

# 深基坑开挖的有限元模拟与实验研究

梅传书<sup>1</sup>, 徐海峰<sup>2</sup>, 严 驰<sup>1</sup>

(1. 天津大学建工学院, 天津 300072; 2. 天津市规划局河西规划处, 天津 300000)

**摘要:** 本文根据 Goodman 接触面单元和 Duncan-Chang 模型编制了二维有限元程序 SJK。考虑了工程实际中分步开挖、支撑等一系列施工过程, 利用模型试验对该程序进行了验证, 实测结果与理论计算值两者较为接近, 为工程设计和施工提供参考。

**关键词:** 有限元; 深基坑; Duncan-Chang 模型; Goodman 单元

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2000)05-0008-04

**Abstract:** This paper introduces 2D finite element program SJK prepared by using Duncan-Chang model and Goodman surface unit. This new program can analyze and simulate the process of the excavation of the deep foundation pit for braced pile. The analyzed results obtained by the calculations fairly approach the measured values achieved from the model experiment.

**Key words:** finite element; deep foundation pit; Duncan-Chang model; Goodman surface unit

## 1 前言

随着经济建设的发展及城市用地的日趋紧张, 高层和超高层建筑不断兴建, 深基坑问题日渐突出, 尤其在软土地基的建筑密集区内, 基坑越来越深, 难度越来越大。例如天津市无缝钢管厂铁皮坑基坑开挖深度达 19.5m; 天津国际大厦基坑深度达 11.5m; 国际贸易中心基坑深度达 15m。目前, 能否成功地进行基坑开挖与支护已成为深基础工程设计和施工的关键。

对于深基坑支护结构的计算, 现有常规计算方法不能有效地计算基坑开挖时挡土结构及支撑轴力的变化过程, 采用这些计算方法所得到的结果用于多道支撑的深基坑挡土结构分析时, 内力和实际情况相比误差较大。常规方法主要是用极限理论分析, 这类方法可以求出作用于挡土结构上的土的破坏荷载, 但不能预测此时的变形, 也无法全面了解有关极限状态之前的情况。相比而言, 有限元法有以下显著优点: 考虑桩、土相互作用, 协调两者的变形; 可以模拟基坑开挖过程; 通过计算可求得支护结构的应力和位移, 从而对支护结构进行合理设计; 可以计算一定区域内土体的应力和位移, 由此可得此区域的应力场和位移场, 对基坑开挖和设计具有更科学可靠的理论指导意义。

收稿日期: 1999-09-22

作者简介: 梅传书(1972-), 男, 天津大学在读博士生, 主要进行地基处理方面的研究。

本文采用非线性弹性 Duncan-Chang 模型来模拟土的非线性, 采用 Goodman 接触面单元来模拟桩体与土体接触面的力学特性, 并结合相关的模型试验进行开挖过程的计算模拟, 得到了较为理想的计算结果。

另外, 本文考虑了工程实际中分步开挖、支撑等一系列施工过程, 从而可以模拟整个施工的全过程, 为工程设计和施工提供参考。

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 Duncan-Chang 模型<sup>[1]</sup>

在建筑物与土相互作用研究中, 建立反映土体变形特性的本构模型是至关重要的。在选择合适的模型时, 应同时考虑工程实用性和计算的可能性。Duncan-Chang 模型属于非线性次弹性模型中的变模量模型, 在工程实际中已积累了不少经验, 故对土单元采用 Duncan-Chang 模型, 其切线弹性模量为:

$$E_i = \left[ 1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 \cdot k p_a \left[ \frac{\sigma_3}{p_a} \right]^n$$

其中  $c$ 、 $\varphi$  分别表示土体的粘聚力和内摩擦角。由此可看出, 要确定切线模量  $E_i$ , 需要确定  $\varphi$ 、 $c$ 、 $k$ 、 $n$  及  $R_f$  共五个参数。对粘性土,  $k$  一般变化于 50~400, 对于砂土和块石, 则变化于 100~1500。  $n$  是反映  $E_i$  随  $\sigma_3$  而增加的指标, 变化于 0~1.0。  $R_f$  为破坏比, 反映双曲线弯曲程度, 一般变化于 0.55~0.95。

### 2.2 Goodman 接触面单元<sup>[2]</sup>

在基坑开挖中, 土与支护结构之间不发生相对位

移是不可能的,所以从整体上说土与结构是不连续的,为了进行有限元计算,就要设置所谓接触面单元。

Goodman 单元(图1)是一种无厚度的四节点单元,两片接触面之间设想由无数的法向和切向的微小弹簧相联系,能较好地模拟接触面的错动和分裂,应用较广。

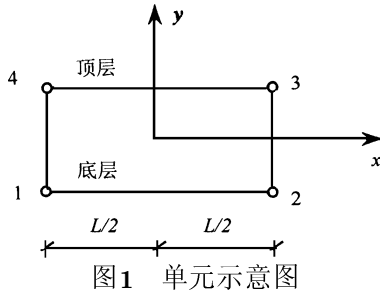


Fig. 1 Sketch of Goodman element

假定接触面上的法向应力和剪应力与法向相对位移和切向相对位移之间无交叉影响。则应力与相对位移的关系式为:

$$\{\sigma\} = [k_0] \{\omega\}$$

式中:  $[k_0]$ ——由  $k_s$  和  $k_n$  确定的劲度矩阵,  $k_s$  和  $k_n$  分别为切向和法向弹性系数( $\text{kN/m}^3$ )。

### 2.3 对支撑的分析

在工程实际中,有钢支撑、钢筋混凝土支撑等多种形式。为了简单起见,并在一定程度上反映工程实际情况,采用弹性支撑形式(图2),进行模拟计算。



图2 支撑示意图

Fig. 2 Sketch of braces

当开挖至一定深度时,桩体产生向坑内的位移,支撑随之产生位移  $\Delta L$ , 并对桩产生一反力  $F$ 。由弹性力学公式:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{AE}$$

由此可推求此反力  $F$ , 将此反作用于桩体, 进行多次迭代, 反算桩体位移。

### 2.4 对开挖过程的分析<sup>[3]</sup>

由于岩土工程问题是典型的非线性问题, 在加载某阶段的应变和位移不仅取决于当时的应力状态, 而且取决于应力历史。因此对于基坑开挖的施工过程能否进行正确的模拟, 对最终的计算结果有很大的影响。

粗看起来, 挖方与填方相反, 只要在计算中将挖去的土的重量移去, 也就是给结构一个负的土重即可。但实际上并不那么简单, 因为挖去的土原先承担了某种初始应力, 除了竖向应力外还受侧向应力, 即使是竖向应力也不一定等于土重。仅仅减去挖土重, 不能使开挖面上的应力解除。有限元法模拟开挖, 关键在于使开挖面上的应力得到完全解除, 成为应力自由面。因此, 对于每级开挖要根据开挖前的应力求出开挖面上部土体对下部土体所作用的结点力  $\{F\}$ , 在开挖后将  $\{F\}$  反向作用在开挖面的结点上, 并将挖除的土体从结构中去掉, 进行下一步的有限元计算。

### 3 程序简介及框图

本程序具有如下几个功能: 模拟基坑的分步开挖; 模拟土的非线性应力-应变关系, 以及土的成层性; 模拟支撑系统的分阶段设置, 土与支撑系统的共同作用分析; 能模拟任意几何形式的开挖及多种形式的支撑。

本程序由一个主程序和若干子程序组成, 采用四结点等参不协调位移模式。主程序读入和打印控制数据。程序框图见图3。

### 4 模型实验与计算结果分析

#### 4.1 试验概述及计算模型

本文以在大型砂槽内做的平面应变状态下埋深挡土墙模型试验为例, 利用上述理论对其开挖过程进行计算, 并与试验实测数据进行了比较。

试验是在天津大学水利系港工结构试验室的模型槽内进行, 计算模型如图4所示。试验槽长6.1m, 宽2.5m, 深2.2m。模型板桩采用PV(聚氯乙烯)塑料板。模型板沿宽度方向布设三块; 为了满足平面变形条件, 消除中间板的边界效应, 在三块模型板之间设置一充气胶囊, 这样空间因素由两侧的板消除, 可保证中间一块模型板非常接近平面变形状态。故量测点全部布置于中间一块板上。

试验设备包括试验槽、装卸砂装置以及贮砂槽等三个部分。试验仪器包括土压力盒、电测位移计和巡回检测仪(包括配套的接线箱及NEC计算机)。

试验用砂土为风干的细砂, 平均粒径为  $d_{50} = 0.26\text{mm}$ ; 不均匀系数  $C_u = 1.65$ 。

开挖分三级进行, 分别开挖  $\nabla - 0.30\text{m}$ 、 $\nabla - 0.60\text{m}$ 、 $\nabla - 0.90\text{m}$ 。

试验时先将模型板用吊车吊起, 然后将模型板慢慢地放下。在模型板两侧塞入充气胶囊, 而后充气, 以

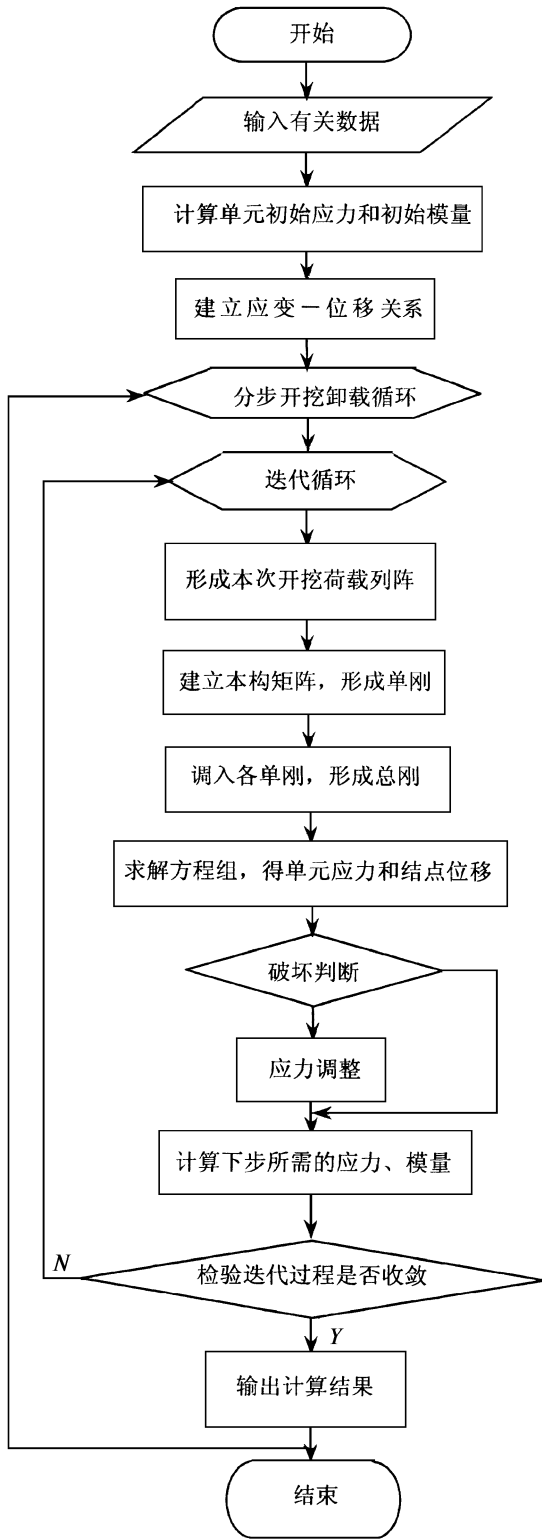


图3 程序计算框图

Fig. 3 Flow chart of program computation

防漏砂。最后, 模型板顶部用螺丝固定于上支架。模型板放好后, 打开巡回检测仪和 NEC 计算机, 将空载调零, 然后在模型板两侧自动均匀加砂, 加至1.8m 高。

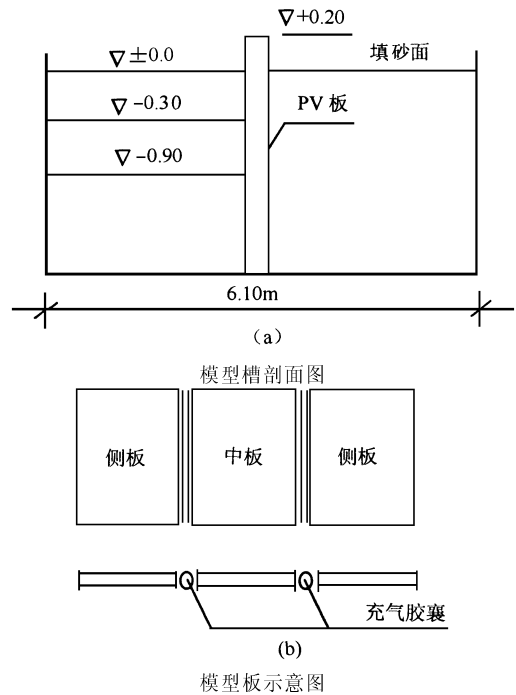


图4 模型试验示意图

Fig. 4 Sketch showing model experiment

先做悬臂板桩试验。加砂完毕后, 松开模型板顶部的螺丝, 模型板稍有位移, 待位移稳定后读取模型板上静止土压力值及初始位移值。模型板前的填土分三层开挖, 每层30cm。每层开挖后至位移稳定期间按一定时间间隔, 采集数据, 直至模型板位移稳定后, 再开挖下一层土。然后做锚锭板桩试验。装卸砂过程与悬臂板桩相同, 只是在板的1.8m 高处, 设固定锚点, 使其在模型板桩装、卸砂的各个阶段位移始终为零。

#### 4.2 计算模式的选择

为了模拟实际的施工过程, 选用图5所示的计算单元网格划分。土体采用四结点等参元, 横撑采用一维弹性单元, 土体与墙体接触面采用接触面单元。

模拟实际施工过程, 将开挖分成五个阶段, 进行增量分析。

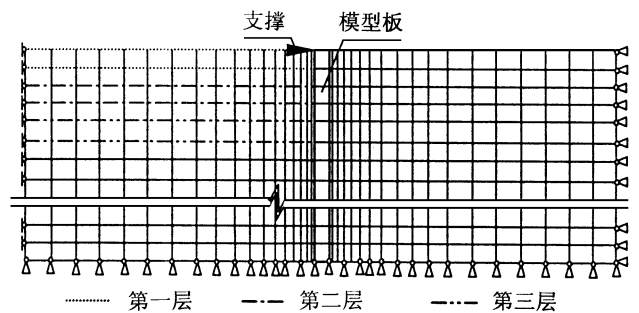


图5 计算单元网络示意图

Fig. 5 Sketch of computation element network

4.3 试验材料的特性指标

在试验过程中,共涉及到模型板桩和砂土两种材料。其试验特性指标如表1所示。

表1 试验材料的特性指标

Table 1 Indices for properties of experimental material

材料	特性指标		
砂土	$\gamma$	$c$	$\varphi$
	1.60g/cm <sup>3</sup>	0.0	31°
模型板桩	$\rho$	$E$	
	1.48g/cm <sup>3</sup>	3.41 × 10 <sup>3</sup> N/m <sup>2</sup>	

4.4 计算结果分析

图6中第1、2、3条线分别为开挖至▽- 0.30m、▽- 0.60m、▽- 0.90m的结果,第1'、2'、3'条线为程序计算值。第一步开挖至▽- 0.30m时,位移计算值和实测值较为接近,图中即重合为一条直线。从变形曲线可以看出,无论是悬臂板桩还是锚锭板桩,在开挖三层土体过程中,第一、第二层的开挖使板桩的变形均不很大,尤其是第一层开挖,变形很小。挖至第三层时,板桩变形明显增大,且变形为曲线。

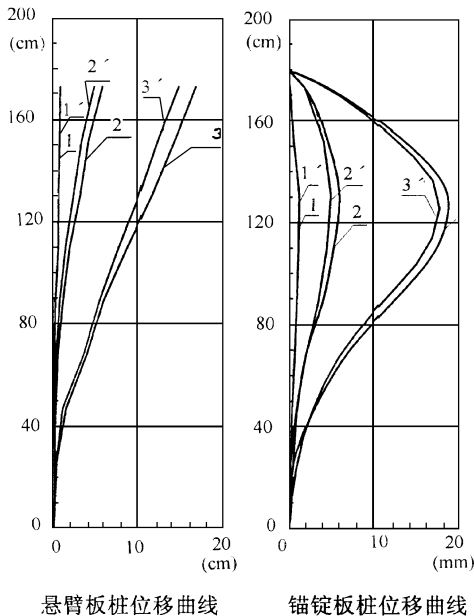


图6 位移变形曲线

Fig. 6 Curve of displacement variation

土压力曲线以静止土压力和开挖至第三层时的土压力为例。由图7中可见计算土压力与试验结果较为接近。底部静止土压力差别较大是由于装砂过程中桩砂之间会产生摩阻力,其结果将使较深处的土压力偏小。在模型试验中,实测土压力的分布形式是在板桩出现倾斜位移时发生的,因此在被动侧,挖土表面的板桩位移最大,土体受到挤压,会最先达到屈服强度。但在板桩的根部,其位移几乎为零,故土压力较小。

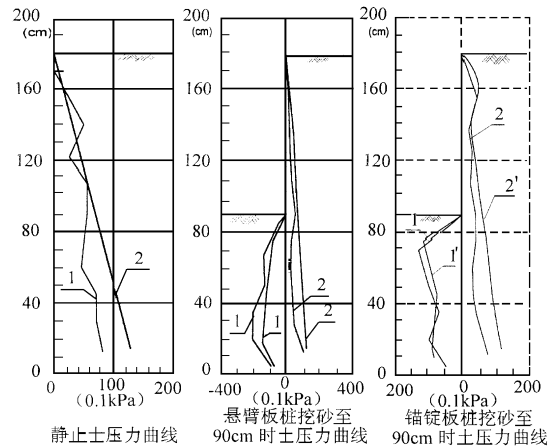


图7 土压力变化曲线

Fig. 7 Curve of earthstress variation

5 结论

本文就基坑开挖引起的支护桩位移和其受力进行了分析,建立了有限元模型,且在计算中可以考虑分步开挖、锚锭、接触面特性等的影响。并用此模型对柔性挡土墙的室内模型试验进行了计算分析,计算值与实测值吻合较好,为基坑开挖支护设计提供了参考。

参考文献:

[ 1 ] 张学言. 岩土塑性力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993. 77-83.  
 [ 2 ] Goodman R E. Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks[M]. USA West Publishing Company. 1976. 320-333.  
 [ 3 ] 郑宏, 葛修润, 谷先荣等. 关于岩土工程有限元分析中的若干问题[J]. 岩土力学, 1995, 3(9): 7-12.  
 [ 4 ] 张文正. 土石坝弹性非线性有限元分析[R]. 1985.  
 [ 5 ] 华东水利学院. 土工原理与计算[M]. 北京: 水利出版社, 1980. 61-65.