

文章编号:1000-582X(2008)03-0344-05

# 深基坑桩锚支护结构变形和内力分析方法探讨

严 薇,曾友谊,王维说

(重庆大学 土木工程学院,重庆 400030)

**摘 要:**利用弹性地基梁法和有限差分法,分别计算桩锚支护体系在深基坑开挖过程中支护结构的变形和内力,并与实测数据对比分析后发现:两种设计分析模型由于选型差异和对实际桩土作用模拟的情况不同,分析结果与实测结果间存在程度不同的差异,其中弹性地基梁法在支护结构水平位移分析中误差较大,在以强度控制为主的设计情况下使用较妥;有限差分法能更真实地反映桩锚支护结构在深基坑开挖过程中土体与支护结构的变形及内力变化,但计算模型复杂。

**关键词:**桩锚支护;弹性地基梁法;有限差分法

中图分类号:TU473

文献标志码:A

## Analytic Method Discussion on Deformation and Inner Force of the Pile-anchor Structure of Deep Excavation Under Construction

YAN Wei, ZENG You-yi, WANG Wei-shuo

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** We have calculated the deformation and inner forces of the pile-anchor structure based on the model of beam on elastic and finite difference method respectively. By comparing the calculated results with the measured values, two analytic models show dramatic discrepancy from the real values due to the selection and the simulation of the soil-pile action. The error of the model of beam on elastic is obvious as it is use in analysis of horizontal displacement of the supporting structure, which is thus suitable for assessment of the designs mainly controlled by strength. The finite difference method can reflect the change of the deformation and inner forces of the pile-anchor structure of deep excavation, although its calculation model is complicated.

**Key words:** pile-anchor structure; model of beam on elastic; finite difference method

随着城市化建设进程的加速及施工技术的不断发展,桩锚支护体系作为一种重要的支护方式被引入到深基坑支护体系中,由于深基坑施工的特殊性,使其施工过程中的安全问题日益突出,而施工阶段支护结构的变形和内力变化直接影响工程施工的安全。据不完全统计:基坑设计失误引发的事故约占事故总数的 47.6%<sup>[1]</sup>,所以从施工安全预控的角度考虑,有必要按设计方案对施工各阶段支护结构的变形和内力变化进行分析,检验设计方案在施工阶段是否安全;同时明确施工各阶段监测和控制的重

点,以最大限度地防止安全事故的发生。笔者依据工程实例,分别采用弹性地基梁法和有限差分法对桩锚支护体系在深基坑开挖过程中土体与支护结构的变形及内力变化进行分析,同时与实测数据进行比较,对其在施工安全预控中的应用提出一些建议。

### 1 计算模型

#### 1.1 弹性地基梁法的计算模型

图 1 为弹性地基梁计算模型,该模型将桩墙支挡结构视作支撑在弹性支座上的梁,基坑外侧作用

收稿日期:2007-11-10

基金项目:重庆市建委科技计划基金资助项目(城科字 2005 第 21 号)

作者简介:严薇(1964-),女,重庆大学教授,博士,主要从事施工技术与管理研究,(Tel)023-65106834;

(E-mail)yanwei6636@yahoo.com.cn。

已知的土压力和水压力,基坑内侧土体对支挡结构的地基反力 $f$ 用一系列土弹簧模拟,地基反力 $f$ 的大小与挡土结构变形 $y$ 有关。

$$f = ky, \quad (1)$$

式中: $y$ 为计算点处支挡结构的水平位移; $k$ 为水平地基反力系数。假定水平地基反力系数 $k$ 沿深度按线性规律变化,即

$$k = mz, \quad (2)$$

式中: $z$ 为地面或开挖面以下的深度; $m$ 为比例系数。支挡结构主动侧土压力采用图1所示通常使用的土压力分布模式,即在基底开挖面上作用的主动土压力,根据朗肯土压力理论计算,基底开挖面以下主动土压力分布呈矩形,不随深度变化<sup>[2-3]</sup>。

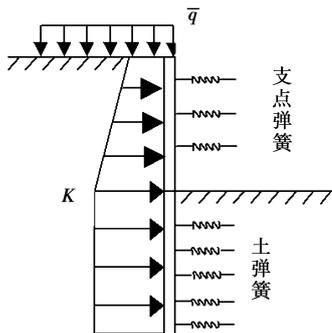


图1 弹性地基梁模型

### 1.2 有限差分法的计算模型

1) 土体。有限差分法根据不同的应用需要,设计了10多种土体本构模型。文中土体采用摩尔库伦模型建模;土体参数的选择主要依据现场实验和实验室的实验结果。

2) 单元体系。笔者主要考虑了桩单元和锚单元,桩锚单元均采用弹性结构单元。

3) 模型范围。根据实际需要,取基坑平面的1/4对称空间建模;边界取值:长度与宽度方向基坑外取2~4倍开挖深度为影响范围,深度方向基底以下取

2~3倍开挖深度为影响范围;边界条件:顶部为自由边界,其它面为约束边界。

4) 工况模拟。首先让土体在自重状态下达到初始平衡,再将初始位移设置为0,按施工工序挖除土体,设置锚杆,计算变化后的位移与应力,直至基坑施工完毕<sup>[4-5]</sup>。

### 1.3 桩锚支护深基坑施工工序的工况模拟

桩锚支护的每一步施工包括,挖除开挖区土体,铺上面层,设置锚杆。因此,在计算分析中,每一步的施工模拟都要“挖除”一些土体单元,增加一些面层和锚杆单元。具体到计算中而言,根据施工方案、土体开挖顺序、埋设锚杆过程,结合实际的施工工序,工况分析按以下情况处理。

第1步:开挖至第1层锚杆的位置,超挖0.5 m,在指定位置设置第1道锚杆;

第2步:开挖至第2层锚杆的位置,超挖0.5 m,在指定位置设置第2道锚杆;

.....

第 $i$ 步:同第1、2步,开挖至第 $i$ 层锚杆的位置,超挖0.5 m,在指定位置设置第 $i$ 道锚杆;

第 $i+1$ 步:开挖至坑底,到达基坑底面标高<sup>[6]</sup>。

## 2 工程实例概况

### 2.1 实例一

长沙铁路总公司高层住宅,总建筑面积为38 213 m<sup>2</sup>,开挖基坑东西长67 m,南北宽31 m,实际开挖深度从天然地坪至基底为9 m。基坑东面有一幢7层砖混结构住宅,距基坑边4 m,采用人工挖孔灌注桩加锚杆支护。总计护坡桩27根,桩径1.2 m,桩间距1.5 m,桩长10.2 m。在距桩顶2.5 m处布置一排锚杆,锚杆直径130 mm,长12 m,倾角20°。基本土质参数见表1。

表1 实例一基本土质参数

土层号	土类名称	厚度 /m	密度 / (kN · m <sup>-3</sup> )	粘聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)	剪切模量 /MPa	体积模量 /MPa	比例系数 / (MN · m <sup>-4</sup> )
1	填土	1	18.5	15	20	1.1	5.0	7.50
2	粘性土	2	18.5	20	10	2.2	10.0	3.00
3	卵石	2	18.0	20	22	15.4	33.4	9.48
4	粉土	2	18.5	40	18	3.1	14.2	8.68
5	细砂	2	19.0	0	23	5.3	13.8	8.28
6	强风化岩	21	21.0	60	29	63.6	38.6	54.00

2.2 实例二

深圳某经贸变电站,开挖基坑东西方向长55 m,南北长 60 m。基坑开挖深度 13 m,安全等级为一级。基坑支护主要采用灌注桩加 3 排锚杆的形式。

支护桩采用人工挖孔桩,桩径 1.5 m,桩间距 2.0 m,桩长 21 m,桩身混凝土强度 C25。锚杆设在距桩顶 2.6、10.3 m 处,倾角 15°,长度 24 m,一桩一锚。基本土质参数见表 2。

表 2 实例二基本土质参数

土层号	土类名称	厚度 /m	密度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	剪切模量 /MPa	体积模量 /MPa	比例系数 /( $\text{MN} \cdot \text{m}^{-4}$ )
1	填土	2.0	14.0	2	25	3.269	17.083	10.20
2	淤泥质土	1.5	17.0	8	6	0.357	1.667	0.92
3	粘性土	3.5	19.5	19	20	21.429	10.456	7.90
4	粘性土	4.0	20.0	20	25	11.200	18.667	12.00
5	粉质粘土	1.0	19.0	20	20	9.615	20.833	8.00
6	粉质粘土	3.0	19.0	20	20	9.615	20.833	8.00
7	砂质粘土	1.0	19.3	28	15	10.156	19.697	5.80
8	强风化岩	3.0	21.0	70	28	32.000	53.333	19.88
9	中风化岩	19.0	21.0	60	29	38.000	63.333	19.92

2.3 实例三

重庆市涪陵区某单位住宅,开挖基坑东西长 30 m,南北宽 60 m,采用人工挖孔灌注桩加锚杆支护。实际开挖深度从天然地坪至基底为 10 m,桩长

13 m,桩径 1 m,桩间距 1.5 m。在距桩顶 2.5 和 5.5 m 处各布置一排锚杆,锚杆直径 150 mm,长 13 m,倾角 15°,一桩一锚,施加预应力 100 kN,基本土质参数见表 3。

表 3 实例三基本土层参数

土层号	土类名称	厚度 /m	密度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	剪切模量 /MPa	体积模量 /MPa	比例系数 /( $\text{MN} \cdot \text{m}^{-4}$ )
1	粘性土	11	19.7	23.76	9.75	2.090 6	5.276 2	3.30
2	页岩	24	24.7	522.00	26.83	622.047 2	1 144.927 5	63.91

3 计算结果

为便于比较,各模型选取的主要参考指标包括:

各工况支护结构顶部最大水平位移、桩身最大弯矩及最大锚杆轴力,实例一、二、三的计算结果见表 4-6。

表 4 实例一各工况理论计算与实测值

计算方法	支护结构顶部最大水平位移/mm							锚杆轴力 /kN	桩身最大弯矩 /( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )
	工况一 (1.5 m)	工况二 (3.0 m)	工况三 (加锚)	工况四 (4.5 m)	工况五 (6.0 m)	工况六 (7.5 m)	工况七 (9.0 m)		
弹性地基梁法	-0.530	-2.940	-2.940	-6.55	-10.64	-13.10	-12.83	210.93	296.7
有限差分法	-4.484	-9.531	-9.531	-12.43	-14.51	-18.97	-20.12	207.60	146.3
实测值	-1.500	-4.000		-8.50	-10.20		14.80	197.00	

表5 实例二各工况理论计算与实测值

项 目	计算方法	工况一 (3 m)	工况二 (加锚)	工况三 (7 m)	工况四 (加锚)	工况五 (11 m)	工况六 (加锚)	工况七 (13 m)
支护结构顶部 最大水平位移/mm	弹性地基梁法	-1.860	-1.270	-6.64	-6.52	-15.59	-15.62	-19.39
	有限差分法	-8.126	-7.852	-13.69	-13.65	-25.57	-25.57	-30.57
	实测值	-4.280	-4.060	-9.94	-9.23	-20.92	-20.73	-27.61
锚杆一	弹性地基梁法		30.000	91.17	89.61	209.33	209.47	266.58
	有限差分法		27.970	86.21	82.69	172.10	169.20	207.90
	实测值		26.750	79.61	72.48	167.59	158.17	204.37
锚杆轴力 /kN	弹性地基梁法				30.00	107.68	107.48	154.03
	有限差分法				26.02	96.11	92.59	132.90
	实测值				26.74	89.07	87.42	126.73
锚杆三	弹性地基梁法						30.00	53.50
	有限差分法						26.69	61.15
	实测值						26.43	55.67
桩身最大弯矩 /(kN·m)	弹性地基梁法	193.410	131.660	350.51	338.83	990.86	983.58	1269.95
	有限差分法	169.800	146.100	116.50	137.00	336.80	308.70	603.30

表6 实例三各工况理论计算与实测值

项目	计算方法	工况一 (3 m)	工况二 (加锚)	工况三 (6 m)	工况四 (加锚)	工况五 (10 m)
支护结构顶部 水平位移/mm	弹性地基梁法	-0.68	4.45	-4.430	-3.780	-9.510
	有限差分法	-14.43	-1.55	-13.130	-11.060	-19.680
	实测值	-7.68	-0.62	-9.760	-5.480	-11.060
锚杆一	弹性地基梁法		100.00	158.345	151.078	201.133
	有限差分法		102.30	178.600	141.500	184.300
	实测值		91.23	164.320	135.860	169.570
锚杆二	弹性地基梁法				100.000	192.313
	有限差分法				98.870	184.100
	实测值				89.380	159.610
桩身最大弯矩 /(kN·m)	弹性地基梁法	8.99	111.46	271.660	190.840	606.670
	有限差分法	38.65	106.10	192.700	80.560	244.200

## 4 对比分析

### 4.1 计算结果分析

对上述各工况计算结果进行比较分析发现:

1) 锚杆轴力。在各工程实例中,弹性地基梁法与有限差分法计算所得的各层锚杆在各工况中的轴力基本趋于一致,较大于实测值,且与实测值的发展趋势相符;

2) 支护结构顶部的最大水平位移。有限差分法的计算结果基本满足变形控制标准,是实测值的1.2~2倍,且两者变形趋势基本趋于一致;而弹性地基梁法计算所得的位移值偏小,且小于实测值;

3) 桩身最大弯矩。在基坑开挖初期,两种方法的计算值基本趋于一致,但随着基坑开挖的不断深入,弹性地基梁法的计算值远大于有限差分法,且是其2~3倍,从设计角度考虑,偏安全;

4) 支护结构顶部的水平位移受施加预应力的影响。在工程实例二中,当预应力较小时,两种方法在施加预应力前后位移变化幅度基本一致;在工程实例三中,当预应力较大时,有限差分法变化幅度较大。

#### 4.2 原因分析

考虑到模型的差异和实际工程的复杂性,产生上述差异的原因可能有:

1) 计算模型选型的差异。弹性地基梁法考虑土体为弹性模型,未考虑工程中坑底的塑性区;而有限差分法采用摩尔库伦模型,充分考虑了土体的弹性;

2) 计算参数的选取上,有限差分法比弹性地基梁法更为全面。弹性地基梁法主要考虑了土层厚度、土体的密度、粘聚力、内摩擦角、比例系数,而有限差分法在其基础上,又加入了土体的剪切模量、体积模量这两个重要指标;

3) 在现行的设计分析中,通常采用的弹性地基梁法为平面弹性地基梁法,为二维空间体系,而有限差分法分析中利用的是三维空间体系,有效地考虑了基坑施工中的空间效应;

4) 对于主动区土体与桩的相互作用的处理方法不一致。在设计分析中,弹性地基梁法事先假定墙后荷载,并在计算中取值固定不变,仅考虑开挖侧土压与变形有关,显然这种方法未能全面考虑结构与土体的相互作用<sup>[7]</sup>;而有限差分法全面考虑结构与土体相互作用,在建模时首先考虑土体在弹性条件下的土压力(荷载)平衡,而土压力(桩的受力荷载)随开挖工况不断变化,因而,理论上更为完善,尤其在支护结构的水平位移分析应用上,与实际情况基本相符;

5) 实际工程中土体的复杂性。在计算中,为便于处理,一般将土层均一化,忽略了实际工程中土层的不均一性、土质的多样化,因而理论分析值与实际情况存在一定的差距。

## 5 结论及建议

1) 在地质情况较好、主要以强度控制为主的设计情况下,考虑到弹性地基梁法计算的简便、快捷,建议使用;

2) 在对拟建工程的施工模拟分析预测中,有限差分法有更强的适应性,能较为真实地反映桩锚支护体系在深基坑开挖过程中土体与支护结构的变形及内力影响,与实际情况基本相符,但考虑到建模的复杂性,根据实际需要确定选用;

3) 在设计中,弹性地基梁法主要考虑的是在一定条件下单桩受最不利因素影响的极限状态;而在基于有限差分法的三维分析中,不仅较大幅度地引入了施工及周边环境中的影响因素,而且计算结果充分反应了基坑施工中的空间效应,为施工中的安全预控提出了更为明确的重点和依据;

4) 弹性地基梁法由于没有考虑主动区土压力与支护结构的相互作用,在支护结构的水平位移的计算分析中误差加大,有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 龚晓南,高有潮. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1998:513-597.
- [2] 中华人民共和国建设部. GBJ50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] 中国建筑科学研究院. JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [4] 中国建筑科学研究院. JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [5] 刘波,韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社,2005.
- [6] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:139-231.
- [7] 秦四清,万林海,汤天鹏,等. 深基坑工程优化设计[M]. 北京:地震出版社,1998:79-100.

(编辑 李胜春)