文章编号：1000－7598－(2008) 08－2111－05

从力矩效应和地下水分析缓倾角结构面成因

孙 强，张晓科，钱海涛，杨继红，王媛媛

（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）

摘 要：在岩石剪切破坏中引入力矩模型并就剪切破坏过程进行了分析。在发生剪切破坏时岩石的破坏带有一定宽度，剪切带上的剪应力和支持力不是均匀分布的，在剪切过程中存在一个调整过程，并在局部集中，导致了剪切力矩的存在。当轴向压力 σ_1 较小时，支持力和剪切力都很小，可视为均匀分布；随着 σ_1 的增大，支持力和剪切力都增大，出现非均匀分布，局部表现为应力集中，出现局部破坏，而在整体上表现为力矩平衡。当剪切力矩大于支持力矩时，宏观上剪切破坏出现；分析研究了地下水引起的接触面积的变化，由此并推导了静水压力情况下结构面的稳定性。随着水压力 p 的增大，除了对岩体材料力学性质的弱化外，结构面上有效压力 σ_n 和结构面上、下岩体的接触面积率 λ 变小，使得发生失稳破坏的临界角 θ 降低，也就是发生滑动的条件更容易满足。

关 键 词：岩石力学；缓倾角结构面；剪切带；力矩；岩体状态；地下水

中图分类号：TD 313$^+$.5 **文献标识码：**A

Analysis of low-angle structural-plane appearance from effect of moment of force and groundwater

SUN Qiang, ZHANG Xiao-ke, QIAN Hai-tao, YANG Ji-hong, WANG Yuan-yuan

(Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The model of moment of force is introduced to the rock shearing failure; and the shearing failure process is analyzed. The moment model is used to explain the formation of low-angle structural-plane. When the rock has the shearing failure, the shear band has a certain width. On the shear band, shear stress and the support strength are not the even distribution. There is a process alignment procedure in cuts; and the stress concentrated in some part caused the existence of shearing moment. Along with increasing of σ_1 , the supports strength and the shearing force all increase; the non-uniform distribution appears. The stress is concentrated partially; and the rock appears the partial failure. When the shearing moment is bigger than the support moment, the macroscopic shearing failure appears. Based on the destruction effect of groundwater, the change of interface with the variety of groundwater is analyzed. Along with the increasing of hydraulic pressure, the effective pressure and the contacted area rate of the structural surface and under the crag body changes slightly, the critical angle of the steady destruction reduces. So the rock block is easy to lose its steadily.

Key words: rock mechanics; low-angle structural-plane; shear band; moment of force; rock-body state; groundwater

1 引 言

关于缓倾角结构面的形成机理一直是近几十年地质构造研究关注的重点内容，然而这些研究大多都脱离了岩石的本构关系以及受力情况，仅仅从已知现象推理，因此对于缓倾角结构面的形成机制各有其说。

（1）对于岩石的剪切破坏传统研究一直力图从岩石受力及变形的方面来解释这种现象，如很多学者就层状岩体剪切破坏面方向的影响因素进行分析，提出一系列剪切破坏模式下岩石的破坏准则。当有力矩作用存在时，摩擦面上正应力的分布不是均匀的，在发生剪切破坏前的加载过程中会有一个剪应力调整阶段[1]。试验表明剪切带是有一定厚度的，认为厚度和材料的平均粒径有关[2, 3]，可用非局部的梯度塑性理论研究剪切带的宽度[4]。

收稿日期：2006-11-09
基金项目：本项目受中国科学院知识创新工程重要方向项目资助（No.kzcx2-yw-113）。
作者简介：孙强，男，1981 年生，博士研究生，从事工程地质、岩土工程研究。E-mail: sunqiang04@126.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（2）处于岩体中的地下水，会在岩体的不连续面边界上会产生润滑作用，使不连续面上的剪应力效应增强，诱发沿着不连续面上岩体发生剪切运动，在受降水入渗使得地下水位上升到结构面上时尤其显著。地下水对岩体结构面上产生的润滑作用反映在力学上，就是使岩体的内摩擦角减小。地下水对岩体的软化和泥化作用主要表现在对岩体随含水率的变化，发生由固态直至液态的弱化效应。软化和泥化作用使岩体的力学性能降低，凝聚力和内摩擦角值减小。这些弱化效应在结构面上体现的尤为明显

本文在有限宽度剪切带的基础上，对岩石剪切破坏进行力矩分析，得出了岩石剪切破坏角的规律，并用来解释缓倾角结构面的形成机制，同时分析地下水引起的结构面稳定性问题。

2 模型基础

破坏模型如图 1 所示。假设岩石试样为单轴压缩剪切破坏，试样两端受力，其内部某一可能破坏带法线与轴向压力夹角和剪切带与轴向加载面的夹角 θ 相等，破坏带宽度为 w，试样高度为 L。剪切带内部产生剪切破坏。

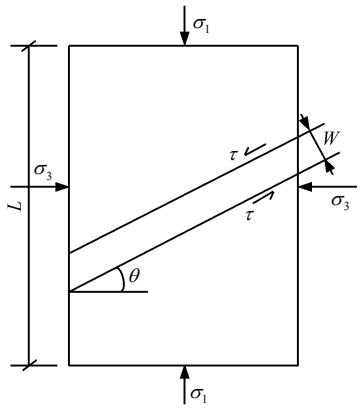


图 1 岩石试样剪切破坏模型

Fig.1 The sample shears the model of destroying

剪切带的宽度与试样剪切带的粗糙程度及起伏角有关。由于 w 的存在，剪切带边缘平行于剪切带的剪应力必然对剪切带存在一个力矩 M_τ。为了抵抗试样的转动，又必然存在一个抵抗力矩 M_π，抵抗力矩只能由剪切带的支持力提供，因此在剪切带上支持力并不是均匀分布的。当轴向压力 σ_1 较小时，支持力和剪切力都很小，可视为均匀分布；随着 σ_1 的增大，支持力和剪切力都增大，出现非均匀分布，在局部表现为应力集中，并且出现局部破坏，而在整体上表现为力矩平衡。当剪切力矩大于支持力矩时，宏观上剪切破坏发生。

3 剪切破坏与剪切带倾角

岩石试样单轴受力压缩，d 为轴向压缩位移。文献[4]提到 d 根据虎克定律可以表达为

$$d=\frac{\sigma_1-\nu\sigma_3}{E}L \tag{1}$$

式中：E 为弹性模量；ν 为泊松比。假定轴向位移主要体现在剪切带区域，则近似有

$$w=d\cos\theta \tag{2}$$

$$\tau_\theta=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\sin 2\theta \tag{3}$$

$$M_\tau=\tau w \tag{4}$$

由式（1）~（4）最终可得

$$M_\tau=\frac{\sigma_1-\nu\sigma_3}{E}\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}L\sin 2\theta\cos\theta=\frac{\sigma_1-\nu\sigma_3}{E}\frac{\sigma_1-\sigma_3}{4}Lf_1 \tag{5}$$

由式（5）可以看出，试样高度及倾角等因素都对岩石试样的剪切破坏有影响，σ_1 与 σ_3 对破坏的影响均为二次函数关系。对 $f_1=2\sin\theta\cos^2\theta$ 进行一次求导可知其极值出现在 35.3° 时，笔者认为当力矩取极大值时出现破坏，但考虑到剪切带上粗糙不平，会出现爬坡效应，这种效应阻碍了力矩效应下的岩石破坏。假定爬坡角为 i，则剪切带倾角可表示为

$$\alpha=35.3°+i \tag{6}$$

式中：i 为 ϕ_f 的函数，$i=f(\phi_f)$，ϕ_f 为岩石的内摩擦角。则式（6）可变为

$$\alpha=35.3°+f(\phi_f) \tag{7}$$

图 2 为不同 θ 值的截面上 f_1-θ 与 f_2-θ 曲线。

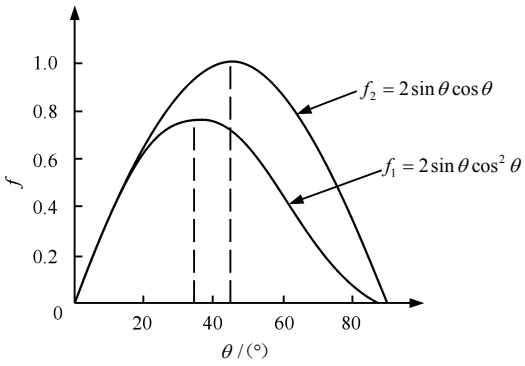


图 2 f_1-θ与f_2-θ曲线

Fig.2 f_1-θ and f_2-θ curves

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对比两条曲线可以看出，截面上 f_1-θ 的峰值出现的要比 f_2-θ 的峰值早，此时 $\theta=35.3°$。

4　对缓倾角结构面的解释

岩体破裂带是应力集中释放造成的破裂变形（图 3）。近些年关于倾角低缓的结构面的研究日益受到关注。根据式（5）和式（7）可知，当 L 很大时会对结构面倾角产生影响。当结构面切穿不同地层，而不同的岩层的强度不同，即使同一岩层在不同方向也不相同，具有强度各异性。当存在相对软弱层时应力会在局部集中。根据式（7）可知，当 i 比较小时，结构面倾角可以出现小于 45°的情况；当存在软弱岩层或软弱面结构时，甚至出现更低的角度滑动。换句话说，随着研究尺度的不同，力矩作用肯定存在。当 i 取值很小且岩体本身就存在内部缺陷（即岩体的隐性结构面，其成因可能是多方面的，如构造运动、成岩作用等等的影响）时，会造成更加低缓的结构面，即 30°以下的结构面。



图 3　缓倾角结构面[5]
Fig.3　Low-angle fault[5]

5　地下水对结构面稳定性的影响

岩体沿着某结构滑动破坏时一定要首先克服岩体内部颗粒之间的凝聚力，产生破裂面或滑动，然后还要克服摩擦阻力才有可能发生位移[6, 7]。干燥情况下，阻止上部岩体滑动的抗滑阻力很大，不易发生滑动，但当岩体中存在地下水时，地下水不仅改变了一些岩体材料的可塑性状态，大大的降低了颗粒之间的凝聚力和岩体的强度，而且当孔隙中完全充满水时，应力的传递方式将由颗粒传递变为孔隙水传递。这时将会出现很高的浮力效应，去抵消结构面上由于岩体重量产生的压力，此时可以将莫尔-库仑破裂准则修正为

$$\tau_n = c + (\sigma_n - p)\tan\varphi = c + \sigma_e \tan\varphi \quad (8)$$

式中：τ_n 为岩体的抗滑强度，即克服阻力发生破裂与滑动的极限剪切应力；c 为岩体的凝聚力；φ 为岩体的内摩擦角；σ_n 为上覆岩体作用在结构面上的正应力，即总压力；p 为结构面上的水压力；σ_e 为作用在结构面上的有效应力，$\sigma_c = \sigma_n - p$。

由式（8）可知，由于孔隙流体压力 p 的存在，使有效应力 σ_e 降低，相应的岩体滑动破裂的极限应力 τ_n 也降低，使得滑动破坏更容易发生。一旦发生剪切破坏后，凝聚力 $c=0$，岩体产生滑动所需的剪切应力服从摩擦定律，即

$$\tau_n = (\sigma_n - p)\tan\varphi \quad (9)$$

当 p 趋于 σ_n 时，τ_n 趋于 0，在这种情况下不需很大的 τ_n 岩体就发生滑动。当破坏面存在的水压力很高时高压浮力效应将对破坏起到控制作用。

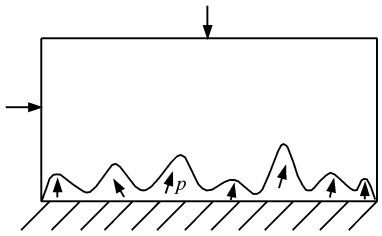


图 4　滑动面上的接触关系
Fig.4　The contact on sliding surface

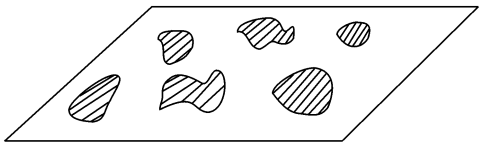


图 5　真实接触面积与视接触面积
Fig.5　The real contact area and the assumed contact area

式（8）中没有将沿结构面上、下岩体之间的真实接触面积和视接触面积区分开（图 4 和图 5）。事实上，位于结构面上、下的岩体接触并非在整个结构面上发生，也只是发生在凸体的顶端。水压作用只是发生在接触面孔洞部位（图 4）。由于真实接触面很小，所以凸体顶端的接触应力很高，使得接触面发生变形。又因为接触面附近的岩体由于水化作用，其力学性质已转化为比较理想的塑性。上述的接触变形可以看成为理想的塑性变形，导致真实接触面积的进一步增加，直到能够承担垂直荷载为止，

$$A^*\sigma_s = W - p(A - A^*) \quad (10)$$

式中：A^* 为结构面上、下的岩体的真实接触面积；σ_s 为塑性岩体的屈服正应力；W 为上覆岩体的重

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量； p 为水压； A 为结构面面积。

由式（10）得

$$A^* = \frac{W - pA}{\sigma_s - p} \tag{11}$$

即为考虑结构面上岩体与水相互作用后结构面上、下的岩体的真实接触面积。假定结构面上、下岩体的接触面积达到 A^* 面积后，结构面上、下岩体的接触为弹性接触，则作用在结构面上的有效应力 σ_e 为

$$\sigma_e = \frac{W - p(A - A^*)}{A^*} \tag{12}$$

令 $\lambda = A^*/A$，则

$$\sigma_e = \frac{1}{\lambda}(\sigma_n - p) + p \tag{13}$$

将式（13）代入式（1），得

$$\tau_n = c + \left[\frac{1}{\lambda}(\sigma_n - p) + p\right]\tan\varphi \tag{14}$$

即为考虑水压浮力效应以及结构面上、下岩体真实接触面积后的莫尔-库仑破裂准则。由式（14）可以看出，即使岩体破裂（ $c = 0$ ）， p 趋于 σ_n ，但 $\lambda \neq 1$，岩体要产生滑动还要克服 $p\tan\varphi$ 的抗滑力，体现了流体能够把压力传递到各个方向。

倾斜结构面上自重作用下岩体滑动的临界角所满足的方程为

$$W\sin\theta = \tau_n A^* \tag{15}$$

即

$$\sin\theta = \tau_n A^*/W \tag{16}$$

将式（14）代入式（16），得

$$\sin\theta = \frac{\lambda A\left\{c + \left[\left(\frac{1}{\lambda}(\sigma_n - p) + p\right)\right]\tan\varphi\right\}}{W} \tag{17}$$

即

$$\sin\theta = \frac{\lambda(c + p\tan\varphi) + (\sigma_n - p)\tan\varphi}{\sigma_n} \tag{18}$$

由式（18）可以看出， λ 越小，即 A^* 越小，则 θ 越小，说明在结构面上、下真实接触面积越小，岩体滑动所需得临界角就越小。而水压 p 的增加有助于 A^* 的减小，因此在水压作用下岩体只需较小的倾角就会发生滑动。

需要指出的是，在考虑水对结构面的稳定性影响时，本文没有从力矩的角度分析，这是因为是地下水的影响主要体现在对结构面本身的改变上。当地下水和力矩同时存在时，对结构面稳定影响将更加不利。此外，文中主要分析了水的静水压力和浮托力对结构面的影响，而没有分析水的动水压力（渗透力）对结构面的作用，这是因为动水压力只有在结构面贯通和发生渗流后起到显著的作用。关于力矩作用和水的动、静压力共同作用下结构面稳定性研究将另文进行研究分析。

6 结 论

（1）基于力矩模型，本文主要讨论了岩石试件剪切破坏及剪切带的倾角。岩石在发生剪切破坏时破坏带有一定宽度，剪切带上的剪应力和支持力不是均匀分布的，在剪切过程中存在一个调整过程，且有局部集中，导致剪切力矩的存在。在此基础上推导出了式（7），借以判断剪切破坏带倾角，并讨论了缓倾角结构面的形成，得出较为合理的解释。

（2）在结构面稳定性分析中，结构面的位置和滑动角度变化是非线性的，同时随着地下水的加入，发生滑动的条件更容易满足，也就是在水压下岩体更容易发生失稳。地下水的存在减小了 λ 值是发生失稳破坏的一个重要因素。 A^* 越小，即 λ 越小，发生失稳破坏的临界角 θ 就越小。

本文只是一个初步尝试，还需要进一步研究，从模型基础和各种试验的对应中具体分析，并结合野外实际调查，以期待得到力矩作用影响的分析，同时关于地下水对结构面稳定性的影响也需要进一步分析研究。

参 考 文 献

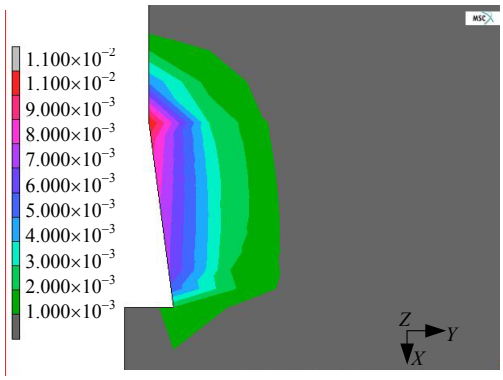
[1] 邱泽华，张宝红. 用力矩模型解释摩擦试验加载过 程中的非线性变化[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23（2）：252－255.
QIU Ze-hua, ZHANG Bao-hong. Theoretic studies on nonlinearity in loading process of frictional experiments with moment considered[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 252－255.

[2] MUHLHAS H B, Vardolakis. The thickness of shear brand in granular materials[J]. **Geotechnique**, 1987, 37(3): 271－283.

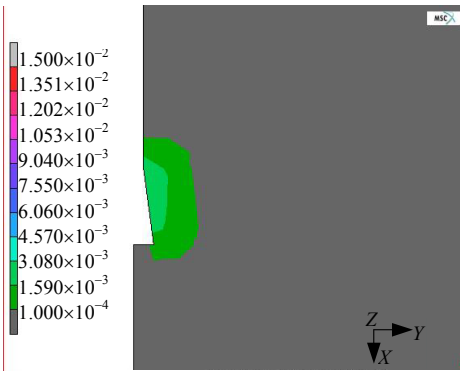
[3] 潘一山，杨小彬. 岩石变形破坏局部化的白光数字散斑相关方法研究[J]. 实验力学，2001，16（2）：220－228.
PAN Yi-shan, YANG Xiao-bin. A study on the deformation localization of rocks by white light digital speckle correlation method[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2001, 16(2): 220－228.

下转第 2120 页

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）桩 C 土体塑性应变分布



（b）桩 D 土体塑性应变分布

图 11 不同持力层土体塑性应变等值云图

Fig.11 The affection of soil characteristics on plastic zone

4 结 语

采用数值分析方法，对影响扩底抗拔桩承载特性的主要因素进行了敏感性分析，根据不同计算参数下结果的对比，并结合工程实际要求得到一些有意义的认识和建议：

（1）扩大头的作用。扩大头阻力由竖向侧摩阻力和竖向压力组成，在土体对扩大头的旁压作用下，这两个力都得到不同程度的提高。对于上海地区的小扩展角度扩底抗拔桩，扩大头侧面上摩擦阻力的贡献远大于竖向压力。

（2）扩大头形状的影响。扩大头直径越大，承载力提高越多，但提高率有所下降。扩大头直径的变化对扩底桩的破坏模式也有很大影响。由于土层和施工机具的限制，上海地区扩大头直径不易太大，D 与 d 的比例宜在 2 左右，扩展角为 8～12°，相对于其他地区而言，扩展角度相当小，但效果明显。从施工角度出发，扩大头长度宜控制在 1.0～2.5 m。在这个范围内变化时，扩底桩的抗拔承载力变化不大，扩大头长度长者，承载力略大。可根据施工、地质等条件综合确定扩大头长度。

（3）持力土层的影响。扩大头所处土层特性对扩底桩的承载力有较大影响，因此建议将扩大头置于相对较硬的持力层内，并有一定的埋深。从扩大头上拔过程中周围土体变形与塑性区的发展，初步确定扩大头顶部在持力层中的埋深宜为（1~3）D，且不小于 1 m。

参 考 文 献

[1] 刘祖德. 抗拔桩基础[M]. 桩基工程技术//北京：中国建材工业出版社，1996：642－674.

[2] 张尚根，**李刻铭**，吴步旭，等. 扩底抗拔桩的变形分析[J]. 工业建筑，2003，33（6）：40－41.
ZHANG Sang-gen, LI Ke-ming, WU Bu-xu. Analysis of deformation of pedestal tension pile[J]. **Industry Architecture**, 2003, 33(6): 40－41.

[3] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A. The influence of soil reinforcement on the uplift behaviour of belled piles embedded in sand[J]. **Geotextiles and Geomenbranes**, 2001, 19: 1－22.

[4] 许宏发. 桩的抗拔承载力与非线性计算理论研究[D]. 南京：**中国人民解放军理工大学**，2000.

[5] **黄绍铭，王卫东，吴江斌，等**. 上海软土地区扩底抗拔灌注桩的研究与应用[R]. 上海：上海软土地基基础学科研究发展中心，2004.

上接第 2114 页

[4] 王学滨，潘一山，任伟杰. 基于应变梯度理论的岩石试件剪切破坏失稳判据[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22（5）：747－750.
WANG Xue-bin, PAN Yi-shan, REN Wei-jie. Instability criterion of shear failure for rock specimen based on gradient-dependent plasticity[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(5): 747－750.

[5] Yadong ZHENG, Tao WANG, Mingbo MA, GREGORY A. Davis 2004 maximum effective moment criteron and the origin of low-angle normal faults[J]. **Journal of Structural Geology**, 2004, 26: 271－285.

[6] 吴宏伟，陈守义. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学，1999，20（1）：1－14.
WU Hong-wei, CHEN Shou-yi. Parametric study of effects of rain infiltration of unsaturated slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(1): 1－14.

[7] 燕彬，李前，许炳，等. 渗流对基坑稳定的影响[J]. 山东建筑学院院报，2001，15（1）：63－65.
YAN Bin, LI Qian, XU Bing, et al. Influence of seepage in pit stability[J]. **Journal of Shandong Institute of Building Materials**, 2001, 15(1): 63－65.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net