

# 竖向荷载作用下桩-土相互作用时 土体对空心桩受力性能分析

张晓萌<sup>1</sup>, 汪拾金<sup>2</sup>, 王进明<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学土木与建筑学院, 湖南长沙 410076; 2. 浙江省岩土基础公司, 浙江宁波 315040)

**摘要:**采用有限单元法,用 Ansys 进行模拟仿真分析计算,考虑桩-土相互作用,在竖向荷载作用下对空心桩受力性能进行了分析,提出了在裂缝易产生处增设土工复合材料、增加土体弹性模量、粘聚力、桩侧灌浆等改善土性的措施,旨在给工程界提供理论参考。

**关键词:**空心桩;土体参数;受力分析

**中图分类号:**TU473.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)06-0040-04

**Analysis on Loading Capacity of Hollow Pile under Vertical Loading Condition by Consideration of Pile-soil Coupling Effect/ZHANG Xiao-meng<sup>1</sup>, WANG Shi-jin<sup>2</sup>, WANG Jin-ming<sup>2</sup>** (1. College of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410076, China; 2. Zhejiang Provincial Geo-engineering Foundation Company, Ningbo Zhejiang 315040, China)

**Abstract:** A finite element analysis is performed for a hollow pile by considering the interaction between the soil and the pile. The vertical ultimate loading capacity is calculated. Some measures such as laying geo-technical composite materials in cracks; increasing soil elastic modulus and cohesion; and filling the side of pile with gravel concrete and so on are proposed. The influences on the loading capacity are discussed in detail. The theoretical analysis can be taken as a reference to the engineering application of hollow piles.

**Key words:** hollow pile; soil parameter; bearing capacity analysis

## 0 前言

1956年空心桩首次用于武汉长江大桥空心桥梁结构,因其施工简便,适应性强,桩的断面布置合理有效,在各个领域推广迅速。

为进一步满足越来越广的工程需要,完善理论体系,作者采用有限单元法,编制了有限元程序,用 Ansys 进行模拟仿真分析计算,考虑影响桩基工作性能的主要因素及方法<sup>[1]</sup>,考虑桩-土的相互作用,分析了桩周土体对空心桩及桩-土接触界面承载影响,得出了桩周土体裂缝产生的主要位置,提出了改善土性诸如:增加土体弹性模量、粘聚力、内摩擦角等,在桩周、桩端土体灌注水泥浆、化学浆、碎石混凝土加固以及埋设土工膜等措施来提高桩的极限承载力,计算并分析了加固效果。

## 1 理论依据

为真实模拟桩与土的接触界面受力分析,文章采用张冬霖<sup>[2]</sup>单剪试验本构关系曲线,考虑接触面变形的弹性性。该曲线在 Desai 的剪切模量计算公

式、Boulon 直剪试验的  $\tau - \omega_s$  关系曲线上做了修正。采用下式验算桩周土的承载力<sup>[3]</sup>:

$$[P] = P_j/k = (P_p + P_s)/k > P_c \quad (1)$$

式中:[P]——桩的容许承载力,kN; $P_p$ ——桩侧极限摩阻力,kPa; $P_s$ ——桩端极限阻力,kPa; $P_c$ ——桩承受的竖向荷载,kN; $k$ ——安全系数,通常取 2.0; $P_j$ ——桩的极限承载力,kN。

桩周土体材料的屈服准则使用 Mohr-Coulomb 剪切破坏准则<sup>[4]</sup>,屈服函数表示为:

$$f = |\tau| + \sigma_n \tan \varphi - c \quad (2)$$

式中: $\tau$ ——材料破坏面上的剪应力; $\sigma_n$ ——材料破坏面上的正应力; $\varphi$ ——材料的内摩擦角; $c$ ——材料的粘聚力。

## 2 桩-土接触面

接触问题是一种高度非线性行为,存在 2 个难点:

(1)接触区域、表面之间是接触、分开、还是突

收稿日期:2009-05-14; 改回日期:2009-06-04

作者简介:张晓萌(1972-),女(汉族),广东惠州人,长沙理工大学讲师,土木工程专业,硕士,从事土木工程研究与力学教学工作,湖南省长沙市,flzxm5232166@163.com。

然变化等问题未知,随载荷、材料、边界条件和其他因素而定;

(2)大多的接触问题需要计算非线性的摩擦,而摩擦使问题的收敛性变得困难。

为此,本文使用多组覆盖层接触单元,以适应几何模型和潜在变形的多样性以及一个接触面的同一区域可能和多个目标面所产生的接触关系。

在面面接触分析中,本文考虑了如下因素:

(1)时间步长足够小。时间步长太大,会破坏接触力的光滑传递。

(2)为了避免收敛太慢,迭代期间接触状态发生变化而引起的不连续等问题,使用修改的刚度矩阵,即将牛顿-拉普森选项设置成 full。

对于面一面接触问题,考虑到接触分析中有许多不收敛问题是由于使用了太大的接触刚度,因此,检验接触刚度是否合理非常关键。在桩土共同作用中,由于桩体结构的材料性能与周围土层性质相差较大,在垂直荷载下有可能在其接触面上产生较大的剪应力从而导致错动或开裂,因此,为了充分反映桩土接触面上的受力及变形特性,本文采用文献[2],并设置合理的平衡迭代次数(25~50之间)使计算稳定。接触面有限元模型见图1。

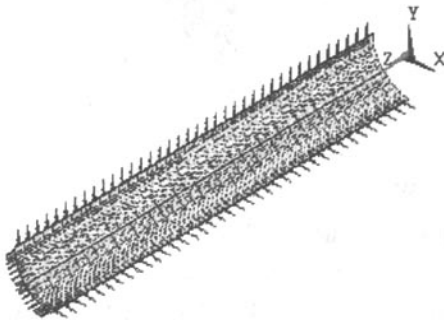


图1 桩-土接触面有限元模型

### 3 程序验证

程序编制正确<sup>[5]</sup>,可以用于模拟桩体、土体及其有一定层厚的接触面在不同土层作用下的各力学参数对桩承载影响的计算。

### 4 承载性能分析

#### 4.1 土体物理力学条件

取内径为1.3 m、外径1.8 m,桩长为40 m的空心桩置于两层土体之间,土层性质见表1。桩底基础为基岩,其物理力学性质见表2。

表1 土层物理力学性质

材料	弹性模量 /Pa	泊松比	密度 /( $t \cdot m^{-3}$ )	粘聚力 /Pa	摩擦角 /( $^{\circ}$ )
桩 C25	3.45E9	0.167	2.350	7E6	40
土层1 淤泥粘土	2.3E6	0.3	1.770	1.2E4	8.8
土层2 淤泥粉质粘土	3.6E6	0.21	1.770	2.6E4	4.1

表2 基岩物理力学性质

岩石风化程度	指标性质	天然密度 /( $t \cdot m^{-3}$ )	干密度 /( $t \cdot m^{-3}$ )	自然抗压 /MPa	干抗压 /MPa	饱和抗压 /MPa	抗剪强度 /MPa
弱风化1	min	2.658	2.648	60.6	64.2	55.4	3.285
	max	2.719	2.719	63.7	67.8	58.7	7.495
	$\bar{X}$	2.700	2.698	61.9	65.8	57.1	5.869
弱风化2	min			65.7	70.2	59.5	
	max			68.4	74.3	62.3	
	$\bar{X}$			67.0	72.5	61.2	

### 4.2 结果分析

在竖向荷载作用下取1/2对称结构进行有限元模拟仿真计算,得出的Z方向应力云图见图2,临界值应力分布云图见图3。

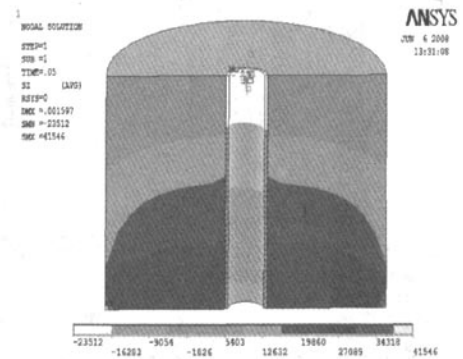


图2 Z方向应力云图

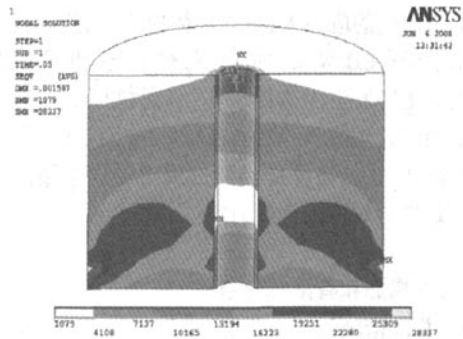


图3 临界值应力云图

从图2可以看出,在竖向荷载50 kN作用下,在桩顶处应力最大,荷载主要由桩顶来承受,其他部位应力分布沿高度方向由上而下呈减小趋势,说明桩

体受力是由上到下逐渐减小,桩身中的轴向力由上到下逐渐变小。桩-土接触面上产生应力较周围土体大,土体受到挤压,并因此产生摩阻力,由摩擦挤压作用产生滑移,沿高度方向由上而下增加,在桩端处这种滑移变化程度最大,桩侧摩阻力上部小,下部大,沿桩身从上而下依次发挥作用并逐渐增大。端部接触面单元产生的剪应力比中部大,这表明端部受到的桩侧土压力大,单元压应力大,抗剪强度大。桩体通过摩阻力将部分荷载传给桩周土体。桩周土体应力分布沿桩长方向由上而下呈减小趋势。荷载由桩体、桩-土接触面、桩周土体共同承受,且三者承受的程度依次减小。在相同高度的区域附近,桩-土接触面受力约占桩体受力百分比分别为:桩顶附近约7.8%;桩中部约31%;近桩端处约38%。桩周土体受力沿土体直径范围扩散,呈减小趋势。在竖向荷载作用下,应力对称分布,说明土层性质均匀。

原因分析:由于在桩顶加载的过程中,桩体刚度

远大于土体刚度,桩顶荷载较小时,荷载主要由桩来承担,相应的桩-土接触面上,由于桩、土之间紧密接触,没有相对位移产生。随着荷载逐步加大,桩的上部桩身先产生压缩,上部质点向下产生位移,达到一定范围时,就明显地看到桩土发生了相对位移。于是在桩周一定范围内的土体就产生了剪切变形,即接触面单元产生了滑移。土体要阻止桩的上部位移就产生了非线性的摩阻力,桩顶荷载通过摩阻力就逐渐扩散到土体中去。

从图3可以看出:中部接触面单元剪应力较端部大,这是由于中部的相对位移较端部大,所以相应的剪应力也大。

#### 4.3 桩周土层破坏面

取桩长为20 m,内径为2.0 m、外径为2.8 m的空心桩置于上述两种自然土体中,在竖向荷载作用下,根据对称性,采用有限元模型如图4(a),应力图、位移图分别如图4(b)、(c)所示。

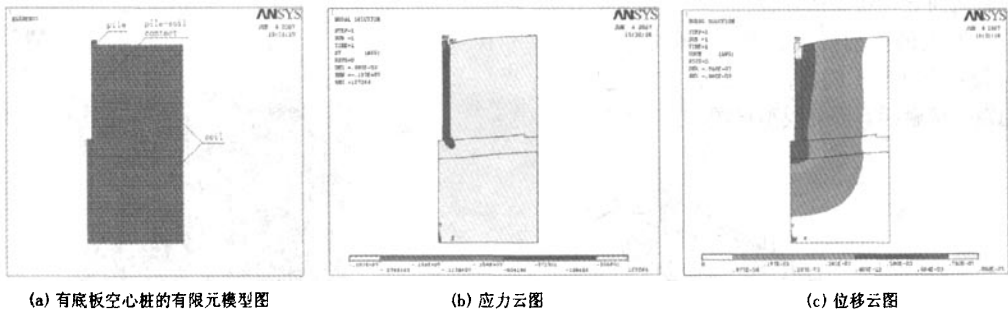


图4 有底板空心桩模型及计算结果云图

从图4可知:随着单元位移的增加,剪应力值也增加,单元开始破坏,接触面单元的摩擦力也达极限。桩产生的应力大,桩周土体应力小,荷载主要由桩来承受;在逐级加载情况下,桩-土接触界面以及桩周的土层发生了塑性破坏,靠近桩周底部的土层出现裂纹,塑性破坏最大,而桩底的土层还没有达到塑性破坏,也就是说是因为桩周土层发生塑性破坏而导致桩达到极限承载力的。

## 5 相应措施和有限元分析

### 5.1 相应措施

(1)为改变桩-土的相互作用效应,使桩、混凝土介质与土体三者接触良好,提高桩侧摩阻力,尽可能地减小桩身位移,进一步提高桩的承载能力,可将桩底浮土清除干净,采取在桩周及其底部区域对土体进行加固,如:灌注水泥浆、化学浆、碎石混凝土等

措施来提高桩的极限承载力。

(2)改善土性,诸如增加土体粘聚力、增加桩周土体弹性模量 $E_s$ 、增加土体内摩擦角等措施,以减小桩体位移,提高桩的承载力。

若桩基位于大坝坝址附近,可在桩周土体内部、表面或不同土层之间埋设低透水性、弹性好、对变形的适应能力强的土工合成材料,如:土工织物、土工膜、特种土工合成材料、复合型土工合成材料等。其作用是防止渗漏和渗透变形等问题的产生,发挥加强和保护土体,进一步提高桩的极限承载力。

### 5.2 结果分析

(1)将该桩在桩周灌注厚度为 $d = 30$  cm的碎石混凝土,与灌浆前进行对比,桩侧混凝土厚度 $d$ 对 $P-s$ 曲线的影响见图5。

比较图5可以看出,在荷载较小时, $P-s$ 图成直线,桩与桩周混凝土处于弹性工作阶段;随着荷载

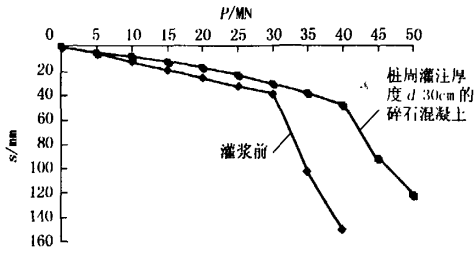


图5 桩侧混凝土厚度  $d=30\text{cm}$  对  $P-s$  曲线的影响

的增加,  $P-s$  图逐渐表现为曲线线形, 桩和混凝土处于弹塑性或塑性阶段。桩周土体为自然土体时, 曲线很快出现拐点, 桩体材料很快达到屈服状态。在桩周灌注碎石混凝土为  $d=30\text{cm}$  时, 曲线拐点逐渐上移, 这表明灌注桩周碎石混凝土, 可以明显减小桩体沉降, 桩体承载力提高明显, 约 30% 以上。当荷载继续增加, 即荷载  $P=40\text{MPa}$  时, 桩周混凝土厚度为  $30\text{cm}$  的桩, 曲线也呈现出下降的现象, 这表明桩周的混凝土有压碎破坏, 桩体位移迅速增加。

(2) 土体粘聚力  $c$  对桩  $P-s$  曲线的影响见图 6。在桩顶荷载  $P$  较小时 (在  $35\text{MN}$  以内), 土体粘聚力  $c$  对桩  $P-s$  曲线的影响并不十分明显, 两段曲线几乎重合。当桩沉降超过  $40\text{mm}$  以后,  $c$  值增加, 桩沉降减小, 承载力提高的现象较为突出。这说明土体粘聚力  $c$  的作用是在桩身出现一定的滑移以后才开始发挥, 且其发挥程度受到桩-土的相对位移的制约。从图 6 可看出: 提高土体粘聚力  $c$ , 桩承载力提高 28% 左右。但当荷载加到  $45\text{MN}$ , 土体粘聚力  $c=30$  时, 桩身曲线下降很快, 这说明土体已经屈服, 粘聚力对于桩体在大荷载、大位移下已不起作用。

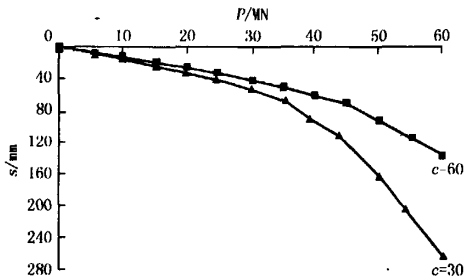


图6 土体粘聚力  $c$  对桩  $P-s$  曲线的影响

由此可知: 一定范围内  $c$  值的增加, 桩承载力的影响也相应的增加。

(3) 增加桩周土体弹性模量  $E_s$  值对  $P-s$  曲线

效果体现见图 7。从图中两段曲线可以看到: 增加桩周土体弹性模量  $E_s$  值, 桩体位移明显减小, 承载能力显著增加。当荷载  $P=24\text{MPa}$  时, 桩周土体弹性模量  $E_s=10\text{MPa}$  的曲线出现拐点, 桩周土体开始屈服, 此后荷载增加, 而桩身位移增加并不明显, 土体由于挤压而处于密实强化阶段。当荷载  $P=32\text{MPa}$  时, 曲线下滑, 位移迅速增加, 土体处于破坏状态。桩周土体弹性模量  $E_s=30\text{MPa}$  的曲线在荷载  $P=32\text{MPa}$  时开始出现拐点, 其承载能力比  $E_s=10\text{MPa}$  的曲线提高约 30%。由此可知, 增加桩周土体弹性模量  $E_s$  值, 可以使桩体位移明显减小, 承载能力显著增加。

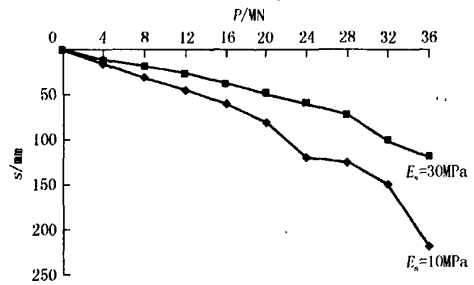


图7 桩周土体弹性模量  $E_s$  值对  $P-s$  曲线的影响

此外, 土体内摩擦角  $\varphi$  的增加, 也能使桩体位移减小、承载力增加, 但土体内摩擦角  $\varphi$  对桩承载能力的影响是随桩身沉降超过一定范围内才发挥。

### 6 结语

由于工程实际条件复杂, 理论计算与实际会有较大误差, 本文旨在抛砖引玉, 给工程界提供一点理论参考。

### 参考文献:

- [1] 张晓萌, 汪拾金, 武晓璠. 桩土相互作用时桩参数对大直径空心桩承载影响的有限元研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(11).
- [2] 张冬霖, 卢廷浩. 一种土与结构接触面的模型的建立及其在应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 62-66.
- [3] 冯忠居, 李晋, 谢永利. 大直径空心桩承载性状的数值仿真[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, (7).
- [4] 卢世深, 林亚超. 桩基础的计算和分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [5] 陈星焯, 张晓萌, 喻小明. 大直径空心桩承载性能有限元仿真及参数分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2006, (6).