

# 预应力管桩在基坑开挖中的受力特性 及有限元分析

吴 步 青

(同济大学, 上海 200092)

**提 要** 预应力混凝土管桩在基坑开挖过程中由于挖土施工不当等原因常会发生桩身偏斜事故, 造成较大的经济损失并且延误工期。本文分析了承受土体侧向位移的桩的受力特性, 并采用通用有限元分析程序对比分析了各种开挖施工方式下管桩的偏斜和内力, 对设计施工提出了一些建议。

**关键词** 预应力管桩, 基坑开挖, 桩基偏斜, 有限元分析

## Mechanical Behavior and Finite Element Analysis of Pretensioned Spun Concrete Piles in Excavation

WU Buqing

(Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract** Pretensioned spun concrete piles often incline in the process of excavation because of incorrect construction method. When accident occurs, the remedy measures will cost a lot of money and time. This paper analyses the effect of lateral soil movement on pile. A finite element program is applied to calculate the displacements and internal forces of piles for different excavation methods. Some suggestions are given for design and construction.

**Keywords** pretensioned spun concrete pile, excavation, pile incline, finite element analysis

### 1 概 述

建筑基础工程中使用的预应力混凝土管桩(PC管桩)或预应力高强混凝土管桩(PHC管桩)一般是采用先张法预应力工艺和离心成型方法制成的一种圆管形钢筋混凝土预制桩, 具有单桩承载力高, 耐久性好, 工厂化生产, 沉桩方便, 穿透力强, 经济性好, 场地文明等优点, 已广泛应用于工程中。然而, 由于管桩为管形空心截面, 其抗弯刚度较实心桩要小, 在水平荷载下易发生挠曲。

上海等沿海地区多属软粘土质, 复杂的地质条件和软弱的土体结构给高层建筑基坑开挖施工带来了难度。在开挖施工时, 由于开挖分层不当, 一次挖土过深, 相邻基坑开挖等各种原因, 会引起坑底土体位移, 对管桩产生较大土压力, 出现桩位偏斜, 特别是大面积群桩整体位移, 严重影响工程

质量。近来已发生多起管桩偏斜事故, 桩位位移有的大大超出规范允许值, 甚至出现开裂、断桩而破坏, 对于已弯曲倾斜的基桩由于存在初始弯曲应力, 其承载力将降低。事故发生后, 必须根据实际情况采取纠偏、补桩、加固、加强承台等补救措施方可保证基桩的承载要求, 造成较大的经济损失并且延误工期。所以, 在软土地基中进行深基坑开挖施工, 必须详细考虑各种工况, 把施工对工程桩的影响降至最低。

目前, 绝大多数工程桩的设计中并未考虑其承受基坑开挖引起的侧向土体滑移力, 对工程桩在基坑开挖过程中的受力特性也尚未有深入研究, 故确定合理的开挖参数至为重要。本文分析了承受土体侧向位移的桩的受力特性, 并采用通用有限元分析程序 ANSYS 对比分析了各种开挖施工方式下管桩的偏斜和内力, 对开挖施工提出了一些建议。

## 2 侧向土体位移下桩的受力特性

基坑开挖引起的土体位移对桩的作用如图 1 所示。图中土体被分为不稳定层和稳定层,滑动面存在于两层之间。相应地,在不稳定土层中承受土体侧向位移的上部桩段称为“被动”部分,而稳定土层中的下部桩段受到上部桩段传来的荷载,这与桩头直接承受水平荷载的桩类似,故称之为“主动”部分<sup>[1]</sup>。

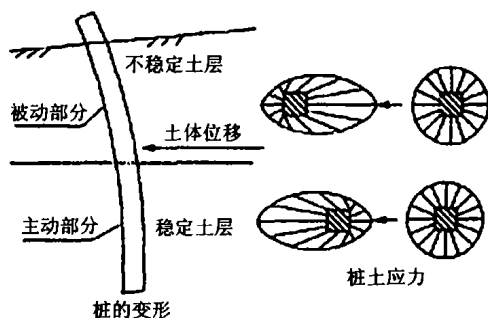


图 1 土体位移对桩的作用

图中应力表示土体发生位移前后的两个平衡状态。基坑未开挖时,坑底土体尚未移动,桩在桩周土的初始应力下处于平衡状态;一旦基坑开始开挖后,桩周土应力发生变化,同时桩产生挠曲和内力,达到新的平衡状态。在这一过程中,桩周土可能达到极限状态并产生极限土压力  $P_u$ ,  $P_u$  的值在被动部分和主动部分有所不同。

## 3 有限元分析

本文采用桩土共同建模,桩土单元之间位移协调的有限元方法,将桩土单元集成总体刚度矩阵进行整体分析。

### 3.1 计算模型

计算程序采用美国 ANSYS 公司开发的 ANSYS 大型通用有限元计算软件。在有限元分析中,模型简化为平面应变问题,计算基坑平面模型长 40m,深 5m,各层土体的基本力学参数见表 1。

在有限元分析中,模型简化为平面应变问题。土体采用 4 节点平面矩形单元。土体本构模型选用 Drucker-Prager 弹性-理想塑性本构模型,塑性流动服从相关联流动规则,其屈服准则为广义的 von Mises 准则,在主应力空间屈服面为一圆锥面,取土的膨胀角等于内摩擦角。

基坑支护形式为水泥土搅拌桩挡墙,墙宽 3.2m,桩长 11m,弹模  $E = 300\text{MPa}$ ,重度  $\gamma = 18\text{kN/m}^3$ 。搅拌桩挡墙亦采用 4 节点平面矩形单元,线弹性材料。

表 1 土体力学参数

| 土层编号 | 土体密度 (kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量 (kPa) | 泊松比  | $c$ (kPa) | $\varphi$ | 厚度 (m) |
|------|---------------------------|------------|------|-----------|-----------|--------|
| 1    | 1918                      | 12000      | 0.3  | 24        | 12        | 4      |
| 2    | 1870                      | 10000      | 0.35 | 16        | 10        | 5      |
| 3    | 1900                      | 18000      | 0.3  | 10        | 13        | 2      |
| 4    | 1880                      | 17000      | 0.28 | 20        | 11        | 24     |
| 5    | 1980                      | 28000      | 0.25 | 38        | 12        | 5      |

预应力管桩采用 2 节点梁单元,线弹性材料,桩长 32m,桩间距基坑长度方向为 5m,基坑宽度方向为 2m,桩端进入第 5 土层。不考虑桩间土的作用,根据抗弯刚度  $EI$  相等的原则将间隔布置的管桩等效为矩形截面混凝土桩墙(图 2)。

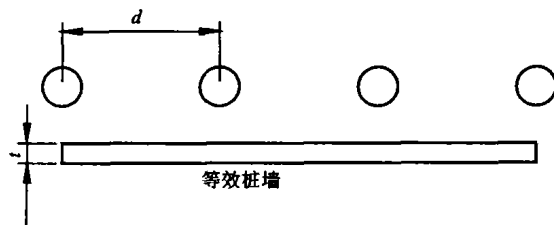


图 2 等效桩墙换算

如图 2,本文研究的管桩编号均为 PHC-A500(100),惯性矩  $I_p = 0.00267\text{m}^4$ ,由

$$\frac{1}{12}t^3d = I_p$$

得等效桩墙宽度  $t$  为 0.25m。抗裂弯矩 99 kN·m,极限弯矩 148 kN·m。

有限元计算模型尺寸为 90m×40m,两端约束水平方向位移,底部约束垂直和水平方向位移,单元网格划分如图 3。

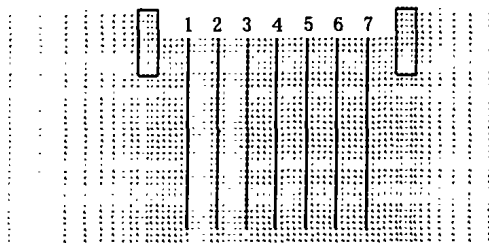


图 3 单元网格划分图

本文使用 ANSYS 的单元“生死”功能来模拟土体开挖和支护结构施工,假定开挖前管桩已经施打完毕,暂不考虑打桩施工对结果的影响。考虑地面附加荷载为 20kPa。

### 3.2 计算结果与分析

#### 3.2.1 开挖垂直分层对结果的影响

本文选取 7 排桩墙为研究对象,编号见图 4,均为 PHC-A500(100)。基坑开挖由左向右,按垂直分层的不同计算两种开挖方式:一次开挖到底和分两层开挖(第 1 层 3m,第 2 层 2m)。以偏斜和内力较大的 P5 桩为例,图 4、图 5 为桩的水平位移和弯矩随深度变化曲线(均为基坑开挖 5m 后)。

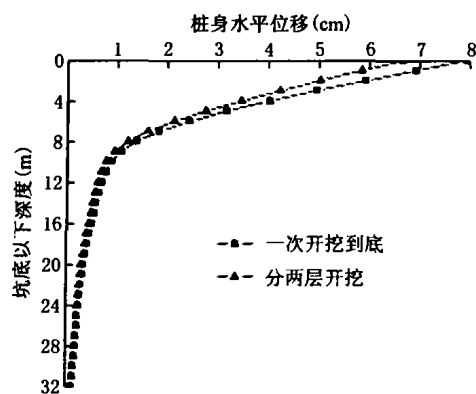


图 4 P5 桩水平位移随深度变化曲线

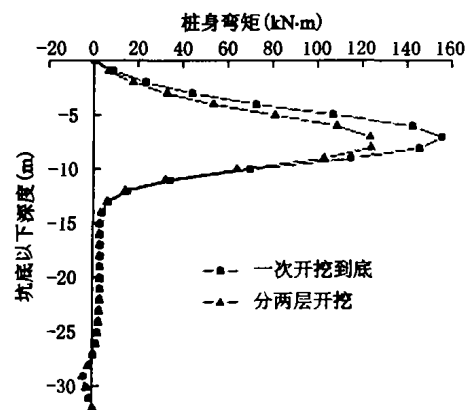


图 5 P5 桩弯矩随深度变化曲线

计算可以得到土体和管桩的位移及管桩的内力分布,从计算结果可以看到:

- (1) 除部分桩(如 P1)外,桩头水平位移方向均与开挖方向相反;
- (2) 垂直分两层开挖时,管桩的内力和位移都比一次开挖到底小;
- (3) 桩身弯矩主要集中于距桩头约 3 倍开挖深度以上的桩段,其余部分弯矩很小,可以忽略。

#### 3.2.2 开挖水平分层对结果的影响

垂直分两层,第 1 层 3m,第 2 层 2m,按水平分层的不同计算以下 3 种开挖方式:

- (1) 逐层开挖,两层间无流水施工;
- (2) 两层间以退坡长度 8m 流水开挖;

- (3) 两层间以退坡长度 4m 流水开挖。

图 6、图 7 为 P5 桩的水平位移和弯矩随深度变化曲线。从结果可以看出,开挖水平分层对桩水平位移的影响并不明显,对桩身弯矩影响相对较大。

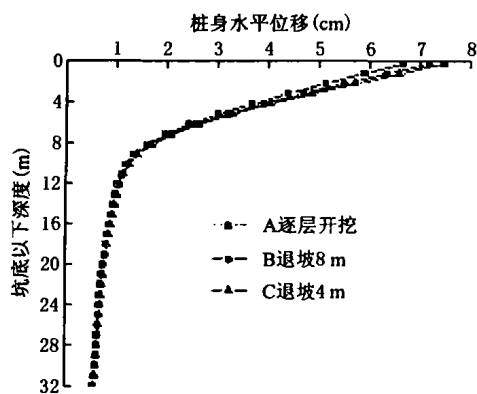


图 6 P5 桩水平位移随深度变化曲线

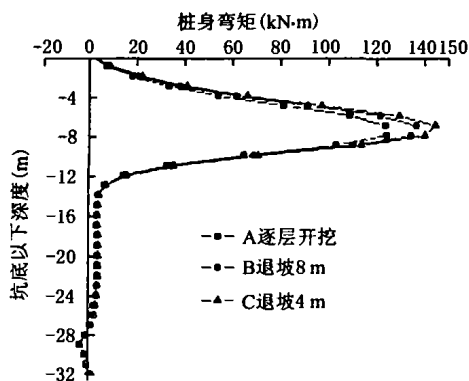


图 7 P5 桩弯矩随深度变化曲线

#### 3.2.3 搅拌桩挡墙对结果的影响

改变水泥土搅拌桩挡墙的宽度,发现距离基坑开挖起始边最近的 P1 桩的计算结果对挡墙宽度最为敏感,而其他桩受挡墙宽度的影响较小。图 8、图 9 为 P1 桩的水平位移和弯矩随深度变化曲线。

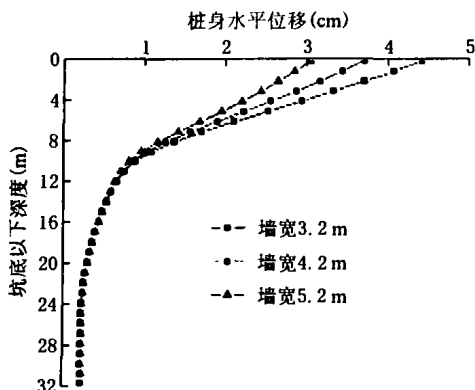


图 8 P1 桩水平位移随深度变化曲线

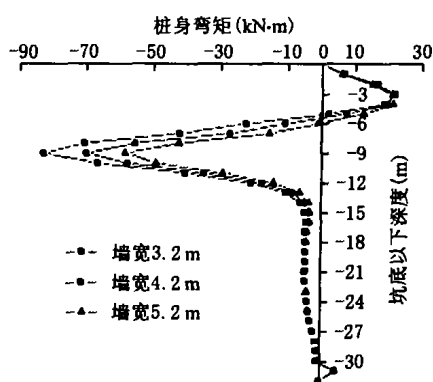


图 9 P1 桩弯矩随深度变化曲线

改变水泥土搅拌桩挡墙的长度,各桩的影响程度与改变挡墙宽度基本一致,P1 桩计算结果对挡墙长度最为敏感。然而,加大搅拌桩长度至 15m 以上时,对管桩位移和内力的减小已经不再明显。图 10、图 11 为 P1 桩的水平位移和弯矩随深度变化曲线。

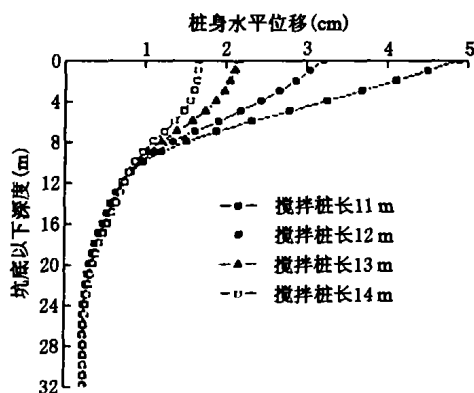


图 10 P1 桩水平位移随深度变化曲线

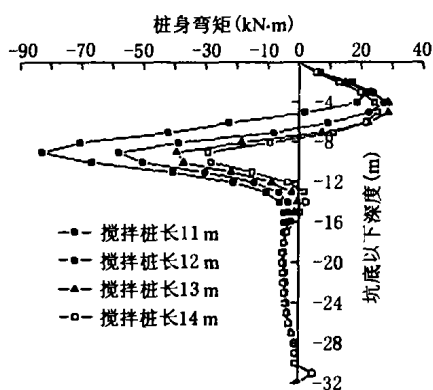


图 11 P1 桩弯矩随深度变化曲线

### 3.2.4 支撑对结果的影响

在开挖深度至 3m 时加设一道混凝土支撑,支撑采用两节点杆单元。图 12、图 13 为 P1 桩的水平位移和弯矩随深度变化曲线。

从结果可以看出,加设支撑与否对结果有明显影响,且对距开挖起始边较近的 P1 桩影响较

大;而支撑刚度对结果影响不大。

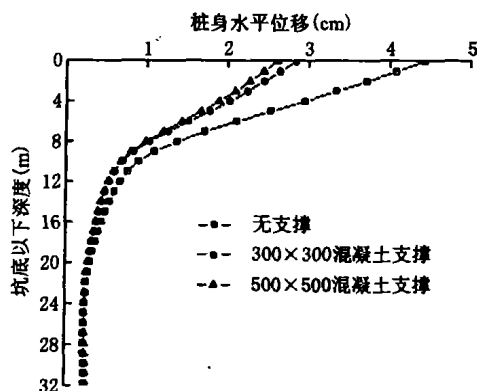


图 12 P1 桩水平位移随深度变化曲线

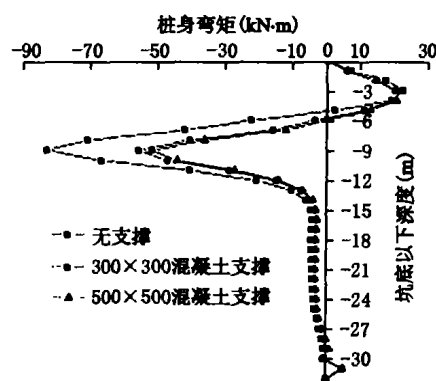


图 13 P1 桩弯矩随深度变化曲线

## 4 结论和建议

平面应变有限元分析由于忽略了空间效应,计算结果比实际偏大,必要时可进行三维有限元分析,不过计算机时将大大增加。本文管桩单元为弹性材料,未考虑其开裂和破坏,文中部分桩身弯矩(图 5、图 7)已超过极限弯矩,可视为桩已破坏。本文未考虑沉桩挤土对结果的影响,锤击打桩或静力压桩都会产生很大的挤土效应,特别是在饱和软土地层,将导致桩周土体产生相当大的挤压应力,引起很高的孔隙水压力,以能量的形式储存在土中。如桩基施工与土方开挖施工的时间间隔太短,则基坑施工时,就给储存在土体中的能量形成了定向释放空间,造成群桩定向倾斜。

针对影响桩偏位的各种因素,本文提出以下建议:

(1)挡墙应进入稳定土层。开挖应按实际情况垂直分层开挖,水平分层应尽量延长退坡长度,以免造成开挖时高差过大。

(下转第 43 页)

况 14(相应于加速度峰值 0.40g)。通过对测得的应变进行分析可知,工况 6 和工况 14 分别对应于结构的开裂和屈服的极限状态。因而刚度曲线有 3 个阶段:基本上保持不变的初始刚度、与外加荷载成反比的退化刚度,以及基本平缓的残余刚度。

### 3.3 结构的屈服情况

试验表明在进行到工况 20 时,结构左上立柱底达到极限状态,此前所有塑性铰区域的钢筋都已经发生了屈服。通过粘贴在钢筋上的应变片,首次屈服发生的次序为左下立柱底(工况 8)、右下立柱底(工况 10)、左下立柱顶、右下立柱顶、左上立柱底、右上立柱底(工况 11)、左上立柱顶、右上立柱顶(工况 12)。主要特点是柱底比柱顶先屈服,另外在多遇地震和设计地震作用下结构没有屈服,而发生首次屈服的工况在设计地震作用与罕遇地震作用之间,在罕遇地震的作用下只有个别位置发生了屈服,而结构没有发生破坏。

研究还发现在结构破坏时,结构的变形主要集中在上层,而上层的损伤主要集中于两根上立柱的柱底,这说明多层结构破坏时存在损伤集中的现象。

## 4 总 结

本文介绍了对上海市共和新路双层高架桥进行的抗震试验,以及试验结果分析和对结构的抗震性能评估,主要发现有:

(1) 多遇地震作用下,结构处于弹性状态;设

计地震作用下,结构出现了轻微的软化;罕遇地震作用下,结构出现了残余裂缝。

(2) 试验中结构的损伤集中于上、下立柱两端的潜在塑性铰区域,而按能力保护构件设计的横梁和节点等实际上保持弹性。

(3) 上、下层结构和总体结构的位移延性能力都满足要求。

(4) 柱底比柱顶先屈服;在多遇地震和设计地震作用下结构没有屈服;在罕遇地震的作用下只有个别位置发生了屈服,而结构没有发生破坏。

研究表明结构具有较好的延性能力,即使在罕遇地震作用下也没有发生破坏,完全能够满足抗震设计的要求;能力保护设计方法通过对各个构件设置不同的强度等级,可以保证结构形成适当的塑性耗能机制,研究表明对原结构进行抗震设计所采用的能力设计原理是可行而且有效的。

## 参考文献

- [1] F Zayati, S A Mahin. Experimental and analytical evaluation of a retrofit double-deck viaduct structure. Berkeley: University of California, 1996
- [2] S A Mahin, P B Shing. Pseudodynamic test method-Current status and future directions. Journal of Structural Engineering, 1989; 115(8), 2113 - 2128
- [3] K. Takanashi, M. Nakashima, Japanese activity on on-line testing. Journal of Engineering Mechanics, 1987; 113(7): 1014 - 1032
- [4] CALTRANS. Caltrans Seismic Design Criteria, Version 1. 3, California Department of Transportation, Sacramento, USA. 2004

(上接第 63 页)

(2) 根据开挖方向,适当加宽加长支护挡墙,对距坑边较近的管桩有一定的保护作用。对于无支撑支护开挖基坑,适当加设支撑可以明显减小管桩偏斜和内力。

## 参考文献

- [1] Chen, L, Poulos, H G. (1994). A method of pile-soil interaction analysis for piles subjected to lateral soil movement. Proc. 8th Int. Conf. on Comp. Methods and Adv. In Geomech