

循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨

葛修润 卢应发

(中国科学院武汉岩土力学研究所)

一、前言

在周期性荷载作用下的岩石的力学性能与岩体工程的长期稳定性密切相关。Müller 和葛修润^[1]曾指出在循环荷载作用下, 岩石不可逆变形的发展存在三个阶段, 并提出以变形来度量岩体的破坏和强度。葛修润^[2]提出了岩石是否发生疲劳破坏和应力门槛值有关, 并认为岩石疲劳门槛值接近常规屈服值。Akai^[3]认为岩石单轴疲劳破坏似乎受静态全过程轴向变形控制。在循环幅值荷载、加载波形等对岩石疲劳寿命影响的研究方面, 莫海鸿^[4]、吴玉山和林卓英^[5]做了一定的工作。

本文利用MTS电液伺服刚性压力机进行了大量试验研究, 探讨了岩石在三角波的单轴循环荷载作用下的疲劳门槛值和循环不可逆变形发展的规律。

二、静态试验和循环试验的加载方式

本文对试验研究工作中的试样采取了非常严格的措施, 保证其同一性良好。岩样为湖北大冶大理岩。

(一) 静态试验

以恒定的应变率控制岩石的静态全过程试验见图1。由图1可以看出, 岩样的力学性质的离散性得到了有效的控制, 试验结果的重演性很好, 静态试验结果为岩石循环试验所需的各种指标的选取和对比分析提供了重要依据。

(二) 循环试验

虽然循环荷载的幅值 P'_{max} , 循环荷载差 $\Delta P'$, 循环荷载率 \dot{P}' , 循环荷载频率 F , 循环加载波形等因素对岩石的不可逆变形的发展都存在一定的影响, 但本文主要研究前四种因素对岩石力学性能的影响, 至于循环加载波形, 则仅选取图2所示的一种加载波。四者之间存在如下关系。

$$\dot{P}' = \Delta P' / T \quad (1)$$

到稿日期: 1990-02-20.

$$F=1/(2T)$$

$$(2)$$

式中 T 的意义如图2所示

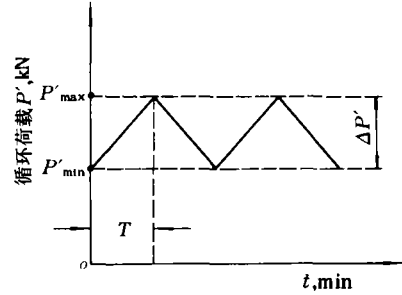
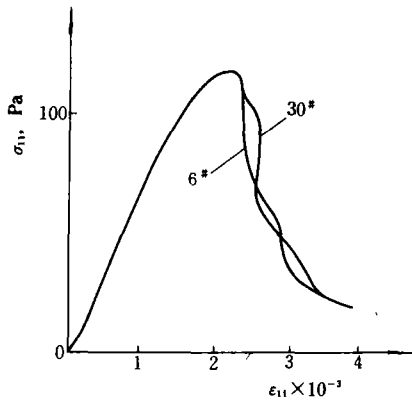


图1 6#, 30#试件的全过程曲线应变率 $\dot{\epsilon} = 8.1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, 图2 循环加载波形示意图

研究试验采用的循环荷载差 $\Delta P' = (1 - k)P'_{\max}$ 分为三等: 大循环荷载差(取系数 k 为4%), 中循环荷载差(取 $k = 25\%$), 小循环荷载差(取 k 为90%或80%)。

通过已有的认识和资料分析, 可以初步认为在循环荷载作用下岩石是否发生疲劳破坏存在一个门槛值点, 此点可能为岩石静态全过程曲线的体积压密最小点, 图3曲线 II 上的 C 点, C 点可以通过静态试验获得。本文利用岩石在循环荷载作用下的试验结果深入地讨论了有关问题。

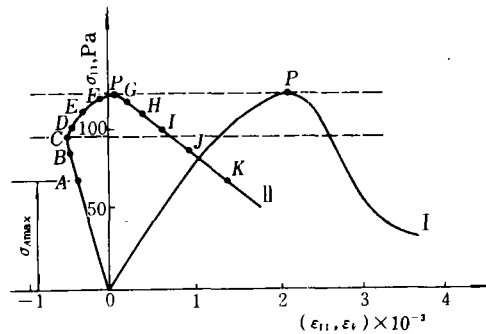


图3 循环加载试验方案

I. $\sigma_{11} - \epsilon_{11}$ 曲线, II. $\sigma_{11} - \epsilon_v$

三、岩石疲劳门槛值的试验验证

参照同一组试样中静态试验所取得的轴向应力与体积变形曲线的 C 点(图3), 以 C 点为基准点, 取 A 至 K 点的荷载(应力)水平分别进行循环试验。特征点 C 相应的荷载水平为 P_C , 轴向应力水平为 σ_C ; 取 A, B, D, 3 点的轴向应力水平 σ_A 为 $0.75 \sim 0.80\sigma_C$, σ_B 为 $0.9 \sim 0.95\sigma_C$, $\sigma_D = \sigma_C + 0.1(\sigma_P - \sigma_C)$, (σ_P 为试件的峰值应力, 它取自同一组试件中静态试验得到的全过程曲线的峰值应力)。同时循环试验按前述大、中、小三种循环差值进行。由 A 点和 B 点进行循环荷载试验的试样(共 6 个试样)得出同一的规律: ①随着循环次数 N 的增加, 环向不可逆变形 ϵ_{22} 的增量越来越小(由于测量误差, 循环时环向变形的值减少); ②随着循环次数 N 的增加,

轴向不可逆变形的增量减少,最后趋于常数,轴向变形 ϵ_{11} 趋于稳定;③随着循环次数 N 的增加,体积变形 ϵ_V 的增量越来越小,最后趋于常数(图4);④岩石经多次循环之后,再做静态试验,其刚度系数基本不变(图5)。另外,在破坏后区用几个试件进行了如下的试验:对岩石先加载刚过峰值应力点后立即卸载,由于加载过峰值应力后,岩石疲劳门槛值有所下降,其门槛值的下降和静态加载发生的不可逆变形有关^[6],对岩石作循环试验时,当循环幅值应力小于岩石过峰值应力后所具有的门槛值应力时,其变形规律和刚度系数仍具有上述四个特点。

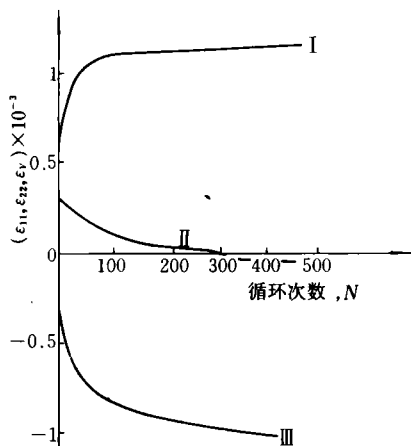


图4 49*试件的循环次数和变形曲线

I. $N-\epsilon_{11}$, II. $N-\epsilon_{22}$; III. $N-\epsilon_V$, 幅值荷载 $P'=56\text{Pa}$

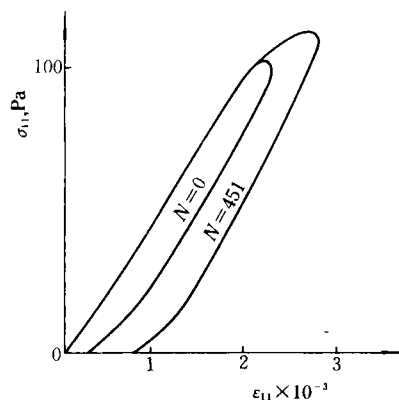


图5 49*试件的静态曲线

$\dot{\epsilon}=8.1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$

以上试验结果明确地显示了在循环荷载作用下,岩石是否发生疲劳破坏和应力门槛值有关,当循环幅值荷载低于门槛值时,随着循环次数的增加,轴向、环向和体积变形趋于稳定,岩石的刚度也不因循环而急剧下降,且门槛值与静态试验的体积变形和应力关系曲线的拐点 C 相当。当循环荷载幅值高于门槛值时,循环试验的变形规律与前述截然不同,岩石疲劳将发生破坏。

四、岩石疲劳破坏和不可逆变形特征

取图(3)所示的 $D-K$ 点所对应的荷载作为循环试验所对应的幅值荷载,相对应的轴向应力值为: $\sigma_D=\sigma_I=\sigma_C+0.1(\sigma_P-\sigma_C)$; $\sigma_E=\sigma_H=\sigma_C+0.5(\sigma_P-\sigma_C)$; $\sigma_F=\sigma_G=\sigma_C+0.8(\sigma_P-\sigma_C)$; $\sigma_J=\sigma_B$; $\sigma_K=\sigma_{K0}$ 。岩石循环试验分为在峰值以前的循环荷载试验和静态加载过峰值后卸载作循环试验两大类。

将循环荷载作用下 A^*_3 试件的应变和循环次数的关系曲线(图6曲线III, IV, V)与 6^* 试件的静态曲线(图6曲线I, II)作一对照,可以分析体积应变的情况。循环加载试验的初始点 C_1 相当于静态加载试验的 S_1 点,其体积变形是压密的。随轴向应力的增加而达到峰值 P (图中 S_2 点), ϵ_V 为微膨胀,当轴向应力与 S_1 点处于同一水平线时,此时的 ϵ_V 为 S_3 点。对于循环荷载试验来说, ϵ_V-N 曲线的初始点为 C_1 ,它与静态的 S_1 点相对应;随循环次数的增加, ϵ_V 也经历了 C_2 点上而发生急剧膨胀, C_2 点的量值相当于静态曲线 S_2 点的量值;随着循环次数的继续增加, ϵ_V 接近破坏时的 C_3 点;此点之后变形急剧增加,岩石发生破坏。图6表明 C_3 点

与 S_3 点大致相当。当应力水平超过阈值时，变形是增加的，相当于静态曲线上从相应点向后区过渡(图中箭头所示)。对于 ϵ_{11} 也有大致的对应关系。因此，岩石的强度随循环次数的增加而降低。

从循环试验中X—Y记录仪反映的轴向荷载与轴向位移和环向位移的迟滞回线可以看出，循环幅值荷载和荷载差越大，单位循环产生的不可逆变形亦大；反之，单位循环产生的不可逆变形就小。借助公式(1)和(2)，我们研究了循环荷载差、荷载率、频率对岩石疲劳寿命的影响，试验结果表明：荷载差、荷载率、频率对岩石循环不可逆变形的发展都有一定的影响；但荷载率和频率相对幅值荷载和荷载差的影响可以忽略不计，即岩石的疲劳寿命主要由幅值荷载差所决定。

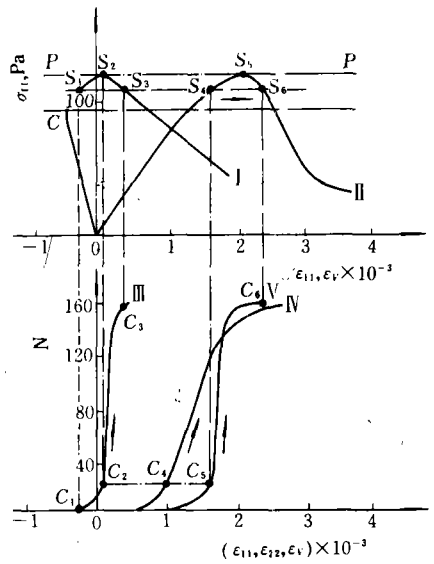


图6 不可逆变形发展对照图

I. $\sigma_{11}-\epsilon_v$, II. $\sigma_{11}-\epsilon_{11}$, $\dot{\epsilon} = 8.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, III. $N-\epsilon_v$, IV. $N-\epsilon_{22}$, V. $N-\epsilon_{11}$,
幅值荷载 $P' = 107 \text{ Pa}$

五、循环荷载下岩石疲劳破坏控制量问题

比较岩石疲劳破坏的不可逆变形的最终量和静态全过程破坏后区疲劳幅值荷载所对应的不可逆变形的大小，可以得出一个重要结论：岩石在循环荷载作用下发生疲劳破坏的控制量为变形总量，在轴向变形、环向变形和体积变形三者中，尤以体积变形作为控制量为最佳(图7)。岩石损伤的发展在宏观上主要表现为变形，当岩石内部的裂源等发展时，宏观变形的量值就增加。环形变形比轴向变形更能反映岩石损伤的发展过程；轴向变形既是内部裂隙等发展的度量，也是内部裂隙闭合的度量。在大量裂隙等张开的同时，不免有少量裂隙的闭合，体积变形能整体反映岩石内部的裂隙是“张开”还是“闭合”。选择体积变形作为疲劳破坏控制量，还避免了岩石静态破坏以第二类^[7]形式发生时轴向变形不能作为岩石疲劳破坏控制量的缺点。

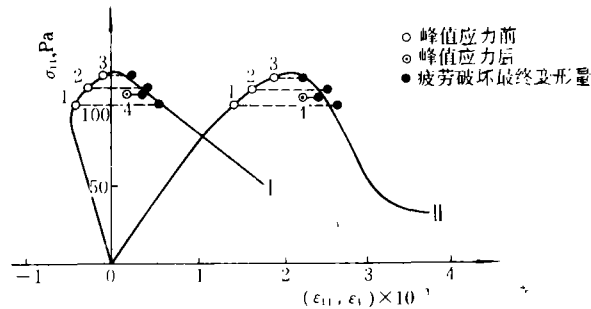


图7 疲劳破坏最终变形量与静态破坏变形量关系

I. $\sigma_{11}-\varepsilon_v$ (静态), II. $\sigma_{11}-\varepsilon_{11}$ (静态),

1. 24°试件, $N=1048$; 2. 41°试件, $N=330$; 3. 36°试件, $N=73$; 4. 20°试件, $N=52$;

六、结 语

本文在大量试验研究的基础上, 得出了以下结论:

1. 试验证明了岩石在循环荷载作用下存在疲劳门槛值点, 且该点为静态全过程体积变形的最小点。当循环幅值荷载在门槛值之下时, 轴向、环向和体积变形三者随循环次数 N 的增加而趋于稳定; 当循环幅值荷载在门槛值之上时, 三者都随 N 的增加而增大。

2. 在岩石疲劳破坏受变形所控制的观点基础上, 进一步提出了体积变形作为疲劳破坏控制量的观点; 至于岩石疲劳寿命则主要由岩石本身的结构、循环幅值荷载和荷载差决定。

本文试验得到中国科学院武汉岩土力学研究所吴玉山、林卓英、王金龙、关玲珊等的大力帮助和支持, 深表感谢。

参 考 文 献

- [1] Leopold Müller-salzburg, Xiurun Ge. Studies on the Mechanical Behavior (Deformation Behavior) of Jointed Rock Masses under Cyclic Load. The 5th National Rock Mechanics Conference, Australia. 1983, 1: 43~49.
- [2] 葛修润. 周期荷载作用下岩石大型三轴试验的变形和强度特性研究. 岩土力学, 1987, (2).
- [3] Koichi Akai. Plate Loading Tests on Multi-played Sedimentary Rocks. The 5th National Rock Mechanics Conference, Australia, 1983, 1: 121~124.
- [4] 莫海鸿. 岩石的内时本构理论[博士论文]. 武汉水利电力学院, 1987.
- [5] 吴玉山, 林卓英. 岩石在循环荷载作用下的强度和变形特性. 岩土力学, 1987, (3).
- [6] 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形发展规律及损伤本构理论[硕士论文]. 中科院武汉岩土所, 1989.
- [7] [澳]布雷迪 B H G, [英]布朗 E T. 地下采矿岩石力学. 冯树仁等译, 北京: 煤炭工业出版社, 1990.