

不同应力水平时砂岩滞回曲线演化的实验研究*

许江, 尹光志, 王鸿, 唐宇

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:通过对周期性循环荷载作用下3种不同应力水平时砂岩滞回曲线演化规律的实验研究发现,岩石滞回曲线是否发生变化将取决于应力水平等外在因素,一般而言,在较低应力水平情况下,其滞回曲线所围的面积随循环次数增加有可能就趋于稳定,但在较高应力水平时,其滞回曲线所围的面积随循环次数增加将呈减少-恒定-增加的演化趋势。

关键词:周期性循环荷载;滞回曲线;应力水平;砂岩

中图分类号:TU452 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)02-0040-04

Experimental Research on the Evolution of Hysteresis Curve of Rock in Different Axial Stress Levels

XU Jiang, YIN Guang-zhi, WANG Hong, TANG Yu

((Key lab. for exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

Abstract: This paper has probed into the evolution of the hysteresis curve of rock under the cyclic loading by the experimental research on the deformation characteristics of sandstone under cyclic loading in three axial stress levels. The following results have been indicated: whether the hysteresis curve change will depend on the stress level, when the stress level is low, the acreage closed in the hysteresis curve will go invariable with the increase of cyclic count, but when the stress level is high, the acreage closed in the hysteresis curve will be invariable from the decrease and then to the increase with the increase of cyclic count.

Keywords: cyclic loading; hysteresis curve; stress level; sandstone

岩石是由多种矿物组合而成的集合体,其内部包含着许多裂缝、孔洞等不连续面,是一种非均匀的非线性体,其力学属性与其他人工材料相比,存在有很大的不同,所以,岩石力学的发展趋势之一就是如何正确、健全地认识岩石的基本力学特性和如何比较正确地把握住岩石在各种荷载作用下,以及在各种因素影响下的动、静态力学响应^[1]。另一方面,在岩土工程施工及其工程运营阶段,经常会遇到周期性循环荷载的作用,岩体在周期性循环荷载作用下的力学性能也是影响岩体工程长期稳定性的重要因素之一,历史上由于人们未能掌握周期性循环荷载作用下的岩土体失稳破坏规律而引发重大灾害的例子不少,如意大利 Vajont 水库的岩坡滑动、法国 Malpasset 拱坝坝基位移导致整个拱坝坍塌、中国梅山连拱坝坝基(花岗岩)的滑动等

灾害的形成都涉及到岩体在周期性循环荷载作用下的长期稳定性问题。因此,展开对周期性循环荷载作用下岩石的非线性变形特征方面的研究既是岩石力学与工程领域的专家学者所关注的前沿课题之一,同时也有助于正确认识岩体在周期性循环荷载作用下的破坏机理进而科学地评价工程岩体的长期稳定性^[2-5]。然而,在过去岩石力学与工程方面的论著中,却普遍都认为当岩石在多次反复加载与卸载,且每次施加的最大、最小荷载与第一次施加的最大、最小荷载相同时,则与每次循环相应的加、卸载变形曲线都将形成一滞回曲线,且这些滞回曲线随着循环加、卸载次数的增加而愈来愈狭窄,并且加载曲线段与卸载曲线段相互之间愈来愈靠近,岩石也愈来愈接近线弹性变形,直到某次循环没有塑性变形为止^[6,7]。但笔者通过相关系列实验

* 收稿日期:2005-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50574108;50374084);教育部“春晖计划”资助项目;教育部优秀青年教师资助计划
作者简介:许江(1960-),男,湖南永兴人,教授,博士生导师,主要从事岩石力学与工程方面的研究。

研究发现,上述结论与岩石类材料在周期性循环荷载作用下的变形特性,尤其是滞回曲线的演化规律似乎并非完全如此,有必要就其岩石在周期性循环荷载作用下的变形特性及其滞回曲线的演化规律作进一步深入探讨。为此,拟就岩石在周期性循环荷载作用下不同应力水平时滞回曲线的演化特征开展实验研究。

1 实验方法^[8]

以某边坡工程现场采集到的细粒砂岩为研究对象,并采用湿式加工法将所采集的砂岩样加工成 $\varphi 50 \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体试件,加工成型后的试件保持自然干燥状态。所采用动力设备为 MTS815 岩石力学试验系统(图 1a),其轴向荷载由安装在试验系统上的荷重计测定,纵向位移和横向位移则采用与试验系统配套的位移引伸计(图 1b)测定。

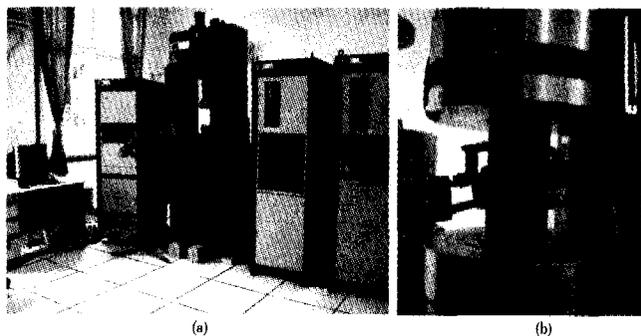


图 1 MTS815 岩石力学试验系统及其配套的位移引伸计

整个实验过程分 3 个阶段完成,第 1 阶段是岩样的采集、加工与基本物理力学参数测试阶段,第 2 阶段为周期性循环荷载实验阶段,第 3 阶段为岩石峰值强度实验阶段。周期性循环荷载实验阶段为本实验的核心实验阶段,主要进行了所施加的轴向应力为细粒砂岩单轴抗压强度的 0% ~ 45%、25% ~ 70% 和 45% ~ 90% 等 3 种不同应力水平时的周期性循环荷载实验。

依据国际岩石力学协会建议标准对细粒砂岩的基本物理力学参数进行了测试,其密度为 2.534 t/m^3 、弹性模量为 23.474 GPa 、泊松比为 0.344 、单轴抗压强度为 94.186 MPa 、单轴抗拉强度为 1.789 MPa 。

实验过程中,具体按如下周期性循环加、卸载路径进行加、卸载:(1)将轴向应力从零加载到相应上限应力水平 σ_1 后,再将其卸载至相应下限应力水平 σ_2 ,完成第 1 次循环实验;(2)再将轴向应力从该下限应力水平 σ_2 加载到相应上限应力水平 σ_1 后,将其卸载至下限应力水平 σ_2 ,完成第 2 次循环实验;(3)不间断地重复第 2 步,直至完成 N 次循环实验;(4)完全卸除荷载并将试件闲置一定时间后,再以相同应力速率对该试件进行连续加载直至其产生宏观破坏,并测试其单轴抗压强度;(5)更换岩石试件,重复以上第 1 ~ 4 步

实验步骤。图 2 给出了与该周期性循环加、卸载路径相对应的轴向应力与试件受载时间之间的关系曲线。

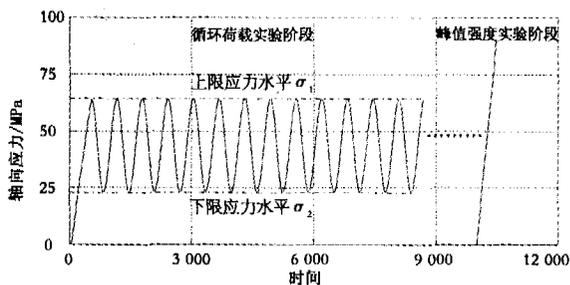


图 2 加、卸载路径示意图

文中涉及的所有实验均统一采用 0.129 MPa/s 的应力速率进行加、卸载。

2 实验结果与分析

图 3 具体给出了细粒砂岩在 3 种不同应力水平时周期性循环荷载作用下的应力 - 应变曲线,该图同时也给出了周期性循环荷载实验完成之后所进行的峰值强度实验中所检测的同一试件的相应应力 - 应变曲线。图 4 则具体给出了细粒砂岩在 3 种不同应力水平时周期性循环荷载作用下的轴向应力与纵向应变和横向应变对比。

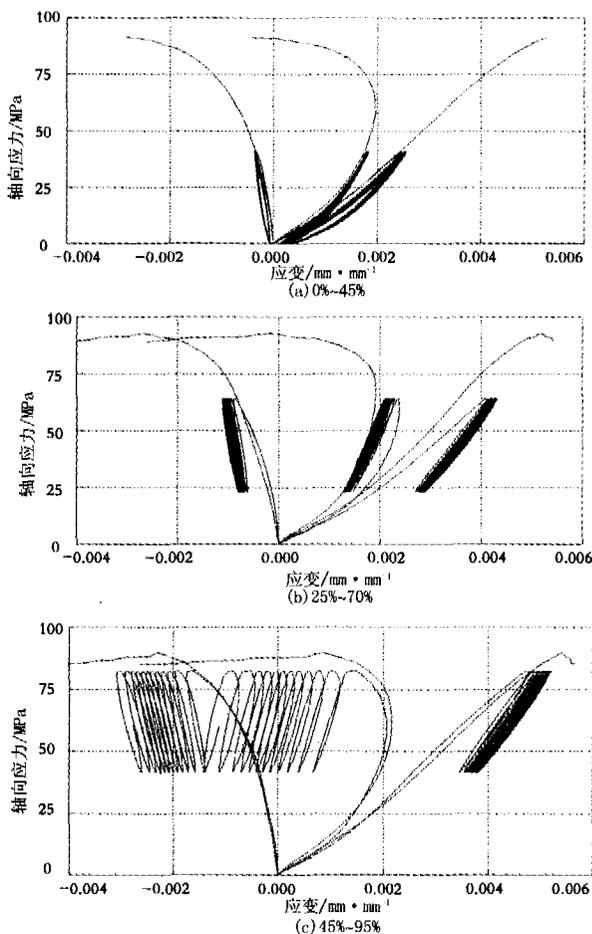


图 3 不同应力水平下的应力 - 应变曲线

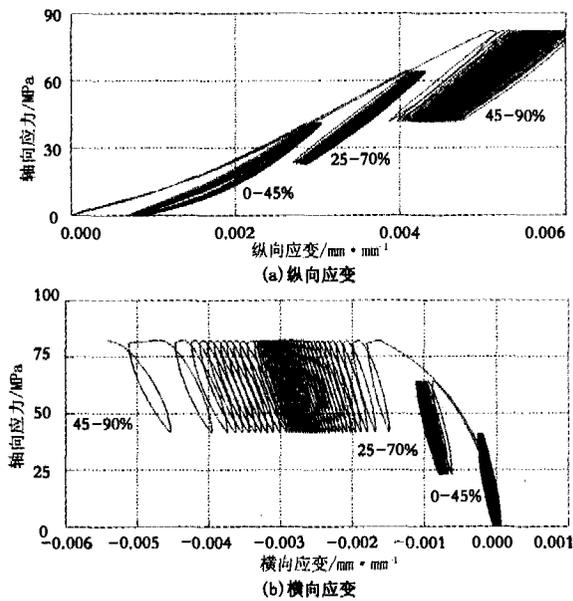


图4 不同应力水平条件下应力-应变曲线的对比

通过对图3和图4中各应力-应变曲线的对比分析,不难发现,由于岩石本身的非线性特性,细粒砂岩在周期性循环荷载作用下的卸载曲线段与加载曲线段不相重合,确实将形成一封闭的滞回曲线。但同时还发现,在较低的应力水平时,除了从第1次循环到第2次循环的滞回曲线有较大的变化外,从第2次循环开始,其滞回曲线将基本保持不变,但在较高应力水平时,从第2次循环开始,随着循环次数 N 的增加,其滞回曲线将随应力水平的不同而产生一定的变化,这种变化主要表现在以下4个方面:(1)每次循环所形成的滞回曲线随循环次数 N 的增加有逐渐向其相应应变绝对值增大的方向移动的趋势;(2)每次循环所形成的封闭滞回曲线所围成的面积随循环次数 N 增加有呈减少-恒定-增加的演化趋势;(3)每次循环完成后相应纵向应变、横向应变和体积应变的相对残余应变随循环次数 N 的增加有呈减少-恒定-增加的演化趋势;(4)每次循环所形成的滞回曲线的变化随着应力水平的增加有越加明显的演化趋势。

另外,通过对图3所示的周期性循环荷载作用下的应力-应变曲线与峰值强度实验条件下的应力-应变曲线的对比分析,不难看出,在一定的应力水平下承受一定的周期性循环荷载作用后,若卸除所承受的荷载并闲置一定时间段后,再将该岩石试件置于完全相同的实验条件下进行实验时,发现其应力-应变曲线存在相当程度的恢复。基于该现象,从另一角度证实,尽管岩石是一种天然的非弹性材料,但由于其特殊的微观结构特征,其变形的确具有一定的弹性后效现象,亦即当作用在岩石上的荷载全部卸除后,其所产生的变形随时间的推移将逐渐地得到一定程度的恢复。

3 结论

通过对细粒砂岩在周期性循环荷载作用下不同应力水平时所形成的滞回曲线演化规律的实验研究,发现以下基本现象:

- 1) 岩石在周期性循环荷载作用下的卸载曲线段与加载曲线段不相重合,将形成一封闭的滞回曲线;
- 2) 从第2次循环开始,随着应力水平的提高,滞回曲线有由基本保持不变逐渐地向产生一定程度的变化的演化趋势;
- 3) 在较高应力水平时,从第2次循环开始,随着循环次数 N 的增加,其滞回曲线的变化主要表现在:纵向应变、横向应变和体积应变的应变绝对值均逐渐增大,滞回曲线所围的面积呈减少-恒定-增加的演化趋势、每次循环的相对残余应变呈减少-恒定-增加的演化趋势;
- 4) 当作用在岩石上的荷载全部卸除后,其所产生的变形将随时间的推移逐渐地得到一定程度的恢复。

文中仅针对细粒砂岩在3种典型应力水平时周期性循环荷载作用下滞回曲线的演化特征开展了系列实验研究,取得了一些初步的定性结论,这些结论对岩石类材料是否都普遍适用以及该性质在岩土工程中的作用等问题都还有待于作进一步的探讨。

参考文献:

- [1] 席道瑛,王少刚,刘小燕,等. 岩石的非线性弹塑性响应[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(6):772-777.
- [2] Müller-salzburg Leopold, Xiurun Ge. Studies on the mechanical behavior(deformation behavior)of jointed rock masses under cyclic load[A]. The 5th Int. Congress on Rock Mechanics[C]. Australia 1983. 43-49.
- [3] 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[J]. 岩土力学,1987,8(2):11-19.
- [4] 葛修润,蒋宇,卢允德,等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(10):1581-1585.
- [5] 刘云平,席道瑛,张程远,等. 循环应力作用下大理岩砂岩的动态响应[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(2):216-219.
- [6] 蔡美峰,何满朝,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [7] Jager J C, Cook N G W. 岩石力学基础[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [8] 许江,王维忠,杨秀贵,等. 细粒砂岩在周期性循环荷载作用下变形实验[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2004,27(12):60-62.