

离散单元法及其在区域构造 稳定性研究中的应用^{*}

尚岳全 王士天 陈海文

(中国成都 610059 成都地质学院工程地质研究所)

摘要

首先扼要地介绍了 70 年代初才提出的离散单元法的基本原理. 根据离散单元法可求解不连续变形的特点, 笔者将其应用于区域构造稳定性研究中, 分析构造应力场作用下断层的活动性特征及断块的运动方式. 应用结果表明, 离散单元法在区域构造稳定性研究中是有广阔前景的, 特别是该方法可以揭示断块的转动特征, 为解释局部应力集中和地震发生机制提供了新的分析方法.

关键词 离散单元法; 安宁河断裂带; 断块运动; 构造稳定

一、离散单元法的基本原理

离散单元法(Discrete element method)是美国明尼苏达大学土木及采矿工程系 Cundall(1971)提出的, 用它来模拟岩土块体受力的渐进性破坏过程. 这一数值方法的基本特征在于允许各离散块体发生平动、转动、甚至相互分离, 弥补了有限单元法或边界单元法对介质连续和小变形的限制. 因此, 特别适合块裂介质的不连续变形及破坏问题分析.

离散单元法视介质体系为符合牛顿运动力学理论的振动系统, 它的基本假定包括: (1) 介质由一系列多边形块体组合而成, 且各块体是准刚性的(忽略块体本身变形, 但允许块体间的迭合); (2) 块体与块体之间作用力由相互的迭合和错位产生, 体系的变形通过块体间的迭合、滑动或分离来实现, 块体之间的接触归纳为角和边或边和边两种模式(图 1); (3) 块体间的相互作用可用图 2 所示的力学模型表达. 接触点在某一时间段(ΔT)所产生的法向力(ΔF_n)和切向力(ΔF_t)

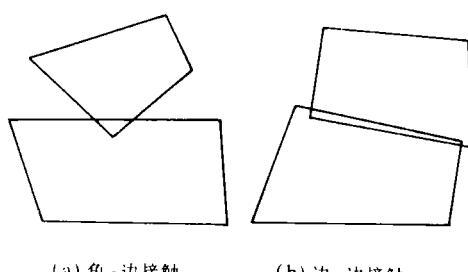


图1 块体间的接触关系

* 国家自然科学基金资助项目.

1991 年 1 月 10 日收到本文初稿, 1991 年 8 月 9 日决定采用.

增量分别由法向和切向刚度系数 K_n, K_s 及法向和切向相对位移量 $\Delta U_n, \Delta U_s$ 来表征, 其本构关系为

$$\Delta F_n = K_n \Delta U_n$$

$$\Delta F_s = K_s \Delta U_s$$

当块体间有拉应力时, 就认为块体之间发生分离, 解除接触点的切向和法向力; (4) 块体运动的动能由阻尼元件 C_n 和 C_s 吸收.

根据上述假设, 用牛顿第二定律即可得出块体在 x 方向和 y 方向的平动及绕 z 轴转动(绕重心旋转角 θ)的运动方程

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_x, m \alpha \frac{dx}{dt}$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = F_y, m \alpha \frac{dy}{dt}$$

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = m - I \alpha \frac{d\theta}{dt}$$

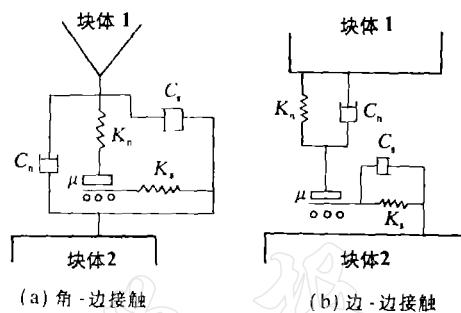


图 2 块体接触的力学模型

其中, m 和 I 为块体的质量和转动惯量, α 为阻尼系数.

离散单元法的解题思想是动态松弛法, 该方法的实质就是对临界阻尼振动方程进行逐步积分, 通过采用刚度阻尼和质量阻尼吸收系统的动能, 使振动系统函数收敛于静态值. 这种带有阻尼的动态平衡方程, 可用有限差分法方便地求解.

二、应用实例

目前, 离散单元法已在斜坡岩体破坏过程、地下采掘出体稳定性影响和洞室围岩的变形破坏过程等方面得到成功的应用(剑万禧, 1978; 王泳嘉, 1990). 本文则试图通过安宁河地区区域构造稳定性的分析, 对离散单元法在区域构造稳定性模拟应用方面进行探讨.

1. 地质背景和历史地震活动性特征

(1) 断裂构造基本特征 安宁河地区断裂构造格架如图 3 所示. 它有以下特征:

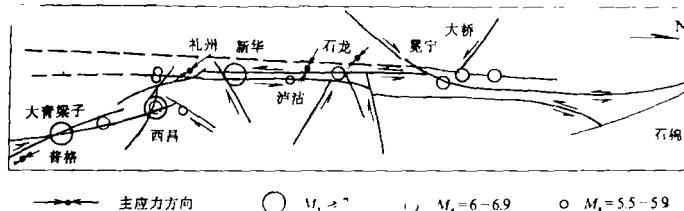


图 3 构造格架及历史地震分布图

1) 南北走向的安宁河断裂带构成本区断裂构造的主体. 它是一条深大断裂带, 北起石棉, 经

冕宁、西昌向南延伸,沿断裂带有多期岩浆侵入和喷发活动,有多处温泉出露。沿断裂带构造地貌反映明显,有一系列的地垒、地堑和串珠状断陷盆地。断裂带的总体走向稳定,且倾角陡;2)呈北东和北西向的次一级断裂,多成对出现,在安宁河断裂带的两边切割出楔形地块,成为本研究区断裂构造的一个显著特征;3)则木河断裂带是一条北北西向的区域性大断裂,与安宁河断裂带在西昌附近交汇。

(2) 断层新活动性 通过现场地质调查并结合地形变测量结果分析,表明安宁河断裂带的活动性有如下特点:

1)第四纪以来安宁河断裂带的活动性可大致分为两期:晚更新世末期以前,表现为强烈的逆冲,其平均逆断错动速率约为 1.5 mm/a ,并控制着早更新世山间湖盆的发育;全新世初期以来,断层活动转变为以左旋走滑为主兼有一定的逆冲成分,其活动强度各段差异较大,见表1。表1中历史平均错动速率是根据断层错开阶地的错距和相应各级阶地的形成时代进行计算所得的结果,现今实测水平错动速率则是根据近十年来断层两盘相对升降运动测量结果(四川省地震局,1986),结合断层的实际错动方式进行换算后得出的(李渝生,1990)。从表1可以看出,泸沽以南历史平均左旋错动速率为 $5.7\text{--}6.0\text{ mm/a}$,泸沽以北为 4.0 mm/a 。其现今错动速率在礼州—松林附近地段最大为 5.3 mm/a ,沿断裂带向北依次降低为:泸沽—石龙段, 3.58 mm/a 、冕宁附近 2.54 mm/a 、石棉附近为 1.4 mm/a 。由此可见,安宁河断裂带的活动性是南段较强而北段较弱。

表1 安宁河与则木河断层错动速率

断层名称	地 点	历史平均水平错动速率(mm/a)	现今实测水平错动速率(mm/a)
安宁河断裂	石棉	4.0	1.4
	冕宁	4.0	2.54
	石龙	4.0	3.58
	松林	5.7—6.0	5.3
则木河断裂	西昌	10.0	0.71
	大青梁子	10.0	4.9

2)北东向断层都为左旋错动,北西向断层都为右旋错动。错动速率明显低于主干断裂。

3)则木河断裂的新活动性是以左旋走滑活动为主。根据地质调查结果分析,全新世以来历史平均错动速率在 10 mm/a 以上。目前活动性最强的大青梁子—养窝段,最大水平错动速率仍然保持在 $3.5\text{--}4.9\text{ mm/a}$ 的水平上。北段在与安宁河断裂相交切的西昌附近,水平错动速率仅有 0.71 mm/a ,在其南北两段顺向斜列部位的拉张区,控制着现代沉积湖盆——邛海的发育。

(3) 历史地震活动及与构造的关系 安宁河地区的历史地震活动与本区的构造有密切的关系,表现在地震活动受构造控制。按地震活动及其与构造的关系,可将研究区从南向北划分为三段:

1)普格—西昌强震活动段。主要受则木河断裂的控制,历史上多次发生7级以上的强震,它们均发生在则木河主干断裂和与其它断裂交汇的部位。

2)西昌—大桥较强地震活动段。主要受安宁河断裂强烈活动的控制,历史上强震及中强震均发生在由次一级北东及北西向断裂所切出的楔形块体尖端强力楔入安宁河断

裂的部位(如图3和表2),且强度由南而北逐渐降低.

表2 安宁河地区历史上6级以上地震统计表

发震时间	震中位置	$\varphi(^{\circ}N)$	$\lambda(^{\circ}E)$	震级
公元前116年	西昌海南公社古城村	27.8	102.3	≥ 6
公元282年	西昌泸山	27.8	102.3	≥ 6
公元814年	西昌	27.9	102.3	6.5
1536年3月19日	西昌北新华	28.2	102.2	7.7
1850年9月12日	西昌	27.9	102.3	7.5
1913年8月19日	冕宁县城北	28.6	102.2	6
1952年9月30日	冕宁石龙	28.4	102.2	6.7

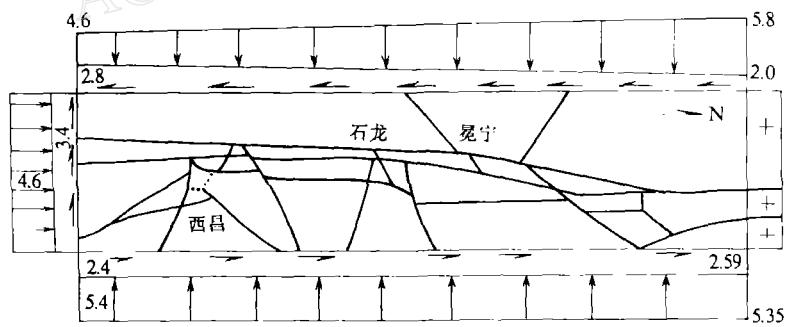
3) 大桥-石棉弱震频繁活动段.此区段内历史地震的最大强度未超过4.5级.

2. 现今构造地应力场

在西昌以南的普格所作的钻孔应力解除法(套芯法)地应力实测结果表明(董玉善,1985),最大主应力为6.2 MPa,方向为N54.4°W,泸沽附近的断裂带中则测得最大主应力为4.1 MPa,方向为N59.3°W.结合研究区外围的实测结果分析,可知研究区的最大主应力一般为6 MPa.

3. 离散元数值模拟研究

(1) 模型建立 在区域构造稳定性研究中应用离散单元法尚无先例,就如何建立起合理有效的计算模型是一个首先需要解决的问题.一个离散元计算模型的建立,包括确定合理的计算范围、计算区域剖分、有关计算参数及边界条件的确定等(图4).



+ 为固定块体; — 为断层; 为添加块体边界; 边界分布力的单位为 MPa

图4 安宁河断裂带离散元模型(共32个单元)

通过取不同大小的计算范围试算结果表明,过大的计算范围会大量增加计算时间.因此,在作离散元分析时宜使计算范围尽可能限制在所需讨论区域附近.

离散化是把模型分割成一系列分离的块体体系,合理地划分单元块体是十分重要的工作.虽然离散单元法的单元划分允许块体为任意多边形,但由于地质问题的复杂性,只取断层作为块体的划分边界往往无法实现介质的合理单元剖分.此时人为适当添加划分界面是必要的,这种添加不仅需要从地质分析和从力学原理上追求合理性,而且还需要通过多种方案的对比试算分析及与有限元计算结果进行比较才能取得合理的最终计算方案.

边界条件是根据本区应力分布的有限元反演结果确定的(尚岳全, 1990), 由有限元计算所得的边界分布力按等效原则移置到各边界块体的重心上, 与其它数值计算方法相同, 离散单元法计算也需要有约束单元. 约束意味着块体在受荷过程中保持静止, 因此, 约束单元一般应当选取在研究意义不大且相对不发生较大位移的块体上.

任何数值分析方法均需要输入合理的力学参数, 离散单元法也不例外. 对于多边形刚性块体体系的离散元分析, 输入的力学参数有: 角-边接触法向刚度系数和切向刚度系数及接触摩擦系数, 边-边接触法向刚度、切向刚度、摩擦系数和粘聚力. 在岩体稳定性分析中, 这些参数可通过岩体力学试验确定. 但在区域稳定性分析中, 目前还无可行的确定上述力学参数的有效方法. 因此, 我们取表 3 所示的经验值进行模拟计算. 从另一个方面讲, 模拟研究在很大程度上是一种基于半定量的机制分析, 所以, 只要参数取值反映了实际地质条件的差异, 也就基本能满足机制模拟的要求.

表 3 计算参数选取表

角-边接触			边-边接触			
法向刚度系数	切向刚度系数	接触摩擦系数	法向刚度系数	切向刚度系数	摩擦系数	内聚力
60000	5000	0.45	600000	50000	0.3	0.025

注: 角-边接触刚度系数的单位为 MN/m , 边-边接触的刚度系数的单位为 MPa/m , 内聚力的单位为 MPa

(2) 计算结果分析 离散元计算是用一定时间步长迭代控制的一系列位移增量来计算块体的运动. 如图 5 所示的就是 600 个时间步长迭代的计算结果, 它直观地揭示了安宁河断裂带在平面上的活动性具有以下明显特点:

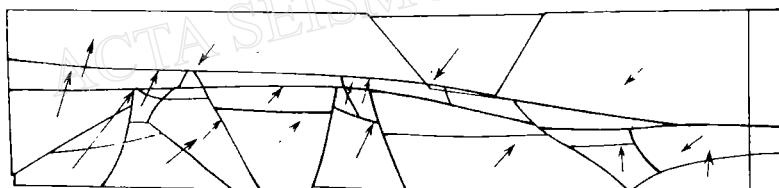


图 5 块体平面运动特征. 箭头表示箭头起点所在块体形心的移动方向和相对大小

1) 在活动方式上南北方向断裂都呈左旋压扭性. 北西向次一级断裂都表现为反扭, 北东向断裂表现为强烈的压性顺扭, 与实际地质调查结果完全吻合.

2) 北东和北西向次一级断裂活动都与楔形块体的活动有密切的关系, 楔形块体在近东西或北西-南东向的挤压力作用下以复杂的方式向安宁河断裂带挤入, 如冕宁-大桥楔形块体, 由于两侧断裂活动的差异性, 在大桥附近楔形块体尖端强烈压入主干断裂.

3) 由图 5 所表明的块体形心位移方向并非垂直安宁河断裂带及图 6 所显示的不同时刻剪应力集中区随时间变化的特点, 表明楔形块体不是均匀地挤入安宁河断裂带, 而是表现为楔形体端部不同部位与安宁河断裂带的接触关系在不同时刻具不同特点, 即楔形体的楔入过程有转动的趋势.

由于楔形块体的楔入作用, 且这些楔形块体在楔入过程中还伴随着旋转的趋势, 从而导致楔形块体尖端部位的应力分布异常复杂. 正是这种作用控制着安宁河地区中强震的发生和迁移, 复杂分布的不连续剪切应力集中区(图 6)与历史强震区的良好对应性就说明了这一点. 不连续剪切应力的效果是要引起块体间的相互错动. 一个集中区的应变能得

到释放后,它的集中区又在另一个地方出现.因此,在时间序列上,不连续剪切应力集中是一个动态的变化过程.尽管还无法定量地揭示这样一个过程,但我们可以认为,它反映着地震迁移的本质原因.

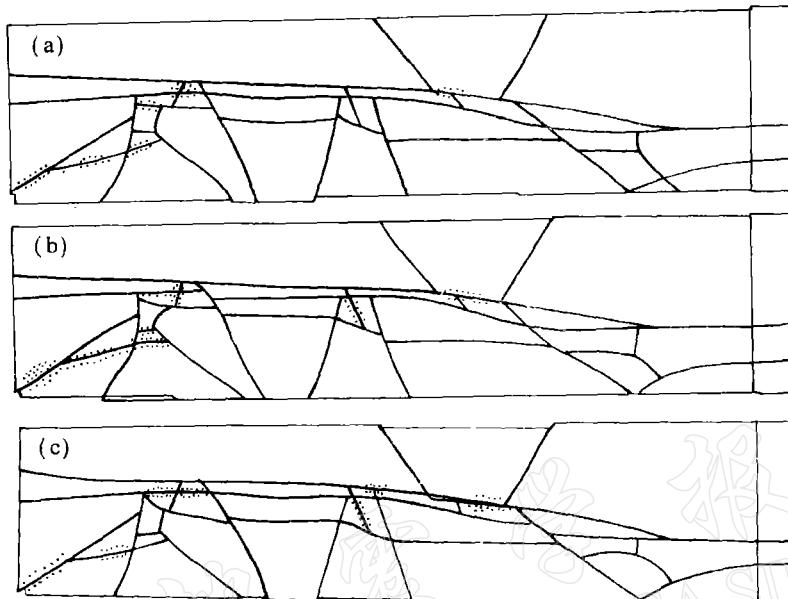


图6 不连续剪切应力分布.黑点区表示剪应力集中部位
(a) 经历 400 个时步迭代; (b) 经历 500 个时步迭代; (c) 经历 600 个时步迭代

三、结语

综上所述的离散单元法分析结果表明:在东西边界的挤压和反扭构造应力场作用下,南北向的安宁河断裂带为压性反扭活动;北东和北西向次一级断裂切出的楔形块体以平动并具转动趋势强力楔入安宁河断裂带内,并在楔形块体楔入的端部产生不同程度的不连续剪切应力集中,控制着地震的发生.所有这些模拟结果均与实际情况达到了很好的拟合.

通过对安宁河断裂带区域构造稳定性问题成功的离散元模拟研究,可以看出,离散单元法作为一种块体力学计算方法,在将其应用于地质问题研究时,尽管存在单元剖分和力学参数选取等方面的困难,使得分析结果基本上还是定性的,但它能有效地解决存在多结构面地质体的非连续变形问题,是一种有前途的数值计算新方法.

本文的实践也说明了离散单元法在地学的许多涉及不连续变形问题的研究领域有着广泛的适用性和应用前景.如板块的运移规律研究、断裂带不同区段的拉张和挤压分布等非连续变形问题的求解,离散单元法可提供有效的求解手段.

参 考 文 献

剑万禧, 1986. 离散单元法的基本原理及其在岩体工程中的应用. 岩石力学与工程学报, 5, 2, 165-172.

- 董玉善, 1985. 鲜水河断裂带及其邻近地区的原地应力测量. 鲜水河断裂带地震学术讨论会论文集, 231—237. 地震出版社, 北京.

尚岳全、王士天、李渝生, 1990. 安宁河断裂带断层新活动性及强震发生机制的有限元模拟. 岩土力学数值方法的工程应用, 299—305. 同济大学出版社, 上海.

四川省地震局(编著), 1985. 攀西地区地震危险性研究, 65—100. 四川科学技术出版社, 成都.

王沫嘉、邢纪波, 1987. 离散元法的基本原理及其应用. 第一届全国计算岩土力学研讨会论文集(一), 124—129. 西南交通大学出版社, 四川峨眉.

王沫嘉, 1990. 离散元法的进展及其在岩土工程中的应用. 岩土力学数值方法的工程应用, 35—45. 同济大学出版社, 上海.

Brady, B. H. G. and Brown, E. T., 1985. *Rock Mechanics for Underground Mining*. London.

Li, Y. S., Shang, Y. Q. and Wang, S. T., 1990. Research on the present activity and seismogenetic model of Anning River Fault in Western part of Sichuan Province. *Proc. 6th International IAEG Congress*, 1655—1662. Amsterdam.

欢迎各界朋友订阅《中国地震》

由国家地震局主办的《中国地震》是综合性学术刊物,内容涉及地震学,地球物理学,地震地质学,地震工程学等有关地学的诸多领域以及地震预测、预报,减轻地震灾害等.刊载我国在上述学科中的最新理论、方法、实验和观测等研究成果.是广大地震科学工作者必备的重要参考文献.欢迎各界朋友订阅《中国地震》.

所有新、老订户请注意：从 1993 年起由本刊编辑部自办发行，欲购者请向编辑部索取订单。

订购发行处:100036 北京复兴路63号《中国地震》编辑部

电话:821.5142

定价:每年4期,每期每册8元,全年总计32元(包括邮资在内)

国家地震局《中国地震》编辑部