

# 桩 - 土相互作用下单桩沉降影响因素的数值分析

孙 亮<sup>1</sup>, 高金川<sup>2</sup>

(1. 中交天津港航勘察设计研究院有限公司, 天津 300450; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**从相互作用的角度出发, 探求桩土相互作用体系中单桩沉降的影响因素, 试图为桩基础的承载力设计和沉降量控制找到一种理论依据, 并利用有限元软件 ADINA 建立桩 - 土相互作用的数值模型并进行分析。

**关键词:**桩 - 土相互作用, 沉降, 数值模拟, ADINA

**中图分类号:** TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 7428(2009)04 - 0043 - 04

**Numerical Analysis on Influence Factors of Single Pile Settlement under Pile-soil Interaction/SUN Liang<sup>1</sup>, GAO Jin-chuan<sup>2</sup>** (1. CCCC Tianjin Harbor Consultants Co. Ltd, Tianjin 300450, China; 2. Engineering Faculty of China University of Geoscience, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Based on the interaction of pile and soil, this article explored the influence factors of the single pile settlement in pile-soil interaction, and tries to find a theory basis for the design on bearing capacity of pile foundation and settlement control. FEM software ADINA was used to establish the numerical model of pile-soil interaction, which was applied to solve the problem.

**Key words:** pile-soil interaction; settlement; numerical simulation; ADINA

随着我国经济的快速增长, 高层、超高层建筑得到了迅速的发展, 然而高层建筑因为层数多, 荷载大而对地基基础的要求越来越高, 对基础的设计与施工提出了更高的要求。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007 - 2002) 中规定: 对于以控制沉降为目的的桩基, 在基础设计中, 应考虑桩 - 土相互作用的效应。然而如何合理考虑桩土相互作用产生的桩基沉降问题, 是近年桩基础研究所面临的新课题。

近年来, 桩土相互作用下桩基的沉降问题引起了国内外学者的高度重视, 特别是单桩的沉降的影响因素问题。单桩的沉降直接关系到群桩的沉降问题, 是预测群桩沉降的基础。另外, 大直径的钻孔灌注桩由于承载力大, 通常可以采用单桩的型式来支撑建筑物或桥梁的上部荷载, 因此对单桩沉降分析的准确性要求越来越高。

## 1 参数的选取与模型建立

为了能够得出桩 - 土相互作用结果的变化规律, 对桩进行二维数值模拟, 并且对于每一物理模型, 分别改变它的桩径、桩土模量等条件, 以总结其对单桩沉降的影响规律。为桩基础设计提供参考。

桩 - 土之间的滑动关系相当复杂, 为了简化分析, 做了如下的假定:

(1) 土体本构模型为 Drucker - Prager 模型, 桩体为线弹性模型, 桩 - 土接触采用库仑摩擦形式;

(2) 考虑自重初始应力场, 桩顶荷载施加模拟静载试验的加载方法, 并假定荷载产生的超孔压有足够的时间消散。每次施加荷载设为 200 kPa。

计算时设桩体的弹性模量为 25500 MPa, 泊松比取 0.167, 土体的重度为 18.80 kN/m<sup>3</sup>, 粘聚力为 25 kPa, 内摩擦角为 30°, 接触面摩擦系数  $\mu = 0.42$ , 桩土接触粘聚力为 16 kPa。

土的弹性模量为 6 MPa, 模拟后处理的桩顶位移随荷载变化展示如图 1 ~ 4。

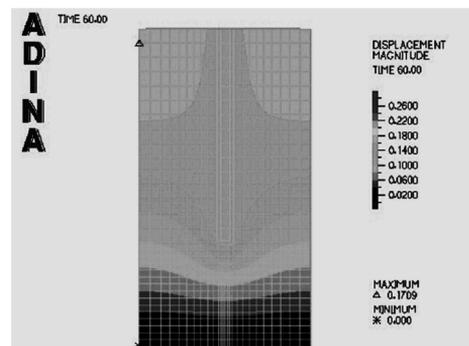


图 1 荷载为 200 kN 时的沉降图

收稿日期: 2008 - 07 - 06

**作者简介:** 孙亮(1985 -), 男(汉族), 黑龙江齐齐哈尔人, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司, 地质工程专业, 硕士, 从事勘察设计工作, 天津市塘沽区中心路增 1 号, sld1981@163.com; 高金川(1963 -), 女(汉族), 陕西宝鸡人, 中国地质大学(武汉)副教授, 工程地质专业, 从事岩土工程勘察、城市地质灾害研究与治理、基础工程方面的教学和科研工作, 湖北省武汉市鲁磨路, gjinc@126.com。

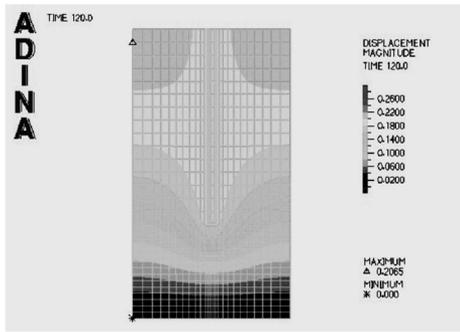


图2 荷载为400 kN时的沉降图

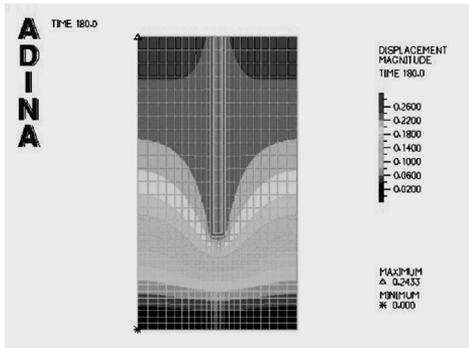


图3 荷载为600 kN时的沉降图

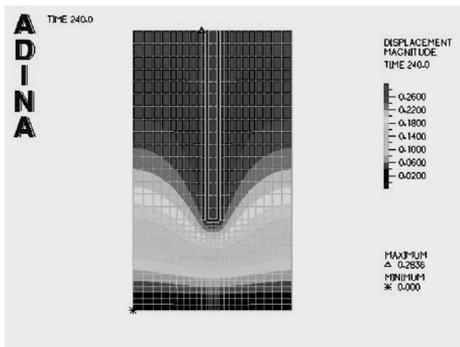


图4 荷载为800 kN时的沉降图

## 2 土的性状对沉降的影响

桩-土体系的荷载传递开始时主要靠侧阻力来维持,桩侧土的性状对桩土体系的影响是巨大的。本节将分析桩侧土弹性模量按6、8、10和12 MPa顺序变化时对单桩沉降的影响(见图5),桩长统一取10 m,桩径为0.6 m。

由荷载-沉降曲线可得:随着桩顶荷载的增加,桩侧土的性状越好,即弹性模量越大,同等荷载作用下桩顶的沉降就越小,因而土弹性模量越大,桩的极限承载力越高。但当土的弹性模量增大到一定的程度,其对桩沉降的影响关系不是很明显。

同样,在不同桩侧土情况下,侧阻力与端阻力发挥的程度和大小是不同的,根据模拟得出侧阻力和

端阻力的大小,桩顶荷载与桩侧阻力和桩端阻力的变化关系如图6、图7。

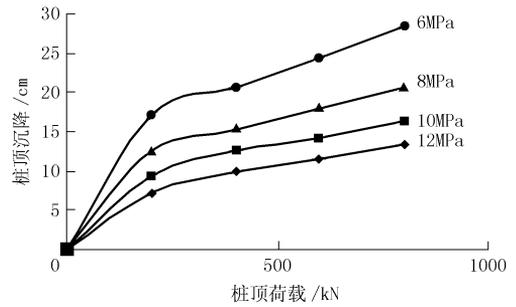


图5 土的弹性模量与桩沉降的关系图

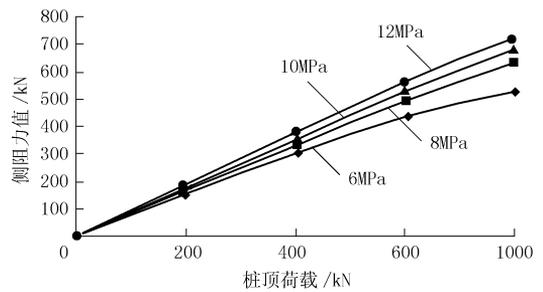


图6 不同弹性模量下桩侧阻力与桩顶荷载的关系图

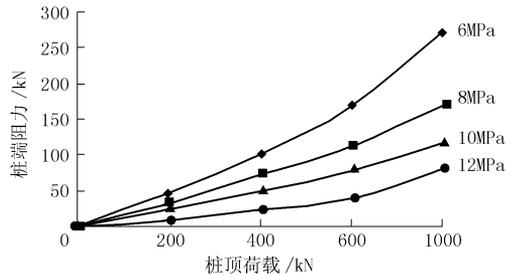


图7 不同弹性模量下桩端阻力与桩顶荷载的关系图

随着桩侧土弹性模量的增加,桩侧阻力在不断增加,且增加值随着桩顶荷载的增大而逐渐增大;而由于侧阻力与端阻力之和等于桩顶荷载,所以桩端阻力则随着桩侧土弹性模量的增加而下降。并且桩顶荷载与侧阻力的关系几乎呈直线变化,这是因为在桩的各个尺寸已知的情况下,其侧阻力大小只与桩侧土的性状有关,只要侧阻力没有发挥到极限值,两者都是线性的直线关系,而一旦侧阻力发挥到极限值后,则该曲线可能要发生屈服。一开始随着桩顶荷载的增加,桩侧土摩阻力逐渐发挥,在同等桩顶沉降的情况下,桩侧土弹性模量越大,则所能发挥的侧阻力就越大;在同等侧阻力作用下,随着桩侧土性状的提高,所对应的桩顶沉降则越小。随着桩顶荷载的逐渐增大,侧阻力逐渐发挥,但是增加的趋势变缓。这与桩顶荷载沉降关系类型相似,这也说明了由于桩侧土先与桩端土发挥,因此桩侧土的性状直

接决定了桩的承载力性状。

### 3 桩长对沉降的影响

本节主要考虑桩长变化对单桩沉降的影响,模拟时假设桩在同一土层中,即桩端和桩侧为同一土层,分别计算桩长为 10、12、15、20 m 时单桩沉降的变化(图 8)。桩径取 0.6 m,土的弹性模量取 6 MPa。

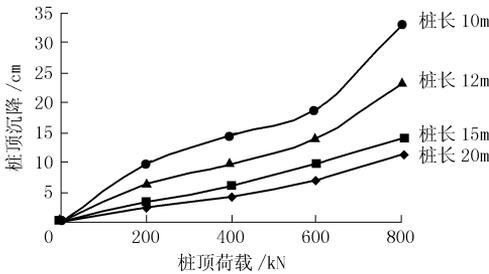


图 8 桩长与桩顶沉降的关系图

由图 8 可见,桩长的增加也将大幅度提高桩的承载力。10 m 长的桩的荷载 - 沉降曲线的破坏点很明显,而 20 m 长的桩的沉降随荷载变化不是很明显,这可能是计算时所加荷载尚不及桩的承载力的极限值,从而没有出现拐点。但是无论如何,随着桩长的增加,同等桩顶荷载作用下的桩顶沉降明显减少,从而可有效提高桩的承载力。在同样桩顶荷载作用的情况下,改变桩长,相应的桩侧阻力和桩端阻力也发生变化,随着桩长的增加,桩侧阻力与桩顶荷载几乎成线性关系增加,与桩长本身并没有直接的关系(见图 9)。

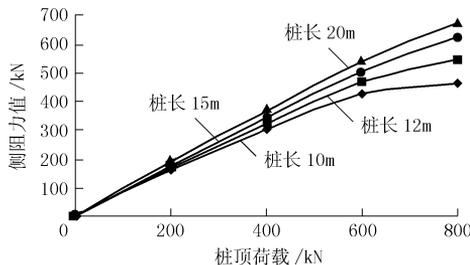


图 9 不同桩长下桩侧阻力与桩顶荷载的关系图

但是对于较短的桩,在曲线的尾段侧阻力值增加不明显,这可能是因为桩顶荷载达到 600 kN 时,短桩的侧阻力已经全部发挥,而增加桩长时桩自身的承载能力较大,如图 9 所示,20 m 长的桩,桩顶荷载为 800 kN 时,桩侧阻力尚没有发挥完全,因此曲线关系是直线段;相应的桩端阻力也随着桩长的增加而逐渐得到发挥,10 m 桩长的曲线在尾段发生突变,这是因为其侧阻力发挥完全后承载力的增加部

分全部由桩端阻力承担的缘故,见图 10。

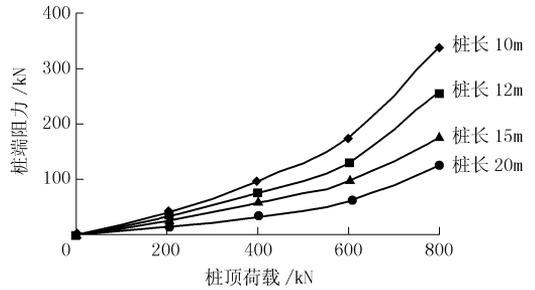


图 10 不同桩长下桩端阻力与桩顶荷载的关系图

随着桩长的增大,桩的承载力将大大增加,桩长增大则侧阻力必然增大,并且在同样桩随着桩顶荷载的增大,端阻力作用下时,桩长越长,则所对应的桩顶沉降越小。但是总体来看,两者的关系并不是很明显。

总之,随桩长的增加,桩顶沉降量减小。桩长较短时,桩顶沉降量很大,桩长为零则相当于天然地基。增加桩长对减小桩顶沉降的效果很明显;桩长较大时,桩顶沉降已比前面降低很多,但仍然比较大,继续增加桩长能使桩顶沉降进一步减小,但效果不是很明显;桩长增加到一定程度,桩顶的沉降趋于稳定,此时继续增加桩长对减小桩顶沉降几乎不产生影响。

在工程中,桩顶沉降随桩长的变化曲线可以作为桩基础设计中确定桩长的重要依据,以避免使用过长的桩,从而减少经济上的浪费和施工上的困难。

### 4 桩径对沉降的影响

本节分析桩径变化对单桩沉降的影响,分别考虑了桩径按 0.6、0.8、1.0 和 1.2 m 顺序变化时对沉降的影响,桩长统一取 10 m,土的弹性模量取 8 MPa。

由图 11 可见,桩径的增加将会增加桩的承载力,桩径 0.6 m 的桩的荷载 - 沉降曲线的破坏点很明显,桩径为 0.8 和 1 m 的曲线也开始出现拐点,但不是很明显,而桩径 1.2 m 的荷载 - 沉降曲线接近线性曲线,这是由于桩径增大能提高桩的承载力,在计算荷载的作用下,1.2 m 桩径的桩还没有达到极限承载力所致。

由此可见,桩应力随桩径的变化逐渐减小,但当桩径 > 1 m 之后,桩径的增加对减小桩体应力所起的作用逐渐不明显。在实际工程中,为了减小桩体沉降,可以适当增加桩径,但还要综合考虑地质条件、周边环境、经济效益等因素。

将此时不同桩径下得出的桩侧阻力和桩端阻力

与桩顶荷载之间的数值用曲线表示,如图12、13。

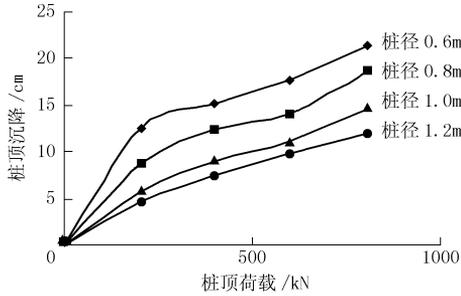


图11 桩径与桩顶沉降的关系图

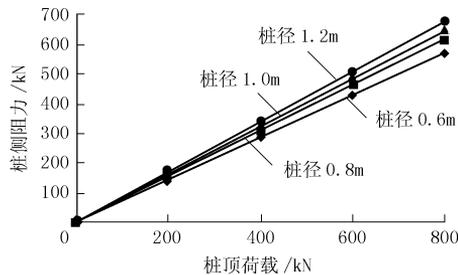


图12 不同桩径下桩侧阻力与桩顶荷载的关系图

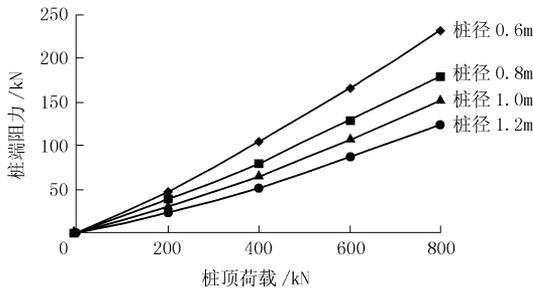


图13 不同桩径下桩端阻力与桩顶荷载的关系图

由图12可见,侧阻力与桩顶荷载近乎成线性关系,随着桩顶荷载的增大而逐渐增大,这与用经验公式计算侧阻力时的情况是非常吻合的。同时由于侧阻力和端阻力的和就是桩顶荷载,由此可得端阻力的值,由图13可见,端阻力值与桩顶荷载也是成线性关系增加的,而这与用经验公式计算端阻力时的结果是不完全相同的,可能原因是端阻力是在侧阻

力之后发挥的,其具体发挥的大小可能不是经验公式表示的那样。

## 5 结论

(1)随桩的长度 $L$ 和直径 $D$ 的增加,桩的沉降有随之减小的规律,并且都有减少的幅度逐渐变小的趋势,由此可知,在工程实践中要选取合适的桩长和桩径,不能无限制的增大桩长和桩径,因为这样既造成不必要的经济浪费,而且当桩长和桩径增加到一定值后,继续增加将不能有效减少桩基础的沉降。

(2)桩的沉降随弹性模量 $E$ 的增加而减小,但是到一定限度以后,弹性模量 $E$ 的继续增加对单桩的沉降影响不大,这是由于随着弹性模量的增加,持力层土体的粘聚力和内摩擦角也逐渐增加,则桩的沉降随之减小。由此可得,要减小桩基础的沉降量,可以通过对地基土进行改良,比如反复夯实、对软土进行置换等方法。

(3)桩长 $L$ 、桩径 $D$ 和弹性模量 $E$ 的增加反映了桩体刚度的增加,使得桩通过桩侧摩擦阻力和桩端阻力将上部结构荷载更多的传到持力层中去,从而减小了沉降。在这几个因素当中,土的弹性模量对桩顶沉降的影响要更大一些。

## 参考文献:

- [1] Small J. C., Zhang H. H. Behavior of Piled Raft Foundations Under Lateral and Vertical Loading[J]. The International Journal of Geomechanics, 2002, 2(1).
- [2] Clancy, p. & Randolph, M. F. A Contribution to Optimum Design of Piled Rafts[J]. Geotechnique, 1996, 48(3).
- [3] 宰金珉,宰金璋. 高层建筑基础分析与设计(土与结构物共同作用的理论与应用)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [4] 曹汉志. 桩的轴向荷载传递及荷载-沉降曲线的数值计算方法[J]. 岩土工程学报, 1986, 1(6).
- [5] 秦义新. 考虑桩土滑移的单桩沉降计算分析[D]. 杭州:浙江大学, 2005.

(上接第36页)

差,动力头钻机相对于立轴式钻机的优势逐渐变小。这是因为动力头钻机提钻长度小,提下钻次数多后,其提下钻速度慢的弱点就会变得突出。

(3)液压元件成本高,功率消耗大,是动力头钻机又一大弱点。

## 4 结语

经过生产实践体会到,CS14型全液动力头钻

机性能优越,施工效率高,质量好,事故率低(包括孔内事故和机械事故),在复杂地层和浅孔、中深孔具有较大优势,是一种适应性强及轻便的钻机。但在深孔施工优势不明显,且处理事故能力差,功率消耗大,成本较高。动力头钻机应是我国地质岩心钻机大力发展的趋向。