

文章编号:1673-2049(2010)01-0031-05

基于 ADINA 的桩基荷载-沉降全过程计算

宋 兵^{1,2}, 蔡 健¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 广州市建筑科学研究院, 广东 广州 510440)

摘要:对桩基计算理论进行了概括,介绍了利用 ADINA 软件进行桩基荷载-沉降全过程计算的方法和步骤,探讨了几个主要参数对计算结果的影响;对 2 根试验桩进行了内力测试,并利用 ADINA 软件模拟了荷载-沉降全过程,得出了不同土层桩侧摩阻力的变化规律,并与实测值进行了对比;分析了 ADINA 计算系统的优势及不足,提出了使计算更符合实际的改进方向。结果表明:ADINA 计算结果与实测结果吻合良好,可对桩基础进行优化设计。

关键词:ADINA;荷载-沉降;有限元分析;桩侧摩阻力;内力测试

中图分类号:TU437.1

文献标志码:A

Calculation of Load-settlement Whole Process for Pile Foundation Based on ADINA

SONG Bing^{1,2}, CAI Jian¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China; 2. Guangzhou Institute of Building Science, Guangzhou 510440, Guangdong, China)

Abstract: The calculation theories of pile were summarized. The calculation methods and procedures of load-settlement whole process were introduced. Several main calculation parameters and their influences on the results were discussed. The load-settlement whole process of two testing piles were simulated by using ADINA software, and the changing rules of pile skin friction for different soils were obtained. The values of side soil resistance of different soil sections were calculated and compared with testing values. The superiority and shortage of ADINA calculation system were analyzed and the way for improving ADINA calculation was put forward. The results show that the calculated results agree well with the measured results for ADINA, and the optimizing design is made for pile foundation.

Key words: ADINA; load-settlement; finite element analysis; pile skin friction; internal force testing

0 引言

对于桩的承载力计算问题,目前有很多方法,可归纳如下:一是基于力学分析的计算方法,这一类的

代表有荷载传递法、弹性理论法、剪切变形传递法等;二是经验性的理论方法,如“灰色系统”方法及基于实测资料的神经网络映射方法等;三是数值方法,此类的代表性方法即有限元法。试验证明桩的侧摩

收稿日期:2009-11-09

基金项目:国家自然科学基金项目(50878087)

作者简介:宋 兵(1975-),男,山东烟台人,广州市建筑科学研究院高级工程师,华南理工大学工学博士研究生,

E-mail:seros0497@sina.com。

阻力及端阻力发挥是受桩型、桩长、岩土层分布、底部持力层情况等因素影响的^[1-3],由于桩土之间及土层之间存在着复杂的相互影响,因此孤立地、简单地叠加已有的各土层试验统计结果是不准确的^[4]。实际桩侧摩阻力的发挥还受多方面的影响,主要分 2 类:一类是土的体积变化,如砂土的剪缩和剪胀^[5]、受力后应力角的偏移引起的体积变化^[6]等;另一类是因土层相互作用及桩土相互作用造成的摩阻力变化,即受力方向的变化(抗拉、抗拔)、桩端持力层情况^[7]、桩身泊松效应等。研究第 1 类影响需对土的本构模型有更精细的描述,有限元法对研究第 2 类影响有先天的优势,只要模型建立正确,这些影响都可以一一解决。因此在各种桩的计算理论中,有限元法可以考虑到土层之间及桩土之间的相互作用,是比较合理的计算方法。由于有限元法编程复杂,在早期大型通用软件还不成熟的情况下,应用受到很大限制,目前计算机在软件、硬件方面都已取得了长足的发展,使大范围地采用有限元法进行桩基的理论分析成为可能^[8]。

目前比较常用的有限元分析软件有 ANSYS、ABAQUS、ADINA 等,关于 ADINA 的中文介绍较少,而 ADINA 在桩土界面的接触分析及土的大变形分析方面有很大的计算优势,本文中笔者对 ADINA 在桩基计算中的应用进行探讨。

1 分析过程

ADINA 软件是一个单机系统的程序,是用于结构相互作用的流体流动的完全耦合分析的最主要的程序之一。ADINA 程序提供了世界领先的、用于 2-D 和 3-D 固体应力分析以及静力学和动力学中结构分析的功能,分析对象可以是线性的,也可以是非线性的,如材料非线性特性的影响、巨大变形和接触条件。在接触分析方面 ADINA 软件具有超强的实力,桩土界面分析是典型的接触问题,使用 ADINA 软件进行桩的计算分析非常适合。ADINA 程序的相关步骤及命令如下:

(1)建立几何模型。图 1 为有限元网格划分区域。有限元计算采用平面轴对称模型,此模型已足可完成桩在抗压及抗拔受力情况下的分析,首先定义点的坐标,根据桩的实际尺寸及土层的分布情况定义边界点的几何坐标。土体的计算底面在土层下 $1.5h$ 处, h 为桩长,土层取 $50D$, D 为桩径,此时可认为满足桩对土层的影响范围。

(2)根据点的位置定义平面,定义完平面后,相

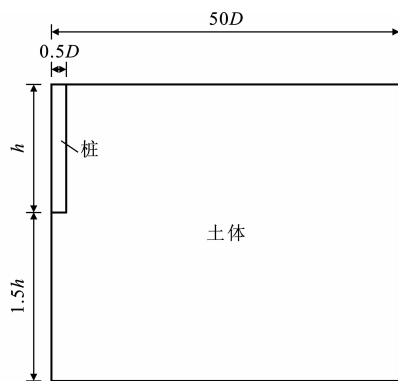


图 1 有限元网格划分区域

Fig. 1 Grid Division Area of Finite Element

应的线编号就自动生成了。

(3)定义边界条件。边界条件是土层底面相应编号的线为 z 向约束(竖向位移为 0),右边土层边界线为 y 向约束(水平位移为 0)。

(4)定义材料特性。对于岩土材料可选用软件自带的 Mohr-Coulomb 模型或 Drucker-Prager 模型,也可使用自编的本构模型。

(5)初始地应力的计算。ADINA 软件中的初始地应力施加可通过变换桩单元方法实现。开始时在桩单元的位置设置若干个临时单元,为了后期在边界处初始地应力施加方便,可选择与土层划分方式相同的位置设置临时单元,单元的特性可选择与土层相同进行计算,从中提取地应力。在此步计算中不需输入静止土压力系数,将土体整体进行计算,根据建立的模型、边界条件、材料特性及所受重力荷载经有限元分析计算出各节点的应力,即为初始地应力。

(6)施加重力荷载。在荷载类型中选择按质量均匀分布,定义重力加速度及方向。

(7)单元划分。对各条线指定网格划分密度,可根据离桩土层远近划分不同密度的单元。ADINA 软件在对网格进行单元划分的同时定义单元组,使用网格划分可将代表土层或桩的区域划分为不同的单元组,而单元组又是与材料特性相对应的。

(8)应力计算。将计算结果按每个土层单元输出到不同的 txt 文档。输出的结果为单元应力,按 stress-ZZ、stress-YY、stress-XX、stress-YZ、stress-XZ、stress-XY 的顺序输出。列出结果后要将文件处理成 ADINA 的数据表格形式,具体方法为用替换的方式去掉所有的 Node 字符,即多余的文件说明,然后用 Excel 文件将连续空格转化成为制表符,最后输出新的 txt 文档。

- (9)删除在计算初始应力时建立的临时单元,重新定义 4 个点代表桩身,然后由这 4 个点定义桩的面,对桩的面进行单元划分,施加初始应力。
- (10)在代表桩顶的直线上施加均布荷载,定义时间函数及计算步。
- (11)在代表桩的直线及代表土的直线交界的地方设置接触面及接触对,接触对采用库仑摩擦模型,以摩擦因数为主要控制条件。
- (12)进行计算分析。

2 界面接触条件

目前有限元分析中用到的摩擦模型基本上有以下 3 种:

- (1)Coulomb 摩擦模型。它是基于经典摩擦理论的模型。ADINA 提供了该模型的便捷使用界面,并提供了非常可靠的隐式算法。通过该模型的计算,可以观察到桩土之间相对滑移的情形。
- (2)界面本构方程。它由方程给出切向力,类似于材料的本构方程。很多文献中使用了这种模型,该模型的界面条件需通过试验确定,对没有试验资料的界面情况使用依据不足。
- (3)粗糙-润滑模型。它模拟界面物理特性的行为,常用于微观尺度^[9]。

3 模型计算的主要参数及其影响

ADINA 的计算参数可以分为 2 大类,一类是材料参数,另一类是界面参数。在材料参数中,主要有桩或土的弹性模量、泊松比、密度,对于土层还有 2 个重要的参数,即粘聚力和内摩擦角。下面对这些主要参数的影响进行分析:

- (1)弹性模量反映了桩或土的刚度,土的刚度越大土越不易变形,该土层在相同桩身位移的情况下侧摩阻力发挥较大,增大土层的刚度在同样受力情况下计算出的桩位移较小。桩的刚度越大桩身变形越小,桩顶与桩底的位移越接近,顶部荷载越容易向下传递。
- (2)泊松比是土的横向与纵向位移的变形比,泊松比越大,在相同纵向位移的情况下,土的横向位移越大,通过有限元分析发现,改变桩端和桩侧土的泊松比对结果影响很小,说明土的泊松效应影响甚微。
- (3)土的密度主要影响初始地应力的计算,密度大的材料所受重力大,当侧压力系数相同时土对桩施加的侧向压力大。
- (4)土的粘聚力和内摩擦角是影响土体强度的

主要指标,粘聚力和内摩擦角越大,土体越不易破坏,桩的侧摩阻力计算值越大。粘聚力和内摩擦角足够大时可使桩土之间的破坏发生在界面处,侧摩阻力由 Mohr-Coulomb 模型所确定的界面静摩擦力控制。粘聚力和内摩擦角还会对初始土压力造成影响,经有限元分析可知:粘聚力不变,内摩擦角越小,则自重引起的土体的侧向压力越大;若内摩擦角不变,粘聚力越小,则土体的侧向压力越大。

(5)ADINA 界面中最主要的参数是 Mohr-Coulomb 模型中的摩擦因数。摩擦因数越大,相同侧向力的作用下极限侧摩阻力越大。

从上述分析可知,ADINA 计算体系的物理意义明确,除界面的摩擦因数需根据经验取值外,其余参数均可从工程的岩土勘察报告中获取。与摩擦因数相比,侧摩阻力是一个受桩土之间或土层之间相互作用影响甚小的值,一经确定可直接用于相似界面情况的模拟计算中。

4 计算实例分析

为使结果具有代表性,选取 1 根钻孔桩及 1 根管桩进行有限元分析,对 2 根桩均进行了内力测试,可深层次地检验有限元分析的结果。钻孔桩桩径为 $\Phi 1\ 000$,桩长为 23.8 m,试验情况见文献[4];管桩桩径为 $\Phi 400$,桩长为 36.0 m。

2 根试验桩地质情况及主要有限元参数的取值见表 1、2,各土层参数参考地质勘察报告取值,摩擦因数参考文献[10]取值。图 2~4 为试验桩计算结果与实测结果的对比。

表 1 钻孔桩的土层参数
Tab. 1 Soil Layer Parameters of Drilled Piles

桩侧土层类型	层底深度/m	弹性模量/MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	摩擦因数
素填土	4.2	3.2	1.6	10.0	5.2	0.30
淤泥质土	6.0	4.0	1.7	12.0	8.2	0.25
粉质粘土 (可塑)	9.1	4.9	1.7	20.0	11.8	0.75
中砂	15.5	6.0	1.8	0.00	31.0	0.70
粉质粘土 (硬塑)	17.5	8.8	1.9	32.0	22.0	0.85
强风化粉砂质泥岩	22.0	15.0	2.1	42.0	35.0	0.90

由图 2~4 可以看出:采用 ADINA 有限元法计算结果与实测结果吻合较好。本文的算法是直接采用地质勘察报告中的相关土参数,根据桩与土层的

表 2 预应力管桩的土层参数
Tab. 2 Soil Layer Parameters of Prestressed Pipe Piles

桩侧土层类型	层底深度/m	弹性模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	界面摩擦因数	界面粘聚力/kPa
填土及淤泥	10.2	3.1	1.7	15.0	6.0	0.10	20.0
细砂	11.8	5.0	1.9	0.0	16.0	0.80	7.0
淤泥	40.7	2.1	1.6	10.0	4.0	0.10	20.0
砂质粘土土	53.1	6.0	1.8	21.0	33.0	0.85	14.0
全风化花岗岩	58.0	8.8	1.9	42.0	34.0	0.90	30.0

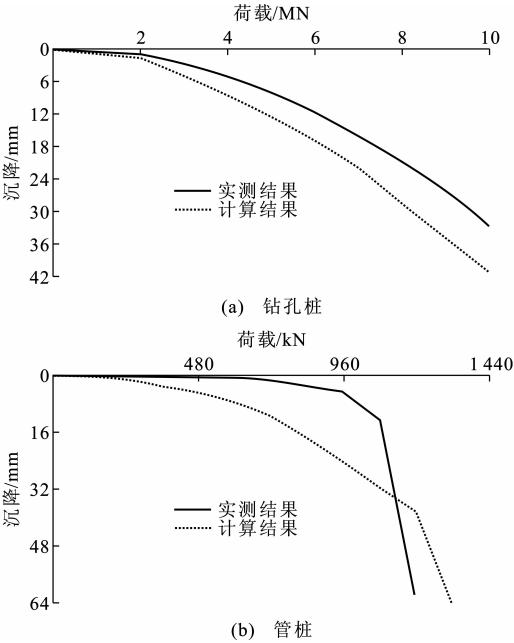


图 2 桩的荷载-沉降曲线

Fig. 2 Relations of Loads and Settlements of Piles

实际尺寸及分布情况建模,由土层重力引起的侧向压力与摩擦因数估计值相乘来模拟界面的条件,这些条件可根据已有的地质勘察情况获得,不需额外进行试验,便于对工程进行预估。在分析中惟一需要额外确定的是摩擦因数,而此值是相对稳定的,当桩与土的情况确定时,可凭经验获得。该值不受土层之间或桩土之间的影响,可通过一定的试验确定取值,因此采用 ADINA 计算系统可以考虑到土层之间或桩土之间的相互作用对侧摩阻力发挥造成的影响。

5 结 语

(1)采用 ADINA 分析时可使用岩土勘察报告中的参数进行计算,计算参数易于取得。其侧摩阻力的大小是通过界面的摩擦力条件及土的参数取值间接推导出来的,符合桩土本身的受力规律,物理意义明确。

(2)ADINA 模型计算出的破坏形式有 2 种:一

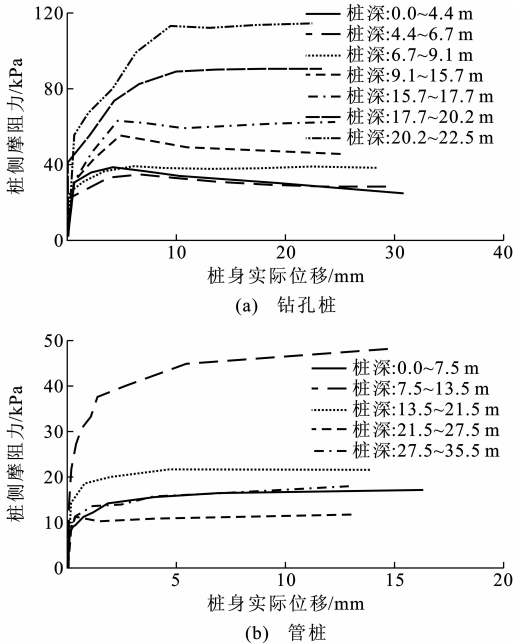


图 3 桩侧摩阻力-桩身实际位移实测曲线

Fig. 3 Measured Curves of Pile Skin Frictions and Real Pile Section Displacements

是界面破坏,引起的原因可能是摩擦因数小,也可能是土对桩的侧向压力小;二是土层破坏,如土层的主要强度参数粘聚力、内摩擦角较小时可能会发生土层破坏的情况,在此情况下提高粘聚力、内摩擦角可使侧摩阻力进一步提高。通过对实测侧摩阻力的数据分析发现,大多数情况下,在土层达到实测侧摩阻力时,土层未达到强度极限,此时可由摩擦因数控制计算侧摩阻力大小,这就为摩擦因数的反分析提供了方便,即可通过试验资料、依据侧摩阻力确定摩擦因数,经统计归纳后用此值计算相似界面情况的工程桩。

(3)通过对比发现采用 ADINA 有限元体系计算的结果与实测结果较吻合,在分层分析桩侧摩阻力与桩身实际位移的关系上也表现较好,使用此种方法可以进行理论计算分析,从而预估桩的承载力,对桩基础进行优化设计。

(4)在 ADINA 有限元计算中虽然粗略地知道

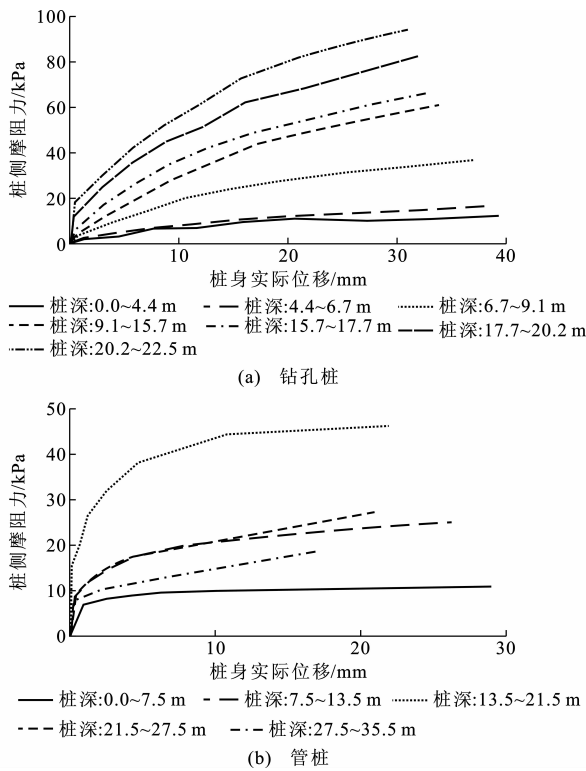


图 4 桩侧摩阻力-桩身实际位移计算曲线

Fig. 4 Calculated Curves of Pile Skin Frictions and Real Pile Section Displacements

了侧摩阻力的发挥机理,但仍有细节问题有待深入研究:一是摩擦因数及粘聚力的取值,笔者认为界面除摩擦力外,还应存在粘聚力,广义的粘聚力应包括水泥对混凝土和土层的胶结力及因桩身粗糙引起的桩土之间的机械咬合力,广义的粘聚力与侧向力之间是否也存在一定的比例关系还有待研究,若要与实际更符合,应细致研究各种力在不同土层中占有的比例及发挥规律;二是土体本身的特性变化,如扰动、时效、结构性排列改变造成的体积改变及强度改变等。细化的研究可使计算模型更符合实际,提高模拟的准确度。

参考文献:

References:

[1] 刘利民,舒翔,熊巨华. 桩基工程的理论进展与工程实践[M]. 北京:中国建材工业出版社,2002.
LIU Li-min, SHU Xiang, XIONG Ju-hua. Theory Progress and Engineering Practice of Pile Foundation Engineering[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2002.

[2] 蒋建平,汪明武,高广运. 桩端岩土差异对超长桩影响的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3190-3195.

JIANG Jian-ping, WANG Ming-wu, GAO Guang-yun. Contrastive Study on Influence of Difference of Pile End Rock-soil Layer on Super-long Pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3190-3195.

[3] 丁佩民,黄堂松,肖志斌. 抗拔桩侧摩阻力发挥规律的探讨[J]. 建筑科学, 2003, 19(6): 46-48.
DING Pei-min, HUANG Tang-song, XIAO Zhi-bin. Discussions on Developments of Side Resistances of Tension Piles[J]. Building Science, 2003, 19(6): 46-48.

[4] 於法明,宋兵,郑美田. 大直径钻孔灌注桩荷载与沉降规律的试验研究[J]. 岩土工程界, 2006, 9(7): 33-36.
YU Fa-ming, SONG Bing, ZHENG Mei-tian. A Tentative Research on the Load and Settlement Regulations of Large Diameter Cast-in-place Piles [J]. Geotechnical Engineering World, 2006, 9(7): 33-36.

[5] O'NEILL M W, RAINES R D. Load Transfer for Pipe Piles in Highly Pressured Dense Sand[J]. Journal of Geotechnical Division, 1991, 117(8): 1208-1226.

[6] 杜广印,黄锋,李广信. 抗压桩与抗拔桩侧阻的研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 91-93.
DU Guang-yin, HUANG Feng, LI Guang-xin. Study on the Compressive and Tensile Capacity of Piles[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(1): 91-93.

[7] TOUMA F T, RAINES R D. Load Transfer for Pipe Piles in Highly Pressured Dense Sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(8): 1208-1226.

[8] 尚守平,任慧,曾裕林,等. 桩与土非线性耦合扭转振动特性分析[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 41-47.
SHANG Shou-ping, REN Hui, ZENG Yu-lin, et al. Analysis of Dynamic Behaviors of Pile-soil Nonlinear Coupling Torsional Vibration[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 41-47.

[9] BELYTSCHKO T, LIU W K, MORAN B. 连续体和结构的非线性有限元[M]. 庄茁,译. 北京:清华大学出版社,2002.
BELYTSCHKO T, LIU W K, MORAN B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures [M]. Translated by ZHUANG Zhuo. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[10] 许宏发,吴华杰,郭少平,等. 桩土接触面单元参数分析[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2002(5): 10-12.
XU Hong-fa, WU Hua-jie, GUO Shao-ping, et al. Study on the Parameters of Pile Soil Contact Surface Element[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2002(5): 10-12.