

桩基承载力的 ANSYS 有限元分析

杜蓉¹, 张建友¹, 隋丽丽², 张洪美²

(1. 国核电力规划设计研究院, 北京 100094; 2. 山东省滨州市水利勘测设计研究院, 山东 滨州 256600)

摘要: 利用 ANSYS 软件建立土体与桩共同作用的数值模型, 将有限元应用于桩—土结构进行三维有限元数值计算, 得到桩—土结构的应力与变形, 分析了桩—土结构的荷载—沉降曲线及荷载的传递规律, 对以后桩—土模拟及设计有重要的参考价值。

关键词: 桩基础; 桩与土共同作用; 桩—土结构; 数值模拟; 有限元

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2010)04—0213—03

Analysis on Loaded Capacity of Pile Foundation by Finite Element Method

DU Rong¹, ZHANG Jianyou¹, SUI Lili², ZHANG Hongmei²

(1. State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Beijing 100094, China;

2. Binzhou Investigation and Design Institute of Water Conservancy in Shandong Province, Binzhou, Shandong 256600, China)

Abstract: The numerical model of soil and pile interaction is built based on the large finite element software ANSYS, and three-dimensional finite element theory of numerical simulation is applied to the calculation of pile-soil structure. The stress and deformation of the pile-soil structure are obtained and the load settlement curve and load transferring law of the pile-soil structure are analyzed. The research results will be very useful to the pile-soil simulation and design in the future.

Keywords: pile foundation; soil and pile interaction; pile-soil structure; numerical simulation; finite element

0 引言

桩基础是一种历史悠久的建筑基础形式,也是一种应用广泛、发展迅速、生命力强大的现代建筑基础形式。在以现代高层建筑为特征的大型土木建设工程中,都会广泛使用到桩基技术。桩基础已经成为在土质不良的地区修建各种建筑物所广泛采用的基础形式,特别对于高层建筑、重型厂房和具有特殊要求的构筑物,即使是土质良好,桩基也被普遍采用。桩是深入土层的柱型构件,可以定义为垂直或微斜埋置于土中的受力杆件。桩的3个基本要素是^[1]:设置方向、周围介质和结构特性。由桩的定义可知桩的设置方向一般是垂直的,且主要用于承受竖向压力荷载。上部结构作用于桩顶的荷载,通过桩土接触面传递到桩周介质中,因此,桩与周围介质接触面上的剪切特性是决定桩的承载力和变形特征的主要因素之一。虽然桩设置方向单一,结构特性简单,但由于桩周介质(岩土)的复杂性,无论是桩的承载力预测方法,还是桩的沉降分析计算理论,均有待进一步完善。

1 计算理论

1.1 有限元方法基本原理

有限单元法是20世纪60、70年代发展起来的强有力的数值分析方法,它使许多复杂的工程分析迎刃而解,而且随着前、后处理技术的发展,计算效率的提高,实际应用越来越广泛。有限单元法是一种数值分析方法,它从变分原理出

发,把泛函(能量积分)的极值问题转化为一组多元线性方程组来求解;从物理和几何角度来讲,有限元方法被称作矩阵方法在结构力学和弹塑性力学领域发展和应用。有限元方法解决结构问题的基本思想是将该弹塑性体离散分解成有限个小单元体,对于每个单元体,采用有限个确定参数来描述它的力学特性,而对于整个连续弹塑性体的力学特性可认为这些小单元体力学特性按照一定规律进行迭加,从而得出整个连续体的力平衡与连续性关系。

1.2 有限元方法基本方程^[2]

有限元法是将连续体用网格划分为有限数目个单元体,这些单元体之间在节点处相互铰结,形成离散结构,用这些离散结构来代替原来的连续体结构,以分析应力和变形,将荷载移置作用于离散结构的节点上,成为节点荷载。应力—应变关系表示为:

$$[\sigma] = [D][\varepsilon] \quad (1)$$

式中:[D]为弹性矩阵。由虚位移原理和应力—应变关系,可建立节点荷载和节点位移之间的关系,即

$$[K][\delta] = [R] \quad (2)$$

式中:[K],[δ],[R]分别为刚度矩阵,节点位移和节点荷载列阵。解方程可求得位移,进而可推出应变[ε]和应力[σ]的分布。

2 数值模拟

2.1 基本假定

为了在有限元分析中使问题既得以简化又能反映问题

的主要特征,本文只考虑竖向受荷情况下的基本假定:

- (1) 模型采用空间轴对称进行分析;
- (2) 桩身混凝土采用线弹性模型;桩侧及桩底土体假定为连续均匀、各向同性的均质弹塑性材料,破坏准则采用 D - P 准则;
- (3) 土层为均质、各向同性;
- (4) 桩与土体的变形相协调,即交界面无滑移。为考虑桩土接触面单元特性,桩土界面设置接触面单元;
- (5) 由于土体自重产生的变形在成桩前已基本完成,故计算中不计入土体自重引起的应变。

2.2 单桩与土体相互作用有限元计算模型

2.2.1 几何模型

虽然利用数值分析方法研究桩土共同作用已取得了大量有价值的成果^[3~8]。本文利用大型通用软件 ANSYS 对桩土之间的接触问题进行分析,通过荷载步来扣除土体自重施加引起的压缩变形,再现桩顶受载荷时桩顶沉降情况和桩土的受力变形情况,基于桩—土结构之间的相互作用情况以及桩周土体的受力变形情况探讨桩土之间相互作用的机理。

在 ANSYS 中实体模型,理论上,模型区域选取的越大,计算精度越高,但是计算区域越大,计算时间越长,费用就越昂贵。以前的研究一般都假设土体为弹性体,要求的计算区域明显偏大。实际上,土体几乎没有抗拉的性质,传递剪切变形能力很差,桩侧剪应力在土中传递随距离衰减很快。考虑到模拟土体的真实性,经过试算,计算区域选取为:径向取 5 倍桩的直径,竖向取 3 倍桩长。为了降低自由度、减少计算时间,建模时利用对称性原理,桩和土体取 1/4 模型进行计算,在对称面上设立正对称的边界条件,单桩的计算实体模型图和模型网格划分图如图 1 和图 2 所示。

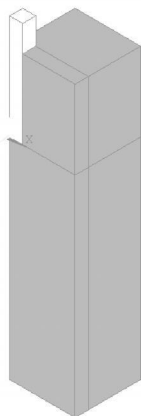


图 1 实体模型

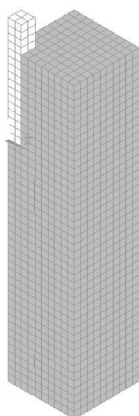


图 2 模型网格划分

2.2.2 材料的选择及所用参数

对桩身选用线弹性模型,土体选用弹塑性模型,桩土间添加接触面单元。桩周土的本构模型,本文采用 Duncan - Chang 模型^[8],这种模型在岩土工程中应用较多,能反映土体的剪胀效应。

本文收集了 Drucker - Prage 模型参数的部分经验值,这些经验值选自某些文献提供的经验值或个别工程的试验值,由于资料有限,所收集的数据很不完善,有待进一步补充。

这些计算参数有很大的地区性,因此表 1 中所列的参数只可作为范围值,本章所采用的计算参数是参考这些经验值并作调整而得到的,本文模型所使用的参数为:土体采用 Drucker - Prage 理想弹塑性材料,主要参数有弹性模量 E 、泊松比 μ 、粘聚力 c 和摩擦角 ϕ 。桩身材料由混凝土浇筑制成,其受荷变形远小于土体,在荷载作用下基本处于弹性工作状态,故其材料定义为弹性材料。

桩—土之间接触采用面—面接触单元模拟桩—土接触面上的非线性,本文选用刚体—柔体的接触单元来模拟桩土交界面的非线性,桩侧面被作为“目标”面,用 Target170 来模拟;土体的表面被当作“接触”面,用 Contal73 来模拟。主要参数涉及接触面的摩擦系数 μ ,取为 0.3。

表 1 材料性能参数

材料类型	μ	ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	c /Pa	φ /($^\circ$)	E /MPa
土体	0.2	2000	30000	25	30
桩	0.3	2500			3000

2.2.3 网格划分

建模时桩身和土体的模型均采用六面体 8 节点 SOLID45 实体单元进行网格划分。整个计算模型中的单元之间由节点相互连接,单元变形满足几何连续性。

2.3 加载和求解过程

2.3.1 边界条件

由于所研究的模型属于轴对称模型,故在建模时只取了其 1/4, XZ 面、 YZ 面为对称面,所以在 XZ 面、 YZ 面上施加对称约束;除上表面无约束外,其余各界面均为固定约束。

2.3.2 加载过程

在桩体表面施加面载,考虑土体的自重。荷载直接施加于实体模型上,在 ANSYS 程序中,求解时程序自动将所加荷载转换到节点和单元上。取桩径 $D = 1\text{ m}$,桩长 $L = 40\text{ m}$,加载过程中模拟桩静载试验逐级加载,一般每级加载量为最大试验荷载的 1/10 到 1/15,根据试算结果,取最大试算荷载(5 MN)的 1/10,每级加载量为 0.5 MN。

2.3.3 初始地应力的模拟

计算过程分 13 个荷载步,第 1 步为土体在自重作用下的计算,第 2 到第 13 步为各级荷载和重力共同作用的计算。对于实际的工程,桩施工之前,绝大部分土体已经完成固结,在数值模拟时,施加自重应力会引起土体的压缩变形。因此,本文在确定各级外荷载作用下的桩土变形时,在后处理中均减去了第 1 个荷载步产生的变形。

3 计算结果分析

荷载作用下的桩—土结构沉降及应力如图 3、图 4 所示。

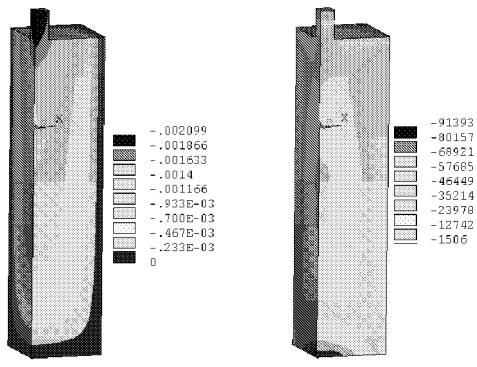


图 3 5 MN 荷载下桩土沉降 图 4 5 MN 荷载下桩土垂向应力

单桩的 $P-S$ 曲线特征是桩体受力特征宏观外在的表现。研究桩体在不同荷载作用下的 $P-S$ 曲线特征是揭示桩体受力机理的主要途径。

图 3、图 4 给出的是桩径 $D=1\text{ m}$ ，桩长 $L=40\text{ m}$ 时，桩土在某一荷载下沉降和垂向应力。从图可知：在竖向荷载作用下，土体形成以桩为中心的沉降盆，靠近桩身附近的土体沉降较大。从垂向应力图可以得出，最大应力不是发生在顶部也不是发生在底部，而是桩身中部偏下的应力较大，之所以出现这样的结果，是侧壁出现摩阻力的作用。荷载作用下，土体将发生较大的沉降，桩的沉降却较小，加入接触单元后，能够使得两者变形尽量协调，但由于两者刚度差别太大，因此最大垂向应力出现在中部偏下部位。

图 5 给出的是桩径 $D=1\text{ m}$ ，桩长 $L=40\text{ m}$ 时，单桩的荷载—沉降曲线，即 $P-S$ 曲线。曲线为一个缓变型曲线，没有明显的转折点，说明桩有良好的变形协调能力和良好的承载能力。曲线前半部分近似为一斜直线，表明此时桩顶受荷与沉降呈线性关系；当荷载继续增大，接近建筑物的极限承载力时，位移增长明显加快，曲线的后半部分曲率稍有增大。

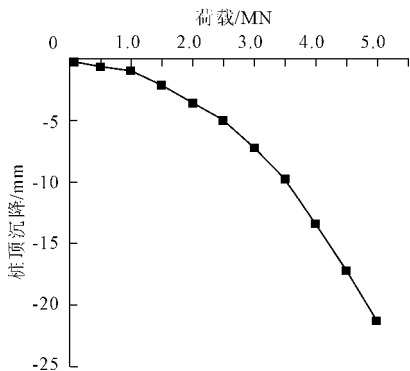


图 5 单桩的荷载—沉降曲线

通过图 6 可以看出：分布曲线大致可以分为 3 个阶段：第 1 阶段基本持平还会略有增加，第 2 阶段出现下降的趋势，下降较缓慢；第 3 个阶段急剧下降阶段。最大轴力为 4.97 MN，随着桩深度的增加，桩底部轴力为 1.87 MN。说明

桩身轴力沿其深度的增加而逐渐减小，桩身轴力符合桩的受力规律，同时桩身轴力分布曲线有一定的倾斜。

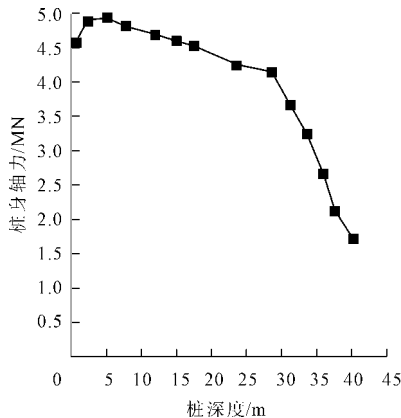


图 6 单桩的桩身轴力随深度变化曲线

4 结 论

(1) 有关桩—土共同作用研究的文献报道很多，其计算方法和程序也有很多。该文简单的介绍了 ANSYS 在桩—土共同作用中的应用，该方法简便易行，免去了编译原始程序的烦琐过程，从而大大提高了工作计算效率。在三维问题中接触面的设置比较困难，而其摩擦系数极限应力较难确定，计算需要耗费计算机大量空间和时间，而且一旦计算参数设置不当，很容易造成求解不收敛，笔者认为，在利用 ANSYS 分析桩—土共同作用时，一定要合理选择确定计算时所需土的物理力学参数，并且计算模型能简化的则简化。

(2) 通过 ANSYS 中荷载步操作减去土体自重作用下的变形能较为真实地反映桩和土体的共同作用机理，但桩—土之间的接触单元参数的选取是一个反复试算的过程，适合于具有实测资料的反演模拟。

参考文献:

[1] 颜云辉, 谢里阳, 等. 结构分析中有限单元法及其应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000.
[2] 王幼青, 张克绪. 竖向荷载作用下单桩工作性能模拟分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(5): 667-670.
[3] 齐良锋, 简浩, 唐丽云. 引入接触单元模拟桩土共同作用[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 127-130.
[4] 纪淑鹏. 弹塑性土体中竖向受荷单桩数值分析研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(增刊): 755-757, 760.
[5] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社出版, 2005.
[6] 蔡敏, 付春友, 张文斌. 考虑桩土共同作用的桩基沉降分析[J]. 武汉大学学报, 2008, 41(增刊): 126-129.
[7] 王先军, 周文宇, 蒋鑫. ANSYS 在模拟桩土接触中的应用[J]. 森林工程, 2006, 22(3): 49-51.
[8] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.