

DDA 数值方法及工程应用研究

周少怀, 杨家岭

(中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 基于 DDA 计算模型, 补充和发展了 DDA 计算程序, 分析了边坡大位移问题和地下开挖引起地面变形的工程实例, 并与离散元计算结果进行了比较研究。计算分析结果表明, 该模型的计算结果基本符合实际, 适合于不连续块体系统岩体的情况, 可用于大规模工程问题的应用和分析。

关键词: DDA, 边坡大位移, 地下开挖, 地表变形

中图分类号: O 241; TB 115 文献标识码: A

作者简介: 周少怀, 男, 25 岁, 硕士, 从事结构力学与数值计算方法方面的研究工作。

DDA method and its application to engineering

Zhou Shaohuai, Yang Jialing

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Wuhan 430071, China)

Abstract: The computing program of DDA is expanded and developed based on DDA computation model in this paper. Large displacements of slope and surface deformation due to underground excavation are discussed using the DDA model with results compared with those from DEM. It is shown that the results are in accordance with those of DEM. All of the analysis proves that DDA can be effectively applied to large rock engineering.

Key Words: DDA, large displacements of slope, underground excavation, surface deformation

1 DDA 理论概述

DDA(不连续变形分析)^[1]是石根华博士提出的一种新型数值分析方法, 它解决了岩体的大变形和大位移问题。DDA 以位移作基本未知量, 按结构矩阵分析的方式求解平衡方程, 主要适用于不连续块体系统

1.1 位移模式

考虑块体平移 (u_0, v_0) 转动 (V_0) 正应变 (X, X) 和剪应变 (V_{xy}) 变形的情况下, 取块体系统的全一阶位移模式, 块体内任一点的位移可写为

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = [T_i][D_i] \quad (1)$$

其中 i 表示系统中的第 i 个块体, 且有

$$[T_i] =$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y - y_0) & (x - x_0) & 0 & \frac{(y - y_0)}{2} \\ 0 & 1 & (x - x_0) & 0 & (y - y_0) & \frac{(x - x_0)}{2} \end{pmatrix}$$

$$[D_i] = (u_0, v_0, V_0, X, X, V_{xy})^T$$

1.2 联立方程组的建立和求解

块体系统的总势能包括块体单元的应变能、初始应

力的势能、点荷载和线荷载作用下的势能、体荷载势能、锚杆连接的势能、惯性力势能和粘性力势能等。由最小势能原理, 在势能泛函取最小值时系统达到平衡。

块体系统的总势能可写成一般形式:

$$C = \frac{1}{2} [D]^T [K][D] - [D]^T \{F\} \quad (2)$$

C 取极值的条件为 $\frac{\partial C}{\partial [D]} = 0$ ($\frac{\partial C}{\partial [D]}$ 表示对 $[D]$ 内的每一分量分别求偏导), 即得支配方程:

$$[K][D] = \{F\} \quad (3)$$

如果系统包括 n 个块体, 则可写成:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

引入边界条件和块体系统的运动学条件, 即可对上述方程求解, 得到每一个块体的位移与变形状态。

1.3 运动学条件

块体系统变形时, 块体之间应满足无拉伸和无侵入的条件。块体如果在接触处发生了侵入, 则施加刚度很大的弹簧将其原路推回; 如果两块体间有了接触

收稿日期: 1999-07-08

拉力,则撤消弹簧的作用。这一过程决定了 DDA 的分析计算是一反复的迭代过程。

块体之间的接触有三类:凸角与边、凸角与凹角、凸角与凸角,如图 1。如果角点越过了进入线,则认为发生了侵入。

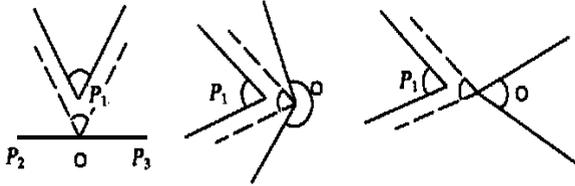


图 1 接触的种类

Fig. 1 Contact modes between blocks

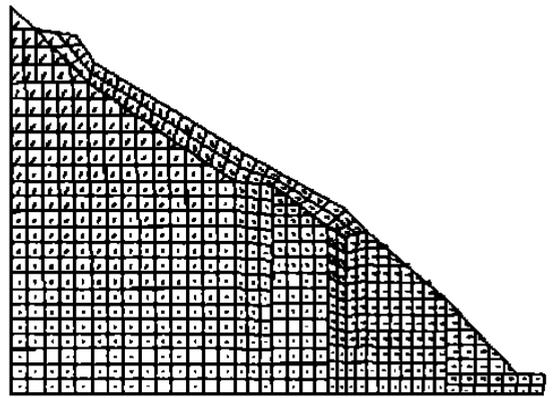


图 2 DDA位移图(时步为 800步)

Fig. 2 Displacements from DDA analyses (step= 800)

2 边坡失稳分析

2.1 工程条件

小湾电站坝体左岸坝肩处有一堆积体,分布于坝前饮水沟下游侧山坡地段,平面形状似舌形。该堆积体主要由块石和特大孤石(岩块较新鲜坚硬)组成,中间夹碎石质砂壤土填充在块石缝隙之间。堆积体下岩体抗剪强度高,且无贯通性或延伸较长的缓倾角顺坡结构面存在,因此在基岩中不存在对整体稳定不利的相对软弱面。考虑到堆积体本身最接近于块体系统的组成特点,且可能产生大的位移和变形,较适合于用 DDA 进行计算模拟,故选择堆积体具有代表性的一个剖面进行计算分析。长度取 760 m,高度取 580 m 共划分 1 000 余个块体单元。

对于基岩部分,密度取 $2\ 630\ \text{kg}/\text{m}^3$, $E = 6\ 545.5\ \text{MPa}$, $\nu = 0.36$ 。对于堆积体部分, $d = 16\ \text{t}/\text{m}^3$, $E = 315.8\ \text{MPa}$, $\nu = 0.42$ 。接触面节理摩擦系数取 1.3,摩擦角 42° ,内聚力 $0.9\ \text{MPa}$ 。

2.2 DDA 计算结果

取计算时步为 800 步,时步系数为 0.002。图 2 和图 3 分别表示 800 个时步迭代后整个块体系统的位移矢量图和应力矢量图。这里模拟的是堆积体在漫长的地质年代的位移,故数值较大。堆积体中块体位移的最大值为 $4.92\ \text{m}$,该块体位于堆积体下端。最大应力值是 $12.5\ \text{MPa}$ (为压应力),出现在基岩底部。但堆积体整体上尚未因为滑移而失稳。

在其他各条件相同的情况下,降低材料的物理参数,即取参数下限值。将各力学参数降低 5%,取时步仍为 800 步,重新进行计算。其位移和应力矢量图如图 4,图 5。在这种情况下,堆积体整体发生了滑移且失稳。堆积体下端的岩块明显滑落。堆积体块体呈现明显的不连续变形。

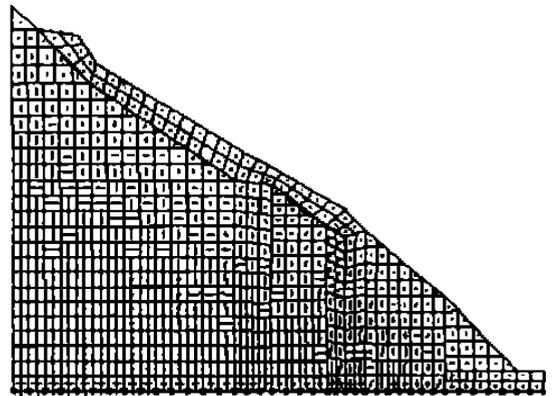


图 3 DDA 主应力图(时步为 800 步)

Fig. 3 Principal stresses from DDA analyses (step= 800)

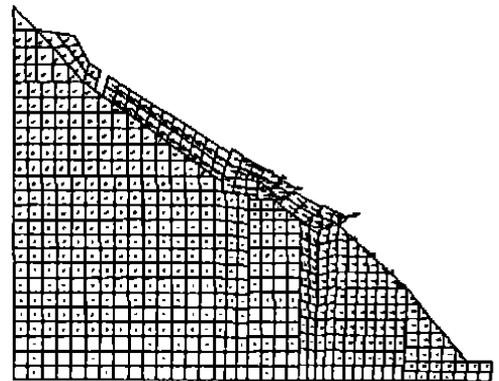


图 4 降低材料参数后的 DDA 位移图(时步为 800 步)

Fig. 4 Displacements for DDA analyses (step= 800) (with material parameters reduced)

2.3 离散元计算结果

取与上述 DDA 第一次计算中相同的岩石材料和参数,用离散元法进行了计算^[2],当循环迭代次数达 100 000 次时趋于稳定,其块体最大位移值为 $3.92\ \text{m}$,最大应力值为 $12.5\ \text{MPa}$ 。其网格划分和岩体位移矢量如图 6,图 7。

比较 DDA 与离散元方法的计算结果可知,两者

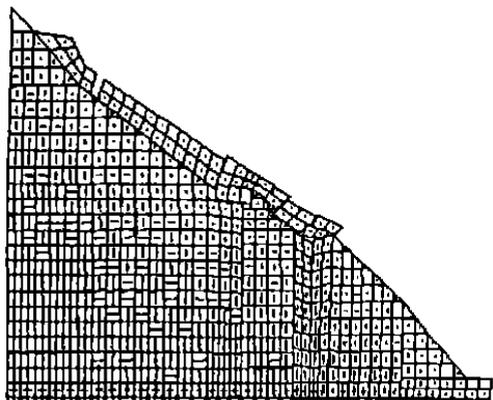


图 5 降低材料参数后的 DDA 主应力图 (时步 800 步)
Fig. 5 Principal stresses from DDA analyses (step= 800)
(with material parameters reduced)

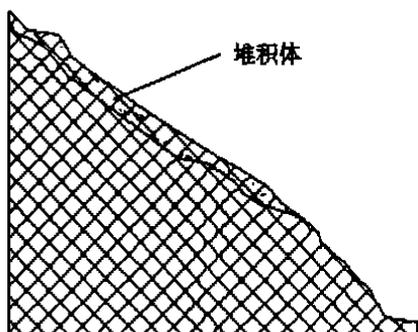


图 6 离散元网格
Fig. 6 Meshes for DEM calculations

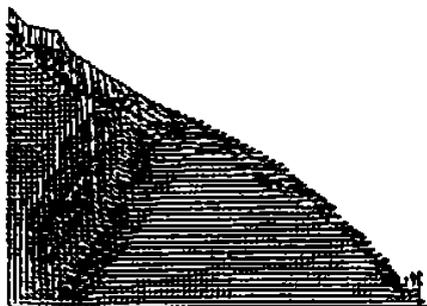


图 7 离散元位移矢量
Fig. 7 Displacement vector of DEM calculations

在定性上的趋势是一致的,定量上 DDA 的计算结果较离散元大一些,但也接近。

上述结果与这两种类似算法原理相一致。离散元法取的是一个离散体系统,变形是完全不连续的。DDA 取的是一个块体系统,块体之间在满足无侵入和无拉伸的条件下,其变形也是完全不连续的,而且相互之间允许产生较大的滑移或张开等变形。

当然,DDA 与离散元算法也有各自的优缺点,对于不同的工程实际情况,可以采用不同的算法,也可综合运用进行对比。本例计算说明,DDA 可以应用于工程计算中并能取得较好的效果。

3 地下开挖引起的地表变形研究

湖北金山店铁矿地下开采引起地表变形的影响分析,对地表建筑物的保护十分重要。在该地区已进行了大规模的地质调查和计算分析研究工作。为了验证 DDA 方法的可应用性,故也应用 DDA 方法对其进行了计算分析。

3.1 工程条件

该矿区地质剖面主要是由上盘和下盘岩层组成,中间夹着矿床。上、下盘岩体的材料参数取为: $d = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E = 20 \text{ GPa}$, $\nu = 0.25$, $c = 2.0 \text{ MPa}$, $h = 50^\circ$ 。夹层岩体取: $d = 2.6 \text{ t/m}^3$, $E = 5 \text{ GPa}$, $\nu = 0.30$, $c = 1.0 \text{ MPa}$, $h = 45^\circ$ 。断层材料参数取为: $h = 26^\circ$, $c = 0.18 \text{ MPa}$, $f_t = 0.05$ 。开采范围为 $\nabla - 200 \text{ m}$ 以下, $\nabla - 550 \text{ m}$ 以上。计算分析中,主要考虑岩体自重荷载的作用。

3.2 计算结果

图 8 给出了计算的块体划分以及开挖的范围。取计算的时步数为 800,时步系数为 0.005。图 9,图 10,图 11 分别给出了 300 步、550 步和 800 步时块体系统的变形情况。

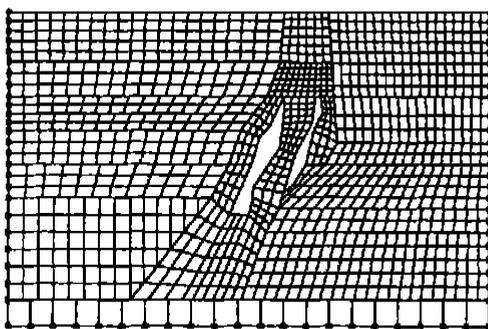


图 8 DDA 块体划分
Fig. 8 Meshes of block system for DDA analyses

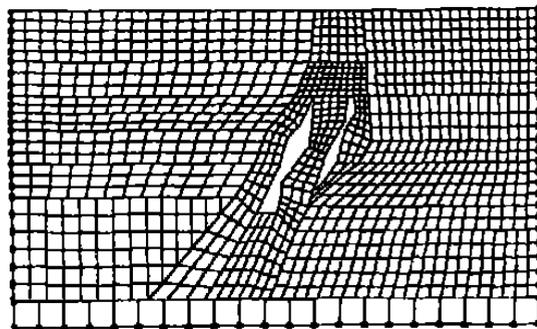


图 9 DDA 位移图 (时步 300 步)
Fig. 9 Displacements from DDA analyses (step= 300)

(下转第 140 页)

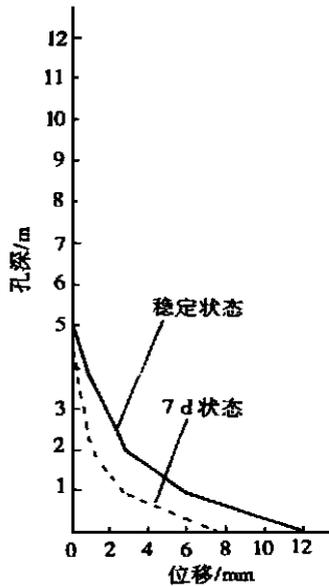


图 5 多点位移量测结果

Fig. 5 The outcomes of multi-point measuring

定时各测点的围岩值,这里设最深测点(12 m)处位移值为零。从图中可以清楚地看出,采用锚索支护后,顶板的变形发生在离巷道周边 5 m 的范围内,而 5 m 以外的围岩基本上不产生变形,说明 5 m 以外的锚索基本上不受力。据此,考虑锚固段的受力特征和安全性,将锚索长度由原来的 10 m 减少到 7.2 m 即可满足要求。

实践证明,这种新的多点位移量测方法不但经济、简便,而且量测精度高、数据可靠、应用范围广,是一种理想的多点位移量测方法。

参 考 文 献

- 1 徐祯祥. 地下工程试验与测试技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984. 19~ 30
- 2 韩瑞庚. 地下工程新奥法 [M]. 北京: 科学出版社, 1987. 65~ 106
- 3 尤春安. 软岩巷道监控量测 [J]. 软岩工程, 1994, (1): 9~ 18

(上接第 125 页)

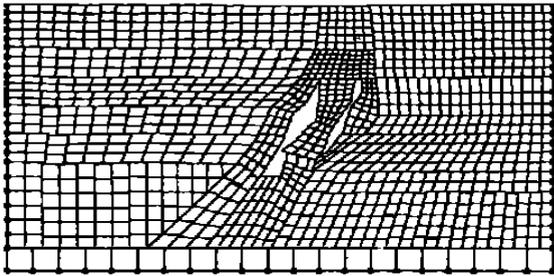


图 10 DDA 位移图(时步 550 步)

Fig. 10 Displacement diagram by DDA (step= 550)

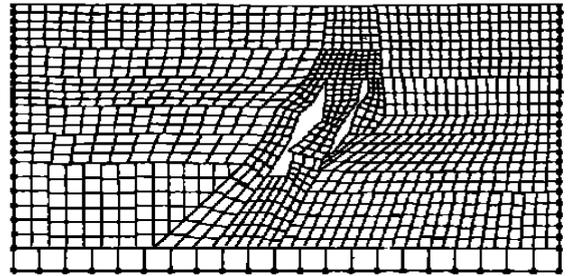


图 11 DDA 位移图(时步 800 步)

Fig. 11 Displacement diagram by DDA (step= 800)

3.3 结果分析

从整个系统的变形趋势可以看出,首先是开挖后两矿体采空区之间的岩体产生滑动,接着上盘和下盘之间的岩体产生滑动和坍塌,进一步的发展导致了开挖区上部岩体的下沉和地面的下沉。地面沉降量为:断裂带靠近上盘处为 13.0 m,靠近下盘处为 11.6 m。其计算结果与其他计算方法(主要指离散元)的趋势亦大体一致。

4 结 语

通过用 DDA 方法对边坡滑动的模拟和地下开挖引起地表变形的计算分析,并与离散元计算结果的对比表明,DDA 计算模型对上述工况的计算是符合实际的,可以作为一种可行的工程分析手段。

计算经验表明时步和时步系数的选取对于计算结果有很大的影响。由于 DDA 计算过程中实现侵入和

拉伸控制的判断,是一个反复的迭代过程,因此,其收敛与否以及判断的实现是一个复杂的过程,需要经验和技巧。一般时步取的越大计算结果越趋于稳定,但客观条件是不允许的。另外,DDA 取的是一个完全不连续的块体系统,模拟实际岩体仍有一定的局限性。若发展一种用连续与不连续分区处理的断续介质分析方法应该更符合岩体实际。

参 考 文 献

- 1 Shi G. H. Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis [M]. Southampton, UK and Boston, USA: Computational Mechanics Publications, 1993.
- 2 张玉军. 小湾坝肩自然条件下堆积体稳定性的平面离散有限元初步分析 [R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998.