

# 非连续变形分析方法的研究及应用现状

唐 瑜, 苏 超

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要** 介绍三维非连续变形分析(DDA)的基本理论及工程研究现状,着重介绍接触模型分析及三维增广拉格朗日子块体接触公式,总结了 DDA 在岩石力学特性分析、岩体变形分析、边坡稳定分析、岩体工程加固、岩体开挖、地壳运动研究、湿砂造型等诸多方面的理论和应用状况及进展,并对其发展方向进行了初探.

**关键词** 数值分析 非连续变形分析 摩擦接触 岩土工程 DDA

**中图分类号** O241 ;TU45

**文献标识码** A

**文章编号** 1006-7647(2004)07-0111-04

非连续变形分析(Discontinuous Deformation Analysis—DDA)方法作为一种新的数值计算方法,与离散元(DEM)方法一起已成为非连续体数值解析方法中的代表.二维 DDA 法已经形成了比较完善的理论体系,以其完备的块体运动学理论及数值实现、严格的平衡假定、正确的能量耗散过程和较高的计算效率,正被诸多领域的研究者所接纳采用,已广泛运用于岩石力学特性分析、岩体变形分析、边坡稳定分析、岩体工程加固、岩体开挖、地壳运动研究、湿砂造型等与岩石或块体结构不连续特性相关的工作中,在研究非连续块体系统位移和变形中发挥着不可估量的作用.

随着实际工程应用要求的不断提高,仅局限于平面应变或平面应力问题的二维 DDA 法,不能完全反映实际变形和特性,国内外一些学者已开始三维 DDA 的研究,并取得了很大的进步.二维有限元提出后不久就成功地推广到了三维,而这对 DDA 法要复杂得多.三维情况下由于块体之间的接触关系十分复杂,突出的问题就是难以建立三维 DDA 的接触理论,因此,三维 DDA 的研究还未完善,还未形成一套完整的可以支配诸多三维块体之间的完整的接触理论<sup>[1~3]</sup>.

本文就三维非连续变形分析方法的一些研究情况和相关理论,以及 DDA 的新应用和新发展状况加以总结.

## 1 基本理论

### 1.1 基本思想

DDA 方法是由石根华博士<sup>[3]</sup>提出的,其目的是

研究非连续块体系统不连续位移和变形.主要分析对象是大小不同、形状任意的弹性块体集合体,以其天然存在的不连续面(如岩体的节理、断层,砂砾之间等)分割集合体,形成形状任意的单个块体单元.块体相互接触可以抽象为角、边、面三者任意组合而成的 6 种形式之一,加入接触力,通过相互接触和位移约束,有机地关联形成块体系统.引进了运动方程,运用最小势能原理把块体之间的接触问题和块体本身的变形问题统一到矩阵中求解.

DDA 方法把静力和动力分析结合在一起,可进行正、反分析.从变形的角度研究块体的稳定性,不仅允许块体自身有位移和变形,而且允许块体间有滑动、转动、张开等运动形式,从而能够计算多块体系统的大位移、大变形,能够较真实地反映实际破坏情况.计算的变形是不连续的,且考虑变形有一时间过程,是动态的<sup>[4~8]</sup>.

### 1.2 位移和变形

通过对单元块体的每一荷载步或时间步的小位移、小变形累计,得到块体系统的大变形和大位移.假设每个块体处处具有常应力、常应变,于是块体中的运动及变形可以由以下 12 个参数所决定:

$$D_i = [u_0, v_0, w_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]^T \quad (1)$$

式中: $D_i$  为第  $i$  块体的位移变量,则块体中任意一点  $(x, y, z)$  的位移可表示为

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = T_i(x, y, z) D_i \quad (2)$$

其中

$$T_i(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (z - z_0) & -(y - y_0) & (x - x_0) & 0 & 0 & \frac{(y - y_0)}{2} & 0 & \frac{(z - z_0)}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -(z - z_0) & 0 & (x - x_0) & 0 & (y - y_0) & 0 & \frac{(x - x_0)}{2} & \frac{(z - z_0)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (y - y_0) & (x - x_0) & 0 & 0 & 0 & (z - z_0) & 0 & \frac{(y - y_0)}{2} & \frac{(x - x_0)}{2} \end{bmatrix}$$

$(x_0, y_0, z_0)$ 为质心.  $T_i(x, y, z)$ 是块体变形的全一阶近似式,可反映块体平动、转动、只有正应变或剪应变等复杂应力状态下的位移情况.

### 1.3 总体平衡方程

通过块体之间的相互约束以及位移和应力约束,把若干个单个块体有机地组成一个块体系统,依据位移和变形变量之间的关系以及块体系统的势能最小原理,设有  $N$  个块体,推得平衡方程为

$$\begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于每个块体有 12 个自由度,所以  $K_{ij}$  是  $12 \times 12$  阶子矩阵.  $D_i$  和  $F_i$  均为  $12 \times 1$  阶子矩阵,  $F_i$  则是使块体发生刚体运动和产生变形的荷载.  $K_{ii}$  完全取决于  $i$  块体的材料特性和几何尺寸,而  $K_{ij}$  则由块体  $i$  和块体  $j$  的接触条件所决定. 块体  $i$  和  $j$  不接触时  $K_{ij} = 0$ ,反之  $K_{ij} \neq 0$  (与两块体的几何形状、材料特性有关).

由常应变位移模式,根据变分原理,总体平衡方程可以通过对应力及外力(包括惯性力和阻尼力)作用下的总势能  $\Pi_p$  求导(即总势能最小)得出:

$$K_{ij} = \frac{\partial^2 \Pi_p}{\partial d_{ri} \partial d_{sj}} \quad r, s = 1, 2, \dots, 12 \quad (4)$$

$$F_i = - \left. \frac{\partial \Pi_p}{\partial d_{ri}} \right|_{D_i=0} \quad r = 1, 2, \dots, 12 \quad (5)$$

### 1.4 接触模型

三维接触情况较二维情况要复杂得多,从二维推广到三维的难点在于接触进入理论的建立,这个理论必须预先提供最先进入面的判定和接触界面满足无侵入以及无拉伸的约束条件的解决方法. 石根华提出了最先进入线理论,运用罚函数方法成功地解决了二维 DDA 的接触问题. 三维情况由于相邻子系统(子块体)之间相互作用力的作用点、作用方向和大小都未知,相对位移满足的约束条件也是变化的,目前尚未发展成熟. 所有的接触类型有:凸角与凸角接触,凸角与凹角接触,角与边接触,角与角接触,边与边接触,边与角接触,面与面接触等,只要能够准确地找出最先进入面,便可以将它们都转化为角与面接触<sup>[7-9]</sup>. 以块体之间天然的不连续面为解除界面,接触面满足无拉伸和无嵌入的接触条件,满

足 Mohr-Coulomb 准则,在接触点处假想施加刚度很大的法向和切向刚硬弹簧. 如图 1 所示.

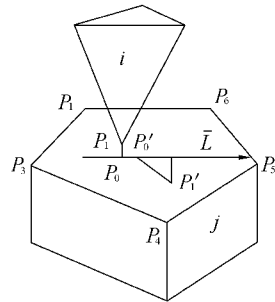


图 1 块体接触模型

解决摩擦接触问题常用重复试错法、惩罚法、拉格朗日乘数法、数学规划法等数值分析方法. 文献[7,9]分别运用罚函数法和矢量法推导了摩擦接触问题和角-面接触模型的计算方法. 文献[17]将柔性弹簧引入 DDA,柔性弹簧和刚性弹簧共同作用. 文献[18]采用增广拉格朗日法与 3 参数 Mohr-Coulomb 准则推导了二维接触子矩阵公式. 这里给出了三维增广拉格朗日法模拟子块体接触的公式.

用补偿值模拟接触弹簧刚度,用拉格朗日乘子模拟接触力. 设块体中任意两相邻的块体  $i$  和  $j$ ,接触点为  $P_1$  和  $P_2$ . 对点  $P_1$ ,其水平、垂直、轴向的位移分别为  $u, v, w$ ,在  $x, y, z$  三方向分别引入拉格朗日乘子  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  以及一个补偿值  $M$ ,则第  $k$  次迭代时子块体接触力引起的应变能为

$$\Pi_f = \Pi_{f\lambda} + \Pi_{fm} \quad (6)$$

其中,  $\Pi_{f\lambda}$  为迭代拉格朗日乘子引起的应变能,

$$\Pi_{f\lambda} = [\lambda_{xk} \quad \lambda_{yk} \quad \lambda_{zk}] \begin{bmatrix} x_i + u_i - x_j - u_j \\ y_i + v_i - y_j - v_j \\ z_i + w_i - z_j - w_j \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\Pi_{fm}$  为补偿约束引起的应变能:

$$\Pi_{fm} = \frac{M}{2} [(x_i + u_i - x_j - u_j)(y_i + v_i - y_j - v_j) \cdot (z_i + w_i - z_j - w_j)] \begin{bmatrix} x_i + u_i - x_j - u_j \\ y_i + v_i - y_j - v_j \\ z_i + w_i - z_j - w_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 2 应用现状

DDA 法与离散元法 (DEM) 及刚体-弹簧法 (RBSM) 并称为分析、研究块体系统运动和变形的三

大方法,应用范围相当广泛。

a. 在岩土工程方面.岩体(天然岩体、重塑岩体等)内部存在节理、裂隙、断层、软弱接触带、剪切带等各种不连续面,是典型的非连续体,正是这些各向异性的裂隙结构面间发生滑动、开裂等而引起主要变形,岩体本身的变形很小.与将岩体的非连续介质等效为连续介质处理的传统有限元方法不同,DDA法形成的计算网格与岩体的物理网络一致,每个计算网格覆盖一块被裂隙切割的块体,各块体相互独立,计算上是不连续的.块体之间在力学上的连续性取决于裂隙的变形条件:当裂隙滑动(剪切破坏)或开裂(拉力破坏)时为不连续;当裂隙不错位及闭合时为连续.因此,DDA法可以反映岩体的连续或不连续的具体部位,可计算破坏前的小位移和破坏后的大位移,对滑动、崩塌、爆炸及贯入等问题十分有效,特别适用于极限状态设计计算<sup>[10,15,19~27]</sup>.

岩石开挖中,文献<sup>[19~23]</sup>运用DDA法分别就采动岩体结构中的‘三铰拱’结构模式和邻近开挖爆破所产生的震动对竖井稳定影响问题进行了模拟;文献<sup>[24]</sup>将DDA法应用到地下工程中,定量研究了非连续围岩体位移影响因素的变化规律.

文献<sup>[26,27]</sup>用DDA法将温度变化转化为等效初应力来求解节理岩体热应力问题,是对DDA理论体系的补充,增强了DDA方法解决实际问题的能力.

b. 在边坡稳定分析、拱坝坝肩(基)抗震稳定分析、有缝重力坝、面板堆石坝的坝基稳定研究等方面,文献<sup>[28~31]</sup>对DDA的边界约束进行了推广,并应用到节理岩质边坡变形规律的数值模拟中,得到了模型试验的良好验证.文献<sup>[32]</sup>利用DDA和DEM方法研究了三峡永久船闸高边坡长期变形和稳定.文献<sup>[33]</sup>鉴于面板堆石坝中堆石颗粒之间以及堆石体与面板之间的位移不连续,用DDA法,从模型试验与数值分析两个方面探讨了面板坝的动力破坏过程及其破坏形态.文献<sup>[34]</sup>建立了适合于有缝结构的离散多体系统的非连续变形计算力学模型,并应用于有缝重力坝的静态应力与变形分析中,为判断坝体缝隙的工作状态与界面应力提供了可能的途径.文献<sup>[35]</sup>应用DDA和FEM耦合方法研究了碾压混凝土重力坝的动力反应.文献<sup>[36,37]</sup>扩展了DDA对于水压力、扬压力等荷载矩阵以及抗滑稳定局部、整体安全系数的求解方法,为重力坝抗滑稳定安全分析提供了一种能同时得到局部安全系数分布和整体安全系数的新方法.

c. 在大坝变形监测系统技术方面,利用DDA法以及陈光齐改进的TDDA(Tool of DDA)法,可以计算模型中具有多条断裂的情况,不断调整模型中断

裂设置和受力状态,能展示所探测的模型受力状况,对于坝况安全性研究是很大的进步<sup>[38]</sup>.

d. 文献<sup>[39]</sup>运用DDA法研究裂隙渗流对岩体边坡的稳定产生的影响问题.考虑裂隙水的流动及渗流压力和岩石变形的耦合作用,推导了考虑裂隙情况下岩石系统的瞬时平衡方程及对任意裂隙进行安全评价的局部安全系数,可对岩体整体及每一条裂隙进行稳定安全性评价,从而找出威胁岩石边坡稳定的最危险部位.

e. 随着地球动力学的发展,在研究地壳块体运动规律时需对全球观测数据进行统一的力学解释,此时研究区域内部因不同板块间边界动力作用而形成了一系列断裂带,是不连续的,利用DDA法对GPS解算的位移进行分析,可以得出块体变形的总体轮廓、主应变率、最大剪应变率、块体绕各自重心的旋转量、平移量,块体之间的相对运动等信息<sup>[40~45]</sup>.文献<sup>[40]</sup>提出了基于DDA理论利用地壳变形推测资料解算块体运动及其应力场的‘位移荷载法’,文献<sup>[43]</sup>用DDA法模拟了伽师强震群前后该地区地壳运动和应力应变的变化过程,得到了良好的结果.

f. 在其他领域的应用.松散砂模型材料不连续、材料非线性 and 几何非线性并存,砂粒之间不连续却又相互接触,是典型的离散问题.文献<sup>[46]</sup>率先应用DDA法实现了有限元法所不能做到的有色分格试验中湿砂的实际运动模式模拟,很好地解决了湿砂造型空气冲击紧实过程的数值模拟问题.

有限元和边界单元法不能充分模拟冰的脆性破坏、压碎以及冰碎块的大位移和冰碎块之间的相互作用,文献<sup>[47]</sup>首次尝试运用DDA法模拟海冰与结构的动力相互作用过程,结果喜人.

针对建筑物爆破设计中失稳和倒塌范围,文献<sup>[48~50]</sup>将失稳后的结构看作由不连续块体组成的块体系统,利用DDA法进行建筑物(混凝土结构、钢结构、框架结构等)拆除爆破和台阶爆破的数值模拟.

g. 对于三维DDA,文献<sup>[4~13]</sup>进行了专门的研究,但由于理论不成熟,实际应用还较少.文献<sup>[8]</sup>对三维的锚杆模拟建立了简化计算模型,并给出了相应的算法和公式.文献<sup>[13]</sup>另辟捷径,以二维DDA法为基础,用改进的平面模型和等效应力方法考虑空间影响,建立了两种以平面模型解空间问题的计算方法.

### 3 DDA方法的发展和应用前景

#### 3.1 在理论研究方面

对于三维接触模型问题,现在还没有形成完整

的、成熟的理论体系,各种接触类型的简化和分析还处在开始研究阶段,对于空间的最先进入面确定的研究,尚未形成规范的理论.这方面的进展将大大推进 DDA 法的应用效率和拓宽其应用空间.

适用于三维块体不连续问题的 DDA 算法的集成应用程序的开发,使其能够方便地与其他分析软件连接,达到综合评价的目的,使其应用领域进一步拓宽.

DDA 模型将岩体完全离散化,而岩体实际上包括岩石和结构面在内的复杂结构体,将 DDA 模型与连续介质力学数值模型结合起来,应该是 DDA 模型工程应用研究的一个重要的发展方向.

### 3.2 在工程方面的进一步推广应用

a. 泥石流是高浓度低切变率两相流运动,从其运动槽子试验中可发现,诸多情况下颗粒之间是相互紧挨着挤压滑动并逐步向前推移,颗粒浓度越高,越接近床面,这种情况越明显.因此,不能只考虑颗粒碰撞作用,还必须考虑接触挤压、摩擦滑动的作用,并且每个颗粒的滑动方向、滑动速度、颗粒接触面间压力和阻力都随时间而变化<sup>[51,52]</sup>.对此复杂的相互接触问题,一般的有限元法或离散单元法不能得到切合实际的计算结果,鉴于 DDA 法的优点,笔者认为可尝试应用 DDA 法研究泥石流运动.

b. 在裂隙岩溶地区中,用 DDA 法求解岩溶管道-裂隙-孔隙的三重介质模型,更好地解决裂隙渗流问题.

c. 与 GPS 数据共同为研究地壳运动,震前和震后块体应力变化情况,以及地震预报等方面的工作提供有力的手段和依据.

d. 对于拱坝坝肩抗震稳定分析的研究,尤其是高拱坝的坝肩稳定问题,运用 DDA 法文章很少,是否可以尝试在拱坝的形体优化和拓扑布局优化中运用 DDA 法,充分考虑介质的不连续性,从而得到更合理的优化结果.

### 参考文献:

- [1] Shi G H. Discontinuous deformation analysis—a new numerical model for the statics and dynamics of Block system[D]. Berkeley: Dept of Civil Engineering, University of California, 1988.
- [2] Shi G H. Block system modeling by discontinuous deformation analysis [M]. London: Computational Mechanics Publication, 1993.
- [3] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析 [M]. 裴觉民译. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [4] 刘君, 孔宪京. 三维连续与非连续变形分析 [J]. 力学学报, 2002, 34(6): 941 ~ 948.
- [5] 王如路, 陈乃明, 刘宝琛. 三维块体不连续变形分析理论

- 简析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 219 ~ 224.
- [6] 姜清辉. 三维非连续变形分析方法的研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.
- [7] 姜清辉, 丰定祥. 三维非连续变形分析方法中角-面接触模型的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 930 ~ 935.
- [8] 姜清辉, 丰定祥. 三维非连续变形分析方法中的锚杆模拟 [J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 176 ~ 178.
- [9] 姜清辉, 杨文柱, 吴益民, 等. 三维非连续变形分析方法中摩擦接触问题的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊): 2418 ~ 2421.
- [10] 吴建宏, 大西有三, 石根华, 等. 三维非连续变形分析 (3D DDA) 理论及其在岩石边坡稳定数值仿真中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 937 ~ 942.
- [11] Q H Jiang, M R Yeung. A model of point-to-face contact for three-dimensional discontinuous deformation analysis [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003.
- [12] 姜清辉, 杨文柱, 丰定祥. 三维块体系统非连续变形正分析模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1765 ~ 1769.
- [13] 王书法, 朱维申. 考虑空间影响的两种非连续变形分析方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 369 ~ 372.
- [14] Zhang Yonghui, Chang yungming. The extension and application of DDA method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 109 ~ 111.
- [15] 郭爱清, 任放, 董学成. DDA 数值模型及其在岩土工程中的初步应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 411 ~ 417.
- [16] 裴觉民, 吕祖珩. 裂隙岩体非连续变形的静力和动力分析方法 [J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 46 ~ 53.
- [17] 张旭, 于建华. 柔性弹簧与刚性弹簧在 DDA 方法中的应用 [J]. 四川联合大学学报 (工程科学版), 1999, 3(30): 122 ~ 128.
- [18] 吴洪词. 用改进的 DDA 法模拟岩体的破裂 [J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊): 556 ~ 558.
- [19] 吴洪词, 张小彬, 包太, 等. 挖动岩体联锁咬合岩块结构及其表现形式再研究 [J]. 贵州工业大学学报 (自然科学版), 2001, 30(3): 25 ~ 32.
- [20] 吴洪词, 穆君, 陈友源, 等. 咬合岩块结构模型及其算法 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1997, 3(4): 10 ~ 12.
- [21] Kim Yongil, Amadei B, Pan E. Modeling the effect of water, excavation sequence and rock reinforcement with discontinuous deformation analysis [J]. Int J of Rock Mech & Min Sci, 1999, 36(7): 949 ~ 970.
- [22] 吴洪词, 张小彬, 包太, 等. 采动覆岩活动规律的非连续变形分析动态模拟 [J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 486 ~ 492.
- [23] 刘刚, 舒大强, 姜清辉. 应用 DDA 方法分析竖井爆振稳定问题 [J]. 爆破, 2003, 20(4): 38 ~ 44.
- [24] Jing Hong wen, Xu Guoan, Ma Shizhi. Numerical analysis on displacement law of discontinuous rock Mass in broken rock zone for deep roadways [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 11(2): 132 ~ 137.

- [12] 逢勇,李学灵.珠江三角洲河网入伶仃洋污染物通量计算研究[J].水利学报,2001(9):40~44.
- [13] 李义天,赵明登,曹志芳.河道平面二维水沙数学模型[J].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [14] 董文军,姜亨余,喻文唤.一维水流方程中曼宁糙率的参数辨识[J].天津大学学报,2001,34(2):201~204.
- [15] 韩龙喜,金忠青.三角联解法水力水质模型的糙率反演及面污染源计算[J].水利学报,1998(7):30~34.
- [16] 姜志群,王佩兰.河道洪水演进有限差分模型糙率系数的率定[J].水文,1996(6):56~58.
- [17] 许光详.汉道糙率计算中非封闭问题的处理方法[J].成都科技大学学报,1995(2):39~42.
- [18] 陈阿贵.受洪涨落率影响的河段糙率推求方法的探讨[J].水利科技,1997(2):3~6.
- [19] 欧素英,杨清书.珠江三角洲网河区径流潮流相互作用分析[J].海洋学报,2004,26(1):125~130.
- [20] 陈晓宏,陈永勤,赖国友.珠江口悬浮泥沙迁移数值模拟[J].海洋学报,2003,25(2):120~127.
- [21] 管卫兵,王丽娅,许东峰.珠江河口氮和磷循环及溶解氧的数值模拟[J].海洋学报,2003,25(1):53~68.
- [22] 诸裕良,严以新,李瑞杰,等.河网海湾水动力联网数学模型[J].水科学进展,2003,14(2):131~135.

(收稿日期 2004-03-04 编辑 熊水斌)

## (上接第 114 页)

- [25] Koo C Y,Chern J C.Modification of the DDA method for rigid block problems[J].Int J of Rock Mech & Min Sci,1998,35(6):683~693.
- [26] 王书法,朱维申,郑少河.节理岩体热应力问题的非连续变形分析方法[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):643~646.
- [27] 张勇慧.关于 DDA 中推导热应力问题公式的讨论[J].岩石力学与工程学报,2001,20(2):277~278.
- [28] 栾茂田,黎勇,杨庆.非连续变形计算力学模型基本原理及在边坡岩体稳定性分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):289~294.
- [29] 王书法,李树忱,李术才,等.节理岩质边坡变形的 DDA 模拟[J].岩土力学,2002,23(3):352~354.
- [30] 张国新,李广信,郭瑞平.不连续变形分析与土的应力应变关系[J].清华大学学报(自然科学版),2000,40(8):102~105.
- [31] 马钺,方祖烈,宫伟力.节理岩体大位移大变形动态分析理论及应用[J].有色金属,2000,52(2):11~14.
- [32] 孙钧.三峡永久船闸高边坡岩体长期变形与稳定研究[J].中国三峡建设,2002(8):4~7.
- [33] 孔宪京,刘君,韩国城.面板堆石坝模型动力破坏试验与数值仿真分析[J].岩土工程学报,2003,25(1):26~30.
- [34] 栾茂田,黎勇,林皋.非连续变形计算力学模型及其在有缝重力坝静力分析中的应用[J].水利学报,2001(4):40~46.
- [35] 刘君,陈健云,孔宪京,等.基于 DDA 和 FEM 耦合方法的碾压混凝土坝抗震安全性分析[J].大连理工大学学报,2003,43(6):793~798.
- [36] 张伯艳,陈厚群.用有限元和刚体极限平衡方法分析坝肩抗震稳定[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):665~670.
- [37] 张国新,金峰.重力坝抗滑稳定分析中 DDA 与有限元方法的比较[J].水力发电学报,2004,23(1):10~14.
- [38] 刘智敏,林文介.大坝变形监测自动化技术的最新发展[J].桂林工学院学报,2000,20(1):89~94.
- [39] 张国新,武晓峰.裂隙渗流对岩石边坡稳定的影响——渗流、变形耦合作用的 DDA 法[J].岩石力学与工程学报,2003,22(8):1269~1275.
- [40] 陈兵,江在森,王双绪,等.利用非连续变形数值方法研究块体运动及其应力场初探[J].地壳变形及地震,2000,20(1):38~42.
- [41] 王辉,张国民,吴云,等.中国大陆活动地块变形与地震活动的关系[J].中国地震,2003,19(3):243~254.
- [42] 敬少群,吴云,殷志山.中国大陆及其周边块体的现时运动、变形及其动力学解释[J].地壳形变与地震,2001,21(4):8~16.
- [43] 秦小军,周硕愚,赵齐乐,等.依据 GPS 数据研究伽师及帕米尔东北侧 1994~1998 年地壳水平运动及其与强震群的关系[J].地壳形变与地震,2001,21(4):1~7.
- [44] 吴云,申重阳,乔学军,等.现今地壳运动与地震前兆研究[J].大地测量与地球动力学,2002,22(1):22~28.
- [45] Yongen Cai,Tao He,Ren Wang.Numerical simulation of dynamic process of the tangshan earthquake by a new methed—LDDA[J].Pure Appl Geophys,2000,157:2083~2104.
- [46] 姚振汉,张锐.采用非连续变形分析对空气冲击湿砂造型过程的数值模拟[J].工程力学,2002,19(5):24~28.
- [47] Zhang Yunliang,Lin Gao,Li Zhijun,et al.Application of DDA approach to simulation of ice breaking process and evaluation of ice force acting on a structure[J].China Ocean Engineering,2002(16):273~282.
- [48] 王建宙,于亚伦,唐春海.拆除爆破研究中数值分析方法的比较与选择[J].工程爆破,2002,8(1):8~11.
- [49] 胡文军,卢艳华.钢结构建筑爆破拆除计算机模拟初步研究[J].工程爆破,2002,8(4):11~15.
- [50] 朱传云,戴晨,姜清辉.DDA 方法在台阶爆破仿真模拟中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(增 2):2461~2464.
- [51] 沈寿长.泥石流流应力本构关系[J].水利学报,1998(12):16~22.
- [52] 罗元华.泥石流堆积运动特征分析[J].地球科学——中国地质大学学报,2003,28(5):533~536.

(收稿日期 2004-06-20 编辑 高建群)