

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.017

# 断层摩擦强度对地下硐室围岩稳定性影响

丁九龙<sup>1</sup>, 徐文娟<sup>2</sup>, 王 孜<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西北农林科技大学 经管学院, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 硐室开挖过程中断层难以避免, 断层对地下硐室的稳定性有着重要影响, 断层的倾角相对于断层内摩擦角更容易测得。因此本文研究断层摩擦强度特性下断层倾角的变化对断层稳定性的影响, 并就断层倾角变化对地下硐室围岩稳定性进行定量分析。最后以某地区的断层特性为基础具体研究了断层倾角的变化对硐室稳定性的影响规律。研究结果对于地下硐室稳定性判断具有重要理论与实践意义。

**关键词:** 断层摩擦; 地应力; 数值模拟

**中图分类号:** TD713; TD32      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-4710(2017)03-0351-04

## Study of the influence of fault friction strength on surrounding rock stability of underground chamber

DING Jiulong<sup>1</sup>, XU Wenjuan<sup>2</sup>, WANG Zi<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Economics and Management, Northwest A &amp; F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** It is difficult to avoid the fault in excavate underground chambers, so faults have an important influence on the stability of underground chambers. The dip angle of the fault is more easily measured compared with the friction angle of the faults. Therefore, this paper studies the effect of fault dip angle on the fault's stability with fault friction characteristics, and analyses the dip angle change to stability of surrounding rock underground cavern quantitatively. Finally, this paper studies the influence of the dip angle of the fault on the stability of the chamber with the fault characteristics of a certain region. The research results are of great theoretical and practical significance for judging the underground chamber stability.

**Key words:** fault friction; ground stress; numerical simulation

断层是影响地下硐室开挖稳定性的重要因素, 断层自身的性质如断层规模、产状、断层埋深等对地下硐室稳定性起着决定性作用。国内外不同学者从以上不同方面进行了较为系统的研究。孟召平等<sup>[1]</sup>研究了断裂结构面对回采工作面矿压及顶板稳定性的影响。李忠华和潘一山<sup>[2]</sup>根据突变理论对围岩和断层所组成的系统进行分析, 给出了断层厚度、断层软化指数、剪切模等定性评价参数。柳畅等<sup>[3]</sup>从地震孕震机制角度研究了断层摩擦滑动与地震的关系。王泽利等<sup>[4]</sup>通过实验手段研究了预制断层的岩石变形过程中的应力状态及摩擦强度变化, 分析了断层带内应力主轴方向发生旋转及达到简单剪切变形状态的过程。在断层摩擦定律方面自 Brace 和 Byerlee<sup>[5]</sup>提出用粘滑解释断层活动引起地震现象

以来, Dieterich<sup>[6]</sup>, Scholz<sup>[7]</sup>, Ruina<sup>[8-9]</sup>等学者围绕断层摩擦进行了较为丰富的研究工作, 建立了描述摩擦性质的速率-状态摩擦本构定律。Su<sup>[10]</sup>用离散元方法研究了断层附近应力场影响因素。贾晓亮等<sup>[11]</sup>通过数值模拟方法研究了不同因素对断层端部初始地应力的影响。以上研究大都根据数值模拟结果对研究区块内进行定描述, 而对不同地区断层的强度特性缺少较为统一的规律。本文从反映断层摩擦特性规律上总结出断层倾角这一主要因素对地下硐室稳定性的影响。

## 1 断层摩擦强度理论模型

断层的摩擦行为一般分为两种不同的机制, 一个是稳滑, 另一个是粘滑<sup>[12]</sup>。滑动中的断层更符合

收稿日期: 2016-12-22

作者简介: 丁九龙, 男, 硕士, 助理实验师, 研究方向为岩土工程实验与数值分析。E-mail: 348223269@qq.com

稳滑机理,而处于滑动-稳定-滑动这一不同阶段的断层,用粘滑能更好的描述其滑动过程。硐室穿过断层带开挖过程中,断层处在极限应力状态,其主要处在粘滑的临界稳定阶段。以断层为单元体进行研究,断层摩擦行为较为复杂(见图 1),可将其简化为断层上下盘之间的滑移摩擦运动。当断层两盘的剪应力超过断层面的摩擦强度时,断层发生活动。断层摩擦滑动行为以库伦提出的“摩擦”准则为基础:

$$\tau_f = c + \mu\sigma \quad (1)$$

式中: $\tau_f$  为断层摩擦强度、 $c$  为粘结强度、 $\mu$  为断层摩擦系数、 $\sigma$  为断层面处的正应力应力。

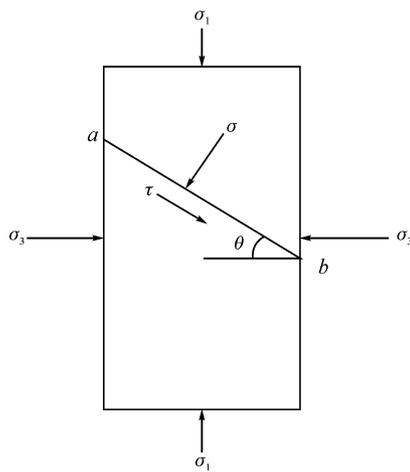


图 1 断层应力示意图  
Fig. 1 Stress diagram of fault

结合岩土工程中常用的摩尔-库伦定律,得断层面处的剪切强度准则为:

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi \quad (2)$$

式中: $\tau$  为断层剪切强度、 $\tan\varphi$  为断层摩擦系数。

断层摩擦强度可用库伦极限应力圆来表示,见图 2,式(1)确定的方程由直线 AB 表示,其斜率为断层的摩擦系数  $\mu$ ,其在纵坐标轴的截距为断层的粘聚力  $c$ 。状态下应力莫尔圆见图 2,其中  $\varphi$  为内摩擦角, $c$  为粘聚力, $\sigma_1$  为最大主应力, $\sigma_3$  为最小主应力, $\theta$  断层倾角, $\tau$  为断层所处的剪应力。

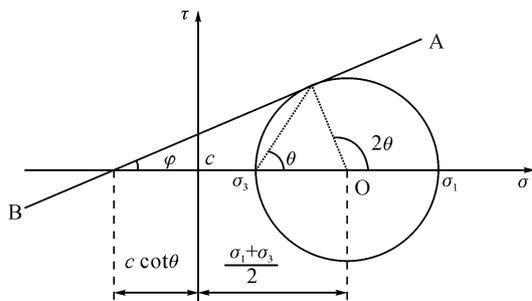


图 2 断层的摩尔圆  
Fig. 2 Mohr's circle of the fault

由图 1,断层在应力作用下产生破裂面  $ab$ 。垂直方向为最大主应力  $\sigma_1$ ,其与破裂面的法向线的夹角为  $\theta$ ,最小主应力  $\sigma_3$  与最大主应力  $\sigma_1$  方向垂直,与平面垂直的应力为中间主应力  $\sigma_2$ 。

在破裂面上由库伦摩尔圆可知,正应力与剪切应力存在以下关系:

$$\sigma = \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta] \quad (3)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1)\sin 2\theta \quad (4)$$

因此,对于直线 AB 而言,可以得出

$$\tau - \mu\sigma = -\frac{1}{2}[\mu(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_3 - \sigma_1)(\sin 2\theta - \mu\cos 2\theta)] \quad (5)$$

令  $\partial(\frac{\tau - \mu\sigma}{\partial\theta}) = 0$  则剪应力取到极值,断层处于极限平衡状态,可以计算出断层发生滑动时:

$$\mu = -\frac{1}{\tan 2\theta} \quad (6)$$

结合图 1 可得到:

$$\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} = \tan^2\theta \quad (7)$$

由此得:

$$\theta = \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \quad (8)$$

因此我们可以通过断层的摩擦系数从而判断出断层发生破坏的破坏角即为断层倾角。

由式(8)可见,断层受剪应力破坏时其内摩擦角  $\varphi$  和断层倾角  $\theta$  之间存在一定关系。断层的内摩擦角不容易测量,通过测量断层面的倾角可以推算其内摩擦角。

## 2 数值计算方案及结果分析

利用 FLAC 3D 有限差分软件进行数值模拟,设置如下数值计算方案:以研究区域内正断层为基础,选取断层倾角分别为  $5^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $65^\circ$  和  $85^\circ$  五个不同倾角的模型,从而研究断层倾角对地下硐室开挖稳定性的影响。位移边界条件为在模型上两个对称面上位移为 0,即  $x=0\text{ m}$ 、 $x=300\text{ m}$  面上 X 方向位移约束,Y、Z 方向位移自由; $y=0\text{ m}$ 、 $y=80\text{ m}$  面上 Y 方向位移约束,X、Z 方向位移自由。应力边界条件情况,在计算中施加应力边界条件,在自重应力作用下,单纯靠泊松效应,在水平方向产生的应力达不到实测的水平应力大小,因此根据研究区内构造应力情况。在模拟时,在上部施加等效上覆岩土体自重,在模型的每个单元上施加一个自上而下且具有一定梯度的水平应力。水平方向分别受到两个垂

直的水平地应力,为了与正断层一致,应力平衡后满足垂直地应力>最大水平地应力>最小水平地应力。本次模拟采用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)力学本构模型。

在图3模型基础上建立5个不同倾角的计算模型,经过地应力平衡、地下硐室开挖及后处理得到以下数值计算结果。

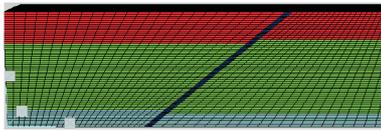


图3 数值计算模型图

Fig.3 Model diagram of numerical calculation

### 2.1 断层倾角变化对初始应力场的影响

如图4所示,从最大主应力云图可见,断层附近地应力明显受断层影响。不同倾角下断层附近的最大主应力见图5。

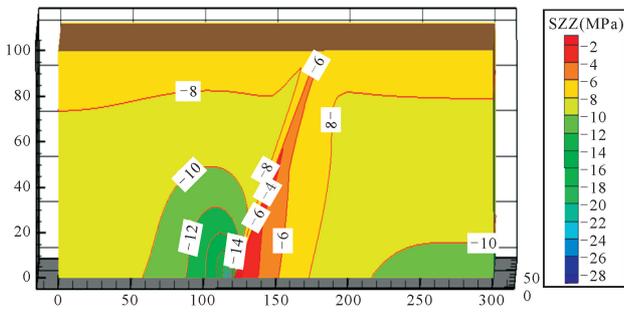


图4 断层初始应力

Fig.4 Initial stress of fault

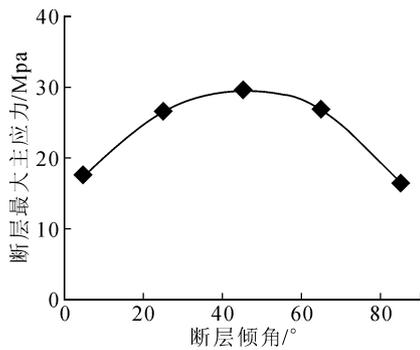


图5 不同倾角下最大主应力图

Fig.5 Peak principal stresses at different dip angles of faults

当断层倾角小于45°时,随断层倾角的增大最大主应力逐渐增大,应力集中程度也逐渐增大;而当断层倾角大于45°时,随断层倾角的增大最大主应力逐渐减小,应力集中程度也逐渐减小。结合式(7)可知,当断层倾角小于45°时,断层摩擦系数随断层倾角的增大而增大;当断层倾角为45°时,断层摩擦

系数达最大值;当断层倾角大于45°时,断层摩擦系数随断层倾角的增大而减小。因此,当断层倾角为45°时,断层有相对较小的摩擦系数和较小的摩擦力。

### 2.2 断层倾角变化对开挖后应力场的影响

在上一步断层对初始应力场影响的基础上模拟地下硐室的开挖,分别研究不同断层倾角下开挖不同距离附近应力的变化情况。数值模拟结果见图6,随着地下硐室距离断层越近,断层附近的应力峰值越大,在开挖过程中,断层应力逐渐积累。对于不同倾角的断层,开挖相同距离条件下,当断层倾角小于45°时,随着断层倾角的增大,断层面的应力峰值都是逐渐增大;在断层倾角等于45°时,达到最大值;大于45°时,正好相反。因此,对于断层来说,倾角为45°时,断层摩擦强度最小,最容易被破坏。在相同的断层倾角时,工作面两侧的应力峰值随工作面推进长度增加而迅速增大。越靠近断层,断层的摩擦强度越小,断层稳定性越差,断层越容易发生滑动。

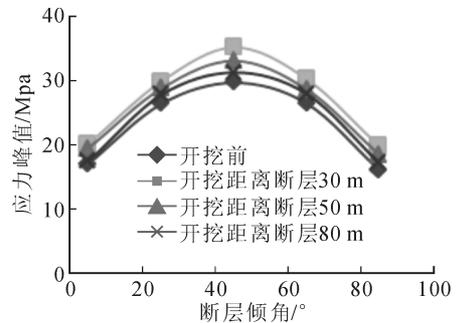


图6 不同倾角下开挖距断层不同距离的应力峰值

Fig.6 Peak stresses at different distances from different dip angles of faults

### 2.3 断层倾角对硐室开挖后位移的影响

由图7可以看出,开挖硐室工作面前方存在断层的情况下,逐渐开挖至距离断层50 m、30 m、10 m的过程中,断层上下两盘会发生相对位移。

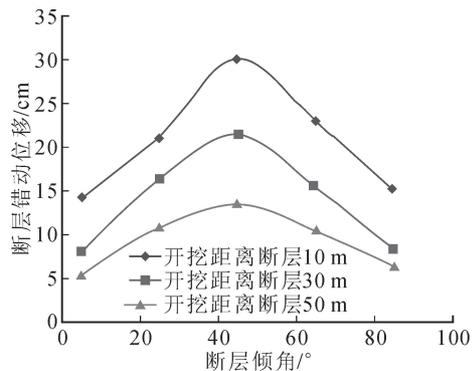


图7 不同倾角下开挖距断层不同距离的断层错动位移图

Fig.7 Displacements of faults at different distances from different dip angles of faults

随着开挖面逐渐至断层的过程中,断层上下两盘的错动位移也会随之增大,这样很容易造成断层摩擦滑动,断层由稳定状态进入临界稳定状态。当断层倾角小于 $45^\circ$ 时,断层上下两盘位移量随断层倾角的增大而增大;当断层倾角大于 $45^\circ$ 时,断层上下两盘位移随断层倾角的增大而减小,断层趋于稳定。因此,断层的活动规律受断层摩擦强度的控制。

### 3 结 论

利用断层摩擦强度理论对断层摩擦特性进行了分析,推导出断层倾角的变化与断层摩擦系数之间的定量关系。并依此为依据进行了数值模拟分析。得到以下结论。

1) 断层附近应力集中程度与断层倾角有关,当断层倾角小于 $45^\circ$ 时,应力集中程度随断层倾角的增大而增大;大于 $45^\circ$ 时,应力集中程度随断层倾角的增大而减小。断层倾角等于 $45^\circ$ 时应力集中最为严重。

2) 地下硐室开挖过程中,应力场变化为随开挖与断层距离的减小,应力集中呈明显增大趋势。断层倾角为 $45^\circ$ 时,应力集中最大。

3) 对不同倾角下不同开挖距离时断层的位移进行数值模拟研究发现,随着开挖距离的增大,断层的上下两盘的相对错动位移增大。断层倾角为 $45^\circ$ 时,断层错动的位移达到峰值。

因此,正断层当断层倾角为 $45^\circ$ 时具有较低的摩擦强度,在开挖等扰动情况下该类断层相对最易发生滑动。数值模拟的结果对于预测断层的活动性及地下硐室开挖具有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 孟召平, 彭苏萍, 冯玉, 等. 断裂结构面对回采工作面矿压及顶板稳定性的影响 [J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(3): 24-27.  
MENG Zhaoping, PENG Suping, FENG Yu, et al. Influence of fracture structure plane on underground pressure and roof stability of working face [J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(3): 24-27.
- [2] 李忠华, 潘一山. 断层冲击地压的影响因素与震级分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊1): 5206-5210.  
LI Zhonghua, PAN Yishan. Influencing factors and magnitude analysis of fault rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 5206-5210.
- [3] 柳畅, 朱伯靖, 石耀霖. 粘弹性数值模拟龙门山断裂带应力积累及大震复发周期 [J]. 地质学报, 2012, 86(1): 157-169.  
LIU Chang, ZHU Bojing, SHI Yaolin. Stress accumulation of the Longmenshan fault and recurrence interval of Wenchuan earthquake based on viscoelasticity simulation [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(1): 157-169.
- [4] 王泽利, 何昌荣, 周永胜, 等. 断层摩擦实验中的应力状态及摩擦强度 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4079-4083.  
WANG Zeli, HE Changrong, ZHOU Yousheng, et al. Stress state and frictional strength obtained with frictional experiments of fault [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 4079-4083.
- [5] BRACE W F, BYERLEE J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes [J]. Science, 1966, 153(3739): 990-992.
- [6] DIETERICH J H. Time-dependent friction in rocks [J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(20): 3690-3697.
- [7] SCHOLZ C, MOLNAR P, JOHNSON T. Detailed studies of frictional sliding of granite and implications for the earthquake mechanism [J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(32): 6392-6406.
- [8] RUINA A L. Friction laws and instabilities: A quasistatic analysis of some dry friction behavior [D]. Dissertation Abstracts International Part B: Science and Engineering, 43(2), 1980.
- [9] RUINA A L. Slip instability and state variable friction laws [J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88(B12): 10359-10370.
- [10] SU Shengrui. Effect of fractures on in situ rock stresses studied by the distinct element method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(1): 159-164.
- [11] 贾晓亮, 崔洪庆, 张子敏. 断层端部地应力影响因素数值分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(4): 47-51.  
JIA Xiaoliang, CUI Hongqing, ZHANG Zimin. Numerical simulation of geostatic stress influencing factor at the end of fault [J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(4): 47-51.
- [12] SCHOLZ C H. Earthquakes and friction laws [J]. Nature, 1998, 391: 37-42.

(责任编辑 王绪迪)