

不同围压下灰岩的强度与变形特性试验研究

熊赞民¹, 高全臣¹, 邬爱清², 胡建敏²

(1.中国矿业大学 力学与建筑学院, 北京 100083; 2.长江科学院岩基研究所, 武汉 430010)

摘 要: 针对灰岩进行了室内常规三轴试验, 对试样在不同围压下的强度和变形特性进行了分析。结果表明: 灰岩的变形分为 4 个阶段, 在 2~10 MPa 的围压范围内, 岩石为脆性剪切破坏。其峰值强度、残余强度随围压的增加而增加, 但峰值时的变形与围压的大小没有相关性; 根据试验数据的回归分析, 得到灰岩强度准则的表达式。

关 键 词: 灰岩; 三轴压缩; 试验

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Experimental research on limestone of strength and deformability under different confining pressures

XIONG Zan-min¹, GAO Quan-chen¹, WU Ai-qing², HU Jian-min²

(1.School of Mechanics and Civil Engineering, CUMT, Beijing 100083, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Triaxial compressive tests on limestone are conducted with a variety of confining pressures that range from 2MPa to 10MPa. This observation causes us to conclude that the deformation of limestone can be divided into four stages and the wreck is brittle cutting. The peak and stub intensity value increase with the confining pressure adding up, but the strain of the stress peak has no relativity to the confining pressure. By the redressing analysis, the formula of relation between intensity parameters is produced.

Key words: limestone; different confining pressures; strength and deformability; triaxial testing

1 引 言

为准确把握岩石的力学特性, 利用岩石力学测试系统对圆柱形岩石试件进行单轴或三轴压缩试验是基本手段之一^[1, 2]。岩石绝大多数处于三向应力状态, 仅用单轴抗压、抗拉等的强度试验来研究岩石的变形、强度特征是不够的。因此, 本文针对灰岩进行了室内三轴压缩试验, 分析了其应力、应变关系发展规律, 研究其在三向应力状态下的强度和变形特征, 为工程实践提供参考依据。

2 试样制备和实验设备

2.1 试样制备

根据常规力学性能测试要求, 试样规格为 $\phi 50$ mm $\times$ 100 mm 的圆柱体, 并对试件的两端进行了仔细研磨, 不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm, 达到国际标准的技术要求。单轴试验测定变形模量为

38.2 GPa, 弹性模量为 35.6 GPa。

2.2 试验设备

试验在长江科学院水利部岩土力学重点实验室的 RMT-150 刚性伺服试验机上进行的, 如图 1 所示。



图1 RMT150试验机

Fig.1 RMT150 testing machine

该系统具有优良的静动态性能,在纵向变形率控制方式下,对于大部分脆性明显的岩石均可测得全过程曲线。在试验过程中,量测试样的轴向应力。

2.3 试验方法和步骤

所有试件的测试均采用连续加载方式。本次加载过程中,采用位移控制方式,位移速率为0.001 mm/s,围压范围为2~10 MPa。在中文Windows 98下进行量测数据,实行实时同步连续采样、存贮,整个过程由计算机自动完整地记录试件受力与变形的全过程。

3 试验结果分析

按照水利水电工程岩石试验规程,本试验数据结果如表1所示。

表1 试验各参数计算表
Table 1 Parameter results by testing

试样 编号	围压 / MPa	σ_1 / MPa	$\sigma_1 - \sigma_3$ / MPa	ε_1 / 10^{-3}	弹性模量 / GPa	变形模量 / GPa
3-1	2.0	87.72	66.56	2.71	36.80	38.94
3-2	4.0	111.29	90.25	3.36	33.77	33.86
3-3	6.0	114.88	93.71	2.93	36.24	35.87
3-4	8.0	129.92	109.16	3.39	37.84	36.98
3-5	10.0	166.26	145.36	3.22	49.96	46.00

3.1 应力-应变关系特征

不同围压下的全应力-应变曲线见图2。

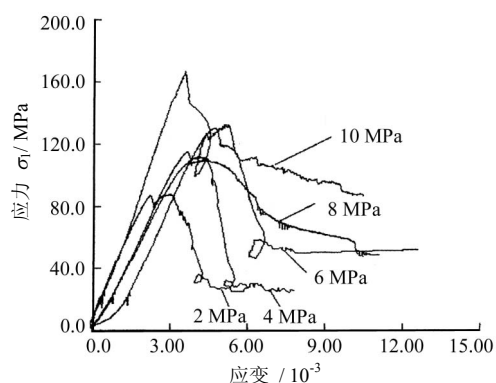


图2 灰岩三轴压缩下的全应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves under different loadings

从图2可以看出:灰岩在不同围压下的轴向应力-应变全过程曲线形状是类似的,可以划分为4个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、塑性阶段和破坏阶段^[3, 4]。第1阶段在开始施加轴向压力时,试件体应变增加体积缩小,岩石被压密,部分裂隙闭合,

应力-应变曲线微向上弯曲。第2阶段体应变继续增加,岩石表现出明显的线弹性。随围压增大,线弹性部分长度增长,但弹性变形阶段的斜率随围压大小变化并不大,这与文献[5]对泥岩的试验结果不同。对于致密性硬岩来说,其弹性模量 E 和泊松比 μ 基本相同,从而可以基于单轴压缩试验确定复杂应力状态下的弹性常数。第3阶段内体应变有一个极值,这个极值对应的应力就是屈服应力,本试验灰岩的屈服应力并不明显。第4阶段试件破坏后,岩石的承载能力没有完全丧失,还具有一定的承载能力,强度减弱到残余强度,而且残余强度随围压增大而增大。

3.2 强度特性

3.2.1 峰值应力与围压关系

灰岩在不同围压下的强度特征表现为:随着围压增大,抗压强度提高,二者可用线性拟合,这与文献[6]结论不同。其峰值后塑性变形明显增大,其变形不仅与围压 σ_3 大小有关,而且与 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的大小有关。

经回归分析,岩石的轴向破坏应力(强度) σ_1 与侧压 σ_3 之间的关系如图3所示,图中为拟合函数,可用如下表达式表示:

$$\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3 \quad (1)$$

式中: σ_1 为轴向峰值应力(MPa); σ_3 为侧向应力(MPa); σ_c 为岩石单轴抗压强度(MPa); k 为岩石强度影响系数。

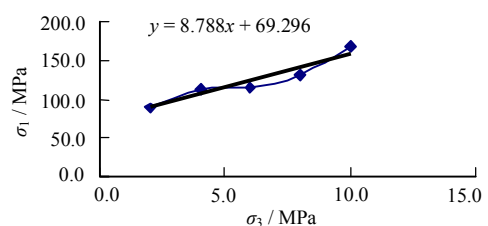


图3 不同围压与对应轴向峰值应力关系图
Fig.3 Axis peak stress under different confining pressures

根据拟合分析,其表达式为

$$\sigma_1 = 69.296 + 8.788\sigma_3 \quad (2)$$

3.2.2 岩石的强度特性分析

$\sigma_3 = 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0$ MPa时,试件的破坏后如图4所示。

由上图,可以明显看出,在围压2~10MPa范围内,灰岩的破坏形式均为剪切破坏,可以用莫尔-库仑强度准则对其分析。莫尔应力圆如图5所示。

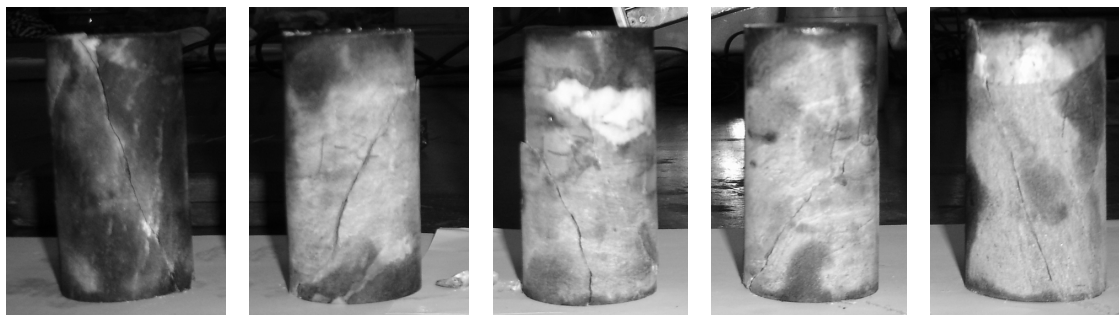


图4 灰岩三轴压缩下的破坏图
Fig.4 Breck picture of limestone in triaxial tests

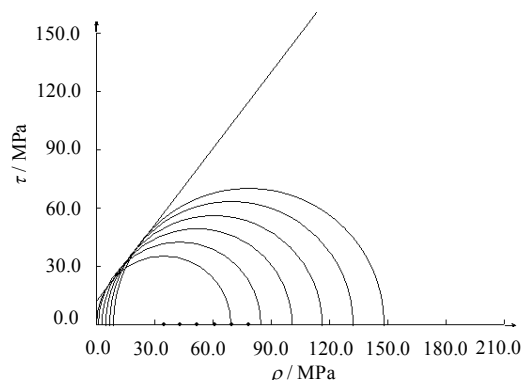


图5 莫尔应力圆及包络线
Fig.5 Mohr stress circle and intrinsic curves

根据最小二乘法原理,采用回归分析得出了强度参数 c , φ 值, $c=11.756$ MPa, $\varphi=52.7^\circ$, $\tan\varphi=1.312$ 。强度准则表达式为

$$\tau = 1.31\sigma + 11.76 \quad (3)$$

4 结 论

(1) 在三轴应力下,灰岩的变形分为裂隙闭合、弹性变形、裂隙扩张和塑性变形4个阶段。灰岩的峰值强度、残余强度随围压的增加而增加,但峰值时的变形值与围压的大小没有明确的关系。

(2) 在2~10 MPa的围压范围内,岩石为脆性剪切破坏。灰岩的峰值应力与侧压之间服从线性关系,弹性模量与围压没有相关性。

(3) 根据回归分析,得到了灰岩强度准则表达式。

参 考 文 献

[1] 孟召平, 彭苏平. 不同侧压下沉积岩石变形与强度特征[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 15—18.

MENG Zhao-ping, PENG Su-ping. Characters of the deformation and strength under different confining pressures on sedimentary rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2000, 25(1): 15—18.

[2] 孟召平, 彭苏平, 张慎河. 不同成岩作用程度砂岩物理力学性质三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 140—143.

MENG Zhao-ping; PENG Su-ping; ZHANG Shen-he. Triaxial test on physical and mechanical properties of sandstone for different diagenesis degree[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(2): 140—143.

[3] 郭中华, 朱珍德, 余湘娟, 等. 灰岩强度特性的三轴压缩试验分析[J]. 河海大学学报, 2002, 30(3): 93—95.

GUO Zhong-hua, ZHU Zhen-de, YU Xiang-juan, et al. Analysis of stress-strain relationships for limestone by triaxial test[J]. **Journal of Hohai University**, 2002, 30(3): 93—95.

[4] 朱建明, 任天贵, 明士祥, 等. 基于三轴实验的软破岩石破坏准则的研究[J]. 中国矿业, 1998, 7(3): 41—44.

ZHU Jian-ming, REN Tian-gui, MING Shi-xiang, et al. A study of criterion for soft-broken rock failure based on the triaxial test [J]. **China Mining Magazine**. 1998, 7(3): 41—44.

[5] 许宝田, 阎长虹, 许宏发. 三轴试验泥岩应力-应变特性分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 863—865.

XU Bao-tian, YAN Chang-hong, XU Hong-fa. Triaxial tests on stress-strain of mud stone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 863—865.

[6] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰, 等. 煤岩强度离散性及三轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1 763—1 766.

YANG Yong-jie, SONG Yang, CHEN Shao-jie, et al. Experimental study of strength discreteness and triaxial compression of coal[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1 763—1 766.