

# 水平力对竖直桩沉降和承载力影响的研究

## Study of effects of lateral loads on the settlement and bearing capacity of pile

皇甫明<sup>1</sup>, 王幼青<sup>2</sup>, 王梦恕<sup>1</sup>

(1. 北方交通大学 土建工程学院, 北京 100044; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

中图分类号: TU 473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2003)04-0511-03

作者简介: 皇甫明(1974-), 男, 内蒙古人, 博士生, 主要从事桩基工程与隧道工程的研究工作。

### 0 前言\*

近些年来, 大直径桩的出现, 一桩一柱的单桩结构的情况日趋增多, 单桩的沉降和承载能力的计算就成为设计必要进行的一项工序。实践表明, 许多结构物的桩基础都是在承受竖向荷载的同时也承受着横向荷载。目前, 关于纵横向荷载下竖直桩的工作机理及性能的研究还很少<sup>[1]</sup>。

在水平荷载作用下, 桩向位移方向的桩侧土施加法向应力, 同时, 也使另一半桩周有脱离桩侧土的趋势, 而且将使桩土的摩阻由静摩擦转变为动摩擦, 故在纵横向荷载作用下桩的受力性状比桩在竖向或水平向荷载单独作用下要复杂得多。由于这一问题的复杂性, 迄今为止, 桩基在受力的分析上均是将纵横向荷载分开单独考虑的, 首先是考虑在竖向荷载下桩的极限承载能力和沉降量, 其次是在水平荷载下桩身的内力和水平位移, 通常所采用的方法是弹性半空间法和非线性地基反力法。这两种方法都是假设轴向荷载和水平荷载分别单独地作用, 而没有考虑桩与土的相互作用<sup>[2,3]</sup>。

到目前为止, 桩基承载力和沉降量的确定仍以单桩载荷试验为基础, 显然, 现场对单桩进行纵横向荷载试验是不大可能的, 为了分析和计算, 有必要进行模型桩的试验研究和有限元法模拟分析。

本文通过室内模型桩试验和三维有限元法, 深入分析了水平荷载对竖向承载桩沉降和承载力的影响。

### 1 桩的室内模型试验及结果分析

#### 1.1 室内模型试验

本文试验采用钢管作为桩的模型材料, 钢管端部用硬木板封堵, 其外径为 33 mm, 壁厚 3 mm, 模型桩桩长为 1050 mm, 桩的埋深为 850 mm。地基土采用均匀粉质黏土, 测得的各项土性指标为: 容重  $\gamma = 17.50$  kN/m<sup>3</sup>, 含水率  $w = 23.3\%$ , 黏聚力  $c_{cu} = 34.0$  kPa, 内摩擦角  $\varphi = 11^\circ$ 。

试验时设置桩顶为自由, 无约束。试验采用维持

荷载法, 分级加载。

按照表 1 所示的荷载组合, 进行模型桩的静载荷试验, 桩顶的荷载—沉降试验结果见图 1。

表 1 模型桩加荷次序组合表

Table 1 Loading sequence of pile tests

试验编号	竖向荷载/N	水平荷载/N
P <sub>1</sub>	0 到破坏	0
P <sub>2</sub>	0 到破坏	462.6
P <sub>3</sub>	0 到破坏	571.4
P <sub>4</sub>	0 到破坏	734.7

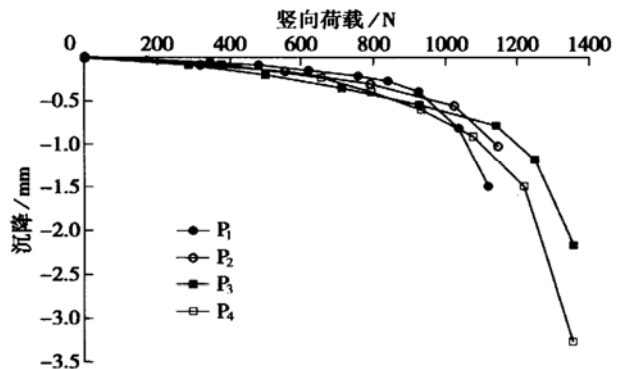


图 1 荷载—沉降曲线

Fig. 1 Load—settlement curve

#### 1.2 试验结果分析

从图 1 中可以看出, 水平荷载的存在对竖向承载桩沉降有较为明显的影响。当竖向荷载的水平较低时, 水平荷载的存在对桩的沉降影响很小, 可以忽略不计; 当竖向荷载水平较高时, 桩的附加沉降则相对较大。如, 竖向荷载为 600 N 时, P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub> 的沉降量分别为 0.15, 0.21, 0.28, 0.23 mm, P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub> 的沉降量比 P<sub>1</sub> 的沉降量分别增大了 40%、87% 和 53%。

从图中还可以看出, 水平力对桩的极限承载力有较为明显的影响。如 P<sub>1</sub> 的极限承载力为 932 N, 而 P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub> 和 P<sub>4</sub> 的极限承载力分别为 1140, 1244, 1213 N。由此可见, 在一定范围内, 水平力的存在使得桩极限承载

\* 收稿日期: 2002-10-07

力有不同程度的提高。这与文献[4]的试验结果相一致。此外,荷载—沉降曲线表现出“缓变型”曲线的特征,即  $Q-S$  曲线没有明显的破坏特征点的现象也越明显。

对于上述情况,分析其原因可能与土体的离散性、桩土的摩阻力减小或桩侧土体发生塑性变形等因素有关。目前还无法用传统的方法分析,以下运用有限元法进行模拟分析。

## 2 有限元法计算及其结果分析

本文采用大型通用有限元软件 ANSYS5.7 对模型桩进行模拟分析,桩与土体均采用实体单元 Solid45 模拟,桩与土体界面处设置接触单元 TARGE170 和 CONTA173 来考虑桩土接触面之间的滑移和开裂,其中考虑土体服从 Drucker-Prager 屈服准则。对于接触单元的摩擦类型,选用库仑摩擦模型。土体计算范围取值如下:桩的径向取 0.6 倍桩长,桩底下取 0.7 倍桩长<sup>[5]</sup>。有限元网格划分如图 2 所示。斜向荷载作用下桩顶的荷载—沉降有限元计算结果见图 3。

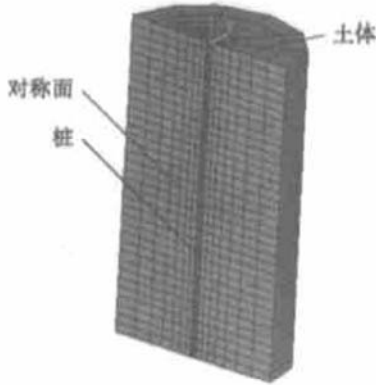


图 2 有限元网格划分  
Fig. 2 Finite element mesh

从图 3 中可以看出,水平荷载对竖直桩沉降和承载能力都有影响。尽管有限元存在着计算模型、计算参数和计算方法上的误差等,而在量化的数值上与试验结果仍然有一定的差异,但在曲线形态上有限元的计算结果与实测结果相似。分析其原因,可能是作用有水平荷载的桩一方面一半桩周与土体分离,另一方面随着水平力的增加,桩向位移方向的桩侧土所施加的法向应力增大,同时桩身发生弯曲变形致使部分桩侧土体对桩身产生向上的反力,从而桩的承载能力有所提高。

此外,采用如图 4 所示的加荷方式(即首先逐步施加竖向荷载,达到某一值后保持不变,然后再逐步施加水平荷载),对比计算了承受竖向荷载  $Q = 1000\text{ N}$  和水平荷载  $H = 400\text{ N}$ ,以及竖向荷载  $Q = 600\text{ N}$  和水平

荷载  $H = 400\text{ N}$ ,其中分别考虑土体服从 Drucker-Prager 屈服准则(缩写为 DP 准则)和弹性介质两种情况下桩的沉降量。计算结果见图 5 及表 2 所示。

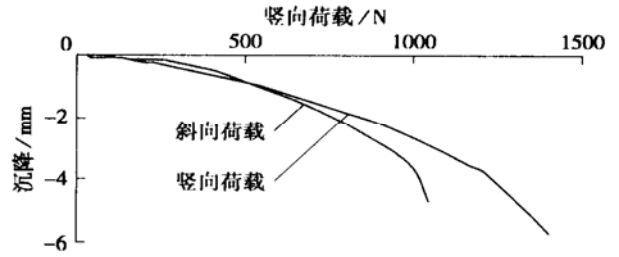


图 3 荷载—沉降曲线  
Fig. 3 Load-settlement curve

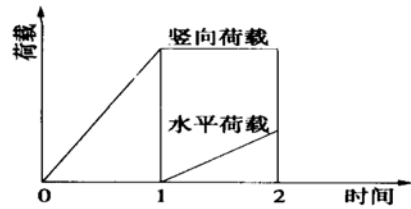


图 4 加载示意  
Fig. 4 Loading sequence

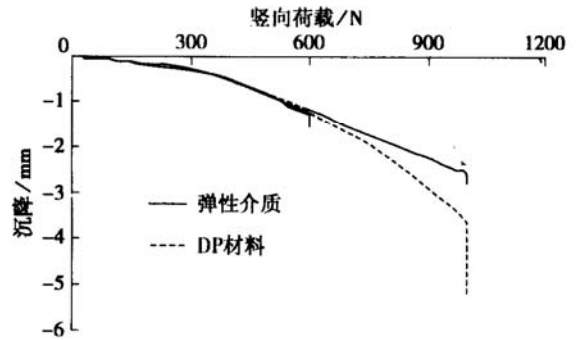


图 5 荷载—沉降曲线  
Fig. 5 Loading-settlement curve

表 2 沉降量模拟分析结果

Table 2 Settlement results of simulation analysis mm

	$Q = 1000\text{ N}$		$Q = 600\text{ N}$	
	$H = 0\text{ N}$	$H = 400\text{ N}$	$H = 0\text{ N}$	$H = 400\text{ N}$
DP 模型	- 1.299	- 1.578	- 3.621	- 5.208
弹性介质	- 1.264	- 1.464	- 2.565	- 2.765

注:  $Q$  为竖向荷载;  $H$  为水平荷载

从图 5 及表 2 可以看出:

(1) 桩顶作用的竖向荷载相对较小时,桩的沉降量的大小与所选用的土体模型是否考虑非线性关系不大,荷载—沉降所表现出的非线性主要是由桩土界面的非线性引起的。

(2) 当竖向荷载相对较小时,水平荷载的存在使得桩产生的附加沉降量很小,且与土体选用模型关系不大。

(3) 当竖向荷载水平较高时, 附加沉降量的大小与所选用的土体模型是否考虑非线性有很大的关系。

通过以上有限元法分析, 可以发现, 对于作用有水平荷载的竖向承载桩而言, 附加沉降量主要与桩周和桩端土体产生塑性变形有关(土体塑性区如图6所示)。也就是说, 桩周土体发生塑性变形, 使土体的抗剪刚度下降, 最终导致桩土间的摩阻力减小, 桩端土体承受的荷载增大, 从而产生附加沉降量。



图6 土体的塑性区域图

Fig. 6 The plastic zones of the soil

### 3 结 论

通过模型桩试验研究和三维有限元结果表明, 水平荷载的存在, 一方面使得桩产生一定的附加沉降量, 同时也使得桩的极限承载能力提高。

分析表明, 附加沉降主要与桩侧和桩端土体发生塑性变形有关; 而桩极限承载能力的提高, 则可能与桩身发生弯曲变形有关。

目前, 对于在深厚软黏土地基建造建筑物, 桩基的沉降量和差异沉降量的控制往往是地基基础设计的关键。软土地区建筑基础工程事故大部分是由于沉降量或沉降差过大造成的, 特别是不均匀沉降对建筑物的危害更大。故水平荷载对摩擦桩的沉降的影响应该予以重视。但在国内各行业规范中均无体现, 应该特别注意。

#### 参考文献:

- [1] 林天健, 熊厚金, 王利群. 桩基础设计指南[M]. 北京: 中国建筑出版社, 1999.
- [2] Christos Anagnosto Poulos, Michael Georgiadis. Interaction of axial and lateral pile responses[J]. Geotech Engrg, ASCE, 1993, 119(4): 793-798.
- [3] Shahrour I, Meimon Y. Analysis of the behavior of offshore piles under loads[A]. Proc Int Conf on Deep Foundations[C]. 1991. 277-284.
- [4] 雷尼科夫 A. 倾斜桩基的分析[J]. 美国土木工程师协会汇刊, 1950, 115: 351-374. (郎昌清译)
- [5] Trochanis A M, Bielak J, Christiano P. Three-dimensional nonlinear study of piles II. Geotech Engrg. ASCE. 1991. 117(3): 429-447.

### 博士简介扩大刊登范围启事

本刊开辟的博士简介栏目在广大读者支持下, 自1995年以来, 已连续8年报导我国岩土工程界博士学位获得者简况。今后仍将在每年第6期刊登博士简介, 凡在海内外取得岩土工

程博士学位者, 均属报导范围。简介文稿请在当年10月30日(截稿)前寄来南京本部。

(本刊编辑部)

### 致本刊编委及各位审稿人

为感谢审稿人的辛勤劳动, 本刊向所有审稿人均按时寄送微酬。但由于种种原因, 汇款单被退回的情况时有发生。本刊除向这些审稿人致谢致歉外, 希望尚未收到审稿费的各位, 将您的准确地址通知本部, 以便重新补寄审稿费。并按您的要求赠阅相应刊期。

本刊编辑部