

三峡坝区非对称共轭低缓角度剪破裂系

索书田¹ 侯光久¹ 石林² 韦必则¹ 余永志²

(1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; 2. 长江水利委员会综合勘测局, 武汉 430010)

摘要: 在岩石摩擦流变学理论指导下, 运用构造解析方法, 在三峡坝区岩体内多期的、复杂的破裂系统中, 识别出一个不对称的共轭低缓角度剪破裂系统. 几何学和运动学标志证明, 这个影响大坝深层和浅层抗滑稳定性的共轭剪切破裂系统形成较早, 受岩体非均一性制约, 被后期破裂系统切错和改造, 是高流体压力控制下非对称共轴变形的结果.

关键词: 低缓角度剪破裂; 非对称共轴变形; 流体压力; 三峡坝区.

中图分类号: P551; TU452 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)03-0283-07

作者简介: 索书田, 男, 教授, 1936年生, 1960年毕业于北京地质学院地质系, 长期从事构造分析、变质岩区构造、岩石圈流变学及 UHP 变质带构造学的教学和研究工作.

举世瞩目的长江三峡水利枢纽跨世纪工程(简称三峡工程)正在顺利兴建. 为了确保工程质量, 从选址、勘察、论证、施工指导到工程监测, 我国地质及工程地质工作者进行了几十年的艰苦劳动和研究. 由于采用了多学科、多手段的综合研究, 并引进和创新了许多现代地质学及工程地质学理论及方法, 三峡坝区的地质研究水平不仅在国内是先进的, 许多领域在国际上也占有一席之地. 有大量的公开和内部专著、论文问世, 其中, 由陈德基等^[1]主编的《三峡工程地质研究》, 全面地总结和检阅了三峡工程地质勘察研究成果, 为进一步继续对某些专题性地质及工程地质问题的深入研究, 奠定了坚实的基础.

坝区岩体内部发育的低缓角度破裂(low-angle fracture), 是影响大坝深层和浅层抗滑稳定性的重要因素^[1], 曾组织地质技术队伍对它进行过多次专题研究. 迄今, 对其几何学特征和空间分布, 可以说有了基本一致的认识, 但对低缓角度破裂的成因解释, 还存在着很大的分歧. 我们充分利用工程揭露的岩体三维新鲜断面, 在不同尺度上详细地观察了岩体内部多期的、复杂的破裂系统, 在岩石摩擦流变学(frictional rheology)^[2]基本理论指导下, 运用构造解析方法, 区分不同期次的破裂系统, 分别研究其几何学、运动学、流变学和动力学. 其中, 低缓角度的破裂

是由非对称共轴变形(asymmetric coaxial deformation)^[3]形成的共轭剪切破裂系统, 高流体压力(fluid pressure)(p_f)是形成低缓角度破裂的重要因素^[4].

1 几何学及运动学特征

三峡坝址基岩主要为闪云斜长花岗岩及闪长岩, 发育了多期、复杂的破裂系统或阵列. 其中发育的低缓角度破裂(面), 以往多关注和强调向东或南东倾斜、倾角 $10^\circ \sim 30^\circ$ 的一组. 由于三峡工程采用的是坝后式厂房设计方案, 在大坝下游要开挖高达47~48 m的基岩斜坡, 给坝基岩体沿缓倾破裂面向下游滑移造成了临空条件, 形成了不利坝基深层抗滑稳定的边界条件. 因此, 该组破裂面的性质和成因, 为有关方面所关注是必然的. 实际上, 特征一致的低缓角度破裂是由分别倾向东或南东及倾向西或北西两组破裂构成的共轭剪切破裂系统, 在三维空间上组成 Hill 型(Hill-type)网状破裂系^[5]. 这种破裂组合特点, 在左非、左岸非溢流坝段及左厂房坝段看得最为清楚(图1), 两组破裂发育程度大体相当. 而在永久船闸、泄洪坝段、右厂房坝段及右岸非溢流坝段等区段, 向西或北西缓倾斜的一组破裂, 露头上显得发育程度差或极差. 所以, 在整个坝区尺度上, 共轭的两组破裂是非对称的: 一组较发育, 一组不太发育.

低缓角度破裂除产状平缓外, 破裂面多平直、光



图 1 网状低缓角度剪破裂系

Fig. 1 Anastomosing low-angle shear fracture system

1. 闪云斜长花岗岩内区域性面理(S); 2. 扁平透镜体状角闪片岩包体; 3. 石英脉; 4. 低缓角度剪破裂及充填的绿帘-石英脉; 5. 蚀变的低缓角度萌芽剪破裂; 6. 高角度破裂或断层; 7. 扩张破裂割阶; 8. 邻破裂挤压面理

滑,沿倾斜方向呈羽列组合,尖灭再现. 破裂缝大都
被绿帘石-石英脉或复合脉充填,脉厚一般 2~3
cm,厚者可达 20~30 cm. 镜下观察表明,这些绿帘
石-石英脉多为碎裂岩、绿帘石细脉、葡萄石脉、石
英细脉构成,有复杂的变形世代和结构. 破裂面上的
纤维状矿物生长线理、叠瓦状纤维席状体(imbricate
sheets of fibers)^[6]、扩张割阶(dilational jog)^[7](图 2)
和先期脉体位移等运动学标志均显示,低缓角度破
裂具剪切面特征,沿着破裂面,上盘相对下盘向上运
动(逆冲),显示沿两组破裂面滑动和位移是相反的
和对冲的,并且它们的几何形状、运动学特征和彼此
交切、联合现象都证明,两组破裂是大体同时形成
的;所以,是共轭的.

依据现有同位素年代学资料,脉状绿帘石-石
英(脉)年龄为(217±7) Ma^[1]. 野外观察表明,低缓
角度共轭剪破裂切割岩体内发育的区域面理(S)、
花岗质及伟晶岩脉,以及粗玄质岩墙,又被后期高角
度断层及破裂系统切错、改造,局部力学性质和运动
学特征也有所变化,推测其形成时代是在印支-燕
山期.



图 2 扩张割阶实例

Fig. 2 Examples of dilational jogs in the dam region

a. 六闸首; b. 二闸首; Q. 石英脉

2 古主应力轴方位估算

利用库伦剪切破裂准则及几个典型区段和露头
尺度上的低缓角度剪破裂方位测量资料,运用赤平
投影技术,可估算出形成共轭低缓角度剪破裂系
统时的古主应力轴方位(图 3). 总的来看,最大主应
力轴(σ_1)近东西向,缓倾伏,中间主应力轴(σ_2)近水
平,向南倾伏,最小主应力轴(σ_3)近直立. 在不少情



图3 共轭低缓角度剪切破裂系统形成时的主应力轴赤平投影图解

Fig. 3 Stereograms showing orientations of the principal stresses during the formation of the conjugate shear fracture system

a. 左厂房坝段, 30次测量, 等值线为百分之一面积内 3.0% ~ 10.0% ~ 17.0% ~ 23.0%, 求出 σ_1 为 NW289°∠14°, σ_2 为 SW198°∠4°, σ_3 为 NE61°∠86°; 实测 σ_2 方位为 SE170°∠11°, SW197°∠14°, SW220°∠9°和 SW189°∠6°; b. 综合图解: ▲. 永久船闸六闸首; ●. 左非 97 m 平台; ○. 左非 90 m 平台; □. 同 a

况下, 两组低缓倾斜的剪破裂面交线(σ_2)被工程揭露出来, 可直接用罗盘进行测量, 其结果与用赤平投影网估算的结果相近或相同. 事实和估算结果表明, 三峡坝区共轭的低缓角度剪切破裂系统, 是在近东西向共轴挤压(纯剪)体制下形成的. 这些认识也由近水平的、与低缓角度剪破裂联通的、充填厚的绿帘-石英脉的张性或张剪性破裂的发育得到佐证(图4). 在这些张性或张剪性破裂内充填脉状物质具栅状结构(palisade texture), 纤维状矿物的生长方向垂直脉壁, 且近直立, 与最小主应力轴(σ_3)方向平行.

3 非对称共轴变形

除左非、左非溢流坝段及左厂房坝段局部地区之外, 在整个坝区尺度上, 共轭的两组低缓角度剪破裂发育很不对称, 向西或北西倾斜的一组, 宏观上不很发育或极不发育, 尤其在永久船闸区段及泄洪坝段, 该组低缓剪破裂仅可零星观察到. 不过, 只要能够发现其踪迹, 它们的几何学、力学性质及运动学标志, 都具有前述的低缓角度剪破裂的共同特征. 所以, 问题的关键是如何解释共轭剪切破裂系统中的明显非对称性.

理论和实验业已证明, 在各向同性的均质岩石中, 在共轴挤压或拉张的力学条件下, 一般会在达到或超过岩石的剪切破裂极限时, 可以同时产生两组



图4 充填张性及张剪性破裂的绿帘-石英脉

Fig. 4 Tension and tension-shear fractures filled by epidote-quartz veins

大体对称的剪切破裂, 它们之间的夹角受岩石的内摩擦角大小控制, 相继沿破裂面发生滑动时, 遵守Byerlee摩擦滑动定律^[8]或修正的Byerlee定律^[9]. 但自然界实际岩石破裂和摩擦滑动现象的观察证明, 即使在均质的岩体内部出现的共轭剪切破裂, 同时同等发育的现象也是罕见的, 往往一组比另一组发育, 形成时间也有先后, 或相互交替, 虽然它们是同处于一个变形场(deformational field)内^[3].

在各向异性或非均质的岩石(anisotropic rock)情况下, 剪切破裂的发育, 要受岩石内部先存的不均一性(如古老面理或成分层理)以及主应力轴与先存不均一性构造间几何关系的控制^[3, 10]. 三峡坝区的闪云斜长花岗岩和闪长岩体, 都是前震旦纪的古老变形侵入体^[1, 11], 均发育一组由矿物定向排列形成的区域透入性面理(S). 研究区统计测量结果显示, 区域面理代表性产状为 NW284°∠56°, 变化区间为 NW330°~SW230°∠47°~82°, 构成一种假单斜层状构造. 实验和理论都表明^[3], 如果挤压轴(σ_1)与古老面理(S)垂直(对称共轴变形), 如图5a所示, 则会发育两组大体对称的共轭剪切破裂, 还可能发育对称的面理布丁构造(foliation boudinage)^[3]. 倘若挤压轴(σ_1)与面理(S)斜交(如图5b所示), 则会出现非对称共轴变形, 虽然也会产生共轭剪破裂系统, 但随着递进变形, 与古老面理呈小角度相交的一组剪破裂向面理(S)方向旋转, 宏观上逐渐变得不活动, 微观上, 则沿着S面透入性滑动会继续进行. 而与面理大角度相交的一组剪切破裂, 由于逐渐向拉伸方向(σ_3)旋转, 因而将继续滑动, 且愈来愈发育. 这种位态关系, 与三峡坝区的实际情况是基本一致的. 图5c示简单剪切情况, 不适于用来解释三峡坝区低缓角度剪切破裂系统的发育过程. 因此, 三峡坝区低缓角度共轭剪切破裂系统, 是非对称共轴变形的结果,

图 5 在非均质岩石中剪切破裂方位与主应力轴关系

Fig. 5 The relation between orientation of the shear fractures and the principal stresses in deformed anisotropic rocks
粗实线示一组较发育的剪破裂. a. 对称共轴变形; b. 非对称共轴变形; c. 简单剪切变形. S. 古老面理; θ . 面理与 σ_3 (拉伸) 方向夹角



图 6 三峡坝区非对称共轭低缓角度剪破裂系或阵列力学模式

Fig. 6 A mechanical model showing the asymmetric conjugate shear fracture system or array in the dam region
粗实线示一组较发育的剪破裂. S. 区域面理

主要反映由先期区域性面理(S)体现的岩体非均质性及对破裂变形的控制作用,其总体构造格局及其与主应力轴关系的力学模式表示在图 6 上.

沿着区域性面理(S)透入性滑动,在微观尺度上,可由绿泥石化的角闪石强烈弯曲、膝折(kink band)及沿黑云母(001)解理面裂开、滑动和绿帘石物质充填(图 7)得到证明.



图 7 沿黑云母(001)解理的裂开和绿帘石物质的充填
Fig. 7 Sketch showing biotite fragments with openings along (001) and filled by epidote crystals or aggregates

视域直径约 5 mm. Bi. 黑云母; Ep. 绿帘石

4 构造均匀区段的划分

除了区域性面理(S)之外,岩体内花岗质脉体、伟晶质脉体、粗玄质岩墙发育程度、变形的古老岩层或岩体包体多寡等,也是导致岩体不均一性的重要因素.微观上,暗色矿物(角闪石和黑云母)含量、矿物优选定向程度以及颗粒大小,都是影响低缓角度共轭剪破裂发育的因素.依据我们的研究,区内较大型的断层或破裂带,如 F_7 , F_{23} 和 F_{215} 等,主要是在共轭低缓角度剪切破裂系之后形成的,因此,它们对低



图8 新太平溪镇(a)及左厂房坝段(b)构造剖面

Fig.8 Sketch sections showing the development of the low-angle shear fracture system

ρ . 伟晶岩脉; γ . 花岗质岩脉; Q. 石英脉; S. 区域面理

缓角度剪切破裂系只有叠加改造作用,而无控制效应.在这些断裂带的两侧或上下盘,共轭低缓角度剪切破裂系统没有明显的差异,因此,不能作为均匀区段的划分边界.

从现场观察及剖面(图8)所示特点清楚看出,虽然两地基岩岩性大体一致,但花岗质、伟晶质脉体发育程度截然不同.新太平溪镇地区的花岗质、伟晶质脉体较为发育,形成网络状,实际上反映的是先期破裂系统或阵列.该处共轭低缓角度剪破裂主要发育向东或南东倾斜的一组,而且,组合的规律也不太明显.在左厂坝段一带,很少看到花岗质及伟晶质脉体,偶而见到花岗质脉体,也仅只3~6 cm厚.该区段代表坝区应变相对弱和相对均匀的部位.这个地段,共轭的两组低缓角度剪破裂均发育,虽然向东或南东倾斜的一组显得更为强大一些.右厂房坝段及右岸非溢流坝段低缓角度剪切破裂发育特征与新太平溪镇一带类似.只是花岗质、伟晶质脉体更为发育,闪云斜长花岗岩体与闪长岩体接触关系也颇为复杂,因而,共轭低缓角度剪切破裂系统及后期其他断层和破裂系的发育,都有独特的性质.

据上述,按照共轭低缓角度剪切破裂系统发育特点及主要控制因素,大体上将坝区划分成3个构

造均匀区段,即由北到南:(1)永久船闸区段,(2)左非一左厂房坝段区段,(3)泄洪坝段—右厂房坝段.各区段之间是逐渐过渡的,主要是由物质(组成)及结构上的过渡控制的.后期的破裂系统叠加和改造这些构造区段,其构造均匀区段划分需重新组合和调整.

5 流体压力效应

根据岩石摩擦流变学理论^[2],脆性强度可用摩擦剪切破裂准则^[12,13]表示,即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta g \rho z (1 - \lambda),$$

其中: $\sigma_1 - \sigma_3$ 为差异应力, g 为重力加速度, ρ 为岩石密度, z 为深度, $\lambda = p_f / \rho g z$ 为孔隙流体因子, $\beta = 3$ (逆断层).由此可以看出,流体压力(p_f)是控制岩石破裂和摩擦滑动过程的关键因素.结合三峡坝区实际,尤其是左厂房坝段的Hill型网状共轭低缓角度剪切破裂系统(图1,4)的几何学和运动学特点,可以推测其形成时的物理条件是, $p_f \approx \sigma_3$, $\lambda \rightarrow 1.0$, $\sigma_1 - \sigma_3 < 4 T$ (T 岩石抗张强度),大体为10 MPa(按闪云斜长花岗岩的抗张强度2.5 MPa计),形成深度在7~10 km范围内.低缓角度剪破裂断层岩性



图 9 挤压逆冲断层、伸展正断层和走滑体制形成的破裂网络发育的流体压力条件(据 Sibson^[4]简化)

Fig. 9 Fluid pressure conditions for activation of fault-fracture meshes in compressional thrust-fault, extensional normal-fault, and strike-slip regime

质,云母及绿泥石低温塑性变形行为,绿帘石石英脉体内矿物栅状结构,强烈的蚀变现象,以及逆冲运动特征,都反映了上述物理条件的推断是合理的,表明流体及流体压力在共轭低缓角度剪破裂形成过程中曾起过重要作用.形成共轭剪切破裂差异应力很小(10 MPa),并不需要强大的构造作用力,因此,也不能反映一次大的地壳运动过程.由脉体的规模及分布分析,左非、左岸非溢流坝段以及左厂房坝段,流体供应较其他区段充分,流体流动方向平行 σ_2 :这也许是促进对称共轴变形发育的因素之一.高或超高流体压力的出现,降低了岩石抗剪强度及非均一性对破裂变形的影响.换言之,在这种物理条件下,流体压力成了在水平挤压(共轴)体制下控制低缓角度(逆冲)剪破裂网络发育的主要因素(图 9)^[4,14].

6 结论

(1)三峡坝区基岩中发育一个低缓角度共轭剪切破裂系统,是在近东西向水平挤压(共轴)体制下形成的两组逆冲型剪破裂构成的,局部形成 Hill 型破裂网.(2)共轭低缓角度剪切破裂系内两组剪切破裂发育不平衡,一组较发育,另一组发育弱或很弱,是受岩体内先期存在的非均匀性的区域性面理(S)控制的,因而,共轭剪切破裂系统属于非对称共轴变

形.(3)低缓角度剪切破裂在空间上发育的不均一性,与岩体组成的不均一性有关.花岗质岩脉、伟晶岩脉及粗玄质岩墙发育程度,实际上是它们所代表的古老破裂系统,制约和影响了低缓角度破裂的形成.(4)共轭低缓角度剪切破裂系统,基本上属于脆性域内摩擦滑动流变体制,高的流体压力是控制其发育的关键因素.但是,对称共轴变形与非对称共轴变形同在三峡坝区发育,表明它们都是在相似的动力学条件下形成的.

该项研究是在长江水利委员会综合勘测局陈德基和薛果夫两位教授指导下进行的,三峡勘测院许多工程师参加了工作和讨论,并提供了良好的资料和工作条件,校绘图室方敏同志清绘图件,一并致谢.

参考文献:

- [1] 陈德基,薛果夫,徐福兴,等.三峡工程地质研究[M].武汉:湖北科学技术出版社,1997.
- [2] Ranalli G. Rheology of the lithosphere in space and time [A]. In: Burg J P, Ford M, eds. Orogeny through time [C]. London: Geological Society Special Publication, 1997. 19~37.
- [3] Platt J P, Vissers R L M. Extensional structures in anisotropic rocks [J]. J Struct Geol, 1980, 2(4): 397~410.
- [4] Sibson R H. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes [J]. J Struct Geol, 1996, 18(8): 1031~1042.
- [5] Hill D P. A model for earthquake swarms [J]. J Geophys Res, 1977, 82: 347~352.
- [6] Marshak S, Mitra G. Basic methods of structural geology [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988.
- [7] Sibson R H. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems [J]. Geology, 1987, 15(8): 404~701.
- [8] Byerlee J D. Friction of rocks [J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116: 615~626.
- [9] Brace W, Kohlstedt. Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiment [J]. J Geophys Res, 1980, 85: 6248~6252.
- [10] Cobbold P R, Cosgrove J W, Summers J M. The development of internal structures in deformed anisotropic rocks [J]. Tectonophysics, 1971, 276: 23~53.
- [11] 冯定犹,李志昌,张自超.黄陵花岗岩类岩基南部岩体侵入时代和同位素特征[J].湖北地质,1991,(2): 1~12.
- [12] Sibson R H. Frictional constraints on thrust, wrench and

- normal faults [J]. *Nature Phys Sci*, 1974, 249: 542 ~ 543.
- [13] Lin A. S-C cataclasite in granitic rock [J]. *Tectonophysics*, 1999, 304: 257 ~ 273.
- [14] Kohlstedt D L, Evans B, Mackwell S J. Strength of the lithosphere: constraints imposed by laboratory experiments [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100: 17587 ~ 17602.

ASYMMETRIC AND CONJUGATE LOW-ANGLE SHEAR FRACTURE SYSTEM IN THREE GORGES DAM REGION, CHINA

Suo Shutian¹ Hou Guangjiu¹ Shi Lin² Wei Bize¹ Yu Yongzhi²

(1. *Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Comprehensive Exploration and Surveying Bureau, Changjiang Water Conservancy Commission, Wuhan 430010, China*)

Abstract: An asymmetric and conjugate low-angle shear fracture system is identified in the multi-phase complex fracture systems within the rock mass of the Three Gorges dam region, with the help of the rock frictional rheology theory and the structural analytical method. The geometry and kinetic indicators show that this conjugate shear fracture system affected by the sliding-resistance stability in the deep and shallow layers of the dam occurred at a relatively early age, and then was sheared and modified by the fracture systems in the later period, constrained by the heterogeneity of the rock mass. In this sense, this conjugate shear fracture system is a product of the asymmetrical coaxial deformation restrained by the high fluid pressure.

Key words: low-angle shear fracture; asymmetric coaxial deformation; fluid pressure; Three Gorges dam region.