

三向压缩下大型混凝土标本的电性特征

陆阳泉 温新民

(兰州地震研究所)

用 $1.0 \times 1.0 \times 1.5\text{m}^3$ 的大型混凝土标本模拟岩石材料进行三轴压缩实验,测量了在受力变形破裂过程中的应力—应变关系以及声波和视电阻率等物理参数。从这些结果中发现,在围压条件下随着应力的增加视电阻率变化与应力、应变密切相关且具有明显的阶段性和方向性特征。这和某些大震前的实测地电资料颇为相似,为震前视电阻率异常的物理解释提供了实验依据。

一、引言

目前,大量野外地电台站的供电极距大多数在800~1000米范围内,实际探测深度约300米左右。一般说来,在这种观测条件下地下岩石处于常温低围压状态。为了模拟该条件下岩石受力变形电阻率的变化特征,我们同冶金部长沙矿山研究院和湖南锡矿山矿务局合作共同开展了大型混凝土标本三轴压力实验*,进行了应力、应变、声波、地音、视电阻率和光应力等综合测试研究。本文着重分析讨论了视电阻率变化与应力—应变的关系和方向性特点等。主要结果有:1)标本在受力变形破裂过程中电阻率呈现相对平稳、下降和加速下降三个明显的阶段性变化规律,其幅度达20%以上;2)电阻率变化与应变的关系较与应力的关系更为密切,相关系数为0.94;3)电阻率变化具有明显的方向性特征:与最大主应力垂直方向的电阻率变化最大,平行方向的最小,45°方向的居中;4)微小的应变可以引起电阻率的显著变化,其相对变化量级达 $10^2 \sim 10^3$,这和某些室内试验和现场观测结果一致;5)围压条件下电阻率变化比单向压力时大,卸载后也不能恢复到原值。

二、实验概述

1. 标本制备和实验条件 标本筑在湖南某矿区坑道洞室中,围岩为矽化灰岩。为补充洞室空间,标本下部筑有高标号混凝土基座。参数见表一。

工作室温度为 $26 \pm 0.5^\circ\text{C}$,相对湿度为 $82 \pm 2\%$,标本含水量未经准确测定。

* 该项实验由陈有发、张同俊等同志与合作单位共同提出和拟定计划;王玉祥、何秀琴同志参加了标本浇注工作;张庆洲、金铭、蒋续媛、李刘玉等同志参加了现场实验和部分资料整理工作。文中插图由赵玉珍同志协助清绘。

标 本 参 数

表一

尺寸大小	配 比	水灰比	浇 注 时 间	令 期
(米)	水泥: 尾砂: 碎石		(年、月、日)	(天)
1 × 1 × 1.5	1 5 1	> 2	78.10、14	233

2. 实验方法和仪器设备 为使标本在低围压条件下进行试验, 采用四块迭合的 $96 \times 96 \times 4$ 厘米³的钢枕施加轴向荷载, 用6.8厘米厚的钢板传压, 高标号混凝土封顶。侧向用 $150 \times 50 \times 7$ 厘米³钢枕对合加载, 传力板厚1厘米, 中间挖有5个标点孔并埋入 $\phi 16$ 毫米长40厘米的无缝钢管测量标本的纵横向变形, 采用18号和14号长160厘米的槽钢组成侧向反力框架, 一共架设14付(图1)。各钢枕油管 and 高压阀门与油泵相连以组成加载油路系统, 在油路系统中安上YB—150M/M标准压力表, 用高压阀门控制各项压力。

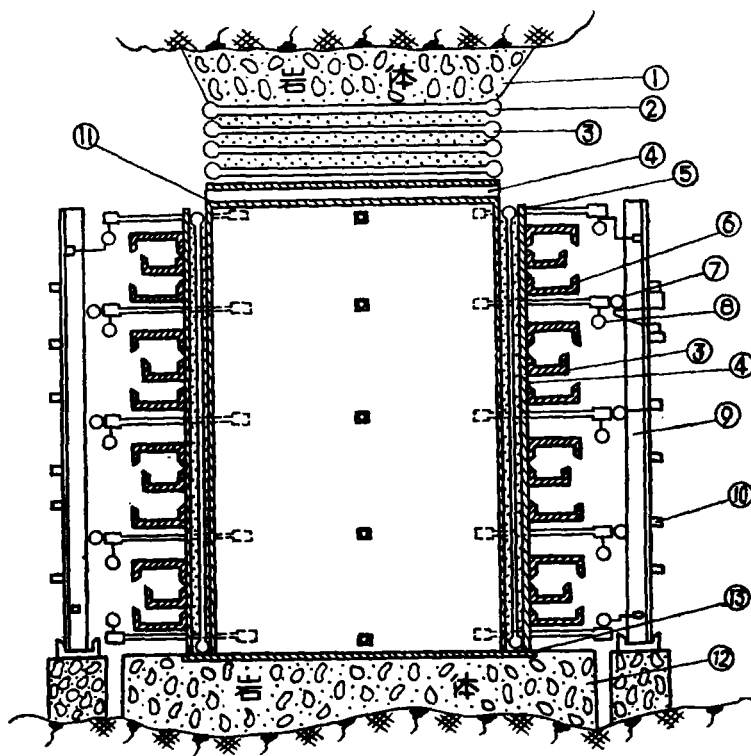


图 1 大三轴实验钢枕安装图

1. 接顶高标号混凝土 2. 顶压钢枕 3. 水泥砂浆 4. 传压钢板 5. 侧压钢枕
6. 抗压框架 7. 百分表测杆 8. 百分表 9. 百分表支架 10. 磁性表座 11. 水泥砂浆垫层 12. 高标号混凝土基座 13. 试体垫钢板

电阻率测量: 标本中部按四极对称法布设测线三道、供电极距 $AB = 30$ 厘米, 测量极距 $MN = 10$ 厘米, 电极材料为 $4 \times 2 \times 0.5$ 厘米³的铅块, 埋深10厘米。用135伏乙电池组供电, $\rho z5$ 型直流数字电压表测量供电电流 I (改装) 和人工电位差 ΔV , 配Ly—1 数字打印机自

动记录*。各面传压钢板涂有绝缘漆, 标本的极化电场小, 稳定快, 供电三秒钟以后电阻率相对变化不超过0.1%。因此, 每次取供电三秒钟后的三组数据(I 和 ΔV)按 $\rho_s = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$ 计算视电阻率值, 其中 K 为电极装置系数。测量仪器精度为0.05%, 电阻率观测误差小于1.8%。

变形测量: 用百分表测量其纵横向变形, 作为分析的依据。此外, 还安装了声波仪, 光弹应力计和地音仪等进行综合测试研究。

加荷方式: 首先各向同时分级加载至静水压力, 然后逐级加大轴向压力(σ_1)直至破坏, 每级4公斤/厘米², 同时逐级读测各种仪器值和变形量, 以供分析。

三、资 料 分 析

1. 视电阻率变化与标本变形特征的关系 我们取体积应力 $\sigma_v = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 和体积变形 $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = -\frac{\Delta V}{V}$ 作为应力—应变分析数据。从绘制的应力—应变关系图(图

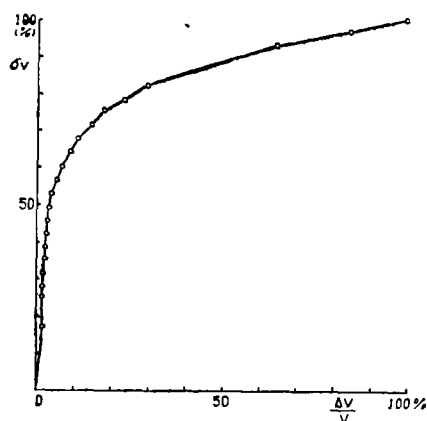


图2 应力—应变关系

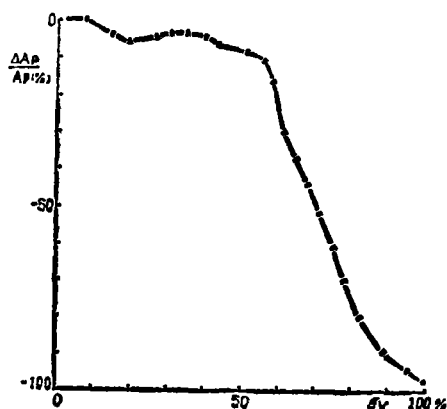


图3 声波振幅 A_p 与应力的关系

2) 以及声波测试结果**(图3)和标本的破坏形迹综合揭示了标本的变形破坏特征。由图2图3可见, 其变形破坏过程大致可分为三个阶段: 即弹性变形阶段; 裂隙的新生和传播阶段; 破坏阶段。从而显示了电阻率变化的阶段性特征(图4)。

弹性变形阶段: 应力—应变曲线大致呈直线, 声波振幅 A_p 平直或略有增长, 显示标本中原有孔隙的缩小和微裂缝的迅速闭合, 从而导致标本体积的微小收缩。孔隙压密而使导电截面减小, 在此阶段电阻率值变化不大或略有升高。

• 朱振卿同志参加了测试仪器的改装、调试和维修工作。

• • 声波资料由李刘玉同志提供。

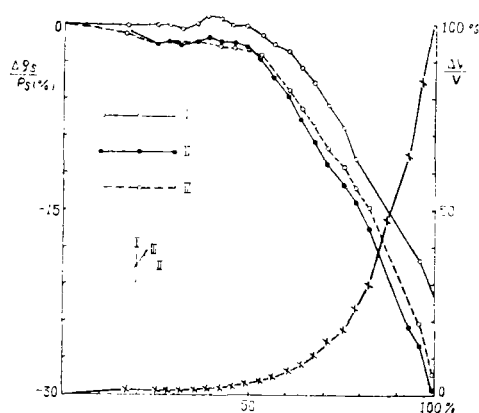


图4 电阻率与应力、应变的关系

裂隙的新生和传播阶段：长沙矿山研究院的有关同志对混凝土标本的研究结果表明，加压前标本中除存在孔隙结构外，还有微裂隙，这种微裂隙主要存在于砂浆同碎石块体的接触处（称粘结裂隙）和砂浆内部（称砂浆裂隙）。当应力超过比例极限以后，粘结裂隙和砂浆裂隙开始新生。随着应力的不断增大，砂浆裂隙也不断增长并向粘结裂隙靠拢，应力增大声波振幅则降低，应力—应变曲线偏离直线，反映标本中裂隙的发展和传播。同时，在稳压期出现明显的蠕变现象。由于裂缝的新生和发展，标本中水份重新分布，致使电阻率随应力的增长而降低，速率也随之加快。

破坏阶段：当临近屈服点时，标本内裂隙急剧发展并非稳定地迅速传播，粘结裂隙和砂浆裂隙连成一线而相互贯通。这时声波振幅波动直至波形畸变或信号消失，变形速率迅速增加，应力、应变都不稳定，显示了较大的塑性。最后用泵继续加油，轴向应力反而降低，标本以较大的变形而破坏。在此阶段，由于裂隙的扩展和连通而形成导电良好的水膜通路，使电阻率剧烈下降，直到标本破坏而下降到最低值为止。

2. 视电阻率变化与应力的关系 钢枕架设及全部准备工作完成以后相隔10天再进行压力实验，在环境条件基本不变的自然状态下电阻率值已趋稳定。5月9日和5月11日进行了两次测定结果分析，三天内相对变化幅度小于1.3%。但是，在七个小时之内的压力实验中各道电阻率下降幅度都在20%以上。在这短短的时间内除压力有变化外，而温度和湿度基本不变，显然这样大幅度的电阻率下降不能不与应力有关。

实验结果表明：随着应力的增大，视电阻率呈现平稳、下降和加速下降三个明显的阶段性特征（图4）。各变化段的应力区域，下降幅度和下降速率都有显著区别（表二）。

当荷载不超过1/3破坏应力时，电阻率变化不大或略有上升，每一加荷级的平均下降幅度和速率都不超过1%，显示出比较平稳的第一阶段。当荷载在1/3～2/3破坏应力区间时，电阻率呈明显下降趋势，每一加荷级的平均下降幅度和速率达6%而进入下降阶段。当荷载超过2/3破坏应力以后电阻率剧烈下降，每一加荷级平均下降幅度和速率都增至19%以上，均为第二阶段的三倍多，它预示着标本的即将破裂。

当荷载超过2/3破坏应力以后电阻率剧烈下降，每一加荷级平均下降幅度和速率都增至19%以上，均为第二阶段的三倍多，它预示着标本的即将破裂。

3. 视电阻率变化与应变的关系 在外力作用下，标本变形与电阻率变化的关系极为密切，相关系数为0.94。由图4可见，标本的应变和电阻率变化曲线几乎互成镜像。由于初始

各阶段视电阻率变化值 表二

测道	总下降幅度 (%)	平 稳 段		下 降 段		加 速 下 降 段	
		幅度 (%)	速率	幅度 (%)	速率	幅度 (%)	速率
I	22.3	0	0.1	4.6	4.0	17.7	15.8
II	31.7	1.6	1.4	8.0	7.8	22.1	21.4
III	29.5	1.4	1.5	6.4	7.0	21.7	19.8
平 均		1.0	1.0	6.3	6.3	20.5	19.0

注：1) 表内各值均为负数； 2) 下降速率按每一加荷级下降百分比计算。

阶段标本变形不大,可能是电阻率变化不大的直接原因。当超过屈服点以后标本变形迅速增加,电阻率变化也急剧下降,二者有明显的对应关系。

电阻率变化和线应变的比值可表示为 $S = \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ S 一般称为灵敏度或放大系数,其大小取决于岩石的种类、含水量和应变等因素。但室内实验表明,沉积岩因应力而产生应变时,其电阻率变化远远超过应变。也就是说,微小的应变可以引起电阻率的显著变化。本次实验结果为,电阻率相对应变量的变化达 $10^2 \sim 10^3$ 数量级,这和某些室内岩石试验和野外观测结果一致^[1]从图5可以看出小应变时电阻率的相对变化量大,大应变时电阻率的相对变化量小并趋于饱和和回升,这也和某些现场实验结果类似^{*}。但应指出,这次实验表明,应力应变与电阻率变化曲线的关系,特别是在初始阶段二者没有相同的形态,它说明引起电阻率变化的主要因素可能是应变。或者说,电阻率变化与应变的关系较与应力的关系更为密切。

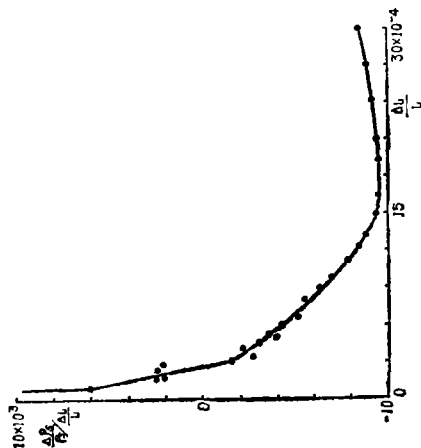


图5 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ 和 $\frac{\Delta L}{L}$ 关系图

4. 视电阻率变化与最大主应力方向的关系 从电阻率各道变化幅度分析,除平行于最大主应力的第Ⅰ道明显偏小而外,其余两道下降幅度比较接近,第Ⅱ道略小于第Ⅲ道。若设 α 为直角坐标系中视电阻率变化与 x 轴(与第Ⅱ道方向重合)的夹角,则由视电阻率 ρ_s 与真电阻率的关系

$$\rho_s = \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_3}{\rho_1 \cos^2 \alpha + \rho_2 \sin^2 \alpha}}$$

在一定假设条件下可推得:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\alpha x_{II} - (x_I + x_{II})}{x_{II} - x_I}$$

由上式所计算的 $\left(\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s}\right)_{\max}$ 方向角 α 可以看到,当达到 $1/2$ 破坏应力以后发生方向偏转(图6),明显地表现出:垂直于最大主应力方向的电阻率变化最大;平行于最大主应力方向的电阻率变化最小;与最大主应力成 45° 方向的电阻率变化居中。计算表明,电阻率变化最大的方向与最小主应变方向基本一致,而且在 $1/2$ 破坏应力区以后最小主应变的方向也发生偏转。这就更进一步说明,应变在电阻率变化中的重要作用。

从各道电阻率变化的时间上看,似乎与最大主应力方向平行的第Ⅰ道变化较早,其余两道变化时间较晚且相差不大,这需要进一步实验研究。

5. 视电阻率变化与围压的关系 由于受侧压钢枕质量的限制,围压施加不能过大。但

* 电阻率与矿山开采应力实验,兰州地震大队预报室地电组,1976年2月

结果表明,施加小于6公斤/厘米²的侧向压力可使标本的强度提高近一倍,其破坏方式也非弹性脆性破坏,而呈现较强的塑性反应。这说明围压虽小但确已加在标本之上并发生了作用。低围压条件下电阻率变化的实验研究仅是初次,从初步结果来看,和单轴压力相比较主

要区别在于:单轴加荷时电阻率变化幅度小,卸载后基本能恢复到原值;有围压时电阻率变化幅度较大,卸载后都不能恢复到原值。在围压条件下电阻率变化比在单向压力时大,这大概是与围压时孔隙的强烈闭合和接触的改善有关〔2〕。

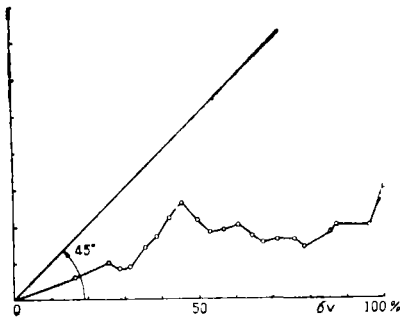


图6 $\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{\max}$ 方向角图

四、初步结论

1.从上述分析结果可以看出,电阻率变化较好地反映了标本的受力变形破坏过程和静力特征,充分肯定了标本电性压力实验的实际意义和电阻率法预报地震的实验基础。

2.视电阻率变化的阶段性特点(大震前曾被观测到*)直接反映了应力、应变的积累和释放过程,同时显示了应变对电阻率变化的重要作用和电阻率对应变量的高度灵敏性以及标本破裂前的电性特征,为用电阻率法监视大震前应变能的积累和地震发生时间提供了实验依据。

3.在外力作用下标本的电阻率变化幅度大和具有一定的方向性(大震前也被观测到*)。根据这一重要结果可用实测地电资料来推断最大主压应力方向,为寻找孕震区域和力源提供线索。

本实验在设备和技术上都得到了长沙矿山研究院和湖南锡矿山矿务局党组织和同志们的大力支持和帮助,在此一并致谢。

(1980年3月收到)

参考文献

- 〔1〕山崎良雄,岩石应变与其电阻率的变化,科学技术参考资料,1972,1期
- 〔2〕Э. Н. пархоменко,Электрические свойства горных пород, №104—117, москва, 1965,

• 钱家栋等,几个浅源大地震前后地壳浅部视电阻率观测结果。