

断层上下盘开挖引起岩移的断层效应

赵海军¹, 马凤山¹, 李国庆¹, 丁德民¹, 文有道²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 金川集团有限公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要: 受断层影响, 在断层上盘开挖与下盘开挖时具有不同的岩移机理。采用理论和数值分析的方法分别对陡倾断层上下盘开挖这两种工程状态下的岩移机制进行了研究, 结果表明: 当陡倾断层位于开挖引起的岩体变形的拉张区时, 不论是在断层上盘开挖还是下盘开挖, 都会使垂直断层面产生附加张应力, 使其抗剪强度减小, 在自重体积力作用下总会表现出具有正断层方式的错动, 在地表以断层陡坎或台阶状的地貌形态出现, 向下到断层“活化”——错动段的下限, 错距逐渐减少到零。

关键词: 地下开挖; 岩体移动; 断层效应; 断层“活化”

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1372-04

作者简介: 赵海军(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事工程地质与岩土工程方面的研究工作。E-mail: Jonavy@126.com。

Fault effect due to underground excavation in hangingwalls and footwalls of faults

ZHAO Hai-jun¹, MA Feng-shan¹, LI Guo-qing¹, DING De-min¹, WEN You-dao²

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737100, China)

Abstract: Influenced by faults, the mechanism of rock movement was different due to the underground excavation in hangingwalls and footwalls of faults. Theoretical and numerical methods were used under two construction states of underground excavation in hangingwalls and footwalls of faults. It was indicated that when the steep faults in the tensile deformation region were incurred by underground excavation, no matter the excavation in hangingwalls or that in footwalls of the faults, there would be additional tensile stress on the vertical fault plane and the shear strength decreased, showing the characteristics of normal fault slip. This phenomenon would appear on the ground surface in the form of fault escarpment, and down to the fault "activation"—the lower limit of fault slip section where the fault throw gradually reduced to zero.

Key words: underground excavation; rock movement; fault effect; fault "activation"

0 引言

大型地下工程必然涉及大规模的开挖, 将开挖区周围岩体看作是均质体的岩移规律研究比较成熟^[1]。但是, 当开挖空间或附近有断层存在时, 位移的连续性和变形的协调性就会被破坏, 在断层及附近一定范围呈现出特殊的岩移规律, 并且常常会引起一系列的与断层“活化”有关的灾害问题^[2-3]。本文分别研究了开挖区处于陡倾断层上盘和下盘时断层出现地表台阶的机制, 这可为今后断层区合理的地质工程设计与施工以及工程设施安全性的预测预报提供依据。

1 正断层方式台阶形态的形成机理

断层带岩体构造复杂, 一般比较破碎, 受开挖影响, 成岩地质体应变能释放引起围岩松动和变形, 原始弱面的破坏特别是剪切破坏, 或弱面充填物的塑性变形, 岩体的势能(重力的和弹性的)大部分都转化

成为这类与塑性和摩擦作用有关的变形功^[4], 导致断层两侧岩体的总体变形出现不协调的特点。

如图1所示, 金川三矿区地下开挖使岩体发生移动、变形, 地表沉陷三维位移等值线图形大致为椭圆形。由于沉陷椭圆中心左上方存在一条陡倾的断层带F₁₇, 在椭圆形盆地内靠近断层带的地方三维位移等值线密集, 三维位移量值变化较大, 而在断层带的另一侧, 即左上方, 岩体移动、变形趋势与断层右侧截然不同, 等值线分布规律性不强, 而且量值远远小于断层右侧的对称区域。

由于断层具备岩移的“屏障”机制^[5], 一般认为在断层附近开挖时, 断层带与开挖空间一侧岩移较严

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-113);

国家自然科学基金项目(40702048)

收稿日期: 2007-10-29

重, 而另一侧则较轻, 尤其是在断层上盘开挖时更为明显, 这类工程实例也较多, 图 1 即为这种情况。然而实践中当开挖区处于陡倾断层下盘, 并且断层位于地下开挖引起的岩体变形的拉张区时, 往往会出现下盘开挖, 上盘岩移反而更严重的实例^[4, 6]。

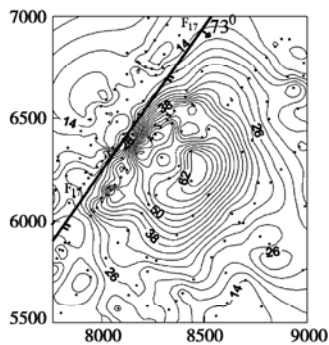


图 1 金川三矿区地表 GPS 三维位移等值线图

Fig. 1 The 3D displacement contour of Jinchuan Mine No. 3

由断层引发的不平衡地表沉陷类型中最明显的宏观标志就是地表出现台阶状的地貌特征。因此, 就以受断层影响地表出现台阶地貌形态的过程来进行分析, 并假定满足断层陡倾, 且处于开挖引起的岩体变形的拉张区。如图 2 所示, 上盘开挖时断层台阶形成过程图为 a1-b1-c1-d1, 下盘开挖时断层台阶形成过程图为 a2-b2-c2-d2。图中的 1, 2 代表断层两盘在地表的出露部位。

在开挖初始阶段, 因处在不断增加的张应力区, 位于断层开挖一侧地表处的 2 点的水平运动分量和局部沉降较 1 点大, 在地表处表现为断层被拉开 (b1 和 b2) 之后在断层被拉开的两壁间出现位移不连续。随着开挖规模的加大, 2 点局部相对于 1 点局部的水平位移和垂向位移差逐渐增大, 这种条件下断层面上任一点的垂直于断层面的张应力分量 $\Delta\sigma_n$ 增加, 即 $\tau = (\sigma_n - \Delta\sigma_n) \tan \alpha + c$, 这意味着断层的抗剪强度变小; 另一方面, 断层面失去原有强度只具有残余强度的范围增加, 未被剪断的范围变小, 总的抗剪能力变

小, 到达一定程度后, 断层上盘上部的岩体必然会自上而下向拉开的裂缝空间发生较大幅度的转动和变形, 表现为正断层方式的运动, 其中上盘地表顶点的运动轨迹都并非直线而是呈圆弧形 (如图 2 中 c1 和 c2)。

由于上盘岩体不断的向逐渐加大的张裂缝空间位移, 使两盘间的张裂缝在减小的同时, 上盘岩体本身也不断的下降, 未能得到完全充实的空间与上下盘岩体本身变形的不协调又会促使张裂缝不断的再生, 同时在地表跨越断层的部位产生垂直于断层线方向上的张应变异常, 实际上这时的张应变异常已经失去了它的物理意义, 在地表出现了正断层性质的台阶状地貌形态 (如图 2 中 d1 和 d2), 并向下到断层“活化”——错动段的下限, 错距逐渐减少到零, 而且这种过程随开挖的进行而将继续发展。

在断层上下盘岩体中开挖, 断层台阶的形成机制:

(1) 在断层上盘开挖时, 鉴于断层的“屏障”机制, 上盘指向开挖区的位移量大于下盘, 导致断层两侧位移差增长较快, 断层面的抗剪强度减小, 致使断层被拉开段的长度递增速度加快。这一过程是在上盘主动指向开挖区的位移趋势下 (如图 2 中 b1 图上的小箭头), 发生转动和变形, 出现的是“主动式”的正断层式的台阶地貌形态, 此类现象发生相对较多。

(2) 当开挖在断层下盘时, 下盘受直接影响, 上盘受间接影响, 断层在地表被拉开后 (b2), 断层下盘地表出露处产生指向开挖区的位移 (如图 2 的 b2 图上箭头所示), 断层上盘是在张裂缝不断被拉开、延伸及断层面抗剪强度不断降低的情况下, 发生转动和变形, 出现的是“被动式”的正断层性质台阶地貌形态。此类现象因对发生条件相对要高, 但是只要满足前述条件, 且开挖规模较大时, 最终会发展成图 d2 所示的地貌特征。

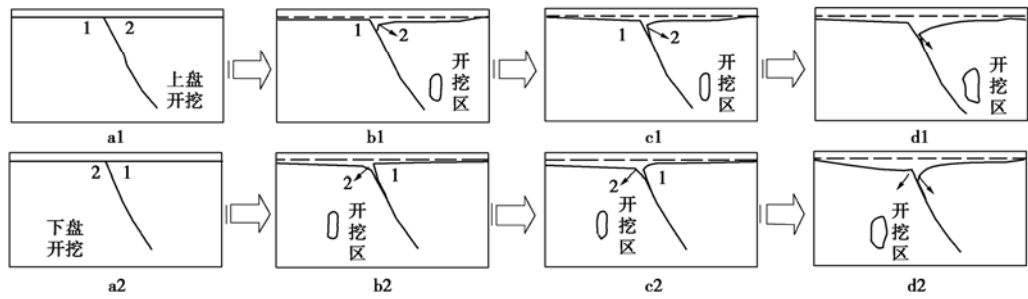


图 2 受开挖影响断层出现地表台阶的过程

Fig. 2 Developmental of terrace morphology incurred by excavation

2 开挖引起垂直断层面的附加张应力的数值分析

计算模型：长 1000 m，埋深 500 m；开挖方式：自上而下分三步开挖，单次开挖宽度为 50 m，高度为 20 m，首次开挖顶板埋深 300 m。作为平面应变问题研究，在模型的两侧面约束水平位移，模型底边界面约束垂直位移，模型纵向约束全部位移，模型上边界为自由表面，如图 3 所示。

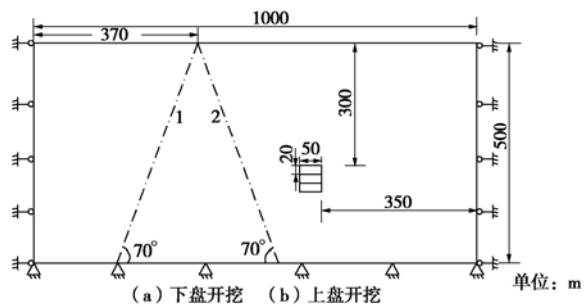


图 3 数值分析模型横剖面图

Fig. 3 Cross-section of numerical model

表 1 数值模拟计算参数

Table 1 Parameters for numerical simulation

计算参数	围岩	断层
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2600.00	
体积模量 $K/10^9 \text{ Pa}$	3.91	
剪切模量 $K/10^9 \text{ Pa}$	7.58	
黏聚力 $c/10^6 \text{ Pa}$	1.00	0.5
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	38.00	30.0
抗拉强度 $T/10^6 \text{ Pa}$	1.00	0.2
法向刚度 $K_n/(10^9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1})$		1.0
切向刚度 $K_s/(10^8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1})$		1.0

计算方案：首先在自重作用下模拟获取初始地应力，然后位移清零后在无限层时进行开挖计算，获取地表下沉分布曲线函数，求得地表曲率为零的点的坐标，确定拉张区和压缩区分界点（图 4）。然后，在拉张区范围地表取一点，分别做一条使开挖区位于上盘和下盘的倾角 70° 的断层（如图 3 中编号为 1, 2 的线段，模拟无厚度的硬性结构面），这样最终到两个计算模型，计算参数如表 1，仍然在自重作用下模拟来获取初始地应力，然后在分别开挖计算。

图 5 为每步开挖后不同深度断层面上法向压应力与初始状态时的差值曲线。从中可以看出，当开挖空间位于断层上盘时（图 5 (a)），开挖后在近地表 70 m 范围垂直断层面的法向压应力变化量 $\Delta\sigma_n$ 较大，垂直断层面上明显产生了附加张应力，而且地表最大，向下近线性减小，直至出现挤压区，法向压应力又明显增大，这与开挖引起断层上盘浅部拉开下滑，重心下

移对下部未拉开断层面挤压增强的道理是一致的。三步开挖计算，这种趋势是一样的，而且随着开挖规模的扩大，开挖在近地表断层产生的附加张应力也随之增大。

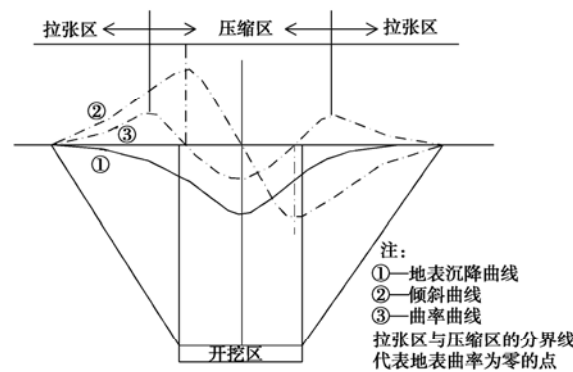


图 4 典型地下开挖引起地表移动和变形分布图

Fig. 4 Distribution of ground movement and deformation due to underground excavation

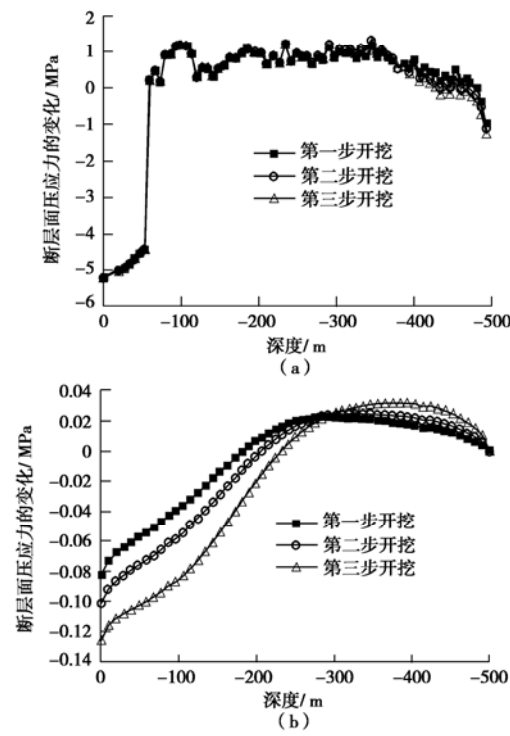


图 5 开挖位于上盘和下盘时不同深度断层面压应力的变化量

Fig. 5 Variation of compressive stress with depth incurred by excavation in hangingwalls and footwalls of faults

当开挖空间位于断层下盘时（图 5 (b)），三步开挖后对断层面的法向应力影响量值较小，但反映的特征比较明显。地表到地下近 300 m 范围内，断层面法向压应力均有减小，且减小量从地表向下近线性分布。即在下盘开挖时，处于拉张区的断层受开挖影响产生附加张应力的断层段长度要明显大于上盘开挖，此次三步开挖趋势一样，且表现为随开挖规模加大，地表

断层面的附加法向张应力随之增大的特点。

3 结 论

通过对陡倾断层上下盘开挖的理论和数值分析研究, 可以得出以下结论:

(1) 断层作为岩土体内的低强度带, 尤其是陡倾断层, 当它位于开挖引起的岩体变形的拉张区时, 不论是在上盘开挖还是下盘开挖, 都会使垂直断层面产生附加张应力, 使断层的抗剪强度变小。

(2) 在开挖尚未使它被拉开之前, 垂直断层面的附加法向张应力越接近地表越大, 在自重体积力作用下总会表现出具有正断层方式的错动。

(3) 断层的错距在地表露头处最大, 并以断层陡坎或台阶状的地貌形态出现; 向下到断层“活化”——错动段的下限错距逐渐减少到零。

(4) 这两种工程状态下都会出现正断层式的地表台阶地貌, 但具有不同的形成机制。断层的规模、产状、断层带的强度特性, 以及开挖区的规模、与断层的距离断层两盘岩体的柔度特性等因素都可以影响到断层的这种效应所显现的方式和表现的强度。

参考文献:

- [1] 刘宝琛, 廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965. (LIU Bao-chen, LIAO Guo-hua. The fundamental laws of the coal mine ground movement[M]. Beijing: China Industry Press, 1965. (in Chinese))
- [2] 蒋建平, 高广运. 地下工程引起的不平衡地表沉陷分析[J]. 煤炭学报, 2003, 28(3): 225 - 229. (JIANG Jian-ping, GAO Guang-yun. Analysis of non-uniform settlement at the ground induced by underground engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(3): 225 - 229. (in Chinese))
- [3] 唐东旗, 吴基文, 李运成, 侯江涛. 断裂带岩体工程地质力学特征及其对断层防水煤柱留设的影[J]. 煤炭学报, 2006, 31(4): 455 - 460. (TANG Dong-qi, WU Ji-wen, LI Yun-cheng, HOU Jiang-tao. The features of fault zone rockmass engineering geological mechanics and its effect on leaving fault waterproof pillar[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4): 455 - 460. (in Chinese))
- [4] 徐嘉谟, 李毓瑞, 马凤山, 等. 金川矿山边坡岩体工程地质力学[M]. 北京: 地震出版社, 1998. (XU Jia-mo, LI Yu-rui, MA Feng-shan, et al. Slope rock mass engineering geomechanics for Jinchuan Mine[M]. Beijing: Seismic Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [5] 李晓昭, 张国永, 罗国煜. 地下工程中由控稳到控水的断裂屏障机制[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 220 - 224. (LI Xiao-zhao, ZHANG Guo-yong, LUO Guo-yu. Barrier effects caused by fault on excavating induced stress & deformation and mechanism of resulting groundwater inrush[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 220 - 224. (in Chinese))
- [6] 徐嘉谟. 抚顺西露天开挖引起环境工程地质问题的研究[M]. 北京: 地震出版社, 1995. (XU jia-mo. Analysis of environment engineering problems induced by open pit mining in west of Fushun[M]. Beijing: Seismic Publishing House, 1995. (in Chinese))