

②

42-44

## 地下工程的开挖模拟计算

张能林

王润富<sup>✓</sup> 卓家寿 · Tu941

(浙江省工业设计研究院 杭州 310007) (河海大学 南京 210098)

**摘要** 本文给出了一种可模拟地下洞室开挖过程的等效节点荷载法,同时对用弹塑性增量理论求解初应力问题中的不平衡余量的求解给出了一种算法。最后对某一具体工程的分级开挖进行了模拟计算,取得了满意的结果。

**关键词** 地下工程 开挖 有限单元法 等效节点荷载法 不平衡余量

### 1 等效节点荷载法

在有限单元法中每个单元只受两种力的作用:一是作用在该单元上的各种荷载,可以化为等效节点荷载;二是相邻单元对它的作用,我们把这种作用看作是节点对单元施加的节点力。作用在每一个节点上的力应该是平衡的,即

$$R_i - P_i = 0 \quad (1)$$

式中  $R_i$  是各种荷载作用在  $i$  节点上的等效节点荷载总和;  $P_i$  是  $i$  节点对周边单元的节点力总和。当挖去与  $i$  节点相接的一个单元时,  $i$  节点上就相当于受到了一开挖外力:

$$F_i^* = P_i^* - R_i^* \quad (2)$$

这里,  $R_i^*$  表示该单元所受荷载作用在  $i$  节点上的等效节点荷载;  $P_i^*$  为  $i$  节点对该单元所施加的节点力。

于是,挖掘面上的开挖外力可以用增量形式的等效节点荷载表示,成为

$$\Delta F = \sum_{N_n} \left( \int_{V_n} B^T \sigma^* dV - \int_{V_n} N^T \gamma dV \right) \quad (3)$$

式中  $N_n$  为挖掘单元总数;  $\sigma^*$  为该区域挖掘前的岩体应力场;  $\gamma$  为岩体沿各坐标轴方向的容重分量。一般来说,地下的岩体单元所受

的荷载仅是它的自重。

于时我们就得到了开挖问题的控制方程

$$K_d \Delta \delta = \Delta F - Q_d \quad (4)$$

这里  $K_d$  是将挖掘单元作为空气单元后得到的整个计算域的整体刚度矩阵;  $\Delta \delta$  是开挖引起的位移增量;  $Q_d$  是初始不平衡余量。

根据式(3)与式(4),每次开挖都可以用增量形式来求解,所以地下洞室的整个开挖过程中引起的应力和位移的变化情况就很容易通过分级开挖(即分级加载)来模拟计算。对于有衬砌、锚杆或预应力锚索的洞室来说,同样也可以根据实际的施工顺序在加载的同时改变相应的这些单元的性质来模拟计算,从而使模拟开挖计算更逼近真实情况。由于我们已把开挖问题转化成简单的加载问题,因此应用等效节点荷载法可以连续跟踪模拟地下工程的开挖过程,并可应用各种屈服准则或破坏准则进行非线性分析计算。

### 2 不平衡余量的求法

地下洞室的开挖是一个典型的初应力问题,前面已得到如式(4)所示的控制方程,其中不平衡余量

$$Q_d = \sum_{i=1}^{N_e} \left[ \int_{V_i} N^T F^0 dV + \int_{S_i} N^T T^0 dS - \int_{V_i} B^T \sigma^0 dV \right] \quad (5)$$

式中  $F^0, T^0, \sigma^0$  分别是初始状态单元内体力、已知应力边界上的面力和单元的初始应力。

对于地下洞室的开挖来说,如果其原始岩体应力场不是自重应力场,我们只有反演得到的初始地应力场或量测得到的地应力数据,那么初始状态的荷载是不知道的,也就是说  $F^0$  和  $T^0$  的值不能确定,从而不平衡余量  $Q_d$  将无法求出。但我们知道,在原始状态,各节点上的力是平衡的,即  $Q_d=0$ ,所以可以反推出原始状态计算域内岩体受到自重和构造作用的等效节点荷载

$$F^0 = \sum_{i=1}^{N_e} \int_{V_i} B^T \sigma^0 dV \quad (6)$$

有了  $F^0$  就可以在大型地下洞室的分级开挖计算中,计算出每一级开挖前的不平衡余量  $Q_d$ ,从而提高计算的精度。

通常量测到的地应力是作为均匀应力场来考虑的,而实际上岩体结构很复杂,地下洞室附近常有裂隙、断层等不连续面通过,如果将初始地应力场作为均匀应力场直接作开挖计算,必然会带来较大的误差。为此,本文提出在开挖计算前先对初始应力场作一次修正,即

$$K^0 \delta^0 = R^0 \quad (7)$$

由上式求出  $\delta^0$ ,从而求出修正后的  $\sigma^0$ ,然后再用等效节点荷载法进行分级开挖计算。

### 3 算例

某工程地下洞室布置见图1。洞室埋置在比较完整的侏罗系复成分砾岩山体内,通过工程区域的断层有  $F_{20}$  (NE60°SE/35°~40°) 和  $F_{30}$  (NE30°~35°SE/30°~35°)。整个

计算域共剖分为4617个单元,其中岩体单元3998个,断层单元98个,锚杆单元489个,预应力锚索单元32个。有61个单元先被开挖掉,后衬砌成为混凝土单元。节点总数4446个。

计算中洞室分四级开挖,开挖顺序见图2。选取的各材料参数见表1。

表1 材料参数值

| 材料名称   | $E(t/m^2)$         | $\mu$ | $c(t/m^2)$ | $\varphi(^{\circ})$ | $\gamma(t/m^3)$ | $[\sigma]_{(t/m^2)}$ |
|--------|--------------------|-------|------------|---------------------|-----------------|----------------------|
| 砾岩     | $1.8 \times 10^6$  | 0.25  | 100        | 45                  | 2.7             | 150                  |
| 断层     | $5.0 \times 10^4$  | 0.43  | 0.5        | 18                  | 2.2             | 0.0                  |
| 250# 砼 | $2.85 \times 10^8$ | 0.17  | —          | —                   | 2.5             | 155                  |
| 锚杆     | $2.0 \times 10^7$  | —     | —          | —                   | —               | $2.9 \times 10^4$    |
| 锚索     | $2.0 \times 10^7$  | —     | —          | —                   | —               | $1 \times 10^5$      |

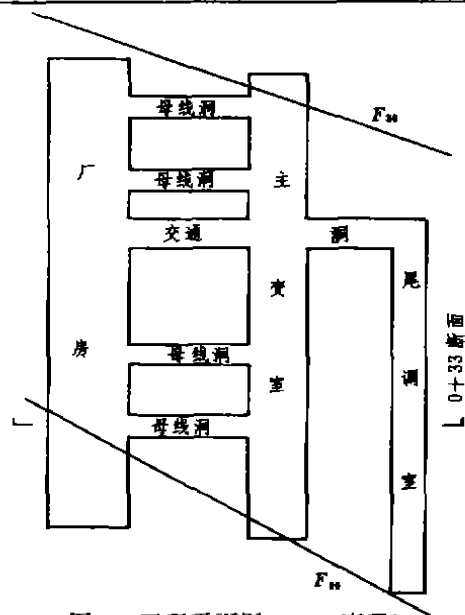


图1 工程平面图 (44m 高程)

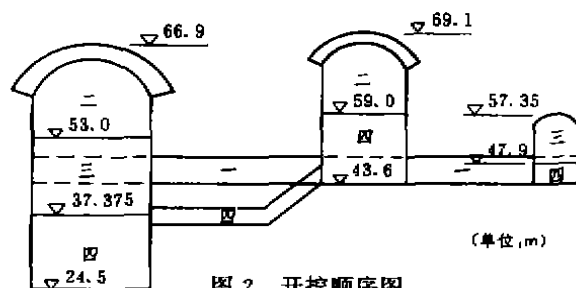


图2 开挖顺序图

地下厂房附近量测到的初始地应力值见表 2。

表 2 岩体初始地应力量测值

| 类别         | 量测值 (MPa) | 方位     | 倾角   |
|------------|-----------|--------|------|
| $\sigma_1$ | 15.0      | NE13°  | 10°  |
| $\sigma_2$ | 12.0      | NW297° | -55° |
| $\sigma_3$ | 8.0       | NW276° | 34°  |

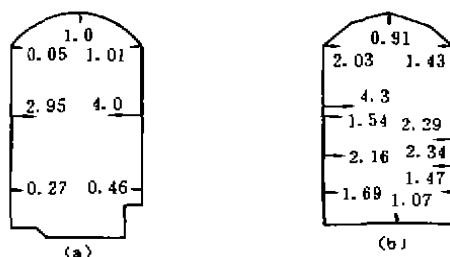


图 3 0+33 断面位移图 (单位: cm)

运用前面叙述的等效节点荷载法思想编写的三维非线性有限元程序 AAA95·FOR 对该工程的整个施工过程(包括开挖和加固)进行了跟踪模拟计算,最后得到的结果比较接近实际量测值。本文仅以地下厂房 0+33 断面的位移计算值与实测值作比较说明,见图 3。另外,在地下厂房布置的锚杆应力计得到的数值与计算得到的锚杆应力值也比较吻合,这里不再赘述。

比较图 3(a)与图 3(b)可以发现,厂房上部的位移值两者非常接近,而下部的位移值两者相差较大,这里由于在计算中,上部的开挖引起了下部的位移,而这部分位移是观测不到的。

## 4 结 论

通过上面实例的验证,说明以上提出的等效节点荷载法是切实可行的,得到的结果是令人满意的。由于等效节点荷载法将开挖问题转化为一般的加载问题,所以一次就可以计算出整个开挖过程的位移变化及应力变化,十分方便。并且等效节点荷载法在理论上比较严密,能反映实际的加载历史(开挖过程),其中还具有对提供的均匀初始地应力场作一次修正,对各级开挖前的不平衡余量进行求解的功能,适用于复杂岩体内地下洞室的开挖问题,使弹塑性求解的精度更高。

## 参考文献

- 1 华东水利学院编,弹性力学问题的有限单元法,修订版,北京:水利电力出版社,1989
- 2 刘钧,关于地下工程的开挖计算,水文地质工程地质,1991,18(3):27~31

(收稿日期:1995-02-27)

## 《海河水利》征订启事

《海河水利》是水利部海河水利委员会主办的综合性技术刊物。1993 年北京高校图书馆期刊工作委员会、北京大学图书馆评定,中国图书馆学术委员会鉴定为全国核心期刊。所设栏目有:流域治理与开发、水文水资源、防洪除涝、水土保持、农田水利、设计与施工、工程管理、小水电、水利经济、水利改革、地方交流、企业介绍等以及刊登广告业务。

• 44 •

《河海水利》为双月刊,双月 20 日出版,国内外公开发刊,16 开本,64 页,每期定价 3.00 元,全年 18.00 元。为加强和读者联系,更好地为读者服务,本刊 1996 年继续自办发行,欢迎广大读者踊跃订阅。订阅单位和个人将订款直接寄至本刊编辑部。联系地址:天津市河东区龙潭路 15 号《海河水利》编辑部。邮政编码:300170。