

# 原位岩体在剪切和摩擦试验中的视电阻率变化特征研究\*

陈 峰 陈大元 曹其平 于淑筠

(中国北京100871北京大学地球物理系)

许东俊 陈从新 余毓良 盛建豪

(中国武汉430071中国科学院武汉岩土力学研究所)

## 摘要

在贵州省贵定县石灰石露天矿区,对倾斜的3条典型软弱夹层面  $C_3^1/C_3^1, C_3^1/C_2^2, C_2^2/C_2^1$ , 用水利水电岩石力学试验规程,选择楔形体试验方案第二方案,进行了岩体原位剪切、摩擦试验。同时测量了夹层的视电阻率变化和穿过夹层的声波速率的变化。8块试体,27测道,38轮回视电阻率资料,显示出电阻率变化有较明显的特征:1. 剪切、摩擦阶段,视电阻率在屈服极限点后开始加速变化,到破坏极限点附近,出现最大的变化速率和变化幅度(不变化的测道除外);2. 同一块试体,各测道电阻率变化不同,与测道位置有关,存在“敏感”部位;3. 剪切前预加正应力段,电阻率普遍下降,少数不变;4. 试体卸去剪应力后,电阻率不能完全恢复,个别测道电阻率变化有滞后效应。

关键词 原位;软弱夹层;屈服极限;破坏极限;敏感

## 1. 引 言

近年来,试件的尺寸大小对试件物理性质的影响,即所谓试件的尺度效应问题,越来越受到人们的关注(Brace, 1981; Cook and Heart, 1981)。80年代初,美国和苏联利用新建和原有的大型实验设备,率先开展了室内大试件实验研究工作(Dieterich, 1981; Стаковский, 1983)。我国起步稍晚,但也已有了一定程度的开展(陆阳泉等, 1990)。开展大试件实验的意义,除解决尺度效应问题外,还有便于多手段综合对比观测,便于显示物理力学效应的局部变化现象与前兆的区域特性等6个特点(耿乃光, 1987)。

除试件的尺度效应外,试件的环境效应,也早受到了人们的重视。试件的环境效应,是指从岩体上取出完整岩块加工成样品置于实验室的环境中,其物理性质与现场岩体是否

\* 地震科学联合基金会资助项目。

1992年1月28日收到本文初稿,1992年7月6日决定采用。

相近的问题,这方面的研究工作,过去做得比较多,也比较早(张同俊,1981;赵玉林等,1983).但大多是利用矿压等,在加载条件未知情况下做的.把大尺度岩石力学实验与现场实验结合起来用于地学研究,国内开展该方面研究工作的学者还不多,许东俊、耿乃光1987年开展了这方面的研究工作(许东俊、耿乃光,1989).

大尺度、原位试件试验,是联系实验室与野外实际应用的桥梁,是实验室研究工作更深入开展的必要途径.1989年,我们在广东从化抽水蓄能电站作了现场大尺度弹模试验(陈大元等,1992)和三轴围压试验电阻率测量工作(待发表).本试验是继上两次试验后,又一次结合工程项目进行的现场实验研究.该试验在测量岩体剪切和摩擦变形特征的同时,测量了岩体软弱面上的视电阻率和穿过软弱面声波速率的变化.类似研究,在国内外尚未见报道.

## 2. 试验场地概况和试验方法

试验在贵州省贵定县石灰石露天矿进行.该矿区位于贵定向斜西翼,呈单斜状.岩层向东倾斜,倾角为25°至40°左右.矿层位于石炭系上统中上部( $C_3^2, C_3^3$ ),矿体直接底板 $C_3^1$ 为深灰色鲕状灰岩,鲕状灰岩下部为细-中细白云岩 $C_2^1$ 和厚层灰岩 $C_2^2$ .岩层层面清楚,在 $C_3^1, C_2^1, C_2^2$ 中及其界面上均有软弱夹层,以 $C_3^1$ 中的最发育,产状与岩层相同.矿区涌水主要受大气降雨影响,水流可自然排泄.矿区溶岩现象发育,地表露头溶蚀呈犬牙状.根据边坡地质条件和露天采场情况,在边坡岩体中部、垂直岩体走向开挖了一条试验主洞.在主洞内沿3条典型软弱夹层 $C_3^1/C_3^2, C_3^1/C_2^2, C_2^2/C_2^1$ 开挖了3条试验支洞.支洞中的 $C_3^1$ 为浅灰色-灰红色中厚层状与薄层状灰岩互层,具隐晶质结构,层间可见顺层发育的灰绿色粘土页岩,厚几mm.少量可达1-2cm,沿走向和倾向不稳定,遇水易软化,Ⅲ#试验支洞选择在此层位.支洞中 $C_3^1/C_2^2$ 界面为灰绿色粘土质页岩夹薄层白云质灰岩,厚10-20cm,节理发育,较破碎,Ⅱ#试验支洞选择在该层位.支洞中 $C_2^2$ 为灰白-灰黄色细-中细晶质厚层白云岩,胶结致密、坚硬,节理发育; $C_2^1$ 为深灰色中厚层状灰岩,沿层面可见断续分布的方解石脉充填,在其顶部有一层黑灰-灰绿色白云质灰岩,厚0.4-0.6m,与上覆 $C_2^2$ 白云岩为渐过渡的渐接触关系,底部可见一层厚1-2cm的灰绿色粘土质页岩,Ⅰ#试验支洞选择在此层位.

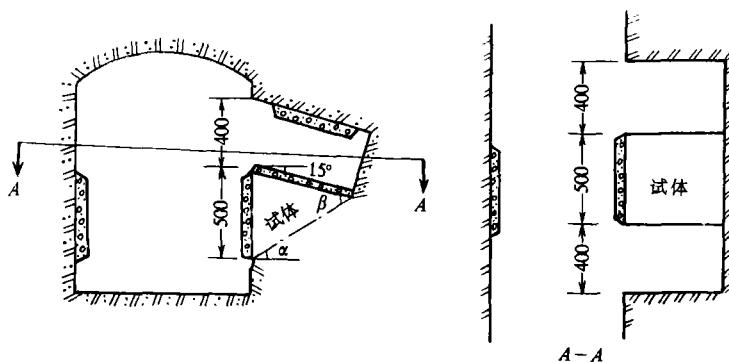


图1 试体状况图,单位 mm

试体布置在3个试验支洞中,每个支洞选择软弱夹层开挖4块试体,按水利水电岩石力

学试验规程,选择楔形体试验方案第二方案,在洞壁上切割预留出试体。试体两受方面的尺寸为 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ ,见图1。试体开挖好后,在其顶面和正面上浇注砼,并放钢筋网,同时浇注顶座和后座。

试验装置见图2。电极分别布置在试体底部四周的软弱夹层中。用直流稳流源供电,多通道转换器、超高阻抗数字电压表和单板机组成自动多道测量系统,对视电阻率进行自动巡回测量。在夹层的上、下盘固定声波速率换能器,用SYC-2声波岩石参数测定仪测量穿过软弱夹层的声波速率的变化。加载时,水平和垂直两个千斤顶按预先计算好的压力加压,使正应力达到一个预定值,在此恒定的正应力作用下,施加剪应力直到剪断。接着,又在4种不同正应力作用下,作4次摩擦试验。正应力以每分 $0.05\text{MPa}$ 的速率增加,施加到预定值后稳压,直稳压到间隔5分钟读数的两次变形差少于 $0.05\text{mm}$ 为止。剪应力加载速率与正应力相同。试体破坏标准为:试体沿剪切面滑动 $5\text{mm}$ 或在这之前变形不断增长,使垂直载荷保持不住。摩擦试验与剪切试验加载方法相同。

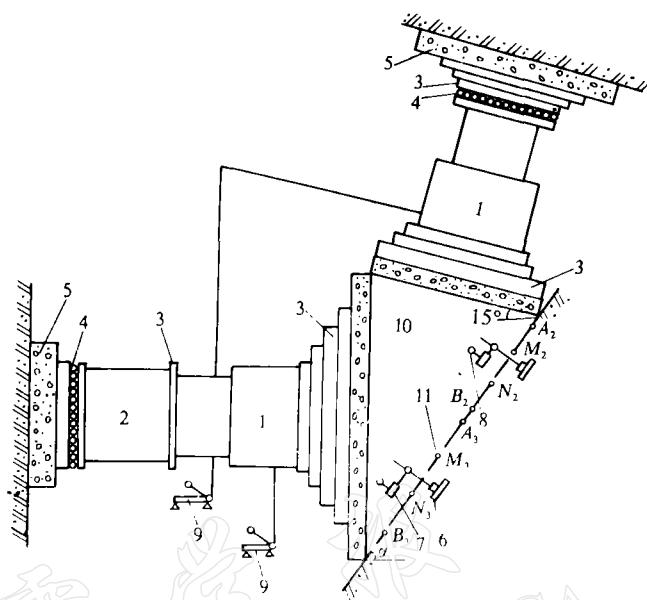


图2 软面剪切试验装置图

1. 千斤顶;2. 传力柱;3. 传力板;4. 滚轴;5. 砼传力块;6. 磁性表座;7. 位移测点;8. 百分表;9. 油泵;10. 试体;11. 电极

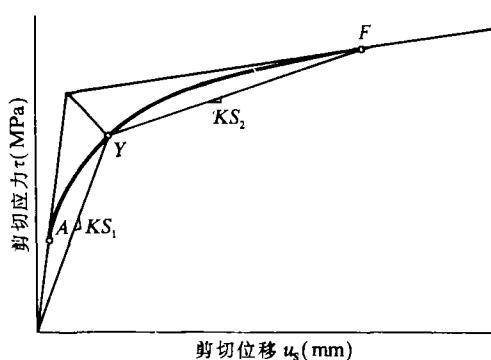


图3 典型应力-位移曲线和强度、刚度取值方法  
F为破坏极限,Y为屈服极限,A为比例极限,KS<sub>1</sub>为屈服前平均剪切刚度,KS<sub>2</sub>为屈服后平均剪切刚度

### 3. 主要结果

本试验采用库伦强度准则  $\tau = c + \sigma \tan \phi$  计算剪切强度参数。公式中,  $\tau$  为剪切面上的剪应力,  $\sigma$  为剪切面上的正应力,  $c$  为粘聚力,  $\phi$  为内摩擦角。抗剪强度破坏极限和屈服极限按两种方法确定:(1) 取屈服后区塑性流动的起点,作为破坏极限点  $F$ , 相应的剪应力为  $\tau_f$ ; 把屈服阶段中点作为屈服极限点  $Y$ , 相应的应力为  $\tau_y$ (见图3);(2) 取对应于 $1.0\text{mm}$  剪切变形的剪应力作为  $\tau_f$ , 把对应于 $0.05\text{mm}$  剪切变形的剪应力作为  $\tau_y$ 。该试

验电阻率共作8块试体,布极27道,作剪切、摩擦试验共38轮回,其电阻率变化显示出较明显的特征:1) 剪切、摩擦阶段(见图4),视电阻率在屈服极限点  $\tau_y$  后,开始加速变化,到破

坏极限点  $\tau_f$  附近, 出现最大的变化速率和变化幅度(不变化的测道例外); 2) 同一块试体, 各测道电阻率变化不同, 与测道位置有关, 存在“敏感”部位, 见图4、图5; 3) 剪切前预加正应力段, 电阻率普遍下降, 少数不变, 如图6a 所示; 4) 试体卸去剪应力后, 电阻率不能完全恢复, 个别测道电阻率变化有滞后效应, 见图6b.

该试验力学结果参看陈从新和盛建豪(1990)文章, 声波速率的结果另文讨论.

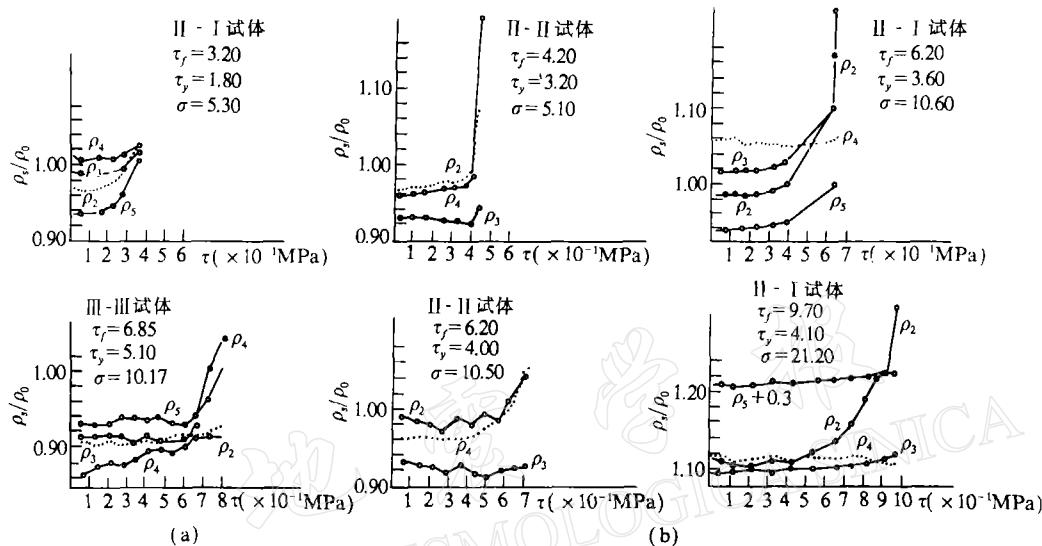


图4(a) 剪切试验、视电阻率与剪应力关系; (b) 摩擦试验、视电阻率与剪应力关系  
 $\tau_f$  为破坏极限应力( $\times 10^{-1}$  MPa),  $\tau_y$  为屈服极限应力( $\times 10^{-1}$  MPa),  $\sigma$  为恒定的正应力( $\times 10^{-1}$  MPa)

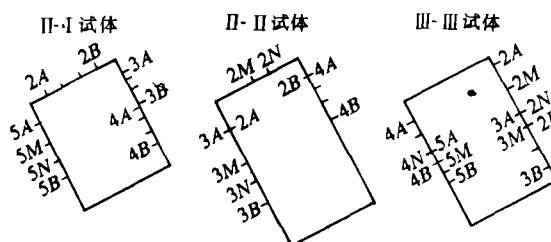


图5 电极布置图

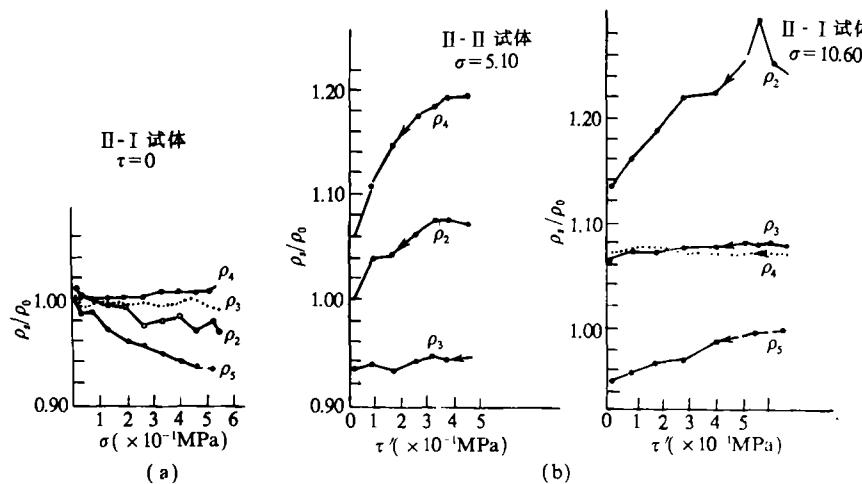


图6(a) 视电阻率与预加正应力关系; (b) 卸压时, 视电阻率与剪应力关系  
 $\tau$  为剪应力 ( $\times 10^{-1}$  MPa),  $\sigma$  为恒定的正应力 ( $\times 10^{-1}$  MPa)

#### 4. 讨 论

##### 4.1 结果的分析和讨论

本次试验的电极直接埋设在软弱夹层中, 电极为铜丝电极, 直径为 1.0mm, 埋深 10mm 左右, 极距从十几 cm 到四十几 cm 不等。

夹层含水量为:  $C_2^2/C_2^1$  层含水 3.08%,  $C_3^1/C_2^2$  层含水 10.18%,  $C_3^1/C_3^2$  层含水 9.44%。试体四周切开, 只底部与基岩相连, 水可以自由流动, 无外来水补给。由于夹层含水, 其电阻率比两盘岩石的电阻率小很多, 电力线主要集中在夹层内, 因此, 对电阻率变化的机理解释, 可以用夹层水溶液网络导电通路的变化来分析。

在试验初期, 预加的正应力使试体与夹层的接触更良好, 也使夹层原有的微裂隙闭合, 起到了压密作用, 水溶液网络导电通路会更畅通, 致使电阻率普遍下降。这与以前我们作的非饱和含水岩石加压初期的电阻率特性相似(陈大元等, 1987), 表明夹层含水是非饱和的。

剪切、摩擦阶段, 从力学结果  $\tau-u$  曲线和  $\tau-\sigma$  曲线得到: 夹层的抗剪特性表现出弹-塑-粘性, 且抗剪强度与摩擦强度接近。电阻率的变化与力学结果相对应。在剪切和摩擦试验中, 电阻率变化的基本形态相似, 剪切、摩擦初期, 电阻率缓慢上升, 当夹层进入塑性屈服极限后, 破裂加快, 由于没有外来水的补充, 张性裂隙将水溶液网络的导电通路切断、减少, 使电阻率加速上升。当夹层进入破坏极限前、后时, 破裂发生质的变化——断裂、滑移, 导电通路几乎全部被切断, 电阻率猛烈上升, 变化幅度可达到 20—30%。在我们的 38 轮回剪切、摩擦试验中, 多数测道的电阻率变化呈上升趋势。但也有一些测道电阻率变化呈下降趋势和不变。呈下降趋势的测道变化幅度都很小。这表明, 试体夹层不是每一个部位受

力都是一样的. 受张力部位产生张裂隙, 并使原有闭合裂隙张开, 不饱和水重新分布, 使导电通道水膜变薄, 或连通遭到破坏, 电阻率呈上升变化趋势. 受挤压部位裂隙进一步闭合, 电阻率呈下降变化趋势. 受力很小和不受力的部位电阻率不发生变化. 受张力部位, 裂隙可从张开较大, 使电阻率发生大幅度的变化. 而在剪应力作用下, 挤压闭合裂隙是有限的, 所以电阻率下降幅度总是很小. 这样就在软弱夹层中造成了“敏感”部位, 这种由于夹层受力的不均匀性所显示的电阻率变化的区域特性, 更接近野外实际情况, 也是小尺度试件难于测量的.

夹层受力的不均匀性, 除显示电阻率变化的区域特性外, 还显示出电阻率变化的时间差异, 即不同测道, 电阻率变化有先、有后. 本次试验, 多数轮回电阻率变化的时间基本同步, 但也有一些轮回电阻率变化出现明显的“时间不同步”现象(对应一个正应力值, 所进行的剪切或摩擦试验, 称一个轮回). 同一块标本, 在不同的轮回试验中, “敏感”部位和时间差都有变化, “敏感”部位的重复性较好, “时间不同步”现象重复性较差. 造成后一种现象的原因, 可能是力源的微小角度变化.

夹层破裂后呈塑性状态, 去掉剪应力后, 电阻率是不能完全恢复的. 该试验只有个别测道在释放剪应力后, 电阻率变化有滞后效应. 这可能是由于剪应力被释放后(正应力还存在), 试体进行应力调整, 使测道所在部位受力发生变化, 个别测道裂隙加宽或继续破裂引起电阻率继续上升, 而不是下降, 出现滞后效应.

上述结果特征(1)显示: 视电阻率在试体剪断、滑移前加速变化, 有明显的破裂征兆. 若用此法监测含软弱夹层的边坡滑移和断层位移, 可能对工程和地震预报有实际意义.

特征(2)出现的“敏感”部位表明: 即使所有测道均布置在对力敏感的软弱夹层中, 其结果, 敏感程度也不相同. 由此推论, 分布在断层附近的地电台站, 也不会个个都在“敏感”部位上. 对“敏感”部位的进一步研究, 可能对地电台站的台址选择和异常分析有帮助.

#### 4.2 测量误差讨论

本试验测量方法采用, 在每个加压或卸压完毕后和稳压期间, 测量  $MN$  间的电位差. 稳流源电流变化小于 0.5%, 测量  $MN$  间的电位差  $V_{MN}$  时, 先测量一个不供电的  $V_1$ , 然后测量供电的  $V_2$ , 最后测量断电的  $V_3$ .  $V_1, V_2, V_3$  的接通和测量时间, 均根据极化情况调整, 使测值  $V_{MN} = V_2 - (V_1 + V_3)/2$ , 尽可能消除极化影响. 每块试体的  $\rho_1$  为布置在不受力的软弱夹层中的对比测道. 测量结果,  $\rho_1$  变化小于 1%, 证明仪器测量是可靠的(因图上太挤, 未画出  $\rho_1$ ).

在剪切和摩擦试验中, 电极可能会随着试体位移而发生位置变化, 从而引起测量装置系数  $K$  ( $\rho_s = K \cdot \frac{V_{MN}}{I}$ ) 的变化. 我们用实测的试体位移量作为电极的位移量, 计算了由于电极随试体位移引起  $K$  变化的大小, 算出的  $K$  相对误差为

$$\text{剪切: 屈服极限点 } \frac{\Delta K}{K} = 0.02\% - 0.5\%$$

$$\text{破坏极限点 } \frac{\Delta K}{K} = 0.2\% - 2.3\%$$

$$\text{摩擦: 屈服极限点 } \frac{\Delta K}{K} = 0.04\% - 1.4\%$$

$$\text{破坏极限点 } \frac{\Delta K}{K} = 0.3\% - 7.4\%$$

这是按最大极限情况计算的,实际的误差范围要比这小得多。尽管如此,试验中有变化测道的视电阻率的变化也超过了与其相对应的这个最大极限误差,有不少测道超过得还比较多,达3—10倍,说明主要变化不是装置系数变化引起的,是可信的。

另一方面,如果用于监测边坡和断层的滑移或破裂前兆,电极的移动使装置系数改变造成的视电阻率的变化,也反映上、下两盘由于应力变化而产生的运动,对监测来说,同样是有意义的。

本试验得到了贵州有机化工厂贵定石灰石矿的支持,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 陈从新、盛建豪,1990. 贵定石灰石矿边坡岩体软弱夹层原位剪切试验报告. 中国科学院武汉岩土力学研究所. 岩土(90)报告69号.
- 陈大元、陈峰、贺国玉,1987. 岩石受压过程中“应力反复”对电阻率的影响. 地震学报,3,303—311.
- 陈大元、许东俊、陆阳泉、曹其平、陈峰、罗荣祥、关华平,1992. 岩石变形特征及物理特性的现场试验研究. 地震学报,3,356—362.
- 耿乃光,1987. 大尺度试件岩石力学实验座谈会概况. 国际地震动态,12:31—32.
- 陆阳泉、钱家栋、刘建毅,1990. 大型花岗岩标本缓慢膨胀破裂过程中,电阻率和声发射前兆特征的实验研究. 西北地震学报,2,35—41.
- 许东俊、耿乃光,1989. 岩石和断层泥摩擦特性的现场大尺度 试件实验研究. 地震学报,4,424—430.
- 张同俊,1981. 矿井岩层受力状态与视电阻率关系的实验研究. 西北地震学报,1,1—24.
- 赵玉林、钱复业、杨体成、刘建毅,1983. 原地电阻率变化的实验. 地震学报,2,217—224.
- Brace, W. F., 1981. The effect of size on mechanical properties of rocks. *Geophys. Res. Lett.*, 8, 651—652.
- Cook, N. G. W. and Heart, H. C., 1981. National Science Foundation—University of California at Berkely. Workshop on large scale laboratory testing in geomechanics. *Geophys. Res. Lett.*, 8, 645—646.
- Dieterich, J. H., 1981. Potential for geophysical experiments in large scale tests. *Geophys. Res. Lett.*, 8, 653—656.
- Стаховский, И. Р., 1983. Информационные предвестники разрушения крупномасштабных образцов горных пород. Физики Земли, 10, 90—94.