

·成果简介·

采动断层(节理)活化的突变问题研究

于广明 赵建锋 姚鑫 邵军

(辽宁工程技术大学, 阜新 123000)

[关键词] 采动断层(节理), 活化, 突变

天然岩体是一个复杂的结构体,在地下开挖之前,它处在一种准静态平衡状态。地下开挖后,这种平衡状态遭到破坏,使采场上覆岩体远离平衡,发生一系列的破坏现象。采动覆岩的变形和破坏乃至移动实则是一种运动,运动系统必然存在稳定性问题。突变则是采动覆岩系统中失稳的一种形式,是指系统在外界条件作用下发生不连续的剧变。结构化岩体采动沉陷过程中具有很多突变破坏形式,如采动断层(节理)的突发性滑移就是其中的典型一例。断层一旦形成,其进一步的运动(突变滑移)将受断层面摩擦的控制。这种突变破坏形式导致矿山开采沉陷过程中的复杂性、剧烈性和高度非线性。因此,寻找一种能很好地解释和研究这种非连续现象的理论和方法,来研究结构化岩体采动沉陷中的突变破坏形式,对正确认识结构化岩体采动沉陷机理和预测是十分必要的。以法国数学家 R. Thom 为先导,在 20 世纪 70 年代逐步形成的突变理论是描述这种非连续破坏的有力数学工具。我们借助这种工具研究和分析了采动断层(节理)的突发性滑移的突变现象,充分认识了采动断层(节理)的突发性滑移机理,对矿山开采沉陷的深入研究具有重要的理论价值。

1 采动断层(节理)活化突变滑移的分形界面效应

研究表明^[1-4],地质断裂面的表面形态具有分形性质。为了模拟断层面分形性质对采动断层活化突变滑移的影响。我们分别进行了相似材料物理模拟(图 1)^[5]和计算机数值模拟(图 2)^[6],模拟地下开挖引起分形断层面活化突变滑移的规律。研究表明,断层面的抗剪强度与其分形维数大致呈线性正

比例关系。断层面在采动活化滑移过程中,其分形维数值越小,断层面的起伏程度越小,其上下盘接触点越少,活化的阻力(摩擦力)越小。因此,突变滑移的可能性越大,活化量越大。

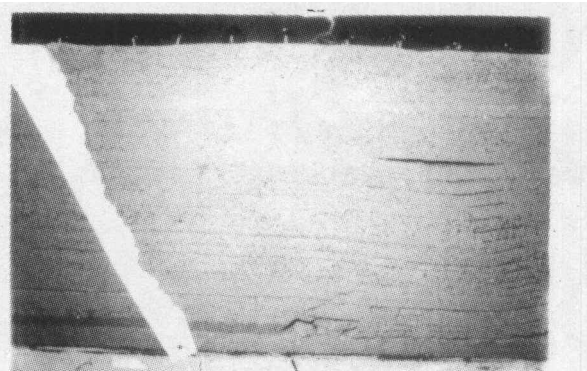


图1 采动断层活化突变滑移相似材料物理模拟

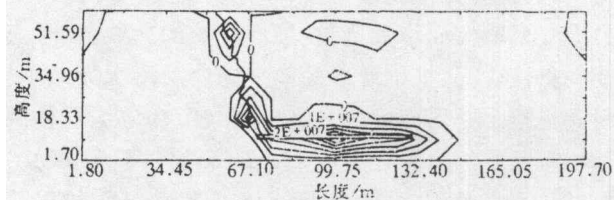


图2 采动断层活化突变滑移数值模拟

通过采动断层活化的分形界面效应研究,揭示了工程岩体中结构面上下盘运动的分形界面效应,挖掘出了又一影响因素,获得了断层面的分形性质对采动断层活化突变滑移影响的认识,这对采动断层活化突变滑移机理的深入研究具有一定的理论价值。

2 采动断层(节理)活化的突变机理

采动断层活化是一个蠕滑过程,若蠕滑是稳定的,可称为慢速活化滑移;若蠕滑是不稳定的,则称

为突发性活化滑移,即发生粘滑现象。上述两种类型的发生与否,在很大程度上,依赖于滑面介质的粗糙程度和刚度性质。所以,本文用尖点突变模型^[7]研究了其失稳的力学机制,提出了采动断层活化失稳的刚度效应机制。

断层系统图如图3所示, H 为断层受采动影响的深度, α 为断层的倾角, β 为断层上盘岩体达到自由重力作用时(即似自由落体运动)的岩体范围角,断层面凸凹的高度为 h , 上部岩体重量为 mg (g 为重力加速度)。在岩体自重产生的下滑力作用下,岩体沿凸起起伏面的蠕滑位移为 u 。

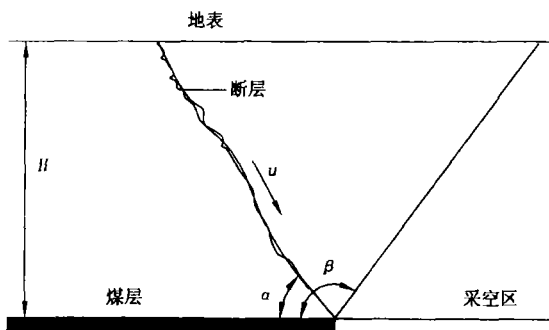


图3 断层系统图

大量研究表明,断层表面粗糙不平,上下盘的较合程度在整个断层面上是不同的,有的区域锁固性强,有的区域锁固性弱(图4)。因此,在锁固性强的区域,具有弹性或应变硬化特征,其抵抗变形的能力随变形增大而增大;而在锁固性弱的区域,具有应变弱化性质,其抵抗变形的能力随变形增大而减小。因此将整个断层面简化为“完全弹性”和应变弱化两种性质介质的统一体,并假设凸凹体及其磨损物的变形是均匀的,并可忽略凸凹体及其磨损物的压缩变形^[8]。

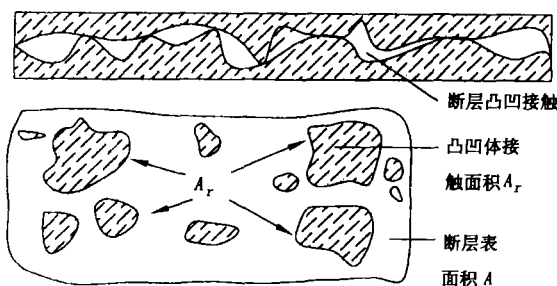


图4 断层滑移接触特征

显然有,弹性性质断层面的本构关系为:

$$\tau = G_e \cdot \frac{u}{h} \quad (1)$$

式中: G_e 为剪切模量。

应变弱化性质断层面的本构关系为:

$$\tau = G_s \frac{u}{h} e^{-\frac{u}{u_0}} \quad (2)$$

式中: G_s 为初始剪切模量, u_0 为最大剪力时的位移。

对于图3所示的断层系统,其总势能是凸凹体及其磨损物的应变能和采动断层滑动势能之和,其总势能为^[8]:

$$V = l_s \int_0^u \frac{G_s u}{h} e^{-\frac{u}{u_0}} du + \frac{1}{2} \frac{G_e l_e}{h} u^2 - mgu \sin \alpha \quad (3)$$

式中: l_s 、 l_e 分别为弱化性质断层区段和弹性断层区段的滑动方向的长度,显然有 $l_s + l_e = H / \sin \alpha$ 。

按尖角突变模型,选 u 为状态变量,根据 $\text{grad}_u V = 0$ 得平衡曲面方程为:

$$\text{grad}_u V = \frac{G_s l_s}{h} u e^{-\frac{u}{u_0}} + \frac{G_e l_e}{h} u - mg \sin \alpha = 0 \quad (4)$$

进而求分叉集方程,即 $\text{grad}_u (\text{grad}_u V) = 0$

$$\frac{G_s l_s}{h u_0} \left(\frac{u}{u_0} - 2 \right) e^{-\frac{u}{u_0}} = 0 \quad (5)$$

通过上式可求出尖点处的位移值:

$$u = u_1 = 2u_0 \quad (6)$$

将平衡曲面方程相对于尖点处状态变量值 u_1 作 Taylor 展开,保留状态变量的3次方以下各项,并将分叉集方程代入简化得:

$$\frac{2}{3} \frac{G_s l_s u_1 e^{-2}}{h} \left[\left(\frac{u - u_1}{u_1} \right)^3 + \frac{3}{2} \left(\frac{G_e l_e e^2}{G_s l_s} - 1 \right) \left(\frac{u - u_1}{u_1} \right) + \frac{3}{2} \left(1 + \frac{G_e l_e e^2}{G_s l_s} - \frac{mghe^2 \sin \alpha}{G_s l_s u_1} \right) \right] = 0 \quad (7)$$

进一步变为

$$\left(\frac{u - u_1}{u_1} \right)^3 + \frac{3}{2} \left(\frac{G_e l_e e^2}{G_s l_s} - 1 \right) \left(\frac{u - u_1}{u_1} \right) + \frac{3}{2} \left(1 + \frac{G_e l_e e^2}{G_s l_s} - \frac{mghe^2 \sin \alpha}{G_s l_s u_1} \right) = 0 \quad (8)$$

做变量替换:

$$X = \frac{u - u_1}{u_1}, \quad a = \frac{3}{2} \left(\frac{G_e l_e e^2}{G_s l_s} - 1 \right), \\ b = \frac{3}{2} \left(1 + \frac{G_e l_e e^2}{G_s l_s} - \frac{mghe^2 \sin \alpha}{G_s l_s u_1} \right) \quad (9)$$

即成尖角突变的标准形式:

$$X^3 + aX + b = 0$$

设 $K = \frac{G_e l_e e^2}{G_s l_s}, \xi = \frac{mghe^2 \sin \alpha}{G_s l_s u_1}$ (10)

式中:参数 K 恰是断层带弹性性质区段介质的刚度 $K_e = \frac{G_e l_e}{h}$ 与应变弱化性质区段介质在本构曲线拐

点 u_1 处的刚度值之比,简称刚度比;参数 ξ 是与断层上盘岩体重量、几何尺寸和力学参数有关的量。

则 $a = \frac{3}{2}(K-1)$, $b = \frac{3}{2}(1+K-K\xi)$, 代入分叉集方程的标准形式中得:

$$2(K-1)^3 + 9(1+K-K\xi)^2 = 0 \quad (11)$$

上式即为采动断层活化突变失稳的充要力学条件判据。

由突变理论,只有 $a \leq 0$ 时,系统才能跨越分叉集发生突变,即

$$\frac{3}{2}(K-1) \leq 0 \quad (12)$$

时,即有 $K \leq 1$

从而得到采动断层活化突变失稳的必要条件,即弹性性质区段介质的刚度与应变弱化性质区段介质的刚度比不大于 1。显然,弹性性质区段刚度越小,应变弱化性质区段刚度越大,越易发生突变滑移。

综上所述,采动断层活化突变失稳取决于断层上下盘的锁固程度,断层面越粗糙,分形维数越大,越不易发生突变失稳,从而活化滑移量越小,这在相似材料模拟实验得到很好的验证。

3 结束语

采动断层活化是一个极其复杂的非线性问题,非线性科学的诞生和发展为该问题的深入研究和实践应用带来了契机。本文仅就采动断层活化突变失稳问题进行了初步研究,获得了采动断层活化突变失稳的充要力学条件判据。然而,其不成熟之处仍然很多,还应从以下几个方面深入研究:

(1)采动断层活化的协同性。断层活化运动时,其两盘众多凸起接触点的破坏,以及磨损物与断面凸凹点的作用均表现出相互影响、互惠合作的协同效应。例如,一个凸点障碍物被剪断,就可能触发相邻凸起障碍体的破坏等等。因此,研究断层摩擦动力学行为时必须考虑这种协同效应。

(2)采动断层活化运动的神经网络预测。采动断层活化运动的复杂性质决定了其难于预测,神经网络模型显示了特有的优越性。因此,应根据大量的研究成果和研究经验,建立合适的神经网络模型,并搜集大量的实例作为样本对其进行检验和修正,以达到准确预测的目的。

参 考 文 献

- [1] 于广明. 地层沉降的非线性原理、监测与控制[国家自然科学基金出版基金]. 长春:吉林大学出版社,2000,126.
- [2] Yu Guangming, Zhao Jianfeng. Study on application of the laws and mechanisms of subsidence in rock masses influenced by mining, The 11th Congress of the International Society of Mining Surveyors, Poland Cracow, 2000, 197—204.
- [3] Yu Guangming, Xie Heping, Zhao Jianfeng. Fractal evolution of a crack network in overburden rock stratum. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2000, (5):47—52.
- [4] 于广明, 谢和平. 地质断裂面分形性研究. 煤炭学报, 1996, 21(5):459—463.
- [4] Xie Heping, Yu Guangming. The Influence of Proximate Fault Morphology on Ground Subsidence Due to Extraction, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1998, 35(8):1 107—1 111.
- [6] 于广明, 谢和平, 杨伦等. 采动断层活化分形界面效应的数值模拟. 煤炭学报, 1998, 23(4), 42—46.
- [7] 哈肯著, 形态发生学, 成都:四川教育出版社, 1992.
- [8] 秦四清等著. 非线性工程地质学导引. 成都:西南交通大学出版, 1993.

THE RESEARCH ON THE QUESTION OF MINING FAULT ACTIVATION (JOINT)SUDDEN CHANGE

Yu Guangming Zhao Jianfeng Yao Xin Shao Yun
(Liaoning Technical University, Fuxin 123000)

Key words mining fault activation(joint), sudden change