

# 基于 ADINA 的桩土相互作用分析\*

崔春义<sup>1,2</sup>, 孟 坤<sup>1</sup>, 程学磊<sup>1</sup>, 杨 刚<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学 土木工程系, 辽宁 大连 116026; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022)

**摘要:** 基于大型通用数值计算平台 ADINA 建立三维数值模型, 分别结合相互作用三维接触模型和  $p-y$  曲线简化分析模型模拟桩土系统在水平荷载作用下的桩顶位移变化规律, 计算分析表明: 计算结果与实际测量值基本一致, 验证了两种建模方式的合理性和正确性。在此基础上进一步对  $p-y$  曲线简化分析模型在不同水平荷载作用下的工作性状进行分析, 计算结果表明  $p-y$  曲线简化分析模型能较好地模拟桩土间的相互作用行为, 将其应用到桩基相关抗震设计中能明显减少计算求解消耗。

**关键词:** ADINA; 桩土相互作用;  $p-y$  曲线; 三维数值分析

**中图分类号:** TU391; TU293.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)01-0096-05

## 0 引言

桩土相互作用在桥梁抗震分析中占有非常重要的地位, 地震作用通过土运动将横向荷载传给桩基, 分析水平荷载作用下桩土相互作用对桥梁抗震设计具有一定的指导意义。

桩基水平承载力的计算方法主要有3种, 分别是有限元方法、弹性分析法和地基反力法。地基反力法即温克尔地基梁模型法(燕斌, 2007), 该法将桩视为埋置于土介质中的梁, 桩周土体用相互独立的弹簧和阻尼器来表示, 在考虑土抗力沿深度的变化同时还可以考虑土的非线性性质, 但忽略了土的连续性。这一方法物理概念清晰, 计算工作量少, 在地基的设计和分析中被广泛地应用。

地基反力法中  $p-y$  曲线法是在水平力作用下, 地面下深度  $z$  处的土抗力  $p$  与该点的挠度  $y$  之间的关系曲线, 综合反映了桩周土的非线性, 桩的刚度和外荷载作用性质等特点(肖晓春等, 2002)。

以往的研究工作中由于当时计算理论和硬件条件限制, 诸多桩土相互作用分析都对地基模型进行线性简化处理, 或利用二维模型进行简化分析。本文将采用大型通用数值分析平台 ADINA, 对横向荷载作用下的桩土相互作用进行三维数值

模拟, 分析其在水平荷载作用下桩顶的最大位移。然后根据 API 规范规定的  $p-y$  曲线, 用非线性弹簧模拟桩土的相互作用, 建立桩土相互作用的简化分析模型, 将其在水平荷载作用下的桩顶位移与三维数值模型以及实际测定值之间进行比较, 说明 API 规范规定的  $p-y$  曲线的适用性。将  $p-y$  曲线简化分析方法应用到大型桥梁的抗震分析中, 在保证计算精度的前提下能大大减少计算量, 具有非常重要的工程实际意义。

## 1 数值分析模型

本文采用 ADINA 中的摩尔-库伦材料模拟土体。库伦摩擦定律是土力学中的一个基本定律, 按照这个定律, 破坏面上剪切应力  $\tau_f$  与法向应力  $\sigma_f$  之间满足下列关系式:

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \varphi. \quad (1)$$

式中,  $c$  为黏聚力,  $\varphi$  为内摩擦角。

用摩尔应力圆表示, 上述条件相当于破坏应力圆将与一条称为强度包线的直线相切。用主应力表示, 式(1)可改写为

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + c \times \cos \varphi. \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金——强震作用下饱和软土地下结构动力灾变机理及震后固结效应研究(51578100)资助。

将上述摩尔－库伦强度理论推广于塑性应变理论，即假定屈服条件也不受中主应力的影响。具有这种性质的材料称为摩尔－库伦材料（刘成宇，华祖焜，2009）。

三维桩土数值模型的参数设置如下：桩周土范围取桩半径的 20 倍，很多理论分析和计算结果证明了当桩周土范围足够大时其边界对桩身位移的影响非常小，因此取边界条件为：模型底部以及桩周土均采用全约束（袁志林等，2011）。

考虑到模型的对称性，只建立一半的真实模型，所有对称面在外法线上的位移是约束的，但在对称面上可以自由移动，采用对称约束，模型顶面上所有节点在各个方向上都是自由的。

本文使用试桩资料来自江苏镇江大港（1982）地区的试验（陈洪，2004），试桩基本资料如表 1 所示，地质资料如图 1 所示。

表 1 试桩参数

Tab. 1 Parameters of test piles

试验地区	试桩外径/m	壁厚/m	入土深度/m	加载高度/m
镇江大港(1982)	1.20	0.19	42.95	7.90

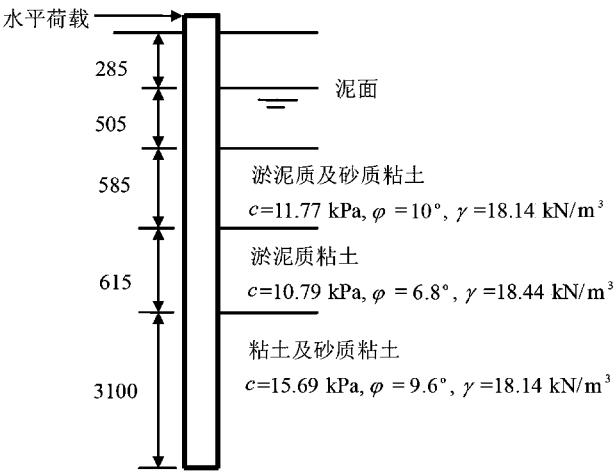


图 1 试桩地质资料

Fig. 1 The geological data of the test pile

在模型中，桩体和土体采用 8 节点实体单元，用各项同性模型进行模拟。土体的变形包括弹性应变和塑性应变，是一种典型的弹塑性介质。土体的材料特性复杂、种类繁多，根据已知土体的不同参数，所对应的本构模型也有所不同，计算结果存在差异。因此模拟桩土间的相互作用时恰当地选取土体的本构模型，对于整个数值分析过

程非常重要（李海林，2006）。目前应用比较多的是摩尔－库伦材料，在 ADINA 中用摩尔－库伦材料模拟土体，各个土层的属性根据图 1 中的各层地质资料进行输入。

在 ADINA 中通过建立接触对模拟桩土间的相互作用，首先在桩土界面上建立接触面，然后建立相互对应的接触对。接触对中接触面的选择需要满足一定的原则，即选择刚度大、自由度相对较少的面即桩表面为 Target Surface，土体刚度较小自由度相对较多为 Contactor Surface。桩土之间的库伦摩擦系数取为 0.2（周月慧等，2007）。建立的三维有限元模型如图 2 所示。

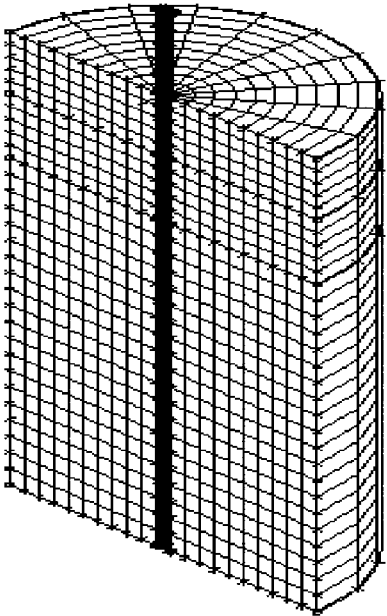


图 2 三维数值分析模型

Fig. 2 The model of three-dimensional numerical analysis

2 p-y 曲线简化分析模型

根据 API 规范中规定的软粘土的 p-y 曲线公式，计算出单位桩长的极限土抗力为

$$P_u = \left( 3 + \frac{\gamma_z}{c_u} + \frac{J_z}{b} \right) c_u d, \tag{3}$$

或 
$$P_u = 9c_u d \tag{4}$$

式中，γ 为由地面到深度 z 处的土的平均有效重度；c\_u 为土的不排水抗剪强度；z 为土的深度；d

为桩的边宽或直径； $J$  为实验系数，一般  $J = 1/2$ ，较硬的土取  $J = 0.25$ 。

土阻力达到极限土阻力一半时的相应变位为

$$y_{50} = 2.5 \varepsilon_{50} d \quad (5)$$

式中， $y_{50}$  为被动侧土达到极限水平抗力的一半时相应深度处桩的侧向变形（胡胜刚，2005）； $\varepsilon_{50}$  为约一半的最大主应力差时的土的应变值，按表 2 取值。

表 2  $\varepsilon_{50}$  值

Tab. 2 The value of  $\varepsilon_{50}$

$c_u/\text{kPa}$	< 54	54 ~ 107	107 ~ 215
$\varepsilon_{50}$	0.008	0.007	0.005

桩径  $d$  计算值（徐鹏举等，2010）按下面方法求得：（1）圆形截面桩：实际桩径  $D > 1 \text{ m}$  时，取  $d = 0.9(1 + D)$ ；实际桩径  $D \leq 1 \text{ m}$  时，取  $d = 0.9(0.5 + 1.5D)$ 。（2）方形截面桩：实际桩宽  $B > 1 \text{ m}$  时，计算桩宽取  $d = B + 1$ ；实际桩宽  $B \leq 1 \text{ m}$  时，取  $d = 1.5B + 0.5$ 。

由此确定  $p-y$  曲线为

$$p/p_u = 0.5 (y/y_{50})^{1/3} \quad (6)$$

当  $y = 8y_{50}$  时，土达到  $p/p_u = 1$  的极限，此后保持为定值。软粘土的  $p-y$  曲线如图 3 所示。

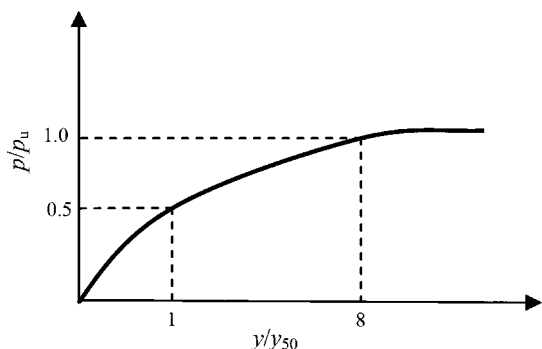


图 3 软粘土的  $p-y$  曲线

Fig. 3 The  $p-y$  curve of soft clay

根据计算出的  $p-y$  曲线，转化出力与位移之间关系的具体数值，输入 ADINA 中，生成非线性弹簧，模拟桩土之间的相互作用。

桩体采用二维梁单元模拟，桩底为固定约束，桩土之间的相互作用通过  $p-y$  曲线生成的非线性弹

簧来模拟。模型总共设置了 15 个弹簧单元，在桩上节点与大地之间设置弹簧，计算模型如图 4 所示：

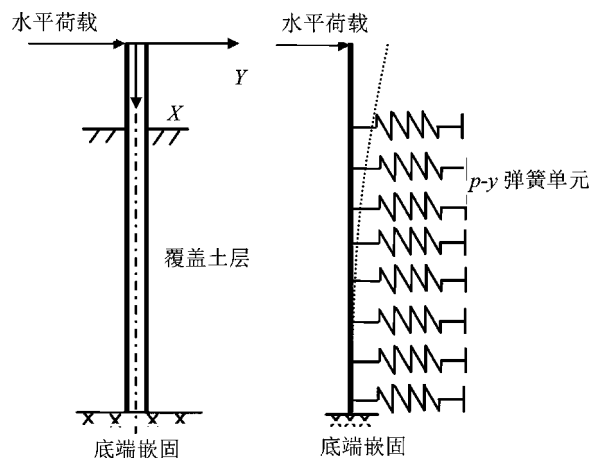


图 4  $p-y$  曲线分析模型

Fig. 4 The model of  $p-y$  curve numerical analysis

### 3 计算结果分析

#### 3.1 $p-y$ 曲线对比分析

按照试桩试验的加载方式，在有限元计算中，同样施加 49.0 kN、98.0 kN、147.1 kN、196.1 kN 和 245.2 kN 的横向水平荷载，计算得出桩顶水平位移。

由计算结果可知，三维数值分析模型计算的桩顶水平位移更接近实测位移，计算结果较  $p-y$  曲线简化分析模型计算得出的桩顶水平位移小。三维模型计算结果差异性产生的原因主要有：三维分析模型土体本构关系的选取与实际土体存在一定的差异，接触面相关参数的选取同样会影响计算结果。

镇江大港试桩在各级荷载作用下桩顶水平位移的实测值与三维数值模型和  $p-y$  曲线简化分析

表 3 镇江大港试桩桩顶位移比较

Tab. 3 Comparison of the displacement at the top of test pile in Zhenjiang port

横向荷载/kN	实测位移/mm	三维模型/mm	$p-y$ 模型/mm
49.0	14.0	15.57	19.96
98.0	30.5	34.58	45.29
147.1	50.5	57.94	79.04
196.1	73.3	85.27	118.3
245.2	96.8	113.1	161.5

模型计算结果的比较如表3所示。镇江大港桩顶位移随水平力变化如图5所示。

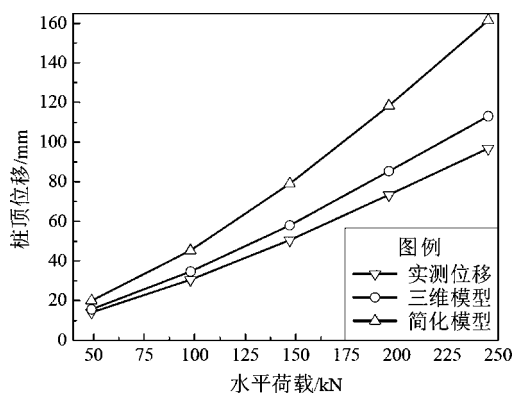


图5 桩顶位移随水平力变化

Fig. 5 The displacement at the top of pile varied with lateral load

随荷载的增大  $p-y$  曲线模型的计算结果误差也越来越大,造成这一结果的原因主要有:非线性弹簧模拟桩土间相互作用本身的近似性因素(李炜等,2011),同时所采用的  $p-y$  曲线是根据美国 Austin 地区的试验资料构造,应用到其他地区会存在一定的误差(曹维科,2011)。因此想要更好地应用  $p-y$  曲线简化模型模拟桩土之间相互作用,必须根据试桩所在地的地质资料,寻找适合本地区的  $p-y$  曲线。

### 3.2 桩身变形分析

桩受到横向荷载作用时,桩身的变形主要为水平向的挠曲。在不同水平向荷载作用下桩土相互作用的  $p-y$  曲线简化分析模型中桩身的水平位移沿埋深的变化如图6所示。由图6可知,随着荷载的逐渐增大桩身位移越来越大,荷载增大到一定程度之后,桩顶的位移增大幅度呈增长趋势。桩身位移沿埋深的变化充分说明了桩土之间相互作用的非线性,当荷载增到一定程度之后,桩逐渐达到极限状态,趋于破坏,桩顶位移急剧增大。

桩在 49.0 kN、147.1 kN、245.2 kN 水平荷载作用下的桩身变形如图7所示,可以看出,桩顶位移随荷载的增大而增大,埋深达到 15 m 后,桩身位移随荷载增大变化并不明显。桩身位移在桩顶处达到最大值,然后沿桩深逐渐减小,到桩体位移为零后,桩体位移开始反向增大,增大到一定值后又开始减小,到桩底时位移为零,很符合柔性长桩的特性(刘延芳,2014)。

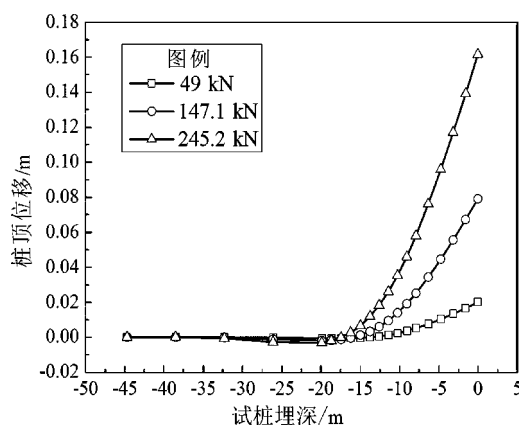


图6 试桩水平位移

Fig. 6 The horizontal displacement of the pile

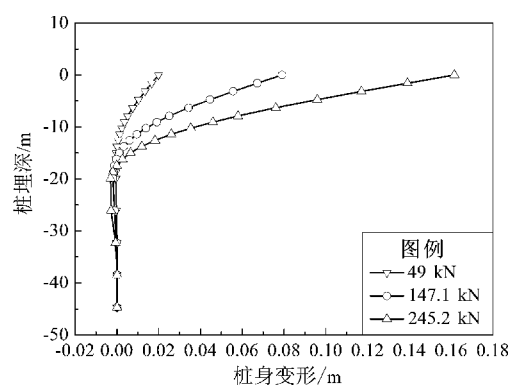


图7 水平荷载作用下桩身变形图

Fig. 7 The deformation of the pile under lateral load

## 4 结论

采用大型通用数值分析平台 ADINA 对水平荷载作用下桩基的工作性状进行分析,分别建立了横向荷载作用下的桩土相互作用三维有限元数值分析模型与  $p-y$  曲线简化分析模型。计算分析表明:

(1) 三维有限元数值分析模型所得的计算结果与实际测量的结果基本一致,而应用 API 规范中规定的  $p-y$  曲线计算的桩顶位移与实测值之间相差较大,说明 API 规范中规定的  $p-y$  曲线有一定的局限性,只适用于与 Austin 地区地质情况大致相同的地区。

(2)  $p-y$  曲线模拟桩土间相互作用简化分析模型在不同水平荷载作用下的工作性状进行分析,计算结果与桩基实际受力性能基本一致,说明  $p-y$  曲线能较好地模拟桩土间的相互作用。这样,应

用  $p-y$  曲线法须先根据本地区的地质资料由实验或者三维分析的方法求得适合本地区的  $p-y$  曲线。

(3) 在保证计算精度的前提下, 将  $p-y$  曲线模拟桩土间相互作用的简化计算方法应用到桩基抗震设计中能大大减少计算消耗, 具有非常重要的工程现实意义。

#### 参考文献:

- 曹维科. 2011. 桩基础水平承载力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 陈洪. 2004. 抗水平力桩性状研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 胡胜刚. 2005. 基于  $p-y$  曲线模型的桩基非线性性状分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学.
- 李海林. 2006. 桩—土相互作用的数值模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学.
- 李炜, 陈法波, 吕娜等. 2011.  $p-y$  曲线法在海上风电基础桩土作用计算中的适用性研究[J]. 水力发电, 37(10): 96–99.
- 刘延芳. 2014. 地震作用下承台刚性假定的适用性分析[J]. 地震研究, 37(1): 94–98.
- 肖晓春, 林皋, 迟世春. 2002. 桩—土—结构动力相互作用的分析模型与方法[J]. 世界地震工程, 18(4): 123–129.
- 刘成宇, 华祖焜. 2009. 土力学[M]. 北京: 中国铁道出版社.
- 徐鹏举, 唐亮, 凌贤长等. 2010. 液化场地桩—土—桥梁结构地震相互作用简化分析方法[J]. 吉林大学学报, 40(5): 1121–1127.
- 燕斌. 2007. 桥梁桩基础抗震简化模型比较研究[D]. 上海: 同济大学.
- 袁志林, 陈祥余, 段梦兰. 2011. 基于 ABAQUS 的桩土相互作用分析[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 南京: 海洋出版社: 502–505.
- 周月慧, 洪勇, 颜静. 2007. 水平荷载下单桩的三维有限元模拟与参数分析[J]. 中外公路, 27(3): 50–54.

## Numerical Analysis of Pile – soil Interaction Based on ADINA

CUI Chunyi<sup>1,2</sup>, MENG Kun<sup>1</sup>, CHENG Xuele<sup>1</sup>, YANG Gang<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

(2. School of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

#### Abstract

Based on the large general numerical computing platform ADINA, we set up the 3D numerical model. Then combined with the 3D numerical model and  $p-y$  curve simplified model, we simulated the displacement change law of the pile top in pile – soil system under the horizontal load. The calculation result is consistent with the measured data, and the rationality and correctness of the two modeling methods are verified. Furthermore, we analyzed the working performance of pile under horizontal load by using the  $p-y$  simplified model. The obtained result is basically consistent with the real stress situation, which indicated the  $p-y$  simplified model could simulate the pile – soil interaction. Therefore, the application of the  $p-y$  simplified model in the seismic design of pile foundation could greatly reduce the calculation of consumption, which also has a very important engineering significance.

**Key words:** ADINA; pile – soil interaction;  $p-y$  curve; 3D numerical analysis