Vol.35 No.3

May, 1999

T() 473.2

第35卷 第3期 1999年5日

深基坑桩锚支护的计算机算法

# 姚爱国 舒家华

(中国地质大学·武汉·430074)

根据多层土主、被动土压力分布特点,详细给出了计算机算法。利用作者自编的程序对一项曾发生 事故的支护工程进行了验算,结果表明,计算错误是引起该工程事故的原因。

深基础

### 关键词 深基坑 桩锚支护 计算机算法

由于计算桩的人土深度和锚杆力时需要涉及到 一个一元三次代数方程,计算起来比较繁琐。对于 多锚支护结构多采用近似方法计算。崔京浩等曾讨 论了各种计算方法的复杂程度及其结果的准确程 度<sup>[2]</sup>。很明显,采用不同的近似方法,计算结果误差 的大小也不一样。

随着计算机应用普及,人们越来越重视计算结 果的准确性,而把计算过程是否繁琐放到次要地位。

1 计算原理

1.1 土压力计算

设所要考虑的土层数为 n,基坑开挖深度为 H, 设置锚杆层数为 m。采用土层抗剪强度指标标准值, 按朗肯理论,由下列各式可计算出土层层顶及层底 的主、被动土压力强度。

$$e_{ai1} = (q_0 + Ge)k_{ai} - 2c_i\sqrt{k_{ai}}$$
 (1)

$$e_{ai2} = [q_0 + Ge + \gamma_i (Z_i - Z_{i-1})]k_{ai} - 2c_i \sqrt{k_{ai}}$$
(2)

$$Ge = \sum_{j=1}^{j-1} \gamma_j (Z_j - Z_{j-1})$$
(3)

$$k_{ai} = \mathrm{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_i}{2} \right) \tag{4}$$

式中:  $1 \le i \le n$ ;  $e_{ai1}$ 一 第 i 层土层顶主动土压 力强度(kPa);  $e_{ai2}$ 一 第 i 层土层底主动土压力强度 (kPa);  $q_0$  一基坑坑顶分布超载荷(kPa);  $c_i$ 一 第 i层土的粘聚力(kPa);  $q_i$ 一 第 i 层的内摩擦角;  $\gamma_i$ 一 第 i 层土的重度(kN/m<sup>3</sup>);  $Z_{i-1}$ 一 第 i 层土层顶深度 (m);  $Z_i$ 一 第 i 层土层底深度(m);  $Z_j$ 为第j 层土层 底深度(m);  $Z_{j-1}$ 为第 j 层土层顶深度(m)。

$$e_{pi1} = G_p K_{pi} + 2c_i \sqrt{k_{pi}}$$
 (5)

$$e_{pi2} = [G_{p} + \gamma_i (Z_i - Z_i - 1)]k_{pi} + 2c_i \sqrt{k_{pi}} \qquad (6)$$

$$G_{p} = \sum_{j=1}^{\infty} \gamma_{j} [(Z_{j^{-}} H) - (Z_{j-1^{-}} H)]$$
(7)

$$k_{pt} = tg^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi_t}{2} \right) \tag{8}$$

本文1997年10月收到,王 梅编辑。

式中: e<sub>pi1</sub>一 第 *i* 层土层顶被动土压力强度 (kPa); e<sub>pi2</sub>一 第 *i* 层土层底被动土压力强度(kPa)。 定义:

$$(Z_{j} - H) = \begin{cases} 0, \ \ \exists \ \ Z_{j} - H \le 0 \ \ \forall \\ Z_{j} - H, \ \ \exists \ \ Z_{j} - H > 0 \ \forall \end{cases}$$

由力学知识可知,每层土的土压力实际为梯形 分布载荷,有时可能退化为三角形分布载荷。不失 一般性,我们考虑梯形分布载荷的情况。

1.2 梯形分布载荷作用下桩的内力计算

考虑桩上作用梯形分布载荷的情况如图 1。



图1 第; 层土对X 截面求矩示意图

定义:

$$(X - X_i) = \begin{cases} 0, \le X - X_i \le 0 \text{ bb}, \\ X - X_i, \le X - X_i > 0 \text{ bb} \end{cases}$$

则桩的任意截面上的剪力可由下式求得:

$$Q(X) = q_{1i}(X - X_{1i}) - q_{2i}(X - X_{2i}) + \frac{(q_{2i} - q_{1i})}{2(X_{2i} - X_{1i})}(X - X_{1i})^2 - \frac{(q_{2i} - q_{1i})}{2(X_{2i} - X_{1i})}(X - X_{2i})^2$$
(9)

任意截面上的弯矩可由下式求得:

$$M(X) = \frac{1}{2} q_{1i} (X - X_{1i})^2 - \frac{1}{2} q_{2i} (X - X_{2i})^2 + \frac{(q_{2i} - q_{1i})}{6(X_{2i} - X_{1i})} (X - X_{1i})^3 - \frac{(q_{2i} - q_{1i})}{6(X_{2i} - X_{2i})} (X - X_{2i})^3$$
(10)

当然,利用材料力学的方法计算桩的挠度也很

57

简单,因为挠度与弯矩有如下关系:

$$\frac{d^2 V(X)}{dX^2} = M(X) \tag{11}$$

由于桩锚支护结构中,桩的变形除了受到锚杆 变形的影响,还受到桩土相互作用的影响。材料力学 的算法难以考虑这些因素。因而桩的变形宜采用有 限元的方法计算,具体算法将另文给出。

对于悬臂式支护结构,所需考虑的载荷类型只 有这种梯形分布或三角形分布载荷。而对于多锚支 护结构还需考虑集中力 —— 锚固力的作用。为方便 起见,先讨论悬臂式结构的计算。

1.3 悬臂式支护结构的计算

根据静力平衡条件,若使桩不倾倒,则需主、被动土压力对桩底端点的力矩达到平衡。即  $\Sigma M_c = 0_c 从基坑坑底至力矩平衡点 C 点的矩离即为桩的最小人土深度 <math>D_{min}$ (图 2(a))。

若把  $(H + D_{min})$ 做为未知数代人  $\sum M_c = 0$ ,由式 (10)可知,必定得到一个三次方程。解此方程的方 法有多种,<sup>[3][1]</sup>笔者采用了逐步逼近的方法。这种 方法不用判断根的合理性,写出的程序也较简单。 具体方法如下:

令 D 逐步增大,判断 ∑ M。是否变为零。

$$D^{k} = D^{0} + K\Delta D \tag{12}$$

式中: D<sup>0</sup>— 初值,可设为零,为加速计算,也可根据 经验设定为一个小值; K— 循环步数; ΔD— 每步增 量。对于每一步循环,给出判断标准

$$CR I = \frac{M(H+D^{k})}{M(H+D^{k-1})}$$
(13)

若 CRI > 0,则继续。若 CRI < 0,则跳出循环。 同时有

$$D_{\min} = \frac{D^k}{(14)}$$

桩的设计长度按下式确定

$$D_{\rm p} = H + k_d D_{\rm min} \tag{15}$$

式中: k<sub>a</sub>一增大系数,基坑底以下土质较好时取1.2,反之取1.4。

沿桩长计算出每点的剪力和弯矩值,可画出剪 力图和弯矩图。用比较法可求出剪力与弯矩的最大 值及最小值。另外也可以查出任意给定深度处的剪 力和弯矩值。

1.4 桩锚支护结构

1.4.1 自由端法

若设置锚杆层数多于一层,则支护结构为超静 定问题。为把超静定问题简化为静定问题,采用自 上而下的分层算法,嫉计算第一层锚杆时,假定开挖 深度为第二层锚杆的设置深度,以此类推。求出某 层锚固力后,在后续计算中锚固力保持不变。

对于第 / 层锚杆(1≤ /≤ m),计算如下:

对 I 点取矩(图 2(b)),令  $\sum M_I = 0$ 。可求出此 种情况下的  $D_{min}$ 。计算方法与 1.3 中的方法相似, 只是力矩平衡点不同。另外,从计算第二层锚杆开 始增加一项集中力——锚固力对 I 点的矩。其大小 为:

$$\sum_{i=1}^{j-1}T_j(h_i-h_j)$$

式中:  $T_j$ 为已求出的锚固力(kN),待求的锚固力  $T_l$ 可由力的平衡方程  $\sum Q = 0$ 求出。支护桩的设计长度仍按式(15)计算。



图 2 悬臂支护(a)与桩锚支护(自由端法)(b)计算原理图

从理论上讲,采用自由端法,从弯矩零点以上, 桩已达到了受力平衡以及力矩平衡。另外又考虑了 安全系数,支护的安全已经有了保证。因而不应只 把它当作浅桩的计算方法来看待。

此外,也可根据实际开挖及安装锚杆情况进行 计算。例如,计算第一层锚杆时,决定开挖深度为低 于安装第一层锚杆深度 0.5 m,以此类推,直到最下 一层锚杆,决定开挖深度为实际基坑开挖深度。这 样计算出的锚固力上层值较小,最下一层的值较大。 1.4.2 固定端法

按固定端计算,采用等值梁法确定最小人土深度。先假定土压力为零处为弯矩零点,如图3中所示 K 点。求出 K 点的位置,再把 AK 段作为简支梁 再计算 T 和  $V_{ko}$ 由  $\gamma K_{a}(H + D_{1}) = \gamma K_{p}D_{1}$ 可得:

$$D_1 = \frac{K_a H}{K_p - K_a} \tag{16}$$

或者  $D_1 = \frac{E_{aH}}{\gamma(K_p - K_a)}$  (17)

再由  $\sum M_k = 0$  可求出锚固力  $T_{o}$ 由  $\sum Q = 0$  可求出 支反力  $V_k$  。

下面部分对 E 点求矩, 令  $\Sigma M_E = 0$ , 采用图 4(c)

来计算 D2 故有:

$$V_{k}D_{2} + \frac{1}{6}\gamma K_{a}D_{2}^{3} - \frac{1}{6}\gamma K_{p}D_{2}^{3} = 0 \qquad (18)$$

$$D_2 = \sqrt{6V_k/\gamma(K_p - K_a)}$$
(19)

$$D_{\min} = D_1 + D_2 \tag{20}$$



#### 图 3 桩锚支护(固定端法)计算原理图

分析这种算法,不难看出是人为简化的近似方 法。从力学的角度来看这种简化并不合理。笔者认 为与其采用这种近似方法,倒不如采用自由端的计 算方法。对于下部土质较差的地层,若还嫌不安全, 可采用增大安全系数的方法增加桩长和锚固力。或 者按照下部主、被动土压力的比值按比例增加桩长 和锚固力。

### 2 计算实例

根据上述理论,笔者用 C 语言与 Foxpro 数据库 语言编写了程序,对吴景华等文献<sup>[4]</sup>中所讨论的例 子进行了验算。算例为长春市某工程,该工程在施 工期间曾发生大量护坡桩向坑内倾斜的事故。计算 所需的数据由表 1、表 2、和表 3 给出。输出结果如 图 4 所示。表 4 给出了原设计数据、文献[4]的计算 结果与本文计算结果的比较。请注意文献[4]采用 山肩邦男近似解法,并取地层重度  $\gamma = 19$  kN/m<sup>3</sup>,内 摩擦角  $\phi = 27^\circ$ , C = 14 kN/m<sup>2</sup>。本文未作近似处理。

表1 输入地层数据
-----------

地层 名称	起点探度 (m)	终点深度 (m)	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	内摩擦角 (*)	粘聚力 (kP∎)
杂填土	0.0	2.4	15	27	
粉质粘土	2.4	9.3	17	27	14
粘土	9.3	13.2	19	30	14
粉质粘土	13.2	14.7	19	30	14
粘土	14.7	22	19	30	14

由计算结果可知,原设计桩长度短、锚固力小是 造成事故的原因。这与文献[4]中所得结论一致,但 文献[4]中所得锚固力及最大弯矩绝对值都比本文 计算结果大。从原理上讲,山肩邦男近似解法把坑 下部分主动土压力的梯形分布简化为矩形分布,其 计算结果应偏小,偏于不安全。而文献[4]中的计算 简化以及结果却偏大,这是由于文中对地层力学参 数对主动土压力简化计算造成的。另外还应该注意 图 4 中最小弯矩值(或最大弯矩绝对值)的数值与锚 固力的大小和位置有关。文献[4]中锚固力较大,所 以这个值也较大。



图4 计算实例输出结果

表2 支	护数据	表3 工程概况数据		
支护探度(m)	开挖深度(m)	工程名称	长春某大厦	
5	9.5	地面载荷(kN/m <sup>2</sup> )	30	
9.5	16	最终开挖探度(m)	16	
		支护层数	2	

### 表4 计算结果对比

	桩长	第一道锚杆	第二道锚杆	最大弯矩绝
	(m)	锚固力(kN)	锚固力(kN)	对值(kN·m)
原工程计算结果 文献[4]计算结果 本文计算结果	18 20.69 20.87	165.01 <sup>©</sup> 280.84 213.19	144.89 <sup>©</sup> 543.29 306.35	840.43 652.04

注:①根据文献[4]中给出的锚杆设计拉力值推算而得。

参考文献

- 1 陈仲颐,叶书麟主编,基础工程学,北京,中国建筑工业出版社, 1990
- 2 崔京浩,李 英,深基坑锚杆支护简要设计计算及应用.第二届中 国国际岩土钻蹭工程会议论文集,1995
- 3 黄 炎,工程弹性力学,北京,清华大学出版社,1982
- 4 吴景华,张树林,某基坑护坡桩倾倒事故原因浅析,第九届全国探 矿工程学术会议论文集,1997
- 5 Bowles J E. Foundation Analysis and Design. (Third edition), Mc Grow -Hill Book company, 1982

# A COMPUTER ALGORITHM OF SUPPORT SYSTEM FOR DEEP EXCAVATION

Yao Aiguo, Shu Jiahua

The paper briefly discuss the inconvenience of the currently used computing methods of support system for deep excavation by hand , and then propose a com (下转第 65 页)

59

工艺合成金刚石以 Ni、Mn、Co 和石墨为主,粉末工 艺合成金刚石所含杂质则以 Fe、Ni 及石墨为主。

2、光谱分析表明:粉末触媒合成金刚石杂质含 量成数量级差别低于片状触媒合成金刚石。

3、热稳定性实验表明:不同工艺金刚石热稳定 性在 900 ℃以下时要好,随着温度升高,粉末触煤工 艺合成金刚石表现出更好的热稳定性,1100℃时,片 状工艺金刚石石墨化明显。

4、缺陷及杂质成分、含量、存在形式是影响金刚

## 石强度、热稳定性的重要原因。

#### 参考文献

- ] B. Henderson、著,范印哲,译、晶体缺陷、北京:高教出版社,1983
- 2 李树棠,晶体 X 射线衍射学基础,北京;冶金工业出版社,1990,1
- 3 有色总公司,中南工大.近代理化仪器及测试技术,中南工业大学 出版社,1991
- 4 谢有赞.金刚石理论与合成技术.长沙; 湖南科技出版社, 1993
- 5 张书达,人造金刚石中的杂质和包体,硅酸盐学报,1985(13),1
- 6 丁实业,等.金属包裹体的变化及对人造金刚石强度的影响.高压物理学报. V01.4 N9.21990.6
- 7 孙士垣,金属材料,北京;中国铁道出版社,1988

### STUDY ON THERMAL STABILITY OF SYNTHETIC DIAMOND

Xiong Xiangjun, Chen Qiwu, Pen Zhenbin, Zhen Rishen

Synthetic diamond has been studied systematically by techniques such as heat treatment, acid treatment, X - ray diffraction, emission spectrum analysis and XTL - [] microscope in this paper. The experimental result shows: diamond synthesized by powder catalyst and graphite is of little impunty, high strenth and good thermal stability. And it is proposed that the important factors controlling its perperties are defects, impurity and its quality and reserving forms. The thermal stability descends rapidly with temperature due to much impurity, especially as temperature is at 1100 °C.

Key words diamond, powder catalyst, thermal stability 第一作者简介。



熊湘君 男、1966年生。现在中南工业大学资源环境与建筑工程学院攻读博士研究生。 通讯地址:湖南省长沙市 中南工业大学 邮政编码:430083

(上接第56页)



第一作者简介: 张绍和 男,1967年生。中南工业大学资源环境与建筑工程学院讲师,博士研究生。 通讯地址:湖南省长沙市 中南工业大学资源环境与建筑工程学院 邮政编码:410083

(上接第 59 页)

puter algorithm in detail based on the distribution features of active and passitive earth pressures in multilayered soils. Using a software developed by the authors, a failed support system of a deep excavation is checked, and all necessary figures like formation columns, each pressures, shear forces and bending moment are plotted. The study indicates that the failure resulted from wrong computation.

Key words deep excavation, support system, computer algorithm

第一作者简介:



姚爱国 男,1953年生。1982年毕业于中国地质大学钻探专业,后获硕士学位。1996年作为访问学者 在英国进修土木工程一年。现任中国地质大学勘建学院副教授,主要从事钻探与土木工程学科的教学与科研工作。

通讯地址:湖北省武汉市 中国地质大学工程学院 邮政编码:430074

65