

# 特征值法及其应用

赵国堂 任天贵

北京科技大学矿业研究所, 北京 100083

**摘要** 通过对地下工程围岩变形曲线的分析,提出了特征值法,介绍了其在确定最优支护时间和围岩变形形态分类中的应用,并用实例证明了该方法的可靠性和简单易行的特点。

**关键词** 地下工程,围岩变形形态,最佳支护时间,特征值法

**中图分类号** TD313;TD322;TU822

## Characteristic Value Method and Its Application

Zhao Guotang Ren Tiangui

Mining Research Institute, USTB, Beijing 100083, PRC

**ABSTRACT** Based on analysis of rock deformation curves around underground opening, the characteristic value method is proposed. The application of this method in determining the optimal supporting time and in classification of deformation pattern is described. This method is reliable, simple and convenient confirmed by a case.

**KEY WORDS** underground opening, rock deformation characteristics, optimal support time, characteristic value method

在深埋和软岩地下工程中,变形失稳已成为其主要的失稳形式。由于变形信息具有易量测性和直观性,而且能记录地下工程自开挖以后渐趋稳定或失稳的过程及其瞬时特性,从而在研究围岩变形规律及其机理等方面获得了广泛的应用。对变形信息的研究,避开了纯理论研究的各种简化和假说,是地下工程稳定性分析的正确途径。本文从变形曲线反映的变形形态分析入手,提出了特征值法,并根据特征值法对变形形态的控制程度以及与围岩性态之间的关系,介绍了确定最佳支护时间和进行围岩变形形态分类的方法和原理。

### 1 特征值法的提出

变形量测得到如图1(a)所示的 $u-t$ 曲线,回归后得到函数 $f(t, a_i)$ ,对 $f$ 进行1次到3次微分,可以得到图中的5个点: $u_0$ 、 $u_\infty$ 、P点、M点和A点,其中, $u_0$ 是工程开挖时的围岩变形,是工程开挖出现临空面时瞬时完成的,是围岩性质和围岩应力共同作用的反映; $u_\infty$ 是

围岩变形最终收敛值,与临界变形值(围岩临界变形或支护最大可缩量)相比,可以判断工程的稳定状况;M点是由  $f'' = 0$  得到的变形速度最大点;P和A点是由  $f''' = 0$  得到的  $v-t$  曲线的拐点,P点是变形急剧增加点,A点是变形趋向稳定的点.这5个点称之为特征点,与特征点相关的时间、变形量和变形速率称之为特征值.由图1看出,当特征值确定以后,围岩变形规律也基本确定,这就是特征值法.

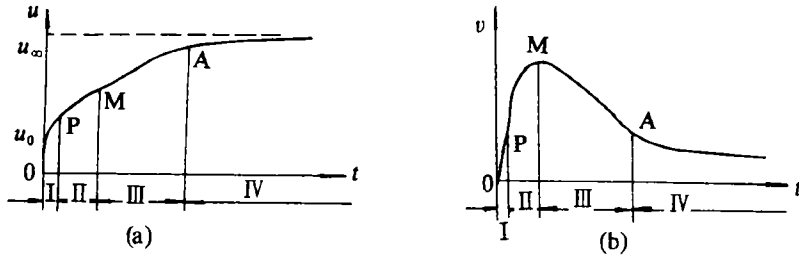


图1 围岩变形曲线(a)和变形速率曲线(b)

## 2 特征值与围岩变形形态

围岩变形形态是指同类围岩在动态效应(地下工程开挖)以后表现出的共有特征,是围岩变形的一般形式.文献[1]通过对大量实测资料的分析,认为,  $u_0$  和时间特征值只与围岩性质和围岩应力有关,受其它因素影响较少,并首次提出了以  $u_0$  和时间特征值  $t_A$  作为围岩变形形态分类指标的分类方法.

## 3 围岩变形形态与支护

由特征点可以将围岩变形分为4个阶段(图1): I 为掘进变形段,是开挖超前影响所致; II 是变形速度急剧增加段,是开挖引起应力重分布的结果,此时,第一塑性圈初步形成; III 是变形速度衰减段,随着应力集中向深部三向应力状态岩体转移,传递到表面的位移速度逐渐减小; IV 为相对稳定阶段,应力重新分布趋于平衡后,围岩变形趋向蠕变.所以, I 阶段难以用支护手段控制; II 阶段是动压显著作用段,允许其发生,产生一个让压范围,对工程长期稳定有利; III 阶段是围岩主要变形阶段,往往由变形地压向松动地压过渡,如果不予控制,容易产生大的离层和垮冒现象.因而,在 M 点附近进行初次支护,控制围岩大变形,在 A 点附近进行二次支护,实现第IV阶段的长期相对稳定,是地下工程支护的首要原则.

## 4 $u_0$ 的确定

围岩表面变形是其内在性态变化的反映.图2是深部位移量测方法和结果.假设各个钻

孔的方向在地下工程的法向方向上, 各点的位移分别为  $u_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 在围岩体失去连续性之前, 各点位移服从回归函数或插值函数  $F$ , 围岩破坏时, 达到临界应变  $\varepsilon_c$ , 即

$$\varepsilon = -F' = \varepsilon_c \tag{1}$$

掘进期间, 假设围岩体不产生大的离层, 而且破坏区岩体是体积不可压缩的, 则有:

$$a u_a = r_p u_p \tag{2}$$

式中  $a, r_p$  - 地下工程断面半径及塑性区半径;  $u_a, u_p$  - 表面围岩变形和弹塑性区交界处的变形。

这样, 由式 (1) 和式 (2) 就能通过围岩表面变形求出破坏区的大小, 建立起围岩变形与地下工程稳定性之间的关系。

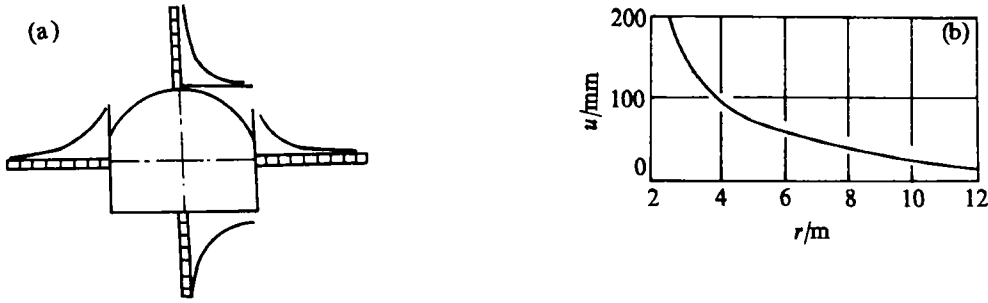


图2 深部位移量测方法及成果

### 5 M点和A点的确定

M点和A点由  $f'' = 0$  和  $f''' = 0$  确定. 这里主要是确定  $a_i$  问题. 对于  $n$  对测量数据  $(u_j, t_j) (j=1, 2, \dots, n)$ , 使:

$$Q = \sum_{j=1}^n [u_j - j(t_j, a_i)]^2 = \text{最小值} \tag{3}$$

即为  $u = f(t, a_i)$  与观测值的最佳拟合.

一般采用线性化方法确定  $a_i$ . 先给一个初值  $a_i^{(0)}$ , 初值与真值之差为  $\Delta_i$ , 即  $a_i = a_i^{(0)} + \Delta_i (i=1, 2, \dots, m)$ , 这样, 确定  $a_i$  的问题就转化为确定修正值  $\Delta_i$  的问题. 为了确定  $a_i$ , 在  $a_i^{(0)}$  附近对  $f$  作泰勒级数展开, 并略去  $\Delta_i$  的高次项, 得:

$$j(t_j, a) = j_{j0} + \sum_{k=1}^m \frac{\partial f_{j0}}{\partial a_k} \Delta_k \tag{4}$$

式中  $f_{j0} = f(t_j, a_i^{(0)})$ ;  $\frac{\partial f_{j0}}{\partial a_k} = \left. \frac{\partial f(t, a)}{\partial a_k} \right|_{a_i = a_i^{(0)}}$ .

当  $a_i^{(0)}$  给定时, 它们都是  $t$  的函数, 可直接算出. 将式 (4) 代入式 (3) 中, 并记  $C_{ik} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{j0}}{\partial a_k} \frac{\partial f_{j0}}{\partial a_i} (i, k = 1, 2, \dots, m)$  和  $C_{iu} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{j0}}{\partial a_i}$  得:

$$\sum_{k=1}^m C_{ik} \Delta_i = C_{iu}, \quad (i=1, 2, \dots, m) \tag{5}$$

当数据点  $(u_j, t_j)$  和初值  $a_i^{(0)}$  给定后, 系数  $C_{ik}$  及  $C_{iu}$  均可算出, 因此, 由方程组 (5) 可以解出  $\Delta_i$ , 进而得到  $a_i$  的值, 利用  $a_i$  不断迭代, 直到  $\Delta_i$  值小到满足精度要求为止.  $a_i$  确定后,  $u = f(t, a)$  函数关系随之确定, 就可以确定出  $f''=0$  和  $f'''=0$  的点, M 和 A 点随之确定.

## 6 实例分析

图 1(a) 是淮南某煤矿 -660m 水平巷道的围岩变形曲线, 回归得曲线满足的解析式为:

$$u_a = A + Be^{b/t} \tag{6}$$

式中  $A, B, b$ —回归系数.

通过对不同围岩、不同埋深和不同支护下各回归系数值的分析得出<sup>[1]</sup>, 系数  $b$  主要与围岩性质有关, 受其它条件影响较小. 系数  $A$  和  $B$  要受到各种因素的制约. 由式 (6) 微分, 得特征点,  $t_M = -b/2, t_A = -0.788b$ , 主要受岩性影响.

图 2(b) 是深部位移实测曲线, 回归得:

$$u = A_1 e^{\alpha/r} \tag{7}$$

式中  $A_1, \alpha$ —回归系数.

由式(1)代入式 (2), 得:

$$\varepsilon_\sigma = \frac{a^2 u}{r_p^2 (r_p - a)} \ln \frac{r_p}{a} \tag{8}$$

$r_p$  一般为松动区范围的 3 倍<sup>[1]</sup>. 根据松动圈理论, 在矿山巷道中, 其围岩变形形态可以分为 3 类<sup>[2]</sup>: I 类稳定变形:  $u_0 \leq 15\text{mm}, t_M > 6\text{d}, t_A > 10\text{d}$ ; II 类不稳定变形:  $15\text{mm} < u_0 < 50\text{mm}, 3 < t_M \leq 6\text{d}, 5\text{d} < t_A \leq 10\text{d}$ ; III 类极不稳定变形:  $u_0 \geq 50\text{mm}, t_M \leq 3\text{d}, t_A \leq 5\text{d}$ . 在软岩矿区, 围岩变形大多数是第 III 类变形, 此时, 初次支护时间应为 3d, 二次支护时间应在 5d 以内. 在淮南某矿试验中采用此支护时间, 取得了良好的效果.

## 7 结束语

本文提出的特征值法开拓了围岩变形研究的新思路; 用变形信息确定适时支护时间和以  $u_0$  与  $t_A$  为指标的围岩变形形态分类方法尽管在指标的量化方面还需要根据不同矿区做相应的调整, 但该方法直观、简单、可靠和指标的早期性对工程实践具有重要的参考价值<sup>[3]</sup>.

### 参 考 文 献

- 1 赵国堂, 陈庆敏. 岩石临界变形稳定性及其在煤矿围岩变形区判断中的应用. 见: 第二届华东地区岩土力学讨论会文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 117 ~ 124
- 2 赵国堂, 任天贵. 特征值法及其在软岩巷道围岩变形形态分类中的应用. 化工矿山技术, 1994(2): 21 ~ 25
- 3 赵国堂. 软岩基本巷道围岩变形规律及其控制的研究: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 1992