

非连续变形分析方法在链子崖危岩体变形预测中的应用

伍 岳¹ 王泽民¹ 徐绍铨¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要: 针对地质灾害中非连续体的变形运动特征与预测防治等问题, 应用非连续变形分析(DDA)方法, 对工程地质灾害的数值模拟与预测进行了系统的研究, 具体分析了链子崖危岩体的地质构造, 并用 DDA 方法进行了危岩体在两个地质剖面的变形模拟和防治模拟, 得出了一系列的形变位移场、应力场变化图。通过防治模拟分析, 证明了已实施的防治工程的有效性。

关键词: 非连续变形分析; 链子崖危岩体; 位移场; 应力场; 数值模拟; 地质灾害

中图法分类号: P227; P258

链子崖危岩体位于长江兵书宝剑峡出口处的南岸, 是被分割出来的斜坡地质体的一部分, 由岩石块体、各种结构面(软夹层、裂缝、断层等)及块体之间的空隙、空区所组成。其结构特点主要受底层岩性、地质构造和外动力因素所制约。斜坡和陡壁体由层状岩类构成, 自下向上(如图 1、2 所示)为: 陡壁之下的斜坡为石炭系上统黄龙组(C2hn)灰岩(煤层底部-岩层底部); 陡壁底部为二叠系下统马鞍山组(P1m)煤层和大规模的挖煤采空区; 陡壁为二叠系下统栖霞组(P1q)灰岩(R001~R401), 其下部为瘤状灰岩间夹薄层炭质页岩(R001~R201), 中上层为厚层灰岩(R201~R203), 顶部为厚层灰岩(R203~R301)和疙瘩状灰岩、夹薄层页岩、泥岩(R301~R401)。灰岩强度较高, 煤层和页岩、泥岩为软弱层。因此, 黄龙组、马鞍山组、栖霞组构成了不同类型的斜坡、陡壁岩体工程地质单元。本文针对链子崖“七千方”、“五万方”危岩体进行变形模拟, 得出了相应的位移场、应力场变化图。

1 链子崖危岩体的变形模拟

针对链子崖的地质情况, 主要选取了具有崩滑特征的“五万方”危岩体区域进行变形分析。为了研究“五万方”危岩体与下伏煤层变形的关系, 选取了如图 1、图 2 所示的两个剖面。在垂向上

考虑了煤层、R001、R201、R203、R301、R401 及 R402 等软层分割作用。由于煤层采空区分布

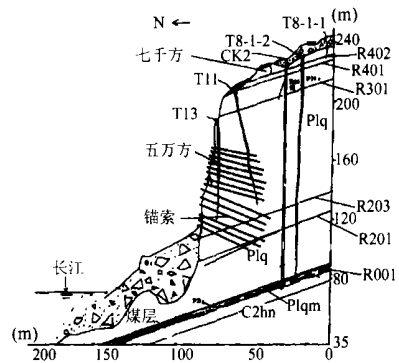


图 1 过钻孔 CK2 的正北(N)方向地质剖面图
Fig. 1 North Geological Section Through CK2

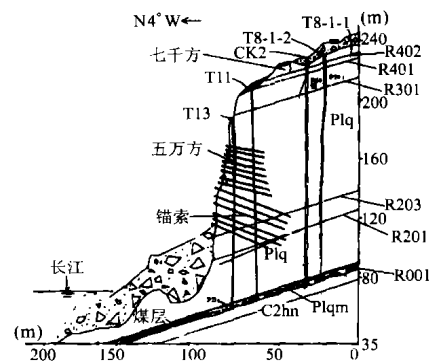


图 2 过钻孔 CK2 的北偏西(N⁴W)方向地质剖面图
Fig. 2 N⁴W Geological Section Through CK2

很难确定, 将之视为一刚性极低的软垫层处理; 纵向上考虑了 T13、T11 和 T8 等裂缝。链子崖危岩体的最基本荷载是自身重力作用, 地下水和地震也是影响危岩体稳定的重要因素。本文着重研究自身重力对危岩体的影响。为了利用 DDA 模型模拟链子崖危岩体的形变位移场及应力场, 首先建立该地区的块体系统, 确定适当的物性参数, 然后以 1978~1995 年对危岩体顶部“七千方”滑坡体的连续变形监测所得的位移作为约束条件进行模拟, 得出位移场及应力场分布图。

1.1 块体划分

进行 DDA 数值分析首先要建立块体系统的初始几何结构, 即依据不连续边界、节理等把研究区域划分成与实际相符的若干个块体。本文主要是根据过钻孔 CK2 的地质剖面图, 将 N 方向及 N4°W 方向的链子崖危岩体剖面按实际裂缝划分为若干个块体, 将山体底部和背部进行固定, 并根据每个块体相应的物性参数来进行 DDA 数值模拟, 如图 3、图 4 所示。

表 1 链子崖危岩体过钻孔 CK2 剖面块体物性参数值

Tab. 1 Physical Parameter of Blocks of the Section Through CK2

| N 方向 | | | | N4°W 方向 | | | |
|------------|--------------|------|---------------------------|-----------------------|--------------|------|---------------------------|
| 块体号 | 杨氏模量 /GPa | 泊松比 | 密度 /kg·m ⁻³ | 块体号 | 杨氏模量 /GPa | 泊松比 | 密度 /kg·m ⁻³ |
| 1、16 | 20 | 0.25 | 2 500 | 1、20 | 20 | 0.25 | 2 500 |
| 2、3、17 | 0.2 | 0.25 | 2 500 | 2、3、21 | 0.2 | 0.25 | 2 500 |
| 4、18、23 | 20 | 0.20 | 2 700 | 4、22、27 | 20 | 0.20 | 2 700 |
| 5、7、8、19 | 20 | 0.20 | 2 700 | 5、7、8、23 | 20 | 0.20 | 2 700 |
| 6、20 | 20 | 0.20 | 2 700 | 6、9、10、24 | 20 | 0.20 | 2 700 |
| 9、11、12、21 | 20 | 0.25 | 2 600 | 11、13、14、 16、25、28 | 20 | 0.25 | 2 600 |
| 10、22 | 0.07 | 0.37 | 2 200 | 12、15、26、 29 | 0.07 | 0.37 | 2 200 |
| 13 | 40 | 0.20 | 2 700 | 17 | 40 | 0.20 | 2 700 |
| 14、15 | 0.07 | 0.40 | 2 000 | 18、19 | 0.07 | 0.40 | 2 000 |

4) 侵入弹簧的刚度系数。为了保证计算结果不受此刚度系数的影响, 取其大小等于 50 倍的块体材料平均杨氏模量。

1.3 变形的 DDA 数值模拟

根据湖北省岩崩滑坡研究所提供的链子崖危岩体“七千方”滑坡体的年平均速度(水平年平均

1.2 参数选取

1) 物性参数(杨氏模量、泊松比及密度)。DDA 模型中每个块体内部都设定为均匀、各向同性的线弹性体。为了既突出地质构造的影响, 又顾及不同的物性结构的影响, 对每个块体设定一组参数。根据资料, 按照各组岩层的性质把研究区域的材料分为 9 种, 各块体的物性参数列于表 1。

2) 侵入判断系数。即判断块体之间是否侵入(进而施加弹簧阻止侵入)的标准, 本文选取在 0.01mm~0.05mm 之间。

3) 摩擦系数。块体之间的摩擦系数分为四类: ① 块体之间有明显裂缝的边界, 摩擦系数取为 1.00; ② 同一岩石由于形状过长或过宽而分成几个不同的块体, 这些块体之间的摩擦系数取为 600; ③ 纵向上的岩层间的软弱层 R401、R402 的摩擦系数取为 0.30; 软弱层 R301 的摩擦系数取为 0.4; R201、R203 的摩擦系数取为 0.50; R001 的摩擦系数取为 0.40; ④ 危岩体脚部与江边第四系松散堆积物之间的摩擦系数取为 0.36。

位移速率为 4.00mm/a, 垂直年平均位移速率为 -2.60mm/a), 将其作为 DDA 模型的约束条件进行模拟, 计算出了这段时间内的位移场和应力场(如图 5、6、7、8 所示)。通过模拟结果计算了“五万方”危岩体在两个剖面的平均水平速率和垂直速率(见表 2)。

表 2 模拟速度结果/(mm·a⁻¹)

Tab. 2 Results of the Simulative Velocity

| N 方向剖面模拟结果 | | N4°W 方向剖面模拟结果 | | 1978~1995 年连续监测值 | | 备注 |
|------------|-------|---------------|-------|------------------|-------|-------|
| 水平速率 | 垂直速率 | 水平速率 | 垂直速率 | 水平速率 | 垂直速率 | |
| 1.49 | -0.75 | 1.38 | -1.04 | 1.50 | -0.70 | “五万方” |

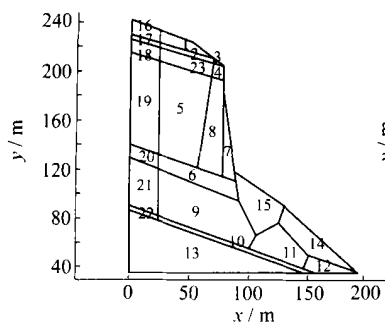


图3 链子崖危岩体N方向块体划分

Fig. 3 Partition of Blocks of the North Section

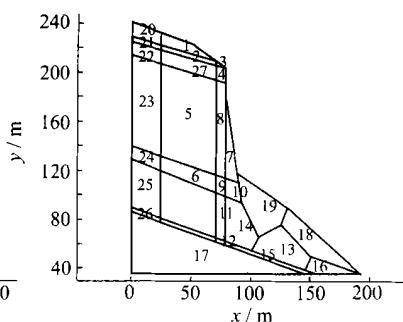


图4 链子崖危岩体N4°W方向块体划分

Fig. 4 Partition of Blocks of the N4°W Section

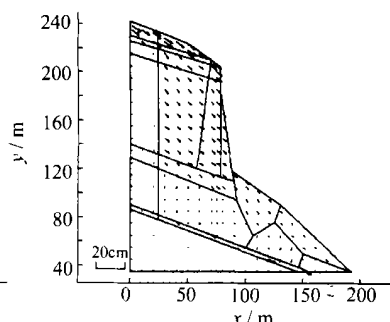


图5 链子崖危岩体N方向位移场

Fig. 5 Distance Field of the North Section

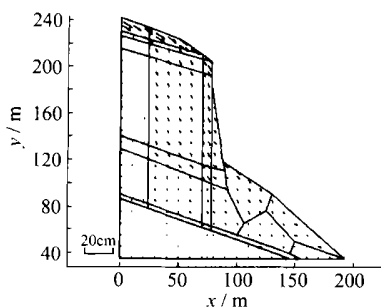


图6 链子崖危岩体N4°W方向位移场

Fig. 6 Distance Field of the N4°W Section

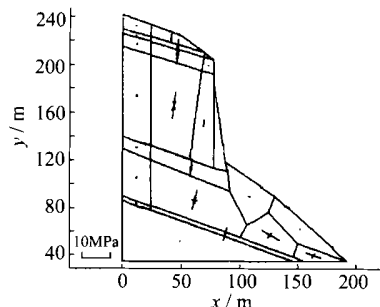


图7 链子崖危岩体N方向应力场

Fig. 7 Stress Field of the North Section

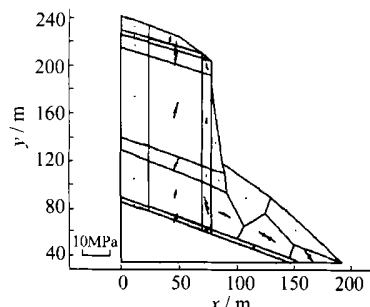


图8 链子崖危岩体N4°W方向应力场

Fig. 8 Stress Field of the N4°W Section

位移场模拟结果显示,危岩体在两个剖面上的北向临江滑移明显;岩体顶部“七千方”滑坡体和岩体陡壁处的“五万方”危岩体稳定性较差,“七千方”滑坡体表现为顺层滑移,“五万方”危岩体表现为崩滑兼具;由于煤层区采空,山体从北方向到北西方向下沉趋势逐渐变大,这与现今危岩体在产生不均匀下沉的同时有NW方向滑移的事实相吻合。通过“五万方”危岩体底部的岩石群应力分布可看出,底部岩石受到上部主体山体明显的滑移挤压作用,说明底部岩石对山体的下滑起到了阻滑作用,但一旦发生因山体下陷或下部岩体应力超过极限而导致下层岩体破裂,或者由于将来三峡库区蓄水而导致裂缝间的摩擦系数变小等情况,将会引发难以预料的后果。因此,针对上述分析结果,必须对山体进行相应的“五万方”危岩体与主体山体的防崩、防滑、下层煤层的防下陷及山体各主要缝隙内的混凝土回灌加固等措施。

2 有效性分析

对危害性最大的临江“五万方”危岩体,针对

其变形破坏的主要因素,采用了如下工程措施:对底部煤层采空区做混凝土承重阻滑工程,防止上部危岩体进一步不均匀沉降变形和滑动;对上覆陡崖危岩体和顺层蠕滑体,进行预应力锚索加固,其中陡崖部位锚固,采用不同量级的锚索,上小下大,上防倾倒,下防滑移;对控制层间滑动的软弱夹层,进行混凝土回填加固。上述工程大部分已完成,效果较好。

2.1 模拟方案

根据链子崖防治工程的具体实施情况,将煤层采空区的物理参数进行改变,使其达到承重阻滑的目的;假设“五万方”危岩体被锚固得很紧,把它们和T8~T11裂缝之间的岩体看作一块岩体加以研究。通过这些条件,考虑危岩体在自重的情况下的变形特征。

2.2 块体划分及模拟

如图9,将危岩体划分为20个块体,为方便模拟,将20个块体分成9种物理材料,对山体在北部和底部进行固定。因为在防治工程中,对各软弱层进行了混凝土回填,在此将各软弱层摩擦系数设为100(认为其摩擦阻力很大),其余边界摩擦系数与

§1.2 相同。计算的位移场(图 10)很好地说明了现今防治工程的有效性。模拟结果显示,水平位移速率为 0.6mm/a(北向临江方向),垂直速率为 -0.8mm/a,年平均位移量为 1.0mm,位移量明显减

小。应力场分布图(图 11)表明,整个山体只在垂直方向受力明显,其他岩体均受力很小,特别是“五万方”危岩体下部临江部分的岩体受力非常小,这表明山体向临江方向的滑移已得到很好的控制。

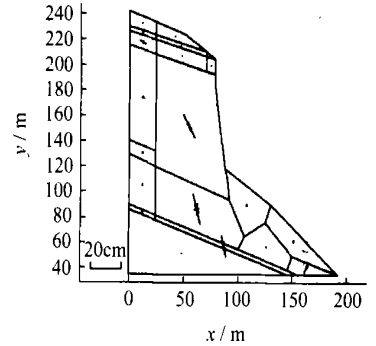
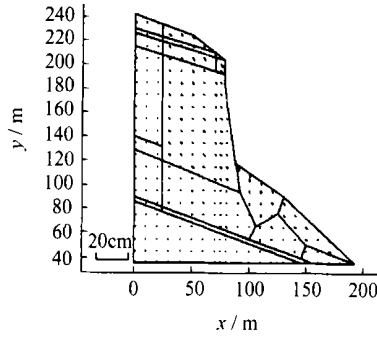
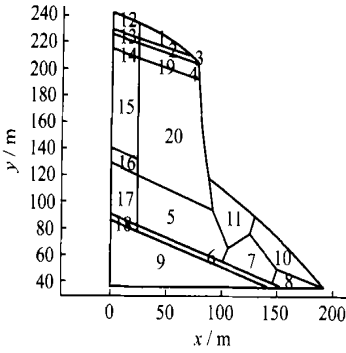


图 9 防治模拟的块体化分

图 10 防治模拟后的年位移场

图 11 防治模拟后的应力场

Fig.9 Partition of Blocks of the Section

Fig.10 Distance Field of the Section

Fig.11 Stress Field of the Section

3 结 语

该模型进一步证明了煤层采空区是山体变形崩滑的主要因素,防治模拟充分说明了现今防治工程的有效性。随着对链子崖危岩体变形监测的深入和数据的积累,将获得更多、更精确的监测资料。对于上述 DDA 数值分析系统,引入更多的约束值,将会得到更加精确的位移场、应力场和更符合实际的变形预测结果。

参 考 文 献

- 1 王尚庆. 链子崖危岩体监测预报初步研究. 中国地质灾害与防治学报, 1994(3): 79 ~ 89
- 2 王泽民. 非连续变形分析与现代地壳运动研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(2): 122 ~ 126

- 3 王勳成. 有限单元法基本原理和数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 4 石根华. 块体系统非连续变形数值分析新方法. 北京: 科学出版社, 1993
- 5 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析. 北京: 清华大学出版社, 1997. 92 ~ 168
- 6 陈永奇. 变形监测分析与预报. 北京: 测绘出版社, 1995
- 7 高 鹏, 艾南山. 土质滑坡体破坏的突变模型. 工程地质学报, 1994(4): 67 ~ 76
- 8 Shi G.H. Numerical Manifold Method. The Second International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Kyoto, 1997
- 9 Chen G.Q., Yuzo O., Takahiro I. Development of High Order Manifold Method. The Second International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Kyoto, 1997

第一作者简介: 伍岳, 博士生. 现从事工程形变及 GPS 研究.
E-mail: wangyan wuyue @163.com

Discontinuous Deformation Analysis and Its Application to the Deformation Forecast of Dangerous Lianziya Cliff

WU Yue¹ WANG Zemin¹ XU Shaoquan¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

Abstract: Aimed at the problem of character of deformation and forecasting of discontinuous blocks in geological disaster, the theory and application research has been systemically done in the side of the value simulation and forecasting on geological disaster with the discontinuous deformation analysis method. Particular analysis of geological structure of Lianziya is

(下转第 584 页)

- 4 Szames M, Ryan S, Lachapelle G. DGPS High Accuracy Aircraft Determination Using Doppler Measurements. The International Symposium on Kinematic System, Baff 1997
- 5 周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS 测量原理与应用. 北京: 测绘出版社, 1995
- 6 刘基余, 李征航, 王跃虎, 等. 全球定位系统原理及其应用. 北京: 测绘出版社, 1993
- 7 肖云. 利用 GPS 确定航空重力测量载体运动状态的理论与方法: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 2000
- 8 肖云, 孙中苗, 程广义. 利用 GPS 多普勒观测值精确确定运动载体的速度. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(2): 113~118
- 9 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型. 北京: 测绘出版社, 1998
-
- 第一作者简介: 肖云, 博士生. 现从事卫星重力测量研究. 代表成果: GPS 在航空重力测量中的应用研究.
E-mail: xiaoyungg@sina.com

Comparison Between Phase-Rate and Doppler to Determine Velocity

XIAO Yun¹ XIA Zhen¹

(1 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, 1 Middle Yanta Road, Xi'an, China, 710054)

Abstract: Doppler and phase-rates are used to evaluate velocities. The different characters of the two methods are put forward. A new method of detection of cycle slips \double differentiated phase-rate bias is shown. The results indicate that the accuracy of velocity deduced from raw Doppler observations is 20~70 mm/s and that from derived Doppler can be 1~3 mm/s.

Key words: Doppler; phase-rate; GPS; velocity; cycle slip

About the first author: XIAO Yun, Ph. D candidate. He is engaged in the research on satellite gravity. His typical achievement is the application of GPS to airborne gravimetry.
E-mail: xiaoyungg@sina.com

(责任编辑: 平子)

(上接第 576 页)

made. Deformation and control simulation have been made on two section planes of dangerous precipitous cliff, and a series of displacement field pictures are obtained. From the result, we can affirm that the deformation of dangerous precipitous Lianziya cliff has the direct relationship with the structure of the mine-out area and the T11 segment, and the simulation results are basically according to the reality.

Key words: discontinuous deformation analysis; dangerous precipitous Lianziya cliff; displacement field; stress field; simulation of value; geological disaster

About the first author: WU Yue, Ph. D candidate. He is engaged in the research on engineering deformation and GPS.
E-mail: wangyan wuyue@163.com

(责任编辑: 燕子)