due to the shaft incline. The parametric analyses show that negative skin friction and drag loads for single piles are reduced by the increase of the batter angle. The condition of fixed-head piles will cause higher bending moments in the middle part, while the condition of free-head piles will cause higher bending moments at the pile base. Drag load development heavily depends on the surface surcharge and axial load. When the surcharge precedes the application of the foundation working load, the effect of negative skin friction is considerably smaller than in the reverse case.

Key words : batter pile; negative skin friction; drag load; numerical analysis

当桩周软弱土层固结或土体表面受到超载作用时, 桩周土体产生相对于桩身向下的位移, 这就使桩身承受向下作用的摩擦力, 这种由地面沉降或超载引起的桩身向下作用的摩擦力, 称为负摩擦力 (negative skin friction, NSF)^[1]。负摩擦力不但不是桩承载力的一部分, 反而变成施加在桩上的外荷载。负摩擦力引起的桩身最大轴力又称为下拉力, 其不利于基础的稳定。

Jeong 等^[2]、Comodromos 等^[3] 以及其他学者对直桩基础土体表面受到超载的负摩擦特性进行了深入的研究。刘汉龙等^[4] 从桩-土相互作用的机制出发, 建立了均质地基中 PCC 桩负摩擦阻力传递的弹性微分方程, 提出了基于有限差分法的一种桩身位移的

迭代算法。高绍武等^[5] 利用 Biot 固结理论和积分方程法研究了表面有堆载的层状地基中的单桩负摩擦问题, 了解了层状地基中单桩在表面圆形均布荷载作用下的位移、轴力、孔压和桩侧摩阻力随时间的变化情况。

但是, 针对海洋石油平台、电视塔及输电线路等结构所采用的用于抵抗波浪荷载和风荷载并为了提高其侧向承载力而将桩基倾斜的斜桩基础, 其负摩擦问题则研究得较少。对于垂直桩基, 负摩擦存在的唯一问题是桩身产生了向下的下拉力; 对于倾斜桩基, 下拉力还会使倾斜的桩体产生较大的附加弯矩, 因此尽管土体向下的位移是相同的, 但 2 种桩产生的现象则是完全不同的^[6]。Shibata 等^[7] 通过模型试

验研究了斜桩受土体固结沉降的特性,并以 Winkler 地基的基本公式入手,通过一定的边界条件得出了微分方程的解析解,但斜桩受土体固结问题较复杂,所取边界条件是否合适值得商榷。Rao 等^[8]对沉积土上斜桩的特性进行了理论分析和试验研究,但分析是基于桩、土之间产生分离的特殊情况,将桩认为是受均布荷载的梁,未考虑桩、土之间的相互作用。

由于桩身的负摩擦是一个复杂的问题,只有在较简单的条件下才能得出负摩擦的解析解,对于斜桩,则情况更加复杂,斜桩的不同倾角都会引起负摩擦力的变化。为了研究斜桩在超载作用下的负摩擦及桩身下拉力的变化规律,笔者通过三维非线性数值模拟对比分析不同倾角、不同桩顶约束条件的斜桩在不同大小的土体地面超载作用下,桩身下拉力、桩身单位摩擦力的分布规律,以及附加弯矩的大小及其在上部轴向荷载作用下对桩身下拉力的影响,以期完善斜桩基础设计理论。

1 计算模型

1.1 有限元网格和边界条件

利用商用有限元软件 ABAQUS 分析斜桩负摩擦特性。采用文献[2]土体和桩身的材料参数,见表 1。桩长 $L = 21\text{ m}$,其中埋在软黏土中的长度为 20 m ,露头高度为 1 m ,桩径 $D = 0.5\text{ m}$,桩底位于 5 m 厚的密砂承载层上。土体初始平衡后,在土体表面施加荷载引起土体沉降,由此产生了负摩擦,表面荷载在 $5 \sim 150\text{ kPa}$ 之间变化。同时,为了考虑轴向荷载对负摩擦力的影响,采用 2 种不同的工况进行对比分析。一种是土体表面荷载施加完毕后在桩顶施加轴向荷载,分析下拉力的变化;另一种是先加轴向荷载,然后施加地面超载,轴向荷载按不同的工况在 $400 \sim 2\,000\text{ kN}$ 之间变化。

表 1 分析采用的材料参数

材料	E/MPa	c/kPa	ν	$\varphi/(\circ)$	$\psi/(\circ)$	K_0	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
桩	2000		0.3			1.0	2500
软土	5	3	0.3	20	0.1	0.65	1800
砂	50	0.1	0.3	45	10	0.5	2000

图 1 为分析中采用的有限元网格,为节省资源,考虑对称只分析 $1/2$ 模型。网格尺寸 z 方向为 25 m , x 和 y 方向各为 26 m ,约束底面网格所有方向的位移。在平面 $x = -13.0\text{ m}$ 和 $x = 13.0\text{ m}$ 处约束 x 方向的位移,平面 $y = 0\text{ m}$ 和 $y = 13.0\text{ m}$ 处约束 y 方向的位移。

1.2 本构模型和材料参数

表 1 为分析中采用的材料参数。桩为线弹性模型,软黏土和砂为非关联流动法则的 Mohr-Coulomb

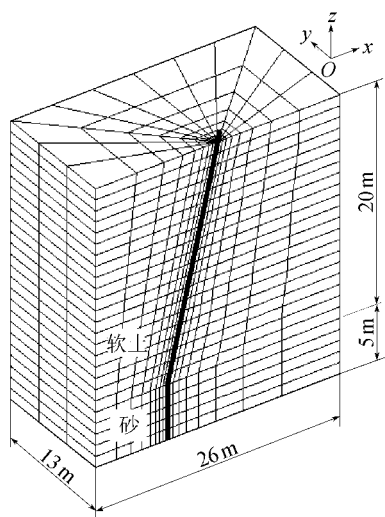


图 1 斜桩 3D 有限元网格

模型。桩、土界面满足 Coulomb's 摩擦理论,界面摩擦系数介于 $0.2 \sim 0.5$ 范围,计算公式为

$$\mu = \tan \delta \tag{1}$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \varphi' \cos \varphi'}{1 + \sin^2 \varphi'} \right) \tag{2}$$

式中: μ 为摩擦系数; δ 为界面摩擦角; φ' 为土体摩擦角,一般等于 $15^\circ \sim 30^\circ$ 。

根据式(2)得界面摩擦角为 $13.2^\circ \sim 19.1^\circ$,因此根据式(1)可得界面摩擦系数为 $0.234 \sim 0.346$,本文计算中界面摩擦系数统一取 0.2 。

1.3 下拉力及桩身弯矩的计算

在分析中,桩身下拉力 P_D 通过累加桩单元垂直方向的应力得到^[2]:

$$P_D = \pi r^2 \sigma_v \tag{3}$$

式中: r 为桩身半径; σ_v 为桩身某一截面所有桩单元的垂直应力。

与直桩基础不同,由于桩身倾斜,在竖直向下的地面超载作用下会使桩身弯曲,产生弯矩、剪力和土抗力。斜桩剪力 q 可根据式(4)计算:

$$q = \sum_{i=1}^n \tau_i A_i \tag{4}$$

式中: τ_i 为桩单元高斯积分点上水平方向的剪应力; A_i 为桩身某一截面各单元的表面积。

桩身剪力积分可得到弯矩,求导可得到土反力^[9-10]。

$$M = \int q dz \tag{5}$$

$$p = \frac{dq}{dz} \tag{6}$$

式中: M 为桩身弯矩; q 为桩身剪力; p 为土反力(土抗力); z 为土表面以下桩的埋深。

2 数值试验成果分析

2.1 模型的检验

为了验证计算模型的可行性及合理性,先对 Comodromos 等^[3]的结果进行对比分析。材料参数及模型同第 1 节,只是基础为直桩基。土体表面在 5 kPa 超载作用下的桩身单位摩擦力 f 和桩身下拉力 P_D 分布如图 2 所示。由图 2 可见笔者的计算结果与文献[3]中的曲线在反应性状上吻合较好,误差在允许范围之内,说明笔者选用的计算模型是适用的。

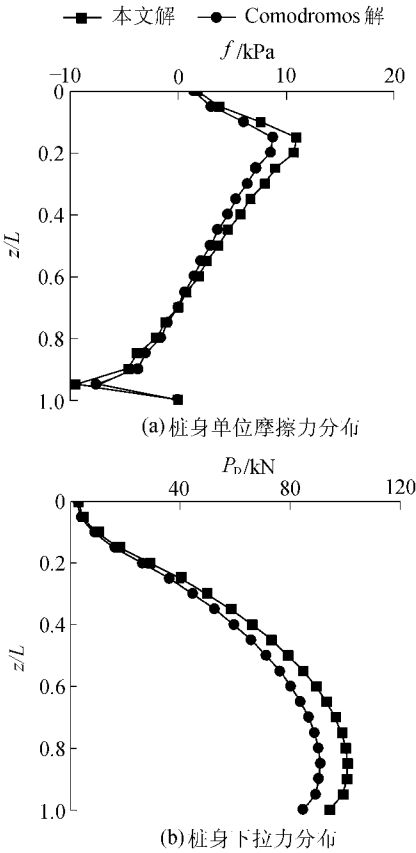


图 2 直桩桩身单位摩擦力和下拉力分布

2.2 桩顶自由斜桩在地面超载作用下的特性

直桩基础在超载作用下桩身表面与土体之间产生负摩擦力,桩身产生向下的下拉力,桩身不存在剪力和弯矩,但斜桩则不同。斜桩在地面超载作用下其桩身会产生弯矩、剪力,导致斜桩挤压侧向土体而产生土抗力。

图 3 为倾角 5° 的斜桩基础在不同的地面超载作用下,桩身单位摩擦力和桩身下拉力的分布规律。从图 3 中可明显地看出桩身负摩擦随着深度增加直到中性面。当地面超载较小时(5 ~ 10 kPa),在桩身上半部分产生土体滑移,最大负摩擦力出现在桩身上部。随着荷载的增加,桩、土界面的滑移范围逐渐增加,最大负摩擦力也向桩身下半部分移动。同样,随着荷载的增加,下拉力也相应增加,在中性面以下

(桩土相对位移为零处)由于桩土相对滑移较小,剪切强度未充分发挥,导致下拉力也较小。从图 3 中还可得出,在相对较小的地面超载(10 kPa)作用下,桩身最大下拉力就达到了 150 kN,当地面超载达到 150 kPa 时,桩身最大下拉力达到 650 kN,可以得出一旦土体沿整个桩身滑移产生负摩擦力则桩身下拉力的大小主要取决于垂直方向的土体应力的结论。

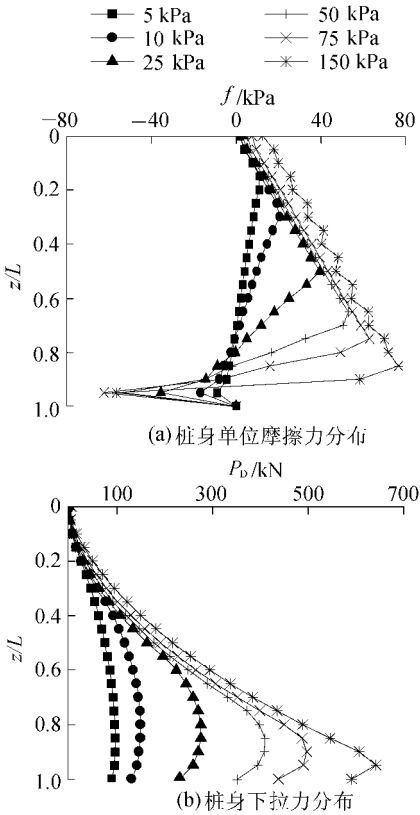


图 3 5° 倾角斜桩在地面超载作用下桩身单位摩擦力和下拉力分布

不同超载下桩沉降 Z_p 、土体沉降 Z_s 及中性面的位置如图 4 所示。从图 4 中可明显看出桩-土的相对位移。由于土有较大的可压缩性,当地面超载 5 kPa 时中性面就大约位于地下 17 m 处。中性面的位置随着荷载的增加逐渐向下移,当地面超载 150 kPa 时中性面位置位于地下 19 m 处,此时整个桩身周围都作用有负摩擦力,基础承载力完全由桩底承载,已接近于端承桩的特性。

图 5 为倾角 5° 的斜桩基础在不同地面超载作用下桩身的剪力(横向力)、弯矩和土抗力分布。对于桩顶自由的斜桩基础,在超载作用下基础顶部的剪力很小,而在基础的下半部分剪力较大,并且随着地面超载的增加,剪力也增大。其原因是斜桩基础在超载作用下,基础的上半部分沿倾斜方向移动,而基础底部由于位于刚性承载层上,使基础有绕着桩底转动的趋势。基础的弯矩和土抗力也与剪力表现出相同的分布形式。

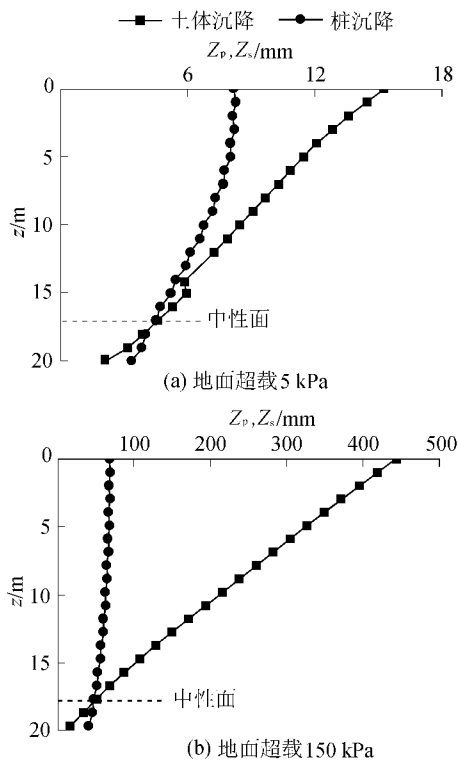


图4 不同地面超载下桩与土体沉降曲线

2.3 轴向荷载对斜桩下拉力的改变

对于输电线路基础或是桥梁基础,斜桩在承受周围土体沉降或超载的同时还要承担上部结构传来的荷载,使得桩、土之间相对位移改变,导致正、负摩擦力的中性面位置发生变化,这将影响桩身受到的

下拉力。为了分析轴向荷载引起土体沉降从而导致的对桩身下拉力的影响,此处考虑2种不同的加载方式:一种是先施加地面超载,在桩身下拉力完成以后在桩顶施加轴向荷载;另一种则相反,先在桩顶施加轴向荷载,然后再加地面超载。以下分析中以倾角为 15° 的倾斜基础为研究对象,地面超载为50 kPa,轴向荷载为400~2000 kN。

图6为不同轴向荷载作用下桩身下拉力的变化规律。第1种加载方式如图6(a)所示,轴向荷载可有效减小桩身的下拉力。轴向荷载为800 kN时桩身上、下均为正摩擦力,在轴向荷载作用下增加了桩身的沉降而改变了桩身中性面的位置,使得桩-土界面荷载传递变为正值。可见,轴向荷载对基础的稳定是有利的,并且效果随轴向荷载的增加而逐渐明显。通过计算还可知,为了消除超载引起的下拉力,需要的轴向荷载为最大桩身下拉力的125%~325%。但是,需要注意的是轴向荷载的增加减小了桩身下拉力,同时增加了基础顶部的沉降,在工程设计时需要对这2个方面统一考虑。图6(b)所示为第2种加载方式,随着轴向荷载的增加,桩身下拉力也增加,但中性面位置仍位于桩身中部,也就是斜桩上半部分仍受负摩擦力的作用,这种加载方式对工程稳定是不利的。图6(c)为2种加载方式桩身下拉力的对比,第1种加载方式的桩身下拉力明显小于第2种加载方式的桩身下拉力,2种加载方式的桩

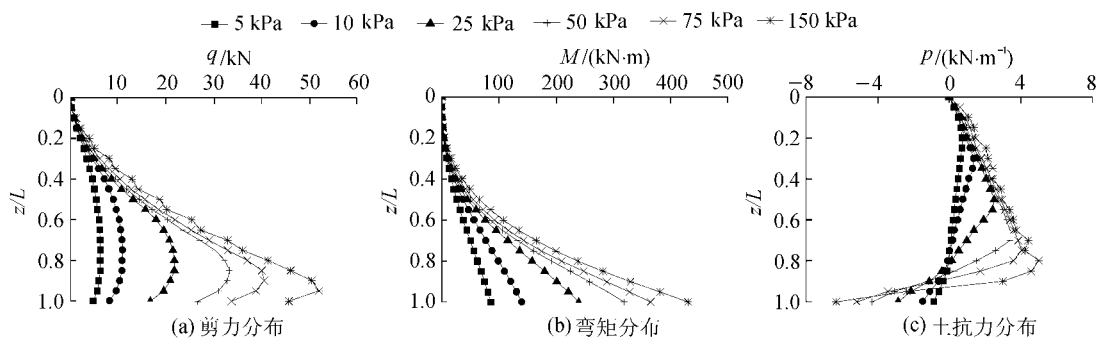


图5 5° 倾斜斜桩在不同地面超载作用下的响应

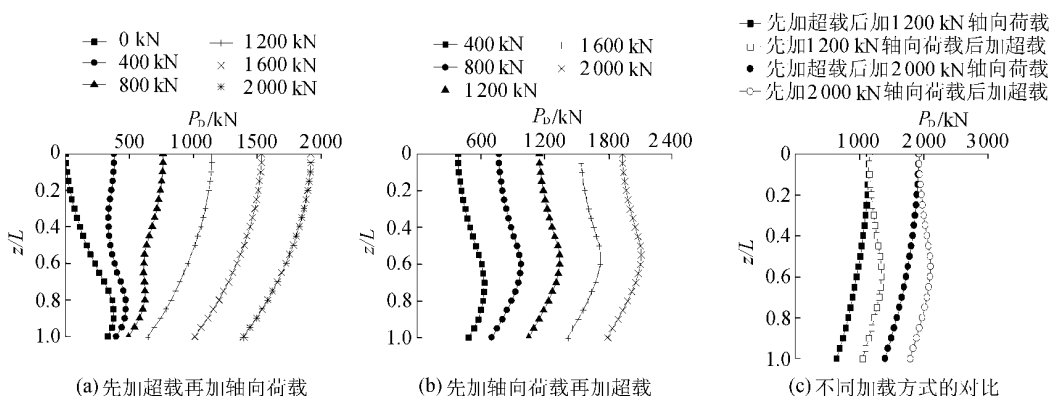


图6 轴向荷载不同加载方式的影响

身下拉力相差40%左右,在实际工程施工中应待堤岸填筑完毕或土体固结沉降完毕后再使基础承受工作荷载,以减小负摩擦力。

2.4 不同倾角斜桩基础内力的对比

由于斜桩基础倾角不同,因此在相同的地面超载作用下不同倾角的斜桩基础产生的内力有所不同。图7为不同倾角的斜桩在地面超载50 kPa作用下桩身单位摩擦力和桩身下拉力的分布。可见,随着基础倾角的增加,桩身单位摩擦力有减小的趋势,并且倾角越大其减小得越明显,基础倾角不大(5°~10°)时这种变化较小。同样,桩身下拉力也是随基础倾角的增加而有所减小,但不同倾角之间的差别不明显。

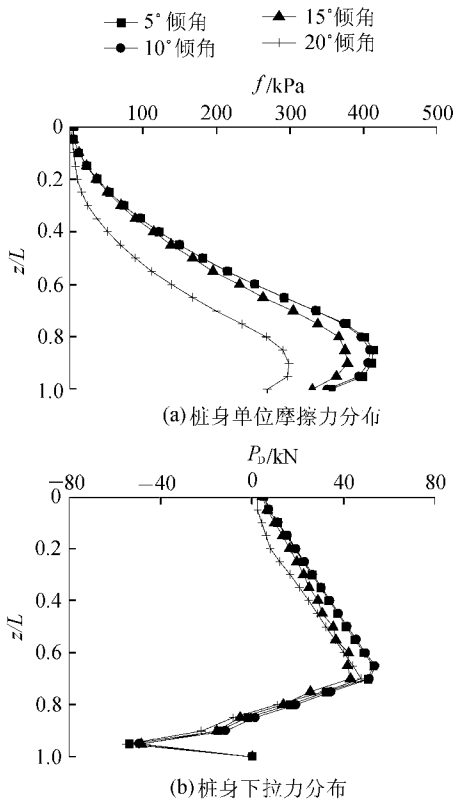


图7 斜桩在地面超载50 kPa作用下的桩身单位摩擦力和下拉力分布

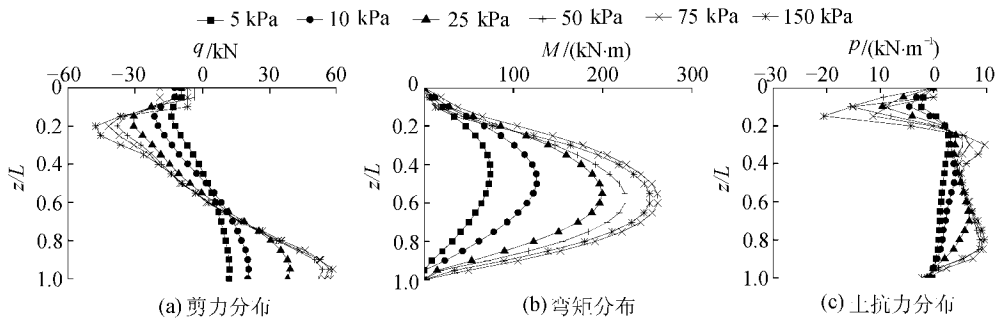


图8 10°倾角桩顶固定的斜桩在不同地面超载作用下的特性

2.5 桩顶约束斜桩在土体地面超载作用下的内力

图8为倾角10°、桩顶约束的斜桩在不同地面超载作用下的内力分布,可见,由于桩顶约束,基础的内力分布与桩顶自由的情况截然不同。基础上半部分和下半部分都存在较大的剪力,而在跨中弯矩最大,并且随着地面超载的增加内力逐渐增大,相应的土抗力分布也与剪力表现出类似的规律。

3 结 语

通过非线性有限元分析,讨论了地面超载作用对斜桩的负摩擦力、下拉力及附加弯矩的影响规律,结果表明:

- a. 当地面超载较小时,桩身负摩擦力主要集中在桩身上半部分。随着超载的增加,桩身负摩擦力也增大,并由桩身上半部分逐渐向桩身下半部分发展,即中性面位置向桩身底部移动。随着地面超载的增加,桩身由于负摩擦产生的下拉力也相应增加,分布形态为上小下大,呈现出底部承载的特性。
- b. 斜桩基础与直桩基础不同,由于桩身倾斜,在地面超载作用下,桩身不仅产生下拉力,同时还产生剪力、弯矩和土抗力,并且内力随地面超载的增加而增加。不同的桩顶约束条件对桩身弯矩分布形态的影响明显。
- c. 地面受超载后再加工作荷载及桩身先承受工作荷载再加地面超载对桩身负摩擦力的影响明显。地面受超载后再加工作荷载可有效地减小桩身所受的负摩擦力,随着工作荷载的增加,可完全消除由地面超载产生的负摩擦力,所需工作荷载为最大桩身下拉力的125%~325%。因此施工时应使土体固结沉降完毕后再施加工作荷载,可保证基础承载力。桩身先加工作荷载后再受地面超载则相反,仍存在较大的桩身负摩擦力,对桩身稳定极为不利。
- d. 不同倾角的斜桩在地面超载作用下,随桩身倾角的增加,桩身单位摩擦力和桩身下拉力相应地减小,但桩身摩擦力的减小更明显。

(下转第60页)

[9] 郭炎,倪汉根.旋流竖井溢洪道的水流特性研究[J].水动力学研究与进展,1995,10(2):146-154.

[10] 董兴林,郭军,肖白云,等.高水头大泄量旋涡竖井式泄洪洞的设计研究[J].水利学报,2000(11):27-31.

[11] 刘善均,许唯临,王伟.高坝竖井泄洪洞、龙抬头放空洞与导流洞‘三洞合一’优化布置研究[J].四川大学学报:工程科学版,2003,35(2):10-14.

[12] 高鹏,杨永全,马耀,等.旋流式竖井涡室结构优化试验研究[J].人民长江,2006,31(11):121-123.

[13] 刘超,张光科,冯凌霄,等.泄洪洞反弧段上游掺气坎对反弧段下游侧墙的减蚀作用[J].水利水电科技进展,2007,27(1):46-49.

[14] 方卫红,孙保平.旋流消能及三洞合一出口型式在溪古水电站设计中的应用[J].西北水电,2007(4):25-33.

[15] MARTI S J. Pressure on a stepped spillway[J]. Journal of Hydraulic Research,2007,45(4):505-511.

[16] CHANSON H, GONZALEZ C A. Physical modeling and scale effects of air-water flows on stepped spillways[J]. Journal of Zhejiang University: Science,2005,6(3):243-250.

[17] PFISTER M, HAGER W. Stepped chutes: pre-aeration and spray reduction[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006,32(2):269-284.

[18] STEPHENSON D. Energy dissipation down stepped spillways[J]. Intl Water Power and Dam Construction,1991,43(9):27-30.

[19] 吴守荣,张建民,许唯临,等.前置掺气坎式阶梯溢洪道体型布置优化试验研究[J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(3):37-42.

[20] 张志昌,曾东洋,郑阿漫,等.台阶式溢洪道滑水流压强特性的试验研究[J].水动力学研究与进展:A辑,2003,18(5):652-659.

[21] 张志昌,曾东洋,刘亚菲.台阶式溢洪道掺气特性的试验研究[J].应用力学学报,2003,20(4):97-100.

[22] 陈群,戴光清,朱分清,等.影响阶梯溢洪坝消能率的因素[J].水力发电学报,2003,83(4):95-104.

[23] 郭军,刘之平,刘继广,等.大朝山水电站宽尾墩阶梯式坝面泄洪水力学原型观测[J].云南水力发电,2002,18(4):16-20.

(收稿日期:2008-12-03 编辑:方宇彤)

(上接第 36 页)

参考文献:

[1] 顾晓鲁,钱鸿缙,刘惠珊,等.地基与基础[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.

[2] JEONG S, LEE J, LEE C J. Slip effect at the pile-soil interface on dragload[J]. Computers and Geotechnics,2004,31:115-126.

[3] COMODROMOS E M, BAREKA S V. Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis[J]. Computers and Geotechnics,2005,32:210-221.

[4] 刘汉龙,张晓健.负摩擦作用下 PCC 桩沉降计算[J].岩土力学,2007,28(7):1483-1486.

[5] 高绍武,王建华,毛娜.层状地基中单桩负摩擦问题积分方程解法[J].岩土力学,2005,26(9):1456-1460.

[6] TAKAHASHI K. Bending of a batter pile due to ground settlement[J]. Soils and Foundations,1985,25(4):75-91.

[7] SHIBATA T, SEKIGUCHI H, YUKITOMO H. Model test and analysis of negative friction acting on piles[J]. Soils and Foundations,1982,22(2):29-39.

[8] RAO S N, MURTHY T V B S S, VEERESH C. Induced bending moments in batter piles in settling soils[J]. Soils and Foundations,1994,34(1):127-133.

[9] ZHAO Hui-yang, JEREMIC B. Numerical analysis of pile behaviour under lateral loads in layered elastic-plastic soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2002,26:1385-1406.

[10] GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C, SAFIEKOU S. Cyclic lateral loading of piles in soft clay[J]. Geotechnical Engineering,1992,23:47-60.

(收稿日期:2009-02-20 编辑:高建群)

(上接第 45 页)

[11] 张兴芳.城市需水量预测方法的研究[J].太原理工大学学报,2000,31(3):159-161.

[12] 王景,刘良栋,王作义.组合预测方法的现状和发展[J].预测,1997,16(6):37-38.

[13] 唐纪,王景.组合预测方法评述[J].预测,1999,18(2):42-43.

[14] ZHANG G P. Time series forecasting using a hybrid ARMA and neural network model[J]. Neurocomputing,2003,50:159-175.

[15] TANG Xiao-wo, ZHOU Zong-fang, SHI Yong. The error bounds of combined forecasting[J]. Mathematical and Computer Modelling,2002,36(9):997-1005.

[16] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000.

[17] 邓红霞,李存军,赵太想,等.基于 SPA 的水文预测模型评估[J].四川大学学报:工程科学版,2006,38(6):34-37.

[18] 曾珍香,谢素卿.常用预测方法的模糊综合评判模型[J].预测,1993,12(4):60-64.

[19] 金菊良,洪天求,王文圣.基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J].水力发电学报,2007,26(4):22-28.

[20] 王应明,傅国伟.基于不同误差准则和范数的组合预测方法研究[J].控制与决策,1994,9(1):20-28.

[21] 陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].大连:大连理工大学出版社,2005.

[22] 张雅君,刘全胜.需水量预测方法的评析与择优[J].中国给水排水,2001,17(7):27-29.

(收稿日期:2008-10-31 编辑:高建群)